

浮体の安定と姿勢制御について

田中正博
(技術研究所)

外村健司
(土木本部開発部)

小西康之
(技術研究所)

堀哲郎
(土木本部開発部)

§ 1. はじめに

大型の海洋構造物は、ドライドックで躯体の一部（または全て）を建造し、海上に浮かべて目的地まで曳航し据付けられる。したがって、ドライドックを出てから目的地に沈設されるまでの間は、浮体としての安定性を有していなければならない。また、曳航に先立って各種装置や機器を搭載したり、目的地で構造物の基礎を海底地盤に貫入されるため浮体を傾斜させて沈設する場合や、水深の浅い海域を曳航する場合など、浮体の姿勢を制御する必要がある。従来、橋脚用ケーソン等ではクレーン船により安定を確保しながら据付けたり、経験者がケーソンの姿勢状態を監視しながらフィードバックにより姿勢を修正しながら据付けている。しかし、これらの方法は次のような欠点がある。

- ①遠隔地に据付ける場合、クレーン船の使用は不経済である。
- ②浮体の姿勢状態を監視しながら制御するためには、かなりの経験が要求されるし、オペレーターによる個人差を生じる。
- ③構造物の形状が複雑な場合やバラスト調整用の隔壁数が多い場合、オペレーターが即時的に対応することは困難である。
- ④経験に基づいているため、正確な沈設所要時間の把握や異常時への対応等を含めた最適な沈設計画が立てられない。

これらの欠点を改善するため、予測制御による大型海洋構造物の沈設システム（イマーション・システム）を開発した。本報告はイマーション・システムのうち、

- (1)内部に自由水を有する3次元任意形状浮体の静的復原力の計算法と模型実験による検証
- (2)任意の姿勢状態にある浮体の隔壁へのバラスト水流入量の計算法と模型実験による検証
- (3)隔壁へのバラスト水の注排水による浮体の姿勢制御方法

について述べたものである。

§ 2. 復原力と姿勢制御の計算方法

2.1 復原力¹⁾

2.1.1 基本的な考え方

復原力は、何らかの外力により浮体のつり合い状態がこわれたために生ずる自重と浮力の作用線のずれに起因するモーメントである。したがって、復原力は浮体の重心と浮心の位置を求めることに帰着する。重心と浮心の計算は構造物の断面形状により、矩形、円形および任意形の3つに分類した。重心と浮心の計算は基本的に同じことであるので、以下に矩形断面隔壁に対するバラスト水の重心位置の計算方法を示す。

2.1.2 座標系および記号

矩形断面隔壁に対する基本座標系を図-1のようにとる。また、各記号の内容は以下に示すとおりである。

- B : 隔壁の幅 (x 方向)
- D : 隔壁の奥行 (y 方向)
- H_m : 隔壁の高さ (z 方向)
- H_s : バラスト水位
- θ : 浮体の最大傾斜方向 (z 軸時計まわりを正)
- ϕ : 最大傾斜方向の水面傾斜角 (反時計まわりを正とする)
- $x-y-z$: 図-1に示すような浮体を基準にした座標系

