

极端风浪下海上机场 VLFS 连接器载荷响应分析*

王丽君^{1,3}, 柯世堂^{1,2,3}, 李文杰^{1,2}, 陈静^{1,2}, 任贺贺^{1,2}

(1. 南京航空航天大学土木与机场工程系 南京, 211106)

(2. 江苏省机场基础设施安全工程研究中心 南京, 211106)

(3. 南京航空航天大学金城学院 南京, 211106)

摘要 为了研究浪向角、入射波频率和连接器刚度耦合变化对连接器载荷的影响,以刚模块柔性连接器(rigid module and flexible connector,简称RMFC)模型计算理论为基础,建立8模块海上机场超大浮体水动力模型进行数值模拟水槽实验,分别对连接器在规则波和不规则波下的载荷响应进行频域计算。选取6个连接器刚度条件,研究不同连接器刚度下连接器的载荷响应,在不同海况和连接器刚度条件下考虑 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 及 90° 浪向角的作用,连接器载荷响应幅值主要从纵向、横向及垂向3个方向进行比对。结果表明,同一方向上的载荷在浪向角 45° 和 60° 较为敏感,极端风浪耦合环境下,垂向载荷明显比其他两个方向载荷值大,连接器载荷值随刚度值增大而增大,在 $K_5 \sim K_6$ 之间呈大幅递增趋势。

关键词 极端风浪;浪向角;耦合;海上机场;超大浮体;连接器;载荷响应

中图分类号 TV139.2;U66;P75

引言

随着海洋资源的开发利用日益增强,我国对超大型浮式结构物(very large floating structure,简称VLFS)进行了一系列概念论证^[1],其中海上漂浮机场的研究和开发引起了众多学者的关注。相关研究^[2-6]主要是针对其动力特性的预报方法,目前亟需解决的问题^[7]主要包括:①水弹性响应;②非均匀海洋环境的激励;③连接器上的载荷;④系泊装置的动力响应计算;⑤动力特性的模型试验技术。

超大型海洋浮式结构物尺寸巨大,是一个模块化的结构。模块与模块之间的连接是一个工程问题,而给定连接方式后如何计算连接器上的动态响应是一个理论问题^[8]。连接器方面的研究涉及连接器的形式与布置、构件承受的载荷计算和刚度特性以及对系统动力响应的影响等^[9-11]。卢超^[12]提出了平行铰接式弹性连接器模型、交叉铰接式弹性连接器模型和复合型弹性连接器模型等3种连接器结构模型。施奇佳^[13]对超大型海上浮动平台连接模式及动力学特性展开研究,提出了一款可以有效缓解连接区域应力水平的柔性连接器模型。徐道临等^[14]从网络动力学角度构建了具有链式拓扑结构特征的海

上浮机场非线性力学模型,并数值仿真分析了浮动机场的非线性响应和连接器载荷。张波等^[15]以7模块超大浮体为研究对象,利用刚模块柔性连接件模型,基于势流理论对7个构成模块单元进行了3D水动力性能分析。

海上漂浮机场所处的环境比较复杂,其在随机波浪的激励下运行。因此,研究非规则波浪激励下的系统响应以及连接器载荷响应十分必要。笔者利用刚模块柔性连接器计算模型,研究了浪向角、入射波和连接器刚度耦合变化对连接器载荷的影响,揭示出随机风浪荷载下连接器对海上机场超大浮体的动力响应的规律,为海上机场超大浮体的柔性连接器设计和优化提供参考。

1 RMFC模型计算理论

根据半潜式超大浮体系统的特点,笔者采用RMFC模型进行计算,将半潜式模块看作刚体,将连接器简化为线性弹簧^[16]。浮式机场简化模型如图1所示。其中: $M_1 \sim M_8$ 为刚性浮体模块; $C_1 \sim C_{14}$ 为线弹性连接器。

引入系统自由度矢量 $u = \{u^1, u^2, \dots, u^8\}^T$,用于

* 国家自然科学基金资助项目(52078251);江苏省自然科学基金资助项目(BK20211518, BK20210309);南京航空航天大学金城学院2022年度校级科研基金资助项目(XJ202209)

