

逢甲大學學生報告 ePaper

建構模組化自動程式研析

臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

Constructing Modular Automatic Program Analysis:
Application of CPT Methodology to Taiwanese Building
Technical Regulations

作者：李宥霖

系級：土木工程學系四年級

學號：D0942705

開課老師：紀昭銘

課程名稱：畢業設計(二)

開課系所：土木四乙

開課學年：112 學年度 第 1 學期



中文摘要

在離岸工程中，常採用尺寸遠大於陸域式基樁的開口式套管樁作為構造物基礎。本研究旨在評估目前國內使用的建築物基礎構造設計規範是否適用於離岸尺寸的基樁承載力評估。透過開發一套模組化自動程式，以臺灣的規範和國際常用於評估基樁軸向承載力的方法，對不同尺寸的基樁進行評估成果比較。研究結果顯示，在離岸基礎工程中常使用的開口式基樁，執行砂土層承載力分析時，基礎規範得出的分析成果最不保守。

關鍵詞：離岸工程、基樁軸向承載力、開口式基樁、台灣建築物基礎構造設計規範、模組化自動程式



ABSTRACT

Offshore engineering often utilizes open-ended pile foundations with sizes much larger than those used in onshore applications. This study aims to evaluate the applicability of current domestic building foundation design regulations to the assessment of bearing capacity of offshore-sized piles. Through the development of a modular automatic program, assessments of different-sized piles are compared using Taiwanese regulations and internationally recognized methods for assessing axial pile capacity. The findings reveal that, concerning the commonly used open-ended piles in offshore foundation engineering, the foundation regulations yield the least conservative results in the analysis of bearing capacity in sandy soil layers.

Keywords: Offshore engineering, Pile axial capacity, Open-ended piles, Taiwanese Building Foundation Structural Design Regulations, Modular automatic program



目錄

中文摘要	1
ABSTRACT	2
目錄	3
圖目錄	4
表目錄	4
第一章 緒論	6
1-1 研究背景	6
1-2 研究動機及目的	7
1-3 研究方法	8
第二章 文獻回顧	10
2-1 台灣建築物基礎構造設計規範 (2001)	11
2-2 API 法(2014)	12
2-3 ICP 法(2005)	13
第三章 模型建置	15
3-1 參數輸入	16
3-2 參數處理	17
3-3 主程式運算	19
3-4 成果輸出預覽	20
第四章 模型驗證	20
4-1 參數假設	20
4-2 案例驗證	22
第五章 成果輸出	25
第六章 結論與建議	30
6-1 結論	30
6-2 建議	30
參考文獻	31

圖目錄

圖 1 Examples of CPT profiles	7
圖 2 離岸風電之風機樁基礎安裝	7
圖 3 港灣碼頭基樁打設	7
圖 4 計畫研究流程圖	9
圖 5 工程地質探勘資料庫 GIS 圖資查詢	9
圖 6 模組化自動程式分析流程圖	10
圖 7 基樁承載機制示意圖	11
圖 8 基礎靜力學法-主程式運算介面	19
圖 9 基礎 CPT 法-主程式運算介面	19
圖 10 API 法-主程式運算介面	19
圖 11 ICP 法-主程式運算介面	19
圖 12 單位摩擦範例	20
圖 13 累積摩擦範例	20
圖 14 樁端阻抗範例	20
圖 15 總極限承載力範例	20
圖 16 砂土與黏土錐尖阻抗隨深度變化	21
圖 17 單一砂土層隨深度變化之 f_s 對比	22
圖 18 單一砂土層隨深度變化之 Q_s 對比	22
圖 19 單一砂土層隨深度變化之 Q_b 對比	23
圖 20 單一砂土層隨深度變化之 Q_u 對比	23
圖 21 單一黏土層隨深度變化之 f_s 對比	23
圖 22 單一黏土層隨深度變化之 Q_s 對比	23
圖 23 單一黏土層隨深度變化之 Q_b 對比	24
圖 24 單一黏土層隨深度變化之 Q_u 對比	24
圖 25 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 f_s	26
圖 26 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 f_s	26
圖 27 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 f_s	26
圖 28 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 f_s	26
圖 29 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_s	27
圖 30 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_s	27
圖 31 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_s	27
圖 32 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_s	27
圖 33 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_b	28
圖 34 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_b	28
圖 35 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_b	28
圖 36 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_b	28
圖 37 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_u	29
圖 38 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_u	29

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法	
圖 39 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_u	29
圖 40 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_u	29

表目錄

表 1 各法於基樁軸向承载力評估所需之參數表.....	15
表 2 「模組化自動程式」參數輸入步驟.....	16
表 3 「模組化自動程式」參數處理.....	18
表 4 「模組化自動程式」主程式運算範例.....	19
表 5 土層參數基本假設.....	21
表 6 模型分析案例.....	25



第一章 緒論

1-1 研究背景

當今社會對於氣候變遷和能源需求的議題日益關注，能源科技的發展持續演進，離岸風力發電產業的出現被認作能源轉型的重要契機。作為臺灣近年來積極發展的重大建設之一，離岸風力發電產業在臺灣發展優勢的主因諸如：(I)能源構面：乾淨且可循環再生之能源，增加能源多樣性改善能源供應需求；(II)地理構面：臺灣坐擁絕佳風場地理環境，可將風機架設於海上降低陸上空間需求；(III)政策構面：參與國際交流共享，不僅引進國際先進技術，透過參與技術發展在國際市場佔有一席之地。這些構面形成的綜合框架，為臺灣在離岸風力產業打下堅實的基礎，確保了可持續性的能源供應，也促進臺灣在國際社會的競爭力。

而離岸工程的實行，包含土木、電機、海洋等不同專業工程領域的知識積累與融合，才完善的這龐大而複雜的體系。其離岸風機結構的設計與施行有諸多考量，結構主體因於尺寸、設計需求、水域條件等因素造成總重量達到數百乃至數千噸，為此承載上方的水下基礎對於整體風機結構的穩定性便扮演著至關重要的角色。

鑒於前述，為確保水下基礎可提供足夠承載力給予上部結構支撐，在基礎設計上須考量地盤土層性質與樁基礎極限承載力(ultimate bearing capacity)，經由工址調查流程針對工程場址進行鑽探取樣及室內實驗，獲得土壤種類分佈及其工程性質，並由工程師研判作為後續基礎設計之依據。在工址調查作業中，調查地下土層並了解土層分佈並由此分析地層承載力的強弱，則會成為影響後續工程之設計因素。調查地下土壤的主要項目為：(I)取得地下土層的厚度；(II)層面之高程；(III)土層之土壤種類。

在大地工程之地質鑽探作業中，傳統方式是採用標準貫入試驗(Standard Penetration Test, SPT)操作搭配劈管取樣，取得所需之地層強度與物理參數，再依現場工程師的經驗與目測研判層面位置與土壤種類。要求準確則需將土樣送至實驗室進行試驗，依據性質成果進行統一土壤分類法分類。但是標準貫入試驗法僅適用於陸域分析操作，且易有誤差過大、試驗時間長、土層變化大等問題。而圓錐貫入試驗(cone penetration test, CPT)是採用特定規格電子錐以等速度貫入土壤，依據儀器反饋取得錐尖阻抗(tip resistance)、錐身摩擦力(frictional resistance)與孔隙水壓(pore water pressure)，如(圖 1)。其優點如下：(I)降低分析成本：無須經實驗室試驗；(II)操作簡單；(III)由儀器產出數據：排除人為誤差提升數據的準確性；(IV)連續數據變化：可明確觀察到土層差異變化。且 CPT 法適用於海下土工調查作業，因此工程師可據 CPT 報告與室內試驗成果較合理地評估基礎樁軸向承載力(Mayne et al., 2018)。

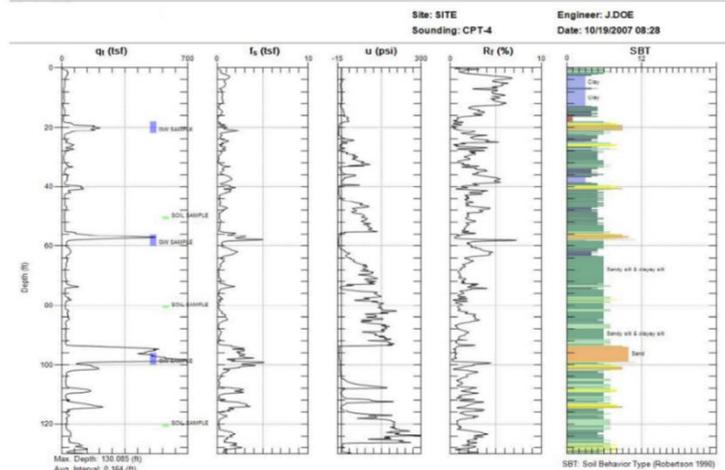


圖 1 Examples of CPT profiles

據 Randolph and Gourvenec (2011) 與紀昭銘等人 (2020) 指出離岸 (offshore) 海事工程所採用的基礎尺寸通常數倍於陸域 (offshore) 工程所採用的基礎尺寸，而導致二者尺寸差異巨大的因素之一為環境外力 (environmental loads) 的不同。其中，離岸結構物所受之環境外力為風力 (wind force)、波浪 (wave)、與洋流作用力 (current force) (SNAME, 2008)。套管式基樁之直徑約為 3 至 4 公尺，樁長可達 70 至 80 公尺；大口徑單樁之直徑約為 5 至 10 公尺，樁長可達 30 至 60 公尺。離岸工程(圖 2)所採用之基樁直徑遠大於陸域工程與港灣工程(圖 3)所採用之基樁直徑 (通常小於 1 公尺)，從而導致其基樁長徑比(L/D)亦有明顯差異，因此受到基樁尺寸效應影響下海陸域的基樁承載行為有明顯的不同 (黃俊鴻與王俊翔，2022)。



(圖片來源：<https://www.csbcnet.com.tw>)

圖 2 離岸風電之風機樁基礎安裝



(圖片來源：https://www.hunghua.com.tw/company_tw_7.php)

圖 3 港灣碼頭基樁打設

1-2 研究動機及目的

由於臺灣在離岸基礎工程設計規範尚未完善，因此設計之內容仍需符合臺灣建築物基礎構造設計規範(以下簡稱為基礎規範)之標準。但直接將陸域的基礎規範應用在龐大的離岸基礎可能是不妥善的，離岸工程中常採用開口式(open ended)鋼管樁作為構造物基礎，但是基礎規範尚無提供開口式基樁的承載力評估方法且亦未考量基樁尺寸效應帶來的影響等因素，

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

因此本研究導入國際規範 DNVGL-RP-C212 (2017) 所列出之離岸基樁設計方法：(I)美國石油學會 (American Petroleum Institute, API)及(II)英國倫敦帝國學院 (Imperial College Pile method, ICP) 進行基樁軸向承載力的評估，並與臺灣的基礎規範的分析成果進行比較討論。

