

逢甲大學學生報告 ePaper

離岸基礎在均質黏性土之圓弧滑動承載力探討

**The Bearing Capacity Analysis of Offshore  
Foundation on homogeneous Cohesive Soils by Slip  
Circle Method**

作者：姜瀚荃

系級：土木四乙

學號：D0712051

開課老師：紀昭銘

課程名稱：基礎工程(二)

開課系所：土木工程學系

開課學年： 109 學年度 第 2 學期

## 中文摘要

台灣這幾年積極推廣離岸風電(Offshore wind power)，都是透過自升式平台船進行風機的安裝。由於台灣風場的地質複雜，事前對於承載力的分析就相當重要。本文探討離岸基礎在均質黏性的土壤，藉由改變上土層厚度(H)及固定一半基礎寬度(b)的情況下，基礎發生圓弧破壞時的破壞半徑(r)及破壞角( $\theta$ )對於極限承載力的影響。研究利用 Reddy and Srinivasan(1967&1971)所提出的理論(圓弧滑動破壞機制)、Matlab 程式、Excel 進行數值分析以及繪出基礎承載力因子圖與 Reddy and Srinivasan(1967&1971)的基礎承載力因子圖進行比對。

關鍵字：

1. 離岸基礎工程
2. 離岸風力發電
3. 全面剪力破壞
4. 承載力因子



## Abstract

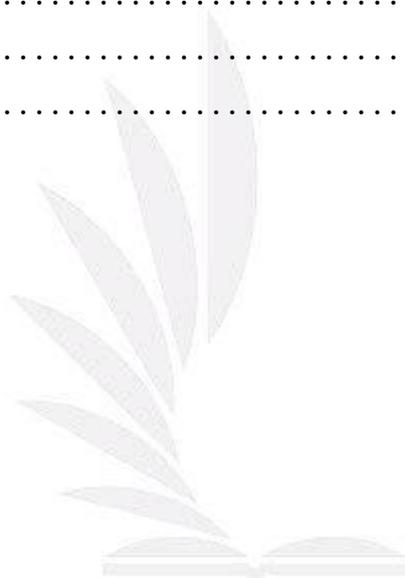
In the past few years, Taiwan has actively promoted offshore wind power, and installed wind turbines through jack-up barges. Due to the complex geology of Taiwan's wind farms, prior analysis of the bearing capacity is very important. This article discusses the offshore foundation on homogeneous cohesive soil, by changing the upper soil layer thickness ( $H$ ) and fixing half the width of the foundation ( $b$ ), the influence of the radius of failure ( $r$ ) and the angle of failure ( $\theta$ ) on the ultimate bearing capacity during arc failure, The research uses the theory (Circular Failure Mechanisms) proposed by Reddy and Srinivasan (1967&1971), Matlab program and Excel for numerical analysis, and draws a basic bearing capacity factor diagram for comparison with the basic bearing capacity factor diagram of Reddy and Srinivasan (1967&1971).

### Keyword :

1. Offshore foundation engineering
  2. Offshore wind turbine
  3. General Shear Failure
  4. Bearing capacity factors
- 

## 目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
圖目錄.....	4
一、前言.....	5
二、理論分析.....	6
2-1 淺基礎承載力的破壞型式.....	6
2-2 Terzaghi 淺基礎承載力理論.....	7
2-2-1 Terzaghi 承載力公式假設.....	7
2-2-2 Terzaghi 承載力公式.....	8
2-3 Reddy and Srinivasan 圓弧滑動法.....	9
三、研究結果.....	11
四、結論.....	15
參考文獻.....	17



## 圖目錄

圖 1 台灣 109 年電力結構分布 .....	5
圖 2 自升式平台船施工情形 .....	5
圖 3 全面剪力破壞(Vesic,1963) .....	6
圖 4 局部剪力破壞(Vesic,1963) .....	6
圖 5 貫穿剪力破壞(Vesic,1963) .....	6
圖 6 淺基礎全面剪力破壞模型 (Das, 2016).....	7
圖 7 全面剪力破壞之 Terzaghi 承載力因數(施國欽, 2014).....	8
圖 8 Reddy and Srinivasan 圓弧滑動破壞模型 .....	9
圖 9 承載力因子圖 .....	11
圖 10 $H/b=0.2$ 之破壞弧的範圍 .....	12
圖 11 $H/b=0.4$ 之破壞弧的範圍.....	12
圖 12 $H/b=0.6$ 之破壞弧的範圍 .....	13
圖 13 $H/b=0.8$ 之破壞弧的範圍 .....	13
圖 14 $H/b=1.0$ 之破壞弧的範圍 .....	14
圖 15 $H/b=1.2$ 之破壞弧的範圍 .....	14
圖 16 $H/b=0$ 的承載力因子圖 .....	15
圖 17 $H/b=0\sim 1.0$ 的承載力因子圖 .....	15
圖 18 $H/b=0.5\sim 3$ 的承載力因子圖 .....	16
圖 19 $H/b=0.6$ 之破壞弧的範圍 .....	16
圖 20 $H/b=1.0$ 之破壞弧的範圍 .....	16

# 一、前言

台灣的發電結構(圖 1)，由燃燒化學燃料的火力發電為主要發電來源，佔台灣發電比例約 78.5%，大量使用火力發電進而排放出很多的廢氣，導致全球暖化日益嚴重。因為如此，台灣政府積極推動離岸風力發電(offshore wind power)，想要發展新型能源，達到能源可以回收再利用的原則。離岸風機的施作工程都會透過自升式平台船(jack-up barge)來完成海上的所有工程(圖 2)。在安裝風機前要做好海域的環境分析以及和安裝基礎前要進行鑽探試驗、土壤的性質分析以及最終本研究要探討的主題為計算出基礎在均質黏性土壤的圓弧滑動承載力因子。

