

地工技術

技術資訊專欄

由歐洲經驗淺談離岸風場工址調查的重點

常欣玉* 李駿基**

一、前言

台灣過去數十年伴隨著經濟發展，累積許多陸上工程經驗，相較之下，國內工程師在離岸風力發電所真正面對的離岸環境經驗尚淺。如果引用過去陸上工程經驗，由陸上觀點看海上，容易形成盲點，尤其設計前期的工址調查，對於專案開發影響甚鉅，有必要釐清正確的觀念與想法，參照歐洲經驗加速台灣的學習曲線是本文的出發點。

在歐洲離岸風電發展的過程中，海床地質與土壤問題一直以來深深困擾著風場開發商與專業工程師，由於離岸風電高投資和高風險的特性，高品質的調查有助於降低開發風險及成本。以歐洲經驗來看，目前地質調查經費約佔總開發經費的 1~3%(依地質複雜程度而定)，如以 100MW 的中小型風場，大約在 1~3 億台幣之間，這經費有逐年增加趨勢。

與陸上工程相較，離岸風場開發的特性如下：

1. 需要調查廣大面積：離岸風場面積廣大，以英國第三階段的北海 Dogger Bank 風場為例，單一風場面積就達到 $8.66 \times 10^9 \text{m}^2$ ，等同四分之一個台灣面積。

2. 離散的佈設區位：風機為避免尾流干擾，設置多半相隔數百公尺，需要調查的區位十分離散。

3. 變化多端的地層：在同一個風場中，部分區位的岩盤可能鄰近海床，鑽探及現場試驗橫跨土壤與岩石之間，為達成最好的調查品質，設備的選擇需有多方面的考慮。

4. 海洋環境的特殊性：風機在海洋環境中複雜的荷載，包括了風、海、流反覆的作用力，使用先進的室內試驗是必要的。

5. 潛在的地質災害(Geohazard)：諸如海

底邊坡穩定、淺層氣體、海床深溝與沖刷現象、海生物造成的軟質土壤夾雜硬質土層等所構成的單一或相互的風險。

面對如此的挑戰，地工工程師需要周詳的規劃，良好的調查設備，適當的調度，結合室內試驗與現場試驗的成果，才能達成預期的目標。

二、工址調查邏輯與流程

離岸風場的工址調查(詳照片一)，從資料蒐集、地球物理調查、地工調查數個層面，由淺至深，缺一不可。

1. 先從地區性的資料蒐集開始，了解區域地質狀況，並且衍生出初步的地層模型(Ground Model)，這個初步的模型，有利於形成調查的規劃。

2. 進行地球物理調查，以專業的儀器取得高解析度、高品質的資料，地球物理調查資料再次整合初步地層模型，找出土層的分佈與狀況。

3. 進行現場地工調查，按照先前發展的初步模型，決定土層特性與力學參數，利用先進的土壤力學試驗使鑽探取樣發揮最大效益。



照片一 離岸風場工址調查流程

* 船舶暨海洋產業研發中心

**香港輝固國際工程顧問有限公司

4. 發展完整的地層模型，利用地理資訊系統 GIS，將多方面的資訊整合進資料庫，有助於風險量化及地質災害的管控。

三、國際上離岸風場工址調查規範

離岸風場調查的終極目標與離岸油氣 (Oil & Gas) 產業類似，油氣產業長久以來累積經驗，對調查水平要求極高，需有足夠的調查數量與高品質結果，才能發展出精確的地層模型，繼而做出合適的基礎設計和施工方案。由於同屬離岸環境，油氣產業所用的調查設備及規範沿用至離岸風場開發。

國際現今離岸調查規範多參照美國石油協會 API、國際標準組織 ISO、德國海事水文局 BSH、水下技術協會 SUT，由於過往經驗對於海中基礎結構設計的了解，這些組織中有成立委員會不斷的修正規範內容。至於其它認證組織，因離岸風場認證與海事的相關研究，也扮演了重要的角色，組織包括美國驗船協會 ABS、挪威船級社 DNV、勞氏驗船協會 GL 等。

