

水平円柱に作用する全波力について

土 屋 義 人*・山 口 正 隆**

1. 緒 言

近年、海中構造物や海底パイプラインなど水平円柱を用いた海中構造物を建設することが多く、こうした場合に作用する波力の適確な評価の重要性はいうまでもない。

周知のように、Morison¹⁾の波力算定式に基づいて水平円柱に作用する波力を解明した代表的な研究にKeulegan および Carpenter²⁾のものがある。しかし、この研究は水平円柱を重複波の節に設置した場合の実験結果に基づいているので、鉛直水粒子速度が存在せず、そのため、通常の進行波による波力と若干その特性が相違すると考えられる。また、最近では Johnson³⁾、Al-Kazily⁴⁾ および長崎ら⁵⁾により実験が行われてきたが、鉛直円柱の場合に比べて研究例が少なく、必ずしも明確な波力の算定式が確立されていないと思われる。もちろん、流体力学的な観点に立てば、水平円柱に作用する波力も鉛直円柱の場合と本質的に同じものであるが、波動運動の場合においては付加的な要素のために、若干その特性に相違があると考えられる。著者ら^{6),7)}はすでに有限振幅波理論を導入した Morison の波力算定式および次元解析に基づいた鉛直円柱に作用する全波力の特性について若干の考察を加えてきたので、本研究ではひきつづき、同様の方法に基づき、水平円柱に作用する全波力の特性について検討することにする。なお、本研究の解析は Morison の波力算定式に基づくので、非碎波の波によって剛な水平円柱に作用する波力を対象とし、また円柱による波の変形は無視できるものと仮定する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は長さ 78 m、幅 1 m、高さ 1.5 m の一端に 1/100 の勾配をもつコンクリート造長水槽である。実験装置は、造波機側の水槽端より約 53 m の地点に鋼製のわくを組み、そこに試験円柱および電気抵抗線式波高計を取り付けたものである。水平円柱の場合の波力測定装置は図-1に示すように、水平円柱を支える2本の支柱の表面にそれぞれ4枚のストレインゲージを接合し、ブリッジ回路を構成したものである。実験に使用

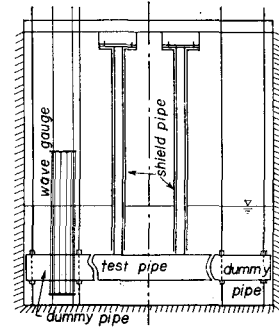


図-1 波力測定装置

した円柱は直径 7 cm および 14 cm、長さ 50 cm の鋼管であり、円柱端部の影響を除くために、円柱端部と 5 mm 程度離して同一径の円柱を 2 本ダミー円柱として設置した。試験円柱を固定する支柱は、波力が作用しないように薄肉鋼管でシールドした。実験に際しては、それぞれの円柱に対して、周期、波高および水深のほか円柱の設置位置も変化させた。実験に用いた波の周期は 1.5 sec ~ 3.0 sec、水深は 55.6 cm および 27.8 cm であり、また波高は 4.3 cm ~ 39.0 cm の範囲である。

3. 波力算定式

いま、図-2のように座標系をとると、円柱の軸が波の進行方向と直交するように水中に設置された水平円柱に作用する単位長さあたりの波力は、Morison に従って次式で表わされる。

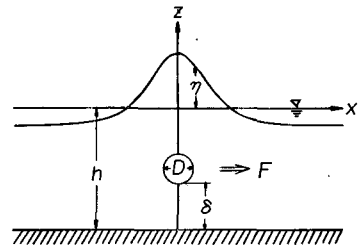


図-2 座 標 系

$$F/l = (\rho/2)C_D Du |u| + (\rho/4)C_M \pi D^2 (du/dt) \dots (1)$$

ここに、 F : 水平円柱に作用する全波力、 l : 水平円柱の長さ、 ρ : 流体の密度、 D : 水平円柱の直径、 u : 波の水平水粒子速度、 du/dt : 波の水平水粒子加速度、 C_D : 抗

