

共振柱試驗於離岸風機基礎設計之應用 Application of the Resonant Column Tests on the Design of Offshore Wind Turbine Foundation

王金山^{1*}、林金成¹、王天佑¹、冀樹勇¹、蔡尚錡²、林至堯²、李宏道²

¹財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心

²海洋風力發電股份有限公司土木部

Gin-Shan Wang^{1*}, Chih-Chan Lin¹, Tian-Yu Wang¹, Chih-Cheng Lin¹, Shu-Yung Chi¹,
Anthony Tsai², Derrick Lin², Harris Lee²

¹Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, INC.

²Civil Department, Formosa I Wind Power Co., LTD.

gswang@sinotech.org.tw

摘要

離岸風機基礎設計所需之室內試驗種類及參數除考量一般陸上工程所需之外，為了評估風機地震時土層的動態反應與土壤-風機基礎結構物互制之動態行為，尚需額外取得土壤動態性質之資料。其中，動態剪力模數及阻尼比為進行此行為研究分析不可或缺的參數，但傳統動三軸試驗無法求得土壤小應變範圍之最大剪力模數及最小阻尼比。因此，本研究利用 Stokoe 式固定-自由型共振柱試驗系統，針對離岸風機基礎設置預定場址土壤進行相關研究，成果可供未來國內離岸風機基礎設計應用之參考。

關鍵詞：共振柱試驗、土壤動態性質、剪力模數、組尼比。

Abstract

In order to evaluation the dynamic behavior of the soil and offshore wind turbine foundation under dynamic conditions such as machine vibration and earthquakes, the dynamic properties of soil like relationship between soil shear modulus(damping ratio) and shear strain are necessary. In this study, Stokoe type fixed-free resonant column device was used to perform the tests of the soil from designated offshore wind farm. The results can provide some information to foundation design of the offshore wind turbine of Taiwan in the future.

Keywords: Resonant Column Test, Dynamic property of Soil, Shear Modulus, Damping Ratio.

I. 前言

土壤所承受之動力作用來源，一般可大致分為機械震動與地震兩種動力荷重；前者對於工程設施之基礎或結構物產生較小之應變振幅行為，後者則可能產生較小至甚大之應變振幅行為；由於產生之應變不同，相對應之土壤動態性質亦有所不同。無論是承受何種型式大小之動力作用，為了瞭解土壤動態性質對工程設施受振之影響，須對土壤與結構進行動態分析，並由分析結果中得到合乎安全與經濟之設計。

為了正確分析與預測離岸風機基礎的耐震能力，需

要有場址準確的土壤動態性質(如土壤剪力模數和阻尼比與剪應變振幅的關係曲線)以作為地盤反應分析中土壤動態參數選取之用。過去在工程實務上，若無土壤的動態性質試驗資料，常採用多位著名學者建議的關係式和關係曲線為土石材料受震反應分析之參數(Hardin and Richart, 1963; Hardin and Black, 1968; Seed and Idriss, 1970; Tatsuoka et al., 1978; Sun et al., 1988; Hardin and Drnevich, 1972)，但由於前人試驗的土壤皆非基礎場址處之土壤，與實際土壤有相當的差異。因此，需透過現地土壤鑽探取樣進行土壤動態特性試驗如動三軸或共振柱試驗。惟目前動三軸試驗無法求得土壤小應變範圍之最大剪力模數及最小阻尼比，因此，若愈求得完整應變範圍的土壤動態性質則需透過土壤共振柱試驗以進行之。

本研究利用離岸風場預定處之場址取樣進行土壤相關室內動態性質試驗，相關成果可供未來國內離岸風機基礎設計應用之參考。

II. 試驗場址及土層概述

本研究針對海洋風力發電股份有限公司所規畫的「海洋 I 離岸風場(Formosa Offshore Wind Farm I, FOWI)」之地層取樣進行相關研究，如圖 1 所示。該風場位於竹南外海，離岸約 2.5 至 5 公里，水深約為 15 公尺至 35 公尺之間，總面積約 10 平方公里，規劃興建 32 部離岸風機，總裝置容量約為 128MW。