常用調查規範如 ISO 19901-8 (2013), DNV (2011), SUT (2014) 和 BSH (2003)，值得注意的是，各國規範往往受制於地域性的差異，工程師使用時需要特別考慮當地的適用性。

規範中說明了調查需考慮的因素，重要因素的像是是否有鄰近調查資料、地質複雜程度、所需的土壤參數等。舉例來說，在一廣大的開發區域，如有數個鄰近區域的調查資料佐證，且地質相對均質，會比一個全新的、且地質複雜的區域需要調查孔數少。

四、地球物理調查

為了解廣大區域的地質狀況，在地工調查之前需要先進行地球物理調查。

根據水下技術協會 SUT 於 2014 公布的技術指引，地球物理調查是在離岸風場調查必備的項目，地球物理調查利用聲學原理，得到以下的資訊：

1. 海床地形。
2. 在測線下方垂直向的聲學性質，可提

供大範圍地層分布的概況。

3. 地層的水平向的連續性與厚度的變化。

4. 地層的走向、地質構造。

5. 土層的性質，可與地工調查互相比對，也可外推地工調查未涵蓋的位置。

6. 依據地層的聲學特性，可大致推導出材料的物理特性。

任何地工調查前必須先進行地球物理調查，利用地球物理調查可了解地層的變化程度，直接影響了後續地工調查計畫。

地球物理調查，至少要針對風機位置與海纜位置，進行多波速測深儀 (Multibeam Echosounder)、震測剖面 (Sub-bottom Profiler) 調查、側掃聲納 (Side-scan Sonar) 調查、磁力探測 (Magnetometer) 調查。以上這些調查資料要盡可能同時取得，避免分次取得。

地球物理調查的結果可用於確認資料蒐集的精確性，也會發現許多非預期的情況，這些就會變成地工調查的重點。另一個地球物理調查的優點，在於辨識可能的地質災害，如同淺層氣體等，有助於降低地工調查的操作風險。

儘管很多學者努力改善，但至目前為止，震測資料的精確性仍然不足，無法作為土壤強度特性的定量描述，因此不能僅以地球物理調查資料就進行離岸風機基礎設計。

五、地工調查

5.1 調查計畫的擬訂

在計畫階段，儘可能蒐集相關的資料，如地質、地球物理及先前鄰近區域的調查結果，才能選擇適合的調查船隻或工作平台，這一階段做的決定，將會影響調查預算的成本控制。

離岸工址調查危險性等同施工，在國外，勞工安全衛生永遠是擺在第一，並須配合良好的事先計畫。調查計畫是由風場開發商、承包商、分包商共同完成，並須確保安全操作及減少環境衝擊。

地工調查能夠取得基礎設計所需要的參數，並能正確辨識土壤的分類，才能發展出完

整的地層模型。土壤參數要能夠符合細部設計的需求，包括了土層在三維空間的分佈狀況，及土壤強度在三維空間的變化。為了達成目的，優質的取樣品質才能夠精確的推導出土壤參數供作設計。

一般離岸風場缺少鄰近資料情況下，需要取得每個風機基礎位置的地層分佈，採用圓錐貫入試驗是比較經濟的做法。圓錐貫入試驗的優點在於經濟、快速及其連貫的獨特性，並可與鑽探取樣試驗的結果互相比對，加強工程師在發展地層模型的信心。

鑽探取樣因為經濟性考量，不會在每一個基礎位置進行，工址調查在符合品質、效率的前提下，工程師需找到最經濟的方案，一般歐洲經驗鑽孔數量會取 20%~30%基礎總數量。

整個工址調查報告須在設計前完成，所以需要足夠的時間去完成現場工作、試驗及解析。在一些大型的專案，常常將地工調查分成數個階段進行，第一階段的初步地工調查有助於釐清細部調查工作。細部地工調查取得大量可用的資料，如有特別的疑慮，也得針對某一特定區位進行補充地工調查。