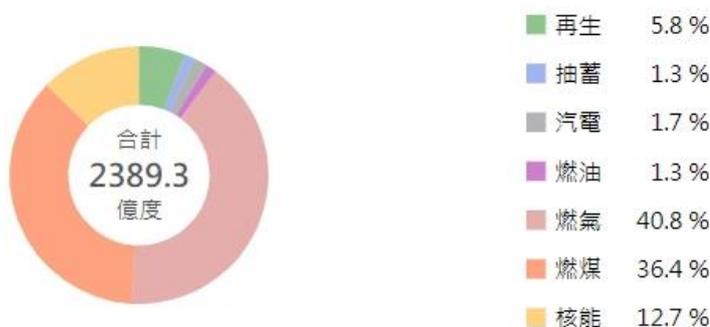


圖 1 台灣 109 年電力結構分布

(form:[https://www.taipower.com.tw/tc/chart\\_m/a01\\_%e9%9b%bb%e5%8a%9b%e4%be%9b%e9%9c%80%e8%b3%87%e8%a8%8a\\_%e9%9b%bb%e6%ba%90%e9%96%8b%e7%99%bc%e8%a6%8f%e5%8a%83\\_%e6%ad%b7%e5%b9%b4%e7%99%bc%e8%b3%bc%e9%9b%bb%e9%87%8f%e5%8f%8a%e7%b5%90%e6%a7%8b.html](https://www.taipower.com.tw/tc/chart_m/a01_%e9%9b%bb%e5%8a%9b%e4%be%9b%e9%9c%80%e8%b3%87%e8%a8%8a_%e9%9b%bb%e6%ba%90%e9%96%8b%e7%99%bc%e8%a6%8f%e5%8a%83_%e6%ad%b7%e5%b9%b4%e7%99%bc%e8%b3%bc%e9%9b%bb%e9%87%8f%e5%8f%8a%e7%b5%90%e6%a7%8b.html))



圖 2 自升式平台船施工情形

(form:<https://www.offshore-mag.com/rigs-vessels/article/14203246/dsme-to-build-eneti-wind-turbine-installation-vessel>)

## 二、理論分析

### 2-1 淺基礎承載力的破壞型式

#### 1. 全面剪力破壞(General Shear Failure) (Vesic,1963)

由圖 3(a)可以觀察到破壞發生的時間且很劇烈，周圍地表也有隆起的現象。在基礎壓力與沉陷量的關係曲線中可以發現有明顯的尖峰強度，一般較容易發生在壓縮性低的緊密土壤，如圖 3(b)所示。



a 全面剪力破壞型式

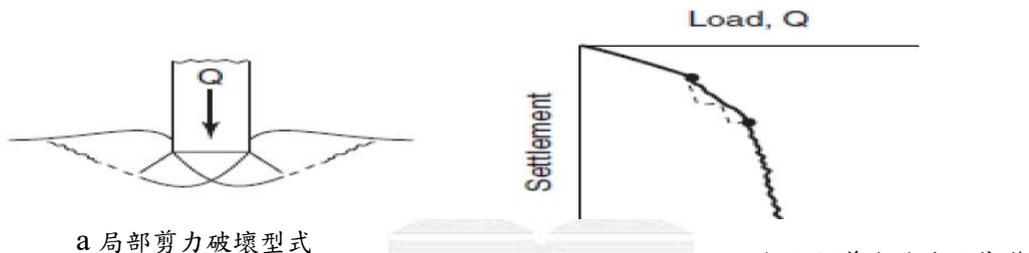
b 全面剪力破壞的基礎

圖 3 全面剪力破壞(Vesic,1963)

載重與沉陷量關係圖

#### 2. 局部剪力破壞(Local Shear Failure) (Vesic,1963)

由圖 4(a)可以觀察到滑動面發生在土層內沒有延伸到地表處。在圖 4(b)可以發現沒有明顯的尖峰強度，一般較容易發生在中等緊密砂土或正常壓密黏土。



a 局部剪力破壞型式

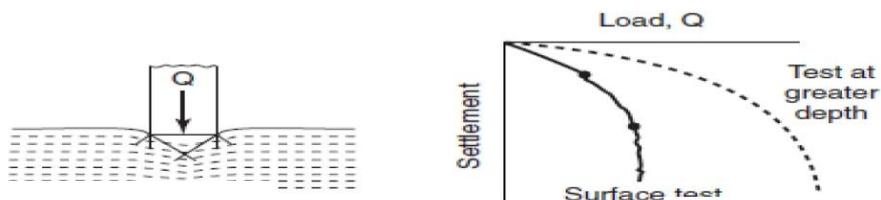
b 局部剪力破壞的基礎

圖 4 局部剪力破壞(Vesic,1963)

載重與沉陷量關係圖

#### 3. 貫穿剪力破壞(Punching Shear Failure) (Vesic,1963)

由圖 5(a)可觀察到基礎下方沒有明顯的剪切滑面，基礎隨著壓力增加而迅速向下垂直貫入，直到破壞。通常較容易發生在極鬆軟的土壤。



a 貫穿剪力破壞型式

b 貫穿剪力破壞的基礎

圖 5 貫穿剪力破壞(Vesic,1963)

