

II-342 数値消波フィルターによる開境界処理法の基本性能について

清水建設(株)技術研究所(正) 大山 巧 東京工業大学土木工学科(正) 瀬岡和夫

1. はじめに

近年、波の非線形効果が厳密に取り込める手法として、境界要素法による非線形波動場の解析法が提案されている。しかし、この手法に適用できる開境界処理法(無反射境界)に関する検討はほとんどなく、実際には開境界処理を必要としない孤立波などが解析の対象となっている。そこで、著者らは非線形かつ不規則な波動場の解析にも適用できる開境界処理法として、「数値消波フィルター」を考えた。本研究は、この方法の基本的な性能を調べるための最初のステップとして、線形理論に基づく周波数領域の検討を行ったものである。

2. 数値消波フィルターの基本的な考え方

差分法などによる非線形波動場の解析における開境界処理法として、Orlanski型¹⁾の吸収法がよく用いられている²⁾。しかしこの方法では、波が単一の位相速度を持つことを前提にしているため、非保存波や不規則波に対しては吸収効率が悪くなる。そこで、本研究では図-1に示すような「数値消波フィルター」を考えた。このフィルターは、流速に比例した減衰を与えるスポンジ層とその背後に設定した Orlanski 型境界で構成される。スポンジ層は、入射波をエネルギー的に吸収する、いわゆる実験における通常の消波装置に対応するもので、広い周期帯の成分波にも有効である。ただし、成分波の波長がスポンジ層の幅に比べて大きくなると、消波効率が低下してしまうことが予想される。そこで、このような長周期波成分については、波速 C が $C = \sqrt{gh}$ で近似できることを利用して、Orlanski 型境界でエネルギーの一部を吸収させることにした。また、スポンジ層で与える減衰係数 μ を一定にすると、 μ が不連続になるスポンジ層前面から有意な大きさの反射波が発生するため、 μ は図-1のように層内で線形に分布させることにした。

3. 線形理論に基づく解析法の概要

図-2のように座標系を定義し、通常の線形ポテンシャル理論に基づいて数値消波フィルターからの波の反射を考える。図に示すように、流体領域をスポンジ層内 Ω 、スポンジ層前面領域 Ω_1 、スポンジ層背後領域(解析領域外) Ω_2 に分け、層内の速度ポテンシャルを $\Phi(x, z, t) = \phi(x, z)e^{i\omega t}$ (ω : 入射波の角振動数) と表す。ここで、スポンジ層内の減衰係数が任意の分布をする場合、層内の自由表面条件は以下のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{g}(\omega^2 - i\omega\mu)\phi + \frac{i\omega}{g} \int_{-\frac{B}{2}}^x \phi \Big|_{z=0} \frac{\partial \mu}{\partial x} dx \quad (\text{on } S_F) \quad (1)$$

スポンジ層背後では、Orlanski 型の境界条件 $\partial \phi_2 / \partial x = -(i\omega/\sqrt{gh})\phi_2$ (ϕ_2 : Ω_2 でのポテンシャル) を適用し、 S_O における流速と圧力の連続条件を考慮すると、 ϕ に関する境界条件として次式を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{i\omega}{\sqrt{gh}} \left\{ \left(1 - \frac{i\mu}{\omega}\right)\phi + \frac{i}{\omega} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \phi \Big|_{z=0} \frac{\partial \mu}{\partial x} dx \right\} \quad (\text{on } S_O) \quad (2)$$

また、 Ω_1 では放射条件を満足する一般解を与え、 Ω と Ω_0 の接線面 S_I で流速と圧力の連続条件を与える³⁾。これら S_F , S_I , S_O での境界条件と海底面 S_B での不透過条件を Ω で立てたグリーンの公式に基づく境界積分方程式に代入し空間的に離散化すると、 S_F , S_O でのポテンシャルと Ω_1 で与えた一般解に含まれる未定係数に関する連立方程式を得る。そして反射率 K_R は、求められた一般解の未定係数の値から算定できる³⁾。ここで、井島ら³⁾は領域分割法により透過性防波堤の反射率、透過率を求める際、透過性物質内の流れの抵抗として、本研究のスポンジ層と同様に流速に比例する減衰を与えている。そこで本解析の妥当性を調べるために、井島らと同様な条件で解析を行った。その結果、本解析結果は井島らの領域分割法の結果と良く一致することを確認した。

4. 数値消波フィルターの反射率特性

図-3は、 μ_{max} を変化させたときの本消波フィルターの反射率特性を示したもので、横軸は入射波長 L に対するスポンジ層の相対幅を表している。この図において、長周期側 (B/L の小さい側)で K_R が大きくなるの

