

抵抗の違いによる孤立波の崩れ波型碎波波高と 碎波段波波高の発達の差について

松 富 英 夫*

1. ま え が き

碎波後の波高減衰は、抵抗の効果が大きくなるにつれて、著しくなることが知られている。しかし、その後の碎波段波波高の発達がどうであるかは、未知である。後者については、研究例もほとんどないように思われる。

著者は、抵抗の効果が大きくなるにつれて、水平床上での孤立波の、崩れ波型碎波後の無次元（静水深で無次元化）碎波段波波高の発達は弱くなることを理論的に示した¹⁾。しかし、この理論結果の妥当性は、実験データの精度不足のため、検証されずじまいであった。この理論は碎波段波の発達の最も著しい段階に適用されるものである。段波波高は衝撃波力（圧）^{2),3)}等に関連し、この理論結果の妥当性の検討は工学上重要と思われる。

ところで、孤立波の碎波波高に関する研究は、理論的にも実験的にも、従来より数多く行われてきている⁴⁾。しかし、“抵抗の效果に差がある時、碎波波高にどのような違いが生じるであろうか”という視点での研究例はないように思われる。この知見は碎波開始時の波の力学の解釈等に有用と思われる。

そこで、本研究は、底面粗度の大きく異なった水平床上での孤立波の崩れ波型碎波の再実験を行い、抵抗の違いによるその碎波波高の差と碎波段波波高の発達の差の二点について、検討を行うものである。これ等の水平床上での検討は、戻り流れ等の影響が加わらず、問題がより簡単になって好都合である。碎波波高については、従来の諸実験結果（水平床上でのものとは限らない）の検討も行うことにする。

2. 実験装置と方法

実験に使用した水路は高さ 0.5 m、幅 0.3 m、長さ 11.0 m の水平に設置された鋼製矩形水路で、水路下流側の 10 m 部分が両面ガラス張りのものである。この水路上流端には、プランジャー型造波機が据え付けられており、孤立波はそれを一度だけ押し下げる（ストロークと周期は一種類に固定）ことにより造波された。下流側

のガラス張り部分には、勾配 1/10 の斜面に引き続き、高さ 0.1 m のベニヤ製水平台が設置された。これ等は共にペンキ塗装が施されている。碎波はこの水平台上で生じる。また、ガラスの片面には碎波波高、波高減衰、段波の先端軌跡や先端水位等の読み取りのため、5 cm 間隔のメッシュが刻まれている。実験装置の概要を図-1 に示す。

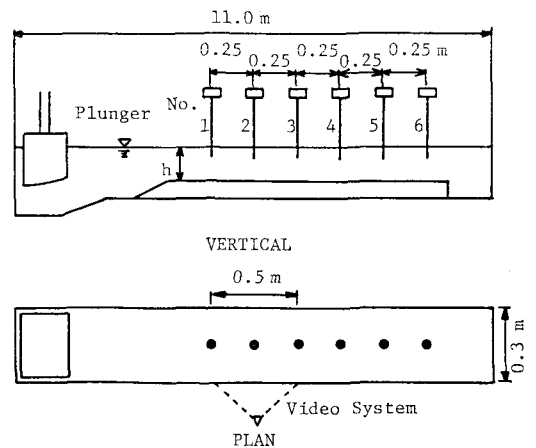


図-1 実験装置

実験ケースは、水平台上での静水深 h を 0.12 m に固定し、底面粗度（ $5 \times 5 \times 300$ mm の角柱木製棧を水路縦断方向に 5 cm 間隔で設置）有無とした 2 ケースである。この 2 種類の底面条件を選んだ理由は、抵抗の效果の差を強調するためである（以下、簡単のため、各々の底面条件を粗面、滑面と呼ぶことにする）。ただし、粗面での静水深は棧粗度底面からのものである。棧粗度床での底面がどこかという問題は、まだ解決されていない。この静水深の取り方は、無次元碎波波高と碎波段波波高を少し小さめに評価することになる。各ケースとも、有効実験回数が 20 回以上となるよう、実験を繰り返した。

