

不規則波浪実験とその特性について

合 田 良 実*・鈴 木 康 正*・岸 良 安 治**

1. ま え が き

最近海の水の不規則性の影響を明らかにするため、模型不規則波を使って実験を行うようになってきた。これは波浪実験の発展であり、不規則波に特有な実験手法を開発していく必要が生じている。ここでは、不規則波を用いた二、三の実験例を紹介するとともに、著者らの用いている若干の実験手法について記述する。

2. 不規則波の発生法について

造波装置としては、任意波形の入力信号に追従して造波板を駆動する型式のものであれば、制御方式、造波板の運動方式などは何であってもよい。著者らは、先に報告¹⁾したように、低慣性の直流電動機（ミナーシャモーター）を電氣的に制御する方式でピストン型の造波板を駆動させている。

造波性能は、正弦波形の入力信号（規則波）に対する応答性および発生波高の大きさで判断できる。応答性は入力と出力の振幅比および位相遅れで表示され、著者らの造波装置では図-1のような特性である。一般に短周期の波は水路内を伝播する途中で減衰してしまうので、造波機として $f > 2\text{Hz}$ における応答性は考えなくてよい。造波装置が所定の波高の安定した波形の規則波を発生できれば、不規則波発生装置としても十分な性能を発揮する。ただし、規則波による特性試験の際、短周期の波は振幅を大きくすると造波板の前で崩れてしまうので、これは特性試験の対象外としなければならない。

造波装置の所要馬力は、低周波側における発生波のエネルギー輸送量と高周波側における駆動部の慣性トルク（造波板の両側の水の慣性を含む）とから定まるので、この両者がほぼ等しくなるように設計する。

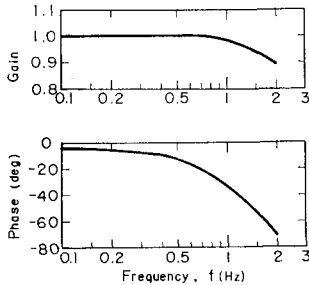


図-1 造波機の Gain と位相遅れ

不規則波を発生させるための入力信号としては、①計算機で所要のスペクトルに対応する波形の時系列を求め D-A 変換する²⁾、② white noise を filter で修正する³⁾、の二つの方法が一般に用いられる。このほか、多数の正弦波を重ね合せた線スペクトルも考えられるけれども、10~20 本程度では波高分布の幅が狭く、十分な不規則波にはなりにくい（これは波形のシミュレーションによっても確認される）。

著者らは後者の方法を採用しており、10 本の band-pass filter を奇数・偶数番に分けて 2 台の white noise generator に結んである。Filter は図-2 のようにやや鈍い減衰特性を持たせてある。入力信号の発生手順は次のとおりである。

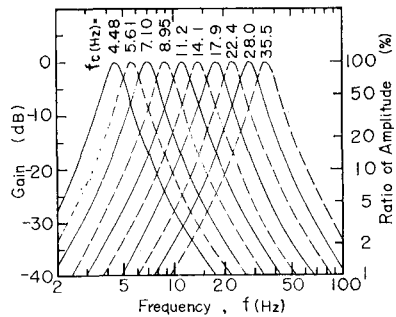


図-2 Band-pass filter の特性

① 目標とする波高と周期を持つ波のスペクトル密度を計算する（通常は Bretschneider 型を使用）。

② スペクトル密度を各 filter の周波数帯で積分し、これを ΔE_i とする。

③ 各 filter の目標波高を $\Delta \bar{H}_i = 2.51 \sqrt{\Delta E_i}$ で求める。

④ $\Delta \bar{H}_i$ の発生に必要な振幅をピストン型造波板の理論式で計算し、これを電圧量に変換する。

⑤ filter の出力は隣接する周波数帯へも広がっているので、この漏出分を差し引く。

⑥ 各 filter ごとに所要の電圧（実効値）を得るためのアテネーターのダイヤル値を計算する。

⑦ filter の中で最大出力のダイヤル値を 10.0 として他の filter のダイヤル値を比例計算するとともに、造波板の駆動信号全体に対するアテネーターのダイヤル値も計算しておく。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部

