

反射波吸収式造波システムの開発と基本特性

小山 裕文*・岩倉 重行**・松本 勝*・遠藤 泰司***

1. 緒 言

波浪に対する構造物の特性等の検討には、高反射性の堤体を用いた水理実験が行なわれることが多い。この際、造波板からの再反射波の影響がきわめて問題となる。とくに、比較的短い水路で長周期規則波の実験を行なう場合には再反射波の存在を無視することができなくなる。

したがって、所定の造波を行ないつつ、再反射波成分を打ち消す造波システムがあれば、実験の精度の向上につながることは言うまでもない。また不規則波実験に対しても、今後増加するであろう時系列の連に関する実験の際や、あるいは実験終了後の擾乱波を速やかに静めることができるという実用的な面からもこのタイプの造波システムはきわめて有用となると思われる。

近年、上述の問題を解消するために様々な吸収タイプの造波機が開発されている^{1)~4)}。しかし、これらの造波機の水理特性について十分な検証がされているとは言い難い。また、これらの造波装置には、造波機や原動機系の慣性力、摩擦力の正確な評価が困難なため、吸収特性が不安定になる点や、吸収制御信号を出力する際、電気回路等による固定されたフィードバックゲインを用いるため、特定の周波数の反射波についてしかその効果が期待できない等の問題も指摘されている⁵⁾。

そこで本論では通常的位置制御の造波装置にパソコンによる計測制御フィードバックシステムを付加した反射波吸収式造波システムの原理を検討し、様々な周期の反射波に対し、常に最適な吸収特性をもつことのできる造波制御システムを開発する。さらに、同システムを用いた水理実験によりその基本特性（造波板の再反射率など）について検証を加える。

2. 反射波吸収式造波システム

2.1 理 論

造波ならびに波の吸収を同時に行なうための一枚の板の運動理論は、最初に Gilbert が⁶⁾、線形速度ポテンシ

ル理論を基にした造波理論⁶⁾ および吸収理論⁷⁾ の重ね合わせの形で表わした⁸⁾。本論でも線形理論の単純重ね合わせにより、（造波＋吸収）を行なうための造波板の制御位置 e を定式化する。

はじめに造波理論では対象水位、速度ポテンシャル、造波板変位について整理すると以下の通りとなる。

$$\eta_I = a_I \cdot \cos(\sigma t - kx) \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \phi_I = & a_I \frac{g}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(\sigma t - kx) \\ & - \frac{ga_I}{\sigma A} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_n \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} \right. \\ & \left. \times \exp[-k_n x] \right\} \cos \sigma t \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$e_I = a_I / A \cdot \sin \sigma t \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 η_I ；造波（目標）水位、 a_I ；水位振幅、 σ ；角周波数、 k, k_n ；波数、 ϕ_I ；造波速度ポテンシャル、 A ；造波特性関数、 g ；重力加速度、 z ；水面からの位置、 h ；水深、 c_n ；慣性項係数、 e_I ；造波のための変位、 t ；時刻、 x ；進行方向座標 である。

ここでピストン型造波機では次式の関係がある。

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

$$c_n = \frac{4 \sin^2 k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $k_n = -\sigma^2/g \cdot \tan k_n h$ である。

一方、吸収理論では

$$\eta_R = a_R \cos(\sigma t + kx + \epsilon) \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} \phi_R = & a_R \frac{g}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(\sigma t + kx + \epsilon) \\ & + \frac{ga_R}{\sigma A} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} c_n \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h} \right. \\ & \left. \times \exp[-k_n x] \right\} \cos(\sigma t + \epsilon) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$e_R = -a_R / A \cdot \sin(\sigma t + \epsilon) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 η_R ；吸収対象水位、 ϵ ；位相差、 ϕ_R ；吸収速度ポテンシャル、 e_R ；吸収のための変位となる。

