

文章编号:1005-9865(2023)02-0022-09

船舶碰撞中空夹层钢管混凝土导管架平台损伤分析

商文翰¹, 张纪刚¹, 吴书义², 刘菲菲¹, 陈文礼³, 赵 阳⁴

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青建集团股份公司, 山东 青岛 266071; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 青岛国工高新材料有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要:针对船舶与中空夹层钢管混凝土(CFDST)导管架平台碰撞问题,利用ABAQUS/Explicit非线性有限元软件建立中空夹层钢管混凝土导管腿导管架数值模型,对船舶碰撞进行数值模拟,对比分析 1 m/s、2 m/s 和 3 m/s 的 3 种碰撞速度下工况下导管架抗碰撞性能、耗能及损伤。从碰撞力、碰撞区域变形以及导管架能量耗散等方面详细研究中空夹层钢管混凝土导管腿作用下导管架整体的损伤模式和动力响应。结果表明:CFDST 导管架在船舶碰撞荷载作用下主要由 CFDST 导管腿耗能,有效控制了结构整体位移变形,提升了整体刚度,有效发挥平台各构件之间组合耗能,结构抗碰撞能力得到明显提升。

关键词:船舶碰撞;中空夹层钢管混凝土;导管架平台;结构损伤

中图分类号:P751;U661.43 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2023.02.003

Analysis of damage to concrete-filled double skin steel tube jacket platform by ship collision

SHANG Wenhan¹, ZHANG Jigang¹, WU Shuyi², LIU Feifei¹, CHEN Wenli³, ZHAO Yang⁴

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Qingjian Group Co., Ltd., Qingdao 266071, China; 3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Qingdao Guogong High-Tech Materials Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: For the collision problem of ship and concrete-filled double skin steel tube (CFDST) jacket platform, the numerical model of concrete-filled double skin steel tube conduit leg jacket platform is established by using ABAQUS/Explicit nonlinear finite element software, and the numerical simulation of ship collision is carried out to compare and analyze the resistance of the jacket platform under three working conditions of 1 m/s, 2 m/s and 3 m/s collision speeds. The collision performance, energy dissipation and damage are compared and analyzed. The loss pattern and dynamic response of the overall catenary under the action of concrete-filled double skin steel tube catenary legs are studied in detail in terms of collision force, collision area deformation and catenary energy dissipation. The results show that the CFDST jacket platform is mainly dissipated by the CFDST conduit leg under the action of ship collision load, which effectively controls the overall structural displacement and deformation, improves the overall stiffness, and effectively exerts the combined energy dissipation among the platform members, and the structural collision resistance is significantly improved.

Keywords: ship collision; concrete-filled double skin steel tube; jacket platform; structural damage

收稿日期:2022-05-25

基金项目: NSFC-山东联合基金资助项目(U2106222);国家自然科学基金资助项目(52108282);山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE053)

作者简介: 商文翰(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事海洋平台动力响应研究。E-mail:2361318127@qq.com

通信作者: 张纪刚。E-mail: jigangzhang@126.com

根据Tebbett^[1]的报告,船舶碰撞是危害海上导管架平台的主要因素。这种潜在后果可能导致结构从轻微的结构损害到严重的结构倒塌。DNV规范^[2]采用相对较低的碰撞能量(11~14 MJ)评估船舶与海上平台碰撞。根据文献^[3]统计排水量在2 000至5 000 t之间的典型船舶具有更高的碰撞速度,引起的碰撞能量达到55~60 MJ。普通钢质导管架结构在不增加额外用钢量的情况下已无法承受船舶引起的高能碰撞。中空夹层钢管混凝土作为一种新型组合结构,相比钢质空钢管拥有更高的轴向承载力和抗弯刚度^[4],逐渐在海洋风机塔筒和导管架导管腿等海洋工程中得到应用。因此,分析船舶碰撞引起中空夹层钢管混凝土导管架平台结构损伤,具有重要的工程应用价值和现实意义。