⑧ 各 filter の出力を上記のダイヤル値で調整して不規則信号を発生させ、これをデータレコーダに記録する。

⑨ 実験の際は上記の信号をテープ速度比 1/10 または 1/20 で再生し、造波板を駆動させる。

以上の操作において white noise generator の出力は最大に設定してある。また、filter 1 本ごとの出力電圧(実効値)および電圧と造波板変位の関係はあらかじめ検定しており、計算プログラムに組み込まれている。なお、アテネーターはすべて 10 回転 500 目盛のポテンシオメーターを使用している。ポテンシオメーターの出力電圧の実効値はダイヤル値にほぼ比例するが、直線性よりもむしろダイヤル目盛による微調整および再現性を目的としている。

3. 不規則波浪実験における反射波の取扱い

不規則波の実験の中でも構造物との相互作用を目的とするときは、模型で波が反射され、これが造波板で再反射される問題が一つの難点である。今、スペクトルの各成分波がその周波数に対応する群速度で伝播するものとして、模型直前の波のスペクトルの時間的変化を計算してみると図-3 が得られる。ただし、模型と造波板との

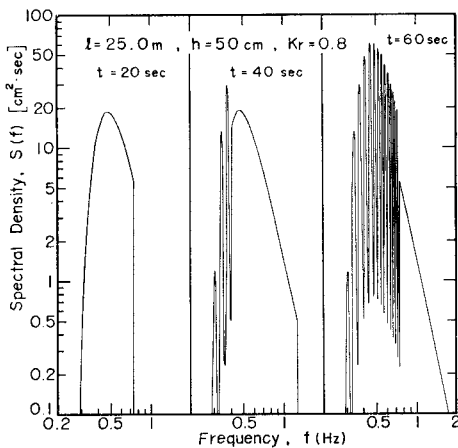


図-3 水路内の不規則波のスペクトルの時間的変化

距離を $l=25$ m, 水深は一樣で $h=50$ cm, 波は $H_{1/3}=10$ cm, $T_{1/3}=2.0$ sec を想定し、反射波が一往復する間の減衰を含む造波板の反射率を 80% と見なしている。この例では、起動後 40 sec で既に反射波の影響が認められ、60 sec ではこれが $f=0.74$ Hz にまで広がっている。また、このスペクトル形の変化につれて波高の増大および周期の減少現象があり、定常状態は厳密には存在しない。

ここで視点を転換して、多重反射が定常状態にまで発達した状態を考えてみる。造波板 ($x=0$) の反射率を r , 模型 ($x=l$) の反射率を R とすると、水路内の波形は次

の無限級数で表わすことができる⁴⁾。ただし、 a_0 は発生波の振幅であり、また $rR < 1$ とする。

$$\begin{aligned} \eta/a_0 &= \cos \theta + rR \cos(\theta - 2kl) + r^2R^2 \cos(\theta - 4kl) + \dots \\ &+ R \cos \theta' + rR^2 \cos(\theta' - 2kl) + r^2R^2 \cos(\theta' - 4kl) + \dots \\ &= \frac{\cos(\theta + \varepsilon) + R \cos(\theta' + \varepsilon)}{\sqrt{1 - 2rR \cos 2kl + r^2R^2}} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここに, } \theta &= \sigma t - kx, \quad \theta' = \sigma t + kx - 2kl, \\ \sigma &= 2\pi f, \quad k = 2\pi/L, \\ \varepsilon &= \tan^{-1} \{ rR \sin 2kl / (1 - rR \cos 2kl) \} \end{aligned}$$

模型前面 ($x=l$) の波高は、 $\cos 2kl = \pm 1$ に応じて次の極大・極小値をとる。

$$\left. \begin{aligned} H_{\max} &= 2a_0(1+R)/(1-rR) : \cos 2kl = 1 \\ H_{\min} &= 2a_0(1+R)/(1+rR) : \cos 2kl = -1 \end{aligned} \right\} (2)$$