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2024-03-07

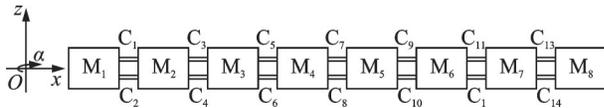


图 1 浮式机场简化模型

Fig.1 Simplified model of floating airport

描述各模块的 6 自由度运动,即

$$u^k = \{x^k, y^k, z^k, \phi^k, \theta^k, \varphi^k\} \quad (1)$$

其中: u^k 的 6 个分量分别表示模块 M_k 的 6 自由度的运动。

连接器 C_i 与模块 M_k 及 M_{k+1} 相连, C_i 与 M_k 模块连接点的坐标值为 (x_i^k, y_i^k, z_i^k) ,该连接点运动可由 M_k 模块的运动来表示,即

$$\vec{u}_i^k = N_k u^k \quad (2)$$

其中: N_k 为 C_i 与 M_k 模块的连接点的位移函数矩阵, $i=1,2,\dots,14;k=1,2,\dots,8$ 。

M_k 和 M_{k+1} 这两个相邻模块在连接点处的位移差可表示为

$$\Delta u^{k,k+1} = N_{k+1} u^{k+1} - N_k u^k \quad (3)$$

相邻模块之间相对运动引起的连接器上的作用力可表示为

$$F = K \Delta u^{k,k+1} \quad (4)$$

其中: K 为连接器刚度值。

2 水动力模型

水槽实验浮体采用多模块半潜式浮体平台,单浮体模块主要参数如表 1 所示,半潜式浮体水动力计算模型如图 2 所示。半潜式模块单元左右对称,网格采用表面重构和多面体网格进行划分。水动力网格单元划分如图 3 所示。

表 1 单浮体模块主要参数

参数	数值
单浮体模块长度/m	300
单浮体模块宽度/m	100
单浮体模块高度/m	27
单浮体模块吃水/m	14
立柱高度/m	16
立柱直径/m	18
排水量/t	852 136
横向惯性矩/(kg·m ⁻²)	2.37 × 10 ¹²
纵向惯性矩/(kg·m ⁻²)	1.62 × 10 ¹³
垂向惯性矩/(kg·m ⁻²)	1.81 × 10 ¹³
浮体密度/(kg·m ⁻³)	327.3
弹性模量/Pa	2.1 × 10 ¹¹
泊松系数	0.3



图 2 半潜式浮体水动力计算模型

Fig.2 Semi-submersible floating body hydrodynamic calculation model



图 3 水动力网格单元划分

Fig.3 Hydrodynamic grid cell division

世界气象组织根据波浪的波高情况对海洋海况进行了分级。表 2 为世界气象组织海况等级表,共分为 10 级。目前,当波况达到或超过 7 级时,海上浮动机场连接器的材料结构已无法承受波浪激励所产生的连接件载荷作用。在北太平洋,开敞海面 5~9 级海况波浪统计参数如表 3 所示。

表 2 世界气象组织海况等级表

海况等级	波高范围/m	海况特征
0	0	无浪
1	0~0.1	微浪
2	0.1~0.5	小浪
3	0.5~1.25	轻浪
4	1.25~2.5	中浪
5	2.5~4	大浪
6	4~6	巨浪
7	6~9	狂浪
8	9~14	狂涛
9	>14	怒涛

表 3 开敞海面 5~9 级海况波浪统计参数

海况等级	有义波高/m	谱峰周期/s	波频范围/Hz
5	3.25	9.7	0.074~0.263
6	5.00	12.4	0.058~0.208
7	7.50	13.8	0.060~0.200
8	11.50	16.4	0.050~0.170
9	15.25	20.0	0.041~0.143

与“海况恶劣”这一程度相对应的海况等级至少应在 6 级以上,因此笔者将 7 级海况作为恶劣海况。其中,风载荷采用 NPD 风谱,风速 $v_a=40$ m/s,不规则波所采用的波浪谱为 Bretshneider 谱。研究海上机场超大浮体柔性连接器在恶劣海况的不规则波浪激励下 5 个波浪入射方向(0°,30°,45°,60°,90°)的动约束力。

根据文献[17]统计的各海区风浪流长期分布参数,选择40号海区为研究区域,选取典型的定常额定风速参考海况作为规则波海况,其中:风速 $v=11.4\text{ m/s}$,波高 $H=3\text{ m}$,波浪周期 $T=10\text{ s}$,有5个波浪入射方向($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)。

因工况较多,以2个不规则波入射方向($45^\circ, 60^\circ$)和2个规则波入射方向($45^\circ, 60^\circ$)为例,给出200s时不同工况下波浪面位移云图,如图4所示。图5为规则波下浪向角为 0° 时前90s的波浪时程曲线。