整個調查計畫，可能因為非預期的地工調查結果、設計單位對基礎型式的改變，導致調查計畫需要跟著變更。常見的情況如風機配置的變更，探勘位置也需跟著變動，因此調查作業需要保持一定的靈活性。調查的團隊需要足夠的經驗、技術、權限，去做必要變更，以達成專案調查的目標。

5.2 離岸地工調查技術與船隻的選擇

工址的區位及範圍，預期的地質狀況，左右了鑽探取樣及現地試驗的方式，進而左右了調查船隻的形式與尺寸。調查的船機必須要有船級認證，作業前與作業中須定期檢視，這部分依據國際海事組織、船級社規定辦理。

市場上有多種調查的設備與船隻，用於離岸風場調查，其中包括了：

1. 大型的自升式平台船（如照片二），可適用波高 1.2m 以下的海況。船上可搭載 25 名工作人員，需要搭配拖船及人員運輸船，進行岩層鑽探、土壤取樣及現地荷蘭錐貫入試驗，甲板上大型吊車利於海床式圓錐貫入試驗

操作。因平台船站立於海床上，提供穩定的工作環境，不需搭配波浪補償系統是其優點，但一般有工作水深的限制。

2. 大型施工用平底駁船（如照片三），利用下錨固定，可適用 2.5m 以下波高海況，船上一般可搭載 25 名工作人員，因波浪會造成船體運動，需以波浪補償系統消弭運動影響，進行岩層鑽探、土壤取樣及井下式荷蘭錐貫入試驗。

3. 小型專業調查船(如照片四)，可進行鑽探取樣及現場試驗，適用海況較為狹窄，常限制在 1.2m 波高以下。採用動態定位系統 DP1 或搭配下錨固定。需要配合波浪補償系統，進行岩層鑽探、土壤取樣及井下式荷蘭錐貫入試驗。

4. 大型專業調查船(如照片五)，適用波高達到 3.0m, 主要以動態定位系統定位。搭配波浪補償系統，進行岩層鑽探、土壤取樣及井下式荷蘭錐貫入試驗，船上有大型 A 臂，亦可進行海床式圓錐貫入試驗作業。適用海域廣是其優點，但動員費用較貴。

5.3 離岸地工調查設備

目前地工調查的現地試驗及取樣有兩大類型。調查設備需由國際認可組織校正，獨立的專案必須有獨立的校正報告，才能確保調查品質。

1. 利用鑽探孔底取樣或試驗，一般稱為井下式(Down-hole Mode)。

2. 於海床面往下貫入或取樣的設備。一般稱為海床式(Seabed Mode)。

5.3.1 井下式

井下式是利用預先鑽好的鑽孔下方，進行取樣或試驗。井下式一般又可分為兩種(Hawkins & Markus 1998)：

1. 試驗及取樣利用液壓加壓操作，再以訊號線回傳至甲板，因此可即時取得資料，液壓操作所須液壓油及加壓設備，也是由調查船遠端操作，如 Fugro WISON® Mk III。

2. 以鋼纜沉降至孔底，然後利用海水或泥漿，以自身的加壓設備來推進，以 Fugro XP® System 作為代表。

地工技術



照片二 大型自升式平台船 Fugro Excalibur



照片三 大型施工用平底駁船



照片四 小型專業調查船 Fugro Commander



照片五 大型專業調查船 M/V Gargano

井下式系統可輪流進行圓錐貫入試驗、現地十字片剪試驗(In-situ Vane Shear Test)或取樣。以圓錐貫入試驗而言，井下式目前可做到一次推進 3.0m，然而現地十字片剪試驗通常 0.75m 或 1.5m 施作一次，需要互相錯開。對於鬆軟的土層，鑽探擾動的影響可能 0.4m~0.8m，因此需要考慮現地試驗或取樣的位置，並在解釋資料時納入考量。