以上により、造波のための制御位置（式(3)）と吸収のための制御位置（式(6)）を加えれば、（造波＋吸収）のた

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株) システム事業開発班

** 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所 システム室

*** 正会員 理博 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所長

めの造波板の変位 e が求められる。この際、式中の正弦波水位を一般的な水位 η に拡張することにより次式を得る。

$$\begin{aligned} e &= e_I + e_R \\ &= 1/A \cdot \{a_I \sin \sigma t - a_R \sin(\sigma t + \varepsilon)\} \\ &= 1/A \sigma \cdot \{-a_I \cos \sigma t / dt + a_R \cos(\sigma t + \varepsilon) / dt\} \\ &= 1/A \sigma \cdot (\eta_R - \eta_I) / dt \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

上式によれば、目標水位 η_I に対して現在造波板前面に作用している反射波成分水位 η_R がわかれば、時々刻々の制御すべき造波板の位置が計算されることになる。反射波成分に対する造波板の運動は、造波のための運動とは逆の動きをするように制御してやれば良い。

反射波成分は、次式のように理論的には造波板前面の波高計の計測水位 η_m から造波板前面水域に特有の慣性項水位成分を除き、さらに造波目標水位 η_I との差により表わされる。

$$\begin{aligned} \eta_R &= (\text{計測水位}) - (\text{慣性項水位}) - (\text{目標水位}) \\ &= \eta_m - \eta_0 - \eta_I \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \sum_{n=1}^{\infty} c_n \{a_I/A \cdot \sin \sigma t - a_R/A \cdot \sin(\sigma t + \varepsilon)\} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} c_n e \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

なお、式(10)による反射波成分検出法の妥当性については、後述の水理実験により検討を行なう。

本システムでは位置制御方式造波機の造波信号発生装置～造波機の間 $A/D, D/A$ 変換機能をもつ16ビット・パソコンを配し、 $dt=40$ msec 毎に造波板前面水位を計測し、式(9)～(11)を用いて次のインターバルで制御すべき造波板変位 e を計算し、出力している。

ただしその際、波高計特有のゼロ点ドリフトや造波板前面の水しぶきのハネ等による突発的水位データの発生に対し、造波機が暴走しないようにする各種安全ループを組み込んでいる。

2.2 既往の吸収造波装置との相違点

前述した通り、最初の(造波+吸収)の制御理論は、Gilbertにより明らかにされている⁹⁾。Gilbertの手法は、造波板前面波高計からの水位情報を基に制御を行なうものであり本システムとはほぼ同じ考えであるが、具体的に実際の制御のための定式化はされておらず、また実際の造波装置も作られていない。以後、発表される吸収タイプの造波装置は、いずれも線形造波および吸収理論の足し合わせという点では共通しているものの、いかなる情報により反射波成分を検出し、造波運動のどのような諸量を制御の対象とするかはそれぞれ異なっている。

最初の吸収造波装置は、Salter¹⁾により製作されている。この方式は、造波板に働く流体力を計測し、造波板

の速度を制御するものである。同種の造波装置は経塚⁹⁾によっても製作されており、さらに谷本ら²⁾、内藤ら³⁾は速度ではなく造波板に働く推力を直接制御する手法を採用し、それぞれ実用化している。

このタイプの吸収造波装置は、平面水槽の造波機のように造波板に対し、斜めに作用する反射波についてもその方向に応じた吸収運動が可能であるという利点があるものの、重い造波板を動かすために生じる摩擦などの機械系の力等を正確に評価するのは困難であり、そのため吸収特性にばらつきが生じることが報告されている⁹⁾。

川口⁴⁾は、この弊害を避けるため、造波板前面の波高計からの情報を基に造波板の速度を制御する方式を行なっている。しかしながら検出された反射波成分から吸収制御信号を求める際、装置に組み込まれた電気回路により固定されたゲインを用いているため、様々な周波数の反射波に対し、必ずしも最適な吸収制御を行なっているとは言い難い。

