

ポンツーン型浮体式洋上風車のスラミング応答に関する研究

A Research on Slamming Response of a Pontoon Type Floating Offshore Wind Turbine

学籍番号 47-146645 須山 聡大
指導教員 鈴木 英之 教授
平林 紳一郎 講師

(平成 29 年 1 月 30 日)

Keywords: 浮体式洋上風車, スラミング, エネルギースペクトル法, 衝撃実験, 弾性応答

Keyword: Floating offshore wind turbine, Slamming, Energy spectrum method, Impact experiment, Elastic response

1. 序論

1.1 研究背景

現在福島復興・洋上ウィンドファーム実証研究事業に代表されるように、浮体式洋上風車の実用化に向けて多くの研究が進められている。日本で実証研究の対象としている浮体の形状については、陸上風車にあまり改造を加えることなく浮体に搭載する設計が採用されていた為、許容動揺が小さいものとなっている。次の段階として、浮体の設計と風車の設計がトータルで検討されることにより耐動揺性を備えた風車の設計が実現されつつあり、現在実証研究が進んでいる浮体形状のものに比べ揺れの大きなポンツーン型の浮体が採用可能になった。ポンツーン型浮体式洋上風車のイメージ図を Fig.1 に示す。特徴として、浮体の動揺を抑制する浮体中央部のムーンプールや、減衰の効果がある浮体底面側部のスカートなどが挙げられる。ポンツーン型浮体は小型で、かつ建造や施工が容易であることから比較的 low コストというメリットがある一方、デメリットとしてスラミングが発生する可能性があり、風車の運転に支障をきたす恐れがある。スラミングとは船体底面が空中に露出した直後、再び水中に没する際に波面が底面を叩くことによる衝撃現象で、古くから浮体式海洋構造物の折損事故の主要原因として多くの研究が成されている。最近では 2013 年に大型コンテナ運搬船「MOL COMFORT 号」がスラミングにより折損し、沈没するという事故があった。スラミングによる重大な海難事故を防ぐために、スラミングの発生確率、スラミングによる荷重、スラミングが起きたときの洋上風車の応答の以上 3 点を解析することが不可欠である。

1.2 先行研究

これまでスラミングの解析に関する研究は、相対水位の応答関数によるスペクトル法を用いた超大型浅喫水箱型浮体のスラミング発生確率について解析されている[1]が、ムーンプールやスカートがある浮体についての研究は行われていない。また、スラミング衝撃荷重推定式が導出[2]されており、スラミングによる船の弾性応答の研究[3]が行われているが、風車のタワートップやベースについての影響を考察した研究は行われていない。

1.3 研究目的

本研究ではポンツーン型浮体式洋上風車の問題点であるスラミングについて、ポンツーン型浮体式洋上風車のスラミングの発生確率、スラミングによる衝撃荷重、スラミングによる弾性応答の 3 点について総合的に解析し、影響を評価する。更に、スラミングが発生したときの風車、タワーを含む洋上風車全体の過渡的な振動応答を解明する。そして、スラミングによる折損事故や座屈に成り得る条件を整理する。

2. スラミング発生確率

スラミング発生確率を求める手法として、NK-UTWind による不規則波中応答計算、エネルギースペクトル法による線形重ね合わせ、不規則波実験の 3 つの解析を実施した。

2.1 NK-UTWind によるシミュレーション

NK-UTWind は当研究室で開発している風車-浮体-係留連成解析プログラムで、ポンツーン型浮体式洋上風車のモデルを作製し、不規則波中

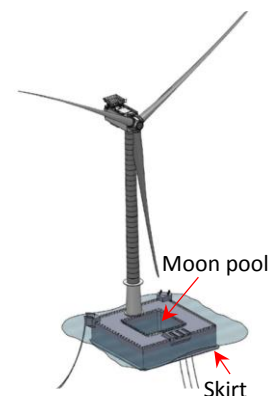


Fig.1 Image of pontoon type FOWT

応答計算を実施した。Fig.2 は浮体底面の相対水位を ISSC スペクトルで有義波高 9.8m、有義波周期 13.6s で 3 時間解析した結果である。マイナス方向が波面とスカートが近づく方向であり、浮体の喫水は 7m なので -7m を越えると底面露出が発生していることになる。3 時間のうち喫水 7m を越える、即ち底面露出が起きている回数は 1 回となった。

