

II-3 スリット壁の抗力係数と質量係数について

苫小牧工業高等専門学校 正会員 雨島 三朗
 苫小牧工業高等専門学校 正会員 石塚 耕一
 室蘭工業大学 正会員 近藤 俊郎

1. まえがき

近年、海岸保全とともに水域の有効利用、港湾内外の静穏および港内の海水汚濁の緩和等の目的で、直立消波型式の防波堤、岸壁の開発、研究がなされ、相次いでその研究成果が発表されている。筆者の1人も複数の消波壁をもつ防波堤にも適用できる変形理論¹⁾²⁾を発表している。しかし波力や反射率などの理論的推定には、抗力係数、質量係数もどのように決定するのが大きな問題となる。多孔壁については近藤ら³⁾⁴⁾⁵⁾によって調べられているが、最近普及しているスリット壁についてはMei⁶⁾の提案があるにすぎない。そこでスリット壁の抗力係数および質量係数を円柱構造物の波力算定に用いられているMorisonの方法を適用し、全波力を測定することにより求めた。両係数の決定方法は、(1) 周期内の2定点から決定する、(2) 最小二乗法を用いて測定波力と理論波力の差が最も小さくなるように決定する、(3) 実測波力を各時間ごとに正確に表現するように決定する⁸⁾、などの方法がある。また水平水粒子速度および加速度に用いる波動理論は重要な検討事項であるが、ここで1部分重複波が対象となるため、波力算定式に用いる波動理論は微小振幅波理論とし、両係数の決定には(2)の最小二乗法の方法および(3)のAl-Kazilyの方法を応用して行い、その結果について考察を行った。

2. 波力算定法および解析方法

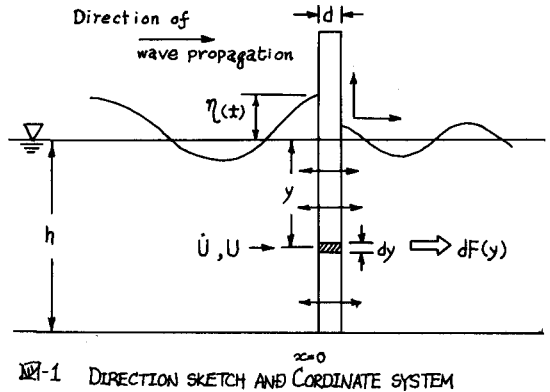
1). 波力算定式

スリット壁構造物に作用する全波力は揚力が働かないとすMorisonが提案した抗力と慣性力の線形和として次式で表わされる。

$$F_{total} = F_D(t) + F_I(t) = C_D(t) \cdot f_D(t) + C_M(t) \cdot f_I(t) \quad \text{---- (1)}$$

$$F_D(t) = C_D(t) \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u|u|}{2} dA \quad \text{---- (2)}$$

$$F_I(t) = C_M(t) \int_{-h}^{\eta} \rho \ddot{u} dV \quad \text{---- (3)}$$



ここで dA , dV は水深方向の積分を容易にするためスリット壁前面の面積を円柱列に換算した単位面積および単位体積であり抗力係数 C_D 、質量係数 C_M は水深方向には変化しないと仮定した。スリット壁透過堤では円柱等の孤立構造物とは異なり反射波を無視することはできないので(2)、(3)式中の水平水粒子速度 u 、水平水粒子加速度 $\ddot{u}$ は微小振幅波理論により部分重複波を考慮して求めた。 a_I = 入射波振幅、 a_R = 反射波振幅、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ として位相を無視するとスリット前面での波形、水平水粒子速度および加速度は次式で表わされる。

$$\eta = a_I \cos(kx - \sigma t) + a_R \cos(kx + \sigma t) \quad \text{---- (4)}$$

$$u = (a_I - a_R) \sigma \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \cos kx \cdot \cos \sigma t + (a_I + a_R) \sigma^2 \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \sin kx \cdot \sin \sigma t \quad \text{---- (5)}$$

$$\ddot{u} = -(a_I - a_R) \sigma^2 \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \cos kx \cdot \sin \sigma t + (a_I + a_R) \sigma^2 \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \sin kx \cdot \cos \sigma t \quad \text{---- (6)}$$

$x = 0$ として式(5)、(6)を式(1)、(2)、(3)に代入し整理すると全波力として次式を得る。

$$F_{total} = \frac{r C_0 R \eta}{2} B(1-\lambda) \frac{(a_I - a_R)^2}{\sinh 2R\eta} \left[\frac{1}{2R\eta} \sinh 2R\eta \left(1 + \frac{\eta}{R}\right) + \left(1 + \frac{\eta}{R}\right) \right] \cos \alpha x \cos \alpha t$$

$$- r C_M B(1-\lambda) d \frac{(a_I - a_R)}{\cosh R\eta} \left[\sinh R\eta \left(1 + \frac{\eta}{R}\right) \right] \sin \alpha x \quad \text{----- (7)}$$

