

ソリトン波列の碎波変形に関する実験

永 富 政 司*・ 後 藤 智 明**・ 真 野 明***

1. はじめに

日本海中部地震津波ではソリトン分裂をおこしたと思われる短周期波列が観測された。しかもこの短周期波列は打ち上げ直前に碎波し、重量4トンの消波ブロックを散乱させるといった巨大な流体力を秘めていることも明らかになった。したがって、このようなソリトン波列の碎波を含めた変形特性を調べることは防災対策の見地から有意義なものと考えられる。

ソリトン波列の変形に関しては、Zabusky¹⁾、室田²⁾、岩崎³⁾をはじめとし数多くの基礎的研究が行なわれているが、その多くは分裂機構に焦点をあてたものであり碎波変形に関するものは少ない。

本研究では、斜面上におけるソリトン波列の碎波特性を調べる目的で水理実験を行なっている。実験の結果から、ソリトン波列の第1波が碎波するとその乱れの影響で後続する第2波の波高増幅が小さくおさえられること、また第2波が碎れた第1波に追いつくことにより通常の碎波限界より波高水深比が大きい状態で存在しうるなど興味深い知見がえられたので、これらの現象を運動量、エネルギーの変化から検討した結果を報告する。あわせて、碎波後の陸上遡上高に関しても考察を行なう。

2. 実験装置および実験方法

実験には、図-1 に示す全長 54 m、幅 1 m、低水路高 1 m、高水路高 0.5 m の鉄筋コンクリート製の二次元水路を用いている。低水路部に設置された造波機により作られた一山の波は、45° の斜面部において波形の前傾化を促がされ水平床部で 2～3 波のソリトン波列に分裂したのち、1/75 斜面部へ伝播するようになっている。

水理量の測定には、容量式水位計と超小型 3 mm プロペラ流速計を用いている。測定密度は水平方向に 1 m、鉛直方向に 1～2 cm 間隔である。計測結果は 100 Hz で離散化され水理量の計算に用いられている。

実験は表-1 に示す 2 種類のものに関して行なってい

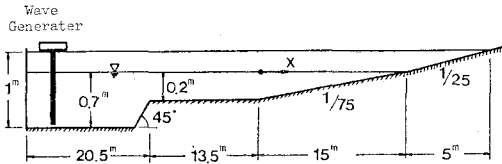


図-1 実験水路

表-1 実験波諸元

	1/75 斜面部 法先波高 (cm)			碎波波高 H_b (cm)		碎波水深 h_b (cm)		碎波形態
	第1波	第2波	第3波	第1波	第2波	第1波	第2波	
ケース 1	11.5	5.2	—	14.4	7.9	13.6	4.0	spilling 碎波
ケース 2	11.5	6.2	4.9	14.4	9.0	13.6	5.3	spilling 碎波

る。両者は第1波の波高は同じであるが第 2、3 波の波高が異なるものである。

3. 波高変化と流速分布

(1) 波 高 変 化

図-2 に水位の経時変化を示す。斜面法先 ($X=0$ m) の第1波は背後の谷が静水面まで下がってはいないがほぼ孤立波と見なして良い。一方、第 2、3 波は同じ波高の孤立波に比べ波形が緩らかであり孤立波形に達する前に斜面部へ到達している。

図-3 はソリトン波列の波高変化を示したものである。白印は碎波前、黒印は碎波後を表わす。

第1波の碎波以前の波高変化は初期波高水深比が大きいため水深の -1 乗に比例して増大する。第 2、3 波はほぼ -1/4 乗に比例している。第1波の碎波点の波高水深比 H_b/h_b は 1.06 であり、Street⁴⁾の実験式

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.75 + 25S - 112S^2 + 3\,870S^3 \dots\dots\dots (1)$$

に斜面勾配 $S=1/75$ を代入した値 1.08 にほぼ等しいものとなる。第2波の値はケース1で1.9、ケース2で1.6となりStreetらの実験式から求まるものに比べ大きなものとなる。これは、第1波が碎波し段波状の波形になったところへ第2波が追いつくことによる第1波の set-up

