



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

Discussion on the Arc Sliding Bearing Capacity of Offshore Foundation in Homogeneous Clay

作者：胡程翔

系級：土木四乙

學號：D0741552

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

摘要

在現今地球石化能源資源有限且對環境造成巨大傷害的情況下，各國都在尋找更有效的再生能源。在 2020 年，台灣再生能源發電量共 15,119,811 千度，其中風力發電量排名第四占據 2,289,288 千度，因為太陽能造價昂貴、廢棄物發電需要焚化、水力需要考量氣候因素，風力是相對較穩定於前三者的再生能源，而且台灣的地理條件也很適合風力發電。

台灣西半部海域的離岸風場的地質條件複雜，因離岸基礎尺寸比一般陸地上的基礎大得多，故基礎加載後影響的土壤範圍會延伸至下層土壤，在這個範圍中有黏土、粉土或砂土等不同性質土壤互層，所以需考量基礎承載力在互層土壤之間的影響，本文在進行基礎承載力分析時將會針對黏性土壤之現地狀況作分析。

本文考量基礎於均質黏性土壤、強(上層)-弱(下層)黏性土互層，以及弱(上層)-強(下層)黏性土互層，探討離岸基礎於均質黏性土壤之基礎極限承載力。本文將使用圓弧滑動法，透過 MATLAB 數據和 Excel 圖形探討均質黏性土壤之承載力因子變化與黏性土壤之破壞分析，並根據結果進行討論。

關鍵字：離岸基礎工程、均質黏性土壤、基礎承載力、自升式平台船

Abstract

In today's situation where the earth's petrochemical energy resources are limited and cause great harm to the environment. Countries are looking for more efficient renewable energy. In 2020, Taiwan's renewable energy power generation totaled 15,119,811 kilowatt-hours. Among them, wind power generation ranks fourth with 2,289,288 kilowatt-hours. Because Solar energy is expensive, wind power generation needs incineration, and water power needs to consider climate factors. Wind is a relatively stable renewable energy source than the first three and Taiwan's geographical conditions are also very suitable for wind power generation.

The geological conditions of offshore wind farms in the western Taiwan sea areas are complex. Since the sizes of offshore foundations are much larger than those of onshore, the soil affected by foundation loading will extend to the underlying soil. In this range, there are interlayers of different types of soil such as clay, silt or sand. Therefore, it is necessary to consider the influence of the foundation bearing capacity between the interlayer soils. This article analyzes the current situation of cohesive soil when analyzing the foundation bearing capacity.

Based on consideration herein homogeneous cohesive soil, strong (upper layer) - weak (lower) cohesive soil interbedded, and weak (upper)-strong (lower) cohesive layered soils , explore the ultimate bearing capacity of offshore foundations in homogeneous clay soils. This article uses the arc sliding method to investigate the changes of the bearing capacity factor of homogeneous clayey soil and the failure surfaces of clayey soil by MATLAB data and Excel graphics.

Keywords: Offshore Foundation Engineering, homogeneous cohesive soil, Bearing Capacity of Foundation, jack-up platform ship

目次

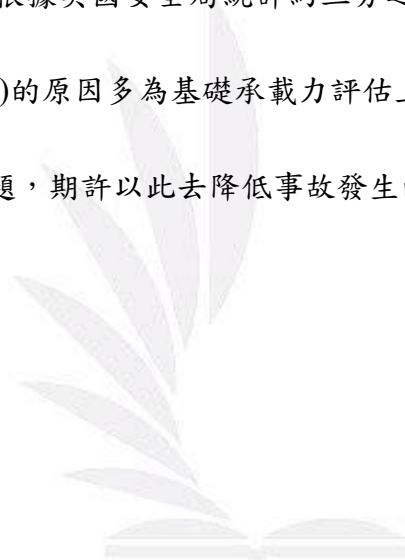
摘要.....	i
Abstract	ii
目次.....	ii
第一章 前言.....	1
第二章 研究目的.....	5
第三章 文獻探討.....	7
3-1 基礎破壞形式.....	7
3-2 均質土壤淺基礎承載力理論.....	9
3-3 Reddy and Srinivasan 承載力計算模型.....	11
第四章 結果與討論.....	13
參考文獻.....	17

第一章 前言

在現今地球石化能源資源有限且對環境造成巨大傷害的情況下，尋找更有效的再生能源(如：太陽能、風力、潮汐能、地熱能、水能、生物燃氣…等)被世界各國視為一個不可輕忽的議題。根據台灣電力公司網公布再生能源發展概況，109 年我國再生能源發電量共 15,119,811 千度，其中風力發電量排名第四占據 2,289,288 千度(前三為太陽能 6,085,793 千度、廢棄物發電 3,562,449 千度、慣常水力 3,021,694 千度)，因為太陽能造價昂貴、廢棄物發電需要焚化、水力需要考量氣候因素，風力是相對較穩定於前三者的再生能源，而且台灣的地理條件也很適合風力發電。

根據國際工程顧問公司 4C Offshore 在 2014 年針對全球「23 年平均風速觀測」的研究，發現世界上風力最強的 20 處離岸風場，台灣海峽就佔了 16 處，且絕大多數在彰化外海。台灣有如此得天獨厚的地理位置，加上國際風能開發之趨勢，所以台灣政府近年來大力發展離岸風力發電(圖 2)，此外根據台灣經濟部能源局統計台灣自身能源生產率不足 3%，高達約莫 98% 能源需仰賴進口，發展離岸風電不只能提高國內能源自主比例，提供穩定的綠電給企業，更能幫助本土產業在國際供應鏈上更有競爭力。離岸風場的設備涵蓋鋼鐵等重工材料、又須在碼頭及海上進行大型建造工程，對於重工業和海事工程產業也帶來巨大的商機。除此之外，如金融業、環境工程與碼頭服務等產業也均因離岸風電而得以開拓新的發展機會。

