

ソリトンモードに基づく海岸波浪の造波システム

安田孝志*・篠田成郎**・服部 武***・向 勝巳****

1. 緒 言

近年、各種の数値シミュレーション手法の開発が急速に進んできたが、海岸構造物の水理特性や安定性の解明において水理模型実験の果たす役割は依然として大きい。こうした模型実験においては、所定の海岸波浪を水槽内に再現することがまず要求されるが、実際には、Biesel-Suquet の線形造波理論を基に所定のスペクトルの再現を目標とした造波が行われているため、顕著な非線形性を持つ海岸波浪の造波は困難となっている。

本研究では、まず、造波の対象となる海岸波浪を不規則ソリトン列として扱うことにより、海岸波浪の造波問題をソリトン列の造波問題として解き、造波に必要な造波板の変位を理論的に求める。ついで、造波信号に忠実な造波板の運動を可能とする2-ウェイモード方式の造波装置を試作し、これによって、従来の手法では困難であった所定の波形を持つ海岸波浪の造波が可能となり、所定の波高分布や時系列特性を持つ歪度の大きい海岸波浪を容易に造波できるようになることを明らかにする。

2. 造波理論

非回転流体場での非線形不規則波浪の造波問題を流体力学的に取り扱うことにし、座標および造波板を図-1のように定めれば、このときの基礎方程式および境界条件は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi &= 0, \\ \eta_t + \eta_x \phi_x - \phi_z &= 0 \quad |_{z=h+\eta}, \\ \phi_t + (\phi_x^2 + \phi_z^2)/2 + g\eta &= 0 \quad |_{z=h+\eta}, \\ \phi_z &= 0 \quad |_{z=0}, \\ dX/dt &= \phi_x \quad |_{x=X} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ϕ は速度ポテンシャル、 η は平均水面周りの水位変動、 g は重力加速度、 h は平均水位および X は造波板の変位を表す。ここで、波動の場が KdV 方程式に支

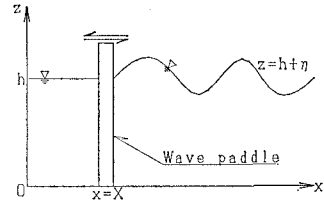


図-1 座標系と記号

配されているとすれば、式(1)はその最低次において次式のように書き換えられる。

$$\eta_\tau + (3/2)\epsilon \eta \eta_\xi + (1/6)\eta_{\xi\xi\xi} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$dX^*/dt^* = \eta|_{x^*=X^*} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \epsilon^{1/2}(x^* - t^*), \tau = \epsilon^{3/2}t^*, x^* = x/h, \\ X^* &= X/h, t^* = t\sqrt{g/h}, \epsilon = (h/L)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

である。造波すべき波は式(2)を満足する不規則ソリトン列であるから、最終的に式(1)を解く問題は次式の新線形常微分方程式を解く問題に帰着される。

$$dX^*/dt^* = \eta(X^*, t^*) \dots\dots\dots (5)$$

式(5)は造波板の変位 X^* に関する非線形常微分方程式となり、解法に若干の工夫を要する。このため、 $\Delta X^* \ll 1$ の領域において式(5)を次式のように展開する。

$$\frac{dX^*}{dt^*} = \eta(0, t^*) + \Delta X^* \frac{\partial \eta}{\partial t^*} \Big|_{X^*=0} + O(\Delta X^{*2}) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\Delta X^* = X^*(t_{n+1}^*) - X^*(t_n^*), t_n^* \leq t^* < t_{n+1}^* \dots\dots\dots (7)$$

であり、式(6)が $O(\Delta X^*)$ において十分な精度を持つように t^* のステップを細かくし、 $t^* = t_{n+1}^*$ になれば、 t_{n+1}^* を t_n^* と置き換え、同様な計算を行う。これより、 $t^*=0$ の初期条件を満足するように $X^*(t^*)$ を求めると、次式ようになる。

$$\begin{aligned} X^*(t^*) &= X^*(t_n^*) \\ &+ \exp\left(-\sum_{j=1}^n \frac{\eta_j}{c_j}\right) \int_{t_n^*}^{t^*} \sum_{j=1}^N \eta_j \end{aligned}$$

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 工修 伊勢屋機械製作所

$$\exp\left(-\sum_{j=1}^N \frac{\eta_j}{c_j}\right) dt^* \dots\dots\dots (8)$$

ここに,

$$\eta_j = A_j \operatorname{sech}^2 \left[\frac{\sqrt{3} A_j}{2} \{X^* - c_j(t^* - \delta_j)\} \right] - \frac{\eta_0}{N} \dots\dots\dots (9)$$

であり, A_j : 無次元化されたソリトンの振幅, c_j : ソリトンの無次元伝播速度, δ_j : 各ソリトンの位相定数, η_0 : 波谷面と平均水面との水位差, N : 造波対象時間中のソリトンの個数である.

