

· 综 合 ·



Stokes 波作用下张紧式组合刚度系泊 浮式防波堤水动力响应研究*

亢戈霖¹, 张 雨², 金瑞佳¹, 耿宝磊¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程研究中心,
工程泥沙交通运输行业重点实验室, 天津 300456; 2. 常熟市港航事业发展中心, 江苏 常熟 215002)

摘要: 为适应海洋工程深水化发展, 提出将张紧式系泊方案与组合刚度系泊方式相结合, 并应用于浮式防波堤。基于势流理论下的高阶边界元方法, 建立张紧式组合刚度系泊的浮式防波堤数值模型, 将绕射波浪力与经典文献对比, 证明了数值模型的准确性。设定入射波为二阶 Stokes 波, 分析组合系泊刚度和钢缆长度因素影响下的浮式防波堤水动力特性, 并计算系泊张力安全系数。研究发现: 在各波周期下浮堤在垂荡方向运动曲线呈现出明显的不规则现象, 系泊几何非线性影响显著。不同系泊刚度方案的几何非线性程度不同, 防波堤运动幅度差异较大, 不同钢缆长度的防波堤运动位移统计结果接近, 运动特性相似。最后结合系泊张力安全系数比较, 得出适合设计波浪条件的张紧式组合刚度系泊系统参数。

关键词: 浮式防波堤; 张紧式系泊; 势流理论; 组合刚度系泊; Stokes 波; 系泊安全

中图分类号: U653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0014-09

Hydrodynamics of tensioned combined stiffness mooring floating breakwater under Stokes wave

KANG Gelin¹, ZHANG Yu², JIN Ruijia¹, GENG Baolei¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering MOT, National Engineering Research Center for
Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

2. Changshu Port and Shipping Development Center, Changshu 215002, China)

Abstract: To adapt to the development of marine engineering to deep water, a combination of tension mooring and combined stiffness mooring system is proposed and applied to floating breakwater. A numerical model of the floating breakwater with tensioned combined stiffness mooring is established based on the high-order boundary element method under the potential flow theory, and the accuracy of the numerical model is proved by comparing the bypassing wave force with the classical literature. Setting the incident wave as a second-order Stokes wave, the hydrodynamic characteristics of the floating breakwater under the influence of combined mooring stiffness and cable length factors are analyzed and the mooring tension safety factor is calculated. The results showed that the heave motion curves of the floating breakwater under each wave period exhibit obvious irregular phenomena, and the nonlinear influence of mooring geometry is significant. Different mooring stiffness schemes have different degrees of geometric nonlinearity and large differences in breakwater motion amplitude, and the statistics of breakwater motion displacements for different cable lengths are close to each other with similar motion characteristics. Finally, by comparing the safety factors of mooring tension, the parameters of the tensioned combined stiffness mooring system suitable for the designed wave conditions are derived.

Keywords: floating breakwater; tensioned mooring; potential flow theory; combined stiffness mooring; Stokes wave; mooring safety

收稿日期: 2024-06-20

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20123, 42307597); 中央级公益性科研院所科研创新基金项目(TKS20230106)

作者简介: 亢戈霖(1993—), 女, 博士, 助理研究员, 从事流域湖泊河流环境模拟、水运工程研究。

随着海洋经济的高质量发展,浮式防波堤在一定程度上可以防止和减少海洋风暴对海洋装备、海水养殖、海岸工程的破坏^[1]。与固定式防波堤相比,浮式防波堤主要由锚泊系统和浮堤组成,随着水深增加,建设成本增加有限,结构简单,在深水工程中具有一定的应用前景^[2]。

浮式防波堤的系泊系统主要包括悬链线式系泊和张紧式系泊两大类。悬链线系泊方式是浮式结构物常见且传统的系泊方式,适用于水深较浅的水域^[3]。随着海洋工程建设水深越深,悬链线系泊系统水中悬挂段重力越大,系泊缆设计难度和浮体所受到的垂向载荷也随之增加。在深水、超深水浮式浮体系泊系统中,广泛应用张紧式系泊^[4]。张紧式系泊系统与海底呈一定角度,系泊缆保持张紧状态,轴向刚度提供了系泊系统的大部分恢复刚度。

系泊系统按照材料属性分为全钢缆、全锚链和组合式系泊系统^[5]。对于全钢缆系泊系统,由于钢缆比锚链轻很多,所以预张力一定时,钢缆能提供更大的回复力,但与海底接触部分会因长期磨蚀而造成磨损。对于全锚链系泊系统,在海上作业中具有抵抗海底磨蚀的优势,并对提高锚抓力做出了巨大贡献。但在深水区域,由于自重增加及对初始张力的要求提高而造成浮式结构物载重能力下降。在锚链和钢缆组成的系泊系统中,锚链可用于连接锚,既可有效抵御海底磨蚀,而且锚链的自重力也有助于提高锚抓力。若合理选择锚链及钢缆的长度,组合式系泊系统可以在为系泊提供更大恢复力的条件下降低预张力、改善锚链轴向刚度以及拥有良好的抗海底磨蚀能力。

Loukogeorgaki et al.^[6]在频域中研究正向入射波作用下系泊浮式防波堤的水动力性能,研究不同系泊缆长度和结构吃水深度对系泊浮式防波堤性能的影响,试验结果发现张紧式系泊能有效提高浮式防波堤的消波性能。嵇春艳等^[7]以深水条