对中空夹层钢管混凝土构件抗碰撞性能国内外学者做了大量研究。刘明玉^[5]、王丙斌^[6]、Zhu等^[7]针对中空夹层钢管混凝土抗冲击性能,开展了系列的试验和数值模拟,揭示了空心率对中空夹层钢管混凝土冲击性能的影响机理。Wang等^[8]和Aghdamy等^[9]研究了边界条件、轴向荷载对中空夹层钢管混凝土抗冲击性能的影响。对船舶与海洋平台碰撞问题国内外研究人员也已经做了很多研究。针对船舶与海上结构物碰撞问题,Petersen和Pedersen^[10]利用单元响应函数计算并给出了使用附加质量的近似方法。Amdahl和Eberg^[11]、Amdahl和Johansen^[12]针对供应船和导管架海上结构之间的相撞问题,研究船头和船尾结构的能量耗散以及导管架管状支撑的变形行为。Travanca和Hao^[13]提出一种用于结构响应分析的简化等效系统的开发程序,并使用有限元模拟对其可靠性进行了测试。Travanca和Hao^[14]针对不同的导管架支腿厚度,分析导管架与撞击船舶之间的内部能量分布。宋剑^[15]采用非线性弹簧单元考虑水动力效应、桩—土—平台的相互作用及受损构件的损伤,反演分析计算出船舶对平台结构碰撞的最大撞击力。杨亮^[16]分析了船舶质量和船舶速度等参数变量对导管架平台损伤的影响。

上述都仅仅是对中空夹层钢管混凝土构件的抗冲击性能或碰撞荷载下普通钢管导管架平台的结构损伤进行研究,缺少对船舶撞击中空夹层钢管混凝土导管架进行的比较研究。文献^[5]的研究表明,中空夹层钢管混凝土(CFDST)中钢管将混凝土周围包裹产生有效约束防止混凝土破碎,混凝土又可以避免和延缓钢管的局部屈曲变形,两种材料之间相互作用使得构件性能得到有效发挥,相比空钢管具有更好的抗碰撞性能。因此中空夹层钢管混凝土应用在导管架平台中可以大大提高导管架平台的抗碰撞损伤能力。文中针对中空夹层钢管混凝土导管腿导管架平台与供应船的碰撞问题展开研究。研究波浪引起常见船速1 m/s、2 m/s以及小概率3 m/s^[17]的3种情况下对导管架平台结构损伤,并通过对比数值仿真模拟结果分析中空夹层钢管混凝土导管腿对平台结构损伤的影响,为平台损伤评估提供有价值的参考。

1 碰撞问题计算原理及验证

1.1 计算原理

碰撞问题是瞬态物理过程,属于结构动力学问题,即荷载和位移均为时间的函数。在总体坐标系中,碰撞动力平衡方程为:

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{d}(t)$ 为位移矢量; $\mathbf{v}(t)$ 为速度矢量; $\mathbf{a}(t)$ 为加速度矢量; $\mathbf{F}(t)$ 为外荷载矢量; t 为时间。

通过显式中心差分法在时间步上积分即可求出加速度矢量、速度矢量和位移矢量:

$$\mathbf{a}(t_n) = \mathbf{M}^{-1} \left[\mathbf{F}(t_n) - \mathbf{K}\mathbf{d}(t_n) - \mathbf{C}\mathbf{v}\left(t_{n-\frac{1}{2}}\right) \right] \quad (2)$$

$$\mathbf{v}\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right) = \mathbf{v}\left(t_{n-\frac{1}{2}}\right) + \frac{\mathbf{a}(t_n)(\Delta t_{n-1} + \Delta t_n)}{2} \quad (3)$$

$$\mathbf{d}(t_{n+1}) = \mathbf{d}(t_n) + \mathbf{v}\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right)\Delta t_n \quad (4)$$

式中: $\mathbf{a}(t_n)$ 、 $\mathbf{v}\left(t_{n+\frac{1}{2}}\right)$ 、 $\mathbf{d}(t_{n+1})$ 分别为 t_n 时刻加速度、 $t_{n+\frac{1}{2}}$ 时刻速度和 t_{n+1} 时刻位移。

由位移积分推导式(4)可以看出,当前时刻的位移仅与前一时刻的位移和加速度有关,表明动力显式求解过程中不存在多次迭代的过程,只需要将运动方程中质量矩阵对角化即可求解,使问题大大简化。

1.2 数值计算方法验证

目前没有详细的船舶碰撞导管架平台的试验数据,所以这里选取文献[7]侧向冲击碰撞下中空夹层钢管混凝土构件的试验数据对有限元数值方法准确性进行验证。图1为文献[7]中试验加载示意和构件截面形式,其中试件两端由夹具及端板控制,边界条件为两端固定,试件有效长度 $L=1\,200\text{ mm}$,构件侧向中心位置由质量 206.65 kg ,冲击接触截面为 $30\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 矩形落锤施加冲击荷载。

