

矩形柱体列群と波の相互作用に伴う共振特性

金沢大学工学部 正会員 ○斎藤武久・Miao Guoping・石田 啓

1. はじめに 超大型浮体構造物の適切な設計には、考慮すべき様々な設計項目が考えられる。その一つに、浮体構造全体を構成する各矩形浮体要素間との間隙で生じる波の相互干渉問題が挙げられる。特に、超大型浮体構造物では、各浮体要素幅に対する間隙幅の比率が極めて小さくなるため、波浪エネルギーの蓄積に伴う共振現象を誘発する危険性がある。しかし、現在まで、浮体構造物の場合に限らず、微小な間隙を有する矩形柱体列群に対しても波の相互作用に伴う共振特性は明かにされていない。本研究では、これら一連の研究の第1段階として、微小な間隙を有する2つの矩形柱体列を対象に、波による共振特性について考究する。

2. 解析方法 図-1に座標系を示す。本研究では、幅 B 、長さ L の2つの矩形柱体が、一定水深 h 上に間隙幅 $2a$ で設置された場合を想定する。流体を非粘性・非圧縮性とし、非回転流れおよび周波数 ω による調和運動を仮定すると、流体場の速度ポテンシャル Φ は入射波および回折波の速度ポテンシャルとの和として、 $\Phi = \phi e^{-i\omega t} = (\hat{\phi}_I + \hat{\phi}_D) e^{-i\omega t}$ により記述できる。さらに、線形波理論を用い、また、矩形柱体断面が鉛直方向に変化しないことを考慮すると、入射波の速度ポテンシャル $\hat{\phi}_I$ および回折波の速度ポテンシャル $\hat{\phi}_D$ は次式で与えられる。

$\hat{\phi}_I(x, y, z) = \phi_I(x, y) \cosh k(z+h) / \cosh kh$, $\phi_I(x, y) = \bar{A} e^{ik(x \cos \alpha + y \sin \alpha)}$, $\bar{A} = -igA/\omega$, $\hat{\phi}_D(x, y, z) = \phi_D(x, y) \cosh k(z+h) / \cosh kh$ (1)
ここに、 k , A および α は入射波の波数、振幅および入射角、 g は重力加速度を表す。式(1)の $\hat{\phi}_D$ は水表面および水底における境界条件を満足するため、解析の対象は ϕ_D に関する次式の2次元回折波問題に帰結される。

$$\frac{\partial^2 \phi_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_D}{\partial y^2} + k^2 \phi_D = 0 \text{ (in the fluid domain)} \quad (2), \quad \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \text{ (on the surface)} \quad (3), \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_D}{\partial r} - ik \phi_D \right) = 0 \text{ (far field)} \quad (4)$$

式中、 $\partial/\partial n$ は柱体表面から流体内に立てた単位法線ベクトルによる微分を意味する。ここで、支配方程式(式(2))の基本解となり、かつ Radiation 条件(式(4))を満足する ϕ_D をわきだし分布法により次式で与える。

$$\phi_D(P) = \frac{1}{4\pi} \int_C \sigma(Q) G(P, Q) dl \quad (5), \quad G(P, Q) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad (6), \quad r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$

ここに、 C は柱体表面、 P および Q は対象点の位置およびわきだし密度 $\sigma(Q)$ の位置を表す。式(6)中 $H_0^{(1)}$ は0次の第一種のハル関数であり、グリーン関数 $G(P, Q)$ は式(2)の基本解となる。また、 $r \rightarrow 0$ で $\ln r$ の特異性を有し、 $r \rightarrow \infty$ で式(4)を満たす。このため、式(5)を式(3)に代入して得られる積分方程式(式(7))から、未知量となる柱体表面上の $\sigma(Q)$ を定めることにより流体場の ϕ が求まる。さらに、柱体に作用する波力が式(6)により求まる。

$$\frac{1}{2} \sigma(P) + \frac{1}{4\pi} \int_C \sigma(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} dl = -\frac{\partial \phi_I(P)}{\partial n} \quad (7), \quad \mathbf{F}_m e^{-i\omega t} = e^{-i\omega t} \rho i \omega \int_{-h}^0 dz \int_C \phi(P) \mathbf{n} dl \quad (m=1, 2; \text{cylinder number}) \quad (8)$$

