

係留索配置形状が完全没水型係留浮体の 三次元動揺特性に及ぼす影響

EFFECT OF TENSION LEG ARRANGEMENTS ON THREE DIMENSIONAL DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF SUBMERGED FLOATING STRUCTURE

佐藤太裕¹・星崎心吾²・蟹江俊仁³・三上 隆³

Motohiro SATO, Shingo HOSHIZAKI, Shunji KANIE and Takashi MIKAMI

- ¹正会員 博士(工学) 北海道大学大学院助教 工学研究科北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
- ²学生会員 工学士 北海道大学大学院修士課程 工学研究科北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
- ³正会員 博士(工学) 北海道大学大学院教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
- ³フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

For a type of “perfectly underwater” structures moored by some tension legs, namely submerged floating structures, the dynamic behaviors of the floating body are expected to involve many severe design and computational problems. In addition, three dimensional motions with six degrees of freedom induced by some external forces like strong waves and earthquakes may be very complex and it is difficult to explain the mechanisms of the behavior accurately.

This paper presents the three dimensional dynamic response characteristics of the submerged floating structures. Three dimensional restoring forces due to tension legs are introduced and dynamic properties such as natural period and fluctuating tension force are investigated here. Especially, we focus on the effect of tension leg arrangement on dynamic characteristics of submerged floating structure.

Key Words : *Submerged floating structure, tension leg, free vibration, natural period, wave response*

1. はじめに

本研究は完全没水型係留浮体における三次元的な動的特性に及ぼす係留索配置形状の影響について解析的に把握することを目的としている。本研究で対象とする完全没水型の係留浮体とは、浮力を有する円筒状の函体を係留索(テンションレグ)を用いて水中に安定化させる構造形式を有するものである。将来的には交通、物流輸送を想定した水中浮遊式トンネル^{1), 2)}や、エネルギー輸送を目的とした海洋パイプライン^{3), 4)}、波浪制御施設¹⁾への適用など、世界的な今後の海洋開発における新規な発展に寄与する高い汎用性、可能性を有した構造形式であるといえる。係留浮体では一般的に、浮体の大きな動揺に伴う張力変動により引張力を失うと、その後の張力回復時にスナップ荷重という準衝撃的な力が作用することが知られている⁵⁾。このような現象は発生を回避させなければいけないものであるが、構造物の

持つ固有振動数が外力周期に近くなる場合、変位の増大に伴う張力変動の増加がこのような現象を引き起こしやすくさせることとなるため、固有振動数を適切に把握することが構造設計段階において極めて重要となる。過去の研究において著者らは、断面2次元の解析モデルから固有周期や波浪応答について検討を行ってきた⁶⁾。しかしながら係留浮体軸に対し垂直ではない入射角をもって波浪が入射する場合、三次元的な浮体の挙動は6自由度の運動が複雑に連成し合い、断面2次元モデルの検討では把握できない運動が励起される可能性がある。

本研究ではこれまで著者らが行ってきた断面2次元モデルに対する検討⁶⁾を拡張し、三次元的な浮体動揺に対し適切な係留索配置を検討するものである。そのためにまず3次元係留に対する復元力を導出し、それを基に固有振動解析を実施する。また本研究は非線形力学的見地から3次元動揺に対して上述したスナップ荷重の発生メカニズムを解析的に検討する

研究の準備段階と位置づけており、波浪動揺に伴う張力変動の様子を時刻歴応答解から考察することを試みている。ここではそれらの結果について報告する。

2. 解析モデル

図-1(a)～(c)は本研究で検討対象とする完全没水型係留浮体を示したものである。本研究ではこれらの図に示すような4本の係留索（ヤング係数： E ，断面積： A ）を用いて，傾角 α ， γ （ $0 \leq \alpha < 90^\circ$ ），取り付け角度 β （ $0 < \beta \leq 90^\circ$ ）で水中に安定化させた中空円形断面を有するものである。また係留浮体は剛体であると仮定する。この係留浮体が水中で安定となるためには，浮力が重力を上回ることが条件となる。

