

造波機による不規則波の発生

富 永 正 照*・橋 本 宏*

1. ま え が き

風によって発生した海の波は不規則であって、波の高さやそれぞれの峰の生じる時間間隔は決まっていない。このような不規則な波の作用による諸現象は不規則性を考慮して解析されなければならない。海岸構造物に作用する波圧や波のうちあげなどは単一波による理論または模型実験により調べられるのが一般的であり、設計に際しても有義波などで不規則な波を代表させて利用している。しかし得られた結果は実際のものとは異なっているおそれがあり、不規則性を考慮した解析も行なわれ始めている。

現象が線形である場合には単一波によって得られた結果を利用して、あるスペクトルを持った波に対する応答が比較的簡単に求められる。しかし非線形な現象に関しては重ね合わせがきかない。とくに海岸近くでの波は常に砕波を伴っており、不規則な波による現象を解析するためには、現地観測や不規則波による模型実験が必要である。現地観測に比較して簡単に種々の条件を調節できる模型実験は、このような現象を解析するのに適した方法である。

ここでは不規則波発生装置を製作し、その特性を調べた結果について発表する。この造波装置は油圧ピストンを使用し、サーボ弁によって造波板の変位を自動制御する方式をとっている。不規則波の発生は入力として不規則な波を与えることによって行なわれ、与えるべき入力には現地観測記録やシミュレーションによって発生したものを利用できる。この不規則波入力の発生方法とその結果についての検討についても述べたい。

2. 不規則波の発生方法

不規則波の発生方法については機械的に数種類の成分波を組合せて発生したり¹⁾、油圧ピストンによって発生する方法が行なわれている²⁾。成分波を組合せて発生する方式は線スペクトルを持った波しか発生できないために連続スペクトルを得るためには与えられた入力通りに造波装置が動くことが必要である。このようなものとして油圧によって造波板を制御する方式は一般的のもので

あろう。造波機が入力として与えた通りに波を発生すれば、入力を不規則なものにすることによって不規則波を発生することができる。この入力を作成する方式としてはアナログ方式とデジタル方式がある。

アナログ方式は電氣的に必要なとするスペクトルを持った波を発生する方法で、まず雑音発生器によって白色雑音を発生し、これをフィルターに通し必要とする波形を得る。任意の特性を持ったフィルターを造ることはむずかしいために、一般には周波数を数個の周波数帯に分割し、バンドパスフィルターによって必要な波形を得る方法がとられる。

デジタル方式は電子計算機による数値計算によって不規則な波を得る方式である。これはまず、乱数を発生し、必要とするスペクトルを得るためにインパルスを作動させる方法であり、実際の計算は移動平均を行なうことに相当する。次に D-A 変換を行ない造波機入力とする。

このほかに機械的に数十個の歯車を組合せて不規則な波を造る試みも行なわれているが一般的ではない。ここではデジタル方式による不規則波の発生について検討を行なっている。

3. 造 波 装 置

造波水路は図-1に示すように幅 60 cm、高さ 137.5 cm、長さ 60 m の水路であり、その一端にフラップ型造

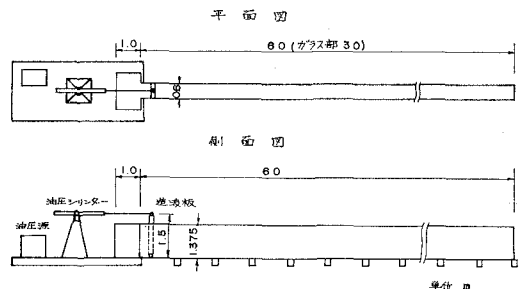


図-1 造 波 水 路

波板が取り付けられてある。特性を調べる実験は一部水路が未完成であったために造波板から 9 m の範囲を使用して行なわれた。造波装置は石川島播磨重工製であり、与えられた入力にしたがって造波板が動くよう自動制御さ

