

造波機による現地不規則波浪のシミュレーション に関する研究

岩 垣 雄 一*・木 村 晃**

1. 緒 言

従来、海岸工学上の諸問題は多くの場合規則波を対象として研究され、その結果が海岸構造物を設計するときの基準として用いられている。しかし、実際の現地波浪は不規則な波で、その実体の把握が困難であるため、経験に基づいて導入された統計量である有義波を、これら不規則波の代表的な波として採用してきた。しかし、こうした統計量に対する物理的意義は必ずしも明確でなく、波の不規則性が海岸工学上の諸問題に対しどの程度影響を与えるかという点に関しては、現在のところあまりわかっていない。このため、海岸構造物設計の際の外力としての波の決定法が、それ以外の設計条件の決定方法に比して、同様に合理的であるとはいえない。

一般に、不規則波浪に含まれる各成分波の挙動が、微小振幅波理論によって表現できる場合は、これら各成分波の単一波としての特性を重ね合わせることが可能であり、取扱いは比較的簡単である。しかし、海岸に接近してきた波は非線型な特性を持ち、これらに対しては上述したような線型重合ができない。したがって工学的に問題となる海岸付近の不規則波浪の持つ諸特性を明らかにするためには、現地あるいは実験室において不規則波浪を用いた研究を行なう必要がある。このため各国において、現地波浪と同様な特性の不規則波浪を発生させる造波機の開発が試みられ、最近では研究に用いられ始めている。

実験室において不規則波浪を発生させる方法には、大別して¹⁾、(1) 風洞水槽による方法²⁾、(2) 造波板を駆動するモーターの回転数と運動の振幅を刻々変化させる方法³⁾、(3) 有限個の正弦波を合成する方法⁴⁾、および(4) 造波板をランダム信号により駆動させる方法⁵⁾があるが、この研究は(4)の方式を用いてあらかじめ設定した任意の期待スペクトルをシミュレートする手法を示し、それがかなり良好な結果を与えることを述べたものである。

2. 電気油圧式不規則波発生機

実験に用いた不規則波発生機の原理ならびにその造波

特性に関しては、すでに報告したので¹⁾、ここではその原理のみを略述する。

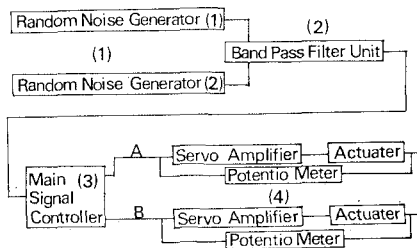


図-1 電気油圧式不規則波発生機のブロック線図

不規則波発生機の制御装置は図-1に示すように、4つの独立したユニットより構成されている。(1)の部分はランダムノイズ発生器であり、ここからの信号は、DC~200 cps まで平坦なスペクトル特性を持ち、かつ2台の発生器の信号出力強度は等しい。この発生器の出力は(2)のスペクトル修正用帯域濾波器(バンドパスフィルターユニット)に導かれる。このユニットには中心周波数が0.2 cps から5.0 cps まで、それぞれ1/3 oct ごとに分割された15本のバンドパスフィルターが組込まれている。

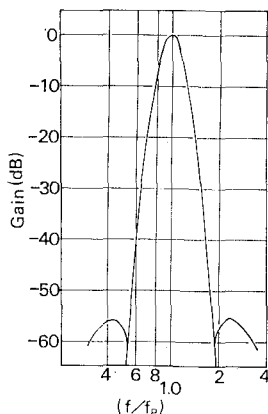


図-2 バンドパスフィルターの周波数特性

このフィルターは、図-2に示すように80 dB/oct というきわめて大きな減衰傾度を持つ。各フィルターは中心周波数の上下12.5%の周波数帯において、最大3 dBの減衰効果しか持たないが、この周波数帯外では減衰傾度が急になるのでランダムノイズ発生器からの信号をほとんど通過させない。また、このユニットにおける15本のフィルターは

互いに独立しており、単独または組み合わせで、希望する周波数帯の不規則信号を得ることができる。各バンドパスフィルターにはそれぞれスライド式抵抗器が付属しており、フィルターのゲインは0から100%の間、連続可

