

没水球体に作用する不規則波力の特性

岩田好一朗*・水谷法美**・葛西信三***

1. 緒 言

構造物に作用する不規則波の波力の特性を明らかにすることは、海岸・海洋構造物を設計する上で重要な課題である。本論では、構造物として球状物体を取り挙げる。これは、球体形状は、等方性を有する水圧に対して最も有利な形状であり、今後の海岸・海洋開発の進展の上で、例えば係留構造物の中間ブイ、あるいは海中備蓄タンクなどのように、その必要性が考えられ、したがって球体に作用する波力の特性を明らかにすることは、工学的に重要と考えられるためである。また、円柱に代表される二次元構造物に作用する波力の研究は比較的多く行なわれているが^{1),2)}、球に代表される三次元構造物に作用する波力の研究³⁾は少なく、その基本的な特性を明らかにすることは、水理学的な立場からも重要であると考えられる。本論は、室内水理実験を行い、球体に作用する不規則波による波力の特性を明らかにするとともに、規則波による波力との差異を検討しようとするものである。

2. 水 理 実 験

2.1 実験方法

実験は、名古屋大学工学部土木工学科の二次元鋼製水槽（長さ 25m、幅 0.7m、高さ 0.95m）で行なわれた。水槽の一端には、フラップ型不規則波発生装置が設置されており、他端には、反射波を極力小さくするために、捨石と消波ブロックからなる消波装置が設置されている。静水深（ h ）は 56cm で一定とし、静水面下 20cm の位置（ d ）で、球体に作用する波進行方向（ x ）、鉛直方向（ z ）、および両方向に垂直な水槽幅方向（ y ）の波力 F_x , F_z , F_y と x , z 方向の流速 u , w 、また、同地点での水位 η を計測した。なお、水位の計測を電気容量式水位計で、流速の計測を電磁流速計で行った。実験に使用した球は、直径（ D ）が 2.5cm の合成樹脂製であり、キャンティレバー型波力計を製作して波力を計測した。

波力計のシールド部分は、極力流れを乱さないような形状になっている（図-1 参照）。この波力計の水中固有振動数は、15 Hz 程度であるが、これは入射波の周波数に比べ 1 桁大きく、そのため計測波力に含まれる波力計の固有振動周波数の影響はほとんどないと考えてよい。実験に用いた不規則波は、ブレットシュナイダー型スペクトルを期待スペクトルとする 7 種類の不規則波であり、その諸元を表-1 に示す。なお、比較のため規則波による実験も並行して行った。規則波の実験条件は、 $h=56$ cm に対し、入射波の周期を 3 種類（1.0, 1.5, 1.85 秒）、波高を 2~4 種類（1.0~10.1 cm）変化させ、波力の計測水深を 5 種類（5~50 cm）変化させた。計測時間は各ケースとも約 7 分間であり 計測した水位、流速、波力の時間波形を全て磁気テープに記録した。

2.2 解析方法

実験で得られた全てのデータを、サンプリングタイム $\Delta t=0.05$ 秒で離散化し、波別解析については、ゼロダウンクロス法によって波を定義した。解析に使用したデータの個数は 4096 個（約 2.5 分間）であり、約 200 波が含まれる。水位、波力の記録から、波高、周期と三方向の波力の極大値の $1/n$ 最大値（ $n=1, 3, 10$ ）を計算し、また後述する Morison 式⁴⁾を波力算定式として採用し、同式中の流体力係数を決定した。流体力係数の決定は、Morison 式に流速、加速度を代入することにより計算される波力波形が、実測の波力波形に最も良く合うように最小自乗法により決定した。

2.3 Morison 式

球体に作用する波力ベクトル $\mathbf{F}$ は、Morison 式が適用できると仮定すれば次式で表わすことができ

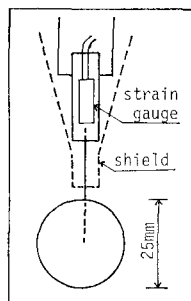


図-1 波力計の概略図

表-1 不規則波の諸元

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7
$H_{1/3}$ (cm)	6.29	6.86	10.22	9.84	8.58	4.24	6.00
$T_{1/3}$ (sec)	1.41	1.16	1.10	0.95	0.87	1.27	1.21
$(H/L_0)^{1/3}$	0.0202	0.0327	0.0592	0.0699	0.0726	0.0168	0.0263

