

フリーハンギング形状線状構造物の初期計画戦略に関する研究
Study on initial planning strategy for free hanging type slender structures
based on global dynamics

学籍番号 47-166623 金澤 元泰
指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)

Keywords: 線状構造物、フレキシブルライザー、圧縮、ランプトマス

Keywords: Slender structure, Flexible riser, Compression, Lumped-mass

1. 序論

1. 1 研究背景

フレキシブルライザーを始めとする線状構造物は、海底と洋上浮体を接続する上で極めて重要な技術的要素である。上端部から線状構造物を重力で垂れ下げる最も単純な構造をフリーハンギング形状 (Fig.1) と呼ぶ。上端部の浮体が動揺すると、線状構造物も動き、動的張力変化が生じる。動的張力変化は、短期的には軸方向圧縮を原因とする側面方向破裂 (Birdcaging、Fig.2)・長期的には繰り返し応力による疲労破壊の原因となることが知られており、設計時の主要なチェックポイントとなる。

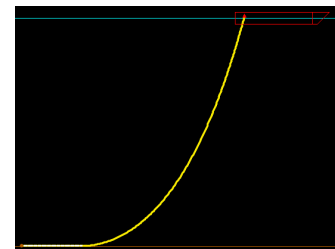


Fig.1 Free hanging configuration



Fig.2 Birdcaging[1]

線状構造物の設計プロセスは流体力学的・幾何学的な非線形性をもつ自由度問題である。そのため、解析的・網羅的知見に乏しく、「初期設計案を不規則波中の時間領域計算にかけ、結果が設計要件に合うまで設計パラメータを改善し続ける」という手法が採用されている。初期計画案の性能と、設計パラメータの改善方法は経験的知見に基づいており、設計プロセスは非効率的で最適化できていない現状にある。

1. 2 先行研究

Foyt ら (2007) は数種類のライザー性能を FEM ソフトウェア OrcaFlex の時間領域計算で検証した [2][3]。ライザーの動的最小張力が上端部下方向最大速度に線形であることを示したが、想定している設計・環境条件が限定的すぎるために結果の適用性が明らかではない。Queau ら (2013) は膨大なパターン設計・環境条件で OrcaFlex の時間領域計算結果を学習した機械学習モデルを開発した [4]。内挿予測精度に優れるが、メカニズムを明らかにしたモデルではないため、学習条件外での予測精度が低い。精度向上のために物理的根拠のない学習データの場合分けを必要とし、初期計画段階で用いるには信頼性が不透明である。

1. 3 研究目的

本研究では、動的張力を決定づける重要パラメータの抽出、その定性的影響・非線形効力影響の議論を通して、フリーハンギング形状初期計画で有用な定性的知見の確立を目的とする。

2. 研究手法

従来研究は時間領域数値計算に基づいていたが、本研究では Fig.3 に示すように解析的モデルと数値解析モデルを組み合わせる。数値解析モデルは、非線形抗力や他自由度問題を取り扱えるというメリットがあるが、重要パラメータを把握していない状況下で設計指針を明らかにしようとすると計算パターンが膨大になってしまう。そこで本研究では、まずフリーハンギング形状を簡易化し、かつ非線形抗力を無視して線形化した Lumped-mass モデルを構築し、重要パラメータを抽出・動的張力決定の基本的なメカニズムを明らかにする。その上で、構築した解析的モデルが重要パラメータの定性的影響を評価できているか、OrcaFlex の時間領域計算で検証する。

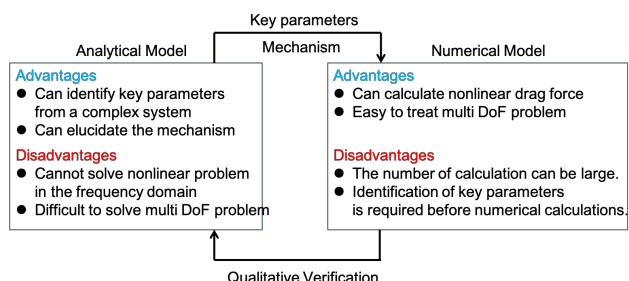


Fig.3 The analytical and numerical model

3. 解析的モデルの構築とその性能検証

3. 1 解析的モデル

解析的モデルはフリーハンギング形状を3つの質点と2つの非伸縮ロッドで表現する Lumped-mass モデルである。モデルの静的状態を Fig.4 に示す。ライザー単位長空中重量を w 、上端部から静的 TDP(Touch Down Point) までの長さを L 、上端部水平力を T_H 、鉛直力を T_V とする。ライザー全体重量は3つの質点に分配される。上端質点は上端 $L/4$ 分、中間質点は中間部 $L/2$ 分、下端質点は下端 $L/4$ に加えて動的に動く静的 TDP より先の長さ δ 分の重量を代表させる(そのため、下端部で垂直抗力 T_R を設定した)。このとき、各ロッド静的張力 $T_1 \cdot T_2$ 及び静的角度 $\theta_1 \cdot \theta_2$ は各質点の水平・鉛直方向静的釣合式と幾何学的条件から求めることができる。

