

不规则波作用于垂直桩柱上的正向力

俞聿修 张宁川

(大连工学院土木工程系)

摘 要

通过试验,研究了规则波,特别是不规则波作用于孤立桩柱上的正向力。通过测定桩上的总波浪力并利用时域最小二乘法和互谱分析法,研究了Morison公式中的系数 C_D 、 C_M 与 KC 数和雷诺数的关系及其随频率的变化,给出了规则波和不规则波作用下的 C_D 、 C_M 与 KC 数的关系曲线。此外,从波、力之间的相干数角度,对传递函数法计算不规则波浪力的适用范围也作了分析。

用Morison公式计算小直径桩柱上波浪力的关键之一是合理地确定速度力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 。通常认为,这些系数是 KC 数($KC=U_m T/D$)、雷诺数 R ($R=U_m D/\nu$)、柱壁相对糙率和时间的函数。一些学者曾对规则波的作用力做过大量的试验和分析^[1-3],其结果往往比较离散。至于不规则波的作用情况,目前成果还很少,因而更有必要进行系统和细致的研究。

为了便于比较,在相同的条件下我们分别对规则波和不规则波的情况做了试验,然后再用同样的方法,分别在时域和频域确定 C_D 、 C_M 值,并分析它们与 KC 数、雷诺数的关系。试验中采用光滑金属管做桩柱模型。对于 C_D 、 C_M 随时间的变化,目前已有试验结果^[2]表明:在时域内, $C_D(t)$ 、 $C_M(t)$ 的平均值与 KC 数均方根的关系与Chakrabarti和Sarpkaya求得的 C_D 、 C_M 随 KC 数的变化规律相同,因而本文讨论中未考虑 C_D 、 C_M 随时间的变化。

本文的分析是基于线性波理论,因为这种理论既是谱分析的基础,同时一些水槽的试验结果也表明^[5],实测规则波和不规则波的质点水平速度和垂直速度在相当大的范围内(本试验在其范围内)与线性波理论相符。对于不规则波浪力的计算,目前常采用线性化的Morison方程进行谱分析(传递函数法)^[6],或用数值模拟方法在时域模拟波力过程^[7]。在这两种方法中,特别是前者所作的线性化处理的可靠性,有必要通过实验予以检验。此外,本文还对不规则波如何定义(选择)具有代表性的 KC 数也进行了探讨。

一、试验和分析方法

(一) 试验方法和量测仪器

试验是在大连工学院海洋工程研究所的不规则波浪槽中进行的。槽长68.9米、宽2

本文于1987年5月9日收到,修改稿于1987年9月20日收到。

*参加试验工作的还有缪莘、李木国、林异珠等。

米、深1.8米。波浪槽装有引进的电液伺服式不规则造波系统,由PDP11/24计算机控制产生不规则波和同时采集波浪及波力信号。槽的末端设有1:6的架空块石消能坡,消波效果良好。桩柱模型的上端固定在框架上,放置在造波板前29米处。用荷兰制造的浪高仪测波浪,用测力天平同步测量作用于整根桩上的总波力——正向力和横向力。仪器稳定可靠,线性良好。桩长1.3米,桩径有4厘米和6厘米两种。测力系统的自震频率为7—8.3赫〔兹〕,可不考虑动力反应的影响。试验组别列于表1。

不规则波浪采用二种谱形:布氏谱和JONSWAP谱($\gamma=3.3$),简称为B谱和J谱。试验水深固定为1.0米。每次试验的有效采样时间为240秒,共采样6144点,采样时距为

表1 试验组次

一、规则波

组 别	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	
波高 $H(m)$	0.219	0.305	0.099	0.121	0.144	0.256	0.274	0.083	0.097	0.149	0.221	0.228	0.266	
频率 $f(Hz)$	0.65	0.45	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
KC数	$D=0.06$	12.1	20.6	5.5	6.8	—	14.3	15.3	5.6	6.6	10.2	—	15.6	18.1
	$D=0.04$	18.1	30.9	—	—	12.0	—	—	—	—	15.4	22.6	—	—

