

圧気固定構造物による非線形波浪変形および空気圧の変化に関する研究

名古屋大学工学部 正 岩田好一朗 名古屋大学大学院 学○金 度参

名古屋大学大学院 学 織田幸伸

1. はじめに: 圧気型構造物の場合, 一般浮遊式構造物のように, 構造物の潜水深が浅くなると, 上面を通過する波の非線形性が非常に大きくなり, その非線形性が内部の初期空気圧と深い関係をもっているのが, これまでの研究¹により明らかにされている. このような非線形の波動境界値問題を解くいくつかの数値解析方法が示されているが, それらは, 主に, 境界積分方程式を用いる非定常解析法と定常解析法に大別される. 本研究では, 吉田²によって提案された摂動展開法と境界積分方程式法に基づいた定常解析法を圧気型固定構造物に適用し, 構造物による非線形波浪変形と内部空気圧の変化を検討しようとするものである.

2. 理論解析: 図-1 に示すように, 一定水深の2次元波動場に置かれた圧気型固定構造物に対し, x の正方向から有限振幅波が入射する場合を考える. 減衰定常波が無視できる地点の $x = \pm d$ に仮想境界面を設けると, 流体領域は自由水面, 底面, 構造物の表面, 圧気室内の水面および両側の仮想境界面で囲まれる閉領域により構成され, 各々の境界面での境界条件は次式のように与えられる.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Omega}{\partial x} = 0 \quad (\text{自由水面と圧気室内水面での運動学的境界条件}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\Omega + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + \frac{P_a}{\rho} = Q \quad (\text{自由水面と圧気室内水面での力学的境界条件}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \nu} = 0 \quad (\text{底面および構造物の表面境界での境界条件}) \quad (3)$$

ここで, 式(1)と(2)において, 自由水面の場合は, $\Omega = \eta$, 圧気室内の水面の場合は, $\Omega = -q_3 h + \zeta$ であり, 自由水面の波形, η , 圧気室内の水面波形, ζ , 速度ポテンシャル, Φ , 空気圧, P_a および Bernoulli 定数, Q が摂動パラメータ $\epsilon (= k^{(1)} \eta_0, k^{(1)} \eta_0: O(\epsilon^1)$ の波数と入射波の振幅) によって次のように展開できるものとする.

$$\Phi(x, z; t) = \text{Re}[\epsilon \phi^{(1)}(x, z) e^{i\sigma t} + \epsilon^2 \{ \phi_0^{(2)}(x, z) + \phi^{(2)}(x, z) e^{2i\sigma t} \} + \dots] \quad (4)$$

$$\eta(x, t) = \epsilon \eta^{(1)}(x) e^{i\sigma t} + \epsilon^2 \eta^{(2)}(x) e^{2i\sigma t} + \dots \quad (5)$$

$$\zeta(x, t) = \epsilon \zeta^{(1)}(x) e^{i\sigma t} + \epsilon^2 \zeta^{(2)}(x) e^{2i\sigma t} + \dots \quad (6)$$

$$P_a(t) = P^{(0)} + \epsilon P^{(1)} e^{i\sigma t} + \epsilon^2 \{ P_0^{(2)} + P^{(2)} e^{2i\sigma t} \} + \dots \quad (7)$$

ここで, P_0 は圧気室の初期空気圧である. 式(1)と(2)を $\eta = 0$, $\zeta = 0$ まわりに Taylor 級数展開した結果に式(4)~(7)を代入し, 両式から $O(\epsilon^1)$, $O(\epsilon^2)$ の水面波形を消去すると, $O(\epsilon^1)$, $O(\epsilon^2)$ の水面境界条件が求められる. ここで, 時間に関係しない $O(\epsilon^2)$ の水面境界条件が現されるが, $\phi_0^{(2)}$ は $O(\epsilon^2)$ までの水面波形と圧力には寄与しないから, 固定構造物の解析には考慮しないものとする. 仮想境界面での境界条件は, $O(\epsilon^1)$ の水面および底面の境界条件を満足する $O(\epsilon^1)$ の Laplace 方程式の解と, その解を $O(\epsilon^2)$ の水面境界条件に代入した式と底面境界条件式を満足する $O(\epsilon^2)$ の Laplace 方程式の解から, $x = \pm d$ での $\phi^{(1)}$, $\phi^{(2)}$, $\partial \phi^{(1)} / \partial \nu$ および $\partial \phi^{(2)} / \partial \nu$ が得られる. 閉領域の境界面で与えられる境界条件式と Green 公式を利用すると, 図-1 に示すような閉領域におけるある地点 (x, z) での速度ポテンシャル $\phi(x, z)$ は次式で与えられる.

$$\phi(x, z) = \int_s \left\{ \phi(x_b, z_b) \frac{\partial G(r)}{\partial \nu} - G(r) \frac{\partial \phi(x_b, z_b)}{\partial \nu} \right\} ds, \quad G(r) = \frac{1}{\pi} \log r \quad (8)$$

ここで, r は境界上の点 (x, z) と (x_b, z_b) との間の距離である.