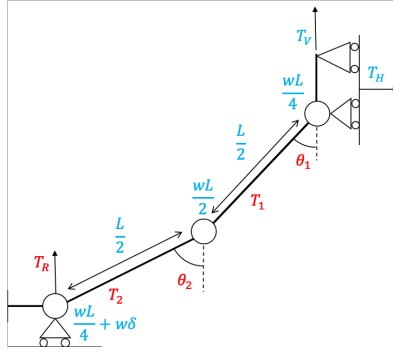


Fig.4 The effect of θ_1 and $\frac{\omega^2 Z_0}{g}$

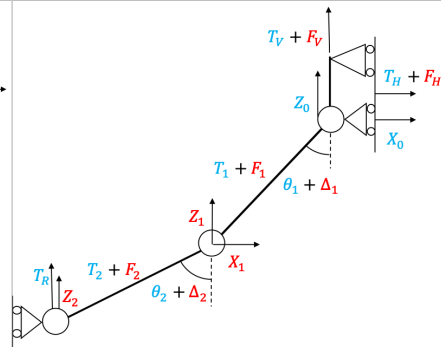


Fig.5 The effect of β/α and $\frac{\omega^2 Z_0}{g}$

$$T_V + F_V = (T_1 + F_1) \cos(\theta_1 + \Delta_1) + \frac{\alpha w g L}{4} + \frac{\beta w L}{4} \ddot{Z}_0 \quad (1)$$

$$(T_1 + F_1) \sin(\theta_1 + \Delta_1) = (T_2 + F_2) \sin(\theta_2 + \Delta_2) + \frac{\beta w L}{2} \ddot{X}_1 \quad (2)$$

$$(T_1 + F_1) \cos(\theta_1 + \Delta_1) = (T_2 + F_2) \cos(\theta_2 + \Delta_2) + \frac{\alpha w g L}{2} + \frac{\beta w L}{2} \ddot{Z}_1 \quad (3)$$

$$(T_1 + F_1) \cos(\theta_1 + \Delta_1) = (T_2 + F_2) \cos(\theta_2 + \Delta_2) + \frac{\alpha w g L}{2} + \frac{\beta w L}{2} \ddot{Z}_1 \quad (4)$$

$$(T_2 + F_2) \cos(\theta_2 + \Delta_2) + T_R = \alpha w g \left(\frac{L}{4} + \delta \right) + \beta w \left(\frac{L}{4} + \delta \right) \ddot{Z}_2 \quad (5)$$

次に、モデルが上端部強制変位 (X_0, Z_0) を与えられたときの動的釣合を Fig.5 で考える。空中重量に対する水中重量の比を α 、付加質量影響を含むみかけ重量係数を β とする ($0 < \alpha < 1$ かつ $\beta > 1$)。非線形抗力は無視し、 β は簡単のために方向依存性を考えない。下端質点は上下方向にのみ動く。各ロッドの動的張力成分を $F_1 \cdot F_2$ 、動的角度変化を $\theta_1 \cdot \theta_2$ 、中間質点変位を (X_1, Z_1) 、下端質点変位を Z_2 、上端部水平力動的成分を F_H 、鉛直力動的成分を F_V とする。Fig.5 中赤字で示される9つの未知数に対して、幾何学的条件式4式に加えて式(1)~(5)の5つの動的釣合式が成り立つ。動的角度・張力変化が静的成分に対して十分に小さいと考えて線形化を行えば、張力の静的成分に対する動的成分 ($F_1/T_1 \cdot F_2/T_2$) は以下のように求められる。 F_2/T_2 の方が常に小さいため、 F_2/T_2 に着目すると、

$$\frac{F_2}{T_2} = -\frac{16T_H T_2}{LT_V^2} X_0 - \frac{12T_2}{LT_V} Z_0 + \frac{1}{LT_V} (12T_2 - \beta w L(L + 4\delta)\omega^2) Z_2 \quad (6)$$

