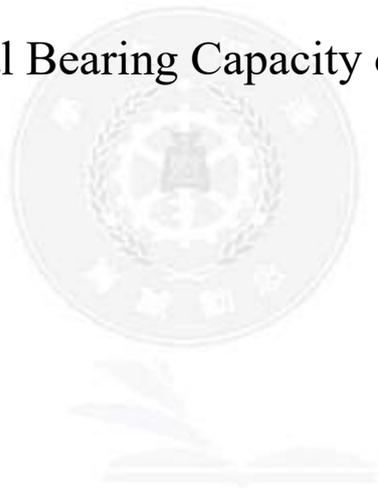




# 逢甲大學學生報告 ePaper

## 不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響 The Impact of Different Soil Classification Systems on the Axial Bearing Capacity of Piles



作者：吳惠馨

系級：土木工程學系碩士班二年級

學號：M1205017

開課老師：紀昭銘

課程名稱：離岸基礎工程

開課系所：土木工程學系碩士班

開課學年：113 學年度 第1 學期



## 摘要

離岸工程普遍利用圓錐貫入試驗獲取土壤參數，因此 CPT 的數據常被用來作為離岸工程的土壤分類方法或基樁軸向承載力評估之研究參數。然而，基於 CPT 的土壤分類結果隨著不同的分類版本而不盡相同，且相對應的基樁承載力也有顯著的變化。本研究利用台灣建築物基礎構造設計規範 (DCSBF-SM 法與 DCSBF-CPT 法)、ICP 法、UWA 法和 UCM 法分析基樁軸向承載力，以及根據台灣電力公司離岸風力發電第二期項目的 CPT 試驗和設計數據進行研究。以 SBTn 分類台灣西部海域之土壤，相較於 SBT 分類結果，大約在深度 15m 前整體由黏土區往砂土區移動的趨勢，但在 15m 後則呈現相反的趨勢。承載力結果顯示 DCSBF-SM 法與 DCSBF-CPT 法皆呈現較為不保守的趨勢，而 ICP 法較為保守。此外，UWA 法與 UCM 法兩者趨勢相近。相較於 SBTn 土層，基於 SBT 的設計土層之極限承載力 (ICP 法、UWA 法與 UCM 法) 在淺層有放大但隨深度增加則趨向保守，且設計土層承載力甚至只有前者之半。

關鍵詞：離岸工程、圓錐貫入試驗、土壤分類方法、基樁軸向承載力

## ABSTRACT

Offshore engineering commonly utilizes cone penetration tests (CPT) to obtain soil parameters. Therefore, data from the Cone Penetration Test (CPT) are often used as research parameters for soil classification or pile bearing capacity assessment in offshore engineering. However, the CPT-based soil classification results vary with different classification versions, and the corresponding pile bearing capacity also changes significantly. This article analyzes the axial bearing capacity of driven piles using the Design Code and Specifications of Building Foundations (DCSBF-SM method and DCSBF-CPT method), the ICP method, the UWA method, and the Unified CPT method (UCM method), with CPT test and design data of the second phase of Taiwan Power Company's offshore wind power project. Using the SBTn method to classify the soils in the western Taiwan offshore region, compared with the results from SBT method, the overall trend moves from clay zone to sand zone before the depth of 15m, but the opposite trend is shown after 15m. The results of the bearing capacity show that both the DCSBF-SM method and the DCSBF-CPT method exhibit relatively less conservative tendencies, while the ICP method is more conservative. Additionally, the UWA and UCM methods show similar trends. Compared to soil layers classified by SBTn, the ultimate bearing capacity (ICP method, UWA method and UCM method) of the design soil layer based on the SBT method is amplified in the shallow layer but tends to be conservative as the depth increases, and bearing capacity of design soil layer is even only half of that of the former.

Keyword: Offshore engineering, Cone Penetration Test (CPT), Soil classification methods, Axial bearing capacity of foundation piles

目錄

摘要 .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
一、 前言 .....	4
二、 文獻回顧.....	4
2.1 土壤分類方法 .....	4
2.2 軸向承載力評估法 .....	5
1、 Design Code and Specifications of Building Foundations (DCSBF) .....	5
2、 Imperial College Pile (ICP) .....	6
3、 University of Western Australia (UWA).....	6
4、 Unified CPT Method (UCM) .....	6
三、 土壤分層 .....	6
3.1 SBTn 土層 .....	6
3.2 設計土層 .....	7
3.3 設計土層與 SBTn 土層之差異.....	8
四、 承載力分析.....	10
五、 結論 .....	12
參考文獻.....	13
附錄 .....	14

