

(昭和 59 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

半潜水式海洋構造物の転覆機構に関する一考察 (第 1 報)

正員 宝田 直之助* 正員 中 嶋 俊 夫*
正員 井 上 隆 一*

A Study on the Capsizing Mechanism of Semi-submersible
Platforms (1st Report)

by Naonosuke Takarada, *Member* Toshio Nakajima, *Member*
Ryuichi Inoue, *Member*

Summary

The present paper deals with a study on the mechanism of capsizing phenomena of a semi-submersible platform in regular beam waves. Especially, the author's attention is paid to analysis of larger steady tilt of the platform under the excitation caused by the wave-induced vertical steady force on the lower hulls.

Firstly, the steady wave force and moment on the submerged cylinder were investigated. As the result of this study, the steady heeling moment due to vertical steady force on the lower hulls were obtained by both theory and experiment.

Secondly, the time histories of the platform motions predicted by the computer simulation are shown and are compared with the experimental results with good agreement.

Finally, the insights of stability of a semi-submersible platform in regular waves are examined by means of graphical illustrations.

In conclusion, it is clarified that the larger angle of steady tilt is strongly influenced by the wave-induced vertical steady force on the lower hulls. Especially, when the platform has small metacentric height and/or the higher position of fairleader, the angle of tilt increases drastically.

1 緒 言

半潜水式海洋構造物は、水面下の排水量に比較して水線面積が小さく、運動の固有周期が長く、通常考えられる波周期範囲の波強制力との同調を避けることができる。また、波強制力が零になる所謂波無し周波数が存在する特性を利用して、環境に応じて運動を最小にする設計が可能であるので、各種の海洋構造物に利用されている。しかしながら、水線面積の小さいことは、メタセンタ高さが小さいことでもあり、静的復原力にいささか不安を感じることも事実である。過去に数基の半潜水式海洋構造物が覆没し、そのあるものは構造的欠陥であるとされたものもあるが、明瞭にその原因を指摘されたものは少ない。筆者らは半潜水式海洋構造物の安定性に着目し、自由浮遊状態、係留浮遊状態の数多くの水槽実験を実施した結果から、通常起こり得る波周期の範囲内で、波漂流力の最大値があり、自由浮遊状態では余り問題に

ならないが、係留状態では転倒モーメントが発生すること、これに付随して、係留点と重心との相対位置が問題になることを実験的に確認し、半潜水式海洋構造物の復原性の検討には、現行規則で規程されている船舶類似の自由浮遊状態における検討だけでは不十分であり、係留状態における復原性をも検討すべきであることを提案した^{1),2)}。本研究は係留状態で問題になる転倒モーメントについてさらに詳細な実験および解析を行い、半潜水式海洋構造物の転覆機構を解明しようとするものである。第 1 報として、横波中でのローアハルに働く上下方向の波浪定常力による定常転倒モーメントの影響と、この要素を加味したシミュレーション結果が、水槽試験時の挙動をよく表現することを示すとともに、これによって波浪中の大傾斜現象を解釈し、転覆機構解明の一つの手段となることを報告する。

2 波の定常転倒モーメントに関する実験

この実験は横波中の定常転倒モーメント、波漂流力を

* 住友重機械工業 (株) 技術本部平塚研究所

Table 1 Principal particulars of the model

ITEMS	UM COND.	M COND.
LENGTH OF LOWER HULLS (L)	1.700 m	
BREADTH OVER LOWER HULLS (B)	1.160 m	
DISTANCE BETWEEN LOWER HULLS	0.900 m	
DRAFT (d)	0.400 m	0.413 m
DISPLACEMENT (Δ)	161.4 kg	163.5 kg
METACENTRIC HEIGHT (GM_T)	0.011 m	0.028, 0.008 m

UM COND.--- Unmoored Condition of the Wave Induced Steady Force/Moment Measurement
M COND.---- Moored Condition

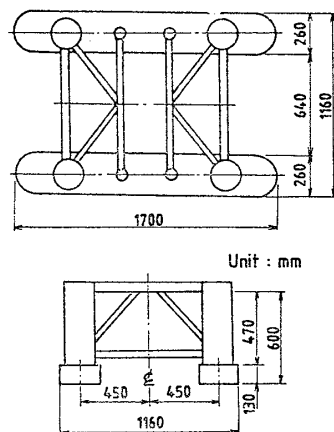


Fig. 1 Sketch of the semi-submersible platform model

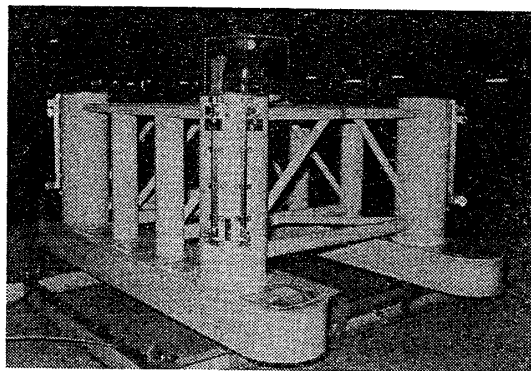


Fig. 2 Photograph of the semi-submersible platform model

求める目的で行われた。この種の実験は Hineno³⁾ らによって直立状態について行われているが、本実験では構造物が動揺している時間平均的傾斜角（以後定常傾斜角という）と定常転倒モーメントの関係を求めることを主眼とした。

2.1 供試模型

供試模型は、2ローハル、8コラム型の半潜式海洋構造物で、その主要目、外形寸法を Table 1, Fig. 1 に、外形を Fig. 2 に示した。基本的には文献 1), 2) で使用したのと同じ模型であるが、大傾斜時の打込み水の影響を消すために、上甲板部を格子状の骨組みだけに

Table 2 Test condition

λ/L	WAVE HEIGHT (H_w)	HEEL ANGLE ($\Delta\phi$)
0.8 ~ 3.0	10 cm	$ \Delta\phi \leq 1.0^\circ$
0.80	10 cm	$-11^\circ < \Delta\phi < 10^\circ$
1.21	5, 10, 15, 17.5, 20 cm	$-13^\circ < \Delta\phi < 17^\circ$
1.51	5, 10, 12, 15 cm	$-13^\circ < \Delta\phi < 15^\circ$

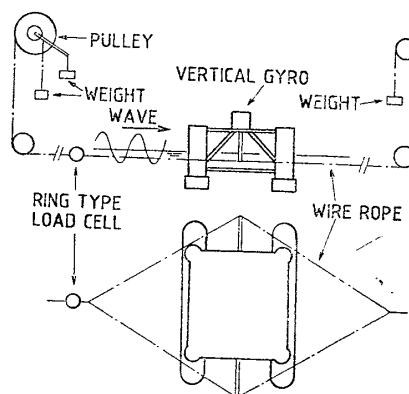


Fig. 3 Measurement of wave-induced horizontal steady force (drifting force) and heel angle

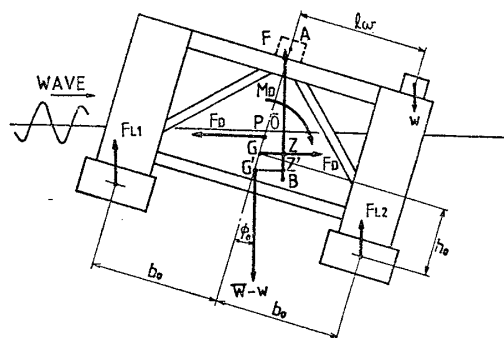


Fig. 4 Coordinate system of wave-induced steady heeling moment

したり、定常傾斜を大きくするため、メタセンタ高さを小さくしたりしてある。

2.2 実験の種類および方法

実験は横波規則波中に行い、波長、波高、定常傾斜角を変化させた。その詳細を Table 2 に示した。実験装置は、Fig. 3 に示したように、菱形形状のワイヤロープの枠組で模型重心位置を支え、入射波方向の変位を拘束する一般的な方法を採用した。波の定常転倒モーメントは Fig. 4 によって求めるが、次の仮定による。

(1) 波浪中の時間平均的な復原モーメントは、静水中のそれと変わらないと仮定し、定常傾斜角において、復原モーメントと波の定常転倒モーメントが釣り合っていると考える。

(2) 水面直下の没水浮体には、波浪中で比較的大きな上下方向の波浪定常力（以後定常揚力という）が働

き^{6),7)}, 半潜水式海洋構造物では, 一旦傾斜がつけば, 各ローハルまたはフーティング部分に働く定常揚力の相違により転倒モーメントが発生する^{4),5)}が, ここでは単純化して, 定常揚力による定常転倒モーメント (M_L) のみが存在し, 喫水変化すなわち浮力の変化はないものとする。

