

共鳴装置付潜堤の消波効果に関する研究

松見吉晴*・山本雄平**・木村 晃***・横田泰弘****

1. ま え が き

海岸侵食制御等の海岸防災あるいは、海浜利用等の目的をもった潜堤および人工リーフは、各地で計画・施工されている。この潜堤および人工リーフは、その消波機構上、天端水深を浅くすると共に、天端幅を波長に対して広くとって消波効果を期待するものであることから、構造物としては非常に巨大なものとなる欠点をもっている。そこで、先の著者らの研究(1995)では、潜堤の断面形状を小さくするため、最近注目されている波浪フィルター理論(中村ら, 1994; 清川ら, 1994)による波エネルギーのトラップ効果や、波の位相効果を利用した共振装置を潜堤に付加することにより、消波効果が期待できるのではないかと着想し、図-1に示すような潜堤天端に矩形のくぼみ(以下、共振装置と呼ぶ)をつけた。この共振装置は、共振装置内での波の反復反射を利用すると共に、この装置から反射波が沖側と岸側へ伝播し、入射波および透過波との間に生じる位相のズレを利用して、反射波および透過波の両方に対して消波効果を期待しようとするものである。本研究は、この共振装置付潜堤の消波効果について潜堤周辺の波浪変形計算に関する強非線形ポテンシャルモデルに基づいた数値波動実験より検討するため、まず数値波動実験の妥当性を模型実験より検証し、ついで消波効果に対する共振装置の有効サイズを検討したものである。

2. 数値波動実験

本数値実験で用いたシミュレーション手法は、波浪場に対してオイラー的な速度ポテンシャルを求めながら、水面の境界条件をラグランジュ的に表すことにより、非線形な境界条件を厳密に取り入れることができるオイラー・ラグランジュ法(Donaldら, 1984; Sawaragiら, 1989)を基に、境界積分要素法を適用して潜堤に拡張したものである。以下に、その手法の概略を示す。

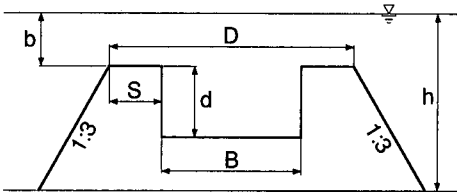


図-1 共振装置付潜堤モデル

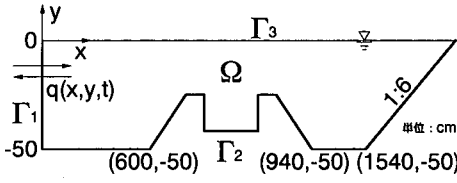


図-2 数値波動水槽モデルの説明図

(1) 計算の概略

本研究では、図-2に示す座標系を対象に、波動場に対して非圧縮、非粘性流体の非回転波動を仮定し、流体運動を速度ポテンシャル $\phi(x, y, t)$ で表示する。この速度ポテンシャルに関するラプラス方程式に対して、グリーンの公式を適用して次式の積分方程式が得られる。

$$C_p \phi(x_0, y_0, t) = - \oint_r \phi(x, y, t) \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) d\Gamma + \oint_r \frac{\partial \phi(x, y, t)}{\partial n} \ln r d\Gamma \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$$C_p = \begin{cases} 0 & (x_0, y_0) \text{ が境界領域外} \\ \pi & (x_0, y_0) \text{ が境界 } \Gamma \text{ 上} \\ 2\pi & (x_0, y_0) \text{ が境界領域内 } \Omega \end{cases}$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

(x_0, y_0) は流体場の注目点、 n は境界面での外向きの法線方向を示す。この積分方程式に含まれる未知数である境界上の速度ポテンシャル ϕ とその法線微分値は、次に示す造波板 Γ_1 および固定境界面 Γ_2 での境界条件、並びに自由表面 Γ_3 での運動学的および力学的境界条件の下