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

力係数および C_M : 質量係数である。

式(1)によって水平円柱に作用する全波力を計算する場合、 u および du/dt としてなんらかの波動理論あるいは実測の結果を用いる必要があるが、ここでは著者ら⁸⁾が波速に対する Stokes の第2定義を用いて再計算した Stokes 波の第4次近似解およびクノイド波の第2次近似解を用いることにする。次に、抗力係数および質量係数は、これら両係数の位相による変化を無視し、また有限振幅波理論による水位変動および水粒子速度の特性を考慮して、波の峯および水位変動の零点の位相における実測の全波力 F_{70} および $F_{7=0}$ を用いて次式よりそれぞれ算出されるものとする。

$$C_D = \frac{F_{70}/l}{(\rho/2)Du|u|} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_M = \frac{F_{7=0}/l - (\rho/2)C_D Du|u|}{(\rho/4)\pi D^2(du/dt)} \dots\dots\dots (3)$$

さらに、Reynolds 数および波動運動場の非定常性を表示する Keulegan-Carpenter 数はそれぞれ、

$$Re = uD/\nu, \quad KC = uT/D \dots\dots\dots (4)$$

で表わされるものとする。この場合の u は水平円柱の中心位置での前記の有限振幅波理論による水平水粒子速度の最大値を用いることにする。ここに、 ν は動粘性係数である。

4. 抗力係数および質量係数の特性

(1) 抗力係数

図-3は式(2)に第2定義による Stokes 波の第4次

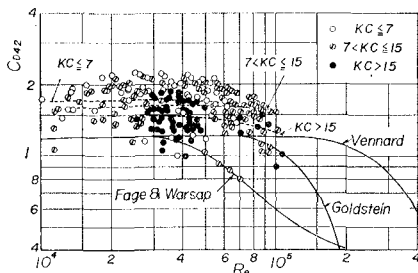


図-3 抗力係数の Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数による変化

近似解を適用して水平円柱に作用する全波力の実験結果から推定した抗力係数と Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数との関係を示したものである。すでに著者らが指摘したように、水平円柱の抗力係数も鉛直円柱の場合と同様に Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数の増加とともに若干減少する傾向がある。また、その値は重複波の節に設置された水平円柱の波力に関する Keulegan および Carpenter の実験結果のうち、本実験の Keulegan-Carpenter 数と同様な範囲に対する平均値と比較的

よく対応している。しかしながら、一様流中の円柱の抗力係数の値や波による鉛直円柱のそれより平均的に約40%程度も大きい。この原因としては、実験および解析に伴う誤差もあるが、主として、底面の影響、鉛直水粒子速度に伴う揚力が水平波力に加算されていること、後述する水粒子速度のこう配による抗力係数の鉛直方向変化の影響さらに水面の影響などが考えられる。これらのうち水面の影響を評価することは困難であるので、前述の3つについてその影響を推定してみよう。

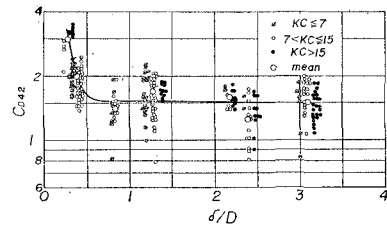


図-4 抗力係数に及ぼす proximity effect

図-4は第1の原因と考えられる底面の影響すなわち proximity effect を検討するために、水平円柱の抗力係数 C_{D42} の底面と円柱の間隔 δ と円柱の直径 D との比 δ/D による変化を Keulegan-Carpenter 数をパラメーターとして示したものである。図中の同一の δ/D の値に対する個々の実験結果は同じ直線上に表示されるべきものであるが、実験結果が重なりあうので、 δ/D に若干の幅をとって図示されている。また図中の大きな白丸は一定の δ/D に対する抗力係数の平均値であり、実線はそれらの平均的な傾向を表わすものである。この図から $\delta/D > 0.5$ では抗力係数は平均的に一定値となり、この範囲の実験結果を図示した図-3の抗力係数には proximity effect がほとんど現われないのに対して、一方 $\delta/D < 0.5$ では δ/D の値の小さいほど、proximity effect が顕著になることがわかる。第2の原因として鉛直水粒子速度に伴う水平方向の揚力の影響が考えられる。波によって円柱に作用する揚力の研究例はきわめて少ないが、鉛直円柱の場合は Bidde⁹⁾ によって行なわれており、揚力は最大で全波力の60%程度にもなることが報告されている。さらに、また揚力係数は $C_L \approx 1.0$ であり、水位変動と揚力の位相の遅れはおおよそ 80° 程度であるので、前述の方法で算出した水平円柱の抗力係数にも鉛直水粒子速度に伴う揚力の影響が含まれている可能性がある。図-5は $C_L = 1.0$ とし、鉛直水粒子速度の最大値を用いて揚力を計算して波の峯の位相での全波力の測定値 F_{70} を補正した場合の抗力係数と Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数との関係を示したものであるが、この場合には揚力の位相を最大 90° まで変化させたことになる。図-3および図-5との比較から、揚力の補正をした抗力係数の方が若干小さくなることがわかる。この揚力の影響

