

OW_10

離岸風力發電支撐結構之安全性分析

Security Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines

簡志宇¹、林宗岳²、吳凱洋²、范秉天²、黃心豪^{1*}

¹ 國立台灣大學工程科學暨海洋工程學系

Zhi-Yu Jian¹, Tsung-Yueh Lin¹, Yann-Quemener¹, Bryan Nelson¹, Hsin-Haou Huang^{1*}

¹Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

²Department of the CR Classification Society

hsinhaouhuang@ntu.edu.tw

摘要

近年來綠色能源越來越被重視，而風力發電占有相當的比例，穩定風場的腹地與噪音問題為考量重點，所以離岸風電成為一個解決方法。本研究計畫主要係探討四種離岸風力桁架支撐結構，建造在台灣海峽時的安全性分析，比較結構強度與二十年運行時間內結構疲勞壽命預估。利用有限元素軟體，建立四種高度適合台灣海峽的支撐結構。藉由時域性分析取得應力訊號，利用雨流記數法計算應力範圍，並且依據 DNV 規範計算應力集中係數與 S-N 曲線，經由 Palmgren-Miner 理論計算破壞率，即可得到預估疲勞壽命。本研究也比較台灣颱風狀況下，四種支撐結構強度比較，並且探討考量慣性效應與否的差別。

關鍵詞：離岸風力發電、安全性分析、破壞率、疲勞壽命

Abstract

People placed great emphasis on the Green Energy recently, and wind power had a place, steady wind and noise were an important issue, so offshore wind turbine became a solution. In this research, we discussed the security analysis for four kinds of jacket substructures for offshore wind turbines which was constructed in Taiwan Strait, comparing the structure strength and fatigue life in the 20 years of operation. Four models which were suitable for Taiwan Strait were created in the finite element analysis software. Time-domain analyses were conducted for the stress, and calculated stress range by Rainflow-Counting and obtained stress concentrate factor and S-N curve by DNV Standard, so we could get cumulative Damage by Palmgren-Miner's rule and fatigue life. The research also compared the structure strength of this four structure in the typhoon condition with and without inertia effect.

Keywords: Offshore Wind Turbine, security, cumulative Damage, Fatigue life

I. 前言

近幾年，台灣積極的推動離岸風力發電的發展，預計在 2017 年將會由台電、永傳、上緯三家公司完成兩台示範風機，並且在 2030 年完成 400 架陸上風機與 600 架離岸風機，使得總產能達到 4000MW，然而台灣離岸風機處於剛起步階段，仍有相當多議題尚未探討，在台灣又有颱風之極限狀況，若結構發生損壞，離岸維修工程不僅困難繁雜，且費用亦相當龐大，基於成本與人身安

全，離岸風機支撐結構之穩定性成為一考量重點。本研究取得永傳能源公司建立在台灣海峽西岸的四層桁架式支撐結構尺寸，並挑選文獻中三種表現較佳的結構，在相同高度尺寸、相似重量的假設下，建立有限元素模型模擬並比較，以期望未來在台灣西岸建立離岸風機時，能針對支撐結構找出較佳的結果，維持離岸風機預期運行時限內的安全性。

II. 研究方法

本研究根據永傳能源公司(TGC)的 3.6MW 四層桁架式支撐結構尺寸(如錯誤! 找不到參照來源。)，在支撐結構分析的文獻[1]中，共分析了 14 種 66 公尺高的桁架式結構的應力表現與扭曲分析，從中挑選一種較佳的四腳式傳統桁架式結構 JK、與兩種三腳式桁架結構，分別是美國專利式結構 TJ30 新式結構 MJ30，比較四種結構強度。並且計算接點的應力集中係數，利用接點應力計算破壞率。

2.1 模型建立

依照永傳能源所設計，在 Abaqus 中建構了高度 39.22 公尺，重量 300 公噸的有限元素模型(如圖 1)，適用台灣海峽水深的桁架式支撐結構。

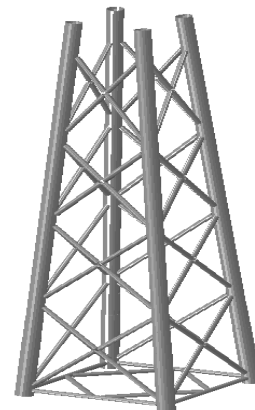


圖 1 永傳(TGC)的離岸支撐結構

在相同高度與相近重量的假設下，建立 JK、TJ30 與 MJ30 的結構(如圖 2)，以永傳的結構重量 301 公噸做為參考，在設計階段中，三種結構重量相差在 10% 以內，在此假設下比較結構強度。