測定項目は碎波波高、波高減衰、段波の先端軌跡と先端水位である。これ等の測定には、ビデオ・システムと 6 本の容量式波高計（0.25 m 間隔で設置）が用いられ

* 正会員 工修 秋田大学助手 鉱山学部土木工学科

た。ビデオの撮影範囲は砕波点より約 0.1 m 手前から約 0.4 m 先までとし、その中に造波機側から数えて 3 本の波高計が入るようにした(図-1 参照)。砕波点はこの 1 本目と 2 本目の波高計の間にくるようにし、それ等の波高記録は砕波点決定の目安に使用された。ちなみに、粗面での砕波点は造波機から約 5.19 m (25 個の平均で、標準偏差 $\sigma \approx 0.04$ m) のところで、滑面でのそれより約 0.40 m 造波機(沖)側であった。ビデオの解析には、1/60 秒まで読み取り可能なビデオ・モーション・アナライザーとデジタイザーが用いられた。波高計出力の記録には、1・2 本目に関してはデータ・レコーダーが、残りのものに関してはペン・レコーダーが用いられた。各実験ケースでの有効実験回数は、滑面と粗面共に 25 回であった(図-2 参照)。

3. 実験結果と考察

(1) 砕波波高

先ず、砕波波高 H_b に関する従来の諸実験結果の検討例について述べる。その対象実験結果として、合田の論文⁵⁾のものと Horikawa et al.⁶⁾のものを取り上げる。

合田は周期波に対する自身と従来の実験結果を、各実験での波高減衰率を勘定しながら、整理している。彼の論文中の図-1~4 を参照されたい。波高減衰率を勘定していることより、相対的な抵抗の効果の大小を知ることができる。それによると、底面勾配が小さい時 (1/30 以下)、抵抗の効果(波高減衰率)が大きいほど、無次元砕波波高 (H_b/h_b) は大きい傾向にあることが判断される。ここで、 h_b は砕波点での静水深である。

同じことは、滑(コンクリート)斜面上の周期波に対する Horikawa et al. の実験結果からも読み取れる。彼等の論文中の図-6 を参照されたい。彼等のものは、静水深、波周期と底面勾配 (1/65) を固定し、砕波波高が系統的に小さく(大きく)なる実験条件で得られたものである。それによると、 H_b が小さくなるにつれて、(H_b/h_b) は大きくなっている。このことは、合田の砕波指標⁵⁾により、斜面からの反射効果等を考慮してもである。 H_b が小さくなるとは、Reynolds 数が小さくなることを意味し、結局は相対的に抵抗の効果が大きくなる実験を行ったと解釈できるからである。

以上の従来の諸実験結果の検討より(周期波に限定されているが)、抵抗の効果が大きくなるにつれて、無次元砕波波高は大きくなるものと推察される。

次に、本実験結果について述べる。

無次元砕波波高に関する本実験結果を図-2 に示す。図の縦軸は実験の順番数である。白丸は滑面での、黒丸は粗面での実験値である。滑面での平均値は $H_{bs}/h \approx 0.798$ (25 個の平均で、 $\sigma \approx 0.010$)、粗面でのそれは $H_{br}/$

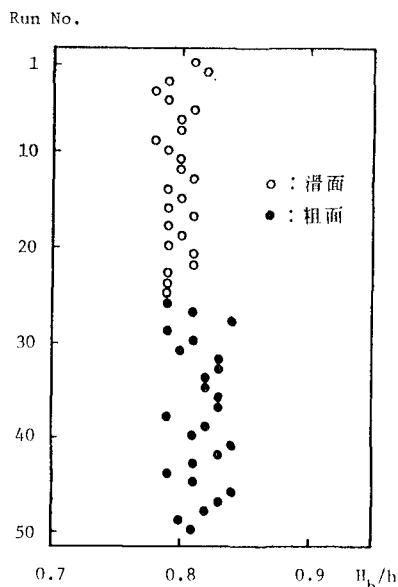


図-2 無次元砕波波高

$h \approx 0.816$ (25 個の平均で、 $\sigma \approx 0.016$) である。ここで、 H_{bs} と H_{br} は各々滑面と粗面での砕波波高である。これ等両者の差に比べ、標準偏差が比較的大きい。実験値の信頼性はまだ低いと言わねばならないかもしれないが、その平均の結果は上述の従来の実験結果と整合している。ちなみに、粗面での静水深を栈粗度頂からのものとする、 $H_{br}/h \approx 0.853$ となり、その差は顕著となる。

