

圧気浮体の安定性と制御に関する研究(2)

神 崎 正*・藤 井 俊 二**・田 中 良 弘***

1. 結 言

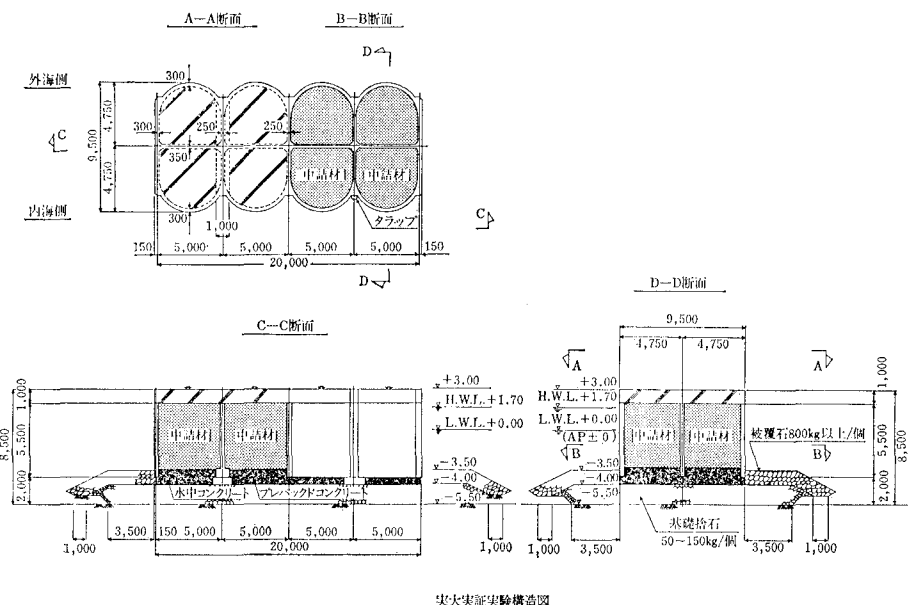
前報において、圧気浮体の基本特性が明らかにされ、その復原特性は理論解により推定できることが実験的に裏付けられた。また、波浪動揺特性、曳航特性や内圧の変動についても、実際の設計・施工に有用な種々のデータを得ることができた。

しかしながら、これらはいずれも模型実験レベルでの話であり、果して相似則を忠実に再現できたか、また実際の操作段階で果して正確にコントロールが行えるのか、などについては実大規模において実証する以外に明らかにするすべはない。例えば、漏気量の推定と必要空気供給量、配管方法、圧気コントロールの操作、レベルや内圧などの測定管理方法、非常用バルブや上蓋等の設備、いずれをとっても重要な実施上の検討課題である。

本論文では、圧気浮体の安定性と制御に関して、その基本特性の実大規模での検証について述べるとともに、こうした実施上の検討課題をどう解決したかについても若干言及していきたい。

2. 実験シリーズおよび実証項目

表一に示すようにして、圧気浮体の安定性と制御に関する一連の研究を進めた。特に実大実証実験の計画をたてる上で必要な漏気量の推定や姿勢制御の方法などについては、予備実験を繰り返して万全の対策をたてた。実大実証実験では、主として模型実験および理論解析で得られた結論を実際に確かめることに重点をおいたが、同時に模型レベルからだけでは判断しにくい、内圧の変動や付加慣性力などスケール効果の影響についても検討課題と考えた。函体の構造は図一の通りで、幅



図一 実大実証実験構造図

* 正会員 工博 大成建設(株)技術本部海洋開発室

** 工修 大成建設(株)技術本部海洋開発室

*** 正会員 工修 大成建設(株)技術本部海洋開発室

表一 実験シリーズ

実験シリーズ	実験諸元	検討項目
圧気浮体の安定性の実証	運動性能実験水槽 (5 m×30 m) 模型縮尺 1/30 曳航速度 2~6 ノット	・復元力特性 ・動揺特性 ・姿勢制御 ・曳航特性 ・内圧の変動
	予備実験 室内実験	・漏気量 ・姿勢制御パイプ方式の安全性
	実大実証実験 函体 (幅 9.5 m×高 5.5 m ×長 20 m) 設置水深 $h=5$ m 設計波高 $H_D=4.65$ m 設計波周期 $T=7.0$ s	・漏気量 ・復元力特性 ・付加慣性力 ・曳航特性 ・内圧の変動 ・沈設

