

斜面上における孤立波の変形に関する研究 (1)

花 安 繁 郎*・佐 伯 浩**・尾 崎 晃***

1. 結 論

津波等の長波が深海から、陸棚、湾内へと進入してくると、その長波は海底の勾配、摩擦、浸透、側壁の効果等の影響を受け、長波は変形する。その変形過程はきわめて複雑で、その変形におよぼす因子をすべて考慮することは困難である。本研究は、主に海底勾配 $[S]$ が、波の変形におよぼす効果を実験的に調べるとともに、長波の陸上への Run-up height を調べたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は、長さ 24 m、幅 1.0 m、高さ 1.0 m の鋼ガラス製水路で、その端に真空タンクを設けて孤立波を発生させる。勾配は、鋼格子状フレームに、5 mm 厚の塩ビ板を張った傾斜版で作られた。波高の測定は、16mm シネカメラで撮影し、一部は容量式波高計で測定した。波高の読取り精度は 0.5 mm である。砕波後の波に対しては、波に多数の気泡を含んでいるため、測定精度はかなり落ちる。しかし完全な bore 状になると、気泡を多く含んでおらず、測定精度は砕波前と同じくらいである。用いた海底勾配は、 $S=1/50, 1/75, 1/100, 1/150$ であり、水深 h_0 は 7, 10, 15, 20, 25 cm であった。使用記号および波の模式図を図-1 に示す。

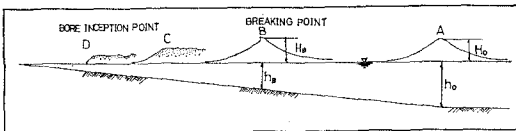


図-1

3. 長波の変形

長波の斜面上での変形に関しては数多く研究されてきた。理論解は、Greenspan, Kishi, 首藤らにより求められている。これは主に砕波前の波の変形を論じたものであり、また Amein, Freeman・LeMéhauté, Pergrine は数値解を求めている。とくに Freeman・LeMéhauté による研究は、特性曲線法により、砕波前と砕波後の

波の変形と、その後の遡上高までを一貫して計算し、その数値解を得た。長波の変形に関する実験的研究としては、Ippen・Kulin, 岸・佐伯, Street・Camfield, のものがある。Ippen・Kulin は $S=1/15.4, 1/20, 1/43.5$, 岸・佐伯は $S=1/10, 1/15, 1/20, 1/30$ で、両研究とも比較的急勾配の海底勾配である。Street らは $S=1/22, 1/33, 1/50, 1/100$, 本研究では $S=1/50, 1/75, 1/100, 1/150$ で、両研究とも比較的緩勾配の海底勾配である。

4. 砕波前の波の変形

微小振幅長波の変形の式は Green's law と言われ、式 (1) で表わされる。

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{h_0}{h} \right)^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

同様に、孤立波の場合のエネルギー伝達の式より、式 (2) が求められる。

$$\frac{H}{H_0} = \frac{h_0}{h} \left(\frac{h_0 + H_0}{h + H} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

式 (1), (2) とさらに岸の求めた式の計算値と実験値とを比較すると、沖の方では、かなりよい一致がみられるが、砕波点に近づくにつれて理論値と実験値との差は大きくなる。また勾配 S が緩いほど理論値に近い値を示す。これらのことで考えられるのは、(1) 理論中には、水底と壁の摩擦と水の粘性を無視している。(2) 水底が勾配を有しているのに、水平床上での理論を用いている。上記の2つの理由のうちとくに、斜面上を波が進行するさい、砕波点近傍に近づくとき、波形は非対称となり、また岸らの研究にもあるように、砕波点に波が近づくにつれて、孤立波の波速から、より速い、段波の波速に近づくことが示されている。したがって、水平床上での波動理論を斜面上の波にまで拡張して用いることは無理であることは明らかである。これは、海底勾配が急であれ、緩であれ、エネルギー法による波高変化の理論は実測値と一致しないことが示されている。Pergrine は、オイラーの運動方程式から、長波の変形の式を求め、 $S=1/30, H_0/h_0=0.1$ の条件で数値計算を行なっている。波形の変形の様子は、きわめて実測値と似かよっているが、波高の変化を調べてみると、実測値とかなり異なっている。この原因は、(1) 底面、側面の摩擦を無視、(2) 水平流速は鉛直方向には一様としている。(3) 横断

