

矩形構造物の動揺および係留に関する研究

藤田良一*・阪東浩造**・志岐 明***
中込國喜****・利穂吉彦*****

1. はじめに

わが国でも、海底石油開発、洋上備蓄、大水深防波堤等が具体化し、大型のコンクリート製海洋構造物が提案されるようになった。構造物の大型化に伴い、その施工法のひとつとして、構造物自体の浮力を最大限に利用する浮遊製作工法が注目されてきた。しかし、わが国の実情では、構造物が大型化するにしたがい、建造ヤードが限定され、国外のような理想的な条件下で施工することは困難である。このため、様々な環境条件下での浮遊構造物の挙動を事前に評価し、設計・施工に反映することが要求される。

水深の影響を受けない条件下での、細長い浮体の動揺に関しては、類似の問題を扱っている造船分野での研究が進んでいる。一方、有限水深下での矩形浮体の動揺を対象とした研究は、井島ら¹⁾が2次元モデルで行っている他、有限要素法や境界積分法による2次元解析がある。また、洋上備蓄計画が具体化するに従い、上田ら²⁾、珠久ら³⁾、新井⁴⁾が独自の研究を行い、矩形浮体の3次元動揺解析、さらに、係留系を含めた解析手法の開発に見通しを得ている。

本研究は、有限水深での波浪中の矩形構造物の運動を把握し、適切な設計・施工計画を行うための、簡便で精度の良い手法を提案するものである。まず、浮体の動揺特性を得るために、水平バネおよび鉛直バネで係留された、2次元等価線形バネ置換モデルによる、動揺解析プログラムを開発し、並行して、これを検証するために、3次元水理模型実験を行った。これらの結果を基に、構造物底部のフーチングの有無の差、および減衰の効果を精度良くシミュレートできるように、プログラムにフィードバックした。

2. 実験方法

(1) 水槽・施設

* 正会員	工修	鹿島建設(株)	海洋開発室
** 正会員	工修	鹿島建設(株)	電子計算センター
*** 正会員	農修	鹿島建設(株)	技術研究所
**** 正会員		鹿島建設(株)	技術研究所
***** 正会員	工修	鹿島建設(株)	技術研究所

造波装置の付いた平面水槽(58m×20m×1.5m)を用い、水深は100cmで一定とした。

(2) 模 型

構造物模型は、図-1に示すように、幅80cm、長さ100cm、吃水30.4cmの直方体である。土木構造物に多い底部のフーチングの影響を把握するため、フーチングの有無の相違がある2種類の模型を使用し、その諸元を表-1に示した。

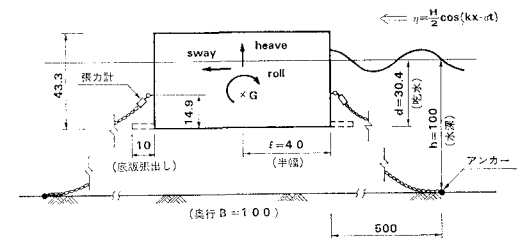


図-1 模型概要図

表-1 模型諸元表

項 目	フーチング無し	フーチング有り
波進行方向幅	2l=80 cm	
奥 行	B=100 cm	
吃 水	d=30.4 cm (自由浮体)	
重 心 位 置	14.9 cm (底版下端から)	
重 量	243 kg	256 kg
メタセーター高さ	17.1 cm	18.8 cm
慣性モーメント	1.68×10 ⁵ kg・cm ²	1.96×10 ⁵ kg・cm ²

(3) 係 留

8本の鋼製チェーン(水中単位重量125g/m)を用い、係留索の初期張力を0.36kg/本とした。係留索の水平長は5mで、係留状態としては、索の実長が有効長より長い、弱緊張係留である。

(4) 計 測

対象とする動揺は、入射波に対し、2次元のと予想できるため、図-1に示す3成分(Heave, Roll, Sway)で表わすことができる。これらの動揺変位は、側面から撮影したVTR画像を追跡して求めた。係留索張力は、張力計(フルスケール50kg)で測定した。

(5) 係留索のパネ定数

係留した構造物を、ロープで上向きおよび横向きに静的に引張り、その時の外力、変位および索張力の関係を求めた。

(6) 静水中の自由振動実験

動揺特性を支配する主要因となる構造物の固有周期、減衰定数および付加質量(または、付加慣性モーメント)を求めるため、静水中の自由振動実験を行った。実験は、動揺3成分のおののに対し、自由浮体(係留索無し)および係留浮体で実施した。

