

複数の大口径円筒構造物周辺の波動場の特性に関する研究

金 昌 済* ・ 真 田 武** ・ 今 井 聡**
宮 池 克 人*** ・ 岩 田 好 一 朗****

1. 緒 言

近年、浅海域に複数の大口径円筒構造物が建設されるようになってきた。いうまでもなく、構造物周辺の波動場の特性を解明することは、構造物周辺の流れを含む沿岸海域の環境面のみならず、構造物の耐波設計の面からも極めて重要である。特に、入射波と回折波とで重合波動場が複雑に形成される複数の大口径円筒構造物を対象とし、構造物周辺の波動場の特性を平均流速や平均水位変動をも含めて考究した研究はこれまで皆無といっても過言ではない。

したがって、本研究では、複数の大口径円筒構造物周辺の波高、平均水位の変動、最大流速や平均流などの波動場の特性を、単円筒構造物の場合と比較しながら、水理実験と数値解析により明らかにしようとするものである。

2. 水 理 実 験

水理実験を名古屋大学工学部土木工学科の平面水槽(長さ28m×幅11m×深さ0.8m)で行った。水槽一端にはピストン型造波装置が、他端には1/10勾配をもつ消波斜面が設置されている。また、円筒からの回折波の水槽の側壁による反射を防ぐため、水槽の側面に消波フィルタを付けて極力消波に努めた。水理実験では静水深 h を20cm、入射波の周期を1.4sおよび入射波高 H_I を5.7cmと一定にし($H_I/L=0.031$)直径 $D=47.2$ cmまたは90cmの2種類の円筒構造物を各々水槽中央部に設置した。直径 $D=47.2$ cmで入射角度 $\alpha=0^\circ$ (直角入射)の場合、構造物間の設置間隔 e を $1D, 2D$ および $3D$ の3種類、直径 $D=47.2$ cmで入射角度 $\alpha=45^\circ$ の場合、構造物間の設置間隔 e を $1D$ 、直径 $D=90$ cmで入射角度 $\alpha=0^\circ$ の場合、構造物間の設置間隔 $e=1D$ と $2D$ の2種類変化させた。そして、構造物周辺の水位変動と流速(底面から1.5cm)を10~25cm間隔の格子上で最大100地点で、さらに、耐波安定に最も重要な位置である円筒回り

の波高と流速を円筒表面から $r/D=0.53$ (r は円筒中心から半径方向の距離)の円周上 22.5° 間隔で計16地点で詳細に計測した。なお、比較のため、単円筒($e/D=\infty$)周辺の水位変動と流速を同様の条件で計測した。計測した水位変動と流速の時間波形を50Hzで離散化し、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解析に使用した。なお、反射波の影響を極力小さくするために水位と流速の計測を造波直後約30秒間に限定して行った。

3. 数 値 解 析 の 方 法

実験結果の項で後述するように、本実験では、発生波の波形勾配が若干大きいこともあり、複数の円筒構造物周辺では冲向きの平均流が卓越するとともに、平均水位が空間的に変化する。したがって、このような波動場の記述には非線形回折理論が必要となるが、現在、正確な非線形回折理論はないので、本研究では下記の方法で数値解析を行うことにする。すなわち、水位変動と流速変動については有限振幅性の波についてもかなりの精度を持ち、且つ複数円筒の場合にも適用できる線形理論に基づく湧き出し分布法(Isaacson, 1978)を使うものとする(岩田ら, 1993)。そして、平均水位については、摂動法を使用した2次オーダーの算定式を誘導し、その中に含まれる1次オーダーの値として上記の湧き出し分布法で得られた値を使った。なお、Kriebel(1990)は単円筒を対象とし、MacCamy and Fuchs(1954)の回折理論を使って平均水位変動を算定したが、複数円筒への適用が困難であることを付記しておく。また、平均流速については、平均流に関する連続式とRadiation stressを含む運動方程式(例えば、斉藤ら, 1988)を使って計算した。まず、平均水位変動の算定法について略記する。流体は非粘性で非圧縮性とし、流体運動は非回転とするとき、自由水面における力学的境界条件は次式のように与えられる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + g\eta = 0; \quad z = \eta(x, y, t) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 (x, y, z) は直交座標系で、 x と y は水平軸であ