* 正 会 員 工 博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科
** 正 会 員 工 修 株式会社テトラ
*** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科
**** 学生会員 鳥取大学大学院 社会開発システム工学専攻

に解くことにより決定される。

[造波板, 固定境界上の境界条件]

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial n} = q(t) \quad \Gamma_1 \text{ 上} \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \Gamma_2 \text{ 上} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

[自由表面での境界条件]

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dX(t)}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \Gamma_3 \text{ 上} \\ \frac{dY(t)}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \Gamma_3 \text{ 上} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 - gY \quad \Gamma_3 \text{ 上} \dots\dots\dots (4)$$

ここに, X, Y は水面上の水粒子のラグランジェ座標, g は重力加速度である。

自由表面上の節点の移動および速度ポテンシャルの時間発展の方法には, Sawaragi ら (1989) の X, Y および ϕ の 2 階の微分値まで用いたテラ展開に基づく方法を採用し, それに伴う未知数である ϕ の時間微分値の計算についても上述の ϕ の解法と同様に造波板, 固定境界および自由表面での境界条件を満足させて行われている。計算の時間ステップ Δt は, Longuet-Higgins ら (1976) の提案した Courant-Friedrichs-Lewy 条件を満足するように与えている。

数値計算の精度については, 安田ら (1991) のエネルギー保存則に対する次式で与えられる誤差指標 ε を用いて評価している。

$$\varepsilon = \frac{E(t) - E(0)}{E(0)} \dots\dots\dots (5)$$

ここに, $E(t)$ は時間 t における流体場の全エネルギー (= 位置エネルギー + 運動エネルギー) である。本数値計算では, ε の値が 0.01 を越えた時点で Longuet-Higgins ら (1976) によって提案された 5 点補間による平滑化を波形および速度ポテンシャルに対して導入し, その後は ε の値に関係なく時間ステップの 5 ステップ毎に 1 回の割合で平滑化を行った。この結果, 全計算ケースにおける数値誤差が 3.5% 以下に留めることができた。

(2) 実験条件

数値波動水槽モデルは, 図-2 に示すように長さ 15.4 m の水平床と 1/6 勾配の斜面からなっている。造波板はピストン型で, その造波振幅は各々の入射波周期に対して計算が可能な限り大きくとった (潜堤モデル天端上で非碎波の条件)。

共鳴装置付潜堤モデルは, モデル沖側法先部が造波板より 6.0 m の位置に設置されている。潜堤モデルは, 消波効果に及ぼす共鳴装置のサイズの影響を検討するため, 表-1 に示すように共鳴装置の幅 B , 深さ d および天

端法肩幅 S , さらにはモデル天端幅 D を変化させた共鳴装置付潜堤 (RSW) と共鳴装置を持たない通常の潜堤モデル (TSW) を対象とした。なお, 潜堤モデルの法面勾配は, 全て 1:3 である。各モデルは水深 50 cm の水平床に設置し, 天端上水深は 10 cm 一定とした。

表-1 各潜堤モデルのサイズ

D (m)	0.8	1.0	1.2	1.3	1.7
B (cm)	70	0, 70	70	100	140
d (cm)	20	0~40 cm を 5 cm 間隔	20	20	20
S (cm)	5	15	25	15	15

各潜堤モデルの透過率の算定には, 透過波の一周期平均エネルギーと入射波エネルギーの比の平方根 (大山, 1989) の定義に基づいて計算した。その際, 入射波および透過波のエネルギー計算位置は, それぞれ造波板から 2 m の位置および潜堤モデル岸側法先から 1 m の位置で行っている。なお, 本数値波動水槽は反射吸収制御を取り入れていないため, 入射波および透過波の算定には, それぞれ造波板からの再反射波および岸側スロープからの反射波が到達する時間ステップまでの計算水位変動波形を用いている。