式(8)によって所定のソリトン列を造波するのに必要な造波板の変位を計算できるため, デジタルシミュレーションや現地観測によって得られた波形データから振幅 $\{A_j\}$ および位相定数 $\{\delta_j\}$ を求め, 式(8)および(9)に与えれば, 造波板の変位信号を得ることができる.

3. 海岸波浪発生装置のシステム構成

期待波形とこれを造波に必要な造波板の変位 X^* の関係を図-2 に示す. 質量輸送を伴う非線形波列の造波ということもあり, X^* は時間とともに永年的に増大し, あるトレンドの上に短周期の変動成分が重畳したものと見ることができる. このため, 不規則ソリトン列の造波には, 個々のソリトンの造波に必要な高速応答性と同時に変位の永年増大に対応できる長いストロークを併せ持つ造波装置が必要となることがわかる. しかしながら, 造波板のストロークが高々数十 cm の従来の造波装置では, 造波できる波の数が限られ, また, 単にストロークを長くしても, 機械系の慣性を増大させて高周波

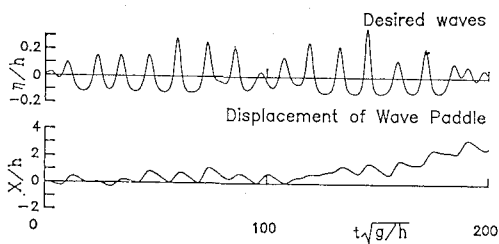


図-2 期待波形と造波板変位

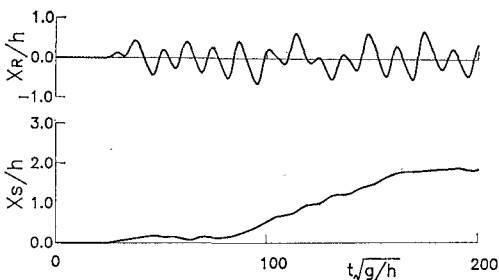


図-3 高速および低速駆動部への造波信号

側の応答性を低下させることになる. そこで, 造波板の変位を長いストロークの低周波成分 X_S と短いストロークの高周波成分 X_R に分離する一方, 最大変位 2 m および最大速度 7.3 cm/s の低速駆動部と最大変位 30 cm および最大速度 60 cm/s の高速駆動部からなる 2-ウェイモード方式の不規則造波装置を考案・試作し, 低速および高速駆動部への造波信号として X_S および X_R を与えることにした.

図-3 は, 図-2 で示した造波板変位の移動平均成分を低速駆動部への造波変位 X_S とし, ついで, X から X_S の成分を除去した高周波成分を高速駆動部への造波板変位 X_R としてそれぞれ分離した造波信号を表したものである. このように, 変位 X を X_S および X_R に分離することによって, 2 m もの長いストロークを有しながら, 従来のピストン型造波装置と同様の高速応答性の確保が可能となっている.

図-4 は, 岐阜大学工学部土木工学科水環境工学講座実験棟に設置されているコンクリート製の 2 次元波浪水槽 (1 m × 1 m × 54 m) の概略を示したものである. 水槽の端部には上述の 2-ウェイモード方式の造波装置が設置されており, もう一方の端部には反射率 5% 以下の消波工が設けられている. この造波装置では, ロータリーアクチュエータによって造波板の高速駆動を行う一方, 高速駆動部の本体をシリンダーアクチュエータによって水平方向に低速駆動し, 2 m の造波板の変位を可能にしている.

4. 一様ソリトン列の造波特性

このシステムでは, ソリトン列として表示できる波列であれば, 振幅 $\{A_j\}$ および位相定数 $\{\delta_j\}$ を与えることによって規則波と不規則波の区別なく造波できる. そこで, まず, 各種の一様ソリトン列の造波実験を行い, 規則波の場合の造波特性について検討する.