式(6)中で、 T_1/L または T_2/L に比例する項を1次モードのたわみ振動の復元力項、 $\beta w L \omega^2$ に比例する項を慣性力項と考えることができる。ライザーでは $T_1/L, T_2/L \ll \beta w L \omega^2$ と考えてよく、簡単のために復元力を無視すると、解析的モデルの解はカタナリー数 γ を用いて以下のように導ける。

$$\frac{F_2}{T_2} = -\frac{\beta \omega^2}{\alpha g} \left(1 + \frac{4\delta}{L} \right) \mu \left(\frac{4\gamma}{3L} X_0 + Z_0 \right) \quad (7) \quad \text{ただし、} \gamma = T_H / \alpha w g \quad \mu = \frac{3 + \left(\frac{3L}{4\gamma} \right)^2}{3 + \left(\frac{3L}{4\gamma} \right)^2 + \frac{8\delta}{L}}$$

動的張力は陽的に表され、動的最小張力に関わる重要パラメータは水中増幅率 β/α 、上端部最大加速度 $\omega^2 X_0/g$ or $\omega^2 Z_0/g$ 、静的上端角 $\theta_1 = \tan^{-1}(\gamma/L)$ の3つであることがわかる。 δ/L はモデルの簡易化に関わる修正項と考えることができ、本研究では OrcaFlex の結果との比較 (2. 2) で性能の良い、 $\delta/L = 1/25$ の値を用いる。

2. 2 OrcaFlex による性能検証

解析解は、大胆な線形化と簡易化の結果導かれた。そのため、非線形抗力・多自由度を考慮した OrcaFlex の時間領域計算を網羅的に行うことで、解析解の定性的性能評価を行った。

まず、静的上端角と上端部最大加速度影響について検証する。1本のライザー（その諸元は Table1 の Value2）を様々な周期（3.5 秒～12 秒）・振幅（0.1m～2.0m）で上端部を鉛直方向もしくは水平方向に強制加振した。ライザーは静的上端角が 5 度から 35 度までの 7 種類用意する。強制変位は衝撃的荷重を防ぐためにその振幅を 0 から滑らかに増やし、計算時間 600 秒のうち最終周期で観測された動的最小張力を抽出する。Fig.6 に、対鉛直方向揺れの結果について横軸をそのモデルの静的上端角、縦軸を強制加振の最大加速度としたとき、最小張力が圧縮に達したときは赤で、達しなかったときは緑でプロットした。解析解では $F_2/T_2 = -1$ が圧縮発生に対応し曲線で示してある。同様に、対水平方向揺れの結果について Fig.7 に示している。

次に、静的上端角を 15 度として水中増幅率と上端部最大加速度影響について検証する。水中増幅率に関わる法線方向付加質量係数・ライザー空中重量・ライザー外径がそれぞれ異なる 27 種類のライザー（Table1 の 3 つの Value の組み合わせ）を用意した。これらをそれぞれ、同様の周期・振幅の組み合わせで上端部を鉛直方向もしくは水平方向に強制加振する。Fig.8 に対鉛直方向揺れの結果について横軸をライザーの水中増幅率、縦軸を強制加振の最大加速度としたときの圧縮・非圧縮プロットをした。解析解も同様に $F_2/T_2 = -1$ を曲線で示してある。同様に、Fig.9 に対水平方向揺れの結果について示した。

Fig.6～9 の結果より、構築したモデルの解析解と OrcaFlex の計算結果の圧縮非圧縮境界線には定量的には違いがあるものの、3 つの重要パラメタの定性的影響を解析的モデルが非常によく評価できていることがわかる。

3 非線形抗力が動的張力に与える影響

一方で、解析的モデルでは非線形抗力影響を無視して立式したため、その影響について更なる議論が必要である。そこで、2 つの無次元数、重力に対する慣性力比 Π_I と重力に対する抗力比 Π_D を以下のように定義する。

$$\Pi_I = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\omega^2 A}{g} \quad (8) \quad \Pi_D = \frac{1}{2} \frac{C_D \rho_w D (\omega A)^2}{\alpha w g} = \frac{2C_D}{\pi} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{(\omega A)^2}{gD} \quad (9)$$

なおライザー外径を D 、振動振幅を A 、抗力係数を C_D 、重力加速度を g 、海水密度を ρ_w とする。モリソン式によれば、ライザーに働く流体力は互いに位相が 90 度ずれた慣性力と抗力の足し合わせである。動的張力に対しても、解析的モデルで導出された慣性力項 Π_I に加えて、抗力項 Π_D が位相を 90 度ずらして寄与すると考える。このとき、それぞれの重み定数を加振周波数に独立であると仮定し、 w_I 及び w_D とすると、三角関数の合成により、

$$\min\left(\frac{F}{T}\right) = \sqrt{(w_I \Pi_I)^2 + (w_D \Pi_D)^2} \quad (10)$$