ここで, 水平方向の定常力 (波漂流力) は重心位置に作用するとし, ローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメント以外の定常転倒モーメントを M_D とすると, 波による全定常転倒モーメント M_H は次式で求められる。

$$\begin{aligned} M_H &= M_D + M_L = F \cdot \bar{GZ} + (W - w) \bar{G}' \bar{G} \sin \phi_0 \\ &\quad - w(l_w \cos \phi_0 + \bar{G} \bar{A} \sin \phi_0) + F_D \cdot \bar{G} \bar{P} \cos \phi_0 \\ &\doteq W \cdot \bar{G}' \bar{Z}' - w(l_w \cos \phi_0 + \bar{G}' \bar{A} \sin \phi_0) \\ &\quad + F_D \cdot \bar{G} \bar{P} \cos \phi_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに, W : 排水量

w : 移動重量

F : 浮力 ($= W - F_{L1} - F_{L2} \doteq W$)

F_D : 波漂流力

F_L : ローハルに働く定常揚力

G : 移動重量がA点にあるときの重心

G' : 移動重量を除いたときの重心

P : 波漂流力に抗する力を与える点

B : 浮心

ϕ_0 : 定常傾斜角

一方, 波漂流力 F_D が計測されているから, 波漂流力の見かけの作用点 h (水上での重心からの距離) は

$$h = M_H / F_D \cos \phi_0 \quad (2)$$

より求められる。

3 ローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメントの計算

3.1 没水体に働く定常力, モーメントの計算

規則波中の2次元浮体, あるいは没水体に働く2次の流体力については, いくつかの報告^{6)~8)}がある。本研究でもそれらの手法を適用する。その概要は, 入射波振幅 (ζ_a) は物体の代表長さ (例えば半幅 b) に比べて微小であると仮定して, 次式で定義された微小パラメータ ε を使って諸量を ε のべきに展開する。

$$\varepsilon = \zeta_a / b \quad (3)$$

速度ポテンシャルの展開は, 規則波中では

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{y}, \bar{z}, t) &= Re \{ \varepsilon \varphi^{(1)}(\bar{y}, \bar{z}) e^{i\omega t} + \varepsilon^2 \varphi^{(2)}(\bar{y}, \bar{z}) e^{i2\omega t} \} \\ &\quad + o(\varepsilon^3) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに, ω : 入射波円周波数

のように表現でき, $\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}$ はそれぞれ1次と2次の境界値問題を解いて求められる。一方, 圧力はベルヌイ式で

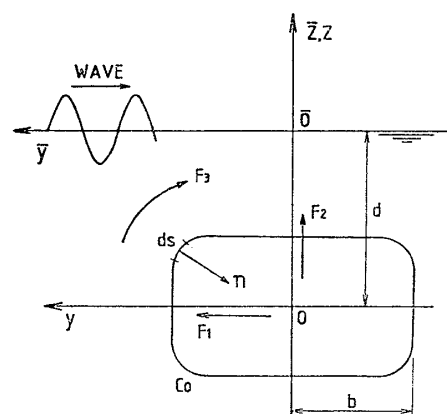


Fig. 5 Coordinate system

$$P(\bar{y}, \bar{z}, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\rho}{2} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) - \rho g \bar{z} \quad (5)$$

であり, $\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}$ が求められれば一般的に流体力は,

$$F_j(t) = \int_{C(t)} P(\bar{y}, \bar{z}, t) \frac{\partial \bar{x}_j(t)}{\partial n} ds \quad (6)$$

ただし, $j=1, 2, 3$ はそれぞれ水平, 上下, 回転方向として求められるが, 動揺する物体では物体表面上の法線, さらに浮体では物体没水面積 ($C(t)$) の時間的変化を考慮しなければならないので, かなり複雑な計算が必要になる。ここでは固定された没水体を考えることにすると, 2次の定常力/モーメントは

$${}_0F_j^{(2)} = -\frac{\rho}{4} \int_{C_0} (\nabla \varphi^{(1)} \cdot \nabla \varphi^{(1)*}) \frac{\partial x_j}{\partial n} ds \quad (7)$$

ここに,

$$\frac{\partial x_1}{\partial n} = \frac{\partial y}{\partial n}, \quad \frac{\partial x_2}{\partial n} = \frac{\partial z}{\partial n}, \quad \frac{\partial x_3}{\partial n} = y \frac{\partial z}{\partial n} - z \frac{\partial y}{\partial n}$$

$\varphi^{(1)*}$: $\varphi^{(1)}$ の複素共役値

とすればよく, それはベルヌイ式の数値2乗項による定常力を表わしている。ここで

$$\varepsilon \varphi^{(1)} = \frac{ig\zeta_a}{\omega} (\phi_i^{(1)} + \phi_d^{(1)}) \doteq \frac{ig\zeta_a}{\omega} \phi^{(1)} \quad (8)$$

ここに, $\phi_i^{(1)} = e^{K\bar{z} + iK\bar{y}}$: 入射波ポテンシャル

$\phi_d^{(1)}$: 散乱波ポテンシャル

$K = \omega^2/g$: 波数

とすれば, 物体表面条件から

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = 0 \text{ on } C_0 \quad (9)$$

であるので, $\varepsilon^2 \nabla \varphi^{(1)} \cdot \nabla \varphi^{(1)*} = \frac{g\zeta_a^2}{K} \left| \frac{\partial}{\partial s} \phi^{(1)} \right|^2$ と (7) 式から定常力/モーメントは無次元化した形で次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} {}_0f_j^{(2)} &= \frac{\varepsilon^2 {}_0F_j^{(2)}}{\frac{\rho}{2} g \zeta_a^2} = -\frac{1}{2K} \int_{C_0} \left| \frac{\partial}{\partial s} \phi^{(1)} \right|^2 \frac{\partial x_j}{\partial n} ds \\ &\quad \text{for } j=1, 2 \\ {}_0f_j^{(2)} &= \frac{\varepsilon^2 {}_0F_j^{(2)}}{\frac{\rho}{2} g b \zeta_a^2} = -\frac{1}{2K} \int_{C_0} \left| \frac{\partial}{\partial s} \phi^{(1)} \right|^2 \frac{\partial x_j}{\partial n} ds \\ &\quad \text{for } j=3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Fig. 6, Fig. 7 にそれぞれ、ローハル断面一定で没水深度が変化した場合の定常揚力および定常モーメントの計算結果を示した。没水深度が浅くなると定常揚力/モーメントは急激に増加することを示している。なお、この計算における速度ポテンシャル $\phi^{(1)}$ は特異点分布法により求めた。

3.2 定常転倒モーメントの計算

前節で計算されるローハルに働く定常力/モーメントのうち、水平方向定常力および定常モーメントによる定常転倒モーメントは M_D に含まれるとし、ローハルの傾斜の影響を無視して $F_L = \int_L F_2^{(2)} dl$ とすれば、定常揚力による定常転倒モーメント M_L は

$$M_L = (F_{L1} - F_{L2})b_0 \cos \phi_0 + (F_{L1} + F_{L2})h_0 \sin \phi_0 \quad (11)$$

で求められる。ここで b_0, h_0 はそれぞれ重心とローハル中心との幅方向、高さ方向の距離である (Fig. 4 参照)。なお、 $\phi_0 = 0$ のときは $F_{L1} = F_{L2}$ であるから、 $M_L = 0$ となる。

4 定常転倒モーメント等の実験結果と考察

4.1 定常転倒モーメント

4.1.1 周波数による影響

定常傾斜角が 0° に近い ($|\phi_0| \leq 1^\circ$) ときの波による定常転倒モーメントを Fig. 8 に示した。ややバラツキがあるが、 $\lambda/L = 1.2$ 付近にピークがあり、 $\lambda/L > 3.0$ の長波長域では定常転倒モーメントが殆どないことを示している。Fig. 9 に定常転倒モーメントを波漂流力で除して、波漂流力の大きさとその見かけの作用点とに分解し

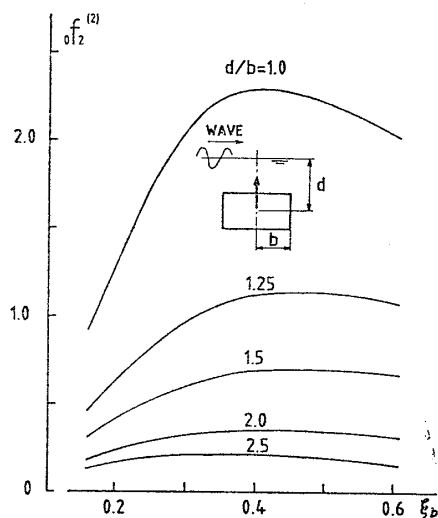


Fig. 6 Calculated results of wave-induced vertical steady force on lower hull section