依據多筆地工調查報告顯示，臺灣西部海域土層為砂土、黏土與粉土互層，粉土層常被發現於海床下 20 公尺內，而粉土層的受力行為介於砂土與黏土之間。值得注意的是，基礎規範、API 與 ICP 法皆有提出針對砂土層與黏土層的評估方法，但是粉土層沒有相對應的軸向承載力評估方法，因此粉土層的承載力評估可採用兩種土層方法取其一或取所得承載力最小值 (紀昭銘等人，2022b)。

本計畫採用基礎規範、API 與 ICP 法進行閉口式基樁及開口式基樁在不同基樁尺寸及土層條件的影響，討論各法基樁軸向承載力的結果與成果曲線趨勢的變化特性。由於工程顧問公司在工程設計階段常受到計畫執行時程與人力受限的壓力影響，加上國外的商業軟體 APILE 沒有提供臺灣的基礎規範評估方法，因此本次專題目的將藉由模組化自動程式的開發達到有效且快速地完成工程設計分析。

在傳統土木工程領域中，數據整理與計算是最為繁瑣的過程，而面對大量數據的處理更需花費龐大的時間與精力。在各個工作階段常需使用到不同的商業軟體或輔助工具，透過人工進行繁瑣的資料處理運算，此種執行方式不但造成效率低落，更易造成人為誤差及設計瑕疵。為此我們提出模組化自動程式的理念，透過編程者的設計下利用數值軟體與輔助功能，可簡單並迅速地取得最終分析成果。模組化自動程式的優點如下：(I)大數據計算：提高分析處理數量；(II)系統性計算：提高分析處理速度；(III)程式計算：降低人為誤差；(IV)資料管理；(V)階段性資料處理：易於後續批量修正錯誤，及將部分計算模塊用於其他工程專案執行。由此以技術快速取得進展，達到精確且快速的成果，也大大降低人工作業及設計流程，由此提升工程品質。

1-3 研究方法

本專題研究運用流程圖(Flow Chart)進行流程設計與規劃(圖 4)。在基樁承載力分析評估方面，本研究回顧過去以 CPT 資料進行分析之觀念與實作流程，並且透過文獻資料的蒐集與閱讀，彙整各評估方法(基礎規範、API、ICP)理論的優缺點。土層數據之蒐集處理方面，採用工程地質探勘資料庫(圖 5)、地工調查報告、施國欽教育用課本案例等數據資料，經前處理為可分析數據用以後續案例分析使用。爾後，本專題研究將依據各法計算公式進行開發「模組化自動程式」設計，並在相同案例分析中，驗證本模組化自動程式與商業軟體 APILE 的分析成果。最終進行各法數值成果的比較討論及分析承載力變化特性與保守度評估。

本模組化程式設計分析流程(圖 6)可區分為四個步驟。(I)設計參數的輸入，包含土壤參

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

數與基樁型式、尺寸參數；(II)分析參數的計算，各單位深度之土層性質(地下水條件、不排水剪力強度、土壤摩擦角、CPT 錐尖阻抗、CPT 錐身摩擦力...等)與基樁分析參數(幾何形狀、底面積、外徑周長、內徑周長...等)；(III)主程式核心計算，分析基礎規範、API 與 ICP 法之極限軸向承載力(Q_u)、樁底承載力 (Q_b) 與樁身表皮摩擦力 (Q_s)的數值；(IV)分析成果輸出，繪製圖表來比較不同方法之基樁隨著深度變化之承載力曲線。

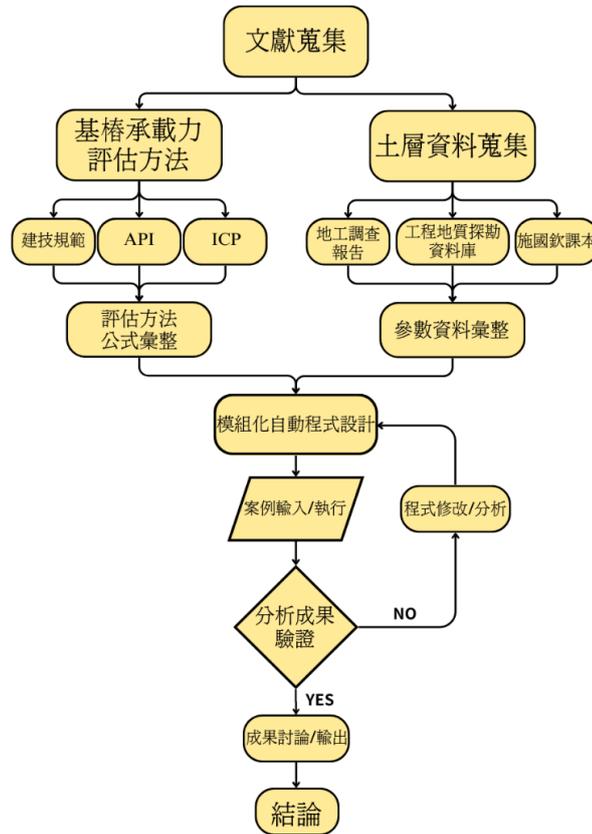
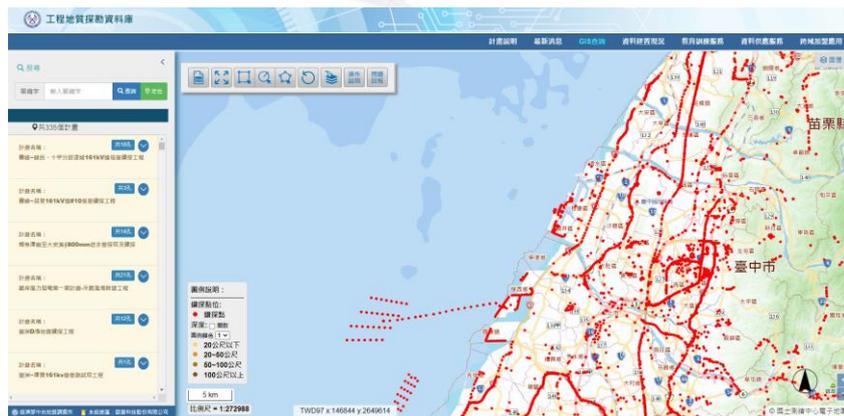


圖 4 計畫研究流程圖



(參考網址：<https://geotech.moeacgs.gov.tw/imoeagis/Home/Map>)

圖 5 工程地質探勘資料庫 GIS 圖資查詢

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

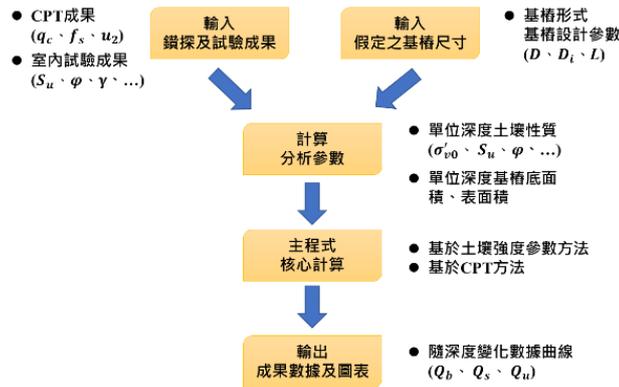


圖 6 模組化自動程式分析流程圖

第二章 文獻回顧

基樁受軸向壓力時的極限承載力 Q_u ，可分為樁底的承載力 Q_b ，加上樁身表皮摩擦力 Q_s ，即為式 1：

$$Q_u = Q_b + Q_s = q_b A_b + f_s A_s = q_b A_b + \pi D \sum f_s \Delta Z \quad \text{式 1}$$

式中： q_b 為樁底極限承載應力； f_s 為樁身表皮摩擦阻應力； A_b 為樁底面積； A_s 為樁身表面積； πD 為基樁周長； ΔZ 為土層厚度。

基樁的承載力在離岸工程中是一個關鍵考慮因素，它受到多個重要因素的影響，包括土壤特性、基樁型式、尺寸和施工方式。其中，離岸基樁型式大致可分為兩種，閉口式基樁(closed end pile)和開口式基樁(open end pile)。閉口式基樁(closed end pile)在施工過程中對周圍土壤產生強烈的擠壓效應，因此能夠提供較高的極限承載力(如圖 7 (a)封閉樁所示)。然而，在離岸工程中，當所需的基樁尺寸變得較大時，將面臨打擊阻抗過高的問題，這可能導致無法將基樁安裝到所需的深度，從而對施工造成困難。有鑒於此，較佳的選擇是改為開口式鋼管樁(open end pile)，以減少對周圍土壤的擠壓效應，將有助於大口徑基樁安裝至預定深度。

開口式基樁(open end pile)打入土層時，土壤會逐漸被擠入樁的內部，同時土壤與樁體內壁之間會產生額外的摩擦阻力(如圖 7(b)非封閉樁所示)。此摩擦力會隨著樁的貫入深度增加而逐漸增加，當土壤與樁體內壁的摩擦力 $Q_{s, internal}$ 加上樁環的承載力 $Q_{b, annulus}$ 總和超過樁底的全斷面承載力時，土壤將不再被擠入樁內(如圖 7(c)閉塞樁所示)，此現象稱為栓塞效應(effect of soil plug)。此時，樁底的承載力 Q_b 主要來自於基樁底部的面積，可透過式 2 來估算，其中 q_b 為樁底極限承載應力； f_s 為樁身表皮摩擦阻應力； A_b 為樁底面積； A_a 為樁環的斷面積； D_i 為樁內徑； ΔZ 為土層厚度。

$$Q_b = \min(Q_b, Q_{ba} + Q_{si}) = \min(q_b A_b, q_b A_a + \pi D_i \sum f_s \Delta Z) \quad \text{式 2}$$

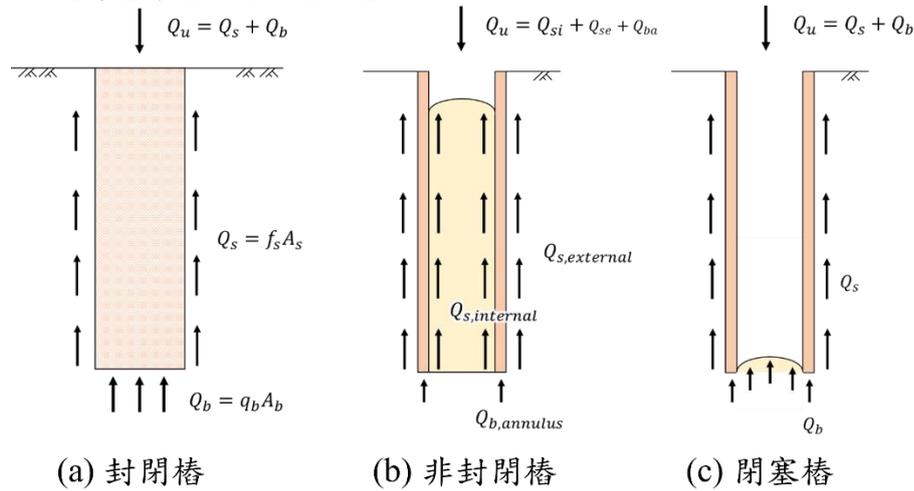


圖 7 基樁承載機制示意圖

開口式基樁的樁底承載力受到基樁的尺寸和栓塞效應的影響，而不同的評估方法可能會導致不同的結果。以下將介紹我國之基礎規範，及其他 2 個國外研究團隊提出的評估方法。

2-1 台灣建築物基礎構造設計規範 (2001)