* 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

*** 正会員 工修 名古屋鉄道(株)

る。

$$F = \frac{1}{8} C_{D\rho\pi D^2} \mathbf{v} \cdot |\mathbf{v}| + \frac{1}{6} C_{M\rho\pi D^3} \dot{\mathbf{v}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 C_D ：抗力係数、 C_M ：慣性力係数、 $\mathbf{v}$ ：流速ベクトル、 ρ ：水の密度、であり上ツキ・は時間微分を示す。波力 $\mathbf{F}$ の x 方向成分 F_x 、 z 方向成分 F_z を、(1) 式より次式のように表現するものとする。

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

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

ここに、 C_{Dx} 、 C_{Dz} はそれぞれ x 、 z 方向の抗力係数、 C_{Mx} 、 C_{Mz} はそれぞれ x 、 z 方向の慣性力係数である。(1) 式を仮定する限り、 $C_{Dx}=C_{Dz}=C_D$ 、 $C_{Mx}=C_{Mz}=C_M$ となるはずである。しかし、実際に作用する波力には、抗力と慣性力以外に揚力も含まれる可能性があるため、その影響を流体力係数に含ませる意味も含めて (2) 式、(3) 式中の流体力係数をここでは独立した量として取り扱うものとする。

3. 実験結果とその考察

3.1 流速・加速度の算定

Morison 式中の流体力係数を決定するためには、流速と加速度を正確に与えることが重要である。本論では、流速・加速度としてつぎの三つの値を採用した。すなわち、(i) 実測による流速・加速度^{*}、(ii) 修正伝達関数法⁹⁾により推算した値、(iii) Reid⁹⁾による線型フィルター法により推算した値である。これら三つの方法による流速・加速度を比較した一例を図-2に示す。図-2の値は、全て実測値の最大値で無次元化したものである。同図より、線型フィルター法（以下 LF 法と略記する）による推算値は、流速については、大きな波では過大評価、小さな波では、 w を過小評価する傾向にあり、加速度については、全体的に過小評価する傾向にあること、一方、修正伝達関数法（以下 MTF 法と略記する）による推算値は、流速・加速度ともに、大きな波に対し過大評価すること、などが指摘できる。しかし、両手法により推算した流速・加速度はともに、不規則波の流速・加速度をかなり正確に表現しているものとみなせよう。

3.2 流体力係数

本論では、流体力係数を、(a) 波別解析された一波ごとに異なると仮定した場合、(b) 一つの時系列記録内で

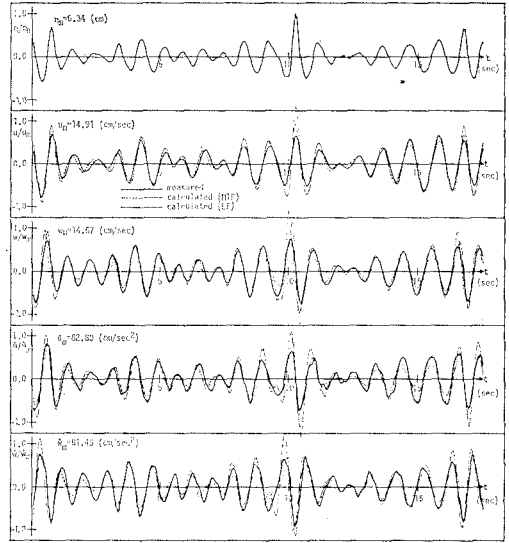


図-2 流速・加速度の比較の一例 (CASE-4)

は一定であると仮定した場合、の二通りについて計算した。これらの二つの手法のうち、(a) の手法、すなわち波別解析された一波ごとに計算した値について述べることにする。図-3は C_{MX} と Keulegan and Carpenter 数 ($u_m T/D$ 、 T は波ごとの周期で添字 m は最大値を示す。以下 K.C. 数と略記する) の関係を Reynolds 数 ($u_m D/\nu$ 、 ν は水の動粘性係数、以下 Re 数と略記する) と D/gT^2 (g は重力加速度) をパラメーターとして示したものである。ただし、同図は実測の流速・加速度を使って得られた値である。図-3より、 C_{MX} は、ポテンシャル理論による値 1.5 より多少小さいが、ほぼ一定値となり、また、 Re 数、 D/gT^2 による変化も小さいことが認められる。なお、ここでは示していないが、 C_{Mz} は、 C_{MX} より若干大きくなるが、その傾向は C_{MX} と同じである。図-3には、比較のために規則波に対する C_{MX} と K.C. 数の関係も示されている。同図によると不規則波による C_{MX} は、規則波による値のほぼ下限値となっているようである。

