

# 周期波による砕波に関する実験的研究

正 員○佐 藤 幸 雄 \*  
正 員 内 島 邦 秀 \*\*

## 1 ま え が き

周期波を用いた斜面上の砕波ならびに砕波後の波の変形に関する問題は従来より多くの研究がなされ、古くはIversen, Munk により実験的あるいは理論的に調べられまた、最近では樫木らがplunging型, Spilling型の砕波形式と沖波波形勾配との関係を詳細に調べ、さらに、2つの型に対する孤立波理論、段波理論の適用性について述べている。一方中村らも数多くの実験値より勾配変化に対する沖波波形勾配と砕波後の波高変化との関係などについて研究がなされているが、なお多くの未解決の問題を含んでいると考えられる。そのうちで特に周期波の砕波後の伝播過程においては砕波の前面水深が変化することが一つの特徴であるため、著者らは砕波後の波の変形を取扱う方法として上記の砕波前面水深の変化に着目して孤立波理論を適用することを考えてみた。

この場合の孤立波理論としてはエネルギー法を用いて導かれたLe. Mehauteの式を使用し、また、従来のMunkの孤立波の砕波限界とともに実験値との比較検討を行ない、今までに取りまとめた結果を以下に報告するものである。

なお、本報告の一部はすでに土木学会第27回年次学術講演会講演概要集に掲載済であることをあらかじめ付記する。

## 2 実 験 方 法

実験には2次元造波水槽(幅0.80m、深さ0.80m、長さ17.5m)の一部をさらに縦方向に厚さ1.2cmの耐水ベニヤで幅0.20mに仕切った部分を使用し、波が完全に2次元に発生するようにした。水槽の一端には、表面に塩ビ板を使用した滑面の傾斜板を設置し、水深は34.9cmで一定とした。

波高の測定は沖波波高、砕波点の砕波波高および砕波点より汀線付近までの間10~20cm間隔に取った各断面波高をそれぞれ電気抵抗線式波高計により測定し、ペン書きオシログラフに記録した。また、砕波後の波の前面水深は波高記録の記録紙上より読み取った。実験に使用

した実験波の諸値は表-1の通りであり、notationは図-1に示した。

表-1 実験波の諸元

d<sub>0</sub>=34.9cm 単位:cm-sec

| 勾配   | 周期             | 沖波波高             | 沖波波形勾配                 | 砕波波高             | 砕波波高             | 記号 |
|------|----------------|------------------|------------------------|------------------|------------------|----|
| 1/20 | 1.70<br>(1.70) | 29~9.0<br>(113)  | 0.010-0.031<br>(0.039) | 44~11.1<br>(124) | 37~11.4<br>(165) | ○  |
|      | 1.48<br>(1.49) | 32~8.7<br>(94)   | 0.013-0.036<br>(0.038) | 52~11.2<br>(114) | 48~15.0<br>(126) | ○  |
|      | 1.22<br>(1.22) | 37~9.5<br>(94)   | 0.019-0.050<br>(0.049) | 47~11.2<br>(119) | 40~16.3<br>(154) | ○  |
|      | 1.04<br>(1.08) | 76~11.2<br>(111) | 0.050-0.074<br>(0.069) | 75~11.2<br>(103) | 82~15.0<br>(136) | ●  |
|      | 0.80<br>(0.83) | 59~8.6<br>(85)   | 0.060-0.088<br>(0.082) | 52~7.4<br>(76)   | 58~10.0<br>(102) | ●  |
|      | 1.70<br>(1.70) | 22~9.3<br>(102)  | 0.008-0.032<br>(0.035) | 41~13.6<br>(119) | 35~15.7<br>(155) | ○  |
| 1/25 | 1.48<br>(1.46) | 53~9.1<br>(111)  | 0.020-0.037<br>(0.046) | 79~12.6<br>(131) | 82~14.9<br>(140) | ○  |
|      | 1.22<br>(1.22) | 39~10.6<br>(92)  | 0.020-0.056<br>(0.048) | 52~12.4<br>(113) | 53~16.6<br>(162) | ○  |
|      | 1.02<br>(1.03) | 40~10.9<br>(70)  | 0.027-0.074<br>(0.047) | 48~11.1<br>(88)  | 65~17.3<br>(113) | ●  |
|      | 0.80<br>(0.80) | 41~7.4<br>(78)   | 0.044-0.076<br>(0.080) | 34~7.3<br>(76)   | 48~12.2<br>(120) | ●  |