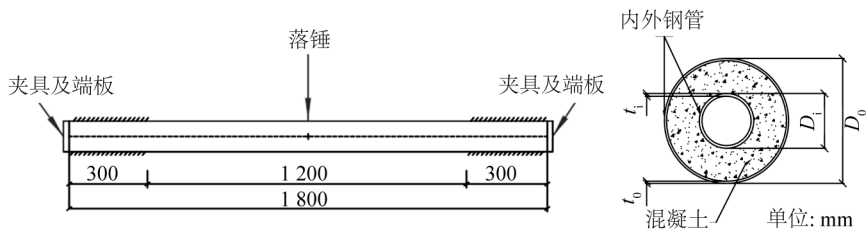


图1 文献[7]试验加载示意和构件截面示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test loading and column section of the member in the literature [7]

表1为文献[7]中典型试件的基本参数以及试验结果,文献混凝土强度等级为C40,内外钢管为Q345。 D_i 、 D_0 、 t_i 、 t_0 分别为试件内外钢管直径和钢管壁厚。

表1 文献[7]试件参数及材料参数

Tab. 1 Specimen parameters and material parameters in the literature [7]

编号	D_0/mm	t_0/mm	D_i/mm	t_i/mm	L/mm	碰撞速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	碰撞 能量/kJ	碰撞力 峰值/kN	碰撞力 平台值/kN
H-DS1	114	2	50	2.5	1 200	9.39	9.11	304.70	145.30

有限元验证模型中构件边界条件设为两端固定;构件单元属性内外钢管采用四边形结构壳单元(S4R),混凝土采用八节点六面体结构实体单元(C3D8R),落锤采用刚性四边形壳单元(R3D4),有限元验证模型网格尺寸为 10 mm ;落锤仅保留碰撞速度方向自由度;锤头碰撞面及钢管与混凝土接触面接触方式选择显式通用接触,法向“硬”接触,切向摩擦系数分别为0和0.6。有限元验证数值模型见图2。

图3为有限元数值模拟与文献[7]试验所得碰撞力时程曲线对比。从图3中可以直观看出,数值模拟计算得到的碰撞力时程曲线与试验获得的时程曲线基本吻合。文中有限元计算的碰撞力峰值为 284.7 kN 、平台值为 150 kN ,与文献[7]中试验值 304.7 kN 、 145.3 kN 之间的误差为 6.3% 、 -3.2% 。有限元计算结果和试验结果误差在合理范围之内,验证有限元计算方法研究此类碰撞问题是可行的。

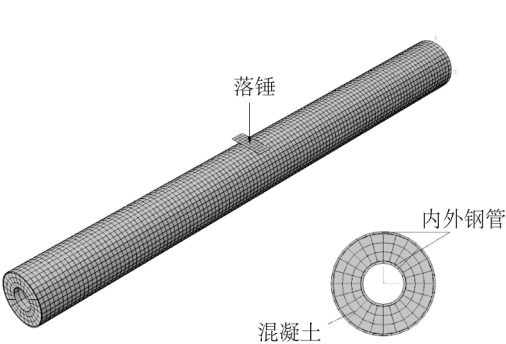


图2 有限元验证数值模型

Fig. 2 Finite element model for verification

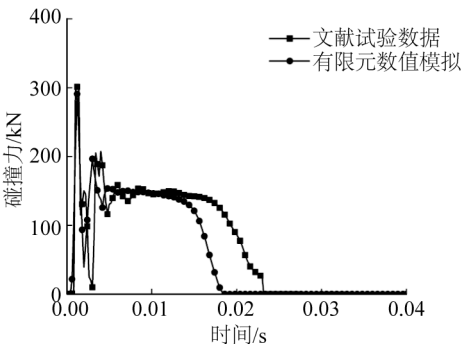


图3 碰撞力时程曲线对比

Fig. 3 Comparison of time-history curves of impact force

2 船舶撞击导管架平台有限元模型

2.1 平台模型

图4为有限元平台模型,主要包括导管架基础结构、碰撞船以及中空夹层钢管混凝土导管腿截面图例,导管架模型为渤海JZ20-2北高点井口平台(下部4腿桩固定式导管架平台),其中平台导管腿导管架结构高23.1 m,上层高度8.5 m,下层高度15.3 m;工作水深15.5 m;上部结构质量622.72 t。导管架结构分布布置水平支撑和斜撑。平台各构件之间均采用ABAQUS刚接处理。

