

孤立波の変形に関する研究(3)

佐伯 浩*・佐藤滋男**・尾崎 晃***

1. 緒 論

前報までわれわれは、水路幅が一定で、一様の水底勾配 S を有する水路中を孤立波が進行する場合と水深が一定で、水路幅 B が一様に変化している場合、また、水路幅、水深がともに一様に変化している水路中を進行する孤立波の変形、特に、波高の変化と、陸上への打ち上げ高さについて論じてきた。今回は、主に、水路幅が一定で、水深が一様に変化する場合の孤立波の波速を実験により調べた。波速は波の形態によっても変わるため、まず、水深一定の場合の波速 $[C]$ 、碎波点以前の水深変化部の波速 $[C_a]$ 、碎波後、波が完全に段波になった点 (Bore Inception Point) から汀線部までの波速 $[C_b]$ 、それから、Dry Bed 上の波速 $[C_d]$ に分けて述べることにする。

2. 実験装置および実験方法

実験は、長さ 24m、幅 0.8m、高さ 1.0m の鋼ガラス製水路で、その一端に真空タンクを設け、吸い上げられたタンク内の水を落下させることにより孤立波を発生させた。落下した水塊は、水深の 25~30 倍で完全な孤立波となる。勾配部は、前回までは、鋼製格子状フレームに、5mm 厚の塩化ビニール板を張ったものであったが、今回は、勾配部のたわみをより少なくするために、5mm 厚の硬化アクリライト板を用いた。

碎波点以前の波高の測定には、抵抗線式波高計を用いた。また碎波後の Bore Inception Point から汀線部までの段波の波高の測定には、抵抗線式波高計と 16mm シネカメラで撮影したものを併用した。碎波点から Bore Inception Point までは、波の中に多数の気泡を含んでいるが、完全な段波となると、水中には、気泡はほとんど存在しない。そのため、16mm フィルムから読みとった波高は、抵抗線式波高計より得た波高と、よく一致している。水深の浅い所 (0~2cm) では、波高計が設置できないため、16mm シネカメラを用いた。波速の測定は、碎波点以前の波に対しては、抵抗線式波高計を 10cm おきに設置することにより求めた。また、Bore Inception

Point より汀線側の波は、水深が深い所では、抵抗線式波高計を数本設置することにより求めることができるが、浅い所では、抵抗線式波高計では、完全な Balance がとれないために、図-1 のような、段波の波速を求めるための波速計を試作した。この波速計は、検出部 ($\phi 2\text{mm}$) が 5.0cm 間隔になっていて、この検出部先端が水面から 1mm の所になるように設置した。これは、ステップ式波高形を横にしたのと同じ原理であり、段波の先端が検出部に達するごとに、記録紙上に階段状に記録されることにより、各検出部間の段波の先端部の通過所用時間を求めることができ、波速を測定することができる。

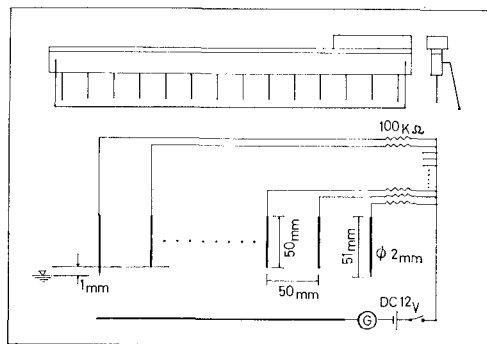


図-1

本実験に先立ち、検出部先端と静水面間の距離を 0.5mm、1.0mm、3.0mm の 3 種類に変えて実験を行なったが (段波の波高は、ほぼ 1.0cm)、その差はなかった。実験に用いた水底勾配は、 $S=1/100$ で、水深は、水平床部で、15cm、20cm である。

3. 水平床上での孤立波の波速

孤立波理論は、数多くの研究者により、その結果が発表されている。Laitone は、第 1 近似理論、第 2 近似理論の波速の式を求めている。それらを式 (1)、(2) に示す。

$$\frac{C}{\sqrt{gh}} = \sqrt{1 + \frac{H}{h}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{C}{\sqrt{gh}} = \sqrt{1 + \frac{H}{h} - \frac{1}{20} \left(\frac{H}{h} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式 (1) は、Boussinesq, Rayleigh らの得た式と同式である。孤立波の波速の実験は、Daily & Stephan によ

* 正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 大林組技術研究所
 *** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

