

3 円筒大型構造物による波の変形と作用波力

Wave Deformation by and Wave Force acting on Three Large Circular Cylinders

岩田好一朗*・水谷法美*・金昌済**・真田武**

Koichiro Iwata・Norimi Mizutani・Changje Kim・Takesi Sanada

In this paper, the wave deformation by and the wave force acting on three large circular cylinders are examined experimentally and theoretically, in relation to the case of one- and two cylinders. The wave profile around the cylinders and the wave force acting on them vary, according to the incident wave height, period and propagation direction, and the distance of the cylinders, and they are quite different from the cases of one or two cylinders. The wave deformation and the wave force are shown to be well predicted theoretically by diffraction theory based on the boundary integral method using a vertical line wave source Green's function.

Keywords: diffraction theory, wave deformation, wave force, three large circular cylinders

1 はじめに

最近、浅海域で複数の大型円筒構造物の建設計画が提案され、また、一部既に建設が始まっているものもある。一般に、海中に複数の大口径の構造物が近接して設置される場合、構造物の設置にともなう波の変形および構造物に作用する波力を正確に把握しておかなければならないが、複数の大口径円筒構造物周りの波の変形および作用波力に関する研究は少なく、解明すべき問題点が数多く残されているのが現状である。本研究で取り扱うような大型円筒構造物の場合、入射波は構造物により変形し、いわゆる回折散乱波が形成される。複数構造物を対象とし、回折散乱波を考慮した数値解析解としては、大楠[1973]などがある。また、非線形回折理論の解析解がさまざま提案されているが全ての境界条件を満足しなく問題点を残している。本研究は、3基の大口径の円筒構造物による波の変形および作用波力の特性を、単円筒および2円筒構造物の場合の特性と比較しながら、水理実験と湧き出し分布法に基づく理論解析により考究しようとするものである。

2 数値解析

2.1 速度ポテンシャル

本研究で使用する解析手法について簡単に記述する。本研究では、図-1に示すような三円筒構造物を取り扱うが、鉛直方向に一樣な構造物を対象とするため、計算時間、計算メモリー面でメリットの大きい鉛直線湧き出し関数を使った線形解析を行うものとする。図-2に示すように任意平面形状を有する鉛直柱周りの任意の点 (x, y, z, t) における回折波の速度ポテンシャル $\Phi_D(x, y, z; t)$ は式(1)で与えられる。

$$\Phi_D(x, y, z; t) = \frac{gk \cosh\{k(h+z)\}}{4\pi\sigma \cosh(kh)} \times \int_S F(X, Y) G(x, y; X, Y) dS(X, Y) \cdot e^{-i\sigma t} \quad (1)$$

ここに、 k : 進行波の波数、 h : 静水深、 σ : 角周波数、 (x, y, z) : Φ_D を求める座標点、 (X, Y) : 湧き出し点の位置、 S : 物体の表面要素、 i : 虚数単位、 t : 時間、 F : 湧き出し強さ分布関数で後述する物体表面の不透過条件により決定される未知関数である。また、 G はグリーン関数で式(2)で与えられる。

$$G(x, y, X, Y) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad (2)$$

ここに、 $r = \{(x-X)^2 + (y-Y)^2\}^{1/2}$ で、 $H_0^{(1)}$ は0次の第1種ハンケル関数である。式(1)は、3次元波動場のグリーン関数を核とす

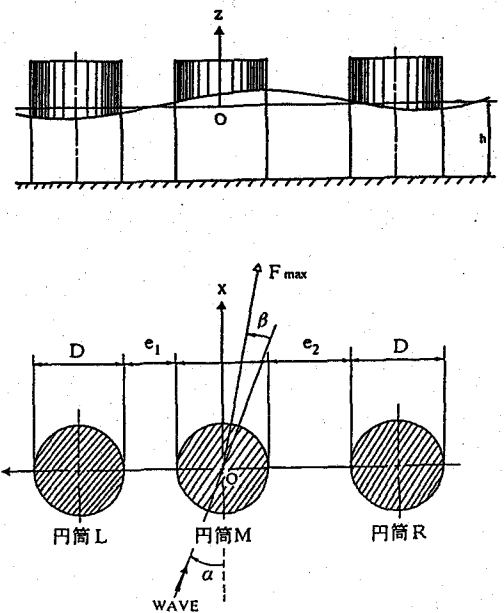


図-1 定義図

- *正会員 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (464-01 名古屋市千種区不老町)
- *正会員 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
- **学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻
- **学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻

る湧き出し分布法から導かれる。すなわち、図-2 の鉛直柱のような場合、湧き出し関数の z に関する関数形が既知であることから面積分における z に関する積分が解析的に行え、式 (1) のような線積分への表示へと導かれるものである。図-2 に示すように断面積分 S を有限個の線積分 $\Delta S_n (n=1 \sim N)$ に分割し、各点の中央点 (X_n, Y_n) に線積分にわたる湧き出しを集合せしめる中央点近似法を採用すると、式 (1) は式 (3) のように書き直せる。

$$\phi_D(x, y, z) = \frac{gk \cosh\{k(h+z)\}}{\pi \sigma \cosh(kh)} \sum_{n=1}^{\infty} F(X_n, Y_n) A_n(x, y) \quad (3)$$

ここに、 ϕ_D は式 (1) の Φ_D より $e^{-i\sigma t}$ を取り除いたものであり、 A_n は式 (4) で表されるものである。

$$A_n = \int_{\Delta S_n} \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) dS(X, Y) \quad (4)$$

物体表面における不透過条件 (式 (5)) を使うと湧き出し分布関数 F が決定でき、式 (3) より ϕ_D が求められる。

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} + \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

ここに、 ϕ_I は入射波の速度ポテンシャルで、微小振幅波により与えられる。

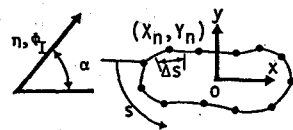


図-2 数値解析の座標系

2.2 水位変動と波力

力学的境界条件より水位変動 η は次式のようにになる。

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (6)$$

ここに、 $\Phi = \Phi_I + \Phi_D$ で、 Φ_I は入射波の速度ポテンシャルである。

波による任意点の動圧は Bernoulli の式より次式のように与えられる。

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (7)$$

式 (7) を円筒全表面にわたって積分すると波力が得られる。

3 水理実験

3.1 実験条件と方法

実験を名古屋大学工学部土木工学科の 3 次元平面水槽 (長さ 30m, 幅 10m, 深さ 0.6m) を使って行った。水槽の一端にはピストン型造波装置が設置されており、他端には 1/10 の勾配を持つ消波斜面が設置されている。水槽内には、先端に勾配 1/15 の斜面を持つ高さ 7cm の水平床を設置し、その上に直径 47.2cm, 高さ 50cm のアクリル製円筒模型を水面から越波しないよう突出させて設置した。波力計 (共和電業製 LSM-50KBS) を水平床に固定した 2 本の支柱に固定し、円筒内に取り付けたアクリル製円盤と波力計とを固定した。その際、円筒が支柱および、水平床に接触しないようにし、円筒表面の不透過条件を確保するために円筒内壁付近に水止めを取り付けた。

静水深は水平床上で 20cm で一定に保ち、3 円筒構造物を対象とし、実験を行った。なお、比較のために単円筒と 2 円筒の場合の実験も若干行った。入射波の周期 T は 1.0 秒と 1.4 秒の二種類、入射波高 H_I は各々の周期に対して 4cm, 6cm, 12cm の三種類変化させた。円筒模型を三基設置した場合には、円筒 L (波の進行方向からみて一番左側の円筒構造物) と円筒 M (真中の円筒構造物) との間隔 e_1 を $1.12D$ と一定に保ち、円筒 R (波の進行方向からみて一番右側の円筒構造物) と円筒 M との間隔 e_2 を $e_2/D = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の五種類変化させた。また、波の入射方向 α を $0^\circ, \pm 22.5^\circ, \pm 45^\circ$ の五種類変化させた。それぞれの条件に対し、波の入射方向およびそれと直交する方向の波力を計測した。