根據中華民國經濟部「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」之規定，獲選開發商須於 2015 年完成兩部單機容量三千瓩以上，位於 5 公尺水深等深線以外之示範風力發電離岸機組。因此，需針對兩示範風機之基礎進行設計需求之地質調查工作。

由圖 1 可知該風場初期之 2 支示範風機位置(鑽孔編號分別為 NO-21 及 NO-28)，其鑽探深度皆為 65 公尺，鑽井現場的水深在 NO-21 是 17.76 公尺、NO-28 是 18.41 公尺。根據此兩孔岩心紀錄顯示，在鑽探深度 65 公尺內的地質分層由淺而深可依序分為：卵礫石夾砂土、富含貝殼碎屑之砂泥質沉積物，以及不含貝殼碎屑之砂泥質沉積物，詳細之鑽孔地層概況如圖 2 所示。

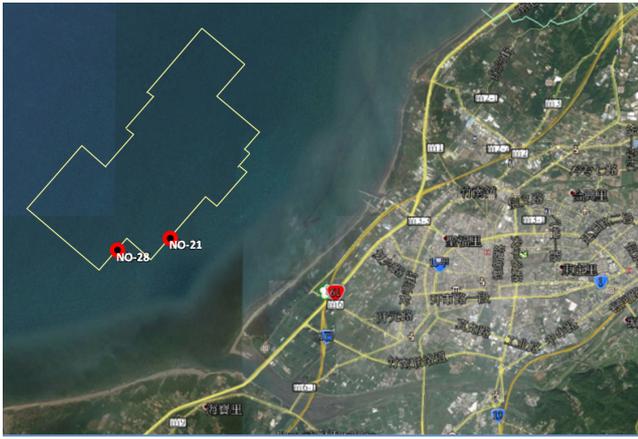


圖 1 海洋 I 離岸風場預定設置場址及場址鑽孔位置

深度 (m)	地層圖元	厚度 (m)	地層描述
-5		6.0	0.00-1.80m 為黑灰色卵礫石夾砂土；1.80-6.00m 為灰色粉質細砂
-10			深灰色帶點棕色的粉砂-細砂沉積物，局部具薄層紋理，沉積物有經過壓密作用，外觀上可保持完整的岩心形狀，但較缺乏膠結作用，以指單即可制碎。其中 14.00-18.00m 以及 24.50-25.00m 含有頁岩碎屑，因有碳酸鈣膠結之故，較為堅硬。
-15			
-20		18.5	
-25			
-30			深灰色帶點棕色的粉砂-細砂沉積物，局部具薄層紋理，沉積物有經過壓密作用，外觀上可保持完整的岩心形狀，但較缺乏膠結作用，以指單即可制碎。其中 2.00-23.00m 以及 26.45-45.00m 含有頁岩碎屑，因有碳酸鈣膠結之故，較為堅硬。
-35			
-40			灰棕色泥質粉砂-泥質細砂沉積物，因含泥量較高，故較上段較軟，局部具薄層紋理，沉積物有經過壓密作用，外觀上可保持完整的岩心形狀，但較缺乏膠結作用，以指單即可制碎。其中 56.00-59.00m 含有頁岩碎屑，因有碳酸鈣膠結之故，較為堅硬。61.00-65.00m 泥質含量為全孔最高，最為軟弱。
-45		45.0	
-50			灰棕色泥質粉砂-泥質細砂沉積物，因含泥量較高，故較上段較軟，局部具薄層紋理，沉積物有經過壓密作用，外觀上可保持完整的岩心形狀，但較缺乏膠結作用，以指單即可制碎。其中 57.0-58.0m 含有 頁岩碎屑，因有碳酸鈣膠結之故，較為堅硬，多處表面具有紅色氧化鐵，但此現象在 No.01 岩心中未曾見到。
-55			
-60		20.0	
-65		65.0	