本システムは、Gilbert、川口と同様、造波板前面水位より反射波を算出しているため、造波機の摩擦力などの評価誤差による影響は考慮する必要はない。また、パソコンによりフィードバック制御を行なうため、実験時の水深、対象周期に応じた最適な吸収ゲインが簡単に設定できる点、および一般的な位置制御造波方式を採用しているため、使用中の造波機をそのまま利用できるなどの実用上の点からもそのメリットは大きいと思われる。

3. 水理実験

水理実験は、日本テトラポッド(株)応用水理研究所の往復流水路($B \times L \times H=0.5\text{ m} \times 30.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$)で行なわれた。水路の一端には油圧駆動による位置制御式ピストン型造波機が設置されている。一方、造波板から20 m離れた地点には直立壁を設け、通常の実験ではかなりの多重反射系となる状況を設定した。水位の計測は、吸収制御に用いる造波板前面の水位を含め、図-1に示す4点で行なわれた。

造波信号は吸収制御機能あり・なしを含め、表-1に示す条件で行なわれた。各ケースとも連続して50波の造波を行ない、吸収制御機能ありの場合は、さらに100×

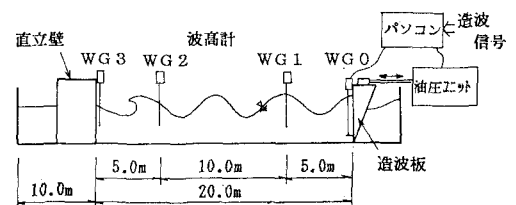


図-1 実験概略図

表-1 実験条件一覧表

実験 No	水深 (cm)	周期 (秒)	波高 (cm)	備 考
A-01	25.0	0.80	3.0	吸収制御なし
B-01	25.0	0.80	3.0	吸収制御あり
A-02	25.0	1.20	3.0	吸収制御なし
B-02	25.0	1.20	3.0	吸収制御あり
A-03	25.0	1.20	4.0	吸収制御なし
B-03	25.0	1.20	4.0	吸収制御あり
A-04	25.0	1.20	5.0	吸収制御なし
B-04	25.0	1.20	5.0	吸収制御あり
A-05	25.0	1.20	6.0	吸収制御なし
B-05	25.0	1.20	6.0	吸収制御あり
A-06	25.0	1.60	4.0	吸収制御なし
B-06	25.0	1.60	4.0	吸収制御あり

T (T : 波の周期) 秒まで吸収制御のみ (水路内の残存波を吸収するための運動) を作動させた。

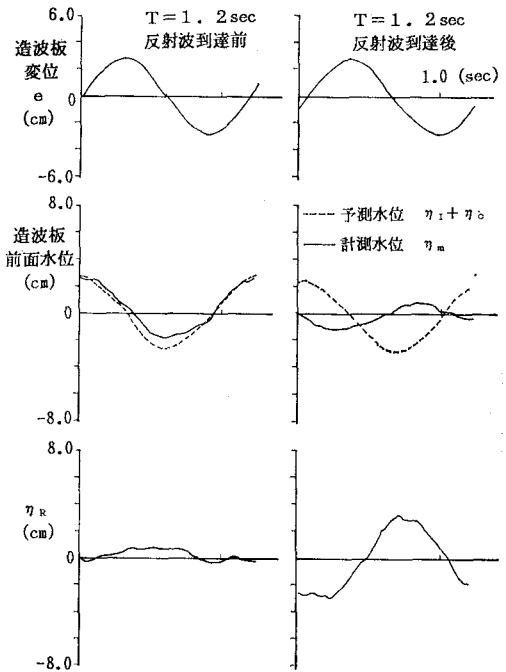
4. 結果とその考察

4.1 反射波成分の検出

吸収制御の特性について述べる前に、造波板前面水位より反射波成分を求める手法 (式(10)) の妥当性について検討しよう。図-2 は、吸収制御なしの実験における造波板の変位 e と計測された造波板前面水位 η_m の時系列を示す。ここで右側の図は直立壁からの反射波が到達した後のデータを、左側の図は到達前のデータをそれぞれ示している。両図には、造波板の動きから式 (11) によって計算される慣性項水位成分を含んだ造波板前面予測水位 ($\eta_0 + \eta_i$) と、式(10)によって計算される水位 η_R の時系列についても示されている。

