

# 逢甲大學學生報告 ePaper

## 報告題名：

自升式平台船基礎於砂土(上層)-黏土(下層)之承載力評估

Ultimate Bearing Capacity Assessment of Jack-up Barge Footings  
on a Sand Stratum overlying a Clay Layer

作者：陳柏儒

系級：土木四乙

學號：D0539065

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：108 學年度 第一 學期



## 中文摘要

(1)目的：近年台灣政府大力推動離岸風力發電(offshore wind power)發展，而風機的安裝與維護則是依靠自升式平台船(jack-up barges)的運作。雖然它廣泛地被運用於離岸石油與天然氣產業(offshore oil and gas fields)，但是其尺寸與樣式與應用在離岸風電的有差距。為了確保自升式平台船所座落之土層的安全性，討論自升式平台船基礎承載力(bearing capacity)為本研究主要目的，同時也是為了降低工程可能帶來的人員傷亡及財物損失。

(2)過程及方法：以往若單純討論單一土層的承載力計算，往往不符合實際工程現地所會遇到的多層及互層土壤，這讓所計算出的承載力與實際情況有相當大的落差。本報告探討基礎座落於砂土(上層)-黏土(下層)的互層土壤，藉由固定砂土層厚度(H)與改變基礎寬度(B)來探討厚寬比(H/B)對極限承載力的影響。研究利用 Matlab 與 FLAC 來進行數值分析以及土壤受力後的塑性流降伏區，最後藉由這些計算基礎工程上最重要的結果---安全係數。

(3)結果：由本報告的分析結果得知基礎極限承載力的大小，主要與砂土層厚度與基礎寬度之間的比值有相當大的關聯。然而現地情

況較書中所介紹之理論模式複雜許多，例如黏土的不排水剪力強度隨深度增加，而其影響因素也待之後做更進一步之研究。

### 關鍵字

1. 離岸基礎工程
2. 離岸風力發電
3. 自升式平台船
4. 極限承载力
5. 貫穿剪力破壞



## Abstract

Taiwan government promotes the offshore wind power development in recent years, and the installations and maintenances of wind turbines depend on the operations of jack-up barges. Although they are widely used in offshore oil and gas fields, the sizes and types are quite different with those employed in offshore wind farms. The main purpose of this study is to investigate the bearing capacity of jack-up barge footings, in order to guarantee the safety of them on proposed soil strata during construction, and to reduce the possible damage to the people and the properties on the barges.

The bearing capacity calculation based on foundations in single soil layer does not reflect the actual in-situ condition, stratified deposits, so there exists a big gap between calculation results from single soil layer and actual bearing capacity. The research work focus on the effects of the thickness-width ratio ( $H/B$ ) to the bearing capacity assessment of the foundation on the sand overlying clay, by changing footing width ( $B$ ) but maintaining the same sand layer thickness ( $H$ ). Software MATLAB and FLAC are utilized to conduct the numerical simulation and analyze the yielding zone of the plastic soil flow, respectively, and finally obtain the most important result “Factor of Safety” on foundation engineering from these calculations.

According to the analysis results in this report, the bearing capacity of the foundation is highly relative to the ratio of the sand layer thickness to the footing width. However, the actual field conditions are much more complicated than those assumed in the theoretical models in textbooks, such as the undrained soil strength increasing with the depth, and the further research are required to explore the effects of these factors.

## Keyword

1. Offshore foundation engineering
2. Offshore wind turbine
3. Jack-up barge
4. Ultimate bearing capacity
5. Punch-through failure

## 目次

第一章緒論.....	5
第二章 文獻回顧.....	7
2-1 淺基礎極限承载力理論.....	7
2-1-1 淺基礎介紹:.....	7
2-1-2 淺基礎破壞類型:.....	7
2-2 Terzaghi 淺基礎承载力理論.....	9
2-2-1 Terzaghi 淺基礎理論概述.....	9
2-2-2 Terzaghi 淺基礎承载力理論公式.....	10
2-3 Meyerhof 淺基礎承载力理論.....	12
2-4 砂土(上層)-黏土(下層)之互層土壤承载力理論.....	15
2-4-1 Punching-through mode 理論.....	15
2-4-2 Load-spread mode 承载力理論.....	18
第三章 研究內容與方法.....	20
3-1 破壞弧影響最深位置.....	20
3-2 砂土層(上層)-黏土層(下層)極限承载力分析.....	21
3-2-1 純砂土承载力分析.....	27
3-2-2 Punch-through mode 分析.....	30
3-2-3 Load-spread mode 分析理論.....	40
3-3 Matlab 與 FLAC 8.1 軟體分析.....	43
第四章 研究結果與討論.....	46
4-1 土壤破壞弧討論.....	46
4-2 Punch-through mode 討論.....	47
4-3 Load-spread mode 討論.....	48
4-4 結果討論.....	49
第五章 參考文獻.....	50

# 第一章緒論

台灣政府大力推動離岸風力發電(offshore wind power)發展。離岸風機(offshore wind turbine)施工與營運維護需仰賴各類型工作船(working craft)，而自升式平台船廣泛運用於離岸石油與天然氣產業(offshore oil and gas fields)亦為本研究焦點。安裝與維護離岸風機圖 1-1 須使用此型工作船提供機具與人員工作空間。為確保自升式平台船可提供足夠承载力，討論自升式平台船基礎承载力(bearing capacity)為本研究主要考量。

淺基礎極限承载力理論(ultimate bearing capacity theorem)廣泛應用於土木工程領域。結構物所受任何外力作用皆須仰賴支承(support)平衡外力，結構系統才可保持靜力平衡(static equilibrium)；而其中大部分結構物的支承即為土壤反力(soil resistance)。為有效評估結構物受力情況，土壤極限承载力理論的發展顯得格外重要。本研究將應用力學(mechanics)模型並加入數值分析軟體 FLAC 8.1 進行模擬，嘗試探討不同土層條件下淺基礎極限承载力變化與其行為。

淺基礎在均質(homogeneous)黏性土( $\phi = 0$ )極限承载力由 Prandtl (1921)根據塑性理論(theory of plasticity)率先提出。當土壤激發至全額

承载力時，土壤破壞弧(failure surface)影響範圍約為 0.707 倍的基礎寬度(B)。然而，離岸(offshore)工程領域中基礎尺寸遠較一般陸域工程基礎大，以自升式平台船(jack-up barge)的 Spudcan 基礎形式為例，其直徑(B)可達 20 米，土壤破壞弧跨越不同土層機率大增，故分析大型基礎承载力尚須考量不均質(nonhomogeneous)土壤行為所造成承载力變化。



圖 1-1 自升式平台船

<https://splash247.com/bernhard-schulte-and-midocean-wind-form-offshore-wind-joint-venture/>

## 第二章 文獻回顧

### 2-1 淺基礎極限承载力理論

#### 2-1-1 淺基礎介紹:

1. 淺基礎:獨立基腳、條形基腳、聯合基腳和筏式基礎，如圖 2-1。
2. 深基礎:樁基礎和沉箱基礎。

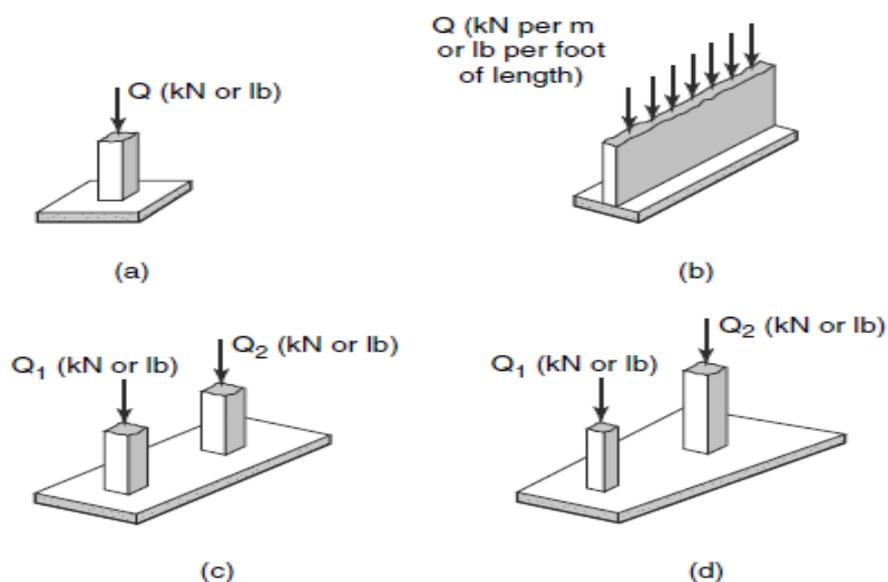


圖 2-1 淺基礎的型式 (McCarthy, 2006)

#### 2-1-2 淺基礎破壞類型:

1. 全面剪力破壞(General Shear Failure) 圖 2-2(a)
2. 局部剪力破壞(Local Shear Failure) 圖 2-2(b)
3. 貫穿剪力破壞(Punching Shear Failure) 圖 2-2(c)

由圖 2-2(a)可以看到，在載重增加到某個程度時，支撐基礎的土層會發生破壞，而且土壤的破壞弧會延伸到地表，此破壞模式其

承载力最高，這種土層破壞稱為全面剪力破壞。此時周圍地表將會發生隆起。圖 2-2(b)為局部剪力破壞，多半在中等緊密的土壤發生，破壞面只發生在土層內，尚未延伸至地表，破壞過程也不劇烈，基礎會有短暫且大的沉陷。圖 2-2(c)貫穿剪力破壞通常在極疏鬆的土壤發生，基礎下方土層沒有明顯的剪切破壞面，基礎會隨著載重增加而幾乎呈現垂直向下貫入土層直到破壞，周圍無地表隆起。

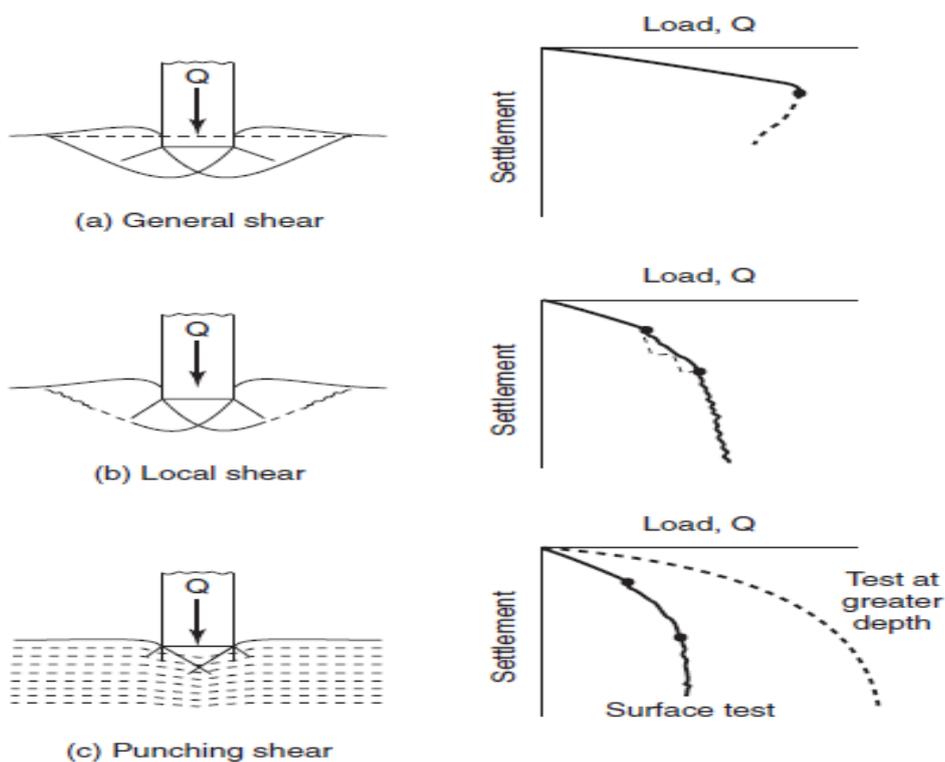


圖 2-2 淺基礎承载力破壞型式 (Vesic, 1963)

## 2-2 Terzaghi 淺基礎承载力理論

### 2-2-1 Terzaghi 淺基礎理論概述

Terzaghi(1943)提出用於評估粗糙底面淺基礎的極限承载力。根據此理論，如果基礎深度 $D_f$ 不超過基礎寬度(B)，則為淺基礎(Shallow foundation)。但是之後的學者認為即便基礎深度 $D_f$ 為基礎寬度(B)的3至4倍的基礎亦可定義為淺基礎。

Terzaghi 建議，對於連續或條形的基礎(即長寬比近似為零)，可以假設土壤在極限荷重下的破壞面類似下圖所示(在此只指出全面剪力破壞的狀況)，基礎底面以上的土壤作用假設以等效載重 $q = \gamma D_f$ ( $\gamma$ 為土壤單位重)代替，基礎下之破壞區如圖中可分為三個部分：

1. 於基礎正下方的三角形區域(主動破壞區)ACD。
2. 輻射剪力區(radial shear zone)ADF 和 CDE，其中曲線 DE 和 DF 則為對數螺線弧，因此又被稱為對數螺旋區。
3. 最外側兩個三角形為 Rankine 被動區 AFH 和 CEG。

圖中角 CAD 及角 ACD 皆假設等於土壤摩擦角  $\phi$ ，且由於基礎底面以上的土壤作用已經被等效載重 $q$ 代替，沿著破壞面 GI 和 HJ 的土壤剪力強度都忽略不計。