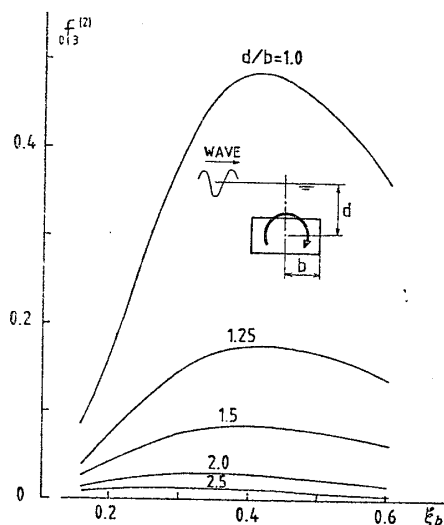


Fig. 7 Calculated results of wave-induced steady moment on lower hull section

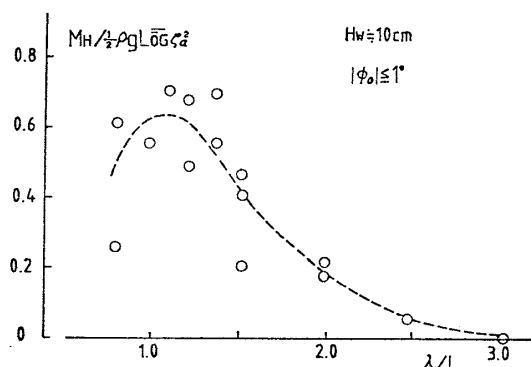


Fig. 8 Wave-induced steady heeling moment

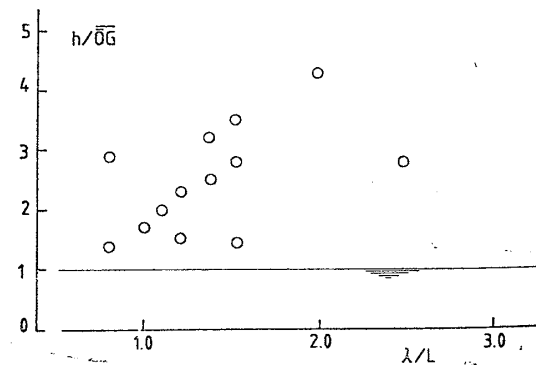
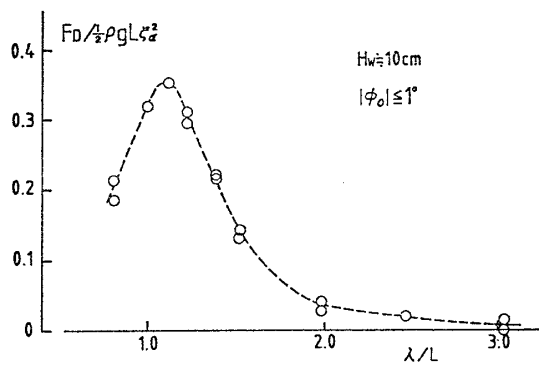


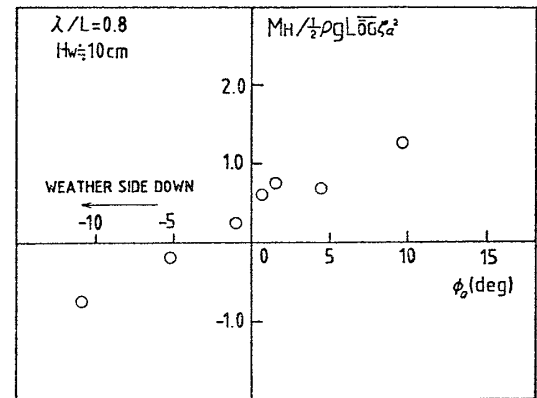
Fig. 9 Drifting force and its virtual acting position

て示した。波漂流力は $\lambda/L=1.1$ 付近にピークをもつ円滑な曲線を示し、文献(9)の計測値に対しピークがやや長波長側にずれ、ピーク値が3倍弱の大きな値を示しているが傾向はよく似ている。見かけの作用点は波漂流力の大きさがまとまっているため、Fig. 8 のバラツキがそのまま現われた形になっている。この場合、 $|\phi_0| \leq 1^\circ$ であり、 $M_L \approx 0$ であるから、見かけの作用点は波漂流力の作用点と考えてよい。Fig. 9 では作用点は静水面より上方、それも大部分は波頂よりも上方にある。波漂流力の小さい周波数域では誤差が含まれることを考慮しても、この傾向は顕著である。水平方向の定常力である波漂流力の作用点が波頂よりも上方にあるとは考えられないが、重心まわりの定常モーメントが寄与しているためか、あるいは波上側のローハル、コラムと波下側のそれらが干渉して、波下側のローハルに働く定常揚力が波上側のそれに比較して小さくなり、 M_L が零にならないためとも考えられる。原因を明らかにするため、さらに検討する必要がある。実験中によく観察される波入射時に模型が波下側に定常傾斜する現象は、この波漂流力の見かけの作用点が静水面より上方にあることが原因と考えられる。

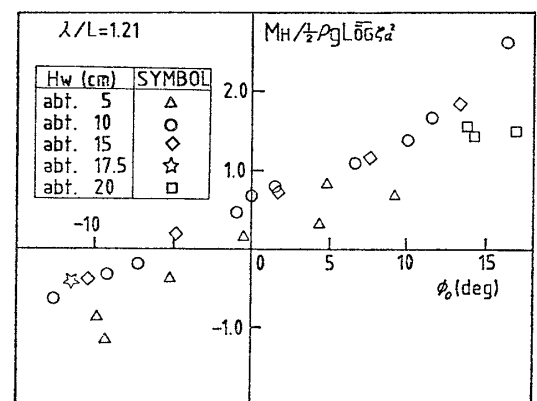
4.1.2 定常傾斜角変化の影響

Fig. 10 に波周波数を一定にし、定常傾斜角を変化させたときの定常転倒モーメントを示した。定常傾斜が土約 12° の範囲では定常転倒モーメントは、ほぼ直線的に変化している。定常傾斜が波下側から波上側 5° 前後の範囲では波下側へ傾斜させるモーメントであり、定常傾斜が波上側に約 5° 以上になると波上側へ傾斜させるモーメントとなる。この主因は、ローハルに働く定常揚力の没水深度影響と干渉影響と考えられる。 $\lambda/L=1.21$ において、波高が極端に低い場合(5cm)と高い場合(20cm)が他に比較して平行移動したような結果を示しているが、波高の低い場合は計測値が小さいために誤差が大きくなること、波高が高い場合には片側のローハルが水面上に露出したり水面下に没したりすることによりこれに働く定常揚力が小さくなることなどの原因が考えられる。これらを除けば定常転倒モーメントは波高の2乗にほぼ比例するといえる。

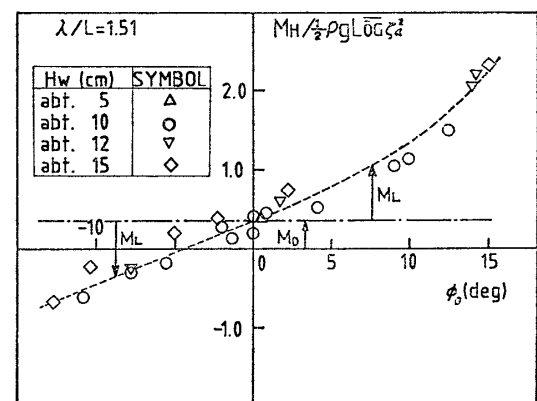
$\lambda/L=1.51$ について、波漂流力とその見かけ作用点を Fig. 11 に示した。定常傾斜角が大きくなると波漂流力は若干大きくなる傾向を示すが、概ね一定値を示している。見かけの作用点は定常傾斜角の波上側から波下側への変化に対してほぼ直線的に上昇しており、大傾斜時は水面の上下はるか離れた位置にある。このことから、ローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメントの存在が推測される。



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Wave-induced steady heeling moment influenced by steady tilt angle

4.2 ローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメント

次にローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメントを求める。Fig. 10 では半潜水式海洋構造物に働く波の全定常転倒モーメント(M_H)を示したが、ここで、直立状態における定常転倒モーメントを M_D と見なし、かつ波漂流力が定常傾斜角の変化に対し概ね一定であることから、 M_D も定常傾斜によって変化しないと仮定し、 $M_L = M_H - M_D$ でローハルに働く定常揚力によ

