

傾斜円柱に作用する揚力について

重村 利幸*・足立 長和**・竹内 俊雄***

1. 緒 言

波動場に設置された小口径の円柱は、波の進行方向に平行な方向およびこれと直角な方向に作用する2種類の波力を受ける。本研究では便宜上、前者を進行波力、後者を揚力と呼ぶことにする。1950年初頭より1960年代前半までは、もっぱら進行波力に関する研究がなされてきたが、1961年、テキサスタワー No. 4 の倒壊事故¹⁾が発生するにおよび、円柱構造物の設計に揚力の影響を加味することの必要性が論じられるようになってきた。以後、揚力に関する研究は逐年、盛んになってきたが、これらの研究は極大揚力の特性値に関する研究と揚力の発生機構の解明を意図する研究とに大別される。

Bidde (1971)²⁾ や Sarpkaya (1975)³⁾ の研究は前者に属する研究といえよう。Bidde は揚力が $K \cdot C$ 数の増大に伴い大きくなり、 $K \cdot C$ 数が10程度になると進行波力の6割にも達することを見出した。また、Sarpkaya は $K \cdot C$ 数が10および18の近傍で揚力の大きさが進行波力の大きさを凌ぐことを報告している。一方、後者に属する研究には樫木・中村・喜田 (1975)⁴⁾ の研究や、沢本・菊地 (1979)⁵⁾ の研究がある。これらの研究はいずれも円柱背後に生ずる後流渦の挙動を克明に観察し揚力特性の統計値と後流渦の挙動との関連づけを試みている。

しかしながら、上記の各研究を含めて過去に実施されてきた研究は主に直立円柱かまたは水平円柱に作用する揚力を対象としたものである。また、揚力の特性値自体についても未だ不明な点も多く残っている。以上の諸点に鑑み、本研究ではいままでもあまり実施されていない傾斜円柱に作用する揚力の特性値を実験的に求め、既往の成果と比較検討することにした。

2. 実験装置および方法

実験には長さ 39.6 m, 幅 0.6 m, 高さ 0.8 m の二次元造波水路を使用した。造波水路の一端には Ballistic

Pendulum 型の造波機が付設されているが、造波機の方 24.1 m の位置には模型円柱を波の進行方向に平行な鉛直断面内で、それぞれ 0° (直立円柱), $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ および $\pm 30^\circ$ に傾斜させて固定することができる円柱固定台を取り付けた。ここに (+) の傾斜角とは模型円柱の上部の造波機側へ前傾させた場合を指し、(-) の傾斜角はその逆の場合を意味する。同固定台の下部中央には波力検出用の三分力計 (日章電機製, LMC-3501-1) を組み込んだ。模型円柱は外径が 4.0 cm および 8.0 cm のアクリルパイプから作製し、各円柱の下端はビニールシートで被覆した。

実験は水深を 40.0 cm に保って実施することにしたが、実験波には波高が 3.3 cm から 13.5 cm, 周期が 0.79 sec から 1.60 sec の範囲の波浪諸元を有する合計 15 種の波を選定した。本実験における $K \cdot C$ 数の範囲は 1.1 から 12.1 であったが、この値はストークスの第3近似式により推定した円柱軸上の水粒子速度の自乗平均値を用いて算出したものであり、以後、同係数を rms $K \cdot C$ 数と呼ぶ。

実験は模型円柱の頭部を前述の3分力計に固定し、これを所定の傾斜角に設置した後、各実験波を作用させて実施した。各実験においては、模型円柱が静水面と交わる点での作用波の特性ならびに円柱に作用する進行波力および揚力を約3分間にわたり電磁オシログラフ上に同時に記録した。なお、作用波特性の検出には市販の容量式波高計を使用した。

3. 解析準備および方法

図-1は作用波、進行波力および揚力の記録例を示す。図から明らかなとおり、揚力は進行波力に比してかなり不規則な変動をする。したがって、揚力の大きさならびに周期等の特性値は十分に多いデータに基づいて算出した統計値で代表させなければならない。ちなみに樫木ら⁴⁾や沢本ら⁵⁾の研究においては、それぞれ実験波を60波および50波、作用させて得られた揚力データに基づいて揚力の特性値を統計的に定めている。適正なデータ数に関してはサンプリング レンジの関係もあり、議論の余地はあるが、本研究では一応、実験波を100波、作