(a) NO-21 鑽孔

(b) NO-28 鑽孔

圖 2 海洋 I 離岸風場示範風機基礎預定設置場址鑽孔地層概況

III. 試驗原理、設備及步驟

一、試驗原理

本研究採用為 Stokoe 型之固定-自由型共振柱系統(如圖 1 所示)，係經由上端往復扭轉振動方式驅動土壤試體(如圖 2 所示)，並透過共振柱水平扭轉波傳理論求得土壤試體之共振頻率 ω_n 進而推得剪力波速 V_s 乃至剪力模數 G ，如式(1)、(2)及(3)所示。

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中 θ 為 x 長度上試體扭轉之角度。

V_s 為試體剪力波速。

t 為時間。

透過帶入邊界條件後並解得如下式：

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n L}{V_s} \tan \left(\frac{\omega_n L}{V_s} \right) \quad (2)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

其中 I 為試體長度為 L 之質量極慣性矩(mass polar moment of inertia)。

I_0 為刚性驅動系統之質量極慣性矩。

ω_n 為試體之自然振動角頻率(the circular frequency of a nature mode of vibration)。

L 為試體長度。

G 為試體剪力模數。

隨後再透過黏彈性理論進行自由振動衰減試驗求得土壤之阻尼比 D ，如圖(3)及式(4)所示。

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{X_1}{X_n} = 2\pi D \quad (4)$$

其中 δ 為對數遞減量。

X_1 為自由振動衰減曲線上第一個尖峰振幅。

X_n 為自由振動衰減曲線上第 n 個尖峰振幅。

D 為阻尼比。

二、試驗設備：

1 控制系統：此系統分為微電腦與其週邊設備及控制軟體兩部份。主要用來控制、輸入試驗之參數及擷取、展示分析試驗資料。

2 壓力供給系統：此系統分為三軸室、空壓控制系統及體積變化儀。試驗中之土壤試體與驅動裝置皆位於三軸室內，並由空壓控制系統提供試驗所需之圍壓及反水壓，同時量測試驗過程中土壤試體體積之變化情形。

3 驅動系統：此系統分為驅動板、驅動馬達及伺服放大器。主要用來接受輸入訊號並產生驅動土壤試體產生反覆轉動。

4 試體高度變化量測系統：此系統主要用來量測試驗過程中試體高度之變化。

5 扭轉量測系統：此系統主要用來監測土壤試體在試驗時的振動反應，包括：近接度感測器探頭(Proximity Probes)與反射板及扭矩傳感器(Torque Sensor)。

6 訊號擷取系統：此系統主要用來擷取試驗過程中之相關量測訊號並轉換為真實之物理量，包括：應變計放大器、線性差動變壓器(L.V.D.T.)、水壓計(圍壓及反水壓)、近接度感測器(Proximitor)等模組。

三、試驗步驟

首先將預作試驗之土壤試體依一般三軸試驗之步驟置入三軸室，試體飽和及壓密階段完成之後，記錄試體體積變化以及試體長度變化，求得試體壓密後之重量及幾何尺寸，算得土壤試體之質量極慣性矩後，隨即進行共振柱之扭轉試驗。共振柱主要試驗步驟包括共振扭轉試驗及自由振盪衰減試驗兩部份：

1 開啟共振柱試驗儀器之電源，接通驅動馬達電源電路、近接度感測器、扭矩感測器以及 LVDT 輸出電路。

2 讀取體積變化儀讀數，以求體積變化量；讀取線性差動變壓器讀數，以求試體高。

3 調整兩近接度感測器至正確量測位置(即須與反射板相對應，且位於其所能量測範圍之中間位置)，並將LVDT 歸零。

4 首先進行共振扭轉試驗。進入共振柱試驗程式，輸入所有試驗資料，如試體尺寸、試體重、含水量、初始孔隙比、校正參數...等。選擇預掃描之頻率範圍，以及預產生剪應變振幅之驅動電壓大小，即可進行試驗。