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

変になっている。なお、各フィルターの出力特性はあらかじめ検定し、一定になるよう調整した。このバンドパスフィルターユニットからの出力信号は図-1(3)で示される主信号調整器に導かれる。このユニットにおいては、(2)からの出力信号を 1.0 cps 以上の高周波信号と 1.0 cps 以下の低周波信号に分離する。この主信号調整器からの出力は、分離されたまま別々に図-1(4)の A および B のサーボ増幅器に導かれて増幅され、さらにアクチュエーターに付属するサーボバルブに送られる。サーボバルブは、サーボ増幅器からの信号にしたがって油圧源より送り込まれる高圧油を制御し、アクチュエーターの往復動シリンダーの左右の部屋に交互に送り込むことによりピストンを高速に作動させ、造波板を駆動させる。主信号調整器から出される信号のうち、1.0 cps 以下の信号でピストン型造波板に付属するピストンを、1.0 cps 以上の信号でフラッター型造波板のピストンを駆動させる。各ピストンの後端にはポテンシオメーターがついており、その変位量を信号として発し、主信号調整器よりの信号とたえず比較して、その差が最小となるように作動している。つまり、図-1 の(4)の部分よりわかるように、サーボ増幅器、アクチュエーターおよびポテンシオメーターで1つのフィードバックシステムを形成し、主信号調整器からの入力信号に対し、造波板が忠実に作動するよう設計されている。

3. 不規則波発生機の制御

不規則波発生機を用いて任意のスペクトル形状をシミュレートする場合、次のような手順にしたがって不規則波発生機を制御する。

(1) 期待スペクトルの決定

(2) 水深ならびにスペクトルのピーク周波数の決定

(3) 各バンドパスフィルターの中心周波数における期待スペクトルのエネルギー密度を計算する。

(4) 造波機の造波特性を考慮し、(3)で決定したエネルギー密度をもとにして各バンドパスフィルターのゲインを決定する。

上述した4段階に対し、さらに具体的な説明を加える。

(1) 今回の実験で期待スペクトルとして選んだのは、外洋で十分発達した風波のスペクトルで、最近よく議論の対象となる Pierson および Moskowitz スペクトルと他の1つの例として Neumann スペクトルである。一般に Pierson および Moskowitz スペクトルは次式のように示される。

$$S(f) = c_1 f^{-5} \exp(c_2 f^{-4}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 c_1, c_2 は定数である。式(1)をスペクトルのピーク周波数 f_p ならびにピークでのスペクトル密度 $S(f_p)$

を用いて書きかえると、

$$S(F) = S(f_p) F^{-5} \exp\left\{\frac{5}{4}(1-F^{-4})\right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

のようになる。ここで $F = f/f_p$ である。

また、Neumann スペクトルは

$$S(f) = c_1 f^{-6} \exp(c_2 f^{-2}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように表現されるので f_p および $S(f_p)$ を用いて書きかえると、

$$S(F) = S(f_p) F^{-6} \exp\{3(1-F^{-2})\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

のように与えられる。式(2)および式(4)で示されるスペクトル形をシミュレートするためには、 f_p ならびに $S(f_p)$ を与え、そのスペクトル形をシミュレートすればよいわけであるが、今回は $S(f_p)$ に対しては特に具体的な値を設定せず、スペクトル形状のシミュレートを目録1の目標とした。

(2) 水深は 40 cm と一定に保った。ピーク周波数 f_p は各実験を通じて 0.2 cps とした。

(3) 前述したように、各バンドパスフィルターの有効周波数幅は中心周波数に対して $\pm 12.5\%$ であるから、各フィルターよりの出力信号の周波数は 0.2 cps より 5.0 cps まで切れ目なく連続となる。したがって各フィルターの有効周波数幅を問題とすることなく、中心周波数での期待スペクトルのエネルギー密度を計算し、各フィルターのゲイン決定の基準とした。

(4) Biesel および Suquet⁽⁶⁾ は規則波を対象として、造波板の変位 $2R$ と発生波の波高 H との関係を理論的に求め、次式のように与えた。

ピストン型:

$$\frac{H}{2R} = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh kh \cosh kh + kh} \quad \dots\dots\dots (5)$$

フラッター型:

$$\frac{H}{2R} = \frac{2 \sinh kh}{kh} \frac{1 - \cosh kh + kh \sinh kh}{\sinh kh \cosh kh + kh} \quad \dots\dots\dots (6)$$

