

圧気浮体の安定性と制御に関する研究 (1)

神 崎 正*・田 中 良 弘**

1. 緒 言

海洋において重量物を運搬する方法として、古来より浮力を利用する方法がとられてきたが、最近では起重機船の大型化によってかなりの重量物の運搬や据付けが容易に行なわれるようになった。しかし、起重機船の吊り能力にも限度があり、構造物が巨大化した場合は浮上曳航法をとらざるを得ないことが多い。しかし、この時最も大きな問題は、ドックや航路水深などから受ける吃水の制約である。こうした問題に対していろいろな方法を検討した結果、底のない構造物に上蓋をし、圧気によって浮上、曳航を行なう方法を提案するに至った。

本研究の目的は、第一に圧気浮体の静的な復原特性を求める理論解を導くこと、第二に動揺特性、曳航特性、内圧の変動など圧気浮体の動的な特性を明らかにするこ

と、第三に圧気浮体の姿勢制御の方法を研究することにある。

そのためにまず、第一ステップとして圧気浮体の復原特性および圧気管理に関する理論解析手法を導き、第二ステップとして模型実験によってそれらの検照を行なった。こうした一連の研究結果に基づき、圧気浮体の設計法、施工法を提案し、第三ステップとして実際の海域における実大実験によってそれらの実証を図った。

本論文は、二編より成り、今回は実大実証実験に至るまでの基礎研究を前編としてまとめたものである。

2. 実験シリーズおよび実験模型

実験は、圧気浮体の基本特性を調べる特性試験、波浪動揺実験、曳航実験および圧気管理試験などの一連のシリーズについて行なった。

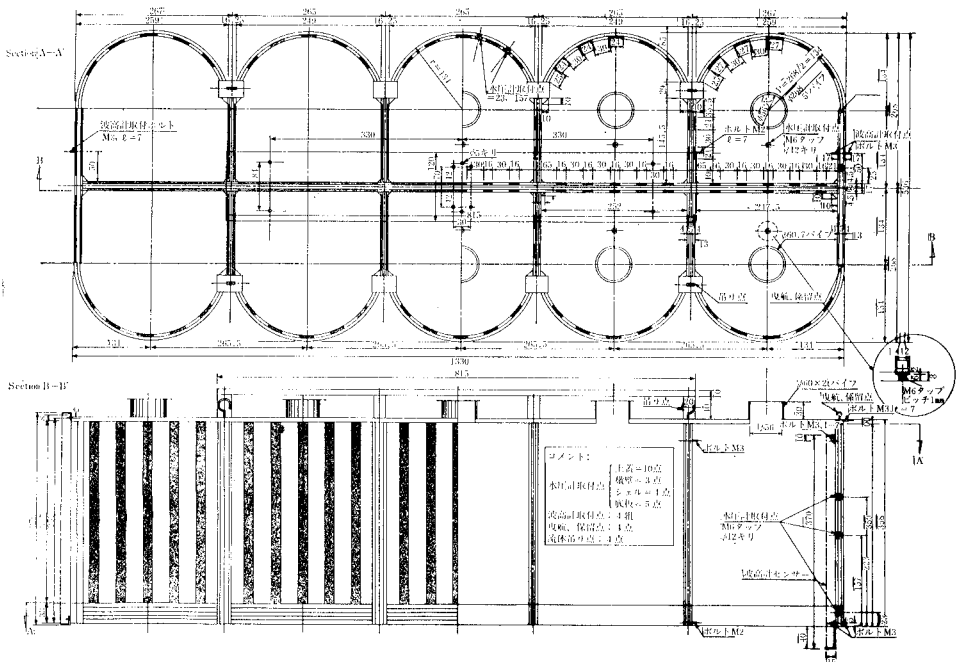


図-1 圧気浮体模型構造図

* 正会員 工博 大成建設(株)技術開発部海洋開発室

** 正会員 工修 大成建設(株)技術開発部海洋開発室

実験に用いた模型の構造は、図-1 の通りで、実大諸元が幅 16.1 m、高さ 10.5 m、長さ 40 m のもので縮尺は 1/30 である。なお、以下に述べる理論解析はすべてこの構造を対象に検討を行ない、また数値計算も実大値を用いている。

