

実験水槽における長周期再反射波の低減方法

Reduction of Long-period Re-reflected Waves in Hydraulic Model Tests

稲垣 聡¹・池谷 毅²・向原 健³

Satoshi INAGAKI, Tsuyoshi IKEYA and Takeshi MUKOHARA

When the hydraulic model tests for wave propagation are done, the re-reflected waves caused at the wave generators also propagate to the experimental area. The absorption methods for the short-period waves are well known, but they are not useful for the reduction of long-period reflected waves. In this study, the analytical model for producing long-period waves using the pump-type wave maker is presented, and laboratory tests for the reduction of long-period re-reflected waves are carried out. In addition, the reduction of short-reflected waves using filter materials is also tested. The combination of these reduction methods for long- and short-period waves might be generally useful for the hydraulic model tests.

1. はじめに

波浪場の実験水槽において、造波した入射波が護岸等の反射面で反射した場合、そのままでは沖の造波装置側で再反射が起こり、護岸付近の実験エリアに再度入射してしまう。これを排除するために、対象が短周期波の場合は、川口(1986)の造波板による吸収制御や、多方向不規則波に適用した方法として、池谷ら(1992)、伊藤ら(1994)などが研究されている。川口(1986)の方法は造波板前の水位を検知して造波板の速度にフィードバックを掛ける方法であり、広く実用に供されている。しかし、造波板のストローク長さの制約等により扱える波周期に制約があり、長周期反射波の吸収方法として用いるには限界がある。

本研究では、著者らの保有する軸流ポンプ式の長周期波造波装置を用い、まず長波の近似を用いて簡便に任意の長周期波形を作成する方法を述べ、これを応用したポンプによる反射波吸収制御について示す。さらに、長周期波の反射時に発生する分裂波(短周期波)の低減についても検討し、実験水槽における長周期波の再反射波低減に汎用的に利用できる手法の提案を試みる。

2. 長周期波の再反射波低減の方策と課題

水槽内に造波した長周期の入射波は水槽内を伝播し、護岸等で反射する。このとき、例えば池谷ら(2005)などの計測結果に見られるように、長周期波は反射時に分裂する場合がある。再反射に対する対策を何も実施しないと、図-1(a)のように沖側で長周期波成分と分裂波の短周期成分を持った再反射が発生し、再び護岸方向に伝

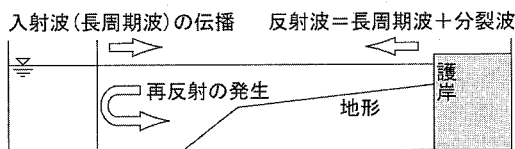
播していくこととなる。すなわち、長周期波実験時の再反射波低減には、長周期成分と短周期成分の両方の低減が必要となる。以下に対策の方針と課題を示す。

(1) 再反射波の長周期成分の低減

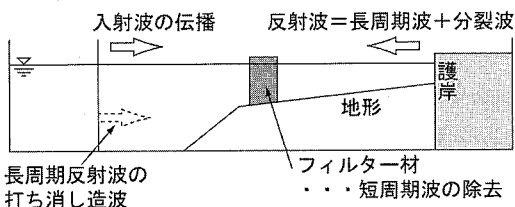
反射してきた波の長周期成分に対しては、それを打ち消す波を造波装置で造波することで、低減を行う方法が考えられる(図-1(b))。入射波を発生させる信号に加えて、打ち消す波の成分を信号に加えれば、入射波を造波しながらの反射波の吸収が可能となる。この検出される任意の形状の反射波に対して、打ち消す波の信号を作る技術が必要となる。

(2) 分裂波(短周期波)の減衰

ポンプ式の造波装置を用いる場合は、短周期の変動に追従する造波が難しいため、(1)で述べた打ち消し波の造波は困難である。ここでは簡便な方法として、図-1(b)に示すような、反射波の伝播途中にフィルター材を設置



