

振動流実験によるスリット壁に作用する水平力の推定精度

浦 島 三 朗*・近 藤 俣 郎**

Estimation of Horizontal Force for Slotted Wall by Oscillating Flow Experiment

Saburo URASHIMA and Hideo KONDO

要旨

透水壁を使用したケーソンタイプの直立型消波構造物についての研究は多くされているが、単一透水壁としての水理的特性を調べた研究は少ない。本研究では単一透水壁としてスリット壁を用い、その抗力係数 C_D および質量係数 C_M を振動流実験による水平力から求めた。抗力係数は、Reynolds数の大きな範囲ではほぼ一定値を示し、定常流実験に近い値を示し、また質量係数は、Reynolds数とともに大きくなる傾向を示す。これらの係数を使用して計算した水平力は、実験値と比較的良く一致する。

Abstract

Many studies on the wave energy dissipating structure equipped with pervious wall have been carried out mainly for the breakwater of caisson type, which has a chamber between the pervious front wall and the solid backwall. The hydrodynamic characteristic of the single pervious wall itself which can serve also as a breakwater, however, has not been known for the use of design purpose. In this paper, the drag and mass coefficients (C_D and C_M) of the single slotted row of wall are estimated based on the measured total force on its with the oscillating flow experiment in a water column. The drag coefficient was shown as constant value in the rang of larger Reynolds number, the drag coefficients in oscillating flow are approximated to values in uniform flow. The mass coefficient was shown as function of Reynolds number increase. In oscillating flow test, the experimentally measured forces agree well with the theoretical force computed using the drag and mass coefficients from experiment.

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は、その低反射性より多くの防波堤や護岸に用いられており、特に高度に利用されている内湾などの海域における適用例が多い。さらに、外海に面した高波浪海域における防波堤に対しても、海域の利用上、低反射性が求められることが多くなり、直立消波構造物が適用されるようになっていく。このような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。¹⁾

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²⁾は係数がある関数形で定め、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³⁾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⁴⁾は、本研究と同じように波力実験から決定し、係数が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

* 助教授 環境都市工学科

** 教授 室蘭工業大学 建設システム工学科

抗力係数 C_D および質量係数 C_M を求めてきた。背後に壁のない単一のスリット壁について実験を行い、実験から求められた C_D および C_M を空隙率、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、スリット壁を通過する際の損失水頭から C_D を求め、実流速の範囲の特性をある程度明らかにしてきたが、Keulegan-Carpenter数の影響、 C_M の特性についてはこの実験からは求めることができなかった。⁵⁾

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などの実験を行い、 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、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たものである。

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、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。水平管路部の中央に長さ200 cm、幅20 cm、高さ20 cm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ものである。両側のタンク部上端は、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、観測部水路内における最大水粒子速度が255.35 cm/secである。

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観測している。

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。

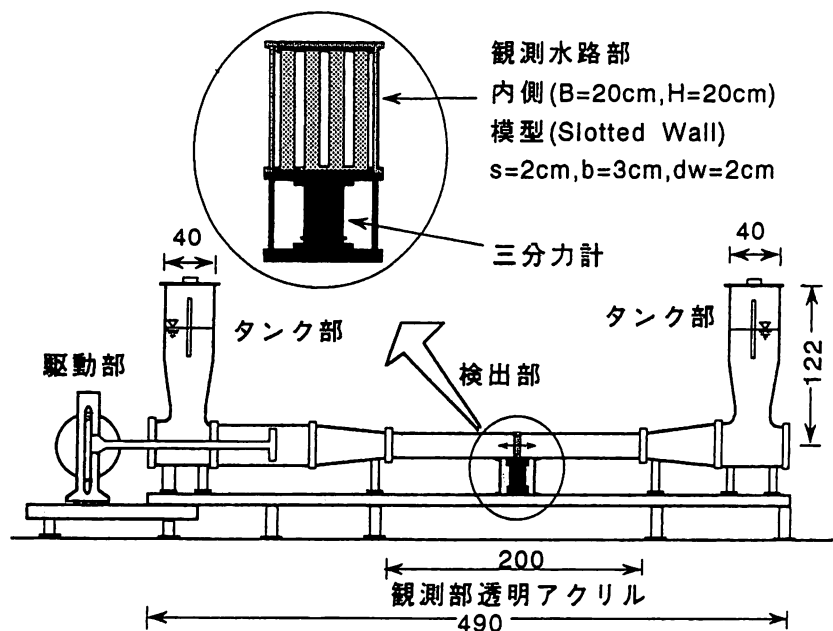


図-1 振動流実験装置 (単位: cm)