りなされている。Daily は水深 13 cm, 長さ 32 ft で側壁, 底面ともに, Lucite で造られた水槽で実験を行ない, その結果は, $(H/h) > 0.35$ の範囲では, Laitone の第1, 第2近似理論の波速より小さく, $(H/h) > 0.35$ では, 第2近似理論にほぼ一致している。今回のわれわれの実験結果は 図-2 に示しているように, $(H/h) > 0.35$

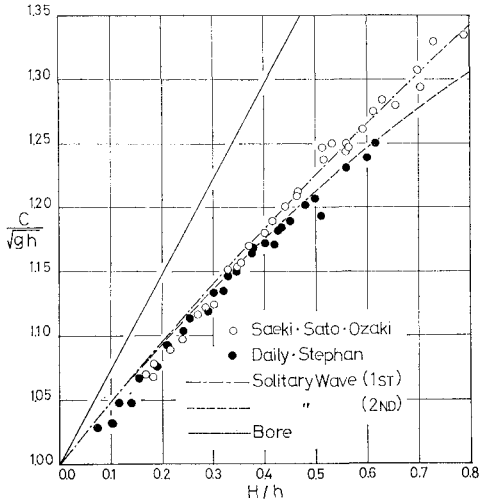


図-2

の範囲では, Daily らの実験値と同じように, 第1, 第2近似理論より小さい値を示しているが, $(H/h) > 0.35$ では, Daily らと違って, 第1近似理論によく一致している。波形については, Daily・Stephan と Kishi・Saeki が実測波形が第1近似理論とよく一致していることを示している。それを考慮すると, 波速が, 第1次近似理論値に近くて当然とも考えられる。また, $(H/h) < 0.35$ では, 理論値から離れているが, これは, 孤立波では, 水深が一定の場合, 波高 H が小さくなるにつれて, すなわち (H/h) が小さくなるにつれて, その有効波長は長くなり, 波頂部はゆるやかな曲率となり, 測定の実験値が生じやすいこと, 波長と水槽長が同じオーダーであること, 発生する孤立波が, 完全な孤立波になっていないことなどが考えられる。なお, 一定水深での孤立波の碎波点での相対波高 (H_B/h_B) は, 孤立波理論では, Bousinesq が 0.73 McCowan が 0.78, Laitone の第2近似理論が 0.71 であるが, 今回のわれわれの実験では 0.82 であった。Kishi・Saeki の結果では 0.83 であった。碎波点の相対波高においても実験値は第1近似理論に近い。

4. 一樣斜面上の孤立波の波速

水深が一様に変化する水路における孤立波の波速の実験は, Kishi らと Street らにより行なわれた。Kishi らは, $S=1/15$, $S=1/30$, Street らは, $S=0.01$, 0.02 ,

0.03 , 0.045 で行なっているが, その詳細な結果は示していない。Kishi の急勾配上での結果によると, 水平床上では孤立波理論波速に近い値を示すが, 碎波点近傍に近づくにつれて, Bore の波速に近づき, 碎波点では, Bore の波速に一致することを示している。であるから, 無次元波速 $C/\sqrt{gh}$ と相対波高 (H/h) で図示すると, 当然沖波の相対波高 (H_0/h_0) によって, その曲線は異なることになる。Street の結果では, そうはなっていない。図-3 に $S=1/100$ の場合の実測値を示す。これに

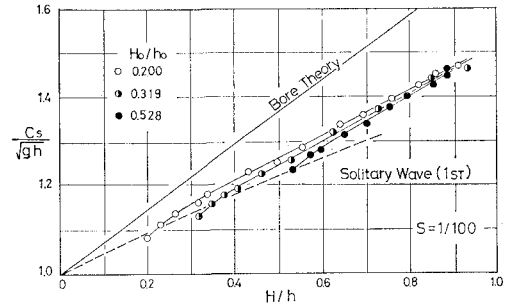


図-3

よると, 水平床部 (沖波) では, 孤立波の理論波速とよく一致しており, それから碎波点に近づくにつれて, 孤立波の理論波速より大きくなっていくが, Bore の波速ほどに大きくなることはない。碎波点 $(H_B/h_B) \approx 0.9$ では, 無次元波速 $(C_s/\sqrt{gh}) \approx 1.46$ となることがわかる。よって碎波点の波速は $S=1/100$ の場合

$$C_s \approx 1.46 \sqrt{gh_B} \approx 1.54 \sqrt{gh_B} \quad (3)$$

式 (3) で表わされる。よって波頂部の流速もほぼこの値を示すものと思われる。

次に, 勾配 $[S]$ による傾斜上の波速を調べたものが次の 図-4 である。この図には, 沖波相対波高 $(H/h) \approx 0.30$ の場合で, 勾配 $[S]$ が $1/30$, $1/50$, $1/100$ の場合である。 $(H/h) \approx 0.30$ で $(C/\sqrt{gh}) \approx 1.12$ から出発した大波は, $S=1/30$ では, $(H_B/h_B) \approx 0.8$ で, ほぼ, Bore の波速に一致しているが, $S=1/50$, $1/100$ では, より小さく, Bore と孤立波の中間の波速を示していることがわかる。よって水底勾配 $S=1/40$ くらいを境にして,