* 正会員 工修 鹿島建設技術研究所
** 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科

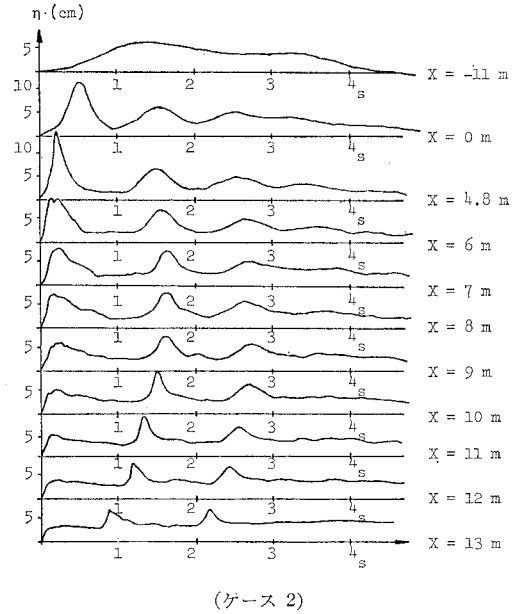
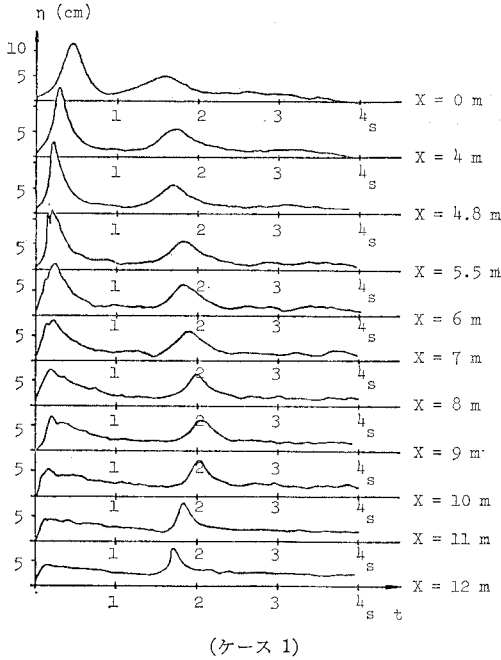
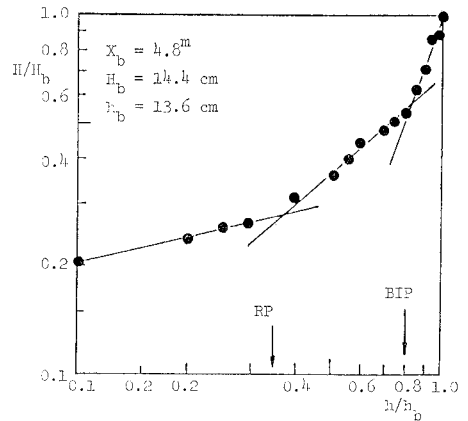
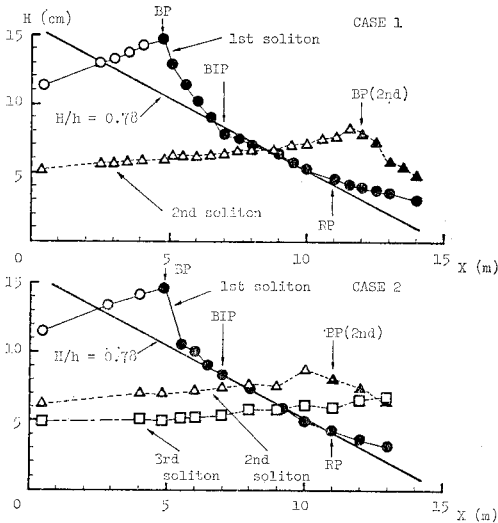