* 正会員 北海道大学工学部

** 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 北海道大学教授 同

法により、変形の式を求めているが、二次近似の式までで、より高次までの計算が必要であり、とくに砕波点近傍では、より高次の方程式を求めておく必要がある。砕波前の波高変化の実験結果を図-2.1~2.4に示す。Streetらは、 $S=1/22, 1/33, 1/50, 1/100$ の海底勾配の実験結果から実験式を得ている。式(3)は、Streetの式を変形したものである。

$$\frac{H}{h} = \frac{23.2}{16.65 + \left(\frac{1}{S} \cdot \frac{h}{h_B} - \frac{1}{S} \right) \cdot \beta_1} - \frac{0.643}{\left(\frac{h}{h_B} \right)^6}$$

$$+ \frac{25.0}{\left(\frac{h}{h_B} \right)^4} \frac{1}{S} - \frac{112.0}{\left(\frac{1}{S} \cdot \frac{h}{h_B} \right)^2} + \frac{3870.0}{\left(\frac{1}{S} \cdot \frac{h}{h_B} \right)^3} \dots\dots\dots (3)$$

$$\beta_1 = 1.05 \sin \left(\frac{0.05}{S} \right)^{1/2}$$

Streetの導いた式(3)においては、波高の変化(H/h)は S と h/h_B の関数として表わされている。岸の $S=1/15, 1/20, 1/30$ の実験結果においては、砕波点の位置 H_B/h_B は S と沖波相対波高 H_0/h_0 によって決まり、