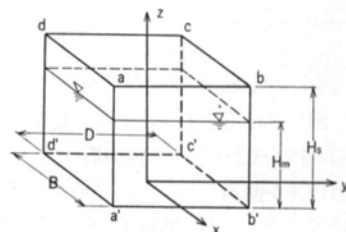


図-1 基本座標系

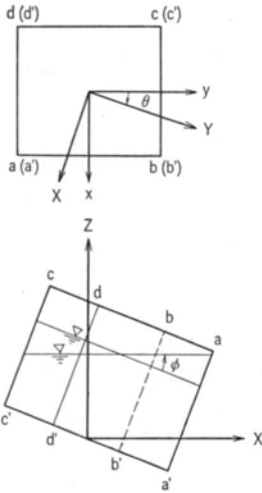


図-2 傾斜時の座標系

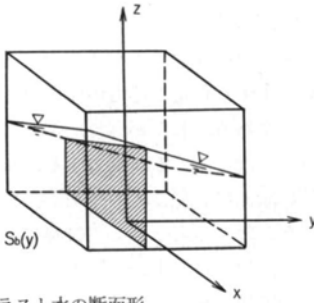


図-3 バラスト水の断面形

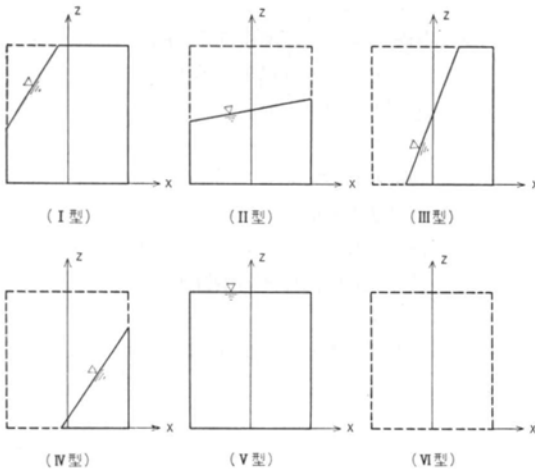


図-4 バラスト水の断面パターン

X-Y-Z: 図-2に示すような水面を基準にした座標系

2.1.2 傾斜時のバラスト水の断面形

矩形断面浮体が傾斜したとき、Y軸と直交する平面で切ったときのバラスト水の断面形(図-3参照)は図-4に示す6つのパターンに分類できる。すなわち、

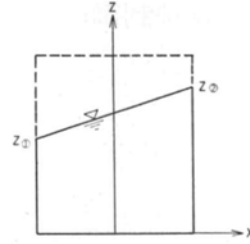


図-5 ⑩型の座標

- ①型: 水面が側壁と天井で交わる場合
- ②型: 水面が両側壁で交わる場合
- ③型: 水面が天井と床で交わる場合
- ④型: 水面が側壁と床で交わる場合
- ⑤型: 水面が天井と一致している場合
- ⑥型: 水が全くない場合

2.1.3 バラスト水の重心位置

Y軸と直交する任意の平面によって切られるバラスト水の面積を $S_b(y)$ 、重心の x, y, z 座標をそれぞれ $g_x(y), g_y, g_z(y)$ とすると、隔室内のバラスト水の体積 V_b 、その重心の x, y, z 座標 G_x, G_y, G_z はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} V_b &= \int_{l_1}^{l_2} S_b(y) dy \\ G_x &= \frac{1}{V_b} \int_{l_1}^{l_2} g_x(y) \cdot S_b(y) dy \\ G_y &= \frac{1}{V_b} \int_{l_1}^{l_2} y S_b(y) dy \\ G_z &= \frac{1}{V_b} \int_{l_1}^{l_2} g_z(y) \cdot S_b(y) dy \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

l_1, l_2 : 積分領域

$-D/2 \leq y \leq D/2$ におけるバラスト水の断面形が①～⑥のどの型の組合せになるか判別し、それぞれの断面形についてバラスト水の体積と重心位置を式(1)により求めれば、隔室内のバラスト水の体積と重心が得られる。

以下に⑩型の場合の V_b, G_x, G_y, G_z の計算式を示す。図-5に示すように両側壁と水面との交点の z 座標をそれぞれ z_1 および z_2 とするとき、

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= a_2 y + b_2 \\ z_2 &= a_4 y + b_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

とおくと、

$$\left. \begin{aligned} S_b(y) &= \frac{B}{2}(z_1 + z_2) \\ g_x(y) &= \frac{B(z_2 - z_1)}{6(z_2 + z_1)} \\ g_y(y) &= y \\ g_z(y) &= \frac{z_2^2 + z_2 z_1 + z_1^2}{3(z_2 + z_1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

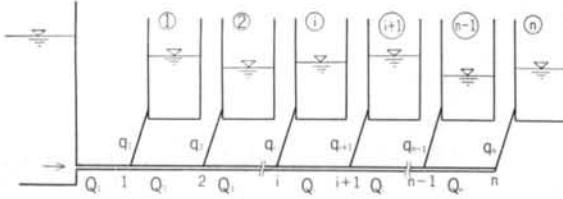
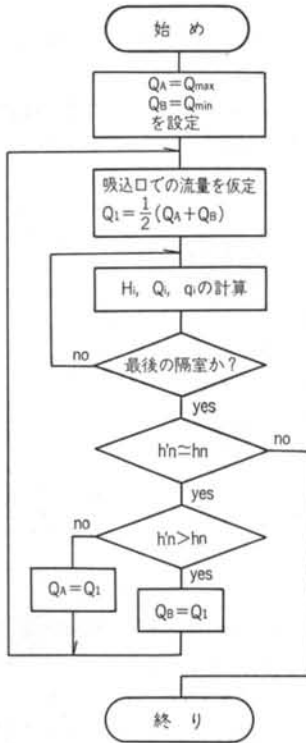