著者らの過去の研究⁶⁾では図-1(a)に対応する Sway, Heave, Roll の3方向に対する断面2次元モデルについて，係留索による復元力マトリックスの導出およびその動揺特性の検討を行ったが，ここでは3次元的な6自由度の運動に対する復元力マトリックスの誘導，動的特性の把握を試みる。

3. 定式化

(1) 復元力マトリックスの導出

6自由度の運動（係留浮体重心における水平変位 x ，鉛直変位 y ，奥行変位 z ， xy 平面回転角 ϕ ， yz 平面回転角 θ ， xz 平面回転角 ψ ）に対する，浮体重心における係留索による復元力は，各係留索（図-1中 leg1～leg4）に起因する復元力マトリックスを重ね合わせるにより次式のように誘導される（ここでは誘導仮定を省略し，結果のみ記述する）。

$$\{f\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

ここで

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$k_{11} = K_h \quad (2a)$$

$$k_{14} = k_{41} = -K_h R \cos \beta \quad (2b)$$

$$k_{22} = K_v \quad (2c)$$

$$k_{33} = K_p \quad (2d)$$

$$k_{35} = k_{53} = -K_p R \cos \beta \quad (2e)$$

$$k_{44} = R^2 (K_h \cos^2 \beta + K_v \sin^2 \beta) \quad (2f)$$

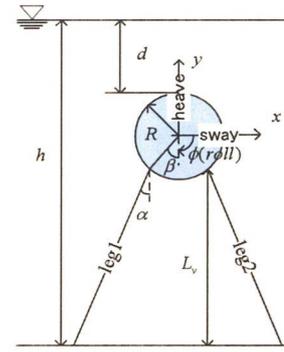


図-1(a) 解析モデル (end)

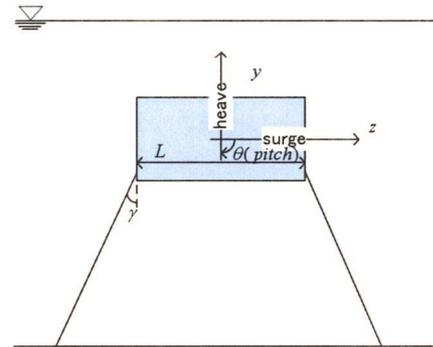


図-1(b) 解析モデル (side)

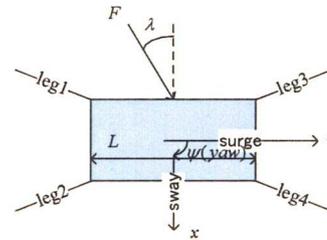


図-1(c) 解析モデル (top)

$$k_{55} = K_v \frac{L^2}{4} + K_p R^2 \cos^2 \beta \quad (2g)$$

$$k_{66} = K_h \frac{L^2}{4} + K_p R^2 \sin^2 \beta \quad (2h)$$

$$K_h = \frac{4(EA \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma + T \cos^2 \alpha)}{l(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma)} \quad (2i)$$

$$K_v = 4\{T(\sin^2 \alpha \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha) + EA \cos^2 \alpha \cos^2 \gamma\} / \{l(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma)\} \quad (2j)$$

$$K_p = \frac{4(EA \sin^2 \gamma \cos^2 \alpha + T \cos^2 \gamma)}{l(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma)} \quad (2k)$$

$$\{u\}^T = \{u \quad v \quad w \quad \phi \quad \theta \quad \psi\} \quad (3)$$

式(2)のマトリックスの成分 k_{ij} は，式(2a)から(2k)において示したが，それ以外の成分は0である。

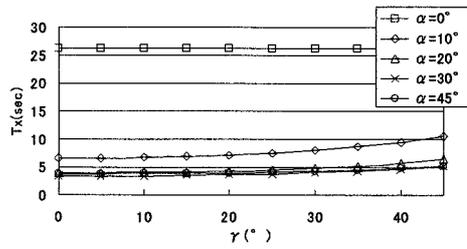


図-2 (a) Sway方向固有周期特性
(L = 100m)

