

プラットフォーム型海洋構造物の振動応答について

榎 木 亨*・中 村 孝 幸**・三 木 秀 樹***

1. 緒 言

さきに著者ら¹⁾は波浪場における単円柱構造物の振動特性を明らかにし、振動応答の推算化を行なった結果、揚力(波の進行方向と直角に作用する力)が直方向力(波の進行方向に作用する波力)と同程度以上に重要な外力要因であることを指摘した。しかしながら一般の固定式海洋構造物は、そのほとんどが複数の円柱パイプを部材とする構造物であるため、上記の単体構造物の結果をそのまま個々の部材に適用することには疑問が残る。このような多柱式構造物の波浪による振動応答あるいは静的な変位を求める場合、構造物系への全作用波力を求めるには支柱間に距離があるため各支柱へ作用する波力の空間的位相差を、そして複数円柱であるために生じる作用波力の相互干渉効果を考慮しなければならない。また先に著者ら¹⁾が単円柱に対して指摘したこのような構造物の動的挙動に対して重要な要因となる揚力の効果、特に上記の空間的位相差を含めた複数円柱からなる構造物の振動挙動に対する効果に対してはその研究は全く行なわれていない。

本研究では、単円柱構造物に関する基礎的な研究成果に基づき、複数円柱を支柱とする海洋構造物の簡単なモデル構造物を用いて揚力に関する空間的位相差の効果を実験的に把握し、その推算法について考察を加えた。そしてさらに直方向力に対しても同様の解析を加え、これらを総合した多柱式海洋構造物の振動応答の推算結果についても検討した。

2. 実験装置および実験方法

本実験に用いた水槽は、全長 30 m、高さ 95 cm、幅 70 cm の水槽である。単円柱のモデル構造は前報に示したものと同一のもので、径 6 mm、長さ 25 cm の鋼棒パネ部、その上に外径 2.5 cm のアクリル製の長さ 51 cm の実験円柱部、さらにその上に固有周期を上げるための円柱と同径の鉄製荷重部から成り、鋼棒パネ部の下端が固

定された片持ばり形式となっている。また、鋼棒パネ部の下端付近に直方向・揚力方向の転倒モーメントを測定できるように防水ひずみゲージをはりつけてある。本研究においては、まず 2 本の円柱間の揚力に対する位相差をみるため 2 本の円柱の上端を連結せずに自由にした場合の実験を行なった。モデルとしては上記単円柱モデルと全く同じ構造のものを 2 本作製し、水槽中央部に 1) 波の進行方向に円柱の中心間隔 l を 30 cm としして設置した場合(以下縦列円柱と呼ぶ)と 2) 波の進行方向に直角に l を 27 cm としして設置した場合(以下並列円柱と呼ぶ)について各々実験した。振動変位は、振動円柱頂部の変位を対象とし、シネカメラにより 16 コマ/秒で撮影し、グラフペンを用いて解析した。

次にプラットフォーム型構造物のモデルの 1 例としては、図-1 に示すように、縦列円柱の実験円柱部の上端を鋼製およびアルミ製の四角柱(以下デッキと呼ぶ)に剛結した装置を用いた。この装置は、2 本の円柱の中心点を結ぶ線の垂直二等分線(中心軸)について対称となっており、中心軸回りのねじり振動変位は微小であるため、直方向力により励起される振動は直方向の振動のみで、揚力方向の振動(以下並進振動と呼ぶ)およびねじり振動は微小であるため、直方向により励起される振動は直角方の振動のみで揚力方向の振動(以下並進振動と呼ぶ)およびねじり振動は揚力により生じるものと考えられる。また、デッキの中には点はねじり振動の中心点に

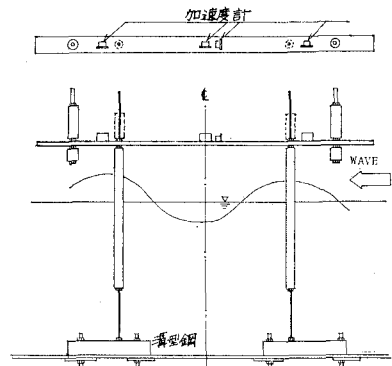


図-1 実験装置(プラットフォーム)