図-6 バラスト水量計算モデル



h_n : 最後の隔室の圧力水頭(既値)
 h_n : 最後の隔室の圧力水頭計算値

図-7 バラスト水量計算フロー

となるから、したがって、

$$\left. \begin{aligned} V_b &= \frac{B}{2} \int_{l_1}^{l_2} \{(a_2 + a_4)y + (b_2 + b_4)\} dy \\ G_x &= \frac{B^2}{12V_b} \int_{l_1}^{l_2} \{(a_4 - a_2)y + (b_4 - b_2)\} dy \\ G_y &= \frac{B}{2V_b} \int_{l_1}^{l_2} \{(a_2 + a_4)y^2 + (b_2 + b_4)y\} dy \\ G_z &= \frac{B}{6V_b} \int_{l_1}^{l_2} \{(a_2^2 + a_2a_4 + a_4^2)y^2 + (2a_2b_2 \\ &\quad + a_2b_4 + a_4b_2 + 2a_4b_4)y \\ &\quad + (b_2^2 + b_2b_4 + b_4^2)\} dy \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

となる。同様にして①, ②, ④, ⑤型についても V_b , G_x , G_y , G_z を求めることができる。

2.2 隔室へ流入するバラスト水量²⁾

バラスト水の注水には自然注水とポンプ注水があるがここでは、図-6に示すような主管から分かれた分岐管を通して隔室に自然流入する流量の計算方法を示す。いま、 $i-1$ 番目の分岐点と i 番目の分岐点にベルヌーイの定理を適用すると、

$$\left. \begin{aligned} H_i &= H_{i-1} - F_i \frac{V_i^2}{2g} = H_{i-1} - K_i \cdot Q_i^2 \\ K_i &= \frac{8F_i}{g \cdot \pi^2 \cdot D_i^4} \end{aligned} \right\} \dots(5)$$

同様に、 i 番目の分岐点と i 番目の隔室にベルヌーイの定理を適用すると、

$$\left. \begin{aligned} h_i &= H_i - f_i \frac{v_i^2}{2g} = H_i - k_i \cdot q_i^2 \\ k_i &= \frac{8f_i}{g \pi^2 d_i^4} \end{aligned} \right\} \dots(6)$$

また、連続の条件より、

$$Q_{i+1} = \delta_i \cdot Q_i - \delta_i' \cdot q_i \dots(7)$$

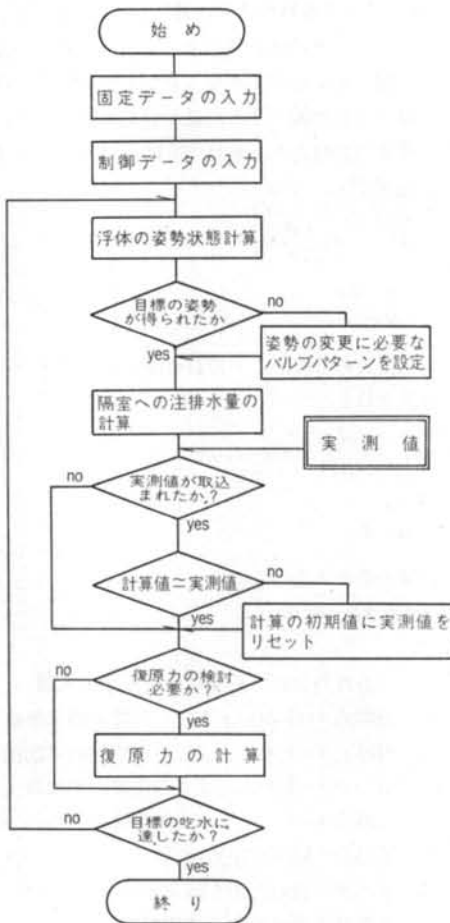
ここに、

- H_i : i 番目の分岐点直前における圧力水頭
- F_i : 分岐点 $i-1$ から i までの主管の損失係数
- V_i : 分岐点 $i-1$ から i までの主管内の平均流速
- Q_i : 分岐点 $i-1$ から i までの主管内の流量
- D_i : 分岐点 $i-1$ から i までの主管の内径
- h_i : i 番目の隔室の圧力水頭
- f_i : i 番目の分岐点から隔室までの損失係数
- v_i : i 番目の分岐管内の平均流速
- q_i : i 番目の分岐管内の流量
- d_i : i 番目の分岐管内の内径
- δ_i : i 番目の分岐管のバルブの開閉を示すインデックス (開のとき1.0, 閉のとき0.0)
- δ_i' : 分岐点 $i-1$ から i までの主管のバルブの開閉を示すインデックス