與海床式相比，井下式較無探測深度的限制，較適用於深基礎的探勘。

5.3.2 海床式

海床式(如照片六)適用於探測鬆軟的沉積層，探測深度取決於設備反力及油壓壓力，往往不是恆定，但與井下式相比，施作快速是其優點，較適用於初步階段的基礎探測及管線區位調查。



照片六 海床式 CPT-Fugro Seacalf

如果採用海床式，一般需搭配大型的調查船或自升式平台船，且甲板上備有 15~20 噸起重設備。

海床式由於貫入深度受限，一般較適合深度 40m~50m 以內軟質的土層，但是只要事先的規劃，海床式系統同樣可用於較堅實的海床，如北海、英倫海峽、愛爾蘭海也都有採用。

在歐洲，海床式系統發展日新月異，如 Benthic Geotech (Cater et. al., 1999)以水下載具的經驗，結合海床取樣及圓錐貫入試驗的設備，稱 Portable Remotely Operated Drill (PROD)，如照片七，它的特性有：

1. 適用深達 2000m 海域。
2. 旋轉式鑽探及取樣。

3. 外徑 44mm 活塞取樣器，取樣長度達 2.75m，可於深度 125m 以內操作。

4. 圓錐貫入試驗設備，外徑 36mm，行程 2.0m，可於深度 100m 以內操作，且以聲波方式傳遞訊號，取代有線傳輸。

5. 圓錐貫入試驗錐頭可更換為外徑 60mm 的球型探頭。

另一個常用的海床式為小型的圓錐貫入試驗。一般 ISO 標準的錐頭截面積 10cm^2 ，需要很大的反力來貫入，而小型探頭的截面積僅 $2\sim 5\text{cm}^2$ ，反力大幅減小，除了探頭小，另一個特徵採用線圈取代推桿，操作十分簡便，降低船舶噸位，提升經濟性。但小型的圓錐貫入試驗非 ISO 認定的標準化錐頭，且因為推力小，貫入深度有其限制(一般在 15m 以下)，在歐洲，這類技術多用於電纜路徑調查和早期的環境影響評估，並非用於基礎設計。

5.4 淺層取樣設備

除了重型、昂貴的海床式系統，常用於淺層的海床取樣系統設計較為輕巧，易於運輸。目前市場上的取樣系統，多半在船尾裝設一個 A 型架，來協助起吊設備。由這點來看，多數的風場可採用多樣化的調查船，而不一定需要使用深海的專業調查船。

如以英國第三階段而言，重力式基礎被認為是可能的基礎選項，由於重力式的尺寸與重量，需要清楚的了解淺層土壤特性，如果土質許可，淺層取樣是對於淺層土壤及特定土層，具快速且經濟的優點。

淺層取樣常用的設備介紹如下：

1. 大型活塞取樣器 Jumbo Piston Corer — 適用於軟質土壤，可取出較大直徑、長度的試樣，目前可做到長達 20m 的取樣。

2. 高效能震動式取樣器 HPC™ — 採用創新的震動馬達來推進取樣外套管，外套管外徑 101.6mm，長度可達 3~8m，試樣被封存在 PVC 製內套管(外徑 84.14mm)，這套系統取樣率十分優秀。

5.5 取樣方式與品質

調查作業的品質取決於良好的計畫、適當的設備、國際規範引用，取樣品質與設備間的關係如表一所示。



照片七 Benthic 的 PROD 系統



照片八 DATEM 的 Neptun 3000 系統

5.6 現場試驗

5.6.1 圓錐貫入試驗

在所有地工調查中，圓錐貫入試驗是最重要的現地試驗。在歐洲及美洲，此技術往往被認為是最適合解析土層，並且也是最常見的離岸風場探勘方式。離岸調查用的圓錐貫入試驗原理與陸上雷同，量測三種數值：錐尖阻抗 q_c 、側壁磨擦力 f_s 、孔隙水壓 u ，利用圓錐貫入試驗進行土壤分類的研究很多，常用的如利用側壁磨擦力及孔隙水壓校正後的錐尖阻抗，兩者比值來確認 (Robertson 1990, Ramsey, 2002)，這樣的比值在黏性或砂性土壤並不相同，可利用於土壤分類。

