緊張繫留プラットフォームの三次元 動的応答特性

正員 吉田 宏 一 郎* 正員 尾 崎 雅 彦**
正員 岡 徳 昭*

Three Dimensional Dynamic Response Characteristics of Taut Moored Platforms

by Koichiro Yoshida, *Member* Masahiko Ozaki, *Member*
Noriaki Oka, *Member*

Summary

As attention paid to development of oil and gas in deep waters has increased, various kinds of concepts of compliant structures have been correspondingly proposed as the production platforms. Among them, the guyed tower and the taut moored platform (also called as the tension leg platform, hereafter abbreviated as TLP) are considered the most expectant at the present time. The first actual one of each type of these structures is planned to be installed a couple of years later.

Authors have carried out several series of two dimensional wave exciting tests on small scale TLP models and have developed the analysis methods for the phenomena observed at the wave exciting tests.

In this paper, three dimensional wave exciting tests were carried out by using a small scale model in regular waves with variable wave angle. The linear response analysis program in the frequency domain and the nonlinear response analysis program in the time domain were developed in the three dimensional case. Comparing the experimental results with the calculated ones, the characteristics of the three dimensional responses and the nonlinear phenomena are discussed.

1 はじめに

海底石油・天然ガス資源の開発がしだいに深海を指向し、生産用プラットフォームとして可撓性構造物 (compliant structure) が着目されている。中でも水深 300m 以上を目指したガイドタワーおよび緊張繫留プラットフォーム (taut moored platform あるいは tension leg platform, 以後 TLP と略称) は実機の検討段階に入り、両者とも今後 2, 3 年のうちに初の本格的な実機の設置が予定されている。

筆者らはここ数年、小型模型を用いた一連の水槽実験を実施し、同時に応答解析法の開発を行い、規則波中の TLP の動的応答特性を明らかにしてきた^{1)~5)}。これらの水槽実験では、基本的な動特性を把握するために、没水部形状は簡単な上部構造を持つ小型模型により、波進行方向を含む鉛直平面内の運動とレグの張力応答を対象と

し、また、一部の模型の主要目を実験の目的にかなうように選択して特徴的な現象を明確に得ることを試みた。その結果、規則波中の TLP の二次元動的応答は線形応答解では説明ができ、特殊な周波数領域および波高領域において見られる特徴的な非線形現象についても、現象に応じて非線形性を取り入れた近似計算によってとらえることができることを見出すとともに、実機相当模型に関する不規則応答解析を行った。

本論文では、実機を想定した小型模型を用いて、入射角を変化させた規則波中で実験を行うと同時に、応答を三次元 6 自由度に拡張した線形周波数応答解析プログラムと、いくつかの非線形性を取り入れた非線形時刻歴応答解析プログラムを作成して、実験結果と計算結果を比較検討する。

2 実 験

北海やメキシコ湾を設定海域としてこの 2, 3 年間に発表された TLP の試設計^{6)~10)}を参考にして、水深 300

* 東京大学工学部船舶工学科

** 東京大学大学院工学系研究科

Fig.1 Configuration of small scale test model

m, 総排水量 40000 ton, 総初期張力 10000 ton, デッキ長さ 80m, カラム間距離 65m, 吃水 35m, 重心高さ (KG) 36m, 1 カラムあたりのレグの軸剛性 2.12×10^6 ton, カラムの上下方向波無周期 15 秒の実機を想定し, 縮尺約 1/100 の小型模型を製作して実験に供した。この模型は, 4 本のフーティングと細いブレースからなる上部構造をパイプを用いたレグで鉛直下方に緊張繫留するものであり, 概要を Fig.1 に示す。

上部構造はアクリル製のフーティング付カラムを 4 個, 十分剛とみなせる程度にアクリル管で結合し, 重心位置を調整しかつ排水量を保つためにカラム上部に重錘を取付けた。カラム中央に細いパイプを通してレグの昇降を行い, フーティング底部のつかみ部でレグの着脱を行った。レグには, 直径 3 mm の中実アクリル棒を 1 カラムあたり 1 本用いた。これは上部構造の固有周期およびレグの張力変動の値を妥当なものにするために軸剛性についての相似を図ったものである。ただし, レグの重量や曲げ剛性についての相似は考慮されていない。レグの上端と下端はピン結合とし, 十分な重量と剛性をもった鋼製のアンカーで水底に固定した。