## 一、前言

台灣目前開發的離岸風場大多採用打擊式基樁作為錨碇基礎，而在離岸工程中，因作業環境、作業時間和經費的考量，廣泛運用圓錐貫入試驗 (cone penetration test, CPT) 獲得土壤參數 (紀昭銘等人, 2022)。由於 CPT 被廣泛運用且其錐體與打擊樁的貫入模式相似 (Lehane et al., 2022a)，因此衍生出基於 CPT 數據的土壤分類方法與基樁軸向承載力評估方法。然而，不同版本的 CPT-based 土壤分類結果不盡相同，進而影響基樁軸向承載力的結果。台灣西部海域地質多為砂土、黏土、粉土互層。多數基樁承載力方法皆評估基樁在砂土與黏土的承載力，傳統在分析基樁在粉土的承載力時，常將粉土視為砂土或黏土分析。由於基樁在砂土或黏土的計算方法不同，粉土視為砂土或黏土時將有不同成果。因此，本研究將探討在相同 CPT 數據下不同版本的 CPT-based 土壤分類對於台灣建築基礎構造設計規範 (簡稱基礎規範) (內政部營建署, 2023) 以及國外 CPT-based 軸向承載力評估方法的影響，並使用台灣電力公司離岸風力發電第二期項目 (下文簡稱台電二期) 的 CPT 數據與工程設計 (台灣電力股份有限公司, 2018) 進行分析。

## 二、文獻回顧

### 2.1 土壤分類方法

常見的 CPT-based 土壤分類方法為 Robertson 提出的土壤行為類型 (soil behavior type, SBT) (Robertson et al., 1986) 與標準化土壤行為類型 (normalized soil behavior type, SBTn) (Robertson, 1990 and 2009)。

SBT 的計算公式如下：

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad \text{式 1}$$

$$R_f = (f_s/q_c) \times 100\% \quad \text{式 2}$$

其中， $q_c$  為錐尖阻抗、 $f_s$  為側壁摩擦、 $u_2$  為孔隙水壓、 $q_t$  為修正錐尖阻抗、 $R_f$  為摩擦比。而 SBTn 的計算公式則為：

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{vo}) \times 100\% \quad \text{式 3}$$

$$Q_{tn} = (q_t - \sigma_{vo}) / P_a \times C_N \quad \text{式 4}$$

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^n \quad \text{式 5}$$

$$n = 0.381I_c + 0.05(\sigma'_{vo} / P_a) - 0.15 \leq 1.0 \quad \text{式 6}$$

$$I_c = \sqrt{[(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2]} \quad \text{式 7}$$

其中， $\sigma_{vo}$ 為垂直覆土應力、 $\sigma'_{vo}$ 為有效垂直覆土應力、 $P_a$ 為一大氣壓力 (100 kPa)、 $F_r$ 為正規化摩擦力、 $Q_{tn}$ 為正規化錐尖阻抗、 $C_N$ 為覆土應力修正係數，以及 $I_c$ 為土壤行為指數。由於 $Q_{tn}$ 、 $n$ 、 $I_c$ 互為遞迴關係，因此須將式 3 至式 7 進行迭代求得 $F_r$ 、 $Q_{tn}$ 與 $I_c$ 。表 1 為 SBT 與 SBTn 的土壤分類描述。由表 1 可觀察到 SBT 將土壤分成 12 種、SBTn 則將土壤分成 9 種，且相較於 SBT 土壤分類，SBTn 在排水土壤與不排水土壤之間有明顯的界限。

表 1 SBT 與 SBTn 土壤分類描述

Zone	SBT: Soil Description	Zone	SBTn: Soil Description
1	Sensitive fine grained	1	Sensitive fine-grained
2	Organic material	2	Clay-organic soil
3	Clay	3	Clays: clay to silty clay
4	Silty clay to Clay	4	Silt mixtures: clayey silt & sandy silt
5	Clayey silt to Silty clay	5	Sand mixtures: silty sand to sandy silt
6	Sandy silt to Clayey silt	6	Sands: clean sands to silty sands
7	Silty sand to Sandy silt	7	Dense sand to gravelly sand
8	Sand to Silty sand	8	Stiff sand to clayey sand*
9	Sand	9	Stiff fine-grained*
10	Gravelly sand to Sand	/	
11	Very stiff fine grained*		
12	Sand to Clayey sand*		

\*Overconsolidated or cemented

## 2.2 軸向承載力評估法

本研究將使用基礎規範、ICP 法、UWA 法與 UCM 法進行基樁承載力的評估，詳細公式於附錄所示。

### 1、Design Code and Specifications of Building Foundations (DCSBF)

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

基礎規範在基樁承載力部分分成靜力學法 (Static Method, SM) 與 CPT 法。靜力學分析黏土的承載力是基於不排水剪力強度 $S_u$ 分析，且側壁摩擦應力 $f_s$ 是依據不同土層與基樁埋置深度對應不同的折減係數 $\alpha$ ；基樁在砂土的承載力則是基於垂直有效應力評估，並且在單位摩擦應力 $f_s$ 與單位樁底阻抗 $q_b$ 皆考慮臨界深度的限制。CPT 法則是基於錐尖阻抗 $q_c$ 評估，且 CPT 法適用於小口徑基樁在砂土的承載力分析。