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科

*** 正会員 工修 三木建設(株)

一致し、並進振動はねじり振動の影響を受けないと仮定した。プラットフォームの支柱間隔 l は 30 cm と 60 cm の 2 種類とし、デッキ上に設置した 4 つの加速度計から、デッキ中央に設置したものから並進振動加速度を、デッキ中心より沖側および岸側に 25 cm の所に設置した 2 つの加速計からねじり振動加速度を求めた。なお、各実験に用いた入射波の特性は周期 $T=0.64\sim 1.86$ sec, 波高 $H=1\sim 15$ cm, rmsK-C 数は $1\sim 16$ の範囲にある。縦列円柱の水中固有周期 T_N は 0.648 と 0.433 sec, 並列円柱は 0.72 と 0.616 sec, プラットフォームの並進振動固有周期 T_{N1} は $0.49\sim 2.43$ sec, ねじり振動固有周期 T_{N3} は $0.14\sim 0.764$ sec である。

3. 縦列円柱に作用する波力の空間的位相差

波浪場に 2 本の円柱を設置した場合、まず各円柱の作用波力において相互干渉効果の生じるか否かが問題となる。本研究に用いた円柱中心間隔ならびに円柱径と波長の比 D/L (0.01 程度) の場合、大楠²⁾らの回折理論を用いた研究によると直方向力に及ぼす干渉効果は、縦列・並列とも無視できることが報告されている。また、波力に及ぼす非ポテンシャル的な干渉効果については、著者らのさきの研究³⁾、縦列・並列とも l/D が 4 以上では、直方向力および揚力に対する相互干渉効果の見られないことが判明しており、本実験における l/D は縦列で 12, 並列で 11 (プラットフォームで 12 と 24) であることから、円柱相互間における波力の相互干渉効果はないものとする。一方、いわゆる柔な円柱であるため、2 次的な相互干渉効果の生じることが考えられるが、水中自由振動実験よりこの効果についても無視できることを確認した。

縦列円柱の場合、波の進行方向 (X 方向) について沖側円柱の位置を原点とし、岸側円柱の位置を l とすると沖側円柱の入射波 η_0 , 岸側円柱の入射波 η_K は各々式 (1), (2) で表わされる。式 (2) 中の Δt は式 (3) あるいは式 (4) で示される。

$$\eta_0 = a \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_K = a \sin \omega(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta t = l/C \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega \Delta t = kl \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし k は波数, C は波速, a は振幅, ω は $2\pi/T$ である。揚力の直接的な発生原因は円柱背後に形成される後流渦にあること、そしてこの後流渦の発生、発達の間は入力である入射波の位相と密接に関連していることを考慮すると、沖側円柱と岸側円柱に作用する揚力の空間的位相差は、最も単純には波速に起因する kl で表わされる。

振動円柱の場合、作用外力と変位 (あるいは転倒モーメント) の間には位相遅れが生じるが、この位相遅れは本

実験では、ほぼ同じ振動特性を有する 2 本の円柱を用いていることから、縦列および並列において大きくとも 3 度程度で無視することができる。

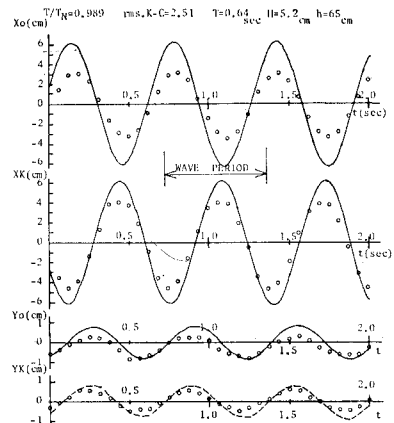
縦列円柱において、転倒モーメントから求めた揚力の遅れ時間 Δt_* (前述の Δt に対する実測値) から $\omega \Delta t_*$ を求め、線形波動理論より求めた波長 L から kl を算定し、 $\omega \Delta t_*$ と kl の比 $\beta = \omega \Delta t_*/kl$ を示したのが表—1 である。 β はその多くが 1 近くの値を示し Δt_* が小さく、その読み取り誤差が最大で 20% となることを考慮すれば、 $\omega \Delta t_*$ は kl によりほぼ表わされると考えられる。

