

令和4年2月修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

浮体式洋上風車の動揺時の係留索動的特性に関する研究

Study on Dynamic Characteristics of Mooring Lines for Motion of a Floating Offshore Wind Turbine

学籍番号 47206642 山田 光輝

指導教員 平林 紳一郎 准教授

(令和4年2月1日発表)

Keywords: 浮体式洋上風車、カタナリー係留、チェーン、動的解析、VIM

Keywords: Floating Offshore Wind Turbine, Catenary Mooring, Chain, Dynamic Analysis, Vortex-Induced Motion

1. 序論

既存の化石エネルギーの資源問題や環境問題に対応すべく、世界中で再生可能エネルギーの開発が進められている。特に風力発電は低コストで発電できるといった利点があり、設備容量が急速に増加している。風力発電の導入拡大を図るためには洋上風力発電の推進が必要であり、特に日本沿岸には浮体式洋上風力発電設備の大規模な導入が見込まれる。

浮体式洋上風力発電は、浮体が波からの外力を受けて動揺することから、浮体に繋がれている係留索の形状の変動により係留索自身への負荷がかかるといった課題がある。また浮体は構造物自身から剥離される渦による動揺現象 VIM(Vortex-Induced Motion)の影響も受ける。渦放出周波数と系の固有周波数が近い値になると、一定の周波数で浮体が大きく動揺するロックイン現象が発生する。このことから、係留索への動的影響は波浪と VIM 双方の面から考慮する必要がある。

2. 研究目的

本研究では、波浪による影響と VIM による影響が共存した場合に起こりうる浮体の動揺について波浪条件を網羅する形で、係留索全体の動的特性を調査した。

研究の流れとしては、波浪影響による動揺と VIM 影響による動揺の双方を加味した場合の張力変動を求めた。そして、それぞれの動揺の特性における係留索の張力変動を明らかにし、係留索の疲労寿命についても計算を行った。また、動的解析プログラムの妥当性を水槽での係留索の加振実験により検証した。

波浪中において VIM 影響による浮体の動揺が発生するリスクは現在の知見で明らかになっていないが、あくまでも動揺が起きた場合におけるハザードを想定して、係留索の動的特性を解明することを目的とした。

3. 係留解析プログラム

3.1 動的解析プログラム MoorDyn

本研究では、Hall によって作成されたオープンソースプログラム MoorDyn[1]を使用して係留索の動的解析を行った。MoorDyn は、係留索を質点とばねが連結されたモデルとして扱うランプドマス法の数値的手法を用いている。このモデルは、係留索の軸方向の弾性力と減衰力、係留索に働く流体抗力、海底との鉛直抗力を考慮している。これらの力を反映させた運動方程式を 2 次ルンゲクッタ法によって解いている。係留索の張力は、直線状のセグメントのひずみによって表現される。

3.2 水槽実験によるプログラムの検証

本研究の水槽実験は、以下の 2 点を目的として行った。

- ・動的解析プログラムで得られた係留索の張力の妥当性の検証
- ・並進 3 方向動揺の影響における係留索の形状変化の再現性の検証

実験でモデル化するチェーンは実機スケールで係留長さ 629.37[m]、水深 50[m]、直径 140[mm]である。水槽の水深は 1.43[m]で、相似比を約 1/35 としている。また、静的張力の結果をもとに初期水平長を実機スケールで 616.22[m]に設定した。

水槽実験では、係留索の長手方向(X 軸方向)と鉛直方向(Z 軸方向)に波浪動揺周期で加振し、横方向(Y 軸方向)に VIM 動揺周期で加振した。X 軸方向と Z 軸方向は同じ振幅、周期に設定し、位相差を変えて実験を行った。VIM 動揺周期は 100~150[s]、波浪動揺周期は 5~20[s]を想定している。