離岸風機的安裝過程需使用多種施工船進行作業，其中自升式平台船被廣泛作用於各項離岸工程。自升式平台船運作可略分為三階段(圖 4)。於圖 4 中(a)階段為自升式平台船抵達預定施工位址，此階段自升式平台船仍漂浮於海面尚未進行任何固定動作。圖 4 中(b)階段為預加載(Preload)階段，此階段自升式平台船將基腳降至海平面下利用自重和外加載重將基腳貫入海床中直至到達預定貫入深度。圖 4 中(c)階段為確認自升式平台船的基礎穩定，而後將船體(Hull)升高脫離海平面以防止海浪衝擊進而影響船體，屆時船體為個可施工的工作平台。根據英國安全局統計約三分之一的自升式平台發生事故(Health & Safety Execution,2009)的原因多為基礎承載力評估上出現問題，因此如何評估其承載力是一個重要研究的課題，期許以此去降低事故發生的機率。



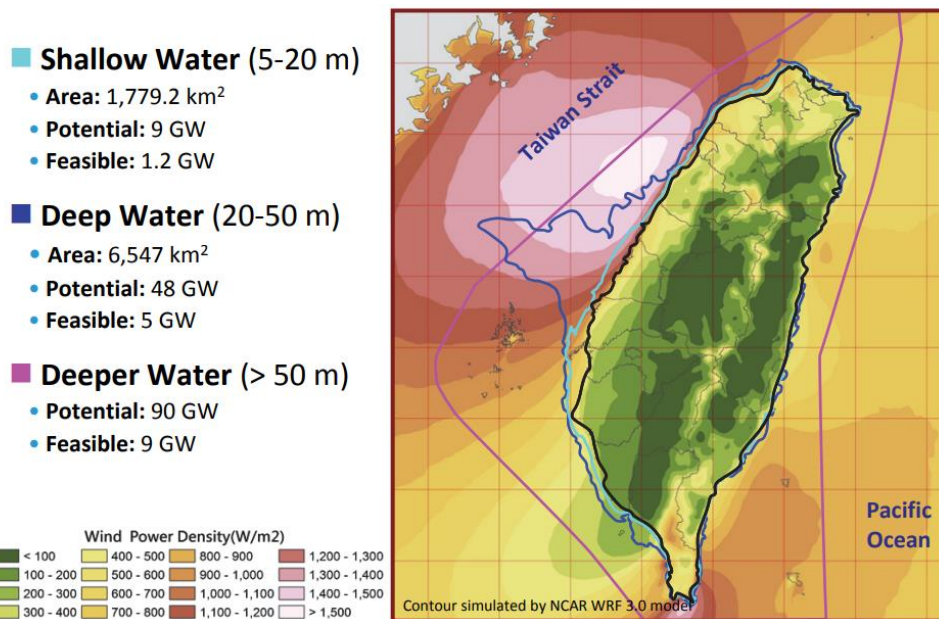


圖 1 台灣離岸風電-風力潛能

(圖片來源: <https://www.mofa.gov.tw/Upload/RelFile/2508/111034/25bcd458-67d7-4ed4-994b-128a7ba49d17.pdf>)

排名	國家/地區	2016年	2017年	2018年	2019年
1	英國	5,156	6,836	8,422	9,723
2	德國	4,108	5,355	6,580	7,493
3	中國大陸	1,627	2,788	5,555	6,838
4	丹麥	1,271	1,271	1,701	1,703
5	比利時	712	877	1,186	1,556
6	荷蘭	1,118	1,118	1,118	1,118
7	瑞典	202	202	192	191
8	台灣	0	8	8	128
9	越南	99	99	99	99
10	日本	60	65	65	85

圖 2 各國/地區離岸風電機列表安裝容量(MW)排行

(圖片來源: <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%A2%E5%B2%B8%E9%A2%A8%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB>)

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%A2%E5%B2%B8%E9%A2%A8%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB>)



圖 3 Seajacks Zaratan 的自升式平台船

(圖片來源: <http://www.seajacks.com/self-propelled-jack-up-vessels/seajacks-zaratan/>)

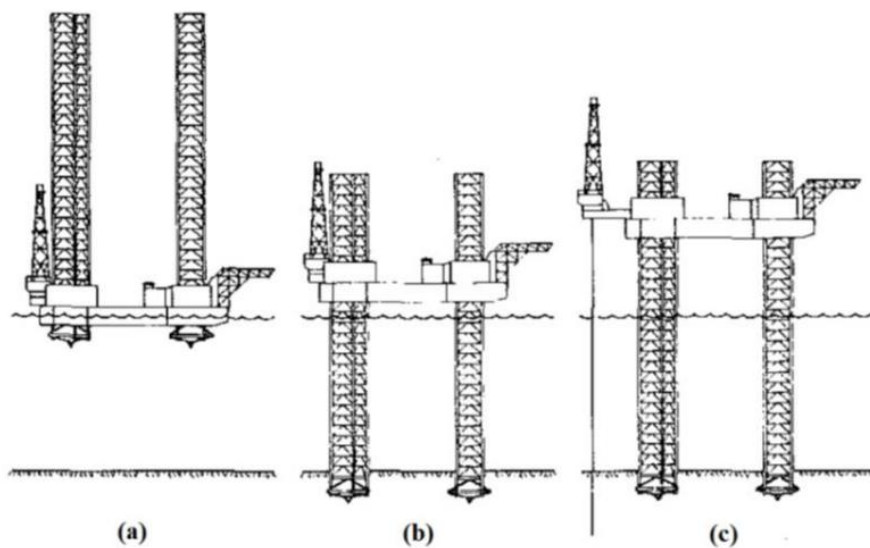


圖 4 自升式平台船運作模式(改繪自 Young et al., 1984)

