



離岸風場 大地工程 調查 與 詮釋 實務簡介

劉浙仁* / 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 正研究員

冀樹勇 / 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 主任

譚志豪 / 財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 資深研究員

目前國內已有 2 座離岸風場正式商轉，先後為海洋風場及台電離岸一期風場，商轉之總裝置容量為 237.2 MW，此外另有 7 座離岸風場業已完工，正處於試運轉測試階段，迄 2023 年 8 月已建置離岸風場之總裝置容量達 1,569 MW，且隨著第三階段區塊開發的展開，國內離岸風場正在穩健發展中，並創造許多離岸風場開發的工作機會，而國內廠商和工程顧問公司也正積極參與，站在國內經濟發展角度，自然希望提高本土廠商參與比例，並朝向自主開發的目標邁進。

離岸工程對於國內而言較為陌生，自離岸風場開發後，國內才陸續投入相關施工和製造能力，以及設計和評估之人才培育，因此本文針對離岸風機之大地工程調查與詮釋工作，由大地工程角度切入，介紹場址調查與大地工程詮釋的方法，並分享一些實務經驗。大地工程詮釋的目的在於將場址調查結果轉化為土壤的設計參數與條件，作為大地工程及結構設計的輸入，為風場開發中相當重要的環節。

ABSTRACT

At present, two domestic offshore wind farms have been operated in commercial scale, namely the Formosa 1 and the Taipower Offshore Wind Farm Phase 1, and their total installation capacity is 237.2 MW. In addition, another 7 offshore wind farms have been constructed and are in the testing stage for operation. As of August 2023, the total installation capacity of offshore wind farms has reached 1,569 MW. And with the unfolding of the third-phase development, domestic offshore wind farms are booming and creating many job opportunities in development. The domestic manufacturers and engineering consultants are also participating actively. From the perspective of domestic economic development, it is natural to expect the increase in participation of native companies and move towards the aim of domestic independent development.

Offshore engineering is relatively new to natives, and since the development of offshore wind farms, relevant capabilities of construction and manufacturing, as well as talent cultivation for design and assessment, have been developed. Therefore, this article focuses on the geotechnical investigation and interpretation for offshore wind turbine generators. From the perspective of geotechnical engineering, this article

introduces the methods of site investigation and geotechnical interpretation, and shares some practical experience. The purpose of geotechnical interpretation is to transform the site investigation results into design soil parameters and conditions, which can be used as inputs for geotechnical and structural design, and is a very important link in wind farm development.

前言

我國離岸風場自 2019 年海洋風場竣工後，於 2021 年開始逐年增加，迄 2023 年 8 月總裝置容量已達 1,569 MW（如圖 1），加上目前正在推展之第三階段區塊開發風場，我國離岸風場開發已正式進入蓬勃發展階段，並創造許多調查、設計、施工與製造相關之工作，由於離岸工程對於國內而言較為陌生，故國內離岸風場開發之執行單位多為國外大型公司，若以大型公共建設帶動產業及經濟發展為目標，則須提高本土公司參與比例，並朝向自主設計和建造離岸風場的目標邁進。

若依離岸風力發電區塊開發場址容量分配作業要點^[1]，經濟部將於 2026 年到 2035 年釋出 15 GW 容量

* 通訊作者，chejenliu@sinotech.org.tw

，並明確第 1 階段以 2026 年到 2031 年分 3 期釋出共 9 GW 辦理選商，目前已完成第 1 期風場分配，預計 2026 至 2027 年將有 7 座風場陸續完工併聯^[2]。一般離岸風場將於商轉約 20 年至 25 年後進行除役，除役後風場將成為新風場開發計畫之場址，因此離岸風場開發會持續進行，值得國內大型廠商與工程顧問公司作長期投入。

離岸風場的主要開發項目可分為離岸風機、海纜、以及離岸變電站等，依據各項目之設計與施工需求，會有不同之場址調查與評估項目，本文僅針對離岸風機之大地工程調查與詮釋工作，介紹其方法並分享實務上之經驗。

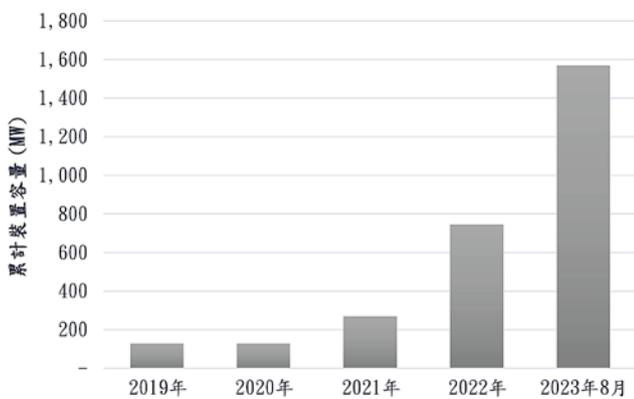


圖 1 國內離岸風場歷年裝置容量累計

(工業技術研究院綠能與環境研究所，再生能源資訊網站^[3])