(a)再反射低減を行わない場合



(b)再反射低減を実施する場合

図-1 長周期波造波時の再反射波低減のポイント

1 正 会 員 工 修 鹿島技術研究所 主任研究員
2 フェロー 工 博 鹿島技術研究所 グループ長
3 正 会 員 工 修 鹿島技術研究所 研究員

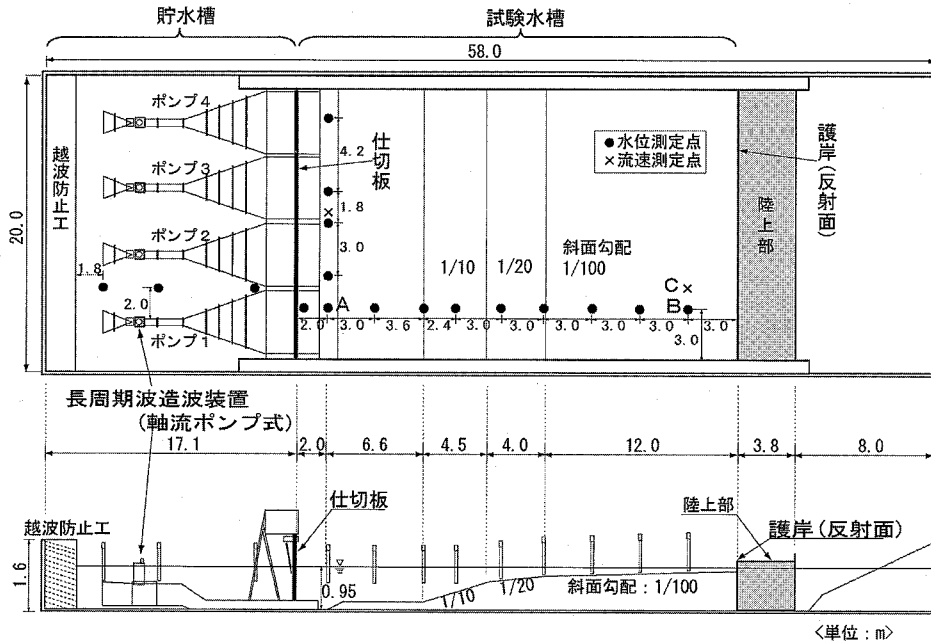


図-2 平面水槽と長周期波造波装置

する方法を考える。フィルター材により、短周期波は減衰させ、長周期波はそのまま減衰させずに通過させる効果が期待できるが、効果確認には実験による検証が望ましい。

本研究では、以下に、ポンプ式長周期波造波装置による、長波の近似を用いた任意の長周期波形の作成理論を示し、実験時のパラメータの決定方法、本方法による長周期波の作成例と反射波吸収の実施例を示す。さらに、フィルター材による分裂波減衰を検討した例を示す。

3. 任意長周期波形の造波方法

(1) 造波装置と造波原理

検討に用いた実験水槽は、鹿島技術研究所の大型平面水槽（以下、平面水槽と記す）である。平面水槽と装置の配置を図-2に示す。この平面水槽には軸流ポンプを内蔵した4連の水路が設置されている。著者らは、これを津波造波装置と称し、主として津波現象を扱う実験に使用している（Asakuraら（2002）、岩瀬ら（2001））。

一般に造波板を使わない造波方法は多く考案されており、例えばGodaら（1964）は水底から出入りする鉛直振動流によって造波する方式を提案している。この方法では、水底の水の出入り口から水平方向両側に波浪を伝播させられることが示されている。著者らの実験装置では平面水槽は軸流ポンプ水路外（上部）の仕切り板により、試験水槽側と貯水槽側に分けられている。ポンプにより貯水槽から試験水槽に送られた水は、ポンプ水路出

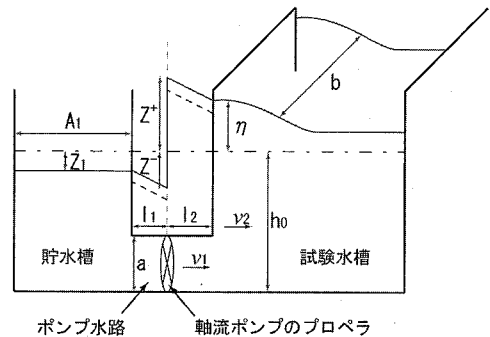


図-3 貯水槽・試験水槽の水位変化の模式図

口付近の水位を変化させ、それが長波として試験水槽内を伝播していく（図-3）。このようにポンプの働きにより水槽内に長周期の水位変動を作ることができる。

(2) 任意長周期波形の造波理論

軸流ポンプのプロペラより貯水槽側・試験水槽側それぞれの運動方程式は式（1）、式（2）のようになる。

$$\frac{1}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{1}{l_1} (Z_1 - Z^-) + f_1 \frac{v|v|}{2g} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{1}{l_2} (Z^+ - \eta) + f_2 \frac{v|v|}{2g} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

