

逢甲大學學生報告 ePaper

自升式平台船基礎於砂土（上層）-黏土（下層）土層 之崩潰荷重評估

Collapse Loading Evaluation of Jack-up Barge Foundations on a Sand-over-clay Deposit

作者：林正山

系級：土木碩一

學號：M0803552

開課老師：紀昭銘

課程名稱：土木工程特論

開課系所：土水博一學位學程

開課學年：108 學年度 第 2 學期



摘要

台灣預計於 2025 年前完成 5.5 GW 的離岸風力發電裝置容量。離岸工程中自升式平台船被廣泛使用，而離岸工程所採用的基礎尺寸通常大於陸域工程所使用的基礎。隨著基礎尺寸的增加，基礎受外力作用時所影響的土壤範圍亦將擴大，故進行大型基礎的承載力分析過程中考量互層土壤效應是必須的。本文考量條型基礎於砂土 (上層)- 黏土 (下層) 互層土壤時的極限承載力分析並利用 Meyerhof (1974) 的分析模型與 SNAME (2008) 所建議的土壤參數近似式進行分析與討論。結果顯示，對於基礎尺寸較大或上土層的內摩擦角較大的情況，基礎整體承載力將受下土層強度與砂土層厚度影響。此外，若僅考量上土層發生全面剪力破壞所得之承載力可能是被高估的，故進行基礎承載力評估時考量互層土壤效應是必須的。

關鍵字：離岸基礎工程、互層土壤、貫穿剪力破壞、極限承載力



Abstract

The target, offshore wind farm constructions in Taiwan, 5.5 GW capacity is expected to be completed by 2025. In the field of offshore engineering, jack-up barges are widely applied and the dimensions of offshore foundations are usually larger than those of onshore footings. As the dimensions of foundations increase, the affected depth range of the footing with plastic collapse load subjected may extend to the subsequent soil deposit, and hence it is necessary to consider the effect of layered soils in the bearing capacity evaluation of foundations. This study applies the analysis model purposed by Meyerhof (1974) and the approximate coefficient formula suggested by SNAME (2008) to assess the bearing capacity of the strip foundation on sand overlying clay soils. Furthermore, the result indicates that the bearing capacity of footings would be affected by the strength of the bottom clay layer and the thickness of the upper sand layer, especially for the magnitude of the friction angle of the sand layer becoming large or the foundation embedded in a stronger soil with short distance from the footing base to a following weaker soil layer. In summary, the bearing capacity determined by general shear failure in the top layer might be overestimated, so it is of particular necessary to consider the soil strata effect on bearing capacity assessment.

Keywords: Offshore Foundation Engineering, Layered Soils, Punch-through Failure, Ultimate Bearing Capacity Assessment

目次

摘要.....	1
Abstract.....	2
圖目錄.....	4
一、前言.....	5
二、理論分析.....	8
三、研究結果.....	14
四、結論.....	17
參考文獻.....	18



圖目錄

圖 1 OFFSHORE WIND TURBINE.....	5
圖 2 自升式平台船安裝風機施工照片	5
圖 3 SPUDCAN FOUNDATION.....	6
圖 4 台灣電力公司離岸風場位置	6
圖 5 BH-03 CPT CONE RESISTANCE PROFILE.....	7
圖 6 BH-05 CPT CONE RESISTANCE PROFILE.....	7
圖 7 淺基礎全面剪力破壞模型	8
圖 8 BEARING FACTORS	9
圖 9 SOIL FAILURE SURFACE ($\phi = 0^\circ$).....	9
圖 10 SOIL FAILURE SURFACE ($\phi = 30^\circ$).....	10
圖 11 SOIL FAILURE SURFACE ($\phi = 35^\circ$).....	10
圖 12 淺基礎土壤破壞弧發展與基礎寬度無因次化結果	10
圖 13 基礎在砂土-黏土互層之可能破壞模式.....	11
圖 14 FOUNDATION FAILURES MODES: PUNCH-THROUGH.....	11
圖 15 BEARING CAPACITY FAILURE: UNIFORM SOILS.....	12
圖 16 RANKINE K_p	12
圖 17 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化 (SNAME APPROACH).....	14
圖 18 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME APPROACH).....	15
圖 19 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME APPROACH).....	15
圖 20 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME APPROACH).....	16
圖 21 MEYERHOF AND HANNA'S PUNCHING SHEAR COEFFICIENT (K_s).....	17

