



# 離岸風力發電 場址調查 及 設計技術指引、資料庫平台 及 固定式支撐 結構分析軟體 研發簡介

宋裕祺\* / 國立臺北科技大學土木工程系 特聘教授 暨 離岸風電工程研究中心 執行長

蘇進國 / 國立臺北科技大學離岸風電工程研究中心 計畫經理

劉小勤 / 國立臺北科技大學離岸風電工程研究中心 計畫副理

盧明德 / 維三企業有限公司 總經理

陳儀諺 / 國立臺北科技大學土木工程系土木與防災研究所 博士生

國立臺北科技大學自 109 年開始接受經濟部標準檢驗局之委託，攜手國內大專院校、研究中心及工程顧問公司，一同編撰離岸風力發電場址調查及設計技術規範主文及解說，經專家學者和政府各主管機關長期審閱及修訂，逐步完善之並同時成立離岸風電發電技術指引資料庫平台。迄今，經濟部已於 112 年 2 月 13 日以技術指引方案公告實施，而資料庫平台亦於 112 年 3 月 31 日正式上線，並由經濟部標準檢驗局發函告知相關利害關係人。此外，研究團隊於執行過程中，為研析國際規範要求及其實質分析和設計方式，自發性研發一套固定式支撐結構分析程序，俾利帶動離岸風電設計能量在地化及自主化之風氣，並得推廣支撐結構設計過程要求及其細節，確保設計規範要求能徹底執行。爰此，本文主要簡介技術指引綱要內容、資料庫平台構架和分析軟體功能，冀能加強宣導臺灣對於風電再生能源開發之努力，亦祈對於離岸風電學術研究、工程設計實務、落實本土化和 2050 淨零排放等目標提供實質助益。

關鍵詞：離岸風電、場址調查、設計技術、資料庫平台、有限元素分析、OWPAS

## 前言

國家發展委員會於 2022 年公告「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」<sup>[1]</sup> 中，說明臺灣正面臨淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，並於 112 年 1 月由行政院核定「淨零排

放路徑 112-115 年綱要計畫」<sup>[2]</sup>，針對淨零碳排目標進行各面向的減緩與調適。其中，推動轉型的十二項關鍵戰略中，即以風電與光電再生能源開發為主力。

臺灣離岸風電發展分為示範獎勵、潛力場址、區塊開發等三個階段，目前已進展至第三階段區塊開發，並以三期核配風場之規劃，每期共配發兩年的裝置容量共 3GW，第一期預計 2026、2027 年完工併網。另觀國內現行相關規範中，除專業技師依據「電業法」、「電業設備及用戶用電設備工程設計及監造範圍

\* 通訊作者，sungyc@ntut.edu.tw

認定標準」、「電業竣工查驗作業要點」及「技師法」進行設計與監造技師簽證外，亦由「離岸風力發電案場專案驗證審查示範輔導作業要點」和 CNS 15176 進行相關規範，惟大部分設計技術仍以國際規定為主，對於本土化議題及應有之技術規定仍相對闕如。

經濟部標準檢驗局（以下簡稱標準局），委託國立臺北科技大學（以下簡稱北科大）執行之「109 年度離岸風電場址調查與設計技術規則先期研析計畫」<sup>[3]</sup> 和「110 至 111 年度離岸風電場址調查及設計技術規範建置計畫」<sup>[4]</sup> 中，參考國際通用規範、世界各國規定和國內工程經驗，已建置離岸風電場址調查及設計技術規範，並經跨部會機關和專家學者審議後由經濟部以技術指引方式公告，而計畫內同步完成之離岸風電發電技術指引資料庫平台業於隔月正式啟用，說明臺灣不僅對外展現邁向淨零排放目標之決心，對內也持續建置更具韌性的設計技術規定，故將於本文簡介之。

另一方面，對於離岸風電支撐結構的分析軟體中，除美國國家再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）研發之風力發電機模擬軟體 FAST（Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence）有限制開放外，其他大多由國外第三方驗證公司、軟體服務提供商或國際顧問公司等私人單位研發而成，分析軟體亦被視為機密並所費不貲。因離岸風電支撐結構承受之環境載重變異性較大，相關載重組合動則上萬組，常造成設計過程所需結構分析時間和產生之資料量過於龐大，現今雖可由雲端服務或平行運算方式加快速度，但卻也造成設計工程師無法取得執行過程資訊，常常僅能靜待最終計算結果，若具時程壓力或執行過程引致些微疏失，則需耗費更多心力解決問題。有鑑於此，本研究團隊於規範草案撰寫過程中，為以隨機變數模擬不確定參數，並利用機率密度函數表示系統需求與容量之機率分布，進而預測支撐結構破壞機率而完成可靠度分析，真正針對設計細節進行分析與模擬驗證，遂投入大量學研能量開發本土化離岸風電自動化分析軟體，現今研發結果有成故將一併概述此程式架構、執行範疇和主要貢獻。

## 離岸風力發電場址調查及設計技術指引簡介

離岸風力發電為我國重要的再生能源項目，目前將邁入區塊開發階段。我國離岸風力裝置發電量的快

速成長，得益於臺灣良好風場條件，以及政府對產業的積極推動，未來離岸風力發電將成為我國達成 2050 年淨零排放的重要助力。鑒於我國風場特有的本土議題，有別於國外風場設計條件，如颱風、地震、軟弱土層、砂波及海生物附著等，對離岸風場生命週期之設計、製造施工至運轉維護階段之參數設定或工法選定影響甚鉅。爰此，經濟部標準局借鏡國內外離岸風電相關法範、標準、指引等，並綜整考量我國特殊場址條件、法規環境、產業現況等因素，主導訂定「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」<sup>[5]</sup>、「離岸風力發電製造及施工技術指引」<sup>[6]</sup> 及「離岸風力發電運轉及維護技術指引」<sup>[7]</sup> 等三本技術要求（以下簡稱技術指引），作為國內離岸風力發電廠之開發業者、工程顧問公司、執業技師、驗證機構、製造商、施工團隊、運轉及維護等單位的重要參考依據。