図-2 水位の経時変化



効果であると考えることができる。実際、第2波の波先の全水深を用いて計算するとケース1で1.0、ケース2で0.85となりStreetらの値に近いものとなる。

第1波の砕波後の波高変化は花安ら⁵⁾の緩勾配斜面上の孤立波の場合に近い結果となる。すなわち、図-4に示した砕波後の波高と水深の関係でわかるように、砕波点(BP)から段波形成点(BIP、花安らは bore inception point と名付けている)までは急激に波高が減衰し、段波形成点からは減衰率が小さくなることである。また、

花安らの実験結果と同様に BIP 点以外に波高減衰直線の折れ曲り点があり、目視によるとこの点は砕波により混入した気泡が消滅する点(RP)であることがわかった。図-4の直線の勾配は右から2.8, 1, 0.25である。特に、BIP から RP の間は $H/h=0.78$ を満たすように波高が変化している。

(2) 流速分布

流速の測定結果の一例を図-5に示す。図はケース1の波峰直下の水平流速に関するものである。静水位より上の波峰部はプロペラ流速計の応答が悪く、測定が困難であるため計測値が少なくなっている。

砕波点($X_b=4.8$ m)以前の流速分布は孤立波理論、

特に McCowan⁶⁾ の値によく一致する。砕波点以後の第1波は砕波による乱れと流れへの移行のため静水位を境にして不連続流の様相を呈する。また、砕波による急激なエネルギー散逸のため汀線前で流速が小さくなっている。

流速分布のひとつの指標として次式で定義される運動量補正係数 β がある。

$$\beta = \frac{\int_{-h}^H u^2 dz}{\bar{u}^2(H+h)} \dots\dots (2)$$

ここで、 $\bar{u}$ は断面平均流速である。

図-6 はこの運動量補正係数の変化を調べたものである。砕波前の第1波の β は 1.01 から 1.02 程度変化しただけであるが、砕波後は流速分布の不連続性のため最大 1.2 まで大きくなる。その後、RP 点すなわち砕波により混入した気泡が消滅する地点で 1.03 と小さくなる。

図-7 は第1波の質量輸送量の分布を示したものである。質量輸送量は流速を第1波の通過時間で積分して求めている。第1波は波峰部が弱く巻きこむものの spilling 形の砕波をするので、波峰部が崩れて静水面上に質量輸送量の最大値が現われる。この最大値が現われる高さは砕波による表面渦の先端の位置に一致している。

一方、第2波の流速分布は水底から波頂付近までそれほど変化はないが、砕波後の第1波を取り込むことにより徐々に流速が大きくなっている。第2波の砕波点はケース1の場合 $X_b=12\text{m}$ であるが、第1波とは異なり顕著な流速分布の不連続はおこらない。

4. 運動量とエネルギーの変位

(1) 波峰間距離の変化

運動量とエネルギーに関する検討を行なう前に、波峰間距離に関して簡単な説明をする。

図-8 は第1波と第2波の波峰到達時間の差 Δt の変化について調べたものである。この図からわかることは、第2波の波高に比べ第1波の波高が大きいため砕波前はもちろんのこと砕波後も BIP 点付近まで第1波の波速が大きいためである。また、BIP 点をすぎたあたりから第2波の波速の方が逆に大きくなり第2波が第1波に追いつくことになる。

(2) 運動量の変化

図-9 に各波ごとの運動量流束の変化を示す。ここで定義した運動量流束 M は密度を ρ 、静水圧からの変動圧力を P_w とすると

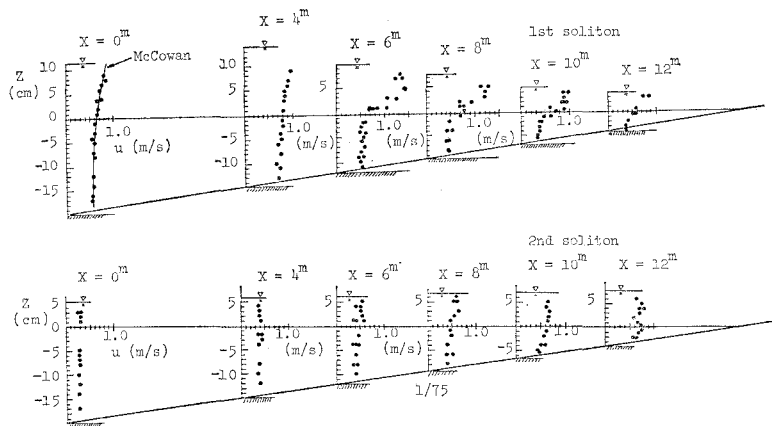


図-5 流速分布 (ケース 1)

