

SIMA と OrcaFlex を用いた係留索挙動に着目した荷重連成解析

大成建設(株) 正会員 ○黒川 翔 佐藤 貴紀 石河 亮 白谷 宏司

1. はじめに

浮体式洋上風力発電設備基礎の設計は、復原力照査、ポテンシャル解析、荷重連成解析、三次元 FEM による構造解析および部材照査により仕様決定するという流れが一般的である。必要な荷重ケースは数万ケースに及ぶため、実務的にはこれらを一貫して実施できる解析プログラムが望ましく、当社では DNV 一貫解析プログラム群をそのツールの一つとして使用している。このうち荷重連成解析は SIMA を用いて実施する。

荷重連成解析は、風車と浮体、係留索等をモデル化し、風況条件の他に波浪条件を設定し、与えた波浪は浮体や係留索に作用し動揺する。係留索はその動揺を抑える効果があるため、適切な係留索解析モデルを設定する必要がある。そこで本論文では SIMA と係留索解析に対して定評のある OrcaFlex で同一条件の係留索解析を実施し、その結果を比較した。

2. 解析ソフトウェア

本論文では SIMA v4.4.00 (Det Norske Veritas Holding AS), OrcaFlex v11.3c (Orcina Ltd) の 2 種類の荷重連成解析ソフトウェアを用いて解析を行った。

3. 解析モデルおよび検討ケース

解析モデルは図 1 のように、係留索 1 本(チェーン、直径 0.16m、長さ 720m、分割数 120) をモデル化し、アンカー側を固定、浮体側には強制変位を作用させた。ここで潮流・波浪は作用させていない。

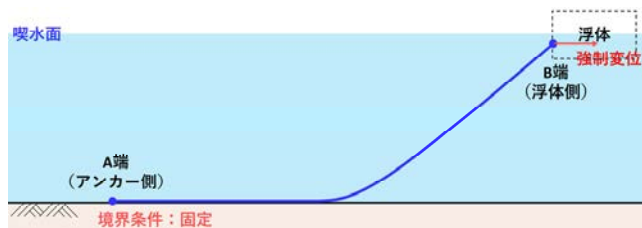


図 1 解析モデルイメージ図

キーワード SIMA, OrcaFlex, 荷重連成解析, 係留索

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1

大成建設(株) 土木本部 土木設計部 洋上風力設計室

TEL. 03-6882-0792 E-mail : krksu-00@pub.taisei.co.jp

解析ケースは以下の 2 種類を実施した。

- Task1 は一定速度で強制変位を作用させ、最終時刻の係留索張力分布および海底面摩擦の差異を理論¹⁾²⁾と解析結果を比較し確認した。
- Task2 では浮体動揺を模擬した強制変位を作用させ、係留索張力の時刻歴分布とタッチダウン位置の差異の検証を目的に SIMA および OrcaFlex で比較した。

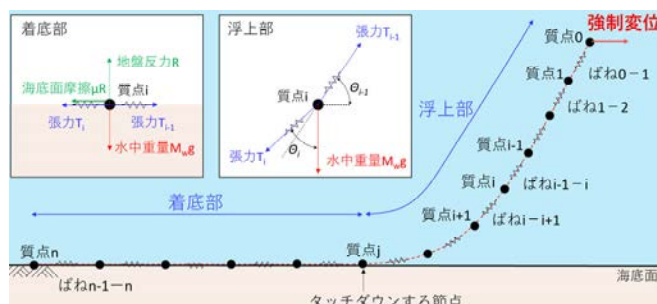


図 2 係留索の解析モデルと力のつり合い

4. Task1 の検証結果

Task1 では、係留索の浮上部に対するランプドマス法の計算(Task1-1)と、着底部に対する海底面摩擦の計算の検証(Task1-2)を目的に理論と解析結果を比較した。

Task1-1 : 浮上部の検証 (ランプドマス法)

ランプドマス法は係留索を微小長さに要素分割し、各要素の質点において、流体力を含む運動方程式を解く手法である。隣接する 2 質点間の力のつり合いは以下の式で合わされる。

$$T_i = \frac{T_{i-1}}{\cos(\theta_i - \theta_{i-1})} - M_w g \cdot \sin \theta_i$$