基礎規範於基樁極限承載力的評估辦法包含靜力學方法和 CPT 經驗公式。靜力學法為依據極限平衡理論推導而得，由於基樁之承載力與基樁種類、施工方式及地層條件有關，因此現行各規範都包含地域性經驗在內(基礎規範，2001)，基樁承載機制可分為黏土層及砂土層進行分析，黏土層為基於不排水剪力強度(S_u)進行分析；砂土層是採用有效應力的概念進行分析，並且砂土層 f_s 與 q_b 會受到臨界深度(critical depth)的影響，臨界深度係指當基樁安裝過程超過某一埋置深度時 f_s 與 q_b 會趨於某一定值。另外，基礎規範於 CPT 經驗公式採用 Bustamante and Gianeselli (1982) 所提出之 LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees) 方法，此法為運用錐尖阻抗(q_c)來預測砂土層之基樁承載力。

➤ 靜力學法：

1. 黏土

(1.) 樁身摩擦力

$$f_s = c_a = \alpha S_u \quad \text{式 3}$$

(2.) 樁底承載力

$$q_b = N_c S_u \quad \text{式 4}$$

其中， c_a 為土壤與樁身之間的表面附著力； α 為 S_u 的折減係數，Skempton (1959) 建議 α 值為 0.3 至 0.6 間，通常可採 0.45； S_u 為黏土之不排水剪力強度； N_c 為承載力因數，建議可採用 9 (Skempton, 1951)。

2.砂土

(1.)樁身摩擦力

$$f_s = \beta \sigma'_v = (k \tan \delta_{cv}) \sigma'_v \quad \text{式 5}$$

(2.)樁底承载力

$$q_b = N_q \sigma'_{v0} \quad \text{式 6}$$

其中， β 為表皮摩擦係數； σ'_v 為垂直有效應力； δ_{cv} 為樁身與土壤間之摩擦角； σ'_{v0} 為樁底有效覆土壓力。

➤ CPT 經驗公式：

1.砂土

(1.)樁身摩擦力

a、閉口樁

$$q_c < 500 \Rightarrow f_s = \frac{q_c}{60} \quad \text{式 7}$$

$$500 \leq q_c \leq 1200 \Rightarrow f_s = q_c/1000 \quad \text{式 8}$$

$$q_c > 1200 \Rightarrow f_s = q_c/150 (\leq 15) \quad \text{式 9}$$

(2.)樁底承载力

a、閉口樁

$$q_b = 0.8 \cdot q_c \quad \text{式 10}$$

其中， q_c 為錐尖阻抗。

2-2 API 法(2014)

API法為採用傳統靜力學法進行基樁軸向承载力的預測(API, 2014)。API法目前廣泛用於國際海域鑽油平台工程，亦被世界上大多數規範所接受，是國際上最具代表性的傳統計算方法(黃俊鴻與王俊翔, 2022)。API與基礎規範採用靜力學評估公式相似，黏土層為基於不排水剪力強度(S_u)進行分析，砂土層是採用有效應力的概念進行分析。值得注意的是，API與基礎規範之間的差異來自於砂土層與黏土層所採用之經驗參數的分析方式不同，並且兩法於砂土層臨界深度的 f_s 與 q_b 強度限制條件亦不相同。

➤ 靜力學法：

1.黏土

(1.)樁身摩擦力

$$f_s = \alpha C_u \quad \text{式 11}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.5\psi^{-0.5}, & \psi \leq 1 \\ 0.5\psi^{-0.25}, & \psi > 1 \end{cases} \quad \text{式 12}$$

$$\psi = \frac{S_u}{\sigma'_{v0}} \quad \text{式 13}$$

(2.)樁底承载力

$$q_b = N_c S_u = 9S_u \quad \text{式 14}$$

其中， α 為折減係數； S_u 為黏土之不排水剪力強度； ψ 為不排水剪力強度比； σ'_{v0} 為樁底有效覆土壓力； N_c 為承载力因數。

2.砂土

(1.)樁身摩擦力

$$f_s = k \tan \delta \sigma'_v = \beta \sigma'_v \quad \text{式 15}$$

(2.)樁底承载力

$$q_b = N_q \sigma'_v \quad \text{式 16}$$

其中， k 為側向土壓力係數； δ 為土與樁壁摩擦角； σ'_v 為有效覆土壓； β 為摩擦係數； N_q 為承载力因數。

2-3 ICP 法(2005)

ICP 法為英國倫敦帝國學院所開發之基樁軸向承载力設計的經驗方法(Jardine et al., 2005)，此方法為整合過往倫敦帝國理工學院的博士研究成果。ICP 法的特點是基於 CPT 之錐尖阻抗 (q_c) 預測基樁於砂土層與黏土層之極限承载力，並且 f_s 與 q_b 受到基樁幾何形狀的因素影響。

➤ CPT 經驗公式：

1.黏土

(1.)樁身摩擦力 f_s

a、閉口樁、開口樁相同

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

$$f_s = 0.8\sigma'_{rc} \tan \delta_{cv} = 0.8k_c\sigma'_{v0} \tan \delta_{cv} \quad \text{式 17}$$

$$k_c = (2.2 + 0.016YSR - 0.87\log S_t)YSR^{0.42} \times \max\left(\frac{h}{R}, 8\right)^{-0.2} \quad \text{式 18}$$

其中， σ'_{rc} 為基樁加載過程平衡穩定的側向有效應力； δ_{cv} 為樁身與土壤間之摩擦角； σ'_{v0} 為樁底有效覆土壓力； k_c 為載重因子； YSR 為降伏應力比 (Yield Stress Ratio)，近似於過壓密比 OCR； S_t 為黏土敏感度。

(2.) 樁底承载力 q_b

a、閉口樁

$$q_b = 0.8q_c \quad \text{式 19}$$

b、開口樁

$$\text{栓塞效應判式：} \quad D_i/D_{cpt} + 0.45q_c/P_a < 36 \quad \text{式 20}$$

$$\text{栓塞發生：} \quad Q_b = q_b\pi D^2/4, \quad q_b = 0.4q_c \quad \text{式 21}$$

$$\text{栓塞未發生：} \quad Q_b = q_b\pi(R_{outer}^2 - R_{inner}^2), \quad q_b = q_c \quad \text{式 22}$$

其中， q_c 為錐尖阻抗； D 為樁外直徑； D_i 為樁內直徑； D_{cpt} 為 CPT 錐尖直徑； R_{outer} 為基樁外半徑； R_{inner} 為基樁內半徑。

2. 砂土

(1.) 樁身摩擦力 f_s

a、閉口樁、開口樁相同

$$f_s = \sigma'_{rf} \tan \delta_f = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \tan \delta_{cv} \quad \text{式 23}$$

$$\sigma'_{rc} = 0.029q_c(\sigma'_{v0}/P_a)^{0.13} \times \max\left(\frac{h}{R^*}, 8\right)^{-0.38} \quad \text{式 24}$$

其中， σ'_{rf} 為破壞時的側向有效應力； σ'_{rc} 為基樁加載過程平衡穩定的側向有效應力； $\Delta\sigma'_{rd}$ 為基樁加載過程中局部側向有效應力的膨脹增量； δ_{cv} 為樁身與土壤間之摩擦角； σ'_{v0} 為樁底有效覆土壓力； $h = L - z$ ， L 為樁長， z 為土壤深度； $R^* = (R^2 - R_i^2)^{0.5}$ 。

(2.) 樁底承载力 q_b

a、閉口樁

$$q_b = \max([1 - 0.5 \log(D/D_{CPT}), 0.3]) \cdot q_c \quad \text{式 25}$$

b、開口樁

$$\text{栓塞效應判別式：} \quad D_i < 0.02(D_r - 30); \quad D_i/D_{cpt} < 0.083q_c/P_a \quad \text{式 26}$$

$$\text{栓塞發生：} \quad q_b = \max([0.5 - 0.25 \log(D/D_{CPT}), 0.15]) \cdot q_c \quad \text{式 27}$$

$$\text{栓塞未發生：} \quad Q_b = q_b\pi(R_{outer}^2 - R_{inner}^2), \quad q_b = q_c \quad \text{式 28}$$

其中， q_c 為錐尖阻抗； D 為樁外直徑； D_i 為樁內直徑； D_{cpt} 為 CPT 錐尖直徑； R_{outer} 為基

樁外半徑； R_{inner} 為基樁內半徑。

表 1 彙整了各法在評估基樁軸向承載力時所需的參數，以下總結了幾項重點：

- 靜力學分析法中，基礎規範僅提供閉口式基樁在砂、黏土的評估方法，而 API 提供閉口式和開口式基樁在砂土與黏土的評估方法，包括栓塞效應及承載力評估方法。
- CPT 分析法中，基礎規範僅提供閉口式基樁在砂土的評估方法，而 ICP 提供閉口式和開口式基樁在砂土與黏土的評估方法，包括栓塞效應及承載力評估方法。
- 三種法規均未提供基樁在粉土層的評估方法。
- 基礎規範未考慮開口式基樁承載力，不適用於離岸工程中常用的開口式基樁。
- 三種法規在粉土的評估上存在差異，將粉土視為黏土或砂土可能導致分析結果差異。

表 1 各法於基樁軸向承載力評估所需之參數表

評估方法		基樁型式	土壤分類	基樁承載力評估對應各土壤所需之參數			
				室內土壤力學試驗所得參數	現地 CPT 試驗所得參數	判斷栓塞效應及其承載力評估	
靜力學分析法	基礎	閉口式	砂土	✓		X	
			黏土	✓			
			粉土				
		開口式	砂土				
			黏土				
			粉土				
	API	閉口式	砂土	✓		X	
			黏土	✓			
			粉土				
		開口式	砂土	✓		✓	
黏土			✓		✓		
粉土							
CPT 分析法	基礎	閉口式	砂土		✓	X	
			黏土				
			粉土				
		開口式	砂土				
			黏土				
			粉土				
	ICP	閉口式	砂土		✓	X	
			黏土		✓		
			粉土				
		開口式	砂土		✓		✓
			黏土		✓		✓
			粉土				