したがって、規則波の実験であれば周期を細かく変えて $x=l$ における波高の変化を求めることにより、水路内の多重反射系の反射率を推定することができる。

また不規則波であれば、式 (1) の関係はスペクトルの各成分波について成立すると考えられるから、 $x=l$ における多重反射後のスペクトルは次のようになる。

$$S(f) = \frac{(1+R)^2}{1 - 2rR \cos 2kl + r^2R^2} S_0(f) \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $S_0(f)$ は発生波のスペクトルである。 $S(f)$ は $\cos 2kl = \pm 1$ に対応する周波数の間隔の ripple を伴うけれども、その積分値は有限である。また、ripple があってもその間隔が十分に狭ければその影響は打ち消し合い、平均的なスペクトル形状のみが効くのではないかと考えられる。そうすると、定常な多重反射の状態において総合的な入・反射波の大きさが推定できさえすれば、こうした多重反射系の不規則波を使って実験を行うことが可能になる。

式 (1) から明らかなように、多重反射系であってもある周波数に対しては入射波および反射波がそれぞれ一つの波形で表わされる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \eta_I &= a_I \cos(\sigma t - kx + \varepsilon_I) \\ \eta_R &= a_R \cos(\sigma t + kx + \varepsilon_R) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

今、水路内で距離 Δl だけ離れた 2 点で水面変動を同時に測定し、これを η_1, η_2 とすると、

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \\ \eta_2 &= (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1 + \Delta l} = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= a_I \cos \varepsilon_I' + a_R \cos \varepsilon_R' \\ B_1 &= a_I \sin \varepsilon_I' - a_R \sin \varepsilon_R' \\ A_2 &= a_I \cos(k\Delta l + \varepsilon_I') + a_R \cos(k\Delta l + \varepsilon_R') \\ B_2 &= a_I \sin(k\Delta l + \varepsilon_I') - a_R \sin(k\Delta l + \varepsilon_R') \\ \varepsilon_I' &= -kx_1 + \varepsilon_I, \quad \varepsilon_R' = kx_1 + \varepsilon_R \end{aligned} \right\} (6)$$

式 (6) を解くと、 a_I, a_R が次のように求められる。

$$a_I^2 = \frac{1}{4 \sin^2 k \Delta l} [(A_2 - A_1 \cos k \Delta l - B_1 \sin k \Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k \Delta l - B_1 \cos k \Delta l)^2]$$

$$a_R^2 = \frac{1}{4 \sin^2 k \Delta l} [(A_2 - A_1 \cos k \Delta l + B_1 \sin k \Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k \Delta l - B_1 \cos k \Delta l)^2]$$

..... (7)

したがって、2点の同時波形記録からそれぞれのフーリエ係数を求めれば、入射波および反射波の振幅が式(7)で推定される。不規則波の場合にもFFTを用いてすべてのフーリエ係数が求められるので、入・反射波のスペクトルが推定可能である。

図-4はこの一例で、 $\Delta l = 20$ cm 離れた2点の測定波形のスペクトルおよび入・反射波の推定スペクトルである(後述の越波実験の波)。波は $(H_{1/3})_I \approx 15$ cm, $(T_{1/3})_I \approx 1.7$ sec である。この図で $f = 0, 1.9, 2.8$ Hz, ... で入・反射波の $S(f)$ が発散しているのは、これらの点で $\sin^2 k \Delta l = 0$ となるためで、これは相関関数を使った鹿島の方法⁵⁾でもすでに指摘されている。

実験手法としては、まずスペクトルの主要部分が $k \Delta l = 0 \sim \pi$ の範囲に入るように Δl を選定する。このうち、 $\sin^2 k \Delta l$ の値がある程度大きな周波数範囲について入・反射波のスペクトルを積分し、これを m_I, m_R で表わすと、この積分値はそれぞれ入・反射波高の2乗に比例する量である。一方、測定した合成波形のエネルギーは入・反射波高のエネルギーの和であり、合成波の代表波高を H_s とすると、 $H_s = \sqrt{H_I^2 + H_R^2}$ でなければならない。したがって、入・反射波の代表波高は次のように推定される。

$$\left. \begin{aligned} H_I &= H_s \sqrt{m_I / (m_I + m_R)} \\ H_R &= H_s \sqrt{m_R / (m_I + m_R)} \end{aligned} \right\} \text{..... (8)}$$