件下浮式生产储油船(Floating production storage and offloading, FPSO)为算例,对不同水深下新型系泊进行时域耦合计算,将新型系泊系统与张紧式系泊系统进行比较,改善了新系泊系统影响下浮体的运动性能、系泊张力,并找到适合该浮式海洋平台结构的工作水深。袁梦等^[8]运用有限元法建立非线性弹性缆索方程数值模型,计算由不同材料系泊线系泊的浮体结构水动力特性,发现采用聚酯纤维材料的系泊性能更好。在系泊系统的国内外研究中,通过数值模型和物理模型试验研究悬链式系泊,以及不同材料组合的系泊,然而,对深水条件下张紧式组合系泊的研究较少,组合系泊与浮式防波堤相结合的研究也较少。

本文提出适用于深水情景的张紧式组合刚度系泊系统,基于势流理论建立高阶边界元数值模型,围绕二阶 Stokes 波作用下浮式防波堤的运动响应、系泊安全问题进行研究,分析不同组合系泊刚度和系泊钢缆长度及波浪动力参数(入射波高、入射波周期)对运动响应、系泊受力的影响,讨论在二阶 Stokes 波作用下张紧式组合刚度系泊浮式防波堤水动力特性,揭示适用于 Stokes 波作用下的浮式防波堤张紧式组合刚度参数方案。

1 研究方法

1.1 波浪与系泊浮体数值模型建立

深海情况下浮式防波堤尺寸较大,对波浪场影响显著,因此将波浪与浮式防波堤看作波浪与浮体相互作用问题,采用势流理论进行研究。考虑到浮式防波堤的径向尺寸远小于轴向尺寸,且浮式防波堤的矩形截面沿轴向没有变化,因此使用二维坐标系进行简化。假设为理想流体,流场内存在一个速度势,满足 Laplace 方程和相应的边界条件。对速度势、波面高度、水平运动 $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ 以及转动 $\alpha = \xi_3$ 进行 Stokes 展开。此外,速度势和波面高度可以分解为入射和散射部分。

$$\varphi = \varepsilon(\varphi_i^{(1)} + \varphi_s^{(1)}) + \varepsilon^2(\varphi_i^{(2)} + \varphi_s^{(2)}) + \dots \quad (1)$$

$$\eta = \varepsilon(\eta_i^{(1)} + \eta_s^{(1)}) + \varepsilon^2(\eta_i^{(2)} + \eta_s^{(2)}) + \dots \quad (2)$$

$$\xi = \varepsilon\xi^{(1)} + \varepsilon^2\xi^{(2)} + \dots \quad (3)$$

$$\alpha = \varepsilon\alpha^{(1)} + \varepsilon^2\alpha^{(2)} + \dots \quad (4)$$

式中: φ 为速度势, η 为波面高度, 下标 i 为入射部分的未知数, 下标 s 为散射部分的未知数; ε 为小摄动展开变量, 与波陡相关, 上标(1)和(2)分别是波浪的一阶成分和二阶成分。

建立的数值模型还应满足相应的海底边界条件、物体表面边界条件和水面边界条件。

$$\frac{\partial \varphi_s^{(k)}}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi_s^{(k)}}{\partial \mathbf{n}} = -\frac{\partial \varphi_s^{(k)}}{\partial \mathbf{n}} + b^{(k)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta_s^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial \varphi_s^{(k)}}{\partial z} + f_1^{(k)} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varphi_s^{(k)}}{\partial t} = -g\eta_s^{(k)} + f_2^{(k)} \quad (8)$$

式中: $b^{(k)}$ 、 $f_1^{(k)}$ 、 $f_2^{(k)}$ 为物体表面边界条件和水面边界条件的强迫项, 具体表达式参考文献[9]; $\mathbf{n}$ 为法向量, 本文按流体部分为正方向。上标 k 为波浪的一阶和二阶成分。

采用细长杆理论模拟线性拉伸和弯曲变形的系泊线, 将杆的中心线定义为空间曲线 $\mathbf{r}(s, t)$, s 为弧长。如图 1 所示。细长杆中心线上任意一点的应力状态由作用在杆截面上的总力 F 和总力矩 M 表示。

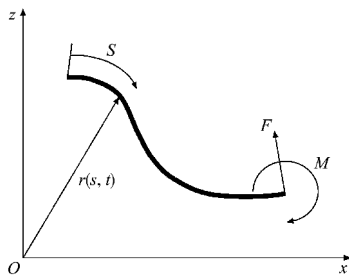


图 1 细长杆坐标系

Fig. 1 Slender rod coordinate system

细长杆采用有限元方法求解, 假设锚链上没有扭矩和外部力矩, 位置矢量 $\mathbf{r}(s, t)$ 的线性动量

方程可以表述为:

$$F_{\text{MI}} + q = \rho \ddot{\mathbf{r}} \quad (9)$$

$$\lambda = T - EI\kappa^2 \quad (10)$$

式中: F_{MI} 为内部力, q 为单位长度的外部力, ρ 为单位长度的质量。矢量 $\mathbf{r}$ 上的点表示时间导数, EI 为抗弯刚度, T 为线张力, κ 为曲率。标量函数 λ 为拉格朗日乘子。

