

大型海洋構造物近傍における係留作業船の長周期動揺特性

織田幸伸*・小林昭男**・増田光一***

1. はじめに

不規則波中に弛緩係留された浮体は、波スペクトルのピーク周波数帯より数十秒も長周期側の周波数帯で大振幅水平運動をすることが知られている。この現象は、不規則波中に含まれる、周波数の接近した二成分波の非線形干渉によって生ずる二次の波浪外力即ち長周期漂流力に起因するものである。長周期漂流力の絶対量は一次の波浪外力に比べてかなり小さいが、浮体の係留方法が弛緩係留で動揺の固有周期が長周期である場合、漂流力が浮体の固有周期と同調し、大振幅水平運動を引き起こす場合がある。

一方、現在各地に計画されている渡海橋の橋脚設置位置は、湾口部の外洋に面した大水深かつ波浪外力の厳しい海域であり、作業船の係留方法も弛緩係留となるため、長周期動揺を引き起こしやすい条件となる。これは渡海橋建設に限らず、今後の大水深かつ波浪の厳しい海域での海上工事に共通することであり、係留システムの設計などの施工検討には、長周期動揺に対する安全性が重要な検討項目となる。

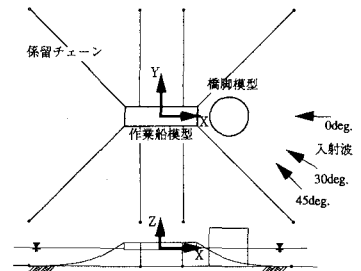
係留された浮体の長周期動揺特性については、船舶、海洋工学の分野で既に多くの研究(例えば、前田ら, 1991)があるが、これらの研究の多くは、浮体を単体で係留した場合を対象としたものである。しかし、渡海橋基礎に代表される大型海洋構造物の施工時には、作業船は大型構造物の近傍に係留されることになり、作業船と構造物の間の流体力学的な相互干渉影響を含んだ長周期動揺特性を解明する必要がある。

そこで本研究では、大型海洋構造物近傍に係留された作業船の長周期動揺特性を模型実験および数値計算によって明らかにし、浮体の動揺解析手法を確立することを目的としており、同時に、海上工事における長周期動揺の検討の重要性を示した。

2. 模型実験

実験は、渡海橋基礎工事において、円筒型橋脚(以後、構造物と呼ぶ)の背後にバージ作業船(以後、浮体と呼ぶ)が8本の係留チェーンによってカタナリー係留されている状態を想定して行った。模型の諸元は、実際に想定される海峡工事に対し、縮尺を130分の1として決定した。ただし、係留チェーンについては、重量のみを相似則に従わせた。模型の配置および模型諸元を図一、表一に示す。実験に用いた波は、規則波、不規則波、および動揺の長周期成分が顕著に現れる二成分波の三種類で、規則波および二成分波では最大波高3cm, 周期0.6~1.4sの範囲の波を、また不規則波では有義波高、有義周期がそれぞれ1.0cm, 0.8sと7.0cm, 1.1sの二種類の波を作用させた。また、波の入射角は、X軸に対し0度、30度、45度の三種類とした。

動揺実験に先立ち行った波強制力計測実験では浮体を



図一 模型配置

表一 模型諸元

| | | | | |
|-----------|--|-------------|-------|-----|
| 作業船模型 | 全長 m | 1.5 | | |
| | 全幅 m | 0.4 | | |
| | 高さ m | 0.15 | | |
| | 重量 kgf(N) | 30(294) | | |
| | 慣性モーメント kgfm ² (Nm ²) | Roll | Pitch | Yaw |
| メタセンター高 m | Roll | | Pitch | |
| | 0.20 | 1.54 | | |
| 橋脚模型 | 直径 m | 0.6 | | |
| | 高さ m | 0.6 | | |
| 係留チェーン | 水中重量 kgf/m ² (N/m ²) | 0.028(0.27) | | |

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所

** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所

*** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

計測台車に三分力計を介して固定し、サージ、ヒーブ、ピッチの三モードの波強制力について計測を行った。

動揺実験では、浮体の動揺測定にポジションセンサーを用い、X方向、Y方向の二つのカメラによって浮体の動揺を計測した。またこの際、8本の係留チェーンにはすべて張力計を取り付け、係留チェーンに働く張力についても同時に計測した。

