

没水球体に作用する波力の特性に関する実験的研究

——Morison 式の適用限界について——

岩田好一朗*・水谷法美**・川角伸彦***

1. 緒 言

構造物に作用する波力を正確に算定することは、海岸・海洋構造物を設計する上で非常に重要な課題である。一般に、構造物に作用する波力は、構造物の代表径が入射波長に比べて充分小さければ、Morison 式¹⁾によって算定されることが多い。Morison 式で計算される波力の時間波形は、抗力、慣性力のいずれが卓越しても、入射波と同じ周波数成分が卓越する。しかし、斜面上の捨石²⁾、あるいは水平円柱³⁾に作用する波力には、一周期内に2つのピークを持つような2倍周波数成分が卓越するものもあることが報告されている。このような波力の時間波形を Morison 式で正確に表現することはできない。したがって、Morison 式の適用限界を明らかにすると同時に、Morison 式の適用範囲外の波力に対しては、新しい波力算定式の提案が必要である。

本研究は、今まで充分検討されていない二次元波動場に設置された没水球体に作用する波力を取り上げ、室内水理実験に基づき、Morison 式の適用範囲を明らかにすると同時に、球体に作用する波力の特性について検討を加えようとするものである。

2. 水 理 実 験

2.1 次元解析

球体に作用する波力 F は、つぎに示す10個の物理量に支配されると考えられる。

$$F = \phi(D, d, h, U, T, \rho, \rho_r, \mu, g, t) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 D : 球の直径、 d : 静水面から球の中心までの距離、 h : 静水深、 U : 流速の振幅、 T : 波の周期、 ρ : 水の密度、 ρ_r : 球の密度、 μ : 水の分子粘性係数、 g : 重力加速度、 t : 時間、である。式(1)を無次元表示して整理すると次式を得る。

$$\frac{F}{\rho U^2 D^2} = \phi' \left(\frac{UT}{D}, \beta, \frac{h}{gT^2}, \frac{D}{h}, \frac{d}{h}, \frac{\rho}{\rho_r}, \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 UT/D は Keulegan-Carpenter 数 ($K \cdot C$ 数) で β ⁴⁾ は周波数パラメータである。ただし、波力 F については、最大値 F_m を取り上げれば t/T とは独立とみなせる。

2.2 実験条件および実験方法

実験は、名古屋大学工学部土木工学科の片面ガラス張りの二次元鋼製水槽 (25 m × 0.95 m × 0.7 m) で行なわれた。水槽の一端には、フラップ型造波装置が設置されており、また他端には、反射波を極力小さくするために、捨石、消波ブロックおよびウレタンメッシュからなる消波装置が設置されている。発生波は全て規則波とし、実験条件は、次元解析にもとづき以下のように設定した。静水深は 70 cm で一定とし、波の周期を5種類 (1.15 ~ 3.0 秒)、波高 (H) を 1 ~ 3 種類 (10 ~ 20 cm) 変化させた。実験に使用した球の直径は、6.35 cm、2.5 cm、0.95 cm の3種類であり、球の設置位置を球径に応じて 9 ~ 10 種類 (6.5 ~ 68.5 cm) 変化させた。したがって、 $0.008 < h/gT^2 < 0.054$, $0.014 < D/h < 0.091$, $0.093 < d/h < 0.979$, $1 < K \cdot C < 100$, $30 < \beta < 3506$ の範囲で実験を行ったことになる。ただし、 $K \cdot C$ 数、 β の値は x 方向の値を示した。

上記した全ての条件に対して、 x, z 方向の流速 u, w と両方向の波力 F_x, F_z および水位 η を同時に計測した。計測時間は約1分間である。なお、 x は波進行方向を正とする水平軸、 z は静水面上に原点を持ち、上向を正とする鉛直軸である。計測された水位、流速、波力の時間波形は全て磁気テープとペン書きレコーダーに記録された。なお、水位は電気容量式水位計で、流速は電磁流速計で、波力は Cantilever 型波力計で計測された。波力計の水中での固有振動周波数は約 15 Hz であり、入射波の周波数に比べて充分大きく、そのため計測波力に含まれる固有振動周波数の影響はほとんどないと考えてよい。

2.3 解析方法

実験で得られた水位、流速、および波力の時間波形を全てサンプリングタイム 0.05 秒で離散化した。解析に使用したデータの個数は 300 個 (15 秒に相当) である。これらのデータを使って、式(2)中の無次元量、波力の