* 正会員 建設省土木研究所 海岸研究室

れている。造波板は油圧シリンダーによって駆動され、これを動かす油の流量はサーボ弁によって制御されている。与えられた入力電圧に比例してサーボ弁が開き、油がシリンダーに送られ、シリンダーのピストンが動く。この変位量をポテンシオメーターによって検出し、電圧に変換されてフィードバック信号としてサーボアンプに入り、入力信号との差が零となるまでピストンは動く。すなわち造波板を入力信号にしたがって動くように制御している。基本的な性能は表-1に示すとおりである。

この造波装置の応答特性を正弦波およびランダムステップ入力によって調べた結果、ゲインは図-2に、また位相遅れは図-3に示されている。ほぼ1 Hz までは一

表-1 造波機性能

形 式	フラップ式油圧駆動造波装置
フラップ可動範囲	± 375 mm
周波数範囲	~ 3 Hz
最大波高	30 cm ($T=1.2$ sec)
制御精度	± 2mm
バンド幅	3 Hz (-3 db)
油 圧 源	105 kg/cm ² × 20 l/min (常用圧力 90 kg/cm ²) 200 volt 5.5 kW
入力信号	± 10 volt フルスケール
緩起動時間	2~10 sec 任意可変
最大発生力	2.95 cm ² × 105 kg/cm ² = 300kg

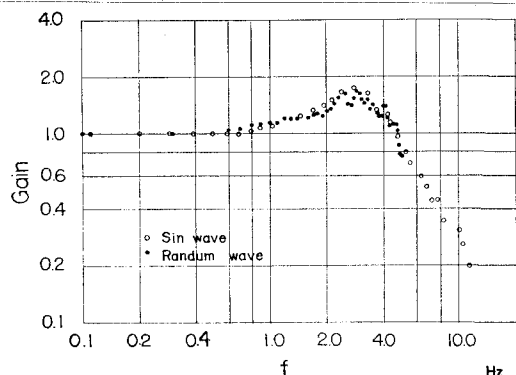


図-2 造波機周波数応答 (ゲイン)

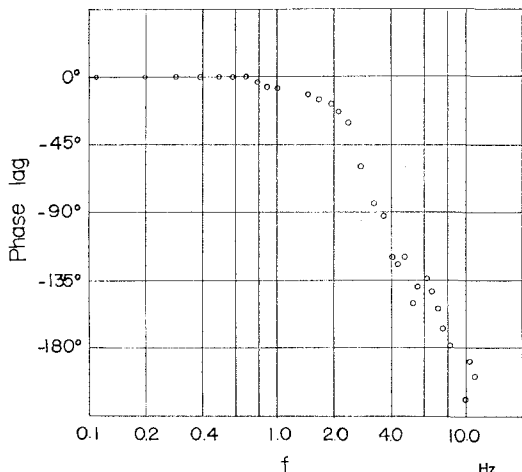


図-3 造波機周波数応答 (位相)

様な応答特性を持っており、非常に良い特性である。

与えるべき入力信号は ±10 mvolt フルスケールから ±10 volt フルスケールの範囲で与えることができる。この他に始動の際に急に造波板が動き大きな波が発生しないように緩起動装置がついている。安全装置としては造波板変位、油圧、油温度、油量などの検出装置があり、設定値を超える場合には運動が停止する。

フラップ型造波装置の特性については微小振幅波理論を用い、Biesel³⁾ によって次のように求められている。

$$a = 4e \frac{(1 - \cosh kh + kh \sinh kh) \sinh kh}{(\sinh 2kh + 2kh)kh} \dots (1)$$

ここで、 a : 波の振幅、 e : 造波板の静水面における振幅、 h : 水深、 k : 波数である。

正弦波および不規則波によってこの関係を調べた結果は図-4に示されている。この図は水深1.0mの場合について造波板天端(高さ1.5m)における振幅 b と a の関係で示してある。式(1)で表わされる Biesel の理論