注( )は砕波後も測定した波

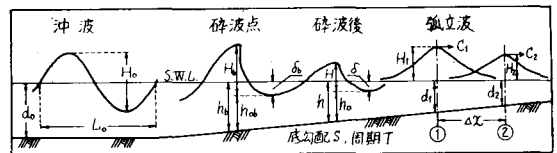


図-1 Notation

## 3 実 験 結 果

(1) 砕波点の波高、水深について 斜面上に斜面上における周期波の砕波波高と砕波水深との比  $H_b/h_b$  に対する沖波波形勾配  $H_0/L_0$  との関係については、各底勾

\* 北見工業大学工学部土木工学部 助教授  
\*\* 北見工業大学工学部土木工学部 助 手

配について Iversen により実験的に調べられているが本実験においても Iversen の実験結果とはほぼ同様の結果が得られた。また、沖波波形勾配  $H_0/L_0$  の変化に対する相対水深  $hb/L_0$  の変化をみるとほぼ類似の傾向を示すことから、 $hb/Hb - hb/L_0$  の関係についてグラフを描くと勾配  $1/20$ ,  $1/25$  については図-2, 図-3, のようになり、横軸に  $H_0/L_0$  を取った場合と同様に  $hb/L_0$  の増加とともに  $hb/Hb$  はほぼ直線的に増加し、また勾配別では  $1/20$  の方が  $1/25$  の場合に比べてわずかに下がり、したがって、勾配が急な程碎波点での波のせり上りが大きいと言える。

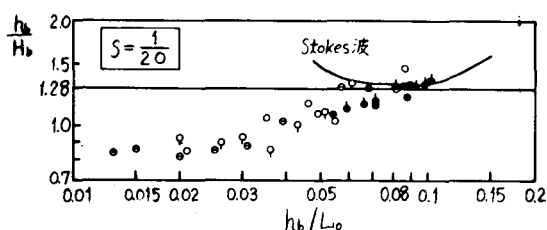


図-2 碎波点における波高変化

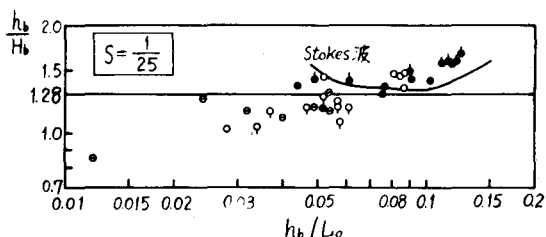


図-3 碎波点における波高変化

一方、孤立波理論より Munk は  $hb/Hb = 1.28 \dots (1)$  を与えている。周期波の場合、波の谷は静水面よりわずかに下がり完全な孤立波とはならないが、測定値を式(1)と比較すると、図-2, 図-3 に実線で示されるように  $hb/Hb$  の値に対して式(1)は勾配  $1/25$  の場合には実験値の範囲でその平均的な値を与えているが、両勾配共に  $hb/L_0 = 0.06$  以上になると孤立波理論あるいは図中に曲線で示した Stokes 波の碎波限界が合うようである。したがって、本報告では  $hb/L_0 = 0.06$  以上のすなわち Spilling 型碎波について碎波後の波の変形を考えると、孤立波の適用を試みた。

## (2) 碎波後の波高、水深について

### (i) 静水深と波高の変化

図-4, 図-5 は勾配  $1/20$ ,  $1/25$  の場合の静水深の変化に対する波高の変化の関係を  $H/h_0 - h/hb$  の関係で描いたもので、図よりわかるように、周期波の場合の特徴は沖波波形勾配  $H_0/L_0$  がパラメーターとなり、さらに  $h/hb$  の変化とともに  $H/h_0$  が変化することである。一方碎波後の波が連続した孤立波の碎波と考えれば、 $H/h_0 = 0.78 \dots (2)$  で一定と考えられ、図-4, 図-5 中に実線で示す通りである。碎波点においては式(1)が比較的一致するのに対して碎波後においては各勾配共にむしろ式(2)の方が測定値に一致して来るようであり、このことは、碎波後の波は前面が泡立ち、静水面上というよりむしろ碎波の前面水深の上を孤立波が伝播する様相に類似しているところから一応妥当な結果であると考えられる。

