

底面粗度による不規則波の波高の頻度分布の変化

岩 垣 雄 一*・木 村 晃**・池 尻 一 仁***

1. 緒 言

不規則波の底面摩擦による波高減衰は、現地海岸での波高を推算する上で非常に重要な問題である。従来、この問題の取り扱いには Hasselmann & Collins¹⁾, Bretschneider²⁾ らのように、成分波の概念に基づくスペクトル解析法によるものと、Bretschneider & Reid³⁾, 岩垣・柿沼⁴⁾らの研究のように、不規則な波群を有義波等で代表させて解析したものの二通りの方法が行われている。しかしながらスペクトル解析法は、底面摩擦によるエネルギーの損失が水粒子速度の2乗に比例する非線型な過程によるものであるため、Hasselmann らのように総エネルギー変化を成分波のエネルギー損失に比例配分してスペクトル形の変化を論じたり、あるいは逆に、Bretschneider らのように、成分波ごとの損失を見つめ、その和から全体のエネルギー損失を推定するという線型の取り扱い法は本質的に問題がある。一方、有義波法によるエネルギー損失の検討も次の2点で問題がある。すなわち、上にも述べたように底面摩擦によるエネルギーの損失機構が非線型であるため、有義波のような平均波を用いた解析で不規則波全体の特性が把握し得るかどうか第1点であり、他の1点はゼロアップクロス法で定義した不規則波の個々の波を同じ波高・周期をもつ規則波と単純におきかえて取り扱うことが妥当であるかどうかということである。

著者らはここ数年来、ゼロアップクロス法で定義した不規則波の個々の波のもつ力学的な特性について、基礎的な研究を重ねてきた。その結果、この方法で定義した波は規則波と非常に近い特性を示す場合もあり⁵⁾、かなり異なる特性を示す場合⁶⁾もあった。しかしながら、いずれの場合においても、この方法により定義した波は一定の特性を示し、力学的特性の検討に使い得ることがわかった。

この研究はやはり、ゼロアップクロス法で定義した波の力学的特性を検討することを目的としたもので、前述

した底面摩擦による不規則波の確率特性の変化を対象として、この方法による不規則波の解析の妥当性を検討する。

2. 実験装置および方法

実験に用いた水槽は長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 75 cm の両面ガラス張り水槽である。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り、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りつけた消波工を設置して波の反射を防いだ。底面の粗度としては、長さ 1.5 m、幅 50 cm、厚さ 3 mm の鉄板に直径 1 cm、長さ 50 cm の塩化ビニール棒を一定間隔で固定したものを並べて用いた。この塩化ビニール棒の間隔 s は 5 cm を単位として変えることができるようになっている。今回の実験では、定常流における浅粗度の抵抗実験の結果を参考にして、比較的大きな抵抗係数の得られる、 $s=5$ cm, 10 cm の 2 種に変化させて用いた。この粗度板を 図-1 に示すように、造波板より 3 m の点よ

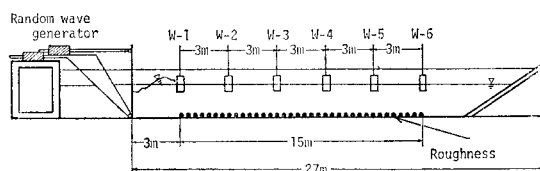


図-1 実験水槽

り 10 枚、計 15 m の区間に敷きつめた。また波高計は図中に示したように、3 m 間隔で 6 本設置した。不規則波の実験に先立ち、上記の粗度板を設置した場合と設置しない滑面の場合の 2 種類にわけて規則波を用いた実験を行った。これにより、水槽側壁の効果を見積り、実験結果から除去することにより底面粗度だけによる波高の減衰を評価した。表-1 に実験に用いた規則波の波高・周期の範囲、粗度の間隔 s 、水深等を示しておいた。不規則波の実験は Pierson-Moskowitz 型スペクトル ($f_p=0.5\sim 0.9$ Hz) およびそれより幾分尖ったスペクトル形状 ($f_p=1.0\sim 1.2$ Hz) をもつ不規則波を用いて 表-2 に示すような条件で計 40 ケースの実験を行った。各波高計で測定した記録はすべて 0.04 sec 間隔で A-D 変換

* 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

*** 正会員 工修 大成建設 土木設計部設計課

表-1 規則波の実験条件

Case No.	s (cm)	water depth (cm)	wave height (cm)	wave period (sec)
1	smooth	30	1.9~13.8	0.5~2.1
2	smooth	40	3.7~15.8	0.7~2.1
3	smooth	50	3.9~18.2	0.7~2.1
4	5	30	1.5~13.4	0.7~2.1
5	5	40	3.5~14.2	0.7~2.1
6	10	30	2.5~14.9	0.7~2.1