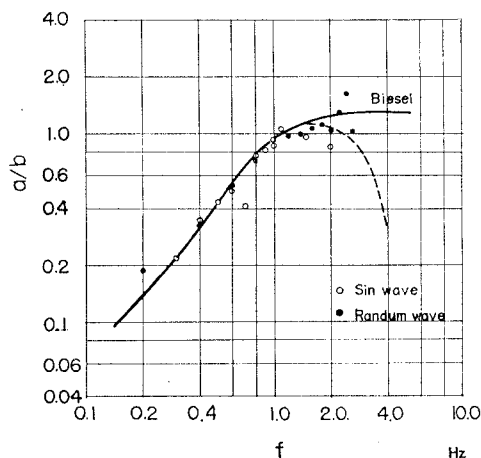


図-4 造波特性

とよく一致している。また位相遅れについても線形理論によって示されることが明らかになった。周波数の大きな場合には粘性による減衰が大きく、式(1)で表わされる関係からはずれてくる。境界および内部粘性を考慮した場合の波高測定位置における関係は図の破線で示される。

造波板の振幅は天端で最大 30 cm、また油圧シリンダーに送る最大油量に制限があり、天端での造波板の移動速度は 100 cm/sec 以下であるために発生できる波には限界がある。発生できる波の最大振幅を示したのが図-5であり、高周波側では砕波するために余力を持っている。周波数 0.8 Hz 付近で最大波高を生じるようになっている。

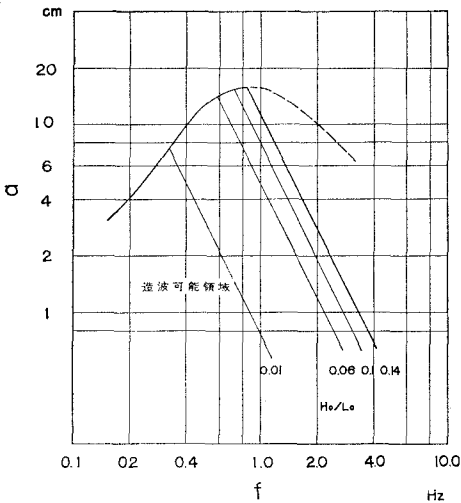


図-5 造波能力

4. 不規則波入力作成

必要とするスペクトルを持った波形を得るにはさきに述べたようにアナログ、デジタルの二方式があるが土木研究所においては一般的なデータ処理のための A-D、D-A 変換装置を持った小型電子計算機（日本電子製 JEC 6 型）があるためにこれを利用し、デジタル方式を採用した。造波装置への入力の作成は次のように行なわれる。まず必要とするスペクトルの形を与え、これからインパルス応答を計算する。次に白色雑音を乱数によって発生し、さきに求めたインパルスを作用させる。この装置は造波板変位を制御しているために、得られた波形にさらに波形—造波板変位間のインパルスを作用させなければならない。この波形を D-A 変換し、データ・レコーダに記録しておき、必要なときに再生して使用する。

以上述べた方法によってノイマンスペクトルを持つ波を発生した例について以下に説明する。

乗算型合同式法によって乱数を発生し、これにすでに日野⁴⁾によって次式で与えられているノイマンスペクトル発生のためのインパルス応答を作用させた。

$$h_N(t) = \sqrt{\frac{\pi C_0}{2C} \left(\frac{nU^2}{2g^2} \right)^3} \left\{ \left(-\frac{1}{\sqrt{n}} \right)^{n-3} \frac{1}{(n-\nu)!} t^{n-1} + \sum_{\nu=2}^{n-1} \frac{(n-3)(n-4)\cdots(n-\nu-1)}{(n-\nu)! (\nu-1)!} \left(-\frac{1}{\sqrt{n}} \right)^{n-\nu-2} t^{n-\nu} \right\} e^{-t/\sqrt{n}} \quad \dots t \geq 0 \quad (2)$$

$$= 0 \quad \dots t < 0$$

ここで、 $h_N(t)$ ：インパルス応答、 t ：時間、 $C_0 = 3.05 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}^{-5}$ 、 C ：白色雑音のスペクトル密度、 U ：風速、 g ：重力の加速度、 n ：ノイマンスペクトル近似の