の割合は、一定の抗力係数に対して鉛直水粒子速度と水平水粒子速度の比 w/u が大きいときほど大きく、著者らの実験では最大 20%, 平均 5~6% 程度であった。したがって、揚力係数や揚力の位相変化の大きさに問題はあがあるが、水平円柱の抗力係数に及ぼす揚力の効果は比較的大きいといえよう。なお、揚力を考慮しても、波の峯の位相での全波力の計算結果を一致させるかぎり、後述の全波力の時間波形はほとんど変化しないことがわかった。

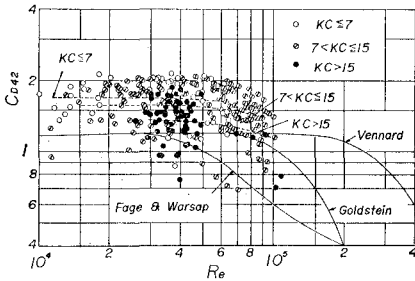


図-5 抗力係数に及ぼす水平方向の揚力の影響

最後に第3の原因として、2次流の発生に伴う抗力係数の鉛直方向変化の影響があげられる。Masch ら¹⁰⁾は、直線的な流速分布をもつ開水路流れでの円柱の抗力係数が流速のこう配によって生じた圧力こう配に起因する2次流のために変化し、底面では増大し、水面に近づくにつれて減少することを示している。波動運動の場合にも同様の機構が考えられるが、鉛直水粒子速度の存在とあいまって、波動運動中での物体の抗力係数は鉛直方向に変化し、水底に近づくほど増加するものと思われる。Masch らの測定結果を参考にして、抗力係数および水粒子速度の値が鉛直方向に直線的に2倍程度変化するものとし、水底からの波の峯高を水深の1.2倍に仮定して算出した水粒子速度の自乗に関する鉛直方向についての平均の抗力係数は、著者らの水平円柱に関する抗力係数の実験結果の大部分を占める水深の1/2程度の深さにおける円柱の抗力係数より約10%程度小さいことになる。

以上の考察から、鉛直円柱および水平円柱の抗力係数の値の相違は、鉛直水粒子速度による揚力および2次流の発生に伴う抗力係数の鉛直方向変化などに起因しているといえる。

(2) 質量係数

抗力係数の場合と同様に、質量係数に及ぼす proximity effect を検討するために、 H/D をパラメーターにして C_{M42} と δ/D との関係を図示したのが図-6である。質量係数に対しても proximity effect が現われ、その範囲は抗力係数の場合と同じく、 $\delta/D < 0.5$ であり、 $\delta/D > 0.5$ ではそれは無視されることがわかる。図-7は第2定義による Stokes 波の第4次近似解を用いた proximity effect の無視される $H/D > 0.5$ の場合の質量係数と H/D

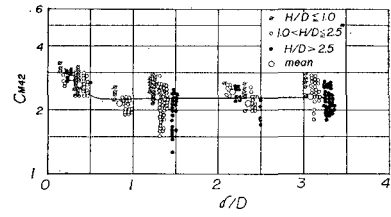


図-6 質量係数に及ぼす proximity effect

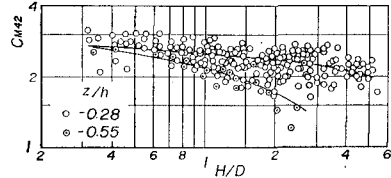


図-7 質量係数の H/D による変化

との関係を示したものである。これによれば、 H/D の値の増加とともに、質量係数の値は減少する傾向がある。また、水平円柱の質量係数も平均値は2.3~2.4程度となり、鉛直円柱に関する著者らの実験結果とよく対応している。さらに、図中には水平円柱の設置水深によって質量係数を区別してあるが、設置水深が小さいほど、 H/D の増加とともに質量係数が減少する傾向が著しい。これは円柱の設置水深によって、水平および鉛直水粒子速度による円柱の後流の形成の様子が相違し、それが質量係数に影響を及ぼすことに起因すると思われる。したがって、水平円柱の質量係数の選択には H/D のみならず、 z/h の影響も考慮する必要がある。なお、著者らの計算方法によれば、質量係数に及ぼす揚力の影響はほとんどないと考えられた。