土工技術

表一 取樣方式與品質的關係 (SUT,2014)

取樣設備	試樣品質				取樣率			
	砂土	黏土	鈣質土	軟岩	砂土	黏土	鈣質土	軟岩
淺層取樣設備								
重力式取樣/活塞取樣器	2	3	3	1	1	3 to 4	3	1
震動式取樣器	2 to 3	2 to 3	2 to 3	2 to 3	3 to 4	2 to 3	3	1
挖斗式取樣器	1 to 2	1	1	1	1 to 2	2	2	1
盒狀取樣器	1 to 2	5	3	1	2	5	3	1
下孔式取樣設備								
液壓活塞式取樣器	3 to 4	5	3	1	3	5	3	3
液壓下壓式取樣器	3 to 4	4 to 5	3	1	3	5	3	3
鋼繩衝擊式取樣器	3	2	2	1	4	4	3	2
槌入式取樣器	2 to 3	2 to 3	2	1	3 to 4	3 to 4	3	2
螺旋式取樣器	1	2	5	5	1	3	5	5

備註： 1-不佳或不合適 2-僅可容許於重要性低的分析 3-普通 4-佳 5-極佳

除了土壤分類，圓錐貫入試驗現地經驗的累積，建立了許多錐尖阻抗與其他土壤參數的關係，包括了黏性土壤的不排水剪力強度、砂性土壤的相對密度及其他相關參數(Lunne et al., 1997, Robertson 2009, Baldi et al., 1986, Mayne ,2006)。同樣的，經驗公式也將試驗數值作為基礎設計參數，如承载力估計、淺基礎的沉陷量估計等(Fugro,2004;Jardine et al., 2005, Lehane et al., 2005)。

5.6.2 薄膜介面探頭設備

為了探測淺層氣體，薄膜介面探頭 Fugro MIP-CPT 可達到以下功能：

1. 辨識沉積層中的淺層氣體。
2. 連續性量測淺層氣體的壓力。
3. 氣體及孔隙水取樣
4. 確認淺層氣體的組成
5. 與圓錐貫入試驗同步探測

5.6.3 圓錐貫入試驗與標準貫入試驗

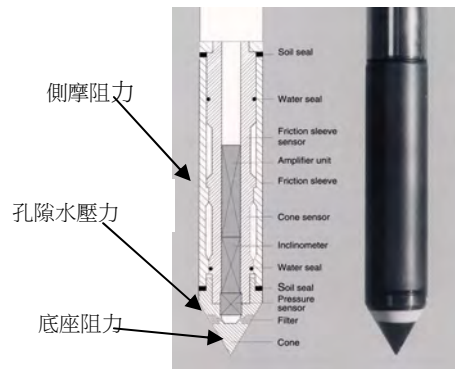
國內常用標準貫入試驗 SPT 作為土層推估，但在海洋環境下施作，標準貫入試驗有顯著的缺點，有必要特別指出。

1. 圓錐貫入試驗運用自動化的試驗儀器，排除人為造成誤差，重複性高。

圓錐貫入試驗是連續性參數，標準貫入試驗本身的限制造成資料不連續性，如中間發生記錄錯誤，甚至會有安全性的疑慮。(如施工階段的平台船翻覆)。



照片九 高效能震動式取樣器 Fugro HPC



照片十 一般圓錐貫入試驗探頭構造

2. 標準貫入試驗不利於淺層海床判讀，尤其重力式或吸力式基礎設計對淺層海床參數十分敏感，更不適用。

3. 標準貫入試驗最大優勢來自於取回擾動土樣室內試驗，但海洋地質受環境、溫度的敏感度較大，一般均認為現地試驗較有價值。

4. 標準貫入試驗一般搭配鑽桿使用，海中懸空這段受波浪與海流衝擊，一般為了保護與固定，需要增加立管與底部壓重塊。最大的疑慮來自於立管是否可承受海洋環境下的作用力，如果勁度不佳，鑽桿與立桿間產生磨擦力，數值更不準確。