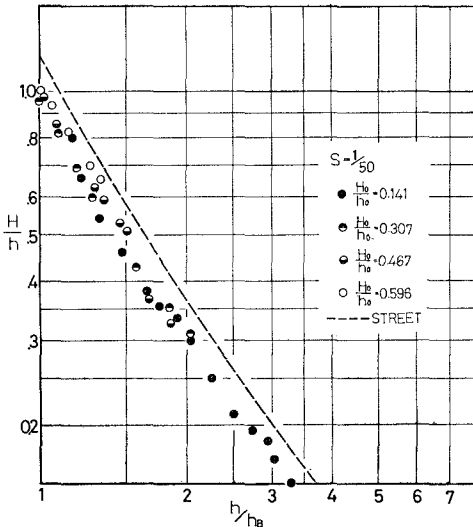


図-2.1 Relation between H/h and h/h_B before Breaking

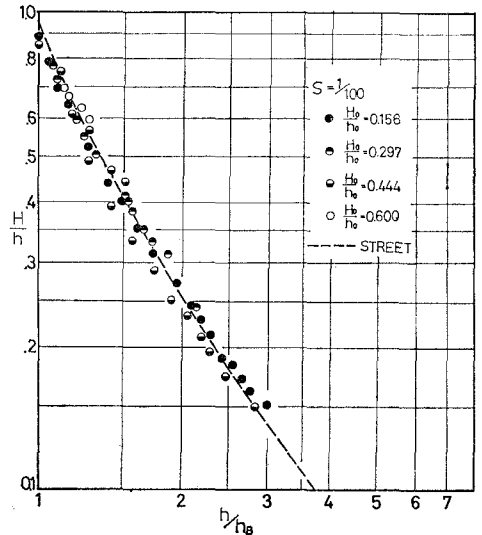


図-2.3 Relation between H/h and h/h_B before Breaking

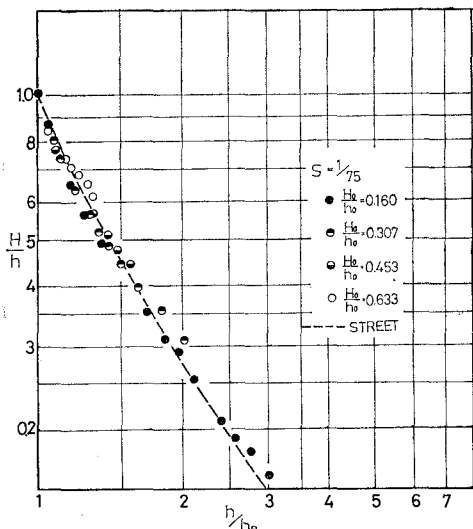


図-2.2 Relation between H/h and h/h_B before Breaking

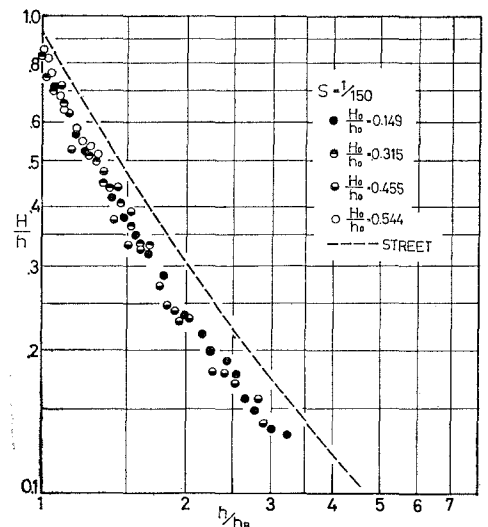


図-2.4 Relation between H/h and h/h_B before Breaking

波高変化 H/h は S と H_0/h_0 と h/h_B の関数となること
 がわかる。この傾向は勾配が急になるほど著しい。勾
 配 S が $1/30$ より緩くなると、沖波相対波高 H_0/h_0 の影
 響は、ほとんどなくなる。図-2 の破線は Street の実
 験式である。 $S=1/75$, $1/100$ においては、われわれの
 実験値とよく一致しているが、 $S=1/50$, $1/150$ ではわれ
 われの実験値よりも大きい値を示している。また実験値
 は、沖波相対波高 H_0/h_0 の影響はほとんどないよう
 である。後で述べるが、砕波後の波の変化に対しては、沖
 波相対波高 H_0/h_0 が影響している。これは勾配 S が大
 きいほどその傾向が大きい。

5. 砕波点

砕波点の位置を決めることは、波の変形を考えるとき
 重要な要素となる。本来孤立波の砕波限界は、孤立波理論
 によって少しずつ異なっているが下記のごとくである。

McCowan, Munk $H_B/h_B=0.78$

Boussinesq, Keulegan $H_B/h_B=0.73$

Laitone $H_B/h_B=0.71$

これは、水平床上での理論から求めたものであるが、
 4. でも述べたように斜面上においては、孤立波の砕波限
 界は、理論値より大きくなる。図-3 に沖波相対波高
 H_0/h_0 に対する H_B/h_B と S の関係を示したものであ
 る。図-5.1~5.4 は、各勾配 S に対する砕波時の H_B
 と h_B との関係を示したものである。図-3 より、 $S<$
 $1/50$ の範囲においては、沖波相対波高 H_0/h_0 が大き
 くなるにつれて、同じ勾配 S に対して、 H_B/h_B は大き
 くなる。また $S>1/50$ の範囲においては、その逆に、同
 じ S に対して H_0/h_0 が大きいほど H_B/h_B は小さく
 なる。岸らの実験値と、われわれの実験値からいえるこ
 とであるが、 $H_0/h_0 \approx 0.2$ を境として、波の性質がかなり
 異なっているようである。また $S<1/100$ となると、孤
 立波理論の砕波限界とかなり近づいてくる。これに対し
 て、Street は 砕波限界の実験式を次式のごとく示して
 いる。