第三章 模型建置

本研究方法之「模組化自動程式」已開發完畢，以下總結使用「模組化自動程式」進行分析基礎規範、API 法、ICP 法之軸向承載力評估的建置流程：

3-1 參數輸入

於本「模組化自動分析程式」中，使用者須選填執行案例之基本資料，如基樁形式、土壤參數等，詳細步驟如表 2。

- 步驟 1：基樁參數輸入：選取執行案例適用的基樁形式、基樁類型。
- 步驟 2：基樁尺寸輸入：給定執行案例適用的尺寸數值、基樁預定埋置深度。
- 步驟 3：計算方法選用：選取執行案例適用的軸向承載力計算方式。
- 步驟 4：基本參數輸入：給定執行案例適用的地下水位面、大氣壓力水單位重。
- 步驟 5：土壤參數輸入：給定執行案例適用的土壤分析類型、土層厚度。並根據選擇的土壤類型，依序填入非紅色儲存格中。注：輸入完畢後需確認土層厚度是否足夠，否則程式無法正常運作。
- 步驟 6：分析模式選用：受力模式(壓力或張力)，土層總厚度、土層數量、土層分析深度。

表 2 「模組化自動程式」參數輸入步驟

基樁參數輸入	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>閉口樁 開口樁</td> </tr> <tr> <td>步驟01 選擇樁形式</td> <td>閉口樁</td> </tr> <tr> <td>選擇樁類型</td> <td>圓形鋼樁</td> </tr> <tr> <td></td> <td>圓形鋼樁 Timber piles 預鑄混凝土樁 Raymond step-taper piles Raymond uniform-taper piles H型樁 tapered portion of monotube</td> </tr> </table>			閉口樁 開口樁	步驟01 選擇樁形式	閉口樁	選擇樁類型	圓形鋼樁		圓形鋼樁 Timber piles 預鑄混凝土樁 Raymond step-taper piles Raymond uniform-taper piles H型樁 tapered portion of monotube	
		閉口樁 開口樁									
步驟01 選擇樁形式	閉口樁										
選擇樁類型	圓形鋼樁										
	圓形鋼樁 Timber piles 預鑄混凝土樁 Raymond step-taper piles Raymond uniform-taper piles H型樁 tapered portion of monotube										
基樁尺寸輸入	<table border="1"> <tr> <td>步驟02</td> <td>項目：軸向承載力計算</td> </tr> <tr> <td></td> <td>建技靜力學法 選取</td> </tr> <tr> <td></td> <td>建技CPT法 選取</td> </tr> <tr> <td></td> <td>API法 選取</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ICP 選取</td> </tr> </table>	步驟02	項目：軸向承載力計算		建技靜力學法 選取		建技CPT法 選取		API法 選取		ICP 選取
步驟02	項目：軸向承載力計算										
	建技靜力學法 選取										
	建技CPT法 選取										
	API法 選取										
	ICP 選取										
計算方法選用	<table border="1"> <tr> <td>步驟03 圓樁外直徑(mm)</td> <td>6000</td> </tr> <tr> <td>圓樁內直徑(mm)</td> <td>5900</td> </tr> <tr> <td>基樁長(m)</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>基樁預定埋置深度(m)</td> <td>80</td> </tr> </table>	步驟03 圓樁外直徑(mm)	6000	圓樁內直徑(mm)	5900	基樁長(m)	80	基樁預定埋置深度(m)	80		
步驟03 圓樁外直徑(mm)	6000										
圓樁內直徑(mm)	5900										
基樁長(m)	80										
基樁預定埋置深度(m)	80										
基本參數輸入	<table border="1"> <tr> <td>步驟04 輸入地下水位面(m)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>一大氣壓(kPa)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>水單位重(kPa)</td> <td>9.81</td> </tr> </table>	步驟04 輸入地下水位面(m)	0	一大氣壓(kPa)	100	水單位重(kPa)	9.81				
步驟04 輸入地下水位面(m)	0										
一大氣壓(kPa)	100										
水單位重(kPa)	9.81										

土壤參數 輸入	步驟05	輸入土壤參數		
	單位	土壤類型	土壤分析類 型	土層厚度(m)
	土層1	砂土	砂土	100
	土層2			
	土層3			
	土層4			
	土層5			
	土層6			
	土層7			
	土層8			
	土層9			
	土層10			
輸入分析 模式	步驟06			
		輸入分析形式		壓力
		土層總厚度(m)		100
		土層數量		1
		土壤分析深度(須為基樁長度+2倍樁徑)		92

3-2 參數處理

使用者選填完畢並確認參數無誤後，本「模組化自動程式」則會依據使用者所提供之參數進行系統式運算，初步執行上會先將土層數據以 0.1 米視作一層進行分層處理，並依照使用者選用之基樁形式、土壤性質、選用計算方法，透過模組化自動化運算完成分析參數，詳細見表 3。

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

表 3 「模組化自動程式」參數處理

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	土層1	20	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
2	土層2	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
3	土層3	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
4	土層4	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
5	土層5	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
6	土層6	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
7	土層7	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
8	土層8	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
9	土層9	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
10	土層10	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
11	土層11	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
12	土層12	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
13	土層13	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
14	土層14	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
15	土層15	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
16	土層16	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
17	土層17	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
18	土層18	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
19	土層19	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
20	土層20	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
21	土層21	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
22	土層22	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
23	土層23	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
24	土層24	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
25	土層25	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
26	土層26	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
27	土層27	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
28	土層28	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
29	土層29	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
30	土層30	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
31	土層31	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
32	土層32	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
33	土層33	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0
34	土層34	0	土層	黏土	2	9.19	0	25	3	8.33333333	14	1.3	31	0	0.5	0	0	0

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S				
																			分析深度	土層深度	土層類型	土層單位重量 (kN/m ³)
1	0	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	25.00	3.00	3.00	3	8.33333333	14	14	14	1.3	1	1.3
2	0.1	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	25.00	3.00	3.00	3	8.33333333	14	14	14	1.3	1	1.2985
3	0.2	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	25.00	3.00	3.00	3	8.33333333	14	14	14	1.3	1	1.297
4	0.3	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	25.00	3.00	3.00	3	8.33333333	14	14	14	1.3	1	1.2955
5	0.4	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	26.20	3.00	3.00	3	8.33333333	14	14	14	1.3	1	1.294
6	0.5	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	27.70	3.00	3.00	3	9.23333333	14	14	14	1.3	1	1.2925
7	0.6	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	29.20	3.00	3.00	3	9.93333333	14	14	14	1.3	1	1.291
8	0.7	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	30.70	3.00	3.00	3	10.63333333	14	14	14	1.3	1	1.2895
9	0.8	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	32.20	3.00	3.00	3	11.33333333	14	14	14	1.3	1	1.288
10	0.9	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	33.70	3.00	3.00	3	12.03333333	14	14	14	1.3	1	1.2865
11	1.0	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	35.20	3.00	3.00	3	12.73333333	14	14	14	1.3	1	1.285
12	1.1	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	36.70	3.00	3.00	3	13.43333333	14	14	14	1.3	1	1.2835
13	1.2	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	38.20	3.00	3.00	3	14.13333333	14	14	14	1.3	1	1.282
14	1.3	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	39.70	3.00	3.00	3	14.83333333	14	14	14	1.3	1	1.2805
15	1.4	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	41.20	3.00	3.00	3	15.53333333	14	14	14	1.3	1	1.279
16	1.5	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	42.70	3.00	3.00	3	16.23333333	14	14	14	1.3	1	1.2775
17	1.6	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	44.20	3.00	3.00	3	16.93333333	14	14	14	1.3	1	1.276
18	1.7	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	45.70	3.00	3.00	3	17.63333333	14	14	14	1.3	1	1.2745
19	1.8	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	47.20	3.00	3.00	3	18.33333333	14	14	14	1.3	1	1.273
20	1.9	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	48.70	3.00	3.00	3	19.03333333	14	14	14	1.3	1	1.2715
21	2.0	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	50.20	3.00	3.00	3	19.73333333	14	14	14	1.3	1	1.27
22	2.1	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	51.70	3.00	3.00	3	20.43333333	14	14	14	1.3	1	1.2685
23	2.2	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	53.20	3.00	3.00	3	21.13333333	14	14	14	1.3	1	1.267
24	2.3	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	54.70	3.00	3.00	3	21.83333333	14	14	14	1.3	1	1.2655
25	2.4	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	56.20	3.00	3.00	3	22.53333333	14	14	14	1.3	1	1.264
26	2.5	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	57.70	3.00	3.00	3	23.23333333	14	14	14	1.3	1	1.2625
27	2.6	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	59.20	3.00	3.00	3	23.93333333	14	14	14	1.3	1	1.261
28	2.7	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	60.70	3.00	3.00	3	24.63333333	14	14	14	1.3	1	1.2595
29	2.8	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	62.20	3.00	3.00	3	25.33333333	14	14	14	1.3	1	1.258
30	2.9	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	63.70	3.00	3.00	3	26.03333333	14	14	14	1.3	1	1.2565
31	3.0	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	65.20	3.00	3.00	3	26.73333333	14	14	14	1.3	1	1.255
32	3.1	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	66.70	3.00	3.00	3	27.43333333	14	14	14	1.3	1	1.2535
33	3.2	0	0	20	土層	黏土	9.19	9.19	9.19	25	85	68.20	3.00	3.00	3	28.13333333	14	14	14	1.3	1	1.252

T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
0	0	0	0.000								

3-3 主程式運算

「模組化自動程式」處理完分析參數後，則會進入程式的主程式運算部分，本模型依據基礎分析參數進行各法之計算，並分置於不同頁面中進行運算，各法依序：(I) 基礎靜力學法；(II) 基礎CPT法；(III) API法；(IV) ICP法，其詳細運算過程如下表4所示。

表4「模組化自動程式」主程式運算範例

Table 8: Foundation Statics Method - Main Program Calculation Interface. A large data table with columns A through BN and rows 1 through 20. It contains numerical values for various parameters and calculations.

圖8 基礎靜力學法-主程式運算介面

Table 9: Foundation CPT Method - Main Program Calculation Interface. A large data table with columns A through AM and rows 1 through 12. It includes numerical data and a small diagram showing a cross-section of a foundation with labels for '施工土' (Construction Soil), '打入式基礎' (Driven Foundation), '非使用自土' (Not using self-soil), and '使用自土' (Using self-soil).

圖9 基礎CPT法-主程式運算介面

Table 10: API Method - Main Program Calculation Interface. A large data table with columns A through AY and rows 1 through 20. It contains numerical values for various parameters and calculations.

圖10 API法-主程式運算介面

Table 11: ICP Method - Main Program Calculation Interface. A large data table with columns A through CE and rows 1 through 19. It contains numerical values for various parameters and calculations.