2.2 不規則波実験

ポンツーン型浮体式洋上風車の模型を用いて、底面露出が発生しているか、そして相対水位の頻度分布がレーレー分布に近似できるか検証する実験を行った。模型スカート横に波高計を取り付けることにより、スカートの相対水位を計測した。模型スケールが 1/100 で、実験条件はフルード則に従った。ISSC スペクトルで解析条件有義波高 9.8cm、有義周期 1.36s を 6 分間行った時の相対水位の結果を Fig.3 に示す。グラフから、底面露出は 1 回発生しており、その時の相対水位の値は -7.06cm であった。

次に、不規則波条件有義波高 9.8cm、有義周期 1.36s における 1000 波分のスカート部の相対水位の極大値から、その頻度分布を作成し、レーレー分布に近似した結果を Fig.4 に示す。レーレー分布は Longuet-Higgins によって示された式(1)を用いた[4]

$$p(H) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{\bar{H}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad (1)$$

この時、 H は相対水位の極大値、 \bar{H} は 1000 波分の相対水位の極大値の平均値である。実験により求めた極大値の有義値とレーレー分布により求めた有義値の誤差は 5.22% となり、相対水位の頻度分布はレイレー分布で近似してよいと考えられる。

2.3 エネルギースペクトル法

相対水位のパワースペクトルは線形重ね合わせの理論[1]より(2)式で計算することができる。

$$S_r(\omega) = |H(\omega)|^2 f(\omega) \quad (2)$$

この時、 $H(\omega)$ は相対水位の周波数応答関数、 $f(\omega)$ は不規則波のパワースペクトルである。 $S_r(\omega)$ から相対水位の短期パラメータである標準偏差 R を計算でき、底面露出の最大期待値を計算することができる。そこで、 $H(\omega)$ を求める規則波実験を行った。模型は 1/100 サイズのものを使用し、実験条件は波振幅 3.5cm の 2 条件、波周期 0.5~2.0s で行った。Fig.5 に波振幅 3.5cm におけるポンツーン型浮体式洋上風車の底面における相対水位の周波数応答関数 $H(\omega)$ を示す。 $f(\omega)$ を ISSC のスペクトルとし、有義波高 9.8cm、有義波周期 1.36s として、(1) 式を用いて標準偏差 R を計算すると波高 3cm の場合が 2.05、波高 5cm の場合が 1.82 となった。不規則波の実験結果から相対水位の極大値の確率分布を Rayleigh 分布で近似し、求めた 2 つの標準偏差の平均値を用いると、1000 波最大の極大値は 7.49cm となった。即ち、底面露出が発生しているということになる。

3. スラミング衝撃荷重

3.1 スラミング衝撃実験

スラミングによる衝撃荷重[2]は(3)式で表すことができる。

$$F_{slam} = \frac{1}{2} \rho C_s A_w |V|^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ は流体密度、 C_s はスラミング係数、 A_w は衝撃時の面積、 V_n は浮体と水面の相対速度である。本研究の目的であるスラミング応答解析の前段階として、スラミング係数を求める衝撃実験を実施した。実験イメージ図を Fig.6 に示す。ポンツーン型浮体式洋上風車の 1/100 サイズの浮体

