

水面波形制御方式による無反射造波機の 不規則波実験への適用性

平口 博丸*・鹿島 遼一*・川口 隆**

1. はじめに

従来の造波機は造波板の位置のみを制御することにより規則波や不規則波を発生させる造波板位置制御方式が用いられている。反射率の大きな構造物の実験を2次元水路内で行う場合、従来の造波方式では構造物からの反射波が造波板で再反射されるのを防ぎ得ず、所定の波を長時間に渡り安定して発生させることは不可能であった。

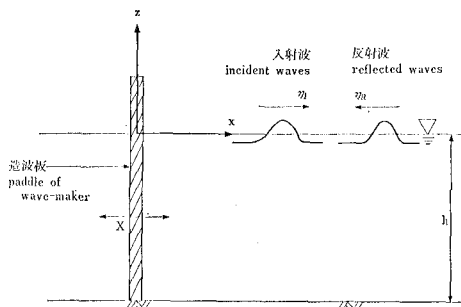
この問題を解決する有力な方法として、構造物からの反射波を造波板の動きで吸収しつつ所定の波を発生させる方法が Salter¹⁾ により考案された。このような無反射型造波機を実現するためには、反射波や発生波に関する何らかの情報が必要となる。谷本ら²⁾、木下^{3),4)} は造波機の推力を制御信号に用いる方式について、川口⁵⁾ は造波板前面で検出される水面波形を制御信号に用いる⁶⁾ 水面波形制御方式について各々検討している。しかし、いずれの研究も理論的検討あるいは規則波を対象とした実験的検討が行われているのみであり、工学的に重要な不規則波実験に対する無反射型造波機の適用性については殆ど検討されていない。

本研究は、水面波形制御方式による無反射型造波機を取り上げ、この造波機の基本原理解を基にして不規則波実験への適用方法を示すと共に構造物を対象とした水理模型実験を行い、本造波機の不規則波実験への適用性を従来の造波板位置制御方式との比較から検討し、その有効性を示したものである⁷⁾。

2. 造波機の制御理論

(1) 造波理論

図—1 のような2次元水路を考える。x 軸を静水面上の水路方向に z 軸を鉛直上向きに取り、 $x=0$ の位置にピストン型造波機の造波板が、 $z=-h$ に水路底が有るものとする。流体を非粘性・非圧縮の完全流体と仮定すれば複素速度ポテンシャル $\phi(x, z, t)$ が定義でき、水深一定の水路内での造波問題は以下のように定式化でき



図—1 2次元水路と座標系

る。基礎式は

$$\phi_{xx} + \phi_{zz} = 0; 0 \leq x < \infty, 0 \geq z \geq -h \quad (1)$$

で表され、境界条件は、

$$\phi_z = 0; z = -h \quad (2)$$

$$\phi_{tt} + g\phi_z = 0; z = 0 \quad (3)$$

$$\phi_x = X_t; x = 0 \quad (4)$$

$$|\phi| < \infty; x \rightarrow \infty \quad (5)$$

で表される。ここに、 x, z, t の添え字は微分を表し、 g は重力加速度、 X は造波板の複素変位である。ここで、造波板が振動数 σ で正弦運動するものとするれば、

$$X = \hat{X} \exp(i\sigma t) \quad (6)$$

ここに、 $\hat{X}$ は造波板の複素振幅、 i は虚数単位である。以下では、振動数 σ の規則波について考える。

造波板から十分離れた場所において、 x 軸の正方向に伝播する進行波を η_I 、 x 軸の負方向へ伝播する反射波を η_R とする。いま、 $\eta_R = 0$ とし η_I のみが存在するとすれば、式 (1)～(5) を満足する ϕ は解析的に求められる。このときの ϕ および X を ϕ_I 、 X_I としよう。逆に $\eta_I = 0$ とし η_R のみが存在するときの解を ϕ_R および X_R とおけば、 X_R は反射波 η_R を完全に吸収して再反射させないような造波板振幅を表すことになる。両者の解を重ね合わせると、反射波 η_R を吸収しつつ所定の進行波 η_I を発生させることができ、その時の造波板変位は、

$$X = (\hat{X}_I + \hat{X}_R) \exp(i\sigma t) \quad (7)$$

で与えられる。即ち、無反射型造波機の場合、式 (1)～(5) を満足するポテンシャル ϕ は次式で与えられる。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