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 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

振幅スペクトルを計算した。振幅スペクトルの計算方法はFFT法であり、データ数は256個とした。また、波力算定式として、式(3)と(4)に示すMorison式を採用して、両式中の流体力係数を計算した。

$$F_x = \frac{1}{8} D_{DX} \rho \pi D^2 u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_{MX} \rho \pi D^3 \dot{u} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$F_z = \frac{1}{8} C_{DZ} \rho \pi D^2 w \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_{MZ} \rho \pi D^3 \dot{w} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 C_{DX} 、 C_{DZ} は抗力係数、 C_{MX} 、 C_{MZ} は慣性力係数である。(3)式、(4)式中の流体力係数は、両式の右辺に流速・加速度の時間波形を代入して得られる計算波力の時間波形が、実測波力の時間波形に最も良く合うように最小自乗法により計算された。なお、加速度は、流速の時間波形に、数値微分に相当する数値フィルターをかけることにより計算した。実際の計算には、3次のStokes波理論による流速・加速度を使用した。これは、(i)電磁流速計の特性により、底面付近の流速を正確に計測することが困難であったこと、(ii)加速度を流速から計算する際に誤差が生じ易いこと、(iii)電磁流速計で計測可能な範囲では、実測の流速と3次のStokes波理論の流速の対応は非常に良いこと、が確認されたためである。

これらの結果を使って、Morison式の適用限界、流体力(抗力、慣性力)およびそれらの係数などを、式(2)中の無次元量と関連づけて考察を加えた。

3. 結果とその考察

3.1 Morison 式の適用範囲

捨石斜面上の捨石に作用する砕波を伴う波による波力に対し、4つの異った波力の時間波形が観測されているが²⁾、一定水深で非砕波の波による球体に作用する波力 F_x 、 F_z については、本実験によると、大きく3つのタイプに大別された。すなわち、一周期内に1つのピーク値を持つ単峰型(S型)波形と、2つのピーク値を持つ

双峰型(T型)波形、および不規則な波力変動を示す不規則型(R型)波形の3つである。これらの代表的な波形の例を図-1に示す。いずれの波力波形についても、流速 u 、 w の時間波形は、本論では図示していないが水位変動と同様に基本周波数成分のみが卓越しており、2倍周波数成分は非常に小さい。前述したように、Morison式は、T型波形を正確に計算することはできない。また、R型波形についても同様である。したがって、新しい波力算定式が必要となる。

まず、Morison式の適用範囲を明らかにする。 x 方向の波力 F_x は、波の谷で球が自由表面上に出るケースを除いて全てS型波形であり、適当な流体力係数を使うことにより、Morison式で計算することが可能であることが確かめられた。なお、球が自由表面から出るケースは、解析の対象外とした。一方、 z 方向波力 F_z については、自由表面に近づくときT型波形が多くなり、また、底面へ近づくときT型波形、あるいはR型波形が多くなり、Morison式は適用できなくなる。これは、自由表面、底面によるProximity Effect⁹⁾によるものであると考えられ、特に F_z に対して重要であると言える。この F_x と F_z の波形の出現特性の差異、およびProximity Effectについては、3.3で述べることにする。図-2は、Morison式の適用範囲を F_z について示したものである。図中、白スキの記号はS型波形、すなわちMorison式が適用できるもので、黒印はそれ以外のもの、すなわちMorison式が適用できないものである。Morison式が適用できる、できないの判断は、式(5)に示す相関係数 γ と、目視による実測波力と計算波力の時間波形の比較により行った。 γ の規準値としては、0.9程度とした。

$$\gamma = \sqrt{1 - \frac{\{F_T(t) - F(t)\}^2}{F(t)^2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 F_T は計算波力、 F は実測波力であり、 — は時間平均を示す。図-2より、Morison式が適用可能な範囲は、図中の曲線の内側であると考えてよさそうである。同図より、Morison式は、 $K \cdot C$ 数が小さい場合、す