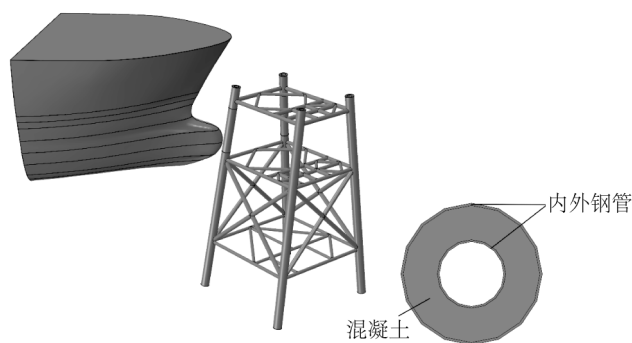


图4 导管架平台有限元模型

Fig. 4 Jacket platform finite element model

导管架平台导管腿采用中空夹层钢管混凝土(CFDST)组合构件,导管腿内钢管及其他非撞击区域采用四边形单元形状(S4R)壳模型,夹层混凝土采用八节点六面体单元形状(C3D8R)实体模型划分网格^[18];模型全局网格尺寸为0.2 m,受撞区域的内钢管和中间夹层混凝土网格细化分别为10 mm和200 mm。平台中空夹层钢管混凝土导管腿尺寸见表2。

表2 中空夹层钢管混凝土导管腿尺寸

Tab. 2 Concrete-filled double skin steel tube conduit leg sizes

单位:mm

参数	数值
导管腿外钢管直径	1 204
导管腿外钢管厚度	20
导管腿内钢管直径	700
导管腿内钢管厚度	16
导管腿长度	30 440

2.2 船舶模型

根据文献[19]报道与海上平台发生碰撞事故的船舶大部分为排水量超过5 000 t的供应船,因此这里选用船舶质量为5 000 t的船只。

船舶采用四节点刚性四边形形状(R3D4)壳单元划分网格,船舶质量以刚性体参考点施加点质量实现。为避免碰撞畸形、引起穿模和沙漏能增大对模型精度的影响,网格细化与平台撞击区域大小相同。

2.3 材料模型

导管架钢管及导管腿内外钢管均采用五段式弹塑性本构模型^[4],船舶碰撞时钢材屈服强度随着应变率提升而提高,因此采用Cowper-Symonds模型如式(5)考虑钢材在受到碰撞时应变率对钢管屈服强度变化的影响。其中 f_y^d 为钢材考虑应变率后屈服强度, f_y 为钢管材料静力状态屈服强度。应变率参数 D 和 p 分别取6 844和3.91^[4]。

$$f_y^d/f_y = 1 + (\bar{\epsilon}/D)^{1/p} \quad (5)$$

导管腿中间夹层混凝土采用ABAQUS内置混凝土塑性损伤模型(CDP),混凝土单轴受压、受拉应力应变曲线采用文献[4]中的模型并通过CEB规范^[20]进行修正。因为船舶相对导管架平台刚度较大,碰撞引起的能量消耗和弹塑性变形均以导管架平台为主,且文中主要研究导管架平台在碰撞荷载下结构的损伤,所以为提高数值模拟效率,将船舶简化为刚体。导管架材料参数见表3。

表 3 模型材料参数
Tab. 3 Model material parameters

材料	强度等级	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	失效塑性应变	失效拉应变	失效压应变
混凝土	C40	2 500	26.4	0.2	40	—	—	—	0.009	0.08
钢管	Q345	7 850	210	0.3	—	345	510	0.21 ^[21]	—	—

3 碰撞场景的确定

3.1 碰撞区域

对于供应船与平台碰撞而言,碰撞多为船头或船身侧向与平台导管腿的碰撞,也有可能发生在斜撑或弦杆。Woisin^[22]研究表明船头正撞引起的损伤最为严重,因此文中选择船头正撞平台导管腿作为研究工况。

3.2 附加质量

船舶碰撞事故中船舶参与碰撞质量包括船舶自身质量和由船舶碰撞过程中水动力引起的附加质量。对于水动力的附加质量,文献[23]进行了一系列水动力试验和分析,表明船舶向前运动时,水动力附加质量为船体质量的10%,侧向运动为船体质量的40%。因此,当船头碰撞平台时船舶碰撞的实际质量为5 500 t。

3.3 碰撞速度

引起船舶与导管架平台碰撞的典型原因有两种,一种是低能量水平碰撞,此时船舶没有失去动力,DNV规范^[2]推荐船舶速度值为0.5 m/s;一种是船舶停靠平台作业时由于失去动力控制,船舶在波浪的推动下与平台碰撞(能量较高),船舶速度与波高关系^[24]:

$$v = \frac{1}{2} H_s$$

(6)

其中, v 为船舶速度,m/s; H_s 为有效波高,m。文献[17]给出渤海年平均波高数据如表4所示。渤海海域波高一般为1~4 m,小概率波高达到4~6 m^[17]。由式(6)计算可得,一般船舶速度在1~2 m/s之间,小概率船舶速度达到3 m/s,因此这里采用1、2和3 m/s的3种船舶速度对比分析导管架损伤。