** 三井造船システム技研(株) エンジニアリング事業部

$$\begin{aligned} \phi(x, y, z) &= \bar{A} \hat{X}_R F(z) \exp \{i(kx + \sigma t)\} - \bar{A} \hat{X}_I F(z) \\ &\quad \cdot \exp \{-i(kx - \sigma t)\} \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} i \bar{D}_n (\hat{X}_I + \hat{X}_R) G_n(z) \\ &\quad \cdot \exp(-k_n x + i \sigma t) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここに,

$$\bar{A} = \frac{4 \sinh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{D}_n = \frac{4 \sin^2 k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} \dots\dots\dots (10)$$

$$F(z) = \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \dots\dots\dots (11)$$

$$G_n(z) = \frac{g}{\sigma} \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots\dots (12)$$

であり、波数および固有数 $k_n (n=1, 2, \dots)$ は、

$$\sigma^2/g = k \tan kh = -k_n \tan k_n h \dots\dots\dots (13)$$

であたえられる。なお、 $\hat{X}_I$ や $\hat{X}_R$ の振幅を $\hat{X}_I$, $\hat{X}_R$ とすれば、入射波や反射波の振幅 a_I , a_R と各々以下の関係にある。

$$\bar{A} \hat{X}_R = a_R, \quad \bar{A} \hat{X}_I = a_I \dots\dots\dots (14)$$

(2) 水面波形制御方式

造波板前面 $x=0$ での水面波形を η_0 とすれば、

$$\begin{aligned} \eta_0 &= -(1/g) \phi_t|_{x=0, z=0} \\ &= -i \bar{A} \dot{X} + 2i \bar{A} \dot{X}_I \exp(i\sigma t) + \bar{D} \dot{X} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

と表され、ここに

$$\bar{D} = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{D}_n \dots\dots\dots (16)$$

である。式(15)の右辺第2項は、 $x=0$ における造波したい波形 η_I に相当している。式(7)を考慮して式(15)を変形すれば、

$$\dot{X} = \sigma/\bar{A} \{2\eta_I - (\eta_0 - \bar{D}X)\} \dots\dots\dots (17)$$

あるいは、上式の実数部より、

$$\dot{X} = \sigma/\bar{A} \{2\eta_I - (\eta_0 - \bar{D}X)\} \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。式(18)中の各項は何れも既知であるかまたは測定や制御が可能なものである。従って、式(18)を満足するように造波板を制御すれば、無反射型造波機が実現できることになる。

以上が水面波形制御方式による無反射型造波機の基本原理である。式(18)は入射波と反射波の周期が等しい規則波については問題無いが、種々の周波数の波から成る不規則波については工夫が必要となる。ピストン型造波機の前面水深を 31.5 cm および 70.0 cm として、 $\bar{A}$, $\bar{D}$ を計算すると図-2 のようになる。中・小型水路で実験対象とする不規則波は 1.5 Hz 以下の場合が多い事を考慮して、 $\sigma/\bar{A} = \text{一定}$ と近似しよう。一方、 $\bar{D}$ はこの周波数範囲内で $\sigma^3 \sim \sigma^4$ に比例して大きくなるため、ここでは以下のように近似した。即ち、