大地工程調查與詮釋之目的

為滿足風機設計需求，風場開發會進行一系列之大地工程調查工作，調查結果經大地工程詮釋後，可轉化為設計土壤剖面與設計參數，作為基礎評估與結構計算之輸入。依據不同的設計標的，會安排不同類型或範圍之大地工程調查項目^[4]，例如樁基礎型式之風機會著重於樁周摩擦力相關的調查項目，且一般而言調查深度可能會達海床面以下 100 公尺；對於重力式基礎而言，則可能較著重於與沉陷量相關之調查，且相較於樁基礎，其調查深度較淺但範圍較廣。目前國內已商轉和正在建造階段之離岸風場皆採用樁基礎型式之風機，因此本文將針對樁基礎之調查項目作簡要介紹。

取得各項大地工程調查結果後，須依風場設計所用之各種設計方法，將調查結果轉化為各設計方法所需之輸入參數，此工作稱為大地工程詮釋，目的在於決定土壤的設計條件，一般會包含土壤的飽和單位重、相對

密度、過壓密比、側向土壓力係數、抗剪強度、勁度特性、反覆阻抗比、動態特性、反覆弱化行為、以及土和鋼的界面摩擦角等參數，由於大地工程詮釋過程中會將土壤進行工程土壤單元分類，且於指派試驗時會盡可能讓各工程土壤單元有足夠試驗數量進行統計，因此可獲得土壤參數之不確定性，進而導出參數之高估計值、最佳估計值、以及低估計值，設計單位可依需求選擇適當之估計值進行設計，例如進行極限程度分析時可能會考量土壤強度之低估計值，疲勞分析時可能會採用最佳估計，於檢核結構自然頻率時則會同時考量土壤勁度之高估計值和低估計值。

離岸風場大地工程調查方法

土壤參數可由現地試驗和室內試驗結果獲得，對於離岸風場而言，最重要的現地試驗為水壓錐貫入試驗 (Piezocone penetration test, CPTu)，其試驗結果可用於土壤分類，或可透過經驗公式估計各種重要靜態土壤參數，且其試驗結果為隨深度變化的連續量測值，可用於建立完整的土壤分層剖面，若於 CPTu 位置旁另施作一鑽探取樣孔，則可進一步安排室內試驗，並以試驗結果為「真值」進行 CPTu 經驗公式的校正，校正後公式可應用於整個風場，故只要有施作 CPTu 處，即可獲得設計土壤剖面及最佳推估之靜態參數。利用同樣的方式也可獲得風場內 CPTu 位置之剪力波速剖面，僅須挑選幾處於 CPTu 位置旁鑽孔進行懸盪式震測 (PS-Logging)，即可以實際量測到之剪力波速值校正 CPTu 經驗公式，並將其應用於整個風場。這種大地工程調查策略，可以較少的鑽孔數量，建立整個風場的設計用土壤參數，如此可縮短調查時間，並省下相當可觀的鑽探費用。雖然 CPTu 於風場開發中的應用層面相當廣泛，但鑽孔取樣後進行高階動態室內試驗，仍為獲得土壤動態參數之唯一途徑。

現地試驗

水壓錐貫入試驗 (Piezocone penetration test, CPTu)

於圓錐貫入試驗中，圓錐貫入器 (Cone penetrometer) 連接於圓桿之一端，以等速壓入土壤，並連續地量測貫入時圓錐 (Cone) 和摩擦套管 (Friction sleeve) 表面的阻抗值。若採用水壓錐貫入器 (Piezocone penetrometer)，水壓可能之量測位置有

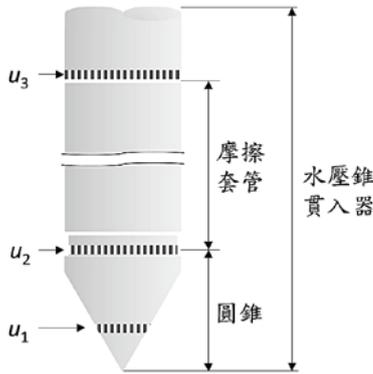


圖 2 水壓錐貫入器示意圖 [5]