* 正会員 Dr. Eng. 防衛大学校助教授 土木工学教室

** 学生会員 防衛大学校理工学研究科学生

*** 正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学教室

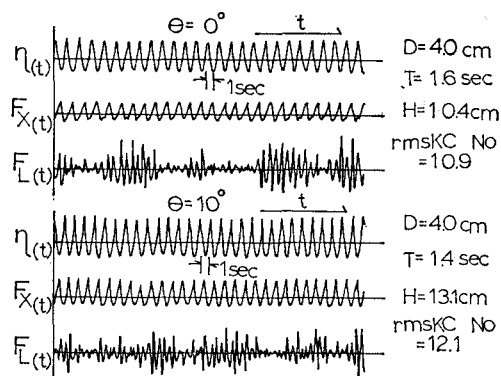


図-1 作用波、進行波力および揚力の記録例

用させた際に得られる揚力データーを用いて揚力の特性値を統計的に定めることにした。なお、特性値の算定に先きだち、100 波にわたって記録された揚力データーはそれぞれ、等時間間隔に分割した約 1 500 個のサンプリング点で A-D 変換器により数値化した。

実際の解析は以下の手順で実施した。

- ① 揚力発生周期性を検討するため、前述の数値化したデーターを用いて自己相関解析を実施する。
- ② 同じく前述の数値化した揚力データーを用いて、ゼロ・アップ・クロス法により揚力の大きさおよび周期を算出し、これら各特性値の有義値ならびにその頻度分布を調べる。

4. 解析結果および考察

(1) 揚力発生周期性

図-2 は time-lag, Δt を実験波周期, T_W の約 30 倍まで変化させて算出した揚力データー間の自己相関係数のうち、 $\Delta t/T_W$ を 7 まで変化させて得られた同係数の絶対値の変動を rms KC 数の大きさにより分類して示したものである。なお、 Δt の原点には作用波の波頂部が傾斜円柱軸と静水面とが変わる位置を通過する時刻をとった。この図から以下の諸点が明らかになった。

(a) rms KC 数が約 6.0 以下の場合には、揚力データー間の自己相関係数は Δt が T_W の整数倍になると、ほぼ同程度のかかなり大きい値を継続的にとる。このことは、rms KC 数がほぼ 6.0 以下の領域においては実験波の周期と同じ周期を有する揚力が、ほぼ規則的に発生していることを示しているものと思われる。ただし、 $\Delta t/T_W$ の値が 0.5 の奇数倍の点においてもかなり大きな自己相関係数が継続的に現われている。このことは rms KC 数が 6.0 より小さい領域においても実験波の周期の 1/2 倍周期を有する、ほぼ同じ大きさの揚力が相当数、規則的に発生していることを示していると思われる。

