

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

松見吉晴*・木村 晃**・山本雄平***

1. ま え が き

潜堤および人工リーフは、海岸の防災機能と、副次的な機能として沿岸域の水産生物の生息環境の場を提供していることはよく知られている事実である。この水産生物に対する機能をより有効に利用するには、天端上の水域空間を広げることが有効であると考えられている。しかし潜堤および人工リーフは、その消波機能が、天端水深を浅くして、碎波による消波効果を期待するものであることから、両者の機能は相反することになる。そこで、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）に基づいた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て、図-1に示すような潜堤天端に矩形のくぼみ（以下、共鳴装置と称す）をつけた。

この共鳴装置は、共鳴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、この共鳴装置付魚礁潜堤の消波効果について、既に筆者ら（1993）が示した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と共に、その妥当性を模型実験から検証したものである。

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。

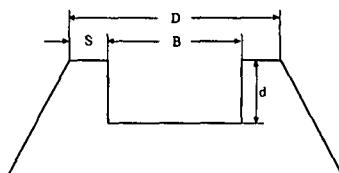


図-1 共鳴装置付魚礁潜堤モデル

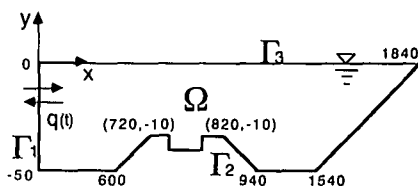


図-2 数値波動水槽モデル

(1) 計算の概略

本研究では、図-2に示す座標系を対象にして、非圧縮、非粘性流体の非回転波動を仮定する。この仮定により得られる速度ポテンシャル ϕ 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。

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

ここに、 C_p は係数で境界 Γ 上の場合には π 、流体内部領域 Ω の場合には 2π をとり、 r は境界上の任意の点 (x, y) と注目点 (x_0, y_0) との距離、 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、すなわち境界上の速度ポテンシャル ϕ とその法線微分値を次に示す造波板 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]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} &= q(t) & \Gamma_1 \text{ 上} \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 & \Gamma_2 \text{ 上} \end{aligned} \dots (2)$$

* 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

[自由表面での境界条件]

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \Gamma_3 \text{ 上} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \Gamma_3 \text{ 上}$$

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

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関しては、Sawaragiら(1989)の X 、 Y および ϕ の2階の微分値まで用いたテーラー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 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。なお、自由表面における各々の物理量の空間微分値の計算は3次のスプライン曲線を利用して行われている。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。

(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の水平床と勾配1/6の斜面からなっている。造波板はピストン型で、その造波振幅について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)。

共鳴装置付魚礁潜堤モデルは、造波板より6 mの位置に潜堤モデル沖側法先部が位置するように設置されている。潜堤モデルとしては、通常の潜堤モデルと、それと同一の大きさ(天端幅 $D=1$ mと3 m、法面勾配1:3)の共鳴装置付モデルを対象とした。共鳴装置の幅 B 、深さ d および天端法肩幅 S は、表-1に示す通りである。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。

各潜堤モデルの反射率の算定には、合田らの入射波分離推定法(1976)を適用した。透過率は、潜堤モデル岸側法先部から1 m離れた位置における一周期平均透過波エネルギーと入射波エネルギーの比の平方根の定義(大山, 1989)に基づいて計算した。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、反射率およ

び透過率の算定には、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波形を用いている。

3. 模型実験による検証

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部の水位変動、反射率および透過率に関して、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の検証を行う。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、ピストン型造波装置を有するものである。実験は、 $D=1$ m、 $B=70$ cm、 $d=20$ cmの共鳴装置付魚礁潜堤モデルについて行った。潜堤模型は、L型鋼性アングルによる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波高計の設置位置は、図-3に示す通りである。入射波条件は、周期 T を0.8~2.3秒の間ではほぼ0.1秒ごとに变化させ、波高については潜堤上での非碎波条件下で可能な限り大きくとった。