載重與沉陷量關係圖



## 2-2-2 Terzaghi 承載力公式

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$$

式 1

式中

$q_{ult}$  為基礎發生全面剪力破壞時所對應的極限承載力

$c$  為土壤凝聚力

$q$  為土壤覆土壓力

$B$  為基礎寬度

$\gamma$  為土壤單位重

$N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_\gamma$  為承載力因子(bering factors)，可參考圖 7

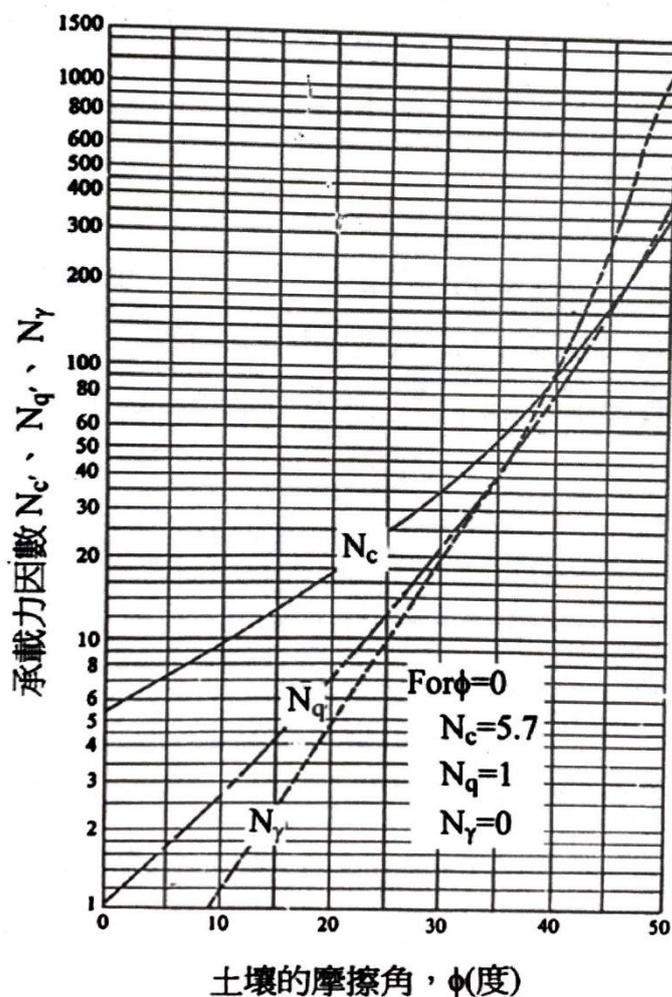


圖 7 全面剪力破壞之 Terzaghi 承載力因數(施國欽, 2014)

## 2-3 Reddy and Srinivasan 圓弧滑動法

Reddy and Srinivasan (1967 & 1971)運用圓弧滑動破壞機制(Circular Failure Mechanisms)且使用極限平衡理論(Limit Equilibrium Theorem)提出條形基礎(perfect rough strip footing)在互層黏性土壤的表面基礎極限承載力分析模型如圖8。Reddy and Srinivasan (1971)的基礎極限承載力分析模型考量了黏性土壤異向性( $K$ )、上下層黏性土壤不排水剪力強度比( $n$ )、主應力旋轉因素( $\psi$ )以及上土層厚度( $H$ )。Reddy and Srinivasan(1971)所提出之計算模型可參考式2。

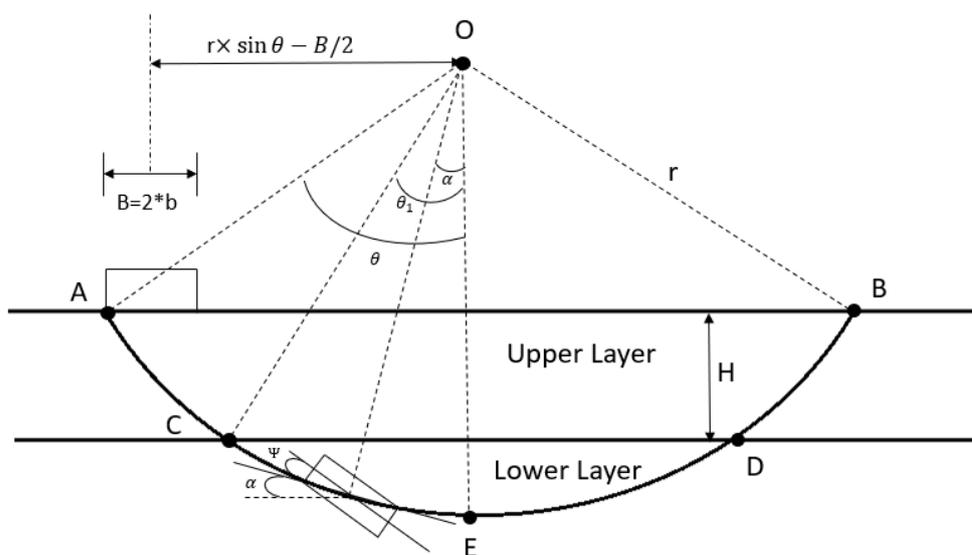


圖 8 Reddy and Srinivasan 圓弧滑動破壞模型

(改繪自 Reddy and Srinivasan, 1971)

$$N_c^* = \frac{\frac{r^2}{b^2}}{2K \left[ \left( \frac{r}{b} \right) \sin\theta - 1 \right]} \left\{ \begin{array}{l} 2\theta + 2n\theta_1 + (K-1)\theta + n(K-1)\theta_1 \\ - \frac{K-1}{2} \left[ \frac{\sin 2(\theta + \psi)}{2} + \frac{\sin 2(\theta - \psi)}{2} \right] \\ - \frac{K-1}{2} \left[ \frac{\sin 2(\theta_1 + \psi)}{2} + \frac{\sin 2(\theta_1 - \psi)}{2} \right] \end{array} \right\}$$