第二章 研究目的

離岸基礎尺寸通常較陸地基礎大，以自升式平台船的基腳基礎為例，其直徑可達 20 米(65ft)，當基礎半徑增加在經過加載後，使得基礎所影響的土壤範圍較大，其範圍會包含各種土壤，而評估大型基礎承載力若僅採用均質黏土分析模式可能使分析結果與實際土壤行為有所不同。

Prandtl(1921)、Terzaghi(1943)及 Meyerhof(1963)所提出淺基礎承載力理論皆假設土壤為均質且均向材料，然而當基礎直徑(B)較大時此假設並不一定可滿足。以 Prandtl(1921)結果而言基礎於黏性土壤中破壞弧範圍約為 0.707 倍基礎寬(B)(圖 5)；而基礎寬度(B)較大時所包含土壤範圍增加，僅以單一土壤參數囊括計算恐有不符。

Meyerhof 於 1969 年指出互層黏土乘載力分析可分為擠壓現象與貫穿剪力破壞兩類討論，若基礎於軟弱黏土層中，但下方尚存在堅硬黏土層，則擠壓現象會發；若基礎於堅硬黏土層中，下方尚存在軟弱黏土層，則貫穿剪力破壞可能發生(紀昭銘等，2019)。貫穿剪力破壞常見於自升式平台船預壓階段，破壞發生時平台基腳突然向下貫入軟弱土層(如圖 6)，造成大量不均勻沉陷導致海上工作平台損毀及人員損傷。

本研究預計探討：

1. 討論均質黏性土壤不同基礎寬度和形狀因素的承載力評估。
2. 利用現有理論與數值模擬軟件 MATLAB 進行兩者比較。

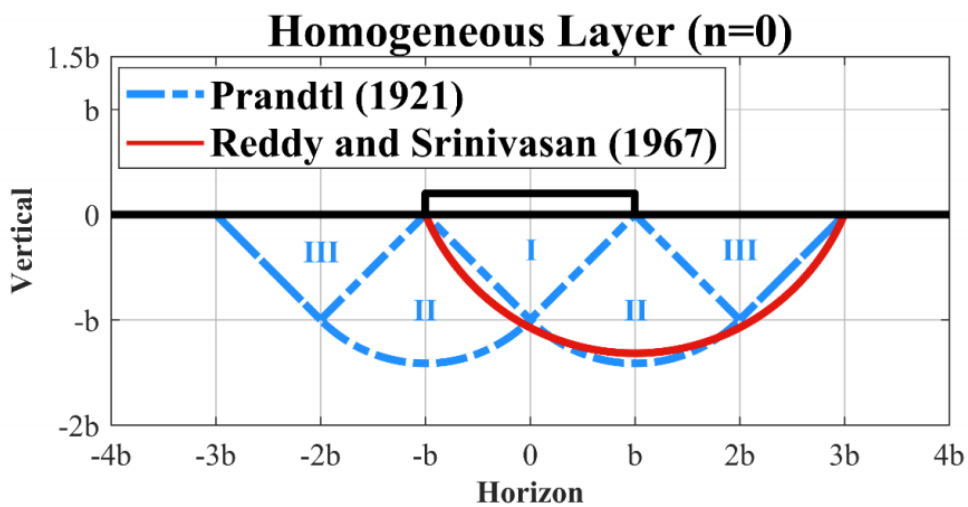


圖 5 均質均向土壤破壞弧(紀昭銘等人, 2019b)

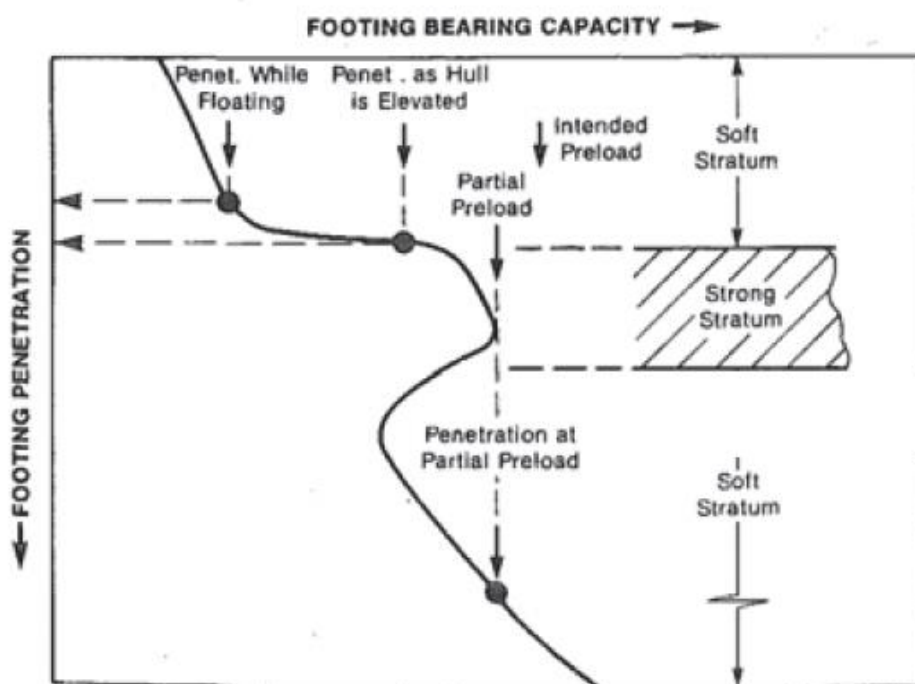


圖 6 自升式平台船貫穿剪力破壞示意資訊

(after Yong et.al, 1984)