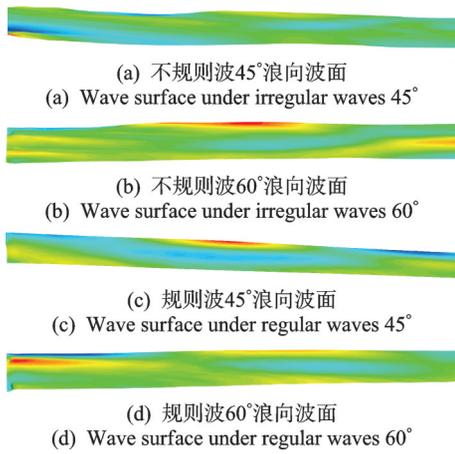


图4 不同工况下波浪面位移云图

Fig.4 Wave surface displacement cloud diagram under different working conditions

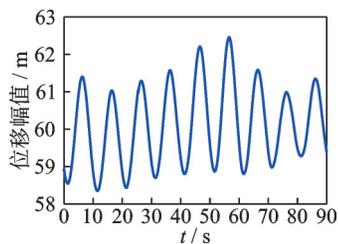


图5 波浪时程曲线

Fig.5 Wave time-course curves

柔性连接器允许模块间相对的横摇、纵摇和首摇运动,限制模块相对的纵荡、横荡和垂荡运动。为了有效评估波浪力激励下海上机场超大浮体柔性连接器的动约束力,将其简化为沿3个方向的弹簧模型,其中: x 轴对应纵向; y 轴对应横向; z 轴对应垂向。连接器运动简化模型如图6所示。

动约束力可根据Hooke定律计算得到,其表达

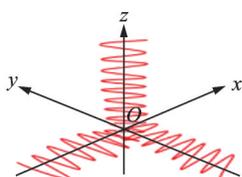


图6 连接器运动简化模型

Fig.6 Simplified model of connector motion

式为

$$\begin{cases} F_x(t) = k_x \Delta x(t) \\ F_y(t) = k_y \Delta y(t) \\ F_z(t) = k_z \Delta z(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中: k_x, k_y, k_z 分别为连接器 x, y, z 这三个方向的刚度; $\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)$ 分别为连接器的相对位移,即相邻两模块在外荷载激励下发生的运动位移差。

通过数值模拟,得到各模块6自由度方向随时间变化的运动响应,将时域结果通过快速傅里叶变换转化为频域结果,进行频域分析。水动力模型运动响应曲线如图7所示。可以看出,模型的运动响应主要发生在中低频区域,随着频率的增大,响应逐渐减小,最终趋于0。

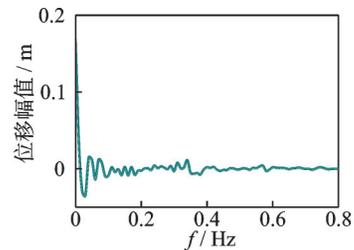


图7 水动力模型运动响应曲线

Fig.7 Motion response curve of hydrodynamic model

连接器的刚度是影响其模块动力响应及连接器约束荷载的关键因素^[18]。因此,笔者选取表4所示的6个不同连接器刚度值进行计算,每个刚度条件刚度值在 x, y, z 方向大小相同。

表4 连接器刚度值

Tab.4 Connector stiffness table		N/m				
刚度方向	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
x	1×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9	1×10^{10}	1×10^{11}
y	1×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9	1×10^{10}	1×10^{11}
z	1×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9	1×10^{10}	1×10^{11}

为了验证计算结果的准确性,选取不规则波下波浪入射角为 45° 、刚度为 K_3 时, C_7 连接器纵向载荷和垂向载荷分别如图8,9所示,并与文献[15]的计算结果进行对比。由图可知,计算结果数据吻合良好。

