



考慮雙向流固耦合效應之 單樁式離岸風力機支撐結構 受地震作用之分析與探討

國立臺北科技大學土木系碩士生 / 余佩萱
國立臺北科技大學離岸風電專案辦公室經理 / 蘇進國
國立臺北科技大學離岸風電專案辦公室經理 / 許琦偉
國立臺北科技大學工程學院院長 / 宋裕祺

關鍵字：單樁式離岸風力機、雙向流固耦合、Ansys Fluent

一、前言

自二十一世紀開始，能源議題成為全球至關重要的問題之一，各國家及產業都在積極尋求安全且穩定的再生能源，能源轉型勢必為長期仰賴進口能源的臺灣必經之路。臺灣擁有得天獨厚的良好風場能夠發展離岸風電，離岸風力機之動力分析有關海洋環境一般是使用附加質量法模擬之，該法為半經驗公式具有計算速度快速之優點，但是否能夠有效模擬流體之回授效果仍有待商榷，更遑論是否能夠準確計算上部結構體的振動反應，有鑒於此，本文將考量雙向流固耦合（Fluid-Structure Interaction, FSI）效應，探討海水對離岸風力機與其支撐結構有關流場

變化回授結構之影響，並將其應用於單樁式離岸風力機支撐結構受地震作用之分析。

二、研究背景

全球平均溫度逐年上升，氣候變遷之問題陸續於各國發酵，2015年12月12日聯合國氣候高峰會通過巴黎氣候協定，希望各國共同遏阻全球暖化趨勢，如何兼顧經濟發展與生態永續成為各國重要的課題，綠色能源勢必為未來驅動經濟發展的新引擎，目前離岸風電為各國積極發展的再生能源之一，依據4C Offshore提供的「23年平均風速觀測」全球風況最好的20處觀測點，有16處場址位於臺灣海峽上，臺灣擁有得天獨厚之良好風場能夠發展離岸風



電。以往我國能源高度依賴進口，為提升能源自主及響應節能減碳，臺灣正進行能源轉型政策，計畫於2025年前再生能源發電佔比達整體20%，有鑑於此，為追求更穩定之風能且避免造成環境視覺的衝擊，國內風力機逐步由陸域延伸至離岸海域，離岸風電遂成為積極開發之重點，中央與地方攜手共推綠電，目標於2025年達到5.7 GW的風電容量，2026年-2035年間風電發電容量超過10 GW，目前我國已於2019年底商轉第一座風場，該風場為海洋竹南風力發電場 (Formosa 1) 位於苗栗外海，使用單樁式基礎。

離岸風力機於設計階段應考量各種環境載重情況，如圖1所示，水平軸代表外力載重頻率範圍；垂直軸代表風速能量頻譜密度 (Power Spectral Density, PSD)；1P為風力機輪轂轉動頻率 (Rotor frequency)；3P為葉尖轉動頻率 (Blade passing frequency)；使用1P與3P做為振動頻率之區分，風力機結構

自然頻率低於1P時屬於SOFT-SOFT設計，其階段之結構撓曲勁度不足，且為大多大氣紊流與波浪作用之頻率範圍，若落於此範圍，將可能導致風力機產生過大之軸向變形，故於設計階段應避免此範圍；介於1P至3P間為SOFT-STIFF設計，為最佳之設計目標亦符合成本考量；大於3P範圍則屬於STIFF-STIFF設計，風力機勁度過大建造費用過高將不符合成本考量。

目前國內外支撐結構設計多半無考量流體空間變化對結構之影響，忽略雙向流固耦合效應之流體消散能量的效應，將可能高估上部結構體之振動反應，形成過於保守之簡化設計。本文將介紹雙向流固耦合效應對離岸風力機自然頻率影響，避免海洋環境之外力載重頻率過於接近風力機自然頻率，以致支撐結構因共振效應產生巨大損傷。此外亦將討論單樁式離岸風力機支撐結構受地震作用之分析。

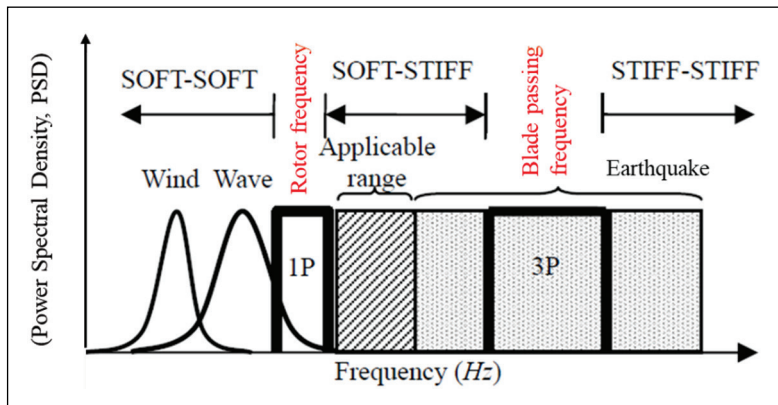


圖 1 離岸風力機結構功率頻譜密度示意圖 [1]