3. 模型実験による検証

(1) 実験装置と方法

ここでは, 模型実験より測定された共鳴装置付潜堤モデル周辺の水位変動および波高の空間変化に関して, 数値計算結果と比較することより数値波動実験の妥当性を検証する。実験に用いた造波水槽は, 長さ 29 m, 幅 50 cm の 2 次元水槽で, 数値波動水槽モデルと同様のピストン型造波装置を有する。岸側スロープの勾配および設置位置は, 数値モデルと同様に 1:6 および造波板から法先が 15.4 m になるよう設置している。

実験に使用した潜堤モデルは, $D=1$ m, $B=70$ cm と 0 cm, $d=20$ cm と 0 cm の RSW モデルと TSW の 2 種類について行った。潜堤模型は, L 型鋼性アングルによる骨格構造にアクリル板を取り付けたものである。潜堤の設置位置および水位変動測定の代表的な位置は, 図-3 に示す通りである。なお, 潜堤モデル周辺の水位変動は, 図-3 に示す以外に $x=3.5$ m~11.9 m までを 30 cm 間隔で測定している。入射波条件は, 周期 T を 1.0~2.1 秒の間で 0.1 秒間隔で変化させ, 波高については潜堤モデル上での非碎波条件下で可能な限り大きくとった。

(2) 検証結果

図-4 は, 周期 $T=1.7$ s の波を入射波としたときの共鳴装置付モデル ($B=70$ cm, $d=20$ cm) 周辺部 (潜堤沖側法肩: $x=7.35$ m, 岸側法先: 9.4 m) の水位変動 η の

時間波形について、模型実験結果と計算結果をそれぞれ示したものである。縦軸は η を入射波高 H_i で無次元化している。この入射波条件は、共鳴装置で励起される副次的な短周期成分波が認められるケースであり、計算結果は実験結果に見られる大きな峰の後に続く小さい峰の時間変化の特徴を再現している。

図一5は、共鳴装置付潜堤モデル周辺の波高の空間変化について計算結果と模型実験結果を比較して示したもので、縦軸には波高 H を入射波高 H_i で無次元化した値をとり、横軸は造波板からの水平距離 x を表す。なお、各位置での波高は、計算結果および実験結果共にゼロアップクロス法で解析している。図中 $x=6.0$ mから 9.4 mの範囲に潜堤モデルが設置されている(▲印で表示)。これらの図より、潜堤モデル沖側および天端上での計算

結果と実験結果の対応性は良く認められる。

一方、透過波側では波の分裂を本モデルが図一4に示したように特徴を再現するものの、全ケースについて完全に評価するまでに至っていないことから、 $T=1.4$ sおよび 1.8 sの場合、ゼロアップクロス法で定義された計算結果の波高が小さめに評価されている。

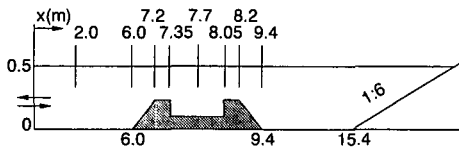
以上のような比較検討より、本数値波動実験は、入射波周期によっては透過波領域における波高の評価に問題を残すが、共鳴装置付潜堤モデル周辺の波の変形を再現することが確認された。

4. 共鳴装置付潜堤の消波効果

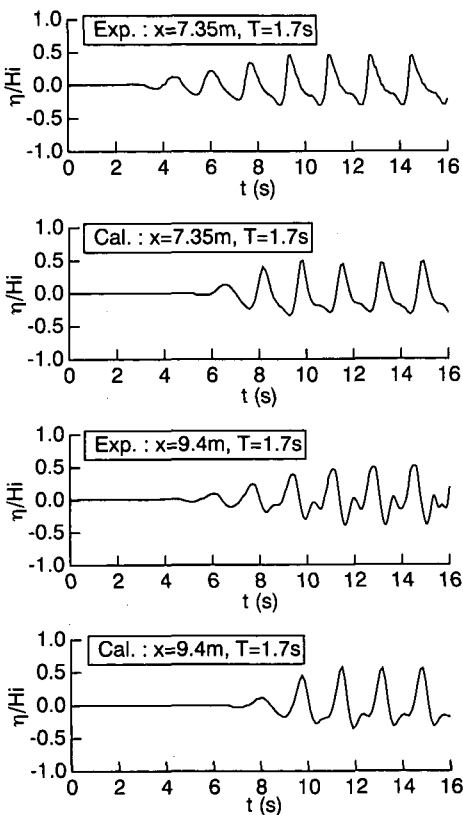
ここでは、共鳴装置付潜堤の消波効果に及ぼす共鳴装置の有効サイズについて、数値波動水槽モデルを用いて検討する。