右図を見ると、反射波到達後においては式 (10) による算定により、反射波としてはほぼ妥当と思われる波高、周期をもつ波動成分を検出していることがわかる。一方、反射波到達前の状況においても、左図に示すように η_R が検出されているが、もちろんこの成分は提体からの反射波によるものではなく、線形造波理論による予測水位と実際の造波水位との差異を示すものである。

つまり式(10)による算定では反射波成分以外にもその造波機固有の誤差を含んでいる可能性があり、この意味では造波板前面の一本の波高計データのみから反射波成分を求める方法には問題があると考えて良い。しかしながら式 (10) で算出される波動成分 η_R は、その後式 (9) により極力ゼロとなるように制御される。すなわち、厳密に言えば本システムは「反射波成分を吸収する」ように制御すると言うよりも、「目標水位からのズレの成分 (反射波も含む) を吸収し、つねに目標水位を実現するように」制御していると考えた方が適切である。したがって、実用上の点からは式(10)によりシステムが吸収すべき波動成分を算定してもまったく問題はないと考えら


 図-2 反射波成分 η_R の時系列

れる。

4.2 時系列特性

吸収制御なし (すなわち従来の位置制御) と、吸収制御ありの実験における造波板変位 e 、造波板前面水位 WG_0 、直立壁前面水位 WG_3 の時系列例を図-3, 4 に示す。

吸収制御なしの場合 (図-3 参照) では造波板からの再反射波の影響により水位振幅の変動が認められる。また最終波が造波板に戻ってきた時点以降でも、水槽内には残存再反射波成分による擾乱がなかなか収まらないことがわかる。

一方、吸収制御ありの場合 (図-4 参照) には、図-3 で認められたような水位振幅の変動は観測されず、造波板からの再反射による影響はほとんど無視することができる。また造波終了後も造波板は直立壁からの反射波に応答してこの成分を吸収する運動を行なうため、速やかに水槽内が静穏な状況になっていることがわかる。

4.3 造波板の反射率

吸収タイプの造波装置の吸収特性の定量的評価に際し、直接的に造波板の反射率を求めた例はほとんどない^{5),9)}。これは、造波制御中に数本の波高計の時系列の段階的变化データを用いて、水路両端の反射率を求めることも原理的には可能であるものの、実際には重複波の腹と節の位置が変動するため、解析すべきデータ区間の選択が困難であるためと思われる。したがって本論では、必ず安定した腹の位置データが得られると考えられ

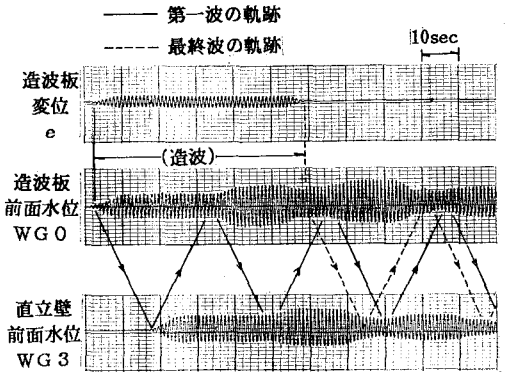


図-3 リニアコーダによる時系列出力例
($T=1.2$ sec, $H=3.0$ cm, 吸収制御なし)