計測については, 波高を容量式波高計を用いて測定しペンオシロで記録し, レグの張力変動をアンカーとレグの間に取付けたリングゲージで取出し, ペンオシロで記録した。上部構造の変位は, 上部構造の上に標点 (点光源) を取付け, カメラの開放で波 1 周期分撮影し, 後に拡大して読取ることにより両振幅を計測した。

模型は波の進行方向に対し, 上部構造の一边が $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ をなすように水槽の中に設置され, それぞれのケースについて周波数領域で波浪強制実験が行われた。

なお, これまで筆者らが行ってきた一連の小型模型実験の延長として, このシリーズの実験名を TLP-D と呼ぶものとする。実験はすべて東京大学工学部船舶工学科

運動性能水槽で行われた。

3 応答解析法

3.1 線形周波数応答解析法

まず線形周波数応答解を求めるにあたり, 次の基本仮定を設ける。

- (1) 上部構造は剛体と仮定し, 三次元 6 自由度の運動を考える。
- (2) 波は微小振幅深海進行波とし, 構成部材の断面寸法に比べ波長は十分大きいものとする。
- (3) 変位は微小であり波力の評価は静平衡時の位置, 姿勢で行う。
- (4) 構成部材間の流体力学的な相互干渉はない。
- (5) 上部構造の運動に対し繫留部材は線形復元力のみを有し, その動的効果を無視する。

構造全体を基本的な要素に分類して外力を求め, その後全体重心へ集めることにより運動方程式を組立てる方法を用いる。まず, 全体重心に原点 O をとり, 水平に X, Y 軸を, 鉛直上方に Z 軸の正をとる右手系の空間固定全体座標 $O-XYZ$ 系と, j 番目の要素の静平衡時の要素重心位置に原点 o^j をとり, 部材軸方向に z 軸を設定する局所座標 o^j-xyz 系を設ける。 $O-XYZ$ 系と o^j-xyz 系で表現される位置ベクトル X, x^j は次式のように結ばれる。

$$X - X_0^j = C_s^j T x^j \quad (1)$$

ここで $X_0^j = \{X_0^j Y_0^j Z_0^j\}^T$ は $O-XYZ$ 系で表現された o^j の位置ベクトルであり, C_s^j は任意の方向を向いた局所座標系の座標軸を全体座標系のそれに平行になるように回転するための座標変換マトリクスである。

要素は, ① 円柱要素, ② 円柱端部要素, ③ 繫留要素の 3 種類の基本要素に分類するものとする。円柱要素は, 上部構造を構成するカラム, フーティング, ブレースなど円断面の部材を表わし, 重力, 慣性力, 流体力が働くと考ええる。ただし定式化において他の断面形状でも支障はない。円柱端部要素は, 円柱要素の端がフーティングの底のように他の部材と接合せずに流体力を受ける平面を表わす。平面の中心に o^j をとり円柱方向の法線上に z 軸をとる。繫留要素については繫留点を着力点として繫留力が働くものとし, 着力点に o^j をとり静平衡時の引張方向に z 軸をとる。

流体力の評価については基本的に筆者らがこれまで行ってきた近似評価法を用いる。すなわち変動浮力を含む静的浮力, Froude-Kriloff 力, diffraction force, radiation force に分け, このうち diffraction force と radiation force は, 流体粒子と部材の相対速度に比例する力と相対加速度に比例する力として算定する。

この結果, 各要素に働く力 f^j は局所座標系で次式の

ように表現される。ただし力の成分の向きは座標軸と同方向とし、モーメントは座標軸の右ネジ方向を正とする。なお、静平衡状態で構造全体としてつりあい状態にある重力、浮力、レグの初期張力は除く。

$$\mathbf{f}^j = -\mathbf{M}^j \ddot{\mathbf{u}}^j - \mathbf{N}^j \dot{\mathbf{u}}^j - \mathbf{K}^j \mathbf{u}^j + \mathbf{f}_w^j \quad (2)$$