為推動離岸風力發電技術指引，標準局邀請主管機關代表及產官學研各界專家，成立離岸風力發電技術指引指導審議會，負責各機關法源諮詢及監督腳色，並於其下項設立三個技術審議會，分別由北科大、財團法人船舶暨海洋產業研發中心、財團法人驗船中心負責編訂三本技術指引，北科大同步負責蒐集國內各機關部會之離岸場址紀錄資料並研發資料庫平台，俾利落實建置離岸風力發電技術規範之相關場址條件歷史資訊分析需求。離岸風力發電技術指引之組織架構如圖 1 所示。

北科大以作為我國工業立國搖籃的優良傳統著稱，自 109 年起致力發展離岸風電產業之各項核心技術，目前已成立離岸風電工程研究中心，並攜手中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、國立臺灣大學、國立成功大學、國立臺灣海洋大學、國立高雄科技大學、私立淡江大學、財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心、行政院原子能委員會核能研究所等單位，建構橫跨產、學、研的離岸風電專業技術團隊，協助我國政府發展再生能源和推進淨零排放的長遠目標。

技術指引的內容架構如圖 2 所示，包括：第一章「總則」、第二章「離岸風力發電廠場址環境條件調查」、第三章「離岸風力發電廠性能與安全要求」、第四章「離岸風力發電廠場址環境條件評估」、第五章「離岸風力機支撐結構與電力系統設計」。每節內容均細部區分為正文和解說等兩大部分，相關內容簡述如下：

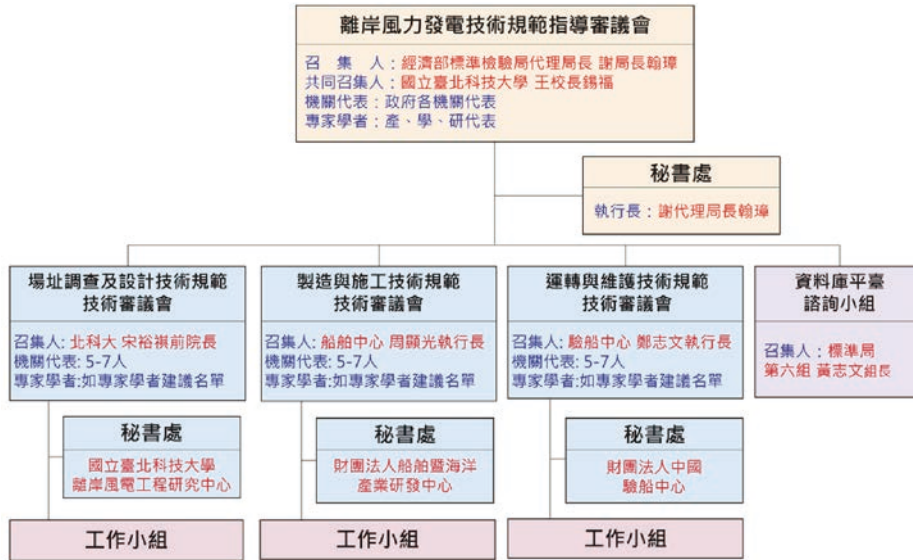


圖 1 離岸風力發電技術指引之組織架構

<p><b>第一章 總則</b></p> <p>1.1 目的</p> <p>1.2 主管機關</p> <p>1.3 適用範圍</p> <p>1.4 名詞與定義</p> <p>1.5 相關法令與標準</p> <p>1.6 設計、施工與運維之配合</p> <p>1.7 場址調查與設計階段送審文件</p> <p><b>第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查</b></p> <p>2.1 通則</p> <p>2.2 離岸風力發電廠場址環境條件調查</p> <p>2.2.1 一般規定</p> <p>2.2.2 風環境條件調查</p> <p>2.2.3 海洋環境條件調查</p> <p>2.3 水深地形及大地工程調查</p> <p>2.3.1 一般規定</p> <p>2.3.2 水深地形調查</p> <p>2.3.3 地球物理探勘</p> <p>2.3.4 大地工程調查與試驗</p> <p>2.4 其他環境條件調查</p> <p>2.4.1 腐蝕環境調查</p> <p>2.4.2 雷擊調查</p> <p>2.4.3 海生物附著調查</p> <p>2.5 特定場址環境條件資料提送</p> <p>2.5.1 一般規定</p> <p>2.5.2 風環境條件與海洋環境條件調查資料提送</p> <p>2.5.3 水深地形及大地工程調查與試驗資料提送</p> <p>2.5.4 其他環境條件調查資料提送</p>	<p><b>第三章 離岸風力發電廠性能及安全要求</b></p> <p>3.1 通則</p> <p>3.2 離岸風力發電廠驗證與審查</p> <p>3.2.1 一般規定</p> <p>3.2.2 專案驗證</p> <p>3.2.3 專案驗證審查</p> <p>3.3 離岸風力機性能及安全</p> <p>3.3.1 設計原則</p> <p>3.3.2 離岸風力機等級</p> <p>3.3.3 安全等級</p> <p>3.3.4 載重組合</p> <p>3.3.5 離岸風力機共振效應</p> <p>3.3.6 離岸風力機支撐結構附屬電氣</p> <p>3.4 變電站性能及安全</p> <p>3.5 輸電系統性能及安全</p> <p>3.6 其他要求</p> <p>3.6.1 安全警示及防護措施</p> <p>3.6.2 高壓氣體及壓力設備安全</p> <p>3.6.3 海洋公害防治</p> <p>3.6.4 運維船舶航行安全</p> <p>3.6.5 資訊安全防護</p> <p>3.6.6 環境與結構監測</p> <p><b>第四章 離岸風電場址環境條件評估</b></p> <p>4.1 通則</p> <p>4.2 風載重</p> <p>4.3 潮位</p> <p>4.4 波浪載重</p> <p>4.5 海流載重</p> <p>4.6 海床變動與淘刷</p> <p>4.7 海嘯載重</p> <p>4.8 地震載重</p> <p>4.9 土壤液化</p> <p>4.10 海洋附生物</p> <p>4.11 腐蝕</p> <p>4.12 其他載重</p>	<p><b>第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計</b></p> <p>5.1 通則</p> <p>5.2 離岸風力機支撐結構設計原則</p> <p>5.2.1 一般規定</p> <p>5.2.2 結構設計年限</p> <p>5.2.3 自然環境條件</p> <p>5.2.4 運轉操作條件</p> <p>5.2.5 臨時階段之設計考量</p> <p>5.3 離岸風力機支撐結構設計要求</p> <p>5.3.1 一般規定</p> <p>5.3.2 結構分析與模擬</p> <p>5.3.3 結構設計與檢核</p> <p>5.3.4 鋼結構強度及挫屈設計</p> <p>5.3.5 鋼結構疲勞設計</p> <p>5.3.6 結構接合設計</p> <p>5.3.7 灌漿接合設計</p> <p>5.3.8 運維船舶撞擊</p> <p>5.3.9 有限元素分析</p> <p>5.3.10 臨時階段之結構檢核</p> <p>5.4 大地工程設計</p> <p>5.4.1 一般規定</p> <p>5.4.2 樁基礎承载力與變位檢核</p> <p>5.4.3 群樁效應</p> <p>5.4.4 淘刷保護設計</p> <p>5.4.5 海墘槽溝設計</p> <p>5.5 防蝕保護</p> <p>5.6 電網連接及電力系統</p> <p>5.6.1 電網連接</p> <p>5.6.2 海底電纜</p>
---	--	--