圖11 ICP法-主程式運算介面

3-4 成果輸出預覽

「模組化自動程式」主程式運算結束後，本模型會依據使用者選用的計算方法(基礎靜力學法、基礎 CPT 法、API 法、ICP 法)，自動產出數值曲線圖表，具有以下資訊：(I)單位摩擦力(圖 12)；(II) 累積摩擦力(圖 13)；(III) 樁端組抗力(圖 14)；(IV) 總承载力(圖 15)。使用者可依據本模型匯出的圖表進行承载力安全性評估與分析工程設計規劃等。

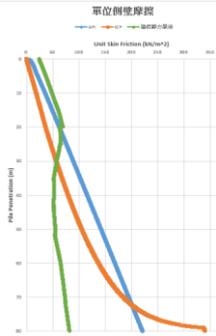


圖 12 單位摩擦範例

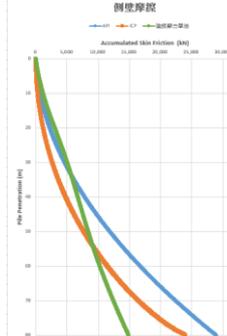


圖 13 累積摩擦範例

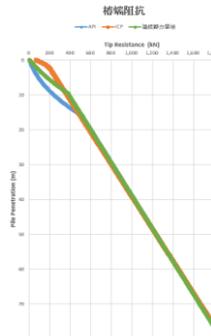


圖 14 樁端阻抗範例

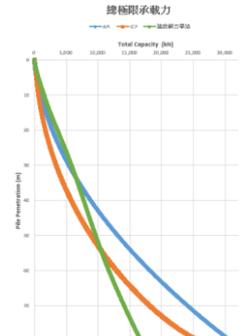


圖 15 總極限承载力範例

第四章 模型驗證

為保證模組化自動程式分析成果有充足的可信度，本模型選擇商業軟體 APILE 使用 API 法與 ICP 法的進行基樁軸向承载力比對，下文將講述驗證案例的參數假設及比對成果。

4-1 參數假設

本模型選擇使用套管式基樁針對以下兩種土層案例作為驗證之依據：

- (1) 單一砂土層
- (2) 單一黏土層

模型驗證的基樁尺寸參考近岸港灣基樁尺寸使用樁徑約 1m 左右之基樁，採用外樁徑：1m，樁內徑：0.9m，基樁長度：80m；砂土分析之 CPT 錐尖阻抗採用 Robertson and Campanella (1983) 經驗公式 ($\tan\phi = [\log(q_t/\sigma'_{v0}) + 0.29]/2.68$) 推估；黏土分析之 CPT 修正錐尖阻抗採用經驗公式 ($S_u = (q_t - \sigma_v)/N_k$, $N_k = 15$) 推估，砂土與黏土推估所得之 q_c 、 q_t 隨深度變化曲線如圖 16 所示。土層基本參數假設在砂土與黏土層分別使用中等緊密砂土與軟弱黏土進行設計，詳細土層參數基本假設如表 5 所示。

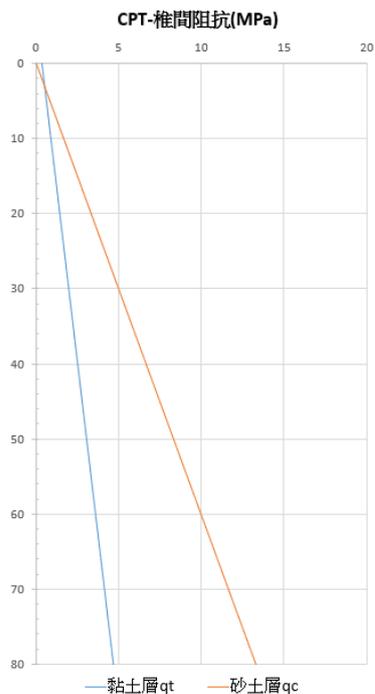


圖 16 砂土與黏土錐尖阻抗隨深度變化

表 5 土層參數基本假設

土層強度：	中等緊密砂土	土層強度：	軟弱黏土
土壤摩擦角：	30°	土壤摩擦角：	31°
樁土界面摩擦角：	25°	樁土界面摩擦角：	26
飽和單位重：	19(kPa)	飽和單位重：	19(kPa)
有效單位重：	9.19(kPa)	有效單位重：	9.19(kPa)
1atm：	100(kPa)	1atm：	100(kPa)
Nq：	20	Su：	25~325(kPa)
Ko：	0.5	YSR：	1.3~1(0~20m) 1(20m~)
		St：	3

4-2 案例驗證

案例驗證之比對成果如圖 17 至圖 24 所示。根據成果顯示，模組化自動程式與 APILE 軟體在 API、ICP 法的分析成果近乎一致，僅有兩處不同，分別為 API- f_s (圖 17)、ICP- Q_b (圖 23)。

在圖 17 中，模型與軟體的差異為 API 法的 f_s 設定強度上限不同。在圖 23 中，模型與軟體在 ICP 法的 Q_b 計算方式在淺層深度有些微差異。

經過模型校正後，本研究發現，模型與軟體兩者存在的差異主要是因為針對計算結果所採用的土壤強度、承载力強度上限不同，但此差異對於整體而言影響不大。鑒於前述，本研究認為模型以現有成果即可良好針對使用者所輸入的土層厚度、土壤類型等數據計算出對應的基樁軸向承载力。