この手法の使用上の注意事項は次のとおりである。

- ① 測定点は模型および造波板から卓越波の波長の1

倍以上離し、合成波のエネルギーの波打ち⁶⁾の影響を避ける。

② 多重反射によるスペクトルの ripple の影響を軽減するため、模型と造波板との距離を数波長以上とする。

③ 同じ目的で、合成反射率 rR の値をできるだけ小さくする。(著者らは文献⁷⁾の図-3のような水槽内に仕切壁で区切られた小水路を使い、模型からの反射波の相当部分が広水路のほうへ拡散されるようにしている。)

著者らは以上の方法を不規則波の模型実験の標準的手法として使用しており、5.、6.の実験例もすべてこれによっている。なお、この手法の妥当性に関する検討結果については文献⁹⁾を参照されたい。

4. サーフビートとその再現性

汀線付近の平均水位が1～数分周期で上下する現象はサーフビートとして知られている。これは不規則波に特有な現象であり、模型実験でもこの現象が現われる^{1), 9)}。ただ、模型実験では現地よりもサーフビートの振幅が大きいに思われたので、大洗および新潟の海岸で以下のような観測を行ってみた。

大洗海岸では水深 0.7～1.0 m の海底の砂に測量用ポールを押し込んで直立させ、水面の上下動を8mm シネカメラで毎秒1コマずつ撮影した。新潟の松浜海岸では突堤の鋼管に50cm 間隔で赤白の縞模様を塗ってもらい、これを基準目盛として水面の上下動を撮影した。記録は各回約30分間である。一方、大洗港では-20m, 新潟東港では-24.5mの地点(平面的には数km離れている)に超音波式波高計が設置されているので、汀線での撮影と同時刻の波形のアナログ記録を借用し、0.5sec 間隔で読み取り、

解析を行ってこれを沖波とした。図-5, 6は沖波と岸波のスペクトルの比較例である。汀線近傍ではスペクトルの形状が沖波と非常に異なっており、むしろ実験室内で得られる碎波後の不規則波のスペクトルと似た形である。

サーフビートの大きさについてはまずその周

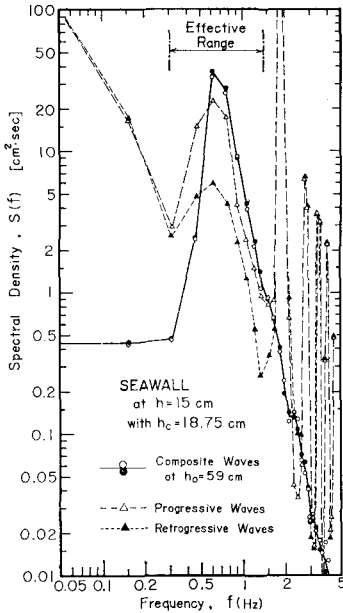


図-4 不規則波の入・反射波スペクトルの分離の例

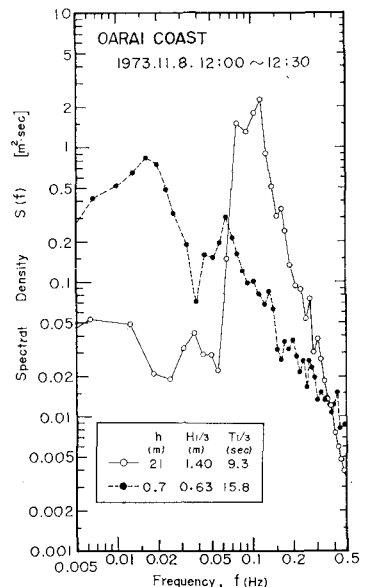


図-5 汀線近傍の波のスペクトル (大洗海岸)

波数帯を定義しなければならないが、ここでは $f=0\sim 0.05$ Hz の成分をすべてサーフビートと見なした。これにより、その rms 値 (ζ_{rms} とする) は次式で求められる。

$$\zeta_{rms}^2 = \int_0^f S(f) df : f_0 = 0.05 \text{ Hz} \dots\dots\dots (9)$$

これを沖波の波形の η_{rms} と比べた結果が図-7 であり、沖波の 30% 程度のもも少なくない。なお、この図には沖波の低周波部分もサーフビートと見なして同様に整理してある。この結果に比べて既往の観測値¹⁰⁾が 10% 程度であったのは、観測水深が比較の深いため汀線近傍のサーフビートを