ここで右辺は、それぞれ付加質量を含む慣性項、減衰項、復元項、波力項であり、 $\mathbf{u}^j = \{u^j v^j w^j \phi^j \theta^j \psi^j\}^T$ は各要素の局所座標系における重心の並進変位およびそのまわりの回転変位、 $\mathbf{M}^j, \mathbf{N}^j, \mathbf{K}^j$ は 6×6 の係数マトリクスである。具体的な $\mathbf{M}^j, \mathbf{N}^j, \mathbf{K}^j, \mathbf{f}_w^j$ については基本要素別に Table 1, 2 に示す。

各要素の重心で評価した力を $\mathbf{C}_s^j$ を用いて全体座標系へ変換し、さらに、全体重心へ変換するマトリクス $\mathbf{L}^j$ を用いて全体重心に集めてつりあい方程式をつくる。この時全体重心の変位、速度、加速度も $\mathbf{L}^j$ と $\mathbf{C}_s^j$ を用いて全体重心の変位、速度、加速度で表現して、結局次式を得る。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{N}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (3)$$

ここで

$$\mathbf{M} = \sum_j \mathbf{L}^{jT} \mathbf{C}_s^{jT} \mathbf{M}^j \mathbf{C}_s^j \mathbf{L}^j, \quad \mathbf{N} = \sum_j \mathbf{L}^{jT} \mathbf{C}_s^{jT} \mathbf{N}^j \mathbf{C}_s^j \mathbf{L}^j$$

$$\mathbf{K} = \sum_j \mathbf{L}^{jT} \mathbf{C}_s^{jT} \mathbf{K}^j \mathbf{C}_s^j \mathbf{L}^j, \quad \mathbf{F} = \sum_j \mathbf{L}^{jT} \mathbf{C}_s^{jT} \mathbf{f}_w^j$$

$$\mathbf{C}_s^j = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s^{j1} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{C}_s^{j2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}^j = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \begin{matrix} 0 & Z_0^j & -Y_0^j \\ -Z_0^j & 0 & X_0^j \\ Y_0^j & -X_0^j & 0 \end{matrix} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{U} = \{U V W \Phi \Theta \Psi\}^T$ は全体重心の変位ベクトルで、順に前後揺、左右揺、上下揺、横揺、縦揺、船首揺を表わす。(3)式は通常行われるように定常状態を仮定して解くことにより、変位振幅と位相差が得られる。また、全体重心の変位から繋留要素の着点の変位が求まり、張力変動の振幅と位相差が求められる。

3.2 非線形時刻歴応答解析法

筆者らはこれまでに TLP の二次元的な取扱いの中で以下に述べるような非線形現象が起こりうることを実験と計算で示した^{1)~3), 11)}。第1は、倍数調波共振で、その原因を高次流体力と考え、波力の評価の際に、i) 波面変動による波力積分領域の変化、ii) 有限並進変位、を考慮することにより縦揺と上下揺の2次の倍数調波共振について実験結果を説明することができた。第2は、分数調波共振で、復元力係数に含まれるレグの張力が周期的に変動することによって係数励起振動が生じるとして、左右揺と船首揺の不安定揺を説明した。第3は、縦揺の同調点近傍で、線形運動方程式では連成しない上下揺が大きくなる現象について、繋留部材の伸縮を幾何学的非線形性を考慮して評価することによりとらえることができた。第4は、レグのスナップ荷重現象について、

運動を支配する方程式がレグの状態により異なり、その不連続性から系に自由振動が生じ、スナップ荷重の原因になると考え、レグの状態に応じた方程式の一般解を時間領域で接続する方法で現象を説明した。

これらの結果をふまえて、上のような特徴的な非線形現象の主な原因と見られる非線形性、すなわち、① 有限並進変位、② 波面変動による波力の積分領域の変化、③ 瞬時の張力による繋留力(幾何学的非線形性および弛緩状態を含む。)に加えて、④ 有限回転変位¹²⁾、⑤ 流体粒子と部材の相対速度自乗に比例する力(抗力)、を取り入れて三次元非線形運動方程式を作り、時間積分法で応答を計算するプログラムを作成した。線形応答解析における基本仮定の(3)と(5)が変更され、空間固定全体座標系、局所座標系の他に物体固定座標系が設けられるが、詳細は紙数の関係で割愛する。なお時間積分には Runge-Kutta-Gill 法を用いた。