(1) 実験条件および結果

表-1 は一様ソリトン列に関する実験条件およびそれらのケース番号を表す. 表中の D は, ソリトンの波峰間隔を表し, クノイド波の周期に相当する. なお, 表中の数値は全て無次元量を表す. また, 予備実験の結果, 実験水深 $h < 10$ cm の場合には, 波の伝播に伴うエネルギー減衰が顕著となり, $h \geq 15$ cm のときには, その傾

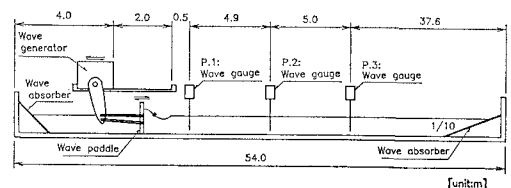


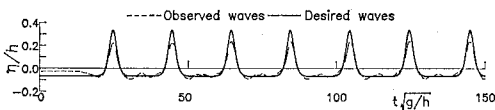
図-4 実験水槽の概略

表-1 一様ソリトン列に関する実験条件とケース番号

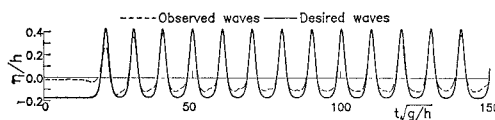
Case No.	Amplitude, A	Period, D
N 11	0.1	10.0
N 21	0.2	10.0
N 31	0.3	10.0
N 41	0.4	10.0
N 51	0.5	10.0
N 61	0.6	10.0
N 12	0.1	20.0
N 22	0.2	20.0
N 32	0.3	20.0
N 42	0.4	20.0
N 52	0.5	20.0
N 62	0.6	20.0
N 33	0.3	30.0
N 43	0.4	30.0
N 53	0.5	30.0

向が小さくかつ一定であることが明らかとなったため、以下の実験では水深を全て 15 cm に設定した。

図-5 は一様ソリトン列に関する期待波形と測点 P. 1 における実測波形を比較したものであり、いずれのケースにも若干の波形の減衰が見られる。また、図-6 は一様ソリトン列に関する期待振幅 A と測点 P. 1 における実測波形をソリトン分解して得られる実測振幅 $\hat{A}$ の平均値の関係を示したものである。この結果からも、実測振幅には若干の減衰が存在し、ソリトン間隔（周期）の大きいものほどその傾向が顕著となることがわかる。しかしながら、波形そのものはソリトン列としての波形とほぼ一致し、その伝播速度も実測振幅から求められるソリトンの理論波速にはほぼ一致することが確認された。このため、実用的な観点から、図-6 に示した振幅減衰を予め見越して振幅の補正を行い、これを用いて造波信号を計算することにする。図中の曲線は、現地波浪における平均的な無次元周期として 12.0 を想定し、非線形回帰式



(a) ケース番号 N 42



(b) ケース番号 N 61

図-5 一様ソリトン列に関する期待波形と実測波形との比較

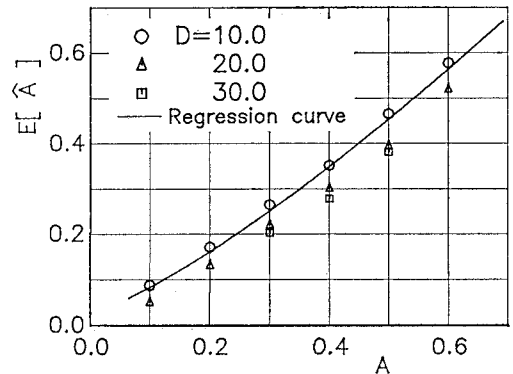


図-6 一様ソリトン列に関する期待振幅と実測振幅との関係

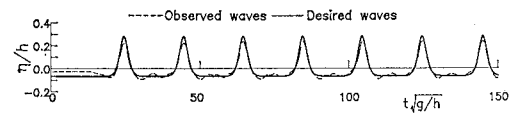
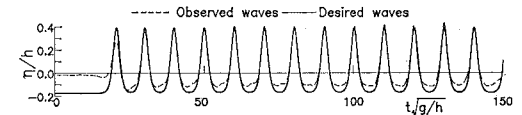
(a) $A=0.35$, $D=20.0$ (b) $A=0.56$, $D=10.0$

図-7 振幅補正を行った場合の一様ソリトン列に関する期待波形と実測波形との比較

$$\hat{A} = 1.024 A^{1.265} + 0.027 \quad \dots\dots\dots (10)$$

によって求めたものであり、振幅として $\hat{A}$ の波を造波するには、これに対応した振幅 A を造波信号として与えればよいことになる。

図-7 は、このように振幅補正を行った場合の一様ソリトン列に関する期待波形と測点 P. 1 での実測波形との比較を示したものである。これより、波谷部分に若干の相違が見られるものの、ほぼ期待通りのソリトン列が造波されていることが確認できる。このため、以下で行うソリトン列の造波においては、式(10)に基づく振幅補正を施すことにする。