* 学生会員 工修 名古屋大学大学院 土木工学専攻
** 学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻
*** 正 会 員 工博 中部電力(株)火力・原子力開発グループ部長
**** 正 会 員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

り、 z は静水面を原点として上向きを正とする鉛直軸、 g は重力加速度、 t は時間、 $\Phi = \Phi_I + \Phi_S$; Φ_I は入射波の速度ポテンシャル、 Φ_S は回折散乱波の速度ポテンシャルは速度ポテンシャルおよび η は水位変動である。式(1)の速度ポテンシャル Φ および水位変動 η を次のように摂動展開する。

$$\Phi = \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 + \dots, \quad \eta = \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 + \dots \quad \dots(2)$$

ここに、 ε は微小パラメータである。式(1)を静水面 $z=0$ のまわりにテーラー展開して式(2)を代入し、2次オーダーである ε の2次項のみをまとめると次式のようなになる。

$$\eta_2 = -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \right)^2 \right\} + \eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial z^2} \right]; \quad z=0 \quad \dots(3)$$

上式で、ポテンシャル Φ と水位変動 η を次のようにおく。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \text{Real}(\phi_1 e^{-i\sigma t}), & \Phi_2 &= \text{Real}(\phi_2 e^{-2i\sigma t} + \bar{\phi}_2) \\ \eta_1 &= \text{Real}(\zeta_1 e^{-i\sigma t}), & \eta_2 &= \text{Real}(\zeta_2 e^{-2i\sigma t} + \bar{\zeta}_2) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

ここに、Real は実数部、 ϕ_1, ϕ_2 はそれぞれ1次、2次の速度ポテンシャルの複素振幅、 $\bar{\phi}_2$ は定常ポテンシャル、 ζ_1, ζ_2 はそれぞれ1次、2次の水位変動の複素振幅、 $\bar{\zeta}_2$ は平均水位変動、 i は虚数単位 ($\sqrt{-1}$) および σ は角振動を示す。式(3)に式(4)を代入し、平均水位変動 $\bar{\zeta}_2$ に対して整理すると次式のようなになる。

$$\bar{\zeta}_2 = \frac{1}{4g} \left(\frac{\sigma^4}{g^2} |\phi_1|^2 - \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right|^2 - \left| \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right|^2 \right) \quad \dots(5)$$

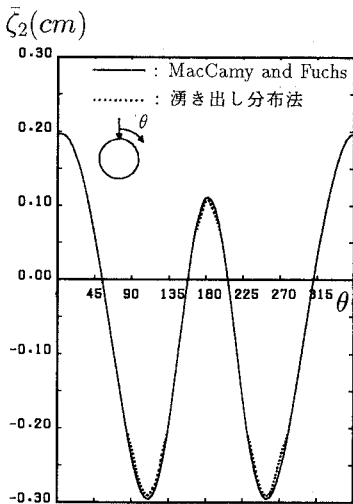


図-1 計算結果の比較
($H_I/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.259, e/D=\infty, r/D=0.5$)

式(5)に、わきだし分布法より求められた線形ポテンシャル ϕ_1 を代入すれば平均水位変動 $\bar{\zeta}_2$ が求められる。また破波しない場合の入射波のみによる平均水位変動は非常に小さいので本研究では式(5)から入射波のみによる平均水位変動を除去し、解析に用いた。

また、湧き出し分布法より波の場を計算し、平均流に関する連続式および運動方程式を有限差分法で解き、定常状態の平均流を算定した。差分に際しては、解の収束性を早めるため式(5)の平均水位 $\bar{\zeta}_2$ を初期値として使用し、それ以外は斉藤ら (1988) にならった。