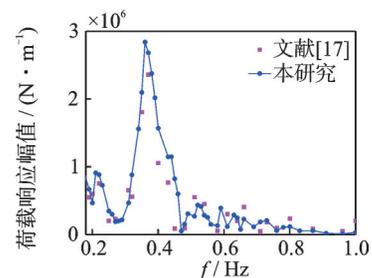


图8 C_7 连接器纵向载荷

Fig.8 C_7 longitudinal load

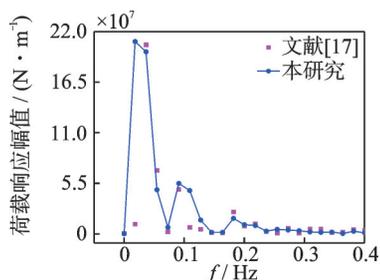


图9 C₇连接器垂向载荷

Fig.9 C₇ vertical load

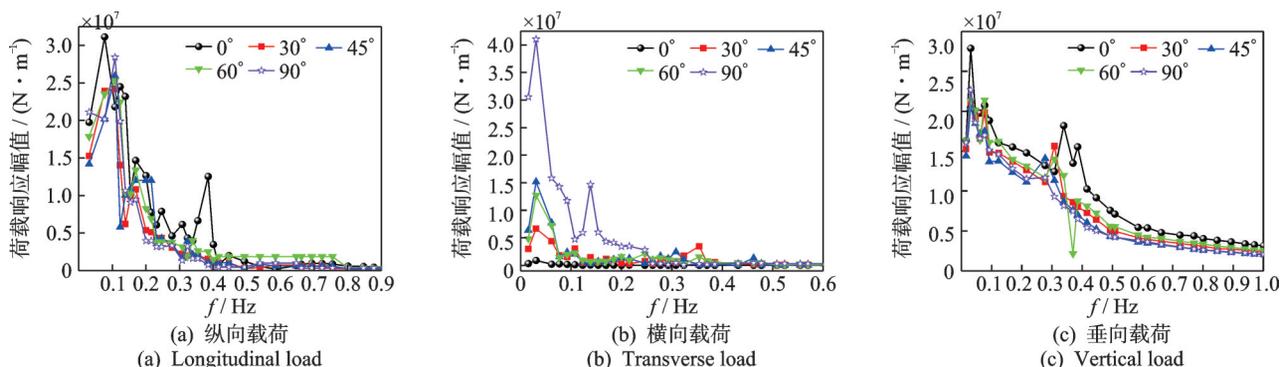


图10 规则波中不同浪向角下C₇的三个方向载荷幅值

Fig.10 Load amplitude of C₇ in three directions under different wave angles in regular waves

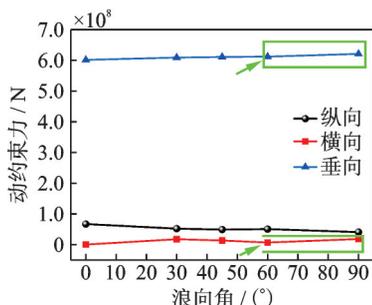


图11 规则波中不同浪向角下C₇的三个方向动约束力对比
Fig.11 Comparison of the dynamic force of C₇ in three directions with different wave angles in regular waves

由图10可以看出,连接器载荷与浪向角的变化密切相关,对波浪频率比较敏感。其中:纵向载荷峰值出现在0°浪向角、频率为0~0.1 Hz区间;横向载荷峰值出现在90°浪向角、频率为0~0.05 Hz区间;垂向载荷峰值出现在0°浪向角、频率为0~0.05 Hz区间。3个方向的载荷幅值都在0.1 Hz范围内达到了峰值,其余波动基本位于0.1~0.6 Hz之间,当频率在0.6 Hz后逐渐趋于0。这是由于在最初状态的极端恶劣海况下,考虑风浪的耦合作用,连接器为了限制模块间的相对运动,出现了较大的载荷值。同时,在高频区域载荷值趋于0,在中低频区域载荷值较大,这是由于波浪的主要能量区域位于中低频,波浪载荷越大,浮体相对运动越大,进而连接器载荷值越大。

由图11可以看出,C₇连接件在横向、垂向的动

3 算例分析

3.1 规则波下的连接器载荷响应

以C₇连接器为例,其纵向、横向、垂向的刚度均为 $1 \times 10^8 \text{ N/m}$,计算规则波下C₇连接器在不同浪向角下(0°,30°,45°,60°,90°)3个方向的载荷幅值,见图10。图11给出规则波不同浪向角下C₇的三个方向动约束力对比。

约束力随浪向角的变化趋势较为一致,当浪向角大于60°时动约束力开始明显上升。连接器在纵向上的动约束力随浪向角的增加呈现小幅度减小的趋势,最大值出现在浪向角0°时。连接器在3个方向上的动约束力均在60°时开始出现转折,这可能是由于连接器刚度为 K_3 时,与C₇连接器相邻的M₄和M₅两模块在60°时的运动产生了共振。