表 4 渤海海域年平均波高频率表
Tab. 4 Annual average wave height frequency in the Bohai Sea

有效波高/m	发生频率/%	累计频率/%
0.0~1.0	63.90	63.90
1.0~2.0	28.09	91.99
2.0~3.0	6.01	98.00
3.0~4.0	1.57	99.57
4.0~5.0	0.38	99.95
5.0~6.0	0.05	100.00

3.4 接触与边界条件

有限元模型中接触面包括碰撞接触面(船头与受撞导管腿接触)以及摩擦接触面(内外钢管分别与夹层混凝土接触),三对接触面均采用ABAQUS显式通用接触(General contact)算法,接触面法向设置“硬”接触,并允许接触后接触面可分离,主从接触面不允许相互侵入;接触面切向设置为罚接触,碰撞接触面和摩擦接触面摩擦系数分别取0.05^[25]和0.6^[4]。

导管架属于海上结构,导管腿插入地下土体,为考虑边界对有限元数值模拟的影响,采用我国船舶检验局批准的《海上固定平台入级与建造规范》取6倍桩径作为等效桩长,桩底固接简化非线性桩土效应;为简化有限元模型加快计算速率,导管架基础上部结构以集中力形式加载至4个导管腿顶部^[16];碰撞船模型简化为船头模型。

4 船舶碰撞导管架的模拟计算与分析

4.1 碰撞位移

从图5、图6可以看出:碰撞区域位移到达最大时,CFDST导管架受撞导管腿区域应力已经超过钢材的屈服应力,钢管已进入塑性变形阶段。对比3种工况应力云图,可以看出CFDST导管架平台在碰撞荷载作用下主要发生受撞导管腿的整体弯曲、局部凹陷以及平台结构的弹塑性变形。1 m/s和2 m/s速度时,平台主要变形为受撞导管腿的局部凹陷及碰撞区域相邻构件的微小弯曲,平台整体弹塑性变形很小。受撞区域位移最大值分别为0.27 m和0.71 m;3 m/s速度时,由于碰撞能量的增大,受撞导管腿受撞区域发生明显局部变形,碰撞区域相邻构件发生弯曲变形,交叉支撑发生微小断裂破坏。平台变形不再以受撞导管腿变形为主,而是受撞导管腿与平台结构整体组合弹塑性变形耗能,受撞区域位移达到1.33 m。

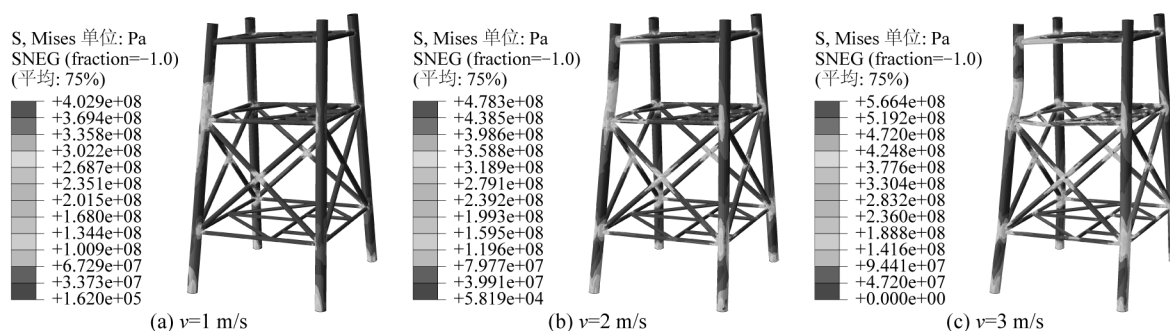


图5 碰撞位移最大时平台应力云图

Fig. 5 The stress cloud diagram of the platform when the collision displacement is the largest

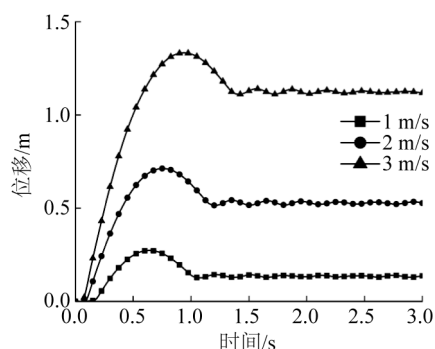


图6 3种船速下平台受撞区域位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time-history curve of the impacted area of the platform under the 3 types of ship speed