図-4は、入射波周期 $T=1.0$ s、1.6 s、2.1 sに対する共鳴装置付モデル($B=70$ cm、 $d=20$ cm)周辺部の波高

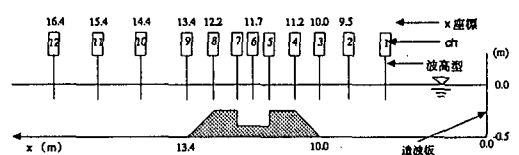


図-3 模型実験の概略図

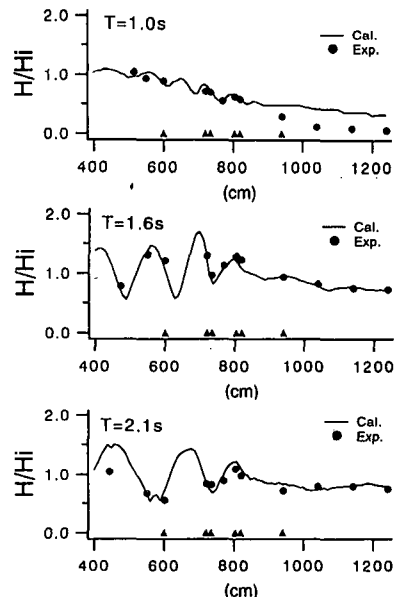


図-4 波高の空間変化に関する比較

表-1 各潜堤モデルのサイズ

D (m)	1.0				3.0
B (cm)	0	30	50	70	200
d (cm)	0	20	10, 20, 30	10, 20, 30	20
S (cm)	100	35	25	15	50

の空間変化について数値実験と模型実験の結果を比較したもので、縦軸には各位置における波高 H を入射波高 H_i で無次元化した値をとっている。なお、図中6mから9.4mの範囲に潜堤モデルが設置されている。これらの図より、周期が短い $T=1.0$ sの場合、数値実験結果は透過波領域で模型実験結果を過大に評価する。この傾向は、他のサイズの共鳴装置の場合にも認められた。

図-5は、 $B=70$ cm、 $d=20$ cmの魚礁潜堤モデルに $T=1.8$ sの波を入射させたときの図-3に示す波高計9と10chの位置における水面変動 η の時間波形について、数値実験結果と模型実験結果をそれぞれ示したものである。このケースは共鳴装置で励起される副次的な短周期成分波が顕著に認められないが、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。

以上のような比較検討より、本数値波動実験は、入射波周期が1s以下の場合、透過波領域における波高を過大評価する問題を残すが、それ以外の周期については共鳴装置付魚礁潜堤モデル周辺の波の変形を良く再現することが確認された。

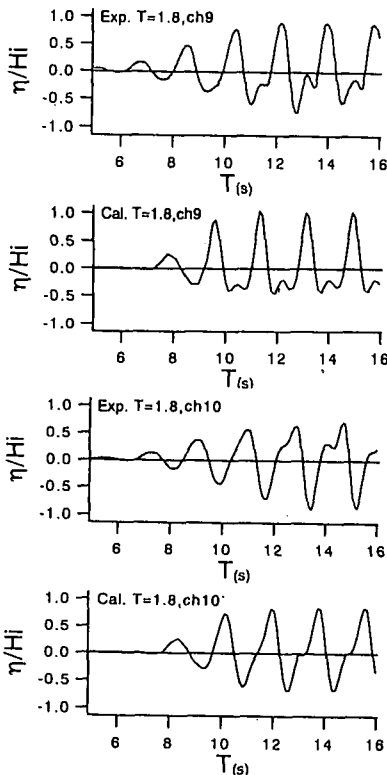
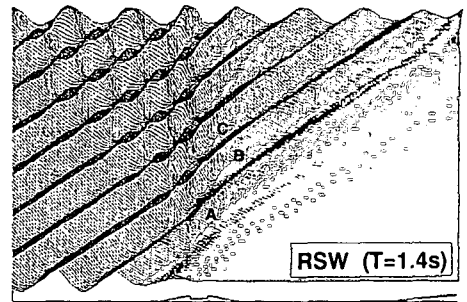


図-5 水面変動の時間変化に関する比較

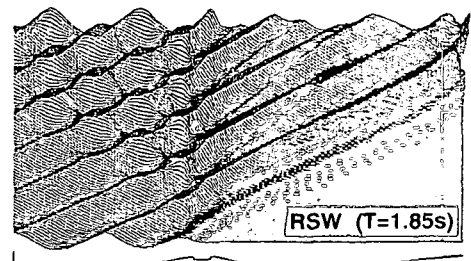
4. 共鳴装置付魚礁潜堤の消波特性

(1) 共鳴装置による波の変形の特徴

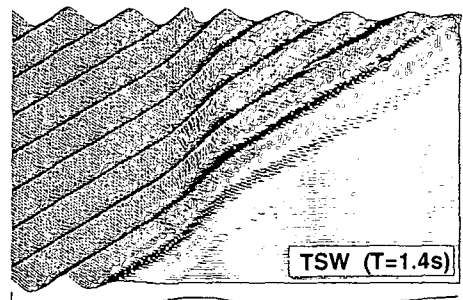
図-6は数値波動水槽内に波を造波してから、第1波目が潜堤モデルに到達した後の水槽全体の水位変動の時間空間変化を示したものである。図(a)と(b)が共鳴装置付魚礁潜堤モデル(RSW)の場合で、図(c)が通常の潜堤モデル(TSW)の場合である。入射波周期 $T=1.4$ sの同図(a)の場合、共鳴装置付潜堤モデル天端上での波の変形を時間を追って見ると、図中Aで示している時間において潜堤沖側法面からの反射の影響を受けて波が変形し始め、Bにおいて共鳴装置の水深の急増による変形が生じ、Cにおいて共鳴装置内での反射に伴う波変形が現れ出している。さらに時間が経過すると、このよう