二、不规则波

试验组号	B2	B4	B44	B5	B55	B6	J1	J2	J3	J4	备 注	
模拟谱形	布 氏 谱						JONSWAP谱($\gamma=3.3$)					
$H_{1/3}(m)$	0.098	0.146	0.156	0.206	0.221	0.27	0.128	0.182	0.255	0.34		
$f_p(Hz)$	0.50	0.40	0.45	0.45	0.40	0.35	0.65	0.50	0.45	0.40	谱峰频	
$T_{1/3}(s)$	1.80	2.19	2.13	2.02	2.27	2.59	1.49	1.77	2.11	2.35		
$(KC)_{1/3}$ 数	$D=0.06$	5.8	9.7	10.1	13.0	15.0	20.2	7.0	10.8	16.6	23.7	以z表示
	$D=0.04$	8.7	14.6	15.1	19.5	22.6	30.3	10.5	16.2	21.9	35.6	以x表示

0.039秒,且采样信号经截止频率为4赫〔兹〕的滤波器滤波。每组试验至少重复三次,各次波浪的重复性很好。本文给出的特征值是各次测量值的均值。

(二) 时域分析确定 C_D 、 C_M

根据前面的讨论,假定 C_D 、 C_M 不随时间变化,基于线性波浪理论,利用最小二乘法把实测总波力过程线与Morrison公式计算值拟合,可得:

$$C_D = \frac{2}{\rho D} \times \frac{\sum(F^m F_1) \sum(F_2^2) - \sum(F^m F_2) \sum(F_1 F_2)}{\sum(F_1^2) \sum(F_2^2) - (\sum F_1 F_2)^2}, \quad (1)$$

$$C_M = \frac{4}{\rho \pi D^2} \times \frac{\sum(F^m F_2) \sum(F_1^2) - \sum(F^m F_1) \sum(F_1 F_2)}{\sum(F_1^2) \sum(F_2^2) - (\sum F_1 F_2)^2}.$$

式中 F^m 为实测总波力过程离散值, $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 为由下式计算的与 $F^m(t)$ 相对应的离散值

$$F_1(t) = \int_0^d u(z, t) |u(z, t)| dz, \\ F_2(t) = \int_0^d \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) dz. \quad (2)$$

这里, ρ 、 D 分别为水密度和桩柱直径; u 、 $\frac{\partial u}{\partial t}$ 分别为质点的水平速度和加速度; d 为水深; z 为坐标原点位于海底柱中心的坐标系纵坐标, 向上为正.

(三) 互谱分析法确定 C_D 、 C_M

Holmes 和 Tickell (1979)^[8] 曾用互谱分析法分析了原型观测资料, 现改用于分析整桩上的总波力. 将 C_D 、 C_M 视为圆频率 ω 的函数, 又设实测波谱、力谱和波、力互谱的实部和虚部分别为 $S_{\eta\eta}(\omega)$ 、 $S_{FF}(\omega)$ 及 $C_{\eta F}(\omega)$ 、 $Q_{\eta F}(\omega)$, 则波、力互谱为

$$S_{\eta F}(\omega) = \frac{1}{2} C_D \rho D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \int_0^d \sigma_u(z) S_{\eta u}(\omega) dz + \frac{1}{4} C_M \rho \pi D^2 \int_0^d S_{\eta i}(\omega) dz \quad (3) \\ = C_{\eta F}(\omega) - i Q_{\eta F}(\omega).$$

式中,

$$S_{\eta u}(\omega) = \omega (\cosh kz / \sinh kd) S_{\eta\eta}(\omega), \quad (4) \\ S_{\eta i}(\omega) = i \omega^2 (\cosh kz / \sinh kd) S_{\eta\eta}(\omega).$$

此处 k 为波数; σ_u 为质点水平速度的均方差, 即

$$\sigma_u^2 = \int_0^\infty \omega^2 (\cosh^2 kz / \sinh^2 kd) S_{\eta\eta}(\omega) d\omega. \quad (5)$$