三處，第一為位於圓錐上 (u_1)，其二為位於圓錐後方 (u_2)，最後為位於摩擦套管後方 (u_3)，詳細位置如圖 2 所示，但依據 ISSMFE 於 1989 發行之「International Reference Test Procedure」，其建議採用 u_2 水壓量測值，這也是目前業界的標準作法。由於 CPTu 的量測值為力學上的阻抗及對應之水壓，因此 CPTu 分類法係依土壤行為類別進行分類，可用以判斷土壤是否具有排水或不排水行為，有別於傳統上基於物理性質的土壤分類，CPTu 分類結果較能符合工程上對於選擇砂土或黏土公式的判斷準則。

懸盪式震測 (PS-Logging)

懸盪式震測系統為一種井測設備，呈長桿狀，其上包含 1 個震源和 2 個固定間隔之接收器，並以纜線垂吊，如圖 3 所示。纜線可支撐探測器並負責與紀錄 / 控制器間之訊號傳遞。首先將探測器置入鑽孔中達指定深度，然後震源於鑽孔流體中產生壓力波，此時壓

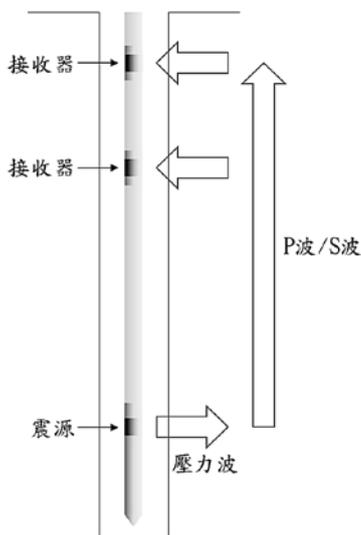


圖 3 懸盪式震測系統示意圖

力波會於井壁處轉換為地震波 (P 波和 S 波)，地震波接續沿著井壁傳遞，抵達接收器位置時又會於鑽孔流體中轉換回壓力波並被檢波器 (geophone) 接收，此時檢波器會將接受到之資料傳回紀錄器。波抵達兩接收器之時間差可用以決定鑽孔周圍接收器間高土壤柱之平均波速。PS-Logging 可以量測鑽孔位置隨深度變化之連續剪力波速值，剪力波速代表地盤的軟硬程度，為進行地盤反應分析之必要輸入參數。

鑽探取樣和室內試驗

為取得土樣進行室內試驗，風場開發於調查階段會進行海上鑽探調查，其中鑽探調查位置一般會以涵蓋風場為原則，並選擇進行載重迭代分析等之重要風機位置，主要考量為鑽探調查一般會進行全孔取樣，經土樣判釋後可獲得整孔土壤類型隨深度之變化，可用以比對 CPTu 土壤分層，並釐清可能造成非預期 CPTu 量測值的原因，例如小礫石造成之 CPTu 阻抗值突增，以及堅硬黏土或黏土中含礫石產生之負水壓量測值。

鑽探取樣

為能獲得現地土壤之力學特性，鑽探取樣時須避免土壤擾動，因此一般會採用薄管進行取樣，關於薄管取樣之規定可參考 ASTM D1587 規範，取樣管須以適當強度與耐蝕性之不銹鋼等材料製造，其厚度除應能承受靜壓而不致挫屈外，亦不可過厚而造成取樣時的土壤擾動。此外，薄管取樣器應為均勻圓管，管面須光滑清潔，不得有傷痕凹紋、銲縫、鐵銹或污物等，面層處理應於徹底清理之後行之，削口務須銳利，不得有裂口存在。在實務上遇土層含有小礫石時，可能會造成薄管的削口損傷，因此取樣時若使用舊薄管，應特別檢查削口的狀況。

室內試驗

依據土壤參數類型，可將室內試驗區分為 (1) 物理及化學類試驗、(2) 靜態力學類試驗、以及 (3) 動態力學類試驗，各類型試驗之說明如下：

(1) 物理及化學類試驗

試驗之目的為獲得土樣之物理和化學性質，例如含水量、單位重、粒徑分布、液塑性、雲母含量、碳酸鈣含量等，試驗結果主要作為土壤分類之依據，惟其中飽和單位重之估計相當重要，因其會直接影響現地垂直有

效應力的計算結果，現地垂直有效應力的應用面相當廣泛，除作為力學試驗之設定條件外，亦為大地工程評估和設計之重要輸入參數，另雲母含量和碳酸鹽含量會影響基樁之承載力，若風場內發現有高含量之雲母或碳酸鹽土壤，則須審慎評估其對於基樁之影響。

