

波別解析法に基づく不規則波浪の波長・波速に関する研究

岩 垣 雄 一*・木 村 晃**

1. 緒 言

従来、海岸構造物の設計・施工に際し、不規則波浪を定量的に把握する最も一般的な方法として、有義波法に代表される平均波法が採られてきた。すなわち、現地海岸に來襲する波浪は本質的に不規則であり、その特性を定量的に把握するには非常な困難が伴う。このため、波高・周期等計測の簡単な波の基本量の統計的な平均値を求め、この平均的な特性をもつ単一の規則波が來襲するものとして、構造物の機能やその安定性を検討する方法が採られてきたわけである。この方法は非常に簡便ではあるが、本来不規則波に含まれる各波の個々の特性が、平均操作により不明確になってしまうという欠点を持つ。こうした統計的な平均値が意味を持つのは、波別解析法で定義した波の諸量の属する確率母集団の特性が明確にされ、かつこれら諸量の力学的特性が十分把握できている場合に限られるわけである。しかし、元来、波別解析法は便宜に基づく波の一決定法であり、これにより定義した不規則波の2, 3の特性量から、短絡的に同じ特性量を有する規則波とおきかえて、設計・施工等の検討を行うことには大きな問題があろう。このような状況のもとで、本研究は、波別解析法、特に zero-up-cross 法により定義した各波の力学的特性解明の第1歩として、周期、波長および波速など、波の基本量相互の関連を検討することを目的として行ったものである。

2. 不規則波の周期・波長・波速

zero-up-cross 法による不規則波の周期は、固定された点における水位変動の時間記録をもとに決定されるものである。一方、波長は逆に時間を固定して得られる空間波形をもとに定義される量であり、本来、不規則波浪のように、時間的にも空間的にも複雑に変形してゆくような現象に対しては、その定義の相違により、厳密な意味では両者の対応はとり得ないことになる。しかしながら、水位の変化は時間的、空間的にみてそれほど急激なものではなく、比較的短い区間を進行する間であれば、

その水面形はほぼ保存され、容易にその進行を目で確かめ得る。

図-1 はこのことを示す1

例であり、図

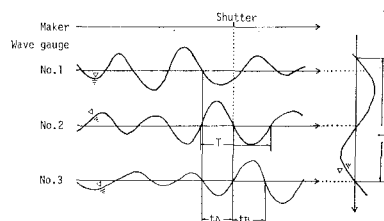


図-1 周期・波長・波速の定義

中の3つの水位記録は1m間隔で設置した3本の波高計で記録した不規則波の時間記録である。図より3つの水位記録は相互に若干の相違はみられるが、その形状をほぼ保持したまま進行していることがわかる。このことから、写真撮影等の手法によれば、波長を決定し周期との対応を検討することが可能であることがわかる。また同時に、波速もこの特性を利用して、波形上の任意の一点、例えば波の峰、谷もしくは zero-cross 点が所定の区間を進行する時間から決定することができる。しかし、不規則波の水面形は元来徐々に変形してゆくものであり、数多くの波の波長および波速を、同じ定義で決定された量として相互に比較するため、本研究では以下に述べるような3つの補助的な定義を定めた。

- 1) 周期は波高計の時間記録をもとに zero-up-cross 法により定義する。
- 2) 波長は1)で定義した波が波高計の位置を通過する際、水位が負の方向に向って静水位を横切る瞬間に撮影した写真を zero-down-cross 法により読み取り決定する。
- 3) 波速は1)で定義した波の水位の zero-down-cross 点が、所定の区間を通過するに要した時間をもとに算定する。

3. 実験装置および方法

実験は京都大学工学部土木工学教室地下実験室に設置してある長さ27m、幅50cm、深さ75cmの両面ガラス張り水槽を用いた。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置してある。一方他端には、1/3勾配のアルミメッシュ製スロープにステラシートを張った消波工を設置し、波の反射を防ぐようになっている。この

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

水槽の造波板より 12m から 16m までの 4m の区間を
検査区間とし、この区間の中で測定を行った。この区間
の前面のガラスには写真撮影の便のため、静水面と一致
するように約 3mm 幅の黒のビニールテープを水平に張り
り、また 10
cm 間隔に縦
の目盛を同じ
黒のビニール
テープで張り
つけた。また
造波板より
13m, 14m お

