

II-68

振動流場における単一スリット壁に作用する水平力の特性について

苫小牧工業高等専門学校 正員 浦島三朗  
室蘭工業大学 正員 近藤倣郎

1. まえがき

スリット壁などの透水性の壁を有する直立消波構造物を設計する際、その波力および消波効果を正確に推定することが要請されるが、基本的な機構である波が透水壁を通過する時のエネルギー損失量の取り扱いが不明なまま残されている。<sup>1)</sup>

このエネルギー損失量は、一般的に実験により係数として取り扱われている。この係数の実験による決定方法について、谷本ら<sup>2)</sup>は係数ある関数形で定め、実験による反射率に最もよく一致するように決定している。角野ら<sup>3)</sup>は、慣性項に関する係数を理論的に取り扱っているが、抗力項に関する係数は実験値の透過率に最もよく一致するように決定している。また萩原<sup>4)</sup>は、本研究と同じように波力実験から決定し、係数ある関数形で定め平均化して使用している。しかしこれらの決定方法は、透水壁の構造条件である空隙率、壁厚などは取り入れられているが、水理的条件であるReynolds数、Keulegan-Carpenter数などの影響については考慮されていない。

そこで著者らは、すでに円柱などの孤立構造物に用いられているMorison式を透水壁に適用して、波動実験における透水壁に働く水平波力から抗力係数 $C_D$ および質量係数 $C_M$ を求め、空隙率、相対

スリット幅、Reynolds数およびKeulegan-Carpenter数で整理してきた。しかし波動場の実験では実験条件の制約上、実流速まで流速の範囲を広げることが出来なかった。そこで定常流実験を行い $C_D$ を求め、Keulegan-Carpenter数の影響および $C_M$ の特性については求めることができなかった<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、新たに作成した振動流実験装置による単一スリット壁の実験を行い、測定水平力から $C_D$ および $C_M$ の係数を求め、Reynolds数およびKeulegan-Carpenter数で整理した。また、それらの係数を使用して水平力を計算し、実験値との比較を行い、その推定精度について検討している。

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験方法

振動流実験装置は、図-1に示すような回転半径を変えるクランク車と周期を変える変速器からなる駆動部およびタンク部と水平部からなるU字型の管水路で構成される。水平管水路部の中央に長さ200cm、幅20cm、高さ20cmの矩形断面の観測部水路をアクリル材で作成した。この装置は、駆動部の回転運動をピストンの水平運動に変換し、観測部水路内に一定の振動流を発生させる。両側

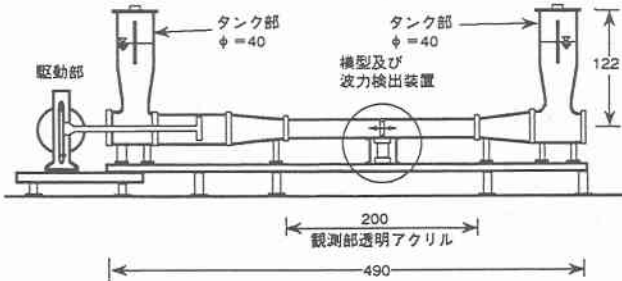


図-1 振動流実験装置概要図 (unit: cm)

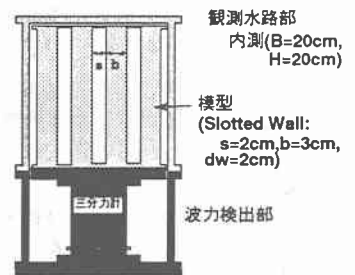


図-2 模型および波力検出装置

Horizontal Force for Slotted Wall by Oscillating Flow Experiment  
by Saburo URASHIM and Hideo KONDO

のタンク部上端は、開放されて大気圧の状態になっている。この装置の能力は、水平管水路内に取り付けられた直径30 cmからなるピストンの最大速度が144.5 cm/secで、観測部水路内における最大水粒子速度は255.35 cm/secとなる。

図-2に示すように、模型のスリット壁に作用する力の検出装置は、三分力計の上にスリット壁を取り付け、分力計の下部を固定し全体として片持梁構造としている。この分力計により水平および鉛直方向の力と横断方向に対する曲げモーメントを測定している。また両側のタンク部に容量式波高計を設置してタンク内の水位変動を測定し、間接的に観測部水路内の水粒子の移動を調べている。

模型に使用したスリット壁は、幅  $b = 3$  cm、厚さ  $d_w = 2$  cm、高さ20 cmの角柱を空隙率  $\lambda = 40\%$ 、スリット幅  $s = 2$  cmで配置したものをを用いている。実験条件は、ピストンのストロークの振幅を70~230 cmの範囲で7種類、周期  $T =$  約1.0~4.0 secの範囲で行った。

