

超大型浮体構造物の変動漂流力 リアルタイムモニタリングシステムの開発

海洋開発工学部 * 難波 康広、加藤 俊司、佐藤 宏

1. まえがき

超大型浮体式海洋構造物の水平方向動揺の固有周期は、例えば長さ×幅×喫水が 4770[m]×1710[m]×2[m]のポンツーン型大型浮体をドルフィン係留する場合の左右揺で、数十秒程度といわれている。このような、超大型浮体の水平面内動揺と、浮体に働く長周期変動漂流力が同調しないよう、係留系のばね強さの設定には十分な注意が必要である。

このような動機から、これまで著者らは、超大型浮体に働く長周期変動漂流力の簡易推定法の開発を目指し、浮体周囲の相対水位の2乗の周積分から、次式によって変動漂流力を見積もる方法を提案してきた。

$$F_H^{(2)}(t) \cong -\frac{1}{2} \rho g \int_A dC \xi^{(1)2}(x;t) n^{(0)} \quad (1)$$

但し

{	$F_H^{(2)}(t)$:2次の水平方向波力
	ρ	:流体の質量密度
	g	:重力加速度
	$\xi^{(1)}(x;t)$:1次の相対水位
	$n^{(0)}$:0次の単位法線ベクトル (浮体から流体の向き正)

但しここでいうn次の量とは、水面波の波長振幅比をとして、のn乗のオーダーの量を指す。

著者らはこれまで、長波頂・短波頂不規則波中模型実験、及び数値計算による(1)式の検証結果について報告した^{1)~3)}。これらの実験・数値計算結果から、(1)式により変動漂流力の評価が出来ることが検証できた。

本論文では、メガフロートフェーズIIモデルを用いた実海域実験による、簡易算定法(すなわち、相対水位から(1)式を用いて、長周期変動漂流力を算定する方法)の検証を行う。

また線形波力についても、(1)式と同様に、近場法と弱非線形の仮定、及び浅喫水の仮定から得ら

れる次式を用いて評価を行い、実海域実験データによる検証、及び評価結果を用いた考察を行う。

$$F_H^{(1)}(t) \cong -\rho g d \int_A dC \xi^{(1)}(x;t) n^{(0)} \quad (2)$$

但し

{	$F_H^{(1)}(t)$:1次の水平方向波力
	d	:喫水

(1)、(2)式は、超大型浮体周辺において、時々刻々の相対水位を計測すれば、超大型浮体に働く時々刻々の変動漂流力、線形波力を評価できることを意味する。すなわち、変動漂流力、線形波力のリアルタイムモニタリングができ、これによって常に、超大型浮体の係留系の安全を確認することができる。

2. 実海域実験

(1)式及び(2)式の実海域での検証を目的として、メガフロートフェーズIIモデルを用いた各種データの収集と解析を行った。ここでは実験の概要と解析結果について報告する。

2.1. 実験概要

メガフロートフェーズIIモデルは、メガフロート技術研究組合(平成12年度末解散)により設置された、長さ1000[m]、幅60[m](一部121[m])、型深さ3[m]、喫水1[m]のメガフロート実証実験浮体である。係留装置はドルフィンガイドフレーム方式(すなわち、ドルフィン頂部の上部工をフェーズIIモデルに配置されたガイドフレームで取り囲んで係留する方式)が採用された。図1にフェーズIIモデルと係留装置、及び圧力と相対水位、風速の計測点の配置概略図を示す。解析に際しては、図中に示すように重心を原点とするX-Y座標軸を考えた。、は各々圧力、相対水位、及び風速計測位置を表す。係留装置は6基設