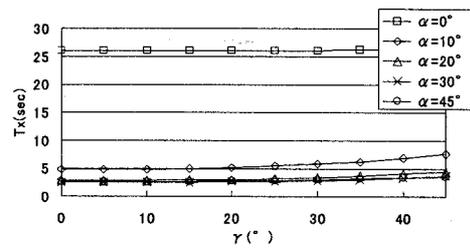


図-2 (b) Sway方向固有周期特性
(L = 50m)

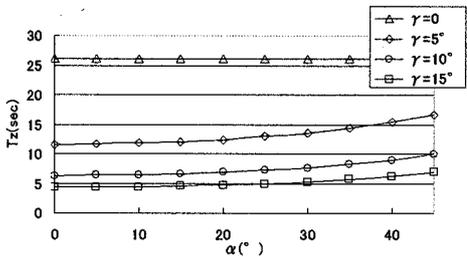


図-3 (a) Surge方向固有周期特性
(L = 100m)

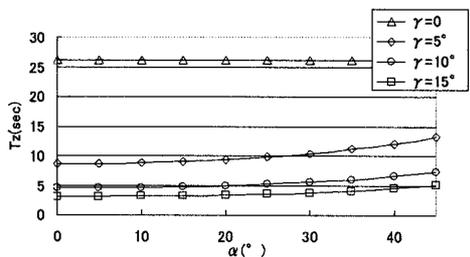


図-3 (b) Surge方向固有周期特性
(L = 50m)

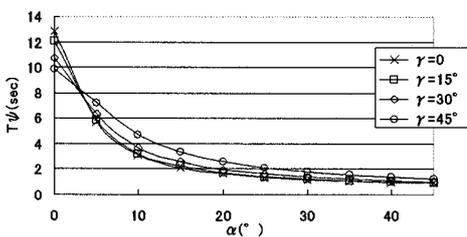


図-4 (a) Yaw方向固有周期特性
(L = 100m)

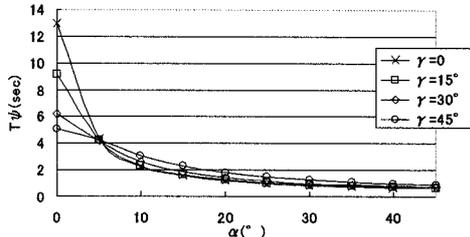


図-4 (b) Yaw方向固有周期特性
(L = 50m)

(2) 運動方程式の導出

(1)において導出された復元力と、慣性力、波浪外力とのつり合いにより、係留浮体重心における運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (4)$$

ここで

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_\psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$I_\phi = \frac{1}{2} m R^2 \quad (5a)$$

$$I_\theta = I_\psi = \frac{1}{4} m R^2 + \frac{1}{12} m L^2 \quad (5b)$$

である。右辺の外力項について、波浪中で運動する

係留浮体に作用する流体力は、固定円柱に作用する波力を求めるモリソン式を、円柱の運動を考慮し動的問題に拡張した修正モリソン式により評価する⁷⁾。

4. 解析結果と考察

前章での定式化をもとに、以下に示す条件にて解析を行う。

(係留浮体)

断面半径 $R = 6.05[\text{m}]$ 、質量 $m = 2.82 \times 10^6[\text{N/m}]$ 、浮力 $w = 4.19 \times 10^6[\text{N/m}]$ 、奥行 $L = 50, 100[\text{m}]$

(係留索)

ヤング係数 $E = 2.06 \times 10^{11}[\text{N/m}^2]$ 、断面積 $A = 0.09[\text{m}^2]$

(海洋条件)