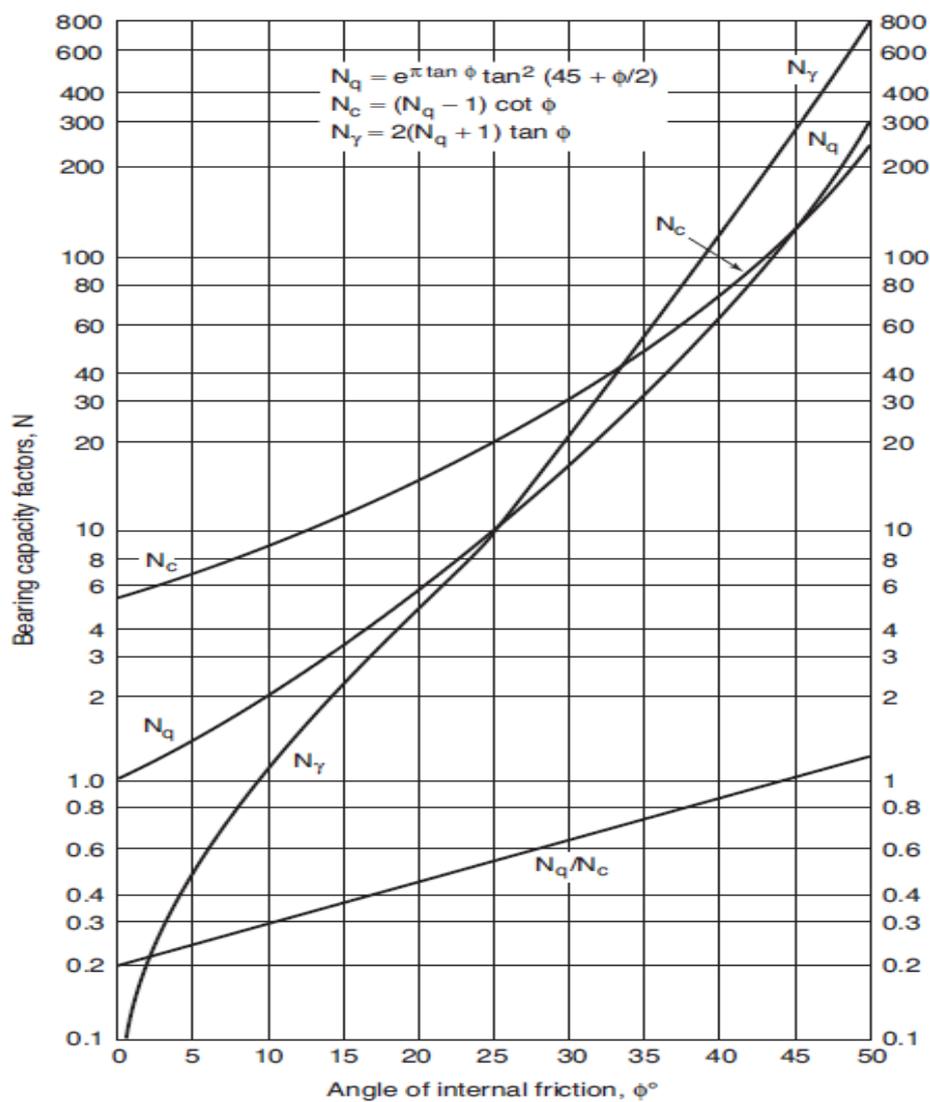


圖 2-4 Terzaghi 承载力因子 (Terzaghi, 1943)

## 2-3 Meyerhof 淺基礎承載力理論

繼 Terzaghi 之後，有許多學者分別提出不同剪力破壞模式的淺基礎承載力理論，破壞模型都並無太大的差別，但在公式內皆加入許多的修正係數，如 Meyerhof (1974)，Vesic (1963)，Hansen (1970)。而 Meyerhof 所提出之模型如圖 2-5 右半部，與 Terzaghi 所提出之模型大同小異。但 Meyerhof 將主動區與基礎底板之夾角，由  $45^\circ$  修正為  $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 。當全面剪力破壞發生時，Meyerhof(1974)所提出之理論模型較 Terzaghi 的更為符合實際之土壤行為。在計算承載力時，Meyerhof 亦加入了深度修正(depth factors)、形狀修正(shape factors)、載重傾斜(load inclination factors)，進而增加在計算承載力時的精確性。而承載力因子在  $\phi=0$  時， $N_c=5.14$ ， $N_q=1$ ， $N_\gamma=0$ 。

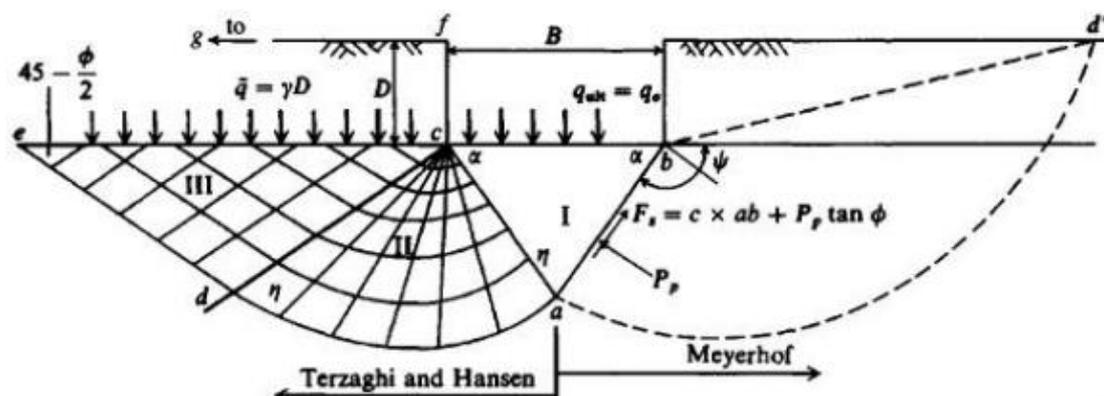


圖 2-5 淺基礎破壞模式 (Bowles, 1996)

Meyerhof(1963)所提出承載力公式:

垂直載重

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + qN_q s_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (\text{式 2.2})$$

傾斜載重

$$q_{ult} = cN_c i_c d_c + qN_q i_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma i_\gamma d_\gamma \quad (\text{式 2.3})$$

$$q_{ult} = cN_c i_c d_c + qN_q i_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma i_\gamma d_\gamma \quad (\text{式 2.4})$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \phi/2) \quad (\text{式 2.5})$$

$$N_c = (N_q - 1)cot\phi \quad (式 2.6)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1)\tan(1.4\phi) \quad (式 2.7)$$

表 1 Meyerhof 承载力因子

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.0	0.0
5	6.5	1.6	0.5
10	8.3	2.5	1.2
15	14.0	3.9	2.6
20	14.8	6.4	5.4
25	20.7	10.7	10.8
30	30.1	18.4	22.4
32	35.5	23.2	30.2
34	42.2	29.4	41.1
36	50.6	37.7	56.3
38	61.4	48.9	78.0
40	75.3	64.2	109.4
42	93.7	85.4	155.6
44	118.4	115.3	224.6
46	152.1	158.5	330.4
48	199.3	222.3	496.0
50	266.9	319.1	762.9

表 2 Meyerhof 承载力公式之修正因數

摩擦角 角度	形狀修正因數	深度修正因數	傾斜修正因數
任意角度	$s_c = 1 + 0.2K_p B/L$	$d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p} D_f/B$	$i_c = i_q = (1 - \alpha/90)^2$
$\phi \geq 10^\circ$	$s_q = s_\gamma$ $= 1 + 0.1K_p B/L$	$d_q = d_\gamma$ $= 1 + 0.1\sqrt{K_p} D_f/B$	$i_\gamma = (1 - \alpha/\phi)^2$
$\phi=0^\circ$	$s_q = s_\gamma = 1$	$d_q = d_\gamma = 1$	$i_\gamma = 0$

註:  $K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$   
 $\alpha$  為傾斜載重與垂直線的夾角  
 B 為基礎寬度  
 L 為基礎長度  
 $D_f$  為基礎埋置深度



## 2-4 砂土(上層)-黏土(下層)之互層土壤承载力理論

### 2-4-1 Punching-through mode 理論

前述不管是 Terzaghi 或 Meyerhof 的承载力理論，都是假設基礎下方為單一土層之情況。本節將簡單介紹砂土-黏土互層之情形，並計算其基礎承载力。並非此類型互層土壤皆會發生貫穿剪力破壞。在分析時，需先考慮基礎寬度與土壤內摩擦角所繪出之全面剪力破壞弧，之後再加入上層砂土層厚度進行判斷，若全面剪力破壞弧僅坐落於砂土層範圍內，如圖 2-6(右)，那基礎承载力主要由砂土層控制，即可以淺基礎破壞形式來處理；反之若砂土層厚度較薄，導致全面剪力破壞弧超過了砂土層，如圖 2-6(左)，影響範圍有接觸到下層黏土層，基礎承载力將會由砂土與黏土共同提供，此時就必須考慮貫穿剪力破壞是否可能發生，故須將整體土層共同分析討論。

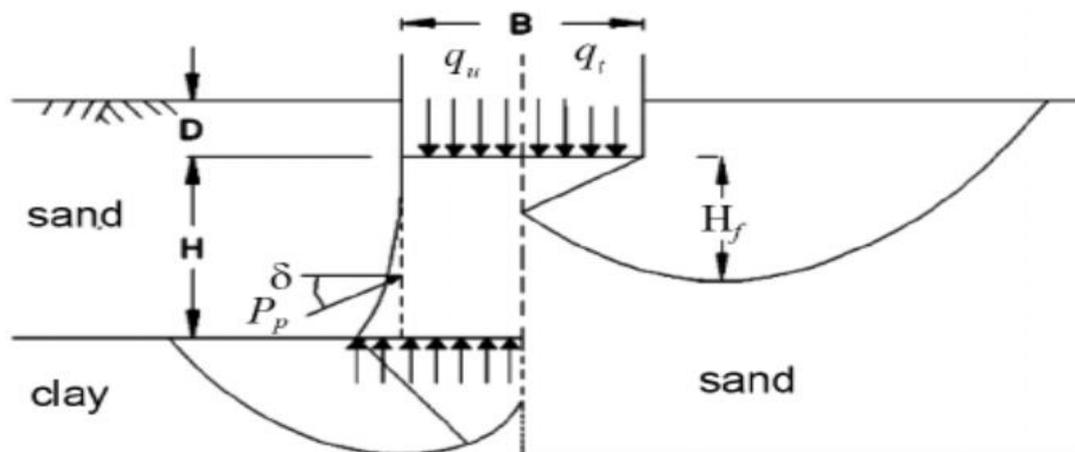


圖 2-6 單層土壤與互層土壤示意圖 (Shoaei et al.,2012)

圖 2-6(左)為 Meyerhof(1974)基於砂土-黏土互層發生貫穿剪力破壞時所提出之模型。由此模型可得知，當基礎寬度(B)與上層砂土層厚度(H)固定時，其土壤在發生全面剪力破壞或貫穿剪力破壞時，僅由破壞弧深度( $H_f$ )所控制。而破壞弧深度( $H_f$ )又為土壤內摩擦角之函數，其影響深度由土壤內摩擦角控制。當土壤內摩擦角越大時，破壞弧深度( $H_f$ )越深，將朝向貫穿剪力破壞發展;反之，若土壤內摩擦角越小，破壞弧深度( $H_f$ )亦越淺，破壞形式將朝向全面剪力破壞發展。

而 Meyerhof 以此模型為基礎，發展出下列公式計算承載力

$$F_v = F_{clay} - AHr' + 2 \frac{H}{B} (Hr' + 2po') k_s \tan \theta A \leq F_{sand} \quad (\text{式 2.8})$$

式中  $F_{clay}$  為下層黏土承載力， $k_s$  為貫穿剪力係數(punch shear coefficient)， $po'$  為基礎之覆土壓力。

在式 2.1 中，計算出之數值須小於等於上層砂土層  $F_{sand}$  所能提供之承

載力，若計算出的承載力大於上層砂土層 $F_{sand}$ ，其承載力將由上層砂土主控。

由於貫穿剪力係數 $k_s$ 的選取較為複雜且困難，因此本報告將利用 SNAME (2008)(The Society of Naval Architects and Marine Engineers)所提出之近似解公式(式 2.2)替換貫穿剪力係數 $k_s$ ：

$$k_s \tan \phi \cong \frac{3c_u}{Br'} \quad (\text{式 2.9})$$

式中 $k_s$ 為貫穿剪力係數、 $\phi$ 為砂土層摩擦角、 $r'$ 為土壤單位重、 $c_u$ 為黏土不排水剪力強度、 $B$ 為基礎寬度。



## 2-4-2 Load-spread mode 承載力理論

Load-spread mode，如圖 2-7，將基礎以特定比例放大投影到下層黏土層，利用放大的基礎來計算承載力。此承載力計算方式，會忽略上層砂土層所提供的側向摩擦力，但因為此方式的計算較為方便運算，即便較不符合實際情形，仍然被廣泛採用。

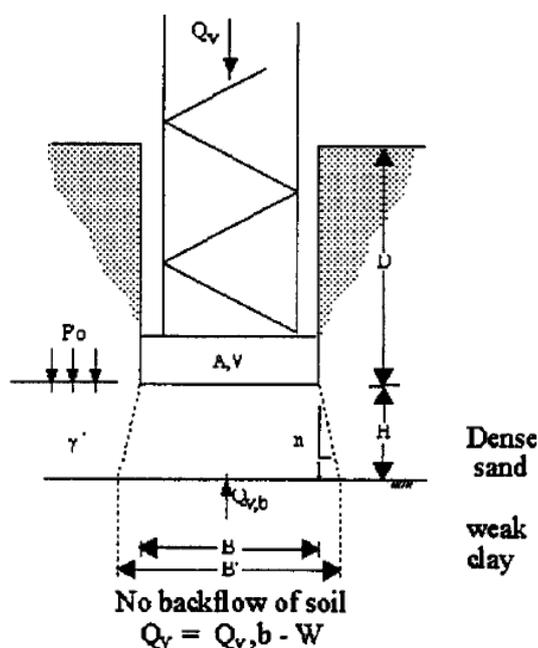


圖 2-7 Load-spread mode (SNAME, 2008)

SNAME 所提出的計算式在圖 2.7 中之  $n$  建議取在 3 至 5，其  $n=3$  為承載力之上限，反之  $n=5$  為承載力之下限。(式 2.10) 計算結果，如同 punch-through mode，需要與砂土層承載力做比較，依然不得超過砂土所提供之最大承載力。

$$Q_v = Q_{v-b} - W \leq Q_{sand} \quad (\text{式 2.10})$$

其中  $Q_{v-b}$  為投影至下方黏土層所計算出承載力， $W$  為投影之梯形砂土重量，其中  $W$  之計算如(式 2.11):

$$W = \left[1 + \frac{2H}{nB}\right]^2 A H r' \quad (\text{式 2.11})$$

其中  $H$  為上層砂土層厚度、 $n$  為投影斜率、 $B$  為基礎寬度、 $r'$  為土壤單位重。



## 第三章 研究內容與方法

### 3-1 破壞弧影響最深位置

在全面剪力破壞中，其破壞弧最深處會位於對數螺旋區(輻射區)之內。由於在大學部我們所學的大部分是以基礎下方為單一且均質的土壤所組成，所以在計算上土壤參數的挑選取用相較容易。但若下層土壤改為互層土壤，計算上就無法單純以上層土壤之參數，因此土壤參數的選取上就較為困難，必須格外謹慎。此時就必須加入破壞弧的輔助，來判斷該如何選取土壤參數。

可由(式 3.1)大學部所學公式計算出對數螺旋:

$$r = r_0 e^{\tan \phi} \quad (\text{式 3.1})$$

其中公式中的 $r_0$ 為 $(\frac{B}{2} \div \cos \phi)$ ，而非基礎寬度(B)，之後再利用 EXCEL 的輔助計算較為大量的數據，推導出以下公式，即可計算破壞弧影響之最深處:

$$Z_{MAX} = r_0 e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \tan \phi} \times \cos \phi \quad (\text{式 3.2})$$