一方、 C_{Dx} と K.C. 数の関係を示したが図-4であ

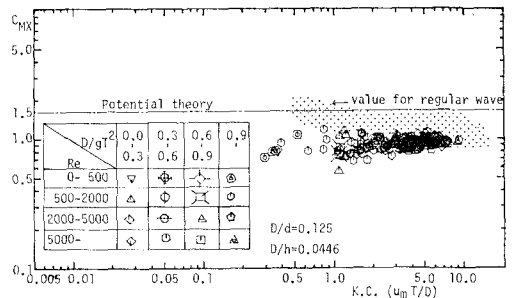


図-3 C_{MX} と K.C. 数の関係の例 (CASE-4)

* 加速度は、実測流速をフーリエ級数展開し、各成分に時間微分に相当するフィルターをかけ再合成したものであるが、LF 法、MTF 法による値と区別するため、実測による加速度と表現する。

る。抗力係数は、慣性力係数に比べてかなりばらつき、その傾向は明瞭でないが、K.C. 数が5より小さい領域では、K.C. 数が小さい方が、値は大きくなるようである。同図ではあまり明瞭ではないが、 R_e 数の小さい方が抗力係数は大きくなる傾向が、 C_{DX} と R_e 数の関係の図より認められた。ただし、紙面の都合上、ここでは示さない。また、 D/gT^2 による差異は認められなかった。これらの傾向は C_{DZ} についても同様であった。図-4には、規則波による C_{DX} と K.C. 数の関係も示されている。両者の値を比較すると、不規則波の抗力係数は、規則波による値に比べ全体的に小さいことが認められる。つまり、規則波より不規則波の方が抗力は小さいことを示している。この結果より、同じ周期・波高の波が続く場合より、異なる周期・波高の波が入射する場合の方が渦は発生しにくいことが推察される。

図-5は、図-3、4に示される流体力係数を使って計算される波ごとの抗力の最大値 F_{Dm} と慣性力の最大値 F_{Im} の比 F_{Dm}/F_{Im} と K.C. 数の関係を示したものである。同図は、 x 方向の波力について示したものであるが、値はばらついており明瞭な傾向は認められない。しかし、ほとんど全ての値が1以下であり、したがって、本実験の範囲では、慣性力が抗力より卓越していたことが認められる。

つぎに、(b)の手法、すなわち、全ての波に対して流体力係数は一定であると仮定した場合の値について述べる。この手法で求めた値を表-2に示す。同表には、実測の流速・加速度を使って計算した値のほかに、(ii)、(iii)の手法により、水面波形より推算した流速・加速度を使って計算した値も示されている。(i)の流速・加速度、すなわち実測値を使って得られた値に比べ、(ii)の流速・加速度(MTF法)を使った値は小さく、逆に、(iii)の流速・加速度(LF法)を使った値は大きくなっ

ていることがわかる。これは、本実験の範囲で卓越していた慣性力に大きく影響を及ぼす加速度を、MTF法では大きく、逆に、LF法では小さく見積るためであろう。これは、表-2の流体力係数のうち、実測の流速・加速度から計算される値が、K.C. 数の大きな波、すなわち波高の大きな波の値に近く、特に、MTF法による加速度は、波高の大きな波で加速度を過大評価することより考えられる。また、MTF法による C_{DZ} が、他の C_{DZ} に比べ大きいのは、MTF法による w の位相が若干ずれているためであろう。