圖 2 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」之章節架構

## 第一章 總則

總則主要說明指引訂定目的、主管機關、適用範圍、名詞與定義、相關法令與標準、設計及施工與運維之配合、場址調查與設計階段送審文件等。其中，此章除準確定義各項名詞與專業術語外，特別強調離岸風力發電廠於其全生命週期內之安全需求、使用性能與服務水準，而安全需求範圍包含離岸風力機結構共振評估、轉子機艙總成、離岸風力機支撐結構、海

上變電站結構、海纜等項目。此外，亦要求設計階段須揭櫫設計理念與對應的離岸風力發電廠全生命週期內各項需求與性能水準，編製明確的配套作業要求，以提供未來施工廠商編訂施工計畫書與開發商編訂運轉及維護計畫書之依據，並應於完成各項作業時提送相關調查報告與設計成果，經專業技師簽證及 / 或驗證機構核可後，提送主管機關辦理專案驗證審查並核定之。

## 第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查

離岸風力發電廠場址環境條件調查係以符合離岸風力發電廠於設計階段工程技術所需之條件進行調查，調查作業應涵蓋基本設計與細部設計等階段之需求，包含風環境條件與海洋環境條件調查、水深地形與大地工程調查及其他環境條件調查等。

風環境條件調查包含風速、風向、氣壓、氣溫、空氣濕度與淨輻射量等，海洋環境條件調查包含波浪、海流、水位與潮汐等；水深地形與大地工程調查包含水深地形調查、地球物理探勘與大地工程調查；其他環境條件調查包含腐蝕環境、雷擊與海洋附生物調查。

另外，對於特定場址環境條件資料，指引要求開發商應將調查成果提交至目的事業主管機關，提送資料應包含但不限於風況、波浪、海水水位、海流及潮汐等調查成果，以及水深、地形、地質及大地工程等調查與試驗成果，並須提送腐蝕環境、雷擊及海洋附生物等調查成果。

## 第三章 離岸風力發電廠性能與安全要求

離岸風力發電廠於其全生命週期內應符合預期的性能及安全等目標所需之工程技術要求。離岸風力發電廠性能及安全要求分類為 5 項：

- (1) 離岸風力發電廠驗證與審查：離岸風力發電廠之設計成果須完成專案驗證及專案驗證審查。專案驗證及專案驗證審查之目的，係以確認設計成果符合離岸風力發電廠預期之安全需求、使用性能與服務水準。
- (2) 離岸風力機性能及安全：離岸風力機於全生命週期內須至少應綜合考量離岸風力機的特性、等級及自然環境等設計條件，於設計年限內，不得因風、波浪、海流、颱風、地震、海嘯、土壤液化、腐蝕、雷擊與海洋附生物等作用，而損及原設計要求之性能，並維持其發電功能。
- (3) 變電站性能及安全：海上變電站須提供離岸風力發電廠電力併入電網之服務，並應避免變電站於結構破壞或功能失效，導致人員傷亡、環境嚴重汙染以及社會與經濟損失等後續效應，亦應考量人員使用空間、逃生通道與消防設備之安全，以提升人員與變電站設備之使用安全，而陸上變電站應符合輸配電設備裝置規則及國內相關建築設計法規。

- (4) 輸電系統性能及安全：輸電系統在責任分界點與電網相連，應符合台灣電力股份有限公司相關電網併聯要求與規範，而輸電系統應設置故障保護措施，另經考量電力系統之需求、重要性或系統穩定度分析確認有額外需要時，得增設保護設備。另對於海纜採埋設方式鋪設者，應設計適當埋設深度，確保足夠保護層厚度；採非埋設方式鋪設者，應避免海纜系統功能失效。惟無論採任何鋪設方式，均不得影響港口、航運及漁業使用，並應避免對現有管線造成影響。
- (5) 其他要求：包含安全警示與防護措施、液壓與氣壓設備安全、海洋公害防治、運維船舶航行安全、資訊安全防護、環境與結構監測等。

## 第四章 離岸風力發電廠場址環境條件評估

離岸風力發電廠之設計應考慮本節所述之環境條件，其中環境條件可分為風環境條件、海洋環境條件、水深地形與大地工程及其他環境條件等。風環境條件為影響轉子機艙總成結構完整性之主要外部環境條件。水深地形與大地工程為包含隨時間變化之海床移動、淘刷與其他海床不穩定要素。其他環境條件包含但不限於地震、海嘯、雷擊、腐蝕、土壤液化與海洋附生物等。

環境條件可分為正常環境條件與極端環境條件。正常環境條件一般代表風力機正常運作期間頻繁發生之情況，並與重複發生之結構載重狀況有關；而極端環境條件則代表罕見之情況，通常以 1 年或 50 年回歸期之極端值決定，惟在某些非常特殊之極端事件分析時，應特別注意統計資料之數量及品質是否具有代表性。