(a) 共鳴装置付魚礁潜堤モデル ($T=1.4$ s)



(b) 共鳴装置付魚礁潜堤モデル ($T=1.85$ s)



(c) 通常の潜堤モデル ($T=1.4$ s)

図-6 水槽全体の水位変動の時間空間変化

な影響の相互作用により、潜堤モデル天端上での波は非線形波の特徴が顕著に現れ、共鳴装置内で形成される波の反復反射や、共鳴装置による水深の不連続性に伴って生じるであろう副次的な波の混入が目立ち始める。しかし、潜堤モデル通過後の波には、この共鳴装置によって形成された成分波の明確な存在は認められない。

一方、 $T=1.85$ s の図 (b) の場合、潜堤モデル天端上での波の峰の形状は、(a) の場合と比較してより急峻化し、潜堤モデル通過時に波の分裂のような現象がみられる。その結果、透過側の波に短周期の波の発生がみられ、この短周期の成分波は波速の違いにより、後続波に追いつかれながらもほぼ等速で伝播されることがわかる。この波の分裂のような現象が共鳴装置内の波の反復反射との干渉によって励起されるものか、また水深の不連続性に強く依存して発生するものか、また両者の相互干渉によるものか明かになっていない。この点については、今後さらに検討する予定である。

このように副次的な短周期の成分波を伴う場合、透過率を透過波の波高と入射波の波高の比で定義すると、透過波を測定する位置によって透過率が誤算される危険性が十分にあることから、先に述べたように入射波の1周期分の透過エネルギーで評価することにした。一方、反射域では、(a) と (b) 図を比較しても、透過域でみられるような短周期の成分波の顕著な伝播が認められないことから、合田らの入反射波分離推定法により反射率の算定を行った。

一方、図 (c) の通常の潜堤モデル (TSW) の場合、天端上での波峰前面の急峻化はあるものの、短周期の成分波は発生していない。反射領域における波の変形パターンについて、先の共鳴装置付潜堤モデルの場合と比較すると、明らかに共鳴装置による水深の急増および急減に伴う反射波、並びに共鳴装置内での波の反復反射が波の変形に対して影響している様子がわかる。

次に、反射域および透過域の波の変形に及ぼす共鳴装置の大きさの影響について検討するため、共鳴装置のサイズ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例を図-7に示す。図には通常の TSW モデルの計算結果も併記している。図中の三角印が潜堤モデルの設置位置を示している。まず、共振装置の幅 B の変化に注目した同図 (a) をみると、 B によって部分重複波の節および腹の位置が沖側にずれ、共鳴装置幅が広い方が部分重複波の振幅を増大させる。この部分重複波に対する共鳴装置の影響は、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し、非常に興味深い現象であるが、その原因は明かでない。一方、天端面を通過後の潜堤モデル岸側法面では波高は、共鳴装置幅が広いほど急激に減少し、その後の波高変化には共鳴装置

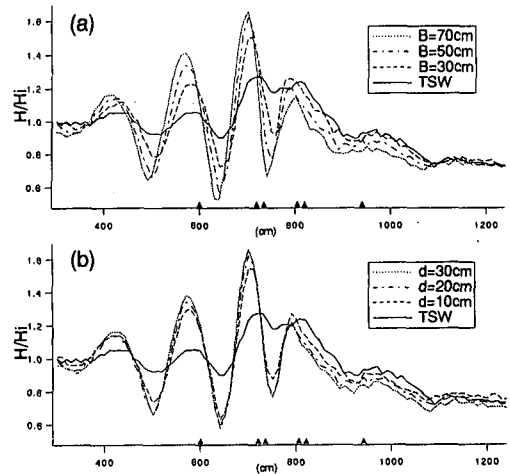


図-7 波変形に及ぼす共鳴装置のサイズの影響

の影響は認められない。従って、共鳴装置付魚礁潜堤としては、堤体前面部の部分重複波の振幅を増大させるものの、共鳴装置による種々の干渉波により、その影響の伝播範囲は大きくないことが特徴の1つに挙げられる。また、(b) 図より共鳴装置幅が一定で深さ d の影響は、部分重複波の振幅を増大させるだけで、当然の結果として反射波の位相のズレは現れていない。以上のこより、共鳴装置付魚礁潜堤の消波効果は、入射波周期の影響を受けて、従来の共振装置型消波工のように変動することが推測される。