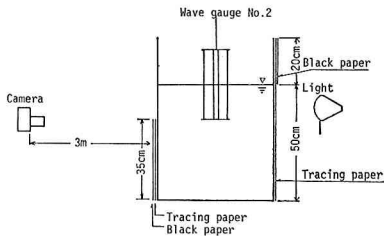


図-2 照明装置

よび 15m の 3 点にそれぞれ電気抵抗線式波高計 No. 1, 2 および 3 を
設置し、水位の変動を測定した。前述した検査区間の前後のガラス面には
図-2 に示すような工夫をほどこした。すなわち、水槽の後面および
前面の下半分にトレーシングペーパーを張り、後面より照射したライト
の光が散乱光になって水面を照らすようにした。また、後面上部および
前面の下半分にはこのトレーシングペーパーに黒ケント紙をかさねて張り
つけ、これらの部分から光がもれるのを防いだ。写真撮影に用いたカ
メラ（250 枚撮り、モータードライブ付）は図-2 でもわかるように、

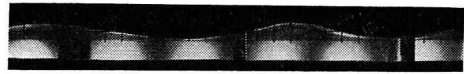


写真-1 不規則波の水面形

表-1 平均値

Case No.	f_p (Hz)	T_m (sec)	H_m (cm)	$T_{1/3}$ (sec)	$H_{1/3}$ (cm)	$\bar{K}$	T_c (sec)	$\bar{R}$
1	1.2	0.88	5.21	0.89	8.15	0.99	0.92	1.02
2	1.0	0.94	5.28	0.99	8.36	0.98	1.21	1.02
3	0.8	1.00	4.98	1.11	7.82	0.95	1.15	1.00
4	0.6	1.30	5.63	1.50	9.04	0.96	1.32	1.02

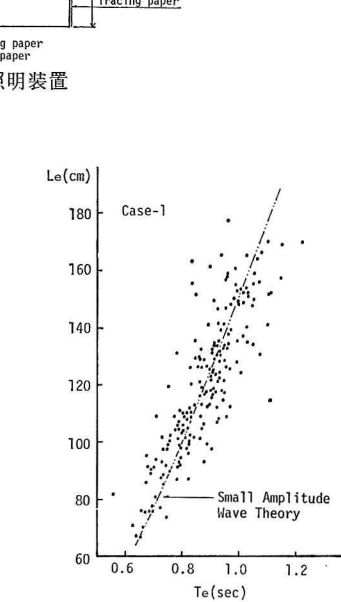
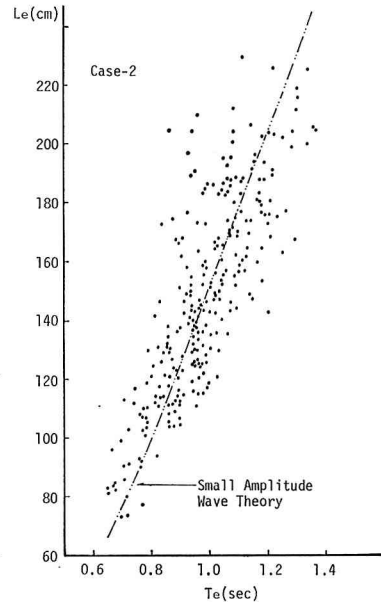
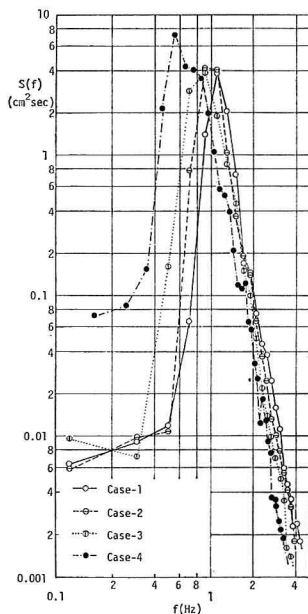
(a) $f_p=1.2$ Hz(b) $f_p=1.0$ Hz