際の係数である。

この式を導く際には指数関数を有理関数で近似しているため n が小さい場合にはスペクトルの値と極大値の生ずる角周波数の値が異なり、これらの値が一致するように正規化を行なう必要がある。この際の係数もすでに求められている。

造波板を与えられた波を発生するように動かすためのインパルス応答は離散値に対して、次のように計算される⁵⁾。

$$y_k = \sum_{n=-N}^N a_n x_{k-n}, \quad k = N+1, N+2, N+3 \quad \dots (3)$$

ここで、 x_k, y_k はそれぞれ入力と出力波形を表し、 a_n は数値フィルタである。周波数応答関数 $K(f)$ と a_n の間には次の関係がある。

$$R_e[K(f)] \approx A_0 + 2 \sum_{n=1}^N A_n \cos\left(n\pi \frac{f}{F}\right) \quad \dots (4)$$

$$I_m[K(f)] \approx 2 \sum_{n=1}^N B_n \sin\left(n\pi \frac{f}{F}\right) \quad \dots (5)$$

$$F = \frac{1}{2\Delta t}, \quad A_n(a_n + a_{-n}), \quad B_n = \frac{1}{2}(a_n - a_{-n}) \quad \dots (6)$$

ここで、 Δt は x_k, y_k の時間間隔であり R_e, I_m は実数部、虚数部を示す。

必要とする波を発生するために造波板に与えるべき変位は、変位・波形の応答が式 (1) で表わされるために、式 (1) の逆数となる応答を必要とする波に作用することによって得られる。すなわちこの場合の $K(f)$ は次のように表わされる。

$$K(f) = \frac{(\sinh 2kh + 2kh)kh}{4(1 - \cosh kh + kh \sinh kh) \sinh kh} \quad \dots (7)$$

ここで、 $(2\pi f)^2 = gk \tanh kh$ である。

ただし実際には $f \rightarrow 0$ で $K(f) \rightarrow \infty$ となるためにこの計算では $f = 0.2 \text{ Hz}$ 以下で $K(f) = K(0.2)$ としている。式 (7)、(4)、(6) から a_n を求めると図-6 のようになる。

発生した白色雑音のスペクトルを図-7 に示す。最大、最小の差を 256 として計算しており、このスペクトルは $C = 256^2/12 \div 5461$ を中心に変動している。これにノイマンおよび造波板応答のインパルスを作用させた結果のスペクトルは図-8 に示されている。ノイマンスペクトルを計算した際には $U = 16.6 \text{ m/sec}$ の値を Froude 則によって 1/100 に縮尺したものを使用した。この図で入力として示されているのが計算結果であり、造波板変位とあるのは入力を造波機に与えたときの造波板変位のスペクトルを示す。また実線は求めようとしたスペクトルである。始めの白色雑音が一一定値でないため