### 3-2 砂土層(上層)-黏土層(下層)極限承载力分析

本節假設有一方形筏式基礎其長寬(B)皆為 5m，坐落於地層為砂土層(上層)-黏土層(下層)之處，固定其砂土摩擦角( $\phi$ )，討論改變基礎貫入深度對極限承载力所帶來的影響。砂土層厚度(H)為 5m，土壤單位重 $r'=7(\text{kN}/\text{m}^3)$ 且凝聚力  $c=0$ 。黏土層位於砂土層下方，如圖 3-1。黏土層不排水剪力強度我們假設固定為 15(kPa)。

在本節中透過變換不同的砂土摩擦角來討論純砂土之破壞弧在不同之砂土摩擦角( $\phi$ )下所發展出不同的最深位置以及極限承载力。因假設之上層砂土層厚度僅為 5m，當砂土摩擦角( $\phi$ )或基礎寬度(B)到達一定值之後，其破壞弧的影響範圍必定會涵蓋到下層黏土層，此時若是繼續採用純砂土承载力分析方法時，無法呈現出真實的破壞模式，所計算出來之承载力必定會與實際工程上大不相同。因此在本節將導入 SNAME 對於分析互層土壤破壞模式理論進行討論。

本節固定基礎寬度(B)為 5m 並加入 excel 作圖輔助判斷在不同摩擦角下，所衍伸出不同深度及廣度的破壞弧。當砂土內摩擦角為  $0^\circ$  時所對應之破壞弧最深處為 3.535m 如圖 3-2，當砂土內摩擦角為  $30^\circ$  時所對應之破壞弧最深處為 7.926m 如圖 3-3，當砂土內摩擦角為  $40^\circ$  時所對應之破壞弧最深處為 11.737m 如圖 3-4。由此分析方式可

以清楚得知當基礎寬度固定，摩擦角越大，破壞弧的影響範圍就越深越廣。藉此能幫助我們判斷某一基礎其破壞弧是否坐落於單一土層內，接著考慮在分析承載力時需不需要考慮互層的問題。

根據本節一開始所假設的土壤條件，我們可以得知當砂土內摩擦角為  $14^\circ$  時所對應之破壞弧最深處恰巧為 5m 如圖 3-5。由此可知，當基礎寬度(B)不變、上層砂土層厚度(H)不變，當砂土內摩擦角大於  $14^\circ$  時，基礎破壞弧將影響到下層黏土層。此時，在進行承載力分析時，就不得單單以淺基礎承載力破壞形式考量，必須納入貫穿剪力破壞形式一同考慮。

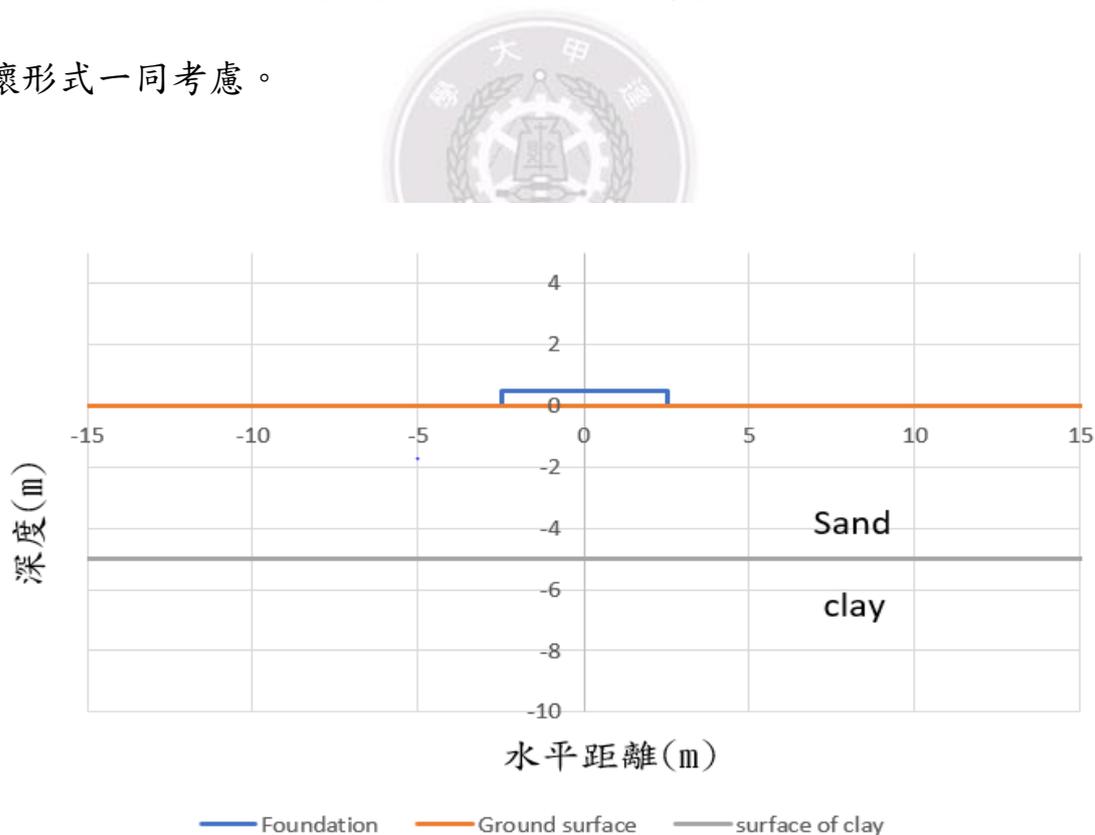


圖 3-1 基礎與土壤示意圖

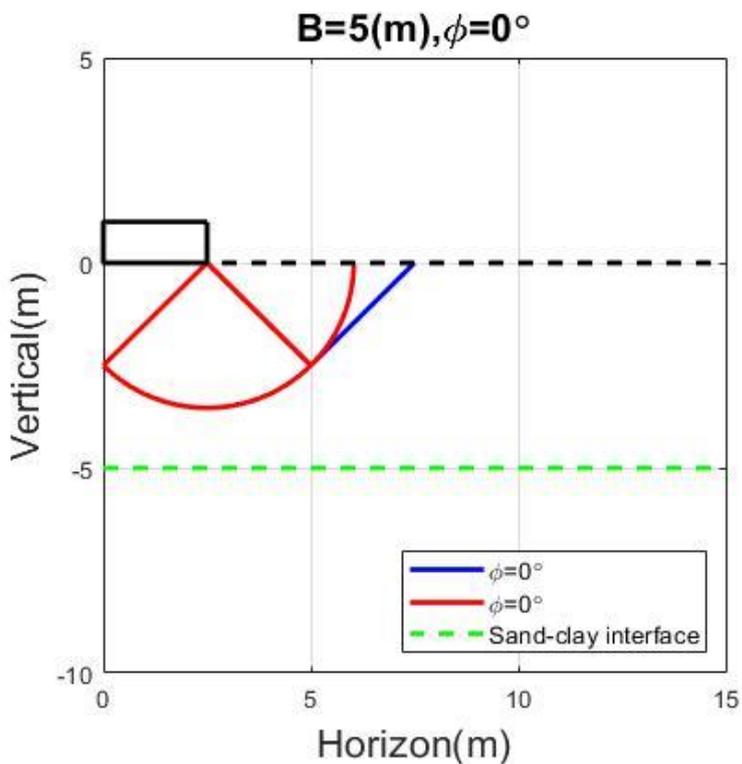


圖 3-2 土壤內摩擦角  $\phi=0^\circ$

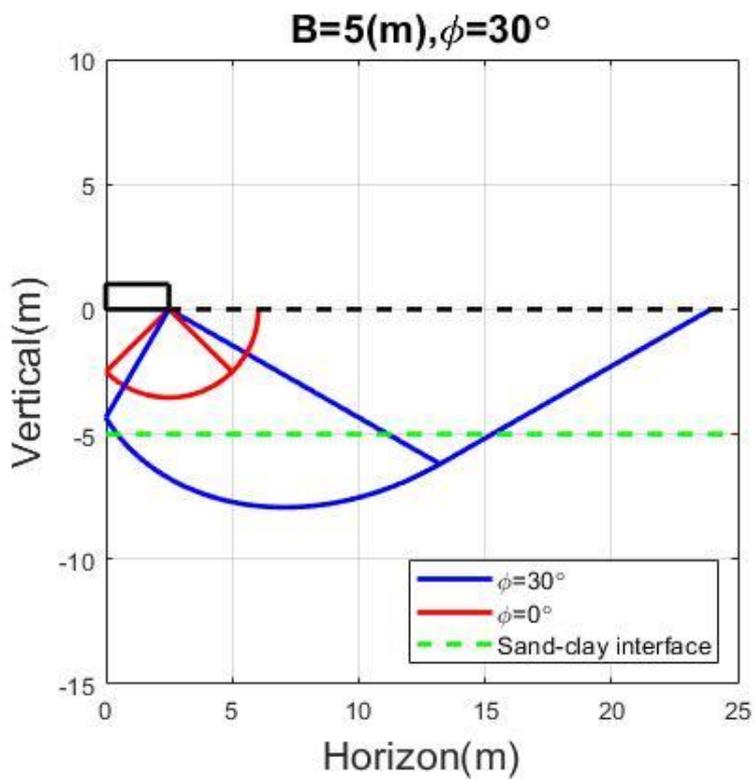


圖 3-3 土壤內摩擦角  $\phi=30^\circ$

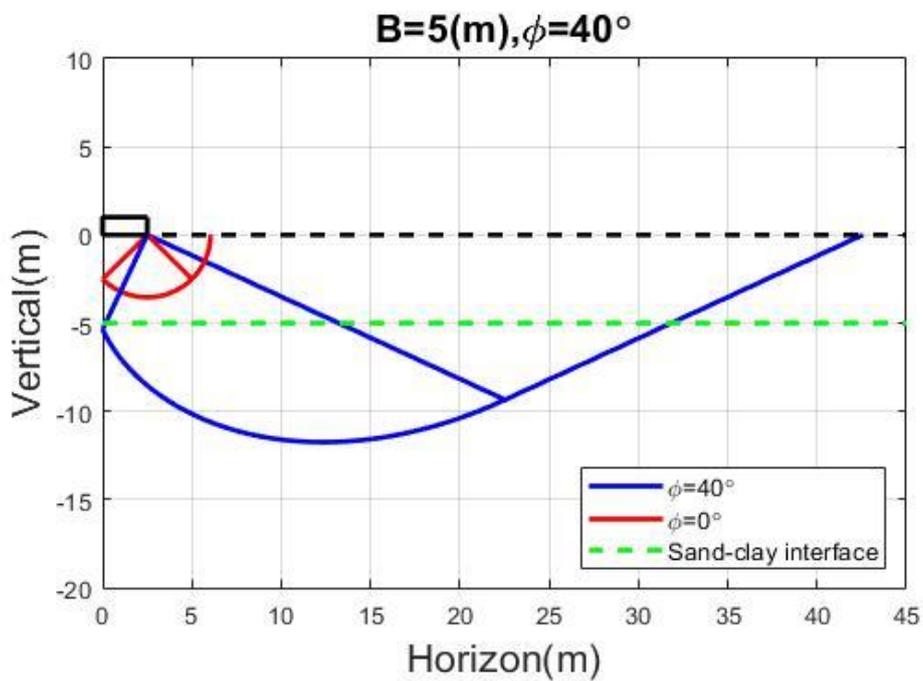


圖 3-4 土壤內摩擦角  $\phi=40^\circ$

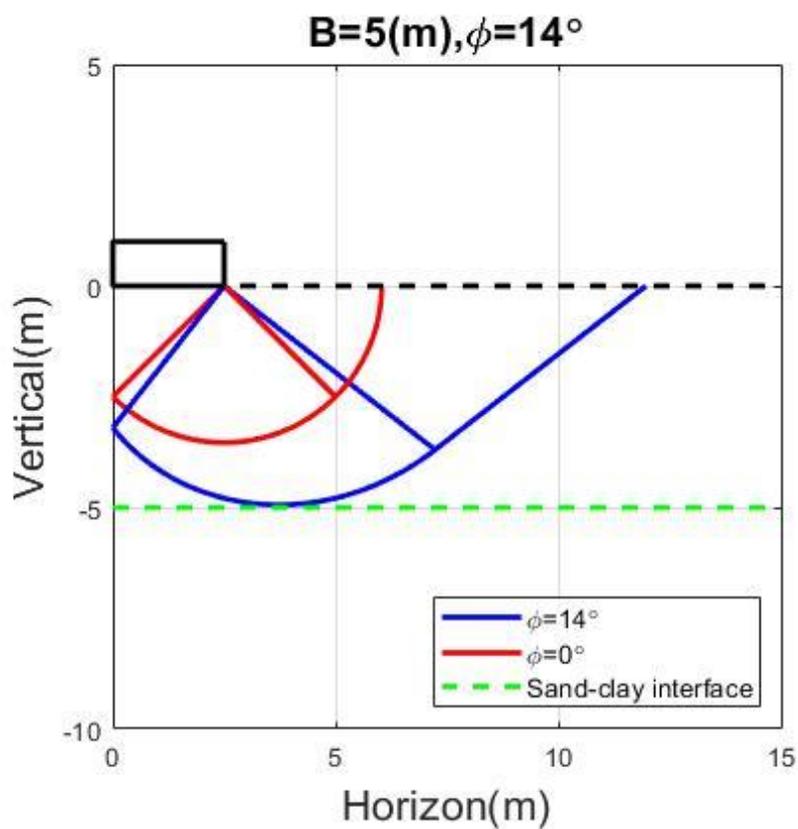


圖 3-5 土壤內摩擦角  $\phi=14^\circ$

圖 3-6 為不同摩擦角所對應之破壞弧最深處位置，而圖 3-7 為破壞弧最深處與基礎寬度(B)做無因次化後得到的結果。由這兩張圖片可以得知，可以摩擦角為  $30^\circ$  做為一個分水嶺，當摩擦角小於  $30^\circ$ ，圖形較為平緩，不過當摩擦角大於  $30^\circ$  時，我們可以發現圖形會較為陡峭。當  $\phi=40^\circ$  時，影響深度可達到基礎寬度(B)的三倍之多，此時若不考慮互層土壤，視為單一土層來分析基礎極限承載力，計算的結果將與工程實際情況有相當大的落差。