次に縦列円柱の各円柱に対し 2 自由度振動モデルを用

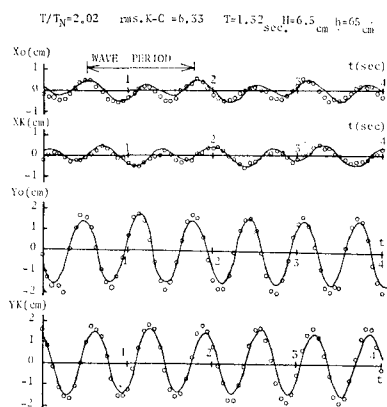
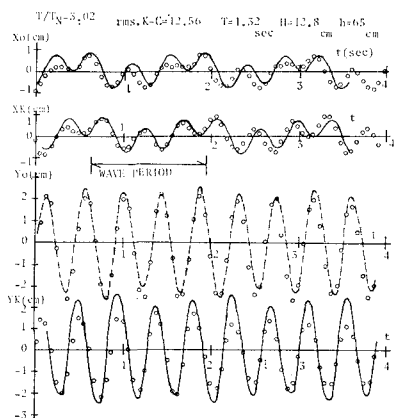
い、作用外力として直方向力にはモリソン波力式を、揚力には著者らが実験的に求めた揚力式⁴⁾を用いて波力積分領域を変動水面までとして振動計算を行なった結果を実験値とともに 図—2~4 に示した。ここでは波力の相互干渉効果および動的応答による 2 次的な相互干渉は無視し、線形波動理論を用いて空間的位相差を kl として求めている。図—2~4 はそれぞれ T/T_N が 1, 2, 3 の共振現象を示す場合の代表例で X は直方向変位を Y は揚力方向変位を表わし、添字 O, K はそれぞれ沖側、岸側の円柱であり、実験値を白丸、計算値を実線あるいは破線で示している。図—2 と 4 の破線は計算結果を Y 方向の正負を逆転 (t 軸に对称) させたものである。図—2~4 の計算値と実験値は各変位とも変位の大きさは多

表—1 空間位相差

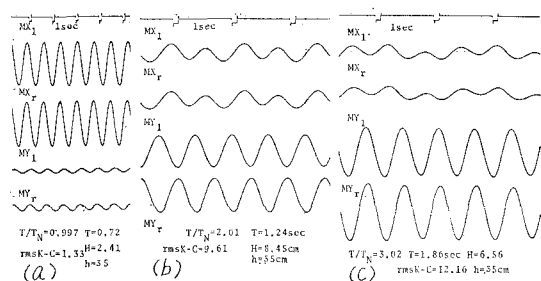
RUN No.	β	T/T_N	L/l
1	1.30	0.99	2.14
2	0.87	2.02	8.31
3	0.83	2.03	8.33
4	1.04	2.03	8.38
5	0.89	2.03	8.38
6	0.68	2.51	11.44
7	0.78	2.53	11.57
8	0.75	1.97	3.81
9	0.90	1.96	3.77
10	0.93	2.53	6.16
11	1.14	2.54	6.20
12	1.00	3.02	8.33
13	0.71	3.03	8.34
14	1.30	4.05	12.75
15	0.93	4.05	12.74
16	0.99	3.43	10.13
17	0.85	3.44	10.16
18		3.43	10.13
19	1.30	3.02	8.31



図—2 縦列円柱の振動変位 ($T/T_N=1$ の場合)


 図—3 縦列円柱の振動変位 ($T/T_N=2$ の場合)

 図—4 縦列円柱の振動変位 ($T/T_N=3$ の場合)

少異なるものの時間形状はほぼ一致しており、揚力および直方向力の空間的位相差は線形波動理論による kl で十分表わされると考えられる。しかしながら、揚力については図—2と4のようにその作用方向の正負が逆転する可能性があることに注意しなければならない。この原因は、円柱背後に形成される後流渦が波の進行方向に対して左右どちらに掃き出されるか不確定であることにありとされる。このことを空間的位相差が0となる並列円柱の場合において検証した例を T/T_N が 1, 2, 3 の図—5 (a), (b), (c) に示した。同図中 MX , MY はそれ



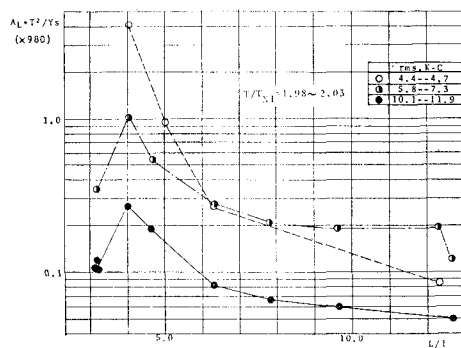
図—5 並列円柱の転倒モーメント

それ X 方向, Y 方向の転倒モーメントを表わし、添字 r, l は X 方向に対しそれぞれ右側, 左側の円柱であることを示し、図中下向が正である。図—5 (a), (b), (c) において右側と左側の円柱の MX , MY の位相は一致しているが、(b) においては MY_r と MY_l の正負は逆となっている。したがって揚力の作用方向は後流渦の掃き出される方向により決定される不確定なものとも言えそうである。なお、並列円柱についても2自由度振動モデルを用いて $X \cdot Y$ 両方向の振動変位を推算した結果は、実験値と時間形状・大きさともほぼ一致した。