実験では、以下の模式図のように FBG 張力センサと Qualisys マーカーを取り付け、6 点の張力と座標の測定を行った。

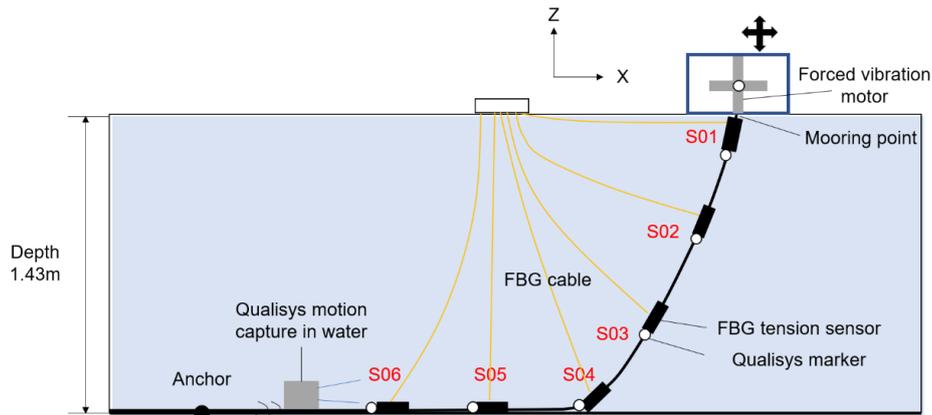


Fig. 1 Experiment schematic diagram from side

Y 軸方向に加振した際は、実験では摩擦の影響が含まれていたのに対し、計算ではプログラムの仕様上、海底摩擦のパラメータを入れることができなかった。そこで、設定のアンカー点を係留索上端に近づけて係留索のある点から先は動かないように設定を変更した。Y 軸方向に実機スケールで振幅 20m、周期 100s で加振したケースの張力変動のデータを Fig. 2 と Fig. 3 に示す。右側が設定アンカー点を変更したデータで、実験結果と計算結果の張力変動幅の一致を確認できる。

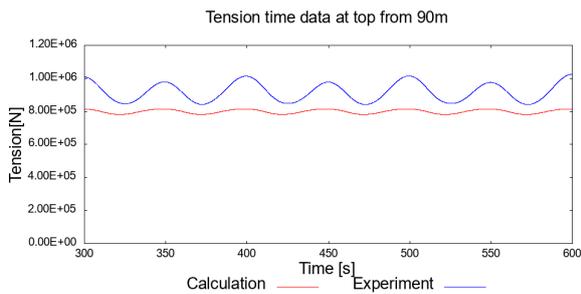


Fig. 2 Tension fluctuation result before moving anchor

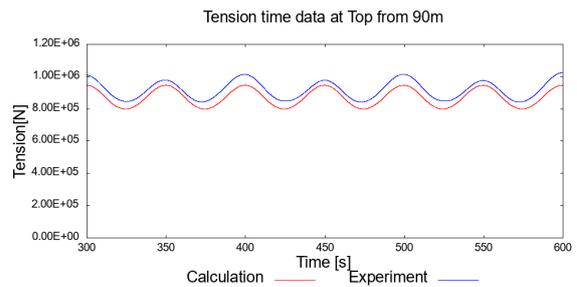


Fig. 3 Tension fluctuation result after moving anchor

4. 張力変動特性

4.1 波浪影響による動揺を考慮した場合

浮体は波の力を受けて様々な方向に動揺するが、本研究では浮体が規則波の影響を受けて上下方向、左右方向に一定の周期で動揺する場合を想定する。計算の条件は、動揺振幅、周期ともに上下方向と左右方向で同一とし、2 方向の動揺の位相差を変えて計算を行った。Fig. 4 より動揺周期を変えて計算を行った場合、係留索の各点の変動張力は周期に依存することが確認された。動揺周期が短いほど、動的解析によって求めた張力変動範囲の大きさは静的解法のカテナリー解で求めたものとかげ離れており、動的影響が出ていることが確認された。

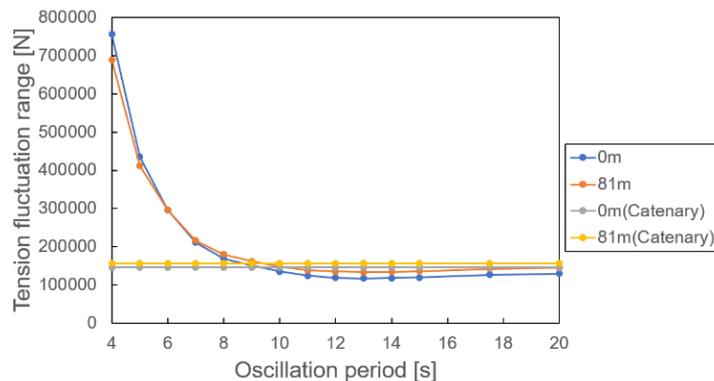


Fig. 4 Tension fluctuation range data at each oscillation period in Case of Amplitude=1.0m

また、同じ動揺条件下において、各質点における張力変動範囲の大きさを求め、係留点からの位置の違いによる張力変動特性を明らかにした。以下 Fig. 5 と Fig. 6 に、振幅 0.5m、動揺周期 5s, 15s の各点の変動張力範囲の大きさを示す。グラフ内の一番左の点が上端における張力変動範囲の大きさを示しており、動揺周期が短くなると上端における張力変動範囲の大きさが相対的に大きくなっていることが分かる。