第三章 文獻探討

3-1 基礎破壞形式

自升式平台船於預加載的過程中基礎會對土壤造成破壞，破壞模式包括許多種類，而假設一條型基礎置於地表面上且下方土壤為均質均向，根據 Vesic(1973) 之淺基礎的破壞形式可分為三種，分別為全面剪力破壞(general shear failure)、局部剪力破壞(local shear failure)以及貫穿剪力破壞(punching shear failure)。

全面剪力破壞

當單位面積上之載重為 q_u 時，支承基礎之土壤將會發生突然性的破壞，如圖 7 所示土壤之破壞面會延伸至地表面，此時單位面積上之載重 q_u ，常被稱為基礎之極限承載力。當土壤發生此種突然性的破壞，且伴隨破壞面延伸至地表面之情形，稱為全面剪力破壞(general shear failure)。

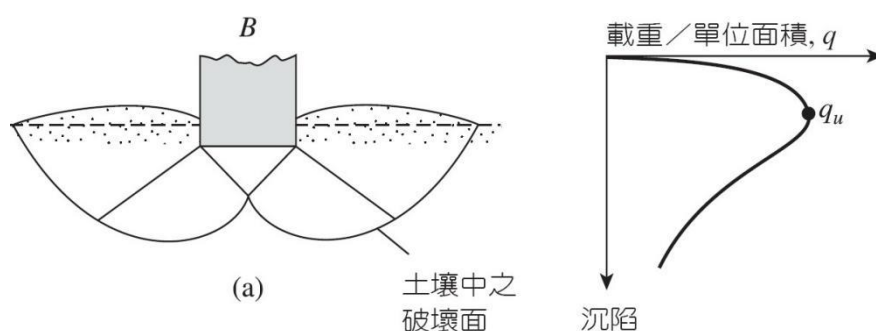


圖 7 全面剪力破壞圖(Vesic,1973)

局部剪力破壞

若基礎位於中度夯實的砂或黏性土壤上，基礎上載重之增加亦會伴隨著沉陷之增加。然而在此情況下，土壤之破壞面會逐漸由基礎向外伸展，如圖 8 的實線所示。當基礎上之單位載重為 q_u 時，基礎之移動將突然產生，而基礎需進一步大量的移動，才會使土壤之破壞面延伸至地表面(如圖中的虛線所示)，而發生此情形之單位面積上的載重即為極限承載力。此種破壞型式下， q_u 之尖峰值則無法確定，此稱為土壤之局部剪力破壞(local shear failure)。

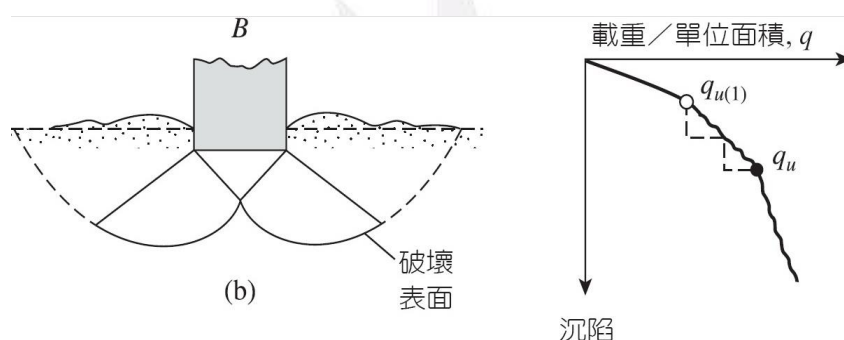


圖 8 局部剪力破壞圖(Vesic,1973)

貫穿剪力破壞

若基礎由相當鬆散之土壤所承受，則其載重—沉陷圖將如圖 9 中(c)所示；此種情況下，土壤破壞面將不會延伸至地表面。當超過極限破壞載重 q_u 時，其中載重—沉陷圖將呈陡峭並近似於線性關係，而此種土壤之破壞型式，則稱為貫穿剪力破壞(punching shear failure)。

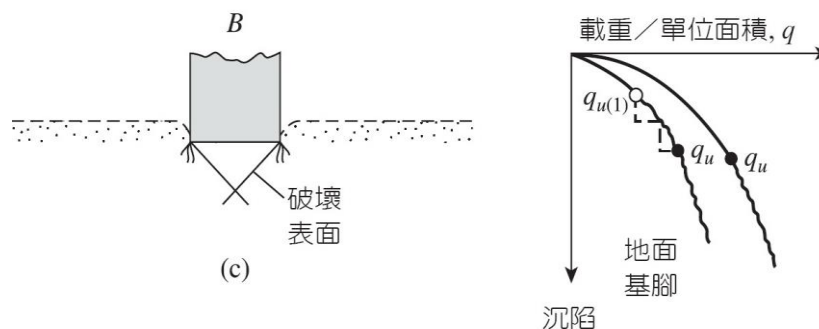


圖 9 貫穿剪力破壞圖 (Vesic, 1973)