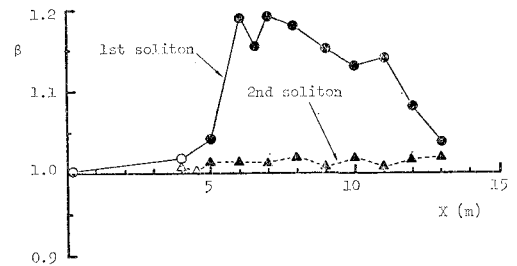


図-6 運動量補正係数の変化 (ケース 1)

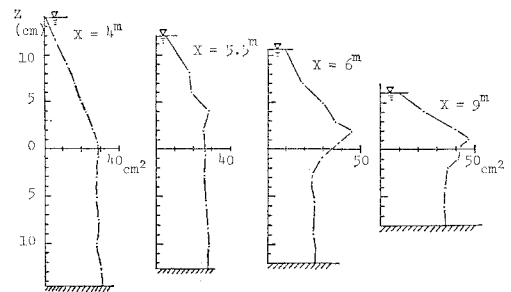


図-7 質量輸送量の変化 (ケース 1)

$$M = \iint_{-h}^H (\rho u^2 + P_w) dz dt \dots\dots\dots (3)$$

で表わされるものである。ただし、 P_w は測定された水位と流速を用いてアーセル数の大きい場合の非線形分散波理論により求めた。

各分裂波は第1波の砕波点まで運動量がほぼ一定に保たれていると考えて良い。砕波後、第1波は砕波による乱れと第2波の追いつきのため運動量が急激に減少する。また、第2波も自らは砕波してはいないが第1波の砕波による乱れた場を伝播するため運動量は減衰する。ケース1の場合は第2波の波高が小さく顕著ではないが、BIP 点をすぎたあたりから第1波に追いつくことにより運動量を獲得するため減衰率が少くなる傾向がみ

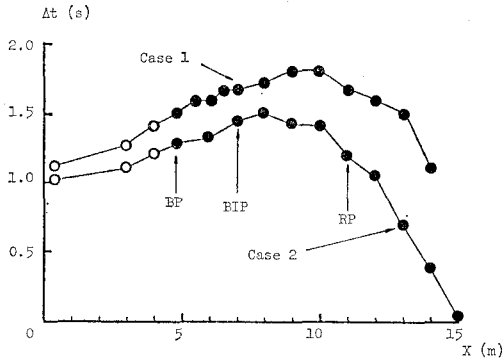


図-8 波峰到達時間の差

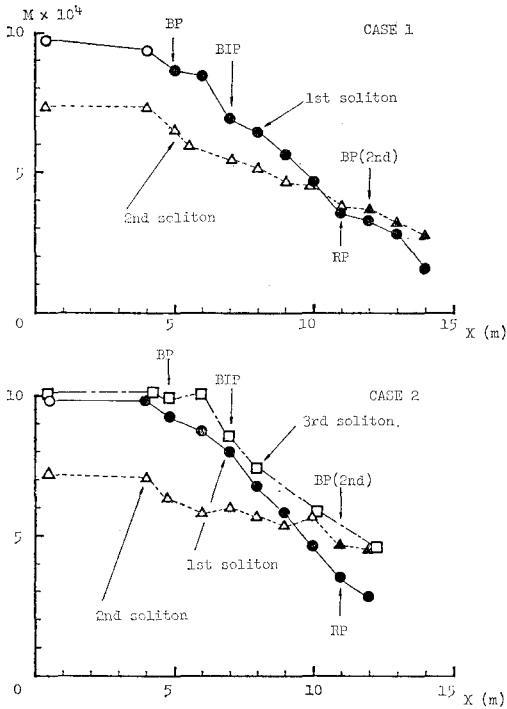


図-9 運動量の変化

られる。

ケース2の第3波に関してはソリトンになりきれなかったさざなみの成分を含んだ形で運動量が計算されているため第1波のものより大きくなっている。

(2) エネルギーの変化

各分裂波ごとのエネルギー流束を

$$E = \iint_{-h}^H u \left\{ \frac{\rho}{2} (u^2 + w^2) + p + \rho g z \right\} dz dt \quad \dots (4)$$