表-2 不規則波の実験条件

Case No.	s (cm)	water depth (cm)	peak (fp) frequency (Hz)
I	smooth	30	0.5~1.2
II	smooth	40	0.5~1.2
III	5	40	0.5~1.2
IV	5	30	0.5~1.2
V	10	30	0.5~1.2

土屋⁷⁾らの理論を用いて底面の波高減衰定数 ε_b を次式のようにして求める。

$$\varepsilon_b = \frac{\phi}{1+\phi} \varepsilon_{b+W} \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi = \frac{kB}{\sinh 2kh} \dots\dots\dots (2)$$

ここに $k=2\pi/L$, L は波長, h は水深, B は水槽の底面幅である。層流境界層理論によると, ε_b は次式で与えられる。

$$\varepsilon_b = \frac{4\pi^2}{\beta L} \frac{1}{\sinh 2kh + 2kh} \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\beta=\sqrt{\pi/\nu T}$, T は周期, である。この ε_b と Bretschneider によって定義された底面摩擦係数 $f(=\tau_0/\rho u_b^2, \tau_0$ は底面摩擦応力) との間には

$$f = \frac{3}{32\pi} \frac{L}{H} \sinh kh (\sinh 2kh + 2kh) \dots\dots\dots (4)$$

なる関係が存在する。図-3 は滑面での ε_b の実験結果

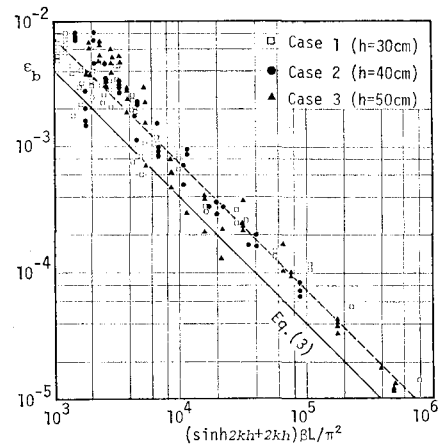


図-3 波高減衰定数の理論値と実験値の比較

を式 (3) (実線) と比較したもので、図から両者の平均的な傾向は一致しているが、データの多くは式 (3) より幾分上にプロットされている。図中の破線はデータのほぼ中央を通るように式 (3) の ε_b を 1.8 倍して引いたもので、データとの対応はかなり改善されていることがわかる。したがってここでは底面、側壁とも理論値の 1.8 倍の波高減衰定数をもつと仮定して側壁の影響を算定した。

つぎに 図-4 は Case 6 の、粗度板を用いて行った規則波

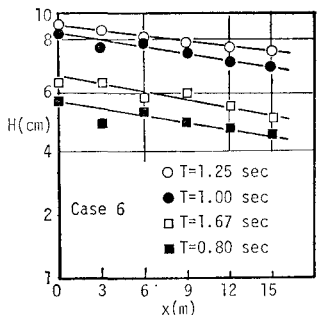


図-4 規則波の波高の減衰 (粗面)

し、後の解析に用いた。

3. 実験結果ならびに考察

ゼロアップクロス法で定義した個々の波は時間とともに変形するが、短時間内であれば、波形は保存され、波高・周期が同じ周期波とほぼ等しい内部機構をもつ。したがって、短期間であれば不規則波のエネルギー損失並びにそれによる波高の減衰は規則波のそれとほぼ等しいと考えてよい。長期的には個々の波の減衰を、その波を追跡して論ずることは無意味であるが、確率母集団における波高・周期の連続性から、形式的には規則波と同様な取り扱いが可能である。したがって、ここではゼロアップクロス法で定義した波を、波高・周期の等しい規則波とおきかえてその減衰特性を検討し、最後にこの仮定の妥当性を検証する。

実験に用いた規則波の Reynolds 数 Re_T は $10 \sim 10^5$ の範囲に分布した。ただし、 $Re_T = u_b^2 T / \nu$ (u_b : 底面における最大水粒子速度, T : 周期, ν : 動粘性係数) である。Collins の限界条件によれば、ここで行った実験の結果は滑面の場合には底面境界層は層流であり、粗面の場合には、 Re_T の大きなデータが遷移領域に達しているが、乱流域にあるデータは限られていた。図-2 は滑面での規則波の実験結果の 1 例を片対数紙にプロットしたもので、縦軸に波高、横軸に距離をとって示した。図からデータは伝播に伴いほぼ直線的に値が通減していることがわかる。したがって、層流境界層理論が適用できるので、図中に示したように最小 2 乗法を用いて直線を引き、その勾配から波高減衰定数を計算した。ただし、この波高減衰定数は側壁の影響を含む ε_{b+W} である。この場合、底面、側壁

