

杆件结构物水动力系数与波浪要素关系研究

桂福坤^{*1}, 姚晓杰¹, 孟 昂¹, 赵云鹏², 董国海²

(1. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用水槽试验研究了水平杆件结构物水动力系数与波浪要素的基本关系. 设计了垂直杠杆结构, 用于提取波浪条件下杆件的水平受力过程线, 有效地避免了波浪垂直运动对杆件水平力的影响. 通过联立 Morison 方程, 得到波浪作用过程中拖曳力系数 C_d 、惯性力系数 C_m 随时间的变化过程线, 并首次采用傅里叶分析方法提取 C_m 变化的频域分布, 利用三角函数进行拟合, 分析拟合系数与波浪要素之间的关系. 研究表明: 在本试验波浪条件下, C_d 呈现 U 形变化, 但计算时仍可取为常数, 不会产生大的误差; C_m 由对应波浪的一倍和二倍频率的周期函数叠加而成, 一倍频系数与波浪周期参数 K_T 相关性较好, 二倍频系数则与波高参数 K_H 相关性较好, 拟合所得的初始相角较为离散, 取均值处理. 为便于实际应用, 给出了水动力系数与波浪要素关系的拟合公式, 其与试验结果吻合较好.

关键词: 水平杆件结构物; 水动力系数; 波浪要素; 波浪力; 拟合公式

中图分类号: TV312; P75 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201702008

0 引言

杆件结构物为常见的海洋设施构成单元, 尤其是小尺度杆件结构物在海洋工程中被广泛运用^[1-2]. 小尺度杆件结构物的波浪力可通过 Morison 方程计算. Morison 方程由拖曳力和惯性力线性叠加而成, 其波浪力的计算结果准确性与惯性力系数和拖曳力系数(统称水动力系数)的选取密切相关. 对于水动力系数的取值, 不少学者都做了相关研究^[3-6], 但统观各个研究成果, 基本都将波浪作用过程中水动力系数视为常数. 目前在实际运用中, 包括部分规范^[7]文件中, 也是如此. 但有学者认为^[8-9], 只有在阻力显著区($Kc > 15$)以及惯性力显著区($Kc < 8$)常数型的水动力系数才可以采用, 在 $8 < Kc < 15$ 的中间区域, 却存在着问题, 也是该方程运用时一直存在争议的区域. 而在实际工程应用中, Kc 却较多地处于这一区域, 因此对杆件在波浪作用过程中随时间(相角)的变化规律研究十分必要. Keulegan 等^[10]使用傅里叶分析方法通过计算相关的修正参数, 得到了

C_d 和 C_m 与相角的关系, 但其计算的参数较多, 运用不甚方便. Sarpkaya 等^[2]在其基础上加密了相角的划分, 将相角分为每段 3° 的小段, 得到的结果大致与前者相同, 而且发现整个波浪作用过程中, C_d 和 C_m 的变化并不对称, 给出的修正式也更加简单. 由于波浪作用下的水动力系数受到水平和垂直方向力的交互作用, 其变化规律显得较为复杂. 目前多数研究以水质点速度为特征参数进行分析, 而与波浪要素波高和周期的直接影响却未见报道, 波浪要素对 C_d 和 C_m 的影响机理尚不明确. 本文针对水平圆柱杆件, 提取固定杆件在波浪作用下的水平方向波浪力历时曲线进行分析, 规避垂向受力的干扰, 分析探讨水平 C_d 和 C_m 的变化情况, 以及波高参数 K_H 、波浪周期参数 K_T 对水动力系数变化的影响, 为水动力系数在争议区间的使用提供参考.

1 模型试验

1.1 试验设备及布置

本试验在国家海洋设施养殖工程技术研究中

收稿日期: 2016-04-15; 修回日期: 2017-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239002); 国家海洋局公益性行业科研专项经费资助项目(201505025-2); 舟山市海洋专项(2015C41001).