3.2 不规则波下的连接器载荷响应

为了便于与规则波进行比较,连接器刚度和序号均相同,计算其在5个波浪入射方向的纵向、横向和垂向载荷。不规则波中不同浪向角下C₇的三个方向载荷幅值和动约束力分别如图12,13所示。

由图12可以看出:在7级海况且风浪耦合作用下,连接器在3个方向上的载荷幅值均分布于中低频区,分别在0.7,0.6,0.4 Hz后趋于0;当浪向角为0°时,对纵向载荷和垂向载荷影响较小,但横向载荷在0 Hz时与其他浪向角一样达到了峰值,说明不规则波浪对连接器的横向载荷影响较其他两个方向大;同时,45°浪向角下3个方向载荷幅值曲线峰值也较为明显。由图13可以看出:垂向的动约束力在浪向角0°~30°和60°~90°呈线性上升趋势,在30°~60°发生了较大变化,说明此时相邻模块间产生了较大的运动幅值;纵向和横向动约束力变化趋势基本

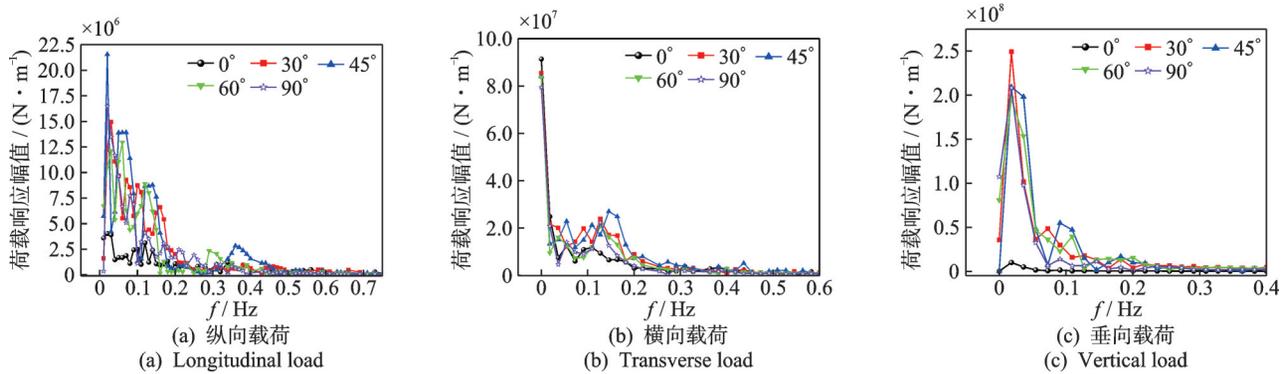


图12 不规则波中不同浪向角下 C_7 的三个方向载荷幅值

Fig.12 Load amplitude in three directions of C_7 under different wave angles in irregular waves

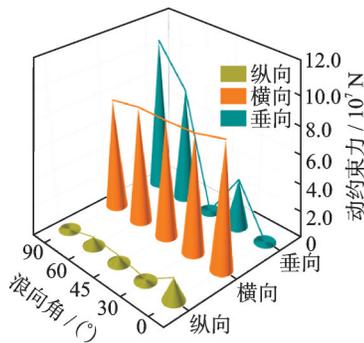


图13 不规则波中不同浪向角下 C_7 的三个方向动约束力对比
Fig.13 Comparison of the dynamic force of C_7 in three directions with different wave angles in irregular waves

一致,变化幅度较小。

图11和图13对比可知,相较于规则波,更接近实际海况的不规则波在风浪耦合的极端环境下,连接器在3个方向上的荷载幅值在更低的频率时就开始趋于0,横向荷载幅值在各浪向角下是其6倍左右,垂向近10倍。这主要是由于不规则波浪的主能量区域分布导致的,波浪荷载越大,浮体间相对运动越大,对连接器荷载值的影响也越大。两种波况下连接器的纵向动约束力大小基本相同,在浪向角 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间垂向动约束力均显示出线性上升,在不规则波中上升幅度更大,横向动约束力约为规则波

的8倍。

3.3 不同连接器刚度下的连接器载荷响应

为了研究不同刚度对连接器载荷的影响,采用表4中6个连接器刚度条件,分别对规则和不规则波中不同刚度条件下 C_7 的三个方向荷载幅值进行计算,结果见图14,15。图16,17为不规则波中 45° 和 60° 浪向角下不同刚度条件下 C_7 的三个方向荷载。

