



## 逢甲大學學生報告 ePaper

# 基樁在互層土承載力之自動化程式設計 Automated Program Design for the Bearing Capacity of Piles in Interlayered Soils

作者：蔡昕佑、黃百主

系級：土木四乙

學號：D1047906、D1076389

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學年度第一學期



## 中文摘要

隨著城市化的快速發展，基礎設施建設的需求不斷增長，對基樁設計的效率與準確性提出了更高要求。然而，傳統的手算方法因計算過程繁瑣、耗時且易受人為因素影響，逐漸無法滿足現代工程的需求，這也推動了自動化設計工具的開發與應用。本研究旨在開發一套自動化程式，用於計算基樁在互層與單層土壤中的承載力，提升設計效率與精確度。該程式整合了多種土壤模型與設計標準，考慮不同土層的特性與基樁的條件進行分析，能有效處理不同土壤結構下的樁底承載力和樁身摩擦力，從而準確計算基樁的極限承載力。

使用者通過操作介面輸入包括土壤參數、基樁尺寸與形狀等相關設計數據，程式將根據靜力學公式與摩擦力分析模型，利用多種分析方法（如 API 法、Meyerhof 法等）進行承載力計算，並生成清晰的結果圖表和數據，展示承載力隨深度變化的趨勢。同時，為確保程式計算的準確性與可靠性，透過自動化程式及手算結果、APILE 軟體的結果進行比對，驗證程式的準確性與可靠性。結果顯示，該程式能夠在合理誤差範圍內提供精確的承載力計算結果，並在不同的土壤和基樁條件下保持穩定性與一致性。

關鍵詞：互層土、自動化程式、軸向承載力、開口樁

## Abstract

With the rapid development of urbanization, the growing demand for infrastructure construction has placed higher requirements on the efficiency and accuracy of pile foundation design. However, traditional manual calculation methods, characterized by cumbersome processes, time consumption, and susceptibility to human error, are gradually unable to meet the needs of modern engineering. This has driven the development and application of automated design tools.

This study aims to develop an automated program for calculating the bearing capacity of piles in layered and single-layer soils, thereby improving design efficiency and accuracy. The program integrates various soil models and design standards, taking into account the characteristics of different soil layers and pile conditions. It effectively addresses the base bearing capacity and shaft friction of piles under various soil structures, enabling accurate calculation of the ultimate bearing capacity of piles.

Users can input relevant design data, including soil parameters, pile dimensions, and shapes, through the program's user interface. Based on static mechanics formulas and frictional analysis models, the program utilizes multiple analysis methods (e.g., API method, Meyerhof method) to calculate the bearing capacity. It generates clear graphical and numerical results, illustrating the trend of bearing capacity variation with depth.

To ensure the accuracy and reliability of the program's calculations, comparisons were made between the program's results, manual calculations, and outputs from the APILE software. The results demonstrate that the program can provide precise bearing capacity calculations within a reasonable margin of error and maintain stability and consistency under different soil and pile conditions.

Keywords: interlayered soil, automated program, axial bearing capacity, open-ended pile

## 目錄

摘要.....	I
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	VI
第一章 緒論.....	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 研究目的.....	1
1-3 研究方法.....	1
第二章 文獻探討.....	3
2-1 樁基礎極限承載力介紹.....	3
2-2 樁基礎極限承載力公式.....	3
2-3 飽和黏土之單樁承載力估算.....	4
2-4 砂土之單樁承載力估算.....	9
第三章 研究設計與實施.....	11
3-1 模型架構.....	11
3-2 模型介紹.....	11
第四章 模型驗證.....	14
4-1 單層飽和黏土基樁承載分析.....	14
4-1-1 $\alpha$ 法分析.....	16
4-1-2 $\beta$ 法分析.....	18
4-1-3 $\lambda$ 法分析.....	19
4-1-4 API 法分析.....	21
4-2 單層飽和砂土基樁承載分析.....	22
4-2-1 90年建技規則分析.....	24
4-2-2 Meyerhof 法分析.....	26
4-2-3 API 法分析.....	28
4-3 飽和互層土閉口方型基樁承載力分析.....	28
4-4 飽和互層土閉口圓型基樁承載力分析.....	31
4-5 飽和互層土開口圓型基樁承載力分析.....	33
第五章 結論與建議.....	35
5-1 結論.....	35

5-2 建議 .....	36
參考文獻 .....	37



## 圖目錄

圖 1 黏土不排水剪力強度與折減係數 $\alpha$ 的關係圖 .....	5
圖 2 錘擊式基樁之 $\beta$ 與深度關係圖 .....	6
圖 3 $\lambda$ 與樁長之關係圖 .....	7
圖 4 輸入土壤參數介面 .....	12
圖 5 輸入基樁參數介面 .....	12
圖 6 主程式計算方法 .....	13
圖 7 結果輸出示意圖 .....	13
圖 8 單層飽和黏土基樁剖面圖 .....	14
圖 9 輸入土壤參數介面 .....	15
圖 10 輸入土壤參數介面 .....	15
圖 11 輸入基樁參數介面 .....	15
圖 12 輸入基樁參數介面 .....	16
圖 13 $\alpha$ 法結果輸出圖 .....	17
圖 14 $\beta$ 法結果輸出圖 .....	18
圖 15 $\lambda$ 法結果輸出圖 .....	20
圖 16 API 法結果輸出圖 .....	21
圖 17 單層飽和砂土基樁剖面圖 .....	22
圖 18 輸入土壤參數介面 .....	23
圖 19 輸入土壤參數介面 .....	23
圖 20 輸入基樁參數介面 .....	23
圖 21 輸入基樁參數介面 .....	24
圖 22 90年建技規則結果輸出圖 .....	25
圖 23 Meyerhof 法結果輸出圖 .....	27
圖 24 API 法結果輸出圖 .....	28
圖 25 飽和互層閉口方型基樁剖面圖 .....	29
圖 26 結果輸出圖 .....	30
圖 27 飽和互層土閉口圓型基樁剖面圖 .....	31
圖 28 結果輸出圖 .....	32
圖 29 飽和互層土開口圓型基樁剖面圖 .....	33
圖 31 結果輸出圖 .....	34

## 表目錄

表 1 $\alpha$ 法結果對比 .....	17
表 2 $\beta$ 法結果對比 .....	19
表 3 $\lambda$ 法結果對比 .....	20
表 4 API 法結果對比 .....	22
表 5 90年建技規則計算結果對比 .....	26
表 6 Meyerhof 結果對比 .....	28
表 7 API 法結果對比 .....	28
表 8 結果對比 .....	30
表 9 結果對比 .....	32
表 10 結果對比 .....	34



# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景

隨著城市化的快速發展，基礎設施建設需求增加，對於基樁設計的準確性和可靠性提出了更高的要求。由於互層土通常由不同類型的土壤層組成，這些土層的物理性可能差異很大。傳統的手算計算方法須花費大量人力與精力計算，容易出現錯誤。此外，工程設計的規範逐漸趨於嚴格，這促使工程師尋找更高效的設計方法。通過提高設計的準確性和效率，減少資源浪費，因此透過自動化程式，本研究實現了快速、準確的基樁承載力分析，為工程師提供一個可靠的設計工具，顯著提升了基樁設計的效率和精度。

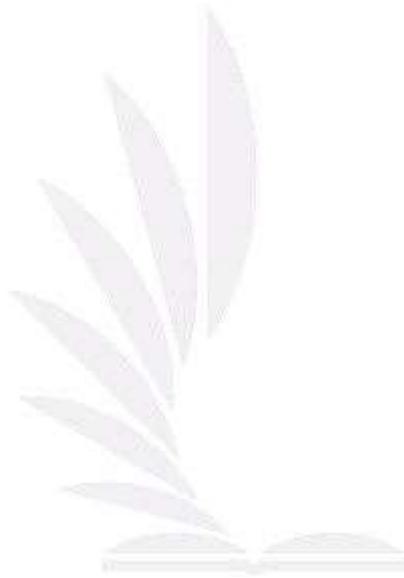
## 1-2 研究目的

傳統的基樁設計通常需要大量手動計算和專業知識，自動化程式可以快速計算和分析承載力，提高設計效率、節省時間和人力資源。手動計算容易受到人為因素影響，導致錯誤或不一致。自動化程式可以通過模組化的計算方法，保證結果的一致性和準確性，降低錯誤風險。互層土的性質較為複雜，存在不同土層的應力狀況。自動化程式可以處理更複雜的土壤模型，進行更全面的分析，幫助工程師做出更好的設計決策。

## 1-3 研究方法

本研究建立多種土壤模型和設計標準的整合模組，能夠處理不同土層的特性、相互作用以及不同樁型（如開口樁或閉口樁）的設計需求。該模組的功能包含使用者可根據需求依序輸入土壤和基樁參數，即可獲得以X-Y為軸的圖表。建立一套能夠考慮不同土層特性和相互作用的模型，使得程式能夠更全面地分析互層土的承載力。提供準確、快速的計算結果。最終再將自動化程式與 APILE 軟體進行對比，驗證所開發程式的計算結果準

確性和可靠性，確保其在實際工程中的應用價值。



## 第二章 文獻探討

本章主回顧以往國內外學者對樁基礎承載力分析行為所使用的承載力公式進行整理與說明。以下針對近期常用的承載力分析公式，其方法有 $\alpha$ 法、 $\beta$ 法、 $\lambda$ 法、民國90年建技規則、Meyerhof法及API法進行探討與介紹，根據分析方法的的不同，得出不同的承載力大小。

### 2-1 樁基礎極限承載力介紹

本文主要利用靜力學分析方法對於不同土層條件與不同樁基樁條件進行極限承載力分析。靜力學公式依據極限平衡理論推導而得，本文採用自行假設參數進行分析。

對於黏土層中之極限承載力，主要與土壤本身不排水剪力強度 $c_u$ 有關， $c_u$ 越大時，樁基礎的極限承載力越大。而對於砂土層之極限承載力與土壤跟樁基礎本身的外摩擦角 $\delta$ 及有效覆土應力 $\sigma'_{v0}$ 有關。樁底承載力受樁長與埋置深度的影響，較深的位置會導致有效覆土應力也較大，得出的樁底承載力也會隨著深度增加而增大。而樁身摩擦承載力則是與外摩擦角 $\delta$ 及有效覆土應力 $\sigma'_{v0}$ 有關，當外摩擦角 $\delta$ 與有效覆土應力 $\sigma'_{v0}$ 越大時，樁身摩擦承載力也會隨著 $\delta$ 與 $\sigma'_{v0}$ 增加而增大。