なお、円筒表面から 6.5cm 離れている位置で円筒回りの水位変動を各々の円筒に対して 45° 間隔で八箇所、電気容量式水位計を設置して計測した。計測した波力および水位変動の時間波形を全て磁気テープおよびフロッピーディスクに記録すると同時にペン書きレコーダーに出力させた。

3.2 解析方法

上記の実験条件に対しては、次元解析により構造物周辺の無次元波高 H/H_I と構造物に作用する無次元波力 $F/\rho g H_I^3$ は、Buckingham の π 定理により次式の6つあるいは5つの無次元物理量に大きく支配されると考えられる。

$$\frac{H}{H_I} = \phi_1 \left(\frac{H_I}{h}, kD, \frac{e_2}{D}, \alpha, \frac{r}{D}, \theta \right) \quad (8)$$

$$\frac{F}{\rho g H_I^3} = \phi_2 \left(\frac{H_I}{h}, kD, \frac{e_2}{D}, \alpha, \frac{t\sqrt{gD}}{L} \right) \quad (9)$$

ただし、 $k = 2\pi/L$ で入射波の波数である。最大無次元波力 $F_{max}/\rho g H_I^3$ には $t\sqrt{gD}/L$ を考慮しなくてもよい。

また、最大波力の無次元化は理論解析との比較のため、式(10)を使うことにする。

$$C_s = \frac{2F_{max}}{\rho g H_I D h \tanh(kh)/(kh)} \quad (10)$$

ここで、 F_{max} は最大波力である。

4 実験結果とその考察

4.1 波の変形の特性

図-3(a), (b) および (c) は各々 $kD = 1.624$, $e_2/D = 2$ の場合の円筒表面から $r/D = 0.64$ 離れている位置の3円筒 L , M と R の周囲の θ に伴う無次元波高の変化を示したものであり、縦軸は無次元波高 H/H_I 、横軸は波が円筒に最初当たる点からの角度である。なお、実線は計算結果で、○は実験値である。円筒 L と M の向かい合う側の斜め前面の $\theta \cong 55^\circ$ の波高が一番大きいことが認められる。これは、この二つの円筒間の設置間隔が円筒 M と R より狭い ($e_1/D = 1.12$) ので、反射が大きくなったため、波高が大きくなったと考えられる。

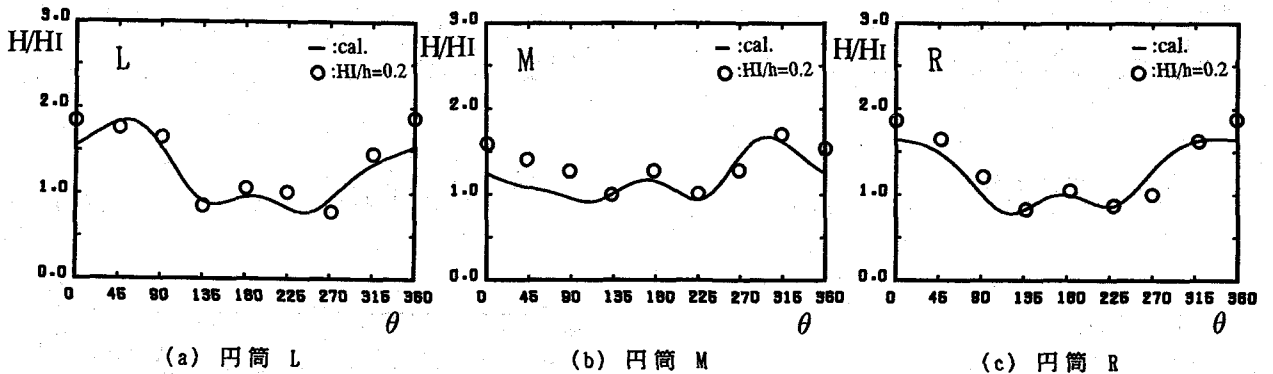


図-3 三円筒周辺の波高分布 ($kD=1.624$, $\alpha=0^\circ$, $e_2/D=2.0$)

