

II-421

岸壁近くに設置した浮体による波浪エネルギー吸収効率について

On the wave-power absorption by a floating body near a quay

日本鋼管(株) 正会員 神 宮 紀 夫

1. 緒 言

浮体の動揺による波浪エネルギー吸収効率はすでに多くの研究がありSalter's duckを除くと単一浮体の単一モードの動揺で可能な最大エネルギー吸収効率は50%である。ところで、設置基礎として岸壁、防波堤を利用することも考えられており、本論ではこの場合の最大エネルギー吸収効率を岸壁に対する鏡像を考慮して理論的に導き岸壁の効果により単一浮体の単一モードの動揺の場合も最大エネルギー吸収効率100%が可能であることを示す。

2. 境界値問題

本論では図1に示すように浮体、岸壁、水底ともに二次元と考える。岸壁は垂直とし、水底は水平とし岸壁面上鉛直上向きにz軸、静止水面上にy軸をとる。波はy軸の正の向きから入射し波高は微小とする。この場合の境界値問題は連続の条件、自由表面条件、浮体表面での力学的条件、水底での境界条件及び岸壁表面での境界条件を満たす速度ポテンシャルを求めることになる。ところで最後の岸壁での境界条件は図2のように岸壁に関しての鏡像領域を考えることにより満足される。図2で鏡像浮体の上下揺は浮体と同位相であり、左右揺と横揺は逆位相である。

図2の発散問題と散乱問題が解けると求める速度ポテンシャル ϕ は次式で得られる。¹⁾

$$\phi = g/\omega A \{ \phi_{1e} + \phi_{2e} \} + i\omega \eta_{1j} \phi_{1j} + i\omega \eta_{2j} \phi_{2j} \dots (1)$$

以後の議論は結論が変わらないので深海についてのみ取り扱うことにする。

ところで ϕ は次のように反射係数Rと透過係数Tを用いて表現できる。¹⁾

$$\begin{aligned} \phi &= g/\omega A \{ e^{iKy} + (T+R_1) e^{-iKy} \} e^{Kz} & y \rightarrow \infty \\ &= g/\omega A \{ e^{-iKy} + (T+R_2) e^{iKy} \} e^{Kz} & y \rightarrow -\infty \dots (2) \end{aligned}$$

$$\text{但し、} R_1 = R + i(A_{1j}^+ \eta_{1j} + A_{2j}^+ \eta_{2j})/A, R_2 = R + i(A_{1j}^- \eta_{1j} + A_{2j}^- \eta_{2j})/A \dots (3)$$

一方、浮体のz軸に関する対称性から発散波振幅について次の関係があり、これを(3)式に代入し整理すると

$$j=1 \text{ の場合 } A_{2j}^+ = A_{1j}^-, A_{2j}^- = A_{1j}^+, j=2, 4 \text{ の場合 } A_{2j}^+ e^{i\pi} = A_{1j}^-, A_{2j}^- e^{i\pi} = A_{1j}^+ \dots (4)$$

$$R_1 = R + i(A_{1j}^+ + A_{1j}^-) \eta_{1j}/A, R_2 = R + i(A_{1j}^- + A_{1j}^+) \eta_{1j}/A \dots (5)$$

となる。この場合のエネルギー吸収効率はEvans¹⁾によると次の式で与えられる。

$$E = \{ 2 - (T+R_1)(T+R_1) - (T+R_2)(T+R_2) \} / 2 \dots (6)$$

(6)式で第2、3項は常に非負の値であるから、結局 $T+R_1 = T+R_2 = 0$ の時にEは最大値1、即ち完全に波エネルギーが吸収される。この条件は(5)式の関係を使うと次のようになる。

$$T + R + i(A_{1j}^+ + A_{1j}^-) \eta_{1j}/A = 0, T + R + i(A_{1j}^- + A_{1j}^+) \eta_{1j}/A = 0 \dots (7)$$

(6)の第一式に A_{1j}^+ を、第二式に A_{1j}^- を掛けて加え、(4)式の関係を使い、さらにEvans¹⁾による(8)式の関係を代入し整理するとエネルギー吸収効率100%となる浮体の動揺(9)式が得られる。

$$A_{1j}^+ R + A_{1j}^- T + A_{1j}^+ = 0, A_{2j}^+ R + A_{2j}^- T + A_{2j}^+ = 0 \dots (8)$$

$$\eta_{1j} = -iA(A_{1j}^+ + A_{1j}^-)^{-1} \dots (9)$$

次に(9)式の動揺を実現するために浮体に付加するバネ定数と減衰係数の式を求める。

3. 浮体の運動方程式

浮体により波浪エネルギーを吸収するために浮体にバネと減衰器を付加した場合の一自由度の運動方程式は次のようになる。

$$(m_j + M_{1j1}) \ddot{\xi}_{1j} + (d_{1j} + B_{1j1}) \dot{\xi}_{1j} + M_{1j2} \ddot{\xi}_{2j} + B_{1j2} \dot{\xi}_{2j} + k_{1j} \xi_{1j} = F_{1j} e^{i\omega t} \dots (10)$$

この式に浮体と鏡像の動揺の位相関係、 $\xi_{2j} = e^{*i\pi} \xi_{1j}$ ($j=1$ の時 $*$ =0, $j=2, 4$ の時 $*$ =1)を代入し整理すると

$$(m_j + M_{1j1} + M_{1j2} e^{*i\pi}) \ddot{\xi}_{1j} + (d_{1j} + B_{1j1} + B_{1j2} e^{*i\pi}) \dot{\xi}_{1j} + k_{1j} \xi_{1j} = F_{1j} e^{i\omega t} \dots (11)$$