ここで、 r は水の単位体積重量、 B は構造物幅、 d はスリット壁厚、 λ は空隙率である。

2) 抗力係数 C_0 、質量係数 C_M の算定方法

ここでは C_0 、 C_M が水深方向に一定であるとして、実験による波力とスリット壁前面の水位の時間-波形記録を一定時間間隔 Δt で読み取り、その波力が各時刻で式(7)と一致すると考えるなら、任意時刻およびそれから微小時間 Δt 後の時刻において測定されたスリット壁に作用する全波力 F_m は各々次式で表わすことができる。⁹⁾

$$F_m(t) = C_0(t) \cdot f_0(t) + C_M(t) \cdot f_I(t) \quad \text{----- (8)}$$

$$F_m(t+\Delta t) = C_0(t+\Delta t) \cdot f_0(t+\Delta t) + C_M(t+\Delta t) \cdot f_I(t+\Delta t) \quad \text{----- (9)}$$

C_0 、 C_M が Δt 間で変化するものと考え $C_0(t)$ 、 $C_M(t)$ と $C_0(t+\Delta t)$ 、 $C_M(t+\Delta t)$ を各々 $C_0(t+0.5\Delta t)$ 、 $C_M(t+0.5\Delta t)$ で近似する。この両係数を式(8)、(9)に代入し連立方程式を解くと次式の解が得られる。

$$C_0(t+0.5\Delta t) = [F_m(t+\Delta t) \cdot f_I(t) - F_m(t) \cdot f_I(t+\Delta t)] / [f_0(t+\Delta t) \cdot f_I(t) - f_0(t) \cdot f_I(t+\Delta t)] \quad \text{----- (10)}$$

$$C_M(t+0.5\Delta t) = [F_m(t+\Delta t) \cdot f_0(t) - F_m(t) \cdot f_0(t+\Delta t)] / [f_0(t) \cdot f_I(t+\Delta t) - f_0(t+\Delta t) \cdot f_I(t)] \quad \text{----- (11)}$$

上式によ、 $t+\Delta t$ における f_0 、 f_I と測定された $F_m(t)$ 、 $F_m(t+\Delta t)$ を代入することにより時間 t での C_0 、 C_M の近似値を決定することができる。なお、微小時間間隔の取り方によって C_0 、 C_M の値が支配されると考えられるがここでは読み取り時間間隔 Δt は0.10 secとしたため $\Delta t = \Delta t$ とすることによる精度上問題があり、時刻 t と $(t+\Delta t)$ での波力、波形の記録から $\Delta t/5$ の値を線型補足し、 $\Delta t = \Delta t/5$ として解析を行なった。時刻 t の算定は記録紙の送り速度から換算し、水位が上昇して静水面と交わった時刻を $t = -T/4$ とし、その後下り再び静水面と交わった時刻 $t = T/4$ の中間時刻を $t=0$ と定めた。抗力係数 C_0 は自乗された水平水粒子速度に関しての水深方向の積分によって表わされることを考慮し水平水粒子速度およびReynolds数、Keulegan-Carpenter数を次式で定義した。

$$U_{rms} = \sqrt{\int_{-b}^b u^2 dy / (b \cdot \eta)}, Re = \frac{U_{rms} \cdot b}{\nu}, KC = \frac{U_{rms} \cdot T}{d} \quad \text{---- (12)}$$

式中 b はスリット幅、 d はスリット壁厚、 T は周期、 ν は動粘性係数である。

3. 実験装置および方法

実験は長さ19.7 m、幅0.8 m、高さ0.8 mのペンデュラム造波装置が設置されている両面ガラス張りの二次元造波水槽を仕切板により二分割し、その一方にスリット壁を取り付け波力測定部とし、他方は入射波検定部として使用した。造波機の前方1.3 mの位置に波力検出計を設置した。この装置は図-2に示すように波力測定アーム部に25 mm × 6 mmの断面を有する平鋼を用いたアーム上端部を固定し、検出計全体として片持梁構造してある。アーム1本につきその表裏には20.0 cm間隔で計4枚のストレーンゲージを貼り、ブリッジ回路を構成し動歪計を通じてジグザグに記録させた。スリット壁前面の水位はスリット壁より1 cm沖側に設置した容量式波高計に