3. 解析結果および考察 数値解析では、柱体幅の1/2である $0.5B$ (円柱の場合は半径に相当)を用いて無次元化した柱体の幅および長さを、改めて B および L とし、 $B=2$, $L=2 \sim 5$, $kL=0.5 \sim 6.4$ の範囲(波長は $12.58L \sim 0.98L$ で変化)で解析を行った。なお、間隙幅は $2a=0.01B$ とし、各矩形柱体表面の分割要素個数を40とした。

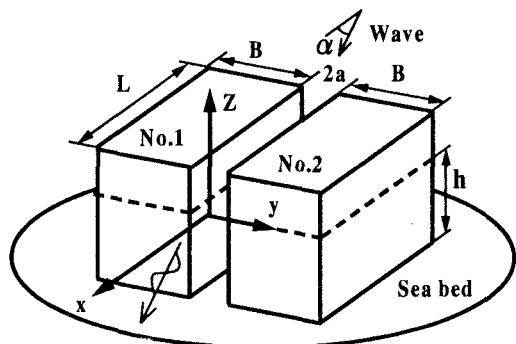


図-1 座標系

図-2に計算例として、 $L=2$ の場合の kL と無次元波力の関係を示す。図中、実線が柱体列の場合であり、点線が比較のため計算した単一柱体の場合である。図より $\alpha=90^\circ$ の場合、No.1およびNo.2の柱体共に、同じ kL に対して y 方向波力に鋭い極値が見られる。さらに、 $\alpha=0^\circ$ の場合、 x 方向波力に同様な極値は見られないが、 y 方向波力には、 $\alpha=90^\circ$ の場合と等しい kL に対して鋭い極値が見られる。このことは、柱体列に作用する波力として、間隙間に作用する波力成分を含む場合に、波力に鋭い極値が現れることを意味している。また、単一柱体の場合との

比較から、長周期領域では波の相互作用が強まること、さらに、短周期領域では No.2 に対する No.1 の遮蔽効果が強まることが分かる。ところで、波力の鋭い極値の出現は、共振現象に起因するものと考えられるが、類似した共振現象の例である、Narrow bay resonance の場合、共振点が $kL = n\pi$ ($n=1,2,\dots$, この場合 L は bay の長さ) 付近で出現し、共振点は $kL = n\pi$ ($n=1,2,\dots$) からシフトすることが Mei (1989) により証明されている。図-2 の場合も、 $kL = n\pi$ ($n=1,2,\dots$) 付近において共振点が出てきていることが分かる。共振点のシフトの有無を明らかにするために、図-3 に数値解析により求めた共振時の k と L との関係を示す。図より、入射波の波長が柱体長の整数倍となる条件となる $kL = n\pi$ ($n=1,2,\dots$) に対して、 $n=1$ 付近では、共振点は短周期側へからシフトしていることが分かる、また $n=2$ 付近では、共振点のシフトは複雑で、長周期側および短周期側へ同時にシフトしていることが分かる。なお、Narrow bay resonance の理論解誘導の際に用いられる漸近解法を応用し、微小な間隙を有する矩形柱体列の共振特性の理論解を求めたところ、共振点のシフトが理論的に証明された。詳細に関しては参考文献 2) を参照されたい。図-4 に円柱列に作用する波力の計算結果を示す。この際、間隙幅は円柱中心間を結んだ直線上の間隙幅を $2a$ として与えている。図より、円柱列の場合には、矩形柱体列の場合に見られた波力の鋭い極値が現われないことが分かる。

4. まとめ 本研究では、微小間隙を有する 2 つの矩形柱体列を対象に、波による共振特性について考究した。結果として、微小間隙を有する 2 つの矩形柱体列の場合、波との相互作用により共振が発生し、共振点は、Narrow bay resonance の場合と同様に、 $kL = n\pi$ ($n=1,2,\dots$) からシフトすることが分かった。ただし、 $n=2$ 付近では、複雑な共振点のシフトが生じることが明らかになった。また、この共振特性は矩形柱体列の場合に特有のもので、円柱の場合には、同様な共振特性は出現しないことが分かった。