(b) rms KC 数が 6.0 以上になると、揚力データー

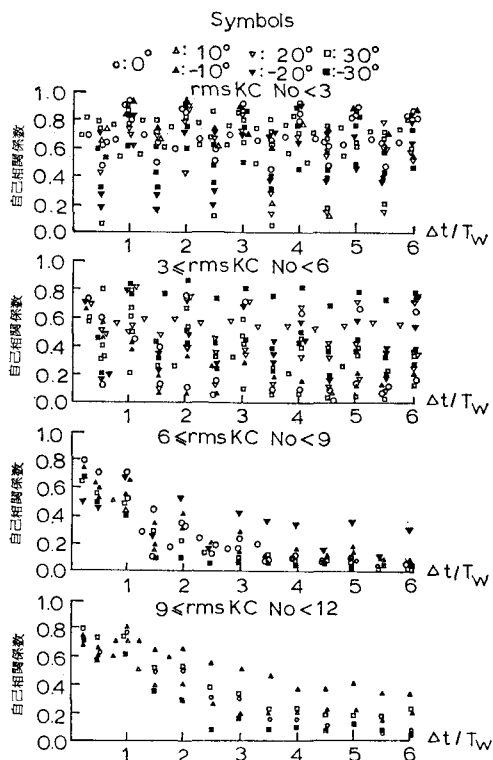


図-2 Phase lag による揚力の自己相関係数の変動

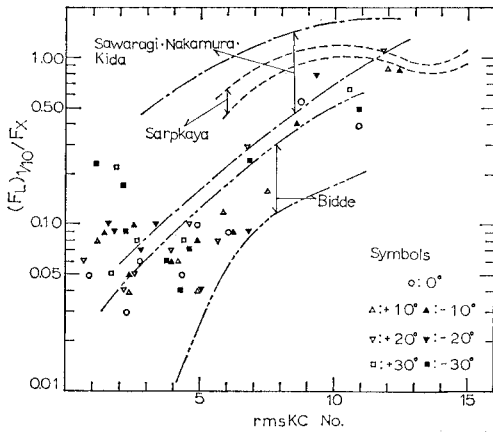
一間の自己相関係数は $\Delta t/T_W$ が大きくなるに従って、徐々に遷滅している。このことは、rms KC 数が 6.0 以上の領域においては揚力の大きさ、または周期がかなり不規則に変動することを示していると思われる。ただし、 $\Delta t/T_W$ が 1.0 以下の場合に限ってみれば、 $\Delta t/T_W$ の値が 0.3, 0.5 および 0.9 の近傍で、ほぼ同じ大きさのかかなり大きい自己相関係数が現われている。このことは、実験波の周期の 1/2 倍および 1/3 倍周期を有する揚力が相当数、発生することを示しているものと思われる。

(c) 揚力データー間の自己相関係数に対する円柱傾斜角の影響は明瞭に現われていないが、これは rms KC 数の算出過程において傾斜角の影響が加味されているためではないかと思われる。

(2) 揚力の有義特性値

前述の数値化した揚力データーにゼロ・アップ・クロス法を適用して検出した揚力の大きさおよび周期に関し、それぞれ極大値、(1/10) 有義値、(1/3) 有義値および平均値等の有義特性値を算定した。本論文では、これら有義値のうち、特に (1/10) 有義特性値についての検討結果について述べる。

図-3 は揚力の大きさの (1/10) 有義値、 $(F_L)_{1/10}$ を進行波力、 F_x の平均値で無次元化したものと rms KC 数の関係を片対数紙上にプロットしたものである。なお、

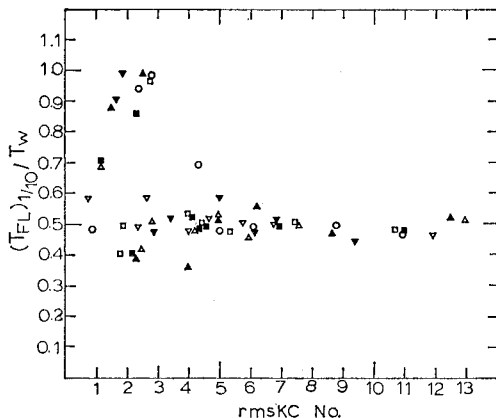
図-3 $(F_L)_{1/10}/F_X$ と rmsKC 数の関係

図中には、既往の成果と比較・検討するため、Bidde²⁾、Sarpkaya³⁾ および樫木ら⁴⁾ の実験成果も合せて示している。ただし、Bidde、Sarpkaya および樫木らの成果は、それぞれ揚力の最大値の平均値、最大値および $(1/10)$ 有義値についての解析結果である。

この図から以下の諸点が明らかになった。

- (a) rmsKC 数がほぼ 6.0 以下の場合には、 $(F_L)_{1/10}/F_X$ の値はほとんどの場合、0.1 以下である。
- (b) rmsKC 数が約 12.0 までの範囲内では $(F_L)_{1/10}/F_X$ の値は rmsKC 数が 2.0 以下の範囲で検出された数値を除いて、rmsKC 数の増大に伴ないほぼエキスポネンシャルに増大し、rmsKC 数が 10.0 以上になると $(F_L)_{1/10}/F_X$ の値は 1.0 以上になる。

次に図-4 は揚力の周期の $(1/10)$ 有義値、 $(T_{FL})_{1/10}$ を実験波の周期、 T_W で無次元化した値と rmsKC 数との関係をプロットしたものである。この図から以下の諸点が明らかになった。

図-4 $(T_{FL})_{1/10}$ と rmsKC 数の関係

- (c) rmsKC 数が約 3.0 以下の領域では $(T_{FL})_{1/10}/T_W$ の値は、ほぼ 1.0 に集中している。このことは同領域において発生する揚力の大半が実験波と同じ周期を有