三、研究方式

流固耦合(fluid-structure interaction)涵蓋固體力學與流體力學之知識，隨著電腦科技之蓬勃發展，目前已有多套流體力學模擬分析軟體(Computational Fluid Dynamics, CFD)計算多項流(multiphase flow)問題，其多項流是指一系統中同時包含兩種或兩種以上之不同狀態的物質流動現象，且物質間具有介面，當不同性質的物質相互接觸時，接觸面的不連續性將產生介面自由能(interface free energy)，本文之多項流問題為兩項流系統中的氣液系統，其介面自由能為表面張力(Marangoni effect)，但介面隨著時間移動，故採用流體體積法(volume of fluid, VOF)技術追蹤整個系統下各物質的體積分率(volume fraction)，以有效又精確預測介面位置，該法適用於求解分層流和需要追蹤自由液面之問題，例如：空氣與液體無法相互參混的流體流動，如圖2所示，數字1代表該部分體積為滿水狀態；數字0代表該部分體積為滿氣狀態，數字介於兩者間則代表介面位置。

流固耦合一般可分為單向及雙向，單向流固耦合忽略結構變形對流場空間的改變，計算上較簡化快速，雙向流固耦合則考量結構變形對流場空間造成的影響，而流體之水壓再返回影響結構，故計算上較繁瑣，目前相關的商業分析軟體有ANSYS、COMSOL、GDS Studio與ABAQUS等，本文使用Ansys

Fluent之三維流體力學分析軟體計算多項流場搭配Mechanical 結構分析軟體建立雙向流固耦合模型，如圖3所示。

雙向耦合求解器(System Coupling)將流體分析之應力變化資料傳遞轉換影響結構物，而結構物之位移變化資料再返回影響流場，計算雙向流固耦合之效應，如圖4所示，流場將計算新的應力變化並調整網格大小(圖5)以確實追蹤其自由液面提升計算精度，並真實模擬流體阻力對結構物之影響，有別於以往之附加值量模擬。ANSYS FLUENT的動態網格適用於模擬多項流場隨時間改變之移動介面，將基於納維-斯托克斯方程式(Navier-Stokes equation)，以積分形式定義物質間相互作用的邊界移動方程式，如式(3.1)所示， ϕ 代表流體流速的速度位； V 代表任意控制體積。 ρ 代表液體密度； \vec{u} 代表