通过匹配导缆孔处的边界条件, 经过推导可以得到浮体的一阶和二阶耦合运动方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\xi}^{(1)} + \mathbf{B}\dot{\xi}^{(1)} + \mathbf{C}\xi^{(1)} = \mathbf{F}_D^{(1)} + \mathbf{F}_M^{(1)} \quad (11)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\xi}^{(2)} + \mathbf{B}\dot{\xi}^{(2)} + \mathbf{C}\xi^{(2)} = \mathbf{F}_D^{(2)} + \mathbf{F}_I^{(2)} + \mathbf{F}_M^{(2)} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为刚体质量阵, $\mathbf{B}$ 为黏性阻尼阵, $\mathbf{C}$ 为恢复力矩阵, $\mathbf{F}_D^{(1)}$ 和 $\mathbf{F}_D^{(2)}$ 为一阶和二阶波浪激振力, $\mathbf{F}_M^{(1)}$ 和 $\mathbf{F}_M^{(2)}$ 为一阶和二阶锚链力, $\mathbf{F}_I^{(2)}$ 为运动一阶项、速度势一阶项等组成的二阶力, 各表达式同样参考文献[9]。

1.2 波浪与系泊浮体数值模型验证

为了验证数学模型的正确性, 利用模型计算一个水平固定圆柱受到的绕射波浪力, 并将模拟结果与 Ogilvie^[10] 和 Vada^[11] 的计算结果进行对比。

波浪力随着 Keulegan-Carpenter 数(KC)的变化情况以及一阶、二阶波浪力的对比结果如图 2 所示。可以看出, 一阶、二阶结果与数学模型中势流理论计算结果较为吻合, 证明了绕射波浪力计算的准确性。

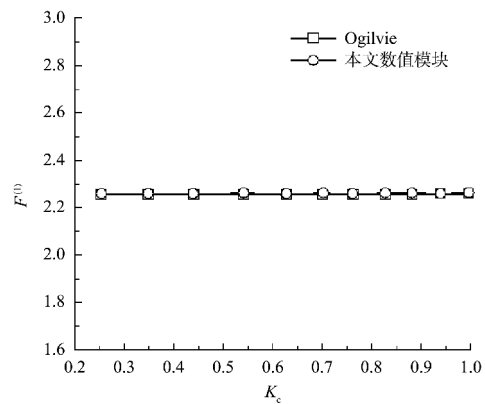
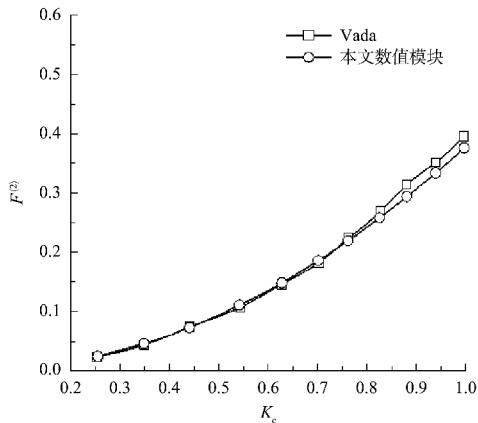


图 2 水平圆柱的一阶、二阶波浪力

Fig. 2 1st-order and 2nd-order wave force



b) 二阶

on horizontal cylinder

1.3 模型设计

针对波浪与浮式防波堤的相互作用建立如图3所示的计算模型, 其中 x 轴为浮箱长度方向, 波浪以 0° 入射, 方向与 x 轴相反; z 轴为竖直方向, 张紧式系泊与水平方向的夹角为 θ 。浮式防波堤的浮重力差由2根张紧式组合刚度系泊承受。浮式防波堤所处海域水深为70 m, 方箱形浮堤由2根张紧式的锚链和钢缆组合的系泊固定于海底, 方箱水平方向宽度 L 为20 m, 纵向吃水 T 为8 m, 方箱的浮心和中心重合, 位于坐标原点下方4 m处。方箱质量为149 t/m, 所受浮力为1.61 MN/m, 浮重力比为1.1, 每根系泊线的竖向预张力 F_z 为2.19 MN。深水计算域以 z 轴为中心线, x 方向两侧各取浮式防波堤宽度的15倍长, 共1 200 m的海域, 分别从计算域两侧距离坐标原点300 m到计算域边界共600 m的区域为阻尼层。

设定张紧式系泊与水平方向的夹角为 45° , 为

了研究合适的钢缆系泊刚度方案, 固定中间段钢缆长度约为系泊总长度的 $1/3$, 重点比选 CASE1 至 CASE5 这5个钢缆参数方案, 选取4S等级锚链, 钢缆选取6股中心线钢丝绳材质, 系泊参数属性根据国际标准和方法计算^[12], 深水中的系泊可以看作小尺度结构物, 波浪的拖曳力和惯性力是主要的分量, 计算方法依据《海洋工程波浪力学》^[13]。表1为组合刚度系泊方案参数。为了研究合适的钢缆系泊长度, 在已经选定的钢缆参数方案上, 重点比选28、36、44、52和60 m这5个钢缆长度方案。每个方案在数值模型中进行波高2 m, 波浪周期4~10 s的二阶 Stokes 波时域计算。

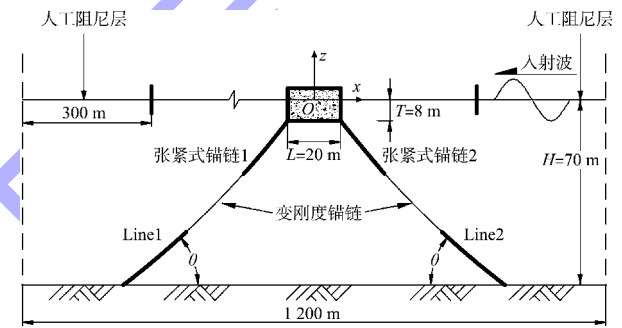


图3 波浪与浮式防波堤作用

Fig.3 Interaction between wave and floating breakwater

在运动响应分析中, 对各运动方向时程曲线进行傅里叶变换, 分析其运动频谱图, 提取运动时程数据的有效值无因次化, 分析运动规律。在系泊张力分析中, 本研究计算的系泊是在完整状态下, 采用细长杆理论的动力分析方法, 根据美国石油协会 *Design and analysis of station keeping systems for floating structures* ^[14], 等效安全系数 S (破断力与计算最大张力比值) 选取1.67。基于上述分析, 选择合适的系泊刚度, 得到系泊刚度方案, 将其加入不同的钢缆长度方案计算中。