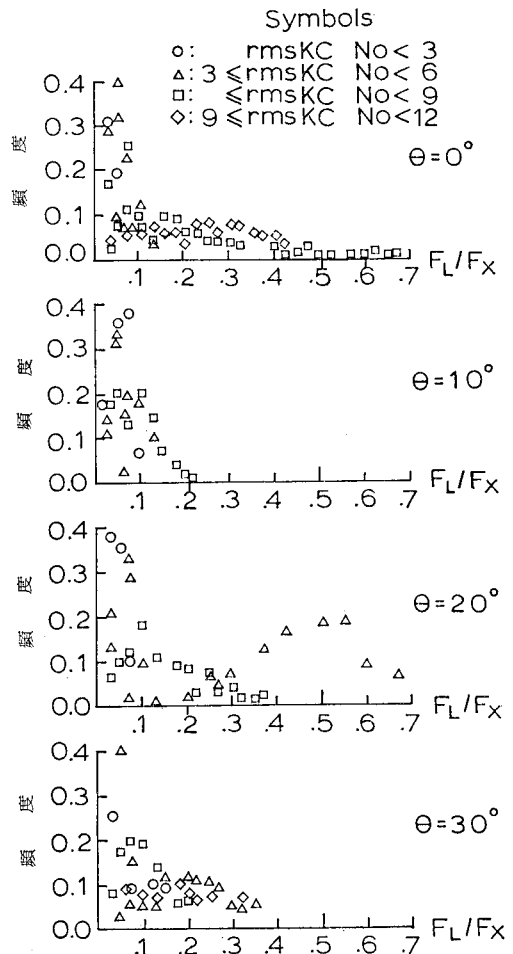
することを示している。

(d) rmsKC 数がほぼ 3.0 以上の領域では $(T_{FL})_{1/10}/T_W$ の値は全て 0.5 近傍に集中している。このことは同領域では、実験波の周期の $1/2$ 倍周期を有する揚力が卓越的に発生することを示している。ただし、rmsKC 数が 3.0 以下の領域においても、同種の揚力がかなり現われるようである。

以上の諸事実は先きに引用した各研究者による研究成果ならびに自己相関解析の結果ともよく符合している。なお、rmsKC 数に対する $(F_L)_{1/10}/F_X$ および $(T_{FL})_{1/10}/T_W$ の変動において円柱傾斜角の影響は判然としないが、これは先きに (1) (c) で述べた如く、rmsKC 数の算出に円柱傾斜角の影響が加味されているためではないかと思われる。

(3) 揚力特性値の頻度分布

次に、ゼロ・アップ・クロス法で検出した揚力の特性値の頻度分布を調べてみる。図-5 は円柱の傾斜角が正の場合に検出された揚力の大きさ、 F_L を進行波力の平均

図-5 F_L/F_X の大きさの頻度分布

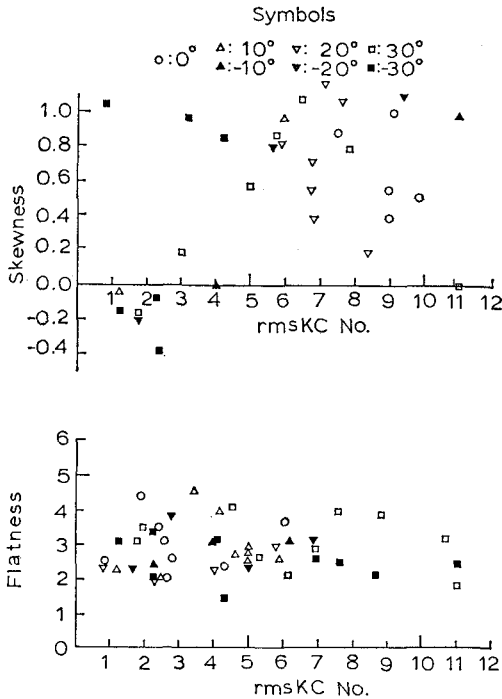


図-6 F_L/F_X の頻度分布の skewness および flatness と rms $K \cdot C$ 数との関係

値, F_X で無次元化した F_L/F_X の大きさの頻度分布を rms $K \cdot C$ 数をパラメーターとして, 各傾斜角毎にプロットしたものである。また, 図-6 は全傾斜角に対して得られた F_L/F_X の頻度分布の skewness と flatness を rms $K \cdot C$ 数に対してプロットしたものである。これらの図から以下の諸点が明らかになった。