図-1 は、単円筒表面での平均水位 $\bar{\zeta}_2$ を示したもので、 ϕ_1 として MacCamy and Fuchs (1954) の回折理論を使った値 (図中実験) とわきだし分布法の値を使った値 (図中点線) を比較したものである。 r は円筒中心から半径方向の距離、 θ は波が最初円筒に当たる点からの角度、 L は波長、 $e/D=\infty$ は単円筒の場合を表す。図-1 より、両方法による平均水位変動の差異がないことが判明する。

4. 実験結果および考察

4.1 波高分布

大口径の単円筒構造物周辺では、円筒からの反射波が卓越する円筒前面の部分重複波動場領域、入射波と円筒による回折波および反射波とで形成される円筒まわりの重合波動場領域、主に回折波が回り込む円筒後面の回折波領域に分けられる。円筒が複数基設置された場合は、円筒数、設置間隔、入射波の入射角度、円筒の直径・波長比などの変化にとまない、波動場はかなり変化する (金ら, 1994)。

図-2 に例示するように、円筒 I の前面領域では、無次

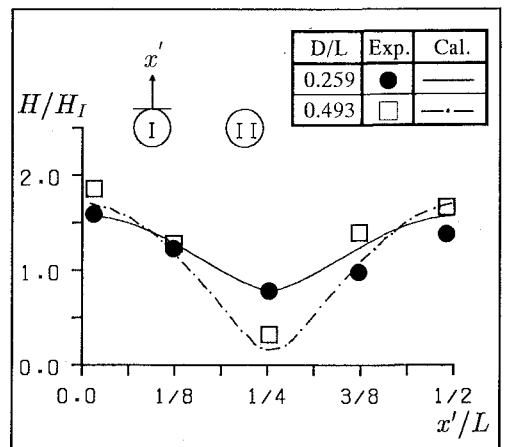


図-2 円筒前面沖側の最大波高
($H_I/h=0.29, h/L=0.11, e/D=2, \alpha=0^\circ$)

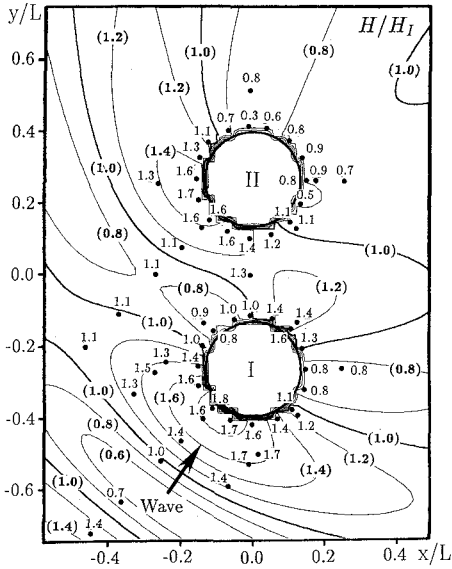


図-3 波高の分布
($H_1/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.259, e/D=1, \alpha=45^\circ$)

元波高 H/H_1 は $x'/L=1/4$ で極小, $x'/L=0, 1/2$ で極大となり, 部分重複波動場が形成されることがわかる。なお, 図中の x' は円筒表面から円筒前面沖側を正とした水平距離である。また回折パラメーターが大きい場合 ($D/L=0.493$), 波高の空間変化は大きくなる。また波は有限振幅性が大きいにもかかわらず, 線形理論で算定した計算値と実験値とはかなりよく合っている。

図-3 に, 波の入射角度 $\alpha=45^\circ$ の場合の最大波高の等

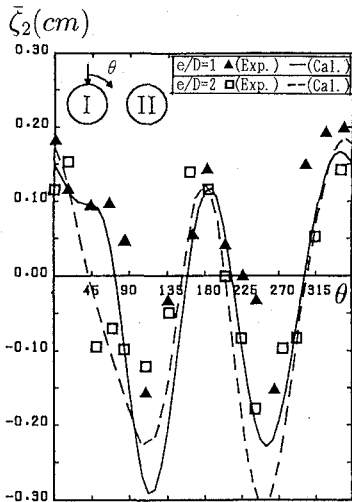


図-4 円筒構造物まわりの平均水位変動
($H_1/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.259, r/D=0.53, \alpha=0^\circ$)