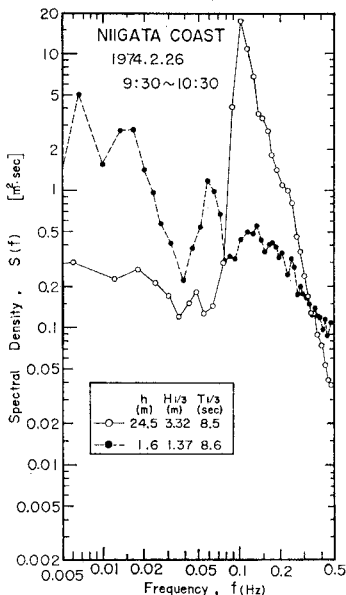


図-6 汀線近傍の波のスペクトル (新潟海岸)

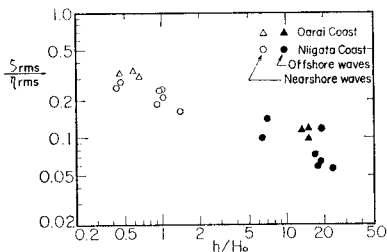


図-7 サーフビートと沖波の振幅比

十分にとらえていなかったのではないかと考えられる。したがって、汀線近傍では沖波の 20~30% の振幅の平均水位の動揺があるものと見るべきであろう。

なお、この表示からは ζ_{rms}/η_{rms} が h/H_0 の $1/2\sim 1/3$ 乗に逆比例するように見える。しかし、既往の観測例で ζ_{rms}/η_{rms} が波高の絶対値にかかわりなくほぼ一定であることを勘案すると、支配的パラメーターとしてはたとえば $(H_0/L_0) \times (1+h/H_0)$ などが適当なのではないかと思われる。

5. 不規則波による護岸の越波量の実験

防波護岸や海岸堤防の越波量を有義波相当の規則波の模型実験で推定することは、波群中の波高の分布特性を考慮してみれば明らかのように、近似法としても不適当で

ある。このため著者の一人は、先に規則波の越波流量と波高との関係曲線を波高の出現確率を重みとして積分する方法を提案し、これを期待越波流量と名づけて $h/(H_{1/3})_0 = 0.6\sim 3.3$ の範囲でその妥当性を実験的に検証した。しかし、前節のように汀線近傍ではサーフビートの影響が大きいことが明らかになったため、期待越波流量方式の適用性についての再検討が必要になった。そこで、汀線近傍から陸上部をも含めた越波量の実験データを系統的に得ることを目的として、次のような実験を実施した。

- 1) 模型護岸: 直立壁
- 2) 設置水深: $h/(H_{1/3})_0 \approx 1.5, 1.0 (-0.33) - 0.33$
- 3) 天端高: $h_0/(H_{1/3})_0 \approx 0.5 (0.25) - 1.75$
- 4) 海底勾配: $\tan \theta = 1/30$ および $1/10$
- 5) 模型波: $(H_{1/3})_0 \approx 15 \text{ cm}, T_{1/3} = 1.66, 2.79 \text{ sec}$

これに引き続き消波護岸についても同様の実験を行い、直立壁の結果と合せて別途報告の予定である。

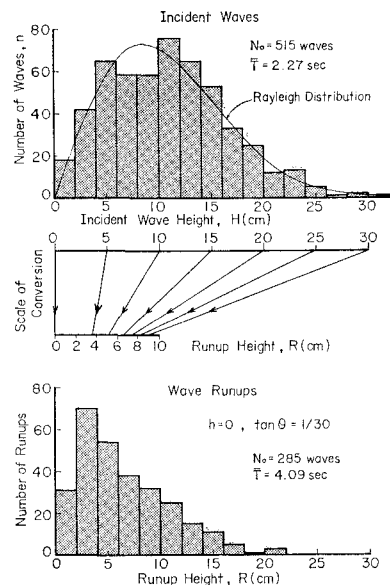


図-8 汀線における不規則波のうちあげ高

実験結果のうちから、海底勾配 $1/30$ で $h=0$ におけるうちあげ高のひん度分布の例を図-8に示す。図の上段は模型設置前の通過波の波高のひん度分布であり、この各波高値は規則波の実験曲線¹¹⁾を使って図の中段のようにうちあげ高に換算される。これによるとうちあげ高は $R \leq 9 \text{ cm}$ にとどまるはずであるけれども、実際には下段のように $R=21 \text{ cm}$ にまで分布している。なお、サーフビート現象のため汀線近傍では波の周期が増大していることに注意されたい。