$$\frac{H_B}{h_B} = 0.75 + 25S - 112S^2 + 3870S^3 \dots \dots (4)$$

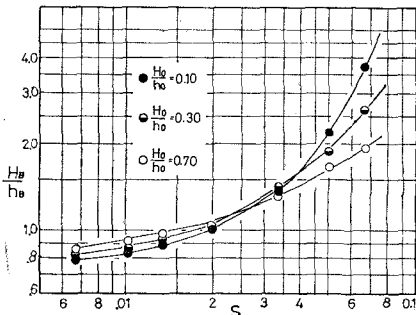


図-3 Relation of H_B/h_B to S

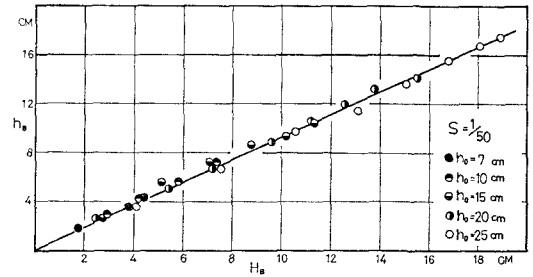


図-5.1

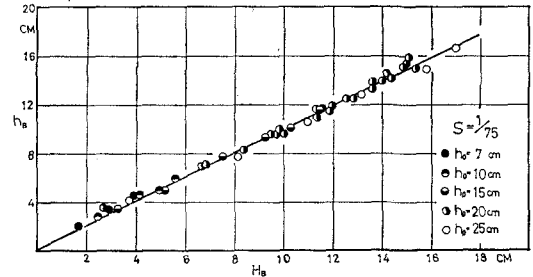


図-5.2

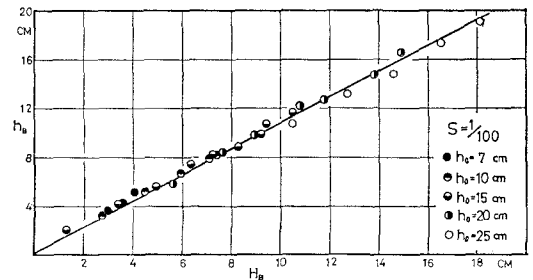


図-5.3

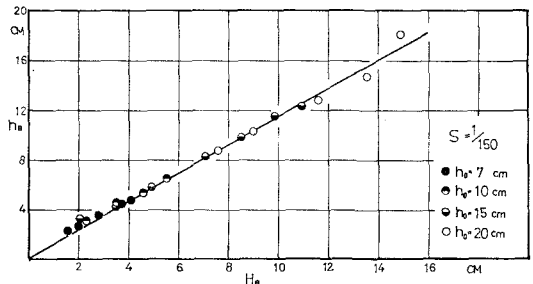


図-5.4

Street の実験式は $H_0/h_0 < 0.2$ より求めているので、
 $H_B/h_B = f(S)$ で表わされるが、われわれの実験値は
 $0.05 < H_0/h_0 < 0.8$ より得られたものであるので、 $H_B/h_B = f(S, H_0/h_0)$
 が適当と思われる。砕波の型、砕波の形態を分類するのに Ippen・Kulin は symmetric

breaker, asymmetric breaker と intermediate breaker に分類した。これは、それぞれ spilling breaker, plunging breaker と、その中間の砕波の三つに相当している。われわれの実験においては、 $S < 1/75$ の範囲では、すべて spilling breaker であった。 $S = 1/50$ では一部 spilling breaker と plunging breaker の中間の砕波がみられたが、他はすべて spilling breaker であった。また岸らの実験結果によると $S > 1/30$ の範囲では、 $H_0/h_0 > 0.5$ では Spilling と plunging breaker の中間的な砕波で、 $H_0/h_0 < 0.5$ ではすべて plunging breaker であった。砕波の型の分類を明確にすることは困難