3-2 均質土壤淺基礎承載力理論

Terzaghi(1943)是第一位提出概括性理論來評估淺基礎(Shallow Foundation)的極限承載力。依據此理論若基礎埋置深度 D_f 小於或等於基礎寬度則稱為淺基礎。然而，後來研究則建議 D_f 等於 3 至 4 倍的基礎寬度也可定義為淺基礎(Das, 2016)。

Terzaghi(1943)建議，對一連續條形(strip)基礎，即基礎寬度(B)與長度(L)比接近於零。當基礎在極限載重下，基礎下土壤破壞弧破壞模式假設如圖 10。圖中可將土壤區分為：(1)主動土壓力區 ACD；(2)對數螺旋區 CDE；(3)被動土壓力區 CEG。據其理論推導所得基礎極限承載力可表示為：

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma \quad \text{式 1}$$

其中： q_u 為極限承載力、 c 為凝聚力、 q 為覆土壓力、 γ 為土壤單位重、 B 為基礎寬度及 N_c 、 N_q 、 N_γ 為承載力因子。Meyerhof(1963)提出類似的承載力計算公式。但 Meyerhof 進一步引入相關修正係數，如基礎形狀修正係數(shape factors)、深度修正係數(depth factors)、

載重傾斜係數 (loading inclined factor) 等。其中 Meyerhof 假設所得 $\phi = 0$ 下 $N_c = 5.14$ ，與 Prandtl (1921)、Vesic (1973) 所求相等可參考圖 11。

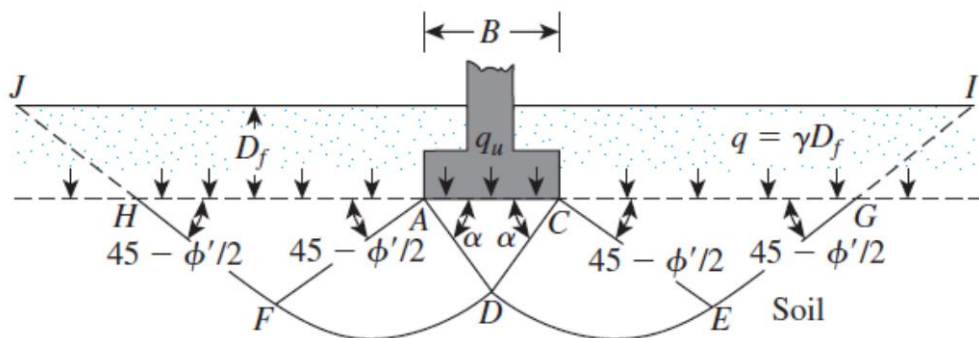


圖 10 淺基礎全面剪力破壞模型 (Das, 2016)

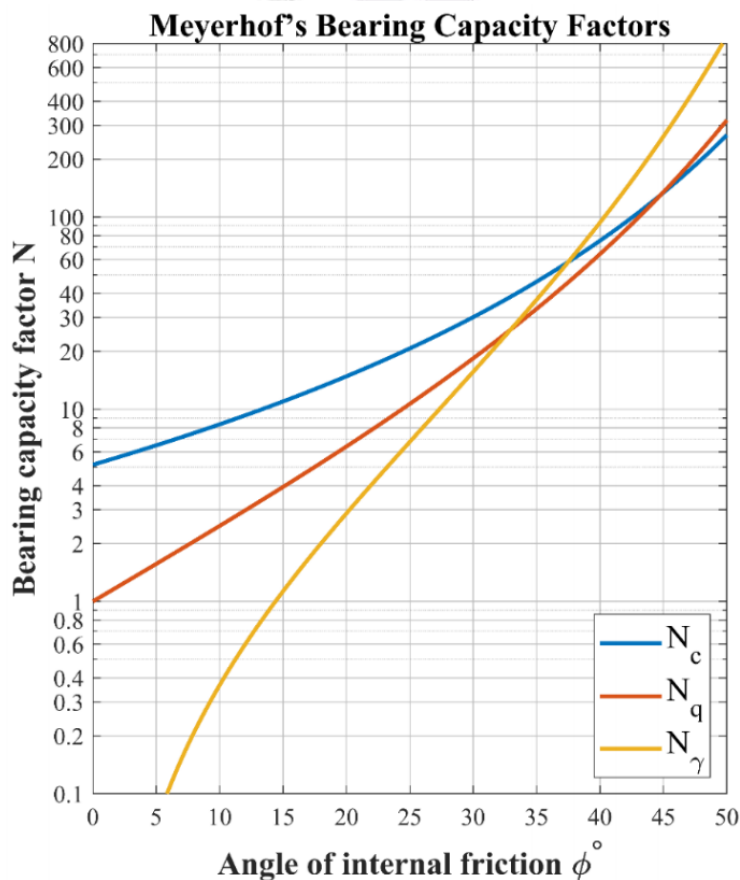


圖 11 承載力因子(改繪自 Meyerhof, 1963)

3-3 Reddy and Srinivasan 條型基礎於互層黏土表面承

載力計算模型

Reddy and Srinivasan 於 1967 年提出條型(Strip)基礎於互層黏土表面承載力計算模型(圖 12)，此模型考量上、下層黏土強度因素(n)、土壤異向性(K)及主應力旋轉因素(Ψ)後透過極限平衡分析求得式(2)，而後透過微分方程組式(3)可求得 r 與 θ 及所對應之 N_c 值。在此先討論黏土層為均向黏土($K=1$)並假設上下層黏土強度一致($n=0$)，此時的互層模式已轉變成均值均向接近 Prandtl 所提出之承載力理論背景。