4 結果の比較・考察

4.1 変位

Fig. 1 の図中に示すように波の入射角 χ 、上部構造の観測用標点の変位 $\mathbf{U}_D = \{U_D V_D W_D \Phi_D \Theta_D \Psi_D\}^T$ を定義する。また次節で張力変動について述べる際の便利のためカラムに ①~④ の番号をつける。

Fig. 2 に前後揺 (U_D) の結果を示す。横軸は入射波の周波数、縦軸は変位振幅を波振幅で無次元化したもので、曲線は線形計算結果、塗りつぶし記号は非線形計算結果、白抜き記号は実験結果であり、波の入射角 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ についてそれぞれ図中の記号に従って示している。各結果ではほぼ良い相関を得ていることがわかる。前後揺の固有周波数は自由振動実験によると 0.78 rad/sec (実機で 80 秒に相当) で、その近傍で応答は非常に大きく、周波数の増大につれて減少している。 ω が 7 (rad/sec) 以下略) 以下の低周波数領域では入射角によって応答の値は異なるものの、曲線の定性的な形状は同じである。これは前後揺は波の進行方向の水平揺の成分であ

Fig. 2 Frequency responses of surge motion

Fig. 3 Frequency responses of heave motion

り、応答に $\cos \chi$ が乗ぜられていると考えられる。一方、 ω が 7 以上の高周波数領域では入射角によって極大、極小をとる周波数が異なっている。 $\omega=7$ は波長がカラム間距離 (0.65m) のほぼ 2 倍になる点で、これより低い周波数領域では波長が十分長いために入射方向に対するカラムの配置が水平変位に影響しないのに対し、高い周波数領域では各カラムにおける波力の位相差によって相殺や適合をするので入射角による影響が見られる。たとえば $\chi=0^\circ$ では $\omega=6.88, 11.92$ で水平波力の相殺、9.73 で適合が生じ、 $\chi=30^\circ$ では $\omega=7.40, 9.74, 12.8$ で相殺が生じる。応答の大きさは同調点を除いては波振幅程度以下であり、実機に換算すると、周期 20 秒、波高 30m の Storm condition の設計波に対して水平変位振幅は水深の 5% ほどである。

Fig. 3 に上下揺 (W_D) の結果を示す。座標軸、記号は前後揺の場合と同じだが実験は $\chi=0^\circ$ のみである。上下揺の固有周波数は自由振動実験によると 32.4 rad/sec (実機で 1.9 秒に相当) で、実験の波領域から高い側に遠く離れている。上下方向変位はレグの軸剛性のためにその縦弾性変位程度に抑えられ極めて小さい。実験結果は高周波数領域では小さくて計測不可能であったので記していないが、低周波数領域では線形解とほぼ相関がとれている。線形解によると前後揺と同様入射角の影響は高周波領域に現われ、曲線の極大・極小は鉛直波力の適合、相殺で説明がつく。また $\omega=4.5$ 近傍で極小になっているのはフーティングの存在による上下方向の波無点にあたる。応答の大きさは波振幅のせいぜい 1~2% であり、このことは TLP の長所のひとつである。非線形計算結果はほとんどの領域で線形解と一致しているが、 $\omega=2.09, 4.19$ にはずれた点が見られる。これはそれぞれ 20cm, 16cm の大波高で計算した結果で、実験における波高約 8cm よりもかなり高い。Fig. 2 に示したように低周波数領域では前後揺が比較的大きく、大波高の入力によって本来微小変位では連成しない上下揺が前後揺と連成して応答が大きくなったものと考えられる。な

Fig. 4 Frequency responses of pitch motion

Fig. 5 Frequency responses of yaw motion

お同じ周波数で線形解と一致しているのは、波高 2cm の結果である。

Fig. 4, Fig. 5 はそれぞれ縦揺 (θ_D)、船首揺 (ψ_D) の計算結果である。縦軸は単位波振幅あたりの回転変位振幅で、無次元値ではない。実機に換算する時は単位の rad/cm を rad/m に変えるのみで数値は同じである。縦揺の固有周波数は 27.1 rad/sec (実機で 2.3 秒) であるが、前後揺と連成しているので 0.78 rad/sec 近傍にピークが見られる。縦揺は中間周波数領域 ($\omega=5\sim7$) で比較的大きいことがわかる。船首揺は、各カラムにおける水平波力の位相差が原因で起きるため、波進行方向に対して上部構造が対称でない $\chi=15^\circ, 30^\circ$ のみに現われ、かつ、カラム間距離に比べて波長が短い高周波数領域で大きい。