3. 圧気浮体の相似性

圧気浮体の各種特性を模型実験で確かめる際に、通常の底版浮体と同様に模型相似則が成り立つかどうかは重要な問題である。

圧気浮体の相似性を検討するため、図-2 に示すように、 Δy だけ強制的に沈めた場合を考える。

ボイル・シャルルの法則より、等温変化とすると式 (1)~(3) が成り立つ。

$$(p_0 + p_1) \cdot l_1 = (p_0 + p_2) \cdot l'_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p_1 + \Delta p = p_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta y + l'_1 = \Delta d + l_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに

p_0 : 大気圧 (=10 t/m²)

p_1 : 変動前の内圧 = $\gamma_w \cdot d_1$

p_2 : 変動後の内圧 = $\gamma_w \cdot d_2$

Δp : 変動圧力 = $\gamma_w \cdot \Delta d$

式 (1)~(3) より l'_1 を消去し整理すると式 (4) が得

られる。

$$\gamma_w (\Delta d)^2 + \Delta d (p_0 + \gamma_w d_1 - \gamma_w \Delta y + \gamma_w l_1) - \Delta y (p_0 + \gamma_w d_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) を模型縮尺 S により模型換算すると式 (5) が得られ、これを Δd について解くと式 (6) が得られる。

$$\gamma_w (S \Delta d)^2 + S \Delta d (p_0 + \gamma_w S d_1 - \gamma_w S \Delta y + \gamma_w S l_1) - S \Delta y (p_0 + \gamma_w S d_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta d = 1/2 \cdot \{ (\Delta y - p_0 / \gamma_w S - d_1 - l_1) \pm \sqrt{(p_0 / \gamma_w S + d_1 + l_1 - \Delta y)^2 + 4 \Delta y (p_0 / \gamma_w S + d_1)} \} \quad \dots\dots (6)$$

この Δd と Δy の関係を、縮尺 S をパラメーターとして求めたのが図-3 である。

この結果から、縮尺 S が 1/30 あるいは 1/10 程度の模型実験では、空気による復原特性は、見掛け上底版浮体と同程度であり、そのままでは圧気浮体の各種特性を再現することは不可能であることがわかる。

そこで圧気浮体の相似則を緩和する方法として、図-10 に示す予備空気室を設けて圧気室と連通し、空気バネを調整する方法を考案した。予備空気室の容量は、各吃水量ごとに図-3 の $\Delta y \sim \Delta d$ の関係を満足するよう計算によって求めた。

4. 圧気浮体の復原特性

圧気浮体の復原機構を明らかにして、その復原特性を求める理論解を導く。

まず静止状態における力の釣り合いは、図-4 より式 (7)~(10) が成り立つ。

$$\Sigma W = F_A + F_c \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_A = p_1 \cdot A_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_c = d \cdot \gamma_w \cdot A_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$l_2 = p_1 / \gamma_w \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに

ΣW : 浮体の全重量 (t)

F_A : 空気による浮力 (t)

F_c : 構造体にかかる浮力 (t)

A_a : 圧気室平面積 (m²)

A_c : 構造体コンクリート平面積 (m²)

d : 吃水 (m)

次に、圧気浮体が回転角 θ 傾斜した時の、重心軸回りの全復原モーメントは図-5 のようにモデル化される。

全復原モーメント ΣM を、圧気による復原モーメント M_A と水圧による復原モーメント M_B 、 M_C に分解して求める。

圧気による復原モーメントは、図-6 の力の釣り合いから式 (11)~(14) のようになる。ただし、 M_A は ①~③ および ①'~③' の内圧成分に分けるものとし、式中 Δh は回転角 θ による体積変化に対応する内圧変化である。