把式 (4) 代入式 (3), 虚、实部分离后可得:

$$C_D(\omega) = \frac{2g}{D} \sqrt{\frac{\pi}{8}} \sinh kd \times C_{\eta F}(\omega) / [\omega S_{\eta\eta}(\omega) \int_0^d \cosh kz \times \sigma_u dz, \quad (6) \\ C_M(\omega) = -\frac{4g}{\pi D^2} k Q_{\eta F}(\omega) / [\omega^2 S_{\eta\eta}(\omega)].$$

二、 C_D 、 C_M 与 KC 数的关系

(一) 不规则波 KC 数的定义

通常定义 $KC = (U_m T) / D$, 其中 T 为波周期, U_m 为波浪水质点的最大水平速度. 对于不规则波浪, 在一个波列中的各个波浪的 U_m 和 T 都是变化的, 且 U_m 是垂直坐标的函数. 工程上常用某种特征波高及其相应的周期来代表一个不规则波列. 显然, 当采用不同的特征波浪时, 可得到不同的 KC 数. 为此, 我们分别采用最大波、十分之一大波、有效波

有效波高配以谱峰周期及平均波五种特征波浪，又分别取其水面的最大水平速度及其沿水深的均值速度二种速度，这样共可定义得10种 KC 数，然后画出 C_D 、 C_M 相对于这些 KC 数的10组变化曲线，发现点据多数较集中，各组相关曲线定性上无大差别，考虑到目前工程上的习惯和能与规则波比较协调，我们采用有效波及其水面质点的最大水平速度 U_{max} 所定义的 KC 数，以 $(KC)_{1/3}$ 表示，或简称为 KC 。各组实验波浪的 $(KC)_{1/3}$ 见表1。对于规则波，按惯例采用平均波。

(二) 时域分析确定的 C_D 、 C_M

1. 规则波：由式(1)确定的 C_D 、 C_M 如图1所示。随着 KC 的增大， C_D 先是增大，然后有些减小； C_M 则由大减小。与Chakrabarti的实验结果^[3]相比较(图1)，可以看出： C_D 的曲线二者很接近；对于 C_M ，后者的结果普遍偏小。

2. 不规则波：由不同谱形、不同大小的波浪作用在不同直径桩上的总正向力确定的 C_D 、 C_M 与 KC 的关系比较协调和明显(图2)，点据的离散也较小，与规则波相比，其总的变化趋势是相似的，但不规则波的 C_D 值普遍较小； C_M 值在小 KC 数时较小，大 KC 数时两者相近，且介于Chakrabarti与本试验的规则波结果之间(参见图1)。