作者简介: 桂福坤^{*}(1976-), 男, 教授, E-mail: gui2237@163.com.

心水动力水槽中进行。水槽长 130.0 m, 宽 6.1 m, 试验水深 3.5 m, 内配有拖车, 可制造最大速度为 6.5 m/s 的相对水流。水槽一侧为液压摇板式造波机, 可制造最大波高 0.35 m、周期 0.5~5.0 s 的波浪; 另一侧建有消波装置。试验模型置于拖车之上, 拖车置于距造波机 50 m 处。杆件模型采用 PVC 管, 长 0.6 m, 直径分别为 0.030、0.050、0.075 m。为避免垂向力和水平力的交互影响, 本研究设计了一种垂直杠杆, 如图 1 所示。杆件模型水平置于杠杆底端, 位于水面下 0.3 m、距离垂直杠杆的转动轴 0.8 m 处。受力通过二分力传感器采集, 最大量程 100 N, 置于杠杆顶端, 距离垂直杠杆的转动轴 0.4 m。波高传感器置于杆件模型边侧 0.3 m 处。各个传感器在测量前均经过率定, 其线性置信度均在 0.999 以上。

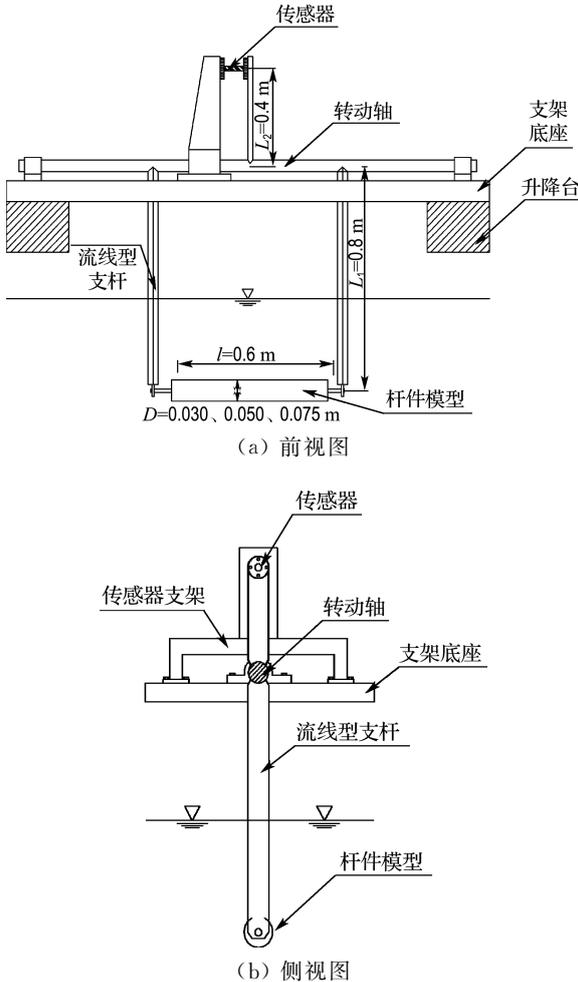


图 1 受力采集装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force collecting device

1.2 试验条件

波高和周期是波浪的两个基本要素。一般常

用 K_c 作为波浪周期的特征参数, 实际上对于一般波浪尤其是深水波浪而言, 由于 K_c 表达式中的水质点最大速度 U_{max} 转换后可与波浪周期 T 抵消, 因此 K_c 的本质是描述波高而非波浪周期的一个特征参数。基于这一考虑, 为更为清晰描述波浪要素对水动力系数的影响, 本文分别定义波高参数 K_H 和波浪周期参数 K_T , 其形式如下:

$$K_H = \frac{\pi H}{D} \tag{1}$$

$$K_T = \frac{gT}{D} \tag{2}$$

深水条件下, 上式定义的 K_H 与 K_c 转换后具有相同的形式。本试验采用的波浪要素设计如表 1 所示。

表 1 试验波浪要素

Tab. 1 Test wave elements

波高 H/m	周期 T/s	波长 L/m
0.1	1.2	2.25
	1.4	3.06
	1.6	4.00
	1.8	5.06
	2.0	6.24
0.2	1.4	3.06
	1.6	4.00
	1.8	5.06
	2.0	6.24
	2.2	7.52
0.3	1.6	4.00
	1.8	5.06
	2.0	6.24
	2.2	7.52
	2.4	8.87

