

エネルギー損失を考慮した不規則波と構造物の非線形干渉解析

九州大学工学部 学生員○池崎 靖 山城 賢
正会員 吉田 明德 村上 啓介

1. はじめに

海底地形や潜堤構造物などによって、水深が急激に変化する海域を進行する波は、たとえ微小振幅波であっても水面境界条件の非線形性より高次のオーダーの周波数成分(自由波)が励起することが知られている。著者らはこの構造物と波との非線形干渉を、グリーン公式を利用して比較的簡便に解析する方法を提案し、実験値と比較して理論解が妥当な推定値を与えることを確かめた。(吉田ら 1989) 励起される成分波の振幅は、入射波の波高に比例して増大するが、実際には潜堤近傍で生じる渦によって波のエネルギーの損失が生じるため、理論解析による推定値と実際の値とは、波高が大きくなるにつれて次第に差異が生じる(図-1 参照)。しかも、入射波の波高がさらに増大すると渦に加えて潜堤上で砕波を生じるようになり、砕波が激しい場合にはポテンシャル理論による推定値は妥当な値を与えない。

著者らは先述の解析法を多成分不規則波と構造物との非線形干渉の解析に拡張しているが、多成分不規則波が入射する場合には、非線形干渉によって励起される高次オーダーの周波数成分波は、基本周波数成分波の整数倍の周波数成分の波に加え、異なる周波数間での干渉による成分波も励起することになるから、単一成分波の非線形干渉を推定する場合よりも、これらのエネルギー損失の影響が推定値に大きく現れる。

そこで、本研究は、理論解析において、便宜的に隅角部近傍での境界条件に、流速の2乗に比例する損失項を考慮することによって理論解の改善を図ることを試みた。

2. 理論解析の概略

多成分不規則波と構造物との解析は2次のオーダーまでを考える限り、2成分波間の非線形干渉の解析が基本で、多成分波を構成する個々の2成分間の干渉の線形和で与えられる。2成分波と構造物との非線形干渉の解析法については参考文献(2)に詳細に述べているが、解析法の概略は次のようである。構造物近傍での停止散乱波が無視できる程度に仮想の境界面(図-2、 $x = \pm l$)を離して取り、これらの仮想境界面で囲まれる流体の閉領域の速度ポテンシャルを次のグリー

ンの公式を用いて表す。

$$\phi(X) = \frac{1}{\alpha} \int_D \left\{ \phi(X_b) \frac{\partial}{\partial \nu} G(r) - G(r) \frac{\partial}{\partial \nu} \phi(X_b) \right\} ds$$

一方、左右の開領域では進行波のみが存在するものと仮定して、水面の境界条件を満足する2次のオーダーの厳密解を解析的に求めておき、これより得られる仮想境界面での境界条件のもとでグリーンの公式を数値的に解くものである。本文では、潜堤隅角部での渦によるエネルギー損失の効果を、数値解析に取り込むことを目的とし、簡単のため、一定水深 h の海域にある構造物に x の正方向から1次の角周波数 σ 振幅 ζ_0 の単一成分のストークス波が入射する場合を考えることとする。

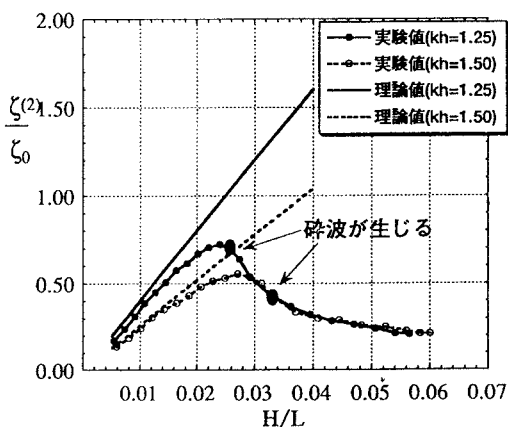


図-1 理論値と実験値の比較

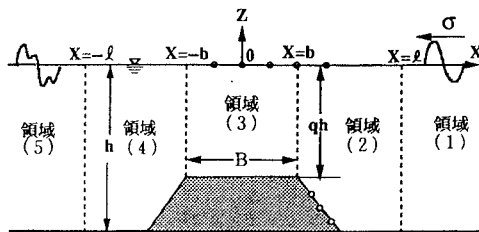


図-2 領域の分割

渦や砕波に伴うエネルギー損失の効果を境界値問題としての数値計算に取り込むため、図-2に示すように、潜堤近傍の流体閉領域を、さらに潜堤上の仮想の境界面 ($x = \pm b$) を用いて3領域に分割し、便宜上、仮想境界面において流速の2乗に比例する抵抗が生じるものと仮定する。境界面 ($x = +b$) を例に取り、おける抵抗の係数を f と表すものとする、流速と圧力の連続条件より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_3}{\partial x} &= \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \\ \frac{1}{\rho}(p_2 - p_3) &= \frac{f}{2}|v|v \end{aligned} \right\} \quad \text{on } (x = +b) \quad (2)$$