波高線図を示す。図中の実線は計算した等高線, ●は水位の計測点, 括弧を付けた数字は計算値, 括弧のない数字は実験値である。沖側円筒 (円筒 I) 前面の波高は, 岸側円筒 (円筒 II) の前面領域に位置するため, 岸側円筒前面に形成された部分重複波動場の影響も受けて岸側円筒前面より大きくなる。また, 円筒間での波高は岸側円筒の方が大きい。これは, 岸側円筒の場合, 入射波が構造物に当たって反射または回折され波高が大きくなるが, 沖側円筒の場合, 入射波の回折領域に位置するため波高が小さくなったと推測される。なお, 実験値と計算値はほぼ一致する。

4.2 平均水位変動

図-4 は, 2 円筒の場合の円筒表面から, $r/D=0.53$ 離れた位置での平均水位変動 ζ_2 を示したものである。 θ は入射波が構造物に最初当たる点からの構造物まわりの角度で, その向きは時計まわりとする。また, 実線, 点線はそれぞれ円筒の設置間隔 $e/D=1$ と 2 の場合の式 (5) を用いた計算値, ▲, □ は計算値に対応する実験値である。平均水位 ζ_2 は, 計算値, 実験値とも円筒前面 ($\theta=0^\circ$ または 360° 付近) と後面近傍 ($\theta=180^\circ$ 付近) では上昇, 円筒間の向かい合う側 ($\theta=90^\circ$ 付近) と外側 ($\theta=270^\circ$ 付近) の円筒近傍では低下し, その対応はかなりよく, 平均水位変動の概略値は充分予測できることが認められる。なお, 円筒の設置間隔 $e/D=1$ の場合は, 円筒前面領域から円筒間の側面近傍 ($\theta=315\sim 90^\circ$) まで平均水位の上昇が起こる。これは, 円筒間の間隔が狭いため, 反射

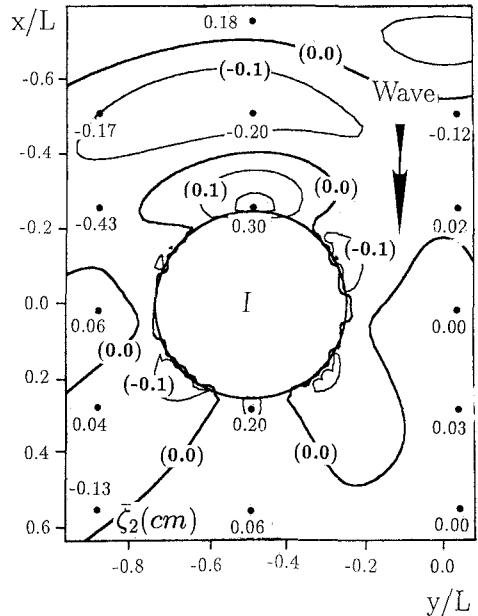


図-5 円筒構造物周辺の平均水位変動
($H_1/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.493, e/D=1, \alpha=0^\circ$)

が大きくなったためと推測される。

図-5は、2円筒構造物周辺の平均水位変動 $\bar{\zeta}_2$ の等高線図である。図中の実線は式(5)を用いて計算した等高線、●は水位の計測点、括弧を付けた数字は計算値、括弧のない数字は実験値である。なお、平均水位変動はほぼ対称なので、全領域の半分のみを図示した。平均水位変動の空間変化は円筒まわりと円筒前面沖側領域で大きい。これは、円筒まわりは回折散乱波が強いため、また円筒前面沖側領域は入射波と反射波とで非線形性の強い波動場が形成され、2次オーダーである平均水位変動が大きくなったと推測される。また、円筒前面沖側領域では部分重複波動場の特徴が認められる。すなわち、部分重複波の腹に該当する $x/L \approx -0.24, -0.72$ 付近では平均水位が上昇し、節に該当する $x/L \approx -0.48$ 付近では平均水位が低下する。そして、円筒間では平均水位の低下の傾向が認められる。また、一般に、回折パラメーター D/L が大きい方が小さい場合より、平均水位の低下は小さく、上昇は大きい。なお、全体的に実験値は計算値と比較的よく合っていることがわかる。