4. プラットフォームの揚力による振動について

2. で述べたようにプラットフォームの並進およびねじり振動が揚力により生じるという推定から、本実験は揚力の大きさが直方向力の大きさに比し有意となる rmsK-C 数 6~14 の範囲を対象とし、前報¹⁾の単円柱を用いた揚力による振動実験結果より、並進およびねじり振動が最も大きくなると予想される T/T_{N1} あるいは T/T_{N3} が 2 付近の領域について検討してみた。

まず 3. に述べた縦列円柱と同様に、デッキで2本の支柱を剛結したプラットフォームにおいても、各支柱に作用する揚力の空間位相差 kl の効果があるかを検討した。すなわち、もし沖側の円柱に作用する揚力のみでこのプラットフォームの振動が支配されるのであるならば、 $kl=0$ とした単円柱と同様の動的挙動を示し、動的変位と静的変位の比は (T/T_{N1} と rmsK-C 数を固定すると) 一定値をもつはずである。そこでプラットフォームの場合、上述に対応する動的変位に代わるものとして実測の並進加速度の $1/10$ 最大値 A_L を用いて $A_L T^2$ として算出し、一方デッキ中央の静的変位 Y_s を $1/10$ 有義揚力係数 $C_{L-1/10}$ を用いて求め単円柱の場合と同様に動的変位と静的変位の比 $A_L T^2 / Y_s$ であらわした。この $A_L T^2 / Y_s$ の L/l に伴う変化を求めたのが図—6であって、この複合構造物が上述の様に単円柱と同様の挙動を示すのであるならば $A_L T^2 / Y_s$ は kl に関係なく一定の


 図—6 L/l の効果

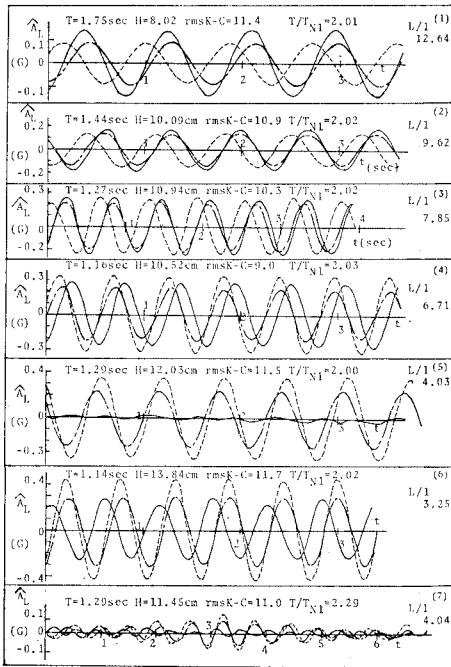


図-7 並進振動加速度

はずである。しかるに図-6からわかるように、 $L/l < 7$ の領域においては $A_L T^2 / Y_s$ は大きく変化し、明らかにこの複合構造物の動的挙動に kl の影響があらわれてきている。しかしながら $L/l > 7$ の領域では $A_L T^2 / Y_s$ は一定値をとり kl の効果はあらわれてこない。以上の様にこの複合構造物の動的挙動においては kl の効果を考慮しなければならないことが明らかになったので、次に図-2~4で算定したと同様の kl を考慮した揚力式を用いて、2自由度振動モデルの並進振動加速度の計算結果を求めたのが図-7である。図-7中の実線は両支柱に働く揚力の作用方向が同じ場合の加速度の計算値であり、破線は作用方向が逆の場合の計算値を示す。また図中の鎖線は実測加速度の変化を示す。図-7の計算値と実測値を比較すればわかるように L/l が13~8付近では実線が、 L/l が6~3では破線が実測値に比し、大きいものの位相はよく一致していることがわかる。なお、図-7(5)と(7)は実線がほとんどあらわれていないのは両支柱の揚力が kl の効果により打ち消し合いほぼ0となってしまうが、実測は必ずしも打ち消し合う効果は示さないことを表わしている。

以上の結果より、揚力による並進振動は、各支柱に作用する揚力の作用方向を同方向とした場合と互いに逆とした場合の各々について空間的位相差 kl を用いて推算し安全側の値をとらなければならないことがわかる。また、プラットフォームのねじり振動については、推算はできなかったが、並進振動と同様の結果を得た。