一方、円筒 M と R の向かい合う側の円筒 R 周囲では、二つの円筒間の設置間隔が比較的広い ($e_1/D = 2$) ので円筒 R の近傍の最大波高は円筒 L 近傍の最大波高より大きくない。また、中央の円筒 M の全周囲の波高は、円筒 L および円筒 R による回折散乱波の影響を受けるため入射波高より大きくなっている。図-4 は2円筒の場合を示した一例であるが、3円筒の場合と同様実験値と理論値の対応は極めて良好である。このように、実験値と計算値との対応はかなり良好であり本研究で採用した回折理論で波高の分布を精度よく予測できる。

図-5～図-7 に数値解析によって計算した3円筒周辺の等波高線図を示す。単円筒の場合、本論で図示しないが、円筒前面で生じる最大波高は入射波高の約1.6倍程度であるが、3円筒の場合の最大波高は、入射角度にもよるが、入射波高の約1.6～2.0倍まで増大し、構造物の多い方が最大波高は大きい。入射角度 $\alpha = 0^\circ$ 、円筒 M と R の設置間隔 $e_2/D = 1$ の場合

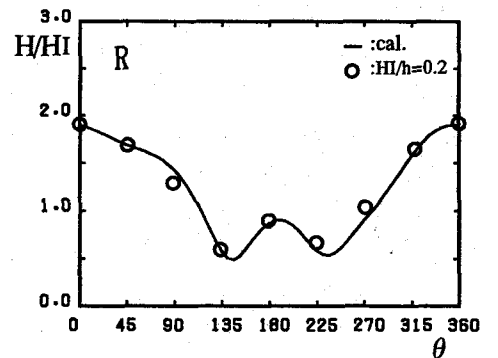


図-4 二円筒周辺の波高分布 ($kD=2.448$, $\alpha=0^\circ$, $e_2/D=2.0$)

の波高(図-5 参照)は、設置間隔 e_1 と e_2 がほぼ等間隔であるため円筒 M を中心に対称となっている。しかしながら、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $e_2/D = 2$ の場合の円筒前面の波高は、図-6 に示すように、円筒 L 、 M および R の順に大きくなっている。これは、円筒の設置間隔によって各々の円筒からの回折散乱波の位相が変化し、これらの回折散乱波が互いに重なり合ったり打ち消し合ったりするため、設置間隔が比較的広い円筒 R の前面の最大波高が円筒 L の前面の最大波高より大きくなったと考えられる。なお、円筒の設置間隔 e_2/D が広くなるにつれて円筒 R の前面の最大波高は大小を繰り返し、単円筒前面での値に近づいていくことが認められた。一方、波が斜めに入射する場合、最大波高は直角入射する場合よりも大きくなる傾向がある。これは、波の入射方向からみた円筒間の設置間隔は斜め入射の場合の方が狭いため、より大きく反射するためであると考えられる。なお、全体的に、 y 方向(円筒の直列方向)の変化が、直角入射の場合に比べて、大きくなる。特に、中央の円筒 M 周辺の波高は円筒 L および円筒 R からの回折散乱波の影響により複雑に変化する。

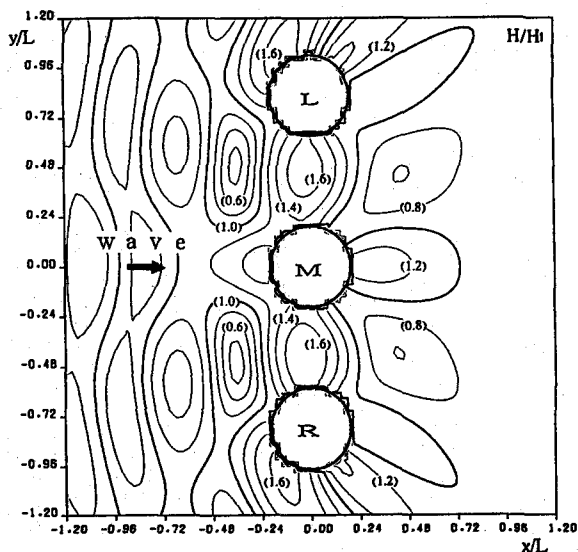


図-5 等波高線図
($kD=2.448$, $\alpha=0^\circ$, $e_2/D=1.0$)