5. 標準貫入試驗在陸上經驗豐富，價格低廉，但對於離岸風場而言，粗略的探測結果，使開發商暴露在高風險，標準貫入試驗在離岸環境下並非主流方式。

六、離岸風場開發所需要的室內試驗

多數的規範，均要求室內試驗要能精確的將土壤分類並描述，並決定土壤的剪力強度與壓縮特性，由於海洋環境下，風、波浪、海流造成的反覆荷重，使得室內試驗需要考慮材料的動力特性。

室內試驗的時程，要由有經驗的工程師，根據現場作業來進行規劃，室內試驗需要足夠的試樣去解析土壤特性，以便於發展地層模型，而各種力學試驗成果可用於基礎設計。表二列出了室內試驗及可取得的參數。

室內試驗包括了基本的單位重及含水量，粒徑分佈曲線、顆粒密度，及一些必要的化學試驗。為了瞭解同一土層於不同深度的變化，應在不同鑽孔中，取不同高程的試樣進行試驗。通常淺基礎對於參數比較敏感，在淺層的取樣頻率要比較高。

對於砂性土壤，應進行夯實試驗，可界定密度的範圍。物性試驗取得的資料，再依據圓錐貫入試驗結果推斷現地的相對密度，以進行直剪試驗、等向壓密排水三軸試驗試體的準備。

對於黏性土壤，液性限度及塑性限度可說明了土壤的特性，需要試驗的次數取決於含水量、單位重的一致性。

不排水剪力強度的取得，可利用袖珍型十字片剪試驗儀、可攜式貫入儀、不壓密不排水三軸試驗。其他更精確的試驗，如非等向不排水壓縮/拉伸三軸試驗、等向壓密排水三軸試驗、單剪試驗，以不擾動的高品質土樣進行。

試驗過程中所受的應力條件，應盡量接近自然環境中的應力條件。試驗結果可決定異向性土壤剪力強度範圍，及決定圓錐貫入試驗試驗換算土壤不排水剪力強度(S_u)的參數(N_{kt})範圍。前述土壤異向性特性，對於淺基礎，如吸力式或重力式基礎尤其重要。對於黏土而言，在一半極限強度下的應變，可用來選取土壤側向彈簧係數，試驗的方法以等向壓密排水三軸試驗會比不壓密不排水三軸試驗來的準確。

表二 離岸風場調查的室內試驗

土壤參數	室內試驗種類
土壤分類	粒徑分佈曲線(PSD)、顆粒密度(PD)、含水量(WC)、阿太堡試驗(AL)、夯實試驗(MM)、滲透率、化學成分
密度	單位重(UW)、含水量(WC)
土壤強度	不壓密不排水三軸試驗(UU)、非等向不排水壓縮/拉伸三軸試驗(CAUc、CAUe)、落錐試驗(FC)、可攜式貫入儀(PP)、袖珍型十字片剪試驗儀(TV)、十字剪切試驗(LV)、單剪試驗(DSS)
岩石強度	無圍壓試驗(UCS)、點荷重試驗(PLT)
磨擦角	等向壓密排水三軸試驗(CID)、直剪試驗(Shear box)、環型剪力試驗(RS)
靈敏度	落錐試驗(FC)、十字剪切試驗(LV)、單向度壓/固定應變速率壓密試驗(OED/CRS)、不壓密不排水三軸試驗(UU)、非等向不排水三軸試驗(CAU)
壓密特性	單向度壓/固定應變速率壓密試驗(OED/CRS)、不排水三軸試驗(UU)、非等向不排水三軸試驗(CAU)、等向壓密排水三軸試驗(CID)
小應變下土壤勁度	彎曲元件(BE)、共振柱試驗(RC)
反覆載重下行為	反覆單剪試驗(CSS)、動三軸試驗(CTXL)