(2) 靜態力學類試驗

重要的靜態力學參數包含不排水剪力強度、 ε_{50} 、有效尖峰摩擦角、以及土-鋼界面摩擦角等，一般可透過三軸試驗和剪切試驗獲得，惟進行三軸試驗時，試體須經過飽和和壓密達穩定後才能進行壓縮，因此試驗所需的時間較長，其中若又採用異向壓密，則需更長時間才能達到穩定狀態。因此安排試驗時，可能須於計畫期程條件下，權衡試驗室能量後，進行試驗數量的增減。

(3) 動態力學類試驗

動態力學類試驗的主要目的為獲得土壤動態特性參數、特性參數隨反覆載重作用次數的變化、以及於反覆加載後的強度值，一般可透過共振柱試驗和動態三軸特性試驗獲得土壤的動態特性，並以反覆載重三軸試驗或反覆剪切試驗探討特性參數的變化，與靜態試驗結果比較後，可獲得土壤於反覆加載後的強度變化。安排反覆載重或反覆剪切試驗時，會先針對目標土樣進行 1 組靜態試驗，再安排多組不同平均應力比和反覆應力比條件之反覆試驗，因此須製作多組目標土樣的試體，若採用試體較長之反覆載重三軸試驗，則於安排試驗前須先確認有足夠長度土樣可進行試驗，但若採用反覆剪切試驗，則無土樣長度需求之壓力。

大地工程詮釋

大地工程詮釋係以工程應用為目的之土壤單元分類，採用基於統計之土壤參數模型，建立簡化具代表性分層之土壤設計剖面與參數，作為工程設計之輸入，其流程可參考圖 4。進行大地工程詮釋前，須先確認設計與相關評估工作所涵蓋之方法，了解各公式所適用土壤類型之條件，以及各方法所需之土壤參數。一般適用砂土類或黏土類公式係以排水和不排水條件作區分，因此進行工程土壤分類時，須明確定義所建立工程土壤單元屬排水或不排水單元，接著再使用室內試驗結果與 CPTu 經驗公式建立各單元之參數模型，最後使用所定義之工程土壤單元完成土壤設計剖面的分層，將各分層

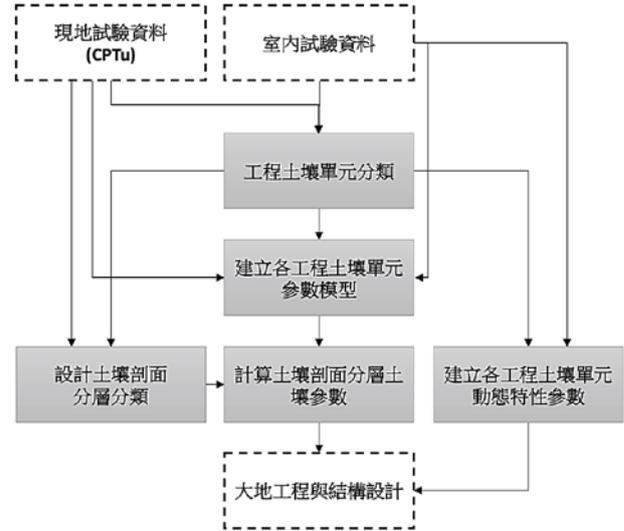


圖 4 大地工程詮釋流程圖

深度及對應之 CPTu 量測值代入該分層所屬工程土壤單元之參數模型，即可獲得該分層之設計參數。

定義工程土壤單元

因工程土壤單元須定義其具排水或不排水特性，因此一般會基於 CPTu 分類法建立工程土壤單元，並使用土壤行為分類指數 (Soil Behavior Type Index, I_{cn}) 作為判斷標準，當 $I_{cn} < 2.60$ 時土壤屬於排水行為類別，反之則為不排水。對於土樣而言，可依深度對應關係建立 ISO 分類 [6,7] 與 CPTu 分類之關聯，完成關聯後，即可將各深度之試驗結果分類到各類工程土壤單元中。一般實務上會建立兩類排水及兩類不排水工程土壤單元，由於各單元針對各項參數需要有一定的試驗數量進行統計，故單元愈多雖然可以獲得較精細的參數模型，但也因此須要安排更多的試驗，導致室內試驗時程延長。

建立土壤參數模型

由於各風機位置皆會進行 1 孔 CPTu，因此風場內各工程土壤單元皆有深度值及對應之 CPTu 量測值，當建立僅與深度相關之土壤參數模型時，則該參數模型可直接針對試驗結果分深度進行統計，建立深度與土壤參數之關係，若要建立與 CPTu 量測值相關之土壤參數模型，則須使用 CPTu 經驗公式推估土壤參數，並以試驗結果獲得之參數為「真值」校正經驗公式，校正後之經驗公式即可作為參數模型使用。由於參數模型