(2) 造波限界

図-8 は、一様ソリトン列について、次式で定義される Ursell 数 Ur と波形の誤差 ε_η との関係を示す。

$$Ur = E[AD^2] \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\varepsilon_\eta = \sqrt{\int_0^T \{\hat{\eta}(t) - \eta(t)\}^2 dt / \int_0^T \eta^2(t) dt} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $E[\cdot]$: 期待値演算、 T : 造波時間、 η および $\hat{\eta}$: それぞれ期待および実測波形を表す。式(10)の振幅補正の実験式がソリトン間隔 $D=12.0$ を対象にして算

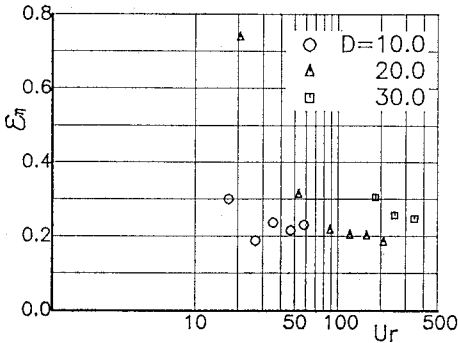


図-8 Ursell 数と波形の誤差との関係

出されているため、 $D=12.0$ を大きくはずれるケースについては、波形の誤差が大きくなる傾向がある。しかしながら、全体的には、Ursell 数の増大に伴い、誤差は減少する傾向があり、本造波システムは、非線形性の卓越した海岸波浪に適していると判断できる。一方、 $Ur < 15$ においては、極度に誤差が大きく、 $Ur=15$ がこの造波方式の適用限度と考えられる。これについては、次のようにも考えられる。すなわち、クノイド波を互いに独立な一様ソリトン列と扱えるのは、1 個の波峰が1 個のソリトンのみで表示できる場合であり、このとき、完全楕円積分の母数 k の値は 0.98 以上となる(土屋ら, 1981)。

図-9 は Ursell 数と母数との関係を示したものであり、 $k \geq 0.98$ となるには、 $Ur \geq 40$ であることが必要となっている。従って、 $Ur \leq 15$ では $k \approx 0.83$ となり、クノイド波の漸近ソリトン列近似自体が困難となるため、ソリトン列としての造波も限界となってくるものと考えられる。

図-10 は、図-8 と同じ波について、Ursell 数と次式で定義される振幅の誤差 ϵ_A との関係を示す。

$$\epsilon_A = \sqrt{E[(\hat{A}-A)^2]/E[A^2]} \dots \dots \dots (13)$$

これからも、 $Ur < 15$ のクノイド波に対して一様ソリトン列としての造波が可能ながわかる。

5. 不規則ソリトン列の造波実験

ここでは、様々な統計的特性を持つ不規則波形の再現性を検討すると同時に、本造波システムの適用性を検討するために、表-2 に示す5 ケースの条件に対して造波実験を行うことにする。なお、ケース番号 R 01~R 03 は大湊海岸において観測された現地波浪を対象としたものであり、ケース番号 R 04 および R 05 は篠田ら(1990)による不規則ソリトン列のデジタルシミュレーション手法に基づき作成された不規則波形である。また、表中の μ_A および μ_D は、それぞれ期待波形としてのソリトン列の振幅および間隔の平均を表す。

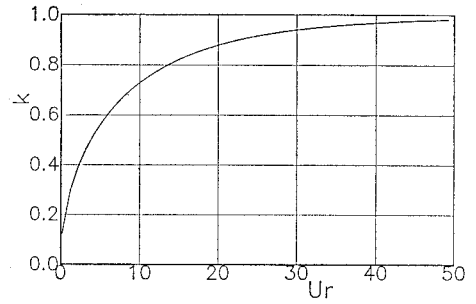


図-9 Ursell 数とクノイド波理論における完全楕円積分の母数との関係

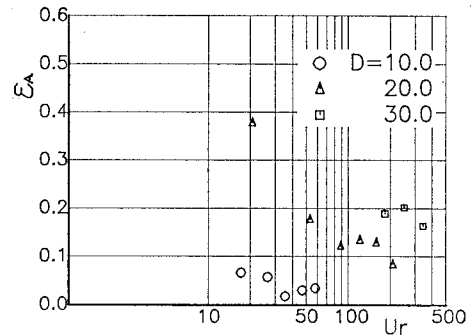
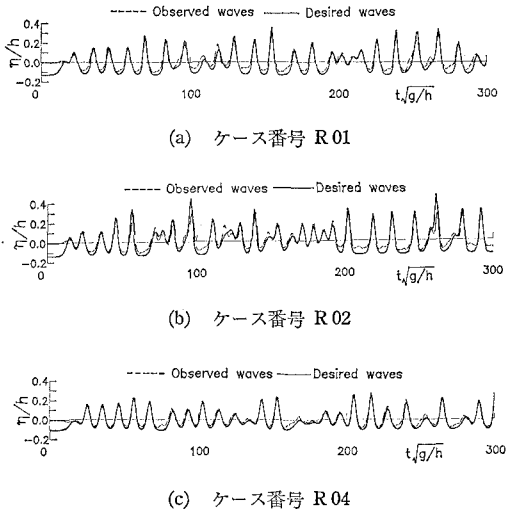


