

ソリトンモードに基づく海岸波浪の造波システムについて

岐阜大学 正員 安田孝志・篠田成郎 学生員 服部 武・川島知佳夫

1. 緒言 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大きく、この場合、所定の海岸波浪を再現できる造波システムが必要となる。著者らは海岸波浪の造波問題を不規則ソリトン列の造波問題として解き、所定の海岸波浪を水槽内に造波することを可能とするシステムを提案した¹⁾。本研究では、この造波システムに改良を加えることによりその適用領域を広げるとともに、この方法による造波の限界を明らかにする。

2. 実験装置 実験は岐阜大学工学部土木工学科水環境工学講座実験棟の1m×1m×54mの1次元波浪水槽(図-1)で行われた。この水槽には、2mの長いストロークを持つ低速駆動部と最大速度60cm/sの高速駆動部から成る2-ウェイモード方式の造波装置¹⁾が設置されている。また、水位変動の計測には6台の容量式波高計を用い、それらの測点を造波板前面から順にP.1, P.2, ..., P.6とする。

3. 造波理論 水底面に沿ってx軸を定め、造波板変位を $X(t)$ 、水深方向に平均化された水平水粒子速度を $\bar{u}(x, t)$ とすれば、造波板前面において次式が成り立つ。

$$dX/dt = \bar{u}(X, t) \tag{1}$$

著者ら¹⁾は最低次において波形 η と水平水粒子速度 u とが一致することを利用して平均流速 \bar{u} を与え、式(1)を解いていたが、鉛直方向の流速分布を考慮していないことから、造波板変位が若干過大に評価されることになっていた。そこでここでは、Goringら²⁾の方法と同様に、造波板の駆動に伴う水塊の移動に対して連続条件を適用して求められる次式の平均流速 \bar{u} を用いることにする。

$$\bar{u}(x, t) = \sum_i^N c_i \eta_i(x, t) / (1 + \eta(x, t)), \quad \eta(x, t) = \sum_i^N A_i \operatorname{sech}^2 \frac{\sqrt{3}A_i}{2} (x - c_i + \delta_i) - \eta_0 \tag{2}$$

ここに、 A_i :ソリトンの振幅、 δ_i :位相定数および $c_i (= 1 + A_i/2 - 3\eta_0/2)$:波速である。ここで、 n 番目の時間ステップ t_n における造波板位置 X_n からの変位量を ξ とし、微小時間 dt の間に $d\xi$ だけ X が変化するとすれば、求めたい造波板変位 $X(t)$ は次式で表される。

$$X(t) = X_n + \xi(t), \quad t_n \leq t < t_{n+1} \tag{3}$$

また、これを式(1)に代入し、式(1)を ξ に関する方程式として次式のように書き換え、これを直接数値積分する。

$$\xi(t) = \exp \left[\int \frac{\partial \bar{u}(X, t)}{\partial X} \Big|_{x=X_n} dt \right] \left\{ \int \bar{u}(X_n, t) \exp \left[- \int \frac{\partial \bar{u}(X, t_1)}{\partial X} \Big|_{x=X_n} dt_1 \right] dt \right\} \tag{4}$$

図-2は期待波形 η とこれを造波するに必要な造波板変位 X を水深 h で無次元化して示したものである。 $\bar{u} = \eta$ による結果よりも式(2)の方が長周期の変動が小さく、造波装置の低速駆動部に対する負荷を最小限に抑えられることがわかる。また、造波時間は主に低速駆動部の長さ依存するため、式(2)の \bar{u} の方が長時間の造波が可能となる。

4. ソリトン列の造波特性 一様なソリトンの連なりが造波できれば不規則ソリトン列も造波可能であることがすでに明らかとなっている¹⁾ので、ここでは、7種類の振幅(波高)および9種類のソリトン間隔(周期)の合計63ケースの一様なソリトン列に対する造波実験を水深15cmで行った。なお、水深の影響を検討するために、数ケースに対して水深を30cmにして同様な実験も実施した。図-3は造波信号計算時に与えた振幅(入力振幅) \tilde{A} と実測振幅 \hat{A} との関係を

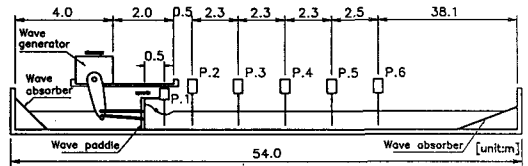


図-1 実験水槽の概略

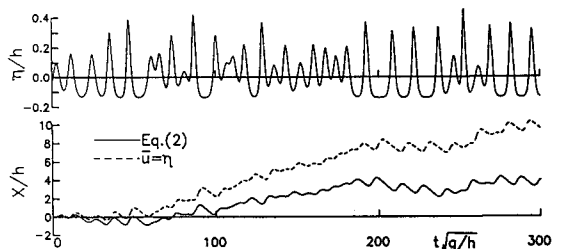


図-2 期待波形と造波板変位

示したものの一例であり、●および▲印はそれぞれ水深15および30cmでの測点 P.3からP.5の平均を表す。また、図中の破線は $\hat{A} = \tilde{A}$ を、実曲線は水深15cmの全ケースに対する回帰分析から求められた次式 $A = \alpha \tilde{A}^{1.18} + 0.0311$ の非線形回帰式を表す。

$$A = \alpha \tilde{A}^{1.18} + 0.0311, \quad \alpha = -0.00673D + 1.06 \quad (5)$$