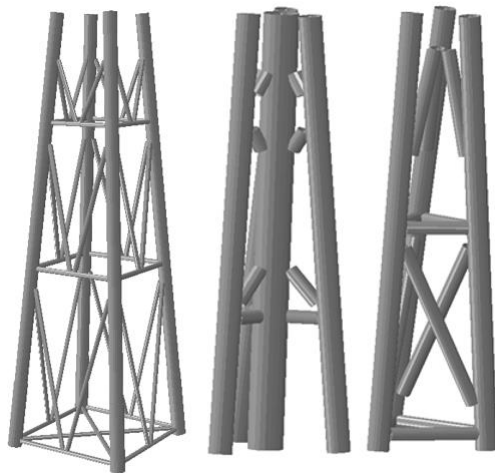


圖 2 三種 3.6MW 支撐結構建模

四種結構總重量與桿件數目如表 1，可以看出四腳式結構(TGC、JK)的桿件與接點數目高出三腳式支撐結構(TJ30、MJ30)許多。結構之疲勞常常位於焊接點處，故減少焊接點的數量能夠減少結構發生疲勞破壞的機會，此外焊接在工程上需要額外程序使施工價錢上升，因此接點數越少越有利於建造工程。

表 1 四種結構重量與桿件數目比較

Jacket Structure	TGC	JK	TJ30	MJ30
Weight(tonne)	301.23	300.99	317.30	308.98
Braces	72	40	12	12
Joints	144	80	24	24

2.2 負載狀況

為分析之稱結構安全性，因此考量颱風狀況風負載與水負載，檢驗極限狀況之結構應力表現是否低於材料之降伏強度。風機組依照分級而能承受不同的停機風速，在設計階段，選定停機平均風速為 50m/s 的風機組作為極限狀況的模擬，在 IEC-61400-3 Standard[引用]中規定陣風因子為 1.4，即針對平均風速為 50m/s 的風況，所考量陣風風速為 70m/s，在本篇颱風狀況的進行了 38 秒短時域模擬，皆採用 70m/s 施加進行短時間模擬。而波浪浪高為 14.8m、周期 12.7s，負載參數如表 2。

表 2 風與水負載參數

平均風速	陣風因子	陣風風速	波高	波浪周期
50m/s	1.4	70m/s	14.8m	12.7s

當環境負載施加在桁架式支撐結構上時，需要考量的因素太多，像是各種負載的施加方式，或是各部位桿件受力的方向性等等。這些因素會造成在用有限元素軟體模擬的過程中產生很多複雜性的結果。因此，本論文為了簡化 ABAQUS 模擬分析，將環境負載中的風、波浪和水流的負載依據 DNV-RP-C205[2]規範方式去簡化成同一個單一方向的負載力。本文在負載分析中主要會

施加 3 種負載(塔架重量負載，風負載以及水負載)，而在風負載中又會區分成 2 種：風機組風負載(Wind turbine load)等效成一點集中力施加在風機塔柱頂端，風機塔柱負載(Wind tower load)則以線負荷方式，依照風機塔柱所在高度與管徑大小分五段施加，如圖 3 所示。並且在颱風狀況模擬中，為了得到最極限狀況，以支撐結構對角方向施加，使得支撐結構單腳架在後。

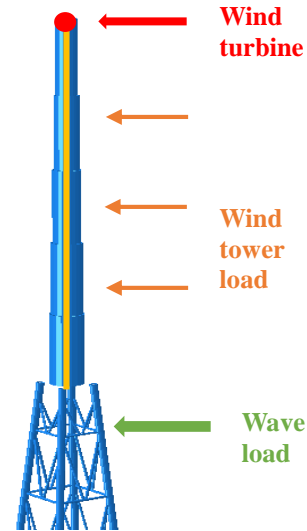


圖 3 負載施加示意圖

2.3 破壞率

在經由動態模擬後，除了最大應力值是否高於降伏強度，破壞率(Damage)是用以判斷結構是否因為應力範圍而產生疲勞，當破壞率值到達 1 表結構破壞，依照 Palmgren-Miner 線性破壞率假設，破壞率[3]定義如下：

$$\sum D_g = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

其中 n_i 為實際循環次數

N_i 為 S-N 疲勞曲線理論循環次數

式(1)中的 n_i 經由 Rainflow-Counting 計算，處理雜亂的應力-時間訊號，可整理出各組應力範圍(stress range)與其循環次數(n_i)，而 N_i 則由疲勞公式所得，如式(2)。