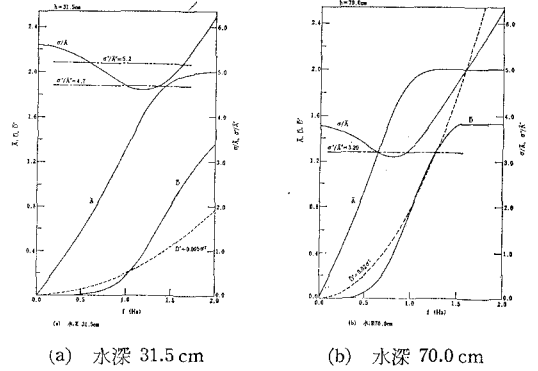


図-2 $\bar{A}$, $\bar{D}$ の関数形と近似式

$$\bar{D}X = -\bar{D}\dot{X}/\sigma^2 = \bar{D}\ddot{X} \dots\dots\dots (19)$$

の関係式を用いて $\bar{D} = -\bar{D}/\sigma^2 = \text{一定}$ と置けば、 $\bar{D}$ は σ^2 に比例するため $\bar{D} = \text{一定}$ とするよりも近似精度は向上する。この場合は、造波板位置 X の代わりに加速度 $\ddot{X}$ をフィードバック信号として用いることになる。

なお、本研究では $h=31.5$ cm とし、 $\sigma'/\bar{A}'=5.20$, $\bar{D}=0.005\sigma^2$ としている。

(3) 応答関数

造波機により波を発生させると言う問題は、造波機—水路系の応答問題と考える事ができる。即ち、波を造波すると言う事は、この系に信号 η_D を入力すると出力として η_I が得られる事であり、反射波を吸収するという事は、入力 η_R に対して出力 $\eta_I=0$ となる事である。従って無反射型造波とは、造波機入力信号 η_D と外部からの雑音 η_R と言う2つの入力に対して、系の出力が常に η_I と成る様に制御するものであると言える。

式(18)を時間に関してラプラス変換して造波機—水路系の伝達関数を求め、それを制御工学で言うブロック図にまとめると図-3 の様になる。図中の K_1 は変位・電圧変換関数、 K_8 は後述する補正関数、 $\sigma'/\bar{A}'$ は $\sigma/\bar{A}$ の電気模擬回路、 N/N_{REF} はモータ部制御系の伝達関数、 K_7 はモータの回転を造波板の直線運動に変換する関数である。同図より、造波機への入力信号 η_D に対する発生波 η_I の応答 G_D は、

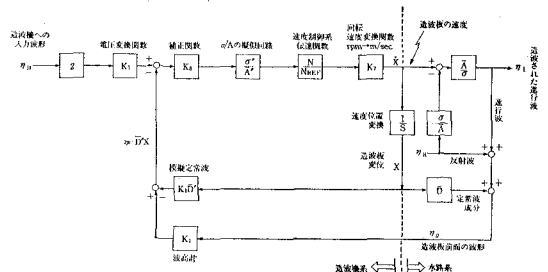


図-3 無反射型造波機のブロック線図

$$G_D = \eta_I / \eta_D$$

$$= \frac{2K_1K_7K_8 \frac{\sigma'}{\bar{A}'} \frac{A}{\sigma} \frac{N}{N_{REF}}}{1 + K_1K_7K_8 \frac{\sigma'}{\bar{A}'} \frac{N}{N_{REF}} \left(\frac{\bar{A}}{\sigma} + \frac{\bar{D} - \bar{D}'}{i\sigma} \right)} \dots\dots\dots (20)$$

と表され、また、反射波 η_R に対する発生波 η_I (再反射波) の応答 G_R は、

$$G_R = \eta_I / \eta_R = 1 - G_D \dots\dots\dots (21)$$

と表される事が分かる。なお、同図では造波板変位 X をフィードバックして $\bar{D}$ を用いているが、実際の造波機では $\bar{X}$ をフィードバックして式を (19) の $\bar{D}$ を用いている。