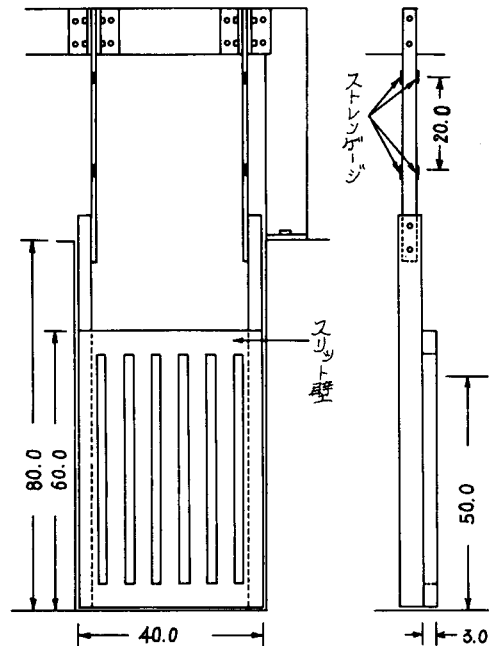


図-2 波力検出装置 (単位: cm)

より同時に記録した。なお本実験では、スリット壁として幅 40 cm, 高さ 60 cm, 厚さ 3 cm のアクリル材を用い、空隙率 λ とスリット幅 b の組み合わせは、 $\lambda = 35\%$ で $b = 28\text{ mm}$ および $\lambda = 25\%$ で $b = 20\text{ mm}$ とした。周期は 1.12 sec ~ 2.38 sec, 波高は約 1.0 ~ 10.0 cm の範囲で行い、前面水深は一定で 50.0 cm とした。

4. 実験結果および解析結果

1) 抗力係数 C_D , 質量係数 C_M の時間的变化

図-3, 4 は前述の方法により得られた C_D と C_M の 1 周期内の時間的变化を示すものであり、横軸に周期 T に対する解析時刻 t/T , 縦軸にはスリット壁前面の水位 η , 抗力係数 C_D および質量係数 C_M の各時刻における値を示している。図中の実線は両係数の 1 周期内において極値を取り除いたものの平均値 $\bar{C}_D$ および $\bar{C}_M$ であり、点線は最小二乗法から求めた C_{D1} および C_{M1} の値を示す。両係数とも時間的変動を示し、内柱および多孔壁の解析結果と同様に C_D は λT が 0.25 および 0.75 近傍でピーク値をとり、 C_M は C_D と 0.25 だけずれてピーク値をとる傾向を示す。この領域において抗力あるいは慣性力が卓越しているため、 C_M および C_D の計算精度が低下することが主な原因で変動が起こると考えられる。特に C_D に対する影響が大きいと思われる。極値を除いたものの平均値 $\bar{C}_D$ および $\bar{C}_M$ は、抗力および慣性力が卓越している領域の C_D , C_M に近い値をもっており、その近傍では各係数の値は比較的安定している。また最小二乗法より求めた C_{D1} は $\bar{C}_D$ にはほぼ一致している。

2) 抗力係数 C_D と Re 数の関係

図-5 には時間的変動をする C_D の極値を除いた平均値 $\bar{C}_D$ を Re 数で整理した結果を示した。スリット壁の抵抗係数 C_{D1} は Mei らによって次のように表現される。

$$C_D = (\frac{S_0}{S_0} - 1)^2, \quad C = 0.6 + 0.4 (S_0/S)^2 \quad (13)$$

ここで S は水路全断面積, S_0 はスリットの断面積, C は流量係数である。また抵抗係数 C_D と抗力係数 C_D の関係は次式で表わされる。

$$C_D = (1 - \lambda) \cdot C_D \quad (14)$$

図中の実線は上式より求めた C_D の値を示す。

実験波の制約のために $250 < Re < 1100$ 程度の範囲しか得られず、また多少変動しているが、 Re 数の増加に伴い Mei らによる推定値に近づいている傾向を示し、全体的傾向としては流速に反比例する層流的抵抗特性を示しているものと思われる。また空隙率 λ の大小による変化は、多孔壁の場合と同様に λ の小さい値の方が大きな値を