であった。この砕波の形態の分類は、次節の砕波後の波高変化に大きな影響をおよぼす。

6. 砕波後の波高変化

周期波の砕波後の波高の変化に関する研究は国内でもかなり発表されている。孤立波に関するものでは、岸・佐伯が $S = 1/10, 1/15, 1/20, 1/30$ とかなり急勾配に対する波高変化を研究しているのに対して、Street・Camfield は $S = 1/22, 1/33, 1/50, 1/100$ に対する結果を得ている。われわれは $S = 1/50, 1/75, 1/100, 1/150$ に対して実験を行なった。実験結果を図-4.1~4.4 に示

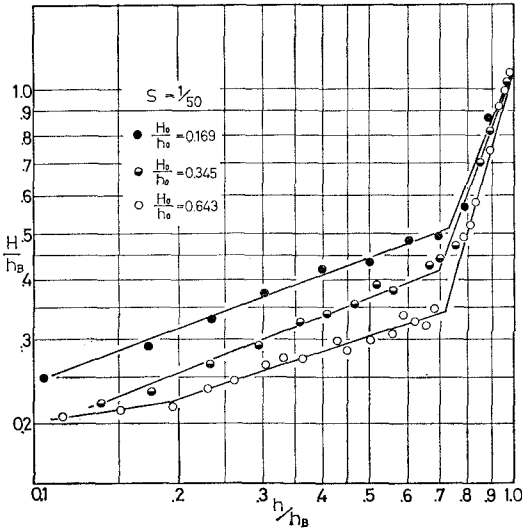


図-4.1 Relation between H/h_B and h/h_B after Breaking

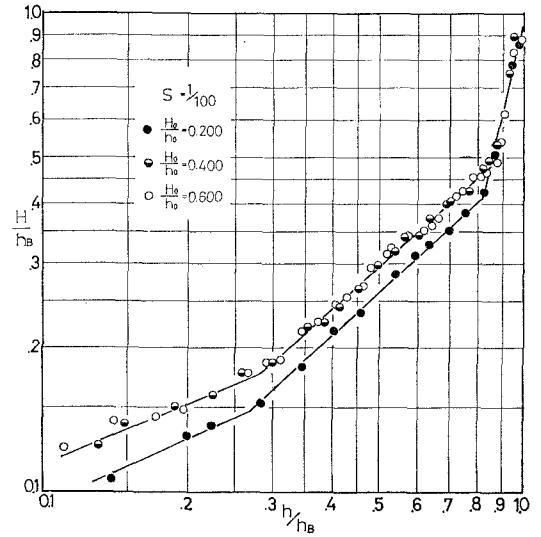


図-4.3 Relation between H/h_B and h/h_B after Breaking

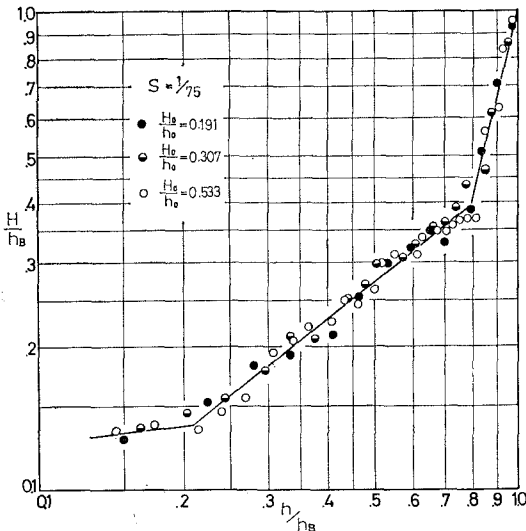


図-4.2 Relation between H/h_B and h/h_B after Breaking

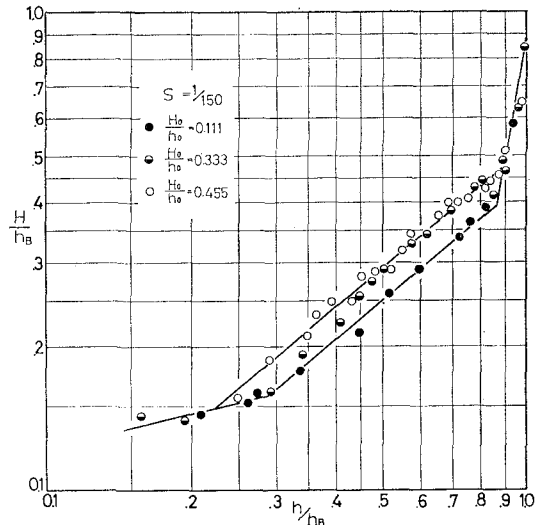


図-4.4 Relation between H/h_B and h/h_B after Breaking

す。砕波後の波の運動機構を明らかにすることは、かなり困難なことである。波高の変化を H/h_B と h/h_B との関係で両対数にプロットしたものであるが、波高の変化 H/h_B は三つに折れる。これは物理的にもかなり面白い結果である。砕波後の第一の折れ目は $S=1/50$ で $h/h_B \div 0.7$, $S=1/75$ で $h/h_B \div 0.8$, $S=1/100$ で $h/h_B \div 0.85$, $S=1/150$ で $h/h_B \div 0.9$ となる。この折れる点は、16 mm フィルムでその波形を見てみると、まず砕波点で波高が最高となり、その直後急激に波は崩れ波高が減少し、その後静水面と、砕波後の波の front が不連続となる。図-1 にそれを示す。図-1 において波形が D のごとくなる点が図-4 の第一の折れる点となる。この点は図から判断すると、ちょうど bore の波形と似かよっている。砕波後の波が段波状になるとそのままの波形で、波高を漸次減少しながら汀線まで進行する。