(a) 実験波を 100 波にわたり作用させた際に検出された揚力のうち, かなりの数の揚力は進行波力の 1/10 以下の大きさを有するものである。特に, rms $K \cdot C$ 数が 3.0 以下の領域で発生する揚力の大半は進行波力の 1/10 以下の大きさのものである。

(b) rms $K \cdot C$ 数が増大するにつれて, 大きい揚力の発生が見られるが, その発生頻度は, F_L/F_X の値が大きくなるにつれて低下する。

(c) F_L/F_X の発生頻度に対する円柱傾斜角の影響は, ここでもはっきりとは見られないが一般に傾斜円柱の場合よりも直立円柱の場合の方が, 大きい揚力が発生する頻度が高いように見受けられる。

以上の事実, 円柱傾斜角が負の場合においても同様に確認された。

(d) F_X/F_L の頻度分布の skewness は rms $K \cdot C$ 数のほぼ全域において正である。また, 頻度分布の非対称性は円柱の傾斜角が大きくなるにつれて増大するように見受けられる。ただし, 頻度分布のとがり度は, 全傾斜角の場合とも rms $K \cdot C$ 数の大きさに関係なく, ほぼ一

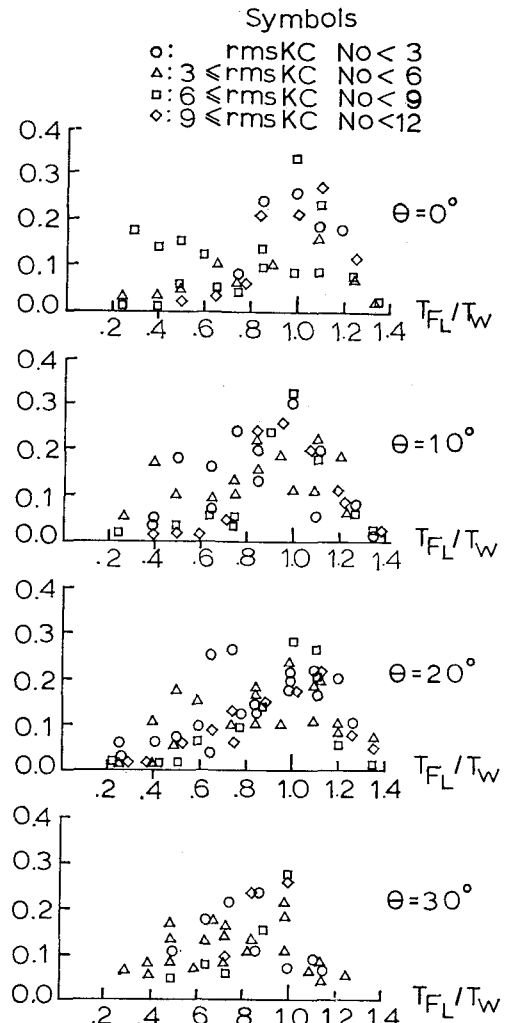


図-7 $(T_{FL})/T_W$ の大きさの頻度分布 (縦軸頻度)

定である。

次に揚力周期の大きさの頻度分布ならびに分布性状の特性を調べてみる。図-7 は傾斜角が正の場合に検出された揚力の周期, T_{FL} を実験波の周期, T_W で無次元化した T_{FL}/T_W の大きさの頻度分布を, 同じく rms $K \cdot C$ 数をパラメーターにとり各傾斜角ごとにプロットしたものである。

また, 図-8 は全傾斜角に対して得られた T_{FL}/T_W の頻度分布の skewness および flatness の各値を rms $K \cdot C$ 数に対してプロットしたものである。これらの図から以下の諸点が明らかになった。

(a) T_{FL}/T_W の大きさの頻度分布に対する円柱傾斜角の影響は判然としなが, 全般的には実験波の周期とほぼ等しい周期をもつ揚力が最も卓越して現われ, 次の実験波周期の半分の周期を有する揚力が卓越する。ただし, この分布特性は, むしろ rms $K \cdot C$ 数が 6.0 以下