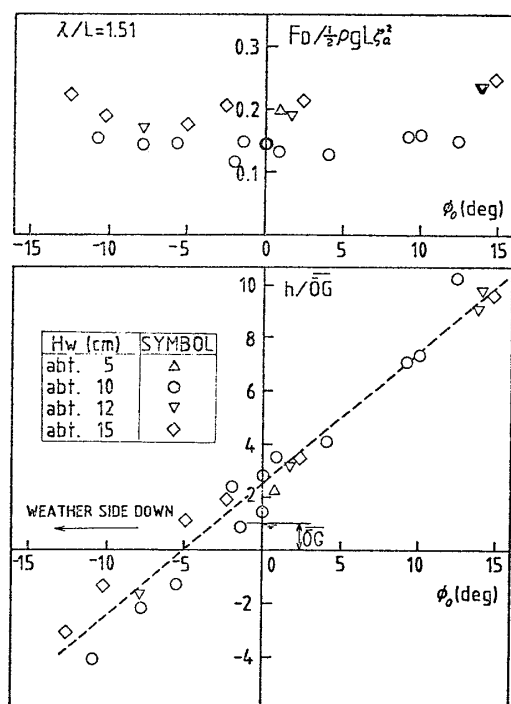


Fig. 11 Drifting force and its virtual acting position influenced by steady tilt angle

る定常転倒モーメントを求める。Fig. 10(c) に M_D と M_L の割合を参考として示した。

以上の取扱いによる M_L と前章による計算値の比較を Fig. 12 に示した。計算値はローハルを波浪中で固定し、ローハル全長のうち、上部にコラムが接続する部分については控除した結果である。全般的に計算値と実験から導出された値はよい対応を示している。この定常揚力は没水体が自由な場合小さくなる^{5),6)} ことから、両者の対応の悪さが予想されたが、本実験が運動の比較的小さい波周波数範囲で行われているため、計算条件に近いことから良い対応を示すと考えられる。

4.3 波の定常転倒モーメントによる定常傾斜

波の定常転倒モーメントと復原モーメントを併記したものを Fig. 13 に示した。本実験結果の取扱いの前提に従い、波浪中においても時間平均的にみて、静水中の復原モーメントと同じ復原モーメントが働くものと仮定すれば、定常転倒モーメントと復原モーメントが釣り合う角度がその波浪中での定常傾斜角となる。例えば、波高 5cm のときは定常傾斜角は無視できる程度の角度であるが、波高 10cm では波下側に約 4° 、15cm になると波下側に約 12° を示す。

5 半潜水式海洋構造物の波浪中挙動シミュレーション

前章までに波の定常揚力による転倒モーメントを求め

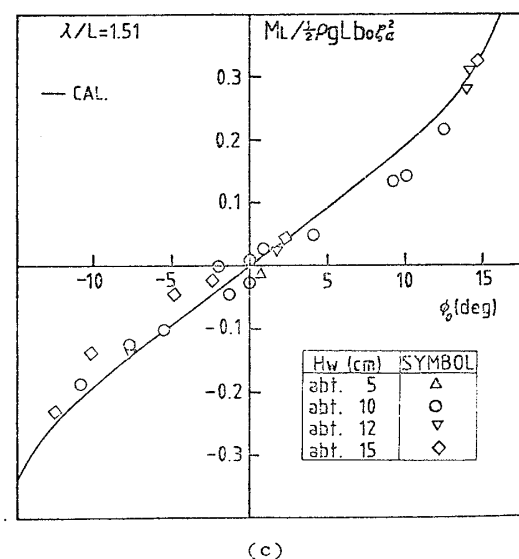
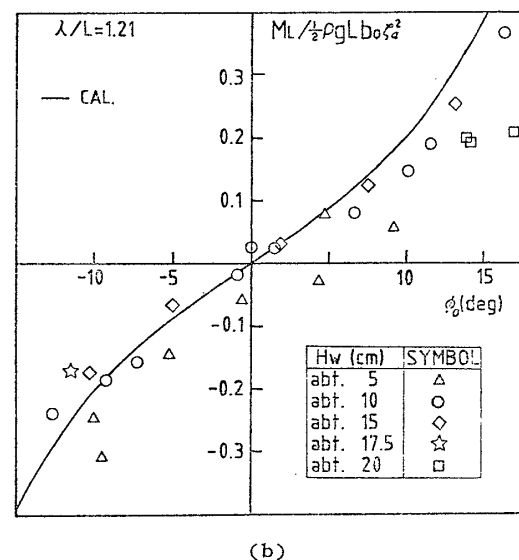
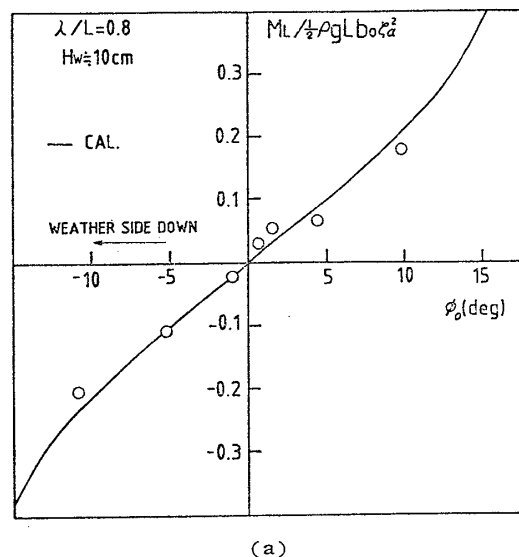


Fig. 12 Steady heeling moment induced by vertical steady force on lower hulls

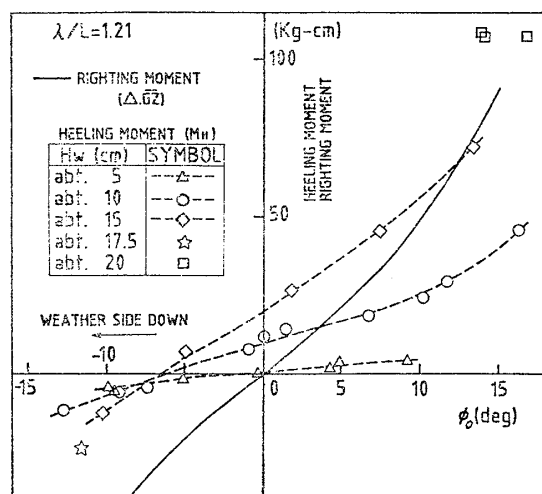


Fig. 13 Equilibrium of wave-induced heeling moment and righting moment

たが、多くの仮定に基づいている。各種の要因が含まれている転覆現象でこれが主因であるとするならば、この要因を含んだ挙動シミュレーションが実際の挙動のある程度再現するはずである。検証の一助として挙動シミュレーションを試みた。

5.1 半潜水式海洋構造物の横波中の運動方程式

横波中の挙動は本研究の目的にしたがって、基本的には Sway, Heave, Roll 運動のみを取扱う 2 次元問題に限定し、3 自由度の連成運動方程式を考える。単純化のために次の仮定を行う。

- (1) 比較的大振幅の波を対象とするが、水深を考慮した線形波とし、波形が崩れることは考慮しない。
- (2) 流体力は各構造部材に比較して波長は十分長いものと考えて計算し、ローハルが水面から出たり、コラムの上端が水没するようなことは考慮しない。また、ブレースなどに加わる流体力は省略する。
- (3) 係留張力は、各時間ステップにおいて、カテナリー解で求めた値を用いる。

基本座標系を Fig. 14 に示したが、波浪については、原点を静止状態の自由表面上で浮体の重心直上に置く空間固定座標を、浮体の運動については、原点を浮体静止時の重心に置く空間固定座標を用いて計算を行っている。したがって、浮体の重心位置における Sway, Heave, Roll は、以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 & (M + A_{yy})\ddot{y}(t) + A_{yz}\ddot{z}(t) + A_{y\phi}\ddot{\phi}(t) + \kappa_{yy}(\dot{y}, t) \\
 & + \kappa_{yz}(\dot{z}, t) + \kappa_{y\phi}(\dot{\phi}, t) + \frac{1}{2}\rho \sum_m C_{aym} \bar{A}_{ym} \cdot |\dot{y}(t) \\
 & - \tilde{z}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)| \cdot \{\dot{y}(t) - \tilde{z}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)\} \\
 & + \sum_k T_{yk} \\
 & = F_y(t) + \bar{F}_{yD} \\
 & (M + A_{zz})\ddot{z}(t) + A_{zy}\ddot{y}(t) + A_{z\phi}\ddot{\phi}(t) + \kappa_{zz}(\dot{z}, t)
 \end{aligned} \quad (12)$$