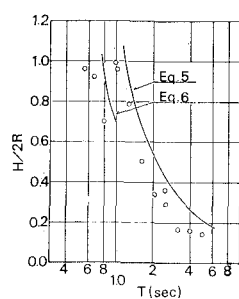


図-3 不規則波発生機の造波特性

これらの2式は不規則波に対してもほぼ適用できることが著者ら⁽¹⁾により明らかにされている。図-3はその1例を示したもので、水深 40 cm で行なった不規則波の造波特性に関する実験結果をプロットしたものである。縦軸は、理論曲線に対しては波高と造波機の最大変位の比、実験値に対

しては水面変動のスペクトルと造波板の変位のスペクトルの比の平方根を示し、横軸は各フィルターの中心周期をとりプロットした。実験結果は理論式に比して多少小

さい値を取っているが、傾向はほぼ一致している。したがって、不規則波の造波特性に関して、式(5)または式(6)を用いることに問題はないと考えられる。式(5)あるいは式(6)の逆数を(3)で求めた各フィルターの中心周波数に対応するエネルギーの平方根にかけあわせ、それぞれの比をもとにしてフィルターのゲインを決定する。以上の手順で期待スペクトル式(2)あるいは式(4)のシミュレートを行なった。

4. 実験ならびに解析方法

実験に用いた水槽は京都大学工学部土木工学科地下実験室に設置された幅 50 cm、高さ 75 cm、長さ 27 m の両面ガラス張り水槽である。水槽の一端には第 2 節で説明した電気油圧式不規則波発生機が設置してある。また、水槽の他端には勾配 1/3 のアルミメッシュ製スロープにステラシートを張ったものを置き消波工とした。造波板より 6 m の水槽中央に電気抵抗線式波高計を置き、水面変動を記録した。実験にあたっては、主信号調整器、ポテンシオメーターおよび波高計からの信号を、データレコーダーを用いて磁気テープに記録すると同時に、オシロスコープで随時波形をモニターした。実験は 1 ケース約 10 分間行なった。磁気テープに記録した波形記録は A-D 変換器を用いて 0.08 sec 間隔でデジタル化し、後の計算に用いた。パワースペクトルは Blackman および Tukey の方法を用い、データ個数 3 000、自由度 40 で計算した。

5. 実験結果ならびに考察

図-4 および 図-5 は第 3 節で説明した手法に基づい

て各バンドパスフィルターのゲインを調整し、造波板を駆動させた結果得られた出力信号のスペクトルである。すなわち、図-4 は式(2)、図-5 は式(4)をシミュレートするための造波板の変位のスペクトル(○印)、ならびに主信号調整器よりの出力信号のスペクトル(実線)で、縦軸はスペクトルのピーク値 $S(f_p)$ で、横軸はピーク周波数 f_p で割り正規化してある。両図より明らかにように、各周波数領域での主信号調整器よりの信号のスペクトルと造波板の変位のスペクトルとはほぼ完全に一致している。写真-1 および 写真-2 は主信号調整器

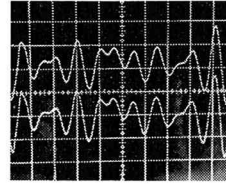


写真-1 主信号調整器およびポテンシオメーターよりの出力信号

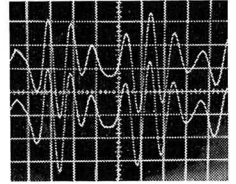


写真-2 主信号調整器およびポテンシオメーターよりの出力信号

とポテンシオメーターとの出力信号を比較するオシロ写真であり、各写真とも非常に良く両者の波形、位相が一致している。以上のことより、主信号調整器からの出力信号に対し、造波板が非常に忠実に対応して運動していることがわかる。しかし、図-4 および 図-5 で問題となるのは、 $F=1.0$ より低周波領域においてもかなりのエネルギーを持つ点である。この原因は 0.2 cps の中心周波数を持つバンドパスフィルターが、図-2 に示す通りの出力特性を持たないで、0.2 cps の低周波側で設計よりゆるやかな減衰勾配を持つためである。

図-4 ならびに 図-5 で示したスペクトルに対応して発生した不規則波浪のスペクトルが 図-6 および 図-7 である。図-6 には式(2)、図-7 には式(4)を点