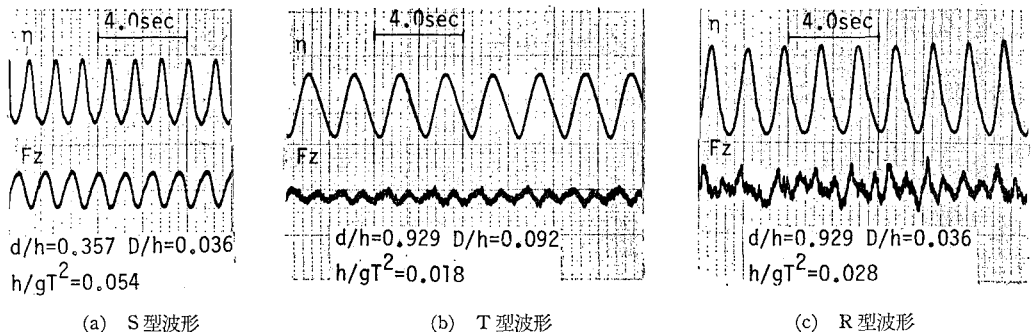
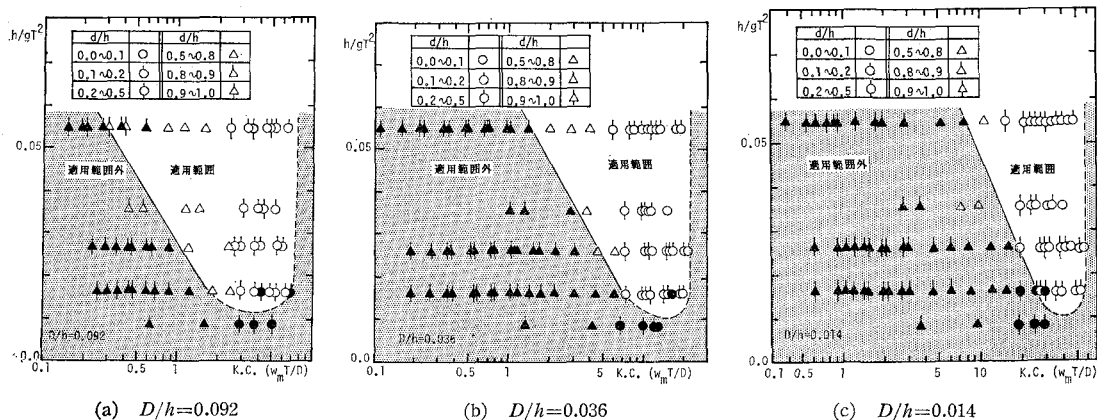
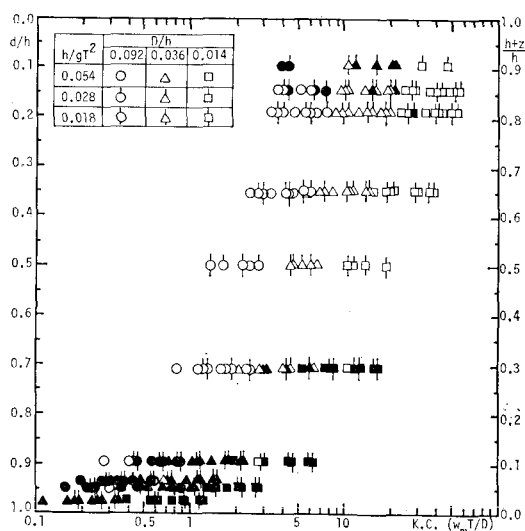


図-1 波力の時間波形の例


 図-2 Morison 式の適用範囲 (F_z の場合)

 図-3 Morison 式の適用範囲 (F_z の場合)

なわち d/h が大きい場合は適用できない。また、 $K \cdot C$ 数が大きい場合、すなわち d/h が小さくなると適用できないものが数ケース認められる。なお、図中の適用限界の上限は、球が自由表面に出ない条件に対応する。Morison 式が適用できる $K \cdot C$ 数の範囲は、 h/gT^2 が小さくなると狭くなるが、 d/h の範囲は、 h/gT^2 により変化しない。これは、 h/gT^2 が小さくなると、流速の水深方向変化が小さくなるために、 $K \cdot C$ 数の範囲が狭くなるためである。また、 D/h の小さい方が、適用範囲は $K \cdot C$ 数が大きい方へ移行する。これは、入射波の条件が同じでも、 D/h が小さいほど $K \cdot C$ 数が大きくなるためであると考えられる。したがって、Morison 式の適用範囲は、式(2)中の無次元量の中でも、特に d/h 、 $K \cdot C$ 数が大きく影響を与えていると言える。これは、図-3 からも認められる。図-3 は、図-2 を 1 つにまと