## 2. 2 解析方法

スリット壁に作用する全水平力  $F_T(t)$  は、揚力が働かないものとするMorisonが提案した構造物背後の渦によって生ずる抗力  $F_D(t)$  と圧力勾配によって生ずる力ならびに構造物の存在による構造物周囲の流体が加速されるために生ずる力の慣性力  $F_I(t)$  の線形和として式(1)で表される。

$$F_T(t) = F_D(t) + F_I(t) = C_D \cdot f_D(t) + C_M \cdot f_I(t) \\ = C_D \cdot \rho \frac{u \cdot |u|}{2} A + C_M \cdot \rho \dot{u} V \quad \text{---- (1)}$$

ここで  $\rho$  は水の密度、 $\sigma$  は角周波数、 $A$  はスリット壁の投影面積、 $V$  は体積、 $R$  は観測部水路内の水粒子の移動半径である。

観測水路内の水粒子の軌跡  $x$ 、水粒子速度  $u$  および加速度  $\dot{u}$  は、断面の各場所で一様とすると時間  $t$  の関数として式(2)で定義される。

$$x = R \cdot \sin \alpha, \quad u = R \sigma \cos \alpha, \quad \dot{u} = -R \sigma^2 \sin \alpha \quad \text{---- (2)}$$

但し、ピストン部は直径30 cmの円形断面で、観測部は20 x 20 cmの矩形断面であるので、観測部

水路内の水粒子の移動半径  $R$  はピストン運動の振幅を1.767倍しなければならない。

抗力係数  $C_D$  および質量係数  $C_M$  を時間に対し一定と考え、実測と計算の力の差が最小になるように  $C_D$ 、 $C_M$  を求める最小自乗法による方法を用いると式(3)、(4)となる。

$$C_D = \frac{\begin{vmatrix} \Sigma F_T(t) \cdot f_D(t) & \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \Sigma F_T(t) \cdot f_I(t) & \Sigma f_I(t)^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Sigma f_D(t)^2 & \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) & \Sigma f_I(t)^2 \end{vmatrix}} \quad \text{---- (3)}$$

$$C_M = \frac{\begin{vmatrix} \Sigma f_D(t)^2 & \Sigma F_T(t) \cdot f_D(t) \\ \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) & \Sigma F_T(t) \cdot f_I(t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Sigma f_D(t)^2 & \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \Sigma f_D(t) \cdot f_I(t) & \Sigma f_I(t)^2 \end{vmatrix}} \quad \text{---- (4)}$$

時刻  $t$  はタンク内の水位記録から水粒子が右から左へ移動する際の静水面と交わった時刻を  $t = 0$  と定めて算出した。また Reynolds 数 ( $R.E.$ ) および Keulegan-Carpenter 数 ( $K.C.$ ) は次式で定義し、水粒子速度には最大水粒子速度  $u_{max}$  を用いた。

$$R.E. = \frac{u_{max} \cdot s}{\nu}, \quad K.C. = \frac{u_{max} \cdot T}{d_w} \quad \text{---- (5)}$$

ここで、 $s$  はスリット幅、 $d_w$  は壁厚、 $T$  は周期、 $\nu$  は動粘性係数である。

## 3. 実験結果および考察

著者ら<sup>5)</sup> は、波動実験において抗力係数  $C_D$  は  $R.E.$  数が小さな範囲では、 $R.E.$  数の増加とともに  $C_D$  が減少する層流的な抵抗特性を示し、 $K.C.$  数によってその変化のしかたは異なるが、 $R.E.$  数が大きくなるとある一定値に近づく傾向があり、定常流実験における  $C_D$  とほぼ連続している傾向が見られることを確認してきた。また定常流実験の結果から損失水頭係数  $C_l$  を次式の実験式で近似した。

$$C_l = \frac{0.52}{\lambda^{3.0} (d_w/s)^{0.46}} \quad \text{---- (6)}$$

また  $C_l$  と  $C_D$  の関係は、次式のように示される<sup>1)</sup>。

$$C_l = (1 - \lambda) C_D \quad \text{---- (7)}$$

Meiらは次式で示される管路に設けたオリフィスマータでの損失水頭係数  $C_l$  を使用している<sup>1)</sup>。

$$C_l = \left[ \frac{1}{\lambda C_a} - 1 \right]^2 \quad \text{---- (8)}$$

$$\text{ここで, } C_d = 0.6 + 0.4 \lambda^2$$

図-3は各K.C.数における $C_D$ をR.E.数で整理したものである。K.C.数が大きくなると $C_D$ は多少小さくなり、その後またK.C.数の増加とともに $C_D$ は大きくなる傾向が見られる。しかし、 $C_D$ のK.C.数による変化は小さく、R.E.数が変化してもほぼ一定値を示している。式(6)および式(8)を使用し、式(7)で求めた $C_D$ は、 $C_D = 13.5$ および $12.7$ となる。振動流実験の $C_D$ は、これらの $C_D$ の値よりも小さくなり、波動実験の値との連続性がさらに良くなったように考えられる。しかしK.C.数が無限に大きくなると定常流実験の値に等しくなるかどうかについてはさらに検討する必要がある。図中の直線はK.C.数による $C_D$ の変化が小さいと考え、 $C_D$ はR.E.数およびK.C.数に対してほぼ一定値としてその平均を示している。