流体圧力 $p(x, z, t)$ と、流速 $v(x, z, t)$ は、速度ポテンシャル $(g\zeta_0/\sigma)\phi e^{i\sigma t}$ より次式で表せる。

$$p(x, z, t) = -i\rho g\zeta_0\phi e^{i\sigma t} \quad (3)$$

$$v = -\frac{g\zeta_0}{\sigma} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| \cos(\sigma t + \theta) \quad (4)$$

ただし

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| e^{i\theta}$$

よって

$$|v|v = \frac{g^2\zeta_0^2}{\sigma^2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|^2 \cdot \cos(\sigma t + \theta) \cdot |\cos(\sigma t + \theta)|$$

上式の時間項を次の形のフーリエ級数に展開する。

$$\begin{aligned} \cos(\sigma t + \theta) \cdot |\cos(\sigma t + \theta)| \\ = \frac{8}{3\pi} \cos(\sigma t + \theta) + \frac{8}{15\pi} \cos 3(\sigma t + \theta) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

右辺の第2項以降の高次項を無視すると次式を得る。

$$|v|v = -\frac{8}{3\pi} \frac{g^2\zeta_0^2}{\sigma^2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| \cos(\sigma t + \theta) \quad (6)$$

複素表示では次式で表される。

$$|v|v = -\frac{8}{3\pi} \frac{g^2\zeta_0^2}{\sigma^2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right| \frac{\partial \phi}{\partial x} e^{i\sigma t} \quad (7)$$

式(3)と式(7)を式(2)に用いると、境界 $x = +b$ における圧力の連続条件式として次式が得られる。

$$\phi_2 - \phi_3 = i \frac{4}{3\pi} \cdot f \cdot \frac{\zeta_0}{\sigma^2/g} \left| \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right| \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (8)$$

従って、領域(2)について示すと境界要素上のポテンシャル $\phi(j)$ に関する次式の形の一次関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{N_1^+} (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij} - \Gamma E_{ij}) \phi_2(j) + \sum_{j=1}^{N_2^+} (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij}) \phi_3(j) \\ + \sum_{j=1}^{N_2^+} \left\{ \beta (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij}) \left| \overline{\phi_3(j)} \right| - E_{ij} \right\} \overline{\phi_3(j)} \\ + \sum_{j=1}^{N_3^+} (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij}) \phi_2(j) \\ + \left[e^{-ikl} \sum_{j=1}^{N_4^+} \left\{ (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij}) + ikE_{ij} \right\} Z(k, z_j) \right] A \\ = -ae^{ikl} \sum_{j=1}^{N_4^+} \left\{ (\overline{E_{ij}} - \delta_{ij}) - ikE_{ij} \right\} Z(k, z_j) \quad (9) \\ (i = 1 \sim N_1^+, 1 \sim N_2^+, 1 \sim N_3^+, P) \end{aligned}$$

ただし、 $\overline{\phi} = \partial \phi / \partial x$, $\beta = i4/3\pi \cdot f \cdot \zeta_0 / (\sigma^2/g)$

上式の3項には、 $|\phi_3(j)|\phi_3(j)$ の非線形項が含まれる。そこで $f = 0$ とおいて、まず損失がない場合を計算する。次いでその解の $\phi_3(j)$ を非線形項 $|\phi_3(j)|\phi_3(j)$ の $|\phi_3(j)|$ に用いて再び解き、同様の計算を解が収束するまで繰り返して行う。ついで、この様にして得られた1次のオーダーの解を用いて2次のオーダーの解を求める。

3. あとがき

現在計算プログラムの作成を行っており、解析結果は実験の結果とあわせて講演会で述べる予定である。

参考文献

- (1) 吉田 明徳ら(1989): グリーン公式による有限振幅波の定常境界値問題解析法 第36回海岸工学講演会論文集 pp.469 ~ 473
- (2) 吉田 明徳ら(1994): 2成分ストークス波と構造物との非線形干渉法 第41回海岸工学講演会論文集 pp.736 ~ 740
- (3) 山城ら(1995): 波と没水構造物の非線形干渉に関する実験的研究 第50回年次学術講演会講演概要集第2部(B) pp.692 ~ 693