4.3 流速分布

構造物周辺の波高分布は、既述したように、線形理論の湧き出し分布法でほぼ予測できる。

図-6は、円筒前面水域での平均流まわりの無次元流速振幅 U^*/U_I と x'/L の関係を入射波の入射角度 α をパラメーターとして示したものであり、 x' は図-2と同様円筒沖側外縁を原点とする沖向き距離である。入射角度 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ の円筒 I の場合は、前述のように部分重複波の特性を表すが、入射角度 $\alpha = 45^\circ$ の円筒 II の場合は円筒前面沖側 $x'/L \approx 1/8 \sim 3/8$ 領域でほぼ一定値を表す。これは、円筒 II の円筒前面沖側 $x'/L \approx 1/8 \sim 3/8$ 領域は、円筒 I の近傍であり、円筒 I 表面からの距離がほぼ一定 (0.24

$\sim 0.27L$) であるため、円筒 I からの回折散乱波の影響が大きく作用したと考えられる。なお、図示していないが、 D/L が大きい場合、全領域で流速の空間変化は大きいことが認められている。図-6に示すように、湧き出し分布法に基づく計算値は実験値とよく一致しており、平均流まわりの流速振幅の概略は充分予測できると考えられる。

水理実験によれば、平均流は図-7(a) に示すように、円筒周辺の広い領域で沖向きが卓越するが、円筒の近傍では円筒の表面に沿って流れる。また、円筒の前面と後面近傍では小さく、円筒の側方では大きいことが一般的

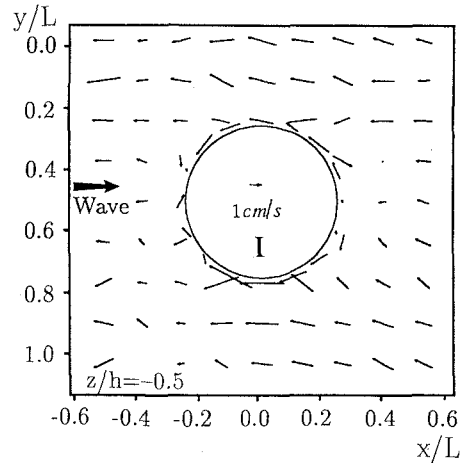


図-7(a) 2円筒周辺の平均流の実験結果
($H_I/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.493, e/D=1, \alpha=0^\circ$)

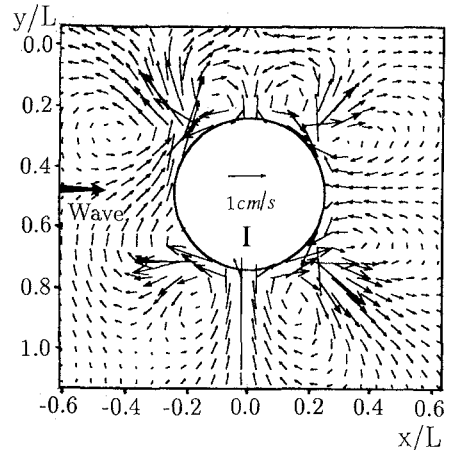


図-7(b) 2円筒周辺の平均流の計算結果
($H_I/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.493, e/D=1, \alpha=0^\circ$)