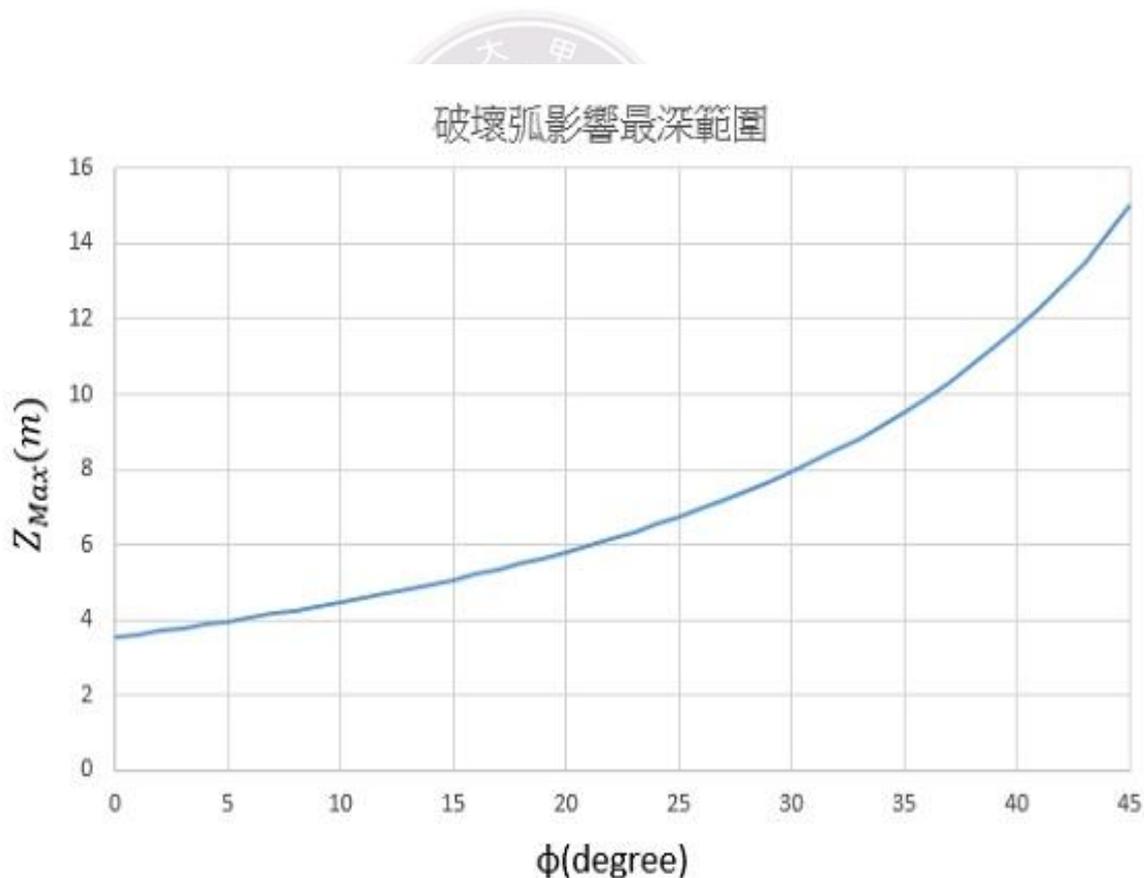


圖 3-6 破壞弧最深處與摩擦角關係圖

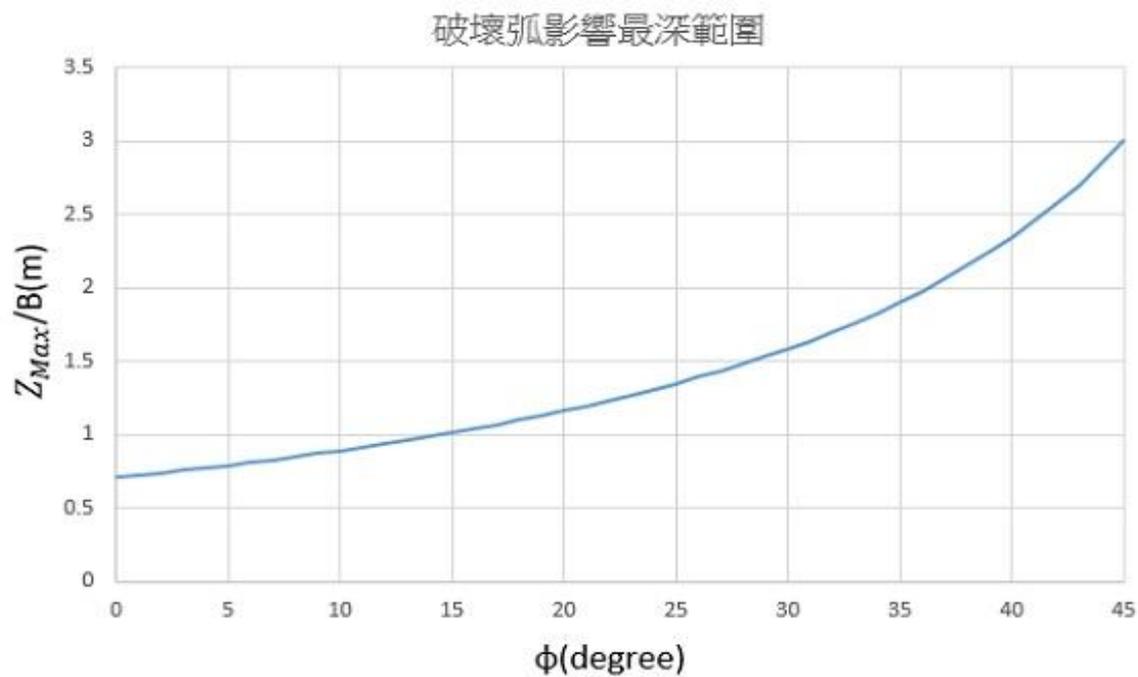


圖 3-7 破壞弧最深處與摩擦角無因次化關係圖



### 3-2-1 純砂土承載力分析

此節討論之參數為砂土摩擦角對承載力的影響，與本論文後續要討論的貫入深度不同，在此說明。由 2-2 節所闡述的單一土層的承載力分析，可求得一筏式基礎坐落於砂土層之中的極限承載力。此處我們假設砂土摩擦角即  $\phi$  為不固定之角度，因此承載力因子  $N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_r$  皆為砂土摩擦角  $\phi$  之函數，而上層砂土因為假設沒有凝聚力即  $c=0$ ，故此基礎承載力只與貫入深度  $D_f$ 、土壤單位重  $r'$ 、基礎寬度  $B$  有關係。而這邊的計算我們假設貫入深度  $D_f = 0$ ，並固定土壤單位重  $r'$ 、基礎寬度  $B$ ，純砂土之承載力計算結果如圖 3-8 及將此結果對基礎面積( $A$ )以及砂土重量( $r'H$ )做無因次化分析結果為圖 3-9。

純砂土之極限承載力與其摩擦角  $\phi$  有相當大的關係，我們可以從計算結果之圖形得知，承載力之轉折點約在砂土摩擦角  $\phi=30^\circ$ ，當砂土摩擦角小於  $30^\circ$ ，圖形呈現平緩向上成長，不過當砂土摩擦角大於  $30^\circ$  時，我們可以發現圖形會突然以較大的斜率攀升成長。而此成長趨勢可回顧到第 2 節承載力因子(Capacity Bearing factor) $N_r$ 值(圖 3-10)對於純砂土之承載力的影響。由此可見， $N_r$ 值在砂土摩擦角  $\phi$  約等於  $30^\circ$  也會呈現明顯的成長趨勢，與純砂土之承載力計算結果呈現大致相同。

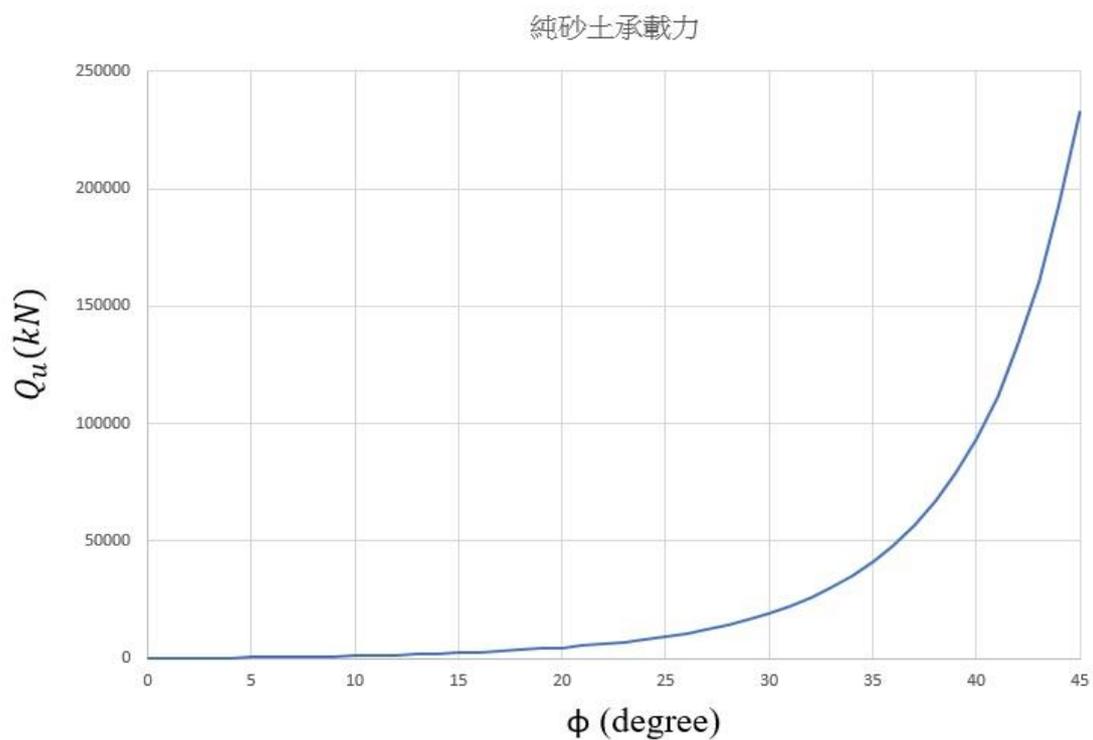


圖 3-8 砂土承载力與摩擦角關係圖

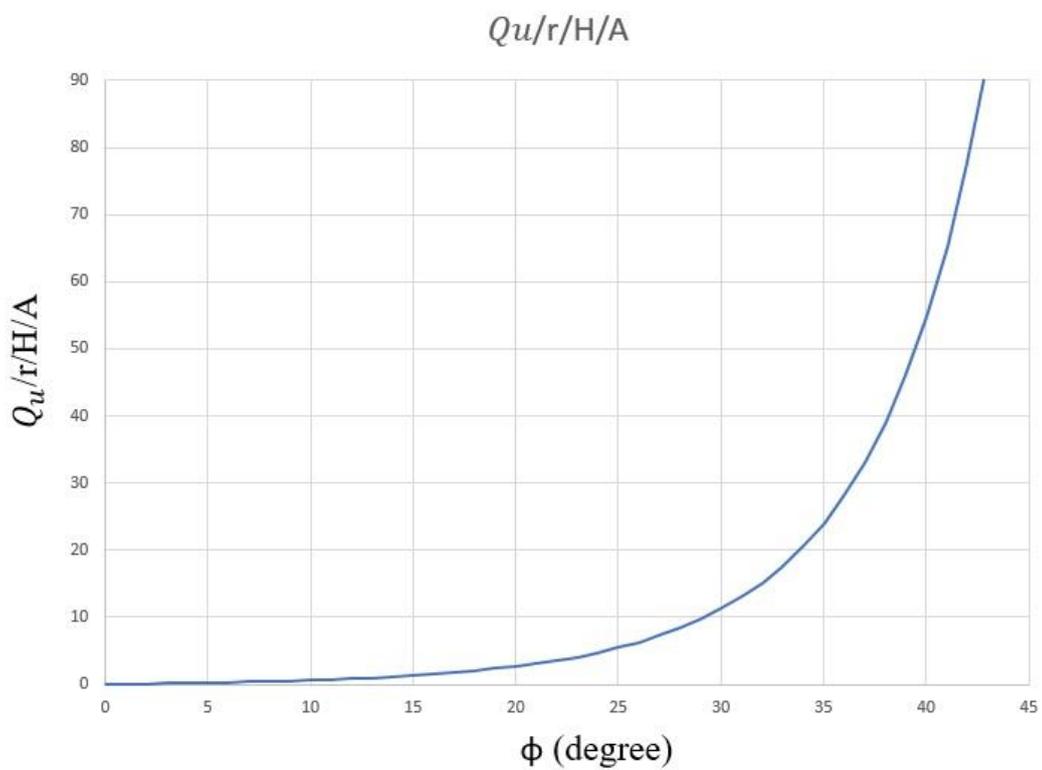


圖 3-9 砂土承载力與摩擦角無因次化關係圖

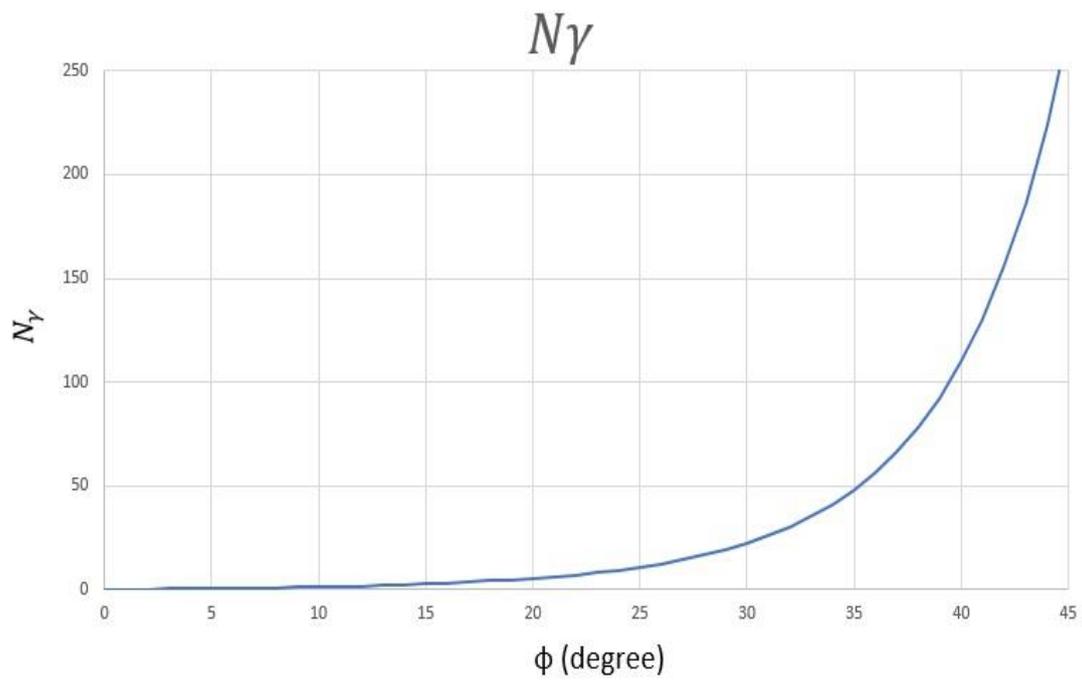


圖 3-10  $N_\gamma$ 與摩擦角關係圖



### 3-2-2 Punch-through mode 分析

在現地進行土壤鑽探的結果中，可以發現地下的土層並非如教科書上所描繪的是由單一土壤所組成，往往都是由多種不同性質、不同強度的土壤所組成。依照 Meyerhof(1974)所提出的 Punch-through mode 理論，我們得知此種互層土壤的承载力計算方式，是由黏土層(下層)之極限承载力，與砂土層(上層)的側壁摩擦力共同作用所產生。其中因砂土層的貫穿剪力係數( $k_s$ )值難以準確且有效的採用，即便在 1978 年 Meyerhof & Hanna(1974)有提出對於貫穿剪力係數( $k_s$ )的選取方法，但因後續的計算方式複雜且龐大，本節將利用在 3-2 節提到的 SNAME 方法來替代貫穿剪力係數( $k_s$ )的計算。