## 2、Imperial College Pile (ICP)

ICP 法是英國倫敦帝國學院發展離岸打擊樁承載力的設計方法，此法彙整過往倫敦帝國理工學院多年的研究成果 (Jardine et al., 2005)。ICP 法砂土與黏土的 $q_b$ 計算公式皆與錐尖阻抗 $q_c$ 有關，而黏土的單位摩擦應力 $f_s$ 則與降伏應力比 $YSR$ 有關。此外，ICP 法提出了開口樁在砂土與黏土的栓塞判定方法。

## 3、University of Western Australia (UWA)

西澳大利亞大學 Lehané 等人因應美國石油協會 (American Petroleum Institute, API) 的要求，對 API、Fugro、ICP 及 NGI 四種方法進行資料比較，並在過程中研發出 UWA 法 (Lehané et al., 2005a, 2005b, 2013, and 2022b)。UWA 在開口樁部分為考慮增量填充比 IFR、最終填充比 FFR 以及部分長度比率 PLR 的概念，IFR 表示開口樁中土壤填入樁內長度與基樁埋置深度的比值、FFR 表示最終的 IFR，PLR 則代表黏土在開口樁時土壤填充之程度。

## 4、Unified CPT Method (UCM)

UWA 的學者 Lehané、Bitter 與挪威地工學院 (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) Lacasse、Liu、Nadim 等人一同提出的 CPT-based 軸向承載力評估法，目的是開發一種統一的 CPT 方法 (Lehané et al., 2022a)。此方法保留了 UWA 法的考量因素、新增粉土的計算方法，並且引用 SBTn 土壤分類方法。

# 三、土壤分層

## 3.1 SBTn 土層

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

本研究依據台電二期 BH-04 的 CPT 數據計算土壤行為指數 $I_c$ 並進行 SBTn 土壤分類，其中 $I_c$ 對應之土壤分類如表 2 所示。圖 1 為 BH-04  $I_c$ 所對應之 SBTn 分類圖。圖 1 顯示大多數土壤介於 Zone 3(黏土)至 Zone 6(砂土)之間，且基於 Robertson 與 Wride(1998)建議排水土壤與不排水土壤之間的界限約為 $I_c = 2.6$ ，因此本研究以 $I_c = 2.6$ 為砂土法與黏土法界限來計算承載力。Zone 6(砂土)與 Zone 5(砂土混合物)以砂土法分析，Zone 4(粉土混合物)與 Zone 3(黏土)以黏土法分析，而 UCM 法在 Zone 5 則以粉土法分析。

表 2  $I_c$ 對應之土壤種類 (Robertson, 2009)

Zone	SBTn	$I_c$
7	Dense sand to Gravelly sand	$I_c < 1.31$
6	Sands: Clean sands to Silty sands	$1.31 < I_c < 2.05$
5	Sand mixtures: Silty sand to Sandy silt	$2.05 < I_c < 2.60$
4	Silt mixtures: Clayey silt and Silty clay	$2.60 < I_c < 2.95$
3	Clays: Clay to Silt clay	$2.95 < I_c < 3.60$
2	Clay-Organic Soil	$I_c > 3.60$

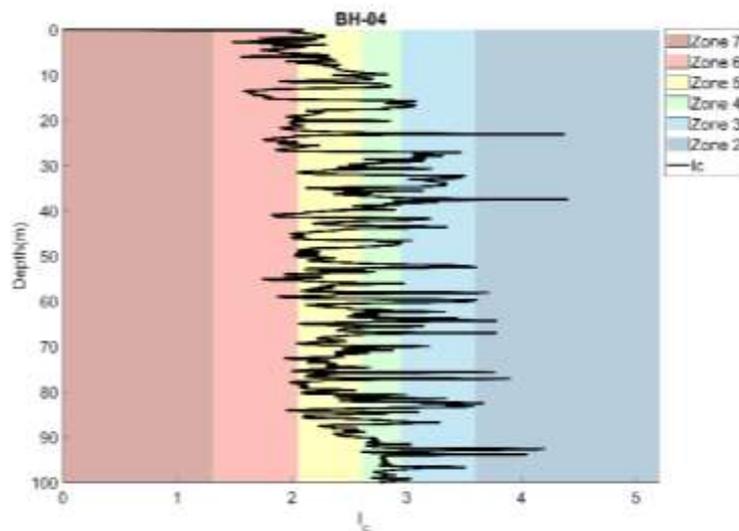


圖 1 BH-04  $I_c$ 所對應之 SBTn 分類圖

### 3.2 設計土層

設計土層是工程師透過 CPT 與室內試驗參數所設計之土層，表 3 為台電二期公開資料 BH-04 之設計土層。此設計土層主要是基於 SBT 土壤分類方法，並且其分為砂土、黏土與粉土三種土壤。本研究為了細分粉土種類，將緊密粉土歸

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

類為砂質粉土，中等緊密粉土歸類為黏質粉土。設計中層中的砂土、砂質粉土、黏質粉土與黏土分別對應 SBT 的 Zone 6、Zone 5、Zone 4 與 Zone 3，故砂土與砂質粉土以砂土法分析，黏質粉土與黏土以黏土法分析，而 UCM 法以粉土法分析砂質粉土。