### 2-2 樁基礎極限承載力公式

根據 Karl Terzaghi (1943年) 發表的土壤承載力理論與 Skempton (1951年) 和 Meyerhof (1956年) 研究如何估算樁周圍土壤的摩擦阻力所結合出的公式，如(式2-1)。

$$Q_u = Q_b + Q_s = q'_{ult}A_b + f_sA_s \quad (\text{式 2-1})$$

其中， $Q_u$ :樁的極限承載力

$Q_b$ :樁底承載力

$Q_s$ : 樁的外壁側向摩擦力

$q'_{ult}$ : 樁底極限承載應力

$f_s$ : 樁身表皮摩擦阻力(應力)

$A_b$ : 樁底之斷面積

$A_s$ : 樁身之表面積

$$N_c = 5 \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) \left( 1 + 0.2 \frac{D_f}{B} \right) \quad (\text{Skempton, 1951}) \quad (\text{式 2-2})$$

其中， $N_c$ : 承载力因數

$B$ : 基樁寬度

$L$ : 基樁長度

$D_f$ : 樁深

## 2-3 飽和黏土之單樁承载力估算

在飽和黏土中， $Q_b$ 是統一以 $q'_{ult}A_b$ 作為估算，則不同方法的 $q'_{ult}$ 都是以 $c_u N_c$ 估算，在 $Q_s$ 中的 $f_s$ 才會依照不同的方法有所區別，算出不同的承载力大小。

### 1. $\alpha$ 法

此法由 Tomlinson (1957年) 提出，因樁錘擊時會擾動土壤，使強度降低，因此以未擾動的 $c_u$ ，乘以折減係數 $\alpha$ ，得到土壤與樁身的附著力 $c_a$ 。

$$f_s = c_a = \alpha c_u \quad (\text{式 2-3})$$

其中， $f_s$ : 樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$c_a$ : 土壤與樁身的附著力

$\alpha$ : 折減係數

$c_u$ :不排水剪力強度

圖 1 為  $\alpha$  值與樁埋入深度關係散佈圖，使用程式進行追點以求得數值間的關係曲線。

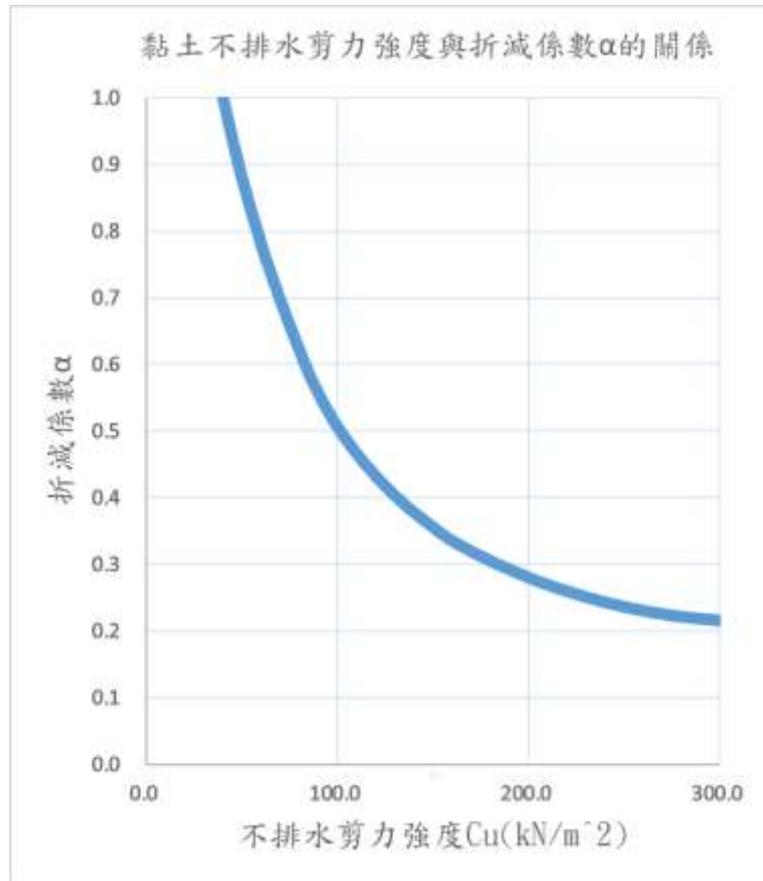


圖 1 黏土不排水剪力強度與折減係數  $\alpha$  的關係圖

## 2. $\beta$ 法

此法乃由 Meyerhof(1976)所提出，認為樁打入飽和正常壓密黏土中，樁周圍會激發超額孔隙水壓，但是約一個月後，此超額孔隙水壓會逐漸擴散，因此，樁的表皮摩擦力之推估，取重模土樣模擬黏土受擾動狀態，進行三軸  $CU$  監測孔隙水壓試驗或三軸  $CD$  試驗獲得有效應力參數  $c'$ 、 $\phi'$ ，在求表皮摩擦力  $f_s$ 。

$$f_s = \sigma'_h \tan \phi' = K_s \sigma'_v \tan \phi' = \beta \sigma'_v \quad (\text{式 2-4})$$

其中， $f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$\sigma'_h$ :側向有效應力

$\sigma'_v$ :垂直有效覆土壓力

$K_s$ :側向土壓力係數， $K_s = \sigma'_h / \sigma'_v$

$\beta$ :外表面摩擦係數

圖 2 為  $\beta$  值與樁埋入深度關係散佈圖，使用程式進行追點以求得數值間的關係曲線。

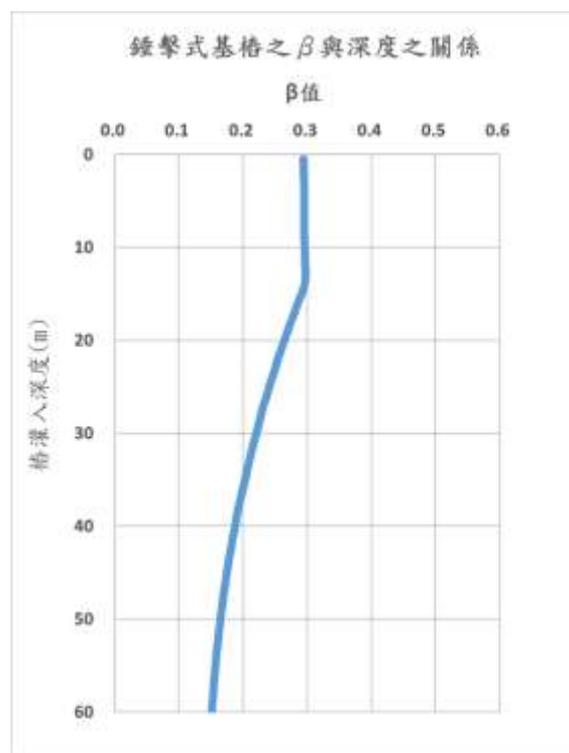


圖 2 錘擊式基樁之 $\beta$ 與深度關係圖

### 3.λ法

由美國 Lambda 公司工程師 Vijayvergiya 與 Focht (Vijayvergiya and Focht, 1972) 所提出假設打樁附近的土壤達到被動側向土壓力狀態，可依莫爾圓求得。其中 $\lambda$ 是由土壤力學專家 A.W. Skempton 在(1951年)提出的，用於估算基樁在黏土中的摩擦阻力。

$$f_s = \lambda \sigma_h = \lambda (\sigma'_v + 2c_u) \quad (\text{式 2-5})$$

其中， $f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$\lambda$ :表皮摩擦係數

$\sigma_h$ :被動側向土壓力

$\sigma'_v$ :樁身之平均有效覆土壓力

$c_u$ :飽和黏土之不排水剪力強度

圖 3為 $\lambda$ 值與樁埋入深度關係散佈圖，使用程式進行追點以求得數值間的關係曲線。

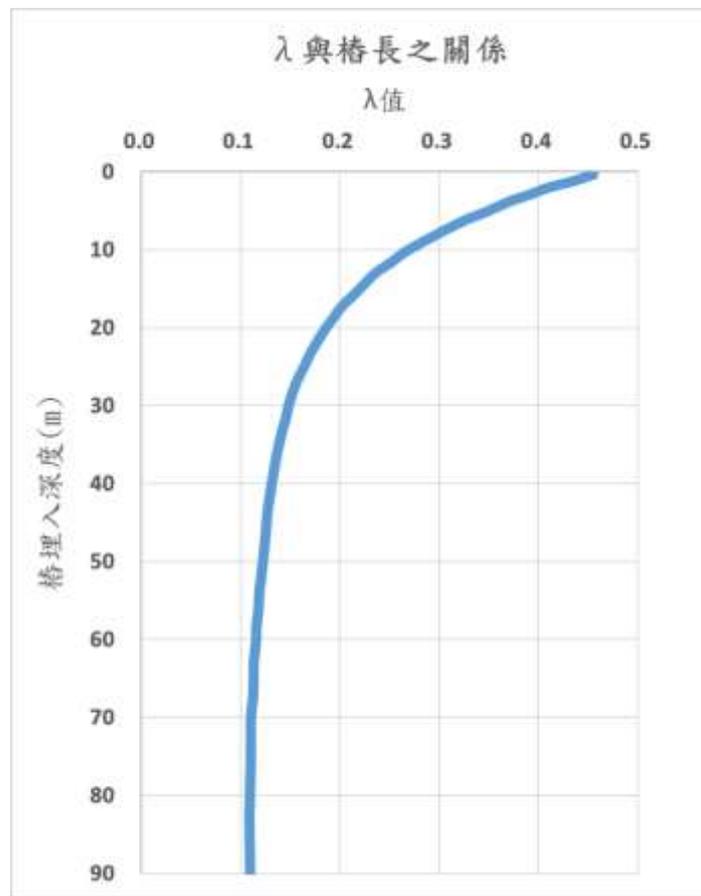


圖 3 λ與樁長之關係圖

#### 4.API 法

API 法是一套由美國石油學會(American Petroleum Institute, 2000)提出的基礎承載力估算標準，常應用於近海樁基礎。該方法考慮了黏土不排水剪力強度 $S_u$ 的性質。API 法分別估算樁底承載力和樁身側向摩擦力，並將其相加得到樁的極限承載力。

$$f_s = \alpha S_u, \alpha \leq 1 \quad \psi = S_u / \sigma'_{vo} \quad (\text{式 2-6})$$

$$\begin{cases} \alpha = 0.5\psi^{-0.5}, \psi \leq 1 \\ \alpha = 0.5\psi^{-0.25}, \psi > 1 \end{cases}$$

$$Q_b = \min(q_b \times A_p, q_b \times A_r + Q_s) \quad (\text{式 2-7})$$

$$q_b \times A_p \text{ (栓塞)}$$

$$q_b \times A_r + Q_s \text{ (未栓塞)}$$

$$q_b = 9S_u$$

其中， $f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$\alpha$ :折減係數

$S_u$ :不排水剪力強度

$\sigma'_{vo}$ :樁身之平均有效覆土壓力

$q_b$ :樁底承載應力

$A_p$ :大圓面積

$A_r$ :環狀面積

## 2-4 砂土之單樁承載力估算

在飽和砂土中，由於砂土的滲透性大，當樁受靜力加載後，超額孔隙水壓力很快地排除，故均以有效應力分析。

### 1. 民國90年建技規則(內政部建築研究所，2001)

由於需要應對台灣的環境、材料、實際施工與已有公式的假設差異，砂土單樁承載力的估算可以依據內政部建築研究所於民國90年發布的《建築技術規則》中相關的規定來進行。以下是砂土單樁承載力估算的公式。

$$\text{樁底: } \sigma'_{vb} \leq \sigma'_{20B} \quad (\text{式 2-8})$$

$$\text{樁身: } f_s = K_s \sigma'_v \tan \delta \leq K_s \sigma'_{20B} \tan \delta \leq 15 t/m^2 \quad (\text{式 2-9})$$