また岸、佐伯の実験値と今回の実験値から、 $S \geq 1/50$ の範囲においては、沖波相対波高 H_0/h_0 が小さいほど H/h_B は大きい値を示し、 $S \leq 1/100$ の範囲においては、その逆に H_0/h_0 が大きいほど H/h_B の値も大きくなっている。その間の $S=1/75$ においては、沖波相対波高の影響はほとんど無いようである。また $S \leq 1/100$ においては、 H_0/h_0 の影響を受けているが、それは急勾配の時に比べれば、非常に小さい。第一の折れ点を bore inception point とすると、各勾配に対する bore inception point を図示したものが図-6 である。図-6 から $S \geq 1/30$ においては、砕波はほとんどが plunging breaker で、 $S < 0.07$ では、bore が起こらないことがわかる。また図-4 から $h/h_B \rightarrow 0$ つまり汀線に波が近づくにつれて $H/h_B \div \text{const}$ になる。bore inception point から Keller らが求めた斜面上の段波の変形の式を用いて計算を行なったが、変化の状態は、実測値と似た形状を示すが、実測値にくらべて波高減少の率が小さい。Keller らが求めた理論式には、粘性、底部摩擦を考慮しないために実測値より大きな波高を示すものと思われる。砕波後の波の運動機構はよりくわしく研究されるべきである。

砕波後の波高変化の式を Street などは提案しているが、 $S=1/50, 1/75$ では、われわれの実測値よりかなり

大きく、 $S=1/150$ では、逆に、われわれの実測値の方が、Street の実験式よりも大きくなっている。これは Street らの実験が $S=1/22 \sim 1/100$ の範囲で、 $H_0/h_0 < 0.2$ であるので、実験式も当然適用範囲で使われるべきである。