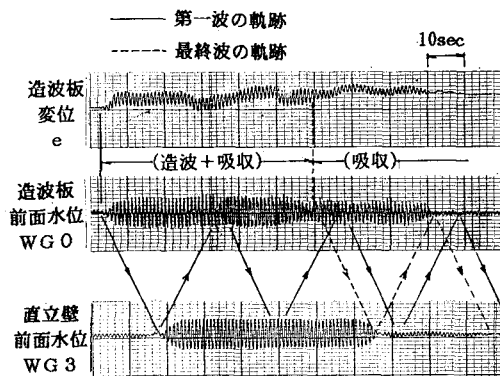


図-4 リニアコーダによる時系列出力例
($T=1.2$ sec, $H=3.0$ cm, 吸収制御あり)

る造波終了後の水路両端に作用する波の波高変化を用いて造波板の反射率を求めることにした。

図-5に造波終了後の波の状況を示す。同図には造波終了時点において直立壁に向かう波の波高 H と、その後の波の進行に伴い水路両端の波高計で計測される波高値 $H1 \sim H3$ の変化についても表示している。 $H1 \sim H3$ の値は、同図に示すように水路両端の反射率 K_R , K_{RR} 及び波の水路内進行による減衰率 K_f により表わされており次式の関係が成立することがわかる。

$$\frac{H1 \cdot H3}{H2^2} = \frac{K_{RR}(1+K_R)^2}{K_R(1+K_{RR})^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 K_R : 直立壁の反射率、 K_{RR} : 造波板の反射率である。

ここで K_R は、最初の波が直立壁に作用した時点で求められるから上式により造波板の反射率 K_{RR} が計算できることになる。この結果を示したものが図-6である。吸収制御なしの場合、すなわち反射波が作用しても造波板が何の動きもしない場合には反射率は $K_{RR}=0.8 \sim 1.0$ の値を示している。一方、吸収制御を行なった場合には広い範囲にわたり $K_{RR}=0.1$ 程度かそれ以下の低

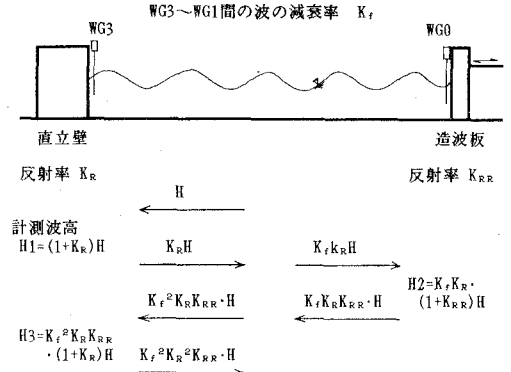


図-5 造波終了後の波高変化説明図

反射率が実現していることがわかった。

4.4 その他の特性

4.1でも触れたように本吸収制御付造波システムでは反射波を吸収する機能の他に、造波板前面水位が目標水位と異なる場合、これをフィードバックにより自己修正する機能を有している。この機能は、水路固有の造波特性に関係なく簡単に目標水位を得られるという点で実験者にとってきわめて有用な機能であると思われる。

本実験による設定波高と実際に計測された波高の比を図-7に示す。ここで計測波高の値としては、反射波が到達する前の WG1 における平均波高を採用している。図中には吸収制御ありなしの場合についてデータをプロットしているが、吸収制御なしの場合、計測波高は目標値の $0.7 \sim 0.9$ 倍程度となっている。これは本造波水路における造波特性が線形造波理論では十分な説明ができないことを示している。一方、吸収制御ありのケースでは計測波高は設定値の $0.95 \sim 1.05$ 倍の範囲内にあり吸収フィードバック制御によりほぼ目標通りの造波が可能であることがわかる。

