

複葉没水水平板の波の制御効果と動揺特性

九州大学 正員 吉田明德
日本国土開発(株) 正員 〇田代晃一

1. まえがき

著者らは、二重管係留システムによって係留した没水水平版による波の制御効果および水平版に作用する波力の特徴について研究を行ってきている。二重管係留システムの特徴は、潮位等の水位変化に対応して水平版上の水深を一定に保つ事が出来る点と、水平版の水平と回転運動を拘束し鉛直運動のみを許容することによって、有効な防波機能を保持しつつ、かつ水平版に作用する波力を著しく軽減出来る点にある¹⁾。

本研究は、水平版をある間隔離して2枚設けた複葉水平版とする事によって、単一の水平版の場合と異なる波の遮断効果および水平版の動揺の特性が得られるかを、線形ポテンシャル理論で解析的に検討する事を目的とし、本文では2枚の水平版が互いに剛結されている場合についての解析法の概略といくつかの解析結果について述べる。

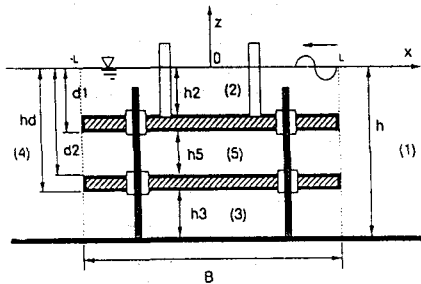


図-1 二重管式係留システムで係留された複葉没水水平版

2. 理論解析法の概略

(1) ポテンシャル関数 $\phi_i(x, z)$ について 図-1に示すような、一定水深の海域にある複葉没水水平版に、微小振幅規則波が x の正の方向から入射する場合を考える。入射波は、振幅 ζ_0 、角振動数 $\sigma (= 2\pi/T : T$ は周期) の規則波で、没水水平版は、鉛直運動のみを行うものとし、鉛直運動の複素振幅を η とする。流体運動は非圧縮・非粘性流体の非回転運動を仮定し、流体運動の速度ポテンシャル $\Phi(x, z, t)$ を次式で表す。

$$\Phi(x, z, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) \exp(i\sigma t) \quad (1)$$

図-1に示した様に、流体域を $x = \pm \ell$ における仮想の境界面によって、(1),(2),(3),(4),(5)の矩形流域に分割し、各領域の流体運動に対応するポテンシャル関数を、添字を付けて $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5$ と表すこととする。各領域の鉛直方向の境界面における境界条件を満足するラプラス方程式の一般解は、それぞれ次式の様に表す事が出来る。

$$\phi_1(x, z) = \exp\{k_{10}(x - \ell)\} Z(k_{10}, z)$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} D_{1n} \exp\{-k_{1n}(x - \ell)\} Z(k_{1n}, z) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_2(x, z) = & \sum_{n=0}^{\infty} [C_{2n} \exp\{k_{2n}(x - \ell)\} \\ & + D_{2n} \exp\{-k_{2n}(x + \ell)\}] Z(k_{2n}, z) \\ & - \frac{2i\Gamma}{\ell'} \left[\sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\alpha_s^2} Z_2(\alpha_s, z) \cos \alpha_s x \right] \eta^* \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_3(x, z) = & C_{30} \frac{x}{\ell} + D_{30} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{3n} \exp\{\nu_n(x - \ell)\} \\ & + D_{3n} \exp\{-\nu_n(x + \ell)\}] \bar{Z}(\nu_n, z) \\ & - \frac{2i\Gamma}{\ell'} \left[\sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\alpha_s^2} Z_3(\alpha_s, z) \cos \alpha_s x \right] \eta^* \quad (4) \end{aligned}$$

$$\phi_4(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} C_{4n} \exp\{k_{4n}(x + \ell)\} Z(k_{4n}, z) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \phi_5(x, z) = & C_{50} \frac{x}{\ell} + D_{50} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{5n} \exp\{\mu_n(x - \ell)\} \\ & + D_{5n} \exp\{-\mu_n(x + \ell)\}] \bar{Z}(\mu_n, z) \\ & - \frac{2i\Gamma}{\ell'} \left[\sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\alpha_s^2} Z_5(\alpha_s, z) \cos \alpha_s x \right] \eta^* \quad (6) \end{aligned}$$