1.3 数据处理

根据文献[11], 本试验中的杆件结构物其特征尺度(直径 D)与波长之比为 $D/L \leq 0.15$, 可以忽略结构物对波浪场的影响, 使用 Morison 方程来计算结构的受力, 考虑到本试验水槽水深 $H_1 = 3.5$ m, $H/H_1 < 0.2$, 波浪场可采用深水线性波浪理论来计算, 杆件的具体计算如下:

$$F = \frac{1}{2} \rho D l u |u| C_d + \rho \frac{D^2}{4} \pi \dot{u} C_m \tag{3}$$

式中: ρ 为密度, D 为模型管直径, l 为模型管长度, u 为波浪水质点速度, \dot{u} 为波浪水质点的加速度, C_d 为拖曳力系数, C_m 为惯性力系数(或质量力系数)。

为获得水动力系数 C_d 和 C_m 在整个波浪周

期内的变化过程,可假设试验测量的数据中,两个相邻的数据点之间水动力系数相同,建立相邻两个数据点的 Morison 方程组如下:

$$F_i = \frac{1}{2} \rho D l u_i |u_i| C_{di} + \rho \frac{D^2}{4} \pi \dot{u}_i C_{mi} \tag{4}$$

$$F_{i+1} = \frac{1}{2} \rho D l u_{i+1} |u_{i+1}| C_{di} + \rho \frac{D^2}{4} \pi \dot{u}_{i+1} C_{mi}$$

联立求解上述方程组,可获得对应该时刻的水动力系数 C_d 和 C_m . 在分析前,需要对测量数据系列进行滤波处理,以获得较为光滑的数据曲线. 在整个波浪周期内,用上述方程组进行递进计算,可获得水动力系数在一个波浪周期内的变化过程.

2 结果与分析

2.1 波浪作用过程中的拖曳力系数变化

拖曳力系数 C_d 在一个波浪周期内呈现典型的 U 形变化,波面位于静水位时, C_d 较大,随着波面的升高或下降, C_d 逐渐减小,并趋于一个固定值,这一规律与文献[9]的研究结果相似. 但本文 U 形规律更为明显,可能是由于本文有效地将水平力进行了剥离,避免了垂直波浪力的干扰所致. 图 2 给出了杆件直径 0.050 m、波高 0.2 m、周期 2.2 s ($K_T=931, K_H=12.34$) 时 C_d 的变化情况(为了显示清晰,图中过滤掉 $C_d > 5$ 的数值部分). 若将 C_d 在整个波浪作用过程中视为常数,采用最小二乘法拟合得到的整体 C_d ,如图 2 中实线所示. 进一步分析整个波浪周期中, C_d 与雷诺数 Re 的关系,如图 3 所示. 由图可见, C_d 随着雷诺数 Re 的增大而减小,当 $Re > 3\ 000$ 时, C_d 逐渐趋于稳定. 在波浪作用过程中, $Re < 3\ 000$ 的时段最大不超过 20%, 并且此时的水质点速度很小,相应的水阻力亦很小,因此,将 C_d 在整个波浪作用过程中视为常数,对整个受力分析总体上不会产生大的影响.