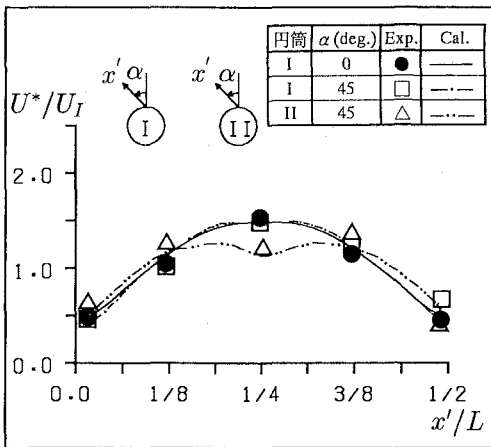


図-6 円筒前面沖側の最大流速
($H_I/h=0.29, h/L=0.11, D/L=0.259, e/D=1$)

な傾向として認められる。

図-7(b)は、計算で求めた平均流の平面分布である。平均流は円筒の沖側部分で沖向き、岸側部分で岸向き、また円筒の外側側方では円筒に向かっており、単円筒の場合の齊藤ら(1988)の計算と類似している。しかし、上記したように、水理実験の場合、平均流の方向は、単円筒の場合(東江ら, 1992)、複数の円筒の場合とも円筒周辺広い領域の底面と水面近傍を除き、全水深にかけて沖向きであり、計算結果と著しく異なる。この一因として計算において使った遠方放射条件が、実験水槽では閉鎖されているので満たされていないことがあげられよう。今後平均流の大きさまで正確に予測できる精度高い非線形回折波論の展開が望まれる。

5. 結 論

以上、本研究では近接して設置された二つの大口径円筒構造物を取り上げ、構造物周囲の波高、水位変動、流速の特性について水理実験と数値解析より検討を加えてきた。本研究で得られた主要な結論をまとめて以下に要約する。

(1) 近接して設置された2円筒構造物周囲の波高分布、流速や平均水位変動は波の入射角と構造物の設置間隔などの変化により複雑に変化するが、波高分布や平均流まわりの変動流速を線形理論に基づく湧き出し分布法で、比較的精度高く推算できる。

(2) 複数の大口径円筒構造物周囲の平均水位の変動は湧き出し分布法を使う回折理論と2次オーダーの式(5)を併用することにより予測可能である。そして、2円筒構造物の場合、円筒前面と後面近傍では平均水位は

上昇、円筒間の向かい合う側と外側の円筒近傍では、平均水位は低下する。また、円筒の設置間隔が狭い場合、平均水位の上昇領域は広い。

(3) 回折パラメーター D/L が大きい場合は、小さい場合より、平均水位の上昇量は大きく、低下量は小さくなる。また、波高、平均水位、最大流速および平均流の空間変化も大きい。

(4) 平均流の流速は、計測した範囲では、ほとんどが沖向きとなる。このような流速の特性は従来の手法ではなかなか推算できないので、信頼性の高い非線形回折理論の展開が望まれる。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・金 昌済・安部智彦 (1993): 二基の大口径円筒構造物周辺の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 526-530.
- 金 昌済・安部智彦・真田 武・今井 聡・宮地克人・岩田好一朗 (1994): 複数基の大口径円筒構造物周囲の流速場に関する研究, 海洋開発論文集 Vol. 10, pp. 313-318.
- 齊藤栄一・佐藤慎司・柴山知也 (1988): 波動場における大口径円筒周辺の局所洗掘に関する研究, 第35回海岸工学論文集, pp. 392-396.
- 東江隆夫・伊藤一教・勝井秀博・灘岡和夫 (1992): 大型海洋構造物周囲の砂移動と平均流, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 496-500.
- Isaacson, M. Q. (1978): Vertical cylinders of arbitrary section in waves, J of Waterways, Harbors and Coastal Engg., Div., ASCE, Vol. 104, pp. 309-322.
- Kriebel D. L. (1990): Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part I; Diffraction theory, Ocean Engg., Vol. 17, No. 4, pp. 345-377.
- MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs (1954): Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory, Tech. Memo. No. 69, U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board.