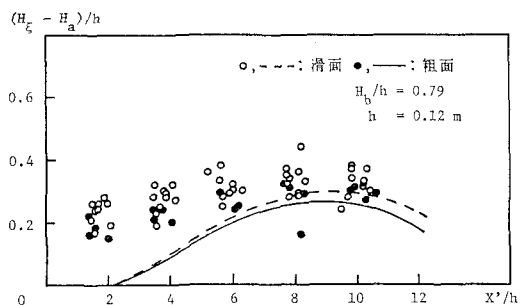
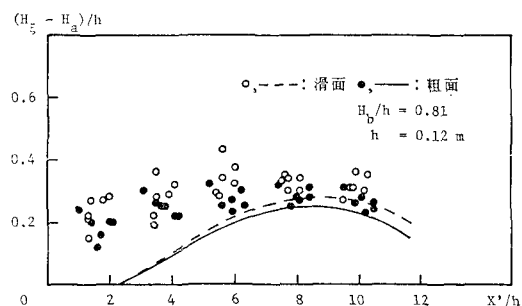
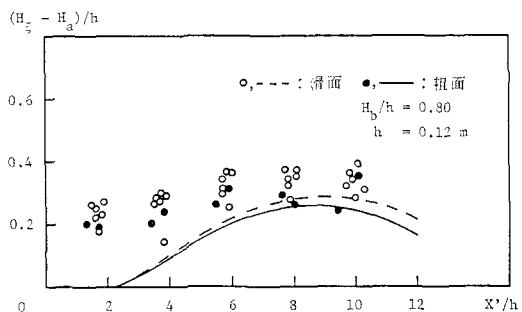
以上の検討結果より、対象波の無次元砕波波高は、抵抗の効果が大きくなれば、大きくなると結論されてよからう。ただし、上述の Horikawa et al. の実験結果からも判断されることであるが、この関係がどこまでも続くとは思えない。

(2) 砕波段波波高の発達

過去に、抵抗の違いによる、砕波段波波高の発達の差についての検討例はないように思われる。

段波波高は段波伝播速度と密接に関連する。段波伝播速度の方からの検討でも、間接的に推論可能かと思われる。しかし、対象段波の伝播速度に関する精度よい実験結果も、まだ得られていない状況である。

本実験で最も生起回数の多かった、 $H_{bs}/h = H_{br}/h = 0.79$ の場合の整理結果を図-3 に示す。理論結果の妥当性の検討は、 H_{bs}/h と H_{br}/h の値が等しいもの同士の比較でなされるのがよいと思われる。対象の現象に関係するパラメータが一つ減り、検討がより容易となるからである。図中、縦軸の $\Delta H = (H_s - H_a)$ が砕波段波波高である。 H_s と H_a は各々段波先端が X' に達した時の段波波頂と段波先端での全水深であり、 X' は固定座標系での段波先端位置(砕波形成後からの経過時間に換算

図—3 砕波段波波高の発達 ($H_b/h=0.79$)図—4 砕波段波波高の発達 ($H_b/h=0.81$)図—5 砕波段波波高の発達 ($H_b/h=0.80$)

可能)である。また、白丸と破線は滑面での、黒丸と実線は粗面での実験値と理論値である。理論値は次式群から計算されている¹⁾。

$$\frac{\Delta H}{h} = \frac{H_b - H_a}{h} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{H_a^2}{h^2} + \frac{8}{gr^2h} \left(\dot{a} + \frac{h}{H_a} c_s \right)^2} \frac{H_a}{h} - 3 \frac{H_a}{h} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{H_a}{h} = 1 + \frac{H_b}{h} \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H_b}{4h^3}} a \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{X'}{h} = (a + c_s t) / h \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 g : 重力加速度、 r : 圧力と運動量フラックス (圧力に換算) の合成補正係数、 c_s : 固定座標系での孤立波の伝播速度、 $\dot{a}$ と a : 各々 c_s で動く移動座標系での段波の伝播速度と先端位置、 t : 砕波開始時を原点とする経過時間である。