由图14,15可以看出,不论是在规则波还是不规则波中,随着刚度的变化,连接器荷载值发生了显著变化。连接器刚度在 $K_1 \sim K_5$ 时,同一个方向上的动约束力变化趋势基本一致,数值相差较小, K_6 时均发生了较大差别的非线性增长趋势,且垂向荷载远比其他两个方向荷载要大。这是因为当连接器刚度增加至 K_6 时,导致模块间的相对运动受到制约,造成应力过大,连接器的动约束力显著上升。此时,连接器荷载值对浪向角的变化较为敏感,不规则波中纵向荷载在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 出现峰值,垂向荷载在 90° 出现峰值,均与规则波一致。规则波中横向荷载分别在 30° 和 90° 出现峰值,而在不规则波中峰值出现在浪向角为 0° 和 60° 时。

由图16,17可以看出,无论是纵向、横向或垂向,浪向角 45° 时的荷载幅值均大于浪向角 60° 时的

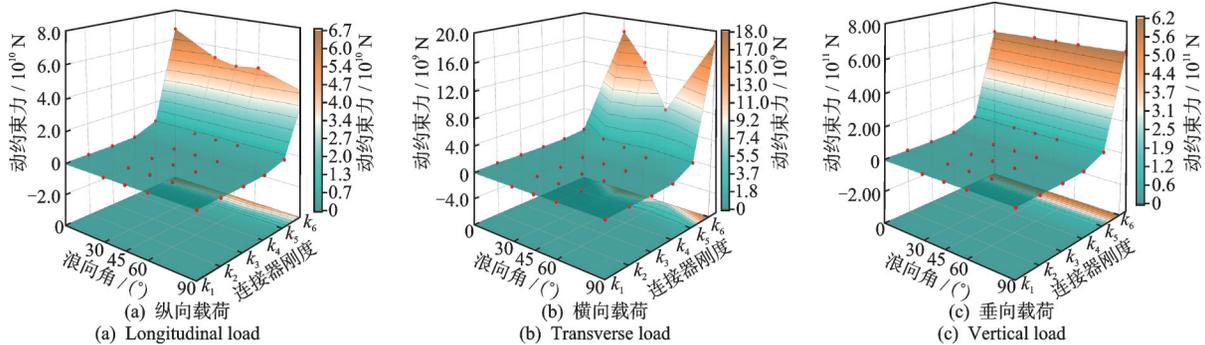


图14 规则波中不同刚度条件下 C_7 的三个方向载荷

Fig.14 Three directional loads of C_7 under different stiffness conditions in regular waves

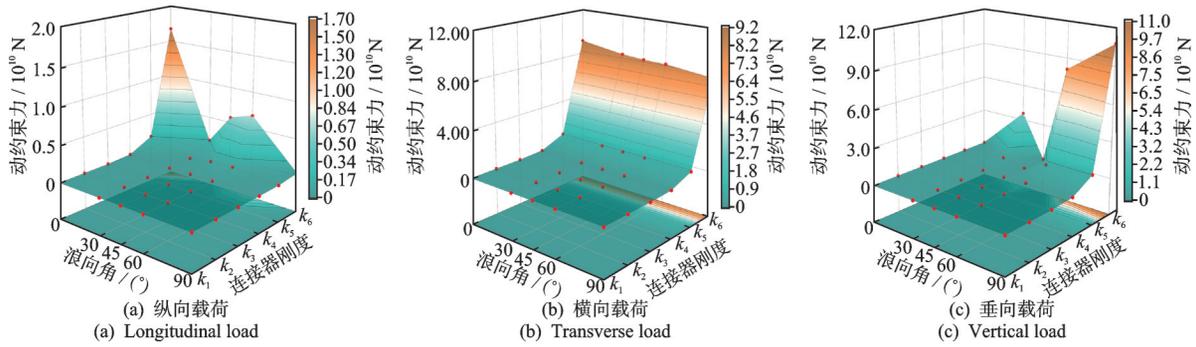


图 15 不规则波中不同刚度条件下 C_7 的三个方向载荷

Fig.15 Three directional loads of C_7 in irregular waves with different stiffness conditions