(3) 抗力係数および質量係数の位相変化の全波力に及ぼす影響

Keulegan および Carpenter は重複波の節に設置した水平円柱に作用する波力の実験結果から、微小振幅波理

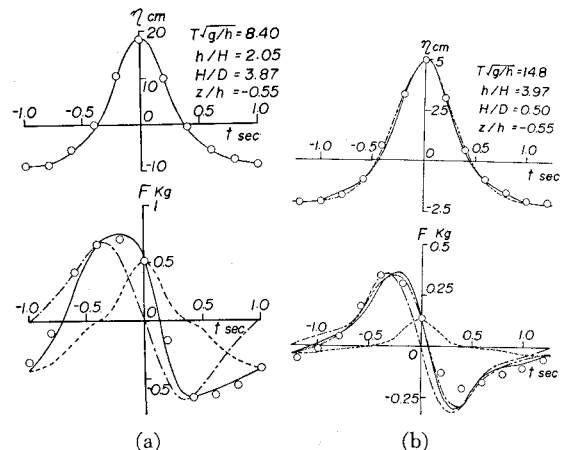


図-8 抗力係数および質量係数の位相変化の全波力に及ぼす影響

論に基づいて、抗力係数および質量係数の位相変化を求めている。しかし有限振幅波理論に基づくかぎり、この解析法はかなり困難であるので、ここでは両係数を一定にした場合の全波力の時間波形に対する計算結果と実験結果との比較から、両係数の位相変化が全波力の時間波形に及ぼす影響を検討することにする。水位変動および全波力の実験結果より便宜的に推定された両係数を用いた全波力の時間的変化の計算結果と実験結果を比較したものが図-8である。

図中の実線および2点鎖線は、それぞれ第2定義による Stokes 波の第4次近似解およびクノイド波の第2次近似解による水位変動と全波力とを表わし、点線および1点鎖線は Stokes 波の第4次近似解による抗力および慣性力を示す。これらの図によれば、計算結果は実験結果と比較的によく一致しており、水平円柱の場合も鉛直円柱の場合と同様に、これら両係数の位相変化は全波力の時間波形にそれほど大きな影響を及ぼさないと考えられる。

5. 全波力の特性

(1) 波力算定式による実験結果の検討

前述したように、鉛直円柱の場合と相違して、水平円柱の抗力係数は proximity effect や鉛直水粒子速度による水平方向の揚力および水粒子速度のこう配の影響を、また質量係数は proximity effect などを受けるので、水平円柱の全波力の計算に際してこれらを適確に評価する必要があることはいうまでもない。しかしながら、これらを数式によって表わすことはかなり困難であるので、ここでは実用上の目的から水平水粒子速度および加速度で便宜的に算出された図-3および図-7に示す抗力係数および質量係数を用いて式(1)による単位長さあたりの波力の最大値に対する計算結果と実験結果とを比較検討すれば、つぎのようである。すなわち、図-9は proximity effect が無視される $\delta/D > 0.5$ の場合について第2定義に基づく Stokes 波の第4次近似解を用いた上記

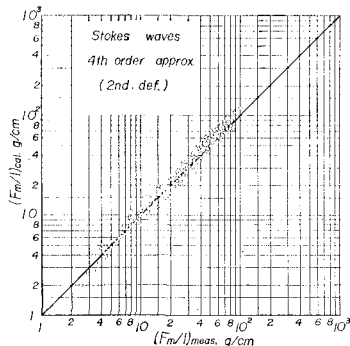


図-9 波力の最大値に対する計算結果と実験結果との比較 (1)

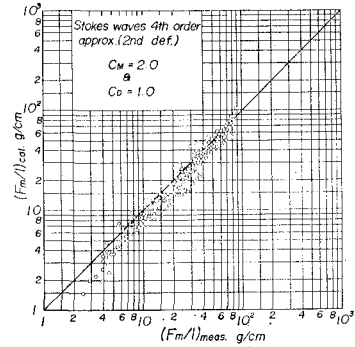


図-10 波力の最大値に対する計算結果と実験結果との比較 (2)