左右揺 (V_D)、横揺 (ϕ_D) については図を省くが、ここでは上部構造が対称性を持っているので定性的にそれぞれ前後揺、縦揺とはほぼ同じであり、 $\chi=0^\circ\sim45^\circ$ に対してはそれらより応答が小さい。

3.2 張力変動

Fig. 6, Fig. 7 にそれぞれ $\chi=0^\circ, 30^\circ$ の場合の張力変動の結果を示す。横軸に波の周波数、縦軸に張力変動振幅を変動浮力振幅で無次元化した値をとり、曲線で線形解、塗りつぶし記号で非線形解、白抜き記号で実験結果

Fig. 6 Frequency responses of tension fluctuation ($\chi=0^\circ$)

Fig. 7 Frequency responses of tension fluctuation ($\chi=30^\circ$)

を示す。波進行方向に対するレグの位置により図中に示すように異なった記号で表わしている。

$\chi=0^\circ$ では計算結果と実験結果の相関が比較的良好のに対し、 $\chi=30^\circ$ では多少相違が見られる。特に $\omega=9.7$ 近傍で実験値にピークが現われており、非線形計算でも説明されていない。この現象については後述する。他の領域でも相関の悪い箇所があるが、応答の比較的大きいところでは傾向が一致していると言える。 $\chi=0^\circ$ の場合、張力変動は Fig. 6 と Fig. 3, Fig. 4 を照合してみると、 ω が 4 以下の低周波数領域では上下揺に、それ以外ではほぼ縦揺に支配されていることがわかる。また定量的には目立たないが $\omega=11.4$ において実験と非線形計算において縦揺の 2 次の倍数調波共振が見られた。1 次の流体力自身がこの領域で小さく、また縦揺や上下揺の固有周波数が十分高いので倍数調波共振は現象として見られるにとどまったが、例えば水深が大きい場合には低周波数側に寄ってくるので留意が必要であろう。

$\chi=30^\circ$ の場合は Fig. 7 と Fig. 3, Fig. 4 を照合すると、波上側④と波下側②の張力変動は低周波数領域で上下揺に、高周波数領域で縦揺および横揺に支配され、両レグの間の①(および③)は全領域にわたって上下揺の応答曲線に近い形になっている。①および③は $\chi=30^\circ$ ではまだ縦揺、横揺の影響を受けるが、ここに示さない $\chi=45^\circ$ においては上下揺のみによって張力変動が生じ

ている。これは波力によるモーメントに対し①および③を支点とし②と④が逆位相で振動する運動モードが起きるため、重心からのレバーが増加する分②、④に生ずる張力変動は $\chi=0^\circ$ に比べ大きくなる。

さて最後に前述の、計算で説明されない実験値について触れる。実験で得られた張力変動の時刻歴を見ると、張力の変動周波数は入射波の周波数に対応しており、線形応答である。しかし各レグの位相差を見ると、隣接する 2 本が逆位相で対角線上の 2 本同士が同位相という、上部構造を剛体とみなしにくい現象が起きている。上部構造を弾性骨組として計算した、弾性変形を含む最低次固有周波数は 29.1 rad/sec であり、レグのたわみ振動について減衰なしの弦振動と考えると最低次固有振動数は 51 rad/sec であり、いずれも原因と考えられず、この現象の解明は今後の課題として残された。

4 おわりに

緊張繫留プラットフォーム (TLP) の三次元的応答特性について実機を想定した小型模型実験結果と線形周波数応答解、非線形時刻歴応答解の比較から以下の結論を得た。

(1) 船首揺以外の変位の、波の入射角に対する依存性は波長の長い低周波数領域では見られない。Fig. 2, Fig. 4 で入射角によって応答の値が異なっているが、これは応答が成分であるため、波進行方向に関する変位ではほぼ同じになる。これに対し、高周波数領域では波力の適合や相殺が生じ、カラム配置によってその波長が変わるので入射角の影響が見られる。一方、船首揺は各カラムに働く水平波力の位相差が原因で起きるため、波進行方向に対して上部構造が対称でない場合に生じ、カラム間距離に比べ、波長が短い高周波数領域で応答が大きい。