波高 : $18.6[\text{m}]$ 、波周期 : $13[\text{sec}]$ 、水深 : $100[\text{m}]$ 、クリアランス $d = 30[\text{m}]$ 、浮体軸垂直方向に対する波浪入射角 $\lambda = 0^\circ, 20^\circ$

(1) 係留索配置の違いによる固有周期の変化

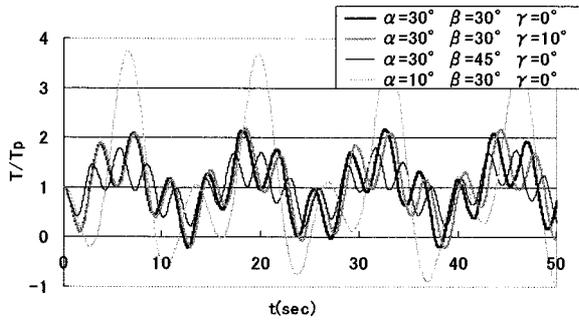


図-5(a) leg1張力変動($\lambda=0^\circ$)
($L = 100\text{m}$)

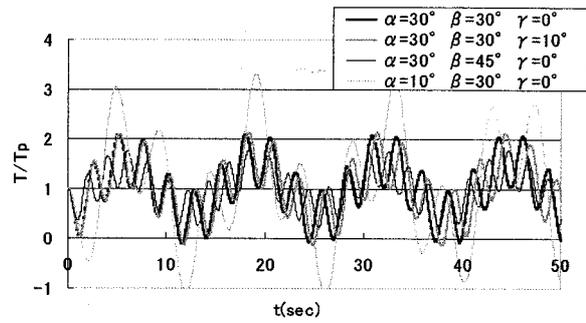


図-5(b) leg1張力変動($\lambda=0^\circ$)
($L = 50\text{m}$)

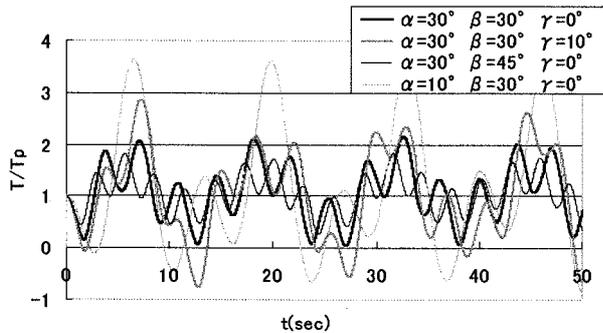


図-6(a) leg1張力変動($\lambda=20^\circ$)
($L = 100\text{m}$)

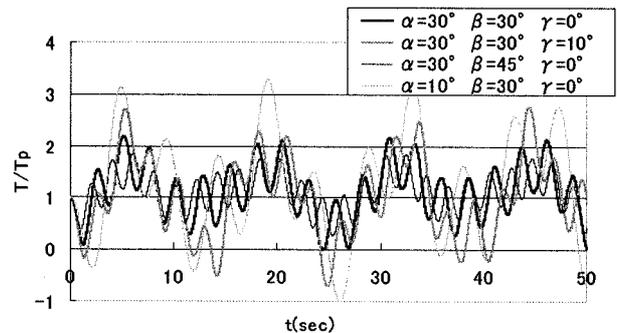


図-6(b) leg1張力変動($\lambda=20^\circ$)
($L = 50\text{m}$)