其中， $\sigma'_{vb}$ :基礎底部有效覆土壓力

$\sigma'_{20B}$ :20倍樁徑有效覆土壓力

$f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$K_s$ :側向土壓力係數

$\delta$ :土壤界面摩擦角

### 2. Meyerhof 法

Meyerhof 法(Meyerhof, 1976)是基於土壤的物理和力學特性進行樁基承載力估算的方法。此方法特別適用於砂土和黏土等土壤，並將樁的側摩阻力與端承載力進行綜合考量。

$$\text{樁底: } \sigma'_{vb} (t/m^2) \leq 5 \tan \phi \quad (\text{式 2-10})$$

$$\text{樁身: } f_s = K_s \sigma'_v \tan \delta \leq K_s \sigma'_{20B} \tan \delta \leq 10 t/m^2 \quad (\text{式 2-11})$$

其中， $\sigma'_{vb}$ :基礎底部有效覆土壓力

$\phi$ :土壤內摩擦角

$f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$K_s$ :側向土壓力係數

$\delta$ :土壤界面摩擦角

### 3.API 法

API 法是一套由美國石油學會(American Petroleum Institute, 2000)提出的基礎承载力估算標準，常應用於近海樁基礎。該方法考慮了砂土承载力係數 $N_q$ 的性質。API 法分別估算樁底承载力和樁身側向摩擦力，並將其相加得到樁的極限承载力。

$$f_s = \beta \sigma'_{v0} = (k \tan \delta_{cv}) \sigma'_{v0} \quad (\text{式 2-12})$$

$$q_b = N_q \sigma'_{v0}$$

$f_s$ :樁身之表皮摩擦阻力(應力)

$\beta$ :外表面摩擦係數

$\sigma'_{v0}$ :樁身之平均有效覆土壓力

$k$ :側向土壓力係數

$\delta_{cv}$ :土壤界面摩擦角

$q_b$ :樁底承载應力

$N_q$ :承载力係數

## 第三章 研究設計與實施

本研究利用基礎軸向承載力自動化程式探討基樁(開口樁或閉口樁)位於單層或互層土中樁基礎之承載力，利用經驗公式來計算基樁的軸向承載力，在不同土壤條件下，分析隨著深度增加其樁身摩擦力和樁底承載力的變化。

### 3-1 模型架構

基礎軸向承載力自動化程式分成三大架構輸入參數、主程式計算( $\alpha$ 法、 $\beta$ 法、 $\lambda$ 法、民國90年建技規則、Meyerhof法、API法)、輸出結果。

計算黏土摩擦力有四種分析方法分別為 $\alpha$ 法、 $\beta$ 法、 $\lambda$ 法、API法，而 $\alpha$ 法、 $\beta$ 法、 $\lambda$ 法各自摩擦係數不同，此時取值的方法為現有的紙本參考文獻以追點程式數位。

計算砂土摩擦力有三種分析方法民國90年建技規則、Meyerhof法、API法，這些方法都考慮了砂土乘載力係數 $N_q$ 的性質，而 $N_q$ 的數值藉由現有的紙本參考文獻來加以參考。

### 3-2 模型介紹

1. 輸入參數:輸入參數分為土壤參數和基樁參數

(1) 土壤參數:選擇土壤種類(砂土或黏土)，依序輸入該層土壤相關參數，黏土無需填內摩擦角，砂土無需填不排水剪力強度 $c_u$ 值，並輸入地下水面高度(如圖4)。

步驟一							步驟二			
依土層順序輸入所需材料參數							輸入地下水位高度			
土層序	厚度	深度	單位	土壤單位重	單位	輸入土層種類代號	土層材料參數			
						C黏土				
						S砂土				
土層1	15	15	m	16	kN/m <sup>3</sup>	C	Ca	單位	Nq	砂土緊密程度
							30	kN/m <sup>2</sup>	60	0
							摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ka
							37	degree	0.45	3
土層2	16	31	m	18	kN/m <sup>3</sup>	S	Ca	單位	Nq	砂土緊密程度
							40	kN/m <sup>2</sup>	45	0
							摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ka
							37	degree	0.45	0.8
							由地表往地下水位高度(m)			
							0			

圖 4 輸入土壤參數介面

- (2) 基樁參數:需選擇樁之種類(開口樁或閉口樁)、形狀(圓形或矩形)，輸入基樁尺寸(斷面長寬、基樁長度、埋置深度)，並輸入安全係數FS(如圖 5)。

步驟三						
依基樁性質輸入所需尺寸參數						
輸入基樁個別尺寸參數						
基樁種類	長邊(L1)	短邊(L2)	薄壁厚度(t)	基樁長度	埋置深度(≤75m)	安全係數
形狀選擇	單位(m)	單位(m)	單位(m)	單位(m)	單位(m)	F.S.
圓形樁	0.3	0.3	0.025	21	21	3

圖 5 輸入基樁參數介面

2. 主程式計算:黏土的分析方法有四種計算方式分別是 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、API法，砂土的分析方式有三種90年建築技術規則、Meyerhof法以及API法(如圖 6)。

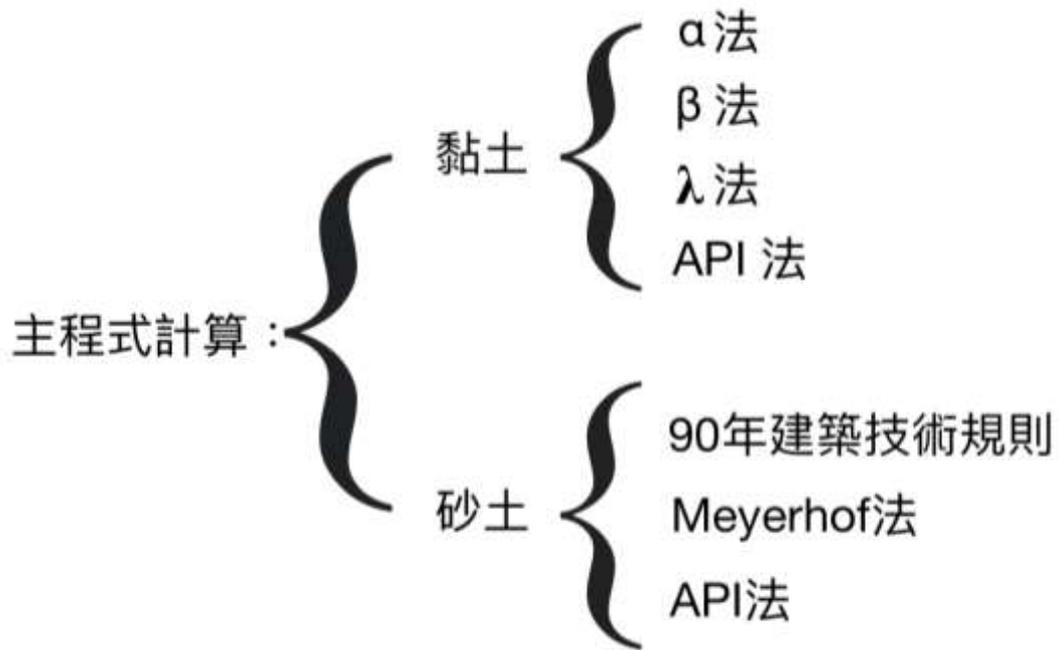


圖 6 主程式計算方法

- 輸出結果:主程式計算結果使用X-Y軸向圖來展示基礎軸向承载力的分析結果，X軸為承载力(側向摩擦力 $Q_s$ 、樁底承载力 $Q_b$ 、總承载力 $Q_u$ 、容許承载力 $Q_a$ )、Y軸為深度，以 $\alpha$ 法為範例如圖 7。

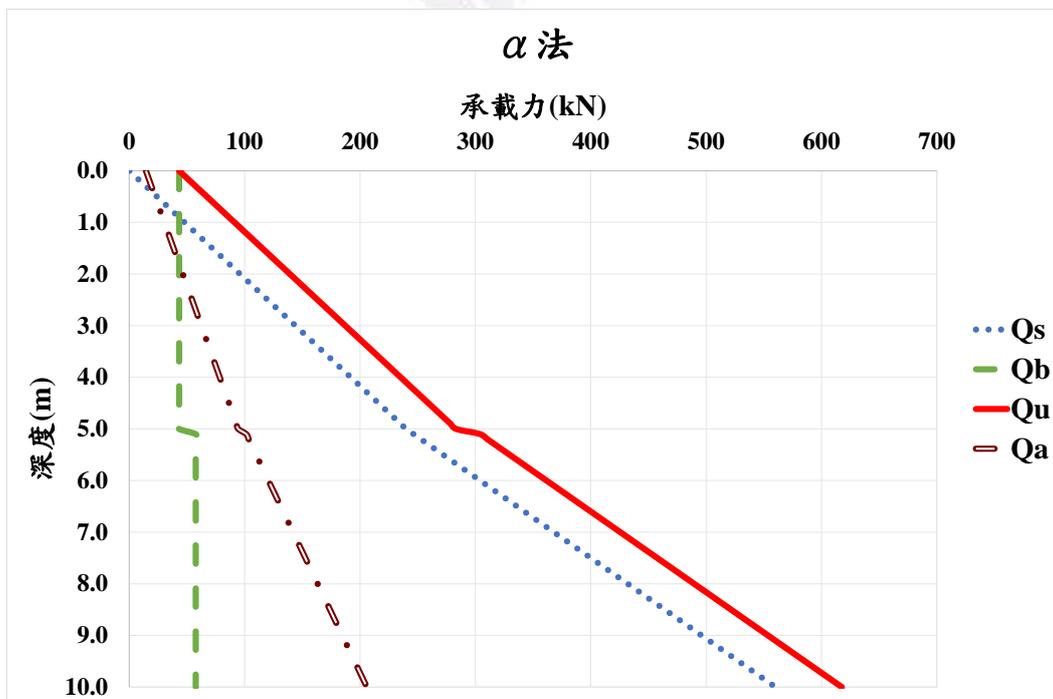


圖 7 結果輸出示意圖

## 第四章 模型驗證

### 4-1 單層飽和黏土基樁承載分析

有一長度為10m的混凝土樁，其斷面為40cm × 40cm，埋置於飽和正常壓密黏土層內，地下水位於地表面(如圖 8)，是以 $\alpha$ 、 $\beta$ 及 $\lambda$ 法求當安全係數FS = 3時，此樁之容許載重。