図-4は各K.C.数における質量係数 $C_M$ をR.E.数で整理したものである。波動実験における $C_M$ は、R.E.数に対してははっきりした傾向が見られず、K.C.数の増加とともに $C_M$ が減少する傾向があった<sup>5)</sup>。またその時の $C_M$ の値は、今回の実験と模型の条件は異なるが、 $C_M = 3 \sim 7$ 程度であり今回の実験値と同程度の値であった。R.E.数の大きな範囲での測定である振動流実験では、各K.C.数における $C_M$ は $C_D$ に比べてバラツキは大きい。全体的にR.E.数が大きくなると $C_M$ も大きくなる傾向を示している。また $C_M$ に対するK.C.数の影響は特にはっきりした傾向は見られなかった。図中の曲線は、K.C.数による $C_M$ の変化を無視して、 $C_M$ はR.E.数が大きくなるに従い大きくなると考え、平均的な値を描いたものである。

図-5は3種類のK.C.数において計算最大水平力 $F_{c,max}$ と測定最大水平力 $F_{m,max}$ を比較したものである。ここで $F_{c,max}$ に用いた $C_D$ 、 $C_M$ の値は図-2、3の平均的な値を図中の曲線から求めている。各K.C.数において水平力の小さな範囲における適合度はあまりよくないが、水平力が大きくなるに従い、 $F_{m,max}$ と $F_{c,max}$ はほぼ一致している。

図-6は3種類のK.C.数において計算最大水平力 $F_{c,max}$ と測定最大水平力 $F_{m,max}$ の差を無次元化して、R.E.数で整理したものである。各K.C.数において

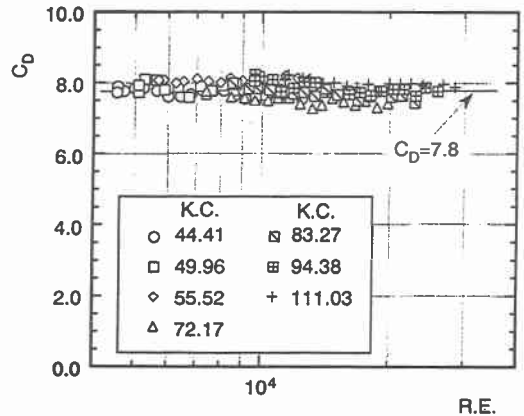


図-3 各K.C.数におけるR.E.数と $C_D$ の関係

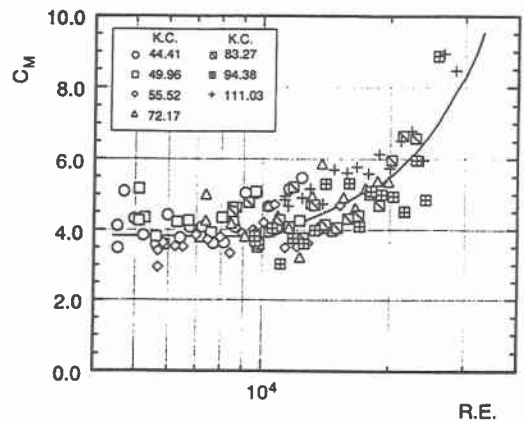


図-4 各K.C.数におけるR.E.数と $C_M$ の関係

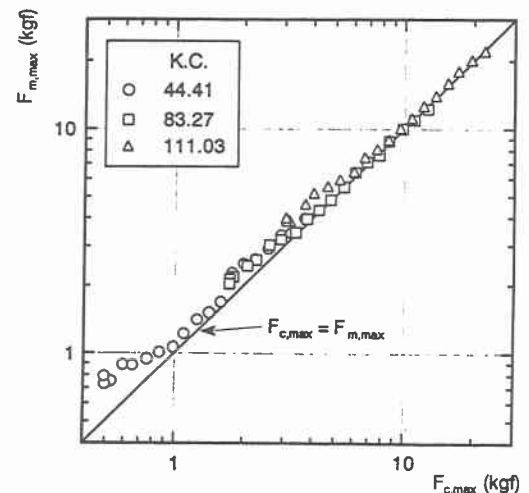


図-5 計算最大水平力と測定最大水平力の関係

RE数の小さな範囲を除くと、ほぼ20%以内の誤差でおさまっている。RE数が大きくなると計算値と測定値の差は10%以内となり、良い精度で最大水平力を推定できる。しかし、各KC数において水平力の推定精度はRE数が大きいところでは良いが、RE数が小さくなるとともに推定精度が悪くなっている。