設計時應依特定場址之特性，統計分析離岸風力發電廠特定場址之風環境條件、海洋環境條件、水深地形及大地工程與其他環境條件等之數據，彙整於設計文件中。

## 第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計

本章適用於固定式離岸風力機支撐結構與相關電力系統之設計。設計者可自行選擇國際普遍認可之固定式離岸風力機支撐結構設計標準 / 規範，如國際標準化組織 (ISO 19902)、歐洲 (如 EN 1993 與 NORSOK N-004 等) 或美國 (如 API RP 2A-LRFD) 等，並配合指引之相關規定進行結構設計，惟目前歐洲與美國採用不同的標準 / 規範系統，有關結構材料、載重與材

料因子、安全係數與製造公差等要求或有不同規定，設計者應採用單一或相同系統進行設計。除非可以確認具備較高或同等之可靠度水準，否則不得混用標準/規範。

## 離岸風電發電技術指引資料庫平台

臺灣海峽為全球矚目的優質離岸風場，惟位處颱風與地震等天然災害高潛勢地區，且環境中尚有如土壤液化、腐蝕條件及海生物附著等特殊場址條件，均有別於國外風場環境。爰此，因應各技術審議會之相關場址條件資料需求，北科大受標準局委託建置「離岸風力發電技術指引資料庫平台」<sup>[8]</sup>，透過跨部會資料庫架接方式，針對我國各部會、研究單位等之場址環境調查資料進行蒐集及整合，藉此落實技術指引內容中本土化特殊場址議題。

資料庫在初期（109年起）即辦理全國離岸風電相關資訊的盤點，由標準局帶領與海域場址條件原始數據資料庫主管機關進行接洽，並執行相關開放資料之架接工作。另於 110-111 年間，積極向開發商、製造商、專案驗證機構、設計顧問公司等利害關係人進行資料需求訪談，確保資料庫平臺的內容和形式滿足各方使用者需求。此外，考量相關資料之機敏性及授權使用規則，資料庫主要係以各部會之開放資料（Open Data）為基礎，並依前述需求訪談結果，採條件式蒐集及篩選與離岸風電工程設計相關之地質、地震、海洋氣象與海生物資料。

經過耗時兩年多的建置，離岸風力發電技術指引資料庫平台業於 112 年 3 月 31 日正式上線（網址 <https://www.owpdb.tw>），資料庫首頁如圖 3 所示。資料庫目前提供 8 個部會資料的檢索與查詢功能（圖 4 所示），包括交通部下屬之中央氣象局、運輸研究所，經濟部下屬之水利署、標準

檢驗局、中央地質調查所，內政部及下屬國土測繪中心，以及工業技術研究院，共計 32 項資料品項。

資料庫亦整合 Jupyter 開源技術，成為一個可交談的資料操作平臺，使用者可利用程式語言（如 Python、R）客制化地操作與應用資料，而得以拓展資料應用範疇，更加契合各使用者族群的需求，俾作為離岸風電工程實際應用之參考以及國內離岸風電工程研究及教育推廣用途。

資料庫已錄入北科大風工程團隊學研成果展示範例，藉以調用標準局臺中港測風塔資料，產製風場之正常及極端風況條件的流場基本參數：平均風速剖面、紊流強度剖面、紊流尺度剖面、風花圖（圖 5 以風花圖為例），著重進行我國風載重推估，建立「場址調查及設計技術指引」之不同設計限度狀態下的設計載重。藉由資料庫的資料操作平臺及驗算程式模組化操作，達成原始資料調用、模組計算、衍生圖表匯出流程，實現客制化地資料加值衍生操作。



圖 3 離岸風電發電技術指引資料庫平台首頁



圖 4 離岸風電發電技術指引資料庫平台檢索功能

資料庫亦納入三本技術指引，並建置了依據章節的指引條文查閱功能，如圖 6 所示。配合技術指引的章節，亦規劃「相關資料」檢索欄位（圖 7），包括相關參考文件、相關參考規範、相關參考資料的檢索資訊或連接，滿足使用者的資訊需求，方便使用者的衍生研讀。

北科大協助標準局建置之「離岸風力發電技術指引資料庫平台」，打造資料庫為離岸風電資訊服務平臺，提供離岸風力發電技術指引之場址條件資訊參考及示範例展示，並藉由風電資訊，輔助離岸風場政策規劃及落實，提升臺灣離岸風電技術發展，加速臺灣相關技術本土化，創造經濟發展、能源轉型多贏局勢的效益。