め、縦軸を d/h にかえたものである。図-3 より、 $d/h > 0.93$ では、Morison 式は適用できず、また、 $0.72 < d/h < 0.89$ では、 $K \cdot C$ 数が大きいと Morison 式は適用できない。これは後述する底面による Proximity Effect によるためであると考えられる。また、 $K \cdot C$ 数が大きくなると適用できなくなるのは、渦と底面との干渉、などが考えられるが、この点は本実験では明らかにできなかった。一方、 $d/h < 0.15$ では、 d/h が大きい場合に比べ、適用できないケースの $K \cdot C$ 数にばらつきがあるように見えるが、 D/h が同じ場合には、 $K \cdot C$ 数が大きい方が適用できない。これは、 $K \cdot C$ 数が大きくなることは、波高が大きくなることに対応し、球と波の谷との間が小さくなり、自由表面による Proximity Effect がより大きく寄与するためであると考えられる。したがって、 d/h が小さいところでは、 D/h も重要な支配パラメーターとなる。

3.2 Morison 式が適用可能な範囲の波力の特性

Morison 式が適用可能な範囲では、同式中の流体力係数の特性を明らかにすることが重要である。本節では、全てのケースに対して Morison 式が適用可能であった x 方向の波力 F_x をとりあげ、Morison 式が適用可能な範囲の波力の特性について、流体力係数を中心に検討する。

図-4 は、抗力係数 C_{DX} と $K \cdot C$ 数 ($u_m T/D$) の関係を示した一例で、 $D/h=0.036$ のものである。同図には、比較のために Jenkins and Inman⁶⁾ の値も示してある。図中の曲線は、 C_{DX} の平均値の概略である。同図より、 C_{DX} は、全体的には、 $K \cdot C$ 数がほぼ 10 以下では、 $K \cdot C$ 数の -1 乗に近い傾きで $K \cdot C$ 数の増加に伴い減少する傾向が認められる。これは、抗力が流速の 1 乗に比例することを示すものであり、粘性抵抗が大きいことを示す結果であると考えられる。この傾向は、Jenkins and Inman の結果と同じである。 C_{DX} は、 $K \cdot C$

数が10前後で極小値をとり、その後、 $K \cdot C$ 数の増加に伴ない多少大きくなる傾向が認められる。また、 C_{DX} は、 d/h が大きい方が大きくなるようである。この一原因として、渦の発生等が、底面の影響により多少変化することが考えられる。振動流中の円柱に対する抗力係数について、 β の大きい方が抗力係数が小さくなることが報告されている⁴⁾が、球に対する C_{DX} は、 β が313の値より、544の値の方が全体的に小さいようであり、同様の結果が認められる。 β が大きくなることは、Reynolds数が大きくなることに相当し、したがって、粘性の影響は小さくなる。そのために、 β が大きい場合の C_{DX} が小さくなったと考えられる。

ところで、 C_{DX} が極小値をとる現象は、円柱の抗力係数にみられる‘drag crisis’に相当するものと考えられ、球の抗力係数についても‘drag crisis’が存在すると言えよう。これらの傾向は、 D/h が異なる場合についても同様であった。ただし、紙面の都合上ここには示していない。Jenkins and Inmanは、 $K \cdot C$ 数が7~10で渦の吐出しが始まることを確めている。この $K \cdot C$ 数の値は、 C_{DX} が極小となる $K \cdot C$ 数の値に近く、渦の吐出しが、drag crisisに大きく関与していることが考えられる。本実験では、流況の観察を行っていないため、この点については今後の課題としたい。

図-5は、慣性力係数 C_{MX} と $K \cdot C$ 数の関係を示した一例である。 C_{MX} は、平均的には、 $K \cdot C$ 数が10以下では、 $K \cdot C$ 数の増加にともない若干減少する。この結果は、河野⁷⁾、中村ら⁸⁾の結果と同じであり、また、その値もほぼ同様で、振動流中の球のポテンシャル理論の値1.5に近い。しかし、 $K \cdot C$ 数がほぼ10以上になると、 C_{MX} は、 d/h が大きいものは大きく変化しないが、 d/h が0.5以下の値は急激に減少し、 $K \cdot C$ 数が20前後