5. 多柱式海洋構造物の振動応答の推算について

著者ら¹⁾は既に単円柱構造物において、揚力による振動が直方向力に対し無視できないことを示したが、ここでは、従来直方向力のみを振動外力としてきた多柱式海洋構造物を対象に、揚力による振動の効果を検討する。簡単のため、水底に固定された4本の長さ1m、径1.6cmの亚克力円柱を波力干渉効果の生じない十分な間隔で一辺が波向に平行となる正方形配置とし、円柱に比し十分重いデッキで剛結されたモデルを用いた数値実験を行なった。1自由度の Harleman⁴⁾の用いた振動モデルにより、2方向の振動外力には縦列円柱と同じものを使用し、非線形項・相対速度・付加質量を考慮してデッキ中心点における2方向の振動波力を Newmark の β 法から計算した結果の1部を図-8に示す。同図中、縦軸に直方向および揚力方向の振動波力 F_x , F_y を、横軸

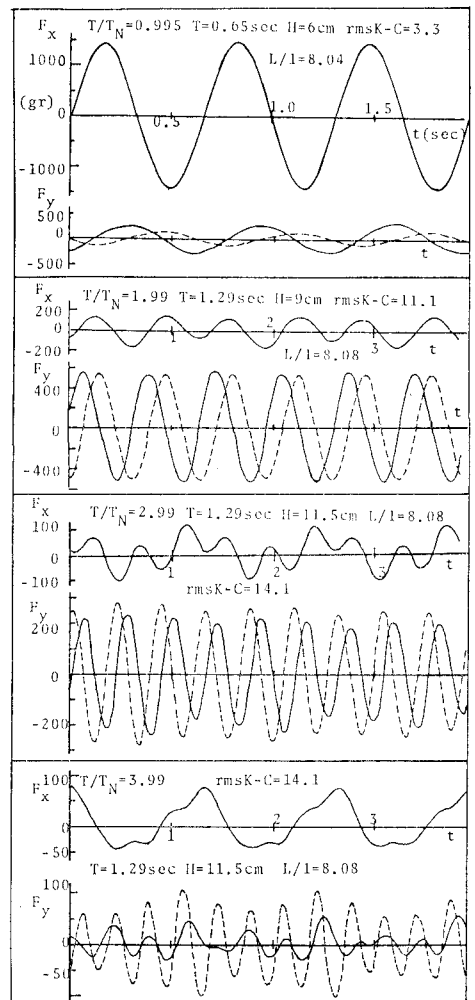


図-8 4本脚柱構造物の振動波力

に時刻 t を示し、入射波の特性および入射波の周期と構造物の固有周期の比 T/T_N を示した。同図は $L/l \approx 8$ 、水深 65 cm の場合の結果で F_Y の破線は沖側の支柱と岸側の支柱に働く揚力の作用方向が互いに逆となる場合、実線は同じ方向の場合である。同図より揚力が直方向力に比し有意となる rmsK-C 数 6~18 の領域において、揚力による振動は直方向力のそれに比し無視できないことを示している。なお、2 種類の揚力による計算結果においては、 F_X との合成した振動波力が大きくなる場合を設計としては用いるべきであろう。この数値実験に対する水理実験による検証は後日稿をあらためて報告したい。

6. 結 語

以上円柱に働く揚力が直方向力に比し有意となる rmsK-C 数の領域においては、複数円柱を支柱とする海洋構造物においても揚力による振動は無視できないことを述べてきた。揚力による振動応答の推算に必要となる

空間位相差は線形波動理論による波数と支柱間隔の積 kl で表わされるが、各支柱に働く揚力の作用方向については不確定であるため、対象とする振動応答が最も大きくなる安全側となる場合について考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 樫木 亨・中村孝幸・三木秀樹：単円柱構造物の波による振動挙動について，第 24 回海岸工学講演会論文集，1977.
- 2) 大楠 丹：複数本の直立円柱に作用する波力，九州大学応用力学研究所所報，第 40 号，pp. 205-222，1973.
- 3) 樫木 亨・中村孝幸・三木秀樹：鏡像法による複数円柱の波力干渉効果に対する一考察，第 30 回年次学術講演会講演概要集，II-31，pp. 61-63，1975.
- 4) Harleman, D. R. F., W. C. Nolan and V. C. Honsinger: Dynamic analysis of offshore structure, Proc. 8th Conf. on Coastal Eng., pp. 482-499, 1962.