

東京大学工学部 学生会員 辻岡和男

東京大学工学部 正会員 堀川清司

1 まえがき 柱体に規則波が作用する時の波力については、従来多くの人々により実験が行なわれており、波力の実用公式であるMorison式中の C_D, C_M の値の傾向も大体わかっていいる。実際には海の波は不規則なものであるから、規則波の結果より現地の波力を推定するのは困難であると考えられるが、今のところ不規則波力に関する実験は比較的少ない。そこで、今回の実験では不規則波を柱体に作用させ、不規則波力における C_D, C_M の値の傾向を調べてみることにした。

2 実験 二次元造波水路(全長23m, 幅48m, 高さ1m)に単梁構造の全波力計を取り付け、水深を50cmとした。柱体としては、抗力もきくように、角柱(1辺が15cm, 3cmのもの2本)円柱(径3cm)の計3本を使用し、角柱については波がその面に垂直にあたるように設置した。柱体にはNeumannスペクトルよりシミュレートした不規則波を作用させた。そのピーク周波数は0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 Hzの5通りに、有義波高は約15, 30, 50, 70cmの4通りに変化させることにしたが、造波機や水槽の特性から実験可能であったのはこのうち1/5ケースであった。

3 解析方法 波力はMorison式で表わされるとすれば、以下の方法で不規則波の C_D, C_M が求められる。

①水面変動および全波力の時系列より C_D, C_M の値を求める。

全波力は
$$F_T(t) = C_D \frac{w}{2g} a_s \int_0^d u(t, z) |u(t, z)| dz + C_M \frac{w}{g} v_s \int_0^d \dot{u}(t, z) dz \quad \dots (1)$$

微小振幅波理論を適用し、線型フィルターの考え方を²⁾用いて $u(t, z)$ を用いると

$$u(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty T_u(\omega, z) [\eta(\omega, t) + \eta(\omega, t - \tau)] d\omega \quad \dots (2) \quad \text{ここに} \quad T_u(\omega, z) = \int_0^\infty \frac{\cosh kx}{\sinh kd} \cos \omega \tau d\tau$$

となる。(2)式を用いて $u(t, z) |u(t, z)|$ を z について0から d まで数値積分すれば(1)式の第1項の積分値がわかる。 $\dot{u}(t, z)$ についても線型フィルターを用いて表わせば、 z について解析的に積分できて(1)式の第2項の積分値は

$$\int_0^d \dot{u}(t, z) dz = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty T_A(\omega) [\eta(\omega, t) - \eta(\omega, t - \tau)] d\omega \quad \dots (3) \quad \text{ここに} \quad T_A(\omega) = \int_0^\infty \frac{\omega^2}{k} \sin \omega \tau d\tau$$

となる。結局(1)式は C_D, C_M と未知数として(4)式の形に表現され、全波力の測定値を $F_T^*(t)$ とすると C_D, C_M の値は最小自乗法によって(5), (6)式のように求められる。ただし(5), (6)式中の $\bar{\quad}$ は時間平均をあらわす。

$$F_T(t) = C_D \cdot F_1(t) + C_M \cdot F_2(t) \quad \dots (4) \quad C_D = \frac{\overline{F_1(t) \cdot F_T^*(t)}}{\overline{F_1(t)^2}} \quad \dots (5) \quad C_M = \frac{\overline{F_2(t) \cdot F_T^*(t)}}{\overline{F_2(t)^2}} \quad \dots (6)$$

②水面変動のスペクトル $S_{\eta\eta}(f)$ と全波力のスペクトル $S_{FF}(f)$ から C_D, C_M の値を求める。

Bergmanによれば $S_{\eta\eta}(f)$ と $S_{FF}(f)$ との間には次の関係が成立する³⁾。

$$S_{FF}(f) \approx \left\{ \frac{8}{\pi} \left[\frac{2\pi f}{\sinh kd} \cdot \frac{w}{2g} \cdot C_D \cdot a_s \cdot \int_0^d \sigma(z) \cosh kz dz \right]^2 + \left[\frac{(2\pi f)^2}{k} \cdot \frac{w}{g} \cdot C_M \cdot v_s \right]^2 \right\} S_{\eta\eta}(f) \quad \dots (7)$$

$$\text{ここに} \quad \sigma^2(z) = 2 \int_0^\infty \frac{(2\pi f)^2 \cosh^2 kz}{\sinh^2 kd} \cdot S_{\eta\eta}(f) df$$