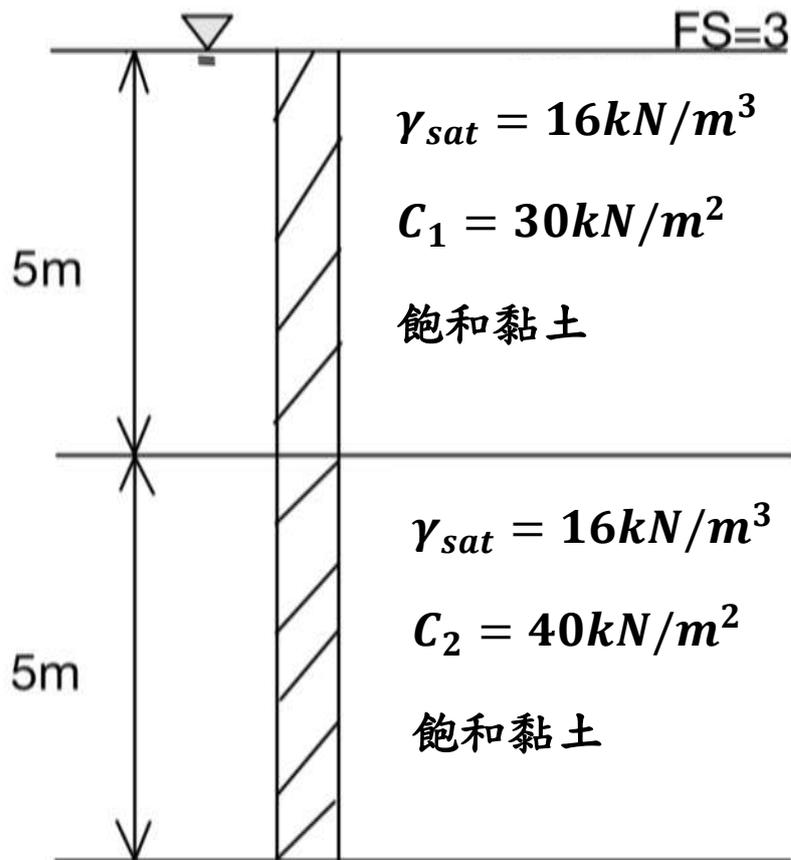


圖 8 單層飽和黏土基樁剖面圖

由圖 8提供的土壤參數與基樁參數，各自帶入自動化程式使用者參輸

土層排序	厚度	深度	單位	土壤單位重	單位	輸入土層種類代號
						C:黏土
						S:砂土
土層1	5	5	m	16	kN/m <sup>3</sup>	C
土層2	5	10	m	16	kN/m <sup>3</sup>	C

入介面

圖 9、圖 10、圖 11、圖 12後，並開始進行各種方式的計算，以獲取輸出結果。

土層排序	厚度	深度	單位	土壤單位重	單位	輸入土層種類代號
						C:黏土
						S:砂土
土層1	5	5	m	16	kN/m <sup>3</sup>	C
土層2	5	10	m	16	kN/m <sup>3</sup>	C

圖 9 輸入土壤參數介面

土壤材料參數				由地表往地下水水位面(m)
				0
Cu	單位	Nq'	砂土緊密程度	
30	kN/m <sup>2</sup>	40	0	
摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ks	
37	degree	0.45	0.8	
Cu	單位	Nq'	砂土緊密程度	
40	kN/m <sup>2</sup>	40	0	
摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ks	
37	degree	0.45	0.8	

圖 10 輸入土壤參數介面

基樁長度	埋置深度(≤75m)	安全係數
單位(m)	單位(m)	F.S.
10	10	3

圖 11 輸入基樁參數介面

基樁種類	長邊(L1)	短邊(L2)	薄壁厚度(t)
形狀選擇	單位(m)	單位(m)	單位(m)
矩形樁	0.4	0.4	0

圖 12 輸入基樁參數介面

### 4-1-1 α法分析

α法

$$Q_u = Q_b + Q_s = q'_{ult}A_b + f_sA_s = (c_uN_c)A_b + (\alpha c_u)A_s$$

根據 Skempton 公式，且  $D_f = 10m > 2.5B = 2.5 \times 0.4 = 1m$

$$N_c = 5 \left(1 + \frac{0.2B}{L}\right) \left(1 + \frac{0.2D_f}{B}\right) = 5(1 + 0.2 \times 1)(1 + 0.2 \times 2.5) = 9$$

$C_1 = 30kN/m^2$ ， $C_2 = 40kN/m^2$ ，均小於  $50 kN/m^2 \therefore \alpha$ 取1

$$Q_u = (c_2N_c)A_b + (\alpha c_1)A_{s1} + (\alpha c_2)A_{s2}$$

$$= (40 \times 9) \times (0.4 \times 0.4) + (1 \times 30 + 1 \times 40) \times 4 \times 0.4 \times 5$$

$$= 617.6kN$$

樁之容許承载力  $Q_a = Q_u/FS = 617.6/3 = 206kN$

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 13，圖中  $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$  會隨深度增加而變化。另外，此案例由黏土組成。由於土層分為上下部分，提供的  $C$  值不同，導致圖中的  $Q_u$ 、 $Q_a$  斜率在為  $5m$  的位置時變大。此外， $Q_b$  在深度為  $5m$  的位置會因為不同的  $C$  值，導致數值出現變化。

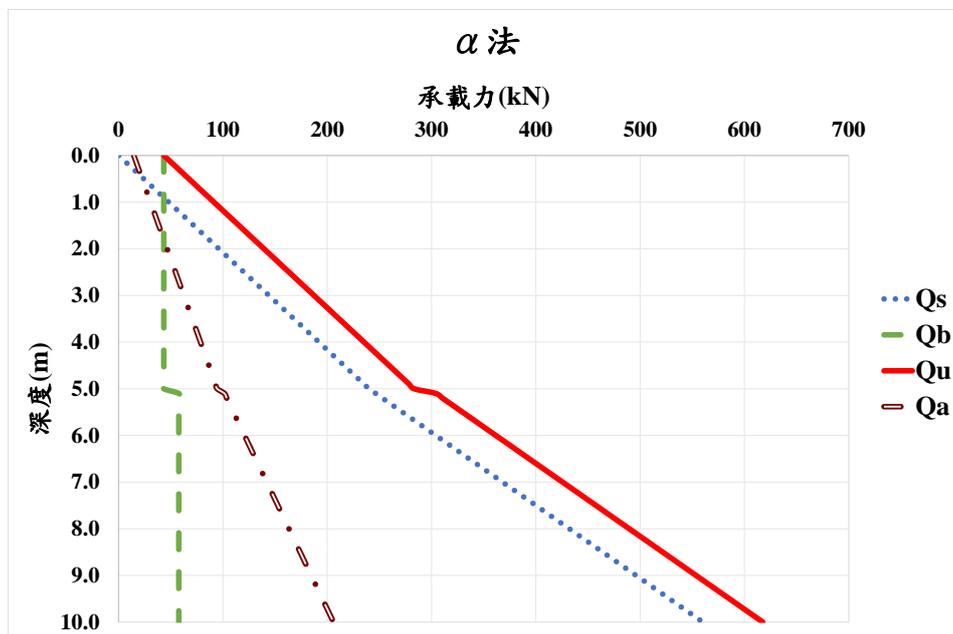


圖 13  $\alpha$ 法結果輸出圖

由已知黏土層數據如圖 8，以  $\alpha$ 法計算出  $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ ，手算結果與程式計算結果輸出進行誤差比較如表 1，此表得出誤差值過小，數值可視為零。

表 1  $\alpha$ 法結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	$Q_a$ (FS = 3)	單位
程式計算	57.60	560.00	617.60	205.86	kN

手算結果	57.60	560.00	617.60	205.86	<i>kN</i>
誤差	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	



## 4-1-2 $\beta$ 法分析

$\beta$ 法

$$Q_u = Q_b + Q_s = (c_u N_c) A_b + (\beta \sigma'_v) A_s$$

$$Q_u = Q_b + Q_s = (c_u N_c) A_b + (\beta \sigma'_v) A_s$$

$$\text{樁深平均覆土壓力 } \sigma'_v = (16 - 9.81) \times 5 = 30.95 \text{ kN/m}^2$$

樁長10m查圖可得 $\beta = 0.3$

$$Q_u = 40 \times 9 \times 0.4 \times 0.4 + 0.3 \times 30.95 \times 4 \times 0.4 \times 10 = 206 \text{ kN}$$

$$Q_a = Q_u / \text{FS} = 68.7 \text{ kN}$$

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 14。圖中 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ 會隨深度大小而變化。另外，此題土層由黏土組成。由於土層分為上下部分，提供的 $C$ 值不同，導致圖中 $Q_u$ 、 $Q_a$ 數值在深度5m的位置變大，但斜率無明顯改變。此外， $Q_b$ 在深度為5m的位置會因為不同的 $C$ 值，導致數值出現變化。 $Q_s$ 的斜率則不會隨 $C$ 值改變。

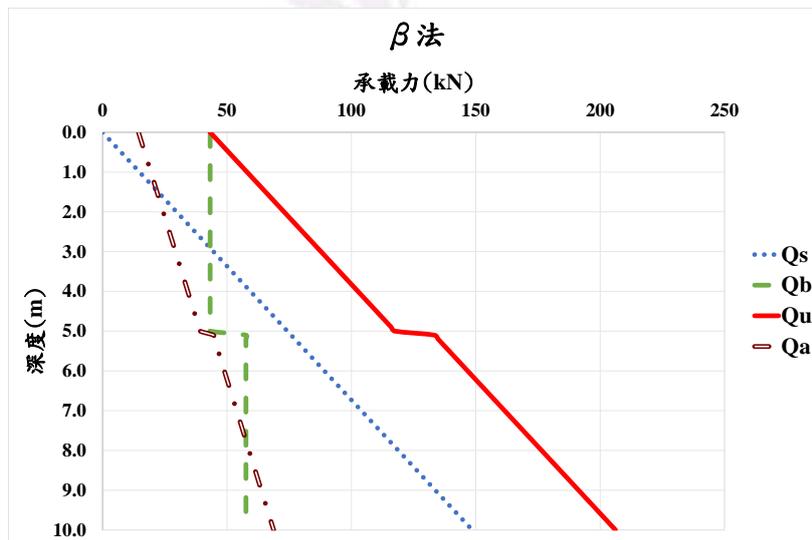


圖 14  $\beta$ 法結果輸出圖

已知黏土層數據如圖 8，以 $\beta$ 法計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ ，手算結果與程式計算結果進行誤差比較如表 2，此表得出誤差值過小，數值可視為零。