(7) 規則波中の動揺実験

入射波は、構造物の長辺方向に直角に作用させ、波高は3.3cmで一定とした。波向、波高が一定の条件の基で、波周期を変化させて周期特性を把握した。実験に用いた周期は、 $T=0.73$ 秒 ~ 2.37 秒で、0.18秒刻みである。

3. 解析方法

(1) 係留パネの決定

浮体を係留する係留索は、水平パネと鉛直パネでモデル化した。一般に、係留索はカテナリー曲線を形成し、係留索の浮体側の取付け位置に、水平力、あるいは、鉛直力を作用させると、カテナリー形状が変化し、取付け位置の移動量が推定できる。逆に、変位を与えることにより、作用力を求めることも可能である。このことは、実験的に確かめることができる。図-2は、静水中での

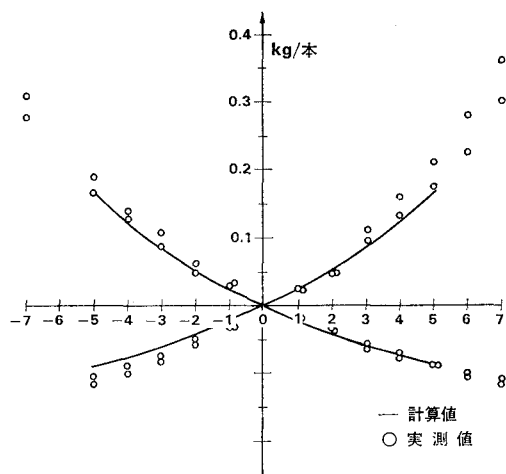


図-2 水平変位と索張力の関係

実験で得られた値であるが、カテナリー曲線から求めた変位と力の関係と良く一致している。

このようにして求められた変位と作用力の関係は、曲線と与えられるが、この非線形なパネ特性を解析に取込むことは難しい。そこで、あらかじめ、浮体の動揺量を推定し、図-3に示すように、この動揺量に相当する曲

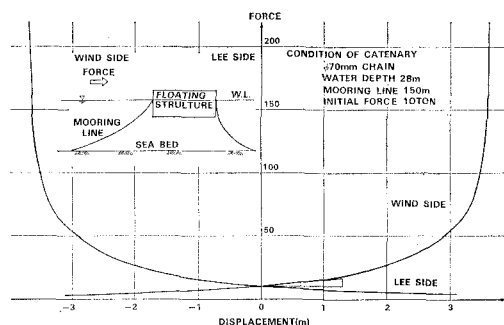


図-3 係留索の非線形パネ特性

線部分の傾きを求め、等価な線形パネを決定した。

(2) 浮体の動揺解析手法

解析は、伊藤ら⁵⁾によって提案されている、簡略な2次元モデルを利用して行う。この方法は、最終的に、Heave, Roll, Sway, 透過波、反射波の振幅(x_j , $j=1\sim 5$)を未知数とする。次の5元連立方程式を解くことに帰着する。

$$\{a_{ij}\} \cdot \{x_j\} = \{b_i\} \cdot a$$

ここで、 a_{ij} , b_i は、構造系や入射波条件等によって決定される係数で、 a は入射波振幅である。一方、付加質量 M_1 、付加慣性モーメント I_1 は、 σ^2 (σ は入射波の周波数)に比例する項として、以下のような形で表わされる。なお、記号は、図-1に準じる。

$$M_1 = \frac{2\rho l}{3(h-d)} \{l^2 + (h-d)^2\}$$

$$I_1 = \frac{2\rho l^2}{h-d} \left\{ \frac{l^2}{45} + \frac{(h-d)^2}{9} \right\}$$

4. 結果と考察

(1) 静水中の自由振動

VTR 記録を基に、Heave, Roll, Sway の自由振動に対する固有周期、減衰定数を求めた。また、測定した固有周期から、付加質量、付加慣性モーメントの値を算出した。実験結果は、表-2に示すとおりである。

底部のフーチングの有無を比較すると、次のようになる。

- フーチングがあると、Heave, Roll に対しては、おのおの、付加質量、付加慣性モーメントが大きくなり、その結果、固有周期が増加する。
- フーチングがあると、Rollでは、減衰定数が3倍程に増加する。
- Sway では、フーチングの有無による差は、ほとんどみられない。