7. 一様斜面上の孤立波の Run-up Height

斜面上への長波の run-up に関する理論的な研究は、数多くある。とくに Freeman・LeMéhauté は特性曲線法により砕波前、砕波後の波の変形、それに汀線近傍の変形と dry bed 上への run-up を一貫して計算できる手法を発表した。また Freeman・LeMéhauté の run-up height の計算値の傾向は、実験値の傾向とよく一致している。またその run-up の計算に用いた仮定も、岩垣・井上・大堀の研究と岸らの研究ではほぼ確かめられている。しかし現実には、海底、dry-bed の粗度の見積りにまだ問題が残ることと、計算に非常に手間がかかる。この他 Amein も特性曲線法により run-up height を求めているが、この計算は砕波を伴う run-up の計算には適しない。孤立波の run-up height に関する実験は、B. E. B. の Hall・Watts の実験と Kaplan の実験がある。各実験に用いた勾配は下記のごとくである。

Hall・Watts (B. E. B.) $S=1/1, 1/2.1, 1/2.4, 1/5.7, 1/11.4$

Kaplan (B. E. B.) $S=1/30, 1/60$

Kishi・Saeki・Kato $S=1/10, 1/15, 1/20, 1/30$

Hanayasu・Saeki・Ozaki $S=1/50, 1/100, 1/150$

周期波に対する run-up height の実験は、Saville, Grantham, Hunt らによる多数の研究がある。周期波の run-up height と孤立波の run-up height の大きな違いは、周期波は、 R/H_0 と H_0/L_0 でデータを整理した時 R/H_0 は peak を持つが、孤立波の場合は、実験の範囲が未だ狭いせいか、peak を持つか否かはっきりしない。

孤立波による実験値と実際の津波の run-up height の間の関係については、k. Kaplan が、1946 年のチリ地震津波が Hawaii を襲った時のデータから、孤立波から求めた実験値が、実際の値とよく一致したことを報告している。またわが国でも佐々木が昭和 8 年の津波のデータと Kaplan の実験値を比較し、よく一致していることを報告している。図-7.1~7.3 に $S=1/50, 1/75, 1/100$ に対する今回の実験値を示す。勾配が緩勾配となると、汀線近傍の表面張力が大きく影響して、データはばらついている。 $S=1/150$ でも実験を行なったが、水路長が 24 m と短いため、水深を大きくすることができず、汀線近傍の表面張力等の影響を受け、満足するデータを得ることができなかった。図-7 から run-up height R/H_0 は次式で表わすことができる。

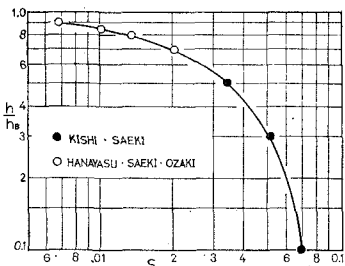


図-6

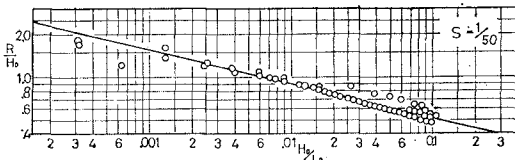


図-7.1

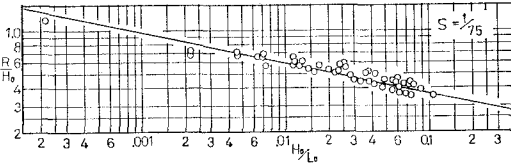


図-7.2

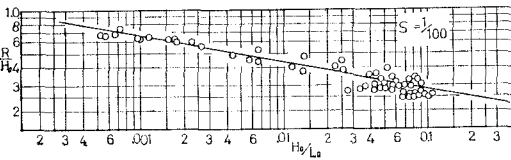


図-7.3

$$\frac{R}{H_0} = K_R \left(\frac{H}{L_0} \right)^{-n} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(5)の K_R と n は勾配 S の関数として表わされる。すなわち $K_R = f_1(S)$, $n = f_2(S)$ であり, その結果を図-8に示す。また同様にして R/h_0 は次式で表わすことができる。

$$\frac{R}{h_0} = K_h \left(\frac{H}{h_0} \right)^{-a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