3. 数値解析

(1) 運動方程式

係留浮体の運動は、次の運動方程式によって支配されるとする。

$$\sum_{k=1}^6 \{ [M_{kj} + m_{kj}(\omega)] \ddot{x}_k(t) + N_{kj}(\omega) \dot{x}_k(t) + C_{kj} x_k(t) \} = F_j(t) \quad (j=1\sim 6) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x ：浮体の動揺量、 M ：質量、 m ：付加質量、 N ：造波減衰力係数、 C ：静的復元力係数、 F ：波強制力および係留チェーンによる復元力をそれぞれ表す。式(1)は、周波数領域で記述された運動方程式であり、付加質量および造波減衰力係数は周波数の関数になっているため、二つ以上の周波数成分を持つ運動について式(1)を解くには、付加質量および造波減衰力係数をあたえる代表的な周波数を決定する必要がある。本研究ではこの周波数を、サージ方向の運動がもっとも卓越する周波数であると仮定し、実験を参考にこの周波数を決定して時系列シミュレーションを行った。

(2) 漂流力

二次波強制力には、波に含まれる二つの周波数の和の成分と差の成分の二つがあるが、本研究では浮体の長周期動揺を対象としているため、差の成分である漂流力のみを考えることにする。漂流力 $F^{(2)}$ は線形動揺解析により算出された結果を用いて、次のように表される (Pinkster, 1980)。

$$F_{k(\omega_1 - \omega_2)}^{(2)} = -\frac{\rho g}{4} \int_{C_w} \eta_{R1}^{(1)} \eta_{R2}^{(1)*} n_k dC_w + \frac{\rho}{4} \iint_{S_0} \nabla \phi_1^{(1)} \nabla \phi_2^{(1)*} n_k dS + \frac{i \rho \omega_1 \omega_2}{4} \iint_{S_0} x_1^{(1)} \nabla \phi_2^{(1)*} n_k dS + \frac{m_i \omega_i^2}{2} (x_{ci}^{(1)} \times x_{kj}^{(1)*}) \quad (k=1\sim 6) \dots\dots (2)$$

ここで、 η_R は一次波面上昇量、 n は外向き法線ベクトル、 ϕ は速度ポテンシャル、 C_w は水線、 x_c は浮体重心の変位、 x_R は浮体の回転ベクトルをそれぞれ表す。また、(1)、(2) はそれぞれ一次、二次の変量であることを示している。

(3) 係留力

係留チェーンによる復元力は、時系列シミュレーション

において、各時間ステップごとに係留チェーンの張力を計算して求めた。このとき、チェーンの伸びは微小であると仮定し、チェーン長を一定としたカタナリー理論 (庄司, 1975) を用いて計算している。

一方、前述した漂流力の計算を行うには、線形動揺解析の結果が必要となるが、線形動揺解析を行う際には、サージ方向、スウェイ方向の近似的な線形バネ定数を実験により求め、これを式(1)の静的復元力係数に加えることにより係留力を考慮した。これは、動揺の小さい範囲では、サージ方向、スウェイ方向以外の係留力は静水圧による復元力に比較して微小であり、線形動揺計算においては無視できるとしたためである。こうすることにより、式(1)は線形微分方程式となり、周波数領域での取り扱いが可能となる。

(4) 時系列シミュレーション

図-2 に時系列シミュレーション計算のフローチャートを示す。時系列シミュレーションではまず、三次元特異点分布法を用いて、線形波強制力および流体力の計算に必要な一次速度ポテンシャルの計算を行う。その後、式(1)を用いて、波に含まれる各波成分についてそれぞれ線形動揺解析を行い、漂流力の計算に必要な浮体の一次動揺応答量を算出する。このとき、前述したように係留力を線形近似して、時間成分を除いた周波数領域での計算を行っている。次に、一次速度ポテンシャルおよび一次動揺応答を用いて、式(2)により漂流力の計算を行う。これらの計算結果をもとに、式(1)を用いて非線形動揺応答シミュレーションを行うのだが、このとき、線形動揺解析では周波数領域で計算を行ったのに対し、ここでは、係留力の非線形性を考慮した時間領域での計算を行っている。なお、式(1)の微分方程式を時間領域で解くには、ルング・クッタ法を用いた。

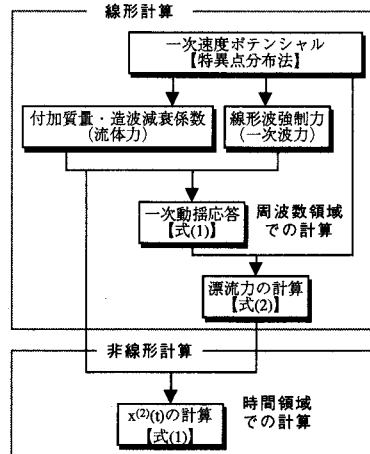


図-2 計算のフローチャート

4. 結果と考察

(1) 一次波強制力

図-3は、サージ方向の一次の波強制力について、実験結果と計算結果を示したものであり、(a)は浮体を単体で係留した場合、(b)は構造物の背後に係留した場合を示している。また、横軸は角周波数を、縦軸は入射波の単位振幅あたりの一次波強制力を表す。波長が長いほど回折は起すため、図-3(a)(b)で、構造物の有無による違いは高周波数域で大きく現れている。