9.5 m×高 5.5 m×長 20.0 m である。

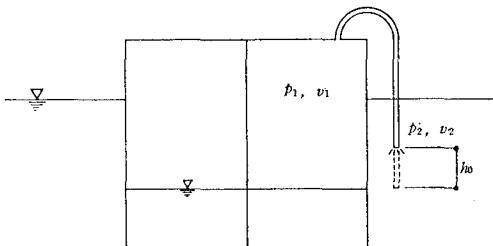
2. 圧気管理計画および沈設制御の実証

圧気管理を行う上で第一の課題は、漏気量を設定し必要な空気供給量を定めること、第二は、安全な姿勢制御の方法を選定すること、である。

第一の課題に対しては、その原因と考えられるセパレーター、打継目、止水板、パッキン等の影響を調べるために、4つの供試体を製作し各々内圧を変えて漏気量を求め、その最大値を必要給気量と設定した。

第二の姿勢制御の方法については、当初内圧によるコントロールを考えていたが、模型実験で失敗したこと、漏気量の変動が大きいことなどから断念した。前報²⁾ 図一の函体について実大値で試算したところ、1°の傾きを水平にするのに必要なコントロール圧がわずかに 0.004 kg/cm² であり、リリーフバルブの性能から考えても事実上制御は不可能であると判断した。

こうしたことから、図二に示す姿勢制御パイプ方式を考案した。この原理は、各室にエアを給気しながら図のように排気パイプを水中に突出してブローさせると、内圧と排気パイプの水頭圧が一致することを利用したものである。すなわち、排気パイプの水頭圧以上には内圧は上らないため一定の値となるものである。この特徴は、きわめて微小なレベル調整がパイプ1本の操作で行えることである。



図二 姿勢制御パイプによる沈設

図二により、姿勢制御パイプを h_0 上昇させて沈設するのに必要な時間を試算してみる。

ベルヌーイの定理より、大気圧を除くと (1) 式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho_a v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho_a v_2^2 + p_2 + \left(\lambda_p \frac{L_p}{D_p} + \zeta\right) \cdot \frac{1}{2}\rho_a v_2^2 \quad \cdots (1)$$

$v_1 \approx 0$, $p_1 - p_2 = w_0 h$ として内水位とパイプの鉛直距離が h の時の v_2 を求めると (2) 式が得られる。

$$v_2 = \sqrt{\frac{2w_0 h}{\rho_a \left(1 + \lambda_p \frac{L_p}{D_p} + \zeta\right)}} \quad \cdots (2)$$

ただし

ρ_a : 空気の密度 ($\approx 0.125 \times 10^{-3} \text{ t} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)

v_1, p_1 : 空気室内の流速および圧力

v_2, p_2 : パイプ先端の流速および圧力

λ_p : 管路摩擦係数 (≈ 0.012)

L_p, D_p : パイプ長およびパイプ径

ζ : 入口 (ζ_e), 曲り (ζ_b) の摩擦損失
($\zeta_e + 2\zeta_b = 0.03 + 2 \times 0.8 = 1.63$)

次に函体内の Δh の高さの空気が抜ける時間 dt は、空気室、パイプの面積を各々 A_1, A_2 とすると、

$$dt = \frac{A_1 \cdot \Delta h}{v_2 \cdot A_2} \quad \cdots (3)$$

となる。(2) および (3) 式より、 h_0 沈設するのに必要な時間 T は、(4) 式の通りとなる。

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{h_0} \frac{A_1}{v_2 \cdot A_2} dh \\ &= \frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{\rho_a \left(1 + \lambda_p \frac{L_p}{D_p}\right) + \zeta}{2w_0}} \int_0^{h_0} \frac{1}{\sqrt{h}} dh \\ &= 2 \cdot \frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{\rho_a \left(1 + \lambda_p \frac{L_p}{D_p} + \zeta\right)}{2w_0}} \sqrt{h_0} \quad \cdots (4) \end{aligned}$$