地工技術

利用壓電陶瓷製造的彎曲元件，可於三軸試驗時貼附在試體的上下，利用剪力波量測極小應變下的水平、垂直剪力模數。共振柱試驗，可取得小應變下的土壤勁度及隨著應變增大產生的勁度衰變，前述小應變下的土壤勁度，對於準確預測離岸風機基礎的變形十分關鍵，而試驗的結果，可與井下式膨脹儀等現地試驗互相參考。

固定應變速率壓密試驗或傳統的單向度壓密試驗，可用於評估土壤單向度壓密的特性，在歐洲北海，由於冰河時期的壓力及其他排水潛變的過程，許多土層有過壓密的應力歷史，壓密特性變得特別重要。

離岸風機基礎長時間受反覆的載重，反覆加載的試驗，如動三軸試驗、動單剪試驗，可提供土壤在反覆載重下的強度變化評估。

反覆載荷下土壤強度的變化，可視為土壤強度的折減，這種現象發生於疏鬆砂土、鈣質土及過壓密黏土。反覆載荷源自於風、海、流的外力，設計者視需求考慮營運期可能經歷單一或連續性的暴風影響。

土壤反覆載荷下，對細顆粒土壤會使超額孔隙水壓逐步增加，在不排水情況下逐步減少有效應力；對粗顆粒土壤會因排水情況，土壤永久體積變化導致強度降低。尤其是離岸風電基礎深受外力影響，這是設計階段重要的考量。

對於細顆粒土壤，前次暴風累積產生的超額孔隙水壓，如未消散，在下次暴風時可能產生近兩倍的超額孔隙水壓，嚴重折減土壤強度。但在反覆作用多次後，會造成土壤的過壓密現象，使得超額孔隙水壓不易增生(Poulos 1988)。

一般來說，動三軸試驗的加載次數要能夠反映真實基礎的狀況，試驗結果，可比對目前挪威海工技術研究所對於 Drammen Clay 及 Baskarp Sand 所作土壤反覆受載的力學模型 (Andersen et al.,2004; Andersen & Berre, 1999)，如果比對結果與既有模型有出入，則必須要更多試驗來發展特定區域的土壤反覆載重的衰減特性。

表三顯示的是 Eurocode 7 (BS EN

1997-2 :2007) 所建議的單一土層最少的土壤力學試驗數量，重要的是，只有在良好的地球物理探測結果配合下，才能妥善運用有限的試驗數據。

表三 Eurocode 7 建議的最少力學試驗數量

試驗種類	是否有過去資料	
	無	有
粒徑分佈	4-6	2-4
含水量	對所有試樣	
點荷重	對所有試樣	
阿太堡試驗	3-5	1-3
有機物含量	3-5	1-3
容積密度	每一物性試驗作一組	
顆粒密度	2	1
化學成分試驗	視地質決定	
三軸 CID 試驗*	4 [^] #	2 [^] #
不排水剪力強度*	6 [^] #	3 [^] #
直剪試驗	4#	2#
壓縮性試驗	4#	2#

* 室內剪力強度試驗可因現地試驗資料適度減少。
[^] 單一組試驗結果係由三個不同圍壓下試體的結果。
最佳的建議值

七、結 論

對於離岸風場調查而言，預算控制的兩個最大的風險，乃來自於土層的不確定性和潛在的地質災害，這兩個風險不單影響調查工作，進而影響專案的工安、基礎設計、施工、環保等，因此工址調查佔專案經費比例逐年上升。

為了減少風場開發的風險，有必要系統性、整體性的找出理想調查方式。了解大範圍的開發區域，需要的是非傳統的工程認知，以及在短時間內各種資訊的充分整合，這種離岸工址調查的技術，已廣泛的被各個地工專家如等人說明 (Power et al.,2010;Evans, 2011; Hill et al.,2011)，國內尚屬起步階段，有必要吸取歐洲當地的經驗，尤其是加強地球物理調查與地工調查的整合，選用離岸專用的調查方式與設備，規劃先進的室內試驗，才能發揮最大的效益。