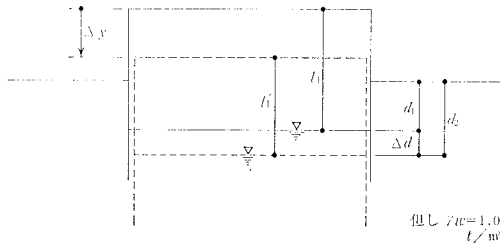


図-2 圧気浮体の強制沈下モデル

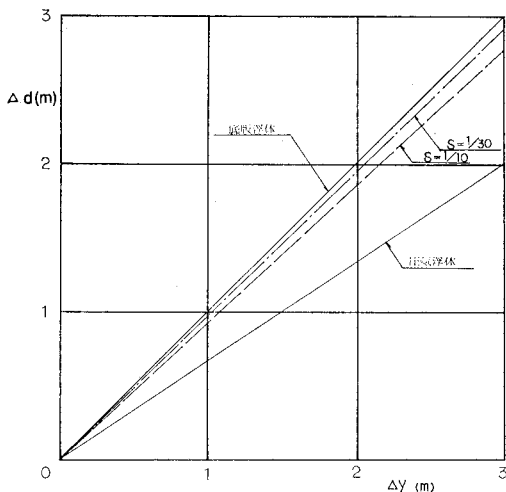


図-3 $\Delta y \sim \Delta d$ の関係

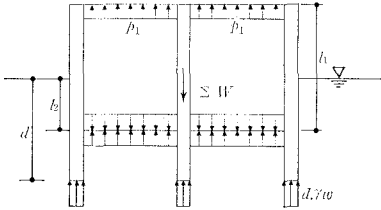


図-4 傾斜前の安定

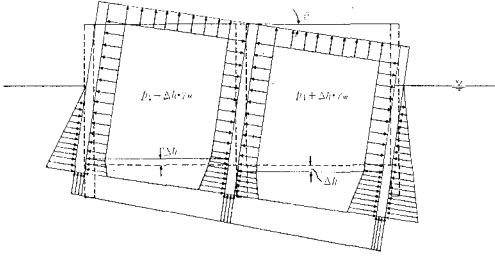


図-5 傾斜時の復元機構

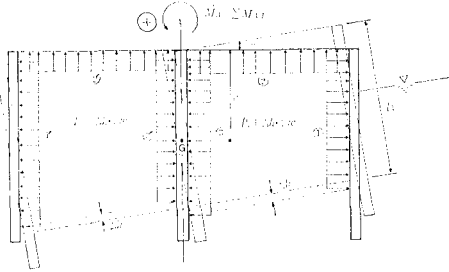


図-6 圧気による復元モーメントの成分

$$M_A = n \sum M_{Ai} = n \{ (M_{A1} + M_{A1'}) + (M_{A2} + M_{A2'}) + (M_{A3} + M_{A3'}) \} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned} M_{A1} + M_{A1'} &= \int_{\pi/2-\alpha_0}^{\pi/2+\alpha_0} (p_1 + \Delta h \gamma_w) r_0 \\ &\quad \times \sin \alpha \{ l_1 + \Delta h - (B_1 + r_0 \sin \alpha) \theta \} \\ &\quad \times \left\{ \frac{l_1 + \Delta h - (B_1 + r_0 \sin \alpha) \theta}{2} - e \right\} d\alpha \\ &\quad - \int_{\pi/2-\alpha_0}^{\pi/2+\alpha_0} (p_1 - \Delta h \gamma_w) r_0 \\ &\quad \times \sin \alpha \{ l_1 - \Delta h + (B_1 + r_0 \sin \alpha) \theta \} \\ &\quad \times \left\{ \frac{l_1 - \Delta h + (B_1 + r_0 \sin \alpha) \theta}{2} - e \right\} d\alpha \\ &= 2r_0 \sin \alpha_0 \{ 2p_1 (\Delta h - B_1 \theta) (l_1 - e) \\ &\quad + \Delta h \gamma_w l_1 (l_1 - 2e) \} \\ &\quad - 2r_0^3 \theta p_1 (l_1 - e) (\alpha_0 + \cos \alpha_0 \sin \alpha_0) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{aligned} M_{A2} + M_{A2'} &= \int x (p_1 + \Delta h \gamma_w) dA - \int x (p_1 - \Delta h \gamma_w) dA \\ &= 2G_x \cdot \Delta h \cdot \gamma_w \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{A3} + M_{A3'} &= -(p_1 + \Delta h \gamma_w) (l_1 + \Delta h) \\ &\quad \times 2r_0 \sin \alpha_0 \left(\frac{l_1 + \Delta h}{2} - e \right) \end{aligned}$$