而 SNAME 所提出的計算方式，將貫穿剪力係數  $k_s \tan \phi \cong \frac{3c_u}{Br'}$ ，只要代入下層黏土之表面或破壞弧深度加權之不排水剪力強度，雖然此公式能使工程計算時較為方便快捷，不過，因為公式內沒有砂土摩擦角之參數，不論怎麼改變上層砂土層之摩擦角，貫穿剪力係數  $k_s$  將會為常數，無法呈現上層砂土層摩擦角大小對於其極限承载力的影響。因此計算出的承载力會與實際情形有些落差。

由於本節使用 SNAME 所建議的公式討論基礎在砂土層(上層)-黏土層(下層)的情形下，利用透過固定砂土摩擦角( $\phi$ )來控制破壞弧深

度，並且改變基礎寬度(B)與貫入深度( $D_f$ ) 如圖 3-11、圖 3-12、圖 3-13。來分析在互層土壤(上強下弱)的情況下，基礎寬度(B)與貫入深度( $D_f$ )對於極限承載力的影響。

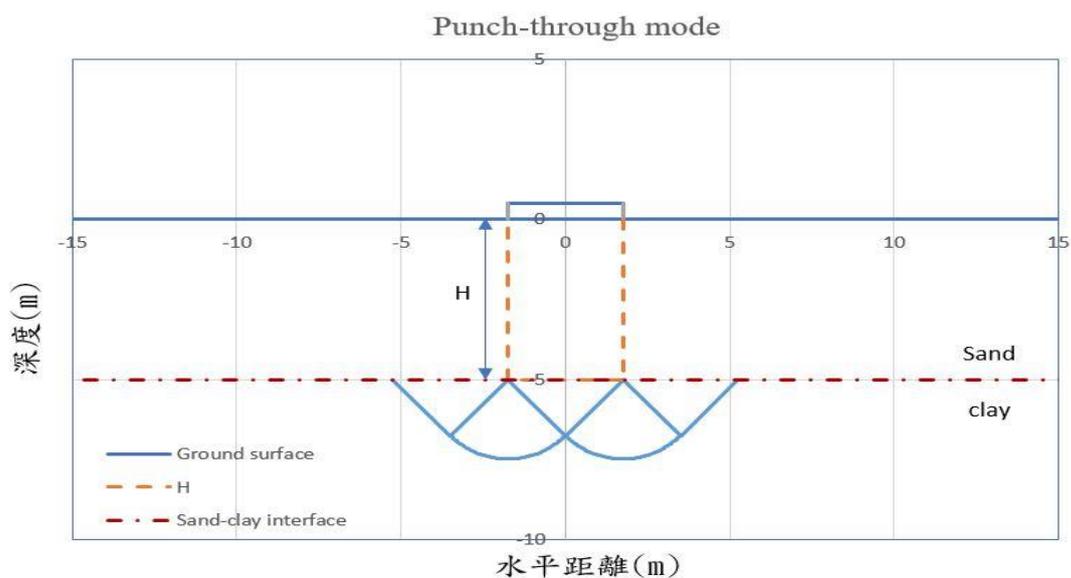


圖 3-11 基礎座落於地表示意圖

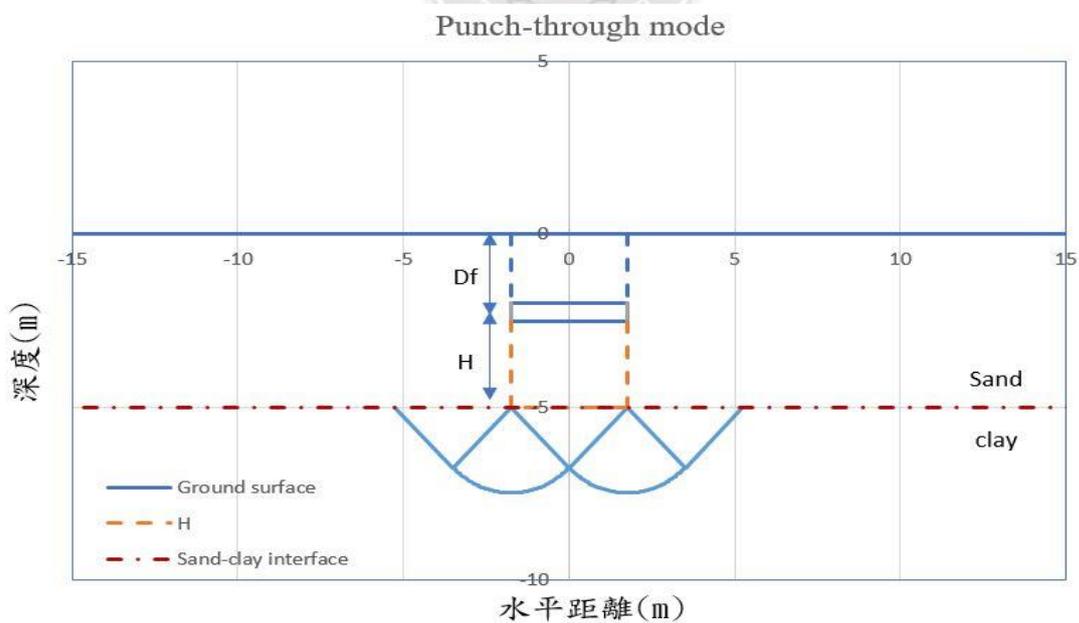


圖 3-12 基礎埋置於砂土層中示意圖

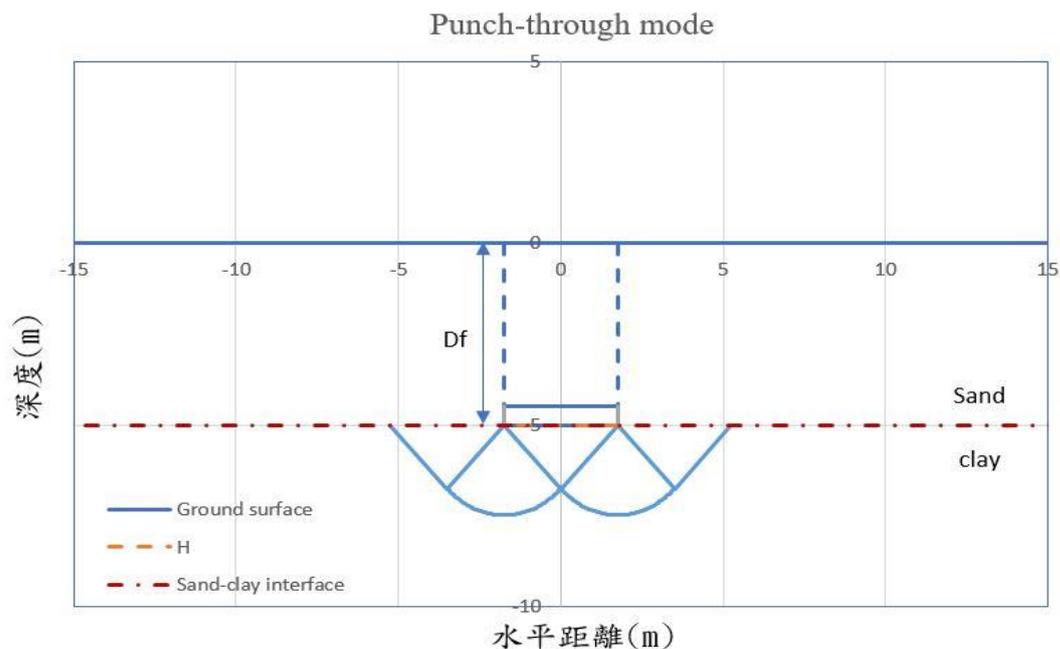


圖 3-13 基礎座落於黏土層表面示意圖

本節將固定上層砂土層摩擦角  $\phi$  為  $30^\circ$ ，並且將基礎寬度(B)由 1m~5m，每 0.5m 為一個單位，因此共有 9 個不同基礎寬度(B)，接著貫入深度( $D_f$ )將會由砂土層表面( $D_f = 0m$ )，逐漸向下貫入，由淺入深，最後基礎將置於下層黏土層表面( $D_f = 5m$ )。最後將(砂土承載力/極限承載力)與(貫入深度/基礎寬度)做無因次化之圖表。下面從圖 3-14 至圖 3-22，表示基礎寬度(B)由 5m 開始縮小至 1m，圖 3-23 為不同基礎寬度之疊圖，並使用 Matlab 進行埋置深度由淺入深之不同承載力之運算。