K_h, a も S の関数で表わすことができる。すなわち $K_h = g_1(S)$, $a = g_2(S)$ であり, その結果を図-9に示す。Kaplan, 岸は同一勾配 $S=1/30$ で実験を行ない, Kaplanの実験が smooth bed であるのに対して岸の実験は rough bed であるが, これから判断して, 海底の粗度の影響は, 打ち上げ高さには, あまり関係ないようである。

最後に本研究は文部省科学研究費(代表者 堀川清司教授)による研究成果の一部である事を付記するとともに, 本研究に協力して頂いた東京都庁の佐々木真君に深甚の謝意を表します。

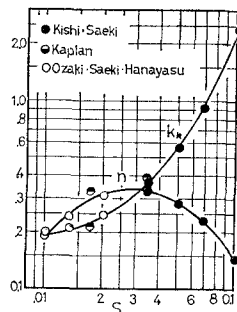


図-8

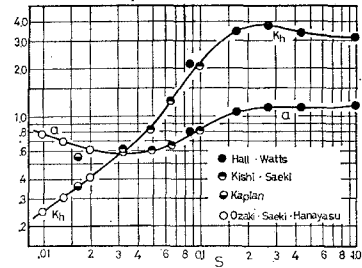


図-9

参考文献

- 1) Amein, M. (1964): Bore inception and propagation by the nonlinear wave theory; Proc. Ninth Conf. Coastal Eng.
- 2) Amein, M. (1966): A method for determining the behavior of long waves climbing a sloping beach; J. Geoph. Res. Vol. 71, No. 2.
- 3) Camfield, F. E. & Street, R. L.: Shoaling of solitary waves on small slopes, Proc. A. S. C. E., Feb. 1969.
- 4) Freeman, J. C. & Le Méhauté, B. (1964): Wave breakers on a beach and surge on a dry bed; Proc. A. S. C. E., Hy. Div., Vol. 90.
- 5) Ippen, A. T. & Kulin, G. (1955): The shoaling and breaking of the solitary wave; Proc. Fifth. Conf. Coastal Eng.
- 6) 岩垣・井上・大堀 (1966): 法面上の波の遡上機構に関する実験的研究, 第21回土木学会年次学術講演会。
- 7) 岩垣雄一 (1964): “海岸堤防論”, 土木学会水理委員会。
- 8) Kaplan, K. (1955): Generalized laboratory study of Tsunami run-up; Tech. Memo. No. 60., B. E. B.
- 9) Keller, H. B., Levine, D. A. and Witham, G. B. (1960): Motion of a bore on a sloping beach; J. Fluid Mech., Vol. 7
- 10) Keulegan, G. H. & Patterson, G. W. (1940): Mathematical theory of irrotational translation waves; J. Res. Nat. Bur. Stand.
- 11) Kishi, T. (1962): Transformation, breaking and run-up of a long wave of a finite height: Proc. Eighth. Conf. Coastal Eng.
- 12) Kishi, T. & Saeki, H. (1966): The shoaling, breaking and run-up of the solitary wave on impermeable slope.; Proc. Tenth Conf. Coastal Eng.
- 13) 岸・佐伯・加藤 (1966): 一様勾配の斜面上における孤立波の変形, 砕波および Run-up, 第21回年次学術講演会。
- 14) Hall, T. Jr. & Watts, G. M. (1953): “Oceanographical Engineering”, by R. L. Wiegell, pp. 71.
- 15) Pergrine, D. H. (1967): Long waves on a beach; J. Fluid Mech., Vol. 27, Part. 4.
- 16) Street, R. L. & Camfield, F. E.: Observations and experiments on solitary wave deformation: Proc. Tenth Conf. Coastal Eng.
- 17) 佐々木忍 (1959): 三陸沿岸の津波対策について, 第6回海岸工学学会講演会講演集。