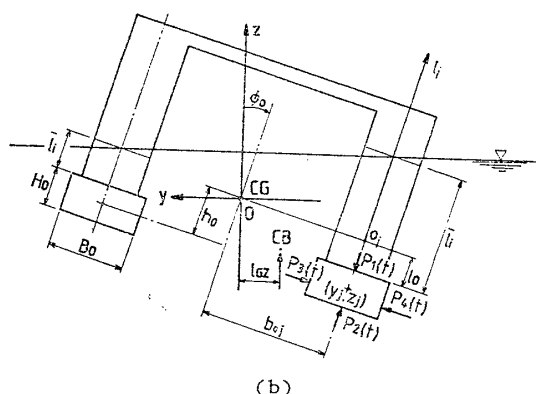
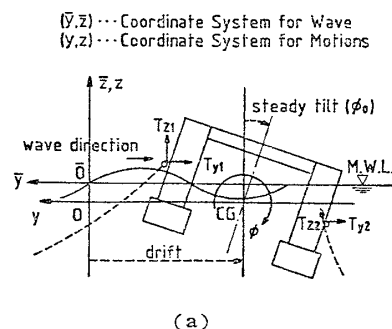


Fig. 14 Coordinate system of simulation

$$\begin{aligned}
 & + \kappa_{zy}(\dot{y}, t) + \kappa_{z\phi}(\dot{\phi}, t) + \frac{1}{2}\rho \sum_m C_{azm} \bar{A}_{zm} \cdot |\dot{z}(t) \\
 & + \tilde{y}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)| \cdot \{\dot{z}(t) + \tilde{y}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)\} \\
 & + C_{zz} \cdot \dot{z}(t) + C_{z\phi} \cdot \dot{\phi}(t) - \sum_k T_{zk} \\
 & = F_z(t) + \sum_m \bar{F}_{zDm}
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 & (I_\phi + A_{\phi\phi})\ddot{\phi}(t) + A_{\phi y}\ddot{y}(t) + A_{\phi z}\ddot{z}(t) + \kappa_{\phi\phi}(\dot{\phi}, t) \\
 & + \kappa_{\phi y}(\dot{y}, t) + \kappa_{\phi z}(\dot{z}, t) - \frac{1}{2}\rho \sum_m C_{aym} \bar{A}_{ym} \cdot \tilde{z}_m \\
 & \times |\dot{y}(t) - \tilde{z}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)| \cdot \{\dot{y}(t) - \tilde{z}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)\} \\
 & - \xi_m(t) \\
 & + \frac{1}{2}\rho \sum_m C_{azm} \bar{A}_{zm} \cdot \tilde{y}_m \cdot |\dot{z}(t) + \tilde{y}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)| \\
 & \times \{\dot{z}(t) + \tilde{y}_m \cdot \dot{\phi}(t) - \xi_m(t)\} + I_{GZ} \cdot M \cdot \rho \cdot g \\
 & + C_{\phi z} \cdot \dot{z}(t) - \sum_k (T_{y\phi} \cdot \tilde{z}_k + T_{z\phi} \cdot \tilde{y}_k) \\
 & = F_\phi(t) + \bar{F}_{\phi D} + \sum_m \bar{F}_{zDm} \cdot \tilde{y}_m
 \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、

M, I_ϕ : 浮体の質量およびロール方向慣性モーメント

A_{rs}, C_{rs} : r に寄与する s 方向の付加質量, 復原力係数

ρ : 液体の密度

C_{aym}, C_{azm} : 要素 m の y および z 方向抗力係数

$\bar{A}_{ym}, \bar{A}_{zm}$: 要素 m の y および z 方向の投影面積

T_{yk}, T_{zk} : k 番目の y および z 方向係留張力

$\xi_m(t), \zeta_m(t)$: 要素 m の中心における y および z 方向波

粒子速度

$\tilde{y}_m, \tilde{z}_m$: 要素 m に関する y および z 方向のレバーアーム

l_{GZ} : 重心と浮心の水平距離

$\kappa_{rs}(\dot{s}, t)$: r に寄与する s 方向流体力のメモリー影響関数 $K_{rsm}(t)$ を含む項

$$\left(\equiv \sum_m \int_0^t K_{rsm}(t-\tau) \dot{s}(\tau) d\tau \right)$$

$F_r(t), \bar{F}_{rD}$: 1次または2次の r 方向波浪強制力およびモーメント (ただし, $\bar{F}_{\phi D}$ は構造物の直立状態における Roll 方向定常モーメント)

次に, 構造部材の流体力係数については, あらかじめ特異点分布法によって直立状態のものを計算しておく。浮体が傾斜する際には, 定常傾斜角 ϕ_0 を考慮して次式で求める (Fig. 14(b) 参照)。

$$\begin{aligned} A_{yy} &= \left\{ \sum_j A_{phj} + \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{xi} \right\} \cos^2 \phi_0 + \sum_j A_{pvj} \cdot \sin^2 \phi_0 \\ A_{yz} &= \left\{ \sum_j A_{pvj} - \sum_j A_{phj} - \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{xi} \right\} \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_0 \\ & (= A_{zy}) \\ A_{y\phi} &= \left\{ -\sum_j A_{phj} |h_0| + \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{xi} \right\} \cos \phi_0 \\ & \quad + \sum_j A_{pvj} \cdot b_{0j} \cdot \sin \phi_0 \\ & (= A_{\phi y}) \\ A_{zz} &= \left\{ \sum_j A_{phj} + \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{xi} \right\} \sin^2 \phi_0 + \sum_j A_{pvj} \cdot \cos^2 \phi_0 \\ A_{z\phi} &= \left\{ \sum_j A_{phj} |h_0| - \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{xi} \right\} \sin \phi_0 \\ & \quad + \sum_j A_{pvj} \cdot b_{0j} \cdot \cos \phi_0 \\ & (= A_{\phi z}) \\ A_{\phi\phi} &= \sum_i \{ A_{phj} \cdot h_0^2 + A_{pvj} \cdot b_{0j}^2 \} + \sum_i A_{chi} \cdot \bar{l}_{ri} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに, $\bar{l}_{xi} = \bar{l}_i \cdot (\bar{l}_i - 2\bar{l}_0)$, $\bar{l}_{ri} = \{(\bar{l}_i - \bar{l}_0)^3 + \bar{l}_0^3\} / 3$ で

あり, A_{phj}, A_{pvj} は, それぞれローハル j の長手方向および短手方向の付加質量 (ここでは周波数無限大時の値), また A_{ch} はコラムの付加質量を示す。

一方, 波浪強制力のうち1次のものについては, 詳細を付録に示し, また2次の定常力およびモーメントは前章の実験から導出された値を用いる。

5.2 波浪中の運動応答

以上の運動方程式を Newmark- β 法を用いて時刻歴解析を行えば目的を達するが, それに先立って妥当性を確認するため, 運動応答について計算結果と実験結果を比較しておく。実験値は前章の定常転倒モーメント, 波漂流力を求める実験時に計測された結果である。Fig. 15 に Heave, Sway, Roll の応答関数および波との位相差を示した。Heave および Sway は上甲板中央部の値を示し, 実線は水深 2.5 m を考慮したそれぞれの計算値を示している。計算の一致度は良好であるといえよう。Fig. 16 に定常傾斜角に対する運動の変化について比較したものを示した。本研究では比較的波周期の小さい範囲におけるシミュレーションを目的にしているため, 代表として波周期 1.15 秒 ($\lambda/L=1.21$) に対するものだけを示したが, 他の周期でも実験結果とは良好な一致を示した。

6 係留された半潜式海洋構造物の波浪中挙動実験とシミュレーション結果

6.1 実験の概要

実験に用いた模型は, Table 1, Fig. 1, Fig. 2 に示したものである。係留は1本の長さが 11.4 m の装飾用真鍮チェーンで, 水中重量 38 g/m の係留索 8 本で構成し, Sway は模型の真上に設けたテレビトラッカーで, Roll, Pitch は模型上部に設けたパーティカルジャイロで測定

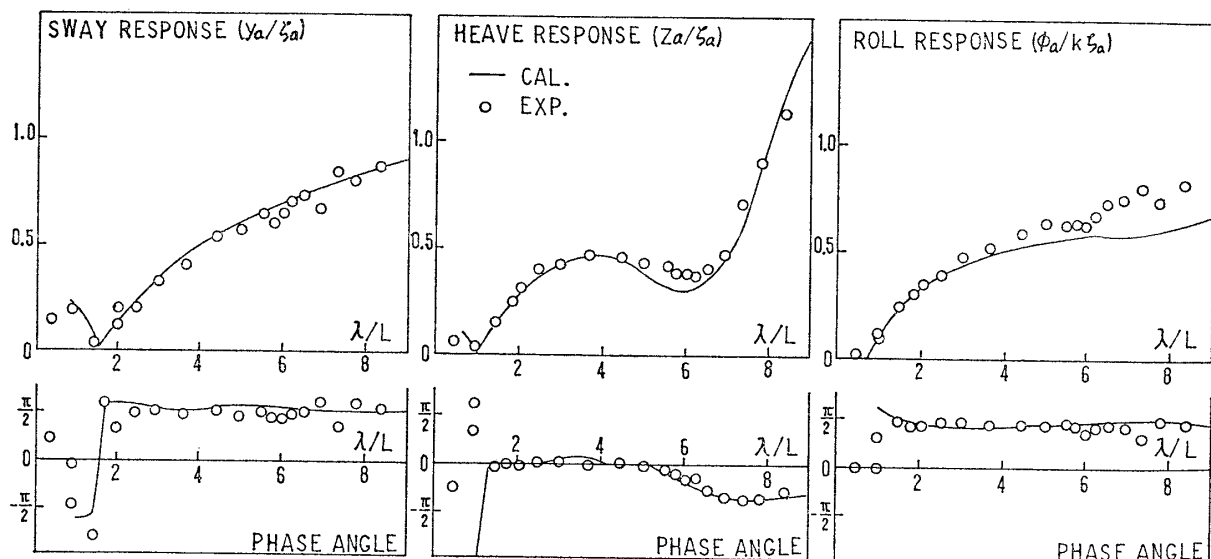


Fig. 15 Comparisons of motions between experiment and simulation (Unmoored Cond.)

