

エネルギー逸散を伴う構造物まわりの波変形の解析法

愛媛大学工学部 正 員 中村孝幸
建設省四国地方建設局 正 員 〇石丸満久

1. まえがき

従来、波と構造物の干渉を考えると、波の変形を伴う大型構造物とその影響が無視できる小型構造物に大別して取り扱われてきた。そして、大型構造物の場合、構造物による波の回折散乱現象や構造物による動揺発散波の影響が重要になることから、剥離流れや渦流れの影響は無視した解析が行われてきた。ここでは、構造物の鋭端部や隅角部などからの渦流れの発生に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮して、構造物まわりの波の変形や作用波力の算定が可能となる数値解析法を展開すると共に、その適用性を従来の実験結果との比較から検討してみた。

2. 減衰波のモデル

ここで用いたエネルギー逸散を伴う波動場の解析法は、透過性防波堤による波変形の解析に用いられている Sollittらの解析法と類似している。Sollittらの解析では、透過性堤体の空隙部と固体部を平均化して均質な透水層に置換した後に、流体抵抗項の等価線形化を介して最終的に流速に比例する抵抗を有し、しかも固体部の流体力学的な慣性効果を付加した仮想的な質量をもつ流体の運動方程式が用いられている。ここでは、波のエネルギー逸散に関係する流体抵抗項の影響のみを採り入れた解析を行う。固体部の流体力学的な慣性効果は、構造物の形状を直接的に考慮して波浪境界値問題の解析を行うため必要としない。このような流体抵抗項のみを付加した、しかも線形化された運動方程式は、次式のようになる。

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho g x) - f_c \omega \vec{v} \quad (1)$$

ここに、 $\vec{v}$: 流速ベクトル、 p : 圧力、 ρ : 流体密度、 f_c : 等価線形抵抗係数、 ω : 角振動数である。なお、ここでは既に角振動数 ω の調和振動が仮定してある。式(1)で表される流体の運動は、非回転運動であることから速度ポテンシャルが定義できる。

3. 境界値問題

ここで想定した解析モデルは、図-1に示すものである。すなわち、渦流れを伴う構造物まわりでは、上述したような流速に比例する抵抗力をもつ流体で置換して、渦流れの発生によるエネルギー逸散を等価的に評価する。また、渦流れの影響しないような構造物より遠方場では、流体抵抗力を0とした非減衰波の領域とした。非減衰波に対する境界値問題は、よく知られていることから割愛することとし、減衰波に対するそれを列挙すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= 0 \text{ (基礎方程式)}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = (1 - if_c) \frac{\omega^2}{g} \Phi \Big|_{z=0} \text{ (水表面)} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= 0 \Big|_{z=-h} = 0 \text{ (水底)}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \Big|_{\text{物体表面}} \end{aligned} \quad (2)$$

一方、図-1に示すような領域分割を行って解析する際には、減衰波と非減衰波の境界上で流速と圧力の連続条件を考慮する必要がある。本研究では、波浪ポテンシャルの算定に流体場のグリーン関数を核関数とする湧き出し分布法を採用した。このとき必要になる減衰波のグリーン関数 G_D は、式(2)を満足する特異解として求められ、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} G_D(x, z; X, Z) &= - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i}{\mu_n} \frac{\mu_n^2 - \lambda^2}{(\mu_n^2 - \lambda^2)h + \lambda} \cos \mu_n(h+z) \cos \mu_n(h+Z) \exp(i\mu_n|x-X|) \\ \lambda &= \frac{\omega^2}{g} (1 + if_c) = \mu_n \tanh(\mu_n h) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 μ_n は減衰波の波数である。この減衰波のグリーン関数は、線形抵抗係数 f_c を0とすると、Johnによる非減衰波のグリーン関数に一致する。

3. カーテン防波堤に対する算定例と実験結果との比較

(1) 実験の概要；ここでは、中村によるカーテン防波堤の実験結果との比較を行った。この実験では、水面上部より鉛直に固定支持された厚さ1.2cmのカーテン防波堤を対象にして、その喫水を各種に変化させて、透過・反射率(C_T, C_R)および水平波力(F_x)が測定されている。