式(5)で $i=1$ のとき、 $H_{i-1}=H_0$ は吸込口での水位(吃水)であるから吸込口での流量を仮定すれば分岐点1での圧力水頭 H_1 が決まり、式(6)により分岐管1での流量 q_1 が決まる。同様な手順で、バルブの開いている最後の分岐管までの流量が求まる。バルブの開いている最後の隔室における圧力水頭の計算値と既値との比較により、吸込口での仮定流量の妥当性をチェックし、両者が一致するまで修正を行なう。これらの計算フローを図-7に示す。

2.3 姿勢の予測と制御

予測による制御は、複雑な形状や隔室の多い海洋構造



図—8 予測制御フロー

物を正確、迅速かつ安全に沈設するため、浮体の姿勢を予測しながらバラスト水の注排水量とバルブのパターンを決定し、目標とする姿勢状態を得ようとするものである。その全体フローは図—8 に示すとおりで、オペレーターは特別な経験を必要とせず制御データを入力するだけでよい。ここでいう姿勢は、①傾斜方向 θ (浮体が最も傾斜している方向)、②傾斜角 ϕ および③平均吃水 H_s をいうものとする。

姿勢の予測は、任意の時刻における浮体の姿勢とバルブ状態に対し、微小時間に各隔室に流入するバラスト流量 Q_i による各隔室のバラスト水位の変化に伴う姿勢の変化を時々刻々追跡していくものである。

一方、姿勢の制御は、

$\Delta\theta$: 任意の時刻における傾斜方向 (計算値) と目標とする傾斜方向との差

$\Delta\phi$: 任意の時刻における傾斜角 (計算値) と目標とする傾斜角との差

ΔH : 任意の時刻における平均吃水と目標吃水との差

Δh : 任意の時刻における隣接する隔室のバラスト水位差

$\Delta\theta'$: 任意の時刻における傾斜方向の実測値と計算値との差

$\Delta\phi'$: 任意の時刻における傾斜角の実測値と計算値との差

$\Delta H'$: 任意の時刻における平均吃水の実測値と計算値との差

$\Delta h_i'$: 任意の時刻における i 番目の隔室のバラスト水位の実測値と計算値との差

ΔT : バルブの操作時間間隔

$\varepsilon(\theta)$: $\Delta\theta$ の許容値

$\varepsilon(\phi)$: $\Delta\phi$ の許容値

$\varepsilon(H)$: ΔH の許容値

$\varepsilon(h)$: Δh の許容値

$\varepsilon(\theta)'$: $\Delta\theta'$ の許容値

$\varepsilon(\phi)'$: $\Delta\phi'$ の許容値

$\varepsilon(H)'$: $\Delta H'$ の許容値

$\varepsilon(h_i)'$: $\Delta h_i'$ の許容値

とするとき、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta &\leq \varepsilon(\theta) \\ \Delta\phi &\leq \varepsilon(\phi) \\ \Delta h &\leq \varepsilon(h) \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

を満足するようにバルブの開閉状態を決定する。すなわち、式(8)を満足する場合には現状のバルブパターンの維持を、式(8)を満足しない場合には目標状態を得るために修正すべき傾斜方向と傾斜角を求め、それに必要なバルブパターンに変更する。

また、計算値 (予測値) と実測値を比較し、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta' &> \varepsilon(\theta)' \\ \Delta\phi' &> \varepsilon(\phi)' \\ \Delta H' &> \varepsilon(H)' \\ \Delta h_i' &> \varepsilon(h_i)' \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