記号は図-3を参照されたいが、 v ：ポンプ水路内流速、 l_1, l_2 ：ポンプ水路入口・出口とプロペラ間距離、 Z_1 ：貯水槽内水位、 Z^-, Z^+ ：プロペラ直前・直後の全水頭、 f_1, f_2 ：水路による損失係数、 η ：試験水槽のポンプ水路

出口付近水位で造波目標となる水位である。式(1)から任意の η 生成のために軸流ポンプで起こすべき水頭差 $Z^+ - Z^-$ (ポンプの運転電圧に比例する値)は式(3)で表される。

$$Z^+ - Z^- = \frac{l_1 - l_2}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + (\eta - Z_1) + \frac{f_1 l_1 + f_2 l_2}{2g} \cdot v |v| \dots \dots \dots (3)$$

ここで η に長波の近似を用いると、ポンプ水路内と試験水槽の連続式から、

$$v_2 = \sqrt{\frac{g}{\eta + h_0}} \cdot \eta = v \cdot \frac{a}{b(\eta + h_0)}$$

$$\Leftrightarrow v = \frac{b\sqrt{g}}{a} \cdot \eta \sqrt{\eta + h_0} \dots \dots \dots (4)$$

となり、 v は η により表すことができる。ここで v_2 :ポンプ水路出口付近の長波の流速、 a :ポンプ水路断面積、 b :水槽幅、 h_0 :初期水深である。また、 v の時間微分は、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{b\sqrt{g}}{a} \cdot (\eta \sqrt{\eta + h_0})'$$

$$= \frac{b\sqrt{g}}{a} \cdot \frac{3\eta + 2h_0}{2\sqrt{\eta + h_0}} \cdot \eta'$$

$$= \frac{b\sqrt{g}}{2a} \cdot \frac{3\eta + 2h_0}{\sqrt{\eta + h_0}} \cdot \eta' \dots \dots \dots (5)$$

となる。 η' : η の時間微分。

次に、貯水槽側とポンプ水路内の連続式から、 Z_1 も連続式により η に関連付けることができる。

$$-A_1 \cdot dZ_1 = av \cdot dt$$

$$\Leftrightarrow \frac{dZ_1}{dt} = -\frac{a}{A_1} \cdot v$$

$$= -\frac{a}{A_1} \cdot \left(\frac{b\sqrt{g}}{a} \cdot \eta \sqrt{\eta + h_0} \right)$$

$$= -\frac{b\sqrt{g}}{A_1} \cdot \eta \sqrt{\eta + h_0} \dots \dots \dots (6)$$

A_1 :貯水槽側の表面積である。式(4)、(5)、(6)の情報を用いると、式(3)の右辺は η のみの関数となる。式(3)に式(4)、(5)を代入すると、

$$Z^+ - Z^- = \frac{b\sqrt{g}(l_1 + l_2)}{2a} \cdot \frac{3\eta + 2h_0}{\sqrt{\eta + h_0}} \cdot \eta' + (\eta - Z_1) + \frac{b^2(f_1 l_1 + f_2 l_2)}{2a^2} \cdot \eta(\eta + h_0) \cdot |\eta| \dots \dots \dots (7)$$

実用上は η' は生成したい η の時系列の数値微分で求められ、 Z_1 は式(6)の右辺を数値積分により求められる。すなわち、式(7)の右辺はすべて η から得られる。よって、式(7)により造波したい η の時系列に対するポンプによる水頭差=ポンプに与えるべき信号時系列が求まり、逆に打ち消したい η の変化に対する