表1 组合刚度系泊方案参数

Tab.1 Parameters of combined stiffness mooring schemes

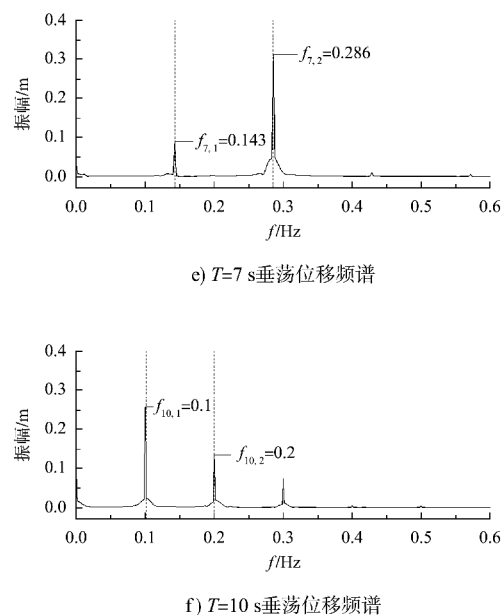
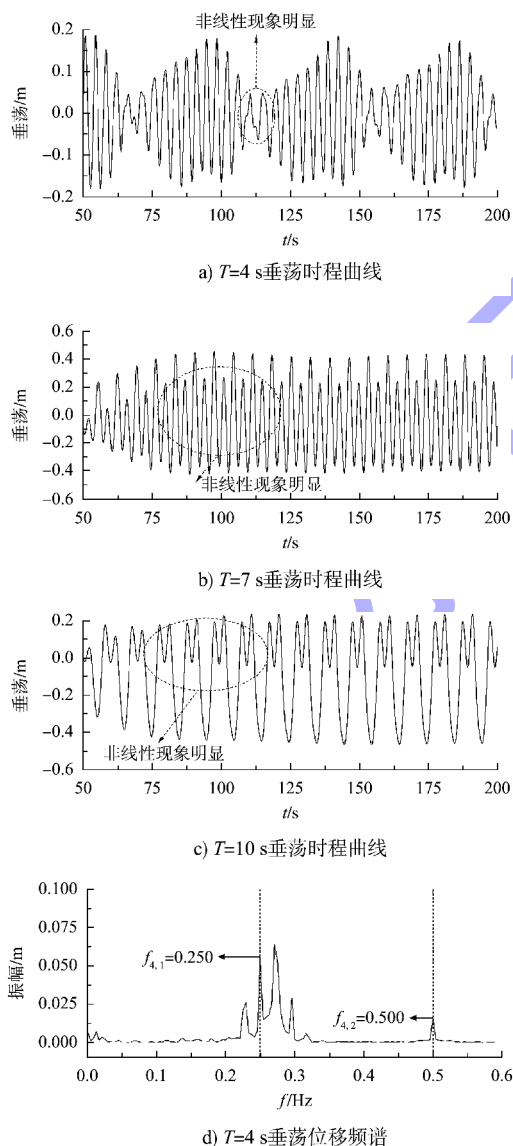
方案	直径 D/m	拉伸刚度 EA/MN	破断力 BL/MN	单位长度水中 质量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	单位长度附加 质量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	惯性力参数/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	拖曳力参数/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$
锚链	0.155	2 050	23.10	478.10	19.30	38.61	95.14
钢缆 CASE1	0.098	388	6.08	38.32	7.72	15.43	60.15
钢缆 CASE2	0.118	563	8.82	55.55	11.19	22.37	72.43
钢缆 CASE3	0.138	769	12.10	75.98	15.30	30.60	84.70
钢缆 CASE4	0.178	1 280	20.10	126.41	25.46	50.91	109.26
钢缆 CASE5	0.198	1 580	24.80	156.41	31.50	63.00	121.53