2.4 S-N curve 與焊接效應

依照 DNV Standard(DNV-RP-C203)，疲勞公式對於應力與循環次數關係的定義如下：

$$\text{Log}(N) = \text{log}(\bar{\alpha}) - m \text{log}(S_a) \quad (2)$$

其中 S_a 為應力範圍

N_i 為 S-N 疲勞曲線理論循環次數

$\bar{\alpha}$ 與 m 為疲勞曲線參數

當考慮結構型態或所處環境不同時， $\bar{\alpha}$ 與 m 兩參數會隨之改變。最容易發生疲勞的位置為焊接點處，在 DNV-RP-C203 APP.A[4]中定義所有 Tubular joint 皆使用 T-curve，此曲線假設接點狀況皆完全滲透焊接(full penetration welded)，因此已考慮焊接狀況。針對 T-curve 共有三種狀況，分別是當接點位於：空氣中、海水中與陰極保護法的海水中，隨著支撐結構處於不同位置而帶入不同參數，相同應力範圍，在海水的情況所得到疲勞壽命會較低。

表 3 不同環境下的 S-N curve

S-N curve	$N \leq 10^7$		$N \geq 10^7$	Fatigue limit at 10^7
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$m_2 = 5$ $\log \bar{a}_2$	
Air	3	12.164	15.606	52.63
Seawater with cathodic protection	3	11.764	15.606	52.63

經由式(1)與式(2)所得破壞率，將應力訊號持續的時間除以破壞率，即可得預估疲勞壽命，若疲勞壽命公式[3]如下。

$$T = \frac{T_0}{D} \quad (3)$$

其中 T_0 為應力訊號時間

T 為預估疲勞壽命

D 為破壞率

2.5 應力集中

經由梁元素動態模擬會得到應力-時間關係圖，所得到的應力為 nominal stress，在考量幾何不連續而產生應力集中現象，因此將 nominal stress 乘上 S.C.F. 得到 hot spot stress[5]，而接點焊接產生的焊接應力，則已考慮在 T-curve 之中。

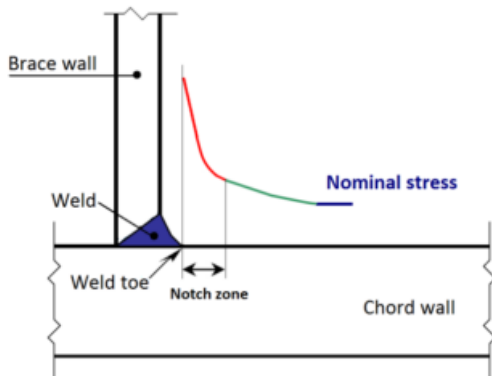


圖 4 應力集中與缺口效應

依照 DNV-RP-C203 APP.B，可計算出各種接點型式與幾何尺寸下的應力集中係數(S.C.F.)，若要計算接點處應力值，則需要考量。

III. 模擬結果

3.1 模擬結果

針對極限狀況進行了靜態與動態時域模擬。動態模擬時間為 38 秒，圖 6 為一節點的波浪負載，前 5 秒用意為緩慢施加負載的預力階段(preload)，在 0 到 5 秒之間負載由 0 緩慢增加到 1 倍初始負載，避免快速施力而產生震盪現象，導致 response 過大。因此 5 到 43 秒此 38 秒訊號才是所要訊號。風負載在 0-5 秒也採用預力階段，5 秒到 43 秒維持 70m/s 的相同風速。