実際の全波力のスペクトルを $S_{FF}^*(f)$ とすると、残差を次式で定義すれば

$$D^2 = \int_0^\infty \{ S_{FF}^*(f) - S_{FF}(f) \}^2 df \quad \dots (8)$$

D^2 が最小になるように C_D, C_M の値を求めることができる。

④液高と全波力の確率分布より C_D, C_M の値を求める。

水面変動のスペクトルのバンド幅が狭いとき、近似的に不規則波と規則波とみなし、全波力を M 、液高を H とすれば (9) 式の関係が成立する。従って、 M vs. H のグラフ、および M vs. H^2 のグラフには直線部分が存在するはずであり、それぞれこの傾きから a, b の値、さらに C_D, C_M の値を求めることができる。

$$aM = \begin{cases} (bH)^2 + 0.25 & : 0.5 \leq bH \quad (\text{抗力と慣性力とがバランスするとき}) \\ bH & : 0 \leq bH < 0.5 \quad (\text{慣性力が卓越するとき}) \end{cases} \quad \dots (9)$$

$$\text{ここに } a = \frac{0.5 C_D g k (\sinh 2kd + 2kd)}{v_s^2 8 C_M^2 \omega^2 \sinh^2 kd}, \quad b = \frac{0.5 C_D (\sinh 2kd + 2kd)}{v_s^2 16 C_M \sinh^2 kd}$$

4. 解析結果 ④④の方法により解析を行なったところ、所期の目的に反し抗力があまり小さいというが、ために C_D については精度が悪く、その議論は割愛することにした。④の方法の解析結果を図1に示す。スペクトル解析を行ない、④の方法により解析した結果も図2に示す。その際得られた水面変動のスペクトルバンド幅は極めて狭かったため、④の方法により解析を行なった。水面変動および全波力の記録から zero up cross 法により液高、周期、波力の確率分布を求め、不規則波と、得られた周期の平均 C_M 値を周期とする規則波とみなして計算を進めた。その結果を図3に示す。

なお、図1, 2, 3のパラメーターは④の解析で求めた有義波高を用いて H_g/D を使った。ここに D は円柱では径、角柱では一辺の長さとした。

5. 考察と結論 図1, 3をみると、角柱の C_M の値に若干の違いはあるものの全体的な傾向は非常によく一致している。しかし、図2は少し傾向が異なる。これは④④の方法における近似の度合いが異なるためであり、精度としては④④の順によりと考えられ、④の方法が望ましいであろう。

次に得られた結果を規則波でのそれと比較してみる。図中に示した曲線は、従来得られている規則波による円柱の C_M の値を示すが、不規則波の結果も傾向は同じである。後者が前者の値より少し小さいものの規則波の C_M 値も実はかなりばらついているので、値が違っても言い切れない。角柱の C_M の値は、図1, 2, 3で値が異なるが、 H_g/D が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。筆者が規則波で求めた角柱の C_M の値は、2.5程度であるので、ほぼ不規則波の C_M の値と代用しうるのであろう。一方、木理公式集によれば角柱の C_M の値は2.19 となっているが、今回の実験によれば2.6~2.7 となるのが妥当と考えられる。本論文では C_D の値については、ばらつきが大きいため割愛したが、実用的には定常流中の C_D の値を用いれば波力の推定値にはほとんど影響がないであろう。結局、本論文の結論として次の二つがあげられる。

1. 不規則波の C_M の求め方にはいろいろあるが、どの方法でも妥当な結果が得られ、そのうち④の方法が最もよいと考えられる。
2. 不規則波の C_M の値の傾向は規則波のそれとほぼ同じであり、その値は円柱で1.7~2.0、角柱で2.5~2.7 とすればよい。

参考文献 ① 岩垣雄一・木村晃 オ20日海岸工学講演会論文集 pp463-468 (1973)

② Reid, R.O. Proc. 6th Conf. Coastal Eng. pp 749-786 (1957)

③ Borgman, L.E. Proc. ASCE, Vol. 91, No. WW3, pp 65-90 (1965)

④ Borgman, L.E. Proc. ASCE, Vol. 93, No. WW2, pp 129-156 (1967)

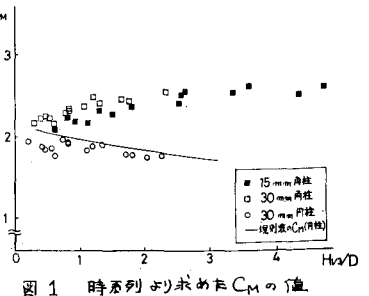


図1 時系列より求めた C_M の値

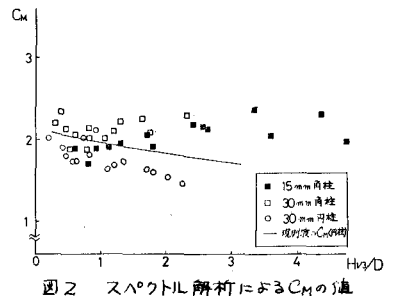


図2 スペクトル解析による C_M の値

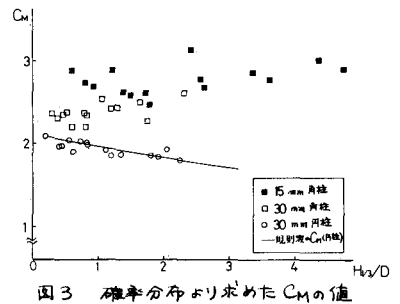


図3 確率分布より求めた C_M の値