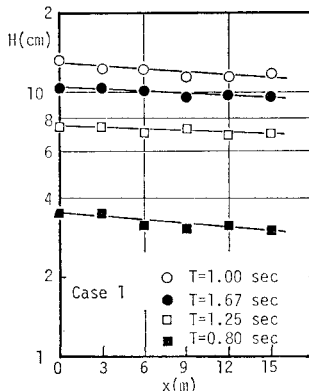
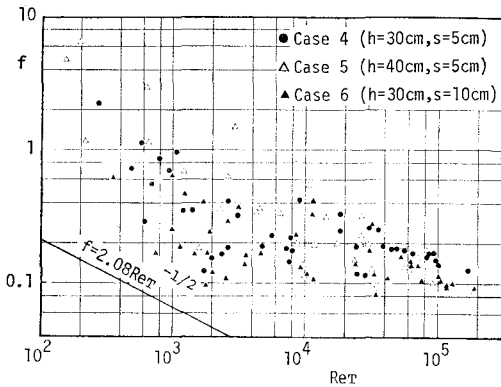
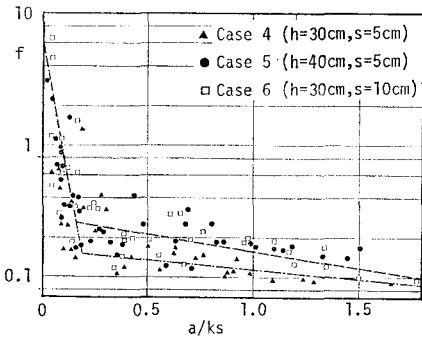


図-2 規則波の波高の減衰 (滑面)

はともに滑面と考えられるので、岩垣・



図—5 底面摩擦係数と Reynolds 数の関係



図—6 底面摩擦係数と a/ks の関係

の波高減衰の実験結果の 1 例で、
図—2 と同様に片対数紙にプロットしたものである。図から、幾分の凹凸はあるが、データはほぼ直線的に減衰しており、層流理論と同様、波高はほぼ指数関数的に減衰すると見なしてよいことがわかる。他の実験ケースについてもほぼ同じことがいえるので、滑面と同様 図—4 の各点に最小 2 乗法で直線を引き、その勾配から波高減衰定数と摩擦係数を計算した。その結果を示したものが 図—5, 6 で

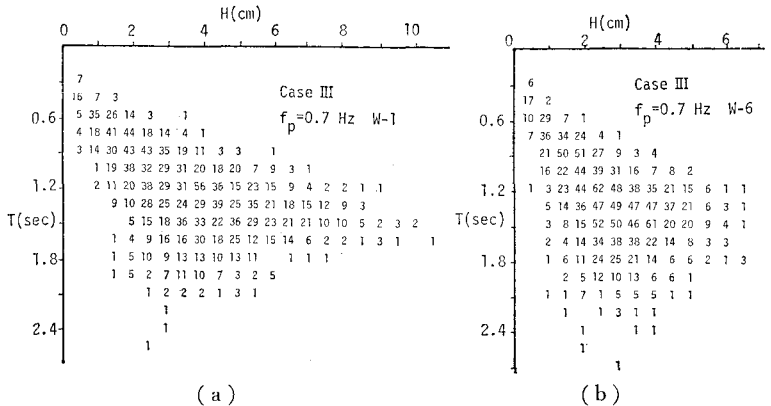
ある。図—5 は f と $Re\tau$ の関係を示したもので、図中の実線は層流境界層理論による $f=2.08Re\tau^{-1/2}$ なる関係である。図からわかるようにデータは理論式よりもかなり大きな値を示しており、 $Re\tau \geq 10^4$ の領域では一定値に近づく傾向が見られるが、ばらつきが大きく必ずしも明確ではない。つぎに、Jonsson と同様 a/ks を用いてデータをプロットしたのが 図—6 である。ここに a は底面での水粒子速度の振幅、 ks は相当砂粒粗度で、開水路での棧粗度の実験結果⁹⁾より、粗度間隔 s が 5 cm のとき $ks=4.5$ cm、10 cm のとき $ks=6.0$ cm とした。図から明らかな