一、前言

臺灣政府目前 (2020) 正積極推動綠能產業 (renewable energy) 發展，其中離岸風力發電 (offshore wind power) 項目更廣受社會大眾及媒體所關注，故於施工安全性及經濟性評估不可不慎。離岸風機 (offshore wind turbine) (圖 1) 施工過程中需使用多種施工船進行作業，其中自升式平台船 (jack-up barge) 提供海上作業平台並廣泛運用於各類離岸工程施工 (圖 2)，臺灣安裝與維護離岸風機須使用此類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載能力，討論自升式平台船基礎承載力 (ultimate bearing capacity) 為本研究主要考量。



圖 1 offshore wind turbine

(from: <https://www.ge.com/news/reports/atlantis-is-calling-ge-turbines-to-power-the-worlds-largest-offshore-wind-project>)



圖 2 自升式平台船安裝風機施工照片

(from <https://www.jandenu.com/en/wind-turbine-installation-vessel>)

自升式平台船其基礎尺寸通常較陸域工程大，以 spudcan 基礎形式為例 (圖 3)，其基礎直徑可達 20 米 (Lee, 2009)，故基礎受極限載重作用後所影響的土壤範圍跨越不同土層之機率大增 (紀昭銘等人, 2019)。據台灣電力公司 (2018) 現地鑽探資料指出，位於台灣西部的離岸風場 (圖 4) 現地土層常夾雜砂土 (sand)、粉土 (silt) 與黏土 (clay) 形成互層土壤剖面使基礎的承載力分析更為複雜、困難 (圖 5 與圖 6)。

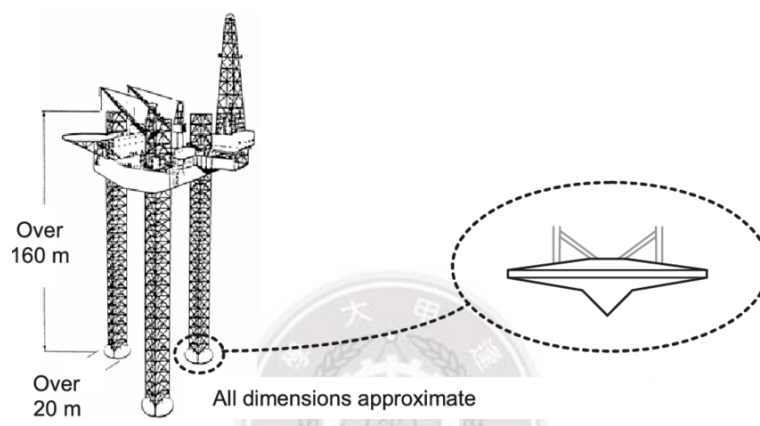


圖 3 spudcan foundation (image from: Cassidy & Gaudin, 2009)