無反射型造波機においては G_R が重要となる。 $|G_R|$ が 0 に近いほど反射波の吸収性能が向上する。このためには、

- (I) 電気回路で模擬した値が実際の値に近いこと
 $\sigma' / \bar{A}' \div \sigma / \bar{A}, \bar{D}' \div \bar{D}$
- (II) モータの速度制御を含む造波機駆動部系が次式を満足すること

$$K_1K_7K_8N/N_{REF} \div 1$$

が必要となる。条件 (I) については前述した通りであり、(II) に関しては上式が満足される様に K_8 を決定した。 K_8 が補正関数と言うのはこの意味である。

3. 水理模型実験

(1) 不規則波の発生方法

不規則波を対象とした水理模型実験では、構造物に作用させたい不規則波の周波数スペクトルを目標とするスペクトル形に一致させるのが一般的である。そのためには、造波機—水路系の応答を考慮して、造波機への入力信号を作成しなければならない。

前述した応答関数 G_D, G_R が理想的な状態 ($G_D=1.0, G_R=0.0$) に有するものとすれば、 $\eta_D = \eta_I$ となる。従って、造波機への入力信号 V_D としては造波したい波 η_I を直接入力すればよい。即ち、

$$V_D = \eta_I K_1 (= \eta_D K_1) \dots\dots\dots (22)$$

ここに K_1 は電圧と長さの換算係数で有り、今回は $K_1 = 0.4 (\text{Vol/cm})$ に設定した。また、造波機設置水深 h_1 とスペクトル設定位置 (通常は模型の設定位置) の水深 h_2 が異なる場合、浅水変形により波高が変化する。この時の水路系の応答関数 $H_S(f)$ は両者の浅水係数比で評価できる。

以上より、目標スペクトルを $S_W(f)$ とすれば、造波機入力信号 V_D のスペクトル $S_V(f)$ は、

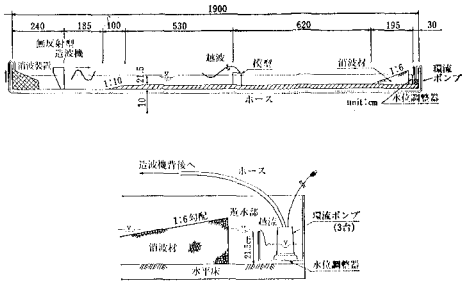
$$S_V(f) = S_W(f) \cdot |K_1|^2 / |H_S(f)|^2 \dots\dots\dots (23)$$

で与えられる。周波数毎に $S_V(f)$ の位相を与えてフーリエ成分を計算し、それを逆フーリエ変換すれば、造波

機入力信号時系列 $V_D(t)$ は簡単に求められる。

(2) 実験条件および実験方法

図—4 に示す長さ 19 m、幅 0.3 m、高さ 0.55 m の 2 次元小型水路に無反射型造波機を設置した。この造波機はピストン型で、ステンレス製の造波板の前面に容量式波高計が固定されている。また、スイッチの切り替えにより水面波形制御方式と従来の造波板位置制御方式の選択が可能となっている。



図—4 実験水路と水位調整装置

造波機付近の水深は 31.5 cm、それ以外の部分の水深は 21.5 cm の水平固定床とした。また、水路の両端には消波工を設け、水路端部からの反射波を極力低減させている。

実験は、(I) 造波機入力信号の電圧・周期を種々に変化させた時の規則波の造波特性 (II) 反射波が入射波に及ぼす影響を検討する無反射型造波機の性能試験の 2 種類行い、水面波形制御および造波板位置制御の両方式について比較・検討した。実験 (II) は不規則波を対象とし、水深 21.5 cm の水路中央部に天端高 24.0 cm の直立ケーソン模型が有る場合と無い場合について検討した。不規則波の目標スペクトルとしては、表—1 に示す諸元を持つ 5 種類の Bretschneider—光易型同波数スペクトルを用いた。また、入射波と反射波は 3 本の波高計の同時測定記録を基にして分離・解析した。