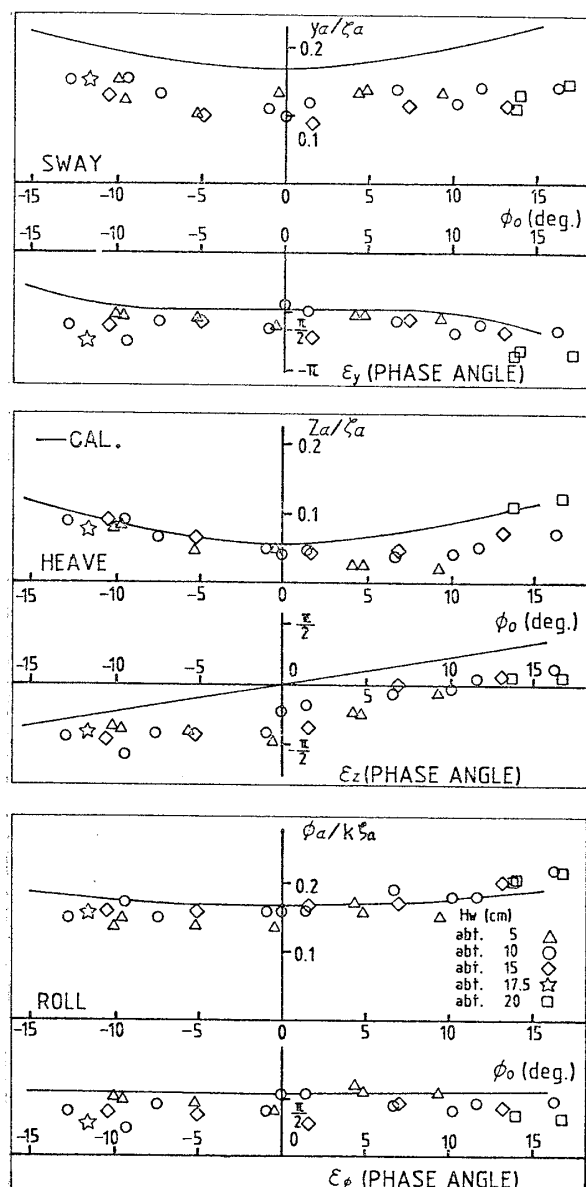


Fig.16 Comparisons of motions between experiment and simulation ($\lambda/L = 1.21$, Unmoored Cond.)

した。その概要を Fig.17 に示した。実験の種類は、

- (1) 重心位置を変化させる系列
- (2) 係留点を変化させる系列

を中心に、波高、波周期などを変化させて計測を行った。

6.2 実験結果およびシミュレーション結果の比較

実験波高は 20~25cm のかなり高い波高を含み、波周期の短いものから比較的長いものまで、広い範囲で実験が行われたが、浮体の運動は無係留時の結果 (Fig. 15) と殆ど差異が認められない結果が得られた。このことは従来係留系は運動を

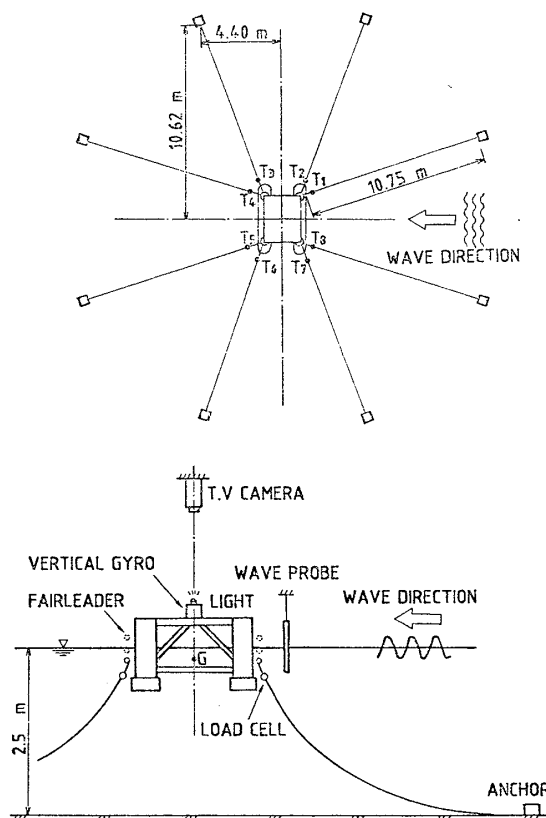


Fig.17 Sketch of mooring lines arrangement and test equipments

拘束しないとされていることを確認したに過ぎない。波周期の短いところでは、波漂流力によって大きく波下側に流され、係留張力と釣り合ったところで、場合によっては大きく波上側への傾斜が見られた。Fig.18 にその例を示した。GM が大きいとこのような定常傾斜が少なくなる。次に GM が十分あり、係留点が重心位置であっても、初期傾斜があれば大きな定常傾斜を起こす例を Fig.19 に示した。Fig.20 にローハルに働く定常揚力を考慮したシミュレーション結果 (A) と、考慮しないシミュレーション結果 (B) を実験結果と比較したものを示した。シミュレーション計算では、Roll の定常波浪モーメントとして、構造物が直立状態にあるときのモーメント (M_D) と、傾斜した際にローハルに働く定常

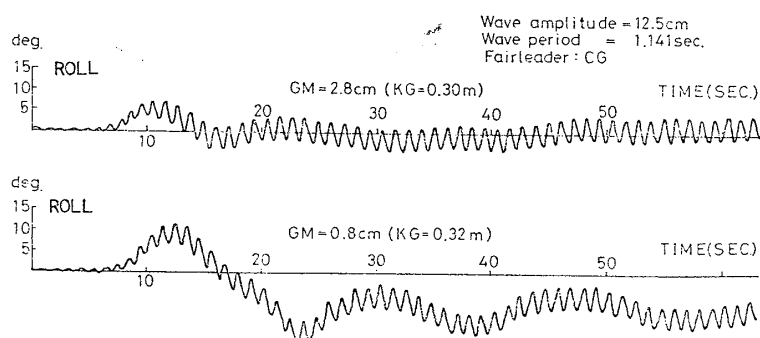


Fig.18 Test examples of steady tilt (Moored Cond.)

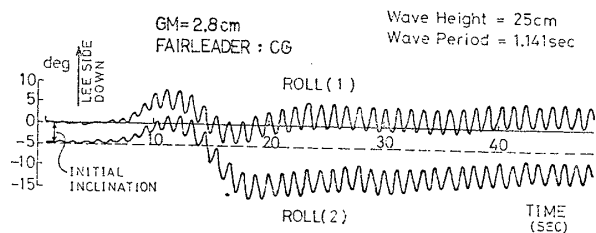


Fig.19 Effect of initial heel on steady tilt (Moored Cond.)