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

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

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

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

r：土壤破壞弧半徑

b：一半的基礎寬度(0.5B)

ψ ：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° 。

$$\begin{cases} \frac{\partial N_c^*}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial N_c^*}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad \text{式(3)}$$

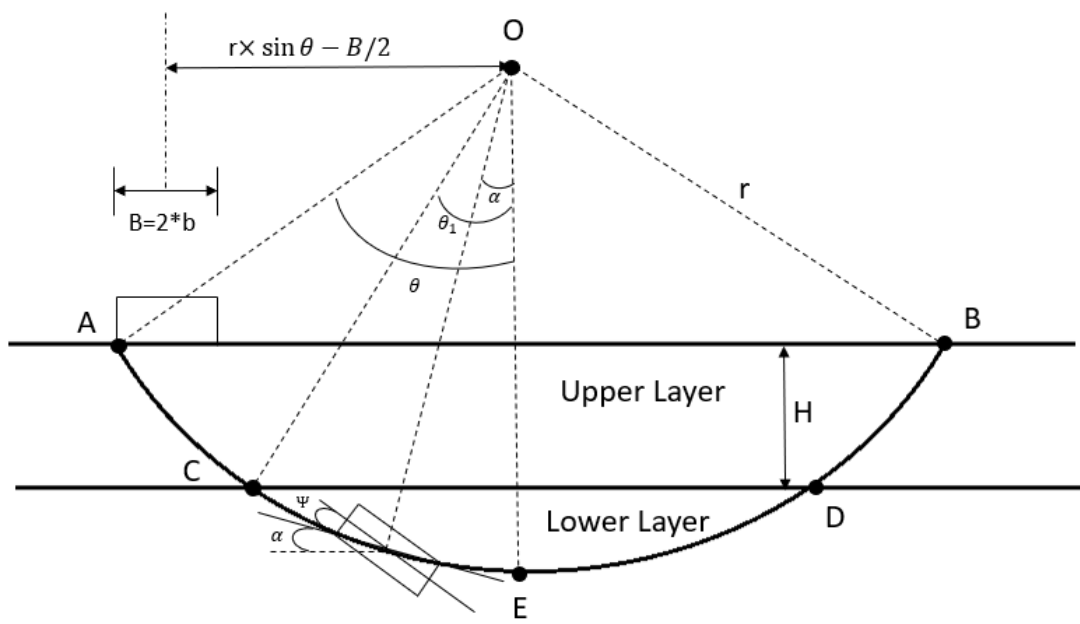


圖 12 Reddy and Srinivasan 圓弧滑動破壞模型
(改繪自 Reddy and Srinivasan, 1971)

第四章 結果與討論

均質($n=0$)且均向($K=1$)互層黏土土層可將式(2)簡化為式(4)，而後滿足式(3)條件可求式(5)。其中式(4)中上層黏土層厚度(H)不影響 N_c 發展，但此現象不符合 Reddy and Srinivasan 模型假設，由圖 12 可知破壞弧須進入下層黏性土層，其所得結果須滿足式(6)。當 $H=1.32b$ 成立時($r=1.32b$ ， $\theta=66.76^\circ$)土壤破壞弧會剛好切過下層黏性土層表面 ($N_c=5.52$)，若 $H<1.32b$ 破壞弧進入下層黏土中，所得結果與 H/b 無關。然而 $H>1.32b$ 所得結果需額外增加條件式(6)會導致偏差，故當 $H>1.32b$ 所得的 N_c 值會更大於 Prandtl 法所得的結果，且 N_c 值會隨著 H/b 增大而變大(表 1)。

$$N_c = \frac{\frac{r^2}{b^2}}{2 \times \left[\frac{r}{b} \sin \theta - 1 \right]} \times 2\theta \tag{4}$$

$$\tan \theta = 2\theta \tag{5}$$

$$r(1 - \cos \theta) \geq H \tag{6}$$

表 1 $K=1$ 及 $n=0$ 時 H/b 與 N_c 關係

H/b	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
N_c	5.5202	5.5202	5.5574	5.9049	7.0405

若上、下層黏土強度不同且強度與深度關係為定值並滿足均向($K=1$)條件，可知當 $n>0$ 時為前述之擠壓現象，而 $n<0$ 時則偏向貫穿剪力破壞。當下層土壤強度大於上層土壤強度時($n>0$)，則基礎下方黏性土壤發生擠壓現象，此時在同一 H/b 的情況下，土壤破壞弧會著 n 增加，土壤破壞弧則隨之向內縮小(圖 14)，其承載力因子(N_c)提高，且上、下黏土強度差達到定值後承載力與上、下黏土強度差無關(圖 13); 而下層土壤強度小於上層土壤強度時($n<0$)，則基礎下方黏性土壤發生貫穿剪力破壞現象，此時在同一 H/b 的情況下土壤破壞弧範圍隨下層黏性土壤強度降低而擴大(圖 15)，且其承載力因子逐漸下降(圖 13)。