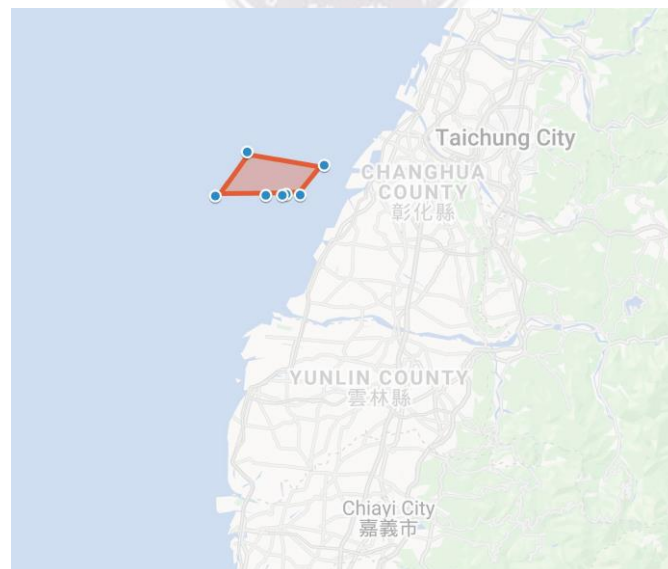


圖 4 台灣電力公司離岸風場位置

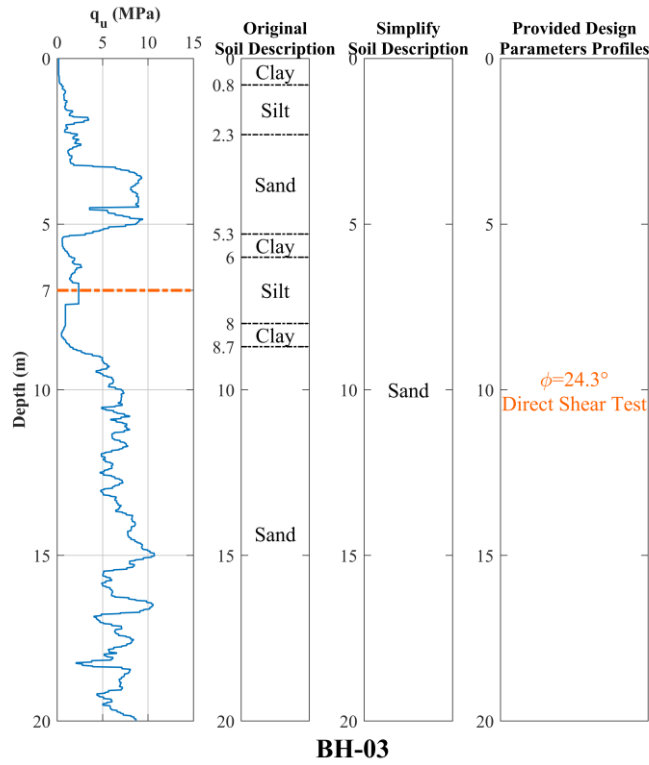


圖 5 BH-03 CPT cone resistance profile (from: Chi & Lin, 2020)

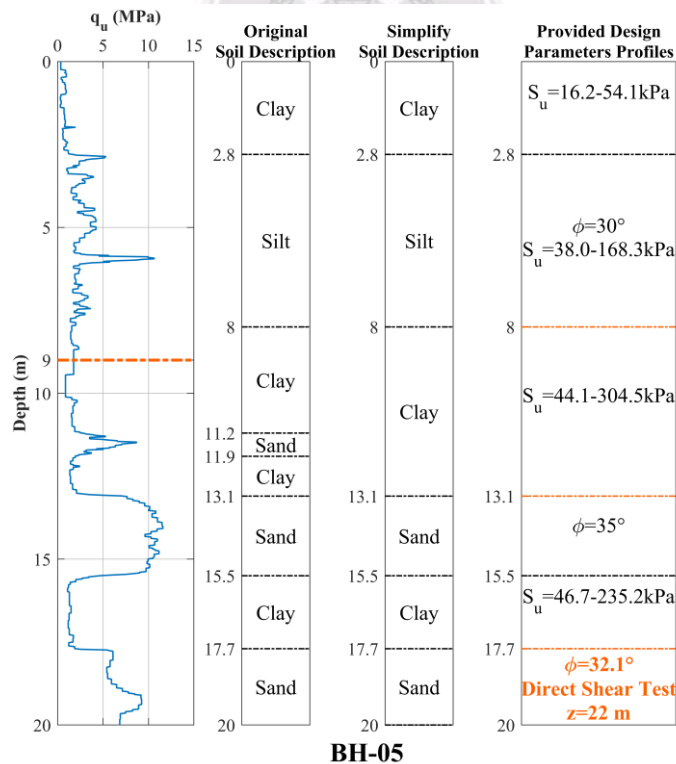


圖 6 BH-05 CPT cone resistance profile (from: Chi & Lin, 2020)