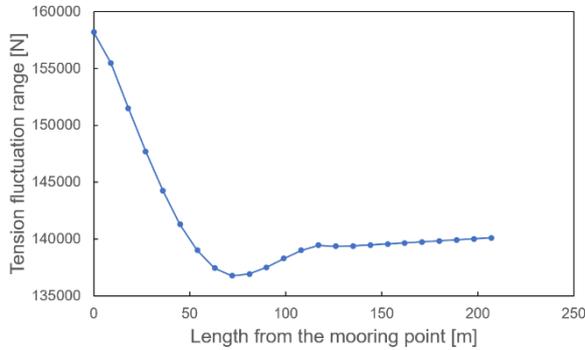


Fig. 5 Tension range of nodes in Case of Period=5s

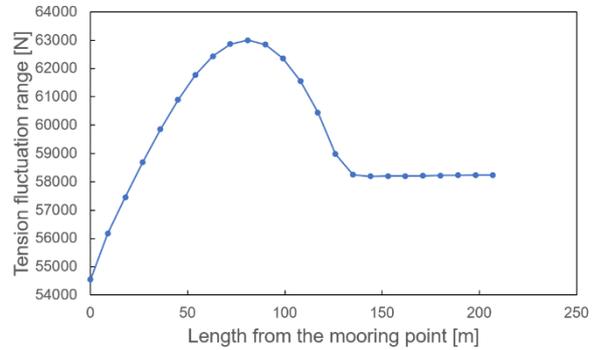


Fig. 6 Tension range of nodes in Case of Period=15s

このグラフの概形をパターン分けして、動揺条件の表を色分けしたものを Fig. 7 に示す。表中の値は、上端からタッチダウン点までの区間内において張力変動幅が最大となる係留索の位置（係留点からの距離）を示している。この表の左下の部分の赤色の領域では、上端での張力変動範囲の大きさが最大となっている。このことより、動揺周期が短い場合は上端での動的影響が強く出ていることがいえる。動揺周期が長くなるにつれ右側の水色の領域に遷移し、静的な傾向に近づくことが確認できる。

| 振幅[m] | 周期[s] | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|--|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 17.5 | 20 | |
| 5.0 | | | | | | | | | | | | | 99m | 81m | |
| 4.0 | | | | | | | | | | 99m | 99m | 99m | 81m | 81m | |
| 3.0 | | | | | | | 108m | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 81m | 81m | |
| 2.5 | | | | | 108m | 108m | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 90m | 81m | 81m | |
| 2.0 | | | | 108m | 108m | 108m | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 81m | 81m | 81m | |
| 1.5 | | | 117m | 108m | 108m | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 81m | 81m | 81m | 81m | |
| 1.0 | 上端 | 上端 | 117m | 108m | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 90m | 81m | 81m | 81m | 81m | |
| 0.5 | 上端 | 上端 | 上端 | 108m | 99m | 99m | 90m | 90m | 90m | 81m | 81m | 81m | 81m | 81m | |

赤色：上端において張力変動幅が最大となる領域

黄緑色、緑色：上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が極大となるが、タッチダウン点から遠ざかるにつれ増大する領域

水色：上端とタッチダウン点の間の地点において張力変動幅が最大となり、タッチダウン点以遠では一定の水張りとなる領域

Fig. 7 Position of the mooring line with the maximum tension fluctuation range

4.2 位相依存性

上下方向と左右方向の動揺の位相差を変えて張力変動範囲の大きさを求めた結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。係留索上端の質点において、動揺周期ごとに張力変動範囲の大きさの値をプロットしている。