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

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、断面の各場所で一樣とすると時間 t の関数として式(2)で定義される。

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

ここで ρ は水の密度、 σ は角周波数、 A はスリット壁の投影面積、 V は体積、 R は観測水路部の水粒子の移動半径である。但し、ピストン部は直径30cmの円形断面、観測部は20×20cmの矩形断面であるので、観測水路部の水粒子の移動半径 R はピストンの振幅を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 を時間の関数として考え、実測の水平力と各時刻 t での式(1)で求められる理論の水平力 $F_T(t)$ が一致するように決定するAl-Kazilyの手法を模して C_D および C_M を求めると式(3)、(4)となる。

$$C_D \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{\begin{vmatrix} F_T(t + \Delta t) & f_I(t + \Delta t) \\ F_T(t) & f_I(t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_D(t + \Delta t) & f_I(t + \Delta t) \\ f_D(t) & f_I(t) \end{vmatrix}} \quad (3)$$

$$C_M \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \frac{\begin{vmatrix} f_D(t + \Delta t) & F_T(t + \Delta t) \\ f_D(t) & F_T(t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} f_D(t + \Delta t) & f_I(t + \Delta t) \\ f_D(t) & f_I(t) \end{vmatrix}} \quad (4)$$

また抗力係数 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(5)、(6)となる。

$$C_D = \frac{\begin{vmatrix} \sum F_T(t) \cdot f_D(t) & \sum f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \sum F_T(t) \cdot f_I(t) & \sum f_I(t)^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum f_D(t)^2 & \sum f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \sum f_D(t) \cdot f_I(t) & \sum f_I(t)^2 \end{vmatrix}} \quad (5)$$

$$C_M = \frac{\begin{vmatrix} \sum f_D(t)^2 & \sum F_T(t) \cdot f_D(t) \\ \sum f_D(t) \cdot f_I(t) & \sum F_T(t) \cdot f_I(t) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum f_D(t)^2 & \sum f_D(t) \cdot f_I(t) \\ \sum f_D(t) \cdot f_I(t) & \sum f_I(t)^2 \end{vmatrix}} \quad (6)$$

時刻 t の算定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 $t = 0$ と定めた。またReynolds数($R.E.$)や

Keulegan-Carpenter数($K.C.$)は式(7)で表され、水粒子速度は最大水粒子速度 u_{max} で定義した。

$$R.E. = \frac{u_{max} \cdot s}{\nu}, \quad K.C. = \frac{u_{max} \cdot T}{d_w} \quad \text{----- (7)}$$

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

3. 実験結果および考察

Al-Kazilyの手法を模して求めた抗力係数 C_D および質量係数 C_M の時系列は、抗力が卓越している領域では C_D が一定値となり C_M が大きな変動を示し、逆に慣性力が卓越している領域では C_M が一定値となり C_D が大きな変動を示すという波動実験⁵⁾と同様の傾向を示す。このことから波動場と同じような水理現象を振動流でも再現されているものと考えられる。

図-2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。 C_D は各 $K.C.$ 数において $R.E.$ 数の変化にかかわらずほぼ一定値を示す。また $K.C.$ 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。波動実験における 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値に近付く傾向があり、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ていた⁵⁾。今回使用したスリット壁の模型は、波動実験および定常流実験に用いた模型緒言と多少異なるので単純な比較はできないが、定常流実験の値よりも小さくなりさらに波動実験の値との連続性が良くなったように考えられる。しかし

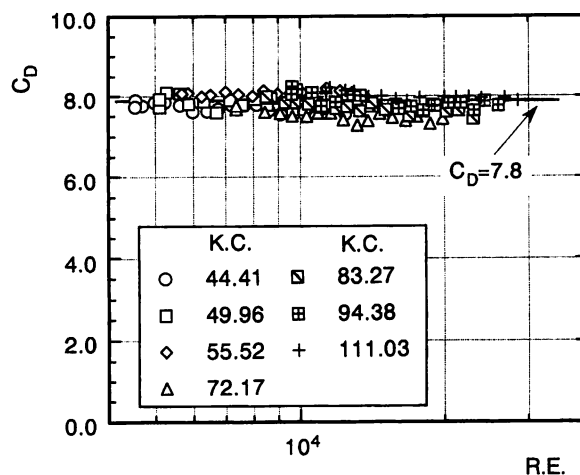


図-2 $R.E.$ 数と C_D の関係

$K.C.$ 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-3は各 $K.C.$ 数における 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⁵⁾。しかし $R.E.$ 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-4は3種類の $K.C.$ 数において計算最大水