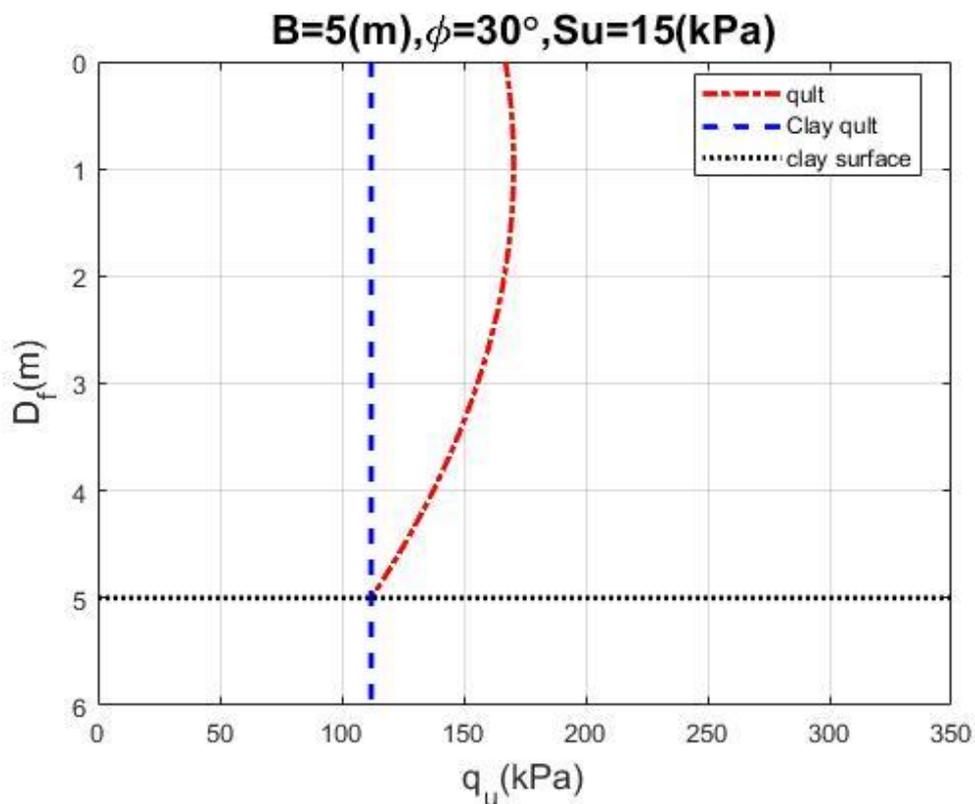


圖 3-14 基礎寬度 5m 之承载力曲線圖

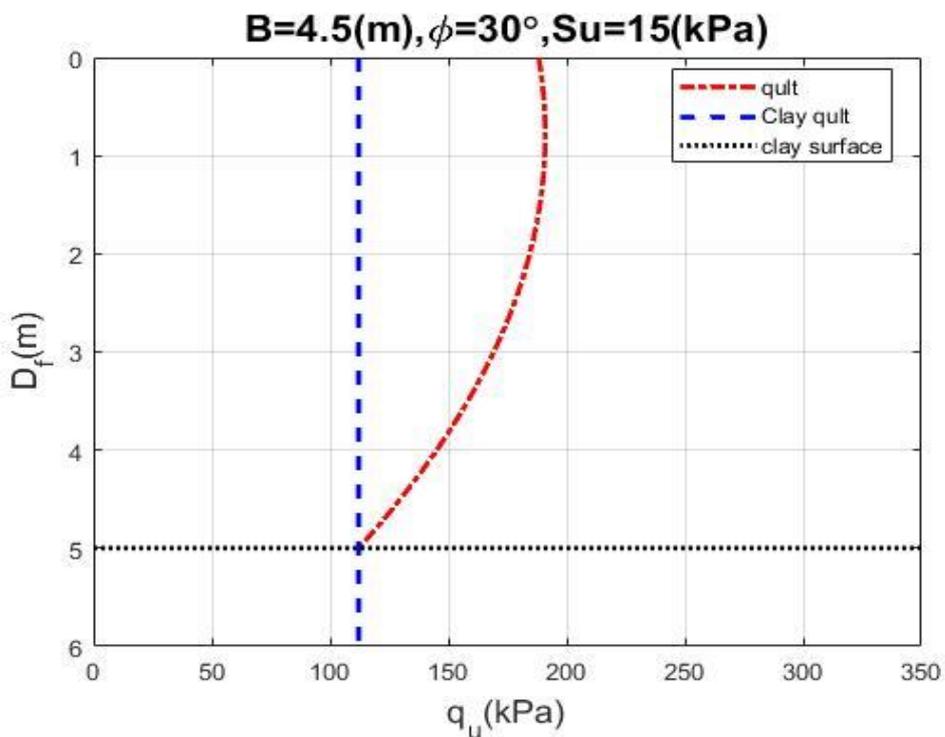


圖 3-15 基礎寬度 4.5m 之承载力曲線圖

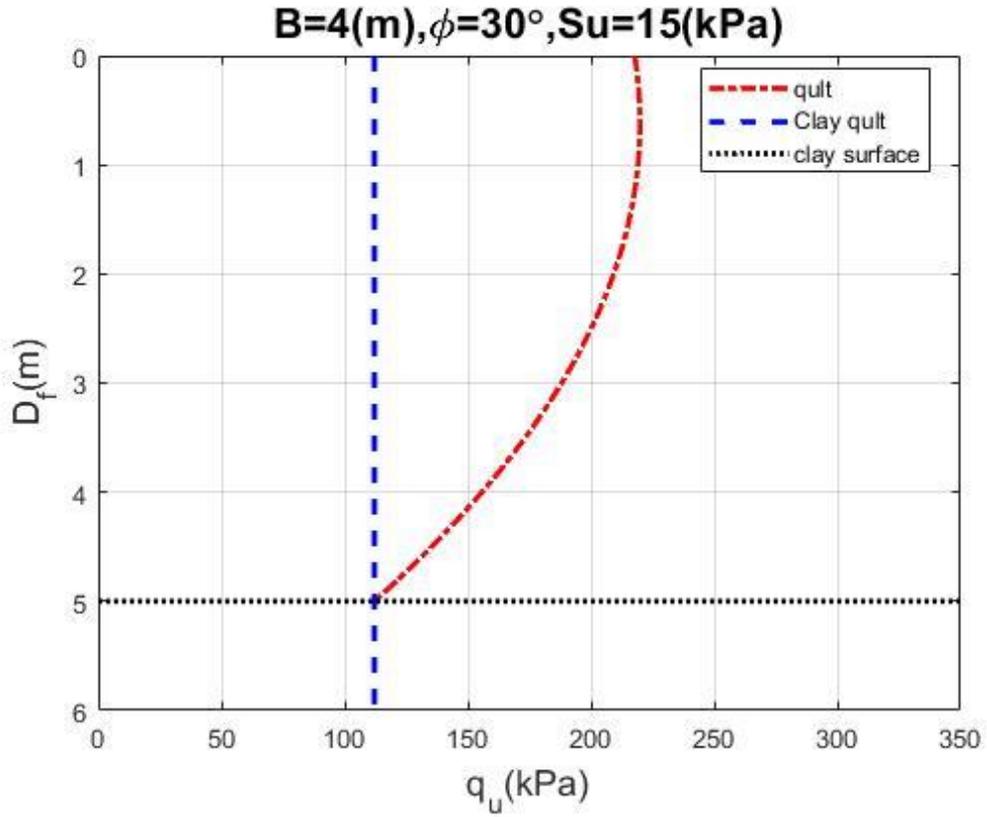


圖 3-16 基礎寬度 4m 之承载力曲線圖

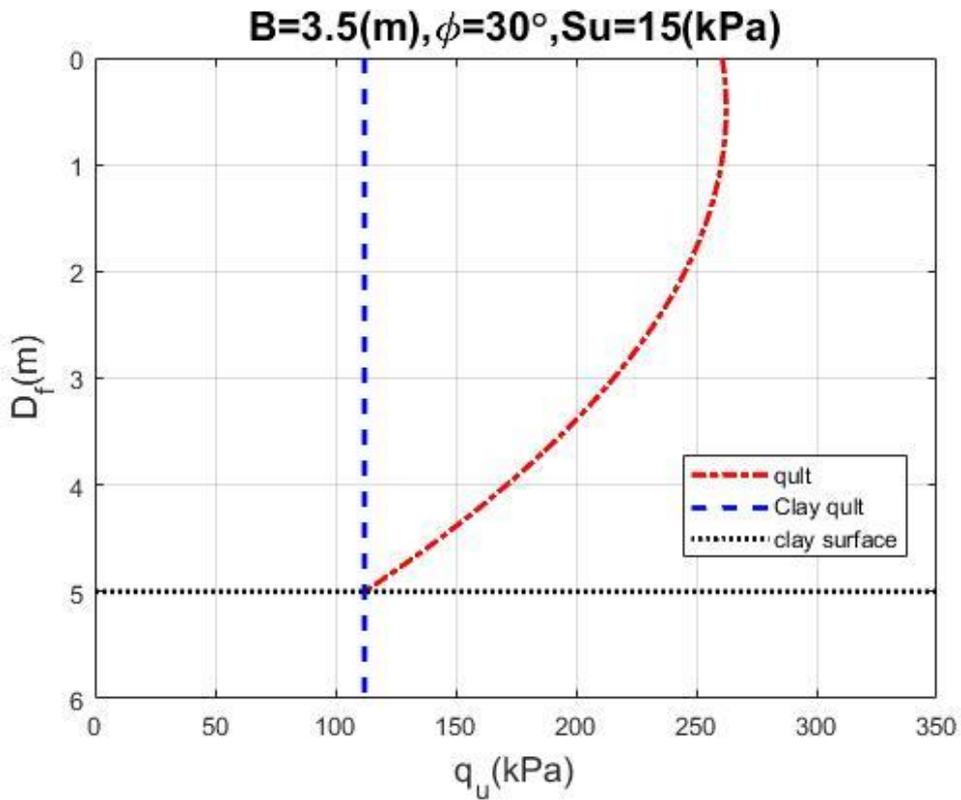


圖 3-17 基礎寬度 3.5m 之承载力曲線圖

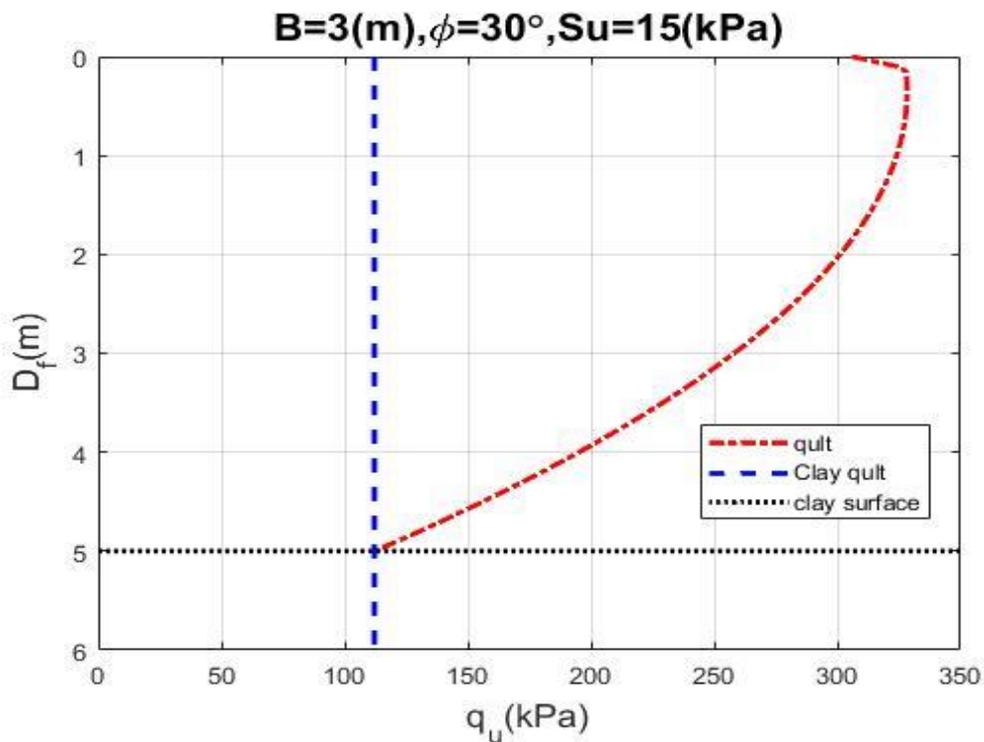


圖 3-18 基礎寬度 3m 之承载力曲線圖

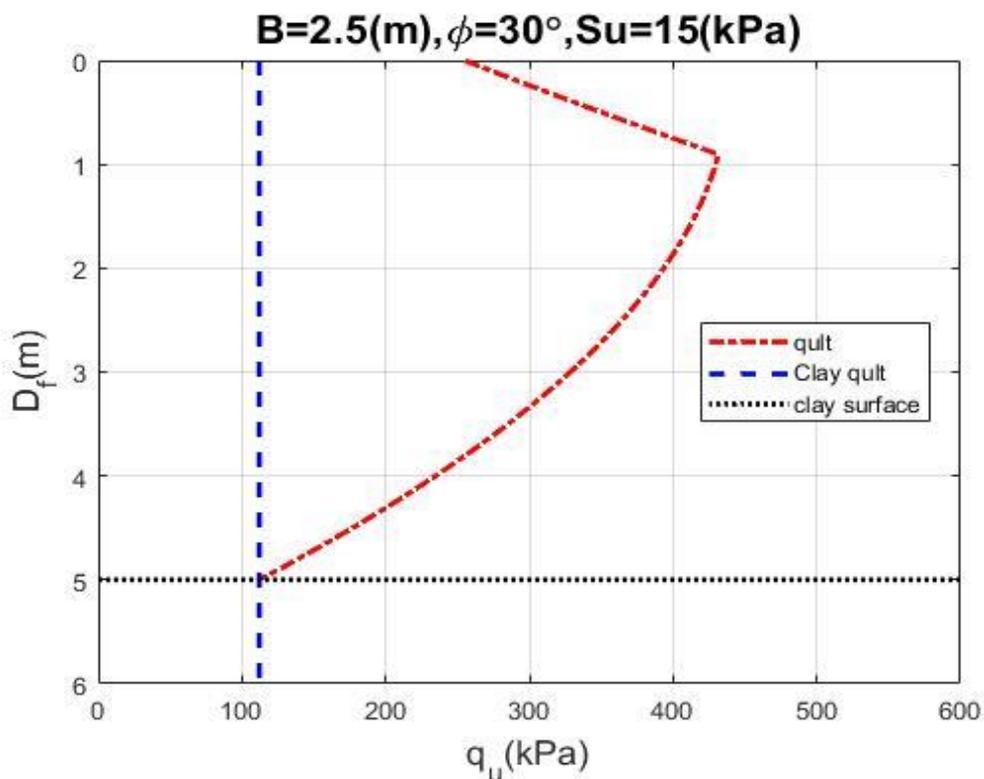


圖 3-19 基礎寬度 2.5m 之承载力曲線圖

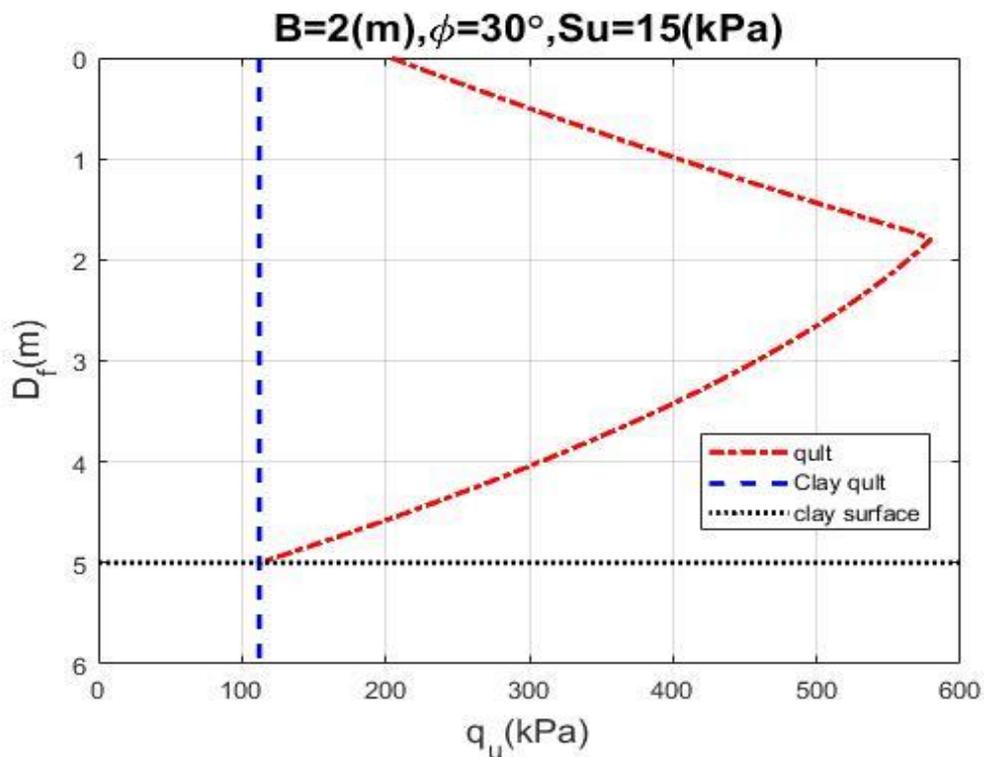


圖 3-20 基礎寬度 2m 之承载力曲線圖

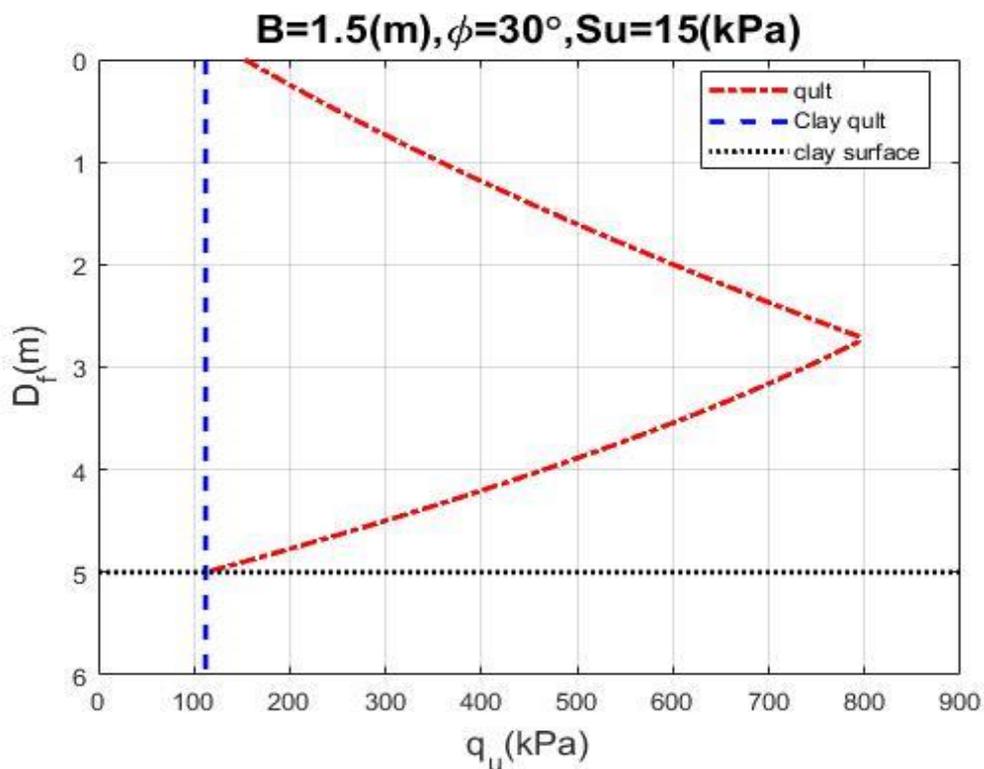


圖 3-21 基礎寬度 1.5m 之承载力曲線圖

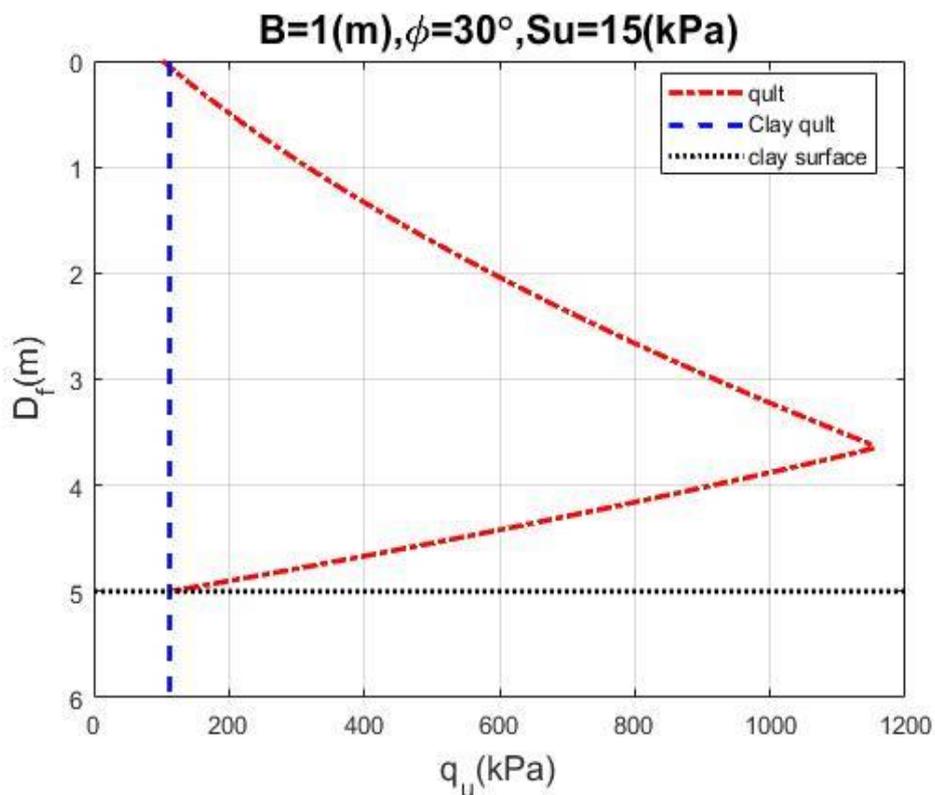


圖 3-22 基礎寬度 1m 之承载力曲線圖

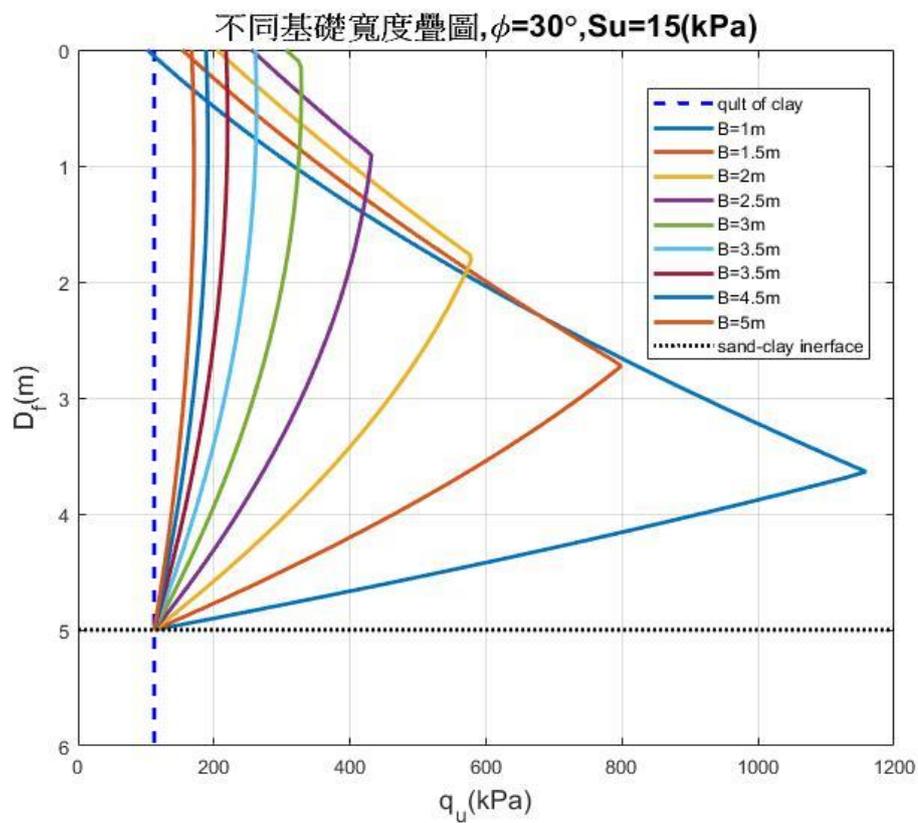


圖 3-23 不同基礎寬度疊圖

在固定砂土摩擦角  $\phi$  之後，雖然本節所使用的極限承載力計算方式為 SNAME 之建議式： $k_s \tan \phi \cong \frac{3c_u}{Br'}$  替換，因上層砂土層之內摩擦角在此式中將為常數，不影響運算之結果，因此摩擦角大小對承載力運算並無影響。但是我們可以從式 3.2 中得知，當我們固定摩擦角大小時，基礎寬度(B)之大小改變時，便會影響計算破壞弧深度之重要參數的  $r_0$ ，因此砂土摩擦角  $\phi$  與基礎寬度(B)的關係將對此處運算有極大影響。透過式 3.2 的計算，我們得知當基礎寬度(B)等於 3.15m 時，其破壞弧最深影響位置已達到 4.99m，幾乎等於我們假設的砂土-黏土交界面。由此可知，當基礎寬度(B)大於 3.15m 時，因為其基礎破壞弧深度已大於假設之砂土層厚度 5m，會接觸到下層黏土層，因此我們不能只考慮土層僅會發生單純的淺基礎破壞，此時需要加入貫穿剪力破壞模式，與純砂土所提供之承載力進行比較。而當基礎寬度(B)小於等於 3.15m 時，破壞弧深度並不會在基礎置於砂土層表面就影響到下層黏土層，而是會隨著貫入深度越來越深之後，破壞弧才會掃到下層黏土層。

而在破壞弧觸碰到下層土壤前，基礎承載力都是由純砂土承載力所主控，一旦破壞弧深度接觸到下層土層之後，此時就必須同時考慮純砂土承載力與貫穿剪力模式，透過兩種不同的計算方式，將結果取小值作為基礎之極限承載力。從圖 3-18、圖 3-19、圖 3-20、圖 3-21、