二、理論分析

評估淺基礎極限承载力 (ultimate bearing capacity of shallow foundation) 由 Terzaghi (1943) 提出較完整分析理論; Terzaghi 透過假設土壤破壞弧 (failure surface in soil) (圖 7) 進行推導後並提出淺基礎承载力理論, 式 1, 其後學者如 Meyerhof (1951)、Hansen (1970)、Vesic (1973) 大致承襲 Terzaghi 理論並加以修正及發展。

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

其中：

q_{ult} 為基礎發生全面剪力破壞時所對應的極限承载力

c 為土壤的凝聚力

q 為覆土壓 (surcharge)

B 為基礎寬度

γ 為土壤單位重

N_c, N_q, N_γ 為承载力因子 (bearing factors), 可參考圖 8

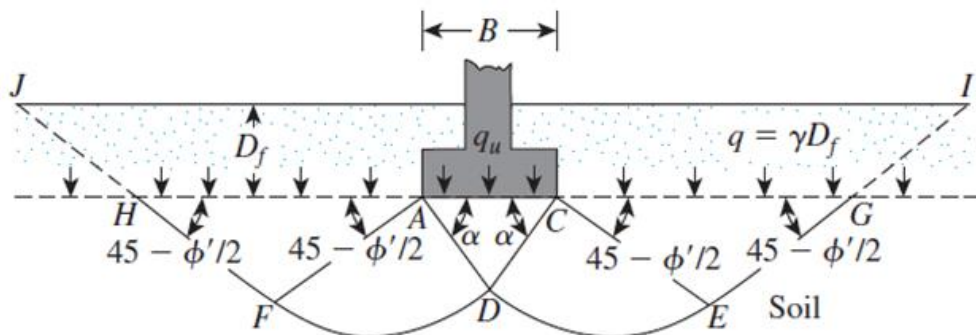


圖 7 淺基礎全面剪力破壞模型 (image from: Das, 2016)

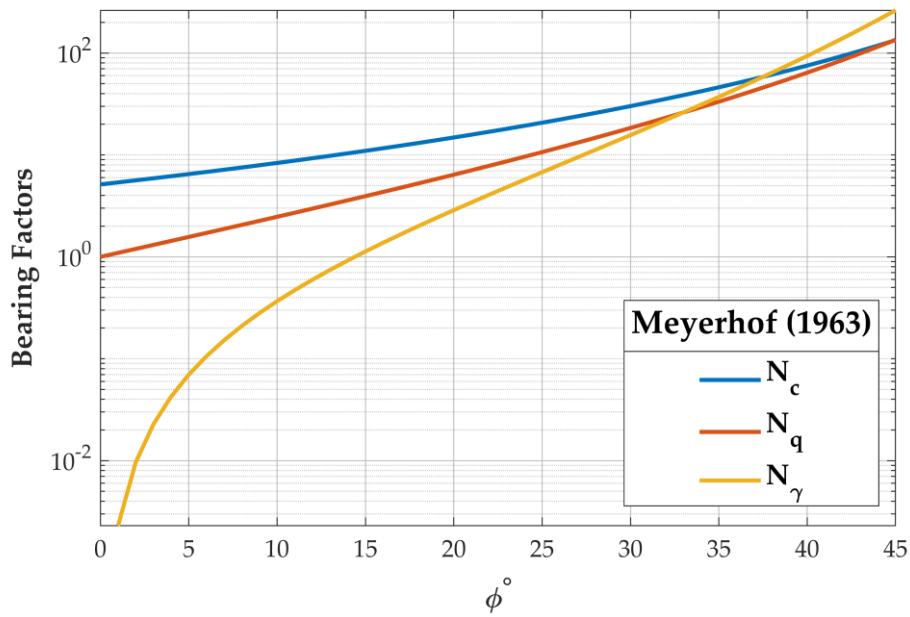


圖 8 Bearing Factors (modified from Meyerhof, 1963)