圧気室内の空気圧は Boyle・Charles の法則に基づいた断熱変化を仮定することにより, 次式のような状態方程式が与えられる.

$$p^{(0)} + \Delta P = P^{(0)} \left\{ \frac{V^{(0)}}{V^{(0)} + \Delta V} \right\}^\gamma, \quad \gamma = 1.4 \quad (9)$$

ここで、 $V^{(0)}$ は空気の初期体積であり、 ΔP と ΔV はそれぞれ空気圧と体積の変動量である。上式を静止状態の $V^{(0)}$ に対してTaylor級数展開し、 ΔP と ζ に関する摂動展開式と、圧気室内の力学的境界条件を用いると、 $O(\epsilon^0)$ 、 $O(\epsilon^1)$ および $O(\epsilon^2)$ の空気圧の成分が求められる。

3. 計算結果: まず、本研究の計算結果の妥当性を検討するため、既往の線形計算結果と本研究の $O(\epsilon^1)$ の解を比較してみた結果、両方がよく一致するのが認められた。 $O(\epsilon^2)$ までの水面波形の計算結果が図-2と3に示されている。図-2は半潜水压気固定構造物の場合の時間波形で、 $x/h = 4.11$ と $x/h = 3.18$ 地点の波形はそれぞれ構造物前面の腹と節での波形を、 $x/h = -1.73$ 地点の波形は構造物後面での波形の例を与えている。図からわかるように、部分重複波の領域で非線形波が大きく、腹より節で非線形性が強く現れる。 $O(\epsilon^2)$ の波で与えられる平均水位の変動をみると、腹で上昇、節で下降する現象となり、一般の重複波の非線形解析結果と一致する。図-3は潜水压気固定構造物に対する時間波形を示したもので、 $x/h = 3.64$ と $x/h = 3.08$ 地点の波形は構造物前面での波形を、 $x/h = -0.28$ 地点の波形は構造物上面での波形の例である。半潜水状態より一般的に非線形性が大きく、特に、構造物上面での波形は構造物前面で急激な水深の変化と構造物後面で水深の変化による反射のため、構造物前面より大きな非線形波が発生すると思われる。図-4は潜水压気固定構造物に対する空気圧の時間変化を示した例である。圧気室の水面変動が構造物前後での水面変動より小さいため、水面波形より空気圧に及ぼす非線形性の効果は小さい。しかし、圧気室内の水面が自由水面に近づき、さらに、通過率が高い場合は非線形性が強くなると考えられる。

4. おわりに: 今後、水理実験を行い、数値解析結果と比較・検討する所存である。

(参考文献) (1) 岩田ら:半潜水压気型浮体の波浪応答および波の変形に関する研究, 海開論, Vol.7, pp.43-48.

(2) 吉田ら: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, 海工論, Vol.36, pp.469-473.

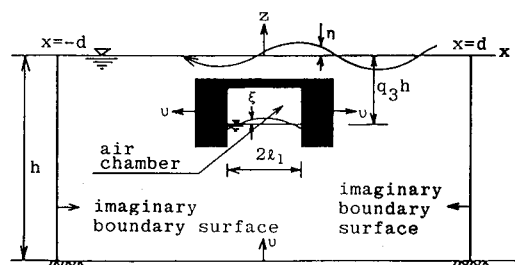


図-1 概念図

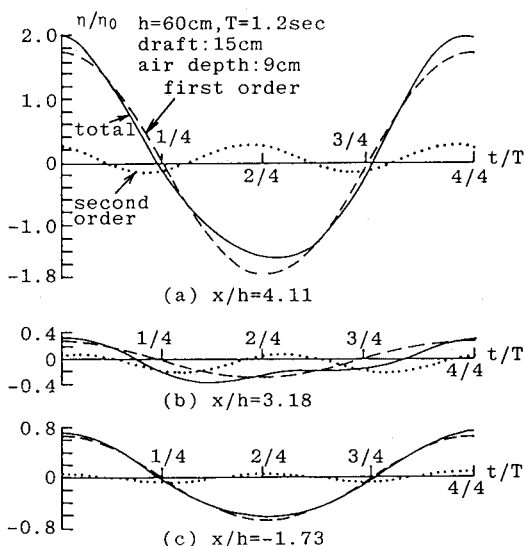


図-2 半潜水压気型構造物による波形

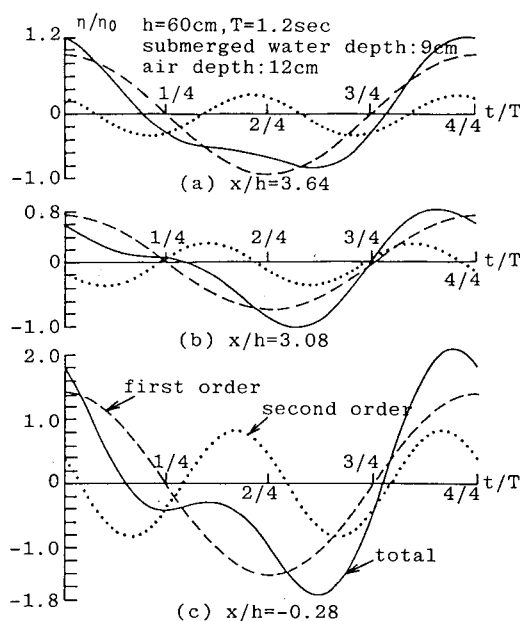


図-3 潜水压気型構造物による波形

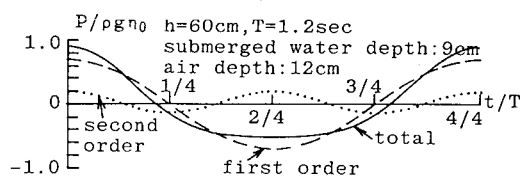


図-4 空気圧の変化