実大実証実験の函体の場合、 $A_1 = 18.05 \text{ m}^2$, $A_2 = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ($D_p = 0.05 \text{ m}$), $L_p = 15 \text{ m}$ として (4) 式を解くと

$$T = 358.1 \sqrt{h_0} = 253 \text{ sec} \approx 4.2 \text{ min}$$

となる。なお、この時間はパイプ径で自由に調整することができる。

次に、着床時には甲板バルブを全開にして沈設を行うと、図三により沈設時間は (5) 式のようになる。ただしバルブ径は同じとする。

$$T = \frac{A_1 \cdot S}{A_2} \sqrt{\frac{\rho_a (1 + \zeta_e)}{2w_0 l_e}} \quad \cdots (5)$$

ここで l_e : 内外水位差 ($= 2.5 \text{ m}$)

S : 沈設距離 ($= 0.5 \text{ m}$)

(5) 式より T を求めると、 $T = 23.0 \text{ sec}$ となる。

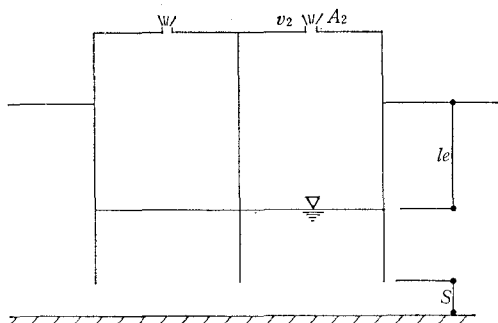


図-3 甲板バルブによる沈没

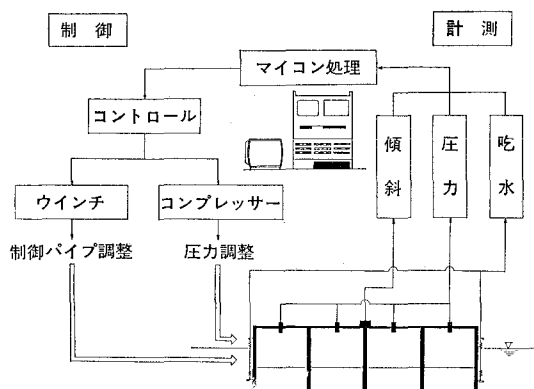


図-4 圧気コントロールシステム

以上の基本計画に基づいて 図-4 に示す圧気コントロールシステムを設計し実施したが、結果は計算値と良く対応していた。

4. 圧気浮体復原特性の検証

静的な復原特性を調べるため、浮上した状態で傾斜試験を行った。 w なる重量のものが偏心距離 e 移動した時の函体 (全重量 ΣW) の傾きを θ とすると、 $\overline{GM}$ は次式により表わされる。

$$\overline{GM} = \frac{w \cdot e}{\Sigma W \cdot \theta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

傾斜試験では、人間およびウエイトの移動によって w , e を変化させ、その時の微小角 θ を読みとって $\overline{GM}$ を求めた。 図-5 に示すように、ローリングについて吃水 8 ケース、計 24 点の $\overline{GM}$ を求めた。 θ が $0.6 \sim 0.8^\circ$ と微小なことや風や波の影響などを考慮に入れると、測定値は理論値と良い一致を示したと言えよう。

ピッチングについては、理論値では吃水 3.5m, 4.5m の時 $\overline{GM}$ は各々 8.5m, 10.0m であるが、実測値では吃水 4.0m の時 9.7m と良い一致を示した。