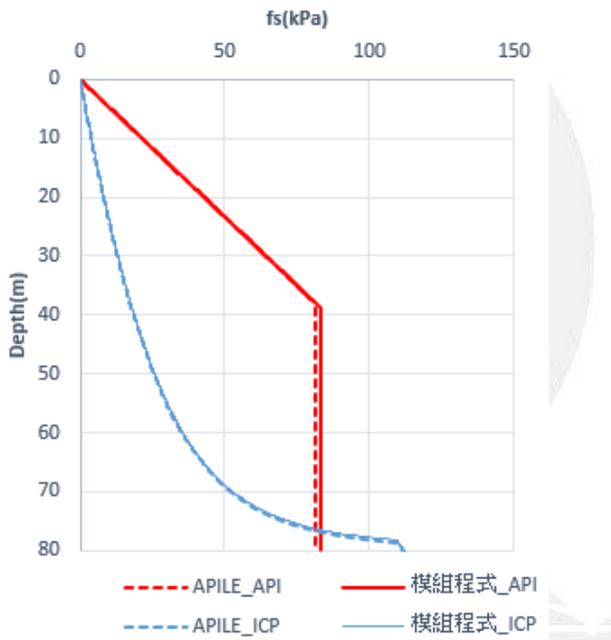


圖 17 單一砂土層隨深度變化之 f_s 對比

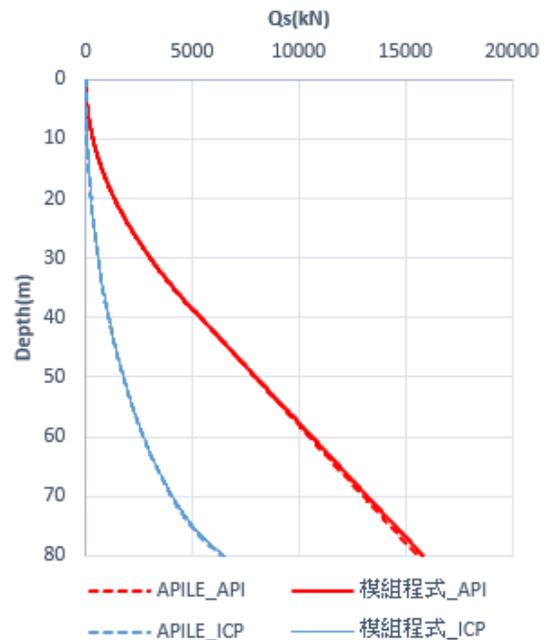


圖 18 單一砂土層隨深度變化之 Q_s 對比

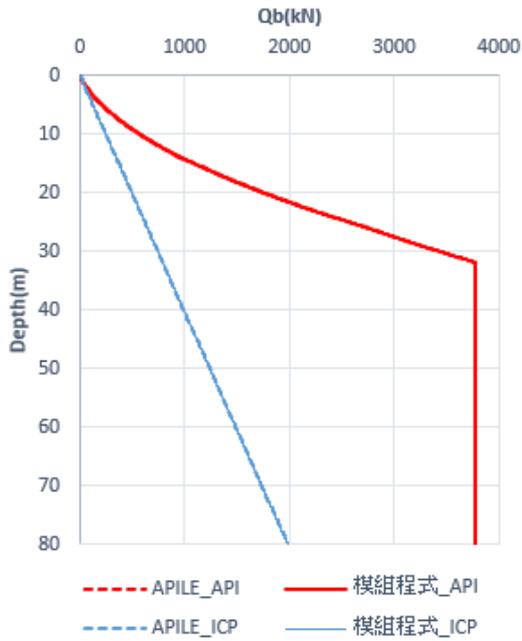


圖 19 單一砂土層隨深度變化之 Q_b 對比

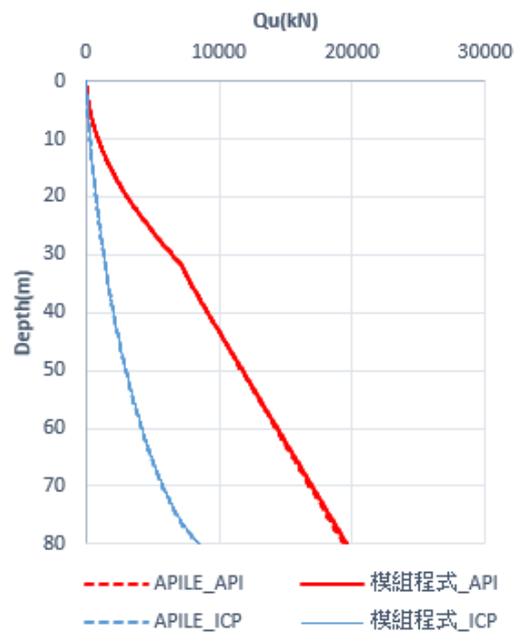


圖 20 單一砂土層隨深度變化之 Q_u 對比

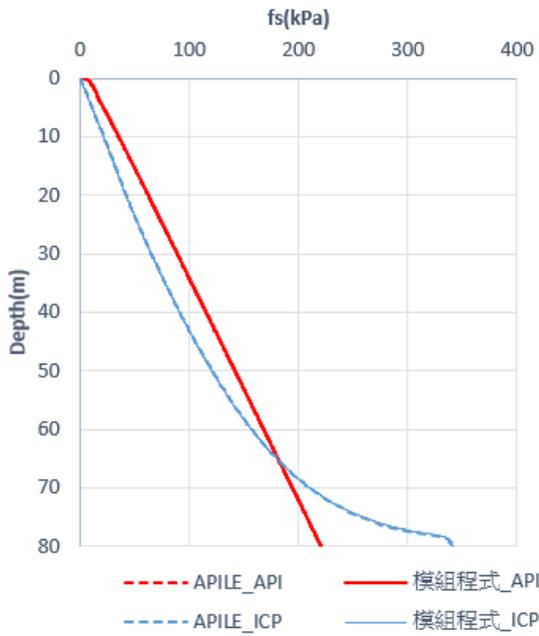


圖 21 單一黏土層隨深度變化之 f_s 對比

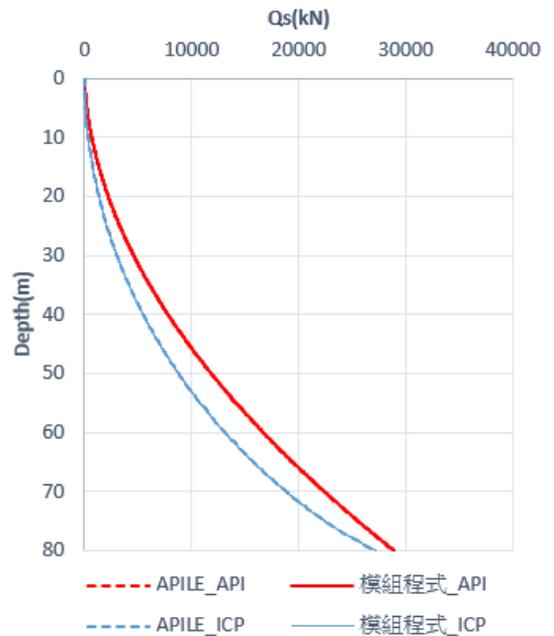


圖 22 單一黏土層隨深度變化之 Q_s 對比

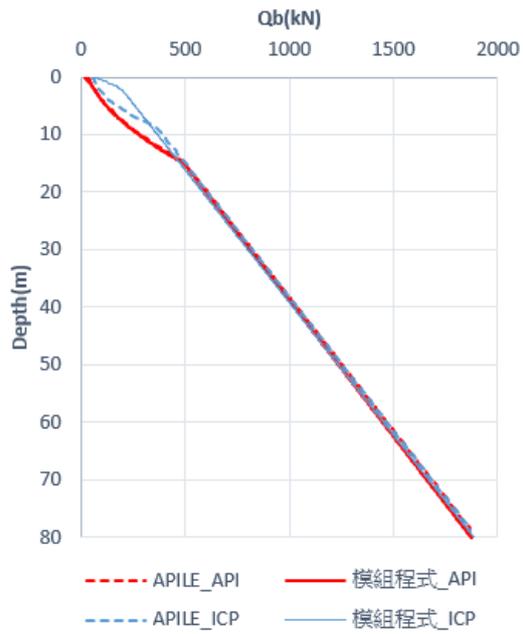


圖 23 單一黏土層隨深度變化之 Q_b 對比

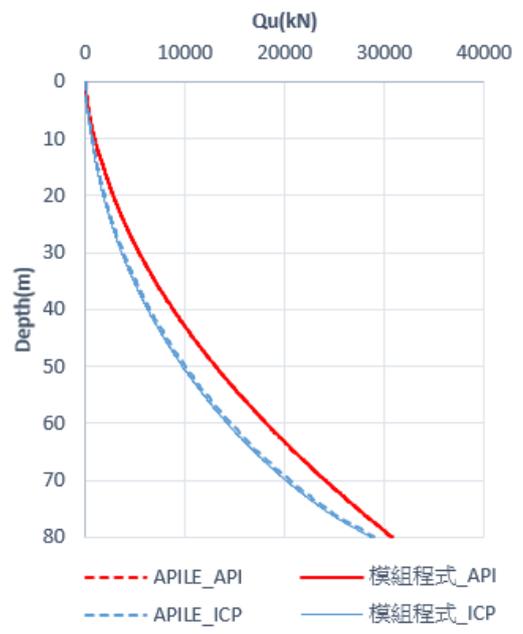


圖 24 單一黏土層隨深度變化之 Q_u 對比



第五章 成果輸出

本研究選擇四種計算方法進行基樁軸向承載力分析，包含 API 法、ICP 法、基礎規範(靜力學法)、基礎規範(CPT 法)；分析案例針對四種不同的土層、基樁條件分別進行計算，需要特別注意的是，由於基礎規範(CPT 法)僅適用於砂土層的分析，故在分析黏土層的案例時不採用此方法進行比對；詳細土壤強度參數基本假設如前段所述之表 5、模型分析案例如表 6 所示。以下說明各案例比對成果。

表 6 模型分析案例

基樁類型	土壤類型	基樁尺寸
開口樁	單一砂土層	港灣式：樁長：80m、樁外徑：1m、樁內徑：0.9m
		套管式：樁長：80m、樁外徑：4m、樁內徑：3.9m
	單一黏土層	港灣式：樁長：80m、樁外徑：1m、樁內徑：0.9m
		套管式：樁長：80m、樁外徑：4m、樁內徑：3.9m

圖 25 至圖 28 為四種分析案例的 f_s 隨深度變化圖。其中圖 25、圖 26 為砂土層分析成果，圖 25、圖 26 為黏土層分析成果；以砂土層而言，淺層時，以不保守度排列為基礎規範(CPT)>API>ICP。深層時，ICP>基礎規範(CPT)>API。並且三種方法計算成果不因基樁尺寸改變而有所變化。值得注意的是基礎規範(靜力學)對於 f_s 的限制條件會根據 20 倍樁徑對應深度之 f_s 而有所變化，因而有不同的 f_s 分析成果。簡而言之，樁徑越大，基礎規範(靜力學法)分析的 f_s 達到限制條件的深度越深，其也因為樁徑變大而從整體中最保守轉變為最不保守；以黏土層而言，淺層時，基礎規範(靜力學)>API>ICP。深層時，ICP>API>基礎規範(靜力學)。其中，API、基礎規範(靜力學)不因樁徑的改變而有較大的差別，但 ICP 由於其樁徑變化而在過程中激發出較大的側向有效應力。

圖 29 至圖 32 為四種分析案例的 Q_s 隨深度變化圖。其反應出 f_s 隨深度累加的結果。以砂土層而言，基礎規範(CPT)>API>ICP，而基礎規範(靜力學)由於樁徑的變大而變為最不保守。以黏土層而言，API>ICP>基礎規範(靜力學)。值得注意的是 ICP 的 Q_s 由於樁徑增加的影響，導致其在深層的 Q_s 變為最不保守。

圖 33 至圖 36 為四種分析案例的 Q_b 隨深度變化圖。以砂土層而言，港灣式基樁的分析成果整體為 API>基礎規範(靜力學)>基礎規範(CPT)>ICP。但是，由於 API、基礎規範(靜力學)的強度受限制，基礎規範(CPT)在深層有最大的 Q_b 。套管式基樁的分析成果則為基礎規範(靜力學)>基礎規範(CPT)>API>ICP，值得注意的是 ICP 相較於其他方法在分析套管式基樁的案例中有遠遠低估的現象。以黏土層而言，三種方法在港灣式基樁的分析成果幾乎一致，只是淺層稍微有所不同。但在套管式基樁的分析成果中，API>基礎規範(靜力學)>ICP，並且尺寸因素造成三種方法的分析成果差異放大。

建構模組化自動程式研析臺灣建築技術規則適用之 CPT 法

圖 37 至圖 40 為四種分析案例的 Q_u 隨深度變化圖。整體而言，由於基樁的 Q_s 對於 Q_u 有較大的影響性，故 Q_u 的整體行為與 Q_s 近乎一致，差別在於套管式基樁在黏土層的案例中，API 比 ICP 更不保守。