(2) 実験結果と算定結果の比較；図-2は、カーテン壁の喫水 d と水深 h の比を0.353と固定して、作用波の周期 T による C_T, C_R の変化を示す。図中では、周期の無次元量として喫水・沖波相当波長比(d/L_0)が採用してある。比較実験データは、入射波高 $H=10\text{cm}$ のときのものである。算定では、減衰波領域の広さ(図-1の第2領域)および等価線形抵抗係数 f_c が必要になるが、ここでは、減衰波領域の広さは剥離渦の形成規模に対応するものと仮定した。そして、中村の渦流れの観測結果を参照して、減衰波領域の広さは概略的にカーテン壁前後の $L/8$ の流体領域とした。また、等価線形抵抗係数 f_c は、各種の値を用いた検討の後、実験結果との対応がよかった $f_c=0.13$ を最終的に採用した。図-2から、 $f_c=0.13$ とした減衰波に対する結果は、 $f_c=0$ とした非減衰波のそれに比較して、 C_T, C_R 共に低減することや、実験での透過率の変動傾向は減衰波の算定結果とほぼ一致していることなどが認められる。しかし、反射率については、非減衰波の算定結果の方が実験結果により近くなっており、構造物の周辺領域内で一様な抵抗力を仮定する理論では十分に渦流れによる逸散現象を説明できないことによるものと考えられる。最後に、図-3は、水平波力($F_x^* = F_x / (\rho g H d / 2)$)についての実験結果と算定結果の比較を示す。この図から、減衰波中での F_x^* は、非減衰波中でのそれに比較して低減することや、最大無次元波力を示す周期帯では、実験結果とほぼ一致していることなどが認められる。ただし、より長周期波の条件下では、一致度は十分でない。

4. 結語

以上、渦流れを伴う構造物まわりの逸散現象を平均的に取り扱う方法として、減衰波理論を導き、その適用性を検討してきた。今後、等価線形抵抗係数と渦力の関係や、繰り返し算定を用いた等価線形化の手法について更に検討していきたい。

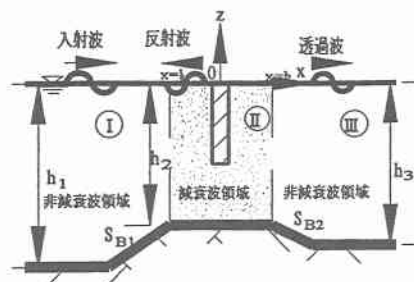


図-1 解析モデル

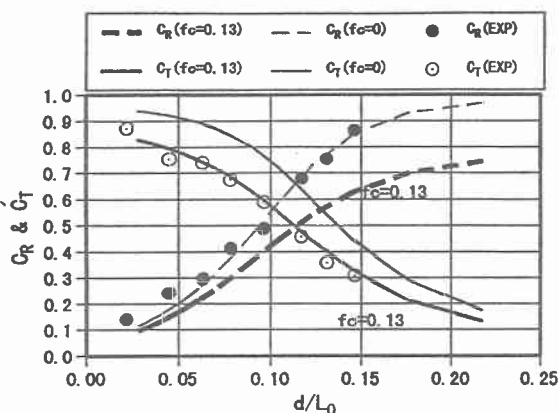


図-2 カーテン防波堤の透過率と反射率

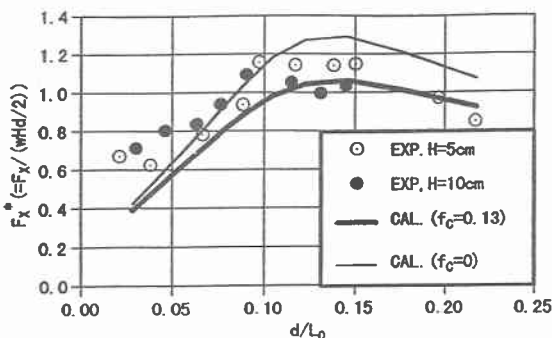


図-3 カーテン防波堤に作用する水平波力