一次の波強制力は、本研究で対象としている長周期動揺には直接関係しないが、漂流力の計算に必要な浮体の線形動揺に大きく影響してくる。図-3によれば、構造物の有無にかかわらず、計算結果と実験結果はよく一致しており、本解析手法のうち線形範囲部分の妥当性が検証される。

(2) 流体力

図-4は水深60cmの場合の付加質量および造波減衰係数の角周波数に対する計算結果である。これによると、構造物がない場合には、付加質量、造波減衰係数ともに、角周波数に対して比較的単調に変化しているのに対し、構造物がある場合には、角周波数によって大きく変動している。これは、浮体と構造物の間の相互干渉によるものであり、特に高周波数側で顕著である。

実際の長周期動揺の数値シミュレーションで用いる流体力は、3の(2)で述べたように、実験より求めたサージ動揺の卓越角周波数における値である。水深60cmの場合の実験結果でこの角周波数は、係留チェーンの初期

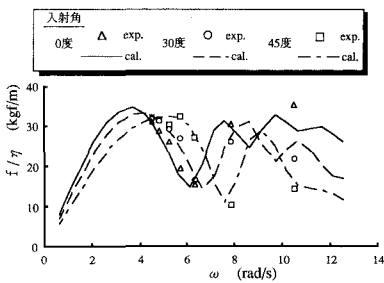
張力70gfの場合にはおよそ0.8rad/sであった。図-4によると、 $\omega=0.8\text{ rad/s}$ のときの造波減衰係数の値はほぼ0であり、長周期動揺は減衰しにくいことがわかる。

(3) 二次波強制力と浮体動揺

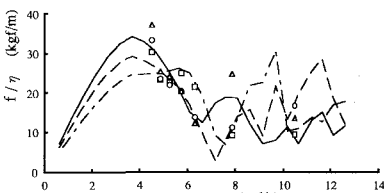
a) 二成分波による浮体動揺

図-5, 6は、二成分波を入射波として入射角0度, 30度で作用させた場合の動揺のスペクトルである。図中には実験結果と数値シミュレーションの結果を同時に示した。作用させた二成分波は周期0.816s, 波高1.5cmの波と周期0.898s, 波高1.5cmの波の合成波である。入射波の周期(周波数1.114Hzおよび1.225Hz)での浮体動揺の応答はほとんど現れなかったため、長周期動揺の起きている周波数帯だけを図示した。なお、水深および係留チェーンの初期張力は、後に述べる不規則波についての結果も含めて全て、60cm, 70gfである。

実験結果と計算結果のスペクトルを比較すると、そのピークにおいて両者はよく一致していると言えるが、その形状は、計算結果の方が幅が広がっている。この理由は以下の通りである。二成分波の場合、長周期漂流力の周波数は二つの波の周波数の差に等しくなるため、この実験ケースの長周期動揺の周波数は0.112Hzとなる。しかし、図-5, 6に示した数値シミュレーションの動揺波形を詳しくスペクトル解析してみると、0.112Hzの周波数成分の他に、これとほぼ同じ程度の振幅を持つ約0.13Hzの周波数成分を含んでいた。これは、係留系を持つ固有周期0.13Hzに一致する。ただし、この固有周期は、浮体に水平初期変位を与え、数値的に自由減衰運動させることによって求めた値である。一般的に動的