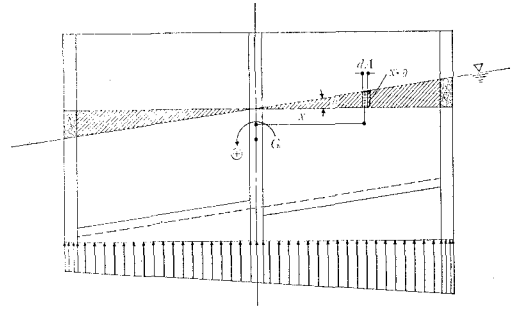


図-7 復元モーメント \$M_B\$ の成分

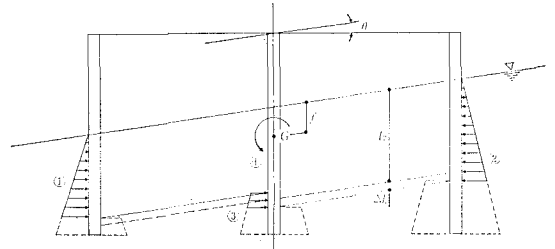


図-8 復元モーメント \$M_C\$ の成分

$$\begin{aligned} &+ (p_1 - \Delta h \gamma_w) (l_1 - \Delta h) \\ &\quad \times 2r_0 \sin \alpha_0 \left(\frac{l_1 - \Delta h}{2} - e \right) \\ &= 2r_0 \sin \alpha_0 \cdot \Delta h \{ \gamma_w l_1 (2e - l_1) - 2p_1 (l_1 - e) \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに

\$n\$: 縦方向のセル数

\$r_0\$: 空気室内接円の半径

\$B_1\$: 構造体中心より内接円中心までの距離

\$α_0\$: 内接円の開角の 1/2

\$G_x\$: 構造体の断面一次モーメント

図-7 に示す成分 \$M_B\$ は式 (15) で得られる.

$$M_B = \int dA \cdot x \theta \cdot \gamma_w \cdot x = \int x^2 dA \cdot \theta \cdot \gamma_w = I_G \cdot \theta \cdot \gamma_w \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに

\$I_G\$: 重心軸回りの構造体の断面二次モーメント (\$m^4\$)

図-8 に示す \$M_C\$ は次式より得られる.

$$\begin{aligned} M_C &= n \cdot \int_{\pi/2-\alpha_1}^{\pi/2+\alpha_1} \frac{(l_2 - \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot r_1 d\alpha \\ &\quad \times \sin \alpha \left\{ \frac{2}{3} (l_2 - \Delta h) - f + (B_1 + r_1 \sin \alpha) \theta \right\} \\ &\quad - n \cdot \int_{\pi/2-\alpha_1}^{\pi/2+\alpha_1} \frac{(l_2 + \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot r_1 d\alpha \\ &\quad \times \sin \alpha \left\{ \frac{2}{3} (l_2 + \Delta h) - f - (B_1 + r_1 \sin \alpha) \theta \right\} \\ &\quad + \frac{(l_2 - \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot \sum B_s \left\{ \frac{2}{3} (l_2 - \Delta h) - f + l_s \theta \right\} \end{aligned}$$

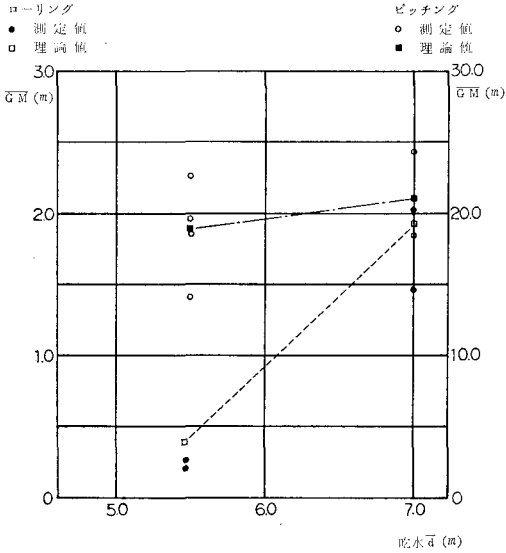


図-9 模型実験の復原特性

$$\begin{aligned}
 & -\frac{(l_2 + \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot \sum B_s \left\{ \frac{2}{3} (l_2 + \Delta h) - f - l_s \theta \right\} \\
 = & n \cdot \left[(l_2 - \Delta h)^2 \gamma_w \cdot r_1 \left\{ \frac{2}{3} (l_2 - \Delta h) - f + B_1 \theta \right\} \sin \alpha_1 \right. \\
 & + \frac{(l_2 - \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot r_1^2 \theta (\alpha_1 + \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \\
 & - (l_2 + \Delta h)^2 \gamma_w \cdot r_1 \left\{ \frac{2}{3} (l_2 + \Delta h) - f - B_1 \theta \right\} \sin \alpha_1 \\
 & \left. + \frac{(l_2 + \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot r_1^2 \theta (\alpha_1 + \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) \right] \\
 & + \frac{(l_2 - \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot \sum B_s \left\{ \frac{2}{3} (l_2 - \Delta h) - f + l_s \theta \right\} \\
 & - \frac{(l_2 + \Delta h)^2}{2} \gamma_w \cdot \sum B_s \left\{ \frac{2}{3} (l_2 + \Delta h) - f + l_s \theta \right\} \\
 & \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