と定義する。ここで、 w は鉛直方向流速、 p は圧力である。

図-10 にケース1の場合のエネルギー変化を示す。斜面法先から第1波の砕波点までは運動量と同様にエネルギーも保存されている。運動エネルギーと位置エネルギー

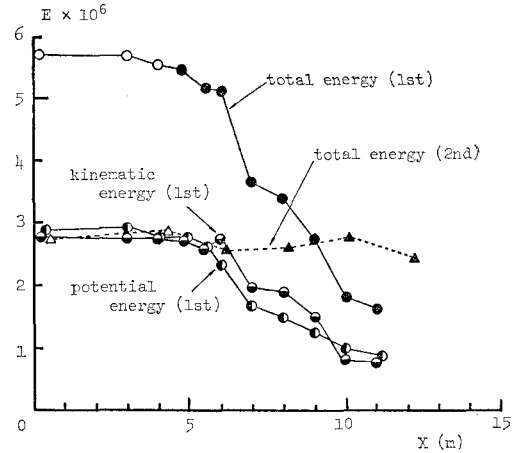


図-10 エネルギーの変化 (その1)

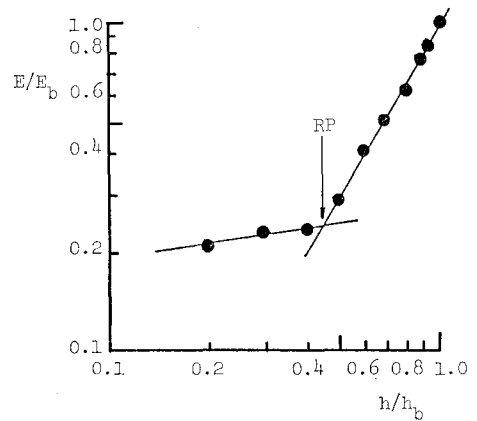


図-11 エネルギーの変化 (その2)

ギーの比はほぼ1である。砕波後は運動、位置エネルギーは共に減少するが、特に波峰部が崩れるためか位置エネルギーの減少する割合が大きく、運動エネルギーと位置エネルギーの比は約1.3程度となる。

図-11 は全エネルギーと水深との関係を調べたものである。波高変化では BIP 点及び RP 点を境にして直線が折れ曲がったが、エネルギーに関しては RP 点で分かれ2本の直線で表わされる。砕波点から RP 点のエネルギー逸散は水深の1.7乗に比例している。

第2波のエネルギーは運動量と同様に第1波の砕波点をすぎたあたりから波砕による乱れのため減少する。その後、第1波に追いつくことにより多少のエネルギー獲得がある。

5. 陸上遡上高

孤立波の陸上遡上高に関しては多くの実験が行なわれている。岸ら⁶⁾はそれらを整理して次式を提案している。

$$\frac{R}{h_0} = K(s) \left(\frac{H}{h_0} \right)^{a(s)} \quad \dots (5)$$

ここで、 R は遡上高、 h_0 は斜面法先水深、 H は入射波高、 $K(s)$ 、 $\alpha(s)$ は斜面勾配 S の関数でグラフで与えられている。本実験の斜面勾配 $S=1/75$ に対して、 $K=0.36$ 、 $\alpha=0.6$ が読みとれる。本実験でも孤立波一波が入射する場合には、式 (5) で良く近似されるが、後続のソリトンが追いつく場合にはこれより高くなることがわかった。