ように、データは幾分ばらついてはいるが、図—5 に比してかなりまとまりが良く、 $a/ks < 0.16$ の領域では a/ks の増加にともない f の値が急激に減少し、 $a/ks \geq 0.16$ の領域では f の変化の様子は非常にゆるやかになり、 a/ks の増加にともない $f=0.1$ 程度に漸近してゆく傾向が見られる。そこで、ここでは $a/ks < 0.16$ と $a/ks \geq 0.16$ の二つの領域にわけ、最小 2 乗法を用いて次式の平均曲線を引き、後の解析に用いた。

$$\begin{aligned} a/ks < 0.16; \quad f &= \exp \{-19.55(a/ks) + 1.762\} \\ a/ks \geq 0.16; \quad f &= \exp \{-0.571(a/ks) - 1.271\} \end{aligned} \quad (5)$$

図中の破線がこの二つの関係を示したものである。

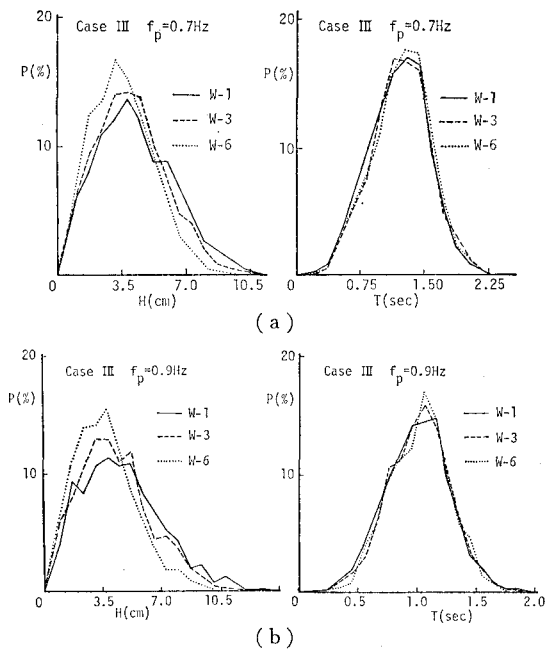
図—7 (a), (b) は不規則波を用いた実験結果の 1 例を示したもので、Case III の $f_p=0.7$ Hz の Pierson-Moskowitz 型スペクトルの不規則波の W-1 と W-6 の 2 点での波高および周期の平面的な分布形状を示したものである。図からわかるように、W-6 では W-1 に比して波高の大きな部分のデータ数が減少しており、底面粗度による波高の減衰の特徴がよくあらわれている。図—8 (a), (b) は、不規則波の伝播に伴う波高および周期の頻度分布の変化を示したもので、図から明らかなように、波高の頻度分布は W-1 に比して W-3, W-6 と伝播距離が大きくなるにつれて、波高の大きな部分のデー



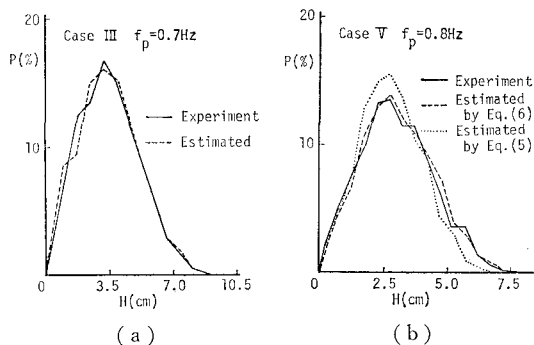
図—7 波高・周期の結合分布の変化

タが減少し、徐々に尖った分布形となる。一方、周期の頻度分布は、両ケースとも伝播にともなう分布形状の変化はほとんど見られない。

つぎに 図—3, 5, 6 の結果をもとに、図—8 における波高の頻度分布の変化を検討する。すなわち、W-1 での水位記録からゼロアップクロス法で定義した個々の波を、同じ波高・周期をもつ規則波と等しい力学的特性をもつと仮定し、W-1 から W-6 まで粗面上を伝播する間の波高減衰を計算した。すなわち、摩擦係数は式 (5) の実験式を用い、式 (4) により波高減衰定数 e_b に変換し、図—3 の破線と式 (1), (2) より側壁の効果を導入して