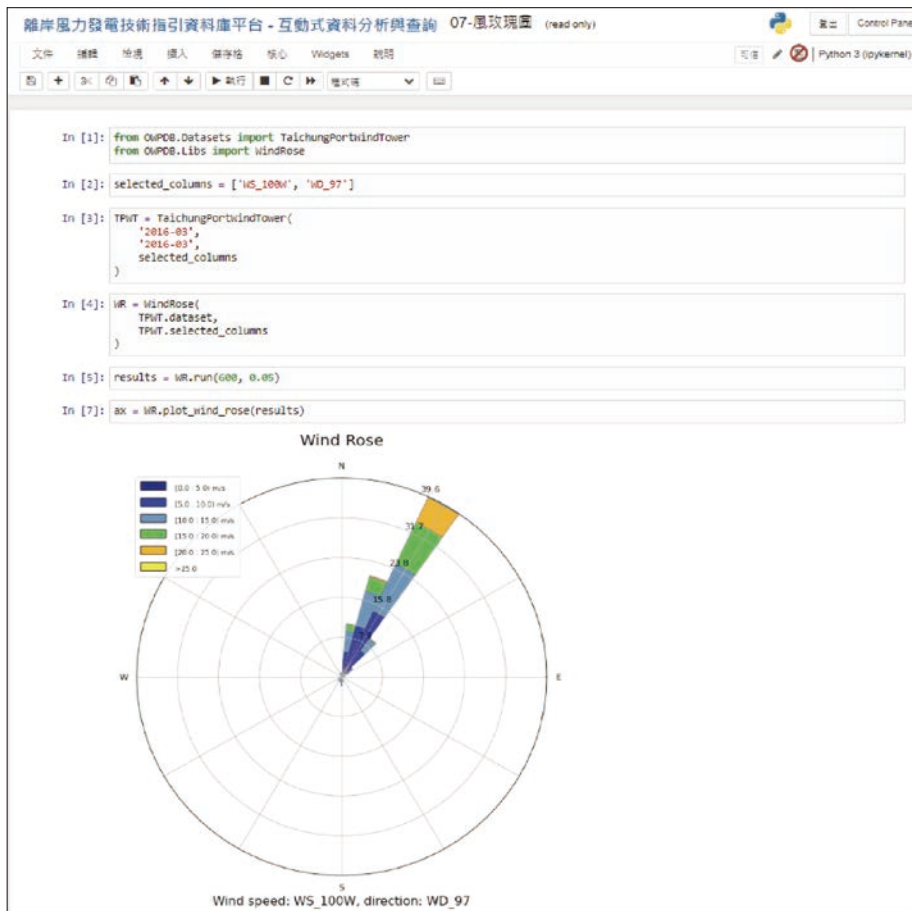


圖 5 資料庫資料操作平台客製風花圖



圖 6 資料庫技術指引檢索功能



圖 7 資料庫參考資料檢索功能

## 固定式支撐結構分析軟體研發架構及規劃

北科大離岸風電工程研究中心以有限元素結構分析軟體 Ansys 為求解器，依據固定式支撐結構設計過程常見之載重迭代分析 (Iteration Load Analysis, ILA) 程序，撰寫：(1) 前處理 (Pre-processing)；(2) 求解過程

(Solution)；(3) 後處理 (Post-processing)<sup>[9]</sup> 等各階段之自動化分析流程，並命名為 NTUT OWPAS (Offshore Wind Power Analysis System, 如圖 8)，專責整體支撐結構分析程序、管狀接頭疲勞應力計算及全自動批次處理工作。求解器 (如圖 9) 之功能說明如下：

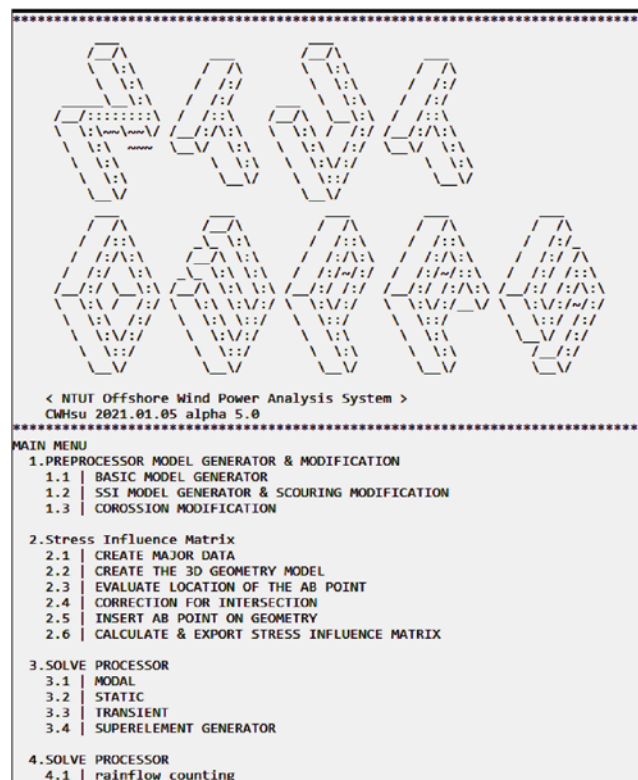


圖 8 NTUT OWPAS 原始處理視窗介面

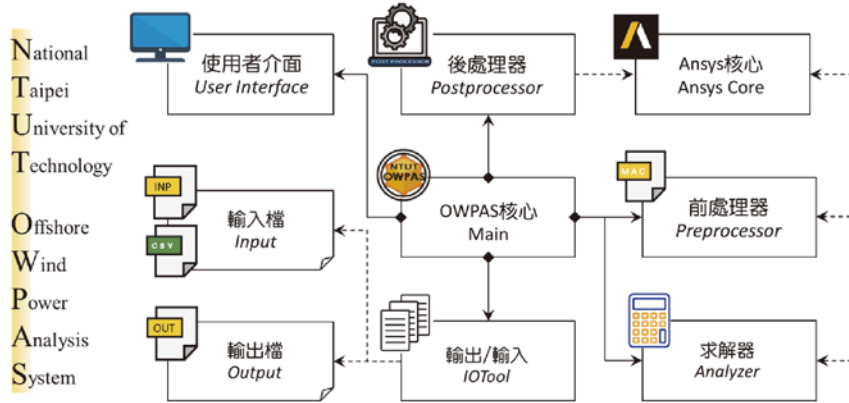


圖 9 OWPAS 求解器自動化分析流程

- (1) 前處理：工作主要目的為建立結構分析模型，以 APDL (Ansys Parametric Design Language) 程式語言，直接給定結構節點、桿件連接、材料屬性、指定元素類型及進行網格劃分等，同時研發 ILA 過程中所需之超元素 (Super Element, SE) 自動化產生語法，並進一步快速產出整體下部支撐結構之質量、阻尼、勁度和外力矩陣。
  - (2) 求解過程：此階段需設定結構分析類型、分析選項和邊界條件。常見之結構分析類型包含靜力分析 (Static)、模態分析 (Modal)、暫態分析 (Transient) 和子結構 (Substructuring) 分析等，而邊界條件設定則提供以彈簧模擬土壤結構互制效應 (Soil-Structure Interaction, SSI)，俾利評估離岸風力支撐結構之共振模態及基樁承載力。
  - (3) 後處理：Ansys 於求解過程後，將產生輸出文件 (Output file)、結果文件 (Results file) 及程式數據庫 (Program database)，俾利於後處理階段進行二次開發，或採圖形使用者介面 (Graphical User Interface) 查看分析結果。而後處理又分為一般後處理器 (General Postprocessor) 與歷時後處理器 (Time History Postprocessor)，一般後處理器能檢視特定時間下整體結構之分析結果，並得快速繪製等值線、向量場、變形圖等，而歷時後處理器則能查看特定位置在不同時間下之分析結果。後處理功能適用於桿件或接頭之應力檢核或使用率研析。
- 另一方面，ILA 程序主要係由離岸風電風場開發商、支撐結構工程設計顧問公司和風力機製造商等三者共同執行 (如圖 10)。一開始由開發商偕同第三方