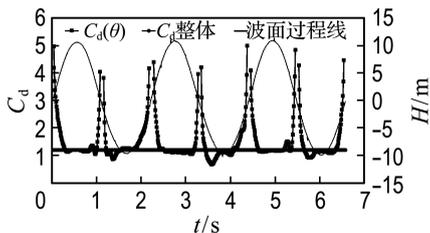


图 2 C_d 与相角的关系

Fig. 2 Relationship between C_d and phase angle

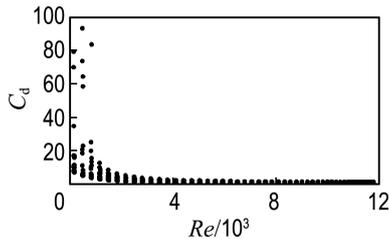


图 3 C_d 与雷诺数的关系

Fig. 3 Relationship between C_d and Re

基于拖曳力系数 C_d 恒定假设,可进一步分析 C_d 与波浪要素 K_H, K_T, Re 的关系,并采用最小二乘法拟合得到以下经验公式:

$$C_d = 1.73 + 0.61 K_H^{-0.3} + 8.1 K_T^{-0.3} - 0.74 Re^{0.1}; R^2 = 0.837 \tag{5}$$

上式中,常数项 1.73 可视为波浪条件下拖曳力系数的特征取值,其余为波浪要素的修正项. 校核分析表明,利用上述拟合公式计算所得受力的相对误差均值为 8.4%,拟合精度较好.

2.2 波浪作用过程中的惯性力系数变化

惯性力系数 C_m 随相角的变化较为复杂,仍以杆件直径 0.050 m、波高 0.2 m、周期 2.2 s ($K_T=931, K_H=12.34$) 的情况为例,如图 4 所示. C_m 取值不仅与波浪要素有关,而且与相角有显著的关系. 为进一步分析 C_m 变化规律,采用傅里叶分析方法将时域下的 C_m 转到频域下进行分析,如图 5 所示.

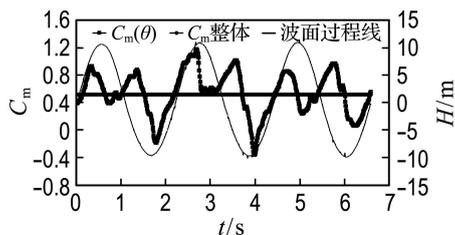


图 4 C_m 与时间的关系

Fig. 4 Relationship between C_m and time

由图 5 可见, C_m 频谱中存在两个峰值点,分别对应波浪的一倍频和二倍频,对应周期分别为 2.195 0 和 1.097 5 s. 因此,可以认为 C_m 由两个周期为波浪周期和波浪半周期的函数叠加而成,可采用以下表达式:

$$C_m = C_{m0} + A \sin(\theta + \varphi_1) + B \sin(2\theta + \varphi_2) \tag{6}$$

式中: θ 为波浪相角, φ_1, φ_2 为初始相角, A, B 为拟合系数,可利用最小二乘法拟合获得. C_{m0} 为惯性力系数的特征常数,与拖曳力系数 C_d 相似,可以

通过假定 C_m 在整个波浪周期内不变, 利用最小二乘法拟合获得其与波浪要素 K_H 、 K_T 、 Re 的关系, 结果如下:

$$C_{m0} = 1.26 + 2.8K_H^{-1} + 168K_T^{-1} - 0.46Re^{0.1};$$

$$R^2 = 0.867 \quad (7)$$

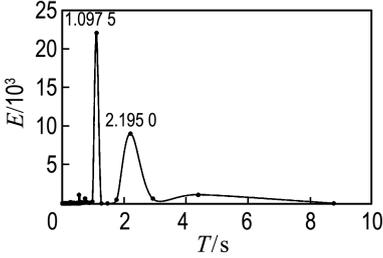
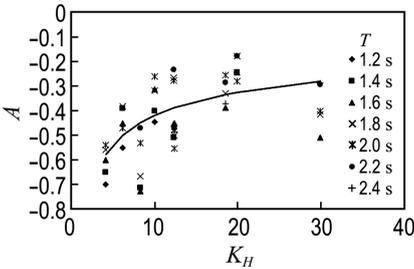