表-1 造波に用いたパラメータ

記号	単位	数値
l_1	m	2.40
l_2	m	10.8
a	m ²	0.709
b	m	18.0
A_1	m ²	340.
h_0	m	0.950
f_1, f_2	—	$v < 0$ のとき 1.1 $v \geq 0$ のとき 0.6

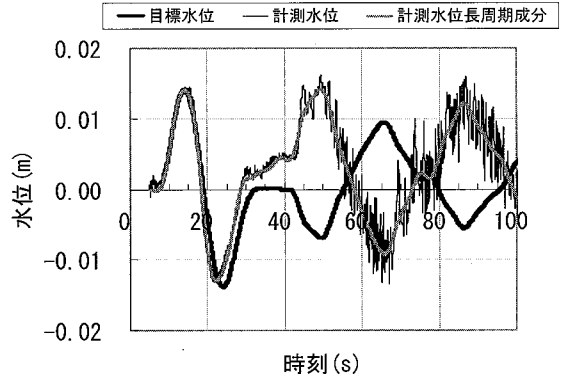


図-4 周期 20 秒の波の造波例

ポンプ運転も可能となる。

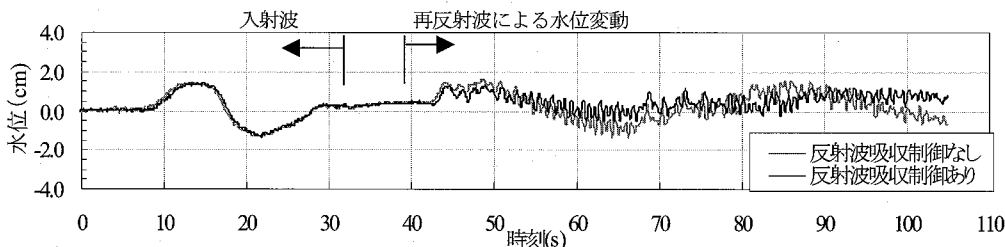
(3) パラメータの決定

今回の水槽にて使用したパラメータを表-1に示す。表の $l_1 \sim A_1$ までは、装置と水槽の形状により決まる。最後の f_1, f_2 については、ポンプを止めた状態で、試験水槽側で一定流量で注水(すなわち $v < 0$ の状況)および水を抜いた($v > 0$)場合それぞれの、定常状態における試験水槽・貯水槽の水位差と実測の v から求めた。この方法では、ポンプ水路内でのプロペラの貯水槽側・試験水槽側の区別は困難であるため、便宜上 $f_1 = f_2$ とした。 v の正負、すなわち流れの向きによって値が変わるのは、ポンプ水路形状の非対称性のためと考えられる。

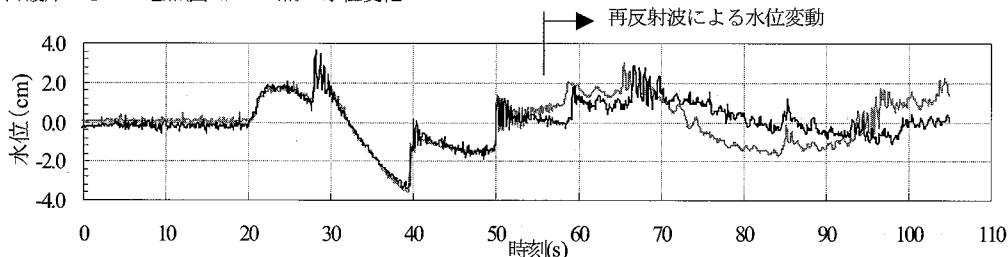
(4) 入射波造波の例

波高 2.8 cm, 周期 20 秒の正弦波を 1 波だけ造波する場合の例を図-4に示す。計測された時系列は、試験水槽のポンプ水路出口付近水位(図-2のA点)であり、時刻 30 秒までの比較で、目標水位と計測水位はよく一致していることが分かる。時刻 40 秒以降の反射波については後述する。なお、正弦波を造波するためには、理論上ポンプは起動時の瞬時に最大の出力を要求される。これは不可能であるため、岩瀬ら(2001)で示したようなポンプの緩起動時間(ポンプ出力を上げるための3秒程度の時間)を設定している。

(a) 試験水槽のポンプ水路出口付近(図-2のA点)の水位変化



(b) 護岸から3m地点(図-2のB点)の水位変化



(c) 護岸から3m地点(図-2のC点)の水平流速の自乗

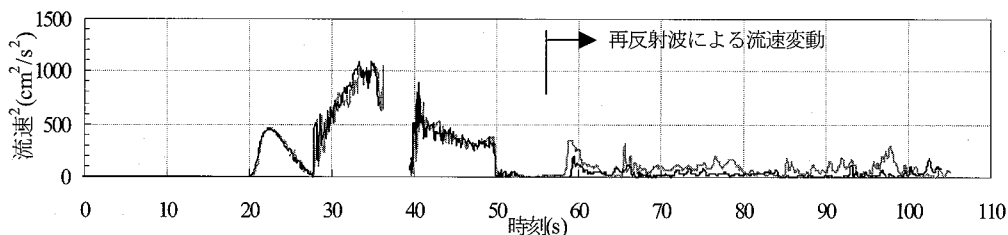


図-5 再反射波低減の例 (沖および護岸付近での水位・流速変化, 沖での波高2.8cm・周期20s)

4. 長周期波吸収制御の実施

前述の波高2.8cm, 周期20秒の正弦波1波だけ造波する場合について, 図-4の時刻40秒以降に計測される長周期波を打ち消す(吸収制御)するよう造波装置(ポンプ)を運転した結果を示す。図-4の40秒以降に見られる長周期変動の, 負が逆で最大変位の70)の振幅を持つ波を「目標水位」とし, ポンプにより造波している。図-5(a)に試験水槽のポンプ水路出口付近水位(すなわち沖・一様水深部での水位変化, 図-2のA点), 図-5(b)に護岸付近での水位(護岸から3m沖, 図-2のB点), 図-5(c)に護岸付近流速の自乗(同, 図-2のC点)の変化を示す。なお, 流速は超音波流速計を用いて測定しており, 水位が下がり流速計センサーが水の外に出てしまう際の欠測の時間帯がある。

吸収制御なしの細線で示した時系列では, 正弦波1波の後に水槽内に水位・流速の長周期の変動が残る。これに対し, 長周期波を吸収するよう造波装置(ポンプ)を運転した場合の結果を, 図-5(a)~(c)の太線に示す。吸収造波を実施した場合には, 再反射波による水位変動は

小さくなり護岸付近の流速は減少し, 流速の自乗は大きく減少することがわかる。例えば, 護岸付近に移動床を置く実験を行った場合, 流速の自乗はシールズ数に比例することから, この吸収制御により再反射波による移動床の砂移動を激減させることが期待できる。