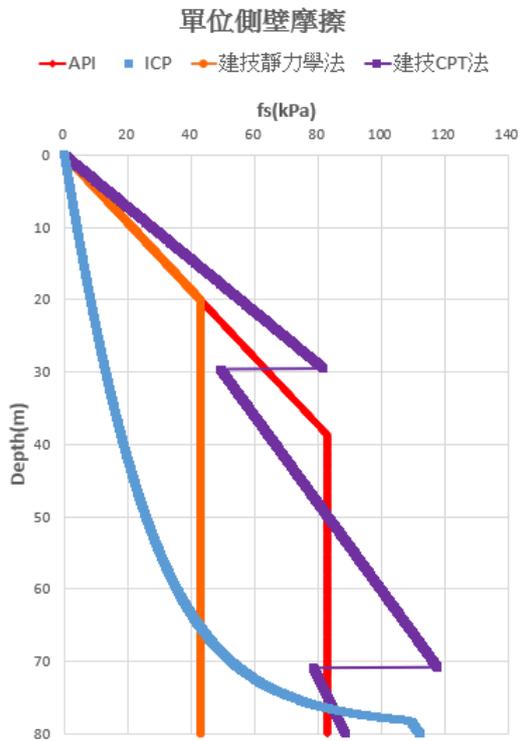


圖 25 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 f_s

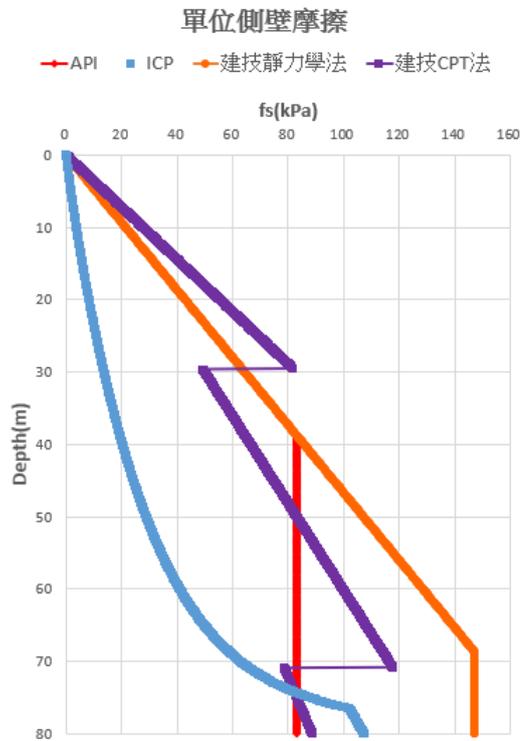


圖 26 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 f_s

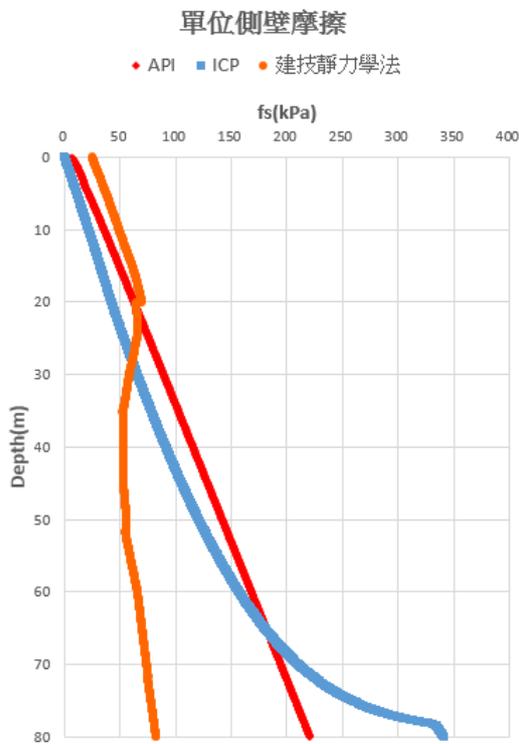


圖 27 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 f_s

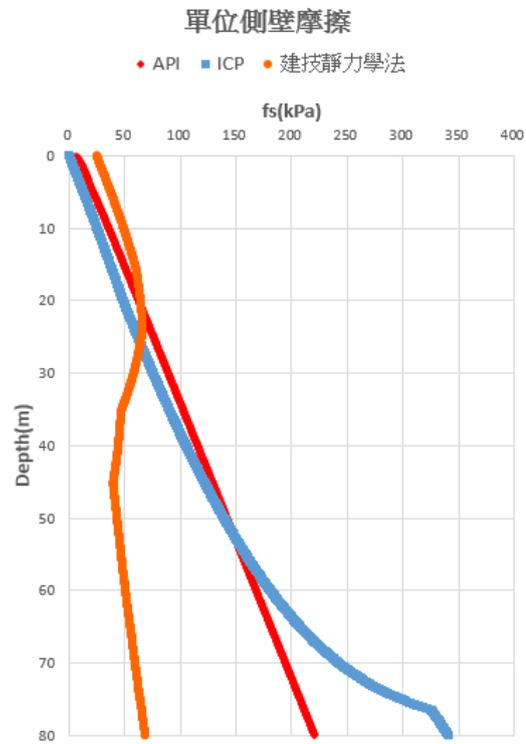


圖 28 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 f_s

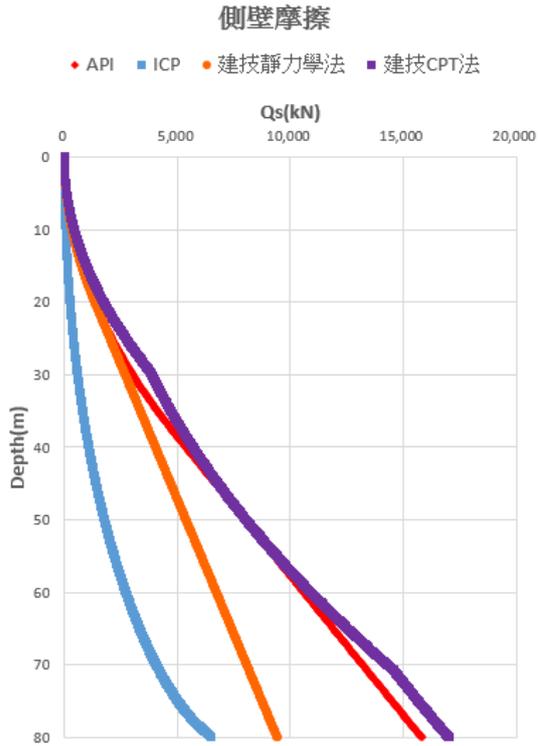


圖 29 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_s

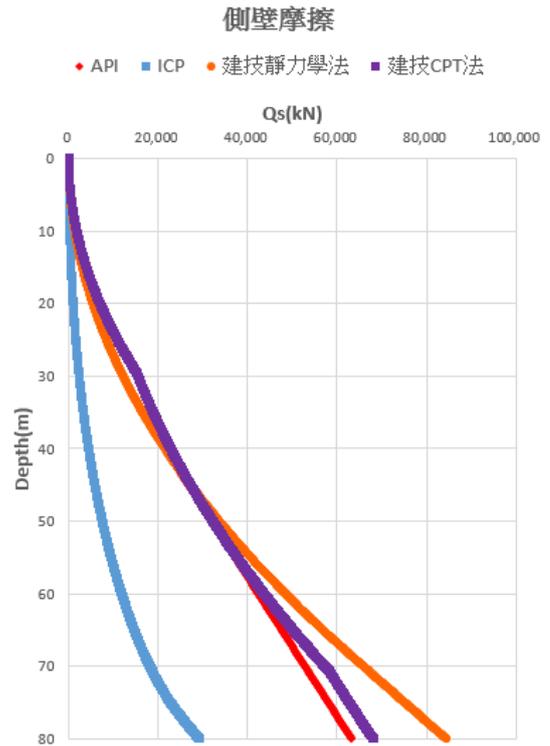


圖 30 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_s

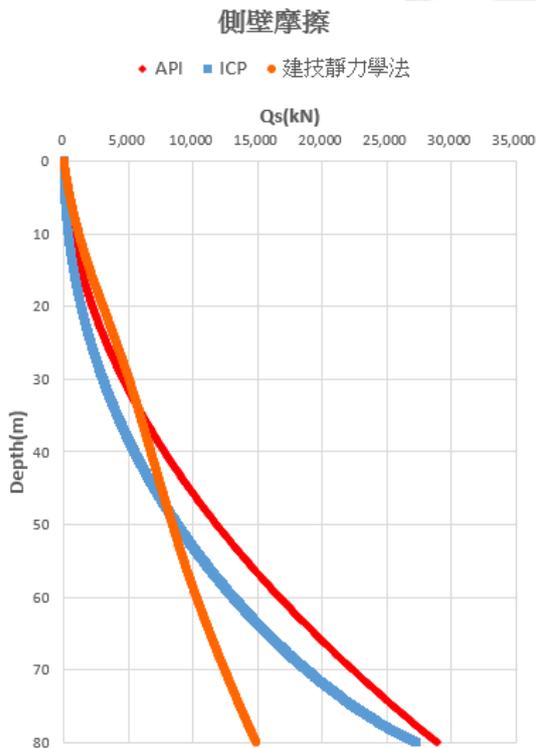


圖 31 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_s

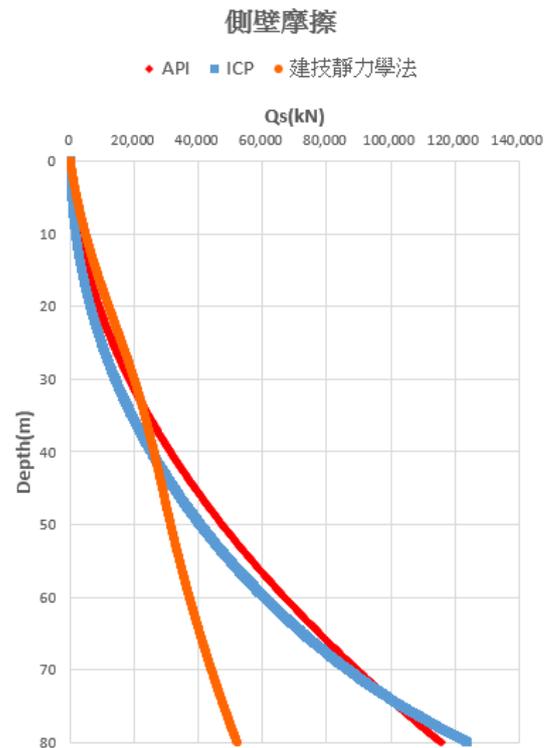


圖 32 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_s

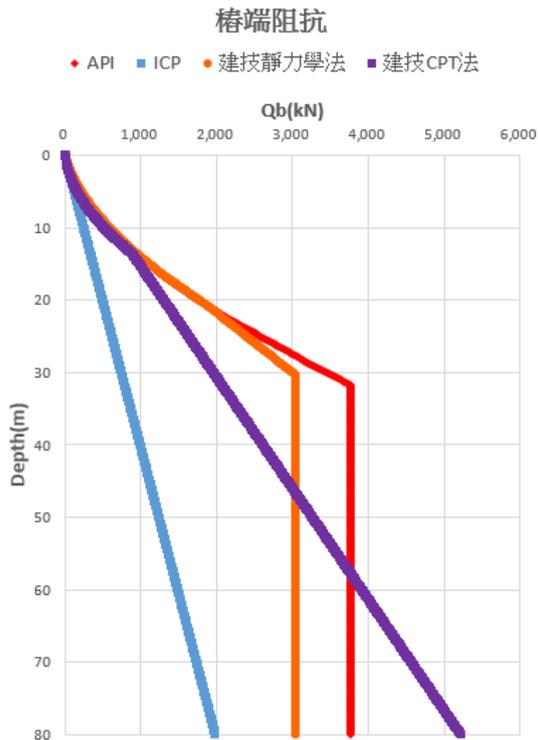


圖 33 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_b

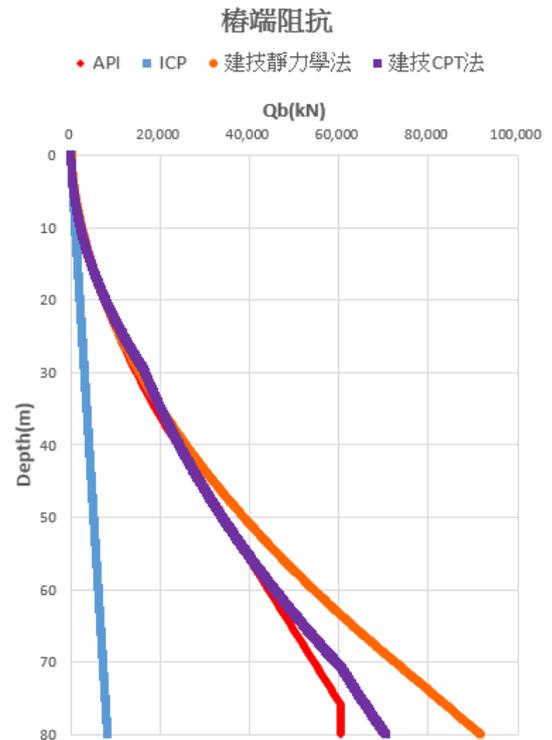


圖 34 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_b

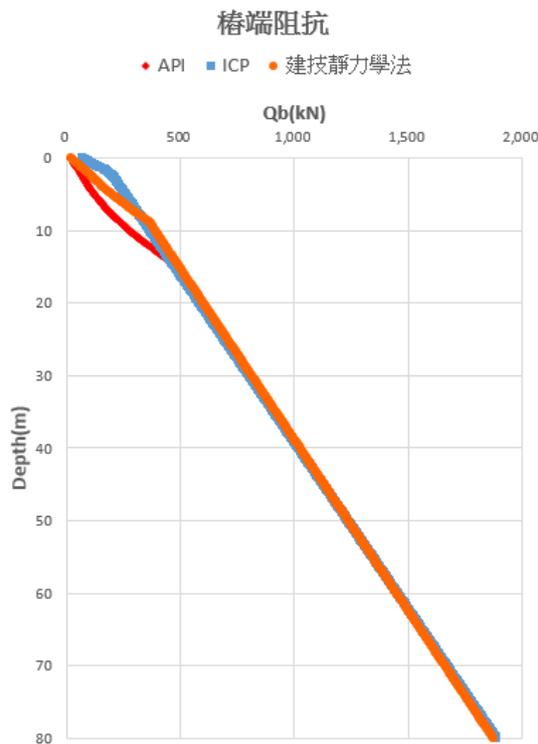


圖 35 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_b

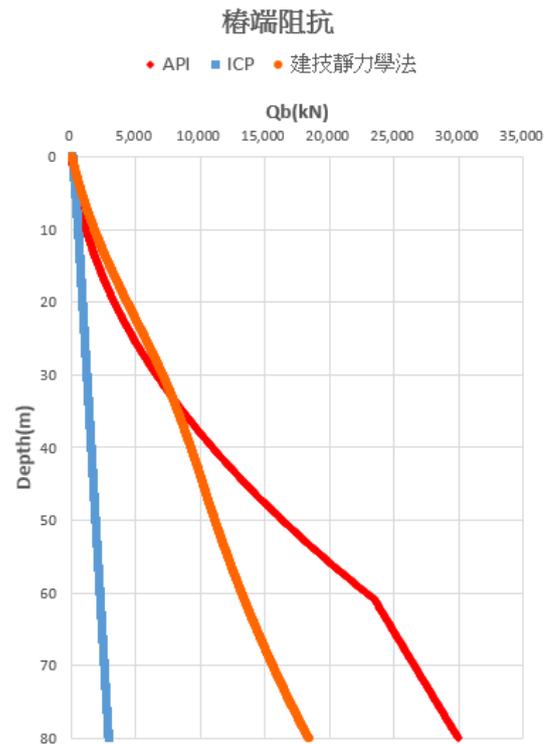


圖 36 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_b

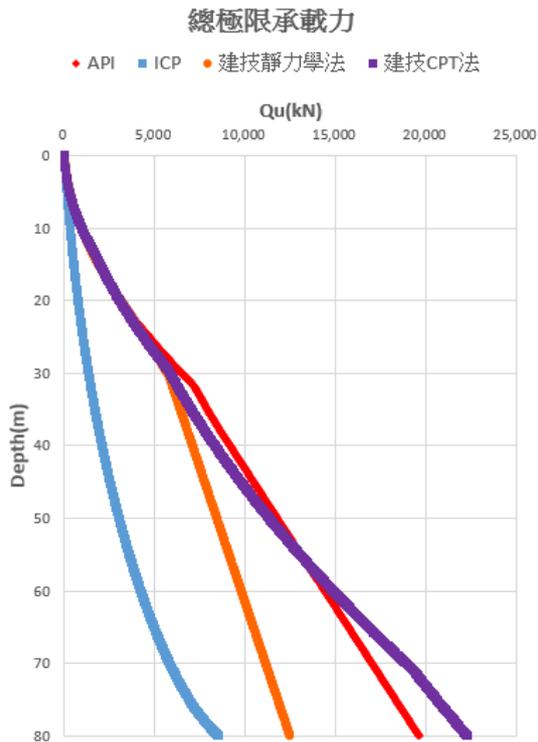


圖 37 港灣式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_u

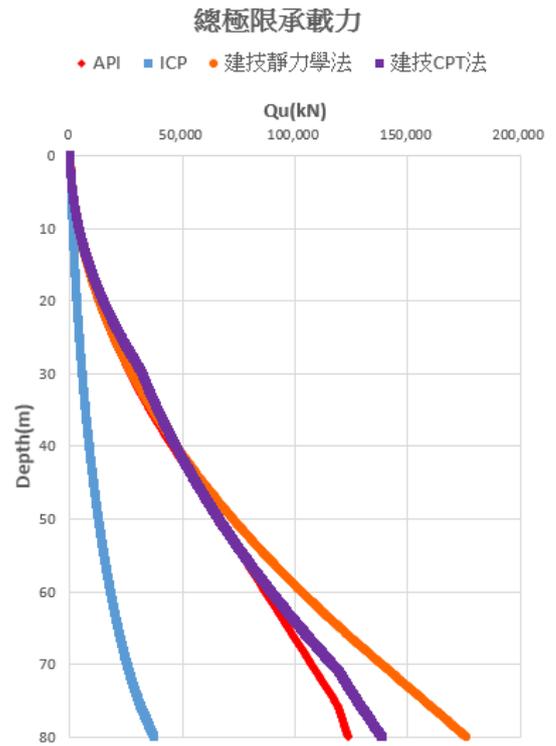


圖 38 套管式基樁於單一砂土層隨深度變化之 Q_u

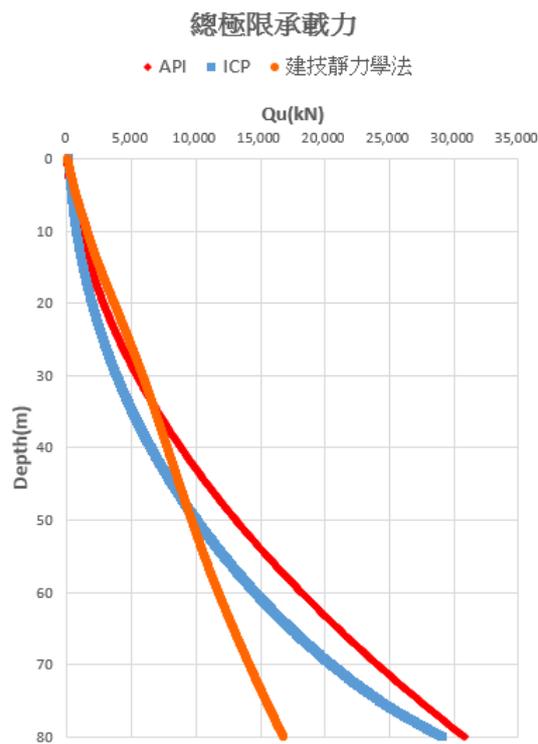


圖 39 港灣式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_u

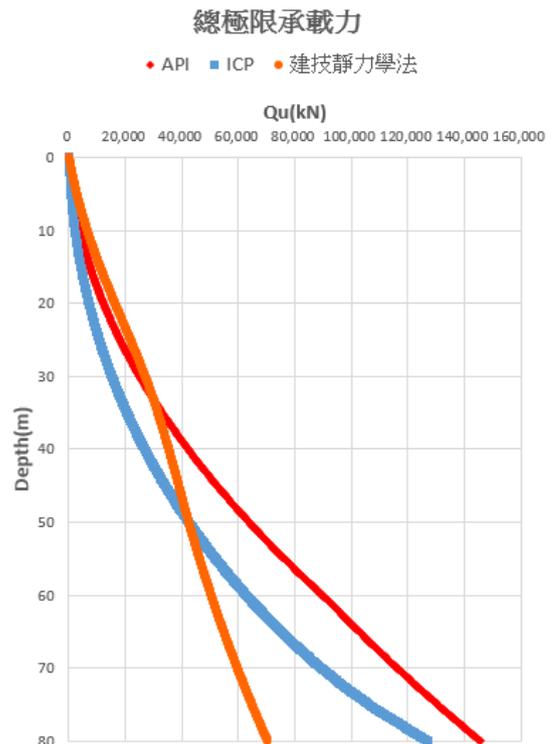


圖 40 套管式基樁於單一黏土層隨深度變化之 Q_u

第六章 結論與建議

6-1 結論

本研究開發了針對離岸基樁承載力的模組化自動分析程式，本程式的應用有助於提高工程效率和準確性，目前可執行分析模式具有國際規範常用之 API、ICP 以及臺灣基礎規範(靜力學)和基礎規範(CPT法)，並且與商用軟體 APILE 進行成果比對印證近乎一致，在分析成果上具有高度可信度。

依據各法分析結果討論，針對臺灣基礎規範(靜力學)和基礎規範(CPT 法)進行保守度評估，不同基樁分析模式與不同土壤性質承載力的分析成果，本研究彙總上述四種案例之軸向承載力比較結果，討論之成果如下。

1. 套管式基樁分析成果顯示，以砂土總極限承載力而言，基礎規範(靜力學)法較其他方法不保守，ICP 法較其他方法保守；以黏土總極限承載力而言，API 法較其他方法不保守，基礎規範(靜力學)法較其他方法保守。
2. 港灣式基樁的分析成果顯示，以砂土總極限承載力而言，基礎規範(CPT)、API 法較其他方法不保守，ICP 法較其他方法保守；以黏土總極限承載力而言，API 法較其他方法不保守，基礎規範(靜力學)法較其他方法保守。

綜合以上研究結果顯示，以離岸基礎工程較常使用的套管式基樁而言，在執行砂土層承載力分析，基礎規範有著最不保守的分析成果，因此未來面對相似的離岸工程專案要將基礎規範應用於離岸基樁的設計上需要多加注意。

6-2 建議