のいずれかになった場合、その時刻の実測値を初期値として予測計算をやり直す。このようにして目標の状態に制御することができる。

§ 3. 復原力および注水量に関する模型実験

3.1 実験方法

本実験で用いた模型は、図—9 に示すような 45cm□×40cm 高さの塩ビ製で、内部が 6 つの隔室に分れている。

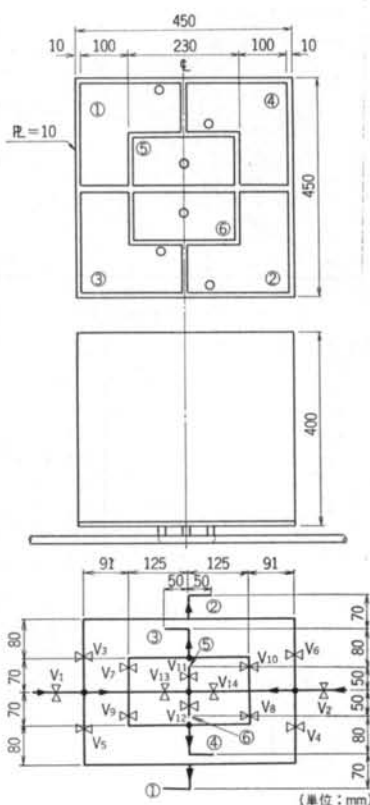


図-9 模型および配管

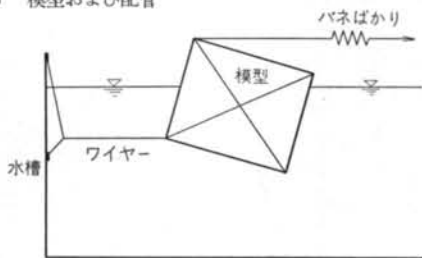


図-10 復原力模型実験

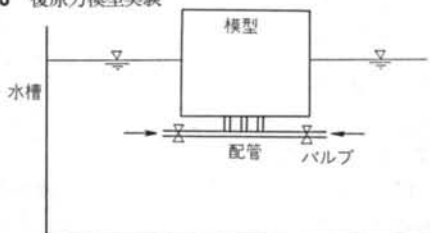


図-11 注水量模型実験

また、注水実験用として模型の底に14個のバルブをもつ塩ビ製パイプを配管した。このパイプは脱着可能で、復原力検討時には外して使用する。

復原力および浮体のつり合いに関する実験は図-10に

実験No	ウエイト		パラスト水		傾斜方向 角度(°)	備考
	取付場所	重量(kg)	隔室No	水位(cm)		
R-1-1	①~④	すべてに2.65	—	—	0	復原力の検討
R-1-2	同上	同上	—	—	45	同上
R-2-1	—	—	①~④	すべてに9.0	0	パラスト水の復原力への影響
R-2-2	—	—	同上	同上	45	同上
R-3	② ④	2.65 1.33	—	—	—	浮体のつり合い状態の検討
R-4	—	—	② ③, ④	6.0 3.0	—	同上
R-5	①~④	すべてに1.33	—	—	—	全てのバルブが開のときの隔室への流入量

表-1 実験条件一覧

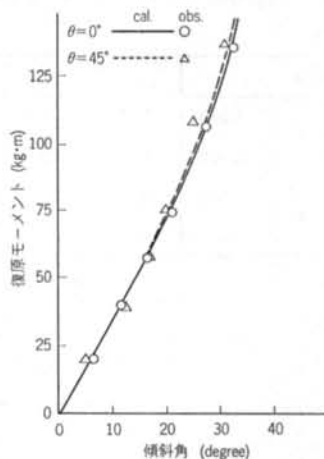


図-12 ウエイトを載せた場合の復原力

示すように、模型を水槽(幅1.2m、高さ1.2m、長さ4m)に浮かべ、ワイヤーを介して一定方向に傾斜させ、そのときの張力と傾斜角より復原力を求めた。張力はバネばかりで、傾斜角は傾斜計と模型四隅の吃水により測定した。

一方、注水量に関する実験は図-11に示すように、配管を施した模型を水槽に浮かべ姿勢が安定した後バルブを素早く開き、隔室内のパラスト水位、模型の吃水と傾斜角を測定した。パラスト水位は、隔室内に取付けた小型圧力計により測定した。本報告に載せた実験の条件を表-1に示す。

3.2 模型実験による計算式の検証

図-12は、隔室の①~④に鋼製のウエイトをそれぞれ2.65kgずつ載せたときの復原モーメントの計算値と実験値を示したものである。0°方向に傾斜させたときの計算値を実線で、実験値を○印で、また45°方向に傾斜さ

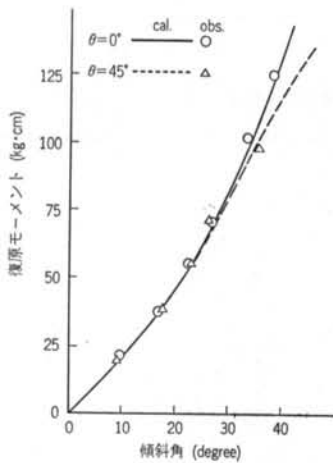


図-13 バラスト水位 9 cm(隔室①~②), ウェイトなしの場合の復原力

実験No.		傾斜方向 (degree)	傾斜角 (degree)
R-3	実験値	17.6	22.8
	計算値	18.4	20.0
R-4	実験値	43.6	21.1
	計算値	45.0	18.6