表 3 BH-04 的設計土層

Depth(m)	Soil Description
0-12	軟弱至堅實黏土
12-19.6	中等堅實至堅實黏土與中等緊密砂互層
19.6-24.9	緊密粉土
24.9-27.7	堅實至極堅實黏土
27.7-35.5	中等緊密砂間夾緊密粉土及黏土
35.5-38.2	堅實至極堅實黏土
38.2-39.7	疏鬆砂
39.7-42.9	堅實至極堅實黏土
42.9-45	中等緊密砂
45-50.1	堅實至極堅實黏土
50.1-57.7	中等緊密砂
57.7-60.4	堅實至極堅實黏土
60.4-63.2	中等緊密砂
63.2-67.7	極堅實至堅硬黏土
67.7-85.5	中等緊密砂
85.5-88.2	極堅實至堅硬黏土
88.2-100	中等緊密砂

### 3.3 設計土層與 SBTn 土層之差異

圖 2 與圖 3 分別為 BH-04 SBT 與 SBTn 兩種土壤分類版本之結果。由圖 2 可觀察到多數土壤是分類在 zone 9 (砂土)，而圖 3 可知土壤是分散在 zone 5 (砂土混合物) 至 zone 3 (黏土) 之間。整體來看，相較於 SBT 土壤分類的結果，SBTn 結果顯示在深度 15m 前土壤呈現黏土區往砂土區移動的趨勢，而深度 15m 後則呈現砂土區往黏土區移動的趨勢。