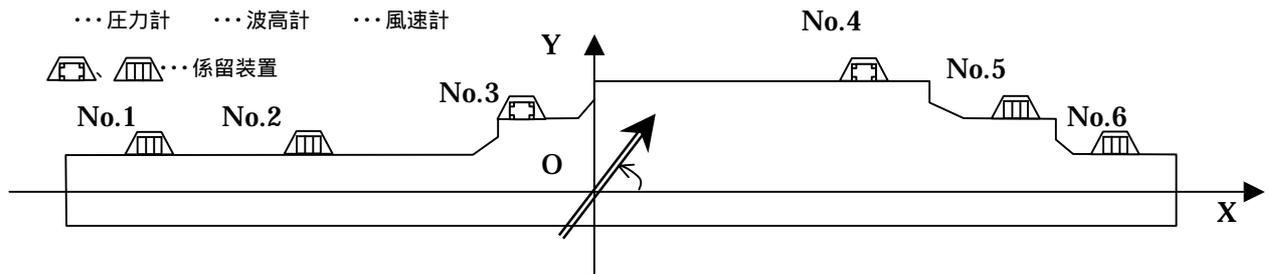


図 1 メガフロートフェーズ II モデル係留装置・計測装置配置概略図

置され、このうち No.3 と No.4 は X-Y 2 方向型であり、No.1,2,5,6 は Y 方向のみの 1 方向型である。フェンダーにはフェンダー高さ 1700[mm] (SUC1700H - RH) と、1600[mm] (SUC1600H - RH) の 2 種類があり、No.1 ~ 6 の北側 (図 1 の上側) からの荷重を受ける側に SUC1700H - RH、その他に SUC1600H - RH のフェンダーが使用されている。図 - 2 に、フェンダー (SUC1700H - RH) の静的反力特性を示す。図中の横軸と縦軸には、各々フェンダーの圧縮歪と反力をとっている。

波・風の入射角 の定義は、図 1 に示す通り。

図 - 3 に変動圧力計測装置取り付け部分の概略図を示す。

2.2. 実験解析

得られた計測データから浮体に働く波力あるいは外力推定値を求める処理方法は次の通りである。まず第 1 の方法は、計測された変動水圧と (1)、(2) 式によって、変動漂流力及び線形波力を算定する方法である。第 2 の方法は、フェーズ II 浮体の水平面内運動方程式を用いる方法である。

2.2.1. 変動水圧による波力の評価法

今回は、相対水位を計測する代わりに、図 1 に示す浮体側面上の 20 点において変動水圧を測定した。浅喫水浮体の場合、浮体側面上の圧力は次式によって、相対水位に変換することが出来る。

$$\xi^{(1)} \cong \frac{P^{(1)}}{\rho g} \Big|_{z=-l} \quad (3)$$

ここで、 $P^{(1)}$ は 1 次の変動圧を、 $z=-l$ は圧力計測位置の z 座標を表す。但し、 z 軸は鉛直上向きを

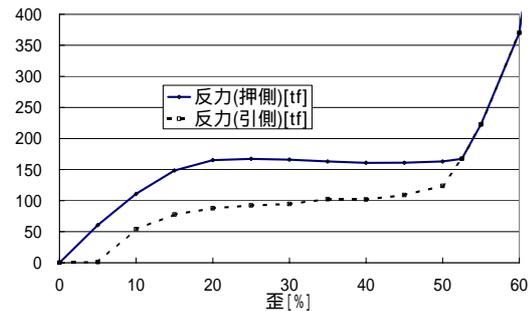


図 - 2 : フェンダー (SUC1700 - RH) 反力特性

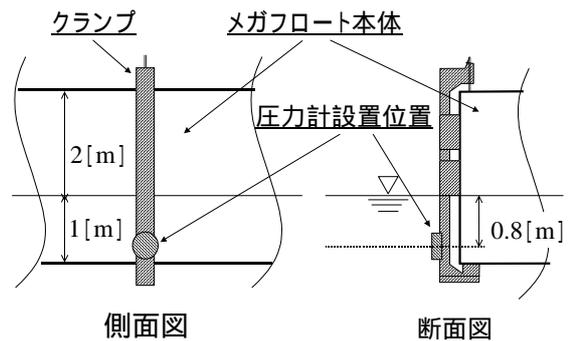


図 - 3: 圧力計設置状況

正とし、 $z=0$ 平面は喫水面と一致するものとする。今回はこのようにして、変動水圧計測値から変換された相対水位時系列に対して、(1)、(2) 式を適用するという手法をとった。

当然ながら、変動水圧計測点は空間的に不連続であるので、(1)、(2) 式を適用する際には、相対水位及びその 2 乗を空間方向に補間する必要があるが、今回は直線補間を行った。

なお、(3) 式自体の実海域データによる検証については、文献⁴⁾において既に報告している通り、良好な結果を得ている。

2.2.2. 運動方程式による外力の評価法

この方法は、フェーズ II モデルの水平面内動揺の運動方程式

表 - 1 : 解析対象データ取得日の海象条件とフェーズ II 浮体左右揺のピーク周波数及び
(5)式により評価された係留装置のばね定数 (解析対象データは 2000 年中に取得)