で極小値となり、その後 $K \cdot C$ 数の増加に伴ないまた増大する。この変化のし方は、ほぼ図中の曲線のようにになると考えられ、振動流中の円柱に対する慣性力係数⁴⁾と同様の傾向を示す。しかし、円柱の場合と異なり、図-5に示すように、 β による C_{MX} の差はあまり明瞭ではない。慣性力係数が小さくなるのは、渦の吐出し等により、球表面での圧力分布が、流れの剝離、あるいは渦の発生がない場合に比べ、かなり変化するためであろう。 d/h が0.5以上の値が、 $K \cdot C$ 数が10~20で減少しない一つの原因として底面の影響が考えられよう。

3.3 Morison 式の適用範囲外の波力に対する検討

Morison式が適用できない波力の代表的な特性としては、2倍周波数成分、あるいはさらに高次の周波数成分の波力が大きいことが挙げられる。本節では、Morison式が適用できない波力の大半を占めたT型波形を中心に考察する。図-6は、波力の振幅スペクトルから求めた F_z の基本周波数成分の振幅 F_{z1} に対する2倍周波数成分の振幅 F_{z2} の比の水深方向の変化を示した一例である。同図からわかるように、2倍周波数成分波力は、自由表面、底面に近づくにしたがい増加する。このうち、底面に近づく場合については、つぎのように考えられる。Lamb⁹⁾は、球が静止流体中を鉛直方向、水平方向に動く場合に、球体に作用する流体力に及ぼす底面の影響をポテンシャル理論より導いた。その結果を、空間的に一様な流れの中に固定された球に作用する流体力に適用すると以下ようになる。

- (1) 水平方向流速 U のみがある場合

$$F_x = \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{32} \frac{a^3}{z^3} \right) \rho V \dot{U} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_z = \frac{9}{94} \frac{a^3}{z^4} \rho V U^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

- (2) 鉛直方向流速 W のみがある場合

$$F_x = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

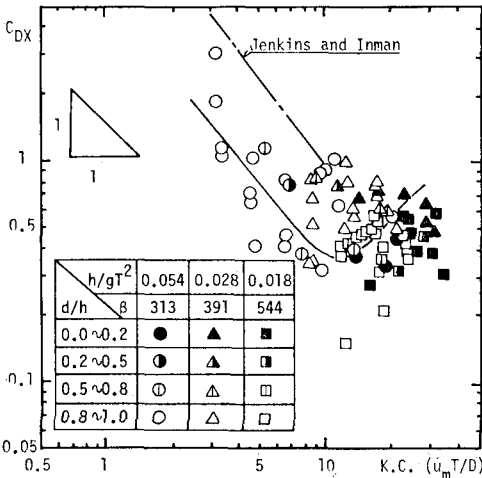


図-4 C_{DX} と $K \cdot C$ 数の関係

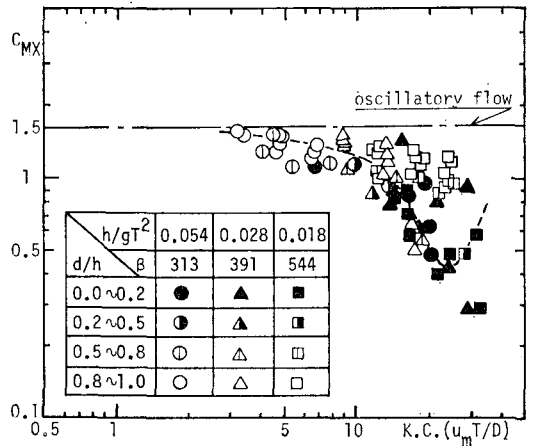


図-5 C_{MX} と $K \cdot C$ 数の関係

$$F_z = \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{16} \frac{a^3}{z^3} \right) \rho V \dot{W} + \frac{9}{32} \frac{a^3}{z^4} \rho V W^2 \dots (9)$$