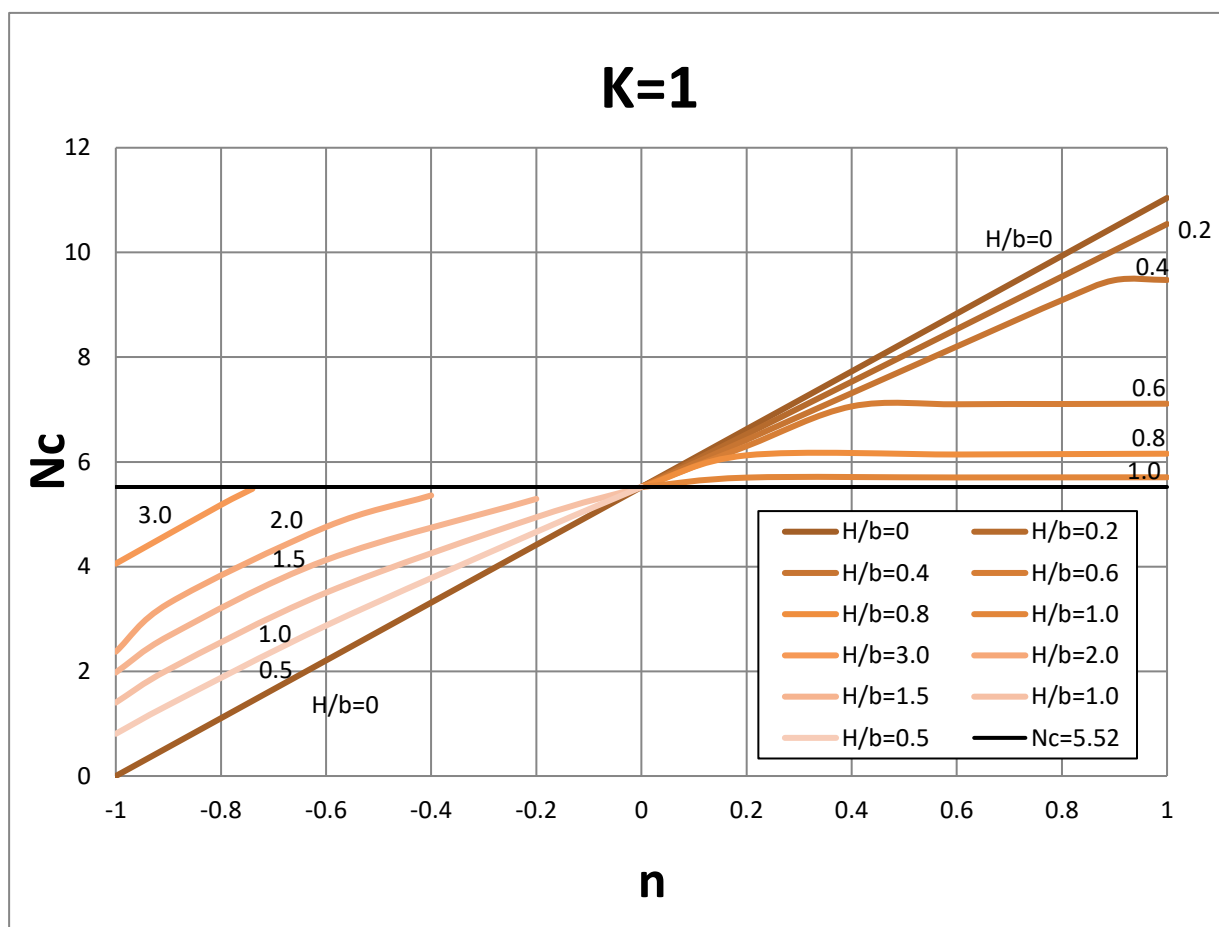


圖 13 均向互層黏性土壤之承載力因子 N_c 。

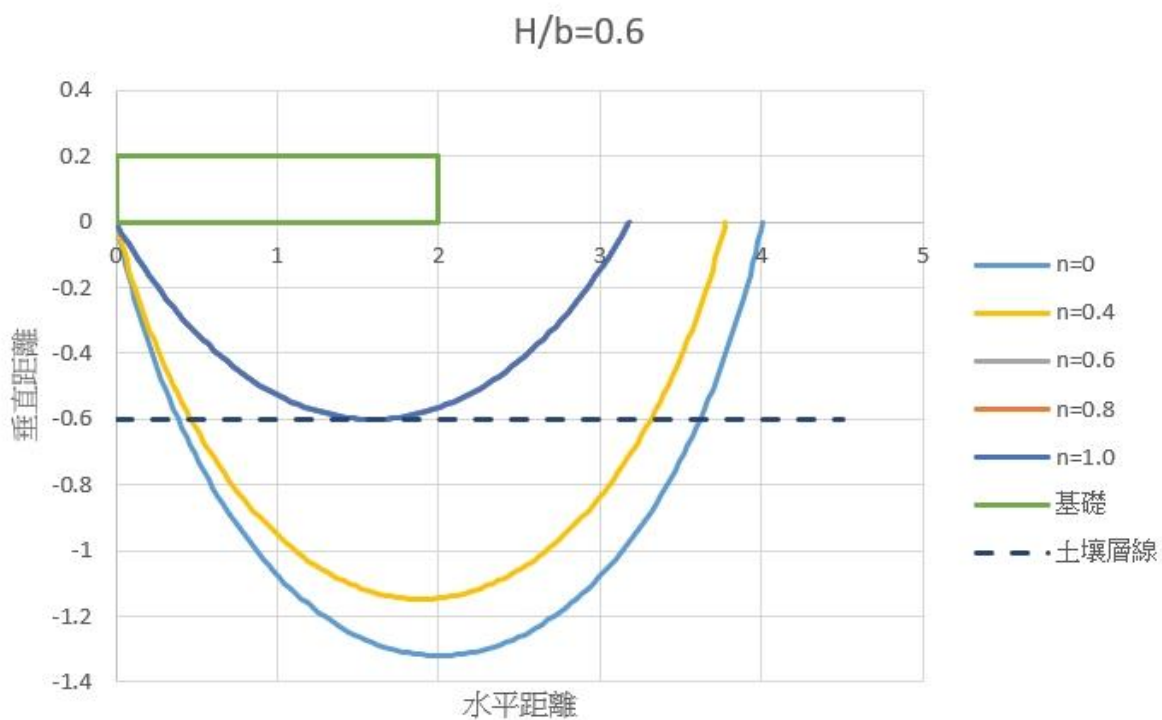


圖 14 $H/b=0.6$ 土壤破壞弧

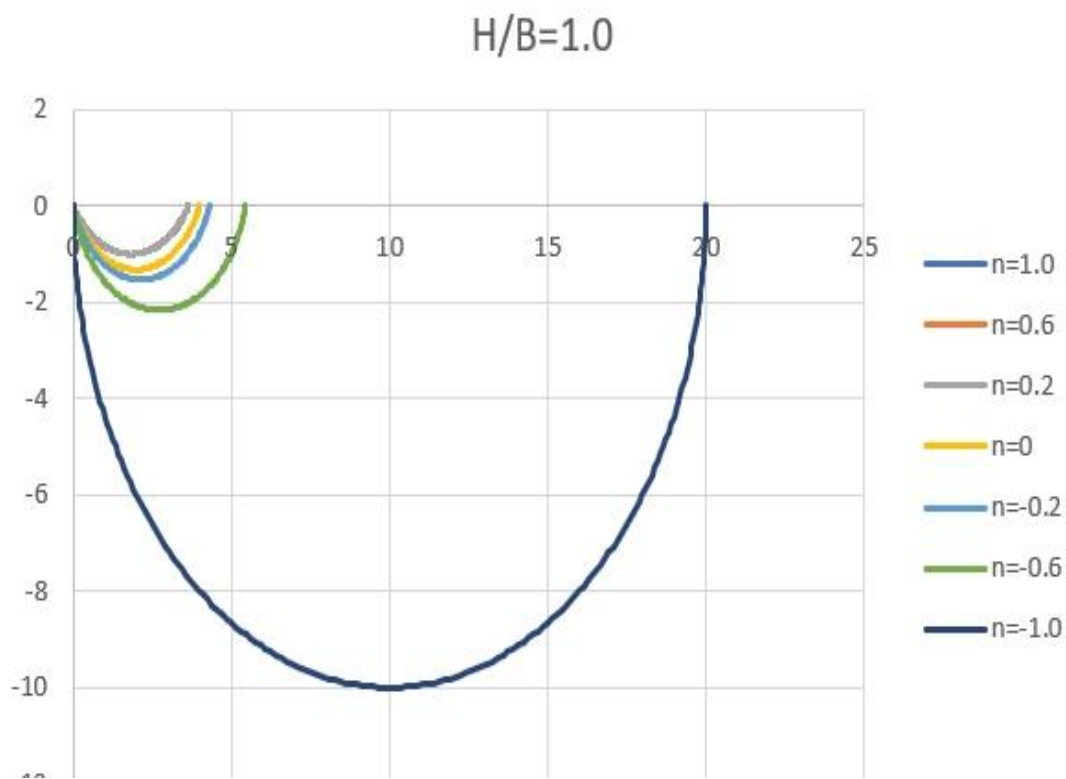


圖 15 $H/b=1.0$ 土壤破壞弧

參考文獻

1. 紀昭銘、林正山、康裕明 (2019a), 「大型基礎在互層土壤中貫穿剪力破壞之承載力評估」。第二十一屆水下技術研討會暨科技部、文化部成果發表會論文集, 第 230-237 頁。
2. 紀昭銘、林正山、黃普源 (2019b), 「大型基礎在互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。
3. 施國欽(2014), *大地工程學(二)基礎工程篇*。臺北市: 文笙書局。
4. 台灣電力公司網台灣再生能源發展概況, 資料更新(民 110 年 07 月 21 日)
檢自 <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=204>(Sep.01.2021)
5. 4C offshore 全球風速訊息資訊庫, 資料更新(民 110 年 8 月 31 日)
檢自 <https://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>(Sep.07.2021)
6. Chen, W.-F. (1975). *Limit Analysis and Soil Plasticity*. Elsevier Scientific Pub. Co.
7. Das, B. M. (2016). *Principles of foundation engineering* (8th edition). Cengage Learning.
8. Health and safety Executive (2009). Review of technical issues relating to foundations and geotechnics for offshore installations in the UKCS. London, HSE books
9. Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16–26.
10. Prandtl, L. (1921). Uber die eindringungsfestigkeit plastischer baustoffe und die festigkeit

von schneiden. *Z. Ang. Math. Mech.*, 1(1), 15-20.

11. Reddy, A. S., & Srinivasan, R. J. (1967). Bearing Capacity of Footings on Layered Clays.

J. Soil Mech. Found. Div., 93(SM2), 83–99.

12. Reddy, A. S., & Srinivasan, R. J. (1971). Bearing Capacity of Footings on Clays. *Soils and*

Foundations, 11(3), 51–64.

13. Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.

14. Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil*

Mechanics and Foundations Division, 99(SM1), 45-73.

15. Young, A. G., Remmes, B. D., & Meyer, B. J. (1984). Foundation Performance of Offshore

Jack-Up Drilling Rigs. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(7), 841–859.