そこで、実験ケースを増やし遡上中の第 1 波に後続波が追いつく場合の陸上遡上高に関して検討を行なうことにした。その結果、第 2 波が追いついて最高波になる場合には相対遡上高 R/H は一波だけのときの約 1.7 倍、また第 3 波が最高波となるときは約 2.4 倍と高くなることがわかった。そこで、第 2 波以後の入射波パラメタを含む予測式として、式 (5) に似た (6) 式を考え、図-12 に実験値との比較を示した。

$$\frac{R}{h_0} = K(s) \sum_{i=1}^N \left(\frac{H_i}{h_0} \right)^{\alpha(s)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 H_i は斜面法先での第 i 番目のソリトン波高であり、 $N=1, 2, 3$ はおのおの第 1, 第 2, 第 3 波が最高波となることを示し、図中の黒丸、黒三角、黒四角印に対応している。予測値との相対誤差は 10% 以内におさまっている。式 (6) は斜面法先に入射するソリトン波列の互々が単独に入射する場合の総和の形をとっているが、その物理的機構については今後の検討課題である。

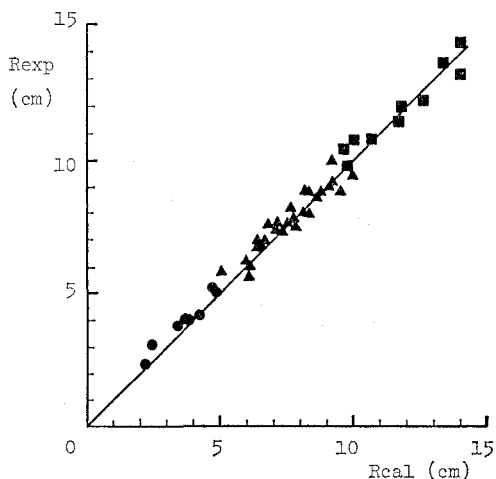


図-12 ソリトン波列の遡上高

従来、波連が入射する場合に戻り流れの影響により遡上高が減少することはよく指摘されているが、波連の位相関係によっては遡上高が相加的に増大することがあることをここで指摘したい。

6. おわりに

以上得られた主な結論を列挙すると次のとおりである。

- 1) 第 1 波が碎波して段波状になった上を進む第 2 波は第 1 波の set-up 効果により岸近くまで非碎波状態を保ち碎波時の波高水深比は大きくなる。
- 2) 第 1 波の運動量は碎波前はほぼ一定に保たれるが、碎波後は急激に減少する。第 2 波に関しては、碎波前であっても第 1 波の乱れの間を進むため運動量は減少する。
- 3) 第 1 波のエネルギーは碎波後、連行気泡の消滅点までは急激に減少するが、それより岸側では減少率は小さくなる。第 2 波に関しては碎波前であっても運動量と同様に第 1 波の碎波点をすぎたあたりから減少する。
- 4) 陸上遡上中に後続波が追いつく本実験の場合、陸上遡上高は式 (6) でよく近似され、相加的に遡上高は高くなる。

本研究を行なうにあたり東北大学工学部岩崎敏夫名誉教授、首藤伸夫教授より多くの助言を賜った。また、この研究の一部は文部省科学研究費（代表 首藤伸夫教授）によって行なわれた。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Zabusky, N. J.: Solitons and bound states of the time-independent Schrödinger equation, *Phys. Review*, Vol. 168, 1969.
- 2) 室田 明・岩田好一郎: 段波の変形に関する研究, *土木学会論文集*, Vol. 160, 1968.
- 3) 岩崎敏夫・真野 明・小杉達郎: 孤立性段波のソリトン分裂に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.
- 4) Camfield, F. E. and R. L. Street: Shoaling of solitary waves on small slopes, *Proc. ASCE*, WW 1, 1969.
- 5) 花安繁郎・佐伯 浩・星崎 晃: 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.
- 6) Kishi, T. and H. Saeki: The shoaling, breaking and run-up of the solitary wave on impermeable rough slopes, *Proc. 10th Conf. Coastal Eng.*, 1966.