(2) 張力変動は低周波数領域では上部構造の上下揺に、中・高周波数領域では縦揺や横揺に支配される。そして、低周波数領域では入射角に対する依存性はなく、中間周波数領域では波進行方向鉛直平面内の回転運動(縦揺と横揺の合成)は入射角の影響をほとんど受けないが、全体重心からの距離の波進行方向成分がレバーとなるので本実験で用いられた模型では入射角 45° の時の波上側、波下側のレグが最も大きな張力変動を生ずる。また、高周波数領域では、波力の適合、相殺が生ずるため入射角の影響が大きい。

(3) 今回の実験の範囲では変位、レグの張力変動はほぼ線形解で説明された。これは、一次同調や分次調波共振の起きる周波数、スナッフ現象が生じる程の大きな波高が実験範囲に入らなかったからである。ただし、一部実験と計算で倍数調波共振が認められ、また計算によ

り、大波高時の上下揺と前後揺の連成をとらえることができた。

終わりにあたり、本研究を進めるにあたり、終始暖かい励ましを戴きました東京大学 飯田國廣教授、ならびに適切な助言を戴きました(財)日本海事協会 米家卓也氏に厚く御礼申し上げます。また、図面作成に助力された東京大学船舶工学科 永井英晴技官、東京大学大学院 垣見健氏に感謝致します。なお、本研究の一部は卒業論文¹³⁾として行われたものであり、実験に協力された、当時東京大学学生の水野堅太郎、宮城盛洋両氏に謝意を表します。

数値計算には東京大学大型計算機センター M-200 H を使用したことを付記する。

記 号

- A: 要素の断面積
- A_w : 水線面積
- a : 波振幅
- d : 全体重心と静水面の距離
- EA_L : レグの軸剛性
- I_ϕ, I_θ, I_ψ : 慣性モーメント
- L : レグの初期長さ
- M : 質量
- M_{ax}, M_{ay}, M_{az} : 付加質量
- N_x, N_y, N_z : 減衰係数
- T_p : 初期張力
- κ : 波数
- ρ : 流体密度
- χ : 波の入射角
- ω : 波の角周波数

参 考 文 献

- 1) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭: 緊張繫留プラットフォームのスナップ荷重, 日本造船学会論文集, 第 144 号 (1978).
- 2) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭: 緊張繫留プラットフォームの動的応答特性, 日本造船学会論文集, 第 146 号 (1979).
- 3) 吉田宏一郎, 米家卓也, 岡 徳昭, 尾崎雅彦: 緊張繫留プラットフォームの動的応答特性 (続報), 日本造船学会論文集, 第 147 号 (1980).
- 4) 米家卓也, 吉田宏一郎: 緊張係留プラットフォームの運動とレグの強度, 第 5 回海洋工学シンポジウム (1981).
- 5) Yoshida, K., Yoneya, T., Oka, N., Ozaki, M.: Motions and Leg Tensions of Tension Leg Platforms, the 13 th OTC, OTC 4073 (1981).
- 6) Taylor, D. M.: Conoco's Tension Leg Platform Will Double Water Depth Capability, Ocean Industry, Feb. (1980).
- 7) Berman, M. Y., Blenkarn, K. A., Dixon, D. A.: The Vertically Moored Platform, for Deep-water Drilling and Production, the 10 th OTC, OTC 3049 (1978).
- 8) Røfren, E. M. Q., Steinsvik, B.: Deep Water Resonance Problems in the Mooring System of the Tethered Platform, Offshore Structures Engineering-Proc. of the Int. Conf. on Offshore Structures-, Pentech Press (1979).
- 9) Perret, G. R., Webb, R. M.: Tethered Buoyant Platform Production System, the 12 th OTC, OTC 3887 (1980).
- 10) Sebastiani, G.: New Tension Leg Platform Design, Ocean Industry, Sep. (1980).
- 11) 尾崎雅彦: 緊張繫留浮体の非線形同調, 東京大学修士論文 (1980).
- 12) Paulling, J. R.: Time Domain Simulation of Semisubmersible Platform Motion with Application to the Tension-Leg Platform, STAR Symp. SNAME (1977).
- 13) 水野堅太郎, 宮城盛洋: 緊張繫留部材の動的挙動に関する研究, 東京大学卒業論文 (1981).