图 5 C_m 频域(周期)分布

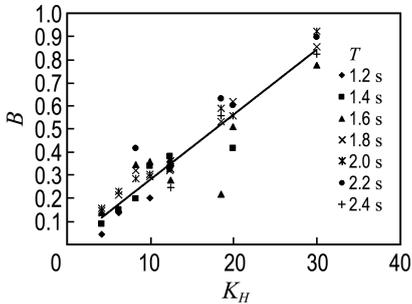
Fig. 5 The distribution of C_m in frequency domain (cycle)

2.2.1 波高参数 K_H 对拟合系数 A 、 B 的影响

图 6 为拟合系数 A 、 B 与波高参数 K_H 的关系图。由图可见, 波高参数 K_H 与 A 的关系较为离散, 随着 K_H 的增大, A 的绝对值存在一定的减小趋势。 K_H 对 B 的影响显著, 随着 K_H 的增大, B 有呈线性增大的趋势, 规律较为明显。 K_H 是影响 B 变化的主要因素。



(a) A 与 K_H 的关系



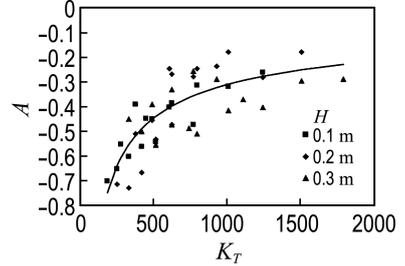
(b) B 与 K_H 的关系

图 6 拟合系数 A 、 B 与波高参数 K_H 的关系

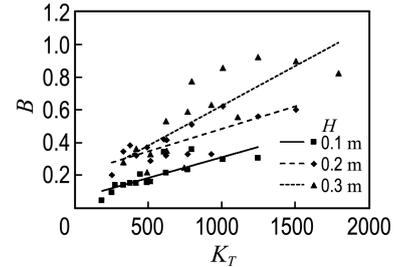
Fig. 6 The relationship between the fitting coefficients A , B and wave height parameter K_H

2.2.2 波浪周期参数 K_T 对拟合系数 A 、 B 的影

响 图 7 为拟合系数 A 、 B 与波浪周期参数 K_T 的关系图。由图可见, K_T 对 A 的影响较为显著, 从整体来看, A 随着 K_T 的增大其绝对值呈幂函数减小。 B 与 K_T 的关系受波高参数 K_H 的影响。由图 7(b) 可见, 在给定波高条件下, B 与 K_T 呈良好的线性关系。且波高越大, B 取值总体越大, 这与图 6(b) 中的规律是吻合的。



(a) A 与 K_T 的关系



(b) B 与 K_T 的关系

图 7 拟合系数 A 、 B 与波浪周期参数 K_T 的关系

Fig. 7 The relationship between the fitting coefficients A , B and wave period parameter K_T

2.2.3 波浪要素 K_H 、 K_T 对拟合系数 φ_1 、 φ_2 的影响

由图 8 可见, 相角的变化规律较为离散, 与波浪要素无显著的相关关系。拟合系数 φ_1 、 φ_2 的离散性在很大程度上来源于试验结果的精确性, 图 9 中的虚线为 C_m 试验结果, 可见数据的变化存在一定的波动。基于上述分析, 对拟合系数 φ_1 、 φ_2 取均值处理, 其中一倍频系数 φ_1 的均值为 $\pi/5$, 二倍频系数 φ_2 的均值接近 0, 在此取 0。