なお、表-2の括弧内に示した数値は、伊藤ら⁵⁾の近似理論によって計算した、Heave, Roll に対する付加質量、付加慣性モーメントの値である。計算は、2次元短

表-2 自由振動実験結果一覧表

フーチング		無し			有		
動揺成分		Heave	Roll	Sway	Heave	Roll	Sway
固有周期 (秒)	自由浮体	1.56	1.61	—	1.81	2.17	—
	係留浮体	1.48	1.58	11.80	1.83	2.08	12.72
減衰定数 (h)	自由浮体	0.082	0.032	—	0.072	0.093	—
	係留浮体	0.075	0.037	0.032	0.088	0.090	0.035
付加質量 (kg)	自由浮体	240	0.99×10^5 (1.06×10^5)	—	395	3.67×10^5	
付加慣性 モーメント ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$)	係留浮体	195	0.93×10^5	68	413	3.26×10^5	105

注: () 内数値は伊藤等の近似理論による。

形浮体に対する理論に基づき、実験結果は、3次元浮体に対して行ったものであるが、両者には、かなり良い一致が見られる。

(2) 規則波中の動揺特性

a) 実験結果の概要

底部にフーチングの無い場合の、実験に関する結果をまとめると、次のようになる。

- 運動は、全ての周期に対して2次元的であり、波に対する直角方向の運動は、ほとんど見られない。
- Rollの固有周期付近では、三成分の内Rollによる動揺が顕著になり、共振する ($T=1.57$ 秒)。
- 波周期が小さくなると、動揺は急速に小さくなる。逆に、Heave, Rollの固有周期を越えて波周期が大きくなっても、動揺は、急には小さくならない。
- 短周期波 ($T \leq 0.91$ 秒) では、構造物前面中央部で波形が盛り、碎波を生じるのが見られ、越波する事がある ($T=0.73$ 秒)。
- 長周期波では、Swayによる応答値が大きくなる。

動揺変位の実験値を、図-4・a～cに丸印で示した。ここで、●印は、底部にフーチングが無い場合、○印が、フーチングの有る場合である。これらの動揺変位量は、波周期内の変動に対し、最小自乗法により正弦波で近似して、変位振幅を求めたものである。また、図-6には、係留索張力変動を示した。

底部にフーチングがある場合の動揺でも、上述のii)を除く結果が得られた。図-4・a～cからもわかるように、フーチングがある場合、次の事がいえる。

- Rollによる動揺は、共振点付近でも顕著でなくなり、Heaveによる動揺の方が支配的になる。しかし、応答変位は、フーチング無しの場合と同程度である。
- Rollでも、共振周期は大きくなるが、応答変位は半分以下になる。
- Swayでは、差はあまりみられない。
- 全般に固有周期が大きくなり、長周期波に対する応答が大きくなる。

b) フーチングの無い浮体

図-4の中に、フーチングの無い場合の実験 (●印)、および、計算 (実線) により得られた動揺の応答値を、入射波高で正規化して示した。周波数特性に関しては、共振周期が少しずれているが、最大応答値は、Rollを除くと、ほぼ等しくなる。したがって、共振周期を一致させる手法を追加することにより、精度良くシミュレートできることが明らかである。一方、Rollに関しては、従来より、構造物の固有周期近傍での計算値が過大になることが知られているが、この傾向とも一致する。そこで、何らかの形で、前述の運動方程式に、減衰の効果を反映する手法が必要となる。

c) 減衰力の効果

図-4から明らかなように、この解析による計算値 (一点鎖線) は、入射波周期が構造物の固有周期に近い場

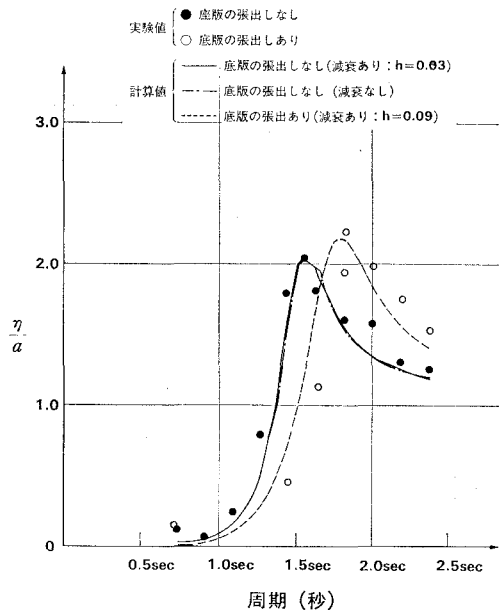


図-4a 周波数応答特性 (Heave)