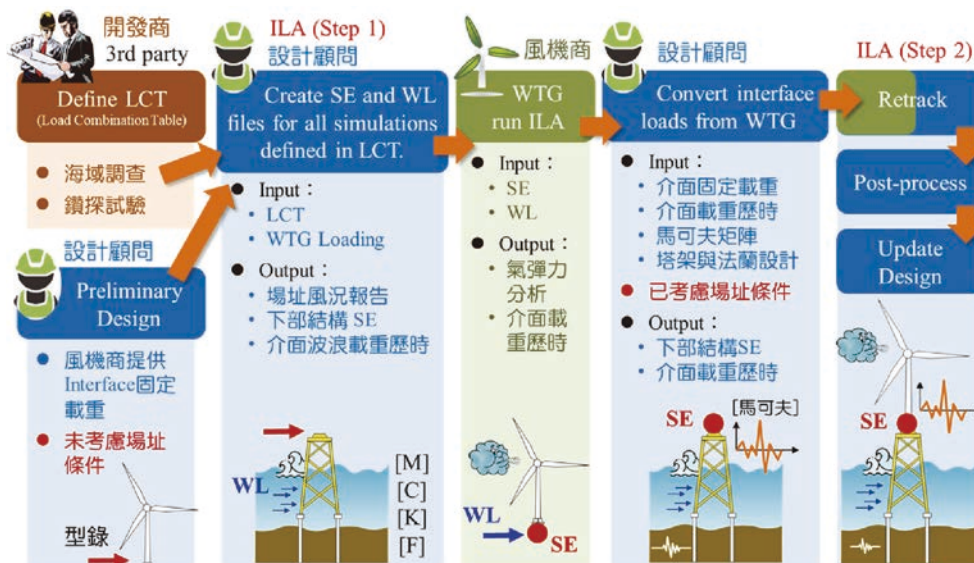


圖 10 載重迭代分析程序示意圖



驗證單位，經審視前階段可行性評估和環境影響評估的場址環境調查資料，訂定適當之載重組合表 (Load Combination Table, LCT) 或設計載重表 (Design Load Case, DLC)，另由風機商先提供數筆風力機傳遞至轉接段 (Transition Piece, TP) 之載重與風力機特性，再由顧問公司依據前述 LCT 及海況資訊，初步進行支撐結構設計，並將成果濃縮出下部結構之超元素 (Super Element, SE)，以及產出相應之質量、阻尼、勁度和外力等矩陣，開啟第一階段之 ILA。此後，風機商賡續其設計結果，重新進行氣彈力分析，取得更詳細之風載重歷時及風力機 SE，並傳回設計顧問公司進行確認，經資料反覆傳遞和設計成果收斂後，完成整體載重迭代分析程序。

根據前述 ILA 程序，以固定式支撐結構設計流程而言，除須先透過模態分析檢核支撐結構自然頻率之 1P 和 3P 外，為確保下部支撐結構在各程度狀態下之完整性，可進一步依據風場環境參數和設計載重條件對結構進行暫態分析，分析所須文件以及前處理、求解和後處理流程如圖 11 所示。其中，設計載重表係考量離岸風電之發電、發電及故障發生、啟動、正常停機、緊急停機、待機 (待機狀況或惰轉)、待機與故障情況、運輸安裝及維護修理、地震、颱風等設計情境，需設定風況、波浪、風與波浪方向、海流、水位、其他條件、分析種類和載重部分安全係數等，而載重組合可能高達上萬組，以自動化設定各式分析

載重實為重要。爰此，OWPAS 著重於開發分析過程所需之各種設定要求，諸如暫態分析設定、由風機商所提供之介面力、海洋環境條件和波浪理論設定等，待匯入支撐結構有限元素模型並設定斷面性質、材料特性和邊界條件後，即可利用 Mechanical APDL 完成分析工作。其中，海洋環境條件模擬與波浪理論設定最為重要，可利用 Ansys 中 OCTYPE 指令設定海洋環境條件類型，如海洋基本條件 (BASIC)、海流條件 (CURR)、波浪條件 (WAVE) 等，另利用 OCDATA 或 OCTABLE 功能進行水深條件、材料屬性編號、桿件浸水條件、平均海水面位置、附加質量係數、浮力係數、波浪行進方向及不同雷諾數或水深條件下採用之波浪力係數<sup>[10]</sup>。

最後，針對後處理與支撐結構程度狀態檢核，可在細分為：(1) 管狀接頭疲勞程度狀態檢核；(2) 支撐結構極限程度狀態檢核。相關應用說明如下：

(1) 管狀接頭疲勞程度狀態檢核

風力機支撐結構通常會面臨高週疲勞破壞 (High-Cycle Fatigue)，因此由有限元素模型評估管狀接頭疲勞損傷和壽命時，應依據規範之要求和建議計算管狀接頭銲接處之熱點應力，接而將熱點應力歷時以雨流計數法和 S-N 曲線，由應力振幅求失效次數和損傷量。基於暫態分析與局部管狀接頭有限元模型之疲勞分析流程如圖 12 所示，OWPAS 已完成自動化建立管狀接頭之 3D 模型 (如圖 13)，並得控制特徵點座標並