図-3 不規則波のスペクトル

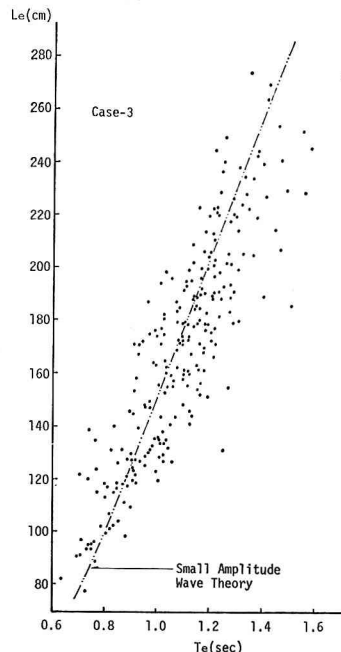
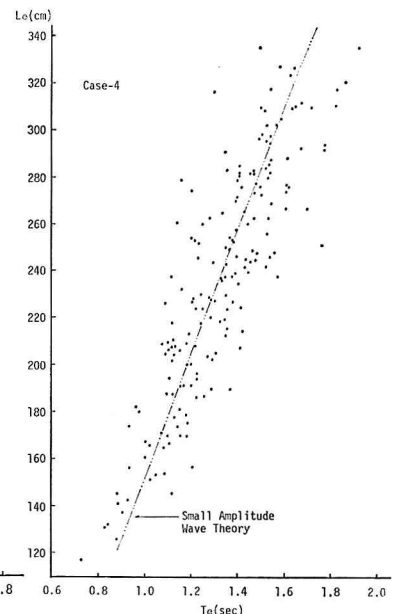
(c) $f_p=0.8$ Hz(d) $f_p=0.6$ Hz

図-4 波長と周期の関係

No. 2 の波高計の位置から 3m 離れた水槽前面に設置した。

実験は著者らによるシミュレーションシステムを利用して、**図-3** に示すスペクトル特性をもつ 4 種の不規則波浪を発生させて行った。各ケースとも、水槽中に発生させた不規則波が十分定常になった時より、水位変動を記録するとともに、写真撮影を開始した。不規則波の周期 T_e は No. 2 の波高計の記録を読み取り決定した。写真撮影はこの No. 2 の波高計の位置で、水位の zero-down-cross 点が通過する瞬間に行い、同時にペン書オシログラフのマーカースイッチを押して、後の解析において記録紙と写真の対応がとれるようにした。**図-1** でもわかるように、写真撮影の瞬間は波の 1 周期のほぼ中央に相当する。**写真-1** はこのようにして撮影した波形の 1 例を示すものである。撮影したフィルムはフィルムモーションアナライザーを用いて読み取り、波長 L_e を決定した。また波速 C_e は **図-1** に示すように、各波高計の水位の zero-down-cross 点の時間間隔の和 ($t_A + t_B$) で区間長 2m を割り算定した。なお 4 つのケースとも水深は 50 cm と一定に保った。

4. 解析結果ならびに考察

表-1 は実験に用いた不規則波の統計量ならびに後に示す測定値の平均等を示したもので、suffix の m は平均、 $1/3$ は $1/3$ 最大値の平均を意味する。また f_p は **図-3** に示したスペクトルのピーク周波数である。**図-4** (a)~(d) はそれぞれ、各ケースの不規則波の波長と周期の関係を示したものである。各ケースとも図中には約 200~250 個のデータがプロットしてある。図中の鎖線は微小振幅波理論に基づく水深 50 cm における波長と周期の関係を示したもので、各図とも実験値は若干散乱してはいるが、理論曲線と定性的にはかなり良い対応を示していることがわかる。事実、

$$D = \sum \left\{ L_e - \bar{K} \frac{gT_e^2}{2\pi} \tanh kh \right\}^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で示す波長の実測値と周期をもとに計算した理論値との差の平方和 D を最小にする $\bar{K}$ の値を計算したところ、**表-1** に示すように、若干小目ではあるがすべてほぼ 1.0 に近い値であった。このことより平均的に

は、波長と周期はほぼ微小振幅波理論による両者の関係を満足しているといつてよい。しかし、各ケースの実験結果を更に詳細に検討すると、理論曲線との間に若干の平均的傾向の差がみられる。