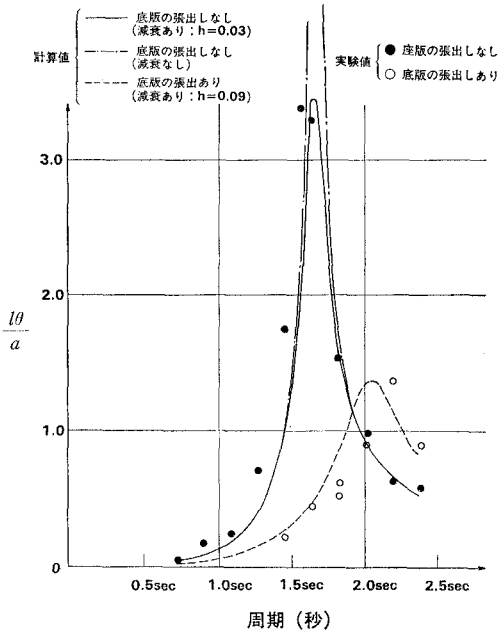


図-4 b 周波数応答特性 (Roll)

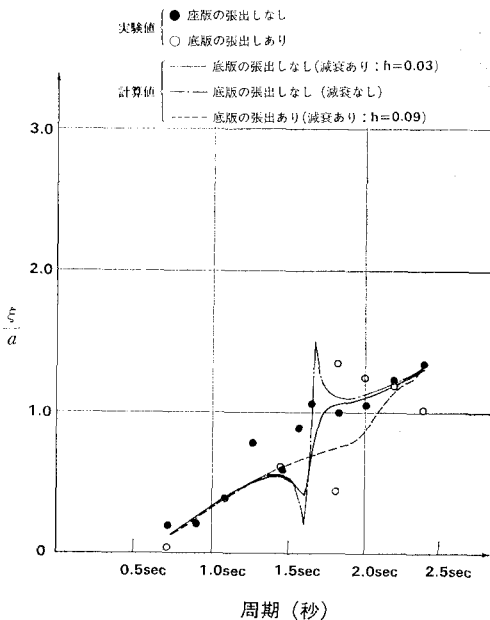


図-4 c 周波数応答特性 (Sway)

合、特に、Roll で過大な応答値を与えている。これは、前述の運動方程式が、速度に比例する、いわゆる粘性減衰力を明確に含んでいないためと考えられる。そこで、速度に比例した減衰力項を、回転運動に対する方程式に付加することにする。なお、減衰定数は、静水中での自由振動実験により得られた値(表-2)を用いる。図-4の実線は、この粘性減衰力を考慮した時の計算結果で、無視した結果(一点鎖線)に比べ、実験値(●印)と良

好な一致を示している。

d) フーチングの効果

土木構造物としての浮体では、着底後の地盤支持力を考慮して、構造物底部にフーチングを有するものが多い。このため、浮体として考えた場合、このフーチングの動揺に対する効果の確認と、解析手法の確立は、重要な課題となる。

前述のように、フーチングは、Roll の動揺量を減少させると同時に、構造物のみかけの固有周期を長くする効果がある。そこで、動揺量の減少は、減衰定数(表-2)によって評価するとし、一方、固有周期の増加は、慣性項の増加として捉える。つまり、フーチング上の流体を、剛性零の構造物の一部と仮定することにより、構造物の質量・慣性モーメントを再評価し、解析に取込むことにする。この場合、フーチングの形状と動揺成分の運動方向を考慮し、水平運動を記述する運動方程式については、このような補正を行わないこととした。