揚力によるモーメント (M_L) を考え、結果 (B) では後者のみ省いている。同図から結果 (A) の方は動揺、定常傾斜ともよく実験結果を再現していることがわかる。動揺については両者極めて近いが、定常揚力を考慮しない結果 (B) は、定常傾斜を再現できないことを示している。また Fig. 21 に、係留点高さの違いによる定常傾斜角の変化について実験とシミュレーション結果の比較を示した。この図からも、ローハルに働く定常揚力を考慮した計算は実験結果をよく説明できることがわかる。同図に、打上げ水の影響を最小にするため上甲板を骨組構造にしたときの結果 (白ぬき) を通常の甲板構造の結果と併記したが、打上げ水がある範囲でも両者の定常傾斜に顕著な差がみられない。一方、シミュレーション結果も、打上げ水を考慮していないことを考えると、この実験の際の打上げ水量は、それほど大きな影響を与えていないと考えられる。したがって、この場合、大傾斜の主因はローハルに働く定常揚力によるものと判断することができる。

以上、実験結果およびシミュレーション結果の比較を通じ、打上げ水の有無にかかわらず、波浪中の定常傾斜

を解釈するにはローハルに働く定常揚力による定常転倒モーメントは不可欠の要因であると考えられる。

7 波浪中の定常転倒モーメントによる大傾斜

波の定常転倒モーメントが定常傾斜の一つの大きな要因であることを実験、解析、シミュレーション計算などで確認できたので、この要因で波浪中の大傾斜を解釈してみる。Fig. 22 に模式化してこれを示した。

Fig. 22(a) に直立状態で $\lambda/L=1.21$ 、波高 15cm の波が入射すると、波下側に約 12° 定常傾斜をして波の定常転倒モーメントと復原モーメントが釣り合うこと、波上側に約 5° の初期傾斜がある状態で同じ波が入射すると、ほぼ直立状態になることを示した (Fig. 13 参照)。Fig. 22(b) に復原モーメントおよび定常転倒モーメントの傾斜角に対する変化率が近くなると、初期傾斜の僅かの差によって釣り合う定常傾斜角が大きく変化することを示した。このことから、逆モーメントにより定常傾斜を小さくすることは微妙な調整が必要となり、バラスト移設などによる方法をとった場合には僅かの誤操作も許されないことになろう。Fig. 22(c) に波高が高くなると定常傾斜が大きくなること、また波高の変化に対し定常傾斜角が変化することを示した。Fig. 22(d) に小角度において定常転倒モーメントの変化率が復原モーメントの変化率より大きい場合は小角度で不安定になり、復原モーメントの変化率が大きくなることによって復原モーメントが定常転倒モーメントを超えるまで大傾斜することを示した。この場合復原モーメントの変化率に大きな変化がなければ、そのまま転覆につながる可能性がある。したがって上甲板の予備浮力が重要となろう。

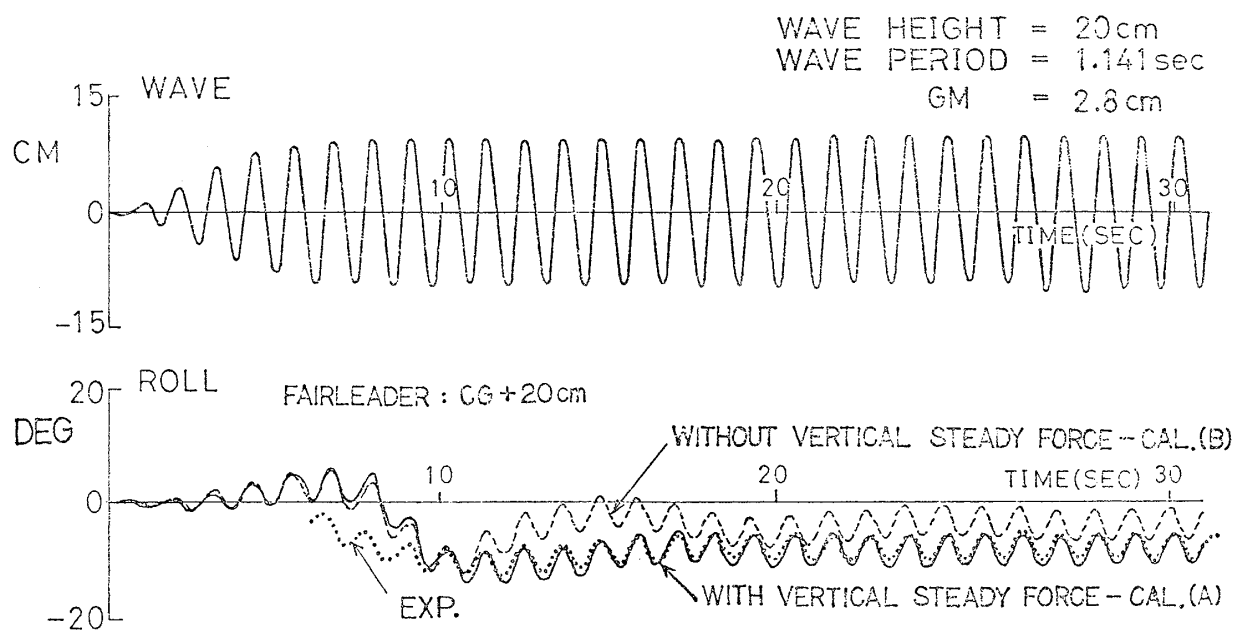


Fig.20 Comparison of roll motion between experiment and simulation (Moored Cond.)

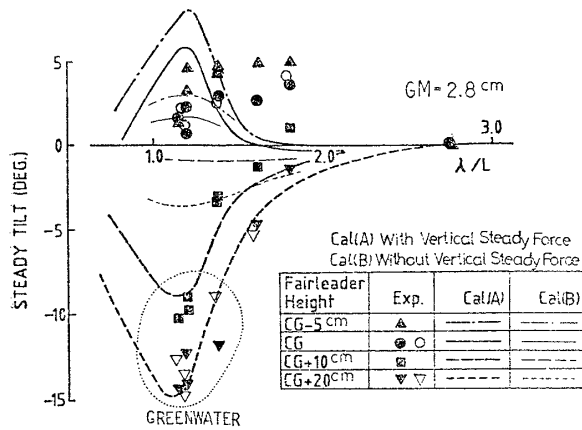


Fig. 21 Steady tilt under mooring condition (Wave Height=25cm)

以上波浪中の大傾斜現象を模式化して解釈したが、今後各要因(風, 潮流, 係留力などによる転倒モーメント)を定量的に求めることが転覆機構の解明に役立つものと考ええる。

8 結 言

半潜式海洋構造物の安定性を論ずる場合に, ローハルに働く上下方向波浪定常力に着目すべきことについては, 既に Numata⁴⁾ ら, Martin⁵⁾ らによって指摘されているが, 本論文では2次のオーダーの波浪定常力/モーメントについて, より詳細に実験, 解析し, 同時にこれらを考慮した半潜式海洋構造物の運動の時刻歴解析および模式的考察を行うことにより, 波の定常転倒モーメントが半潜式海洋構造物の大傾斜現象, 転覆機構に及ぼす影響ならびに関連性について確認した。

次に, 本研究の範囲で個別の結論を求めると,

(1) 半潜式海洋構造物に働く波の定常転倒モーメントは短波長域で大きく, 長波長域ではほとんどみられない。

(2) 波の定常転倒モーメントはほぼ波高の2乗に比例し, 定常傾斜が波下側から波上側 5° 前後の範囲では波下側へ傾斜させる方向に働き, 波上側 5° 前後以上では波上側へ傾斜させる方向に働く。この変化の主因は文