(1) 透過率に及ぼす共鳴装置の深さの影響

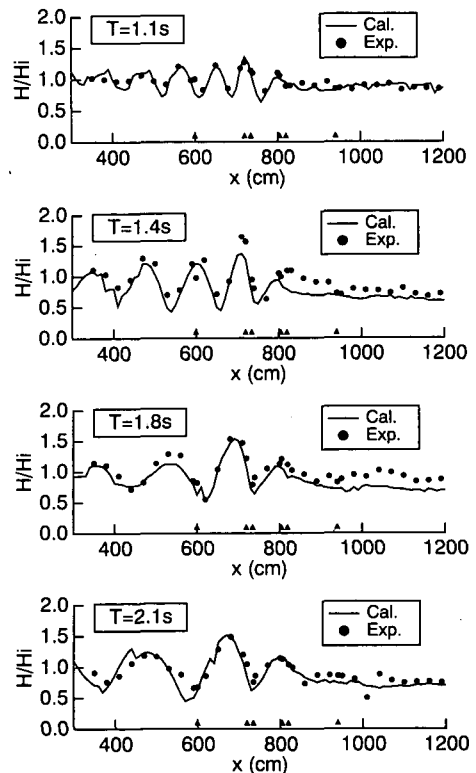
図一6は、 $B=70$ cmの潜堤モデルを対象に共鳴装置の深さ d を $5\sim 40$ cmまで 5 cm間隔で変化させたときの透過率 K_t の変化を示したもので、図中にはTSWモデル($d=0$ cm)の結果も併記している。横軸には共鳴装置の深さ d と潜堤高さ($h-b$)の比をとっている。図より、入射波周期の違いにかかわらず、透過率は d の増加に



図一3 模型実験の概略図



図一4 水面変動の時間変化に関する比較



図一5 波高の空間変化に関する比較

伴って減少し、 $d/(h-b)=0.5$ 程度以降ほぼ一定値に近づく傾向が認められる。

次に、透過率に及ぼす共鳴装置の深さの影響について、図-7に示す共鳴装置の深さの違いによる潜堤モデル周辺の波高の空間変化に関する計算結果の1例($B=70$ cm 一定, $T=1.8$ s)より検討を行う。まず潜堤天端上の波高の変化は、共鳴装置による水深の急増により d が大きい程波高の低下が大きく、岸側法肩部における水深の急減によって波高がまた増加するが、 d が20 cm 以上の場合の波高が最も小さい。これは、分裂した短周期波の波長と共鳴装置内の水深に関係付けられるためと推察する。一方、反射域では部分重複波の振幅を増大させるが、その影響は潜堤モデル沖側法先水深から1波長半程度離れると急激に減少する。また、部分重複波形の空間変化からは、共鳴装置の深さの違いによる反射波の位相のズレの影響は認められない。

以上のことから、透過域の波高の低減に対しては、共鳴装置による水深の急増が効果的に作用し、共鳴装置の有効深さは図-6より堤体高さの5割以上にとれば、消波効果の向上が期待できると考えられる。以下のRSWモデルの消波効果の検討には、 $d/(h-b)=0.5$ として計算を行うことにした。