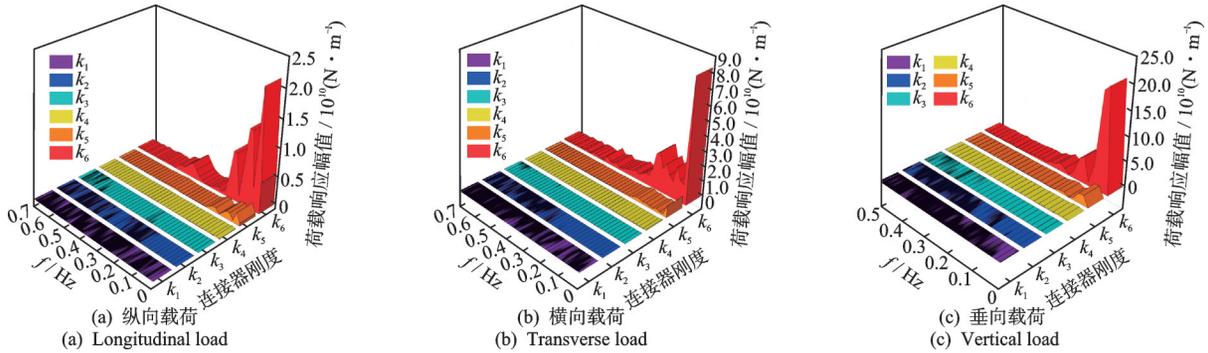


图 16 不规则波中 45° 浪向角下不同刚度条件下 C_7 的三个方向载荷

Fig.16 Three directional loads of C_7 under different stiffness conditions in irregular waves with 45° wave direction angle

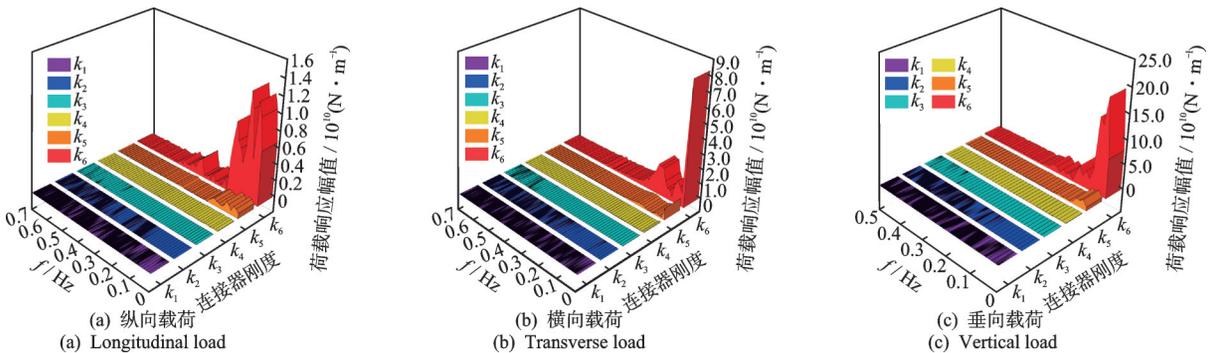


图 17 不规则波中 60° 浪向角下不同刚度条件下 C_7 的三个方向载荷

Fig.17 Three directional loads of C_7 under different stiffness conditions in irregular waves at 60° wave direction angle

幅值,且垂向载荷远大于其他两个方向的载荷。在浪向角为 45° 和 60° 、连接器刚度为 K_5 时,载荷幅值开始出现明显增长,主要集中在 $0\sim 0.2$ Hz 频率范围内,呈递减趋势。随着刚度增大,载荷波动幅值所处的频率区间增大,充分说明了连接器刚度对载荷的影响。

4 结 论

- 1) 恶劣环境海况下,连接器的载荷主要以横向和垂向载荷为主导作用,而垂向载荷值明显更大,需要重点关注。
- 2) 连接器载荷与浪向角的变化密切相关,对波

浪频率比较敏感。规则波在 60° 开始出现大幅增长,不规则波则对 45° 和 60° 比较敏感,因此可以通过设置连接器与模块间的相对夹角来避免其处于敏感浪向角中。

- 3) 连接器载荷值随着刚度的变化而发生变化。在刚度为 $K_1\sim K_5$ 时,同一方向上的动约束力变化趋势基本一致,数值相差较小,此时对浪向角的敏感度降低,浪向角对连接器载荷幅值影响较小。 K_6 时发生了较大差别的非线性增长趋势,因此应慎重选用 K_6 刚度连接器。如在浪向角为 45° 和 60° 时选用 K_6 刚度连接器,则应在 $0\sim 0.2$ Hz 频率范围内调整连接器载荷幅值。