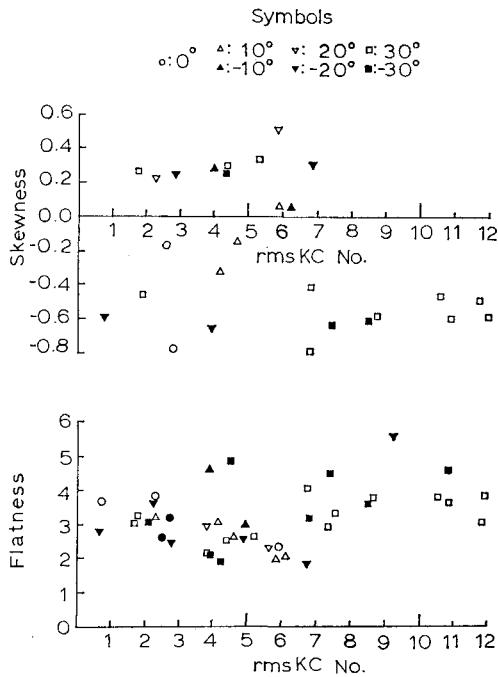


図-8 (T_{FL}/T_W) の頻度分布の skewness 及び flatness と rms $K \cdot C$ 数との関係

の場合に顕著に現われ、rms $K \cdot C$ 数が 9.0 以上の場合には必ずしも同様な分布形状は現われない。

同様な分布特性は負の傾斜角の場合にも現われた。これらの事実は、rms $K \cdot C$ 数の増大に伴い、確かに作用波周波数の 2 倍以上の周波数を有する大きな揚力は発生するが、その出現頻度は必ずしも高くないことを意味しているものと解釈される。

(b) T_{FL}/T_W の頻度分布の大半は rms $K \cdot C$ 数のほぼ全域にわたり、負の skewness 値をとる。特に rms $K \cdot C$ 数が約 7.0 以上の領域では T_{FL}/T_W の頻度分布は全て負の skewness 値をとっている。また、頻度分布のとり度は全ての傾斜角の場合とも、rms $K \cdot C$ 数が増大するにつれて大きくなってゆくようである。

5. 結 論

傾斜円柱模型に連続 100 波の波を作用させて得られた揚力データに基づいて、揚力の大きさおよび周期等につき種々検討した。その結果、以下の諸点が明らかにな

った。

① サンプリング間隔を約 0.05 sec にして得られた揚力の時系列データに自己相関解析を実施した結果、rms $K \cdot C$ 数がほぼ 6.0 以下の領域で得られた揚力データの間には phase lag, Δt が作用波の周期, T_W の整数倍になるごとにほぼ 0.9 程度の極めて高い自己相関係数が継続的に得られた。しかしながら、rms $K \cdot C$ 数が 6.0 以上の領域で得られた揚力データの間では第 1 作用波の周期, T_W 内においてのみ、 $\Delta t/T_W$ が 0.3, 0.5 および 1.0 の近傍で約 0.7 程度のほぼ等しい自己相関係数が得られたに止まり、 $\Delta t/T_W$ が 1 以上になると $\Delta t/T_W$ の値が増大するにつれて、自己相関係数の値も減速してゆくことが判かった。

② ゼロ・アップ・クロス法で求めた揚力の大きさおよび周期の (1/10) 有義値と rms $K \cdot C$ 数との関係を調べた結果、水平円柱や直立円柱に作用する揚力について得られている既往の成果とよい符合を示した。なお、これらの関係に与える傾斜角の顕著な影響は見られなかった。

③ ゼロ・アップ・クロス法で検出した揚力および周期の各大きさによる頻度分布を調べた結果、従来の研究で指摘されている通り、rms $K \cdot C$ 数が増大するにつれて作用波の周波数の 2 倍以上の周波数を有する大きな揚力が発生するが、その発生頻度は必ずしも高くなく出現する揚力のかかなりの部分は作用波の周波数とほぼ同じ周波数を有し、進行波力の 1/10 に満たない大きさのものであることが判った。

参 考 文 献

- 1) U. S. Senate, Committee on Armed Services Preparedness Investigation Subcommittee: Inquiry into the collapse of Texas Tower No. 4, 87th Congress First Session, May 3, 4, 10, and 17, 1961.
- 2) Bidde, D. D.: Laboratory study of lift forces on circular piles, Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 97, WW. 4, pp. 594~614, November, 1971.
- 3) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Journal of Applied Mechanics, Vol. 46, pp. 32~37, 1975.
- 4) 樫木 亨・中村孝幸・喜田 浩: 円柱に作用する規則波による揚力について, 第 22 回海講論文集, pp. 525~539, 1975.
- 5) 沢本正樹・菊地健治: 振動流中におかれた円柱に作用する揚力, 第 26 回海講論文集, pp. 429~433, 1979.