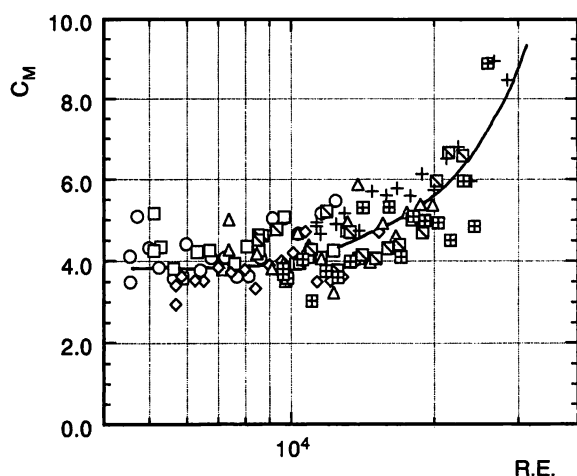


図-3 $R.E.$ 数と C_M の関係

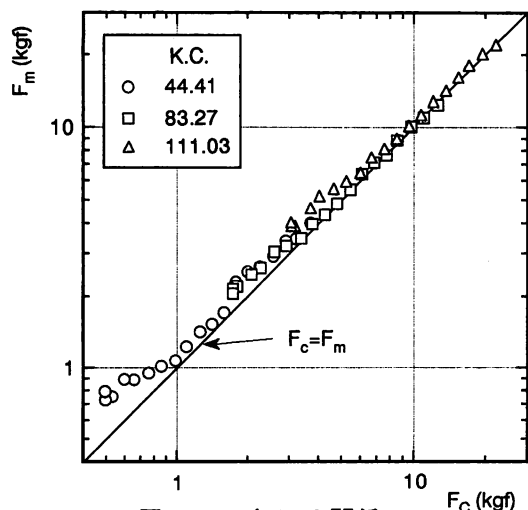


図-4 F_c と F_m の関係

平力 F_c と測定最大水平力 F_m を比較したものである。ここで F_c 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 とほぼ一致している。全体的に F_c は F_m より小さくなっているが、これは測定水平力の時間的変化は完全に正負対称ではなく、 F_m は正負の大きな方の最大値をとっており、 F_c が正側と負側の最大値の中間的な値をとっていることが多いためである。

図-5は3種類の $K.C.$ 数において計算最大水平力 F_m と測定最大水平力 F_m 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 $R.E.$ 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。 $R.E.$ 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 $K.C.$ 数において波力の推定精度は $R.E.$ 数が大きいところでは良いが、 $R.E.$ 数が小さくなるとともに推定精度が悪くなっている。また推定精度が悪い場合は図-4より計算値は測定値よりも小さく見積もっている。これは図-3の C_M の曲線が各 $K.C.$ 数において $R.E.$ 数の大きな範囲では実験値を比較的良く表しているが、 $R.E.$ 数が小さくなるにつれて C_M を実際より小さく見積もっているものと考えられる。

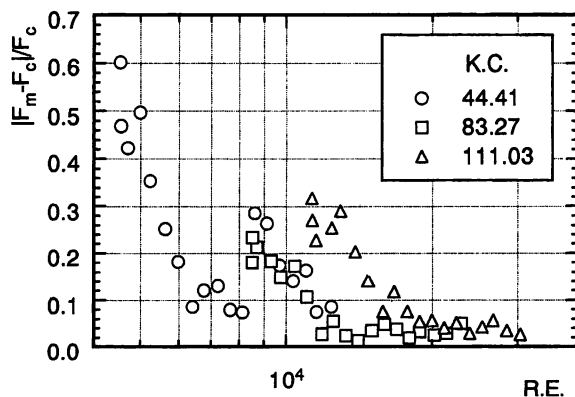


図-5 $R.E.$ 数と $|F_m - F_c| / F_c$ の関係

4. ま と め

本研究において高 $R.E.$ 数における抗力係数 C_D 、質量係数 C_M の変化をある程度明らかにされた。 C_D は $K.C.$ 数によって若干変化するが、 $R.E.$ 数に対してはほぼ一定値をとる。また C_M は $K.C.$ 数に対してはまだ多少の検討を残しているが、 $R.E.$ 数の増加とともに大きくなる傾向が明らかにされた。

推定最大水平力は、 C_D を一定値、 C_M を $R.E.$ 数のみの関数として考えるとほぼ20%以内の精度で推定できる。また今後 C_D 、 C_M を $R.E.$ 数だけではなく、 $K.C.$ 数の関数として表すことができれば、10%以内の精度で推定することも可能である。

参考文献

- 1) 近藤俣郎・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：多重円筒列型防波堤の反射率・透過率の解析と諸要因の影響, 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・近藤俣郎：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.

(平成7年11月30日受理)