日付	12/5/8時	2/24/20時	3/17/19時	4/16/6時	5/3/21時	7/7/22時	8/13/20時	8/13/21時	9/4/21時	10/12/21時	10/13/8時
H 1/3[m]	0.620	0.687	0.696	0.752	0.762	1.017	0.783	0.679	0.879	0.820	0.948
T 1/3[s]	3.614	3.762	3.910	3.556	3.524	3.878	3.536	3.677	3.764	3.757	3.673
平均風速[m/s]	11.6	12.8	14.0	12.1	10.7	12.9	14.6	13.5	11.0	10.8	11.3
平均風向[deg]	347.9	349.1	338.0	5.4	4.5	337.4	354.5	352.4	12.6	8.6	8.3
ピ - ク周波数[Hz]	5.74E-02	5.86E-02	6.23E-02	5.62E-02	5.25E-02	6.35E-02	6.23E-02	6.10E-02	4.88E-02	4.64E-02	5.13E-02
ばね定数[N/m]	1.86E+06	1.95E+06	2.20E+06	1.79E+06	1.56E+06	2.28E+06	2.20E+06	2.11E+06	1.35E+06	1.22E+06	1.49E+06

$$(M_{oi} + m_i) \frac{d^2 x}{dt^2} + N_i \frac{dx}{dt} + K_i x_i = F_i(t) \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

の左辺側を評価し、これによって右辺の $F_i(t)$ 、つまり浮体に作用する i 方向の外力を求める方法である。但し上式において添字 $i=1,2,3$ はそれぞれ前後揺、左右揺、船首揺に対応するものとする。また K_i は係留装置のばね定数、 M_{oi} は浮体の排水量及び慣性モーメント、 m_i は付加質量及び付加質量モーメント、 N_i は減衰力係数を表す。

この方法を用いるには、まず浮体の水平面内動揺の時系列を知る必要がある。このためにフェンダー変位をフェーズ II 浮体の水平面内動揺に変換するという手法をとった。

フェーズ II モデルの係留装置では、フェンダーとドルフィンの上部工との間に 10[cm] の間隙がとってあり、本来フェンダー変位から浮体変位を求める場合には、この間隙をどう扱うかという問題があるが、本論文では解析対象データとして比較的波が大きく、計測時間内において常に片側のフェンダーとドルフィン上部工が接触している状態のデータを選ぶことによって、この問題を回避した。結果として、本論文では外力の変動成分のみに注目することとした。

m_i についてはメガフロート技術研究組合の検討結果から、また N_i については、以前に行った模型実験結果²⁾ から見積もった。

また、先に述べた係留装置のばね定数 K_i は、本来は定数ではない。フェンダー部では図 - 2 に示したような非線形性を持つ。しかしながら、計測されたフェンダー歪量が微小(最大波高時 2000/7/7 台風 3 号時 でも 4 [%] 程度)であることから、今回は K_i を定数として扱うこととした。但し、歪量が小さ過ぎる為に、フェンダーの反力

歪特性がカタログ値(図 - 2)と異なることが予想された。このため、浮体の水平面内 i 方向動揺スペクトルのピーク周波数を、その固有周波数 f_{oi} とみなし、 f_{oi} と浮体の質量(排水量 M_{oi} + 付加質量 m_i) から次式によってばね定数を推算することとした。

$$K_i = (2 \cdot f_{oi})^2 (M_{oi} + m_i) \quad (5)$$

2.3. 解析結果と考察

解析は、観測した中では比較的波の高かった日の計測データを対象とした。表 - 1 に解析対象日の海象条件等を示す。

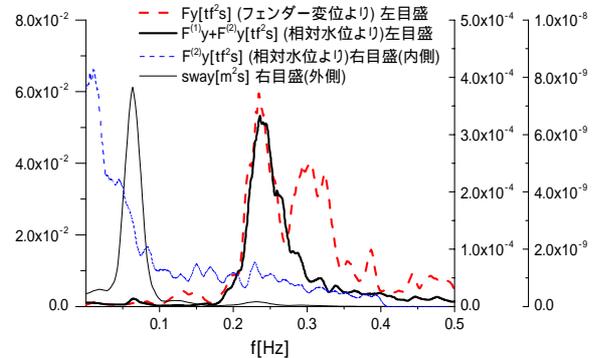


図 - 4 : フェーズ II 浮体に働く外力及び浮体変位のスペクトル(評価値)