式 2

其中  $\theta_1 = \cos^{-1} \left( \cos \theta + \frac{H}{r} \right)$

$$n = \frac{S_{u(\text{Vertical}),\text{botton}}}{S_{u(\text{Vertical}),\text{top}}} - 1 = \frac{S_{u(\text{Horizon}),\text{botton}}}{S_{u(\text{Horizon}),\text{top}}} - 1$$

$$K = \frac{S_{u(\text{Vertical}),\text{botton}}}{S_{u(\text{Horizon}),\text{botton}}} = \frac{S_{u(\text{Vertical}),\text{top}}}{S_{u(\text{Horizon}),\text{top}}}$$

r : 土壤破壞弧半徑

b : 一半基礎寬度

$\psi$  : 為土壤破壞面與主應力夾角，對於異向性黏土 Lo(1965)建議可取 $35^\circ$ 。



### 三.研究結果

考量此研究土壤為均質且非均向(K=1)的黏性土壤，可將式(2)簡化成式(3)。

$$N_c = \frac{q_{ult}}{S_{u0}} = \frac{\left(\frac{r}{b}\right)^2}{2 * \left(\frac{r}{b} \sin \theta - 1\right)} \times [2\theta + 2n\theta_1] \tag{式 3}$$

b: 一半基礎寬度。

r: 圓弧破壞面的半徑。

θ: 圓弧破壞面在中心對角的一半角度。

K: 土壤異向性係數

而根據 Reddy and Srinivasan(1967 & 1971)運用圓弧滑動破壞機制 (Circular Failure Mechanisms)可得出式 3 中 r 之範圍為 0.5b~10b 之間和 θ 之範圍為 0°~ 90°之間。帶入  $-1 \leq n \leq 1$  及  $0 \leq \frac{H}{b} \leq 3$ ，進行  $N_c$  值的計算。