表 2  $\beta$ 法結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	$Q_a$ (FS = 3)	單位
程式計算	57.60	148.56	206.16	68.72	kN
手算結果	57.60	148.56	206.16	68.72	kN
誤差	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

### 4-1-3 $\lambda$ 法分析

$\lambda$ 法

$$Q_u = (c_u N_c) A_b + [\lambda(\sigma'_v + 2c_u)] A_s$$

$$C_{av} = (30 + 40)/2 = 35kPa$$

樁長10m查圖得 $\lambda = 0.28$

$$Q_u = 40 \times 9 \times 0.4 \times 0.4 + [0.28(30.95 + 2 \times 35)] \times 4 \times 0.4 \times 10$$

$$= 57.6 + 452.26 = 509.86kN$$

$$Q_a = Q_u/FS = 509.86/3 = 169.95kN$$

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 15，圖中 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ 會隨深度大小而變化。另外，根據圖中可看出 $Q_s$ 、 $Q_u$ 斜率無明顯差異，推測 $Q_b$ 為定值所導致。

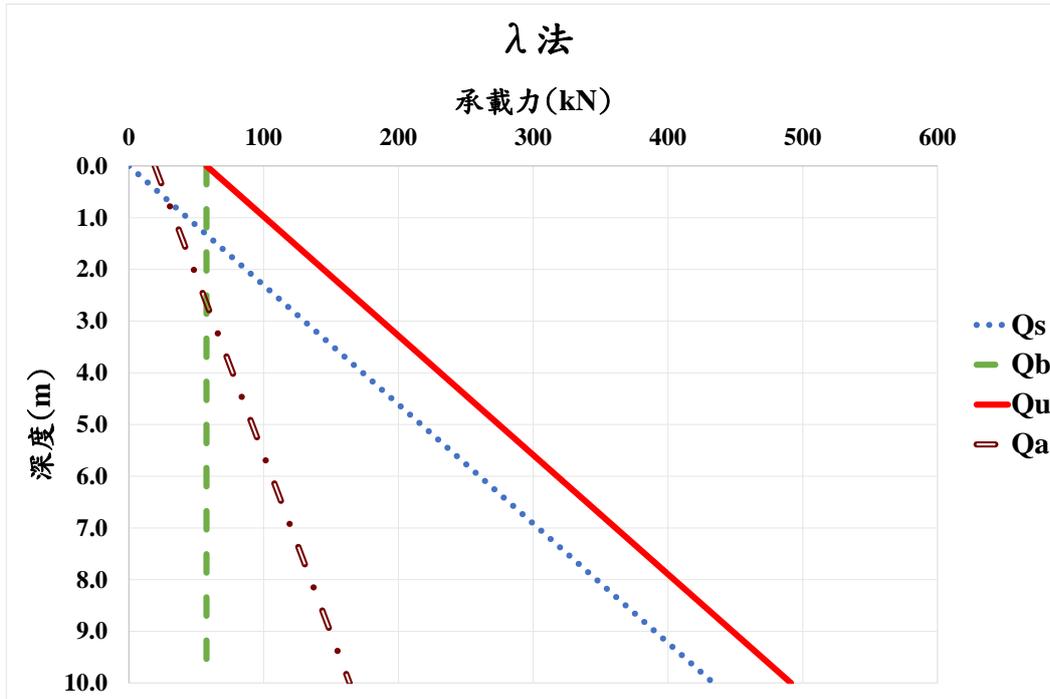


圖 15 λ法結果輸出圖

此題需要分析單一基樁在飽和黏土層上的承载力，已知黏土層數據如圖 8，以λ法計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ 。手算結果與程式計算的結果輸出進行誤差比較如表 3，此表得出λ法結果出現些微誤差。推測有兩個原因。

1. 手算時在小數點後兩位進行四捨五入，而模組計算則無。
2. 上下土層間參數不同所造成。

表 3 λ法結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	$Q_a$ (FS = 3)	單位
程式計算	57.60	433.66	491.26	163.75	kN
手算結果	57.60	452.26	509.86	169.95	kN
誤差	0.00%	4.11%	3.65%	3.65%	

### 4-1-4 API 法分析

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 16，圖中 $Q_s$ 、 $Q_u$ 會隨深度大小而變化。此外，自動化程式與軟體對比結果可知兩者近乎是一致的，只有樁底承载力與極限承载力在淺層時有不同，推測為軟體會考量地表上1.5倍樁徑長度的數據，而自動化程式並無考慮，導致軟體的結果與自動化程式的結果之間有所差異。

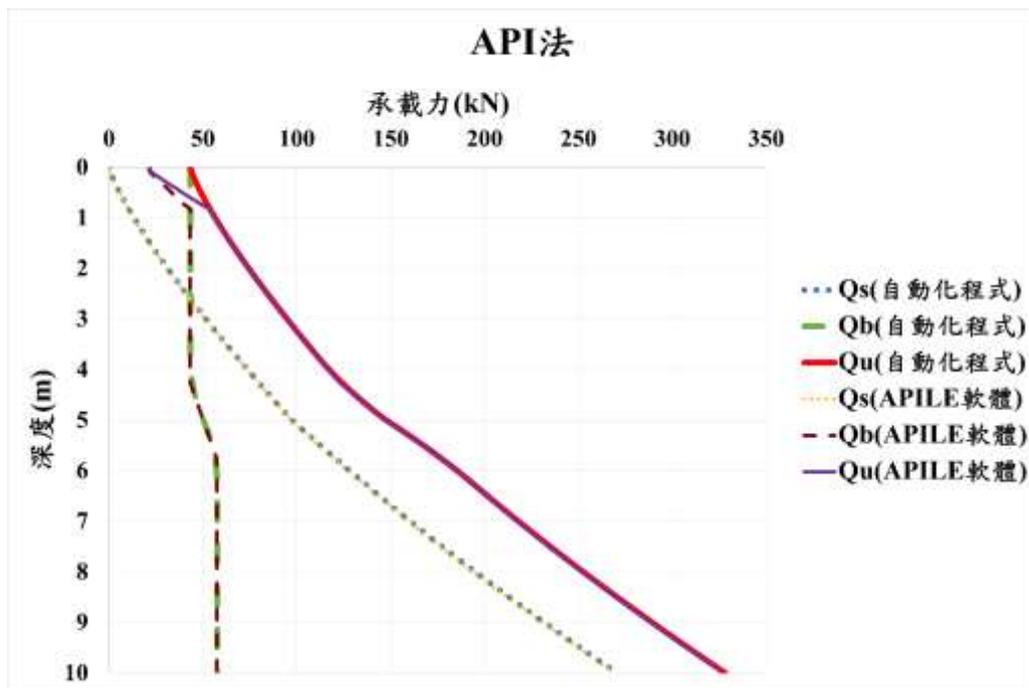


圖 16 API 法結果輸出圖

此題需要分析單一基樁在飽和黏土層上的承载力。已知黏土層數據如圖 8，以 API 法計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ ，軟體計算與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 4，此表得出 API 法結果出現些微誤差，推測原因為程式計算時在小數點後兩位四捨五入，而軟體計算則無。

表 4 API 法結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	單位
程式計算	57.60	270.40	328.00	kN
APILE 軟體計算	57.60	267.10	324.70	kN
誤差	0.00%	1.24%	1.02%	

## 4-2 單層飽和砂土基樁承載分析

預力混凝土樁打入土層中，土壤為中等密度至緊密度砂，土壤條件如圖 17，地下水位於地表面下 3.05m (10ft)。若樁為方形，邊長為 0.305m (1ft)，其打入土層長度為 9.15m (30ft) 恰好為樁身長度。

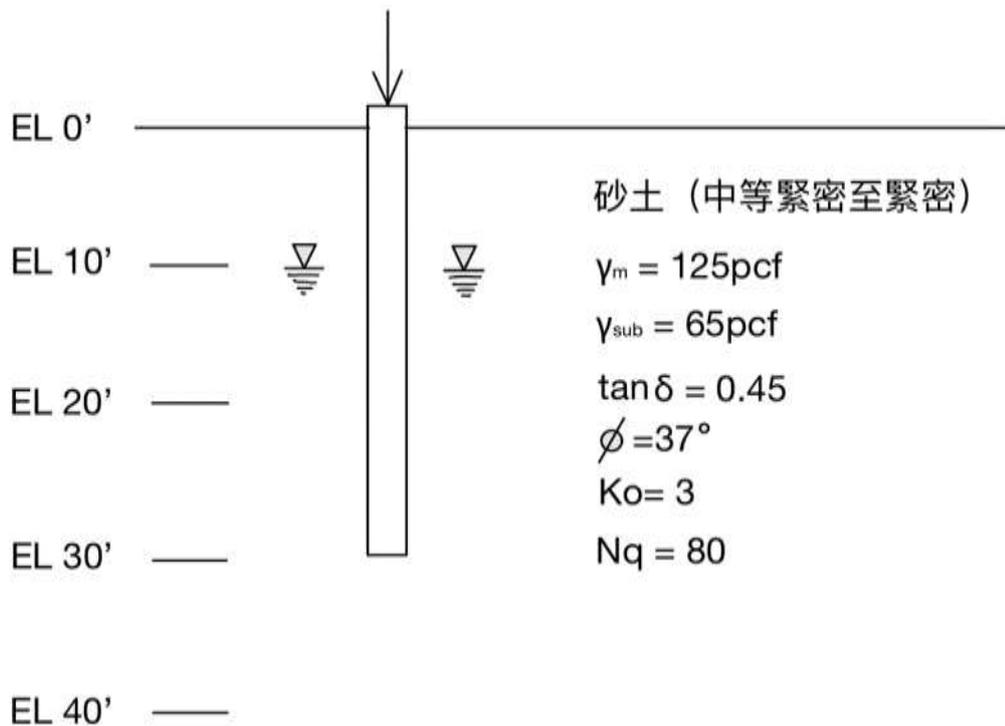


圖 17 單層飽和砂土基樁剖面圖

由圖 17提供的土壤參數與基樁參數，各自帶入自動化程式使用者參數輸入頁面如圖 18、圖 19、圖 20、圖 21後，並開始進行各種方式的計算，以獲取輸出結果。

土層排序	厚度	深度	單位	土壤單位重	單位	輸入土層種類代號
						C:黏土
						S:砂土
土層1	3.05	3.05	m	125	pcf	S
土層2	6.1	9.15	m	65	pcf	S

圖 18 輸入土壤參數介面

土層材料參數				由地表往地下水位面(m)
				10
Cu	單位	Nq'	砂土緊密程度	
39	kN/m <sup>2</sup>	40	0	
摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ks	
37	degree	0.45	0.8	
Cu	單位	Nq'	砂土緊密程度	
40	kN/m <sup>2</sup>	40	0	
摩擦角	單位	tanδ	土壓力係數Ks	
37	degree	0.45	0.8	