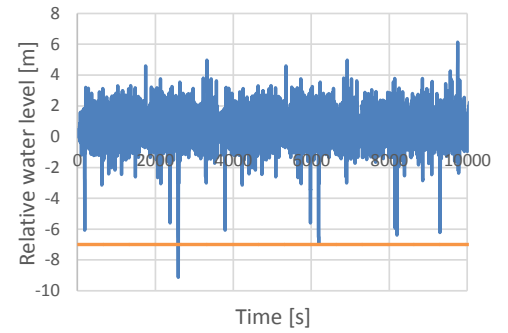


Fig.2 $H_{1/3} = 9.8m, T_{1/3} = 13.6s$

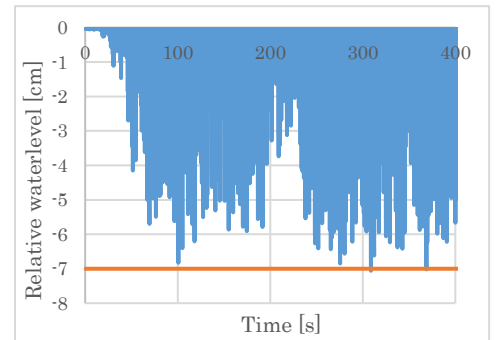


Fig.3 $H_{1/3} = 9.8cm, T_{1/3} = 1.36s$

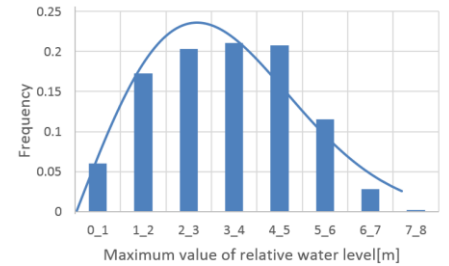


Fig.4 Frequency distribution of Relative water level maximum value

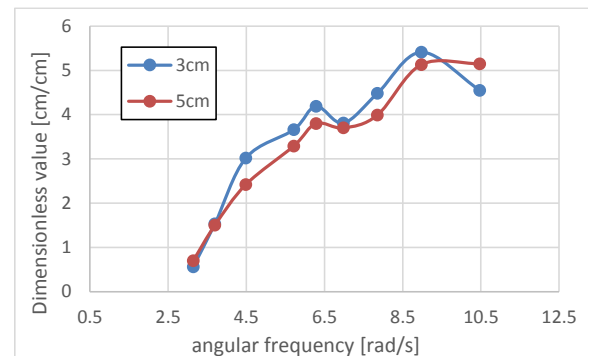


Fig.5 RAO of relative water level

の一辺に相当した模型を強制加振装置で水面に垂直に衝突させた。その時の荷重を計測し、(3)式からスラミング係数を導出した。また、浮体底面に衝撃角が 45° になる楔を装着し、その際の衝撃力も同様に検出した。実験は楔無しの場合と同じ条件で3回試行し、衝撃角が 45° になる楔を装着した場合と同じ条件で2回試行した。

3.2 実験結果

Fig.7 に楔無しの場合における試行1回目の時間領域における落下速度と荷重の関係の結果を示す。プラス方向が上向きに働く力であり、マイナス方向が下向きに働く力である。極短時間に発生している非常に大きな衝撃力が供試体と水面が衝突した際の衝撃力である。例を挙げると、落下速度が 0.386m/s のときの約9000秒の時に発生している荷重である。また、衝撃角が 45° の場合、楔の先端と水面の衝突による衝撃は一切発生しなかった。スカート部と水面の衝突による衝撃力は発生していたので、その衝撃力からスラミング係数を導出した。衝撃の際の最大荷重を用いて、スラミング係数をまとめたものをFig.8に示す。

楔無しの場合、落下速度 0.134m/s の場合に同条件下での試行3回によるスラミング係数の値は28、10、18と大きくバラついてしまった。原因として、2,3回目で供試体が微妙に傾いてしまったことが挙げられる。相対角 0° の時の試行1回目ではほぼ垂直に供試体を落下することができたので、空気巻き込みが発生し衝撃力が大きくなったが、2,3回目では供試体が微妙に傾いてしまったことにより衝撃の際に空気巻き込みが発生せず、1回目よりも衝撃力が小さくなった可能性がある。他のケースに比べて明らかにスラミング係数の値が小さいケースも同様の要因の可能性もある。また、楔無しの場合から求めたスラミング係数と楔を装着した際のスカート部に発生した衝撃力から求めたスラミング係数は値のオーダーはほぼ一致しており、スラミング係数の最大値は29.98、最小値は10.17という結果となった。

4. スラミング弾性応答

4.1 NK-UTWind による弾性応答解析

ポンツーン型浮体式洋上風車の浮体底面にスラミングが発生した時の、タワーベースの弾性応答解析を行うために、NK-UTWind を用いた。NK-UTWind は運動応答と内力を同時に計算することができるからである。そこで、NK-UTWind 上で浮体底面にスラミングを模擬した衝撃力を加える機能を追加し、出力されたタワーベースの部材の曲げモーメントが許容最大曲げモーメントを越えていないか解析を実施した。

4.2 タワー基部の構造概要

タワー基部はトランジションピースで補強されており、トランジションピースの使用材料を Table.1 に示す。

Table.1 Material of transition piece

材質	KEH36
密度	$7,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ヤング率	210,000 MPa
設計基準強度	355 MPa
許容応力	308.7 MPa
ポアソン比	0.3