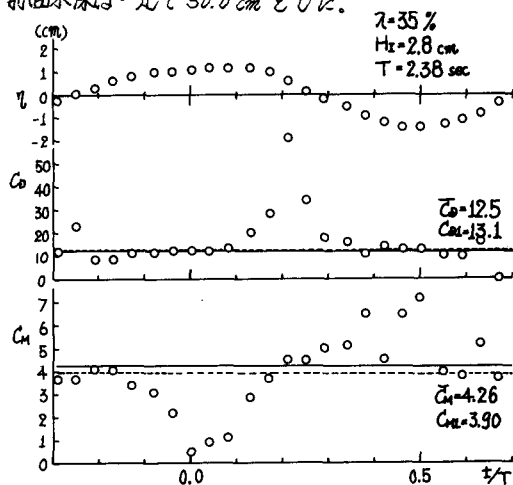


図-3. η と C_D, C_M の時間変動

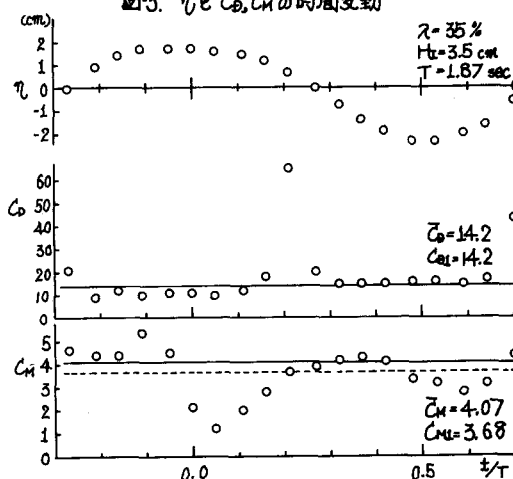


図-4. η と C_D, C_M の時間変動

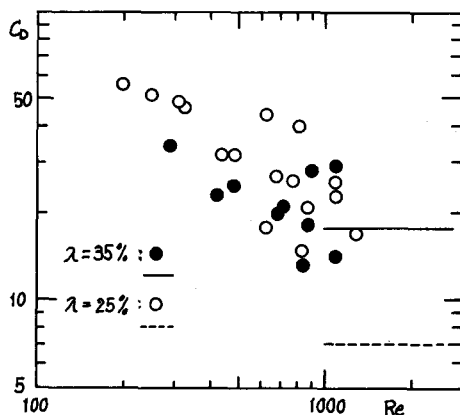


図-5. C_D と Re 数の関係

示す。

3) 質量係数 C_M と K.C. 数の関係

$\psi=7$ 値を取り除いた C_M の平均値 $\bar{C}_M$ と K.C. 数の関係を図-6 に示す。図中の実線は正角柱の値である。 C_M の値は 3~5 程度の範囲にちらばっており、全体的に K.C. 数が増えたと C_M の値は大きくなる傾向を示している。円柱の場合、Kleulegan-Carpenter によれば、K.C. 数は渦の発生機構と密接な関係があり、K.C. 数が小さいほど流水の場が乱れず渦の発生は少ない。これより K.C. 数が小さいほど渦が発生しにくく、渦の発生に起因する抗力が小さくなるため、このような傾向を示すものと考えられる。

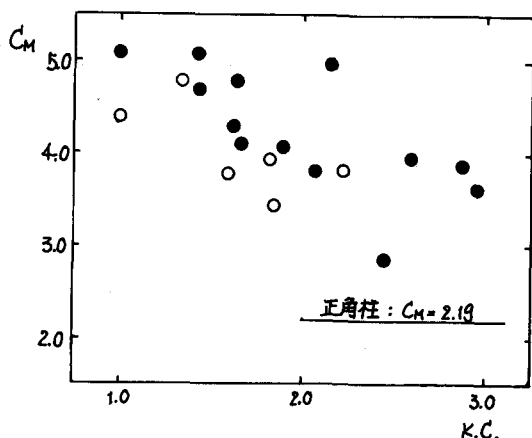


図-6. C_M と K.C. 数の関係

4. あとがき

C_D , C_M の時間的变化は、スリット壁の場合も円柱および多孔壁等とはほぼ同じ傾向を示し、時間変動するこれらの両係数の代表値としては、 $\psi=7$ 値を除いた平均値または最小二乗法より求める方が適当であると思われる。整理方法は C_D については Re 数、 C_M については K.C. 数に対応するようであるが、 C_D においては定常流の値、 C_M については L の影響について今後さらに検討する必要がある。今後は C_D について定常流の値を加えその傾向を明らかにし、また壁厚等の効果を調べていく所存である。

参考文献

- 1) 近藤敬郎：二重透水壁式防波堤の消波理論，第14回自然災害シンポジウム講演会論文集，pp.39~42，1977.
- 2) Kondo, H.: Analysis of breakwaters having two porous walls, Coastal Structures 79, ASCE, Vol. 11, pp.962~977, 1979.
- 3) 近藤・佐藤：波力測定による多孔壁の抗力係数および質量係数の推定，土木学会北海道支部論文報告集，53号，pp.232~237.
- 4) 近藤・佐藤：多孔壁の損失係数と見掛けのオリフィス長さの推定，第26回海岸工学講演会論文集，pp.333~337，1979
- 5) 森山・服部・近藤：多孔壁に作用する波力の特性，第35回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.35~36，1980.
- 6) Mei, C.C., P.L.F. Liu and A.T. Ippen: Quadratic loss and scattering of long waves, Jr. of Waty, Harbors and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 100, WW3, pp.217~239, 1974
- 7) Chakrabarti, S.K., A.L. Wolbert, W.A. Tam: Wave Force on Vertical Circular Cylinder, Jour. of ASCE, WW2, pp.203~221, 1976.
- 8) 土屋・山口：通円柱に作用する全波力について，土木学会論文報告集，第227号，pp.11~21，1974.
- 9) 土木学会：水理公式集