上式で、 $Z(k_{in}, z) = \cos k_{in}(z + h_i) / \cos k_{in} h_i$ である。 k_{in} は各領域 (i) の水深 h_i ($i = 1, 2, 4$) に対応する分散方程式 $\sigma^2 h_i / g = -k_{in} h_i \tan k_{in} h_i$ ($k_{i0} = ik_i$, k_i は入射波の波数、 $i = \sqrt{-1}$ 、 g は重力加速度) の根である。また、

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \sigma^2 / g, \quad \eta^* = \eta / \zeta_0, \quad \alpha_s = (2s + 1)\pi / 2\ell' \\ Z_2(\alpha_s, z) &= \frac{\alpha_s \cosh \alpha_s z + \Gamma \sinh \alpha_s z}{\Gamma \cosh \alpha_s h_2 - \alpha_s \sinh \alpha_s h_2} \\ \nu_n &= n\pi / h_3, \quad \bar{Z}(\nu_n, z) = \cos \nu_n(z + h_d) \\ Z_3(\alpha_s, z) &= \cosh \alpha_s(z + h) / \sinh \alpha_s h_3 \\ \mu_n &= n\pi / h_5, \quad \bar{Z}(\mu_n, z) = \cos \mu_n(z + d_1) \\ Z_5(\alpha_s, z) &= \frac{\cosh \alpha_s(z + d_2) - \cosh \alpha_s(z + d_1)}{\sinh \alpha_s h_5} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、(3)~(7)式中の ℓ' は、水平版面上での運動学的境界条件をフーリエ級数表示する際の定数である。

(2) 水平版の運動方程式 水平版は図-1に示す様な、二重管式浮体係留システムによって係留され、運動は鉛直方向のみが許されているものとする。水平版部分の質量を M 、

二重管内管の質量 M_c 、フロート部分の質量を M_F 、水平版に作用する鉛直波力を $F_z \exp(i\sigma t)$ 、鉛直運動に伴う浮力変化を $F_b \exp(i\sigma t)$ で表し、二重管部分に作用する粘性抵抗と付加質量力を無視すると、水平版の運動方程式は次式で与えられる。

$$(M + M_c + M_F) \frac{d^2 z_g}{dt^2} = \{F_b + F_z\} \exp(i\sigma t) \quad (8)$$

ただし、 M, M_c, M_F, F_z, F_b は単位奥行き当たりの値に換算したものを意味している。また、 z_g は任意時刻における水平版の中心点 G の座標である。 F_b は次式で表される

$$F_b = -m_F \rho g A_F \zeta_0 \eta^* \quad (9)$$

ただし、 ρ は流体密度、 A_F は、1 個のフロートの水線面積、 m_F は単位奥行き長さ当たりのフロートの個数である。一方、上側の水平版に作用する鉛直波力 F_{1z} は ϕ_2, ϕ_5 で与えられる水平版上の流体圧力を積分する事によって得られ、同様に、下側の水平版に作用する鉛直波力 F_{2z} は ϕ_3, ϕ_4 で与えられる水平版上の流体圧力を積分する事によって得られる。

$$F_{1z} = i\rho g \zeta_0 \left[\int_{-l}^l \{\phi_5(x, -d_1) - \phi_2(x, -h_2)\} dx \right] \quad (10)$$

$$F_{2z} = i\rho g \zeta_0 \left[\int_{-l}^l \{\phi_3(x, -h_d) - \phi_4(x, -d_2)\} dx \right] \quad (11)$$

$$F_z = F_{1z} + F_{2z} \quad (12)$$

(9), (12) 式を (8) 式に代入すると、鉛直運動の無次元振幅 η^* と、ポテンシャル関数 $\phi_2(x, z), \phi_3(x, z), \phi_5(x, z)$ の未定係数との関係式が得られる。