圖 3-22 中可以得知，基礎在貫入的初期，由於破壞弧僅坐落於上層砂土層，因此是先由純砂土承载力所主控，當貫入深度到達破壞弧會接觸到下層黏土層時，圖形會出現一個折角，代表此時的基礎承载力將是改由貫穿剪力模式在主控。另外，可以發現基礎寬度越小時，發生折角的時間越晚，因基礎寬度小所激發的破壞弧亦不深，必須待貫入深度越來越深之後，破壞弧才會影響到下層黏土層。



### 3-2-3 Load-spread mode 分析理論

Load-spread mode 分析法，可依照式 2.10 以及圖 3-24 所示意，利用不同的投影斜率( $n$ )求得不同的基礎投影面積，其計算出來的承載力也會有所不同。依據 SNAME(2008)所提出之建議式 2.10，示意圖如圖 3-24 與圖 3-25，其中的基礎投影斜率( $n$ )建議採用 3~5。當  $n=3$  時所計算出的承載力作為基礎承載力的上限(較不保守)，而當  $n=5$  時所計算出的承載力作為基礎承載力的下限(較保守)。依照 SNAME 所建議之投影斜率( $n$ )為 3 到 5，因下層黏土層之不排水剪力強度假設為定值。當投影斜率( $n$ )=3( $Fv_{n=3}$ )時，可得承載力結果為 7710kN，投影斜率( $n$ )=4( $Fv_{n=4}$ )時，可得承載力結果為 6245kN，投影斜率( $n$ )=5( $Fv_{n=5}$ )時，可得承載力結果為 5440kN。SNAME 的建議公式中不包含土壤內摩擦角  $\phi$  此參數，因此所計算出的承載力為一定值，其不受到上層砂土層內摩擦角  $\phi$  改變的影響。可以從圖 3-26 與圖 3-27 看到 Load-spread mode 如同 punch-through mode，在計算出承載力之後，還必須與純砂土承載力做上下限的評估，並且取較小值作為較保守之承載力評估。



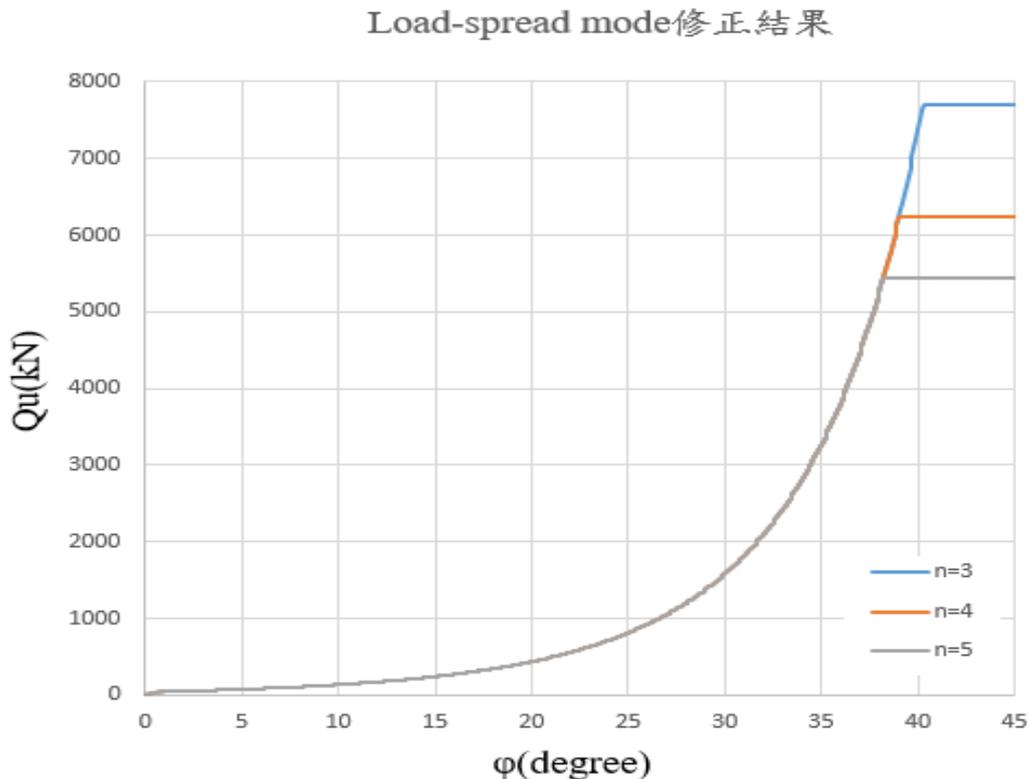


圖 3-26 不同投影斜率承载力疊圖

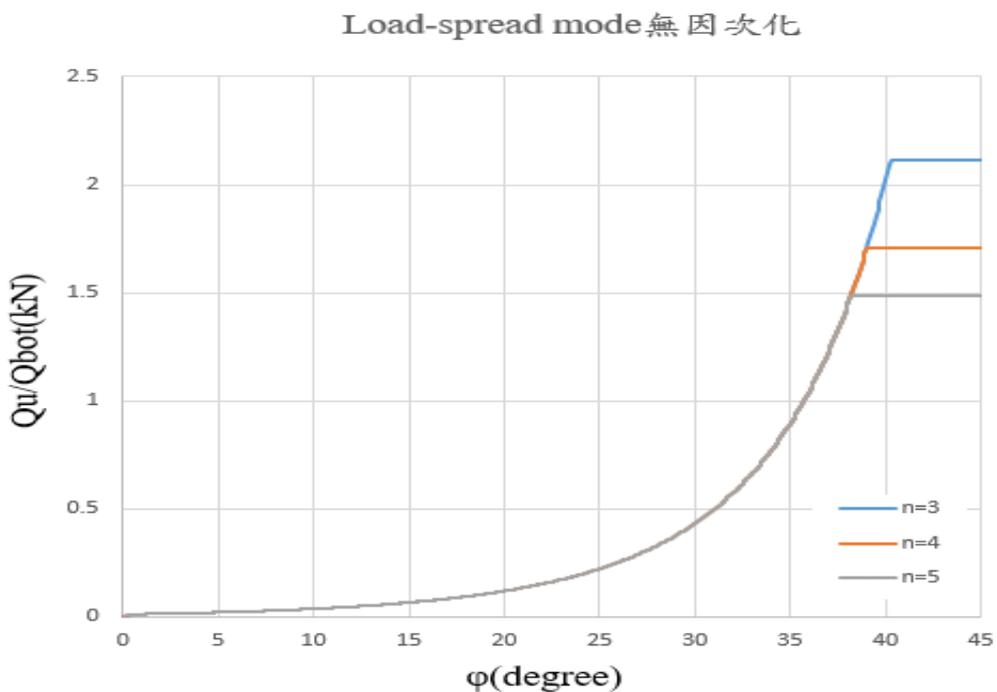


圖 3-27 不同投影斜率承载力無因次化疊圖

### 3-3 Matlab 與 FLAC 8.1 軟體分析

此報告所分析的問題，不像大學部的基礎工程所學，問題複雜程度沒有如此的單純，只要代入課本公式，再利用手動運算就可以求出答案。修習這堂研究所的課，最大的目的就是在讓我們學習如何使用程式軟體去解決數學上龐大且複雜的運算，除了讓我們能省下許多手算的冗長時間外，也可以利用這些程式軟體所計算出的圖形，並與教科書上的圖片進行比較，從中學習自己做的結果與他們有甚麼不同。

Matlab 為工程上，常用的數值運算程式，也運用於控制系統設計與分析、圖像處理、訊號處理與通訊、金融建模和分析等。圖 3-28、圖 3-29 為 Matlab 的使用介面，其中的程式碼是我在運算本報告所設定的參數及運算流程，而前述的圖 3-14 至圖 3-23，便是由此程式碼所分析出之圖形。由這些圖形的趨勢，可以讓我們更便於分析承載力結果與趨勢，也可利用圖表讓我們更加了此議題。圖 3-30、圖 3-31 為 FLAC 8.1 的使用介面，而 FLAC 8.1 則是常用於連續體的大變形模擬，利用介面或滑動面代表不同的介面，沿著此介面滑動或分離的現象會產生，用來模擬斷層、節理或摩擦邊界等。