5 進行連續掃描，找尋剪應變振幅尖峰點。記錄尖峰點的剪應變振幅及試體高度變化量並記錄在尖峰點時的頻率，此時試體即處於共振運動狀態，所記錄到的頻率就是共振頻率。

6 共振試驗結束後，隨即進行自由振盪衰減試驗，經由試體的自由振盪衰減曲線求取試體之黏滯阻尼比。

7 進行更大剪應變振幅之試驗，即將驅動電壓調到更大，並控制近接度感測器輸出電壓，使之能量測更大振幅之共振狀態，重覆步驟 2、3、4、5、6，即重覆進行共振試驗及自由振盪衰減試驗，以求得更大振幅下之共振頻率及阻尼比。逐次，直到驅動電源無法再加大為止。共振柱動態試驗流程詳見圖 5。

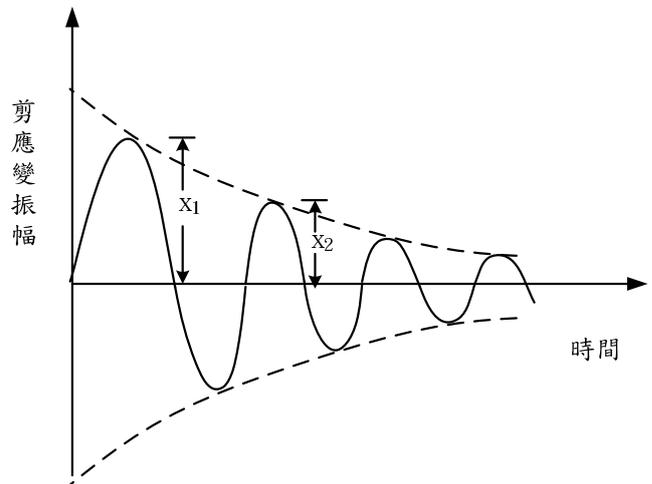


圖 5 剪應變振幅與時間之衰減曲線



圖 3 Stokoe 型之固定-自由型共振柱試驗儀

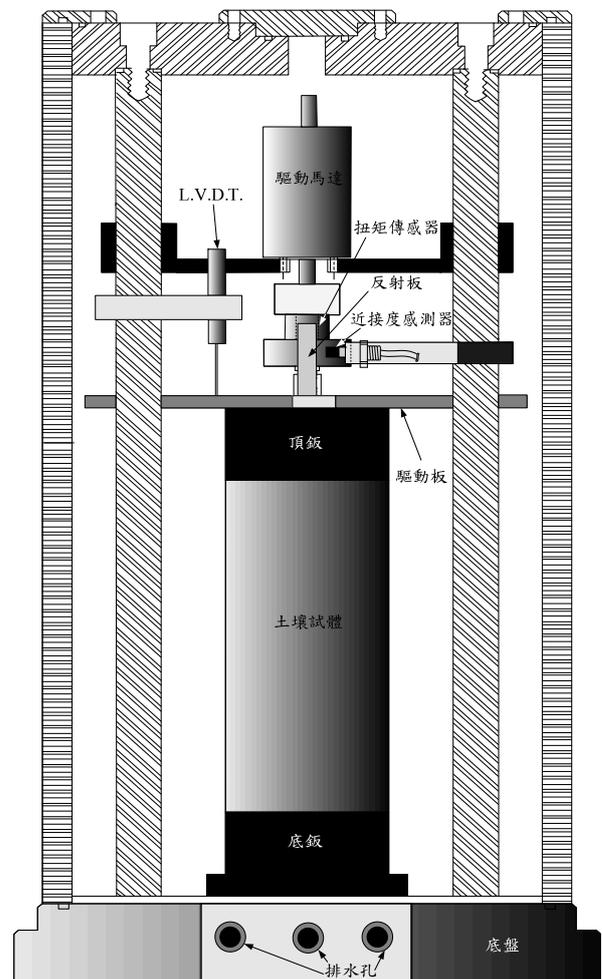


圖 6 剪應變振幅與時間之衰減曲線