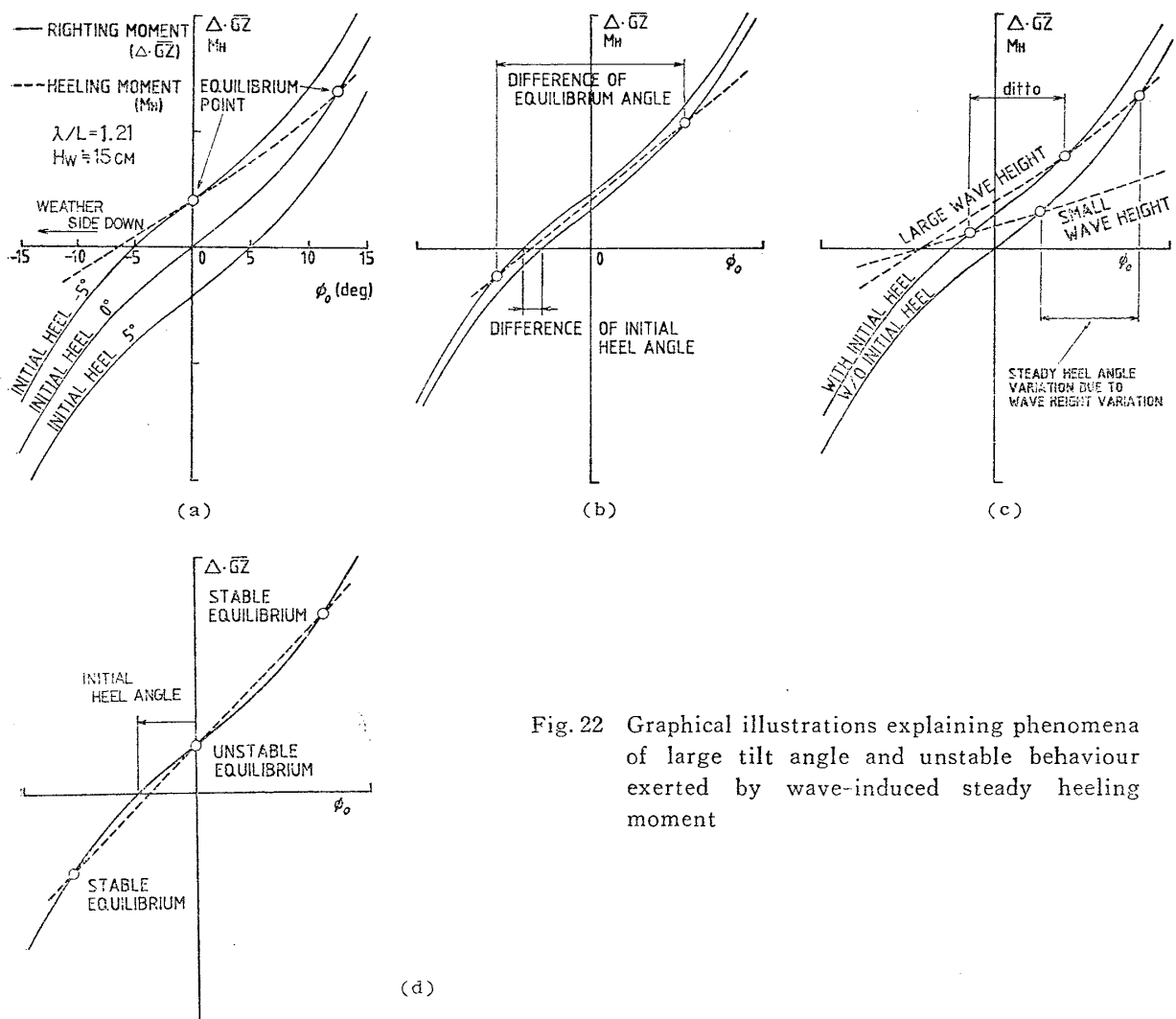


Fig. 22 Graphical illustrations explaining phenomena of large tilt angle and unstable behaviour exerted by wave-induced steady heeling moment

献 4), 5) で指摘されているように, ロワーハルに働く上下方向波浪定常力の没水深度影響と干渉影響と考えられる。

(3) ロワーハルに働く上下方向波浪定常力による定常転倒モーメントの計算結果は, 3次元影響, 干渉影響を無視し, 拘束条件に違いがあるにもかかわらず, 実験から導出された結果と良い対応を示す。

(4) 係留された半潜水式海洋構造物の定常傾斜に関するシミュレーション結果は, ロワーハルに働く上下方向波浪定常力による定常転倒モーメントを考慮に入れた場合実験結果をよく説明できる。

以上のように, 係留された半潜水式海洋構造物の定常傾斜を論ずる場合, ロワーハルあるいはフーティングなどに働く上下方向波浪定常力による定常転倒モーメントは不可欠の要因である。

最後に, 本研究に対し御助言・御討論いただいた防衛大学校 別所正利教授, 横浜国立大学 竹沢誠二教授, 住友重機械工業(株) 平塚研究所 永松秀一室長に深く御礼申し上げます。また, 没水体に働く流体力の計算に御助力いただいた防衛大学校 経塚雄策助手をはじめ, 実験, 解析に御協力いただいた住友重機械工業(株) 平塚研究所の関係各位にも深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Takarada, N., Obokata, J., Inoue, R., Nakajima, T. and Kobayashi, K.: The Stability on Semi-submersible Platform in Waves (On the Capsizing of Moored Semi-submersible Platform), The 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (Oct. 1982).
- 2) 宝田直之助, 他: 半潜水式プラットフォームの係留状態における安定性について, 第6回海洋工学シンポジウム (1982年12月).
- 3) Hineno, M., Takegawa, H., Oda, T., and Abe, M.: The Effect of Low Frequency Roll Motion on Underdeck Clearance of a Semi-submersible Platform, The 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (Oct. 1982).
- 4) Numata, E., Michel, W. H., and McClure, A. C.: Assessment of Stability Requirements for Semi-Submersible Unit, TSNAME (Nov. 1976).
- 5) Martin, J. and Kuo, C.: Calculation for the Steady Tilt of Semi-submersibles in Regular Waves, RINA (1978).
- 6) Ogilvie, T. F.: First-and second-order forces on a cylinder submerged under a free surface, J. F. M., Vol. 16 (1963).
- 7) Lee, C. M. and Newman, J. N.: The Vertical

Mean Force and Moment of Submerged Bodies under Waves, J. S. R., Vol. 15, No. 3 (1971).

- 8) 経塚雄策: 2次元物体に働く非線型流体力について(第4報), 日本造船学会論文集, 第152号(昭和57年12月).
- 9) 朝長義英, 畠中勝則: 浮遊式海洋構造物に作用する波漂流力の計測, 西部造船会々報, 第59号(昭和55年3月).
- 10) 高木又男, 斎藤公男: 非周期的造波問題の周波数領域での取扱い(第1報), 関西造船協会誌, 第182号(1981).
- 11) 竹沢誠二, 酒井敏夫: 波浪中の浮遊式海洋構造物に作用する流体力および運動について, 日本造船学会論文集, 第147号(1980).
- 12) 田才 福造, 根本 紀太郎, 荒川 広行, 栗原 真人: Semi-submersible Catamaran Hull の規則波中の運動について, 西部造船会々報, 第40号(1970).

付録 波浪強制力およびモーメント

ローワーハル型半潜水式海洋構造物の横波中における波浪強制力およびモーメントの近似計算法を以下に示す。前述したように, 波長が構要素と比較して十分長いとすると, Sway, Heave および Roll 方向の波浪強制力およびモーメントは定常傾斜角 ϕ_0 を考慮して以下のようになる。

$$F_y(t) = \sum_j \{F_{phj} \cdot \cos \phi_0 - F_{pvj} \cdot \sin \phi_0\} + \sum_i F_{chi} \cdot \cos \phi_0 \quad (16)$$

$$F_z(t) = \sum_j \{F_{pvj} \cdot \cos \phi_0 + F_{phj} \cdot \sin \phi_0\} + \sum_i F_{chi} \cdot \sin \phi_0 \quad (17)$$

$$F_\phi(t) = -\sum_j \{F_{phj} |h_0| - F_{pvj} \cdot b_{0j}\} + \sum_i M_{chi} \quad (18)$$

ここで, F_{phj} , F_{pvj} はローワーハルの長手方向および短手方向成分の波浪強制力を示し, また, F_{chi} , M_{chi} は, それぞれ, コラムに直角に働く波浪強制力および重心回りのモーメントを示す。

$$F_{phj} = A_{phj}^{(\omega)} \cdot \ddot{\eta}_{yj}(\phi_0, t) + N_{phj}^{(\omega)} \cdot \dot{\eta}_{yj}(\phi_0, t) + (P_{4j}(t) - P_{3j}(t)) \quad (19)$$

$$F_{pvj} = A_{pvj}^{(\omega)} \cdot \ddot{\eta}_{zj}(\phi_0, t) + N_{pvj}^{(\omega)} \cdot \dot{\eta}_{zj}(\phi_0, t) + (P_{2j}(t) - P_{1j}(t)) \quad (20)$$

$$F_{chi} = \rho \bar{A}_c (1 + C_{hc}^{(\omega)}) \int_{l_i} \ddot{\eta}_{yi}(\phi_0, t) dl \quad (21)$$

$$M_{chi} = -\rho \bar{A}_c (1 + C_{hc}^{(\omega)}) \int_{l_i} \ddot{\eta}_{yi}(\phi_0, t) \cdot l \cdot dl \quad (22)$$

上式で, $\ddot{\eta}_{yj}(\phi_0, t)$, $\ddot{\eta}_{zj}(\phi_0, t)$ は, ロワーハルの長手方向および短手方向成分の波粒子加速度を示し, また, $\dot{\eta}_{yj}(\phi_0, t)$, $\dot{\eta}_{zj}(\phi_0, t)$ は, 波粒子速度を示す。

$$\eta_{yj}(\phi_0, t) = \xi_j(t) \cdot \cos \phi_0 + \zeta_j(t) \cdot \sin \phi_0 \quad (23)$$

$$\eta_{zj}(\phi_0, t) = -\xi_j(t) \cdot \sin \phi_0 + \zeta_j(t) \cdot \cos \phi_0 \quad (24)$$

一方, $\bar{A}_c$, C_{hc} はコラムの断面積および付加質量係数であり, N_{phj} , N_{pvj} はローワーハルの造波減衰係数である。また, $P_{1j}(t)$, $P_{2j}(t)$, $P_{3j}(t)$, $P_{4j}(t)$ は, ロワーハルに加わるフルードクリロフ力を示し (Fig. 14 (b) 参照), この中で $P_{1j}(t)$ は, コラムの占める面積を考慮して求める。