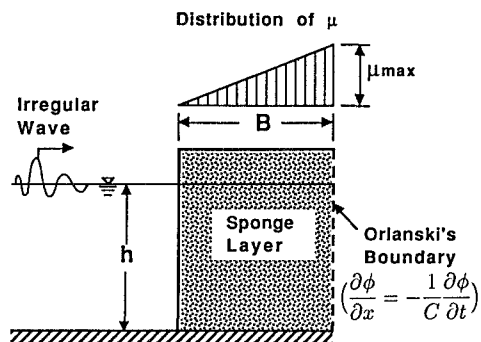


図-1 数値消波フィルターの概念

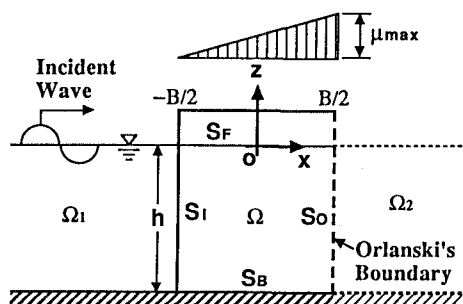


図-2 座標系と記号の定義

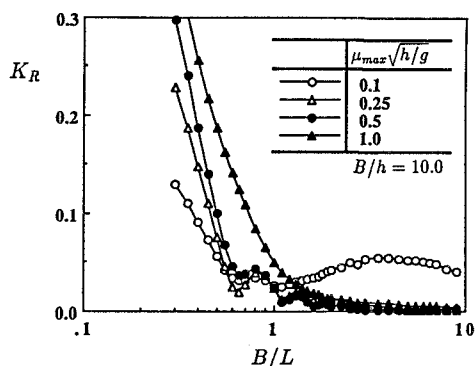


図-3 反射率の周期特性

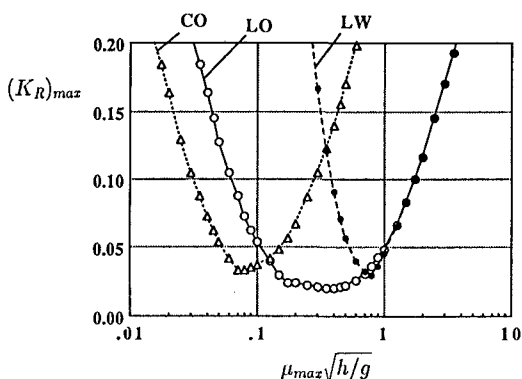


図-4 減衰係数による $1 < B/L < 10$ の最大反射率の変化

は、スポンジ層からの反射が原因であり、その影響は μ_{max} が大きいほど顕著になっている。また、 μ_{max} が最も小さい $\mu_{max}\sqrt{h/g} = 0.1$ では短周期側で K_R が大きくなっているが、これは Orlandski 型境界を用いる際の位相速度 C を長波の波速と設定したことによる Orlandski 型境界からの反射の影響である。そして図-3 の結果から、ある周期帯で反射率を低く抑えることを考える場合、減衰係数には最適値が存在し、 $1 < B/L < 10$ の範囲では $\mu_{max}\sqrt{h/g}$ を 0.25 ~ 0.5 程度に設定した場合の性能が良いことがわかる。

また図-4 は、 μ_{max} による $1 < B/L < 10$ の最大反射率 $(K_R)_{max}$ の変化を示したものである。図中、LO は減衰係数をスポンジ層内で線形に分布させ Orlandski 型境界を適用した本消波フィルターの場合、CO は減衰係数を層内で一定とした場合、LW は Orlandski 型境界を用いずにスポンジ層背後に壁面境界を設定した場合の結果である。この図からわかるように、 μ_{max} を適切に設定すれば本消波フィルターの $(K_R)_{max}$ は 2% 程度に抑えることができ、広い周期帯で良好な消波効率が得られる。また、 $(K_R)_{max}$ の最小値は、減衰係数を一定とした場合よりも 60% 程度、Orlandski 型境界を用いない場合よりも 40% 程度小さくできることがわかる。

5. おわりに

開境界処理のための「数値消波フィルター」の基本性能について、線形理論に基づいた検討を行った。その結果、本消波フィルターは広い周期帯で消波効率が良く、不規則波や非保存波を対象にした解析にも十分に適用できることが示された。さらに本消波フィルターは、波動場が非線形になってもそのまま適用することができるが、これについては別の機会に発表する予定である。

1) Orlandski, I., Jour. Comp. Physics, 21, pp.251-269, 1976.

2) Yen, S. M. and Hall, D. R., Third Int. Conf. Numer. Ship Hydrodynamics, pp.163-177, 1981.

3) 井島・江口・小林, 第 18 回海講論文集, pp.121-130, 1971.