運用上述的條件及數值，帶入式(3)中，運用 Matlab 進程式碼的撰寫以及計算出承載力因子的數值，再利用 Excel 將圖(9)繪製出來。

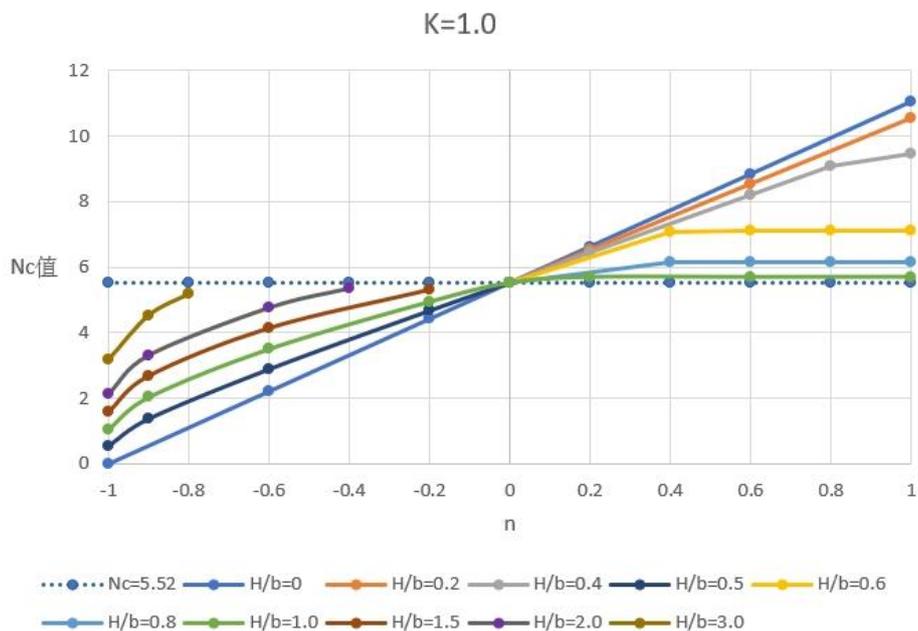


圖 9 承載力因子圖

## 離岸基礎在均質黏性土之圓弧滑動承載力探討

在圖(9)中每一個  $n$  值對應每一個  $N_c$  值都會有各自的破壞弧的範圍，如圖(10)~(15)所示。

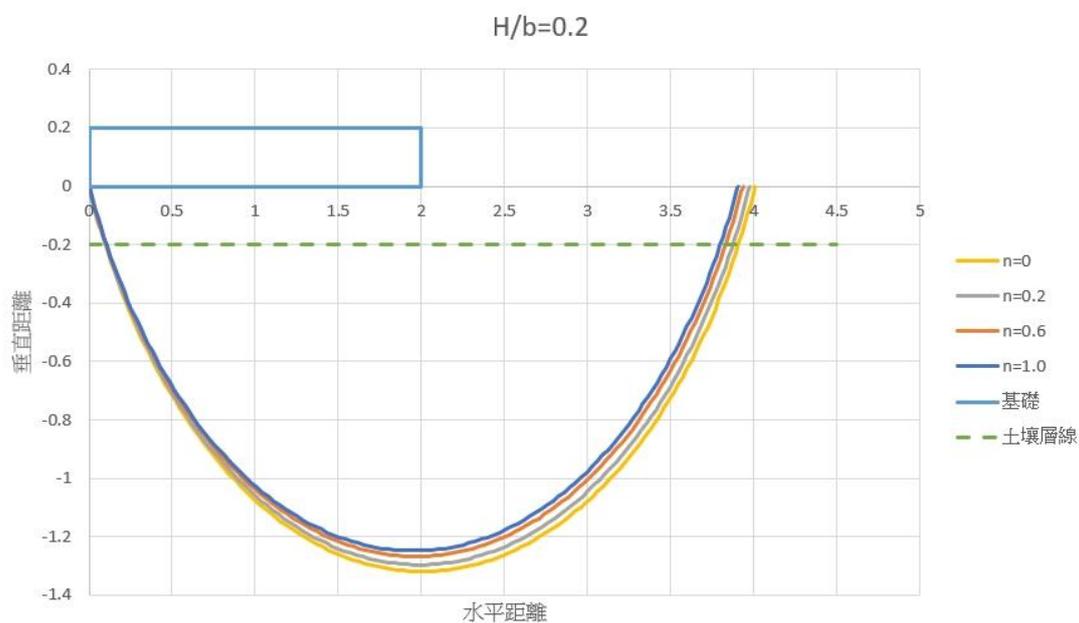