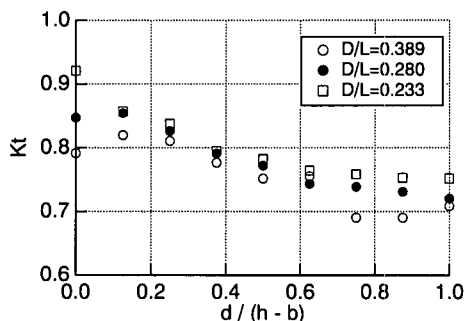


図-6 透過率に及ぼす共鳴装置深さの影響

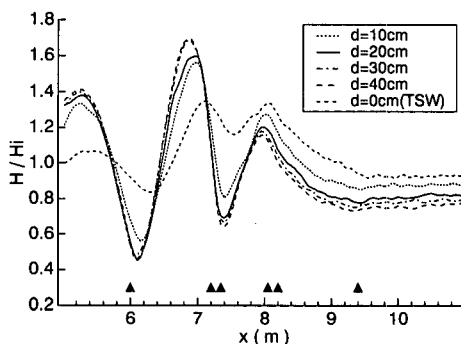


図-7 波変形に及ぼす共鳴装置深さの影響

(2) 透過率に及ぼす共鳴装置の法肩幅の影響

ここでは、共鳴装置の幅 $B(=70$ cm)および深さ $d(=20$ cm)を固定して天端法肩幅 S の透過率に及ぼす影響を検討する。図-8は、 S をパラメータにとって透過率と入射波周期の関係を示したもので、横軸には水深波長比 h/L をとっている。なお、天端幅 D は、共鳴装置幅を一定にしていることから各 S 毎に異なっている。

透過率に及ぼす法肩幅の影響は、図-8より入射波周期が短い場合には S の値の違いがほとんど現れないが、長周期側では $S=5$ cm で高い透過率を示す。また、 $S=15$ cm と25 cm では、 $h/L=0.12$ 付近で透過率に差があるものの、本計算条件の範囲では大差は認められない。従って、以下の計算では $S=15$ cm を採用して共鳴装置幅 B の影響について検討を進めることにした。

(3) 透過率に及ぼす共鳴装置幅の影響

RSWモデルの消波特性は、著者ら(1995)が既に明らかにしたように共鳴装置幅と入射波周期の関係に強く依存する。ここでは、RSWモデルの消波効果に及ぼす共鳴装置幅の影響を検討するため、入射周期 $T=1.0\sim 2.1$ 秒まで0.1秒毎に3種類のRSWモデル($B=70, 100, 140$ cm)について透過率を比較検討した。なお、法肩幅および共鳴装置深さは、それぞれ上述したように $S=15$ cm, $d=20$ cm とした。計算結果の整理に当たっては、潜堤天端幅が B の値によって異なることを考慮して、図-9に示すように横軸に B/L をとっている。この図より、RSWモデルの透過率は、共鳴装置幅に依存するものの、 B/L によって一義的に決定されることがわかる。

(4) RSW と TSW モデルの消波効果の比較

図-10は $B=70$ cmのRSWモデルと同等の天端幅 D をもつTSWモデルについて、それぞれの消波効果を透過率で比較したものである。この図より、RSWモデルの透過率の変化の特徴としては、 $D/L=0.38$ および $D/L=0.82$ 付近でピーク値を持つような入射波周期に強く依存した消波特性を示すことが再確認できる。また、TSWモデルと比較して、天端幅が同じ場合、長周期の入射波