図-2 から図-4 は 6 自由度の運動のうち Sway, Surge, Yaw 方向に対応する固有周期を示したものである。ここで(a), (b)は浮体長がそれぞれ 100m, 50m の場合の結果である。これらの固有周期は波周期が有意なエネルギーを持つ周期帯に入る可能性が図より指摘される。Sway 方向は α が、Surge 方向では γ がそれぞれ 0° から 10° の範囲では固有振動特性が大きく変化することがわかる。このことは復元力マトリックスにおいてこれらの変位に対応する対角項の大きさに対応するものである。また Surge, Yaw 方向の運動は断面 2 次元モデルでは評価できないものである。これらの方向の運動は波周期が浮体軸に対して入射角を有して入射する場合に励起される可能性のあるものであることから、断面 2 次元モデルのみではなく本解析モデル、3 次元運動に対する検討の重要性を示唆するものであるといえる。またそれ以外のモードについては、現実的な係留索配置においていずれの場合も固有周期が非常に小さいことが確認された。

またここで取り上げた Sway, Surge, Yaw 方向の固有周期は、係留索の取り付け角度 α, β, γ のとり方に大きく依存し、それらが相互に関係しあう。これは復元力マトリックスにおける連成項が有意な値をとるためである。さらに浮体長による影響は傾角 α が小さい場合に顕著にみられる。

(2) 係留索張力

図-5 および図-6 は波浪応答に関する係留索張力の時刻歴解析の結果の一例を示したものである。いずれの場合においても取り付け角度 β を大きくする、すなわち Roll 方向の回転を抑制するような係留索配置が張力変動抑制に効果的であることがいえる。また α および γ については鉛直係留からわずかに角度をつけただけで剛性が大きく変化し波浪に同調しやすくなるため、結果として張力変動が大きくなる可能性が指摘される。また図-5 は浮体軸に対し垂直に波浪が入射する場合、図-6 はそれに対し 20° の角度で入射する場合の結果にそれぞれ対応するものであるが、傾角 $\gamma = 0^\circ$ では張力変動に与える入射角の影響が非常に小さいのに対し、 $\gamma = 10^\circ$ の場合には斜め入射に対し張力変動が大きくなることが特徴的である。

これらの結果は張力が 0 を下回る、つまり圧縮力を有する場合においても復元力が発生していることとして解析を行ったものである。よって現在実現象をより忠実に評価可能とするため、張力を失った状態を時刻歴で考慮した非線形方程式を解く解析アルゴリズムを検討中である。

4. まとめ

本研究は完全没水型係留浮体を剛体と仮定した場合における 3 次元運動的特性に及ぼす係留索配置

形状の影響について解析的に把握することを目的として行われたものである。本解析結果は長大な係留浮体の一函体に関する運動に対応するものであり、上記に示す知見が得られた。しかし全体挙動について考えた場合、長大浮体では函体そのものやジョイント部の剛性に起因する弾性変形の影響が有意になる。このため今後は本研究で得られた知見を基に、軸方向の変形、応力も含めた3次元的な全体挙動の検討を行う必要があると考えられる。

謝辞：本研究の一部は(財)東電記念科学技術研究所研究助成(電気・エネルギー一般, 研究代表者: 佐藤太裕, 平成18~19年度)により実施されたものであります。ここに東電記念科学技術研究所をはじめとする関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)水中トンネル研究調査会：水中トンネル—第I編 計画から設計施工まで, 1995.
- 2) (社)水中トンネル研究調査会：水中トンネル—第I編 計画から設計施工まで, 1995.
- 3) Guo, B., Song, S., Chacko, J and Ghalambor, A.: *Offshore Pipelines*, Elsevier, 2005.
- 4) Kyriakides, S and Corona, E.: *Mechanics of Offshore Pipelines*, Elsevier, 2007.
- 5) Plaut, R.H., Archilla, J.C. and Mays T.W.: Snap loads in mooring lines during large three-dimensional motions of a cylinder, *Nonlinear Dynamics*, Vol.23, pp.271-284, 2000.
- 6) 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 三上 隆: 係留索配置形状が水中係留浮体の動的特性に与える影響の評価, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.649-652, 2003.
- 7) 佐藤太裕, 蟹江俊仁, 三上 隆: 弾性床上梁にモデル化した水中浮遊式トンネルの波浪応答特性, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.27-34, 2002.