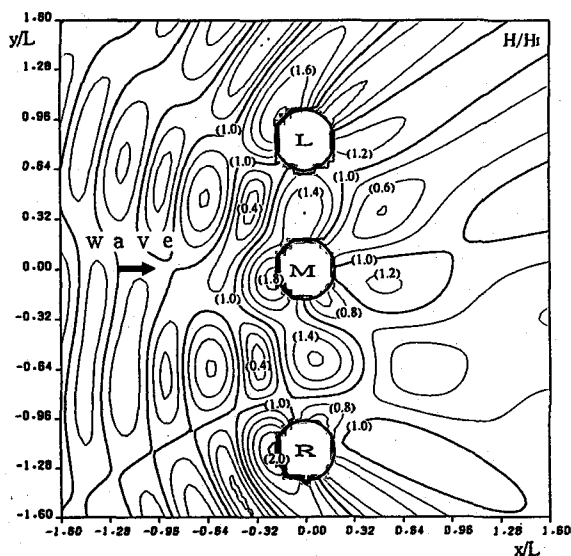


図-6 等波高線図
($kD=2.448$, $\alpha=0^\circ$, $e_2/D=2.0$)

4.2 波力の特性

回折散乱波の影響をもっとも受けやすい中央の円筒(円筒 M)および設置間隔を変える円筒 R に作用する無次元最大波力の特性を中心にして論議する。

図-8 は、 $kD = 1.624$ で $\alpha = 22.5^\circ$ の場合の円筒 L 、 M 、 R に作用する無次元波力 C_s とその波力の作用方向 β と e_2/D の関係を示した一例である。なお、図中の実線の曲線は三円筒の場合の回折理論による値、破線の直線は二円筒のみ($e_1/D = 1.12$)の場合の値である。破線より大きい実線の曲線の値が R の円筒の設置にともない波力 C_s が増大する領域を示す。同図によれば、波高が小さい $H_1/h = 0.2$ のときは C_s の実験値と理論値は比較的良好に一致していることが認められる。しかし、波高が大きくなるにつれて波力の絶対値は波高と共に大きくなるが、無次元化した値は $H_1/h = 0.4, 0.6$ と大きくなるにつれて理論値より小さくなっている。このことより、線形理論では波力は波高に比例するが、波高が大きくなると、波高の増加率に比べて波力の増加率

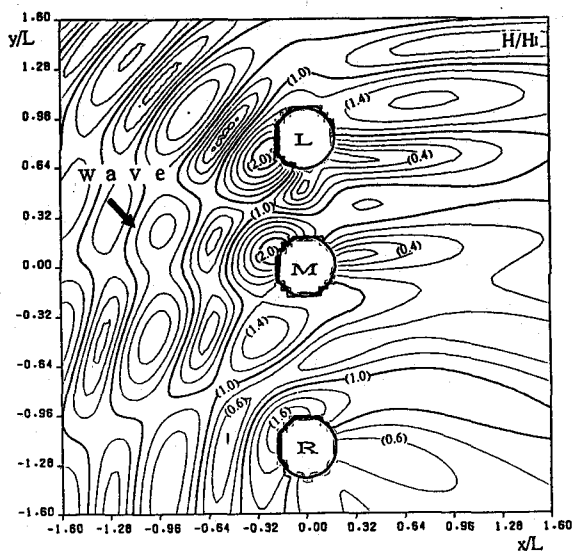


図-7 等波高線図
($kD=2.448$, $\alpha=45^\circ$, $e_2/D=2.0$)

は小さくなると言える。これは、波の非線形性の影響あるいは、抗力と慣性力が打ち消しあったためと推測される。一方、波力の作用方向 β の実験値は理論値とよく対応していることが認められる。このように線形理論で波力およびその波力の作用方向の概略は充分計算できることが指摘できる。