参 考 文 献

- [1] 翁震平. 绿色超大型浮式结构物研发方向[C]//中国钢结构协会海洋钢结构分会2010年学术会议暨第六届理事会第三次会议论文集. 洛阳: 中国钢结构协会海洋钢结构分会, 2010: 6.
- [2] LIN Q, LU D Q, YEUNG R W. Hydroelastic response of a circular plate in waves on a two-layer fluid of finite depth[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(5): 671-686.
- [3] CHENG Y, JI C, ZHAI G, et al. Fully nonlinear numerical investigation on hydroelastic responses of floating elastic plate over variable depth sea-bottom[J]. *Marine Structures*, 2017, 55: 37-61.
- [4] American Society of Mechanical Engineers, Offshore Mechanics and Arctic Engineering Division. Proceedings of the international conference on offshore mechanics and Arctic engineering [C]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1988.
- [5] DING J, TIAN C, WU Y S, et al. A simplified method to estimate the hydroelastic responses of VLFS in the inhomogeneous waves [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 434-445.
- [6] CHENG Y, ZHAI G J, OU J P. Time-domain numerical and experimental analysis of hydroelastic response of a very large floating structure edged with a pair of submerged horizontal plates[J]. *Marine Structures*, 2014, 39: 198-224.
- [7] 崔维成, 吴有生, 李润培. 超大型海洋浮式结构物开发过程中需要解决的关键技术问题[J]. *海洋工程*, 2000, 18(3): 1-8.
CUI Weicheng, WU Yousheng, LI Runpei. Technical problems in the development of very large floating structures [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 18(3): 1-8. (in Chinese)
- [8] PAULLING J R, TYAGI S. Multi-module floating ocean structures[J]. *Marine Structures*, 1993, 6(2/3): 187-205.
- [9] KIM B W, KYOUNG J H, HONG S Y, et al. Investigation of the effect of stiffness distribution and structure shape on hydroelastic response of very large floating structures [C]//The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Seoul, Korea: ISOPE, 2005: 210-217.
- [10] GAO R P, WANG C M, KOH C G. Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells [J]. *Engineering Structures*, 2013, 52: 372-383.
- [11] GAO R P, TAY Z Y, WANG C M, et al. Hydroelastic response of very large floating structure with a flexible line connection [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17/18): 1957-1966.
- [12] 卢超. 超大型海上浮体平台连接器设计及动力学特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [13] 施奇佳. 超大型海上浮动平台连接模式及动力学研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [14] 徐道临, 卢超, 张海成. 海上浮动机场动力学建模及非线性动力响应特性[J]. *力学学报*, 2015, 47(2): 289-300.
XU Daolin, LU Chao, ZHANG Haicheng. Dynamic modeling and nonlinear characteristics of floating airport [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(2): 289-300. (in Chinese)
- [15] 张波, 陈倩倩, 赵春慧. 多模块MOB连接器动力特性研究[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(5): 77-81, 87.
ZHANG Bo, CHEN Qianqing, ZHAO Chunhui. Research on the connectors's dynamic response of MOB [J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(5): 77-81, 87. (in Chinese)
- [16] 余澜, 丁伟, 李润培. 移动式海上基地多模块间相互作用对连接器载荷的影响[J]. *海洋工程*, 2004, 22(1): 25-31.
YU Lan, DING Wei, LI Runpei. Effect of the multiple modules interaction on MOB connector loads [J]. *The Ocean Engineering*, 2004, 22(1): 25-31. (in Chinese)
- [17] Det Norske Verital. DNV-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads[S]. Norway: DNV, 2010.
- [18] KIM B W, YOUNG HONG S, KYOUNG J H, et al. Evaluation of bending moments and shear forces at unit connections of very large floating structures using hydroelastic and rigid body analyses [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(11/12): 1668-1679.



第一作者简介:王丽君,女,1987年7月生,博士生、讲师。主要研究方向为结构工程与风浪工程。曾发表《Effect of considering wave angles on the motion response of oversized floating bodies in offshore airports under irregular wind and wave loads》(《Applied Sciences》2022, Vol.12, No.7651)等论文。
E-mail: wanglijun@nuaa.edu.cn

通信作者简介:柯世堂,男,1982年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为风工程与结构工程。
E-mail: keshitang@163.com