この点を検討するため、**図-4** の値を用いて最小 2 乗法により、3 次曲線によるあてはめを行った結果を示したものが **図-5** である。この図より明らかなように、平均曲線の勾配は、同時に示した微小振幅波の理論曲線よりゆるやかで、周期の小さい領

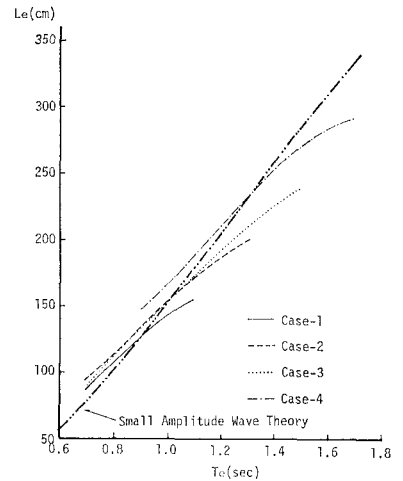


図-5 波長の平均曲線

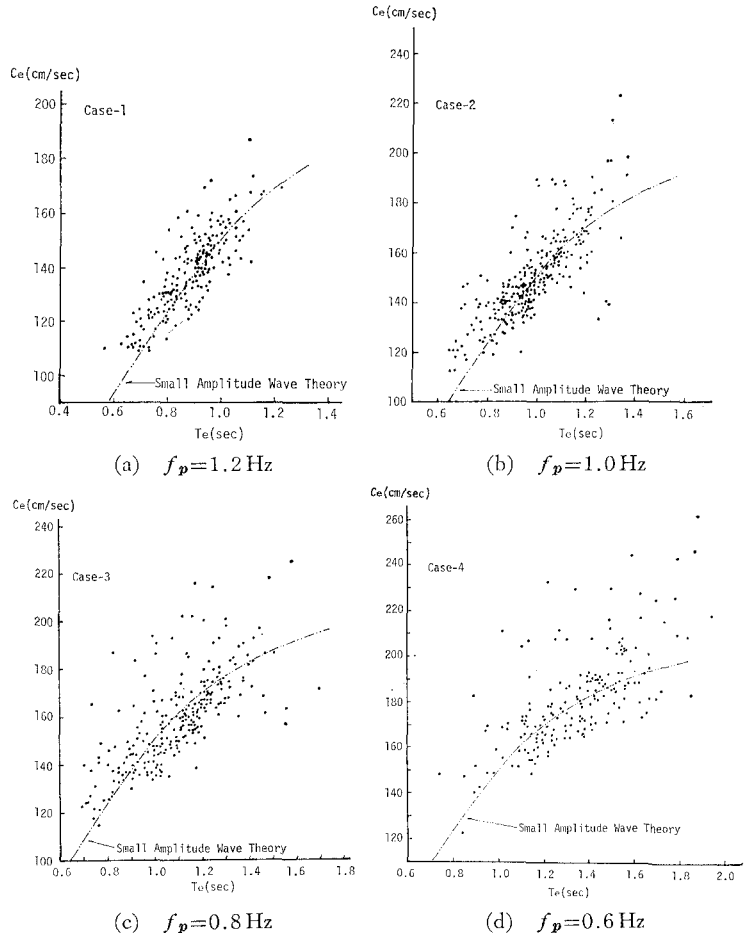


図-6 波速と周期の関係

域では、平均曲線の方が理論曲線より大きな値を示し、周期の大きな領域では逆に小さくなる。更に周期が大きくなると、波長の増加の割合が徐々に減少してゆく傾向を示している。また、特に注目すべきことは、各平均曲線は一致せず、スペクトルのピーク周波数が小さくなるにつれて、しだいに上方に移動してゆくという点である。このことより、波長は規則波のように、水深および周期に対応して一義的に定まるものでなく、スペクトルのピーク周波数により定まる相対的な量であることがわかる。図-5 に示した平均曲線と理論曲線との交点における周期 T_0 は、表-1 に示すように T_m の 1.02~1.28 倍の値が得られた。