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

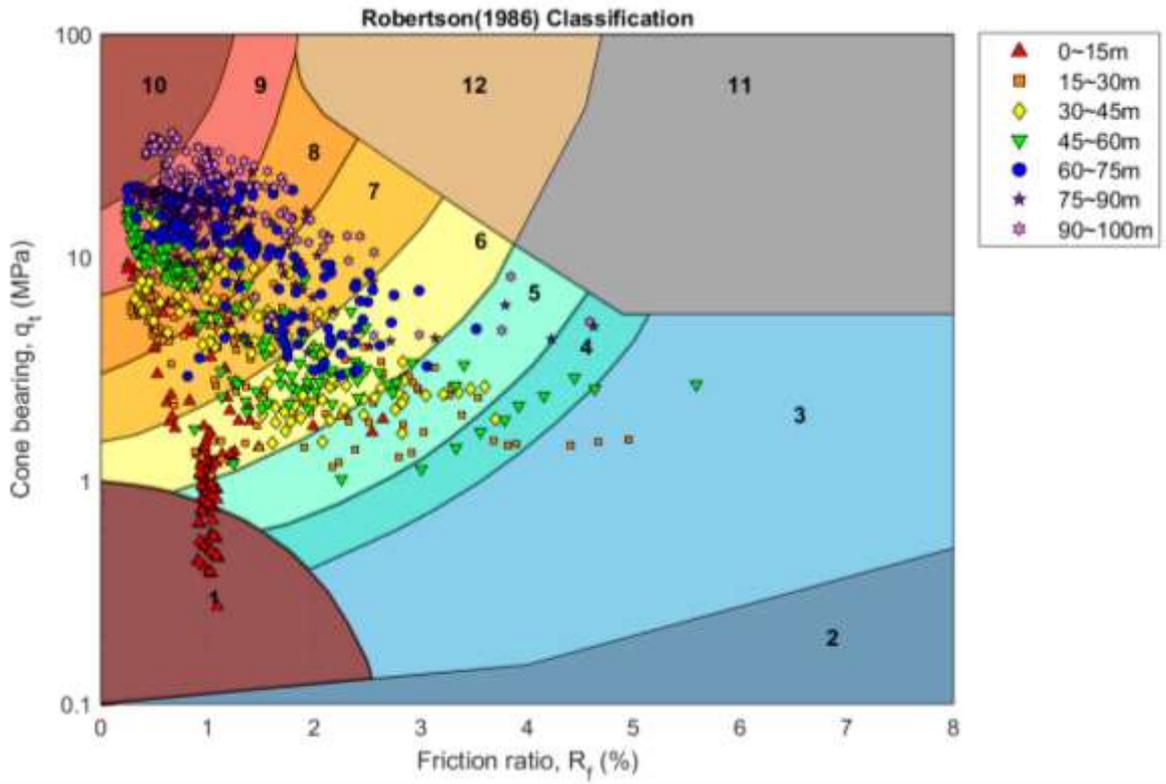


圖 2 BH-04 SBT 土壤分類結果

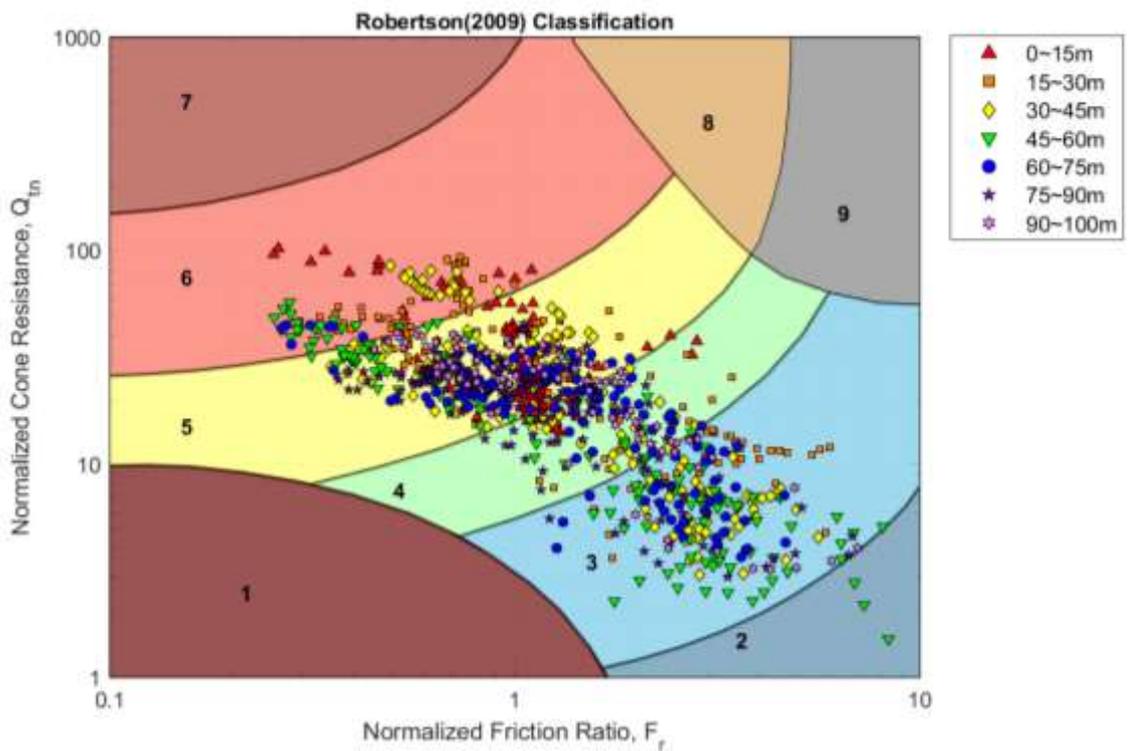


圖 3 BH-04 SBTn 土壤分類結果

#### 四、 承載力分析

本研究以台電二期 BH-04 的 CPT 數據與設計資料分析套管式基樁 ( $D=4\text{m}$ 、 $D_i=3.9\text{m}$  與  $L=80\text{m}$ ) 在不同分類方法其基樁軸向承載力的差異，而軸向承載力分析方法則採用 DCSBF-SM 法、DCSBF-CPT 法、ICP 法、UWA 法與 UCM 法五種方法。由於 DCSBF-CPT 法並未分析基樁在黏土，因此其分析黏土時將以 DCSBF-SM 法計算。

圖 4 為設計土層的樁身摩擦力  $Q_s$ 、樁底承載力  $Q_b$  與總極限承載力  $Q_u$ 。由圖 4 可觀察到 DCSBF-CPT 法的結果最大、ICP 法的結果最小，而 UCM 法與 UWA 法則介於之間。此外，五種方法皆顯示  $Q_s$  最終數值較  $Q_b$  的數值來得大，表示靠近樁底處是由  $Q_s$  提供較多的承載力；圖 5 則為 SBTn 土層的  $Q_s$ 、 $Q_b$  與  $Q_u$ 。圖 5 顯示 DCSBF-CPT 與 DCSBF-SM 法數值較大、ICP 法較小，且 UWA 法與 UCM 法介於上述方法之間。雖然 UWA 法與 UCM 法在  $Q_s$  與  $Q_b$  時趨勢較不一致，但在  $Q_u$  時兩者的趨勢在深度 60m 後開始靠近。此外，五種方法皆呈現在淺層處  $Q_s$  較  $Q_b$  較小，而在樁底處則顯示  $Q_s$  較  $Q_b$  大的趨勢，表示在淺層時  $Q_b$  提供較多的承載力，而在樁底處則是由  $Q_s$  提供較大的承載力。

圖 6 為設計土層與 SBTn 土層總極限承載力之比值。圖 6 顯示 DCSBF-SM 與 DCSBF-CPT 法在淺層有較大的峰值，但隨著深度增加逐漸遞減收斂至 1，ICP 法、UWA 法與 UCM 法在淺層時呈現比值大於 1 的趨勢，隨深度增加時逐漸遞減，甚至 UCM 法在樁底處遞減至約為 0.5 倍。由於基於 SBT 土壤分類的設計土層以砂土層居多，相較於 SBTn 土層的總極限承載力，設計土層的總極限承載力整體呈現隨深度增加而遞減的趨勢，符合紀昭銘等人 (2024) 提出基樁在砂土層的  $Q_u$  較基樁於黏土層的  $Q_u$  保守。

