

地工技術



編者的話

郭玉樹

主題：海域大地工程（離岸風機基礎） 及探勘

離岸風電已於歐洲蓬勃開發，且逐漸朝深水域及大容量發電機發展。我國離岸風電相較於歐洲起步較晚，不論於發電機組產製、支撐結構設計概念、環境資料收集、塔筒基礎製造以及海事工程能量均遠落後於歐洲國家。此外，我國天然環境惡劣，颱風與地震頻仍，離岸風電的使用率與支撐結構的穩定性將備受考驗。

我國自2006年起開始規劃先導型離岸風場開發，但由於政府政策不明，市場不確定，以及技術能量不足等因素，遲至今日離岸風電開發的氣氛才逐漸成熟。就目前市場現況與技術門檻而言，我國投入離岸風機發電機組自主開發，將面臨較高的技術難度與強勁的市場競爭。若透過國外廠商技術引進與移轉，於我國本土自產風力發電機組，勢必需要支付鉅額的技轉權利金，且仍可能無法獲得關鍵生產技術。

雖然，目前我國於離岸工程基礎結構設計施工之經驗亦十分缺乏；但是，由於我國面臨地震與颱風的惡劣環境條件，使得歐洲離岸風電支撐結構設計經驗無法完全複製於我國離岸風場開發。因此，我國產、官、學界應善用此一天然環境屏障，克服鋼結構與海洋工程機工具製造的困難，建立適用於我國惡劣環境條件之設計方法與施工技術，積極投入離岸風電支撐結構製造與施工產業建置。除了以滿足我國未來離岸風電開發市場需求為目標，亦應整合國內產業團隊佈劃開拓亞洲離岸風電市場之願景藍圖。

離岸風電支撐結構包括上部塔架、接合元件以及下部基礎。基礎型式因水深、地質條

件、風機型式、成本等多種因素考量，可概分為重力式基礎、大口徑單樁基礎、三腳基礎、三樁基礎、套管塔架基礎、負壓沉箱基礎及群樁平台基礎等型式。離岸風機基礎長期承受來自於上部結構傳遞之風、波、流荷載，為了滿足每一個設計載重條件，海域大地工程師必須取得合理的土工設計參數，並搭配合適的計算方法，將反覆載重效應、地震及液化等影響納入考量，才能確保離岸風機基礎之承載力及穩定性。同時，為了將基礎設置於海床，順利與上部結構以及海底纜線連結，必須同時進行運輸及施工船隊規劃，評估施工過程之安全與成本，以達到基礎穩定與經濟效益兼顧之目標。

本期地工技術之主題為海域大地工程離岸風機基礎及探勘，共有十篇論文及一篇技術資訊。內容主要包括離岸風機基礎設計、海域土壤地質調查、海事工程施工等三個主題。其中，離岸風機基礎設計主題包括「離岸風機基礎設計與驗證考量」、「離岸風機基礎設計實務」、「離岸風機大口徑單樁基礎土工設計考量」、「離岸風機負壓沉箱基礎之基本設計概念」、「離岸風力機重力式基礎適用性之研究」等共五篇論文。海域土壤地質調查主題則包括「海域大地調查於離岸風場規劃設計與建置期間之角色」、「離岸風力計畫海域大地工程調查-以福海離岸風場為例」、「彰濱風場液化潛能初步評估」等三篇論文以及「由歐洲經驗淺談離岸風場工址調查的重點」一篇技術資訊。海事工程施工主題包括「自升式風機安裝船支撐基腳承載力模型試驗」及「離岸風電之海纜工程關鍵技術探討」兩篇論文。本期地工技術彙集國內外投入離岸風場開發產學各界先進研究成果與技術經驗，其中包含三篇邀請德國具有離岸風機基礎設計實務經驗之專家學者與編者共同撰寫之文章，各文章簡要內容

