



导管架杆件波浪力试验研究

李绍武, 张琳琳, 夏陆军

(天津大学 建工学院港口航道与海岸工程系, 天津 300072)

摘要: 采用应变测力法, 测试了导管架竖直和水平杆件上的波浪力随时间的变化过程。利用测得的数据, 并基于莫里森方程和微幅波理论, 用最小二乘法求得惯性力系数 C_M 和绕流阻力系数 C_D ; 再通过拟合法得到惯性力系数 C_M 及绕流阻力系数 C_D 随 K_C 变化的公式, 试验结果为导管架浮游稳定性计算提供了技术支持。

关键词: 莫里森方程; 惯性力系数 C_M ; 绕流阻力系数 C_D ; 应变测力法

中图分类号: P 752

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0007-03

Experimental study on wave forces exerting on jacket structure' element

LI Shao-wu, ZHANG Lin-lin, XIA Lu-jun

(Port, Channel and Coastal Engineering, Construction Engineering College, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Time series of wave forces exerting on the element of the jacket structure are measured respectively by the strain approach. Based on Morison equation and small amplitude wave theory as well as the measured results, we evaluate the inertial force coefficient C_M and the drag coefficient C_D of the Morison equation by the least-squares method, and obtain the fitting formula of C_D and C_M regarding to K_C .

Keywords: Morison equation; inertial force coefficient C_M ; drag coefficient C_D ; strain approach

导管架结构是港口工程中适用于深水海域的新型码头结构形式^[1]。在导管架浮运稳定性计算中, 杆件的波流力计算至关重要^[2]。目前计算小直径管柱波流力一般均采用莫里森公式, 其中的关键是合理确定惯性力系数 C_M 和绕流阻力系数 C_D 。对于规则波作用下竖向管柱惯性力系数 C_M 和阻力系数 C_D 的研究成果较多^[3], 任佐皋等^[4] 根据实测孤立桩柱上的波力过程, 计算了波力系数 C_D 、 C_M 的瞬时值, 认为当 $K_C = 20$ 时 ($K_C = U_m T/D$, U_m 为波浪水质点运动的最大速度, T 为波周期, D 为管柱直径), 可取 $C_D = 1.5$; 当 $K_C = 40 \sim 50$ 时, 可采用 $C_D = 1.8$; 对于阻力优势区的小直径桩, 可采用平均惯性系数 $C_M = 2.0$ 。但是对于 $K_C < 20$ 的短周期波情况以及桩柱水平放置情况未见有研究

成果。

拟通过波浪水槽试验, 对竖直和水平放置的管柱所受波浪力进行测试, 再通过力学分析, 探索莫里森公式的惯性力系数 C_M 和阻力系数 C_D 随 K_C 数的变化规律。

1 莫里森小直径管柱波浪力理论

波、流中柱体受力的莫里森公式^[5]为:

$$f = C_M A_l a_c + C_D A_D |u_c| u_c \quad (1)$$

式中: 第1项为惯性力, C_M 为惯性力系数; 第2项为绕流阻力, C_D 为绕流阻力系数; $A_l = \rho \cdot \frac{\pi}{4} D^2$; $A_D = \frac{1}{2} \rho D$; u_c 、 a_c 分别为水质点的速度与加速度。

收稿日期: 2014-10-23

作者简介: 李绍武 (1962—), 男, 博士, 教授, 从事海岸动力学及岸滩演变研究。

影响 C_M 和 C_D 的因素包括桩柱断面形状、水中姿态、 K_C 数及 Re 数等^[6]。目前从理论上给出 C_D 和 C_M 的计算公式尚有困难, 需要借助试验反推。具体方法是通过试验测得圆管受力时间序列, 再根据莫里森公式和波浪理论, 通过傅里叶法或最小二乘法确定系数 C_D 和 C_M 。

2 管柱波流力试验

2.1 试验装置及原理

将圆管构件置于造波水槽中, 通过造波在圆管构件上产生波浪力, 再通过测试与圆管构件刚性连接的等截面正方形空心钢管的应变来推算圆管构件的波浪力。正方形空心钢管的应变是通过在其上粘贴电阻应变片测试的, 应变片分布见图 1。应变片 $R_1 \sim R_8$ 两两一组, 采用半桥互补接桥方式与动态信号测试仪连接, 进行应变数据实时采集。整个试验装置原理见图 2, 其中水平圆管轴线与波峰线平行。