Table1 Riser Specifications

	Value 1	Value 2	Value 3
Outer Diameter	0.322 m	0.356 m	0.390 m
Unit mass in air	154.226 kg/m	184.226 kg/m	214.226 kg/m
C_a	0.5	1.0	1.5

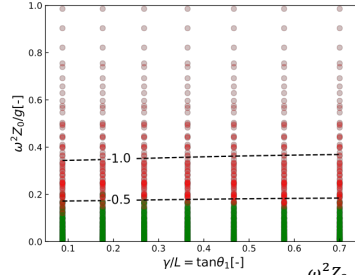


Fig.6 The effect of θ_1 and $\frac{\omega^2 Z_0}{g}$

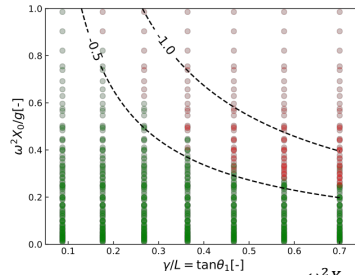


Fig.7 The effect of θ_1 and $\frac{\omega^2 X_0}{g}$

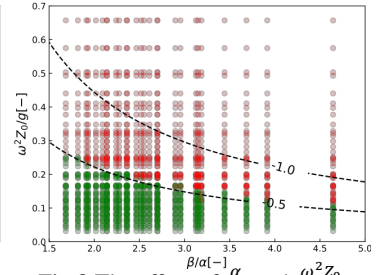


Fig.8 The effect of $\frac{\beta}{\alpha}$ and $\frac{\omega^2 Z_0}{g}$

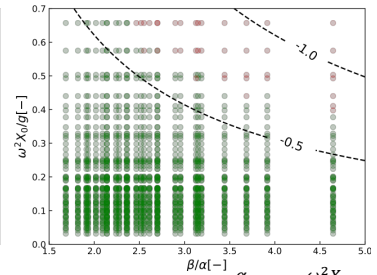


Fig.9 The effect of $\frac{\beta}{\alpha}$ and $\frac{\omega^2 X_0}{g}$

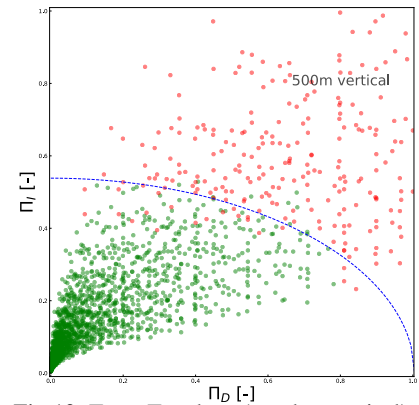


Fig.10 $\Pi_D - \Pi_I$ plane (regular, vertical)

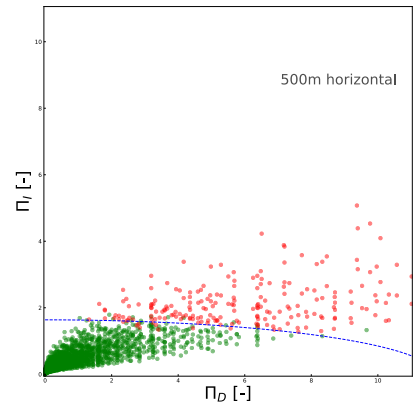


Fig.11 $\Pi_D - \Pi_I$ plane (regular, horizontal)

すなわち、等 $\min(F/T)$ 線は Π_D - Π_I 平面で楕円形状を描くはずである（仮説*とする）。ここでは、仮説*を OrcaFlex の網羅的計算で検証することで、非線形抗力影響を考慮した定性的指針を議論する。本研究では、異なる 2 種類の法線方向抗力係数・付加質量係数・単位空中質量・外径をもつ 16 種類のライザーを 2. 2 同様、様々な周期と振幅で上端部を強制加振した。その結果について Fig.10 に、横軸を Π_D 、縦軸を Π_I として、圧縮が観測されたモデルを赤で、圧縮が観測されなかったモデルを緑でプロットした。 $\Pi_D \cdot \Pi_I$ 中の振幅 A には上端部振幅を用いる。Fig.10 では、圧縮（赤プロット）・非圧縮（緑プロット）境界線が青点線で示されるような楕円形状となっていることが確認できる。すなわち、対上端部鉛直方向揺れの初期設計における設計パラメタの改善方法としては、Fig.10 で示される $\Pi_D \cdot \Pi_I$ 平面上で原点に向かう方法が最適であるとわかる。一方で、Fig.11 に対水平方向揺れの結果を示した。対水平方向では、抗力が動的最小張力に与える影響が小さく、初期設計では解析的モデルと同じく Π_I を小さくする設計パラメタ改善方法が最適である。