推定精度が悪い場合の測定および計算水平力の時系列の例を図-7に示す。図中の各水平力は計算最大水平力 $F_{c,max}$ で無次元化して示している。また計算に用いた $C_D$ および $C_M$ は、図-3、4の平均的な値を使用している。図に示されるように測定値には雑音が含まれ、これらを除いて考えると計算値と非常に良く一致している。しかし、今回の実験条件の範囲では抗力が卓越しており、慣性力の値は非常に小さい。このことが図-4に示されたように質量係数 $C_M$ のばらつきを大きくしていると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究において、RE数の大きな範囲における抗力係数 $C_D$ および質量係数 $C_M$ の変化をある程度明らかにした。 $C_D$ はKC数によって若干変化するが、RE数に対してはほぼ一定値をとる。また $C_M$ はKC数に対してはまだ多少の検討を残しているが、RE数の増加とともに大きくなる傾向が明らかにされた。またこれらの平均的な $C_D$ および $C_M$ を使用して、水平力を良い精度で推定することができる。

今後、模型の条件を変えて実験を行うとともに、波動実験および定常流実験との関係についてさらに調べる必要がある。

#### 参考文献

- 1) 近藤俊郎・竹田英章：消波構造物，森北出版，pp.279,1983.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究，港湾技術研究所報告，第21巻第3号，pp.43~77，1982.
- 3) 角野昇八・小田一紀・村本哲二・芳田利春：複素係数の blockage coef.を導入した漸近展開接合法，海岸工学講演会論文集，第33回，pp.407~411，1986.
- 4) 萩原運弘：多重円筒型防波堤の反射率・透過率の解析と

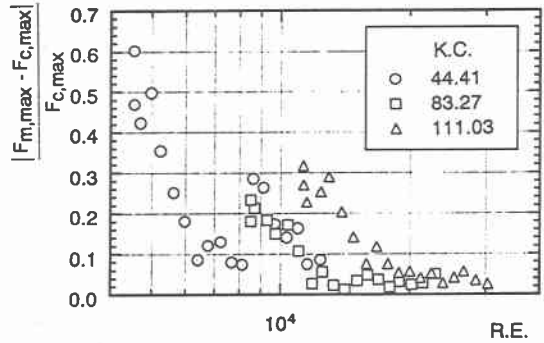


図-6 計算最大水平力と測定最大水平力の誤差

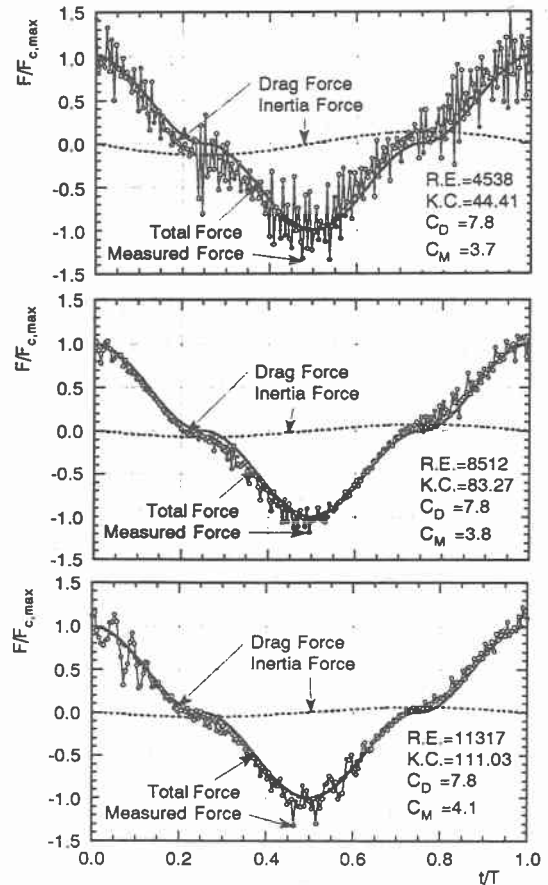


図-7 測定および計算水平力の時系列 (T=3.9 sec)

諸要因の影響，土木学会論文集，第363号，II-4，pp.185~194，1985.

- 5) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：縦スリット壁に作用する波力に関する基礎的研究，海岸工学講演会論文集，第30回 pp.337~341，1983.