說明如下。

第一篇為「離岸風機基礎設計與驗證考量」。為確保離岸風機支撐結構設計與施工安全，歐洲之離岸風場均透過取得第三方單位驗證作為保障。離岸風機支撐結構設計除了上承海域土壤地質調查資料與參數選定，同時需與風機製造商同步完成離岸風機支撐結構整體設計。每一設計步驟與產出報告均需要透過驗證單位審核，方能順利取得計畫驗證，作為銀行融資的有力證明。本文說明離岸風場整體設計與型式驗證、計畫驗證之相關性，並針對支承基礎結構設計流程加以敘述，提供國內離岸風場開發參考。

第二篇為「離岸風機基礎設計實務」。本文根據國內產業界對離岸風機支撐結構設計現階段之瞭解淺談離岸風機基礎型式選定、支撐結構動力分析、材料疲勞特性與反覆側向荷重等考量，提出簡要設計流程供工程實務參考。

第三篇為「離岸風機大口徑單樁基礎地工設計考量」。離岸風機大口徑單樁基礎為目前商轉離岸風場採用比例最高之基礎型式。本文詳細說明大口徑單樁基礎設計之地工關鍵因素考量，包括對應之海域土壤調查需求，側向承載力與穩定性之設計目標， $p-y$ 曲線分析法於大口徑單樁設計之適用性，以及考量反覆側向載重於承載力與變形量之建議計算方法，最後點出大口徑單樁設計後續面對的工程需求。透過本文介紹，國內產業界可以了解歐洲目前進行大口徑單樁基礎設計現有方法與最佳化設計的目標。

第四篇為「離岸風機負壓沉箱基礎之基本設計概念」。雖然負壓沉箱基礎尚未大規模應用於商轉離岸風場，但由於其易於設置與移除，負壓沉箱基礎為目前英國與丹麥大力推行之離岸風機基礎型式。然而，負壓沉箱基礎需透過抽水產生負壓完成基礎安裝；過大之抽水壓力會造成滲流破壞。本文除了提出合理之抽水壓力建議，亦對於負壓沉箱基礎之拉拔力分析考量及側向載重下之變形行為提出設計概念說明，提供我國未來離岸風機基礎選擇參考。

第五篇為「離岸風力機重力式基礎適用性之研究」。本文提出創新重力式基礎概念與設置方法，希冀透過國內可自主施工之沉箱重力式基礎，提供離岸風機另一基礎型式選擇方案，落實扶植風機本土化產業之目標。

第六篇為「海域大地調查於離岸風場規劃設計與建置期間之角色」。海域大地調查包含土壤與地質調查，本文除了介紹海域大地調查工具與方法，更以離岸風機支撐結構型式規劃評估選定、基本設計至施工安裝為主軸，詳細說明各階段海域大地調查於期間扮演之角色，針對調查報告內容重點與取得資料分析注意事項進行剖析，並提供離岸風機基礎設計方法與土壤參數選定溝通橋樑，以作為海域大地工程人員投入離岸風機基礎設計依循參考。

第七篇為「離岸風力計畫海域大地工程調查-以福海離岸風場為例」。本文對我國先導型離岸風場-福海風場現況進行說明，同時整理福海風場海域大地土壤地質調查寶貴資料，除了提供土壤強度參數，亦進行液化潛能分析，供後續我國離岸風機基礎設計初步瞭解我國西部海域土壤地質狀況。

第八篇為「彰濱風場液化潛能初步評估」。由於我國地震頻仍，且歐洲離岸風電設計規範要求將海床液化潛能納入基礎設計考量，本文利用我國彰濱先導型離岸風場現有海域土壤鑽探資料，以簡易經驗法評估地震與波浪引致之海床液化潛能，其結果顯示彰濱離岸風場於地震作用下，確有液化之虞。

第九篇為「自升式風機安裝船支撐基腳承載力模型試驗」。自升式施工船為了於海上提供穩定的工作平台，皆以支撐基腳貫入海床，提供反力以抬昇工作平台於海面上。若貫入腳掌落於軟弱土層，則可能發生貫穿剪力破壞，造成平台傾斜，甚至無法收回支撐基腳。本文利用室內模型試驗，針對我國離岸風場可能面對的無凝聚性海床土壤進行貫入試驗，以評估後續施工平台船腳掌貫入深度與承載力。