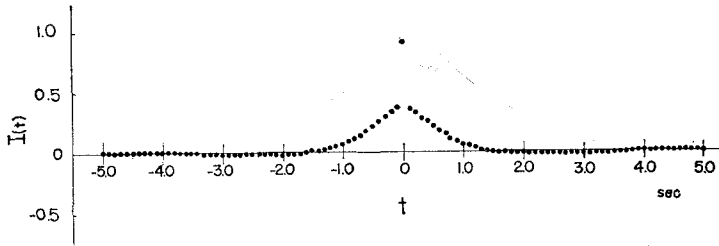


図-6 造波板変位を求めるインパルス応答

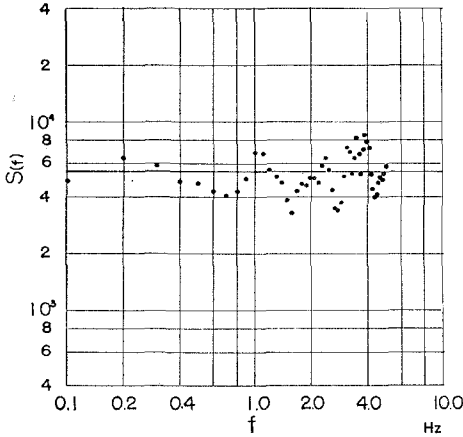


図-7 白色雑音のスペクトル

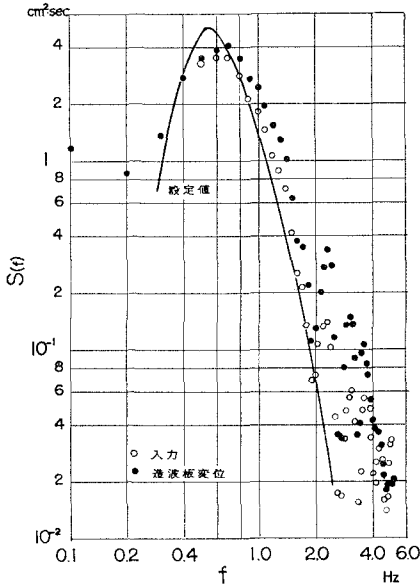


図-8 ノイマン波のための入力造波板変位スペクトル

$f=0.7$ Hz に付近で差がでている。また高周波側では雑音の影響がエネルギーの増加がみられる。

この入力を使用して波を起こした結果波形については図-9 に、また波のスペクトルは図-10 に示されている。図-9 において入力は 0.1 sec 間隔のステップ入力

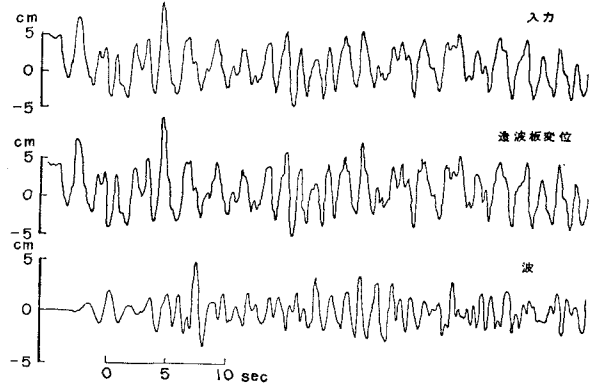


図-9 入力、造波板変位、波形の記録例

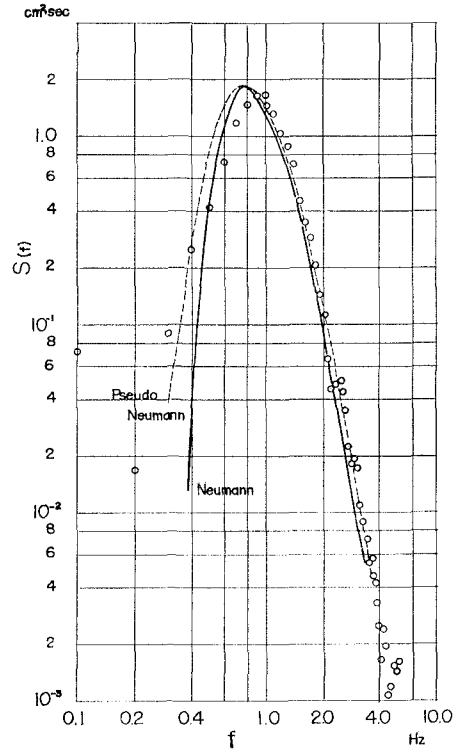


図-10 ノイマンスペクトル

であるが、記録機の応答が悪いので連続的に表われている。変位については入力に比較して高周波成分が大き

なっているようである。波の測定は造波板から 5 m の位置において、また水路一部が未完成のため水路延長は 9 m しかなく、終端に 2 m サンフレックスによる消波装置を設けて行なわれた。このため反射もある程度あると考えられる。図-10 における実線は目標としたノイマンスペクトルであり、砕線は式 (2) を求める際に使用した近似ノイマンスペクトルである。発生しようとしたスペクトルと得られた結果を比較するとかなり良く一致しているように見えるが、スペクトルの高周波側での一致は起こした波が平衡に達しているためにもよる。周波数 0.5 Hz 付近でエネルギーが小さくなっているのは、始めに発生した白色雑音がここで小さくなっているための影響と考えられる。また低周波領域でのエネルギーの増加は反射によるものも含まれていると考えられる。