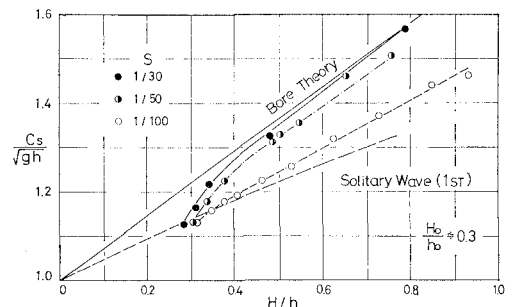


図-4

$S > 1/40$ では、砕波点近傍では Bore の波速に近いことを示している。以上のような傾向は、他の相対波高の場合にもいえることである。前々回の報告で、われわれは、孤立波の斜面上での波高の変化を調べたが、そのとき、波高の変化は、孤立波理論による Energy Flux が一定であるとの条件による波高変換理論が、実測値と一致しないことを示し、その理由として、急勾配の場合は、波形の非対称性と砕波点の相対波高 (H_B/h_B) が孤立波理論と一致しないことにより、すでに、斜面上では孤立波理論が適用できないことを述べたが、今回の以上に述べた波速の実測結果からもそれを裏づけたことになる。また Kishi らの $S=1/10, 1/15, 1/30$ の急勾配上での孤立波の波速は、砕波点近傍ですべて、Bore の波速を示している。

5. Bore Inception Point から汀線部までの波速

孤立波の砕波後の波を測定した例はない。孤立波の砕波の形態は水底勾配と沖波の相対波高 (H_0/h_0) によって決まるが、 $S > 1/5$ になると砕波しないし、 $1/5 > S > 1/30$ の範囲では、Plunging Breaker となり、砕波点と汀線の間では、波が砕波点から崩れ落ちる所で、段波などにはほとんどならない。前々回の報告で、われわれは、Bore Inception Point を実験により求めたが、これは、砕波後の波高の変化を (H/h) と (h/h_B) の関係を両対数紙上で整理すると、二つないし三つに折れ曲がる。砕波点から最初の屈曲点までは急激に波高が低下し、その後はゆるやかに波高が減少することと、この屈曲点あたりから、波の Front は、静水面と不連続になることより、この屈曲点が Bore Inception Point とし、この Bore Inception Point と砕波点の間は、一種の過渡領域を示すもので、Méhauté の指摘する Non-saturated Bore と呼ばれるものであらうと考えた。そこでわれわれは、波の Front が静水面と不連続となる所から、汀線部までの波速を前節で説明した波速計を用いて測定した。測定の結果を図-5 に示す。この結果から明らかなように、測定値は Bore の理論波速によく一致することがわかる。また、砕波前の波速は、(H_0/h_0) によって異なっているが、砕波後の Bore になってからは、沖波相対波高 (H_0/h_0) には関係なく、よく Bore の理論に一致する。水深が変化する場合の、Bore の波高変化に関しては Keller・Levine・Whitham がその理論式を求めていて、その計算を佐伯が行っているが、実験波高は、理論波高より小さくなっている。今回の波速の実測結果より、Bore Inception Point より汀線側においては、Bore に近いことが明らかになったので、今後は、Bore の Energy 損失機構を明らかにする必要があると思われる。また、Bore の Front の速度は、滑らかに変化するのではなく、

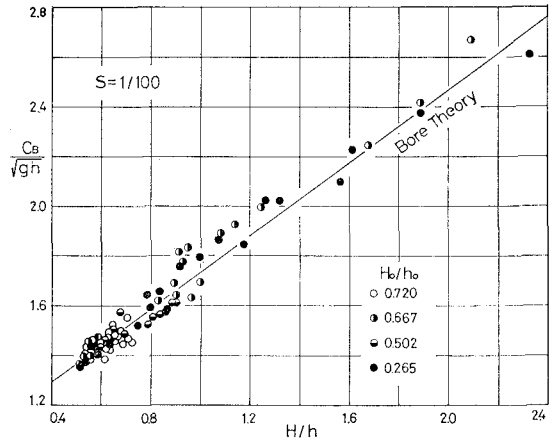


図-5

微小区間では、早くなったり遅くなったりしているもので、測定値は3回の実験値を平均したものである。また波高の測定値も3回の実験値を平均したものをを用いた。

6. 汀線近傍の波速

汀線近傍の波の運動機構は、Freeman・Méhauté らにより詳しく調べられている。汀線近傍の運動機構を明らかにすることは、Dry Bed 上への波の打ち上げ高の解明に重要なことである。本実験では、 $S=1/100$ であるが、その結果を図-6 に示す。この図から明らかなように、