不同土壤分類版本對於基樁軸向承載力之影響

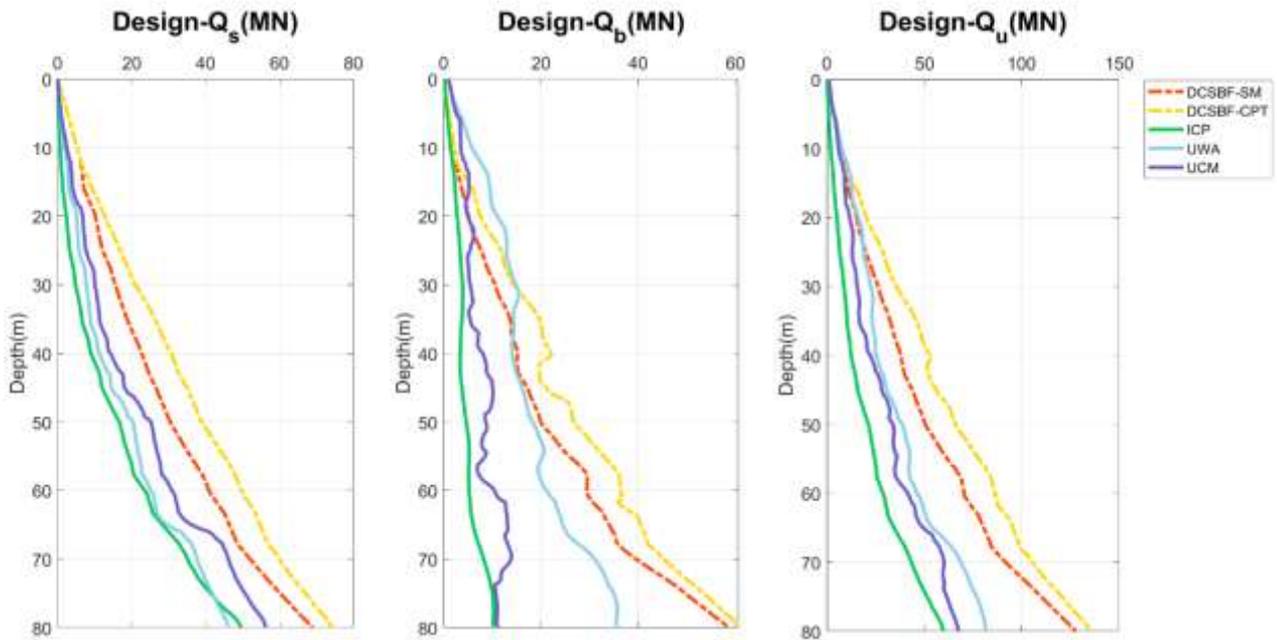


圖 4 設計土層之  $Q_s$ 、 $Q_b$ 、 $Q_u$

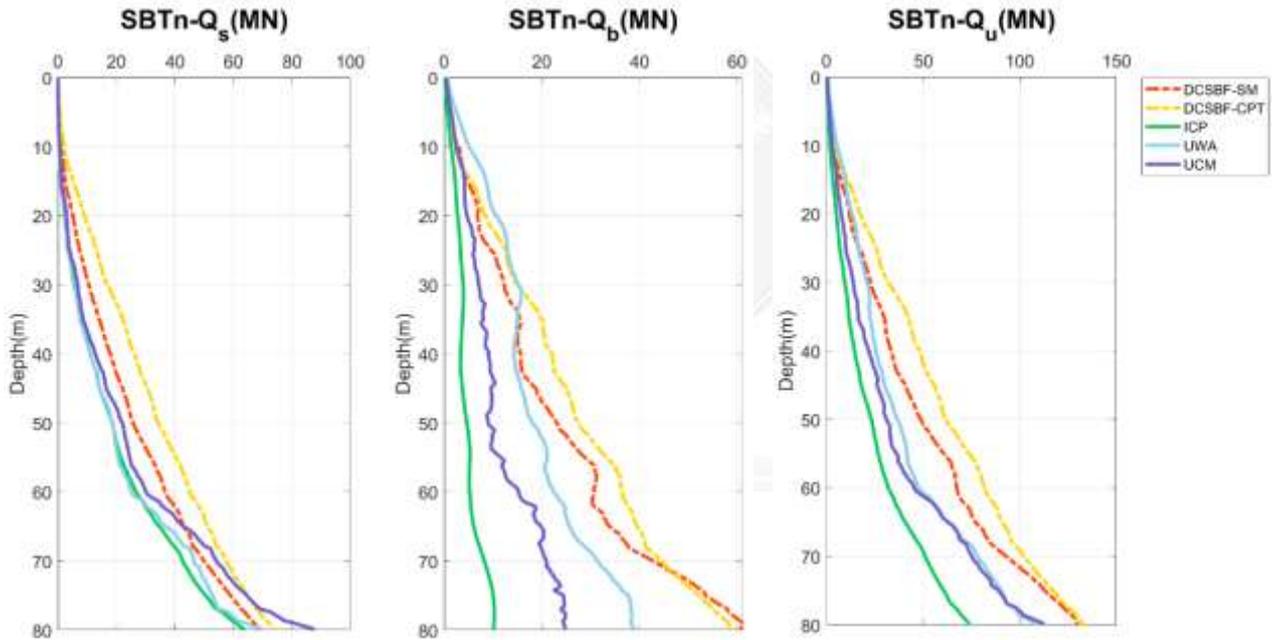


圖 5 SBTn 土層之  $Q_s$ 、 $Q_b$ 、 $Q_u$

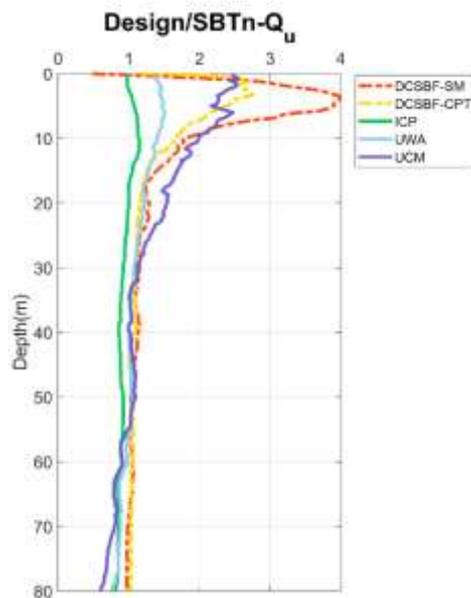


圖6 設計土層與SBTn土層之總極限承載力分析比值

## 五、 結論

本研究以台電二期 BH-04 的鑽孔與設計資料探討基於不同土壤分類的土層其基樁軸向承載力之差異，統整成以下結果：

1. 土壤分類的部分，SBT 的分類結果呈現大部分土壤被分類成砂土，而 SBTn 的分類結果則呈現土壤是分散在砂土混合物至黏土之間。整體來看，相較於 SBT 的結果，SBTn 之結果顯示在深度 15m 前整體呈現黏土區往砂土區移動的趨勢，但在深度 15m 後則呈現砂土區往黏土區移動的趨勢。
2. 在基樁軸向承載力的部分，DCSBF-SM 法與 DCSBF-CPT 法皆呈現較為不保守的趨勢、ICP 法的承載力結果則較為保守，而 UWA 法與 UCM 法介於上述方法之間，且 UWA 法與 UCM 法在總極限承載力的趨勢是相近的。此外，相較於 SBTn 土層的承載力，由於基於 SBT 土壤分類的設計土層其砂土層較多，以 ICP 法、UWA 法以及 UCM 法分析皆呈現隨深度增加而逐漸遞減的趨勢，甚至只有 SBTn 土層承載力的一半。

## 參考文獻

1. 內政部營建署，「建築物基礎構造設計規範」 (2023)。
2. 台灣電力股份有限公司 (2018)，「離岸風力發電第二期計畫可行性研究 報部版」。
3. 紀昭銘、黃普源、林正山、李宥霖、程毓仁與姜良宇，「基於 CPT 設計法的基樁軸向承載力之案例研究」，第 44 屆海洋工程研討會，國立中山大學，第 597–602 頁 (2022)。
4. 紀昭銘、吳惠馨、曾韋禎與顏呈仰 (2024)。「土層判定對於軸向承載力之影響:(I) 假設土層」，*土工技術*，182，79-86。
5. Jardine, R.J., Chow F.C., Overy R., and Standing J., *ICP design methods for driven piles in sands and clays*, Thomas Telford, London (2005).
6. Lehane, B. M., Schneider, J. A., and Xu, X. (2005a). “The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand,” *Proceeding of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, Perth, 683-689.