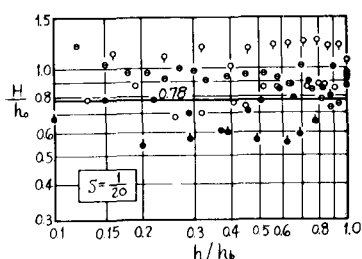


図-4 碎波後における波高変化

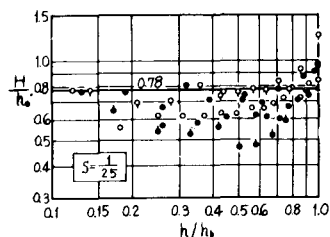


図-5 碎波後における波高変化

つぎに、碎波点の碎波波高  $Hb$  および碎波水深  $hb$  を使用して、碎波後の静水深  $h$  ならびに波高  $H$  の変化を調べてみると、勾配  $1/20$ ,  $1/25$  について、それぞれ図-6, 図-7 のようになり、沖波波形勾配  $H_0/L_0$  の影響は静水深  $h$  を含む  $h/(Hb + hb)$  の値より、 $H/(Hb + hb)$  の波高変化を含む方にパラメーターとして大きく現われ、

4)  
このことは中村らの実験結果における $H/H_0-h/h_0$ の関  
係においても類似の現象が認められる。

は孤立波の碎波限界のみでは十分とはいえない。

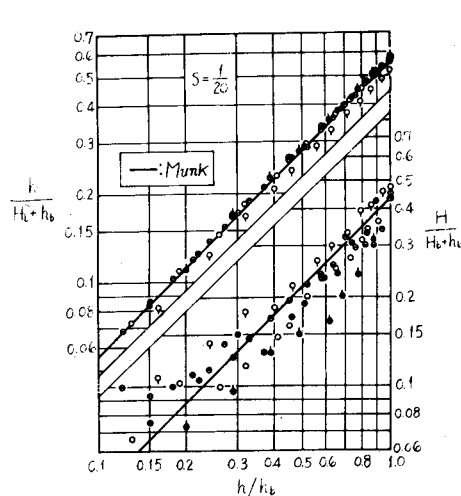


図-6 碎波後における水深と波高の変化

また、図より両勾配共に沖波波形勾配 $H_0/L_0$ が大きい  
場合は $h/(H_0+h_0)$ の値は大きく、 $H/(H_0+h_0)$ の値は  
小さい、そして $H_0/L_0$ が小さい場合はちょうどそれと反  
対の値をとる。すなわち、このことは図-2、図-3を見  
てもわかる通り $H_0/L_0$ が小さい波は、 $H_0/L_0$ が大きい  
場合に比べて碎波点での碎波波高が大きく、また碎波後  
の波の減衰も少ないためと考えられる。

そこで本報告では、 $H_0/L_0$ の変化に対する $h/(H_0+h_0)$   
)と $H/(H_0+h_0)$ の値が相反する傾向を示すことから、両者  
を加算した型の $(H+h)/(H_0+h_0)$ を使用することによ  
り $H_0/L_0$ の影響が減少されたと考え、 $(H+h)/(H_0+h_0)$   
- $h/h_0$ の関係を各勾配についてグラフに描いたのが  
図-8、図-9である。以上の図-6～図-9までの各グ  
ラフを孤立波の碎波限界と比較するため、いま碎波後の  
波について、 $H/h=0.78$  ……(3)とおくと、式(1)と式(

$$\frac{h}{H_0+h_0} = \frac{1}{1.78} \frac{h}{h_0} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{H}{H_0+h_0} = \frac{0.78}{1.78} \frac{h}{h_0} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{H+h}{H_0+h_0} = \frac{h}{h_0} \dots\dots\dots(6)$$