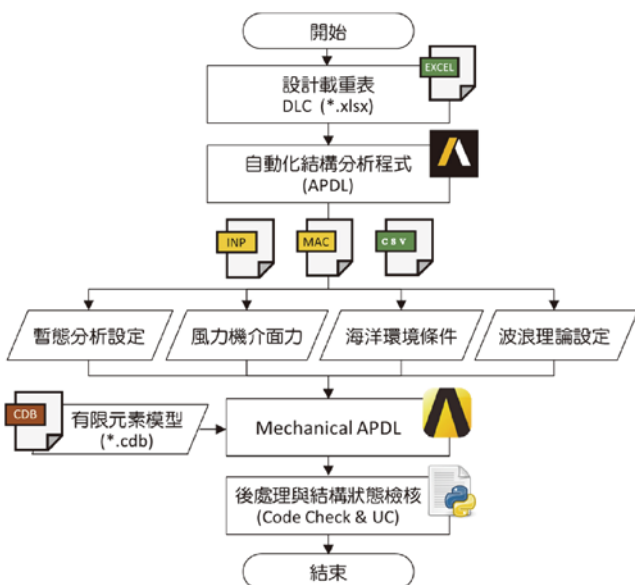


圖 11 依據設計載重條件建立暫態分析流程

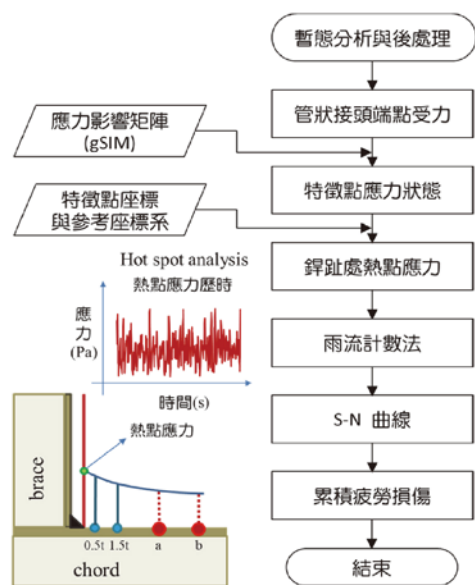


圖 12 基於暫態分析與有限元模型進行管狀接頭疲勞分析流程

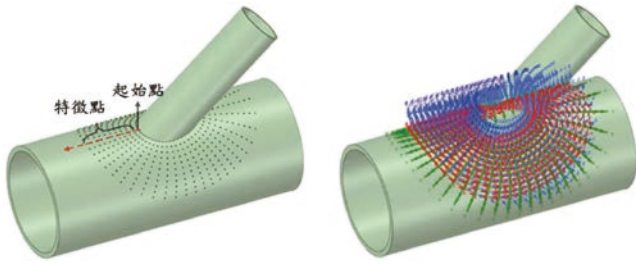


圖 13 管狀接頭三維建模與特徵點座標系建立

進行 mesh，俾利符合熱點應力取點要求，亦接續完成疲勞限度狀態檢核之功能 [11]。

(2) 支撐結構極限狀態檢核

離岸風力機之下部結構檢核對象主要可以分為管狀桿件 (Tubular Member) 以及管狀接頭 (Tubular Joint)，若基於 ISO19902:2020 規範以一般管狀桿件檢核為例，可將相關分析方法與流程彙整如圖 14 所示。其中，首要工作為區分各元素屬於桿件或接頭，再由有限元素中擷取節點編號、座標、元素類型、質點座標與大小、斷面標號和材料參數等資訊。再者，針對檢核項目與使用率，主要係依據 ISO19902 規範以設計載重條件作用下，構件受力狀態 (Action Effects) 與結構設計強度 (Design Resistance) 之比值表示，本文將統稱為使用率 (Utilization)。而檢核項目則較為繁雜，需先審視構件載重作用類型為承受單一載重或複合載重，另經軸向拉力、軸向壓力、彎矩、剪力、扭矩、水壓或數種載重組合之檢核後，方能求得支撐結構各部位之使用率，而本團隊亦將所得使用率成果匯回 Ansys 中，藉此可由圖形及視覺化介面展現整體支撐結構使用率分布狀況 (如圖 15)。

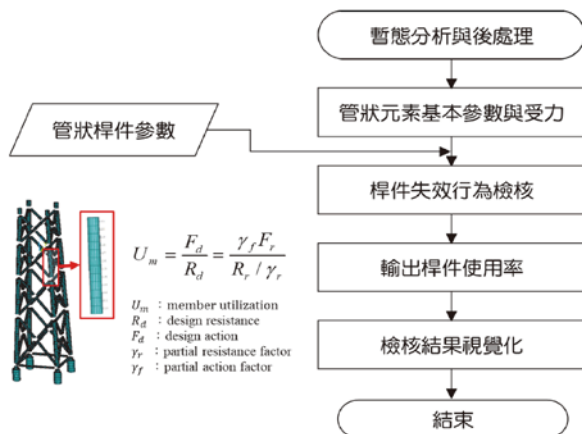


圖 14 完整無受損之一般管狀桿件分析檢核流程

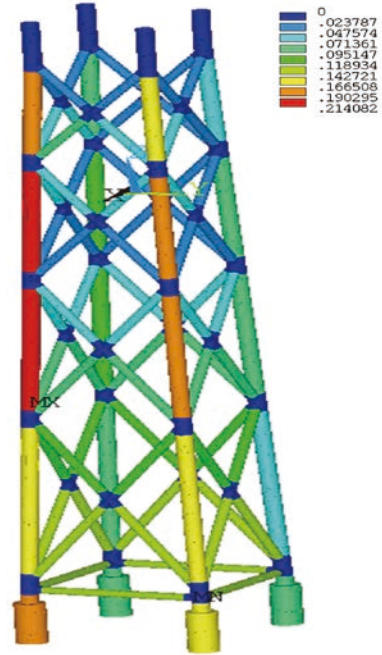


圖 15 管狀桿件使用率與檢核結果視覺化

結論與建議

本文主要以本土化離岸風電設計技術發展為基礎，簡介國內目前廣續公告之「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」、「離岸風電發電技術指引資料庫平台」及固定式支撐結構分析軟體 (NTUT OWPAS) 功能。茲提出相關結論與建議如下：

1. 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」已於 112 年 2 月 13 日由經濟部頒布，此引指致力納入我國場址條件之特殊性考量 (如腐蝕、地震、颱風、軟弱土層及海生物附著等)，研析適合我國環境條件之設計作用力，發展本土化的支撐結構及基礎的分析設計方法，俾利保障離岸風力發電廠於其使用年限之安全需求、使用性能與服務水準等設計目標，除可符合國際通用標準之要求，亦藉此完善離岸風場專案驗證審查制度，進而提高能源自主性及創造產業效益。需特別說明的是，此技術指引目前僅適用於固定式離岸風電支撐結構，對於海上變電站和浮動式離岸風電而言，其相關內容刻正編撰中，待技術與指導審議會校閱並通過後方可能公告施行。
2. 「離岸風電發電技術指引資料庫平台」已於 112 年 3 月 31 日正式上線，其主要係以國內各部會之開放資料為主，經與開發商和設計顧問公司需求訪談後，針對中央氣象局、交通運輸研究所，水利署、標準檢驗局、中央地質調查所，國土測繪中心、工