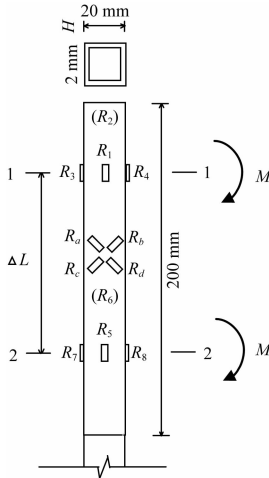


图 1 测力装置应变片布置

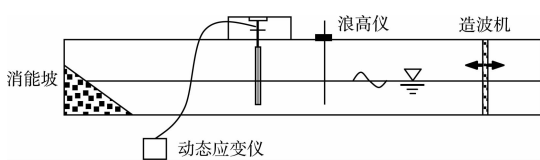


图 2 试验装置

2.2 试验基本条件及组次

试验采用规则波, 试验水深 0.50 m, 各组次波要素见表 1。

表 1 波要素

序号	周期/s	波高/cm
1	1.0	10
2	1.0	13
3	1.4	10
4	1.4	13
5	1.8	10
6	1.8	13

分别对 0.05 m 和 0.10 m 两种管径的圆管分水平和直立两种工况进行试验, 入水深度分别为 15、20、30、40 cm。图 3 为波峰经过管柱瞬间。

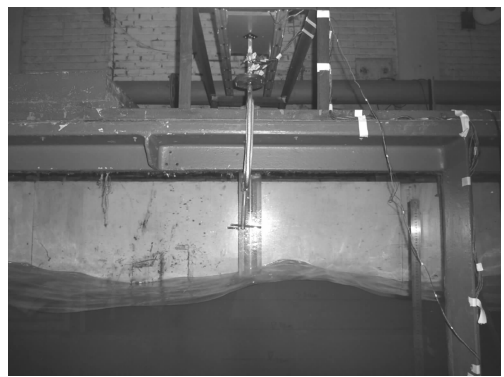


图 3 波峰作用于管柱瞬间

2.3 试验结果分析

1) 竖直管。

根据莫里森公式, 管柱所受的瞬时总波浪力力矩为:

$$M = \int_{z_0}^{d+\eta} \left(C_D \cdot \frac{1}{4} \rho \pi D^2 \dot{u} + C_M \cdot \frac{1}{2} \rho D u |u| \right) (l-z) dz \quad (2)$$

式中: z_0 为管柱底端到槽底面的距离; d 为水深; η 为波面; D 为管径; l 为应变片 $R_1 \sim R_4$ 中心到水面的距离; u 及 \dot{u} 根据微幅波理论计算, 公式为:

$$u = \frac{1}{2} H \omega \cdot \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \cos(\omega t) \quad (3)$$

$$\dot{u} = -\frac{1}{2} H \omega^2 \cdot \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \sin(\omega t) \quad (4)$$

设实测弯矩系列为 M_i ($i = 1, \dots, n$), 则实测值和理论值之间的平方差为:

$$E^2 = \sum_{i=1}^n (M_i - M)^2 \quad (5)$$

据最小二乘法则有

$$\begin{cases} \frac{dE^2}{dC_D} = 0 \\ \frac{dE^2}{dC_M} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

令

$$\begin{cases} \int_{z_0}^{d+\eta} \left(\frac{1}{4} \rho \pi D^2 \dot{u} \right) (l-z) dz = A_i \\ \int_{z_0}^{d+\eta} \left(\frac{1}{2} \rho Du |u| \right) (l-z) dz = B_i \end{cases} \quad (7)$$

则式(6)可写成:

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n A_i^2 \right) C_m + \left(\sum_{i=1}^n A_i B_i \right) C_d = \sum_{i=1}^n A_i M_i \\ \left(\sum_{i=1}^n B_i^2 \right) C_d + \left(\sum_{i=1}^n A_i B_i \right) C_m = \sum_{i=1}^n B_i M_i \end{cases} \quad (8)$$