ケーソン模型を設置する場合、越波に伴う防波堤前面・背面での平均水位の変化が無視し得なくなる。そこで、図—3 に示す様に、水路端部の消波工の背後に水位調整用の越流槽を設け、水をポンプで造波機背後へ返すように工夫している。

不規則波信号の作成、入射波スペクトルの計算、 $D/A \cdot$

表—1 実験波の諸元

CASE	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
I	2.0	0.8
II	3.0	0.8
III	3.5	1.2
IV	5.0	1.2
V	7.0	1.5

A/D 変換等の一連の計算及び処理はすべてパーソナルコンピュータ PC-9801E を用いて行い、そのプログラムは主に FORTRAN で作成した。なお、規則波実験の場合には、関数発生器により得られる正弦波信号を直接用いた。

4. 実験結果

(1) 規則波の造波特性

造波板位置制御および水面波形制御の両方式に対する規則波の造波特性実験結果を図-5 に示す。同図の横軸

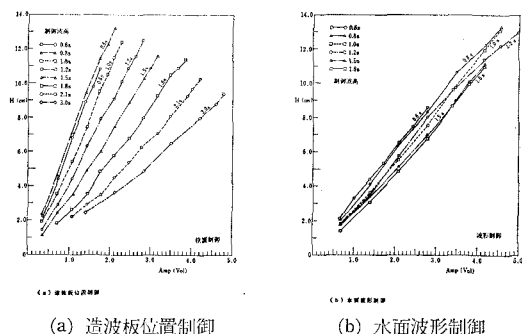


図-5 規則波の造波特性

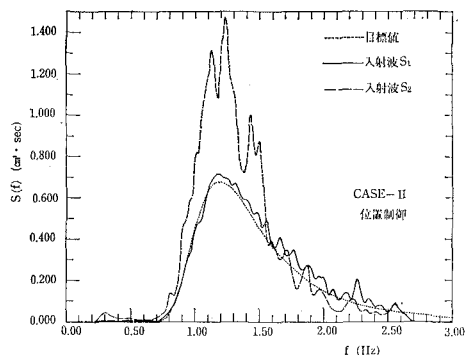
は造波機入力信号正弦波の電圧（全振幅）であり、縦軸は造波板前面で測定された水面波形 η_0 の波高 H である。造波板位置制御方式の場合、入力信号と造波板変位が比例（ここでは入力 1 Vol に対して 5 cm 変位）するよう制御しているため、造波板前面での波高 H には周期の影響が強く現れる。一方、水面波形制御方式では入力信号は造波したい波形に対応するため、構造物からの反射波が無くて定常波成分 D の影響が小さいとするならば、入力信号と造波板前面の波高の比は波の周期によらず一定値を取るようになる。同図には制御方式による造波特性の違いが明瞭に表れている。

(2) 無反射型造波機の性能

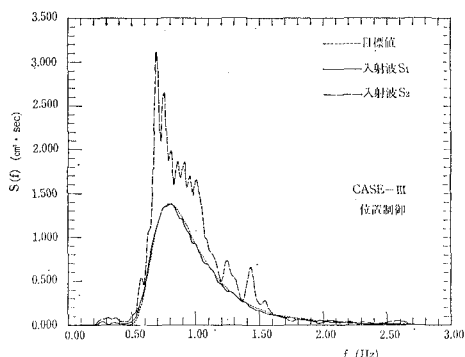
水路内にケーソン模型が有る場合と無い場合について同一の造波機入力信号を用いて実験を行い、反射波の影響により入射波スペクトルがどのように変化するかを検討した。その実験結果を図-6, 7 に示す。図-6 は造波板位置制御方式、図-7 は水面波形制御方式の結果である。図中の実線 $S_1(f)$ は水路内に模型が無い時の入射波の周波数スペクトル、点線の目標値は $S_1(f)$ に対する目標スペクトルであり、破線 $S_2(f)$ は水路内に模型が有るときの入射波スペクトルである。