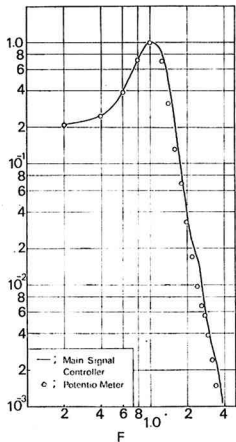


図-4 主信号調整器およびポテンシオメーターよりの出力信号のスペクトル (Pierson and Moskowitz)

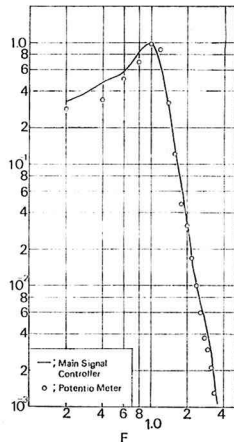


図-5 主信号調整器およびポテンシオメーターよりの出力信号のスペクトル (Neumann)

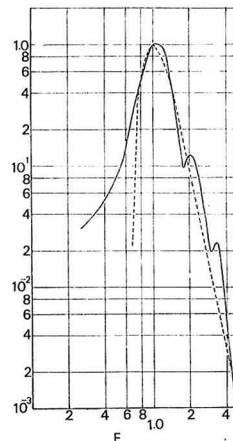


図-6 Pierson and Moskowitz スペクトル

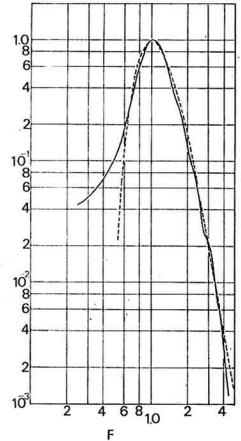


図-7 Neumann スペクトル

線で示し、水面変動のスペクトル(実線)と比較してある。なお両図とも正規化して示してある。これらの図により明かなように、かなり正確にスペクトル形のシミュレートができています。ただ、図-6のスペクトル図において、 $F=2$ および 3 の部分に小さなピークが見られるが、これは水深が 40 cm ときわめて浅いにもかかわらず、 $f_p=0.2$ cps と非常に波長の長い波を発生させたため生じた非線形特性と考えられる。また、図-7 に示す Neumann スペクトルのシミュレーションにおいては、図-6 における結果を考慮して主信号調整器のゲインを多少落とし、造波板の駆動変位を少し小さくした。したがって、図-7 には図-6 において見られた 2 次、3 次のピークはあらわれなくて、期待スペクトルと非常に良く一致している。ただ、図-6、図-7 に共通していることは、図-4 および 5 において見られた、低周波領域での影響があらわれ、ピークより低周波領域において期待スペクトルとの間にかなりの差があることである。

6. 発生不規則波の確率特性に関する考察

不規則波を解析するにあたり、今まで述べてきたようにスペクトル法によりシミュレートした結果を議論するのみでなく、その振幅あるいは水位の確率特性も期待スペクトル構造を持つ不規則波浪のそれと一致する必要がある。振幅の確率分布に関しては、Cartwright および Longuet-Higgins⁷⁾ の研究があり、水面変動の極大値の確率分布は次式にしたがうことが明らかにされている。

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \varepsilon e^{-\frac{1}{2}\eta^2/\varepsilon^2} + (1-\varepsilon^2)^{1/2} \eta e^{-1/2\eta^2} \right. \\ \left. \times \int_{-\infty}^{\eta(1-\varepsilon^2)^{1/2}/\varepsilon} e^{-1/2x^2} dx \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$m_n = \int_0^\infty S(f) f^n df \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta = \xi/m_0^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

$$\varepsilon^2 = (m_0 m_4 - m_2^2)/m_0 m_4 \dots\dots\dots (10)$$

式(9)の ξ は極大水位であり、負の値も可能である。また、通常よく用いられているゼロアップクロス法により算出した波高の確率分布は、式(7)において $\varepsilon=0$ とした場合、すなわちスペクトル幅がきわめて小さな場合に相当する次式に従うことが経験的に明らかにされている。

$$p(\eta) = \begin{cases} \eta e^{-1/2\eta^2} & (\eta \geq 0) \\ 0 & (\eta < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