この例から、越波量も不規則波の実験値のほうが期待越波流量よりも大きくなることが予想される。図-9はこれを裏付けるもので、沖側の $h=22.5$ および 15 cm では実験値 $q_{meas.}$ と計算値 $q_{cal.}$ がほぼ一致している

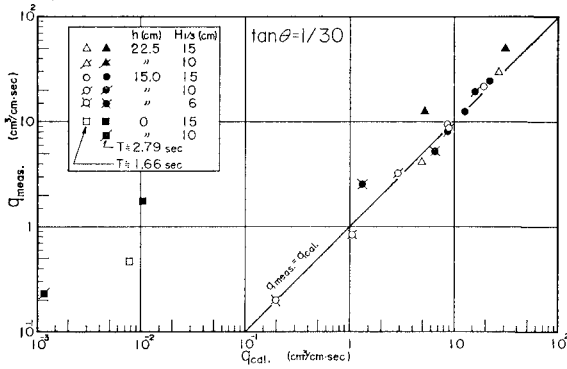


図-9 不規則波の越波流量の計算値と実験値の比較

のに対し、汀線では前者が後者の100倍以上にもなっている。

砕波帯中央部の越波流量と比較して汀線近傍での越波流量のもう一つの特徴は、沖波の波形勾配の影響を受けることである。 $h=0$ での越波流量を $T_{1/3}=1.66$ sec および $T_{1/3}=2.79$ sec の2種類の波で比べてみると、波高は共に約15 cmでも後者のほうが3~10倍大きい。規則波でも波形勾配の小さい波はどちらあげ高が大きい傾向にあるが、不規則波ではさらにサーフビートも波形勾配と逆相関の関係にあり、この傾向を助長するためと思われる。

6. 混成防波堤の伝達波に関する実験

前節とは逆に、不規則波の実験値が有義波相当の規則波の結果にほぼ一致する例が、越波による混成防波堤背後への伝達波の波高である。実験例として、水深 $h=30\sim35$ cm、マウンド上の水深 $d=15\sim20$ cm、天端高 $h_c=0\sim15$ cm、天端幅 $B=30$ cmの模型防波堤に2種類の不規則波を作用させた結果が図-10~12である。模型と水路側壁との隙き間約5 mm ずつはそのままあけて実験した。

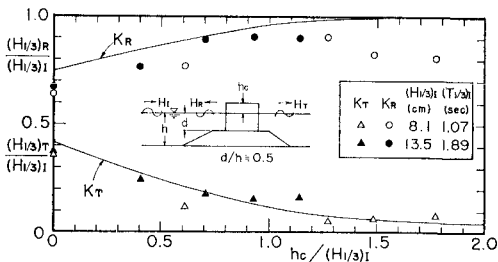


図-10 混成防波堤の反射率と波高伝達率

図-10は、1/3最大波についての反射率および波高伝達率で、いずれも3回繰り返し測定の実験値である。図中の曲線は、規則波の実験結果を公式化したもの¹²⁾で、このうち波高伝達率は次式で表わされる。

$$K_T = \sqrt{0.25 \left[1 - \sin \frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{h_c}{H_t} + \beta \right) \right]^2 + 0.01 \left(1 - \frac{d}{h} \right)^2} \quad (10)$$

ここに、 $\alpha=2.2$, $\beta=0.25$: $d/h=0.5$

不規則波の場合にも波高伝達率はほぼこの式に一致し、またこれは1/3最大波高だけでなく1/10最大波高および平均波高についても成立することが確認されている。このことは、波高の大きな波は相対天端高が低いため波高伝達率が大きく、波高の小さい波にとっては相対天端高が高いため波高伝達率が小さくなることを意味している。