の方法による結果であるが、これらは抗力係数および質量係数をそれぞれ $C_D = 1.0$ および $C_M = 2.0$ として計算した図-10の結果に比べて、実験結果と比較的によく一致しているといえる。

(2) 波力に関する次元解析結果

(1) で述べた全波力に関する考察では抗力係数および質量係数などに含まれる複雑な諸要素の影響のために、若干問題があると考えられるので、さらに次元解析に基づく実験結果の解析から無次元波力の最大値に及ぼす波や円柱に関する無次元量の影響を明らかにし、これらの結果が理論計算によってどの程度説明されるかを検討する。

いま、円柱の粗度、振動特性、粘性および底勾配の影響を無視すれば、水平円柱に作用する単位長さあたりの波力の最大値 $F_m/\rho g l D^2$ に関係する要素としては $T\sqrt{g/h}$, h/H , H/D のほかに、円柱の設置水深を表わす z/h が加えられる。図-11は水平円柱に作用する単位長さあたり

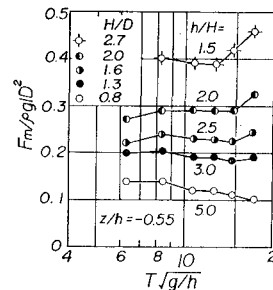
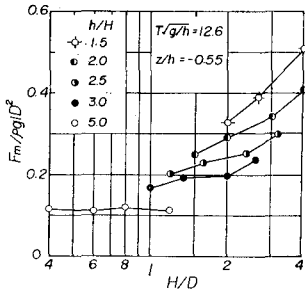


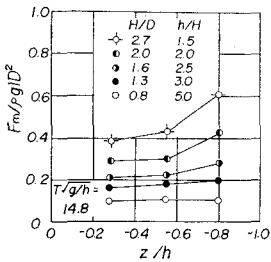
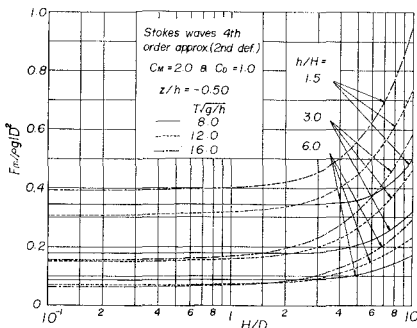
図-11 $F_m/\rho g l D^2$ の $T\sqrt{g/h}$ による変化

の波力の最大値 $F_m/\rho g l D^2$ と $T\sqrt{g/h}$ の関係を h/H , H/D および z/h をパラメーターにして示したものである。波力に関係する無次元量が多いために実験結果はきわめて制限されたものになり、この図から $F_m/\rho g l D^2$ の一般的な特性を考察することはできないが、一定の h/H , H/D および z/h の値に対して、 $F_m/\rho g l D^2$ は h/H の小さい場合には、 $T\sqrt{g/h}$ とともに若干増加し、 h/H

図—12 $F_m/\rho g l D^2$ の H/D による変化 (1)

の値の大きい場合にはむしろ減少する傾向にある。図—12 は $F_m/\rho g l D^2$ の H/D による変化を示したものである。この図によれば、 $F_m/\rho g l D^2$ は $H/D < 1$ ではほとんど一定であるのに対して、 $H/D > 1$ では H/D とともに増加している。そしてその増加の割合は h/H の値の小さいときほど著しい。

図—13 は $T\sqrt{g/h}$ 、 h/H および H/D の値が一定の場合の $F_m/\rho g l D^2$ に及ぼす z/h の影響を調べたものである。図によれば、 z/h の絶対値が大きいほど $F_m/\rho g l D^2$ の値は大きく、便宜上抗力係数および質量係数をそれぞれ $C_D = 1.0$ および $C_M = 2.0$ として $F_m/\rho g l D^2$ を計算した結果とは全く逆の傾向を示す。これは前述した揚力や水粒子速度のこう配の影響、さらに proximity effect によるものといえる。

図—13 $F_m/\rho g l D^2$ の z/h による変化図—14 $F_m/\rho g l D^2$ の H/D による変化 (2)