解得

$$\begin{cases} C_M = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n A_i M_i & \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n B_i M_i & \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n A_i^2 & \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n A_i B_i & \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{vmatrix}} \\ C_D = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n A_i^2 & \sum_{i=1}^n A_i M_i \\ \sum_{i=1}^n A_i B_i & \sum_{i=1}^n B_i M_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n A_i^2 & \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n A_i B_i & \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{vmatrix}} \end{cases} \quad (9)$$

图 4 分别给出了竖直管的 C_M 和 C_D 值随 K_C 数变化的结果, 回归公式分别为:

$$\begin{cases} C_M = 5.32 - \frac{12.76}{1 + \left(\frac{K_C}{0.54} \right)^{0.34}} \\ C_D = 0.75 + \frac{1.20}{1 + \left(\frac{K_C}{7.70} \right)^{11.60}} \end{cases} \quad (10)$$

回归公式的相关系数为 0.98。

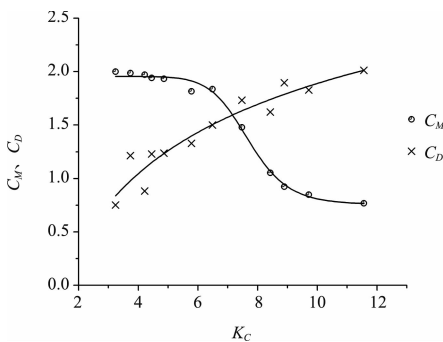


图 4 竖直管 C_M 、 C_D 随 K_C 的变化

由试验结果及所得的关系式(10)可知, 对于竖直管, 当 $K_C = 3 \sim 12$ 时, $C_M = 0.85 \sim 2$, 且 C_M 随 K_C 数的增大而减小, 反映了随着波周期加大, 惯性力成分减小和绕流阻力成分加大, 并趋于定值的趋势; 对于绕流阻力系数, $K_C = 3 \sim 12$ 时, C_D 随着 K_C 数的增大而增大, 同样反映了随波周期增大惯性力成分逐渐减少、绕流阻力成分不断增加并渐近于定值的趋势。

2) 水平管。

根据莫里森公式, 管柱所受的瞬时总波浪力力矩为:

$$M = \left(\frac{C_D}{4} \rho \pi D^2 u + \frac{C_M}{2} \rho Du |u| \right) a l \quad (11)$$

式中: D 为管径; a 为横管长度, $a = 0.6$ m, 横管到应变片的距离 $l = 1.15$ m。

波速仍采用微幅波理论公式(3)计算, 与立管类似, 根据最小二乘法, 得到的有关 C_D 和 C_M 的方程组与方程(8)、(9)完全相同, 只不过其中的积分 A_i 和 B_i 按下式计算:

$$\begin{cases} \frac{1}{4} \rho \pi D^2 u a l = A_i \\ \frac{1}{2} \rho Du |u| a l = B_i \end{cases} \quad (12)$$

图 5 分别给出了水平管 C_M 和 C_D 值随 K_C 数变化的结果, 回归公式分别为

$$\begin{cases} C_D = 1.70 + \frac{1.33}{1 + \left(\frac{K_C}{7.17} \right)^{8.33}} \\ C_M = 2.20 + 0.008 K_C \end{cases} \quad (13)$$

回归公式的相关系数为 0.97。

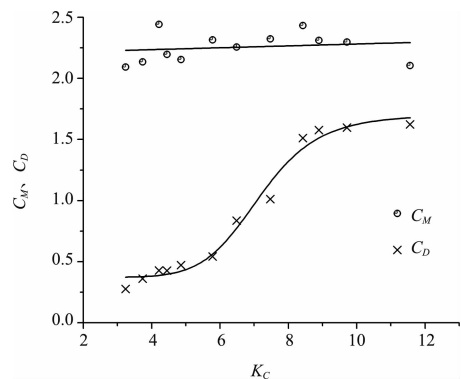


图 5 水平管 C_M 、 C_D 随 K_C 的变化

(下转第 16 页)