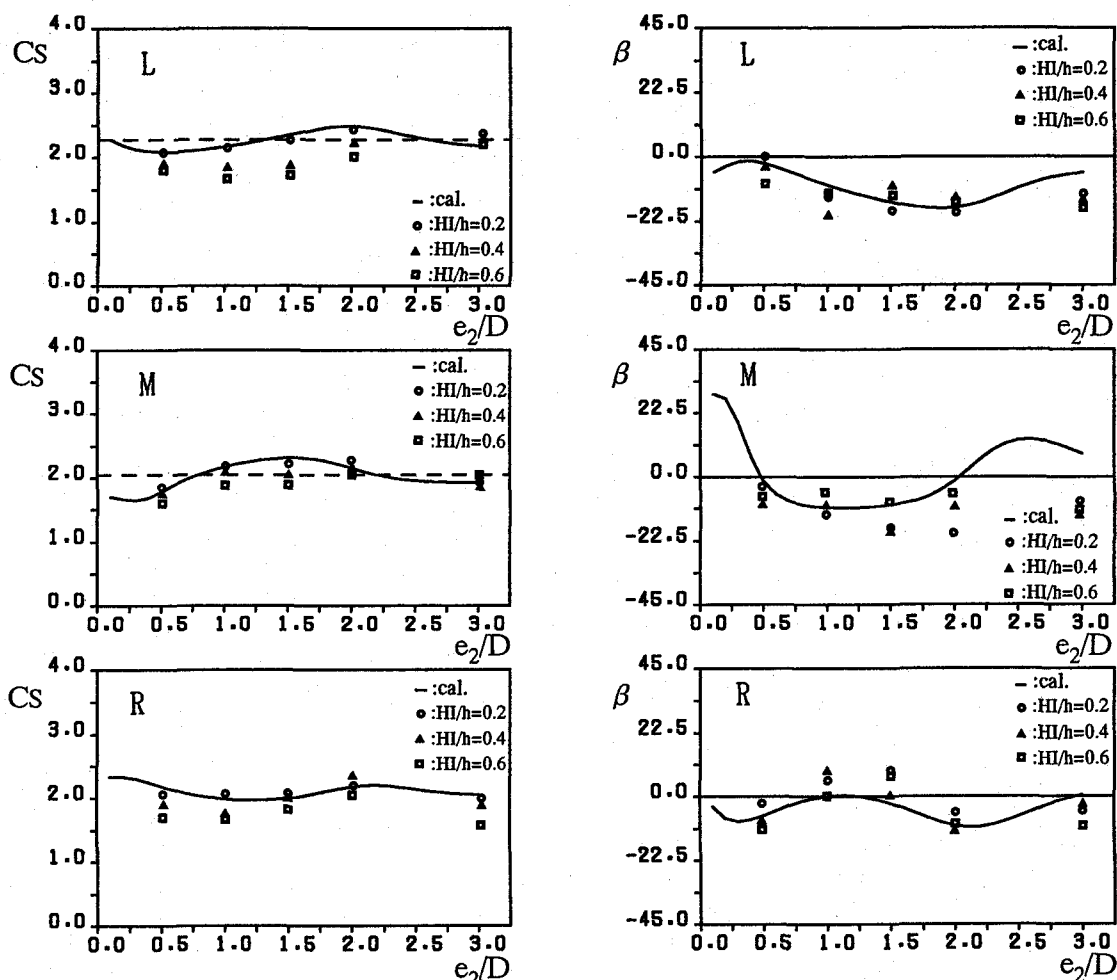


図-8 三円筒の C_s と β と e_2/D の関係 ($kd=1.624$, $\alpha=22.5^\circ$)