(3) 水平版に作用する流体力のモーメント 任意点 (a, b) まわりのモーメント T はポテンシャル関数 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5$ で与えられる水平版上の流体圧力によるモーメントを積分することによって次式のように表せる。

$$\begin{aligned} T = & i\rho g \zeta_0 \left[\int_{-l}^l (x-a) \{\phi_2(x, -h_2) - \phi_5(x, d_1)\} dx \right. \\ & + \int_{-l}^l (x-a) \{\phi_5(x, -d_2) - \phi_3(x, -h_d)\} dx \\ & + \int_{-d_1}^{-h_2} (z-b) \{\phi_4(-l, z) - \phi_1(l, z)\} dz \\ & \left. + \int_{-h_d}^{-d_2} (z-b) \{\phi_4(-l, z) - \phi_1(l, z)\} dz \right] \quad (13) \end{aligned}$$

(4) 選点解法による解²⁾ 境界面 ($x = \pm l$) における流体運動の連続条件式に、(2) ~ (6) 式を代入し、これらの式が境界面上に取った選点上においてのみ成り立つことを規定して、変数 z を消去すると、 $D_{1n}, C_{2n}, D_{2n}, \dots$ 等の未定係数について、未定係数の個数と同数の一次関係式を得られ、運動方程式と連立して解くことにより未定係数と η^* が決まる事になる。

3. 計算例と計算結果

水平版の条件を (没水深 $h_2/h = 0.15$, 版長 $B/h = 2.0$, $A_F/h^2 = 0.02$) に固定し、単葉の場合と複葉の水平板間隔 (h_5/h) を 0.10, 0.30, 0.50, 0.70 の 4 通りに変化させて計算を行った結果を図-2, 3 に示している。また、図-2 には比較のため単葉固定の結果も示した。図-2 より水平版間隔が大きくなると、 $h_5/h = 0.5$ 程度までは単葉の場合に較べて波の遮断効果が小さく複葉とする効果はみられないが、さらに大きくなると長波長域における波の遮断効果が大きくなることがわかる。また図-3 より、水平版間隔が大きくなるとに伴い水平版の変位が小さくなっていくことがわかる。

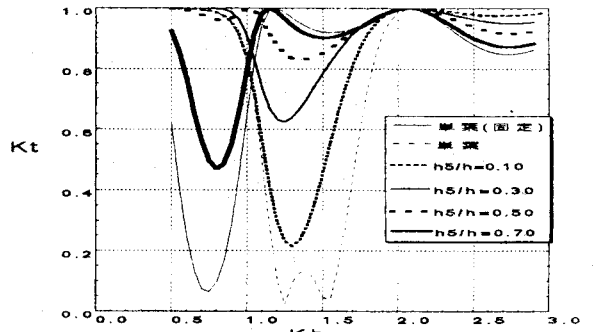


図-2 通過率 Kt

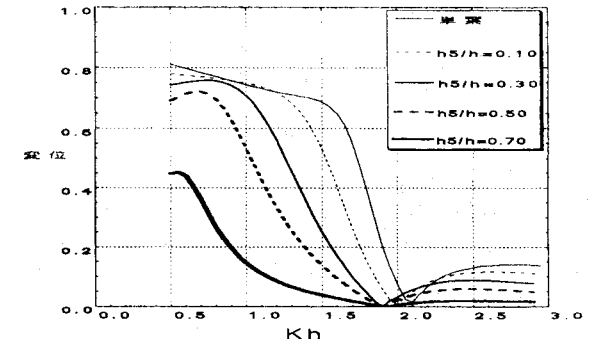


図-3 水平版鉛直変位 η/ζ_0

4. あとがき

2 枚の水平版が剛結された複葉没水水平版は水平版間隔を大きくすると二重管で係留された単葉の水平版と比較して長波長域での遮断効果が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 吉田明徳・旭剛志・小島治幸・中村哲也・入江功：二重管係留システムで係留された没水水平版による波の制御，海岸工学論文集 第 39 巻 pp.521 ~ 525 1992 年
- 2) 吉田明徳・小島治幸・鶴本良博：波動境界値問題におけるポテンシャル接続法の選点解法，土木学会論文集 第 417 号 / II-13 pp.265~274 1990 年 5 月