Table 1 Coefficient matrix

		M^j						N^j						K^j						
		$\ddot{u}^j$	$\ddot{v}^j$	$\ddot{w}^j$	$\ddot{\phi}^j$	$\ddot{\theta}^j$	$\ddot{\psi}^j$	$\dot{u}^j$	$\dot{v}^j$	$\dot{w}^j$	$\dot{\phi}^j$	$\dot{\theta}^j$	$\dot{\psi}^j$	u^j	v^j	w^j	ϕ^j	θ^j	ψ^j	
cylindrical element	non-immersed	x	M																	
		y		M																
		z			M															
		ϕ				I_ϕ														
		θ					I_θ													
		ψ						I_ψ
	fully immersed	x	M+Max	0	0	0	L1Max	0	Nx	0	0	0	L1Nx	0	$c_x^2 B_1$	$c_x c_y B_1$	$c_x c_z B_1$	$-c_x c_y B_2$	$c_x^2 B_2$	0
		y	M+May	0	-L1May	0	0	0	Ny	0	-L1Ny	0	0	0	$c_y^2 B_1$	$c_y c_z B_1$	$-c_y^2 B_2$	$c_x c_y B_2$	$c_y^2 B_2$	0
		z		M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$c_z^2 B_1$	$-c_y c_z B_2$	$c_x c_z B_2$	$-c_x c_z B_2$	$c_z^2 B_2$	0
		ϕ		$I_\phi+L2May$	0	0	0	0	L2Ny	0	0	0	0	0	$c_z B_3+c_y^2 B_4$	$-c_x c_y B_4$	$-c_x c_z B_4$	$-c_x c_z B_4$	$c_z B_3+c_x^2 B_4$	0
		θ	(Sym.)		$I_\theta+L2Max$	0	0	(Sym.)	L2Nx	0	0	0	0	(Sym.)		$(-c_x B_3)$	$(-c_y B_3)$	$(-c_x B_3)$	$(-c_y B_3)$	0
		ψ				I_ψ	0		0											0
cylinder end element		x	0					0	0											
		y		0					0											
		z			Maz				Nz											
		ϕ				0			0											
		θ					0			0										
		ψ						0				0								
mooring element		x												T_p/L						
		y													T_p/L					
		z			0										$E A_k/L$					
		ϕ																		
		θ																		
		ψ																		0

$L_1=(\ell_2-\ell_1)/2$ $L_2=(\ell_2^2-\ell_2\ell_1+\ell_1^2)/3$ $B_1=n\rho g A_W$ $B_2=n\rho g A_W \ell_2$ $B_3=\rho g A(\ell_2^2-\ell_1^2)/2$ $B_4=n\rho g A_W \ell_2^2$
 $n=0$: fully immersed $n=1$: partially immersed