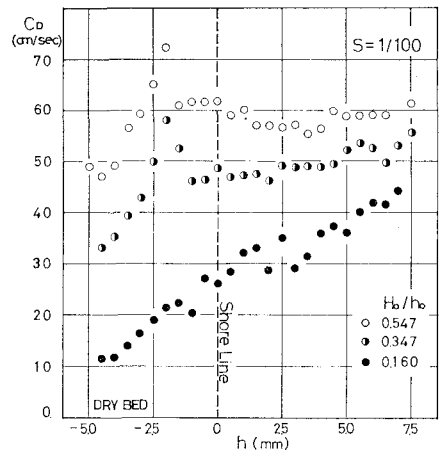


図-6

波速は、沖波相対波高 (H_0/h_0) が大きいほど大きい。これは、前報でも述べたが汀線近傍では、(H_0/h_0) が大きいほど汀線部の相対波高 (H/h) が大きくなり、当然のことといえる。また、(H_0/h_0)=0.547, 0.347 の場合は、汀線から Dry Bed 上に 20 cm 行ったところ、すなわち、静水面上 2 mm の所に波速の Peak がある。これは、Freeman・Méhauté が求めた結果とよく一致しているが、この Peak の発生位置は Shore Line が明確でない

ため、実際には若干ずれているかも知れない。これに対して、 $(H_0/h_0)=0.160$ では、波速の Peak は現われず、一様に波速は小さくなっていく。また、 $(H_0/h_0)=0.547, 0.347$ の場合、この結果からは、Shore Line まで、波速はほぼ一定となっている。また、この部分の波高を測定したが、波高が 1~3mm 程度のため、今回はよい結果は得られなかった。

7. 結 論

(1) 水深が一定の場合には、 $(H/h)>0.35$ では孤立波の第1近似理論によく一致しているが、 $(H/h)<0.35$ では、第1, 第2近似理論より若干小さな値を示している。

(2) 水深が一様に変化する所を進行する孤立波の波速は、 $S>1/30$ では、砕波点近傍では、段波の流速に一致する。これは、斜面を進行する間に、孤立波から段波に移行していると考えられる。比較的緩勾配の場合は、段波の波速より小さく、孤立波の波速より大きい、Street らが得た式とは異なっている。

(3) われわれが前回決めた Bore Inception Point は今回の波速の実験結果から妥当なものである。すなわち Bore Inception Point より汀線側では、波速は、Bore の波速とよく一致していた。

(4) 汀線近傍の波速は、 $(H_0/h_0)=0.160$ の場合を除くと、波速の Peak は、汀線より 20cm 陸側に起こった。

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ことを付記するとともに、本研究の実験装置の開発に協力して頂いた、北大工学部 酒井謙太郎氏に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Camfield, F.E. & Street, R.L.: Shoaling of Solitary Waves on Small Slopes.
- 2) Freeman, J.C. & Le Méhauté, B.: Wave Breakers on a Beach and Surge on a Dry Bed., Proc. A.S.C.E., Hy, Vol. 90, 1964.
- 3) 岩垣雄一: 海岸堤防論, 土木学会, 1964.
- 4) Keller, H.B., Levine, D.A. & Witham, G.B.: Motion of a Bore on a Sloping Beach, J.F.M., Vol. 7, 1960.
- 5) Kishi, T. & Saeki, H.: The Shoaling, Breaking and Run-up of the Solitary Wave on Impermeable Slope, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., 1966.
- 6) 花安・佐伯・尾崎: 斜面上における孤立波の変形に関する研究(1), 第17回海岸工学講演会論文集, 1970.
- 7) 佐伯・高木・尾崎: 孤立波の変形に関する研究(2), 第18回海岸工学講演会論文集, 1971.
- 8) 佐伯・宮川・花安: 一樣斜面上における孤立波の変形に関する研究—砕波後の変形—, 土木学会北海道支部「研究発表会論文集」, 1971.
- 9) Saeki, H., Hanayau, S. Ozaki, A. & Takagi, K.: The Shoaling and Run-up Height of the Solitary Wave, Coastal Eng. in Japan, Vol. 14, 1971.