参考文献

- 1) C.C.Mei : The applied dynamics of ocean surface waves, Word Scientific, Singapore, pp.199-206, 1989.
- 2) G.P.Miao, T.Saitoh, H.Ishida : Water wave interaction of twin large scale caissons with a small gap between, Coastal Engineering Journal, 1999, (Submitted)

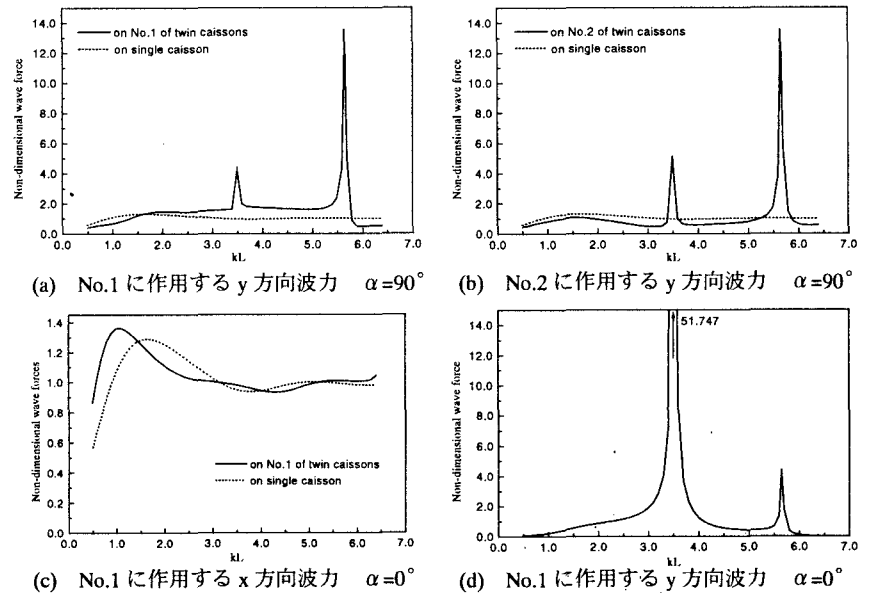


図-2 矩形柱体列に作用する波力特性 $L=2$

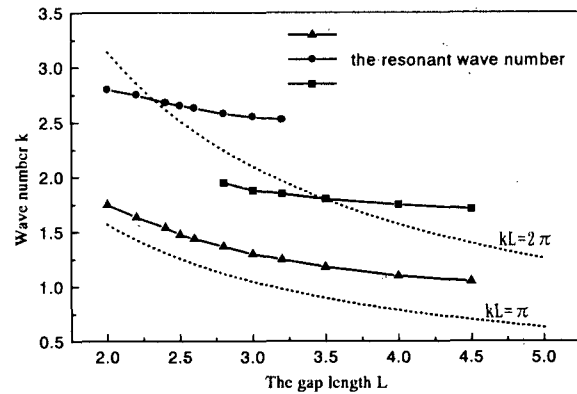


図-3 矩形柱体列と波による共振特性

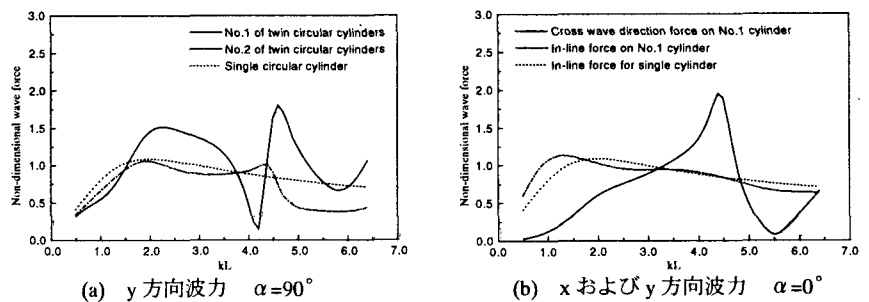


図-4 円柱列に作用する波力特性