圖 19 輸入土壤參數介面

基樁種類	長邊(L1)	短邊(L2)	薄壁厚度(t)
形狀選擇	單位(m)	單位(m)	單位(m)
矩形樁	0.305	0.305	0

圖 20 輸入基樁參數介面

基樁長度	埋置深度( $\leq 75m$ )	安全係數
單位(m)	單位(m)	F.S.
9.15	9.15	3

圖 21 輸入基樁參數介面

### 4-2-1 90年建技規則分析

根據民國90年建技規則規定計算樁之承载力

$$\text{臨界深度 } L_c = 20B = 20 \times 0.305 = 6.1m < 9.15m$$

$$\gamma_m = 125pcf = 2.0 t/m^2$$

$$\gamma_{sub} = 65pcf = 1.04 t/m^3$$

當  $z = 6.1m$  時

$$\sigma'_v = 2.0 \times 3.05 + 1.04 \times (6.1 - 3.05) = 9.27 t/m^2$$

$$Q_u = Q_b + Q_s = (\sigma'_v N_q) A_b + f_s A_s$$

$$\begin{aligned} &= (9.27 \times 80) \times 0.305^2 + [8.24 \times 3.05/2 + (8.24 + 12.52) \times (6.1 \\ &- 3.05)/2 + 12.52 \times (9.15 - 6.1)] \times 4 \times 0.305 = 68.99 + 100.54 \\ &= 169.53t \end{aligned}$$

$$\text{容許承载力 } Q_a = Q_u / FS = 169.53 / 3 = 56.51t$$

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 22，圖中  $Q_s$ 、 $Q_b$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$  皆會隨深度大小而變化。另外，依據圖中可看出  $Q_b$  在 3.05m 處有斜率改變，推測原因為水位線以下有效單位重變小的緣故。

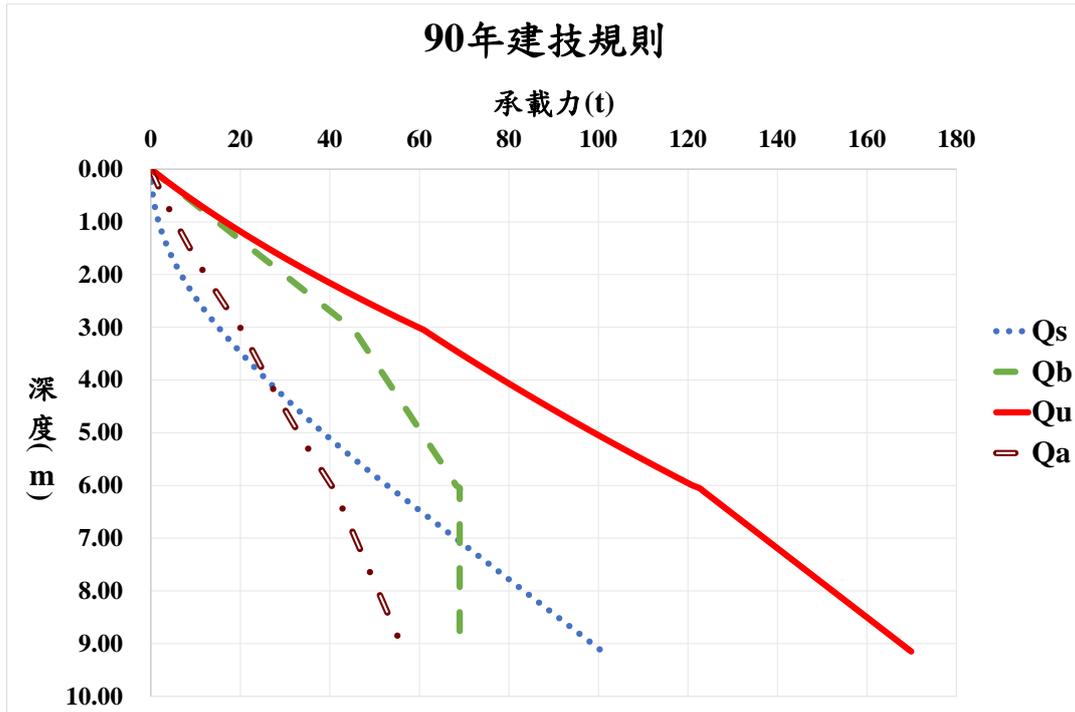


圖 22 90年建技規則結果輸出圖

已知砂土層數據如圖 17，以民國90年建技規定計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ 。手算結果與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 5，此表得出建技計算結果出現些微誤差，依據表中推測有兩個原因。

1. 手算時在小數點後兩位四捨五入，而程式計算則無。
2. 手算時地下水位面從3.06m時開始算，而模組計算從3.05開始算。從圖 17中得知地下水位面在3.05m處，造成使用者在輸入地下水面時會輸入3.05m而造成誤差。

表 5 90年建技規則計算結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	$Q_a$ (FS = 3)	單位
程式計算	69.00	100.89	169.89	56.60	t
手算結果	68.99	100.54	169.53	56.51	t
誤差	0.01%	0.35%	0.21%	0.16%	

### 4-2-2 Meyerhof 法分析

第二法：根據 Meyerhof 之建議，計算樁之承載力

(1) 樁底承載力  $Q_b$  之計算

$\sigma'_v = 2 \times 3.05 + 1.04 \times 6.1 = 12.44 \text{ t/m}^2$ ，而臨界深度有效

$5 \tan \phi = 3.77 \text{ t/m}^2$ ，所以由  $3.77 \text{ t/m}^2$  控制。

又  $\phi = 37^\circ$ ，且  $L/B = 9.15/0.305 = 30 > 1$

查圖得  $N'_q \cong 190$

$$q_l = 5 \tan \phi N'_q = 5 \times \tan 37^\circ \times 190 = 715.9 (\text{t/m}^2)$$

$$\therefore Q_b = q_l \times A_b = 715.9 \times 0.3052 = 66.6 \text{ t}$$

(2) 樁身摩擦力  $Q_s$  之計算

臨界深度  $L_c = 20B = 6.1 \text{ m} < L = 9.15 \text{ m}$

$z = 3.05 \text{ m}$  時， $\sigma'_v = 2 \times 3.05 = 6.1 \text{ t/m}^2$

$z = 6.10 \text{ m}$  時， $\sigma'_v = 2 \times 3.05 + 1.04 \times (6.1 - 3.05) = 9.27 \text{ t/m}^2$

當  $f_l = K_s \sigma'_{20B} \tan \delta = 3 \times 9.27 \times 0.45 = 12.5 \text{ t/m}^2 > 10 \text{ t/m}^2$

取  $f_l = 10 \text{ t/m}^2$ ，反求深度  $z$

$$10 = K_s \sigma'_v \tan \delta = 3 \times [2 \times 3.05 + 1.04(z - 3.05)] \times 0.45$$

$$\text{得 } z = 4.31 \text{ m}$$

$$Q_s = [8.24/2 \times 3.05 + (8.24 + 10)/2 \times (4.31 - 3.05) + 10 \times (9.1 - 4.31)] \times 4 \times 0.305 = 88.4 \text{ t}$$

$$Q_u = Q_b + Q_s = 66.6 + 88.4 = 155 \text{ t}$$

$$Q_a = Q_u / FS = 155 / 3 = 51.67 \text{ t}$$

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 23，圖中  $Q_s$ 、 $Q_b$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$  皆會隨深度大小而變化，另外，根據圖 23 可看出  $Q_b$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$  在接近 2m 處有斜率改變，原因為  $Q_b$  在接近 2m 處之後維持定值。此外由圖可得知  $Q_b$  在接近 2m 處之後維持定值，原因為(式)  $\sigma'_{vb} (\text{t/m}^2) \leq 5 \tan \phi$ ，而此假設土層在接近 2m 處的  $\sigma'_{vb}$  已和  $5 \tan \phi$  相等，造成  $Q_b$  不再變化。

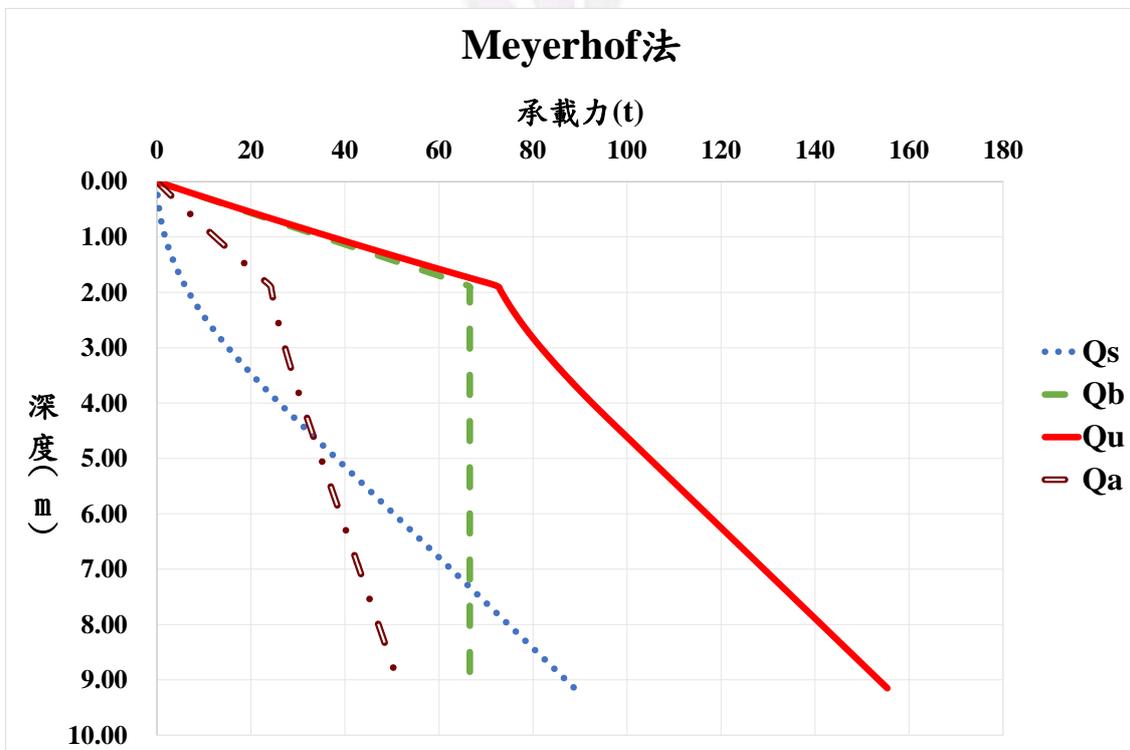


圖 23 Meyerhof 法結果輸出圖

已知砂土層數據如圖 17，以 Meyerhof 法計算出  $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_a$ 。手算結果與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 6，此表得出 Meyerhof 法結果出現些微誤差，根據表中推測有兩個原因。