式(4)～(6)は図-6～図-9中に実線で示す通りであり  
各図において傾向は似ているが、特にHの変化に対して

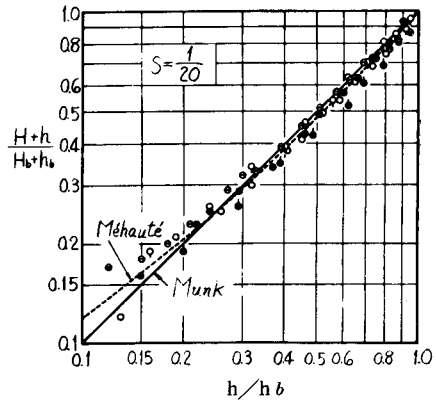


図-8 碎波後における $\frac{H+h}{H_0+h_0}$ の変化

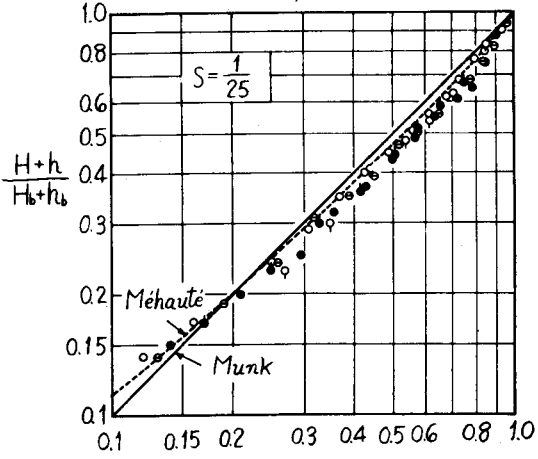


図-9 碎波後における $\frac{H+h}{H_0+h_0}$ の変化

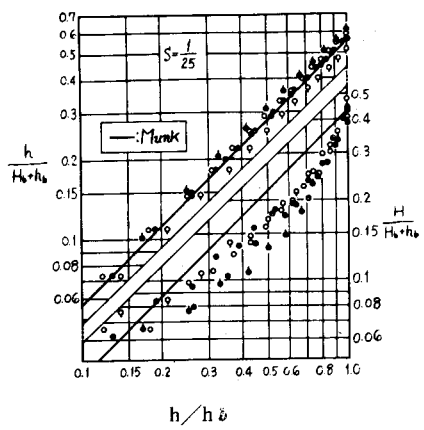


図-7 碎波後における水深と波高の変化

## (2) 碎波の前面水深

周期波の場合は碎波後において波が伝播するとき、静水面上を孤立波が伝播する状態とは少々異なり、波の谷部は碎波点付近の伝播初期では静水面よりさがり伝播とともに次第に静水面に近づき汀線付近に至つて静水面上に上がる。すなわち碎波の前面水深が波の伝播とともに変化しているわけであり、その変化の状態は図-10

に  $h_o/h_b - h/h_b$  の関係で示す通りであり、図において底勾配、沖波波形勾配による区別は明確でなく、対数グラフ上ではほぼ直線の関係にあるが、一つの特徴として、 $h_o/h_b = h/h_b$  の点すなわち、前面水深  $h_o$  が静水深  $h$  に等しくなる点を境として直線が屈曲するのが見受けられる。そこで図-10の測定値に対して平均的な直線を引き、これら2本の直線に対して次のような実験式を作つた。

$$\frac{h_o}{h_b} = 0.79 \left( \frac{h}{h_b} \right)^{0.854} \quad (0.2 \leq \frac{h}{h_b} \leq 1.0) \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{h_o}{h_b} = 0.53 \left( \frac{h}{h_b} \right)^{0.607} \quad (0 \leq \frac{h}{h_b} \leq 0.2) \quad \dots\dots(8)$$

式(7)、式(8)は著者らがすでに発表した実験式をさらに測定値を追加し修正したものである。

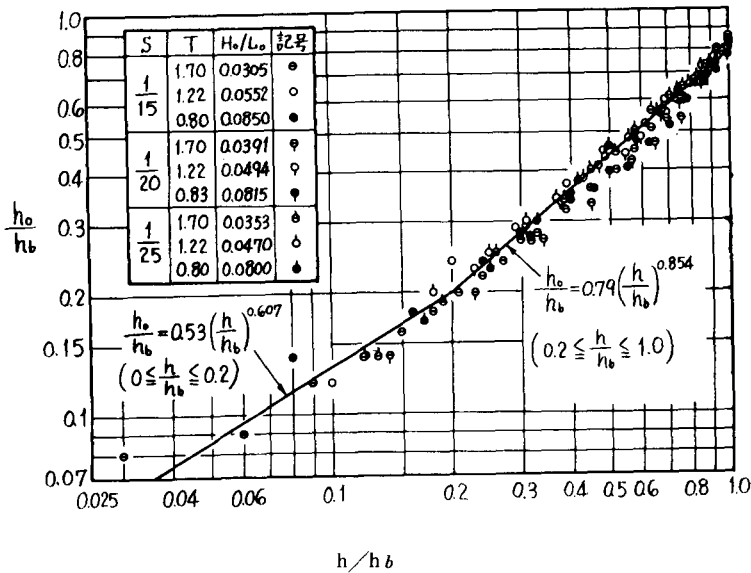


図-10 碎波後の波の前面水深変化

## (3) Le Méhauté の式による計算

Le Méhauté は Energy-Method により孤立波の碎波の波高変化に対して次式を導いている。

図-1において断面①、②における波高ならびに水深をそれぞれ  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ , とし断面間の水平距離を  $\Delta x$  とすると、

$$H_2 = H_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \left( \frac{c_1}{c_2} \right)^{2/3} \left[ 1 - \frac{8}{15} \frac{f H_1 c_1^2}{g d_1^3} \Delta x - \frac{\sqrt{3}}{16} \frac{B H_1^{5/2}}{d_1^{7/2}} \Delta x \right] \quad \dots\dots(9)$$