この実験では造波装置入力と造波板変位の間の応答は考慮していないが、高周波の波 ($f > 1.0$ Hz) が問題になる場合には考慮する必要がある。一般には高周波側では波が平衡に達すること、粘性による減衰があることなどによってエネルギーが減衰するため、上記の応答が問題となることは少ないと考えられる。

以上述べた他に、白色雑音を入力とした場合と白色の

波を発生することを試みた。白色雑音を入力とした場合には入力造波板変位の応答を調べるには都合が良いが、波については低周波側でのエネルギーが小さくなるため精度が悪かった。白色な波を発生した結果は図-11 に示されている。一定値をとっているとはいえないがこれは初めの白色雑音が完全に白色でないこと、造波機応答を考慮していないことの他に造波板に直角方向に進む波の発生によると考えられる。波高の増加にともなって造波板に沿って進む波の発生する現象があり、この場合には水路幅と同じ波長を持つ波が増幅されたと考えられる。波長が 60 cm の場合の周波数は 1.61 Hz となり図-11 においてもこの位置でエネルギーは平衡に達するまで増加している。この他に造波板を停止した場合にも同じ周波数の波が相当長い間続くのが記録された。もし水路方向に進む波であれば消波装置によってすぐ減衰するはずである。このような波の発生を防止するには造波板に沿って水が動かないように隔壁等を設ける必要がある。

5. あとがき

不規則波を発生するに造波装置を作成し、その特性を調べ、与えるべき入力について検討を行なった。この結果造波機は非常によい応答特性を持っており、また与えられたスペクトルを持つ波を発生することができることが明らかとなった。また造波板に沿って進む波が存在するために何らかの方法で、発生を防止しなければならない。

ここでは波形を与えて同じ波形の波を発生することについては検討を行なわなかったが位相も考慮してインパルス応答を求め、これを使用して入力波形を得れば同じ波を発生することも可能であろう。

参考文献

- 1) 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，1969，pp. 29～34.
- 2) d'Angremond, K. and J. H. van Oorschot; Generation of Irregular Waves on Model Scales, Symposium Research on Wave Action, 1969, Delft Hydraulics Laboratory.
- 3) Biesel, F., F. Suquet and Others: Laboratory Wave-Generating Apparatus (translated from La Houille Blanche), Proj. Report No. 39, Univ. of Minnesota, 1954.
- 4) 日野幹雄：波浪の予測フィルター・変換フィルター(1)，第 14 回海岸工学講演会講演集，1967，pp. 21～28.
- 5) Borgman, L. E.: Ocean Wave Simulation for Engineering Design, Journal of the Waterways and Harbors Division, A. S. C. E. Vol. 95, No. WW 4, 1969, pp. 557～583.

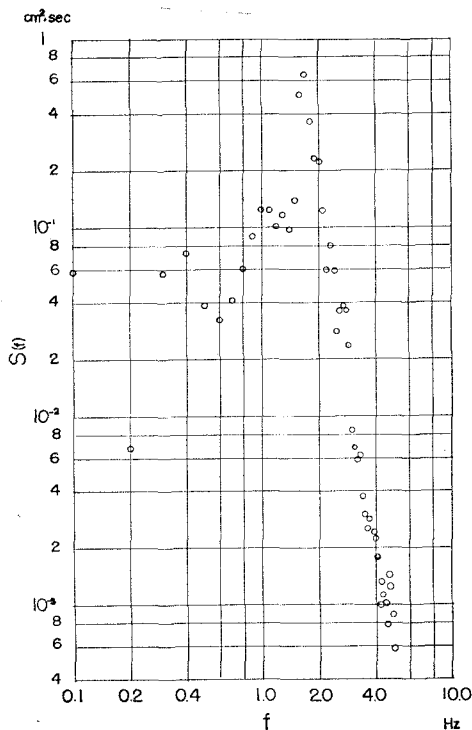


図-11 白色波のスペクトル