2 模拟结果与分析

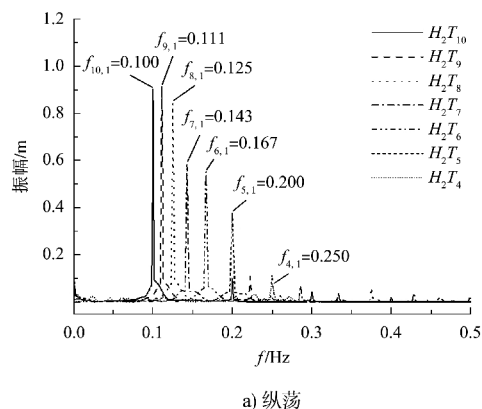
2.1 不同钢缆刚度系泊方案

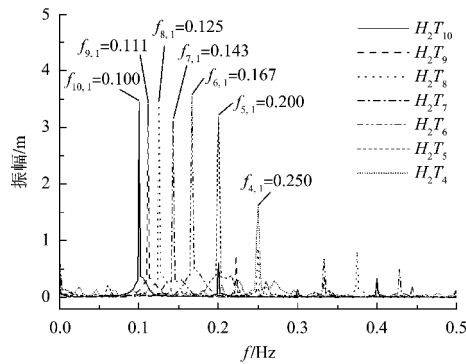
2.1.1 运动响应影响

图4为不同周期波浪作用下, CASE1系泊方案的浮式防波堤在垂荡方向上的运动时程曲线和相对应的傅里叶变换图。从图4可以看出, 在Stokes波浪作用下, 加入钢缆的张紧式系泊浮式防波堤在垂荡方向上的运动呈现了明显的非线性不规则现象。由频谱图亦可看出, 垂荡频谱出现明显的波浪频率的1倍频、2倍频等的高阶分量, 说明刚度浮式防波堤在垂荡运动受组合刚度系泊系统的影响呈现出明显的非线性。



将CASE1系泊方案的纵荡和纵摇运动时程曲线进行傅里叶变换, 结果如图5所示。从图中可以看出, 主频率是波浪周期的倒数, 说明纵荡和纵摇方向的运动主要受到波浪频率的影响。在纵荡频谱图中, 随着波浪周期的增大, 主频振幅也随之增大, 意味着波浪力影响越大。相比于1倍频, 2倍频影响虽不明显, 但也说明了组合刚度系泊的几何非线性存在。





b) 纵摇

注: H 为波高, m ; T 为周期, s 。

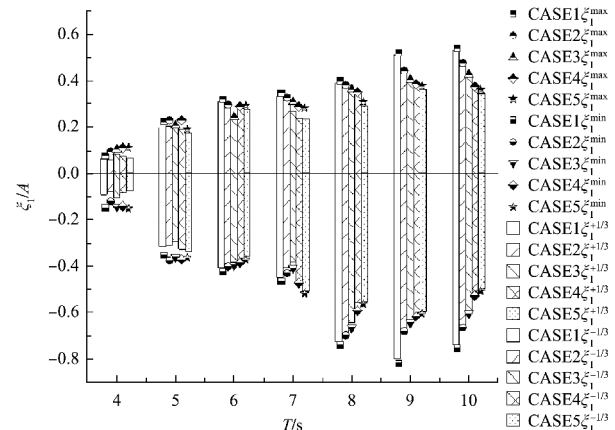
图5 CASE1 系泊方案各周期波浪作用下运动量频谱

Fig. 5 Motion spectrum under each period wave of CASE1

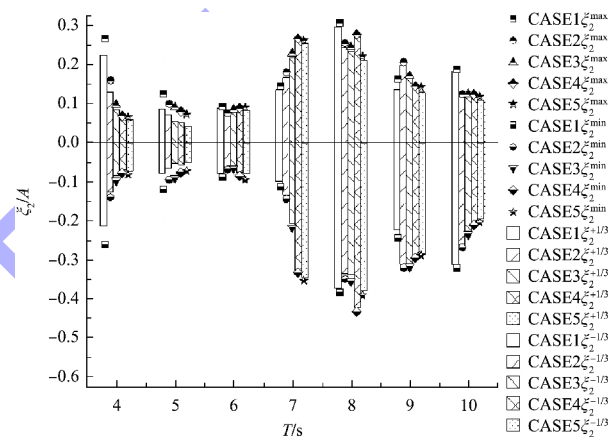
图6为不同系泊刚度方案在各周期各运动方向上的运动响应无因次统计。 $\xi_1^{\max}$ 和 $\xi_1^{\min}$ 分别表示浮式防波堤在正方向和负方向运动的最大值和最小值。 $\xi_1^{+1/3}$ 和 $\xi_1^{-1/3}$ 分别表示浮式防波堤在正方向和负方向运动的有效位移。有效值指通过上跨零点法,将时间历程中结构发生的位移峰值从大到小排列,前1/3位移峰值的平均值。

由图6a)可知,在长周期波浪作用时,结构整体沿波浪传播方向运动,阻挡入射的波浪。最值与有效值相差较小,即前1/3局部峰值与峰值相差不大,说明Stokes波波浪作用下系泊几何非线性对结构运动影响不大,结构在纵荡方向的运动主要受波频影响。随着波浪周期增大,防波堤运动幅度变大。由于不同的系泊刚度方案其几何非线性程度也不同,在结构时域耦合计算中,CASE5系泊方案使结构在纵荡方向运动幅度最小,表现出更好的运动特性。

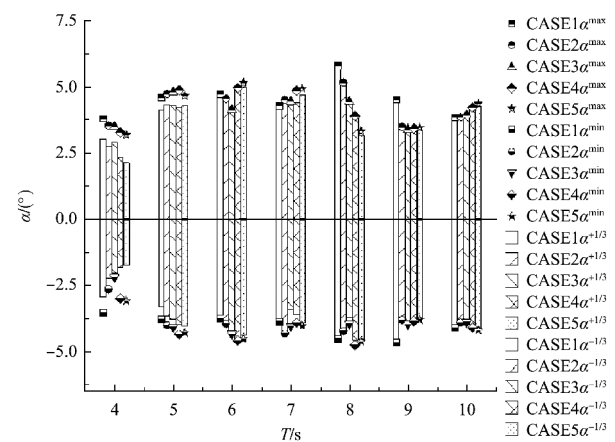
由图6b)可知,在二阶Stokes波的作用下,结构在垂荡方向偏离平衡位置向负方向运动,呈明显的下降(set down)现象。短周期波浪作用时,结构垂荡运动有效值和最值相差较大,说明系泊方案的几何非线性作用在短周期波浪作用时较大,运动峰值较离散。但防波堤在长周期波浪作用下运动范围较大。整体来看,CASE5系泊方案使结构在垂荡方向表现出更好的运动特性。



a) 纵荡



b) 垂荡



c) 纵摇

图6 不同系泊刚度方案下各周期运动响应无因次统计

Fig. 6 Dimensionless statistical of motion response for each period wave under different mooring stiffness schemes

由图6c)可知,正向纵摇下的各方案差距较大,负向纵摇差距较小。可能的原因是波浪作用下负向纵荡和负向垂荡使浮式防波堤出现负向纵摇,刚度小的张紧式系泊恢复力小,受波浪作用的变形大,引起较大的正向纵摇差距。整体来看,

CASE5 系泊方案使结构在纵摇方向表现出更好的运动特性。

由于纵荡、垂荡和纵摇 3 个方向运动的耦合叠加效应,因此对比无因次运动结果更加有利。从系泊刚度运动响应的分析角度对比各系泊方案,选取 CASE5 系泊方案。

2.1.2 系泊张力

图 7 为不同组合刚度系泊方案下, Line1 和 Line2 安全系数与 S 的比较结果,安全系数等于破断强度与张力极值比值,张力极值是时域模拟时间内系泊力最大值。破断强度选取组合刚度系泊的最小破断强度,例如 CASE5 方案的系泊强度选取锚链的破断强度。从图 7 可以看出,随着刚度增加,安全系数显著增大,但仅有 CASE5 的 Line1、Line2 满足系泊安全要求。

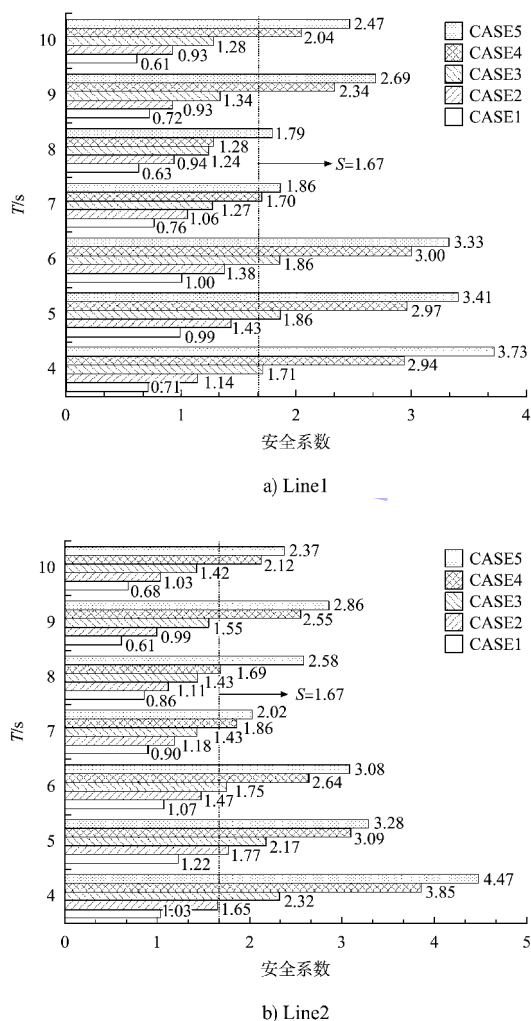


图 7 不同系泊刚度方案的安全系数

Fig. 7 Safety factor of different mooring stiffness schemes

2.2 不同钢缆长度系泊方案

2.2.1 运动响应影响

基于上述计算结果,选择 CASE5 系泊方案,图 8 为不同周期波浪作用下,钢缆长度 28 m 的浮堤在典型周期上垂荡运动时程曲线。浮式防波堤在垂荡方向上的运动亦呈现不规则现象,各周期频谱出现高阶分量,主要由于系泊几何非线性影响导致结构运动出现非线性现象。

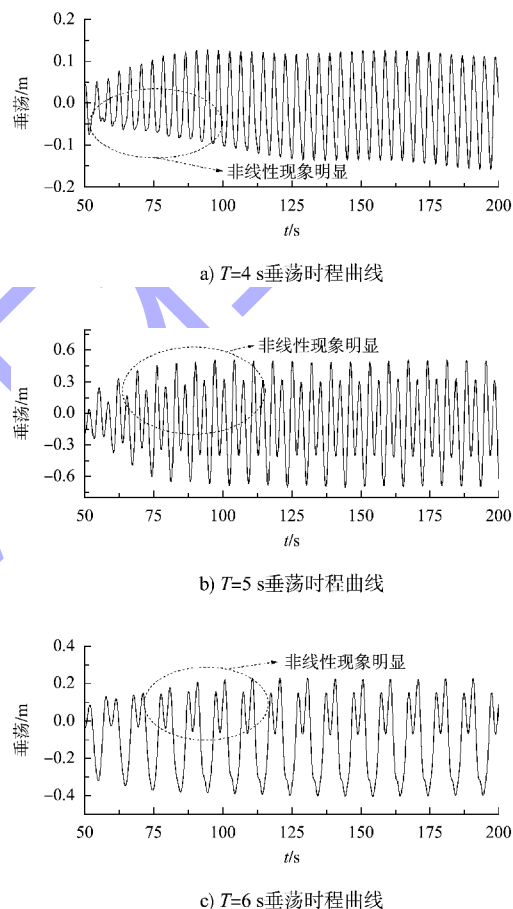


图 8 钢缆长度 28 m 各周期波浪作用下垂荡方向运动时程曲线

Fig. 8 Time history curve of heave motion of 28 m steel cable lengths under each period wave

图 9 为钢缆长度 28 m 时,垂荡、纵荡和纵摇运动的频谱。从图 9 可以看出,主频率是波浪周期的倒数,说明纵荡和纵摇方向的运动主要受波浪频率的影响,且随波浪周期的增大,波浪频率对应的一阶分量频率贡献越大。此外,频谱图出现高阶分量,二阶、三阶振幅远小于一阶,说明组合刚度系泊的几何非线性引起了运动响应的非线性。

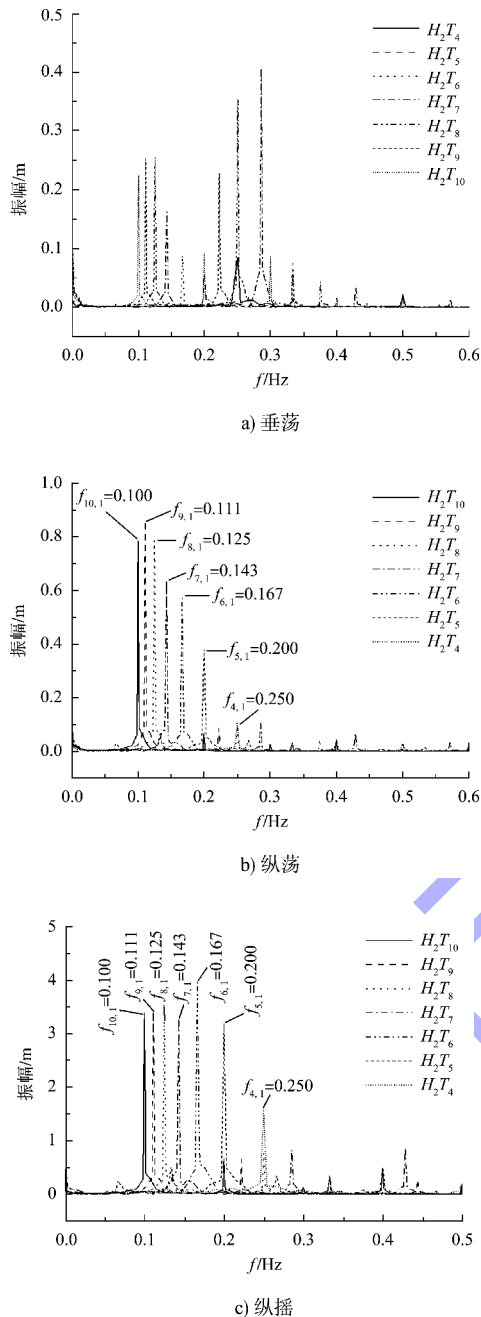


图9 钢缆长度 28 m 各周期波浪作用下运动量频谱
Fig.9 Motion spectrum of 28 m steel cable lengths under each period wave

图 10 为不同钢缆长度方案的浮式防波堤在各周期各方向上的运动响应统计。总体可以看出,结构向着纵荡负方向、垂荡负方向运动。有效位移与最值位移大多在短周期时相差较大,运动时程曲线更加无序,局部峰值较多。各种钢缆长度的位移统计结果实际相差不大,说明加入较短钢缆的系泊和较长钢缆的运动特性相差不大,较短钢缆也能达到相似的运动效果。综上,选择 28 m

长度的钢缆,此时钢缆占据系泊 1/3,上下锚链占据 2/3。

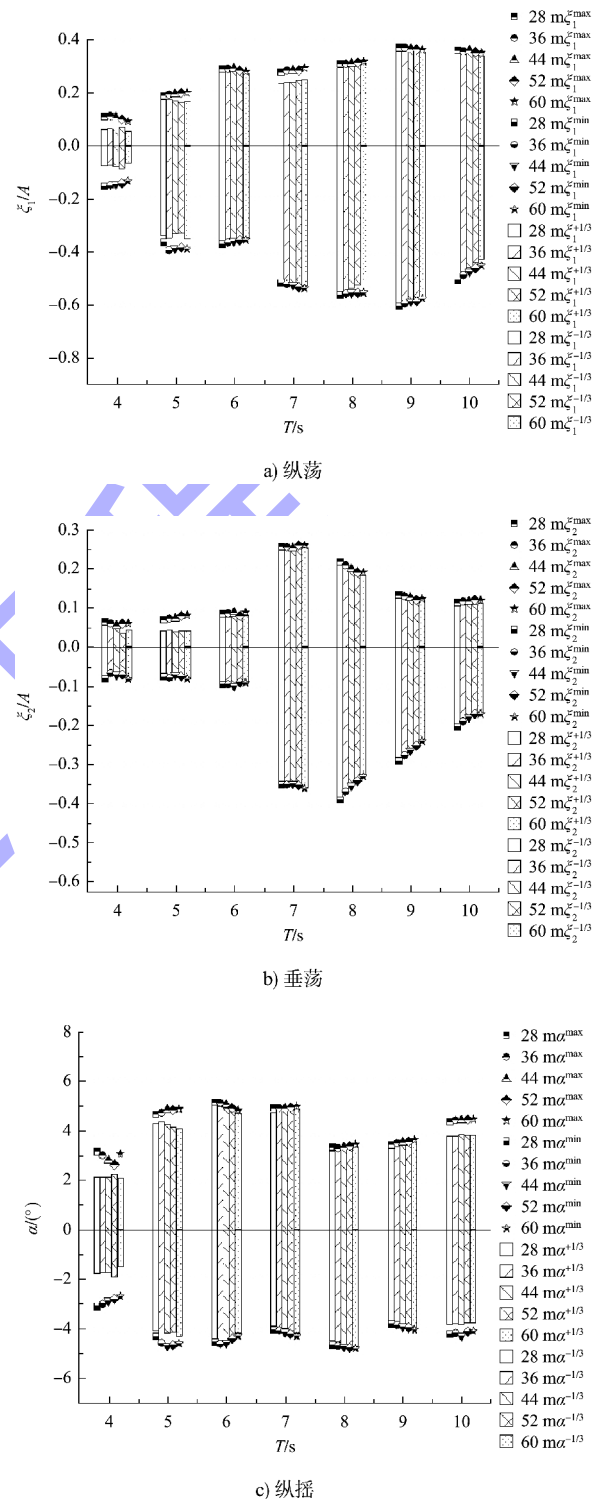


图 10 不同钢缆长度各周期运动响应无因次统计
Fig.10 Dimensionless statistics of motion response for each period with different steel cable lengths

2.2.2 系泊张力

将不同组合刚度系泊方案下 Line1 和 Line2 安

全系数与 S 的相比,发现任何长度钢缆均满足系泊安全的要求,根据钢缆长度的运动响应分析可知,加入不同长度钢缆的组合刚度系泊对运动响应影响差距不大,为确保结构与海底系泊段的锚固安全,锚链具有比钢缆抗磨蚀的作用,因此选择 28 m 长度的钢缆加入组合刚度系泊,能够满足运动幅度较小,到达安全系泊的要求。

3 结论

1) 波浪作用下,浮式防波堤在纵荡方向沿波浪传播方向运动,垂荡方向呈现明显的下降现象,纵摇运动向波浪入射方向转动,其中纵荡和纵摇运动主要体现为波频运动,垂荡运动在组合锚链的影响下呈现明显的非线性现象。

2) 在系泊刚度对防波堤运动响应影响方面,随着钢缆刚度增加,防波堤在纵荡和垂荡方向运动量逐渐减小,同时系泊安全系数显著增加;整体上,随波浪周期的增大,防波堤运动范围变大,运动局部峰值与峰值相差减小,非线性效应减弱;系泊刚度对防波堤纵摇运动无明显影响规律。因此,建议在实际工程中,选择刚度较大的钢缆以减少防波堤运动幅度,保证系泊安全。

3) 在组合刚度系泊长度对防波堤运动响应影响方面,不同钢缆长度的位移统计结果相差不大,运动特性相似,各长度钢缆均满足系泊安全的要求;运动局部峰值与峰值在短周期时相差较大,运动时程曲线更加无序,局部峰值较多。因此建议实际应用时,可选择占据系泊总长度 $1/3$ 的较短钢缆,能以最优的经济性满足浮式防波堤运动幅度较小以及系泊安全的要求。

参考文献:

- [1] 王晓亮,陈永焜,刘勇,等.新型带反浪弧浮箱式防波堤消浪特性的数值和试验研究[J].水道港口,2021,42(5):567-581.
WANG X L, CHEN Y K, LIU Y, et al. Numerical and experimental study on wave dissipation characteristics of a new-type floating breakwater with anti-arc surface [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(5): 567-581.
- [2] 栾英妮,陈汉宝.浮式防波堤研究进展[J].水运工程,2021(3):64-69.
LUAN Y N, CHEN H B. Research progress of floating breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 64-69.
- [3] 刘庆凯,纪巧玲,王钰.悬链式单浮箱防波堤水动力特性试验研究[J].水运工程,2020(1):23-28.
LIU Q K, JI Q L, WANG Y. Experimental study on hydrodynamic characteristics of chain moored single pontoon floating breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2020(1): 23-28.
- [4] 霍家明.深水张紧式系泊系统疲劳分析[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
HUO J M. Fatigue analysis of deepwater taut-wire mooring system[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2023.
- [5] 张鼎,徐阳光.不同系泊缆组合对 FLNG 单点系泊系统特性的影响[J].中国海上油气,2021,33(5):175-181.
ZHANG D, XU Y G. Influence of different combinations of mooring line on characteristics of FLNG single point mooring system [J]. China offshore oil and gas, 2021, 33(5): 175-181.
- [6] LOUKOGEORGAKI E, ANGELIDES D C. Stiffness of mooring lines and performance of floating breakwater in three dimensions [J]. Applied ocean research, 2005, 27(4): 187-208.
- [7] 嵇春艳,元志明,徐胜,等.一种适用于深水浮式海洋平台结构的新型系泊系统设计及水动力性能分析[J].海洋技术,2012,31(2):68-72.
JI C Y, YUAN Z M, XU S, et al. Concept design of a new mooring system applied to deepwater floating offshore platforms and its hydrodynamics [J]. Journal of ocean technology, 2012, 31(2): 68-72.
- [8] 袁梦,范菊,缪国平,等.非线性弹性系泊缆系泊性能[J].上海交通大学学报,2010,44(6):820-827.
YUAN M, FAN J, LIAO G P. Mooring performance of nonlinear elastic mooring lines [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(6): 820-827.
- [9] 金瑞佳.深海平台大幅慢漂运动的两次展开求解方法[D].大连:大连理工大学,2017.
JIN R J. A twice expansion analysis method for large drift motion of platforms in deep sea [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.