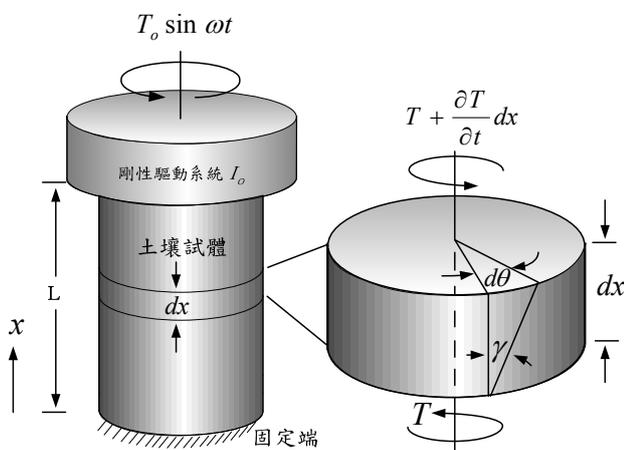


圖 4 固定-自由型共振柱及微小圓柱試體 dx 受扭矩及其變形情形

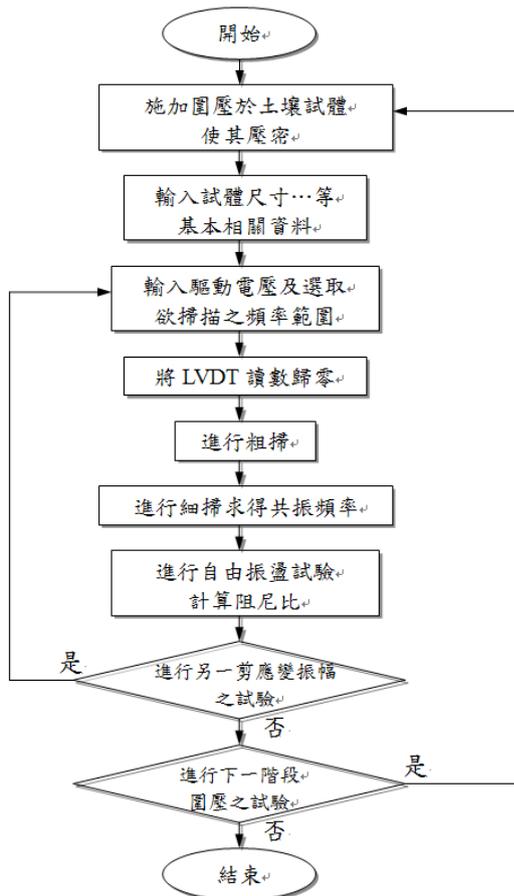


圖 7 共振柱動態試驗流程圖

IV. 試驗成果

由於試體取樣之數量限制，本研究僅針對 NO-28 號鑽孔土樣 3 層不同性質之土壤分層進行共振柱試驗(如表 1 所示)，共計執行 3 組(其中 2 組為重模試驗)，試驗結果如表 1 及圖 3~圖 6 所示。

由結果可知本試驗求得 NO-28 鑽孔之土壤動態特性曲線(剪力模數與剪應變及阻尼比與剪應變曲線)之剪應變範圍結果約在 $5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$ 之間。其中，試驗結果顯示 3 組之試樣似乎皆未有效求得最大剪力模數，究其原因應與海床下淺層深度所取之土樣過於鬆散，低於本研究之剪應變已無法辨識出其共振頻率