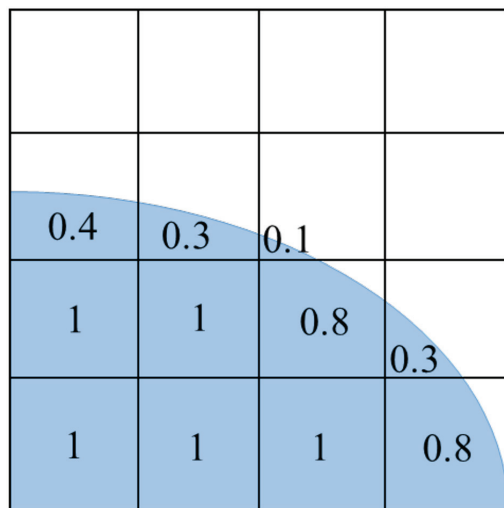


圖 2 有限體積法之體積分率示意圖



圖 3 ANSYS 雙向流固耦合設定介面

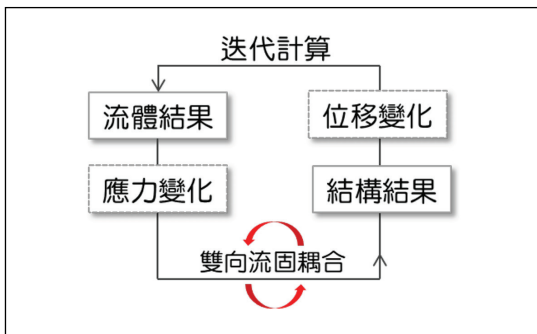


圖 4 雙向流固耦合

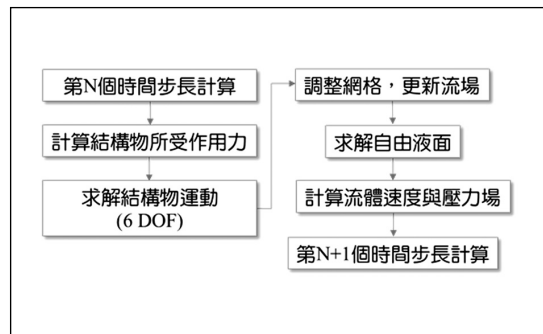


圖 5 流固耦合動態網格計算流程

流速向量； \vec{u}_g 代表移動網格向量； Γ 代表擴散係數，FLUENT 使用六自由度 (6 DOFs) 求解器進行暫態分析，依據新的邊界位置更新網格樣式，動態網格共有三種方式模擬，分別為動態層法 (Layering)、彈簧比擬法 (Spring Analogy)、局部網格劃分法 (Local Remeshing)，如圖6所示，動態層法係依據

邊界的移動量動態的增減邊界上網格層之技術，其法適用於六面體網格、楔型網格等可於邊界上分層之網格系統；彈簧比擬法之網格系統可視為各節點利用彈簧相互連接之網格系統，初始系統為系統保持平衡的彈簧網路系統，任一網格節點的位移都將導致相互連接之彈簧產生彈性力，進而使鄰近網格點

無法力平衡，須經由反覆迭代使網格系統達到力平衡，計算新的變形後網格系統；局部網格法為彈簧比擬法之補充，若邊界之移動和變形過大，將使局部網格產生畸變或自穿透之體積為負情形，該法將初始網格經由彈簧比擬法變更之新網格利用局部網格法重新劃分。圖7為雙向流固耦合研究成果之網格變化。

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\bar{u} - \bar{u}_v) \cdot d\bar{A} = \int_V \Gamma \nabla \phi \cdot d\bar{A} + \int_V S_\phi + dV \quad (3.1)$$

四、案例分析

研究使用之數值分析模型係依據美國國家再生能源研究室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）所開發的開源軟體FAST V8，其中，結構線彈性（ElastoDyn）檔案提供5MW發電容量的單樁式基礎（monopile）離岸風力機相關尺寸參數建立模型，如表1所示。本文針對支撐結構之分析，故風力機輪轂、機艙與葉片等