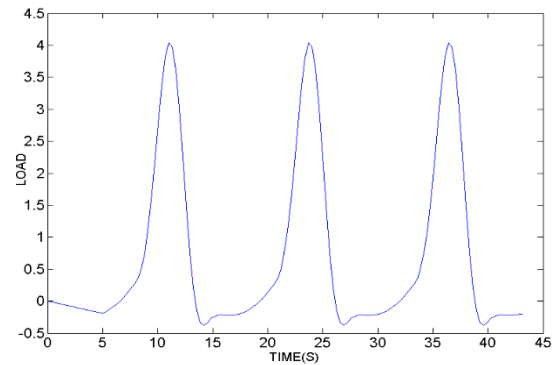


圖 5 一節點波浪負載

3.2 靜態模擬結果

靜態模擬施加負載為前述動態模擬中，負載峰值的時刻點，左上為 TGC 結構、右上為傳統式 JK 結構、左下為 TJ30 結構、右下為 MJ30 結構，風與水負載皆為左往右(如圖 3)，最大應力值皆出現在背負載側(右方)的單獨支撐腳架的底部，最大應力值如表 4，材料降伏強度為 355MPa，兩種三腳式支撐結構腳架底部最大應力皆超過降伏強度，在四種結構的颱風狀況中，四腳式支撐結構最大應力值較低。但因為美國專利式結構 TJ30 並未公布詳細尺寸，在細部尺寸修改後可能會優於目前結果。

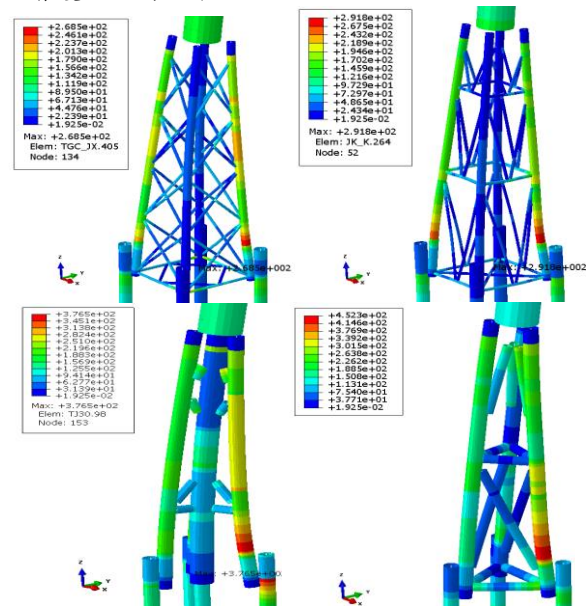


圖 6 颱風狀況靜態模擬最大應力值

表 4 靜態模擬最大應力值

支撐結構	TGC	JK	TJ30	MJ30
最大應力(MPa)	268	291	376	453

3.3 模態分析

結構自然振動頻率與結構的邊界條件、結構型態有關，若自然振動頻率與負載頻率相近，則可能產生共振現象，造成應力響應增加，而造成結構安全性的問題，並且使疲勞壽命下降。表 5 為此四種結構之振動頻率，第一模態(mode 1)頻率皆落在 0.3-0.4HZ 之間，與自然界負載之週期相近，為考慮動態效應需要作動態分析。

表 5 結構自然振動頻率

支撐結構	TGC	JK	TJ30	MJ30
Mode 1	0.37	0.37	0.31	0.31
Mode 2	0.37	0.37	0.31	0.331
Mode 3	1.69	1.49	1.39	1.42
Mode 4	1.69	1.49	1.39	1.42
Mode 5	4.27	3.16	3.59	3.76

3.4 動態模擬結果

為考量動態效應並且為了取得應力-時間關係，以進行破壞率的計算，因此需要進行動態模擬，進行 38 秒動態極限狀況模擬，經過動態模擬，以 JK 支撐結構模型為例，最大應力值出現位置與圖 6 相同，此處動態訊號 stress-time 如圖 7 所示紅色圓點標出波峰與波谷，最大應力值為 307MPa，略高於靜態分析相同位置的 291MPa。

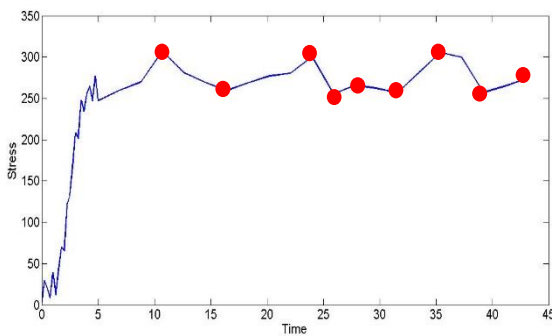


圖 7 JK 腳架底部動態模擬應力值

因前 5 秒為預力(preload)階段，因此只取出 5 到 43 秒進行破壞率分析，因為在腳架底部因此沒入海水之中，採用疲勞曲線 T-curve 中「陰極保護法的海水中」的參數。由 Rainflow-Counting 將圖 7 整理出 stress amplitude 與 cycles 關係如表 6，其中 stress amplitude 為 stress range 的一半。