はりの最大許容応力を表す一般的な式は以下の式(4)で表すことができる

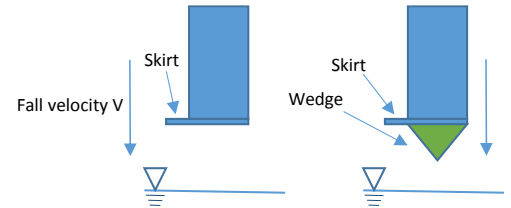


Fig.6 Image of impact experiment

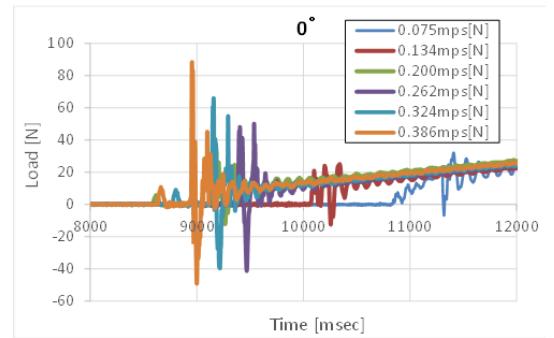


Fig.7 Relationship between fall velocity and load(first time)

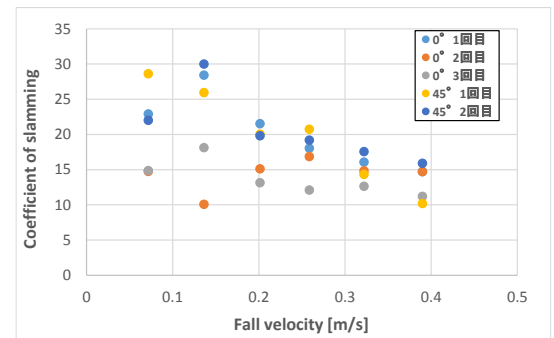


Fig.8 Coefficient of slamming

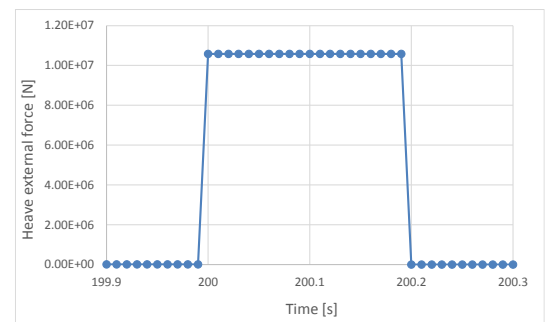


Fig.9 Impulse force when $C_s=30, V_r=6\text{m/s}$, $\Delta t=0.2\text{s}$ and impulse force is square wave

$$\sigma_b = \frac{M_{max}}{Z} \quad (4)$$

このとき、 σ_b は許容応力、 M_{max} は許容最大曲げモーメント、 Z は断面係数である。求めた断面係数 Z と許容応力から許容最大曲げモーメントは 1.1×10^7 [kN・m]となった。

4.3 弾性応答解析条件

式(3)から、スラミングによる最大衝撃力はスラミング係数 C_s と浮体と水面の相対速度 V_r に依存する。相対速度 V_r は3m/sと6m/sで解析を行い、スラミング係数 C_s はスラミング衝撃実験の結果である20と30を用いた。また、衝撃実験結果から衝撃時間 Δt が実スケールで約0.1秒から0.2秒の間であり、そして衝撃波の形状が矩形波と三角波であったので、それらも条件として加えた。解析方法として、シミュレーション開始から静的釣り合い状態に達した200秒後に、各条件の撃力をタワー逆側のスカートの上半分に加え、その時のタワーベースの要素に発生する曲げモーメントを出力した。

4.4 弾性応答解析結果

最もスラミング衝撃荷重が大きくなった $C_s=30$ 、相対速度 $V_r=6.0$ m/s、 $\Delta t=0.2$ sで矩形波の撃力を加えた時の場合であり、その時の節点一つあたりの撃力の時系列変化をFig.9に、その撃力によるタワーベースの曲げモーメントをFig.10に示す。グラフから、曲げモーメントの最大値は 4.9×10^5 [kN・m]となり、許容最大曲げモーメントを大きく下回る結果となった。

次に、どのような条件の時に折損事故が起こりうるのか、更に厳しい条件で解析を行った。スラミング作用範囲はタワー逆側のスカートを含む浮体一辺の全体である。解析条件は $C_s=30$ 、 $V_r=14$ m/s、 $\Delta t=0.2$ s、矩形波の撃力である。節点一つあたりの撃力の変化をFig.11に、タワーベースの曲げモーメントの変化をFig.12に示す。この時のタワーベース曲げモーメント最大値は 1.12×10^7 [kN・m]となり、許容最大曲げモーメントを超える結果となった。