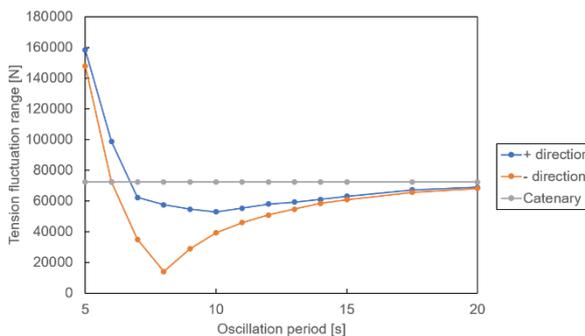


Fig. 8 Tension range data in Case of Amplitude=0.5m

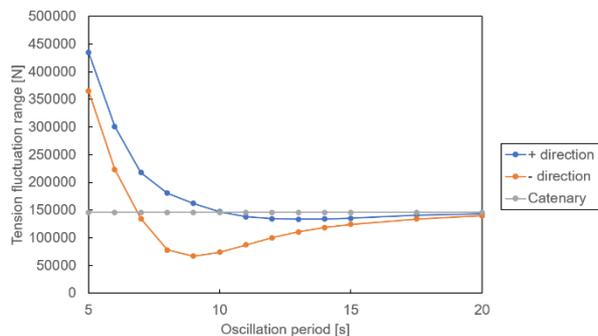


Fig. 9 Tension range data in Case of Amplitude=1.0m

Fig. 8, Fig. 9 より、同じ動揺周期、振幅でも、動揺の位相差が異なると張力変動範囲の大きさが異なることが分かる。これは、実機において波に向かう方向に設置される係留索と反対側に設置される係留索では想定する疲労被害度が異なることを意味している。この原因としては、左右方向の動揺による張力変動と上下方向の動揺による張力変動の波形の干渉の仕方の違いが考えられる。上下方向の動揺に伴う張力変動のピークと左右方向の動揺に伴う張力変動のピークがある時刻において一致すると、張力変動幅が増大するという傾向がみられた。

4.3 波浪影響と VIM 影響による動揺が共存した場合

本研究では、規則波が流れと平行方向にある場合を想定している。VIM は流れと横行方向の動揺振幅が他の方向よりも大きくなり、規則波中の VIM 応答では surge 方向、heave 方向に波周期で、sway 方向に概ね VIM 周期で動揺することが Gonçalves et al.[2] により確認されている。今回は、sway 方向の動揺振幅を 20.0m、動揺周期を 100s としており、この方向への振動の有無の違いにより、張力変動範囲の大きさを明確にした。張力変動範囲の結果を以下のカラーマップに示す。なお、縦軸を波浪影響による動揺振幅、横軸を波浪影響による動揺周波数としている。

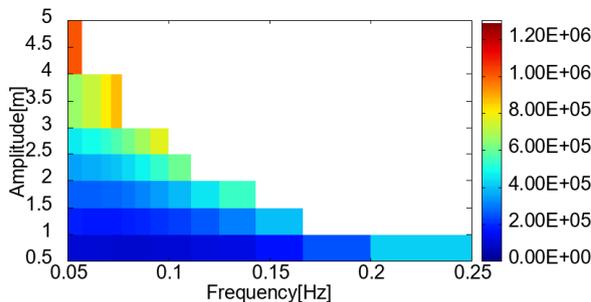


Fig. 10 Map of tension range in Cases of only wave

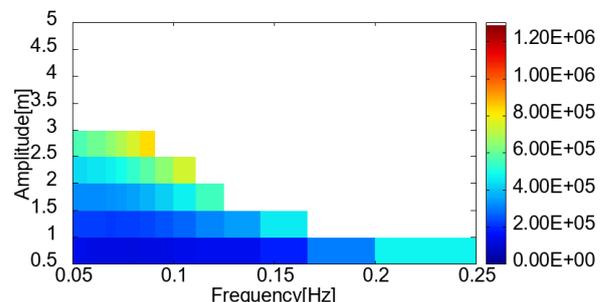


Fig. 11 Map of tension range in Cases of wave and VIM

白い領域は、係留索がスラックして張力が 0 になったケースである。この左右のグラフを比較すると、右図の VIM 影響を含めたケースについて、同じ波浪条件下で比較すると、張力変動範囲がやや大きくなっていることが確認される。左右のグラフのプロット値を比較すると、いずれのケースも張力変動範囲の比率は概ね約 1.1~1.4 倍の範囲に入っていることが計算により確認された。

5. 結論

係留索の加振実験を行い、実験結果と動的解析プログラムの結果を比較することで、並進 3 方向の動揺において形状と張力の妥当性を検証することができた。係留索が索の横断方向に振動した際は海底摩擦の影響があることが示唆され、プログラムのアンカー点の設定位置を変えることにより張力の結果を合わせることが出来た。

MoorDyn の係留解析プログラムを利用して、係留索の各点の張力変動範囲の大きさを求めることができた。周期を短くした際の動的影響について、関谷[3] は単一方向の加振により明らかにしたが、本研究では水平方向に加えて鉛直方向の 2 方向加振により同じような結果が得られた。また、波浪影響と VIM 影響が共存した際の張力変動範囲をあらゆる波の条件において網羅的に求め、張力変動範囲が大きくなる条件を明らかにした。VIM 影響を考慮した場合、今回用いた条件では張力変動範囲の大きさは 1.1~1.4 倍程度になる可能性があることが分かった。

参考文献

- [1] M. Hall, A. Goupee: Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data, *Ocean Engineering* 104, 2015, pp.590-603
- [2] R.T. Gonçalves, L.A. Pinto and A.L.C. Fajarra: Experimental study on vortex-induced motions of a semi-submersible platform with four square columns, part III: Effects of the collinear irregular and regular wave incidence and current, *Ocean Engineering* 217, 2020, 107585
- [3] 関谷 哲: 浮体式洋上風車の浅海係留系の動的挙動特性に関する研究、卒業論文、東京大学、2014 年