ここに、 V は球の体積、 a は球の半径で、 z は球の中心から底面までの距離である。式(7)および式(9)の第2項は、底面が存在するために生じる項であるが、これは、底面の存在により、流れが球の上下で非対称になるために生じる項であると考えられる。また、これらの項は、2倍周波数成分の波力を与え、さらに、水平方向、鉛直方向のいずれの方向の流れがあっても z 方向の流体力のみに含まれ、 z 方向には作用しない。この結果は、 z 方向の波力にT型波形が観測されなかったことの一つの原因として挙げられる。また、式(7)、式(9)の形から明かなように、2倍周波数成分を与えるこれらの項は、 z が小さくなるほど、すなわち底面に近づくほど大きくなり、実験結果の傾向とよく一致する。したがって、波動場においても、式(6)~(9)で表わされるような現象が起っていることは充分予測され、波力算定式にこのような項を考慮する必要があることが指摘できる。さらに高次の周波数成分を含むR型波形は、全て底面付近で観測されており、上述した現象のほか、流れの乱れ、などの影響が大きかったためであろう。

一方、自由表面に近づいた場合には、Gradient Effect⁽¹⁰⁾による効果も考えられるが、この点については、今後検討を加える必要がある。

4. 結 言

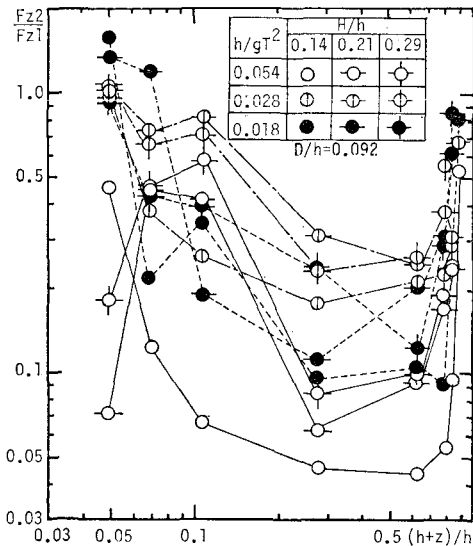


図-6 F_{z2}/F_{z1} の水深方向変化

以上、球体に作用する波力に関して、水理実験にもとづき議論してきた。限られた範囲での議論ではあるが、本研究で得られた結果は以下のように要約できる。

1) 水平方向波力は、本実験の範囲内では、Morison式により全て算定できる。しかし、自由表面、底面の近くに球が置かれた場合は、Morison式により鉛直方向波力を算定することはできない。この適用の限界は、 d/h 、 $K \cdot C$ 数に大きく支配される。

2) Morison式が適用できない波力の大半は、2倍周波数成分が大きく、これは、境界の接近によって球の上下の流れが非対称になるために生じると考えられる。

3) Morison式が適用できる範囲では、流体力係数はつぎのような特性を示す。 $K \cdot C$ 数がほぼ10以下では、抗力係数は、 $K \cdot C$ 数のほぼ-1乗に比例し、また、慣性力係数は $K \cdot C$ 数の増加にともないわずかに減少する。 $K \cdot C$ 数が10以上では、抗力係数は β により変化し、また、慣性力係数は、 $d/h < 0.5$ の範囲で大きく減少する。

4) 球体に対する抗力係数にも、'drag crisis'が存在する。

最後に、本研究を行うにあたり、実験、解析に協力を賜った鈴木正憲君(現東急建設(株)勤務)に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Morison, J.R., et al.: The Force Exerted by Surface Wave on Piles, Petroleum Trans., AIME, Vol. 189, 1950.
- 2) Iwata, K., et al.: Experimental Study of the Wave Force Acting on Armour Rubble of a Rubble-Mound Slope, Natural Disaster Science, Vol. 7, No. 2, 1985.
- 3) 都築 進・他: 波動場に置かれた水平円柱に作用する波力の数値シミュレーション, 第33回海岸工学講演会論文集, 1986.
- 4) Sarpkaya, T. and M. Isaacson: Mechanism of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, New York, 1981.
- 5) 土屋義人・他: 水平円柱に作用する全波力について, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974.
- 6) Jenkins, S. A. and D. L. Inman: Forces on a Sphere Under Linear Progressive Waves, Proc. of 15th ICCE, 1976.
- 7) 河野二夫: 球状物体の波による鉛直方向の流体力一重複波一, 琉球大学理工学部紀要(工学編), 1974.
- 8) 中村廣昭・他: 正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力(続報), 第30回海岸工学講演会論文集, 1983.
- 9) Lamb, S. H.: Hydrodynamics (6th ed.), Dover Publications, New York, 1932.
- 10) 葛西信三: 球体に作用する波力の特性に関する研究, 名古屋大学大学院工学研究科, 修士論文, 1986. 3.