構造物が無い状態のスペクトル S_1 と目標値との比較より、制御方式の違いによらず、目標値に近いスペクトル形状を持つ不規則波が作成されている事が分かる。

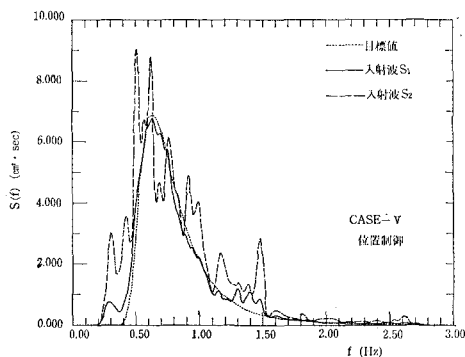
スペクトル S_1 と S_2 を比較すると以下の事が分かる。



(a) CASE II



(b) CASE III

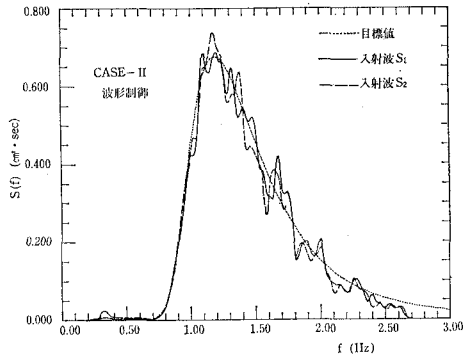


(c) CASE V

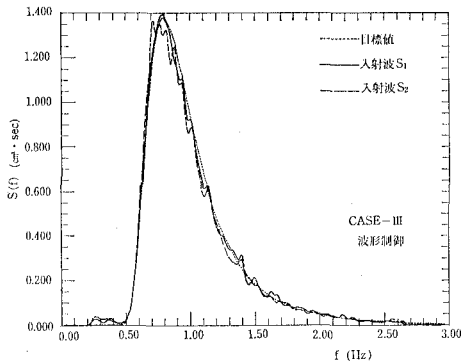
図-6 入射波スペクトルの比較
(造波板位置制御方式の場合)

従来の造波板位置制御方式の場合、 S_2 のスペクトルは S_1 に比べて一般に大きくなり、スペクトル・ピーク付近では 2 倍前後の値を取る場合もある。一方、水面波形制御方式による無反射型造波機の場合には、 S_1 に見られる小さな凹凸が模型設置時のスペクトル S_2 にも現れているなど、スペクトル形の細部にわたり両者はよく一致しているといえる。

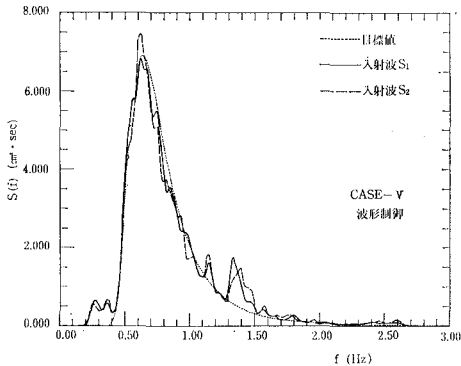
図-6, 7 で見た各々の入射波スペクトルに関する特性量の比較を表-2 に示す。表中の f_p はピーク周波数、



(a) CASE II



(b) CASE III



(c) CASE V

図-7 入射波スペクトルの比較
(無反射型造波機の場合)

m_0, m_1, m_2 はスペクトルの 0, 1, 2 次モーメント, $H_{1/3}$ は m_0 から算出される有義波高である. この表からも本無反射型造波機の有効性は明かであり, 模型構造物の有無によらず, 目標とする不規則波が安定して造波できる事が分かる.