1. 手算時在小數點後兩位進行四捨五入，而模組計算則無。
2. 手算時地下水位面從3.06m時開始算，而模組計算從3.05開始算，從圖 17中得知地下水位面在3.05m處，造成使用者在輸入地下水面時會輸入3.05m而造成誤差。

表 6 Meyerhof 結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	$Q_a$ (FS = 3)	單位
程式計算	66.55	88.81	155.35	51.78	t
手算結果	66.60	88.40	155.00	51.67	t
誤差	0.08%	0.46%	0.23%	0.21%	

### 4-2-3 API 法分析

### 4-3 飽和互層土閉口方型基樁承载力分析

預力混凝土樁打入土層中，土壤為飽和互層土層，土壤條件如圖 25 示，地下水位於地表面。若為閉口方形樁，邊長為 0.4m，其打入土層深度為 21m，求當安全係數  $FS = 3$  時，此樁之容許承载力。

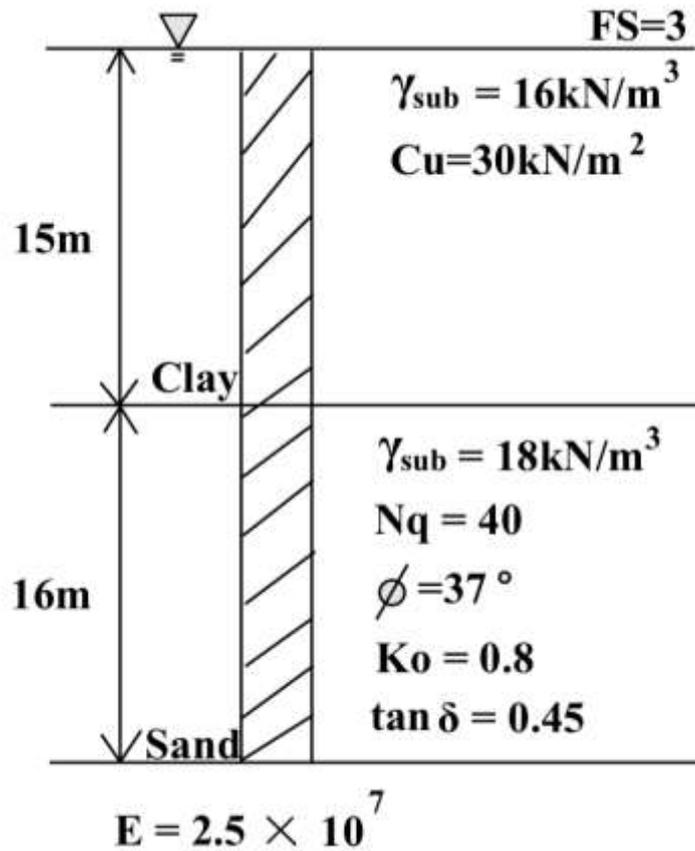


圖 25 飽和互層閉口方型基樁剖面圖

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 26，圖中 $Q_s$ 、 $Q_u$ 會隨深度大小而變化。另外此題分為兩個土層，如圖所示在15m處是黏土和砂土的分界，造成 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_b$ 在15m處數值和斜率發生改變，根據圖中推測原因為砂土的 $Q_b$ 和 $Q_s$ 變大造成 $Q_u$ 也增大。由此圖得知自動化程式和 APILE 軟體誤差極小，導致兩者結果呈現相似。

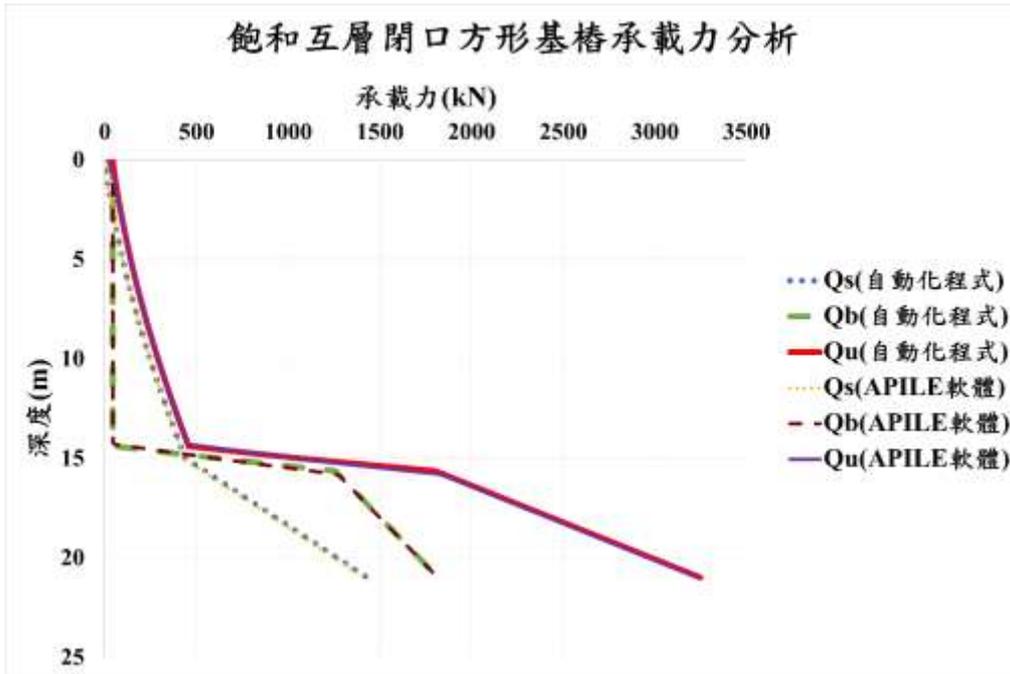


圖 26 結果輸出圖

此題需要分析閉口方形基樁在飽和互層土上的承载力。已知土層數據如圖 25，以 API 法計算出  $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 。軟體計算與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 8，此表得出 API 法結果出現些微誤差，根據表 8 推測原因為軟體計算時在小數點後兩位四捨五入，而模組計算則無。

表 8 結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	單位
程式計算	1817.47	1429.58	3247.05	kN
APILE 軟體計算	1815.8	1416.50	3232.30	kN
誤差	0.09%	0.92%	0.46%	

### 4-4 飽和互層土閉口圓型基樁承载力分析

預力混凝土樁打入土層中，土壤為飽和互層土層，土壤條件圖 27 示，地下水位於地表面。若為閉口圓形樁，直徑為  $0.3m$ ，其打入土層深度為  $21m$ 。求當安全係數  $FS = 3$  時，此樁之容許承载力。

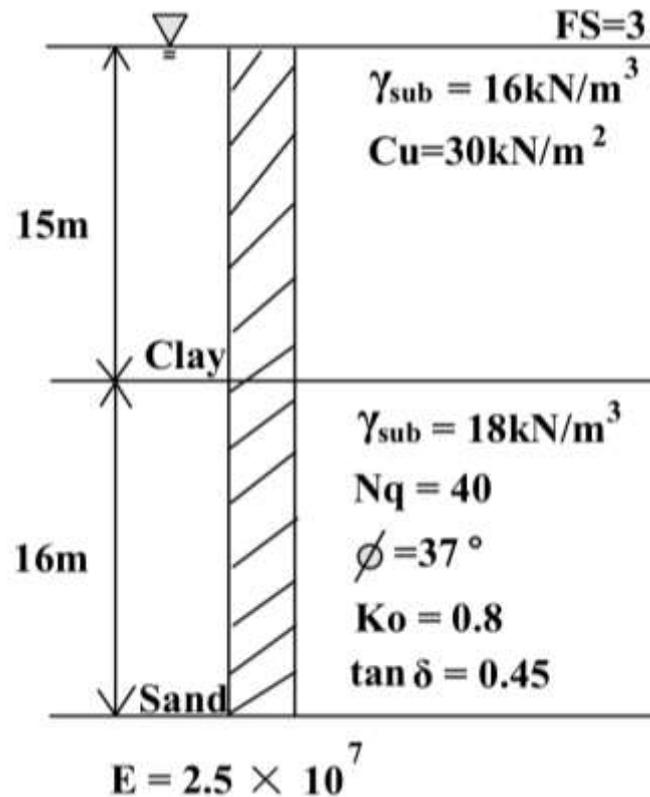


圖 27 飽和互層土閉口圓型基樁剖面圖

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 28。圖中  $Q_u$  會隨深度大小而變化。另外，此題分為兩個土層，如圖中所示在  $15m$  處是黏土和砂土的分界，造成  $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_b$  在  $15m$  處數值和斜率發生改變，根據圖 28 推測原因為砂土的  $Q_b$  和  $Q_s$  變大造成  $Q_u$  也增大。由此圖得知自動化程式和 APILE 軟體誤差極小，導致兩者結果呈現相似。

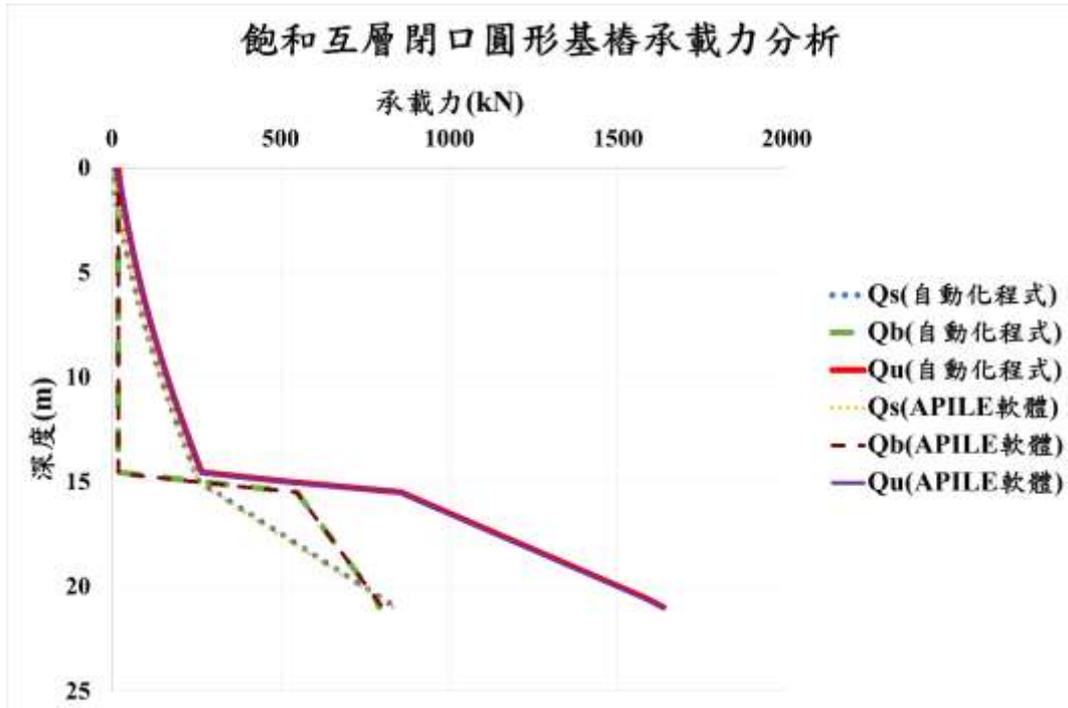


圖 28 結果輸出圖

此題需要分析閉口圓形基樁在飽和互層土上的承载力。已知砂土層數據如圖 27 所示，以 APILE 法計算出  $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 。軟體計算與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 9，此表得出 APILE 法結果出現些微誤差，根據表中，推測原因為軟體計算時在小數點後兩位四捨五入，而程式計算則無。