図—8 波高, 周期の頻度分布の変化



図—9 波高の頻度分布の実測値と推定値の比較

ϵ_{0+W} を計算し、個々の波の波高の減衰量を計算して、その頻度分布をもとめた。図—9 (a), (b) はこのようにして W-1 の記録から推定した W-6 での波高の頻度分布と実測値とを比較したもので、図からわかるように、両者の対応は非常に良好である。その他のケースについてもこれらの各図と同様、実験値と推定値の対応は良好であった。ただし (b) 図の塩化ビニール棒の間隔 $s=10$ cm のケースに対しては、図—6 の規則波の実験結果において実験値が破線で示した実験曲線より下にプロットされるものが多かったため、このケースに対しては f の値は図—6 に一点鎖線で示した次式を用いて算定した。

$$\begin{aligned} a/ks < 0.187 & \quad f = \exp \{-19.55(a/ks) + 1.762\} \\ a/ks \geq 0.187 & \quad f = \exp \{-0.349(a/ks) - 1.831\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図—9 (b) の点線が式 (5)、破線が式 (6) による推定値である。図からわかるように、実験値との対応は式 (6)

によるものの方が良好であり、式 (5) による摩擦係数は幾分過大であることがわかる。これから、粗度間隔の効果は不規則波に対しても規則波と同様な影響を及ぼすことがわかる。

その他、図—9 から容易に推定できるように、平均波、有義波等の波高の変化も、実測値と W-1 からの推定値との対応はいずれのケースにおいても良好であった。また、図—7 に示したような波高・周期の結合分布形も、実験値と推定値は良好な対応を示し、ゼロアップクロス法で定義した個々の波の減衰特性は波高・周期の同じ周期波とほぼ等しいと考えてよいことがわかった。

4. 結 言

最初にも述べたように、この研究はゼロアップクロス法により定義した不規則波の個々の波のもつ力学的な特性の研究の一環として、底面粗度による不規則波の波高減衰に関する実験的研究を行ったものである。その解析にあたり、個々の波は伝播とともにその波形を変えるため、一波を追跡するという手法は取り得ず、ここでは波高、周期の確率特性が底面摩擦という力学的なプロセスを経た場合に、どのように変化するかについて検討した。ここで実験に用いた規則波あるいは不規則波の Reynolds 数は $10 \sim 10^5$ の範囲であり、Collins の限界条件によれば、ほとんどの波の底面境界層は層流もしくは、層流から乱流への遷移領域にあり、乱流状態にあるデータは限られていた。ここで用いたような粗度板によるエネルギーの減衰機構は、一様な砂面上でのそれと異なるかも知れないが、ここではこの粗度板は sand ripple を模したものと考え、底面摩擦係数の概念を用いて解析を行った。

実験の結果は本文中に示した通りであるが、規則波の摩擦係数の値を用いて、エネルギー損失による不規則波の波高の頻度分布の変化をほぼ正確に算定できることがわかった。したがって、底面摩擦による不規則波の波高の減衰特性の解析に際しては、ゼロアップクロス法で定義した個々の波を便宜的に波高・周期の等しい規則波でおきかえて検討してよいことが見出された。このことから逆に、従来の研究において、現地観測により得た摩擦係数の値が、規則波に対する実験値よりはるかに大きくなるような場合には、底面摩擦以外の現象によるエネルギー損失も含み込んでいる可能性があり、十分な検討を要する。

参 考 文 献

- 1) Hasselmann, K. and J. I. Collins: Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction, J. Marine Research, Vol. 26, No. 1, pp. 1~12, 1968.
- 2) Bretschneider, C. L.: Modification of wave spectra on the continental shelf and in the surf zone, Proc.

- 8th Conf. on Coastal Engg., pp. 17~33, 1963.
- 3) Bretschneider, C. L. and R. O. Reid: Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction, BEB, Tech. Memo. No. 45, pp. 1~36, 1954.
 - 4) 岩垣雄一・柿沼忠男: 浅海における波浪スペクトルの変形と海底摩擦係数の推定について, 京都大学防災研究所年報, 第8号, pp. 379~386, 1965.
 - 5) 岩垣雄一・木村 晃: 波別解析法に基づく不規則波の波長・波速に関する研究, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 406~410, 1976.
 - 6) 岩垣雄一・木村 晃・岸田典史: 斜面上における不規則波の碎波に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 102~106, 1977.
 - 7) 岩垣雄一・土屋義人・坂井順行・陳 活雄: 海底摩擦による波高減衰機構に関する研究 (層流境界層の場合), 京都大学防災研究所年報第9号, pp. 647~665, 1966.
 - 8) 足立昭平: 水工水理学 (石原藤次郎編), 第6章, 丸善, pp. 237~245, 1972.
-