次に両係数を一定とした理論計算によって $F_m/\rho g l D^2$ に及ぼす $T\sqrt{g/h}$ 、 h/H および H/D の影響を検討した

のが図—14である。この計算に用いた両係数の値は実験結果から得られたものより小さく、しかも一定値であるので、両者の定量的な対応は必ずしも十分でないけれども、計算結果は、 $F_m/\rho g l D^2$ が $H/D < 1$ では h/H のみによってほぼ規定され、 H/D にはほとんど依存しないのに対して、 $H/D > 1$ では h/H および H/D とともに単調に増加することや H/D および h/H がある値以下では $T\sqrt{g/h}$ とともに減少し、ある値以上では逆に増加するという次元解析結果と定性的にはよく一致している。

6. 結 語

以上、著者らは物体による波の変形が無視できる場合の非碎波の波によって剛な水平円柱に作用する波力を適切に評価するための基礎研究を実施し、若干の成果を得たが、その結果を要約すれば、次のとおりである。すなわち、水平円柱に作用する全波力の実験結果から有限振幅波理論を用いて抗力係数および質量係数を推定し、波や円柱の特性との関連を検討した。その結果、水平円柱の抗力係数は Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数の増加とともに減少する傾向があるが、いわゆる proximity effect や鉛直水粒子速度による水平方向の揚力および水平水粒子速度分布の鉛直方向のこう配の影響を受けるので、水平水粒子速度を用いて算出された抗力係数は鉛直円柱の場合に比べて若干大きくなることを見出した。一方、水平円柱の質量係数は波高・直径比 H/D のみでなく、円柱の設置水深 z/h の影響や proximity effect を受けることが明らかになった。また、両係数の位相変化は全波力の時間波形にそれほど影響しないと考えられた。

次に、波や円柱の特性との関係から便宜的に決定された抗力係数および質量係数を用いた有限振幅波理論による全波力の計算結果は、proximity effect が無視される場合の水平円柱に対しては実験結果とよく一致することがわかった。さらに、水平円柱に作用する単位長さあたりの波力の最大値に対する実験結果 $F_m/\rho g l D^2$ は主として H/D および h/H に依存しており、 $T\sqrt{g/h}$ によってそれほど変化せず、この傾向は両係数を一定とした理論計算によっても比較的よく説明できることを示したが、 z/h の影響は理論計算結果と全く逆の傾向を示すことが明らかにされた。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費によるものであり、また実験的研究は川崎重工業株式会社の委託によるもので、本研究の実施にあたりご配慮いただいた野村襄課長はじめ関係各位に謝意を表明する次第である。

参 考 文 献

- 1) Morison, J. R.: Design of Piling, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng., 1951, pp. 254~258.
 - 2) Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H.: Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, Jour. Res. N. B. S., Vol. 60, No. 5, 1958, pp. 423~440.
 - 3) Johnson, R. E.: Regression Model of Wave Forces on Ocean Outfalls, Proc. ASCE, Jour. HY Div., No. 96, 1970, pp. 289~305.
 - 4) Al-Kazily, M. F.: Forces on Submerged Pipelines Induced by Water Waves, Univ. of California, Berkeley, Hydraulic Eng. Laboratory, Tech. Report, HEL 9-21, 1972, pp. 1~188.
 - 5) 長崎作治・尾形 賢: 海底パイプラインに作用する波力について(その1), 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 223~227.
 - 6) 土屋義人・山口正隆: 柱体に作用する全波力について, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973, pp. 25~29.
 - 7) 土屋義人・山口正隆: 波による円柱の抗力係数および質量係数について, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972, pp. 379~383.
 - 8) Tsuchiya, Y. and Yamaguchi, M.: Some Considerations on Water Particle Velocities of Finite Amplitude Wave Theories, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, 1972, pp. 43~57.
 - 9) Bidde, D. D.: Wave Forces on a Circular Pile Due to Eddy Shedding, Univ. of California, Berkeley, Hydraulic Eng. Laboratory, Tech. Report, HEL 9-16, 1970, pp. 1~141.
 - 10) Masch, F. D. and Moore, W. L.: Drag Forces in Velocity Gradient Flow, Proc. ASCE, Jour. HY Div., Vol. 86, 1960, pp. 1~11.
-