圖 10  $H/b=0.2$  之破壞弧的範圍

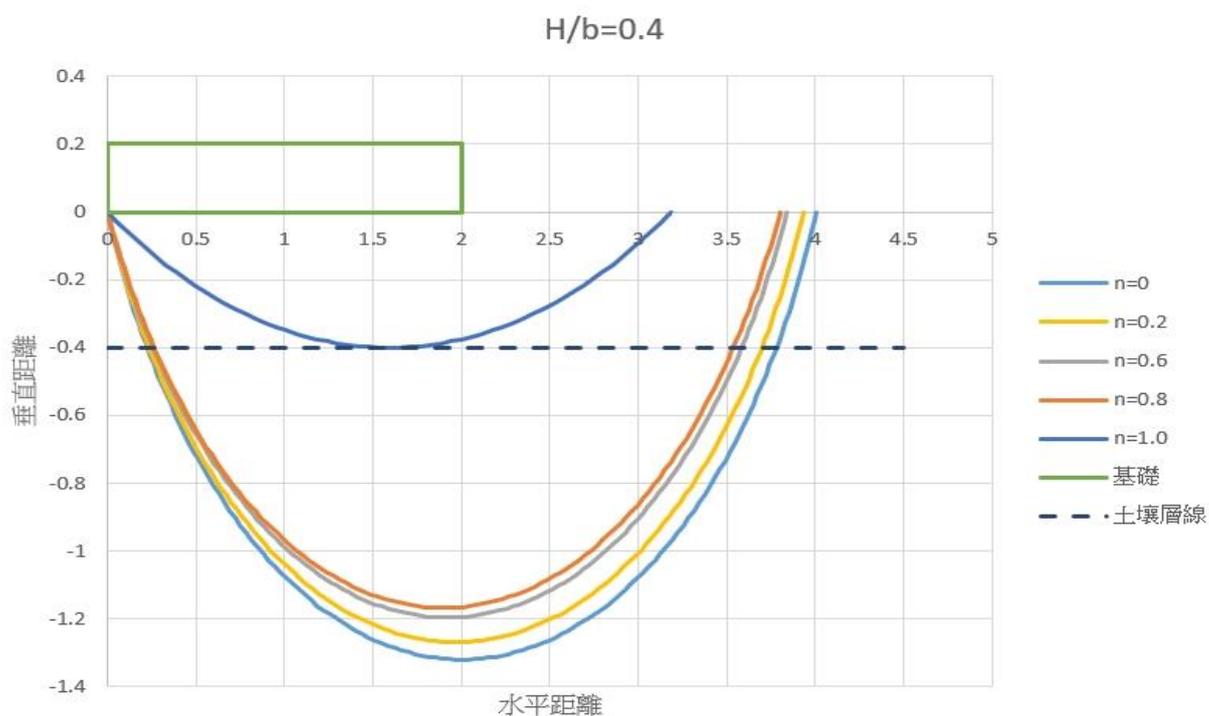


圖 11  $H/b=0.4$  之破壞弧的範圍

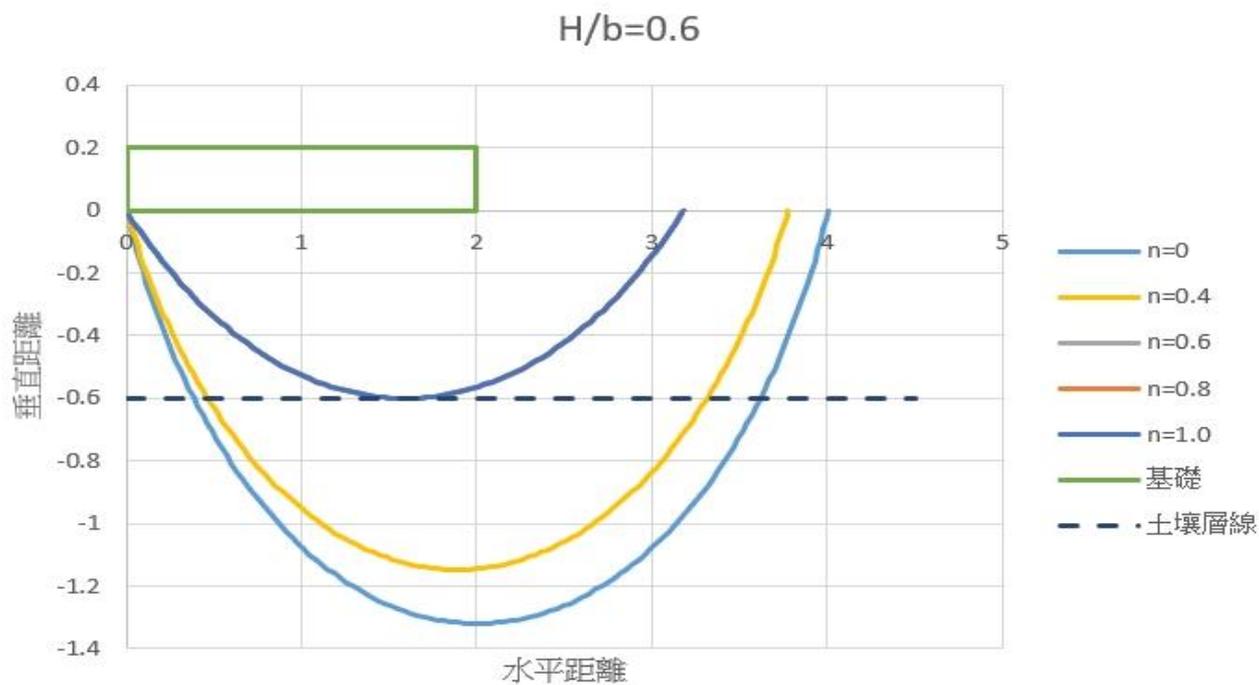


圖 12  $H/b=0.6$  之破壞弧的範圍

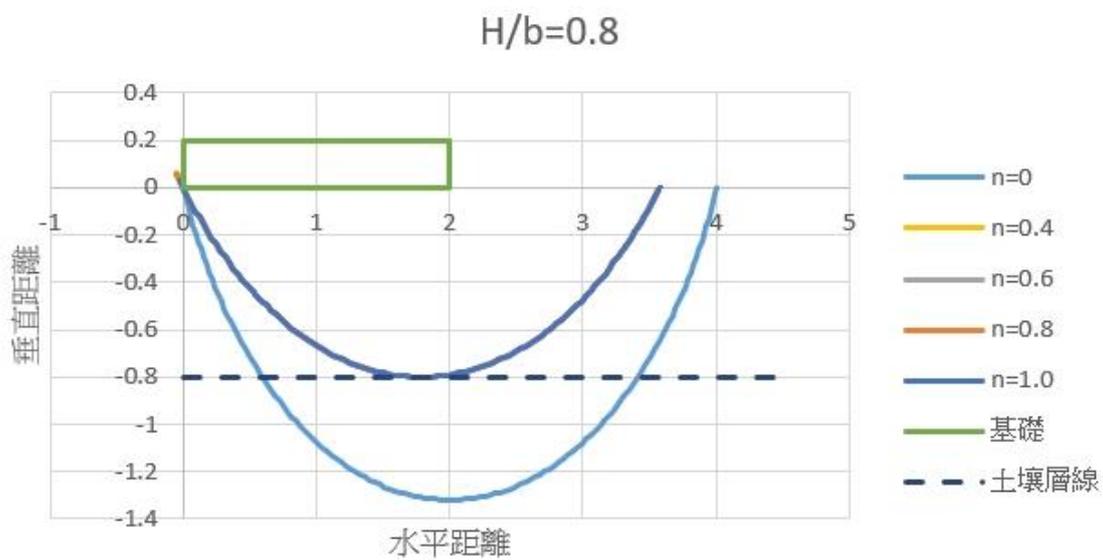


圖 13  $H/b=0.8$  之破壞弧的範圍

離岸基礎在均質黏性土之圓弧滑動承载力探討