(2) 反射率および透過率

図-8 および図-9 は、共鳴装置幅 $B=70$ cm および $B=200$ cm の RSW モデルの反射率 K_r と透過率 K_t の数値波動実験と模型実験結果を、横軸に潜堤モデル天端幅 D と入射波長 L (水深 50 cm) の比を取って示したものである。図中には、比較のため TSW モデルの数値波動実験結果も併記している。まず、これらの図より、計算結果と実験結果を比較すると、反射率および透過率共に定量的には若干の差が認められるが、計算結果は実験結果にみられる D/L の変化を再現していることがわかる。従って、共鳴装置付潜堤モデルの消波特性について、本計

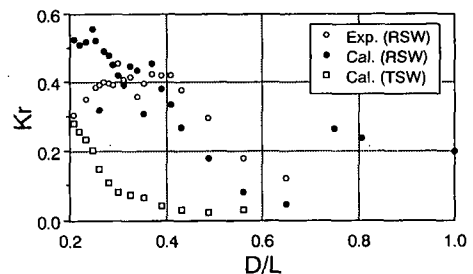


図-8 反射率に関する計算結果と実験結果の比較

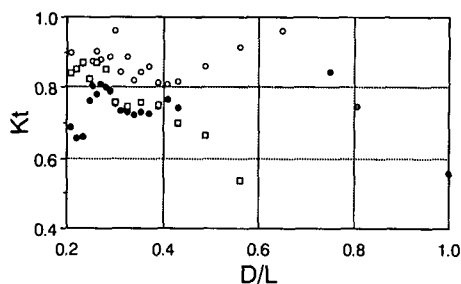


図-9 透過率に関する計算結果と実験結果の比較

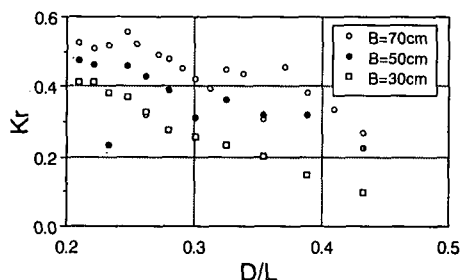


図-10 反射率に及ぼす共鳴装置の幅の影響

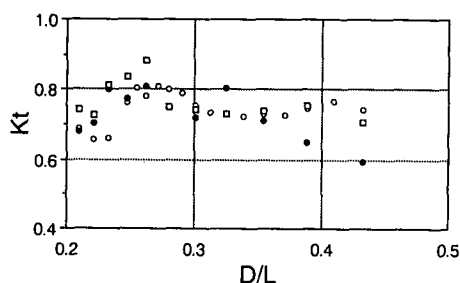


図-11 透過率に及ぼす共鳴装置の幅の影響

算モデルによって検討しても差し支えなからう。

RSW モデルの反射率は、非砕波条件の下で、TSW モデルと同じように D/L の増加に伴って減少するが、その値は TSW モデルより大きくなる。また、RSW モデルの反射率の D/L による変化には、従来の共振タイプの反射特性に見られるような特定の入射波周期に強く依存した急激な変化は、計算結果に若干見られるものの、その変化量は大きくない。一方、RSW モデルの透過率については、TSW モデルの反射率の D/L による変化と同じ変化特性を示すと共に、ほぼ同程度の値をとることがわかる。以上のことから、共鳴装置付魚礁潜堤は、非砕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ことが確認できる。なお、 $D/L=0.7$ 付近で、反射率および透過率が大きくなっているの

は、RSW モデルの天端法肩幅と共鳴装置幅の比 S/B が $D/L=0.7$ を境にして異なるためである。この結果、RSW モデルの法肩幅は、消波特性の重要なパラメータの 1 つになることがわかる。

次に、RSW モデルの反射率および透過率に及ぼす共鳴装置幅の影響について示したのが図-10 と 11 である。図-7 で示したように共鳴装置幅が部分重複波の振幅の増幅に強く関係することから、反射率は共鳴装置幅が広いほど大きな値になる。一方、透過率については、反射率の場合のような共鳴装置幅による明確な差は認められない。

5. あとがき

本研究では、魚礁としての機能を有し、かつ消波効果も保持できる魚礁潜堤の形状を開発する目的から、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魚礁潜堤の消波効果について、数値波動実験より検討を行った。数値波動実験の妥当性については、入射波周期 1 s 以下の場合に透過波の再現性に問題を残すものの、反射波側および潜堤モデル上の波の変形を十分に予測できることが確認された。また、共鳴装置付魚礁潜堤の消波特性については、従来の潜堤モデルと比較して、反射率は大きくなるが、透過率はほぼ同程度の値となる。従って本魚礁潜堤モデルは、潜堤天端上での非砕波の条件の下では、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ことがわかった。

参考文献

- 大山 巧 (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.
- 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.