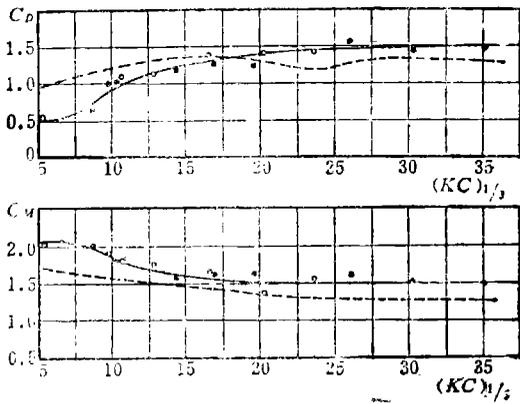


图1 规则波和不规则波情况下的 C_D 、 C_M 比较

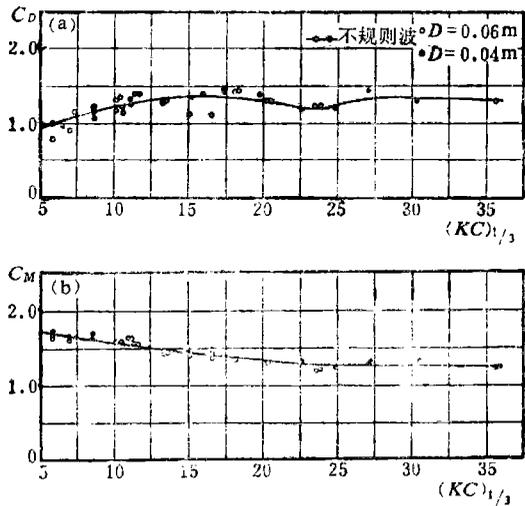


图2 不规则波时的 C_D 、 C_M

(三) 互谱分析法确定的 C_D 、 C_M

由式(6)分析得 $C_D(\omega)$ 、 $C_M(\omega)$ 曲线，图3为其示例。在图3中，同时给出了相应的波谱并发现：在波能量较大的频率范围内， C_M 可视为一个常数，但其数值随 KC 变化(图4)。而 C_D 在 KC 较小时，随 ω 有较大的变化，随着 KC 的增大，在波能分布的主要频域内 C_D 将趋于稳定，但在能量较小的高频侧，有随频率增大的趋势。可以认为，当 $KC > 10$ 时，可视 C_D 在整个频域内为一常数，且不会带来较大的误差，而小 KC 时，速度力的影响很小。将90%能量范围内的 $C_D(\omega)$ 、 $C_M(\omega)$ 平均，得到的 $\bar{C}_D(\omega)$ 、 $\bar{C}_M(\omega)$ 如图4所示，与时域最小二乘法确定的 C_D 、 C_M 值(图上用虚线表示)相比较，除了 C_D 在 KC 较小时(此时速度力影响小)偏小外，其余普遍偏大，因此可以认为，对于不同的计算方法，宜

采用相应的 C_D 、 C_M 值。

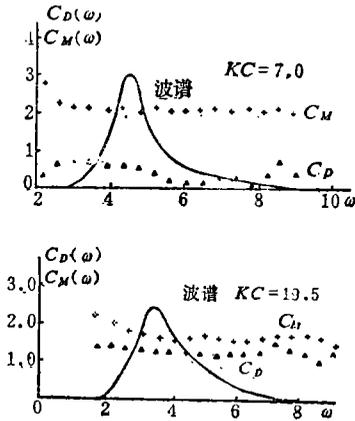


图3 互谱分析所得的 $C_D(\omega)$ 、 $C_M(\omega)$

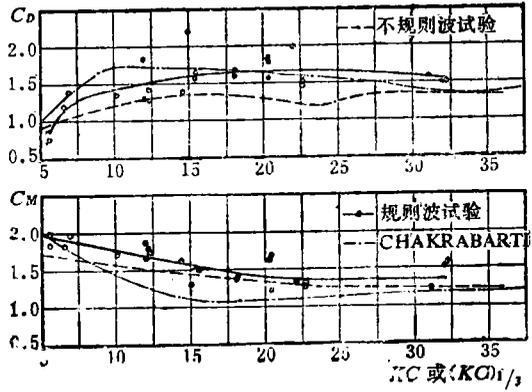


图4 互谱分析所得的 C_D 、 C_M

三、 C_D 、 C_M 与雷诺数的关系

实测不规则波浪力按时域分析法确定的 C_D 、 C_M 与雷诺数 $Re = U_m D / \nu$ 的关系，如图 5 所示。此处 U_m 亦采用有效波的水面最大水平速度， ν 为水的运动粘滞系数，当实测水温为 8°C 时， $\nu = 0.013874$ 厘米²/秒。虽然 C_D 的点据有一定的离散性，但它与 C_M 一样，按桩径不同明显地区分为二组，表明 C_D 、 C_M 与 Re 的关系随桩径变化。对于规则波，其结果与此

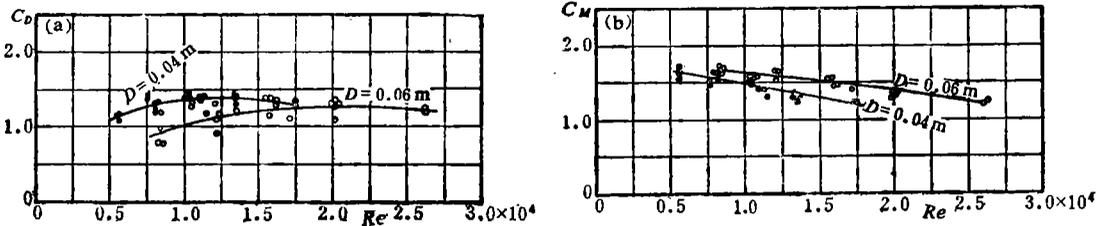


图5 C_D 、 C_M 与雷诺数 Re 的关系 (时域分析)