表-2 浮体のつり合い

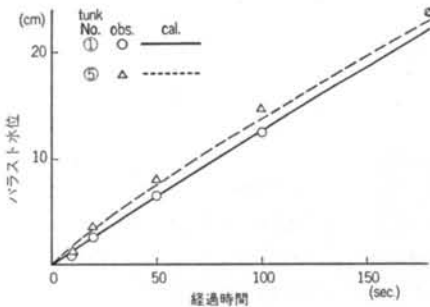


図-14 隔室のバラスト水位

せたときの計算値と実験値をそれぞれ破線と△印で示した。計算値と実験値はよく一致しており、計算式の妥当性が検証された。

図-13は、隔室の①~④にバラスト水をそれぞれ 9.0 cm ずつ入れた場合の復原モーメントである。傾斜方向 0° および 45° ともに計算値と実験値はよく一致しており、自由水を有するときの復原力の計算式の妥当性が確認された。

表-2 は、鋼製ウェイトとバラスト水を偏心荷重として載せたときの浮体のつり合い状態(傾斜方向と傾斜角)の計算値と実験値を示したものである。傾斜角において実験値の方が約 1 割大きくなっているが、実用上問題ないものと考えられる。

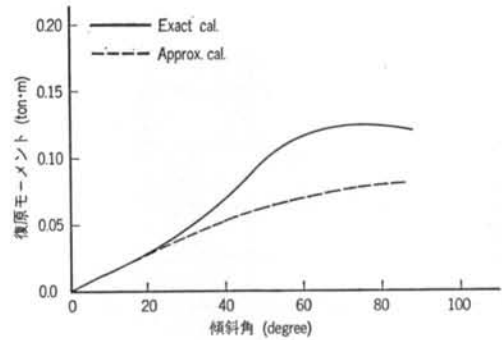


図-15 復原力の計算値比較

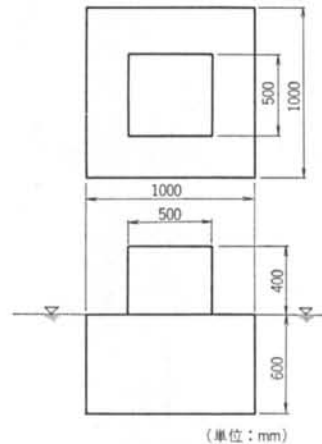


図-16 変断面浮体

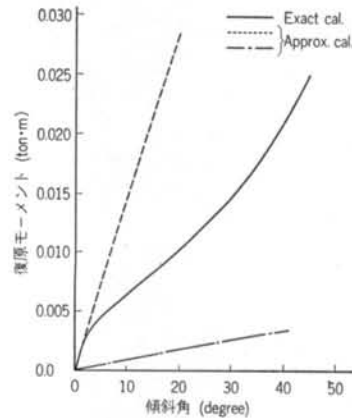
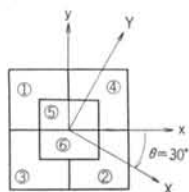
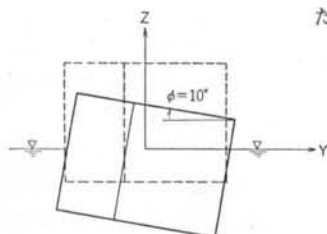


図-17 復原力の計算値比較

図-14は、全てバルブを開放にした場合に水頭差によって隔室の①と⑤に流入するバラスト水の水位変化を示したものである。図中で、隔室①の水位の計算値および実験値はそれぞれ実線と○印で、隔室⑤のそれらはそれぞれ破線と△印で示してある。隔室①、⑤ともに計算値と実験値はよく一致しており、先に示した計算方法により実際に流入するバラスト水量の予測ができることが確



認できた。なお、図中には示していないが、隔室②～④は隔室①と、隔室⑥は隔室⑤とそれぞれほとんど同じ水位になることも確認できた。



図一18 浮体の姿勢制御

§ 4. 計算式による若干の考察

4.1 復原力について

一般に、浮体の安定性はメタセンター高 (\overline{GM}) により判断することができ、 $\overline{GM} > 0$ ならば浮体は安定である。

また、傾斜角が小さいときの浮体の復原力 F_r は、

$$F_r = W \cdot \overline{GM} \cdot \sin \phi \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 W : 浮体重量