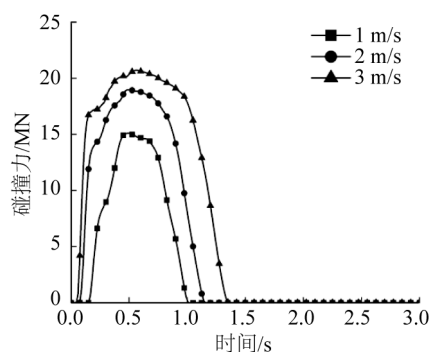


图7 3种船速下碰撞力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of collision force at the 3 types of ship speed

4.2 碰撞力

图7为3种工况下碰撞力时程曲线,从图7中可以看出碰撞力时程曲线的整体变化趋势为碰撞之初碰撞力迅速增大直至到达碰撞力峰值,并在一段的时间缓慢降低,之后短时间内快速降低为零。

随着船舶速度的增大,碰撞力时程曲线峰值提升且碰撞持续时间延长:船速 1、2 和 3 m/s 时碰撞力峰值和碰撞持续时间分别为 15.10 MN/0.92 s、18.96 MN/1.14 s 和 20.71 MN/1.37 s,且碰撞力时程曲线的变化趋势是类似的。2 m/s 时碰撞力相比 1 m/s 时提升了 25.56%,3 m/s 时碰撞力相比 2 m/s 提升了 9.22%,后者增加幅度减小的原因为:1 m/s 和 2 m/s 时碰撞力主要有受撞导管腿承受,3 m/s 时受撞区域除导管腿外,相邻构件发生弯曲,交叉支撑发生微小断裂破坏,导管架刚度降低。

4.3 能量转化

船舶撞击 CFDST 导管架平台系统的能量变化主要为动能和导管架内能(导管架变形能)的相互转化以及小部分的摩擦耗能和沙漏能。因此文中在控制沙漏能小于总能量的 10%,保证数值模拟计算精度前提下,只对船的动能和导管架平台内能进行分析。图 8 为 3 种工况下船舶撞击 CFDST 导管架平台能量转化时程曲线,图 9 为 CFDST 导管架在不同撞击速度系统总体能量分布。图 10 为 CFDST 导管架在不同撞击速度时 CFDST 导管腿各材料吸能情况。

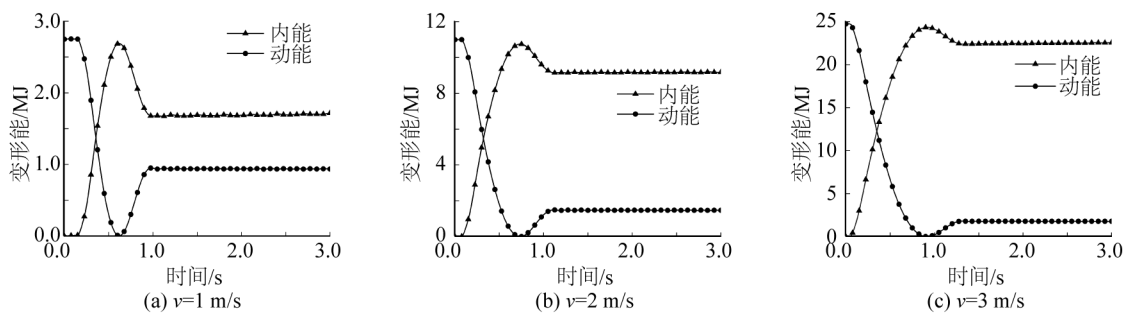


图 8 船舶撞击 CFDST 导管架平台能量转化时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of energy conversion of ship hitting CFDST jacket platform

由图 8 可以看出,整个系统的能量来源为船舶撞击的碰撞能,船舶与 CFDST 导管架相撞时由于平台的约束,碰撞船的动能主要转化为导管架平台的内能和部分动能,一小部分损失在摩擦等其他能量之中。碰撞初期,船舶的碰撞能转化为导管架的内能,然后内能又转化为船舶的动能,所以系统内能时程曲线先增加达到峰值后又减小,系统动能时程曲线先减小后增加,最后在一定的幅值波动。