図-6は、実測・MTF法・LF法の三つの手法による流速・加速度と、表-2に示される各手法による流体力係数を使って計算される波力波形を、実測の波力波形と比較したものの一例である。同図より、実測の流速・加速度を使って計算される波力波形が最も実測の波力波形に近いが、MTF法、LF法による流速・加速度を使って計算される波力波形もかなり実測の波力波形に近いことが認められる。この結果は、MTF法、あるいはLF法を使う場合の流体力係数の特性、言い換えれば、MTF法、LF法が、どの程度不規則波の流速・加速度を正確に評価できるかわかっており、それによって流体力係数を修正すれば、水位変動から球体に作用する不規則波力は予測可能であることを示している。なお、本実験では、前述したように、波ごとに係数が大きく変化する

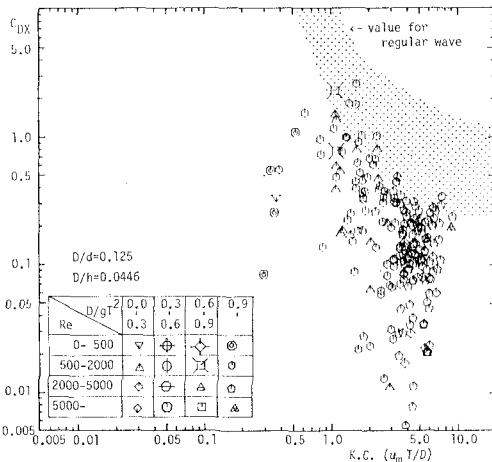


図-4 C_{DX} と K.C. 数の関係 (CASE-4)

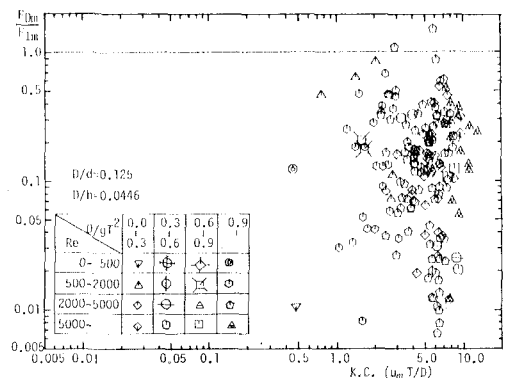


図-5 F_{Dm}/F_{Im} と K.C. 数の関係 (CASE-4)

表-2 流体力係数

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7
C_{DX}	Meas.	0.29	0.17	0.26	0.13	0.02	0.05
	MTF	0.23	0.16	0.21	0.13	0.04	0.05
	LF	0.31	0.20	0.20	0.11	0.02	0.13
C_{DZ}	Meas.	0.05	0.03	0.12	0.05	0.14	0.21
	MTF	0.64	0.43	0.41	0.24	0.37	0.46
	LF	0.07	0.02	0.09	0.05	0.07	0.17
C_{MX}	Meas.	0.91	0.92	0.95	0.95	0.92	0.86
	MTF	0.79	0.77	0.76	0.79	0.78	0.81
	LF	1.24	1.15	1.10	1.08	1.00	1.18
C_{MZ}	Meas.	1.11	1.09	1.04	1.00	1.01	0.88
	MTF	0.94	0.93	0.82	0.87	0.89	0.84
	LF	1.35	1.34	1.25	1.17	1.14	1.10

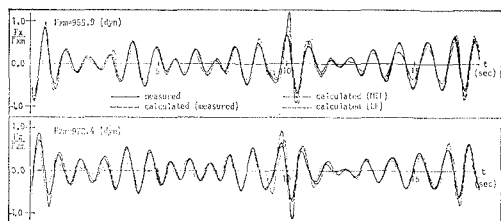


図-6 波力波形の比較の一例 (CASE-4)

ることのない慣性力が卓越していたため、流体力係数を一定と仮定しても、波力波形をかなり正確に計算することができたが、波ごとに係数が大きく変化する抗力が卓越する場合には、別途検討しなければならない。