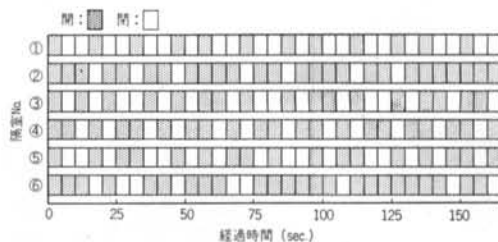
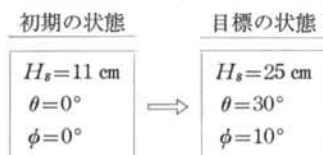
ϕ : 浮体の傾斜角

で与えられる。ここで、2.1 で示した復原力の厳密計算と式(1)による簡略計算について簡単なモデルで比較してみる。図一15は $1\text{m} \times 1\text{m}$ 高、重心高 0.3m 、重量 0.59ton の矩形浮体に対する両式の結果を示したものである。このケースの場合、傾斜角 20° くらいまでほとんど両者に差がなく、式(1)で計算してもよいことが分かる。

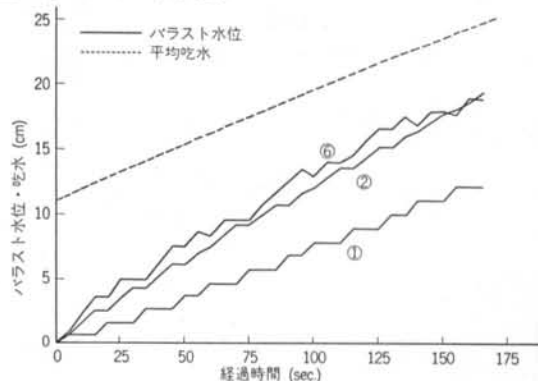
次に、図一16のように水面の近傍で浮体の断面が急激に変化する場合の復原力の計算結果を図一17に示す。図中で、実線が厳密計算値であり、破線および1点鎖線は断面2次モーメントとしてそれぞれ下部断面および上部断面の値を用いたときの簡略計算値である。厳密計算と簡略計算で大きな差が出ており、断面形状の変化が著しい浮体の復原力計算には特に注意が必要である。

4.2 姿勢の制御について

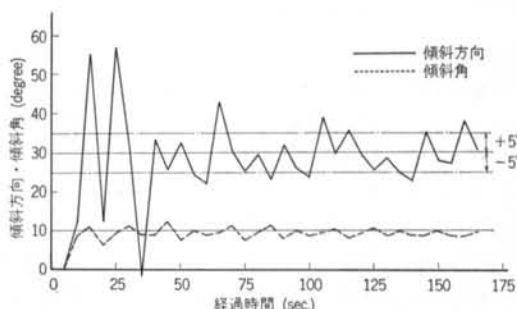
図一18に示すような6個の隔室を有する浮体(寸法は



図一19 バルブの開閉状態



図一20 バラスト水位・吃水の変化 ($\Delta T = 5\text{ sec}$ の場合)



図一21 傾斜方向・傾斜角の変化 ($\Delta T = 5\text{ sec}$ の場合)

図一9参照)の姿勢を、左下図のように変化させる場合について検討する。パラメータを、

$$\Delta T = 5\text{ sec}, \quad \varepsilon(\theta) = 0.1\text{ rad}, \quad \varepsilon(\phi) = 0.01\text{ rad},$$

$$\varepsilon(H) = 0.5\text{ cm}, \quad \varepsilon(h) = 10\text{ cm}$$

とおいたときのバルブパターンを図一19に、平均吃水と隔室①、②、⑥のバラスト水位変化を図一20に、また傾斜方向と傾斜角の変化を図一21にそれぞれ示す。本ケースの場合、浮体の断面積と全隔室の断面積がほぼ等しいので、注水開始時の吃水とバラスト水位との差 (11cm) が注水終了時まであまり変化せず (9cm)、浮体の平均吃水はほぼ一定に変化している。

姿勢の制御に関しては、注水開始後40秒までは傾斜方向の変化がきわめて大きく、目標の $30^\circ \pm 5^\circ$ に対し正負に大きくオーバーシュートしている。これはバラスト水の注入によって浮体全体としての安定性が増加する――