となる。これを解くと動揺が得られる。

$$\begin{aligned} \eta_{1j} &= \rho g A / (i\omega K) (A_{1j}^+ + A_{1j}^-) / \{ (d_{1j} + B_{1j1} + B_{1j2} e^{*i\pi}) \\ &\quad + i\omega (m_j + M_{1j1} + M_{1j2} e^{*i\pi} - 1/\omega^2 k_{1j}) \} \dots (12) \end{aligned}$$

(12) 式に(9) 式を代入するとエネルギー吸収効率100%実現するバネ定数と減衰係数が次のように得られる。

$$d_{1j} = -B_{1j1} + \rho g / (\omega K) |A_{1j}^+ + A_{1j}^-|^2 - \text{Re} \{ e^{* \pi} (B_{1j2} + i \omega M_{1j2}) \} \dots (13)$$

$$k_{1j} = \omega^2 (m_j + M_{1j1}) + \omega \text{Im} \{ e^{* \pi} (B_{1j2} + i \omega M_{1j2}) \} \dots (14)$$

4. 結 言

岸壁近くに設置した浮体式波浪エネルギー吸収装置のエネルギー吸収効率について理論的に考察し、左右対称な浮体で1自由度の動揺によっても岸壁の効果により最大100%のエネルギー吸収率が可能であることを示し、その時の浮体の復元力と減衰係数を与える式を導いた。

【参考文献】

- 1) "A theory for wave-power absorption by two independently oscillating bodies", by M.A.SROKOSZ and D.V.EVANSE; J.Fluid Mech., Vol.90, Part 2(1979)

【記号説明】

$j=1$: 上下揺, $j=2$: 左右揺, $j=4$: 横揺, K : 波数

η_{1j}, η_{2j} : 浮体1の j モードの動揺で $\xi_{1j} = \text{Re} \{ \eta_{1j} \exp(i\omega t) \}$ (浮体2のそれ), $\dots$: 共役複素数

ϕ_{1s}, ϕ_{2s} : $y \rightarrow \infty$ からの入射波による浮体1の散乱ポテンシャル ($y \rightarrow -\infty$ からの入射波による浮体2のそれ)

ϕ_{1j}, ϕ_{2j} : 固定した浮体2に浮体1が動揺する時の発散ポテンシャル (固定した浮体1に浮体2が動揺する時のそれ)

$$\phi_{1s} = \{ e^{iKy} + R(e^{-iKy}) \} e^{Kz} \quad y \rightarrow \infty, \quad \phi_{1s} = T e^{iKy} e^{Kz} \quad y \rightarrow -\infty$$

$$\phi_{2s} = T e^{-iKy} e^{Kz} \quad y \rightarrow \infty, \quad \phi_{2s} = \{ e^{-iKy} + R(e^{iKy}) \} e^{Kz} \quad y \rightarrow -\infty$$

$$\phi_{1j} = g / \omega^2 A_{1j}^{\pm} e^{\mp iKy} e^{Kz} \quad y \rightarrow \pm \infty, \quad \phi_{2j} = g / \omega^2 A_{2j}^{\pm} e^{\mp iKy} e^{Kz} \quad y \rightarrow \pm \infty$$

a : 波の振幅, $A = i a$, R , T : 散乱問題の反射係数、透過係数, $A_{1j}^{\pm}$: 発散問題の $y \rightarrow \pm \infty$ への発散波振幅比

$$F_{1j}^s = \text{Re} \{ i \rho g a / k (A_{1j}^+ + A_{1j}^-) \exp(i\omega t) \}$$

m_j : j モード方向の浮体の質量, M_{1j1} : 浮体1が j モードの動揺する時の浮体1の付加質量, M_{1j2} : 浮体2が j モードの動揺する時の浮体1に働く力の浮体2の加速度と同位相の成分

$$B_{1j1} = 0.5 \rho g^2 / \omega^3 \{ A_{1j}^+ A_{1j}^{+*} + A_{1j}^- A_{1j}^{-*} \}, B_{1j2} = 0.5 \rho g^2 / \omega^3 \{ A_{1j}^+ A_{2j}^{+*} + A_{1j}^- A_{2j}^{-*} \}$$

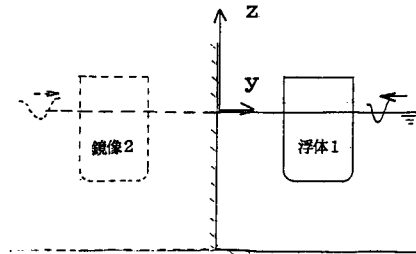


図1 座標系と鏡像

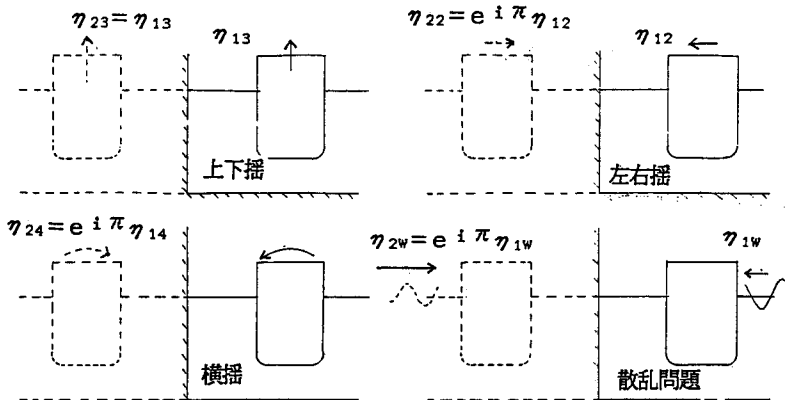


図2 浮体と鏡像の動揺