4 不規則加振における検討

これまで、基礎的な知見の確立のために、上端部規則加振に対する応答を検討してきた。一方で、実際の運用は上端部不規則加振が想定される。その応答は、フリーハンギング形状の非線形性により単純な規則加振応答の重ね合わせにはならないため、OrcaFlex による検証を行った。3 で用いた 16 種類のライザーの上端部を強制不規則加振する。波の時系列は ISSC(the International Ship Structures Congress) Spectrum から有義波高 H_s ・ピーク周期 T_p を組み合わせて (Table2) 16 種類用意する。ライザー上端部は周期 3.5 秒以下の displacement RAO が 0、周期 4.0 秒以上の displacement RAO が 1 であるローパスフィルタの役割をする船体に接続されている。これは、実際にはエネルギーの低い周波数領域を原因としてライザーが共振することを防ぐためである。計算時間は 550 秒、水深は 500m とする。

不規則加振における検討では、 $\Pi_I \cdot \Pi_D$ について式(8)(9)の定義を用いることができない。そこで、550 秒の計算の中の動的最小張力が観測された時刻の前後 15 秒の、上端部下方向最大速度・加速度を最大速度・加速度として $\Pi_I \cdot \Pi_D$ の計算に用いる。このときの結果について、対鉛直方向揺れの結果を Fig.12 に圧縮に至った計算モデルを赤で、圧縮に至らなかった計算モデルを緑でプロットした。規則加振での定性的知見が、現実的な不規則加振に対しても有用であることを確認した。

Table2 ISSC spectrum condition

T_p	H_s			
	1.5 m	6.0 m	7.0 m	7.5 m
8.0 s	1.5 m	6.0 m	7.0 m	7.5 m
10.0 s	2.0 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m
12.5 s	2.0 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m
15.0 s	3.0 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m

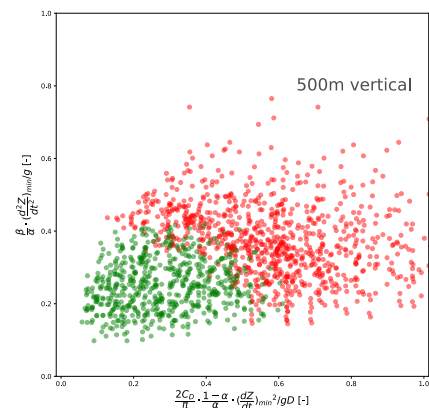


Fig.12 $\Pi_D - \Pi_I$ plane (irregular, vertical)

5. 結論

- ① 線形化と簡易化によってフリーハンギング形状の動的張力を評価できる解析モデルを構築した。この解析モデルによって動的最小張力に関わる 3 つの重要パラメタ（水中増幅率 β/α ・上端部最大加速度 $\omega^2 A/g$ ・静的上端角 θ_1 ）を抽出した。FEM ソフトウェア OrcaFlex を用いて、構築した解析モデルが、重要パラメタが動的最小張力に与える影響を定性的によく評価できていることを確認した。
- ② 解析的モデルでは考慮できない非線形抗力影響を考慮して、設計パラメタの改善方法の定性的な指針を OrcaFlex の時間領域計算で検証した。対鉛直方向加振では無次元化慣性力 Π_I -無次元化抗力 Π_D 平面上で原点に向かってライザー設計を改善する方法が最適である。
- ③ これまでの対規則加振の議論を現実的な上端部不規則加振の議論に発展させた。今回の議論における定性的知見が対上端部不規則加振においても有効な知見であることを確認した。

6. 参考文献

- [1] Simonsen, A., Inspection and Monitoring Techniques for un-bonded Flexilbe Risers and Pipelines, page 76, 2014
- [2] Foyt, E., Wang, H.H., and Kan, C.W, Weight Optimized SCR: Enabling Technology for Turret Moored FPSO Developments, In Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, 2007
- [3] Orcina Ltd, OrcaFlex Manual (Version 9.1a), Technical Report
- [4] Queau, M.L., Kimiaei, M., and Randolph, M.F., Approximation of the maximum dynamic stress range in steel catenary risers using artificial neural networks, Engineering Structures, 92:172-185, Jun 2015