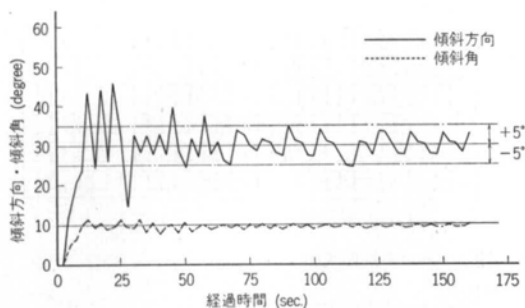


図-22 傾斜方向・傾斜角の変化 ($\Delta T=2.5$ sec の場合)

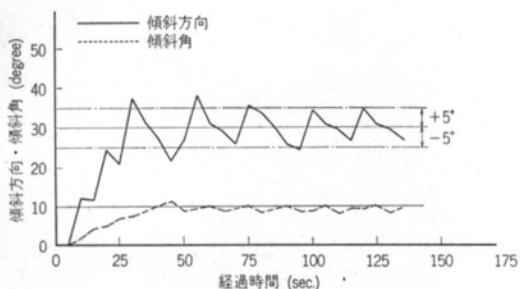


図-23 傾斜方向・傾斜角の変化 (隔室①～⑥に10cmの初期バラスト水を入れた場合)

重心位置が下る——ので、バラスト水位が少ないときほど姿勢の変化への影響が大きいに起因している。したがって、バルブの操作時間間隔とバラスト水位に大きく左右される。図-22は、バルブの操作時間間隔 ΔT のみを 2.5 sec に変えたときの傾斜方向と傾斜角の変化を示したものである。図-21に比して、傾斜方向および傾斜角ともにその振幅が小さくなっている。図-23は隔室①～⑥に一樣に 10cm のバラスト水位を与え、 $\Delta T=5$ sec のときの平均吃水 $H_s=30$ cm までの傾斜方向と傾斜角の変化を示したものである。このケースの注水開始は、図-21の 100 sec くらいに相当しており、著しいオーバーシュートはない。したがって、ここに示した方法でオーバーシュートさせないで目標の姿勢を得るためには、注水開始後しばらくは各隔室に均一に注水し、またバルブの操作時間間隔を短くすればよいことになる。

しかしながら、バルブの操作時間間隔をやたらに短くすることは、計算上は可能であっても実際には対応できないので浮体を制御できないことになる。すなわち、実際にはバルブの開閉操作に時間がかかること、バルブ開

閉操作時およびその直後は配管内の流れが非定常状態になっているため、バルブ操作時間間隔が極端に短い場合には計算値と一致しない。

§ 5. あとがき

浮体の据付け方法(イマーション・システム)のうち、ここでは①浮体の復原力と静的つり合い、②浮体内の隔室に流込むバラスト水の流量、③浮体の姿勢制御に関する基本的な考え方について述べたが、システム上最も重要で課題が多いのは浮体の姿勢制御である。姿勢の制御——傾斜方向、傾斜角および吃水——では特に傾斜方向と傾斜角のコントロールが重要であるが、現在は必ずしも十分コントロールされているとはいえない。ここに示した制御は、ある時刻の傾斜方向と傾斜角が目標とするそれらに対し許容値内にあるか否かをチェックし、許容値を越えた場合に許容値内に収めるべくバルブの開閉パターンを設定する方法である。しかし、この方法はある時刻の姿勢(傾斜方向、傾斜角)のみから次の姿勢を決めたため、姿勢変更の対応が遅れオーバーシュートが多くなる。ここに報告したような隔室の少ない——したがってバルブの数の少ない——場合には、一つのバルブの開閉が姿勢の変更を与える影響が大きいため、特にその傾向が現われる。したがって、隔室の少ない浮体の姿勢を精度よく制御するためには、ある時刻の姿勢のみでなく、それ以前の姿勢変化の傾向、さらにある時刻の姿勢が次のステップの姿勢へもたらす影響度を加味する必要がある。石油生産プラットフォームのような大型構造物では多くの隔室を設けているが、経済性からみても限り少ない隔室で浮体を安全かつ精度よく制御することは重要である。

また、構造物が大型化するほど沈設時間が問題となり、沈設時間を短縮するための配管とバルブ操作パターンが重要な課題である。これらはイマーション・システムの次期課題として取上げる予定である。

なお、本報告の一部は清水建設㈱と五洋建設㈱が共同で開発しているイマーション・システムの一環として取組んだものであり、メンバー各位の助言と助力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

〈参考文献〉

- 1) 大串雅信：“理論船舶工学(上巻)”海文堂(1976年)
- 2) 本間 仁：“水理学”丸善(1978年)