ここに、 D : ソリトン間隔である。なお、 $\tilde{A} = 0.6$ および 0.7 のケースでは造波直後に砕波が発生したため、回帰分析のデータとしては扱っていない。

この図から、ほぼ $\hat{A} = \tilde{A}$ の関係を有するものの、厳密には式(5)に基づく振幅の補正が必要となることわかる。図-4は実測振幅 \hat{A} と式(5)により補正された振幅(期待振幅) A との関係を示したものであり、図中の破線は $A = \hat{A}$ を表す。これより、水深15および30cmの両ケースとも A と \hat{A} との対応は良好であり、式(5)を水深の影響を受けない一般的な補正式として扱えると判断できる。図-5は期待振幅 A とソリトン間隔 D との組み合わせにおける波形の再現誤差 ϵ_η の大きさを段階的に示したものであり、図中の●および○印はそれぞれ非砕波および砕波を表す。また、実線および破線で $A^2D = 0.4$ および Ursell数 $Ur (= AD^2) = 15$ の関係を参考までに示す(これに関しては後述する)。これより、非砕波のケースでは A および D の値が小さくなるとともに波形誤差が大きくなっていることがわかる。図-6は非線形パラメータである Ursell数と波形誤差 ϵ_η との関係を示したものである。この図から、 $Ur = 15 \sim 40$ 付近が造波限界と考えられるが、データのばらつきが大きいため明確な限界を示すのは困難と思われる。そこで、造波限界を表す指標として新たに A^2D を導入し、このパラメータと波形誤差 ϵ_η との関係を図-7に示す。この図より、図-6に比べデータのばらつきも少なく、 A^2D が造波限界に関する良好なパラメータと成り得ることがわかる。図-7において、 $A^2D > 0.4$ が造波の適用領域と考えられる。また、前述の図-5を用いてこの限界を考えれば、 $A^2D = 0.4$ は実線で表されるような曲線となることわかる。

5. 結 語 以上、著者らが提案している所定の海岸波浪を造波するためのシステムに対して、理論面から改良を加えると同時に、詳細な実験結果からその造波限界を明らかにすることができた。

参考文献 1) 畑・藤・藤・向: ソリトンモードに基づく海岸波浪の造波システム, 海岸工学論文集, 第37巻, 1990, pp. 71-75. 2) Goring, D. & F. Raichlen: The generation of long waves in the laboratory, ICCE, 1980, pp. 763-783.

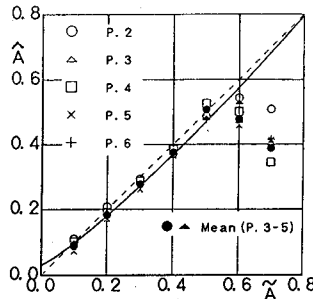


図-3 入力振幅 \tilde{A} と実測振幅 \hat{A} との関係 ($D=10.0$)

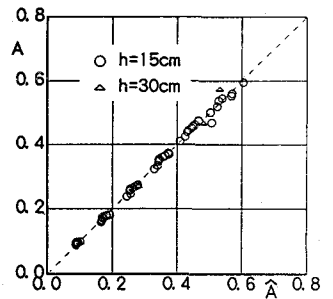


図-4 実測振幅 \hat{A} と補正振幅(期待振幅) A との関係

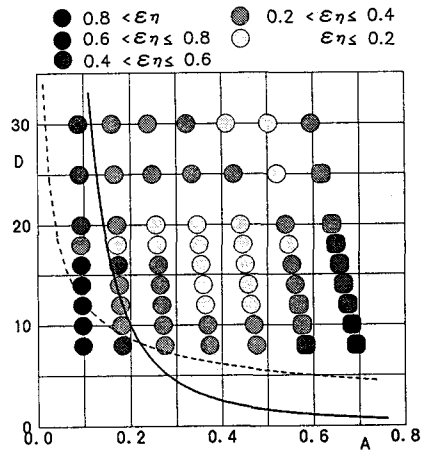


図-5 期待振幅 A およびソリトン間隔 D と波形誤差 ϵ_η との関係

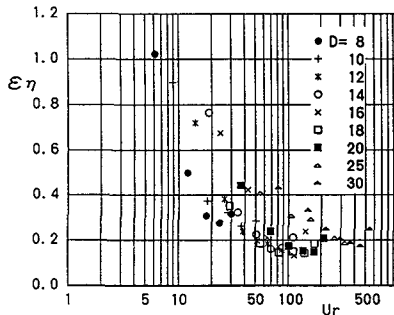


図-6 Ursell数 Ur と波形誤差 ϵ_η との関係

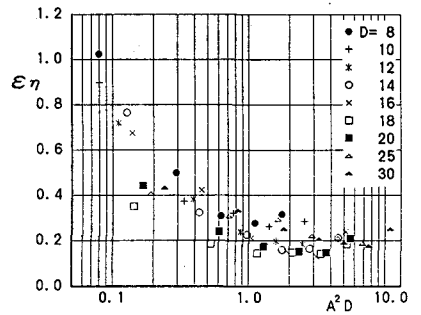


図-7 造波限界パラメータ A^2D と波形誤差 ϵ_η との関係