相似。Reid 和 Wiegel 等人由现场实测也得到过类似的结果⁽⁹⁾。此外，根据我们的实验结果， C_D 与频率参数 $\beta = Re / KC$ 之间也并不像 Sapkaya 所指出的那样存在着较好的相关性。

四、谱分析法计算桩上波力的适用性

谱分析法 (传递函数法) 采用了线性化的 Morison 公式，因而把波浪作用于桩柱上产生波力这一系统视为线性系统，计算比较简单。但应注意，当速度力项所占比例较大时，线性化所带来的误差是不容忽视的。对于不规则波，由于各个波作用时速度力所占比例的不规则性，因而使得判断线性化的影响复杂化。假若把波和力分别看作系统的输入和输出，那么两者间的线性相关程度可用相干数 $r(\omega)$ 来衡量，即

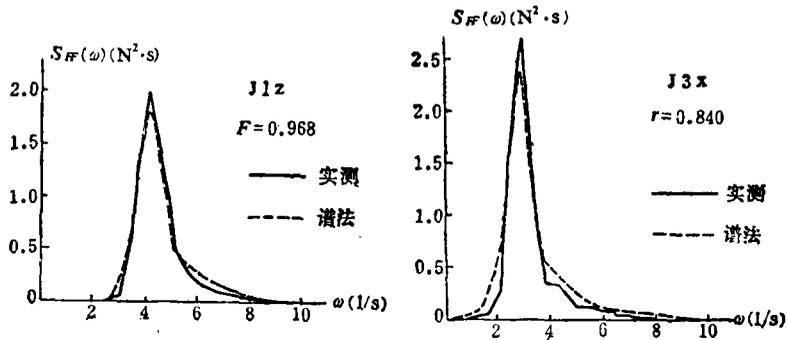


图7 谱分析法所得波力谱与实测波力谱例

(左图内 F 应为 \bar{r} , 右图内 r 应为 \bar{r})

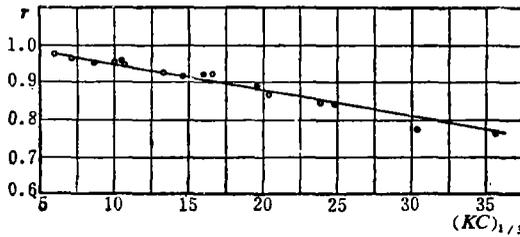


图8 相干数 \bar{r} 与 KC 数的关系

可以看出, 对于 KC 数较小的波浪, 波能集中区的 r 接近于1.0, 谱分析法计算得到的波力与实验值符合良好. 随着 KC 数的增大, 谱峰两侧的 r 值明显减小, 计算波力逐渐偏离实测值. 现取谱峰两侧波能占总能量90%以上范围内的均值 \bar{r} , 它与 KC 的关系见图8所示, 显然他们呈良好的线性相关.

鉴于实用上难以确定 \bar{r} , 因而可用 KC 数作为判别谱分析法适用范围的指标. 根据实验结果, 可以初步认为: 当 $(KC)_{1/3} < 10$ ($\bar{r} \geq 0.95$)时, 谱分析法给出的特征波力接近实测值; 当 $(KC)_{1/3} = 10-20$ ($\bar{r} = 0.88-0.95$)时, 谱分析法计算结果偏小; 当 $(KC)_{1/3} > 20$ ($\bar{r} < 0.88$)时, 谱分析法产生的误差已令人难以接受. Sarpkaya曾在U形水洞中用振动流做过试验^[1], 结果表明: $KC < 10$ 时, 以惯性力为主; 当 $KC > 15$ 时, 阻力项显著增大, 这与上述试验结果基本相符.