7. Lehane, B. M., Schneider, J. A., and Xu, X. (2005b). “A Review of Design Methods for Offshore Driven Piles in Siliceous Sand,” UWA Report, GEO:05358.
8. Lehane, B. M., Li, Y. and Williams, R. (2013). “Shaft Capacity of Displacement Piles in Clay Using the Cone Penetration Test,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139, 2, 253-266.
9. Lehane, B. M., Bittar, E. J., Lacasse, S., Liu, Z., and Nadim, F. (2022a). “New CPT methods for evaluation of the axial capacity of driven piles,” *Cone Penetration Testing 2022 - Proceedings of the 5th International Symposium on Cone Penetration Testing*, 3-15.
10. Lehane, B. M., Liu, Z., Bittar, E. J., Nadim, F., Lacasse, S., Bozozgadeh, N., Jardine, R., Ballard, J. C., Carotenuto, P., Gavin, K., Gilbert, R. B., Bergan-Haavik, J., Jeanjean, P., Morgan, N. (2022b). “CPT-based axial capacity design method for driven piles in clay,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148, 9.
11. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). “Use of Piezometer cone data,” *Use of In-Situ Testing in Geotechnical Engineering*, ASCE, 1263-1280.
12. Robertson, P. K. (1990). “Soil classification using the cone penetration test,” *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 1, 151-158.
13. Robertson, P. K. (2009) “Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach,” *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1337-1355.