以上のことから、圧気浮体の復原特性は前報理論式によりほぼ正確に求められることが検証された。

傾斜試験時の内圧の変化も各セル内の内圧計によって同時に測定記録した。 図-6 は、その測定値と計測値を

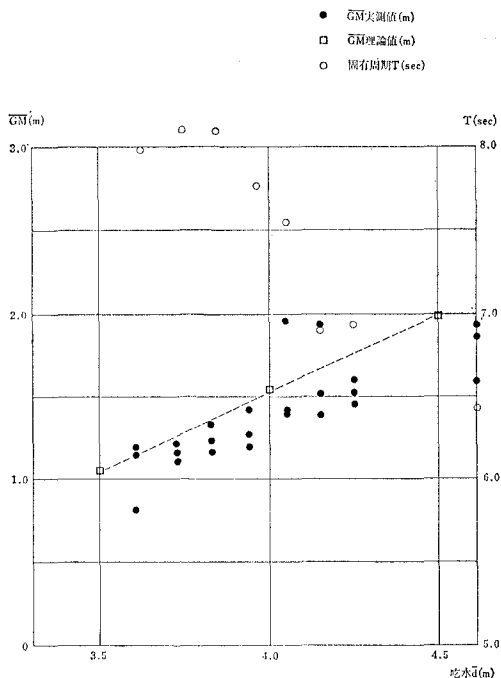


図-5 実大実証実験 復原特性と固有周期

ΔP (kg/cm^2) 各室の変化の絶対値の平均

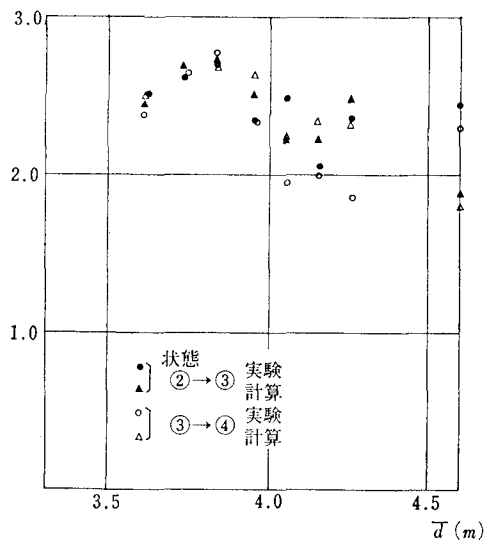


図-6 傾斜試験時の内圧変化 (ローリング)

プロットしたもので、図中状態 ②, ④ は人間のみの偏心, 状態 ③ は人間とウエイトの偏心を示す。 図よりローリングの内圧の変動の実測値は計算値と良く一致していることがわかる。

5. 圧気浮体動的特性の検証

圧気浮体の動的な特性を調べるため、自由振動試験を行った。 圧気浮体に、ウエイトによって自由振動を与

え、その時の固有周期を測定した。測定値を各吃水毎にプロットしたのが 図-5 である。

一方、前報²⁾より回転慣性モーメント I 、付加回転慣性モーメント ΔI および $\overline{GM}$ と固有周期 T の関係は次式で表わされる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I + \Delta I}{\Sigma W \cdot \overline{GM} \cdot g}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

計算によって求めた圧気浮体の回転慣性モーメント I および $\overline{GM}$ の実測値より (7) 式を用いて計算した値を T_1 、固有周期の測定値を T_2 とすると、 $\Delta I/I$ で定義された C_{ADD} は次式により求まる。

$$C_{ADD} = (T_2/T_1)^2 - 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

図-7 は、各吃水毎の C_{ADD} 値をプロットしたものである。図より、実大実証実験でのローリングの C_{ADD} は平均 0.5、ピッチングの C_{ADD} は平均 1.5 程度であり、各々模型実験結果と比較的良好に対応している。このことから、 $\overline{GM}$ および回転慣性モーメントの計算値に付加慣性を考慮することにより、圧気浮体の固有周期を求め、動揺特性を推定できることがわかった。