表 1 共振柱試驗資料與結果

試驗編號	深度 (m)	單位重 γ_t (t/m ³)	含水量 Wn (%)	有效應力 σ'_{3c} (kN/m ²)	最大剪力模數 G_0 (kN/m ²)	土壤分類	備註
RCT-1	3.85-4.00	1.96	23.6	39.24	43752.6	SM	—
RCT-2	6.30-6.45	1.94	20.6	68.67	54347.4	SW-SM	重模試體
RCT-3	2.00-2.15	1.94	26.0	29.43	58173.3	SM	重模試體

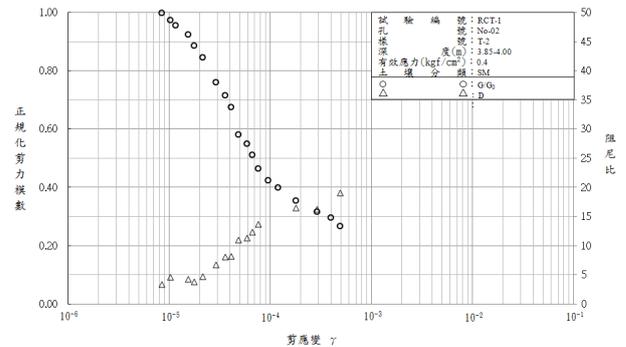


圖 9 共振柱試驗結果 (RCT-1)

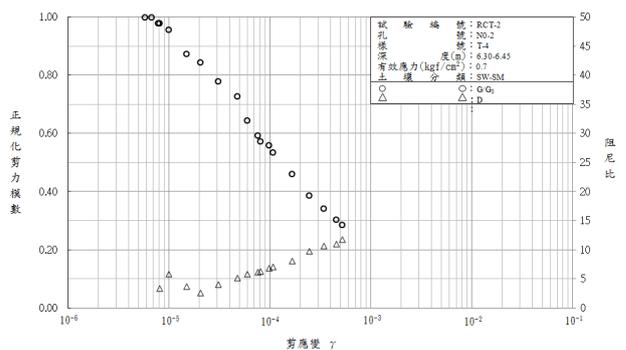


圖 10 共振柱試驗結果 (RCT-2)



圖 8 共振柱試驗執行狀況

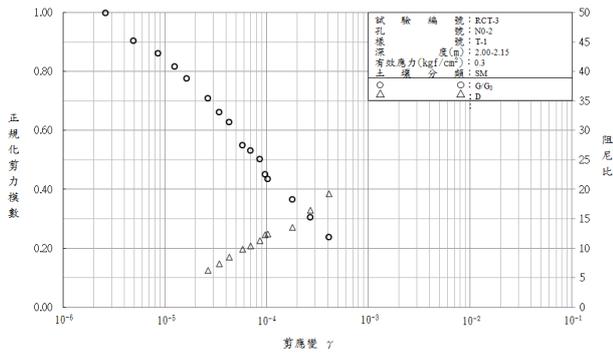


圖 11 共振柱試驗結果 (RCT-3)

V. 結論

目前國內離岸風力基礎設計所需之土壤動態參數可參考的不多，故須仰賴更多的調查案例以蒐集相關之參數。因此，本研究針對台灣西海岸離岸風場預定處之場址取樣進行土壤相關室內動態性質試驗，期望結果能作為建立台灣離岸風場土壤動態性質參數資料庫之起步。

VI. 誌謝

本計畫執行過程中，承蒙中央大學 黃俊鴻教授無私提供相關試驗設備，並對各位工作夥伴們無私地付出，報以至誠之感謝。

參考文獻

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Poewr Electronic, Converters, Applications and Design*, Wiley, New York, USA, 1995.
- [2] Y. Y. Tzou, "DSP-based Fully Digital of a PWM DC-AC Converter for AC Voltage Regulation," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, USA, June 1995, pp. 138-144.
- [3] A. V. Jouanne, P. N. Enjeti, and D. J. Lucas, "DSP Control of High Power UPS Systems Feeding Nolinear Loads," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, Feb 1996, pp. 121-125