2.2.4 各因子对水动力系数的综合影响 基于上述分析, 采用多元拟合方法得到 C_m 随相角变化时的取值拟合公式如下 ($R^2 = 0.868$):

$$C_m = C_{m0} + A \sin\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + B \sin 2\theta$$

$$C_{m0} = 1.26 + 2.8K_H^{-1} + 168K_T^{-1} - 0.46Re^{0.1} \quad (8)$$

$$A = -8.9K_T^{-0.5} - 0.14K_H^{-0.4} + 0.041$$

$$B = 1 \times 10^{-4} K_T + 0.023K_H - 0.029$$

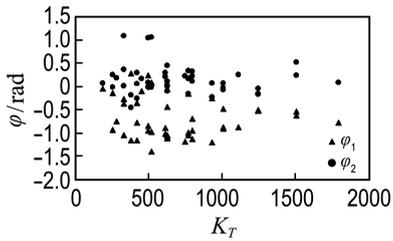
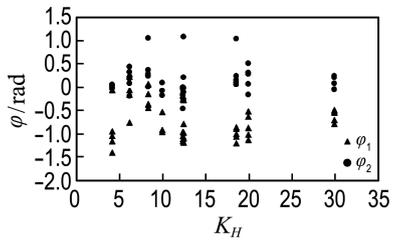
(a) φ_1 、 φ_2 与 K_T 的关系(b) φ_1 、 φ_2 与 K_H 的关系图8 拟合系数 φ_1 、 φ_2 与波浪要素 K_T 、 K_H 的关系

Fig. 8 The relationship between the fitting coefficients φ_1 , φ_2 and wave parameters K_T , K_H

图9为杆件直径0.050 m、波高0.2 m、周期2.2 s ($K_T=931$, $K_H=12.34$)的情况下,由式(8)得到的 C_m 曲线与试验结果比较。由图可见,拟合趋势上总体吻合较好。试验结果由于受波浪稳定性、噪声、结构震动等多种因素的影响,存在一定的误差。

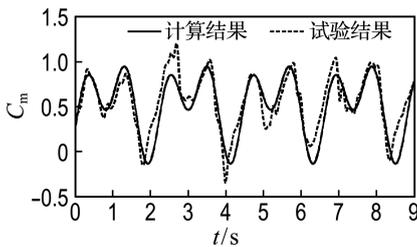
图9 C_m 试验值和拟合值比较

Fig. 9 Comparison of the experimental values of C_m with fitting result

3 结论

(1)水平杆件的拖曳力系数 C_d 在一个波浪作用过程中出现两次U形变化过程。在一个波浪作用过程中, C_d 随着雷诺数的增大而迅速衰减,并在雷诺数接近3000以后趋于定值。考虑到 C_d 较大时波浪水质点速度很小,拖曳力数值较小,且在波浪作用过程中的时段比例不高,因此在计算杆件的拖曳力时,假设 C_d 恒定不变对计算结果不会产生大的影响。

(2)研究表明,水平杆件的拖曳力系数 C_d 与波高、周期和雷诺数等要素均有关系,在波浪力计算分析时,应考虑波浪要素的修正。本文基于拖曳力系数 C_d 在波浪作用过程中恒定不变的假设,拟合获得了拖曳力系数 C_d 与波高、周期和雷诺数等要素的关系公式。

(3)惯性力系数 C_m 在波浪作用过程中,呈现周期性的变化,且存在一倍频率和二倍频率的数值项。分析表明,波高、周期、雷诺数以及相角等要素均对惯性力系数 C_m 存在影响,在波浪力计算分析时,应综合考虑上述影响要素的修正。本文基于试验研究,拟合获得惯性力系数 C_m 与波高、周期、雷诺数以及相角的关系公式。

参考文献:

- [1] 李玉成. 海洋工程技术的新发展[J]. 中国海洋平台, 1998, 13(1):9-12.
LI Yucheng. The new development of offshore engineering technology [J]. **China Offshore Platform**, 1998, 13(1):9-12. (in Chinese)
- [2] SARPKEYA T, ISAACSON M. **Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures** [M]. California: Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [3] 姚晓杰, 桂福坤, 孟昂, 等. 波浪要素对水平圆柱杆件水动力系数影响研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(1):80-87.
YAO Xiaojie, GUI Fukun, MENG Ang, *et al.* Experimental study on hydro-coefficients of horizontal cylinder structure in waves [J]. **The Ocean Engineering**, 2016, 34(1): 80-87. (in Chinese)
- [4] 杨风艳, 邓推, 孙士龙, 等. 浮管结构在波浪中运动的数值模拟[J]. 中国造船, 2012, 53(增刊2): 298-304.
YANG Fengyan, DENG Tui, SUN Shilong, *et al.* Numerical simulation for the motion of floating tube under wave action [J]. **Shipbuilding of China**, 2012, 53(s2):298-304. (in Chinese)
- [5] 康海贵. 不同雷诺数下水平桩柱的水动力特征[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1994, 9(4):388-394.
KANG Haigui. Hydrodynamic force on smooth horizontal cylinder in uniform oscillatory flow [J]. **Journal of Hydrodynamics (Ser. A)**, 1994, 9(4): 388-394. (in Chinese)
- [6] 吴家鸣, 李世龙. 波浪载荷下结构尺度差异对导管架平台结构响应的影响[J]. 科学技术与工程,

2013, **13**(29):8832-8838.

WU Jiaming, LI Shilong. The effects of jacket platform structure differences on its structural responses under the action of wave loading [J]. **Science Technology and Engineering**, 2013, **13**(29): 8832-8838. (in Chinese)

[7] CCS. 海上移动平台入级规范[S]. 北京:中国船级社, 2012.

CCS. Rules for Construction and Classification of Mobile Offshore Drilling Units [S]. Beijing: China Classification Society, 2012. (in Chinese)

[8] 李玉成,滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 2版. 北京:海洋出版社, 2002.

LI Yucheng, TENG Bin. **Wave Action on Maritime Structures** [M]. 2nd ed. Beijing: China Ocean Press, 2002. (in Chinese)

[9] 浦群,林同骥. 振荡绕流的概况和发展[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1990, **5**(2):133-141.

PU Qun, LIN Tongji. The development of oscillatory flow around bluff bodies [J]. **Journal of Hydrodynamics (Ser. A)**, 1990, **5**(2):133-141. (in Chinese)

[10] KEULEGAN G H, CARPENTER L H. Force on cylinders and plates in an oscillating fluid [J]. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, 1958, **60**(5):67-85.

[11] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 1版. 天津:天津大学出版社, 1991:59-62.

ZHU Yanrong. **Wave Mechanics for Ocean Engineering** [M]. 1st ed. Tianjin: Tianjin University Press, 1991:59-62. (in Chinese)

Research on relationship of wave parameters and hydro-coefficient of bar structures

GUI Fukun^{*1}, YAO Xiaojie¹, MENG Ang¹, ZHAO Yunpeng², DONG Guohai²

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The basic relationship between the hydro-coefficients of horizontal bar structures and wave parameters is studied using experimental tests in the tank. An upright lever structure is designed and used to extract the horizontal force curves from the total wave actions. It is considered as an effective way to avoid the interactions from the vertical wave motion. The variation curves of the drag coefficient C_d and the inertial coefficient C_m are obtained by solving the Morison equations in time series. Furthermore, the distribution of the C_m in frequency domain is extracted using Fourier's analysis method and through fitting by trigonometric function, and its relationship with wave parameters is discussed. The research results show that the C_d presents a U-shape variation within the wave period. However, it can still be regarded as a constant in the wave force calculation without causing major errors. The C_m is composed of two parts, the single-frequency part and the double-frequency part. The single-frequency part shows good relationship with the wave period parameter K_T , and the double-frequency part has good relationship with the wave height parameter K_H . The original phase angle is rather discrete, and the average value is used. The empirical formulas of the relationship of hydro-coefficient and wave parameter are proposed for practical use, which agree well with the experimental results.

Key words: horizontal bar structure; hydro-coefficients; wave parameters; wave force; empirical formulas