図-6 (a)~(d) は、それぞれ各ケースの不規則波の波速と周期の実験値の関係を示したものである。実験値は若干散乱してはいるが、やはり図中にあわせて示した微小振幅波の理論曲線とかなり良い対応を示していることがわかる。波速に対しても式 (1) と同様、式 (2) のように、その実験値と周期をもとに計算した理論値との差の平方和 E

$$E = \sum \left\{ C_e - \bar{R} \frac{gT}{2\pi} \tanh kh \right\}^2 \dots\dots\dots (2)$$

を最小にする $\bar{R}$ の値を計算したところ、表-1 に示すように、1.0 に非常に近い値が得られた。しかし各図に共通していえることであるが、周期の小さな領域では、実験値の多くが理論曲線より若干大きい値を示している。この点を更に検討するため、最小 2 乗法による 3 次曲線のあて

はめを行った結果を示したものが図-7 である。図より明らかなように、周期の小さい領域では波速の平均曲線は同時に示した理論曲線よりいく分上にあり、周期の増加にともない理論曲線に近づいてゆく傾向がみられる。この平均曲線と理論曲線がほぼ一致する周期は、表-1 に示した T_m の約 1.1 倍程度である。これより、周期が T_m の 1.1 倍以上の領域では、平均的には波速は規則波と同様に水深と周期より一義的に決めることができるが、それより小さい領域での波速には、その他にスペクトルのピーク周波数もしくは平均周期も関係することがわかる。

5. 結 言

この研究は、実験室内で発生させた不規則波を対象と

して実験を行い、2. に示した補助的な定義にもとづいて、zero-up-cross 法により決定した波の周期、波長および波速といった波の基本量相互の関係について検討したものである。その結果、次のようなことがわかった。

(1) 不規則波の波長

式 (1) による $\bar{R}$ の値は各ケースともほぼ 1 に近い値が得られた。このことより、波長と周期の平均値に限れば、両者はほぼ微小振幅波理論の関係式を満足することがわかった。しかし図-5 で示した平均曲線からわかるように、平均周期の 1.0~1.3 倍程度の周期を境にして、それより周期が小さな領域では実験値は理論値より幾分大きい値を示し、逆にそれより大きな領域では小さい値を示すものが多くなると、ならびに波長は規則波のように水深と周期より一義的に定まる量でなく、その周期と平均周期などとの相対的な関係により定まり、対象とする不規則波の平均周期が増加すれば、それにつれて波長も増加することなどがわかった。

(2) 不規則波の波速

式 (2) による $\bar{R}$ の値は各ケースとも 1 に非常に近い値が得られた。したがって波速と周期の平均値もほぼ微小振幅波理論の関係式を満足する。しかし図-7 に示すように、実験値の平均的な傾向は理論曲線より幾分ゆるやかな曲線に従いが、周期の小さな領域では理論値より若干大きく、周期の増加にともない平均曲線は徐々に理論曲線に漸近してゆく、平均周期の 1.1 倍程度より大きな領域では、両者はほぼ一致する。しかし、各ケースに対して示した平均曲線がそれぞれ異なることからわかるように、波速もその周期と平均周期との相対的な関係により定まる量であることがわかった。

以上述べてきたように、zero-up-cross 法により決定した不規則波の周期、波長ならびに波速といった波の基本的な諸量は、ある程度のばらつきを持つとはいえ、相互にかなり明確な関連を有することがわかった。これより zero-up-cross 法というのは個々の波の特性を把握するためのかなり有効な方法であるといえる。しかし、これは従来行われて来た方法が有効であるということではなく、この方法による検討が有意義であるという意味である。

最後に、実験に用いたカメラは防災研究所海岸災害研究部門所属のものであることを付記するとともに、資料の解析に協力していただいた若築建設協賛哲夫氏（当時学生）に感謝の意を表する。なおこの研究は文部省科学研究費（一般研究）の一部であることを付記する。

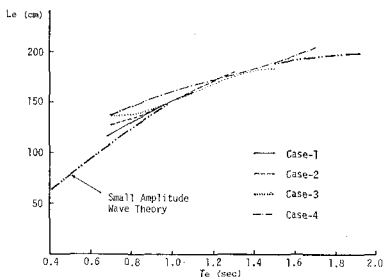


図-7 波速の平均曲線