したがって、伝達波の波高分布は図-11のようにレーリー分布よりも分布幅が広いのが特徴である。海の波の場合は周波数スペクトルが相当にひずんだ形をしていても波高分布はほぼレーリー分布で表わせるものであり¹³⁾、越波による伝達波はレーリー分布が成立しない一つの特例である。

図-11の波高分布のうち、波高の小さい波は入射波と1波ずつ対応する波ではなく、波高の大きな波の越波打ち込みの際のじょう乱によって発生する短周期の波である。また、伝達波そのものの周期も入射波の周期よりも短いものが多い。図-12は入射波に対する伝達波

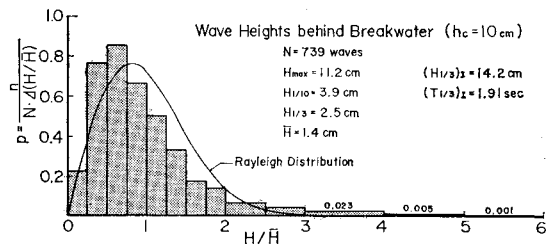


図-11 越波による伝達波の波高分布

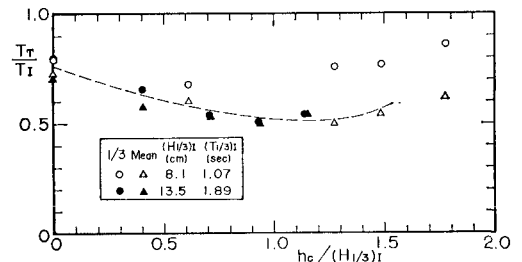


図-12 越波による伝達波の周期の変化

の1/3最大波周期および平均周期の変化を示しており、周期が50~80%に減少している。

7. あとがき

不規則波を用いた実験は、現実の海の波の作用を解明するための最も直接的な方法であり、また汀線近傍の波の挙動など不規則波を使わなければ再現不可能な現象も少なくない。実験施設として、任意波形造波装置、不規

則信号発生装置(またはD-Aコンバーター), A-Dコンバーター, そして手近な電子計算機を必要とするけれども, 不規則波実験によって得られるものは大きい。また, 実験ならびに解析時間も2.の方法で連続試験を行うのであれば, むしろ規則波よりも短かくてすむ。5.の越波量測定では, 約200波ずつ3回の繰り返し測定で1ケース約40分であった。本報文が今後の不規則波実験の参考になれば幸いである。

なお, 本報文中の実験および現地観測にあたっては, 港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室の神山 豊枝官の協力を得たことを記し, 謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 合田: 不規則波の碎波指標について, 第20回海講, pp. 571-577, 1973.
- 2) たとえば, 富永・橋本: 造波機による不規則波の発生, 第17回海講, pp. 415-419, 1970.
- 3) たとえば, 岩垣・村上・酒井・木村: 電気油圧式不規則波発生機について, 第17回海講, pp. 409-414, 1970.
- 4) Goda, Y. and T. Kikuya: The generation of water waves with a vertically oscillating flow at a channel bottom, Rept. Port and Harbour Res. Inst., No. 9, 24 p., 1964.
- 5) 鹿島: 不規則な波の入射および反射エネルギースペクトルの測定法について, 第15回海講, pp. 91-96, 1968.
- 6) 石田・伊藤: 風波の反射によって起るスペクトル構造の規則的变化について, 第18回海講, pp. 43-47, 1971.
- 7) 合田: 岩礁上の円柱に働く波力について, 第19回海講, pp. 385-389, 1972.
- 8) 合田・鈴木: 不規則波に対する反射波の分離法について, 第1回関東支部年次研究発表会, pp. 151-154, 1974.
- 9) 富永・橋本: 不規則波の海岸堤防へのうちあげ, 第19回海講, pp. 303-307, 1972.
- 10) たとえば, Munk, W.H.: Surf beats, Trans. A. G. U., Vol. 30, No. 6, pp. 849-854, 1949.
- 11) 豊島・首藤・橋本: 海岸堤防への波のうちあげ高—海底勾配 1/30—pp. 260-265, 1964. または, 海岸保全施設設計便覧(1969版), p. 203.
- 12) Goda, Y.: Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 1-18, 1969.
- 13) 合田・永井: 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技研報告, 13巻1号, pp. 3-37, 1974.