Table 2 Wave exciting forces

		$f_w^j = a \sqrt{f_{ci}^2 + f_{si}^2} \cos(\omega t + \gamma_i) \quad (i=x, y, z, \phi, \theta, \psi)$	
		f_{ci}	f_{si}
fully or partially immersed cylindrical element	x	$\{(1+C_{mx})(B_x K_s - c_x K_c) + C_{nx}(B_x K_c + c_x K_s)\}D$	$\{(1+C_{mx})(-B_x K_c - c_x K_s) + C_{nx}(B_x K_s - c_x K_c)\}D$
	y	$\{(1+C_{my})(B_y K_s - c_y K_c) + C_{ny}(B_y K_c + c_y K_s)\}D$	$\{(1+C_{my})(-B_y K_c - c_y K_s) + C_{ny}(B_y K_s - c_y K_c)\}D$
	z	$(B_z K_s - c_z K_c)D$	$(-B_z K_c - c_z K_s)D$
	ϕ	$\{(1+C_{m\phi})(-B_\phi K_{sz} + c_\phi K_{cz}) - C_{n\phi}(B_\phi K_{cz} + c_\phi K_{sz})\}D$	$\{(1+C_{m\phi})(B_\phi K_{cz} + c_\phi K_{sz}) - C_{n\phi}(B_\phi K_{sz} - c_\phi K_{cz})\}D$
	θ	$\{(1+C_{m\theta})(B_\theta K_{sz} - c_\theta K_{cz}) + C_{n\theta}(B_\theta K_{cz} + c_\theta K_{sz})\}D$	$\{(1+C_{m\theta})(-B_\theta K_{cz} - c_\theta K_{sz}) + C_{n\theta}(B_\theta K_{sz} - c_\theta K_{cz})\}D$
	ψ	0	0
	ψ	0	0
cylinder end element	x	0	0
	y	0	0
	z	$N_z \omega \epsilon_{eo}(B_z \epsilon_{co} + c_z \epsilon_{so}) + M_{az} \omega^2 \epsilon_{eo}(B_z \epsilon_{so} - c_z \epsilon_{co})$	$N_z \omega \epsilon_{eo}(B_z \epsilon_{so} - c_z \epsilon_{co}) - M_{az} \omega^2 \epsilon_{eo}(B_z \epsilon_{co} + c_z \epsilon_{so})$
	ϕ	0	0
	θ	0	0
	ψ	0	0
	ψ	0	0
non-immersed cylindrical element & mooring element	x	0	0
	y	0	0
	z	0	0
	ϕ	0	0
	θ	0	0
	ψ	0	0
	ψ	0	0

$D=\rho g A$, $B_0=X_0^j \cos \alpha + Y_0^j \sin \alpha$, $B_i=a_i \cos \alpha + b_i \sin \alpha$ ($i=x, y, z$), $\epsilon_1=c_1^2+B_z^2$, $\epsilon_2=c_2^2-B_z^2$, $\epsilon_3=2c_2 B_z$
 $K_s=\{\epsilon_{e2}(c_2 \epsilon_{s2}-B_z \epsilon_{c2})-\epsilon_{e1}(c_2 \epsilon_{s1}-B_z \epsilon_{c1})\}/\epsilon_1$ $\epsilon_{eo}=\exp \kappa(Z_0^j-d)$, $\epsilon_{e1}=\exp \kappa(Z_0^j-d-c_z \ell_1)$, $\epsilon_{e2}=\exp \kappa(Z_0^j-d+c_z \ell_2)$
 $K_c=\{\epsilon_{e2}(c_2 \epsilon_{c2}+B_z \epsilon_{s2})-\epsilon_{e1}(c_2 \epsilon_{c1}+B_z \epsilon_{s1})\}/\epsilon_1$ $\epsilon_{co}=\cos \kappa(B_0-B_z \ell_1)$, $\epsilon_{c1}=\cos \kappa(B_0+B_z \ell_1)$, $\epsilon_{c2}=\cos \kappa(B_0+B_z \ell_2)$
 $K_{sz}=\{\ell_2 \epsilon_{e2}(c_2 \epsilon_{s2}-B_z \epsilon_{c2})+\ell_1 \epsilon_{e1}(c_2 \epsilon_{s1}-B_z \epsilon_{c1})\}/\epsilon_1$ $\epsilon_{so}=\sin \kappa(B_0-B_z \ell_1)$, $\epsilon_{s1}=\sin \kappa(B_0+B_z \ell_1)$, $\epsilon_{s2}=\sin \kappa(B_0+B_z \ell_2)$
 $K_{cz}=\{\ell_2 \epsilon_{e2}(c_2 \epsilon_{c2}+B_z \epsilon_{s2})+\ell_1 \epsilon_{e1}(c_2 \epsilon_{c1}+B_z \epsilon_{s1})\}/\epsilon_1$ $\gamma_i=\tan^{-1}(-f_{si}/f_{ci})$
 $C_{mi}=M_{ei}/\rho A(\ell_1+\ell_2)$, $C_{ni}=N_i/\rho A(\ell_1+\ell_2)$ ($i=x, y$)
 $C_s^j = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x \\ a_y & b_y & c_y \\ a_z & b_z & c_z \end{bmatrix}$