ここに  $C_1$ ,  $C_2$  は断面①、②における孤立波の伝播速度であり、それぞれ

$$C_1 = \sqrt{g(d_1 + H_1)}, \quad C_2 = \sqrt{g(d_2 + H_2)} \quad \dots\dots(10)$$

$g$ : 重力の加速度、 $f$ : 摩擦損失係数である。

いま、式(10)を式(9)に代入すると、

$$H_2 = H_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \left( \frac{d_1 + H_1}{d_2 + H_2} \right)^{3/2} \left[ 1 - \frac{8}{15} \frac{f H_1 (d_1 + H_1)}{d_1^3} \Delta x - \frac{\sqrt{3}}{16} \frac{B H_1^{5/2}}{d_1^{7/2}} \Delta x \right] \quad (11)$$

を得る。式(11)により計算するに当たり、本実験の場合水路幅が  $d = 0.20$  m で狭いため、摩擦係数  $f$  の算

出には次式を使用した。断面①、②の平均水深を $dm$ 、 $dm$ に対する径深を $R$ とすると、

$$dm = \frac{1}{2} \{ (d_1 + H_1) + (d_2 + H_2) \}$$

$$R = \frac{b \cdot dm}{(b + 2dm)} \quad \cdots (12)$$

$$f = \frac{2gn^2}{R^{1/3}} \quad (n: \text{Manning の粗度係数})$$

なお、波が完全に砕波している場合を考え、 $B=1$ とし、 $n=0.011$ を使用した。さらに、断面①、②における静水深を $h_1$ 、 $h_2$ とすると、 $\Delta x$ の値は各勾配について等しく、 $h_2 - h_1 = 0.005$ になるように取り、また水深 $d_1$ 、 $d_2$ としては(2)において与えた実験式、式(7)、式(8)を使用し、 $h = h_1$ 、 $h_2$ のときの $h_0$ の値をもつて $d_1$ 、 $d_2$ とした。

以上の方法により、砕波点での値 $Hb/hb=0.78$ を初期値に与え、式(11)、式(12)により逐次繰返し計算を行ない砕波後の波高変化を計算し、さらに、 $(H+h)/(Hb+hb)$ 、 $h/hb$ の値を求め、勾配 $1/20$ 、 $1/25$ について、図-8、図-9中に破線で示し、実験値と比較すると、比較的良好に一致することが認められた。なお、計算式中の $f$ の値は水深が浅くなるにしたがい次第に増加するが、今回の計算においては、各勾配共に $f=0.056 \sim 0.080$ 位に変化した。

#### 4. あ と が き

斜面上の周期波の砕波ならびに砕波後の波高変化に対しては、戻り流れ、周期の影響、乱れによるエネルギー損失などの数多くの要素を含み、本質的には孤立波理論では説明し得ないことであるが、本実験の場合、勾配 $1/20$ 、 $1/25$ においては比較的孤立波理論で近似できることが認められ、その場合、底勾配、波形勾配にあまり影響を受けない、砕波前面水深を考慮することが有効と考えられる。

また、孤立波は波形勾配を持たないため、周期波との比較において、 $(H+h)/(Hb+hb) - h/hb$ の関係で比較するのも一方法であることなどを述べたが、今後はさらに緩勾配の場合、あるいは、相対水深 $hb/L_0$ の広い範囲について、検討を加える必要があると考える。

#### 参 考 文 献

- 1) Iversen, H.W. (1952) : Waves and breakers in shoaling Water : Proc.

3rd Conf. on Coastal Eng.

- 2) Munk, W. H. (1949) : The Solitary wave theory and its application to surf problems : Ann. N. Y. Acad. of Sciences, Vol. 51, Art. 3.
- 3) 樫木, 岩田, 中辻 (1969) : 砕波の内部機構に関する基礎的研究 (第1報) : 第16回海岸工学講演会講演集.
- 4) 中村, 白石, 佐々木 (1966) : 砕波による波の変形に関する研究 : 第13回海岸工学講演会講演集.
- 5) Méhauté, B. L. (1963) : On non-Saturated breakers and the wave run-up : Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng.
- 6) 佐藤, 内島 (1972) : 砕波後の波の諸特性について : 第27回年次学術講演会講演概要集.