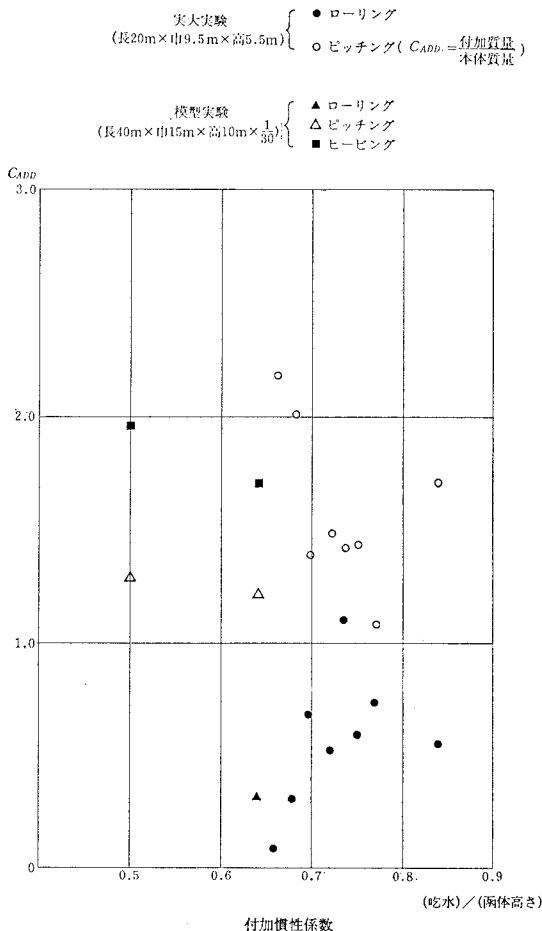


図-7 付加慣性係数

6. 圧気浮体曳航特性の検照

圧気浮体の静的および動的な安定性や姿勢制御、圧気コントロールなどを実証し、その安全性が確認できたため、最後に曳航実験に移った。

曳航実験による検照項目は、曳航中の動揺、内圧の変動、函体応力の測定、曳航抵抗と抗力係数の測定、曳航中の姿勢制御、吃水調整などである。

図-8 はその測定フローを示したものである。曳航は 1 500 PS の曳船によって行われ、船尾にはクレーン、コンプレッサー等を搭載した 300 t 台船が配置された。曳航速度は、0.72 m/sec、0.99 m/sec、1.06 m/sec、1.16 m/sec、1.45 m/sec と 5 ケース行った。