図 - 4 に、2000/7/7/21:45-22:15 取得のデータについて、変動圧力から (1)、(2) 式によって求めた Y 方向波力 $F_Y^{(1)} + F_Y^{(2)}$ のスペクトルと、フェンダー変位から運動方程式(4)を使って求めた外力 F_Y のスペクトルの比較を示す。

太い実線が(1)、(2)式により相対水位から評価した 1 次波力と 2 次波力の和のスペクトル、太い破線が、フェンダー変位から運動方程式(4)によって求めた外力のスペクトルである。

0.25[Hz] 辺りで、両者のピークが一致している。

表 - 1 から、このときの波周期は 3.87[s] (すなわち周波数では 0.257[Hz]) であるから、このピークは線形波力に対応するものと思われ、両者が良く一致していることから、(2)式により線形波力が良く評価されていると考えられる。

一方、図 - 4 中に細い破線で、(1)式により評価された 2 次波力のみスペクトルを示す。目盛は右目盛(内側)であり、左目盛に比べ 100 倍に拡大している。図 - 4 から、約 0.1[Hz]以下の成分が、長周期変動漂流力に対応するものと考えられる。この領域でも、太い実線((1)、(2)式による波力の評価値)と太い破線((4)式による外力評価値)は、比較的良く一致している。

2 次波力は 1 次波力に比べ、大きさ的には非常に小さいのであるが、浮体動揺のスペクトル(図 - 4 中の細い実線)を見ると、浮体の動揺は周期的には 1 次波力よりも浮体左右揺のスペクトルピーク周期により近い。表 - 1 から、浮体左右揺のスペクトルピーク周期は、図 - 4 で示されているピーク周期から、波周期よりもより長周期(低周波数)側の領域(0.0464~0.0635[Hz])にあることが分かる。すなわちフェーズ II 浮体の場合、浮体の動揺周期は波周期よりもむしろ長周期変動漂流力の周期に近いのであり、2 次波力は 1 次波力に比べて大きさ的には小さくとも、これを全く無視することは妥当ではないと思われる。

また、0.27[Hz]よりもより高周波領域での(1)、(2)式により相対水位から求めた波力(図 - 4 中の太い実線)と、(4)式によりフェンダー変位から求めた外力(図 - 4 中の太い破線)の不一致については、フェンダー歪みが極端に小さい為に、そのばね定数が推定値でしかないこと(例えば定数でない可能性もある)、あるいは減衰力係数が正しく見積もられていないこと等に原因があるのではないかと考えられる。

なお、ここでは 2000 年 7 月 7 日 21:45 ~ 22:15 の計測データについての解析結果を元に論じたが、表 - 1 の他の日付のデータに関しても、解析結果については同様のことが言える。

3 . まとめ

本論文の内容をまとめると次のようになる。

a) 既に検証済みの(1)式に加え、本論文では線形波力の評価式(2)についても検証を行った。その結果(2)式は線形波力の評価式として有効であると思われる。

b) フェーズ II 浮体に作用する 2 次波力は、大きさ的には 2 次波力に比べ非常に小さいが、浮体は、線形波力よりもむしろ長周期変動漂流力に近い周期で動揺しており、2 次波力を無視することは妥当ではないと思われる。

4 . おわりに

著者らが提案した変動漂流力評価法については、本年度(平成 13 年度)特許申請を行うことを付記する。

また著者らは、本年度実施される IT メガポート実海域実証実験において、情報基地健全性診断システムの開発・実証を行う。その研究の一環として、今後(1)式を用いた変動漂流力のリアルタイムモニタリングシステムの開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 難波康広, 加藤俊司, 齊藤昌勝: 超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法 --- その 1: 長波頂波中模型実験 ---, 日本造船学会論文集, 第 186 号, pp.235-242, 1999
- 2) 難波康広, 加藤俊司, 齊藤昌勝, 平石哲也: 超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法 --- その 2: 短波頂波中模型実験 ---, 日本造船学会論文集, 第 187 号, pp.151-160, 2000
- 3) 難波康広, 齊藤昌勝, 加藤俊司, 平石哲也, 前田久明: 多方向波中の超大型浮体に働く変動漂流力計測実験, 平成 12 年度(第 74 回)船舶技術研究所発表会講演集, pp.295-302, 2000
- 4) 難波康広, 加藤俊司, 佐藤宏, 居駒知樹, 前田克弥: 超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法 --- その 3: 実海域実験 ---, 日本造船学会論文集, 第 188 号, pp.287-293, 2000