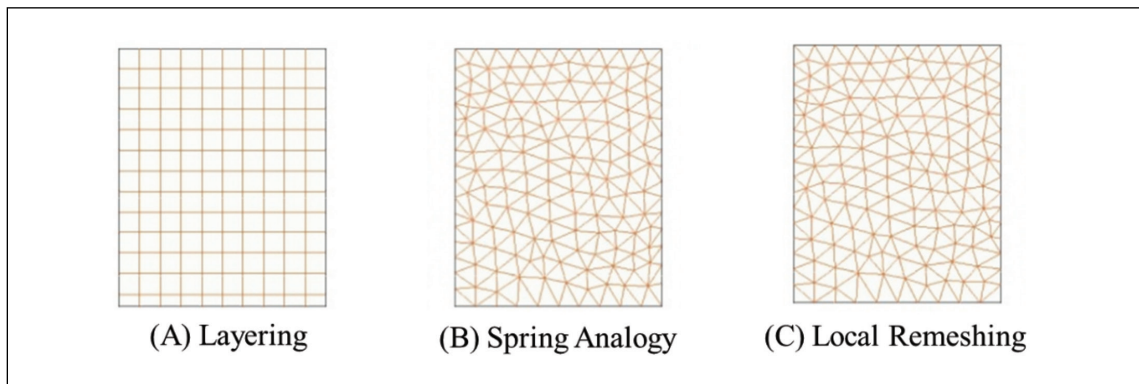


圖6 動態網格法

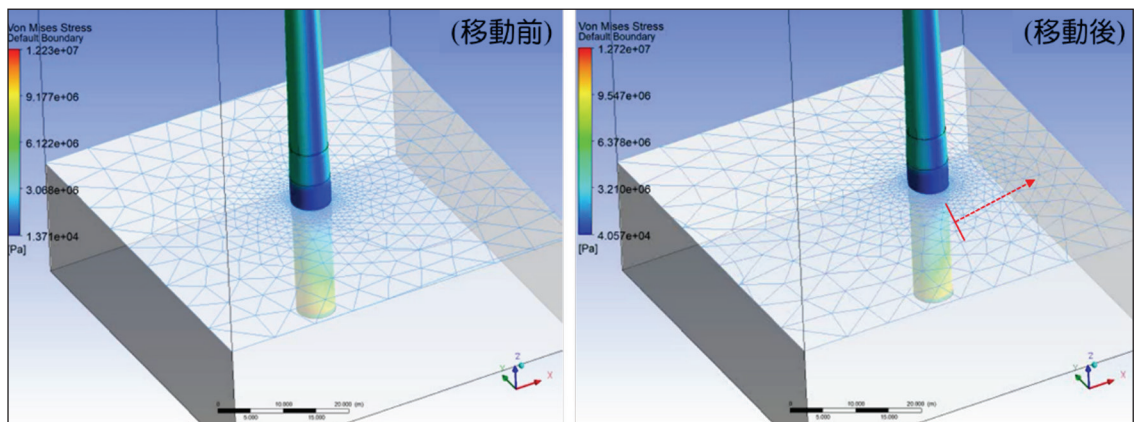


圖7 雙向流固耦合之動態網格



表 1 單樁式離岸風力機模型參數

項目	參數
輪轂高度 (m)	90
水平面上塔架高度 (m)	87.60
葉片加轉子質量 (kg)	110,000
機艙質量 (kg)	240,000
水深 (m)	20
上部塔架厚度 (m)	0.019
上部塔架直徑 (m)	3.87
下部塔架厚度 (m)	0.027
下部塔架直徑 (m)	6

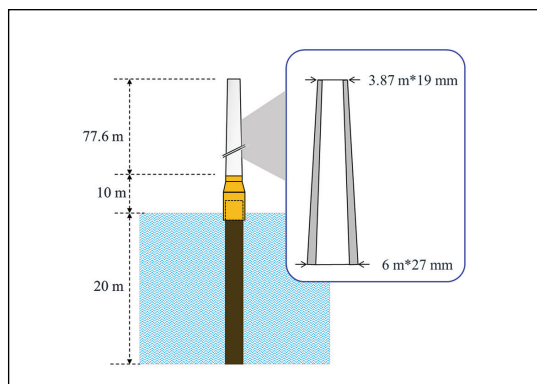


圖 8 單樁式離岸風機尺寸示意圖

將使用質量球模擬並考量其偏心與轉動慣量以簡化模型，並模擬該風力機於水深20公尺處。塔架（圖8）與基礎之材料為鋼，其材料特性之楊氏係數為 210×10^6 kPa，剪力係數為 80.8×10^6 kPa，密度為 $8,500 \text{ kg/m}^3$ ；轉接段（圖9）與基礎間之空隙將灌漿填滿，其水泥砂漿楊氏係數為 70×10^6 kPa，剪力係數為 29.412×10^6 kPa，密度為 $2,740 \text{ kg/m}^3$ 。流場尺寸係依據結構高度決定，本研究之流場尺寸取其高度為結構體高度之兩倍；寬度約結構體高度之三倍，如圖10所示。表2為結構自然頻率之驗證，確認結構模型正確後，再進行雙向流固耦合之分析研究。

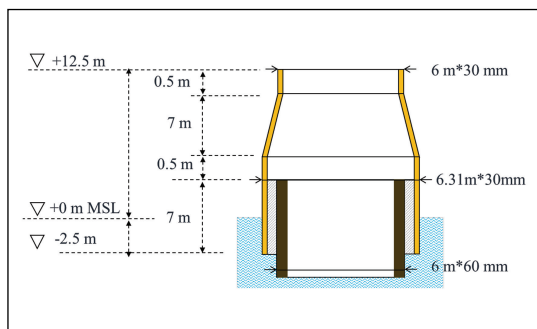


圖 9 轉接段尺寸

本文將考量一近斷層歷時作為動態外力進行分析，使用2016年美濃地震資料第63號測站東西向地表加速度視為風力機底部海床之加速度歷時資料如圖11所示。

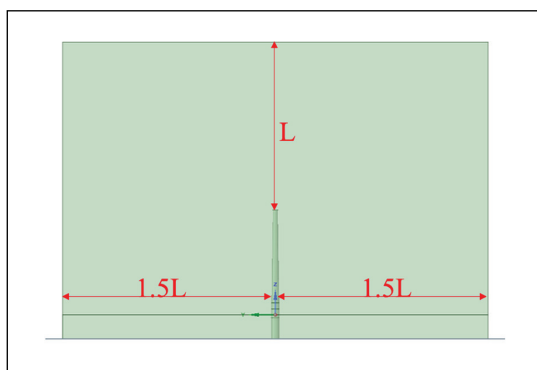


圖 10 流場與風力機結構體示意圖

地震力加載狀態下是否考量雙向流固耦合之塔底位移比對如圖12所示，藍色實線代

表無考量雙向流固耦合；綠色虛線代表已考量流固耦合，於第一波峰相差5.9公分，第

表 2 結構之自然頻率

自然頻率 (Hz)	ANSYS (本文)	文獻	差異 (%)
第一振型 - 前後	0.276	0.277	-0.36
第一振型 - 左右	0.278	0.278	0
第二振型 - 前後	1.592	1.573	1.207
第二振型 - 左右	1.859	1.838	1.142