附錄

分析方法		單位摩擦應力 $f_s$	單位樁底阻抗 $q_b$	
砂土	靜力學法	DCSBF-SM $f_s = \alpha S_u$	$q_b = 9 \times S_u$	
	CPT法	DCSBF-CPT (tf/m <sup>2</sup> )	$f_s = q_c/60$ ( $q_c \leq 500$ ) $f_s = q_c/100$ ( $500 \leq q_c \leq 1200$ ) $f_s = q_c/150 \leq 15$ ( $q_c > 1200$ )	$q_b = 0.5 q_{c,DCSBF-avg}$
		ICP	$f_s = \sigma'_{rf} \tan \delta_{cv} = (\sigma'_{rc} + \Delta \sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$ $= a \times (0.029 \times b \times q_c (\sigma'_{v0}/P_a)^{0.13} \times [\max(h/R^*, 8)]^{-0.38} + \Delta \sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$ 開口拉力樁採用 $a = 0.9$ ；其他型式樁採用 $a = 1$ 壓力樁採用 $b = 1$ ；拉力樁採用 $b = 0.8$	若(1) $D_i < 0.02(D_r - 30)$ 或(2) $D_i < 0.083 \left(\frac{q_{c,avg}}{P_a}\right) D_{cpt}$ 其一項公式成立，基樁將發生栓塞。此時需 $q_{b,plugged} \geq 0.15 q_{c,avg}$ 。 $q_{b,plugged} = [0.5 - 0.25 \log(D/D_{CPT})] q_{c,avg}$ $q_{b,unplugged} = q_{c,avg}$
		UWA	$f_s = \sigma'_{rf} \tan \delta_{cv} = (\sigma'_{rc} + \Delta \sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$ ，壓力樁 $f_t/f_c = 1$ 、拉力樁 $f_t/f_c = 0.75$ $= (f_t/f_c)(0.03 \times q_c \times (A_{rs})^{0.3} \times [\max(h/D, 2)]^{-0.5} + \Delta \sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$	$q_{b0.1} = (0.15 + 0.45 A_{rd}) q_{c,avg}$
	備註	$\Delta \sigma'_{rd} = 4G\Delta r/D$ 、 $G = qc \times 185 q_{c1N}^{-0.75}$ 、 $q_{c1N} = (qc/P_a)/(\sigma'_{v0}/P_a)^{0.5}$		
	UCM	$f_s = f_L(\sigma'_{rc} + \Delta \sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv}$ ，壓力樁 $f_L = 1$ 、張力樁 $f_L = 0.75$ 、 $q_t = q_c$ $= f_L \left\{ \left(\frac{q_c}{44}\right) A_{re}^{0.3} [\max(h/D, 1)]^{-0.4} + \left(\frac{q_c}{10}\right) \left(\frac{q_c}{\sigma'_v}\right)^{-0.33} \left(\frac{d_{CPT}}{D}\right) \right\} \tan 29^\circ$	$q_{b0.1} = (0.12 + 0.38 A_{re}) q_p$ (plugged) $q_{b0.1} = A_{re} q_p$ (unplugged)、 $q_p = q_{c,avg}$	
	備註	Silt: Zone 5 of the SBT chart (Robertson, 2009) Apply equations as for Zone 6 using corrected qc value determined as: $q_c = [3.93I_c^2 - 14.78I_c + 14.78]q_t$		

分析方法		單位摩擦應力 $f_s$	單位樁底阻抗 $q_b$	
黏土	靜力學法	DCSBF-SM $f_s = \alpha S_u$	$q_b = 9 \times S_u$	
	CPT法	ICP	$f_s = 0.8 \sigma'_{rc} \tan \delta_{cv} = 0.8 (K_c \sigma'_{v0}) \tan \delta_{cv}$ $K_c = (2.2 + 0.016 YSR - 0.87 \Delta I_{vy}) YSR^{0.42} \times \max(h/R^*, 8)^{-0.2}$	若 $D_i/D_{cpt} + 0.45 q_c/P_a < 36$ 公式成立，基樁發生栓塞效應。 $q_{b,plugged} = 0.4 q_{c,avg}$ $q_{b,unplugged} = q_{c,avg}$
		UWA	$f_s = 0.23 q_t (q_t/\sigma'_{v0})^{-0.15} [\max(h/R^*, 1)]^{-0.2} \times \tan \delta_{cv}$	$q_b = q_{c,avg} (0.2 + 0.6 \times A_{reff})$
		UCM	$f_s = 0.07 F_{st} q_t [\max(h/D^*, 1)]^{-0.25}$ $F_{st} = 1$ for clays with $I_{z1} > 0$ , in Zones 2, 3 and 4 ( $I_c \geq 2.6$ ) $F_{st} = 0.5 \pm 0.2$ clays with $I_{z1} < 0$ , in Zone 1	$q_{b0.1} = (0.2 + 0.6 A_{re}) q_p$ 、 $q_p = q_{c,avg}$