3.4 無次元最大波力

図-7 に、波別解析された波ごとの波力の極大値を無次元化した無次元最大波力 ($F_{xm}/\rho u^2 D^2$) と K.C. 数の関係を示す。同図より、無次元最大波力は、K.C. 数のほぼ -1 乗に比例して減少する傾向が認められる。この傾向は、波力の極大値は波高に比例することを示すものであり、慣性力が卓越していたことから予測できるものである。なお、図中の直線は、規則波中に置かれた球体に作用する圧力を球体がない場合の圧力で近似し、球表面にわたって積分して得られる仮想的な波力、すなわち、 $C_M=1.0$ とした場合の慣性力に対する値を示したものである。ただし、圧力の近似式は微小振幅波理論による表示式を採用した。したがって、実験値と計算値 (図中直線) の比は、慣性力係数に相当する量として考えられるが、同図よりその値は、表-3 の C_{MX} (実測の流速・加速度による) に近いことがわかる。同様のことは、 z 方向の波力についても認められた。したがって、 F_x, F_z の波ごとの極大値も予測可能であるといえる。

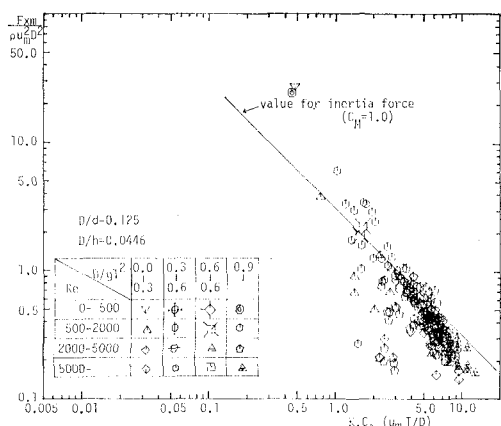


図-7 無次元最大波力と K.C. 数の関係 (CASE-4)

3.5 極大波力の確率分布

前述したように、波別解析された波ごとの F_x, F_z の

極大値は、ほぼ波高に比例することが確かめられた。したがって、波高の確率分布と、 F_x, F_z の極大値の確率分布は相似となることが予想される。Borgman⁷⁾、Bretschneider⁸⁾ は、円柱に作用する不規則波力の極大値は慣性力が支配的で、波動場が微小振幅波理論で表現できるならば、Rayleigh 分布になることを導いている。また、榎木・中村¹⁾ は、実験からもそれを確かめている。本実験においても慣性力が卓越することが確かめられており、また、規則波による実験から、実験による水位・流速・加速度は、微小振幅波理論による値とよく対応していることも確かめられた。したがって、球体に作用する波力についても、波高が Rayleigh 分布すれば、 F_x, F_z の極大値も Rayleigh 分布することが考えられる。図-8 は、波高、および F_x, F_z, F_y の極大値の出現確率を、未超過確率で Weibull 確率紙にプロットしたものであり、図中の直線は、Rayleigh 分布を示す。ただし、横軸は、各々の平均値で無次元化してある。同図より、 F_x, F_z の極大値の確率分布は、波高の確率分布に非常によく似ており、また、それらは全て Rayleigh 分布に近いことが認められる。また、揚力 F_y についても、波高の確率分布に近いことが認められる。しかし、 F_y については、多くのケースで波高の分布と差が認められ、また周期の分布も、波の周期に比べ短い周期の方へ偏っており、揚力成分の非線型性が認められた。

ところで、 F_x, F_z の極大値の確率分布が、波高の確率分布と相似であり、慣性力係数が既知であれば、波高の $1/n$ 最大値より、 F_x, F_z の極大波力の $1/n$ 最大値が計算できることが考えられる¹⁾。すなわち、 $1/n$ 最大波の加速度と慣性力係数を使って、 F_x, F_z の極大値の $1/n$ 最大値が計算できると考えられるが、実際にこの計算を行った結果を表-3 に示す。なお、計算波力は、慣性力のみであり、加速度は、簡単のため微小振幅波理論

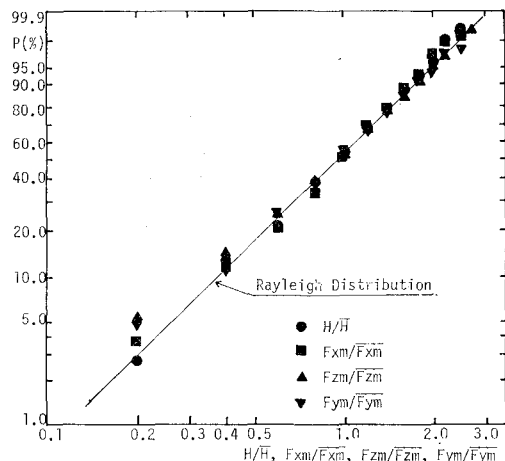


図-8 波高、波力の極大値の確率分布 (CASE-4)