以上の実験結果より, 水面波形制御方式による本無反射型造波機は, 構造物からの反射波を吸収しつつ目標とする不規則波を長時間にわたり安定して造波する事が可

表-2 入射波スペクトルの解析結果

CASE	制御方式	構造物	スペクトル解析						
			1/fp	$\sqrt{m_0}$	$H_{1/3}^*$	m_0/m_1	$\sqrt{m_0/m_1}$	反射率	
I	位置制御	有	0.807	0.543	2.174	0.710	0.683	89.5	
		無	0.807	0.484	1.937	0.694	0.671	11.1	
	波形制御	有	0.845	0.428	1.713	0.709	0.684	89.4	
		無	0.815	0.483	1.933	0.700	0.677	11.4	
II	位置制御	有	0.811	0.594	3.581	0.749	0.723	89.3	
		無	0.845	0.763	3.055	0.681	0.657	10.7	
	波形制御	有	0.853	0.716	2.866	0.710	0.686	90.5	
		無	0.836	0.719	2.878	0.702	0.679	11.1	
III	位置制御	有	1.450	1.092	4.371	1.046	0.990	91.5	
		無	1.251	0.860	3.445	1.024	0.972	11.6	
	波形制御	有	1.400	0.855	3.462	1.010	0.952	92.1	
		無	1.280	0.867	3.470	1.005	0.950	12.0	
IV	位置制御	有	1.343	1.570	6.287	1.048	0.982	87.3	
		無	1.311	1.232	4.932	1.031	0.976	11.1	
	波形制御	有	1.232	1.264	5.061	1.011	0.949	89.4	
		無	1.270	1.250	5.006	1.003	0.946	11.6	
V	位置制御	有	1.974	2.195	8.429	1.205	1.082	80.9	
		無	1.575	1.790	7.168	1.244	1.153	16.0	
	波形制御	有	1.622	1.787	7.154	1.187	1.088	85.9	
		無	1.506	1.794	7.185	1.206	1.112	15.8	

*) スペクトル解析から求められる有義波高 $H_{1/3}$ は $H_{1/3} = 4.004 \sqrt{m_0}$ より計算

能であり, 反射率の大きな構造物を対象とした不規則波の水利模型実験にも適用できる事が確認された.

5. まとめ

本研究で検討した水面波形制御方式による無反射型造波機は, 造波板での波の再反射をかなり低減でき, 長時間の測定が必要な不規則波実験に対して, 実験効率および実験精度の面で特に有効である. また, この造波機の使用により, 本研究で用いたような小型水路においても不規則波実験が可能となる.

しかしながら, この造波機では水面波形を制御用信号に用いているため, 水路内の平均水位の低下や波高計のドリフトが生じると, 周期が非常に長い反射波が来たものと解釈され, それを吸収するような制御を自動的に行ってしまふ. 従って, このような場合には正常な造波機制御ができなくなるので注意が必要である.

参考文献

- 1) Salter, S. H.: Absorbing wave-makers and wide tanks, Proc. of the Cont. on Directional Wave Spectra Applications, pp. 185~202, 1981.
- 2) 谷本勝利・原中祐人・富田英治: 無反射性造波方式の試み, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 54~58, 1983.
- 3) 木下 健: 反射波吸収型造波装置の作動原理について, 生産研究, 39巻1号, pp. 25~28, 1987.
- 4) 木下 健・高岩千人: 反射波吸収型造波装置の反射波係数の計測例, 生産研究, 39巻1号, pp. 33~36, 1987.
- 5) 川口 隆: 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造船技報, 第128号, pp. 20~24, 1986.
- 6) Milgram, J. H.: Active water-wave absorbers, J. Fluid Mech., Vol. 42, Part, pp. 845~859, 1970.
- 7) 平口博丸・鹿島遼一: 水面波形制御方式による無反射型造波機の不規則波実験への適用性, 電力中央研究所研究報告 U88013, 1988.