六、数值模拟法计算波力

数值模拟法不需要对Morison方程作线性化处理, 它给出的总波力过程线为^[7]

$$F(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [\Phi_M(\partial u_i(z_j, t)/\partial t) + \Phi_D u_i(z_j, t) |u_i(z_j, t)| dz_j], \tag{8}$$

$$\Phi_D = \frac{1}{2} \rho C_D D, \quad \Phi_M = \frac{\pi}{4} C_M \rho D^2.$$

式(8)中 N 为沿水深计算桩上波力的分段数, M 为组成波个数. 计算时取 $N=10$, $M=50$, $dz_j = d/N = 0.1$ 米; u , $\partial u/\partial t$ 为波浪水质点的水平速度和加速度. 计算中利用图2的

七、结 语

1. 在本文试验范围内，无论是规则波还是不规则波，由时域最小二乘法确定的 C_D 、 C_M 与 KC 数相关性良好，而与雷诺数 Re 的关系随桩径变化，所以 Re 不宜用作表征 C_D 、 C_M 变化规律的参数。但应指出，通常受试验条件限制，试验中的 Re 要比原型小得多，同时现有的原型观测资料又很少，因此对 Re 的影响需作进一步研究。

2. 文中对规则波和不规则波分别给出了 C_D 、 C_M 与 KC 数的实测关系曲线，并与Chakrabarti的规则波成果作了对比，总的变化趋势是相似的，只在量值上有些差别。当该成果用于数模法计算桩上的不规则波力时，其计算结果与实测值符合良好。

对于不规则波浪，由时域分析和频域分析所得的 C_D 、 C_M 有一定差别，因此，不同的计算方法应采用相应的 C_D 、 C_M 值。

3. 根据实验结果的分析可以看出，谱分析法（传递函数法）计算桩上不规则波力的适用范围，可由波力和波面间的相干数确定，而相干数与 KC 数有良好的线性相关，故易用 KC 数衡量。文中给出了初步的指标。

4. 前已指出^[6, 7]，数值模拟法计算桩上不规则波力能给出较好的结果，此次实验进一步证明了这一点。采用本文给出的 C_D 、 C_M 值，由数模方法计算桩柱上的不规则波总正向力，在本文试验范围内，多能得到与实测力谱和大特征波力相当接近的结果，并可供实际试用。

5. 试验结果表明，垂直桩柱除了受上述正向波力作用外，还常受横向力（升力）的作用，这种力能使作用于桩上的合力比正向力有明显的增大，而且它的变化频率常较高，对此将另文论述。

鉴于模型试验的局限性，因而试验成果最好能进一步得到原型观测的验证。

本研究是教委科技基金资助课题的一部分，并得到交通部规范科研经费的资助。

参 考 文 献

- [1] Sarpkaya T. and M. Isaacson, *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold, 1981.
- [2] 林建二郎等，波力算定式中的抗力係数および質量係数の时间的变化について，第24回海岸工学講演会文集，1977，337—341.
- [3] Chakrabarti, S. K., *Inline Forces on Fixed Vertical cylinder in waves*, *Journal of waterway, Harbour and Coastal Eng. Div. ASCE*, 1980 WW2, 145—155.
- [4] Vis, F. C., *Orbital Velocities in Irregular Waves*, *17th International Conference on Coastal Eng.*, 1980, 173—185.
- [5] 関根義和・服部昌太郎，波动理论の适用范围に關する実験的研究，第32回海岸工学講演会文集，1985，11—15.
- [6] 俞聿修，孤立桩柱上不规则波浪力的计算，*海洋学报*，2（1980），4：132—146.
- [7] 俞聿修、康海贵，孤立桩柱上不规则波浪力的数值模拟，*大连工学院学报*，21（1982），2：111—118.
- [8] Holmes, P. and R. G. Tickell, *Full scale wave Loading on cylinders*, *BOSS'79*, 1979.
- [9] 奎因著，刘宅仁、范加仑译，*海港工程设计和施工*，人民交通出版社，1980，24.