図-8 は図-6 および 図-7 で示される不規則波を、ゼロアップクロス法により読み取った波高の超過確率を Rayleigh 確率紙にプロットしたものであり、○印が図-6、●印が図-7 に対応するものである。図より明かなように、各値はほぼ直線に乗っており、波高は Rayleigh 確率分布に従うことがわかる。なお、両ケ

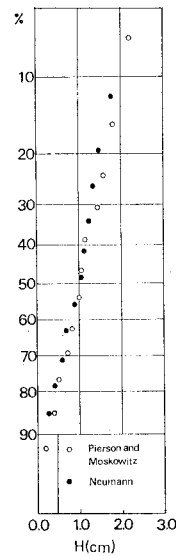


図-8 波高の確率分布

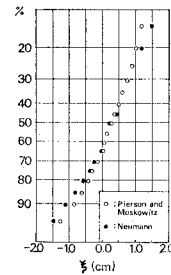


図-9 極大水位の確率分布

ースとも超過確率の計算に用いた波の数は約 70 波であり、確率特性を論議するには十分な数であると考えられる。また、不規則波の水位の極大値の確率特性について考察するため、式(7)をもとにして実験結果と理論の適合性を検討した。式(8)と式(10)に式(2)ならびに式(4)を代入し計算すると、式(2)に対しては $\varepsilon=0.80$ 、式(4)に対しては $\varepsilon=0.77$ となり、両者の値に大差はない。 $\varepsilon=0.80$ とし、式(7)をもとに作成した確率紙に極大水位の超過確率をプロットしたものが図-9である。図中で○印が図-6、●印が図-7の結果に対応するものである。極大水位 ξ が負の場合は、多少ひずみを持っている

が各点はほぼ直線に乗っており、パラメーター ε の値が有意であることを示している。今回の実験にさきだつ予備実験において、各バンドパスフィルターを単独に用いて、各種の ε の値に対して、その水位の極大値の分布を検討したところ、実験結果と式(7)とが非常によく一致することが明らかになった。また、同じ記録に対し、

ゼロアップクロス法によりその波高を読みとり、その確率分布を検討した結果、 ε の値にかかわらず、いずれも Rayleigh 分布をすることが明らかになった。これらのことより、今後スペクトルの形状と確率特性をあわせて論議する場合には、ゼロアップクロス法でなく、むしろ水位の極大値の確率分布である Cartwright および Longuet-Higgins の方法で検討する必要がある。

7. 結 論

今回の研究においては、期待スペクトルとして Pierson および Moskowitz のスペクトルならびに Neuman のスペクトルを選び、そのスペクトル形状をシミュレートすることを試みた。その結果、今回用いた方式で、非常に簡単にシミュレートすることが可能であることがわかった。また、上記の2つのスペクトル形状のみでなく他の任意のスペクトル形状を持つ不規則波も、同様の手法により簡単にシミュレートすることが可能である。今後の問題点として、現地波浪に対して縮尺率も考慮したシ

ュレートが必要となるが、この方式では、全く同様にしかも簡単に可能である。

発生不規則波浪の確率特性も、期待スペクトルのそれとほぼ一致し、この点からも結果が良好であることを裏づけることができた。

最後に本研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・村上仁士・酒井哲郎・木村 晃：電気油圧式不規則波発生機について，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 409～414，1970.
- 2) 土屋義人：風洞水槽を利用した海岸波浪シミュレーターの試作について，第25回土木学会年次学術講演会講演集第2部，pp. 1～2，昭 45.
- 3) 合田良実・永井康平：造波機の変速運動による発生不規則波のスペクトルについて，港湾技術研究所報告第8巻，第3号，pp. 47～75，1968.
- 4) 岩垣雄一・石田 昭：波起し機によって起こした不規則波の特性，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 29～34，1968.
- 5) 富永正照・橋本 宏：造波機による不規則波の発生，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 415～419，1970.
- 6) Biesel, F. and Suquet, F.: Laboratory wave-generating apparatus (Translation of a series of French articles from La Houille Blanche by Straub, G.L.) 1954.
- 7) Cartwright, D.E. and Longuet-Higgins, M.S.: The statistical distribution of the maxima of a random function, Proc. Roy. Soc. A., Vol. 237, pp. 212～232, 1956.