淺基礎極限承载力理論發展之初，透過假設基礎所在土壤為均質 (homogeneous) 材料且為單一土層 (single layered soil) 基礎受外力作用後發生全面剪力破壞 (general shear failure) 的問題。然而，若基礎平面尺寸 (B) 較大或土壤內摩擦角 (ϕ) 較高則基礎受外力作用土壤破壞弧範圍擴大 (圖 9、圖 10 及圖 11) 破壞弧進入相異土層機率提升 (圖 12)，而此現象與均質材料假設不符，故陸續有學者進行互層土壤 (layered soils) 承载力研究。

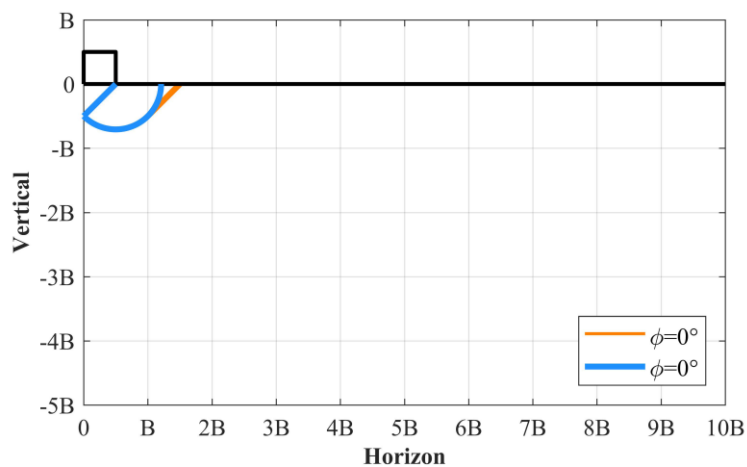


圖 9 Soil failure surface ($\phi = 0^\circ$)

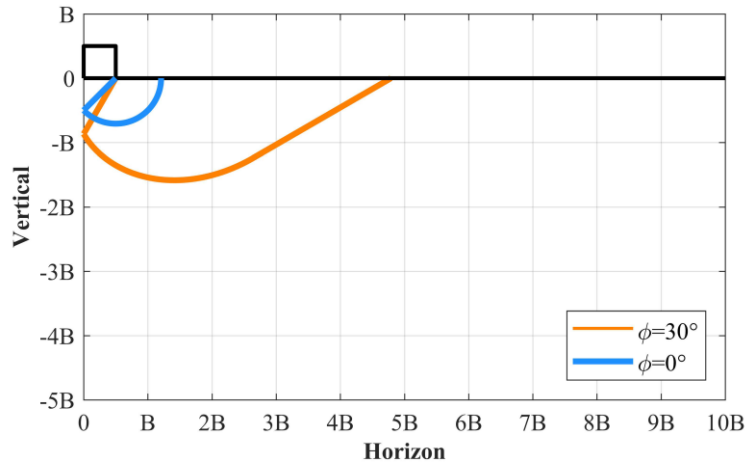


圖 10 Soil failure surface ($\phi = 30^\circ$)

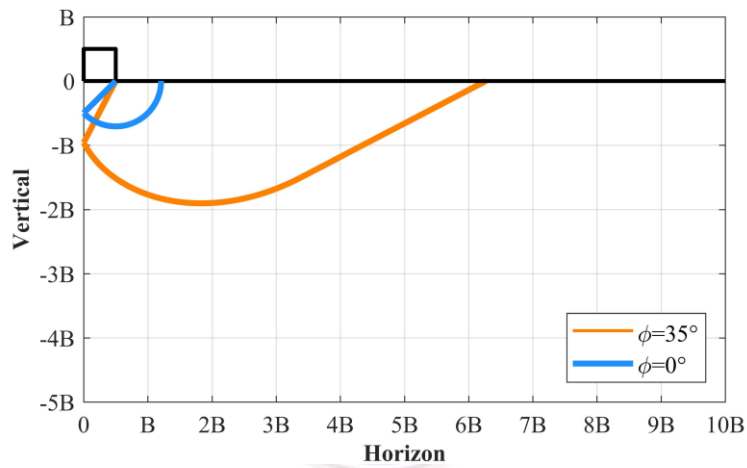


圖 11 Soil failure surface ($\phi = 35^\circ$)