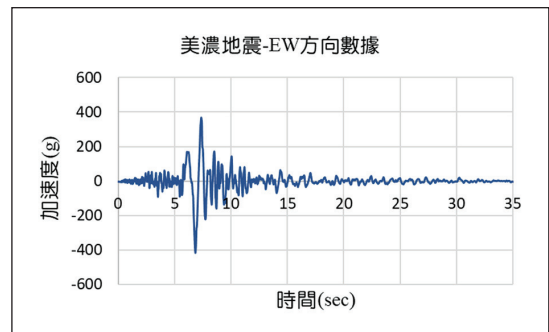


圖 11 風力機底部海床之加速度歷時資料

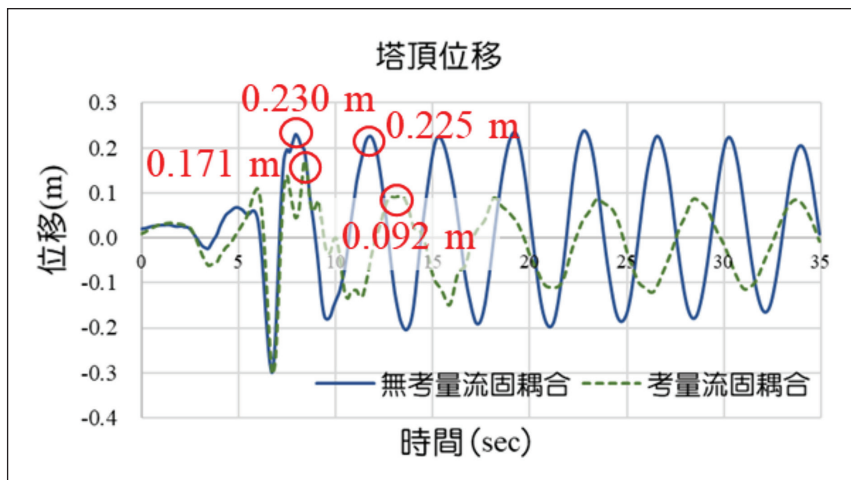


圖 12 有無考量流固耦合之塔頂位置位移

二波峰相差13.3公分，利用快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 計算地震作用狀態下之頻率，計算結果顯示考量雙向流固耦合之頻率為0.1953 Hz，無考慮流固耦合狀態之頻率為0.2604 Hz，證實雙向流固耦合吸收能量與降低頻率之效果。

五、未來展望

我國正處於能源轉型與自主之階段，近

年來離岸風力機新興產業成長下，政府積極推動離岸風機在地化，培育本土產業鏈以期將技術國產化提升能源自主，目前國內外之離岸風力機支撐結構設計多半忽略流體空間變化對結構的影響，而使用簡化之附加質量法取而代之模擬海洋環境，但該法無法獲得風力機真實之自然頻率，未來可透過本文介紹之雙向流固耦合流程建立一套分析方法，並分析專屬於臺灣的本土數據，反饋於國內開發離岸風力機之顧問公司，提供合適臺灣



海岸環境之相關分析與參數，邁向風機產業國產化。

參考文獻

1. Schauman, P, "Einführung offshore wind-energieanlagen," Fachveranstaltung im Haus, Essn, Germany, 2008.
2. Bonnie Jonkman and Jason Jonkman, "FAST v8.16.00a-bjj," National Renewable Energy Laboratory, 2016.
3. Sezawa, K. and Kanai, K., "Decay in the Seismic Vibration of a Simple or Tall Structure by Dissipation of Their Energy into the Ground," Bulletin of the Earthquake research institute, pp. 698-714, 1935.
4. Theo Gentils, Lin Wang and Athanasios Kolios, Integrated Structural Optimisation of Offshore Wind Turbine Support Structures Based on Finite Element Analysis and Genetic Algorithm, Cranfield, 2017.
5. "Recommended Practice for Compliance of Large Land-based Wind Turbine Support Structures," ASCE/AWEA RP2011, 2011.
6. "Support structures for wind turbines," DNV GL-ST-0126, 2018.
7. "Wind turbines-Part 3 : Design requirements for offshore wind turbines," International Electrotechnical Commission, 2009.
8. API(American Petroleum Institute), Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 2002.