ただし、 B_s , l_s は外接円弧以外の直線部の長さおよび重心よりの水平距離で、 α_1 は外接円の開角の 1/2 である。

式 (11), (15), (16) より得られた M_A , M_B , M_C を用いて、次式より復原特性を示す $\overline{GM}$ を算定することができる。

$$\overline{GM} = \frac{\sum M}{(F_A + F_0) \cdot \theta} = \frac{M_A + M_B + M_C}{\sum W \cdot \theta} \quad \dots (17)$$

図-1 の函体について求めた $\overline{GM}$ の理論値を、傾斜試験より求めた実験値と比較したのが 図-9 である。この結果から、理論値と実験値は良い一致を見せており、従って提案した理論式を用いることによって、圧気浮体の復原特性はほぼ正確に求められることがわかった。

5. 圧気浮体の波浪動揺特性

図-10 に示す装置により圧気浮体の波浪動揺実験を行った。図-11 は、予備空気室の有無が圧気浮体の

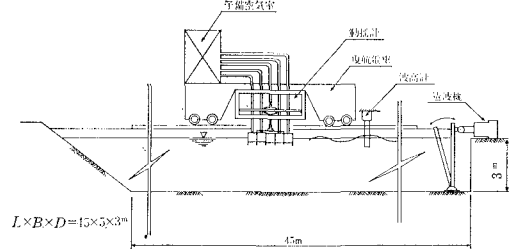


図-10 実験装置

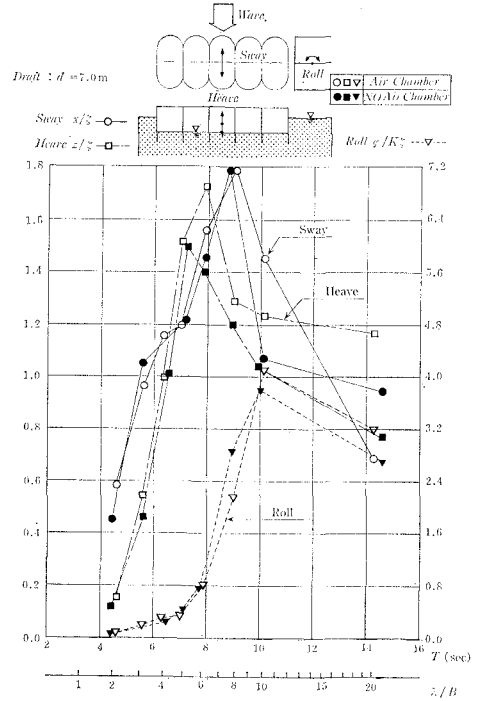


図-11 圧気浮体空気バネの波浪動揺に及ぼす影響

動揺特性に与える影響を示したものである。図より、予備空気室の有無による上下方向の復原バネの相異が、ヒービングの卓越周期の差として現われている。しかし、スウェイ、ロールについては、その差が少なく、予備空気室の固有周期への寄与は小さいといえる。また、いずれのモードも、共振周期よりも長周期側で、予備空気室の影響がでている。

図-12 は、ほぼ同じ運動特性をもった圧気浮体と底版浮体の減衰特性を示したもので、これより両者には顕著な差がないことがわかった。

次に、圧気浮体のローリング固有周期における付加質量について述べる。静水中で減衰がない場合のローリングの運動方程式および固有周期は次式で示される。

$$\frac{(I + \Delta I)}{g} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + W \cdot \overline{GM} \cdot \theta = 0 \quad \dots (18)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I + \Delta I}{W \cdot \overline{GM} \cdot g}} \quad \dots (19)$$