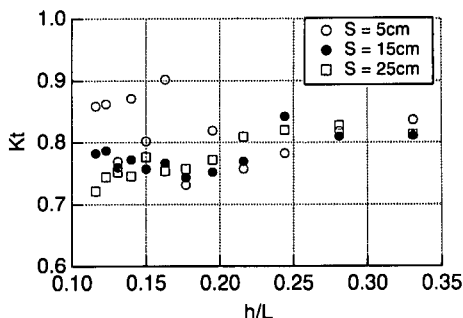


図-8 透過率に及ぼす共鳴装置の法肩幅の影響

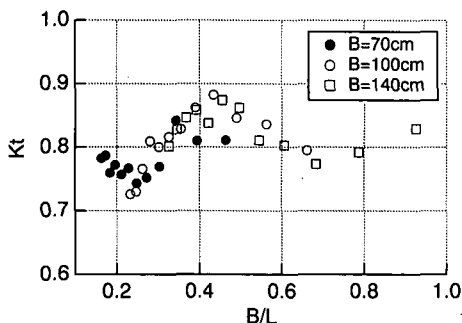


図-9 透過率に及ぼす共鳴装置幅の影響

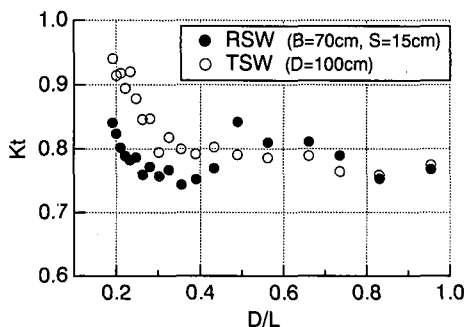


図-10 RSW と TSW モデルの透過率の比較

に対して高い消波効果をもち、短周期の入射波に対してはほぼ同程度の消波効果を得ることができる。以上のことから、共鳴装置付潜堤モデルは、非碎波の条件の下では従来の潜堤の消波効果を保持し、かつ断面積を小さくできる特徴があると指摘できる。

5. あとがき

本研究では、従来の潜堤の天端面に矩形断面のくぼみをつけた共鳴装置付潜堤の消波効果について、数値波動実験により検討を行った。透過率に及ぼす共鳴装置の大きさの影響については、特に共鳴装置深さが堤体高さの

5割以上にすれば効果的であること、また共鳴装置幅の影響は入射波周期との関係で一義的に決定されることが確認された。法肩幅の影響については、法肩幅を短くすると本計算条件の範囲において長周期側で透過率を増大させる傾向にあった。共鳴装置付潜堤の消波効果については、潜堤天端上での非碎波の条件の下で従来の潜堤モデルと比較して、長周期の入射波に対して優れた効果を発揮することが認められ、短周期の入射波に対しても従来の潜堤の消波効果を保持し、かつ断面積を小さくできる特徴があることがわかった。

参考文献

- 大山 功 (1989): 円柱列に作用する孤立波、クノイド波の波力と反射率・透過率の解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 489-493.
- 清川哲志・望月 仁 (1994): 波浪フィルタ型構造物による波浪制御, 海岸工学論文集, 第41巻 (1), pp. 616-620.
- 中村孝幸・望月 仁・仲子敏史 (1994): フィルター理論に基づく共振装置型堤体列の波浪制御効果について, 海岸工学論文集, 第41巻 (2), pp. 621-625.
- 松見吉晴・石田明雄・木村 晃 (1993): 幅広潜堤内に発生する流体圧力の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻 (2), pp. 781-785.
- 松見吉晴・木村 晃・山本雄平 (1995): 波の反復反射を利用した共鳴装置付魚礁潜堤の消波効果, 海岸工学論文集, 第42巻 (2), pp. 756-760.
- 安田孝志・原 正典・榎原幸雄 (1991): BIMを用いたステップによる孤立波の碎波を伴う変形とその法則, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 87-96.
- Donald, J. W. and D. H. Peregrine (1984): Steep unsteady water waves - An efficient computational scheme, Proc. 19th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 643-647.
- Longuet-Higgins, M. S. and E. D. Cokelet (1976): The deformation of steep surface waves on water, I. A numerical method of computation, Proc. Roy. Soc. Lond. A, Vol. 350, pp. 1-26.
- Sawaragi, T. and M. Nochino (1989): Water wave breaking on uniform slope, Proc. Int'l Symp. on Computational Fluid Dynamics, Nagoya, pp. 989-994.