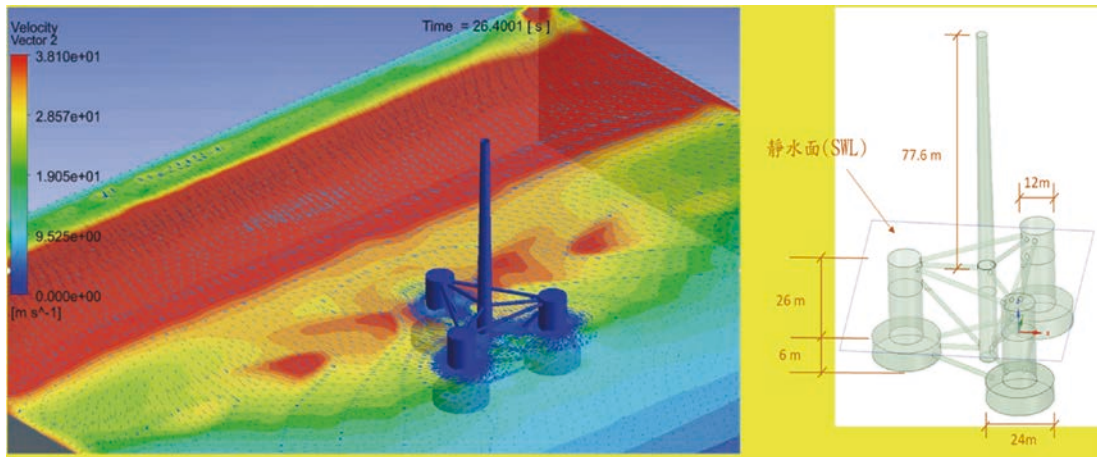


圖 16 浮動式離岸風電結構分析與評估

業技術研究院等 32 項資料基礎資料進行介接，致力於產出離岸風電相關之地質、地震、海洋氣象與海生物等衍生性資料。資料庫整合 Jupyter 開源技術，使用者可直接利用程式語言（如 Python、R）與資料庫平臺進行交談，除可由各部會切面或地圖系統切面進行基本參考資料檢索工作，亦得進一步利用程式語言求取客制化成果。資料庫目前業已完成前述三本離岸風力發電技術指引展示介面，並將各部會基礎資料及技術指引相關內容進行連結，目前積極完成風場正常及極端風況條件之流場基本參數產製示範例、地質調查之 SPT 及 CPT 液化評估法示範例、波浪觀測紀錄之施工窗期統計與暴潮偏差示範例等，冀能推廣直接由資料庫產製衍生性資料用途，為場址環境調查及設計技術提供更優質的參考依據。

3. NTUT OWPAS 屬於固定式支撐結構分析軟體，主要係以 Ansys 為求解器並進行前後處理研發工作，另參考開發商、風機商和設計顧問公司之 ILA 程序，編制快速建立結構模型、模態分析、超元素濃縮、波浪載重施加、三維管狀接頭模型建立、特徵點運算、雨流法計算、疲勞及極限應力檢核、使用率視覺化輸出、批次處理等全自動程式架構。另對於流固耦合、土壤結構互制、船體碰撞、管架局部加勁、轉接段有限元素分析、灌漿段分析、不同土層地震力歷時分析等案例，均得利用 OWPAS 進行實質運用。研究團隊目前亦已完成浮動式離岸風電之支撐結構排水量、吃水深、反應振幅運算子（Response Amplitude Operator, RAO）、附加質量、阻尼、自由振盪、浮筒加勁、繫纜系統等研析

工作（如圖 16），希望真正協助本土化固定式及浮動式離岸風電之工程設計實務工作。

## 誌謝

感謝經濟部標準檢驗局經由公開招標方式，委託國立臺北科技大學辦理「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」及成立「離岸風電發電技術指引資料庫平台」，並提供研究過程所需業務經費及協助，執行團隊謹致以衷謝忱。

## 參考文獻

1. 國家發展委員會，「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，2022 年 3 月 30 日，[https://www.ndc.gov.tw/Content\\_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76](https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76)
2. 行政院，「淨零排放路徑 112-115 綱要計畫」，2023 年 1 月核定。
3. 經濟部標準檢驗局，「109 年度離岸風電場址調查與設計技術規則先期研析計畫」，國立臺北科技大學執行，2020 年。
4. 經濟部標準檢驗局，「110 至 111 年度離岸風電場址調查及設計技術規範建置計畫」，國立臺北科技大學執行，2022 年。
5. 經濟部，「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」，國立臺北科技大學執行，中華民國 112 年 2 月公告。
6. 經濟部，「離岸風力發電製造及施工技術指引」，財團法人船舶暨海洋產業研發中心執行，中華民國 112 年 2 月公告。
7. 經濟部，「離岸風力發電運轉及維護技術指引」，財團法人中國驗船中心執行，中華民國 112 年 2 月公告。
8. 經濟部標準檢驗局，「離岸風電發電技術指引資料庫平台」，國立臺北科技大學執行，中華民國 112 年 3 月 31 日正式上線，網址 <https://www.owpdb.tw>。
9. E. Madenci and I. Guven, *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*, Springer (2015).
10. 劉伯紘，「離岸風力機套筒式支撐結構管狀接頭疲勞分析與極限狀態檢核」，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，宋裕教授指導，台北（2022）。
11. Po-Hung Liu, I-Yan Chen, Xiao-Qin Liu, Chin-Kuo Su, Chi-Wei Hsu, Dzong-Chwang Dzeng, Yu-Chi Sung, "Stress influence matrix on hot spot stress analysis for welded tubular joint in offshore jacket structure", *Ocean Engineering* 251 (2022).