自升式平台船基礎於砂土(上層)-黏土(下層)之承載力評估

```

1 clear
2 friction=30; % 摩擦角
3 frictionCON=[1:1:45]; % 摩擦角連續矩陣
4 Dsand=5; % 上層砂土厚 (m)
5 Dclay=5; % 下層黏土厚 (m)
6 n=100; % 深度切割 (m)
7 H=linspace(5,0,n+1); % 基礎下方砂土厚(連續) (m)
8 Hon=5; % 基礎下方砂土厚 (m)
9 Df=linspace(0,5,n+1); % 埋置深度(向下連續) (m)
10 Done=0; % 埋置深度 (m)
11 B=3.5; % 基礎寬度(短邊) (m)
12 L=3.5; % 基礎寬度(長邊) (m)
13 r=7; % 土壤單位重 (KN/m^3)
14 su=15; % 下層黏土參數 (kPa)
15 c=0; % 砂土c值
16 alpha=0; % 基礎傾斜角度
17 Kp=(tan(45+friction/2))^2; % 被動土壓力係數
18 Dx=linspace(0,6,n+1);
19
20 % 計算承載力因子
21 Nqsand=exp(pi*tand(friction))*tan(45+friction/2)^2;
22 Nrsand=2*(Nqsand+1)*tand(friction);
23 Ncsand=(Nqsand-1)*cotd(friction);
24 NqCLAY=1;
25 NcCLAY=5.14;
26 NrCLAY=0;
27 % Meyerhof修正因子
28 Sc=1+(0.2*Kp*(B/L));
29 for i=1:n+1
30     dc(1,i)=1+(0.2*(Kp^0.5))*Df(1,i)/B;
31 end
32 ic=[1-(alpha/90)]^2;
    
```

圖 3-28 Matlab 使用介面

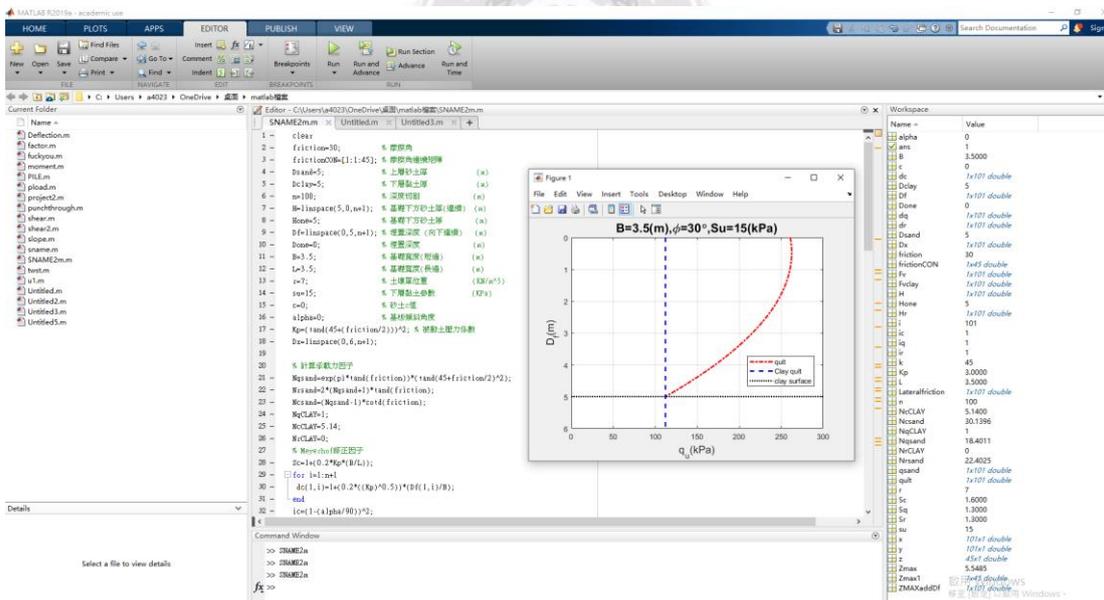


圖 3-29 Matlab 使用介面

# 自升式平台船基礎於砂土(上層)-黏土(下層)之承載力評估

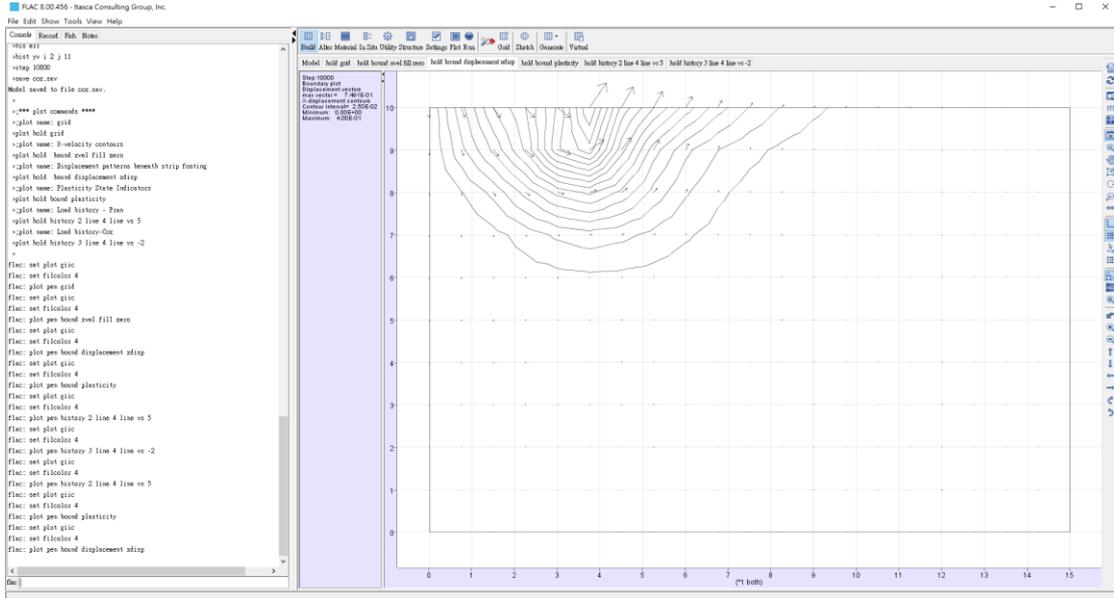


圖 3-30 FLAC 8.1 使用介面

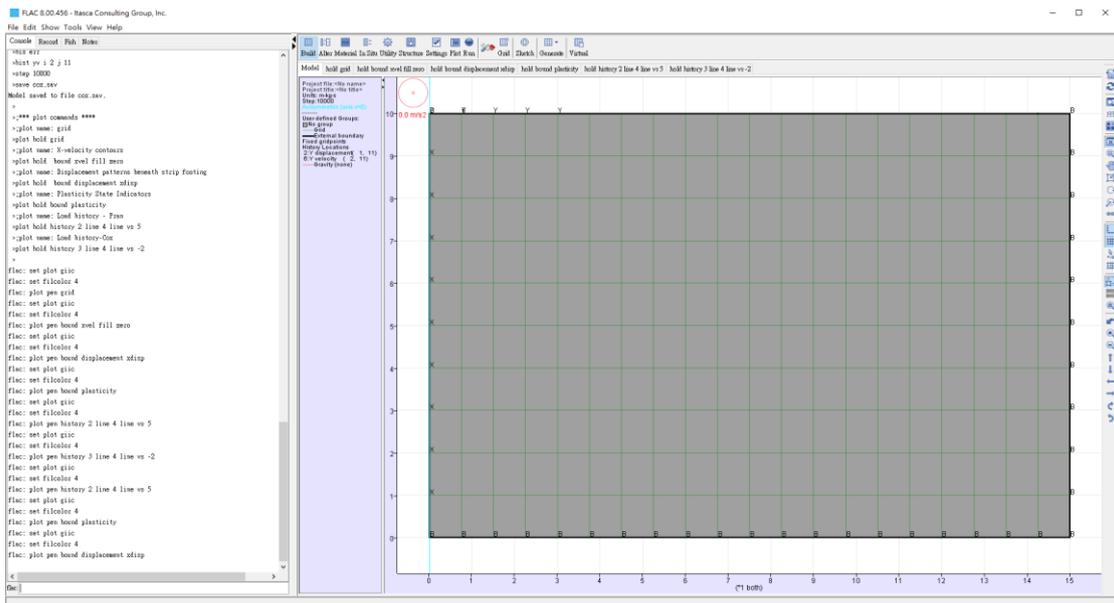


圖 3-31 FLAC 8.1 使用介面

## 第四章 研究結果與討論

### 4-1 土壤破壞弧討論

假設基礎寬度(B)與其他土壤參數固定的情況下，土壤破壞弧的改變會隨著土壤內摩擦角 $\theta$ 的改變而有所變動，其所繪出之破壞弧會連接著主動破壞區，形成一螺旋破壞區(輻射區)。由於對數螺旋區為對數螺線，無法利用手繪完成，為了使圖形精準度夠高，因此利用 3-3 節所介紹的程式 Matlab 進行輔助繪圖。在決定承載力分析模式時，土壤破壞弧是相當重要的參考依據，雖然其看似與土壤種類無關，只要給定基礎寬度及內摩擦角即可求得。但若是基礎坐落於黏土層上，還必須考慮基礎為長期加載分析，如水壩；或是短期加載分析，來決定是否要採用不排水剪力強度來分析。若為短期分析或採用不排水剪力強度分析時，取有效摩擦角來進行計算之結果將會較不保守。對於單一土層的土壤參數採用較為單純，而如本報告在多層土層之間該如何選取土壤參數成為一重要問題。因此必須利用土壤破壞弧之深度輔助判斷該如何設定參數。

## 4-2 Punch-through mode 討論

由於本報告已經利用 SNAME 所建議之公式  $k_s \tan \phi \cong \frac{3c_u}{Br'}$ ，將 punch-through mode 公式中最難以選取之數值:貫穿剪力係數  $k_s$ ，替換為一常數，降低計算上較不準確且複雜之處。本報告將上層砂土層內摩擦角假設為定值，透過改變基礎寬度(B)，並分別對不同的基礎寬度做埋置深度( $D_f$ )的改變，藉此觀察在不同的(H/B)下，基礎承載力會有何種趨勢。

由前述 3-2-2 節所分析之結果可以得到，若(H/B)之值越小，其承載力模式將越有可能由貫穿剪力破壞模式所主控。如圖 3-14，當基礎寬度(B)為 5m 時，其(H/B)=1，即便基礎坐落於地表，但整體承載力皆是由 punch-through mode 所主控;而當基礎寬度(B)為 1m 時，其(H/B)=5，因此在埋置深度( $D_f$ )較淺時，承載力將會由淺基礎破壞模式所控制，待埋置深度( $D_f$ )到達基礎破壞弧影響下層土壤，並做過承載力上下限評估之後，其圖形將會如圖 3-22 發生折角，此折角表示承載力將由淺基礎破壞模式轉由貫穿剪力破壞模式所主控。

而在工程實務上，punch-through 的發生往往會造成嚴重的財務損失以及人員傷亡，藉由本報告讓我們能對貫穿剪力破壞有初步的認識及瞭解，其更深入之破壞之走向，有待未來更進一步研究。

### 4-3 Load-spread mode 討論

利用此模型所做的分析相較於 punch-through mode 將會較簡單且快速。除了土壤參數以外，計算過程中只需要考慮其投影斜率( $n$ )即可計算出極限承载力。在其簡單且快速的計算過程下，承载力皆是由下層黏土層所提供，我們將會忽略上層砂土層所能提供之側向摩擦力以及承载力，因此所計算出之承载力相對於實際情況可以會比較保守。

而在計算中，另一困難之處在於如何取用其建議式中的投影斜率( $n$ )，雖 SNAME 建議採用 3 至 5，前者較為不保守，可能會過於高估其極限承载力；後者雖較為保守，但在這兩者之間並無考慮砂土摩擦力，雖然 punch-through mode 的困難之處可以利用此公式解決，但何種模型與真實情況較為接近，或是需利用此兩種方式進行交叉比對，有待未來做更進一步的探討。

## 4-4 結果討論

以 3-1 所述，在固定其基礎寬度以及其他土壤參數後，可知當內摩擦角 $\phi$ 小於一定值，破壞弧深度尚未影響至下層土層時，其破壞模式將是由淺基礎破壞模式所主控。但在計算中並未考慮多層土層、側向摩擦力、應力擴散等變因，因此理論模型與真實情形相較情形之準確性，還有待商榷。

以 punch-through mode 以 load-spread mode 分析此問題，可以得知，承载力的大小除了與基礎寬度(B)以及內摩擦角有關之外，上層土層厚度(H)與基礎寬度(B)的比值，及埋置深度( $D_f$ )與基礎寬度(B)的比值，將會對承载力造成一定的影響，必須納入整體運算進行考量。又因為在離岸工程中，基礎的尺寸往往較陸域工程的大上好幾倍，因此上層土層厚度(H)與基礎寬度(B)的比值變為至相當重要。

雖 SNAME 所建議的這兩種方式皆有些缺陷，與純砂土承载力做比較有些落差，尤其是在上層土層厚度(H)與基礎寬度(B)的比值接近時，所計算之承载力的正確性還有待商榷。但也因此兩種方式的差異，讓此問題值得討論研究。其結果仍需要做更進一步的討論，才可讓結果更趨一致。

## 第五章 參考文獻

- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*, 5<sup>th</sup> Edition. McGraw-Hill Companies.
- Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. Boston: Cengage Learning.
- McCarthy, D. F. (2006). *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics*, 7<sup>th</sup> Edition. Mohawk Valley Community College.
- Hansen, J. B. (1970). *A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity*, Bulletin 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2016) FLAC — *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.1*. Minneapolis: Itasca.
- Meyerhof, G.G. (1963). Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations, *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 1, No. 1, pp .16-26.
- Meyerhof, G.G. (1974). Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay, *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 11, No. 2, pp .224-229.
- Meyerhof, G.G. and Hanna, A. M. (1974). Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soil under Inclined Load, *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 15, No. 4, pp. 565-572.
- Prandtl, L. (1921). Hauptaufsätze: über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 1, 15-20.

SNAME (2008). Guidelines for Site Specific Assessment of Mobile Jack-up Units. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical & Research Bulletin 5- 5A, New Jersey.

Shoaei, M. D., Alkarni, A., Noorzai, J., Jaafar, M. S. and Huat, B. B. K. (2012). Review of Available Approaches for Ultimate Bearing Capacity of Two-Layered Soils. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 18, No. 4, pp. 469–482.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.

Vesic, A. S. (1963). Analysis of Ultimate Loads of shallow Foundation. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. SM1, pp. 45-73.