表-3 波力の極大値の比較

		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6	CASE-7
F_{xm} ave. (dyn)	Meas.	266.6	293.4	449.1	429.8	355.1	179.6	252.8
	Cal.	267.8	298.5	452.2	422.6	350.3	176.7	272.6
F_{zm} ave. (dyn)	Meas.	240.1	290.0	438.0	418.1	380.3	151.2	221.7
	Cal.	263.9	318.8	469.5	482.5	412.9	191.1	290.1
$F_{xm1/3}$ (dyn)	Meas.	401.2	452.3	682.4	657.2	570.3	285.8	383.6
	Cal.	367.0	446.8	685.6	670.6	578.4	263.5	362.9
$F_{zm1/3}$ (dyn)	Meas.	406.3	493.5	699.9	682.1	626.5	247.5	349.1
	Cal.	308.1	446.3	731.3	757.3	677.3	243.1	359.2
$F_{xm1/10}$ (dyn)	Meas.	514.1	553.4	844.3	806.8	713.2	356.0	471.3
	Cal.	458.2	548.7	865.1	843.4	719.9	333.4	444.7
$F_{zm1/10}$ (dyn)	Meas.	508.0	607.4	850.4	871.6	799.9	314.0	426.6
	Cal.	377.8	557.8	851.9	961.9	848.4	334.1	420.1

により与えた。この点については、規則波の実験により、その妥当性は確められており、また、波別解析された波ごとの実測の加速度も、微小振幅波理論による値と近いことも確められている。また、慣性力係数は、各ケースとも同じ値として、表-2 より、平均的な値として、 $C_{MX}=0.9$, $C_{MZ}=1.1$ を採用した。表-3 より、計算値と実測値を比較すると、 F_x に関する値については、計算値は実測値に非常に近いことがわかる。したがって、 F_x については、水位の記録から、極大波力の $1/n$ 最大値は予測可能であると言える。一方、 F_z については、かなり差のあるものの認められるが、大半は、実測値と計算値は近いものとみなせる。 F_z で実測値と計算値で特に差があるもの、また、 F_x に比べ F_z の値が大きくなるものについては、揚力の影響が大きかったことが一因として考えられる。

4. 結 言

以上、本論では、没水球体に作用する不規則波力の特

性について、限られた範囲ではあるが議論してきた。その結果、流体力係数は、規則波による値に比べ若干小さくなることが認められた。また、本論で扱ったケースのように、慣性力が卓越している場合には、適当な流体力係数を使うことにより、水位変動から、 F_x , F_z の波力波形、極大波力などは、かなり正確に予想できることが認められた。今後、抗力が卓越するような領域での波力について検討を加えると同時に、揚力の影響についても検討していく所存である。最後に、本研究に際し協力していただいた越沢哲君(現鹿島建設)に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 樺木 亨・中村孝幸: 円柱に作用する不規則波力の特性——慣性力の卓越する場合について——, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 7~12, 1973.
- 2) 岩垣雄一・石田 啓・千田哲雄: 円柱に作用する不規則波力について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1973.
- 3) 河野二夫: 球状構造物の波による振動に関する基礎的研究, 琉球大学理工学部紀要, 第5号, pp. 129~212, 1972.
- 4) Morison, J. R., J. W. Johnson and S. A. Schaaf: The force exerted by surface wave on piles, Petroleum Trans. AIME, Vol. 42, pp. 149~157, 1950.
- 5) 小山裕文・岩田好一朗・布藤省三: 修正伝達関数法による水粒子速度の一算定法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 59~63, 1984.
- 6) Reid, R. O.: Correlation of water level variations with wave force on a vertical pile for non periodic waves, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 749~786, 1957.
- 7) Borgman, L. E.: Wave forces on piling for narrow band spectra, Proc. ASCE, Vol. 91, No. WW 3, pp. 65~90, 1965.
- 8) Bretschneider, C. L.: Probability distribution of wave force, Proc. ASCE, Vol. 93, No. WW 2, pp. 5~26, 1967.