図-9～図-12 は $kd=2.448$ と 1.624 に対する円筒 M に作用する無次元波力 C_s と e_2/D の関係を入射波の方向 α 別に示したものである。図-8 と同様、実線は 3 円筒の場合の理論値、破線は 2 円筒 (円筒 L と M) の場合の理論値である。実験値と理論値との対応は、図-8 と同様、 $H_I/h=0.2$ の場合は極めて良好であるが、 $H_I/h=0.6$ のように波高が大きくなると無次元波力 C_s は線形理論値より小さくなることが認められる。また、図-8～図-12 によれば、全体的に、回折散乱係数 $kD=2.448$ の方および斜め入射波の方の波力の変動は大きいことが認められる。 $kd=2.448$, $\alpha=45^\circ$ の $e_2/D \cong 0.25$ の場合に最大波力および $e_2/D \cong 1.25$ の場合に最小波力が現れ、回折散乱波の影響および入射角度が大きいほど波力の変動が大きいことがわかる。なお、入射角度 $\alpha=45^\circ$ に対して $kd=2.448$ の場合の方が $kd=1.624$ の方より最大波力が大きくなり、回折散乱波の影響すなわち回折散乱係数 kD が大きいほど構造物が受ける最大波力も大きくなる。

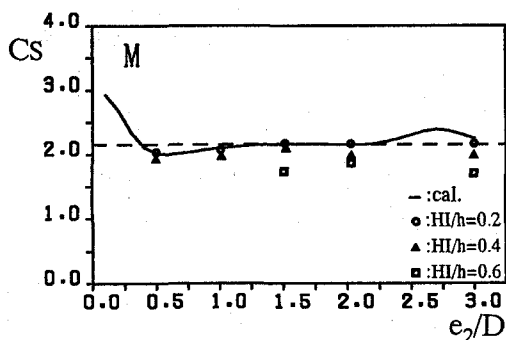


図-9 三円筒の C_s と β と e_2/D の関係 ($kd=2.448$, $\alpha=0^\circ$, 円筒 M)

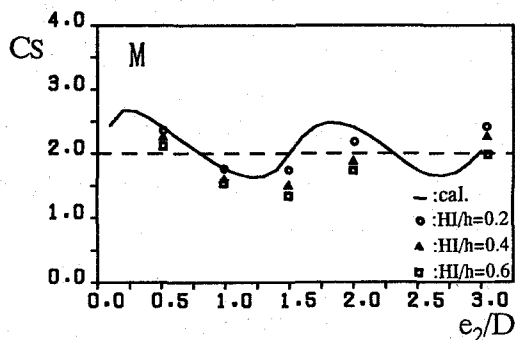


図-10 三円筒の C_s と β と e_2/D の関係 ($kd=2.448$, $\alpha=45^\circ$, 円筒 M)

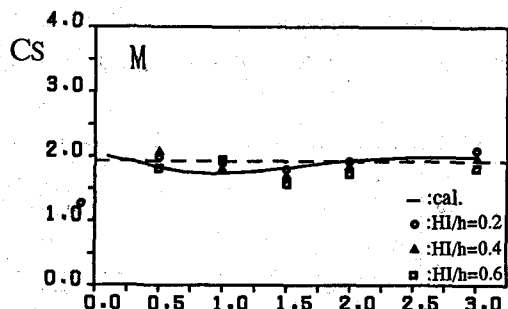


図-11 三円筒の C_s と β と e_2/D の関係 e_2/D
($kD=1.624$, $\alpha=0^\circ$, 円筒 M)

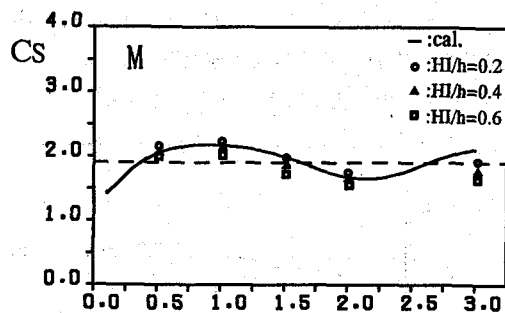


図-12 三円筒の C_s と β と e_2/D の関係 e_2/D
($kD=1.624$, $\alpha=45^\circ$, 円筒 M)

図-13～図-14 は、入射角度 α と円筒 R の設置間隔 e_2/D ともなる円筒 R に作用する無次元最大波力 C_s の変化を示した無次元等波力線図である。 $kD=2.448$ の場合が $kD=1.624$ の場合より複雑な様相を表すのがわかる。なお、 $kD=2.448$ および $kD=1.624$ とも入射角度が -22.5° , -45° の付近の波力の変動がもっとも複雑であり、最大または最小波力もこの領域で現れる。このことより、波が斜めに入射する場合は、沖側円筒 R は岸側の円筒 M と L からの回折散乱波の影響を強く受けることがわかる。