的估計值可與試驗結果比對，因此藉由統計方法可評估參數之高估計值、最佳估計值、以及低估計值，亦即可獲得量化之土壤參數不確定性。當土層之工程土壤單元分類、深度以及 CPTu 量測值皆為已知時，即可將前述已知條件代入各參數模型中獲得所需之土壤參數值。

土壤設計剖面與設計參數

取得 CPTu 量測資料後，先使用 CPTu 分類法進行分層分類，再套用工程土壤單元的定義，建立工程土壤單元的分層，此時可能會遇薄土層的情況，於工程應用上，由於薄土層對於樁土互制行為的貢獻甚低，且土壤模型中的薄土層可能造成數值求解上的問題，因此實務上會將土層作適當地整併。完成土層整併後即可獲得土壤設計剖面，接著使用所建立之土壤參數模型，將設計剖面中各分層之設計參數求出。

實務上的挑戰

台灣外海於東北季風旺盛期間皆不適於進行海上作業，而 6 至 10 月又可能遭遇颱風侵襲，依氣象局統計資料，每年約有 3 ~ 4 個颱風會侵襲台灣，颱風接近所造成之風浪會打斷海上調查作業，作業船隻必須回港作防颱準備，因此離岸調查工作易受不良海況影響而延宕，導致後續室內試驗以及大地工程詮釋工作期程被壓縮，為了應對可能之計畫期程緊縮，增進大地工程詮釋的效率即為一重要課題。

此外，大地工程調查包含各風機位置之現地試驗，以及近萬組之室內試驗結果，產出之資料量相當龐大，因此進行大地工程詮釋前，首要任務為資料的前處理及格式的轉換工作，雖然業界一般會採用英國大地工程和地質環境專家協會（Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists, AGS）提出之通用資料交換格式，但於資料交換時，仍可能遇到 AGS 格式的版本差異以及廠商自定義格式的問題，特別是當有多家現地調查廠商參與風場開發計畫時，資料的前處理工作會更為繁重。

為進行大地工程詮釋，須與試驗室和設計單位相互配合，設計單位依選定之設計方法進行試驗規劃，試驗室則依據設計決定之試驗清單進行試驗，其中針

對高階動態試驗，設計單位先會確認土樣之工程土壤單元分類，並參考靜態試驗結果訂定動態試驗參數，且當試驗完成一定數量時，可先進行初步大地工程詮釋，以獲得各工程土壤單元的試驗數量，設計單位再據以修訂後續試驗清單，以確保有足夠試驗數量讓各參數估計值具有統計意義。因此進行大地工程詮釋時，與試驗室和設計單位的溝通界面相當重要，有效率的溝通方式可大幅縮減試驗等待時間，且確保各工程土壤單元的試驗數量後，可直接採用統計估計值，避免使用較保守之工程判斷方式估計參數值。

結語

為能進行離岸風場之大地工程設計，由大地工程調查開始，即應引入設計方法，依設計需求進行各項現地調查與試驗，再經過基於統計方法之大地工程詮釋，建立土壤設計剖面與包含高估計值、最佳估計值、以及低估計值之土壤設計參數。相較於工程實務面遭遇的挑戰，大地工程詮釋工作相對而言較為單純，惟仍須以深入之室內試驗與大地工程專業為基礎，判斷獲得之參數是否合理，並釐清非預期試驗結果的可能原因。

離岸風場的大地工程詮釋係以 CPTu 應用為主，採用統計方法結合室內試驗成果，提出基於土壤行為類別之分類與分層，可區分土壤具排水或不排水特性，並產出具統計意義之設計土壤參數，除可呈現土壤材料之不確定性外，亦可用於不同目的之設計檢核評估，值得國內大地工程業界參考。

參考文獻

1. 經濟部能源局，「離岸風力發電區塊開發場址容量分配作業要點」（2021）。
2. 台灣電力公司網站 <https://www.taipower.com.tw/tc/index.aspx>。
3. 工業技術研究院綠能與環境研究所，再生能源資訊網站 <https://www.re.org.tw/information/statistics.aspx>。
4. API RP 2GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations (2014).
5. Lunne T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M., Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic & Professional. First revision (1997).
6. ISO 14688-1, Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil—Part 1: Identification and description (2017).
7. ISO 14688-2, Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil—Part 2: Principles for a classification (2017). 