表 9 結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	單位
程式計算	802.93	842.09	1645.02	kN
APILE 軟體計算	802.20	834.40	1636.60	kN
誤差	0.09%	0.92%	0.51%	

此題需要分析閉口圓形基樁在飽和互層土上的承载力。已知砂土層數據如圖 27所示，以 APILE 法計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 。APILE 程式計算與自動化程式進行結果輸出誤差比較如表 9，此表得出 API 法結果出現些微誤差，根據表中推測原因為軟體計算時在小數點後兩位四捨五入，而模組計算則無。

#### 4-5 飽和互層土開口圓型基樁承载力分析

預力混凝土樁打入土層中，土壤為飽和互層土層，土壤條件如圖 29示，地下水位於地表面。若為開口圓形樁，外徑為0.3m，內徑為0.25m，其打入土層深度為21m。求當安全係數 $FS = 3$ 時，此樁之容許承载力。

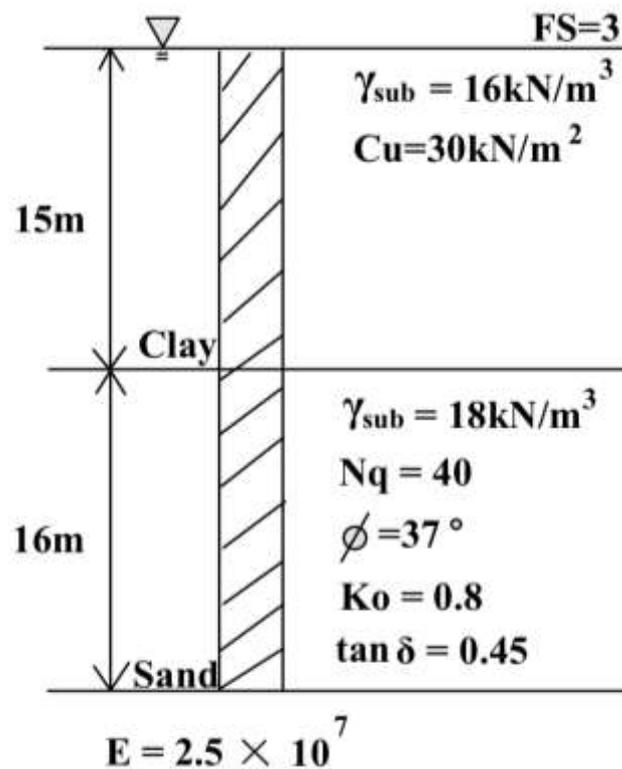


圖 29 飽和互層土開口圓型基樁剖面圖

由各項所求的數據進行圖表分析如圖 30。圖中 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 會隨深度大小而變化。另外，此題分為兩個土層，如圖 29所示在15m處是黏土和砂土

的分界，造成 $Q_s$ 、 $Q_u$ 、 $Q_b$ 在15m處數值和斜率發生改變，根據圖 30推測原因為砂土的 $Q_b$ 和 $Q_s$ 變大造成 $Q_u$ 也增大。由此圖得知自動化程式和 APILE 軟體誤差極小，導致兩者結果呈現相似。

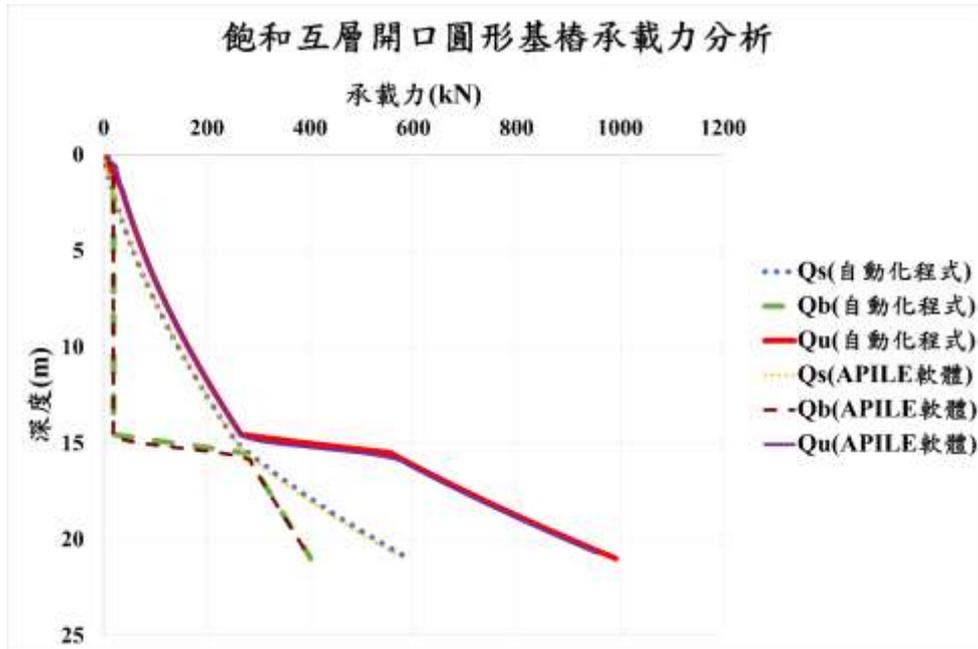


圖 30 結果輸出圖

此題需要分析開口圓形基樁在飽和互層土上的承载力。已知砂土層數據如圖 29所示，以 APILE 法計算出 $Q_b$ 、 $Q_s$ 、 $Q_u$ 。軟體計算與程式計算進行結果輸出誤差比較如表 10，此表得出 APILE 法結果出現些微誤差

表 10 結果對比

	$Q_b$	$Q_s$	$Q_u$	單位
程式計算	395.68	574.27	969.95	kN
APILE 軟體計算	393.80	563.20	957.00	kN
誤差	0.48%	1.97%	1.35%	

## 第五章 結論與建議

### 5-1 結論

本研究針對基樁在單層土與互層土中的承載力進行了自動化程式的研究與應用，目的是為了提升基樁設計的準確性與效率。研究過程中，透過分析黏土層與砂土層的不同物理特性，系統化地建立了基樁在這些土層中的力學模型。該自動化程式基於不同的承載力計算公式，包括 $\alpha$ 法、 $\beta$ 法、 $\lambda$ 法、90年建技規則、Meyerhof 法及 API 法，能快速處理不同深度、不同土層組合下的樁底承載力與樁身摩擦力等重要參數。

在單層黏土中， $\alpha$ 法是一種較為保守的計算方法，因為它假設土壤的折減係數相對較大，因此在設計中提供了較大的軸向承載力。而 $\beta$ 法和 API 法則提供了不同程度的承載力估算，且誤差均控制在合理範圍內，但在 $\lambda$ 法的自動化程式計算結果與手動計算結果比較中發現誤差相較前三種方法較大，其中的原因是因為研究中的 $\lambda$ 折減係數是以文獻中的 $\lambda$ 與樁長關係圖追點而得，其中追點得到的 $\lambda$ 值與文獻讀出的讀數不同而造成誤差，若將 $\lambda$ 值假設與文獻一樣時，得出的計算結果誤差會大幅下降。在單層砂土的分析方法中，API 法被認為是一種較為接近現地狀況的計算方法，給出的承載力相對高且精準。在 Meyerhof 法中提供了不同的承載力大小，雖不如90年建技規則計算的承載力大，但也非常接近，兩種方法都可以作為一種估算方法。

在互層土中，本研究採用 API 法進行不同基樁類型進行分析，其基樁類型分別有方形閉口樁、圓形閉口樁與圓形開口樁，在此土層參數分析中是以自動化程式與 APILE 軟體程式做結果比較，其中自動化程式在閉口樁時的誤差不大，在開口樁時的誤差略微偏大。開口樁與閉口樁在承載力上的差異主要體現在樁身側壁摩擦力和樁底承載力的分佈上。開口樁因為其

內部也與土壤接觸，摩擦力分佈較複雜，容易出現較大的數據誤差，特別是在土層交界處或未形成樁塞時，樁底承載力會低於閉口樁。相比之下，閉口樁的摩擦力和樁底承載力相對穩定，數據誤差較小，設計結果更為可靠，因此在計算中閉口樁通常表現出更高的精確度和一致性。

研究結果顯示，自動化程式的計算結果與手動計算結果或軟體程式計算結果高度一致，且誤差均控制在合理範圍內。對於單層土環境，該程式能夠提供更加精確的結果，因為地質條件相對簡單、穩定。儘管在五層土這類複雜的地質條件下，程式的精確度略低於單層土，但它依然能夠保持較高的穩定性和可靠性。整體來看，該程式在不同地質條件下均能顯著提升設計效率，且誤差均控制在合理範圍內，確保工程的安全性。

## 5-2 建議

本專題模型建置只限於單樁基樁承載力分析，尚未考量到聯合基腳、群樁的形式或是岩石層與其他臺灣常見的複雜土層，若考量這些因素，則此程式可以應用在更多元的工地環境中。此外，雖然目前研究的程式已經有效提升了基樁承載力的計算效率，但可以考慮將程式與圖形界面整合，讓使用者能更直觀地看到結果，並輕鬆操作，這樣程式就會更符合實際工作中使用的需求。

另外，目前的程式設計主要針對靜態承載力的分析，臺灣的地質狀況更常面對如地震、颱風的動態負載，未來可以考慮加入動態承載力的模擬。這樣可以幫助工程師在設計時考慮更多變的條件，提高設計的安全性與可靠性。

## 參考文獻

1. 內政部建築研究所(2001)，建築物基礎構造設計規範。
2. American Petroleum Institute. (2000). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD)*. 21st Edition.
3. Meyerhof, G.G. (1956). "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 82(SM1), 1-19.
4. Meyerhof, G.G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 102, No.GT3, PP.197~228.
5. Skempton, A.W. (1951). The Bearing Capacity of Clays. *Proceedings of the Building Research Congress, Division I, London*, 180-189.
6. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
7. Tomlinson, M.J. (1957). "The Adhesion of Piles Driven in Clay Soils." *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London*, 66-71.
8. Vijayvergiya, V.N. & Focht, J.A. (1972). "A New Way to Estimate Skin Friction and End Bearing Capacity of Piles in Clay." *Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas*.