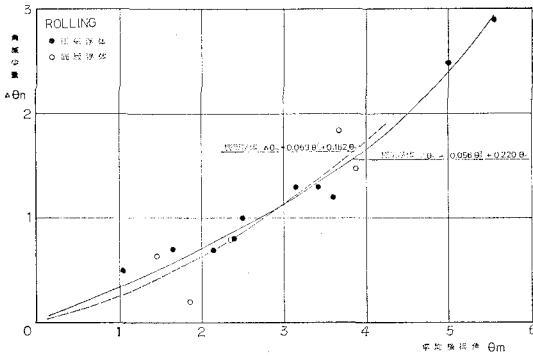


図-12 減減曲線

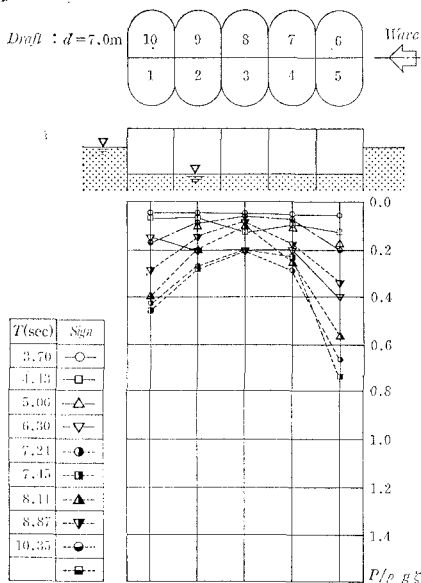


図-13 内圧の変動(ピッチング)

ここに

I : 浮体の回転慣性モーメント ($\text{ton} \cdot \text{m}^2$)

ΔI : 流体による付加回転慣性モーメント ($\text{ton} \cdot \text{m}^2$)

g : 重力加速度 (m/sec^2)

W : 排水量 (ton)

自由振動実験より得られた固有周期および傾斜試験より得られた $\overline{GM}$ により, ΔI を求めた。その結果, 吃水 7.0 m で付加慣性係数 ($\Delta I/I$: C_{ADD} で表示) の値は約 0.35 であった。

一方, 波浪中動揺における内圧の変動は, ローリングの最大値で入射波高の 20~25%, ピッチングでは 図-13 に示すように 30~35% 程度であった。底版浮体の場

合には, 底部の圧力変動はピッチングで入射波高の 75% の最大値を示した。これは, 底版浮体が波による揚圧力を直接受けるのに対し, 圧気浮体は空気による緩衝効果を受けたためと見られる。

6. 圧気浮体の曳航特性

圧気浮体の曳航特性に関しては, 図-10 に示す曳航電車によって曳航中の動揺特性, 内圧の変動などを調べた。実験は静水中曳航のほか, 波高 1 m, 周期 3.58~8.77 秒の 4 種類の波による波浪中曳航も行なった。

静水中曳航の抗力係数は 0.8 前後であったが, 箱型浮体の抗力係数 1.0~1.5 程度に比べ小さいのは, 端面が曲面をしているためと考えられる。

波浪中曳航の場合は, 曳航速度によって見掛け上波の周期が変化するため, 解析上はこの出逢い周期で検討した。曳航中のピッチングは, 出逢い周期が 8 秒付近で最大値を示しており, これはフリー状態での卓越周期と一致している。

曳航中のサージングについては, 出逢い周期 5~6 秒付近で最大値を示しているが, この場合フリー状態での卓越周期秒に短周期側になっている。これは曳航索のバネによる影響と考えられる。曳航抵抗はこのサージングと密接に関係しており, サージングの固有周期を出逢い周期との関係が抗力係数の変動に最も大きな影響を及ぼしているものと推測される。

波浪中曳航における内圧の変動は, 波浪動揺に比べ若干大きく, 最大値で入射波高の 50% 程度に相当する水圧であった。

7. 結 言

理論解析および各種の実験によって, 圧気浮体の基本特性に関する様々な点が明らかにされ, また今後の設計に際して, その特性をほぼ正確に推定しうることがわかった。

最後に, 本研究の遂行にあたり御指導を頂いた東北大学岩崎教授, 運輸省港湾技術研究所の方々に感謝の意を表します。なお, 本研究の一部は, 運輸省試験研究補助金の交付を受けて行なわれたことを付記し, 関係各位に厚く御礼申し上げる次第です。

参 考 文 献

- 1) 大串雅信: 理論船舶工学(上・中・下), 海文堂, 1972 年。
- 2) 神崎 正: 大水深海洋構造物の急速施工法, 海と港 No. 5, 北海道港湾海岸研究会, 昭和 57 年 3 月。