毋庸置疑，海洋獨特的環境，使得離岸工址調查成為高技術門檻，高資金需求的產業，也造成某種程度的寡占性，國內短期內還不

定會有大量的投入。但因循既有的陸上調查方式，而不採用高品質的離岸調查，雖可減少前期投入的成本，卻使後期施工、維運階段曝露在高風險中，以歐洲經驗來看，再再證明『省小錢花大錢』並非聰明之舉，值得國內的大地工程師借鏡。

參考文獻

- Andersen, K. and Berre, T. (1999) Behaviour of a dense sand under monotonic and cyclic loading. ECSMGE XII Geotechnical Engineering for transportation Infrastructure
- Andersen, K. H. (2004) Cyclic clay data for foundation design of structure subjected to wave loading Invited keynote lecture: Proc. Int. Conf. on Cyclic Behaviour of soils and Liquefaction Phenomena, CBS04, Bochum Germany, Balkema: Rotterdam
- Baldi, G., Bruzzi, D., Superbo, S., Battaglio, M., & Jamiolkowski, M. (1986) Interpolation of CPTs and CPTUs; 2nd Part : Drained Penetration of Sands. Proc. Of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore, 143-56.
- British Standard, BS EN1997-2 (2007) Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH (2003) Standard for Geotechnical Site and Route Surveys - Minimum Requirements for the Foundation of Offshore Wind Turbines and Power Cable Route Burial Assessments
- Cater, J. P., Davies, P. J. and Krasnostein, P. (1999) The Future of Offshore Site Investigation – Robotic Drilling on the Sea-bed. Australian Geomechanics, 34(3), 77-84
- Det Norske Veritas AS, DNV-OS-J101 (2011) Design of Offshore Wind Turbine Structures
- Evans, T. G. (2011) A systematic approach to offshore engineering for multiple-project developments in geohazardous areas. Proceeding of the Second international Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, November 2010
- Fugro (2004) Axial Pile Capacity Design Method for Offshore Driven Pile in Sand. Report Number P1003 to API
- Hawkins, R. A. and Markus, A. (1998) New Developments in Offshore Geotechnical Investigations. Proc. Int. Conf. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, SUT, London 259-276.
- Hill, A. J., Fisk, M., Fish, P. R., Thomas, S. (2011) Deepwater Angola: Angola : Geohazard Mitigation. Proceedings of 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia, November, 2010.
- International Standard, ISO 19901-8 (2013) Petroleum and Natural Gas Industries : Specific Requirements for Offshore Structures – Marine Soil Investigations.
- Jardine, R., Chow, F., Overy, R. and Standing, J. (2005) ICP Design Methods for Driven Piles in Sand and Clays. Thomas Telford, London, UK.
- Lehane, B. M., Schneider, J. A., and Xu, X., (2005) A Review of Design Methods for Offshore Driven Piles in Siliceous Sand. UWA Report GEO 05358
- Lunne, T., Robertson, P. K., Powell, J. J. M. (1997) Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Spon Press, London.
- Mayne, P. W. (2006) Undisturbed sand strength from Seismic Cone Tests. The 2nd James K. Mitchell Lecture, Aberdeen 1975, Paper No. OE-75 220.1
- Poulos, H. G., (1988) Marine Geotechnics, Unwin Hyman Ltd., London 473
- Power, P. T., Clare, M., Rushton, D. and Rattley M. (2010) Reducing Geo-risk for Offshore Development The 3rd International Symposium on Geotechnical Risk and Safety (ISGSR)
- Ramsey, N (2002) A calibrated model for the interpretation of Cone Penetration Tests (CPTs) in North Sea Quaternary soils. Society of Underwater Technology
- Robertson, P. K. (1990) Soil Classification Using the Cone Penetration Test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1): 151-158
- Robertson, P. K. (2009) Interpretation of Cone Penetration Tests – A Unified Approach. Canadian Geotechnical Journal, 46:1337-1355
- Society for Underwater Technology, SUT (2014) Guidance Notes for the Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments.