

越波による伝達波について

西 受 由 裕*・水 口 優**

1. はじめに

港湾における防波堤の機能はいうまでもなく堤内への波の侵入を防止することであるが、これを完全に阻止することは建設費との兼ね合いで必ずしも得策でない(合田, 1990)。そこで, ある程度の越波や波の透過は許容せざるを得ない。こうして堤内に生じる波を伝達波と呼ぶが, このうち前者, 越波による伝達波(以後, 越波伝達波)については, 入力条件としての越波量を精度よく見積もることが困難であったということもあり, 波高伝達率を実験的に調べるというようなスタイルがこれまでの研究の主流である(例えば合田・竹田, 1966)。越波伝達波の波形予測モデルとしては, 松井ら(1980)が越波水塊を初期水位上昇と見なした Cauchy-Poisson 波モデル(以後, C.P.波モデル)を提案し, 倉田(1981)が実験においてそれを定量的に検討しているが,

- a) 周期波を用いており, 発生メカニズムにまで踏み込んで検討していない
- b) 初期水位上昇を与えるという初期値問題に置き換えているため定量的に取り扱う際の理論付けが困難である
- c) 微小振幅の仮定を用いて導出されているため, 非線形性の強い波は表現できない

といった問題がある。本研究ではまず孤立波を用いた水理実験を行い, ビデオ画像から発生メカニズムを明らかにし, これに基づき今回新たにピストン造波モデルを提案し, 強非線形数値シミュレーションモデルと併せて越波伝達波波形予測モデルを作り, 実験値との比較によりその有効性を検証した。

2. 越波伝達波の実験的検討

2.1 実験

本研究では, 高さ 12.0 cm 厚さ 1.5 cm の板(鉛直壁)を直立防波堤とみなして長さ 40 m 幅 30 cm の 2 次元波動水槽のほぼ中央に設置し, その前後に水を入れ, 孤立波を造波して越波伝達波を観測した(図-1)。

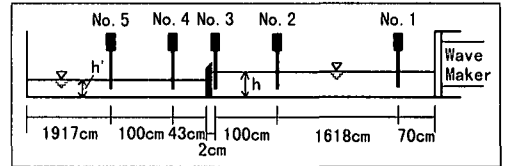


図-1 実験装置

表-1 実験条件(単位: cm)

case No.	h_c'	h'	H_i (No. 2 で観測)
A-1~4	2.0	10.0	1.72, 2.48, 3.16, 3.89
B-1~4	2.0	7.4	1.75, 2.46, 3.20, 3.91
C-1~4	1.9	4.9	1.76, 2.49, 3.23, 4.01
D-1~4	4.5	7.5	1.68, 2.46, 3.14, 3.88
E-1~4	4.5	4.9	1.75, 2.47, 3.20, 3.90
F-1~4	7.0	5.0	1.74, 2.48, 3.16, 3.89

沖側水深 h は 10.0 cm で固定し, 岸側水深 h' は 10, 7.5, 5 cm と変化させ, それぞれに対して 4 通りの入射波高 H_i の孤立波を作用させた(表-1)。水深 5 cm と 7.5 cm のケースでは, 岸側底に板を置くことによって底上げし, 岸側天端高 h_c' を変化させてその影響を検討した。

周期波において越波伝達波は, 個々の越波が発生させる波の合成・干渉したものとして観測される。今回, 入射波として孤立波を採用したのは, 1 回の越波によって生じる越波伝達波を見極めるためである。

実験は屋外で行った。そのため, 風の吹き具合によっては孤立波の伝播中の減衰に違いが生じ, 同じ信号を造波機に送っても鉛直壁における入射波高が若干異なるので注意が必要であった。また, 鉛直壁が傾いていると越波形態が全く違ったものになってしまうので, この取り付けにも注意を要する。

2.2 越波伝達波の発生メカニズム

図-2 の画像は, ケース A-3 の越波伝達波の発生様子をビデオカメラにより捉えたものである。越波流が突っ込む様子を明確にするため, 鉛直壁より岸(左)側には染料が入れている。

鉛直壁の先端を鋭利な形にしているため, 越波流はほとんど空気が混入することなく真下に落ちている。突っ込んだ越波流は渦を巻いているが, その前に第 1 波はほ

* 正会員 工修 (株)エムエーシー (前中央大学大学院)

** 正会員 工博 中央大学理工学部土木工学科

ば形成されている。すなわち、越波伝達波の主要な波は水塊が割り込むことによって生じているといえる。これはすべてのケースに共通していることである。一方、越波流の割り込み形態は岸側水深 h' と岸側天端高 h_c' の組み合わせによって異なり（図-3 参照）、主として突入水深の違いにより次の3つに分類できる。

- a) 越波流が底面まで達していない（ケース A）
- b) 越波流が丁度底面辺りで止まる（ケース B, C）
- c) 越波流が底面で射流状の流れとなる（ケース D, E, F）

2.3 越波伝達波の伝播

水深が 7.5 cm と 10 cm のケースでは伝播に伴い分散し、最大波高が減少し、後続波が生じている（図-4）。

3. 越波伝達波の波形予測モデル

3.1 予測モデルの構成

倉田（1981）は C.P. 波モデルを定量的に取り扱うにあたり、入力条件としての越波量を水理模型実験より決定

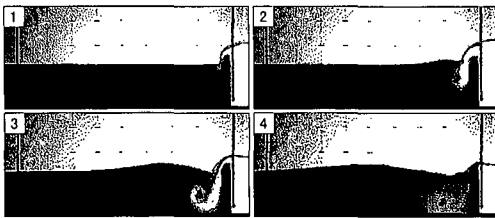


図-2 越波流が突込む様子（2/15 秒間隔）

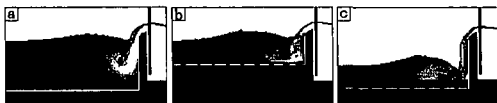


図-3 越波伝達波発生直後（a: A-3, b: C-3, c: F-3）

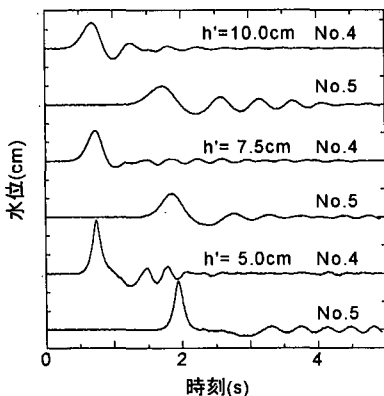


図-4 越波伝達波の伝播（A-3, D-3, F-3）

している。近年、越波量と反射率をエネルギー的に関連づけることにより精度良く越波波形を算定出来る手法が提案された（Mizuguchi, 1993）。この手法を用いれば、入射波条件と天端高を与えるだけで越波波形及び越波量を算定出来る。本研究ではこの手法を用いて入射波条件から越波量を算定し、その越波量を用いて C.P. 波モデルの初期水位上昇量を決定する。今回新たに提案するピストン造波モデルにおける造波板の動きも同様に決める。

3.2 越波量（波形）算定手法

越波がある場合の 1 波あたりエネルギーフラックスの釣り合い式を孤立波に適用すると

$$\begin{aligned} & \rho g H_i^3 \left(\frac{4}{3} \frac{h}{H_i} \right)^{\frac{3}{2}} \\ &= \rho g H_r^3 \left(\frac{4}{3} \frac{h}{H_r} \right)^{\frac{3}{2}} + \rho g \frac{2\sqrt{2}g}{3} \int_{\eta_e > h_c} \eta_e (\eta_e - h_c)^{\frac{3}{2}} dt \\ & \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

となる。ただし、左辺及び右辺第 1 項は孤立波 1 波のエネルギーフラックスであり、右辺第 2 項は越波流のエネルギーフラックスである。式中、 H は波高、 h は水深、 η_e は越波波形、 h_c は天端高を表し、添字の i , r は入射波、反射波を表す。波動理論としては 1 次の孤立波を用いた。水深、入射波高、天端高を既知とし、鉛直壁における越波波形が入射波形と反射波形の線形和で表せると仮定すると、式中の未知数は反射率だけである。従って、この式から η_e が決定できて、1 波あたりの越波量 Q_e は以下の式から求める

$$Q_e = \frac{2\sqrt{2}g}{3} m \int_{\eta_e > h_c} (\eta_e - h_c)^{\frac{3}{2}} dt \dots\dots\dots (2)$$

ここで m は越流係数である。

今回、本実験に先立ち、この越波量算定手法の信頼性を確かめる実験を行った。図-5 の■印は、 $m=1.0$ として素直に実測値と計算値を比較したもので、計算値が大きめになっているのがわかる。この原因としては

- a) 越流係数 m が実際にはもっと小さい
- b) 本実験のスケールが小さく、越波の際の表面張力の影響が無視できない

などが考えられる。本研究では、越流係数を $m=0.8$ とし、さらに天端高を 0.2 cm 実際のものより大きめに見積もることで表面張力の効果を考慮し、以下のモデルの入力条件とした（図-5 の●印）。

3.3 C.P. 波モデル

支配方程式である 2 次元ラプラス方程式（連続式）の初期値問題を、微小振幅波近似して解いたものが C.P. 波解である。松井ら（1980）及び倉田（1981）は、初期条件として、全区間流速ゼロの初期水位上昇を与えている。壁での対称性より、初期水位上昇が偶関数で表せると

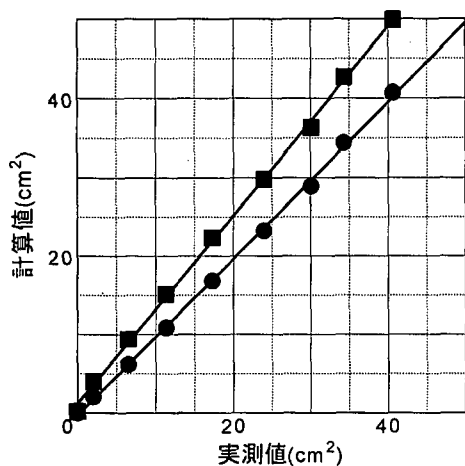


図-5 越波量算定手法の精度

$$\eta(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \eta_0(s) \cos(\sigma t) \cos(sx) ds \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\eta_0(s) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \eta_0(x) \cos(sx) dx, \quad \sigma^2 = g s \tanh(sh) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\eta_0(x)$ は初期水面形状である。倉田 (1981) は規則波の実験との比較からこれを以下のように矩形と仮定した

$$\eta_0(x) = \begin{cases} \bar{\eta}_0 & |x| \leq \bar{x}_0 \\ 0 & |x| > \bar{x}_0 \end{cases}, \quad \bar{\eta}_0 = 0.75 h_c, \quad \bar{x}_0 = \frac{Q_0}{\eta_0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3.4 ピストン造波モデル

既に述べたように、越波伝達波は越波流が割り込むことによって生じているように見える。そこで、この越波流の割り込みをピストン造波機が造波板を押し出すことに置き換えて、越波伝達波を再現することを試みる。越波中の越波流量時系列 $q_e(t)$ は

$$q_e(t) = \frac{2\sqrt{2}g}{3} m \eta_e(t) \{ \eta_e(t) - h_c \}^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表せる。本研究では、

- 割り込んだ越波流は、瞬間的に水面から底面まで鉛直方向に一様に分布する
- 越流中も壁背面の水深は変わらない

と仮定し、(6)を鉛直壁の岸側静水深 h' で割り、造波板の岸向き速度とした。すなわち、図-3で3つに分類した越波流の割り込み形態のうちb)のケースを想定した。

この境界条件によって発生する波を、境界要素法による強非線形2次元水槽数値シミュレーション (Nakayama, 1990) で計算し、このモデルの妥当性を検討する。なお、微小振幅波近似の限界を明確にするためピストン造波機によって生じる波の線形解 (Mizuguchi, 1996) との比較も併せて行った。

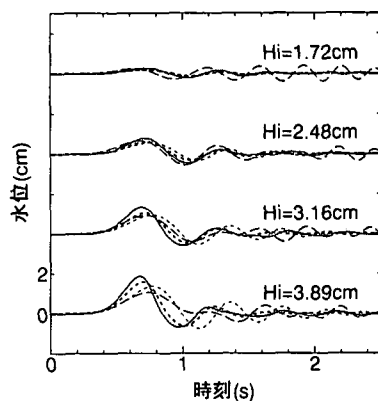


図-6 越波伝達波 (A-1~4の4ch水位データ、細実線：実測値、細破線：C.P.波解、太点線：ピストン造波モデル強非線形ポテンシャルモデル計算値、細点線：ピストン造波モデル線形解)

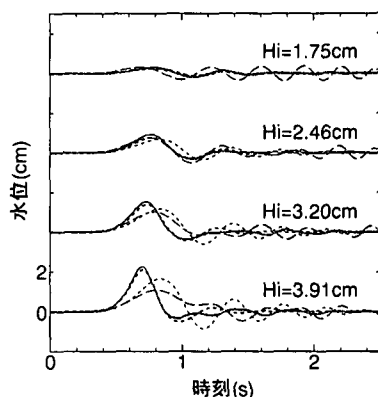


図-7 越波伝達波 (B-1~4, 説明は図-6に同じ)

3.5 モデルの適用性の検討

図-6~11はNo. 4の水位計で観測した越波伝達波(実線)と倉田式C.P.波モデル計算値(細破線)及びピストン造波モデルの強非線形ポテンシャルモデル計算値(太点線)と線形解(細点線)を比較したものである。実測値を計算値と重ねるにあたっては、壁直前の水位が天端高に等しくなってから岸側天端高だけ自由落下するのにかかる時間経過した時刻を $t=0$ とした。

まず、C.P.波モデル(細破線)とピストン造波モデルの線形解(細点線)に着目してみる。いずれの計算値も微小振幅の仮定に基づいて導出されているため非線形性の強い波は計算できていないが、小さい波については当たらずとも遠からずといった感じである。ただし、この矩形初期水位上昇によるC.P.波モデルでは常に大きな後続波が伴うのに対し、ピストン造波モデルの線形解の方

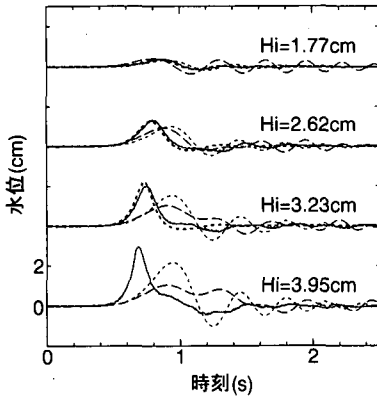


図-8 越波伝達波 (C-1~4, 説明は図-6 に同じ)

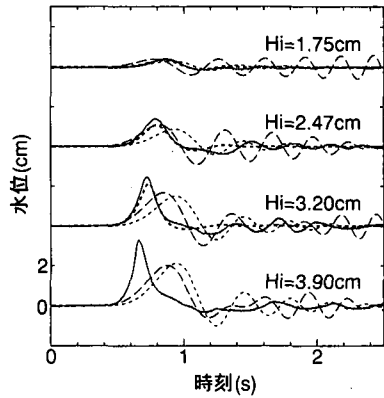


図-10 越波伝達波 (E-1~4, 説明は図-6 に同じ)

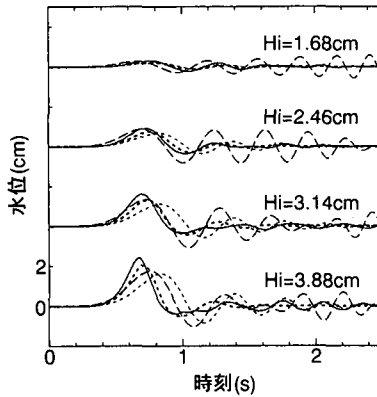


図-9 越波伝達波 (D-1~4, 説明は図-6 に同じ)

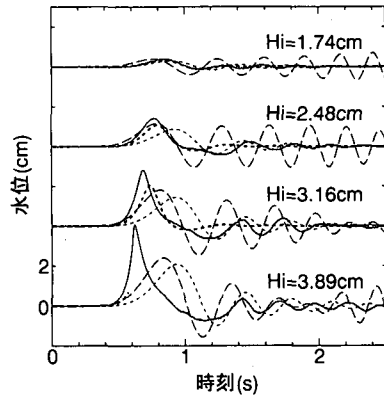


図-11 越波伝達波 (F-1~4, 説明は図-6 に同じ)

は良く収束している。初期値問題に置き換えることの難しさが伺える。

次に、ピストン造波モデルの強非線形ポテンシャルモデルによる計算結果について検討する。水深 5 cm のケースで一部計算結果が無いのは、計算途中で碎波(発散)し、今回用いた数値シミュレーションモデルでは計算不能となるためである。分類 b) の割込み形態のケース(図-6, 7)では、ピストン造波モデルの計算値が実測値と良く合っている。しかし、それ以外のケースではいずれもピストン造波モデルの計算値の方が小さ目になっている。これは造波板速度の決定方法に問題があるためと思われる。

3.6 ピストン造波モデルの修正の試み

本研究では、越波流の割込み形態毎に次のような修正を試みた。まず、分類 a) の割込み形態、越波流が底面まで達しないケースでは、造波板の上部境界 (5.5 cm) だけでピストン造波を行った(造波板下部境界 4.5 cm

では流速を与えない。図-12 の上段)。次に、分類 c) の割込み形態、越波流が底面で射流状の流れを形成するケースでは、水深が若干浅くなることを考慮して、ここで求めた造波板速度を定数倍 (1.25 倍) するという修正を試みた(図-12 の下段)。共に修正後のものは実験結果とよい一致を示すが、この定数 (5.5 cm, 1.25 倍) を見積もる目安は今のところ無く、今後の研究課題である。ここでは実験のビデオ映像を参考に、第一波の最大水位が合うように試行錯誤して決めた。

3.7 伝播特性

図-13 は越波伝達波の伝播を計算モデルが再現できているかどうか示す図である。ピストン造波モデルの計算には上記の修正を行ったものを用いた(ただし A-3 の線形解の方は無修正)。水深 10 cm の方は波の分布が広がっており明らかに分散しているが、いずれのモデルでもよく再現出来ている。しかし、水深 5 cm の方は線形解の場合、特に C.P.波モデルでは、No. 4 の水位計の地点で

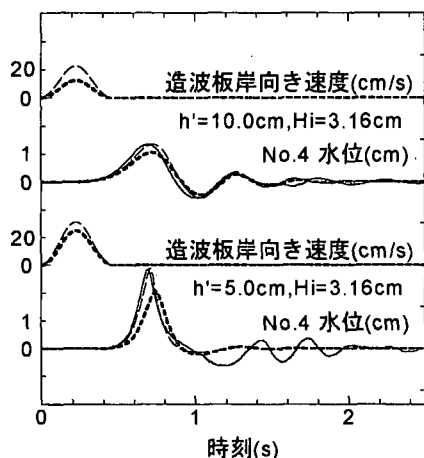


図-12 越波伝達波修正計算値(A-3, F-3, 細実線:実測値, 太点線:ピストン造波モデル強非線形ポテンシャルモデル計算値修正前, 細破線:同じく修正後)

既に越波伝達波を再現できていないので判断は難しいが、線形解は過剰な分散を示すようである。ピストン造波モデルの強非線形ポテンシャルモデル計算値の方はこちらの水深でもよく再現している。

4. おわりに

以上より得られた結論は以下の通り

- 越波伝達波は主に越波流の割り込みによって生じる
- 越波伝達波は、越波流の割り込みをピストン造波機の造波板の押し出しと見なすことによって、C.P.波モデルより精度良く再現出来る

しかし、その造波板の押し出し量を定量的に決定するには、越波流の割り込み形態毎にモデル化する必要があるが、以下のケースではそのモデル化が今後の研究課題として残る

- 越波流が底面まで達しない(岸側水深が深い、天端高が小さい) ケース

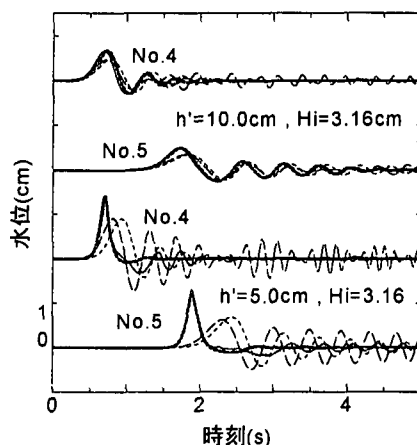


図-13 越波伝達波の伝播(A-3, F-3, 線種の説明は図-6と同じ)

- 越波流が底面で射流状の流れを形成する(岸側水深が浅い、天端高が高い) ケース

参 考 文 献

- 倉田克彦(1981): 越波による伝達波高, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 339-342.
- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 78, 333 p.
- 合田良実・竹田英章(1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 87-92.
- 松井政博・倉田克彦・萩野英樹・鈴木 功(1980): 越波による伝達波特性(Cauchy-Poisson 波によるモデル化), 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 410-413.
- Mizuguchi, M. (1993): Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 36, No. 1, pp. 37-47.
- Mizuguchi, M. (1996): Analytical solutions of non-periodic wave generation and its inverse problem, (投稿中).
- Nakayama, T. (1990): A computational method for simulating transient motions of an incompressible inviscid fluid with a free-surface. Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 10, pp. 683-695.