第十篇為「離岸風電之海纜工程關鍵技術探討」。離岸風機基礎經J型管與海底纜線連結，從風機至陸域變電站之海底纜線佈設分為近風機端、深水段及淺海段。由於海底纜線於

近風機端可能因基礎鄰近淘刷而發生破壞。穿越海床時，若埋置深度不足，亦可能受船錨貫入衝擊。本文分別對於海底纜線進入風機、跨越既有纜線，深水區佈設及穿越海堤等關鍵實務施工技術考量提出說明。

第十一篇為「由歐洲經驗淺談離岸風場工址調查的重點」。本文主要介紹離岸風場海域土壤地質調查重點及相關規範，其中亦針對荷蘭錐貫入試驗設備介紹，同時說明進行海域土壤調查搭配應用船隻，提供離岸風場海域大地調查人員一概括性簡介。

本期地工技術之贈言，感謝新北市經濟發展局葉惠青局長對本期之贈言，葉局長曾任經濟部能源局局長，任內推廣綠色能源產業不遺餘力，包含太陽光電、風力發電以及生質能，從技術、環境、投資、需求等多個面向，加速產業技術滲透與升級，提升國際競爭力，並推動再生能源發展條例完成立法，為我國能源政策的發展與轉型奠定良好基礎。

由於全球積極開發再生能源，離岸風能因技術較為成熟，已成為主要商轉之再生能源發電設施。離岸風機設置成本高昂，其中基礎設計、製造與施工為最有可能降低成本之區塊。因此，離岸風電基礎設計相關研究為目前國際熱門研究方向。

2007年夏，編者於德國漢諾威大學擔任德國Forwind研究計畫研究助理，即將完成博士論文；巧逢台灣大學及國家地震中心離岸風電研究團隊至漢諾威大學訪問，始瞭解國內開始投入離岸風電開發。2009年春，在完成產業離岸風電基礎設計計畫後，編者放下正進行中的Alpha Ventus研究案，離開居住近六年的德國，返台擔任教職。由於適逢我國離岸風電發展起步，承蒙恩師陳景文教授、許泰文教授、林大惠教授及謝正倫教授協助，有機會參與2009年底至2013年之國科會國家能源主軸

離岸風電研究計畫，得以貢獻編者於德國所學，與國內產業互動，甚感榮幸，編者衷心感謝各位師長提攜。自2009年參與國內離岸風電開發推動至今，亦受到各產學先進照顧指導，尤其感謝國家地震研究中心柴駿甫博士、盧恭君博士、成大水利及海洋工程系高家俊教授、黃清哲教授、蕭士俊教授、成大航空太空工程系苗君易教授、呂宗行教授、國立台灣大學生態學與演化工程學研究所周蓮香教授、屏東科技大學土木工程學系徐文信教授、嘉義大學景觀系余政達教授，以及各位產業先進一路協助。對於長期陪伴我的海域大地與能源研究室伙伴，明珠、玉玲、姿郡、惠婷、迪瑩、智印、昱凱、韋禎、啟聖、偉宏、潔恣、博凱、克維及所有同學們，謝謝兩個字仍無法表達我心中的感謝。沒有各位的協助，本人無法完成這項編輯工作，我將這份成果與每一位曾經在研究室停留過的伙伴分享。

本人特別感謝林三賢教授給予本人彙整本期地工技術「海域大地工程離岸風機基礎及探勘」之機會，並且協助編者完成本期編輯工作。同時感謝地工技術研究發展基金會李碧霞小姐費心整理協調，並給予編者極大的包容與耐心，始得本期地工技術得以完成，由衷感謝。對於本期地工技術各文章撰文的作者，分享豐沛的研究成果與設計經驗，在此一併致謝。

我國離岸風電發展的道路仍然很長，也可以預見是一趟艱辛的旅途。我國少有本土自主產業發展；然而，我們的下一代需要一個可以維繫國家生存的產業支柱。希冀今日地工技術對離岸風機基礎設計與地工探勘的淺見，成為每一位讀者心中對於海洋工程與海洋能源憧憬的種子，在未來產、官、學界的團結努力下成長開花，為我國帶來經濟成長的甜美果實。