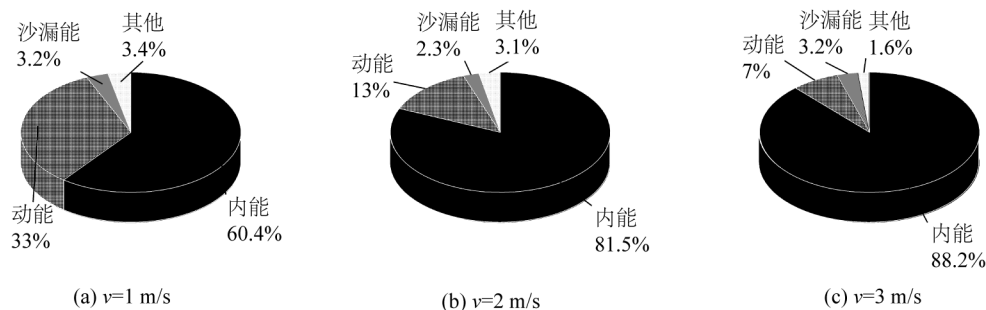


图 9 CFDST 导管架在不同撞击速度系统总体能量分布

Fig. 9 The overall energy distribution of the CFDST jacket at different impact speeds

从图 9 可以看出平台在不同速度下内能动能以及沙漏能和其他能量的占比变化,在保证沙漏能占比较低的情况下,内能和动能的占比趋势随着速度的增大为内能逐步占主导趋势(60.4% 上升至 88.2%),动能占比逐渐降低(33% 降低至 7%);沙漏能及其他能量占比变化细微。

图 10 为 3 种工况下受撞导管腿和平台其他构件占平台总内能的比值变化情况,可以看出:CFDST 导管架平台在碰撞荷载作用下的能量耗散主要为受撞 CFDST 导管腿(1 m/s 时占比 66.3%,2 m/s 时占比 56.2%,3 m/s 时占比 48.1%)。CFDST 导管腿组成的 3 种材料中外钢管材料主要负责大部分的变形能量吸收,其次为中间夹层的混凝土和内部钢管。对比 1 m/s 和 2 m/s 碰撞下 3 种材料的耗能情况,外钢管和内部钢管耗能占比随着速度增加而增大(分别为 29.4% 提升至 30.5%;8.1% 提升至 8.6%),中间夹层混凝土耗能降低,由 28.8%

降低为17.2%),3种材料随着碰撞速度的增大耗能占比逐渐减小。碰撞速度3 m/s时,外钢管耗能开始发生略微降低,中间夹层混凝土和内钢管耗能贡献明显不足,仅仅占总内能的20.3%,大部分内能由平台其他构件变形消耗。这是由于CFDST平台刚度提升且质量增大,惯性力增大,平台开始出现侧向位移且CFDST受撞导管腿的变形无法满足船舶动能消化,平台其他结构也参与到能量耗散之中,并替代CFDST导管腿占主导地位。

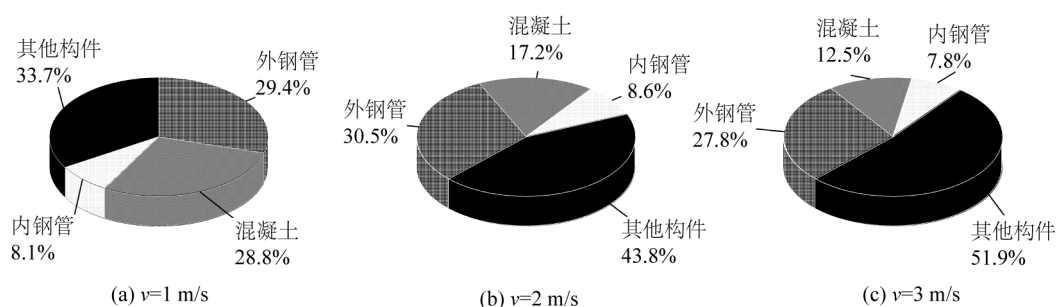


图10 CFDST导管架在不同撞击速度时CFDST导管腿各材料吸能情况

Fig. 10 The energy absorption of each material of the CFDST conduit legs at different impact speeds of the CFDST jacket

5 结 语

通过有限元模拟软件ABAQUS对船舶与CFDST导管架平台在不同工况下碰撞进行了数值模拟研究,并阐述了CFDST导管架在碰撞荷载作用下的结构损伤,通过比较得出的主要结论如下:

1)由于CFDST导管腿侧向抗弯能力的贡献,1 m/s和2 m/s碰撞速度下导管架主要发生受撞导管腿的微小局部凹陷和整体弯曲,有效控制了受撞导管腿变形;3 m/s碰撞速度下导管架受撞区域支撑构件发生弯曲和微小断裂破坏。从防撞角度考虑,应对受撞区域支撑采用加强措施。

2)尽管碰撞速度不同,但碰撞力时程曲线趋势相同,只是峰值和碰撞持续时间不同,表明碰撞力时程曲线走势是导管架自身的固有属性与碰撞速度无关,且碰撞速度增大,碰撞力也会随之增大。