本研究では、 r の値として便宜的に 0.8 を採用している。本論文の式に出てこない、その他の定数の値としては、文献 1) でのものがそのまま採用されている。 c_s , $\dot{a}$, a や抵抗係数等の評価方法、対象段波のモデル化や式中の諸記号等についても、文献 1) を参照されたい。

図—3 によると、実験値は大きく散らばっている。しかし、その平均的傾向は、理論結果と整合していることが見て取れる。つまり、抵抗の効果が大きくなると、砕波段波波高の発達は弱くなっている。ちなみに、粗面での静水深を栈粗度頂からのものとしても (黒丸が、値と位置にして、4% 強右上方へ移動するだけ)、この傾向は変わらなかった。また、理論は、砕波段波の発達の最も著しい段階に適用されることが再確認できる。実験での、対象波の崩れ波型砕波による最大砕波段波波高は、静水深の 4 割程度に達すること等も見て取れる。

図—4 と 5 は、次いでこの順に生起回数の多かった、 $H_b/h = H_{br}/h = 0.81$ と 0.80 の場合の整理結果を示したものである。図中の諸記号は図—3 中のそれ等と同じものを表す。抵抗の違いによる、砕波段波波高の発達の平均的傾向やその他等は 0.79 の場合と同じである。

以上、抵抗の違いによる、対象波の砕波段波波高の発達の差について検討を行った。その結果、抵抗の効果が大きくなれば、無次元砕波段波波高の発達は弱くなることが判り、著者の理論結果の妥当性が確認されたと判断してよからう。

4. む す び

抵抗の違いによる、水平床上で孤立波の崩れ波型砕波段波波高の差とその後の砕波段波波高の発達の差の二点に的を絞って、それ等の実験的検討を行った。本研究で得られた主要な結論は次の通りである。

1) 抵抗の効果が大きくなれば、無次元砕波段波波高は大きくなる。これは従来の実験結果とも整合する。ただし、この関係がどこまでも続くとは思えない。その限界は今後の検討課題である。

2) 抵抗の効果が大きくなれば、無次元砕波段波波高の発達は弱くなる。これは著者の理論結果と整合するものである。

3) 粗面での砕波点は滑面でのそれより沖側となる。

謝 辞: 本研究を遂行するにあたり、東北大学工学部 首藤伸夫教授と秋田大学鉱山学部 浅田 宏教授より有

益なるご意見,ご指摘を賜った。ここに記して,両先生に
 深甚なる感謝の意を表する。また,実験に助力頂いた本
 学卒業生 大石英輝君と斉藤庄秀君にも感謝の意を表す
 る。なお,本研究の一部は昭和62年度文部省科学研究
 費自然災害特別研究(1)(研究代表者:東北大学工学部
 首藤伸夫教授)と奨励研究(A)により行われたことを
 付記し,謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松富英夫: 段波モデルを用いた孤立波の崩れ波型砕波の一
 解析, 土木学会論文集, No. 387/II-8, pp. 263~272, 1987.
- 2) 松富英夫・浅田 宏・橋岡善治: 砕波段波衝突による波力
 の一評価方法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 522~
 525, 1987.
- 3) Fukui, Y., M. Nakamura, H. Shiraishi and Y. Sasaki:
 Hydraulic Study on Tsunami, Coastal Eng. in Japan,
 Vol. 6, pp. 67~82, 1963.
- 4) たとえば, 榎木 亨: 砕波特論, 第9回水工学研修会講義
 集, 土木学会, pp. B-2-1~B-2-38, 1973.
- 5) 合田良実: 砕波指標の整理について, 土木学会論文報告
 集, 第180号, pp. 39~49, 1970.
- 6) Horikawa, K. and C. T. Kuo: A Study on Wave Trans-
 formation inside Surf Zone, Coastal Eng. in Japan, Vol.
 9, pp. 69~81, 1966.