図-9 は曳航中の動揺の測定結果で、横軸に曳航速

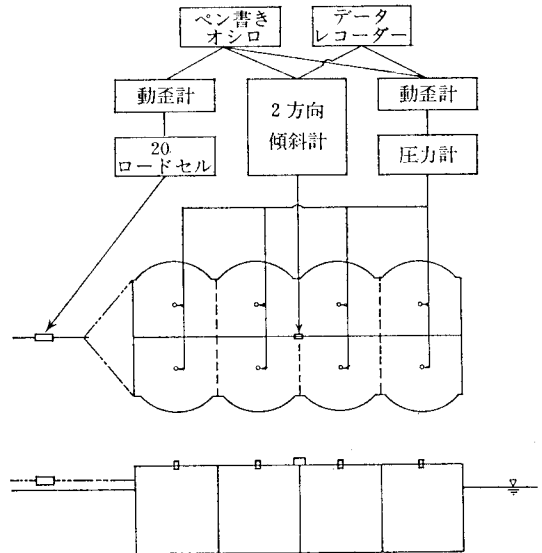


図-8 曳航実験測定フロー図

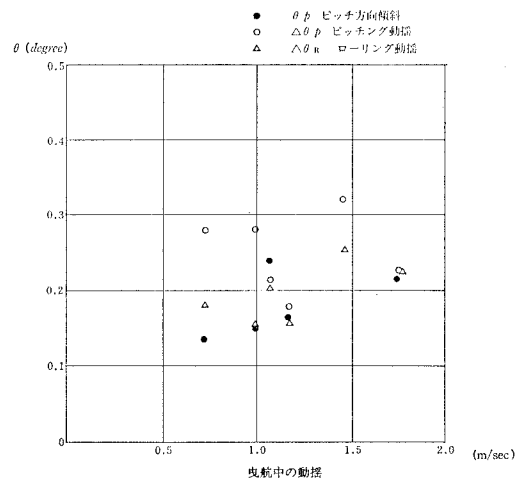


図-9 曳航中の動揺

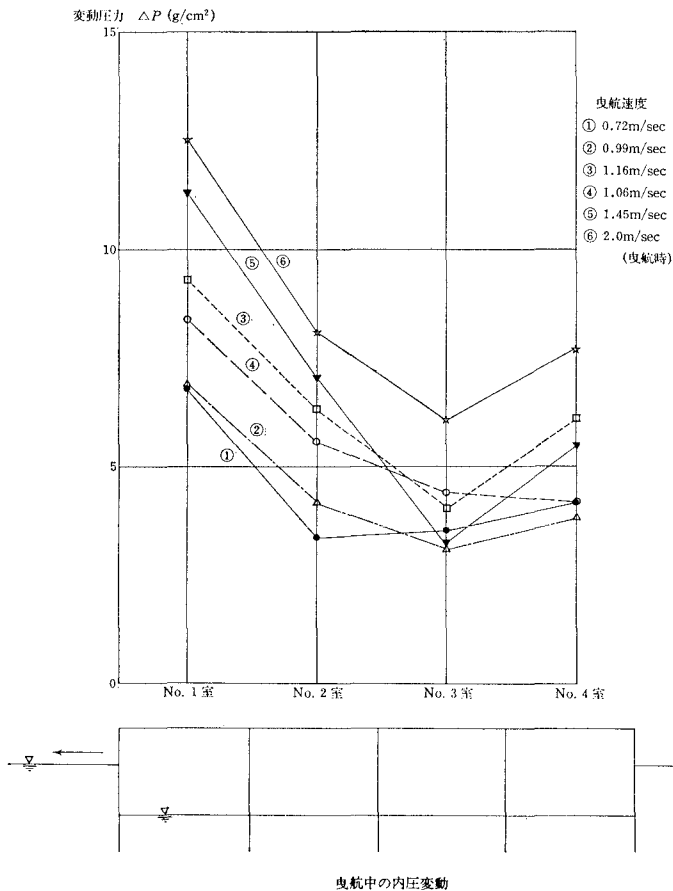


図-10 曳航中の内圧変動

度、縦軸に動揺量を、運動方向をパラメーターとして示した。この結果、曳航中の傾斜角は最大 0.238° 前傾し、曳航速度に比例していることがわかる。動揺量は、ローリングで 0.25° 、ピッチングで 0.32° で、曳航速度が増加するほど大きい傾向を示している。

図-10 は、曳航中の内圧変動を示したもので、曳航速度をパラメータとしてプロットしたものである。曳航速度が増すほど内圧の変動値は増加しているが、この傾向は上記の動揺量の場合より顕著である。これは、図-9 がピッチング、ローリングのみの関数に対して、ヒービングが付加されたためより顕著に出たものとみられる。しかし、いずれにしても内圧の変動値は最大で 12.5 g/cm^2 程度であり設計内圧の 5% でしかたなかった。

曳航抵抗は、曳航索に 20t のロードセルを取り付け、曳船上の動歪計で測定記録した。曳航力は曳航速度の自乗にほぼ比例して増加した。前述のように、函体船尾に台船を接続していたため、抗力係数 C_D は正確には不明であるが、仮に台船の抗力係数を 1.5 と考えた場合には圧気浮体の抗力係数 C_D はおよそ 1.5 程度であった。

7. 結 言

実際の海域における実大実験によって、圧気浮体の各種検討課題の実証を行うことができた。理論解析や模型実験から提案した設計・施工法を検照しただけでなく、実際のハンドリング等を通じて様々な不明な要因を解明し、経験できたことは大きな成果であった。

また、圧気浮体は、従来の水バラスト等による場合に比べ姿勢制御や浮上沈没が容易であり、今後の大型海洋構造物をはじめ様々な用途への応用が考えられる。本論文がこうした展開へのヒントとなれば幸いである。

最後に、本研究の遂行にあたり終始御指導戴いた岩崎敏夫博士に感謝の意を表します。同時に、本研究の一部は運輸省

港湾局の試験研究補助金によって実施され、運輸省港湾技術研究所の技術指導によって設計指針⁵⁾が完成したことを記し、関係各位には改めて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，海文堂，1972 年。
- 2) 神崎 正，田中良弘：圧気浮体の安定性と制御に関する研究 (1)，第 30 回海洋工学講演会論文集，1983。
- 3) 神崎 正：海洋構造物の合理化施工法，土木施工，Vol. 33, No. 14, 1982。
- 4) 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。
- 5) マルチセル工法研究委員会：マルチセル工法設計指針・同解説，施工指針・同解説，昭和 57 年 12 月。