但し, 再反射波の消波は完全ではなく, また平均水位

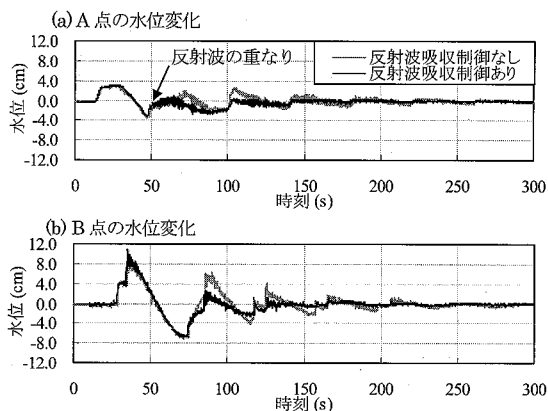


図-6 沖での波高4cm・周期60sの波の水位変化

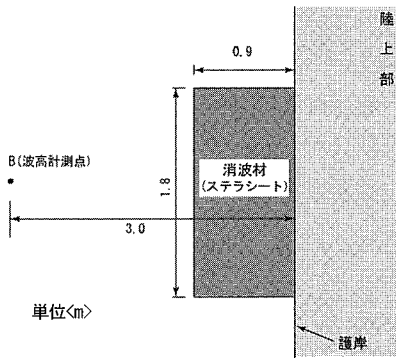


図-7 消波材設置状況

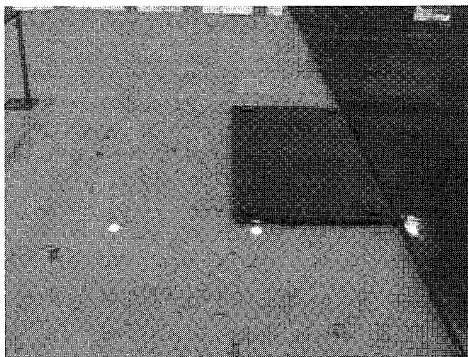
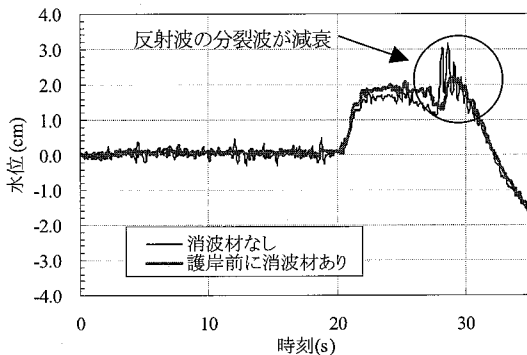


写真-1 消波材設置状況

図-8 護岸近くに消波材を置いた場合のB点の水位変化
(沖での波高2.8cm・周期20s)

も造波前の初期水位と比べて変化していることなどから、造波理論やパラメータの設定にはまだ検討の余地があるものとする。

図-6は周期60秒の波を発生させ、同様に反射波吸収を行った例である。この場合、入射波の発生途中で反射波が造波装置に到達するが、吸収制御により入射波1波のみをうまく岸側に伝播させ、反射波は吸収していることがわかる。

5. 消波材による分裂波の吸収

図-5(a)などの水位の時系列では、反射波の長周期の変動の上に、短周期波が重なっていることが観測される。これは、前述のように、反射時に波が分裂し、その短周期波が分裂により発生していると考えられる。この分裂波である短周期波は、前章までのポンプによる打ち消し制御では、除去することが困難である。

護岸前面に幅0.9m・厚さ0.1mの消波材（ステラシート）を図-7、写真-1のように置いたところ、分裂波の発生が抑えられ、図-8のように短周期波が軽減した。

このように消波材には長周期波は通過させ、短周期波を消波する効果があり、図-1(b)のように伝播途中に設置すれば、伝播中の短周期波の消波が可能であり、また造波装置側の仕切り板の前にこのような消波材を設置することで、仕切り板の再反射時に再度発生する短周期波（分裂波）を抑え、結果として再反射波として伝播していく短周期波の発生を抑えることができると考えられる。

6. おわりに

- (1) ポンプ式の造波装置により長波の近似を用いて簡便に任意の長周期波の造波を行う理論を検討し、長周期波の反射波を吸収制御する方法を開発し、実験により一定の効果を確認した。理論・パラメータ等においては今後さらに検討の余地があると考えられる。
- (2) 反射面に消波材を設置することで、反射面での分裂波発生を低減することができ、結果として反射波の短周期成分を減衰させることができた。

参考文献

- Asakura, R., K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002): The Tsunami Wave Force Acting on Land Structures, Coastal Engineering 2002, pp. 1191-1202.
- Goda, Y. and T. Kikuya (1964): The Generation of Water Waves with a Vertically Oscillating Flow at a Channel Bottom, Report of Port and Harbour Technical Research Institute, No. 9, pp. 1-23.
- 池谷 毅・秋山義信・今井貫爾 (1993): 多方向不規則波の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 81-85.
- 池谷 毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・入谷 剛・柳沢賢 (2005): 陸上構造物に作用する津波波圧の時空間変動特性, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 121-126.
- 伊藤一教・磯部雅彦・勝井秀博 (1994): 多方向不規則波の反射波吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 101-105.
- 岩瀬浩二・朝倉良介・池谷 毅・金戸俊道・藤井直樹・川口隆 (2001): ポンプ式津波造波装置の開発, 土木学会第56回年次学術講演会報文集, 第II部門, pp. 564-565.
- 川口 隆 (1986): 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.