図-10 Ursell 数と振幅の誤差との関係

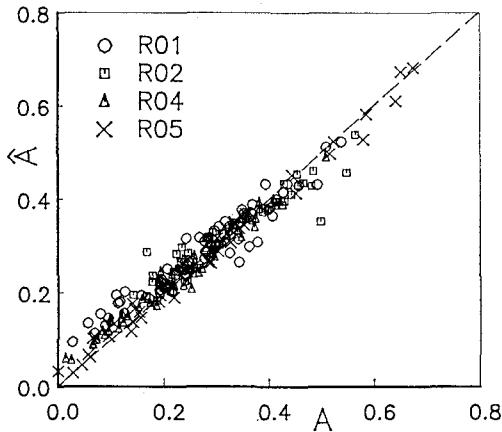
表-2 不規則ソリトン列に関する実験条件とケース番号

Case No.	μ_A	μ_D	Ur	Skewness
R 01	0.218	9.153	23.95	1.136
R 02	0.321	10.246	40.44	0.760
R 03	0.258	9.277	25.53	0.820
R 04	0.223	10.876	27.65	1.197
R 05	0.275	10.645	32.36	1.798

図-11 は、測点 P. 1 における不規則ソリトン列の期待波形と実測波形とを比較したものである。なお、現地波浪の波形の再現については、観測波形のソリトン合成波形を基に測点 P. 1 での期待波形を求め、これと実測波形との比較を行っており、測点 P. 1 の位置の関係で観測波形と実測波形の位相がずれるため、観測波形とは直接比較していない。しかし、いずれの実測波形も期待波形と位相まで含めてほぼ一致しており、期待通りの造波が行われていることが確認できる。また、ケース番号 R 01 および R 02 の現地波浪の波形と比較してみても、微小な擾乱を除けば、現地観測波形がそのまま水槽内に再現されていると言える。ケース番号 R 01 および R 02 に対応した現地波浪は、それぞれ Ursell 数 $Ur=24$ および 40 で、波形の歪度が 1.136 および 0.760 の非線形性の強い波浪であり、特に、後者については、碎波率が60



図—11 不規則ソリトン列に関する期待伝播波形と実測波形との比較



図—12 不規則ソリトン列に関する期待振幅と実測振幅との関係

%である。Biesel-Suquet の理論に代表される従来の線形造波理論では、 $Ur \geq 10$ になると造波効率が低下するだけでなく、二次波峯の発生などもあり、所定の波列の造波が困難であることを考えると、図—11 の結果は本造波システムの優れた有用性を示すものと言える。

図—12 は、不規則ソリトン列の期待振幅 A と測点 P. 1 における実測波形をソリトン分解して得られる実測振幅 $\hat{A}$ との関係を示したものである。多少のばらつきは認められるものの、ほぼ $\hat{A} = A$ の関係を満足しており、期待通りの振幅を持つソリトン列が造波されていることが確認できる。このことは、本造波システムにより、比較的微小な振幅を持つソリトンから砕波直前の振幅を有するものまで、広範囲なソリトン列、すなわち、海岸波浪の造波が可能であることを示している。

6. 結 語

以上、造波の対象となる不規則波を不規則ソリトン列として扱うことにより、非線形不規則波の造波問題をソリトン列の造波問題として扱う造波理論を提案した。また、この理論に基づき、造波信号に忠実な造波板の運動を可能とする 2-ウェイモード方式の造波装置を新たに考案・作成し、これによって、従来の Biesel-Suquet の理論に基づく手法ではほとんど不可能であった顕著な非線形性を持つ海岸波浪の造波が、砕波直前の波まで含めて、正確にかつ容易に実現できることを示した。

最後に、本研究は財団法人鹿島学術振興財団研究助成金による成果であることを付記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 篠田成郎・安田孝志・石原貴司・土屋義人 (1990): 不規則ソリトン列による海岸波浪の統計理論とその応用, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 126~130.
- 土屋義人・安田孝志・武山保徳 (1981): 相互干渉を無視した場合のソリトンスペクトルの理論, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 89~93.