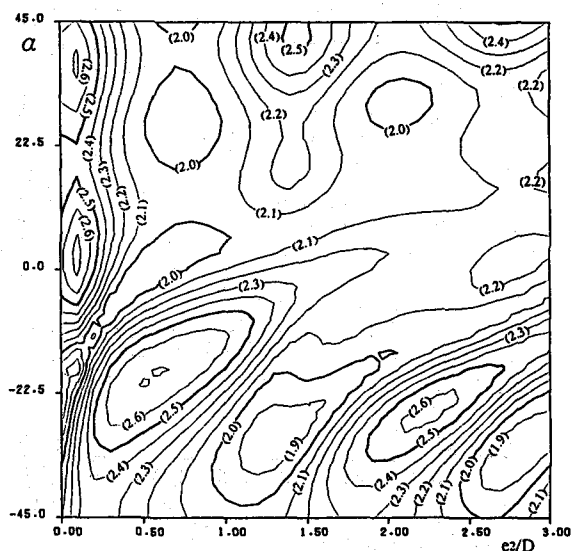


図-13 α と e_2/D の変化に伴う C_s の値
($kD=2.448$, 円筒 R)

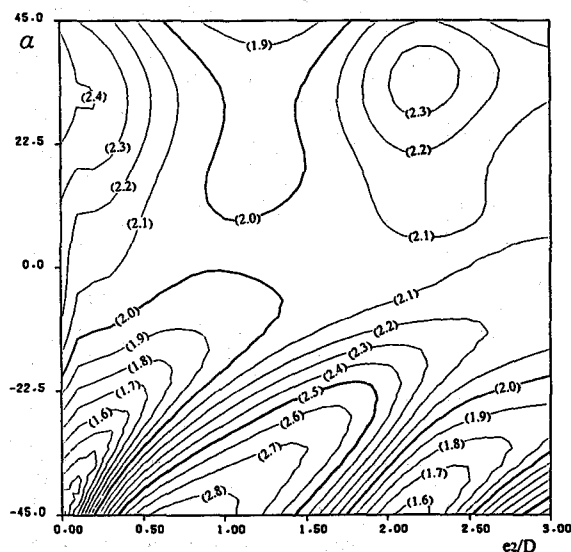


図-14 α と e_2/D の変化に伴う C_s の値
($kD=1.624$, 円筒 R)

5 結論

本研究によって得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) 3円筒大型構造物周辺の波動場と作用波力は波の入射角、設置間隔および回折散乱係数の大小により大きく変動する。
- (2) 構造物周辺の最大波高は、単円筒の場合は、入射波高の約 1.6 倍程度であるが、3円筒の場合は 1.6 ～ 2.0 倍程度にまで増大する。また、波が斜めに入射する場合の最大波高は直角入射の場合よりも若干大きくなる。
- (3) 回折散乱係数が大きいほど波力の変動および最大波力も大きくなる。
- (4) 中央の円筒 M の場合、回折散乱係数 $kD=2.448$ 、入射角度 $\alpha=45^\circ$ および円筒の設置間隔 $e_2/D \cong 0.25$ の場合に最大波力、 $e_2/D \cong 1.25$ の場合に最小波力が作用する。
- (5) 斜め入射波の場合、沖側円筒 (円筒 R) に作用する波力の変動は大きい。
- (6) 回折理論に基づく境界積分法による理論値は非碎波の実験値とよく一致し、3円筒大型構造物に作用する波力と波の変形を精度高く推算することができる。

参考文献

- 1) 大楠 丹：複数本の鉛直円柱に働く波力について、日本造船学会論文集，第 131 号，pp.53-64，1972。
- 2) Isaacson, M. Q. : Vertical cylinders of arbitrary section in waves, J. of Waterway, Harbours and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 104, pp. 309-322, 1978.