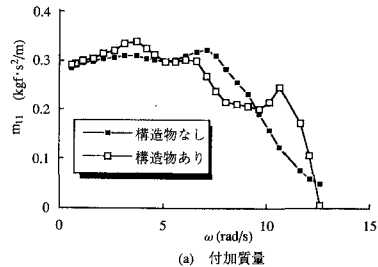


(a) 構造物なし

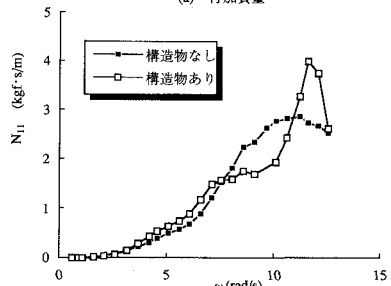


(b) 構造物あり

図-3 一次波強制力



(a) 付加質量



(b) 造波減衰係数

図-4 流体力係数

問題に対する数値シミュレーションを行うと、初期の不安定な段階で自由振動成分を持つ。本計算の場合、本来ならばこの自由振動成分は次第に減衰していき、定常状態では長周期漂流力と同じ周期の動揺のみが残るはずだが、(2)で述べたように、造波減衰力がほとんどないためこの振動成分すなわち固有周期の動揺成分が最後まで残っているものと考えられる。計算結果の方が実験結果に比べて全体に大きな値を示す傾向にあるのも、減衰力が小さいことが原因であると考えられる。この問題を解決するには、式(2)に減衰力項として造波減衰力の他に、粘性減衰力項を加える必要があると考えられ、これは本計算手法の改良点として挙げられる。

次に、動揺に対する構造物の影響について論ずる。浮体を構造物の背後に係留した場合、一般には遮蔽効果により浮体の動揺はかなり減少すると考えられる。しかしながら、図-5および図-6(a)では、構造物による遮蔽効果はそれほど顕著には現れておらず、長周期動揺は大型構造物背後であっても低減されにくいと考えられる。

波の入射角0度のときの、浮体に働くサージ方向の波強制力の値を表-2に示す。これによると、長周期漂流力は一次波強制力に比べてかなり小さい。しかしながら、実際の動揺は長周期漂流力によって起っており、浮体動揺の固有周期が長周期で、長周期漂流力の存在する周期に接近している場合には、長周期動揺を考慮した非線形動揺解析が必要であることをこの結果は示唆している。また、構造物による影響を見ると、一次の波強制力では構造物がある場合は、ない場合に比べて60~75%程度に減少しているのに対し、長周期漂流力は88%程度にしか減少していない。このことは、長周期漂流力は一次波強制力に比較して、構造物背後であっても減少しにくいことを示しており、上述した長周期動揺が構造物の遮蔽効果の影響を受けにくいという現象をよく説明している。

一方、図-6(b)に示したスウェイ方向の動揺スペクトルを見ると、構造物のある方が動揺が大きくなっている。構造物のない場合には波の入射方向に対して浮体の裏側(ここでは、 y の正側)に回折する波が、構造物があることによって遮られ、そのためスウェイ方向の非対象性がより強くなり、動揺が大きくなったと考えられる。

また、スウェイ動揺は、サージ動揺に比較するとかなり小さい。この理由は、スウェイ方向の固有周波数(約0.16 Hz)が、長周期漂流の周波数から大きくずれているためと考えられる。

b) 不規則波による浮体動揺

図-7, 8は、有義波高1.0 cm, 有義周期0.8 s, の不規則波を入射波として与えたときの浮体の動揺スペクトルである。なお、不規則波のスペクトルはブレッグ・光易型を用いた。

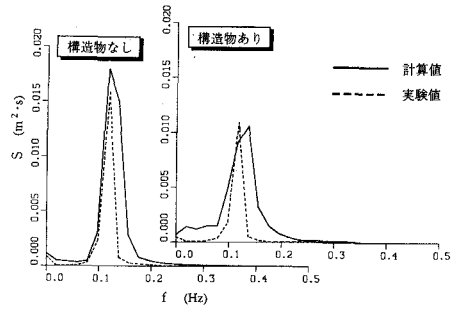
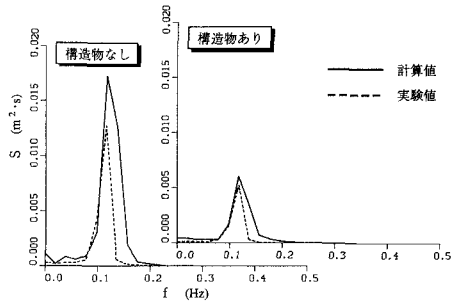
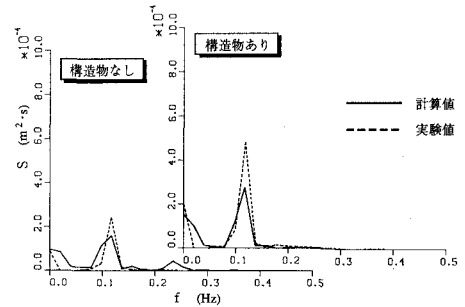


図-5 動揺スペクトル (サージ, 入射角: 0度)



(a) サージ



(b) スウェイ

図-6 動揺スペクトル (入射角: 30度)