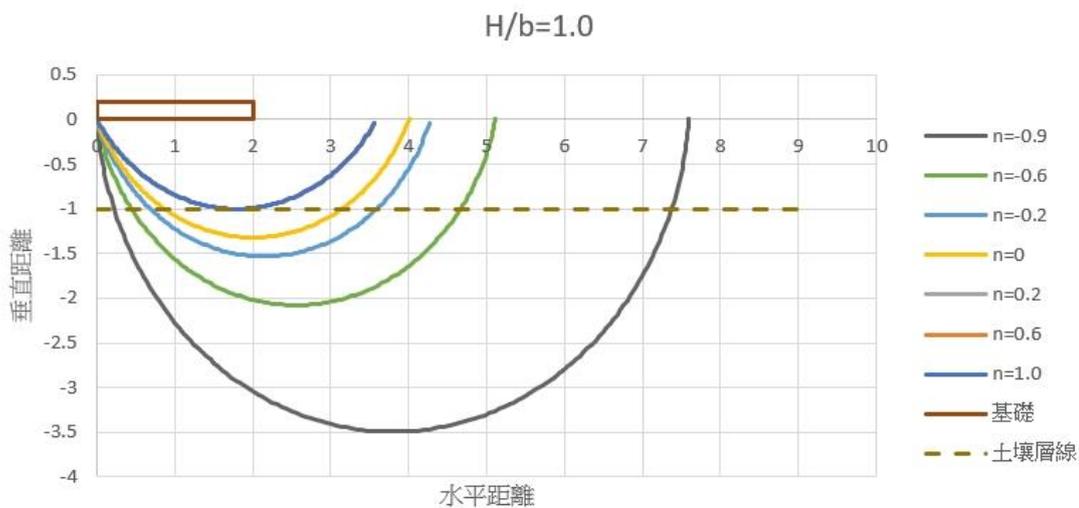


圖 14  $H/b=1.0$  之破壞弧的範圍

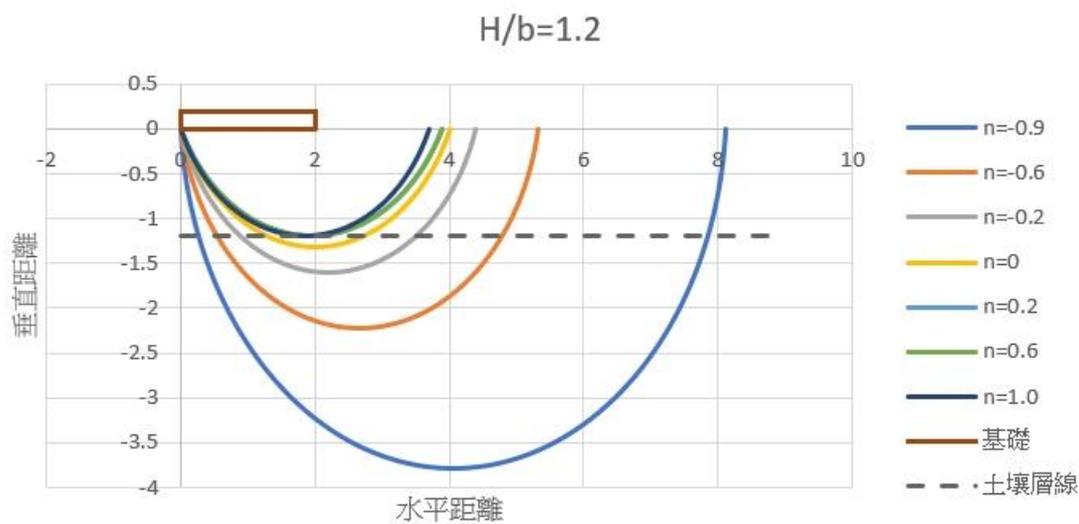


圖 15  $H/b=1.2$  之破壞弧的範圍

## 四、結論

在計算時會將基礎一半寬度( $b$ )設為定值，只去改變上土層高度( $H$ )進而求得破壞面在中心對角的一半角度 $\theta$ 及破壞的半徑 $r$ 。如圖(16)所示，當 $n$ 值慢慢增加時，計算出來的承載力因子 $N_c$ 也會跟著增加。