5. 結論と今後の研究課題

本研究では、大波高におけるポンツーン型浮体式洋上風車のスラミング発生頻度を求めるために、NK-UTWindによるシミュレーションと造波実験を行い、スラミングの発生頻度を明らかにした。また、スラミングが発生した時の衝撃荷重を決めるスラミング係数を導出する衝撃実験を実施した。その結果、浮体底面の形状が長方形の場合のスラミング係数は約10~30の範囲にあることが判明した。更に、ポンツーン型浮体式洋上風車にスラミングが発生した時のタワーベースの曲げモーメントからスラミングによる影響を評価し、その結果、想定される最も厳しい状況でのスラミングが発生したとしても、タワーベースの曲げモーメントは許容曲げモーメントを越えないことがわかった。即ち、折損事故が起こり得る可能性は無いということがわかった。

参考文献

- [1] 吉元博文、大松重雄、池渕哲朗、不規則波中における超大型喫水型浮体のスラミングの予測、(1997)
- [2] Det Norske Veritas (DNV), RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads, (2010)
- [3] 小早川広明、岡田哲男、楠本裕己、コンテナ船船体の動的応答計算に基づく構造健全性評価、(2015)
- [4] 堀川清司、海岸工学 海洋工学への序説、東京大学出版会、(1982)
- [5] 植村典人、河合省吾、建築構造力学公式活用ブック、オーム社、(2003)

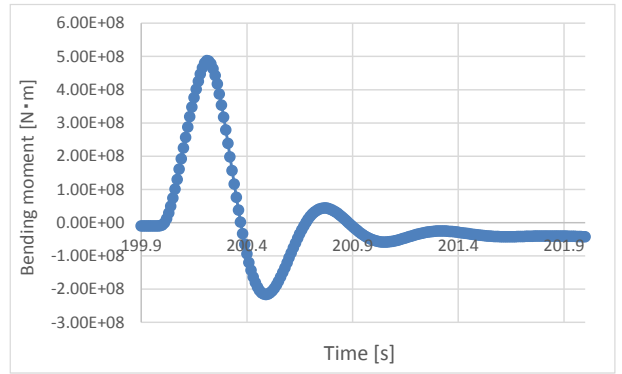


Fig.10 Bending moment of tower base when $C_s=30, V_r=6$ m/s, $\Delta t=0.2$ s and impulse force is square wave

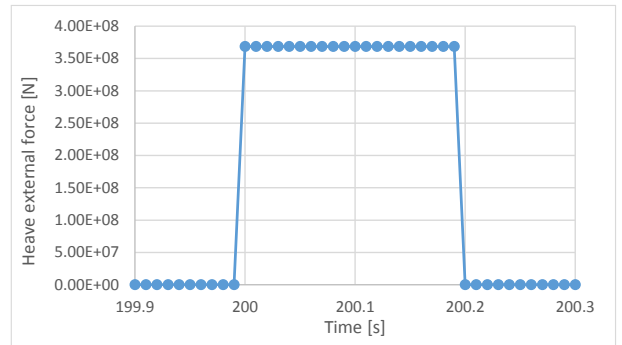


Fig.11 Impulse force when $C_s=30, V_r=14$ m/s, $\Delta t=0.2$ s and impulse force is square wave

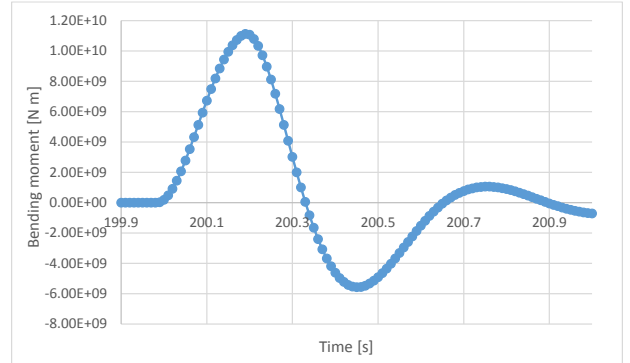


Fig.12 Bending moment of tower base when $C_s=30, V_r=14$ m/s, $\Delta t=0.2$ s and impulse force is square wave