表-2 波強制力

| | 周波数 Hz | 波強制力 kgf(N) | |
|--------|-----------|---------------|---------------|
| | | 構造物なし | 構造物あり |
| 定常漂流力 | 0.0 | 0.0126(0.123) | 0.0082(0.080) |
| 長周期漂流力 | 0.112 | 0.0236(0.231) | 0.0207(0.202) |
| 一次波強制力 | 1.114 | 0.2050(2.009) | 0.1206(1.182) |
| | 1.225 | 0.2326(2.279) | 0.1736(1.701) |

二成分波のときと同様、全てのケースに共通して浮体は入射波の周波数帯ではほとんど動揺せず、動揺の固有周期に同調した周期でのみ水平運動をしている。この浮

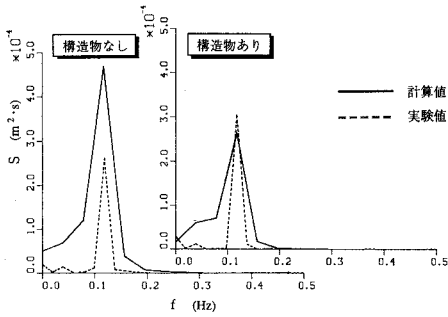
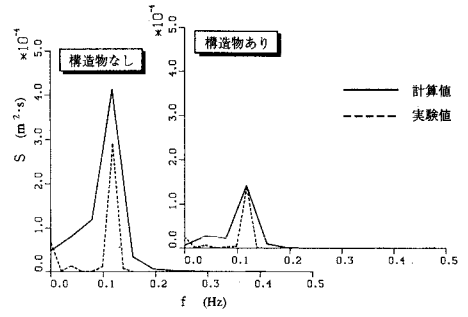
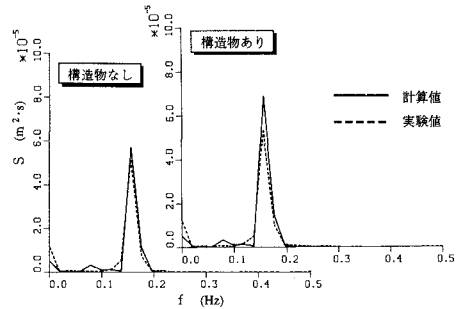


図-7 動揺スペクトル (サージ, 入射角: 0度)



(a) サージ



(b) スウェイ

図-8 動揺スペクトル (入射角: 30度)

体が動揺している周波数帯には、一次の波強制力成分は存在していないため、動揺は長周期漂流力のみによって誘起されていることがわかる。このように、一般の不規則波に対して、浮体の動揺の固有周期が波の周期に比較して長周期である場合には、浮体は主に長周期漂流力によって動揺すると言える。

構造物による影響を見ると、二成分波のときと同じように、構造物による遮蔽効果はあまり顕著には現れておらず、また、スウェイに関しては構造物がある場合の方がより動揺が大きくなっている。

実験結果と計算結果を比較すると、計算結果の方がその動揺量は大きく、この傾向は二成分波のときよりも顕著である。この原因は、前述したように粘性減衰を考慮していないこととともに、流体力の評価方法に問題があると考えられる。すなわち、数値シミュレーションにおいて、サージ動揺の卓越した周波数に対する流体力を用いていることが原因として考えられる。二成分波の場合は、長周期動揺の周波数が一つに限定されるためこの方法でもあまり問題はないが、不規則波の場合、実際にはもっと高い周波数でも長周期動揺しており、これらの周波数に対する流体力も考慮する必要がある。つまり、本解析手法では、流体力を実際よりも小さく評価していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、大型構造物近傍に係留された浮体の長周期動揺特性に着目し、実験および計算によってその特性を明らかにした。本実験および計算によって得られた主要な結論を以下に示す。

① 浮体の係留方式が弛緩係留であり、係留系の固有周期が波の持つ周期に比較して長周期である場合には、線形波力による動揺よりも、非線形な長周期漂流力による動揺の方がかなり大きくなる。

② 構造物の遮蔽効果による長周期動揺量の低減は小さいため、施工計画立案時には注意を要する。

③ 計算結果と実験結果は比較的よく一致しており、さらに改良を加えることにより、本解析手法は長周期動揺の有効な解析手法となり得る。

参考文献

庄司邦明(1975): 係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究, 日本造船学会論文集, 第138号, pp. 233-246.
 前田久明・趙 孝済・宮島省吾 (1991): 方向波中での半潜水式海洋構造物の安全性に関する考察, 関西造船学会誌, 第215号, pp. 113-121.
 Pinkster, J. A. (1980): Low frequency second order wave exciting force in floating structures, NSMB, No. 650, pp. 19-37.