3)船舶碰撞动能绝大部分被导管架结构吸收,1 m/s和2 m/s碰撞速度下,碰撞能量主要由受撞CFDST导管腿消耗;3 m/s碰撞速度下,受撞导管腿无法承受大部分碰撞能量,能量转而由平台整体弹塑性变形消耗为主。

参考文献:

- [1] TEBBETT I E. The last five years' experience in steel platform repairs [C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. OnePetro, 1987: OTC-5385-MS.
- [2] Det Norske Veritas. Design against accidental loads: Recommended practice DNV-RP-C204[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [3] KVITRUD A. Collisions between platforms and ships in Norway in the period 2001-2010 [C]//Proceedings of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2011, 44342: 637-641.
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structures theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 刘明玉. 圆套圆通中空夹层钢管混凝土桥墩的耐撞性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014. (LIU Mingyu. Study on dynamic behavior of CFDST pier under lateral impact [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [6] 王丙斌. 空心率对不锈钢—钢管中空夹层混凝土组合柱耐撞性能影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. (WANG Bingbin. Effect of hollow ratio on the crashworthiness of stainless steel-concrete-steel double-skin tubular columns [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [7] ZHU X, ZHAO P, TIAN Y, et al. Experimental study of RC columns and composite columns under low-velocity impact [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 160: 107374.

- [8] WANG R, HAN L H, ZHAO X L, et al. Experimental behavior of concrete filled double steel tubular (CFDST) members under low velocity drop weight impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 97: 279-295.
- [9] AGHDAMY S, THAMBIRATNAM D P, DHANASEKAR M. Experimental investigation on lateral impact response of concrete-filled double-skin tube columns using horizontal-impact-testing system[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(7): 1133-1153.
- [10] PETERSEN M J, PEDERSEN P T. Collisions between ships and offshore platforms[C]//*Proceedings of Offshore Technology Conference*. OnePetro, 1981: OTC-4134-MS.
- [11] AMDAHL J, EBERG E. Ship collision with offshore structures[C]//*Proceedings of Structural Dynamics Eurodyn*. 1993: 495-504.
- [12] AMDAHL J, JOHANSEN A. High-energy ship collision with jacket legs[C]//*Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2001: 01-IL-430.
- [13] TRAVANCA J, HAO H. Dynamics of steel offshore platforms under ship impact[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 47: 352-372.
- [14] TRAVANCA J, HAO H. Energy dissipation in high-energy ship-offshore jacket platform collisions[J]. *Marine Structures*, 2015, 40: 1-37.
- [15] 宋剑. 海洋平台结构在偶然灾害作用下的可靠性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (SONG Jian. Study on reliability of offshore platform structures subjected to accidental disaster[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))
- [16] 杨亮. 海洋导管架平台的耐撞特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (YANG Liang. Research on characteristics of jacket platform against collision[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [17] 温生亮, 尹光荣. 渤海海域导管架平台船舶撞击性能分析[J]. *石油和化工设备*, 2020, 23(12): 30-34. (WEN Shengliang, YIN Guangrong. Analysis on impact of jacket platform in bohai sea[J]. *Petro & Chemical Equipment*, 2020, 23(12): 30-34. (in Chinese))
- [18] 刘洋, 桂洪斌. 船舶碰撞引起的自升式海洋平台结构损伤分析[J]. *上海海事大学学报*, 2018, 39(2): 91-96. (LIU Yang, GUI Hongbin. Analysis of jack-up offshore platform structural damage caused by ship collision[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2018, 39(2): 91-96. (in Chinese))
- [19] KENNY J P. Protection of offshore installations against impact. Background report[R]. London: Department of Energy, 1988.
- [20] EURO C. CEB-FIP model code 1990: Design code[S]. Thomas Telford Publishing, 1993.
- [21] 乐丛欢. 海洋平台基于结构碰撞损伤的风险评估[D]. 天津: 天津大学, 2010. (LE Conghuan. Risk assessment of offshore platform and peripheral installation due to collision damage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [22] WOISIN G. The collision experiments of GKSS[R]. Gesellschaft fuer Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH, 1977.
- [23] 元良誠三, 藤野正隆, 杉浦正憲, 等. 衝突時の等価附加質量について[J]. *日本造船学会論文集*, 1969(126): 141-152. (SEIZO M, MASATAKA F, MASANORI S, et al. Equivalent added mass of ship in the collision[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1969(126): 141-152. (in Japanese))
- [24] POSEY C J. Protection of offshore structures against underscour[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1971, 97(7): 1011-1016.
- [25] DE OLIVEIRA J P T. Dynamic analysis of ship collisions with offshore platforms[D]. Perth: University of Western Australia, 2014.