この特性は、任意の連なりをもつ不規則波実験において、提体からの反射波に左右されることなく所定の時系列水位を発生させる際に、きわめて有効となるものと思

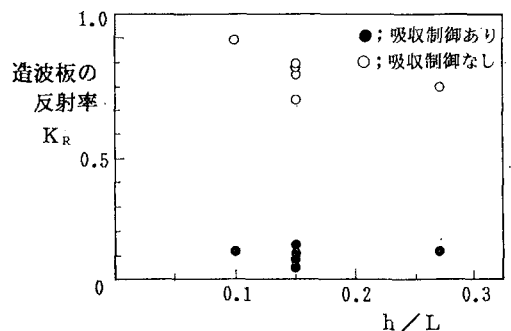


図-6 造波板の反射率

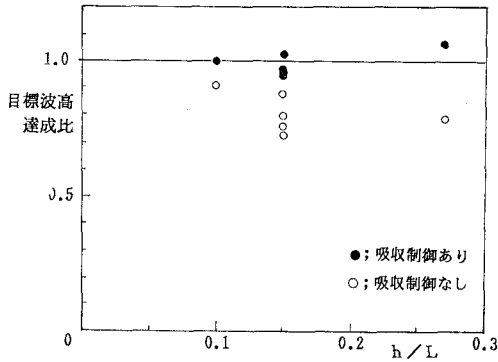


図-7 造波された波の波高達成比

われる。

また、吸収制御の有無による造波水位の安定性の差異を表-2に示す。安定性のパラメータとしては谷本らと同様、直立壁前面の計測波高の最大値 H_{max} と最小値 H_{min} の差を本来の重複波高で割った値を用いた。ただし、 $T=0.8$ sec のデータについては、造波板からの再反射波が到達する前に実験が終了しているため、ここでは対象外とした。同表を見ると吸収制御ありの実験における変動の比率はせいぜい 0.15 程度であり、吸収制御なしの場合の変動比 0.38~0.88 と比べても、かなり安定した水位が実現されていることがわかる。

5. 結 論

本論では、目標水位を造波し、かつ提体からの反射波成分を吸収するための造波板位置制御システムの理論を検討し、検証水理実験を行なった。その結果本システムは、反射波を 90% 以上吸収し、目標水位を十分の精度で安定良く発生させることのできるシステムであることがわかった。今後さらに本システムを不規則波に対して適用し、水理実験の精度や効率を高める手法について検討を加える所存である。

表-2 波高の安定性一覧表

実験 No	周期 (sec)	H_{max} (cm)	H_{min} (cm)	H_s (cm)	$\frac{H_{max}-H_{min}}{H_s}$	吸収の 有無
A-02	1.2	6.8	4.8	4.8	0.43	無
B-02	〃	5.5	4.8	5.5	0.12	有
A-03	〃	7.7	5.6	5.6	0.38	無
B-03	〃	7.8	6.7	6.7	0.14	有
A-04	〃	13.3	8.4	8.4	0.58	無
B-04	〃	9.8	8.4	8.9	0.16	有
A-05	〃	13.3	8.5	8.5	0.56	無
B-05	〃	11.9	10.3	11.9	0.13	有
A-06	1.6	7.0	0.8	7.0	0.88	無
B-06	〃	7.7	6.6	7.5	0.15	有

なお、本造波装置の製作にあたっては、(株)多摩工作所の高岡昇氏ならびに油研工業(株)の広田善晴氏の御助力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Salter, S. H.: Absorbing wave-makers and wide tanks, Proc. of the Conf. 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) 内藤 林, 黄 俊, 森 淳彦, 中村章一: 新しい消波装置の特性, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 181-189, 1987.
- 4) 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.
- 5) 木下 健, 高岩千人: 反射波吸収型造波装置の動作原理と性能, 第2回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 171-180, 1987.
- 6) Biésel, F. and F. Suquet: Les appareils générateurs de houle en laboratoire, La Houille Blanche, Vol. 6, Nos. 2, 4 et 5, 1951.
- 7) Milgram, J. H.: Active water-wave absorbers, J. of Fluid Mech., Vol. 43, Part 4, pp. 845-859, 1970.
- 8) Gilbert, G.: Absorbing Wave Generators, Hydraulic Research Station Note 20, pp. 3-4, 1978.
- 9) 経塚雄策: 吸収式造波装置の研究, 西部造船会会報第70号, pp. 77-88, 1985.