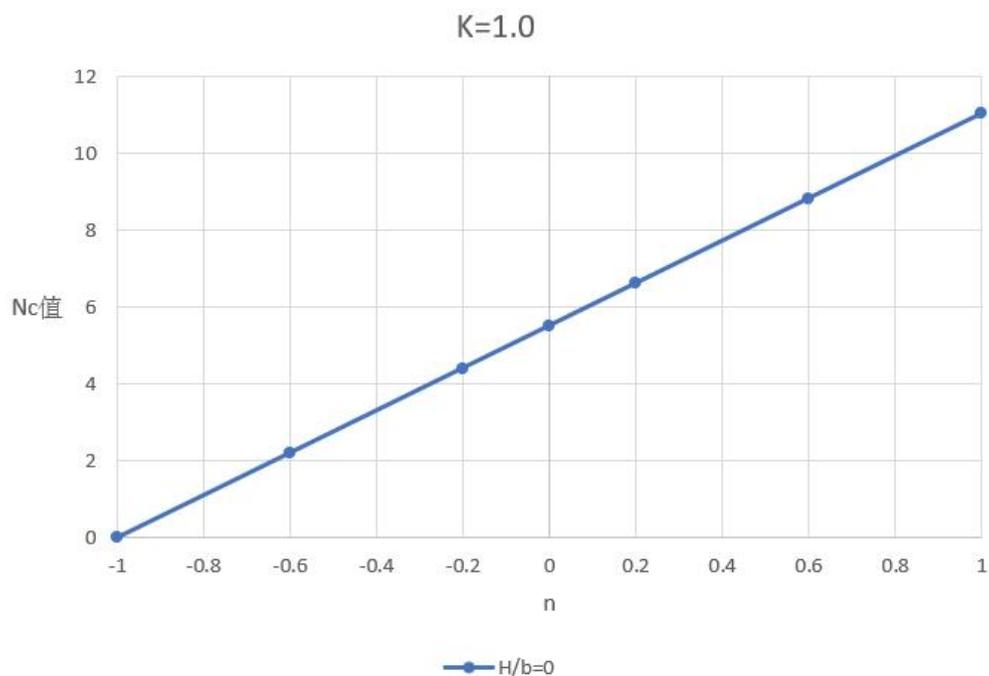


圖 16 H/b=0 的承載力因子圖

當 $\frac{H}{b}$ 的值越大，隨著 $n$ 值的增加，所繪出的曲線會趨於平緩，甚至會出現定值，如圖(17)所示。

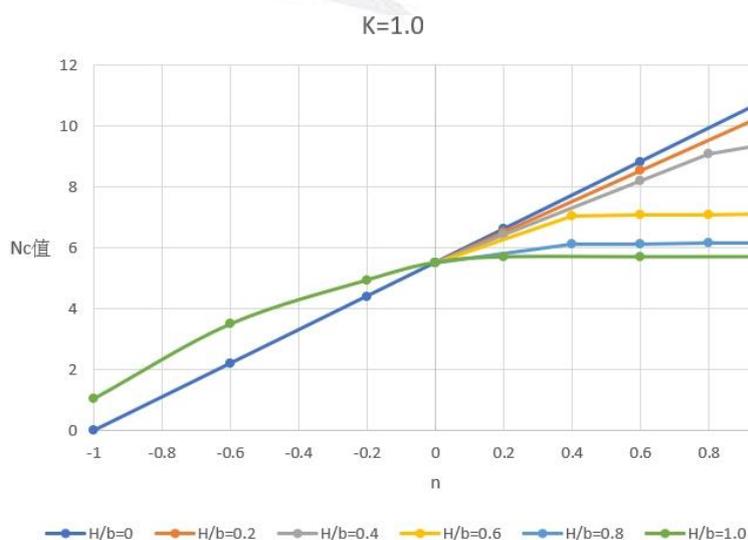


圖 17 H/b=0~1.0 的承載力因子圖

當  $\frac{H}{b}$  大於 0 時，隨著  $n$  值的減少，對於承載力因子  $N_c$  的影響越來越小，導致曲線斜率越來越陡，如圖(18)所示。

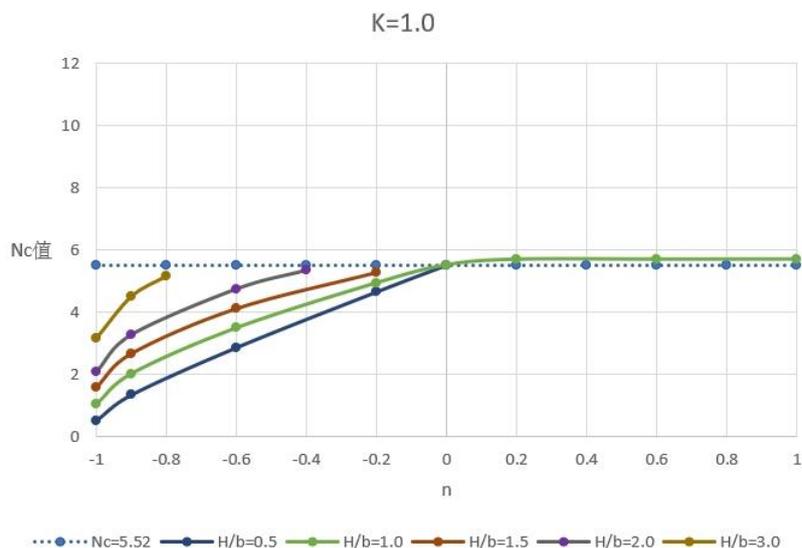


圖 18  $H/b=0.5\sim 3$  的承載力因子圖

從圖(9)中的右邊的數值搭配圖(19)可以發現在相同  $\frac{H}{b}$  的條件下，當  $n$  值從小大到時，可以發現破壞弧的半徑增加，但增加的幅度相對較小。從圖(9)中左邊的數值搭配圖(20)可以發現在相同  $\frac{H}{b}$  的條件下，當  $n$  值從小大到時，可以發現破壞弧的半徑減少，減少的幅度相對較大。

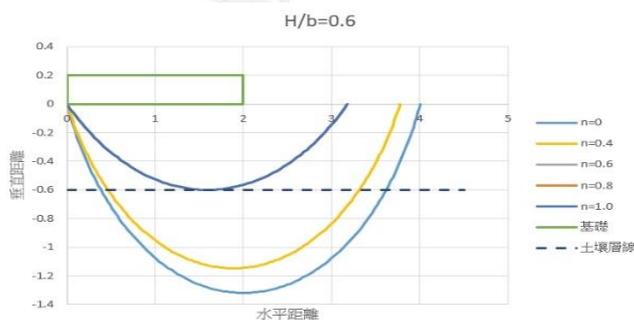


圖 19  $H/b=0.6$  之破壞弧的範圍

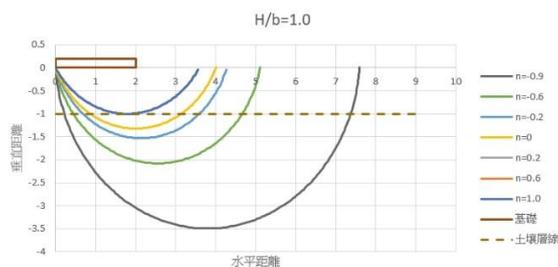


圖 20  $H/b=1.0$  之破壞弧的範圍

## 參考文獻

1. 紀昭銘、林正山、黃普源 (2019)，大型基礎在五層黏性土壤之承載力評估。第四十一屆海洋工程研討會論文集，第 660-665 頁。
2. 施國欽(2014)，大地工程學(二)基礎工程篇。臺北市：文笙書局。
3. Das, B. M. (2016). *Principles of foundation engineering (8th edition)*. Cengage Learning.
4. Meyerhof, G. G. (1963).Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16–26.
5. Reddy, A. S., & Srinivasan, R. J. (1967). *Bearing Capacity of Footings on Layered Clays*. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 93(SM2), 83–99.
6. Reddy, A. S., & Srinivasan,R.J. (1971). *Bearing Capacity of Footings on Clays*. *Soils and Foundations*, 11(3), 51–64.
7. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.
8. Lo, K. Y. (1965).*Stability of Slopes in Anisotropic Soils*.*Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 91(SM4), 85-106.