表 6 應力與循環次數

Stress amplitude (MPa)	cycles
4.55	1
8.21	0.5
20.49	1
24.17	0.5
25.13	0.5
25.81	0.5
29.75	0.5

計算出此 7 組 stress amplitude 訊號所造成的各別破壞率如圖 8，加總後可得 38 秒颱風狀況動態模擬，對於 JK 支撐結構腳架底部處的破壞率總合為 3.13×10^{-8} ，因破壞率達到 1 才發生破壞，在極限狀況出線機率低的情況，可以知道颱風對於疲勞壽命造成的影響不大。

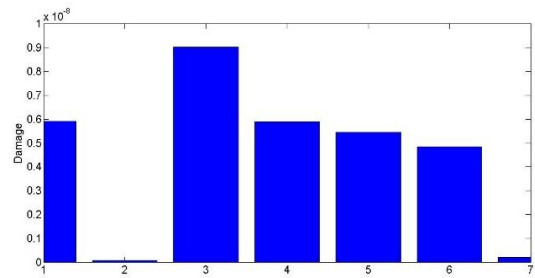


圖 8 各組 stress amplitude 所造成破壞率

3.5 風與水負載比較

以 TGC 支撐結構為例，分兩種情況探討極限狀況風負載與水負載對結構造成的最大應力。單獨施加 70m/s 風負載，並且進行動態模擬可發現最大應力值為 248MPa 如圖 9 紅圈處，發生在腳架的底部。而單獨施加水負載在紅圈處相同位置的應力值為 12MPa，對於腳架底部的應力值影響較小，應力值影響較大的位置出現在底部橫桿件框架處，由水負載所貢獻的最大應力值為 64MPa，由此可得知在颱風狀況下，水負載為主宰負載(Dominating Load)。

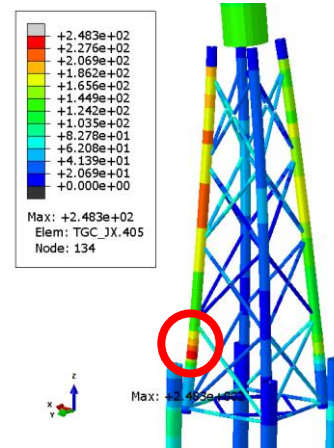


圖 9 只施加風負載-TGC 結構

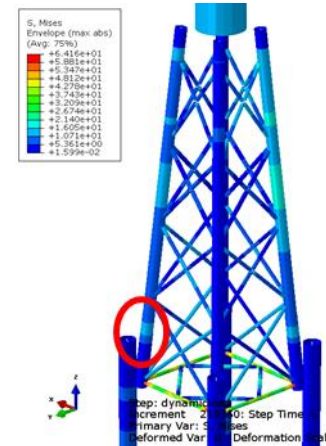


圖 10 只施加水負載-TGC 結構

IV 結論

經由台灣海峽颱風狀況研究狀況，可以得到四種結構強度之比較，並針對極現狀況作初探討。

- I. 四種結構在施加風與水負載為同方向時，四腳式支撐結構最大應力值出現在腳架底部，且四腳式表現較佳。

- II. 經由模態分析，支撐結構的第一自然頻率介於0.3HZ到0.4HZ之間，與自然界負載相近，因此需要作動態分析。
- III. 極限狀況破壞率遠低於1，並且因為出現次機率低，因此對於疲勞損壞影響較小。
- IV. 在極限狀況風負載為主宰負載，對於應力值影響高於水負載，且水負載造成扭矩，因此主要影響位置在底部橫桿件框架處。

V 參考文獻

- 1. Chen, I.-W., et al., *Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines*. Energies, 2016. **9**(4): p. 264.
- 2. *DNV-RP-C205-Environmental Conditions and Environmental Loads*. 2011.
- 3. Nieslony, A., *Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009. **23**(8): p. 2712-2721.
- 4. Veritas, D.N., *Fatigue design of offshore steel structures*. No. DNV-RP-C203, 2010.
- 5. 廖柏凱, *大型貨櫃輪波振效應之探討*. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 2014: p. 1-97.