本研究開發之針對離岸基樁承載力的模組化自動分析程式，本程式目前可用之計算方法僅國際規範常用之 API、ICP 以及臺灣基礎規範(靜力學)和基礎規範(CPT 法)，期望在未來可以增加其他規範適用之分析模式。

以及在參數分析中，建議持續優化參數輸入與處理的步驟及資料驗證，確保執行過程的準確性與可靠性，可以即時發現錯誤問題。以及在未來的研究可進一步探討粉土層的向承載力評估方法，以填補目前在該領域的處理分析應對。對於離岸基樁設計，建議綜合考慮不同方法的分析結果，並根據具體情況選擇最適合的設計方法，以確保工程的安全性和可靠性。

參考文獻

1. 內政部營建署 (2001)，建築物基礎構造設計規範。
2. 紀昭銘、林正山、黃普源與許盈松 (2020)。圓形基礎在正常壓密黏性土之承載力評估，第 42 屆海洋工程研討會暨科技部 108 年度海洋及造船工程學門研究計畫成果發表會，P.591 - P.598，國立台灣海洋大學。
3. 紀昭銘、蕭兆昇、林正山、林柏齡與黃普源 (2022a)。於大地工程教育中採用 CDIO 教學模式-以數值軟體開發自動化模組為例，第十九屆大地工程學術研討會，T-01，淡水。
4. 紀昭銘、黃普源、林正山、李宥霖、程毓仁與姜良宇 (2022b)。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，P.597- P.602，國立中山大學。
5. 黃俊鴻與王俊翔 (2022)，離岸風機基樁軸向承載力計算方法之比較研究：(I) 均勻土層，地工技術，第 172 期，第 95-106 頁。
6. American Petroleum Institute (2014). Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design. Report RP 2A-WSD.
7. Bustamante, M., and Gianceselli, L. (1982). Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Amsterdam, Vol. 2, P.493-P.500.
8. Chao-Ming Chi, Zheng-Shan Lin, Zhao-Sheng Xiao, and Pu-Yuan Huang (2022). Establishment of Computational Thinking in the Interdisciplinary Education of Offshore Foundation Engineering. Marine Research, Vol. 2, 1. DOI:10.29677/MR.202206_2(1).0004.
9. DNVGL-RP-C212 (2017). Offshore soil mechanics and geotechnical engineering.
10. Jardine, R.J., Chow F.C., Overy R., and Standing J. (2005). ICP design methods for driven piles in sands and clays. Thomas Telford, London,
11. Mayne, P.W., Saftner, D., and Dagger, R. (2018). Cone Penetration Testing Manual

for Highway Geotechnical Engineers MnDOT Manual on CPT - Evaluating Deep Foundation Response from Cone Penetration Tests. Minnesota Department of Transportation.

12. P. K. Robertson and K.L. Cabal (2014). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc.
13. Randolph, M. F. and Gourvenec, S. (2011). Offshore Geotechnical Engineering. Spon Press.
14. SNAME (2008). Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-Up Units. In Technical & Research Bulletin 5-5A. New Jersey.
15. Skempton, A.W. (1951). The bearing capacity of clays. Proceedings of Building Research Congress, Division 1, Part III.
16. Skempton, A.W. (1959). Cast in-situ Bored Piles in London clay. Geotechnique, Vol.9, No.4, pp. 153~173.