図-5 は、フーチングを有する矩形浮体の Roll の実

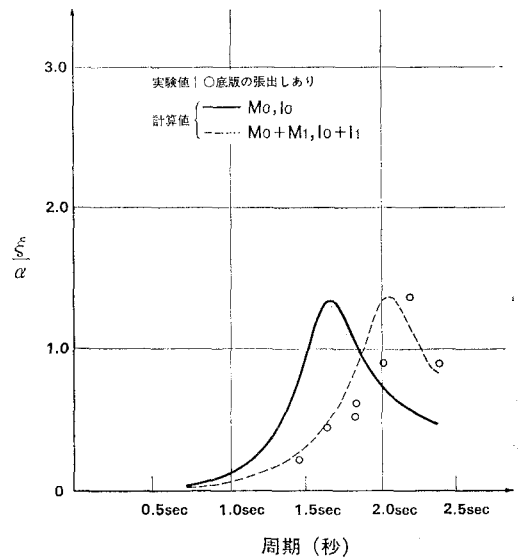


図-5 フーチングの効果

験結果と、計算結果を示したものである。実線は、上述の慣性項補正を行わなかった場合で、一方、破線は、補正をした場合の計算結果である。上述の簡単な解析手法により、フーチングの効果を評価できることがわかった。このような慣性項補正を行った場合の、他の動揺成分の計算結果も、図-4 の中に破線で示されている。

e) 係留索張力

図-6 は、係留索張力に関する実験結果、および計算結果の張力増加分を、初期張力で正規化し、波周期ごとに示したものである。計算では、係留索張力は Sway の応答値に依存し、波周期と共に増加する傾向があるが、

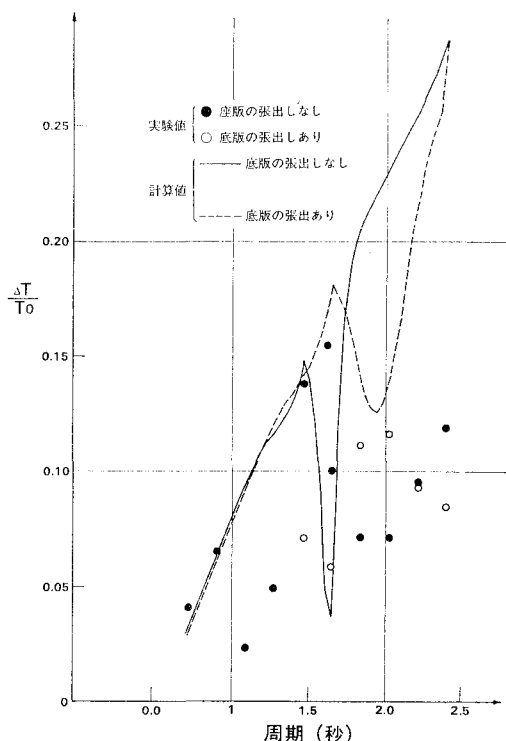


図-6 係留索張力

一方、実験結果には、Roll の影響がみられる。このように、係留索張力に関しては、明確な一致は見られなかった。

5. 結 語

波浪中の矩形浮遊構造物の動的応答特性を把握する目的で、3次元水理模型実験およびこの結果を反映した2次元動揺解析プログラムによるシミュレーションの結果次の事項が判明した。

i) 浮遊構造物の固有周期と、動揺を引起す入射波周期

との関係より、共振点付近での動揺を把握することが重要となる。

- ii) 減衰の影響を無視すると、Roll の応答値が過大となるが、簡単な静水中での振動実験より得られる減衰定数を用いることにより、精度良く評価できる。
- iii) 底部のフーチングの効果は、フーチング上部の水を、付加質量、付加慣性モーメントとして加算することにより評価できる。
- iv) 入射波の周期が、構造物の固有周期よりも短い場合、動揺量は小さくなるが、矩形構造物全面中央部で、反射、回折等の影響により砕波が生じ、乾舷の条件によっては越波する。

以上より、2次元等価線形バネ置換モデルによるプログラムは、簡便な手法にもかかわらず、かなりの精度で現象を再現することが可能なことがわかった。また、これによる解析結果と、あらかじめ準備した係留索の非線形バネ特性を考慮することにより、容易に係留計画を立案することも可能である。

参 考 文 献

- 1) 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による矩形断面体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，No. 202，pp. 33～48，1972，6。
- 2) 上田 茂・白石 悟：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究——数値シミュレーション手法について——，港湾技術研究所報告，Vol. 19，No. 3，pp. 105～143，1980，9。
- 3) 珠久正憲・島田博之・藤井 斉・豊田昭三・池上国広・安藤裕昭：浅海浮上式備蓄タンクの係留に関する研究，日本造船学会論文集，No. 146，pp. 257～266，1979，11。
- 4) 新井信一：箱型係留浮体の運動と係留索の張力及び係留法に関する研究，東北大学博士論文，1979，6。
- 5) 伊藤善行・千葉 繁：浮防波堤の水理に関する近似理論と応用，港湾技術研究所報告，Vol. 11，No. 2，pp. 137～166，1972，6。