浮上部における張力分布を図 3 に示す。SIMA および OrcaFlex の解析結果はランプドマスの理論に基づく張力の算定結果と一致することが確認できた。

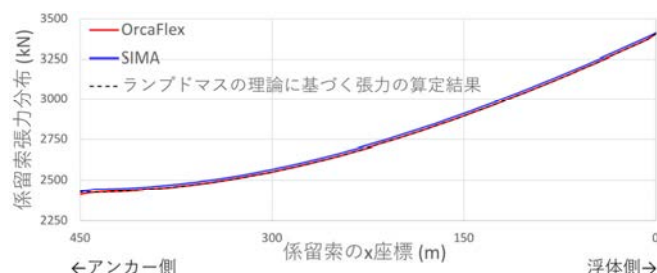


図 3 Task1-1 係留索浮上部の張力分布

Task1-2：着底部の検証（海底面摩擦）

着底部の検討では、図 2 に示した解析モデルの着底部のみを取り出し右端（B 端）の係留索軸方向に強制変位を作用させた。



図 4 着底部の検証モデル

着底部の単位長さ当たりの海底面摩擦 F は以下の式で算定される。

$$F = \mu R = \mu(b \times d \times k_n)$$

ここで、 μ は係留索と海底面の摩擦係数、 b は係留索と海底面の接触幅、 d は自重による沈下量、 k_n は鉛直方向地盤反力係数である。

係留索の接触幅 b については算定方法が不明であった。そのため算定方法の検証も合わせて実施した。接触幅 b の算定方法は表 1 に示す 2 手法が考えられた。

表 1 沈下量 d に対する接触幅 b の関係

		手法 1	手法 2
係留索の沈下量と接触幅のイメージ図			
		$b = 2\sqrt{r^2 - d^2}$	$b = 2r$
接 触 幅 b	計算思想	沈下量に依存 (2 パターン)	沈下量によらず一定値 (直径)
	$d < r$	$b = 2\sqrt{r^2 - d^2}$	$b = 2r$
	$d \geq r$	$b = 2r$	

検証結果を表 2 に示す。なお検証は 2 種類の地盤反力係数で実施し、沈下量による接触幅 b の算定方法の検証した。

検証の結果、地盤反力係数によらず一致したため、接触幅は沈下量によらず係留索直径としていることが確認できた。SIMA, OrcaFlex の解析結果および理論計算の比較においても一致していることが確認できた。

表 2 Task1-2 係留索着底部の海底面摩擦力

想定地盤 (砂地盤)	地盤反力 係数 [kN/m ²]	海底面摩擦力[kN]		
		解析結果		理論 計算
想定 N 値		SIMA	OrcaFlex	
N 値 = 0	1.0×10^2	265	265	265
N 値 = 30	1.0×10^5	265	265	265

Task1 では、係留索張力に対して、算定方法の確認および両ソフトの解析結果の比較を実施した。浮上部・着底部の計算方法は両ソフトで一致することが確認できた。

5. Task2 の検証結果

Task2 では浮体動揺を模擬した強制変位を作用させ、係留索張力の時刻歴分布とタッチダウン位置（着底部と浮上部の境界位置）の差異の検証を目的に SIMA および OrcaFlex を比較した。

浮体動揺を模擬した強制変位として、係留索が完全に浮き上がる状態を評価できるよう、サンプルとして使用した浮体動揺量（50 年確率の気象・海象条件を想定した 15MW 級風車の浮体における試験検討）の surge, heave, pitch を 5 倍に割り増したものを使用した。地盤反力係数は Task1-2 の $1.0 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ で実施した。

係留索張力の時刻歴分布と節点のタッチダウン数（着底している係留索の長さ）を図 5～図 7 に示す。グラフは解析時間 3600s のうち、係留索張力最大付近の 100s を抜粋した。

係留索張力は浮体側、アンカー側ともに 5%以下の精度で一致することが確認できた。またタッチダウン数も概ね一致することが確認できた。

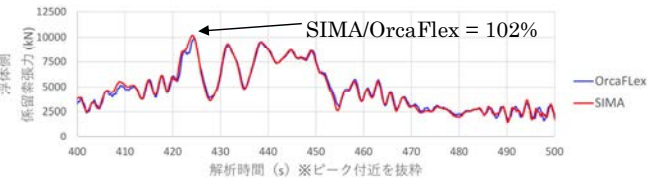


図 5 浮体側係留索の張力時刻歴グラフ

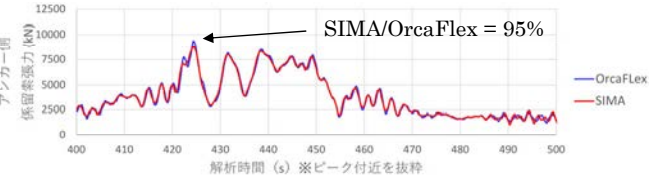


図 6 アンカー側係留索の張力時刻歴グラフ

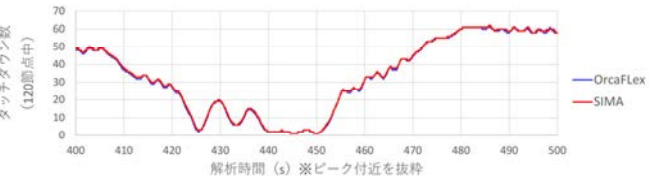


図 7 係留索のタッチダウン数（120 節点中）

6. まとめ

本論文では異なる荷重連成解析ソフトウェア SIMA および OrcaFlex を用いて係留索解析の結果を比較した。係留索張力とタッチダウン位置は概ね一致することが確認できた。

参考文献

- 1) OrcaFlex Help (<https://www.orcina.com/webhelp/>)
- 2) RIFLEX theory / user manual