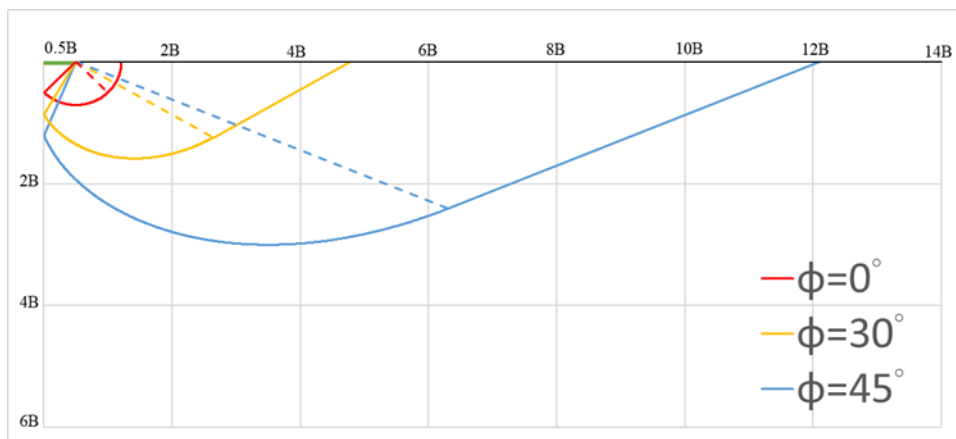


圖 12 淺基礎土壤破壞弧發展與基礎寬度無因次化結果

Meyerhof (1974) 與 Meyerhof & Hanna (1978) 對基礎在砂土-黏土互層之基礎破壞機制 (foundation failure mechanism) 進行研究並進一步假設破壞模型進行分析。此破壞機制 (圖 14) 考量基礎將下方之鐘形區域之砂土往下壓、而其下的黏土層則提供類似淺基礎的承载力 (圖 15)。當鐘形區土壤往下移動時，與外側土壤間之土壓已激發至被動狀態 (P_p) (圖 16)，故伴隨在鐘形曲面上之摩擦力相當可觀 (紀昭銘等人，2019)。

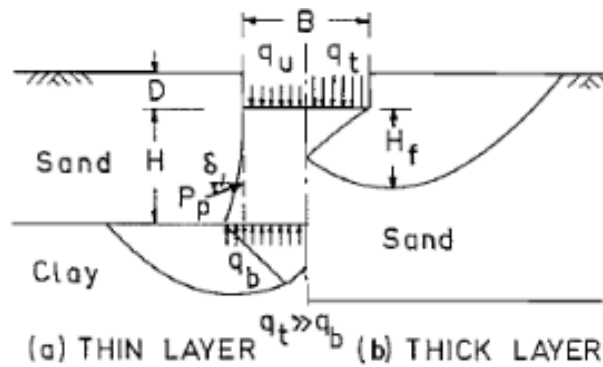


圖 13 基礎在砂土-黏土互層之可能破壞模式 (image from: Meyerhof, 1974)

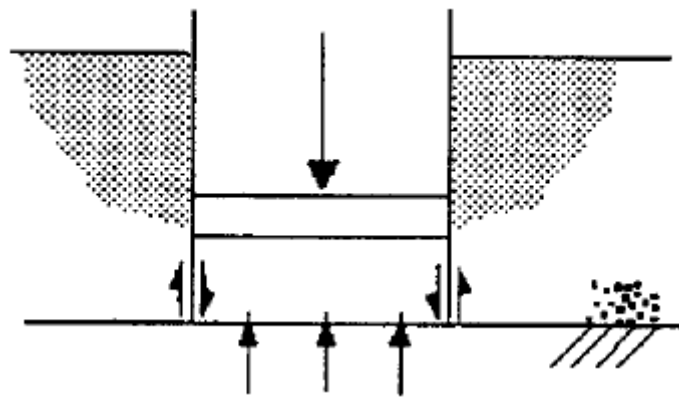


圖 14 Foundation failures modes: Punch-through (SNAME, 2008)

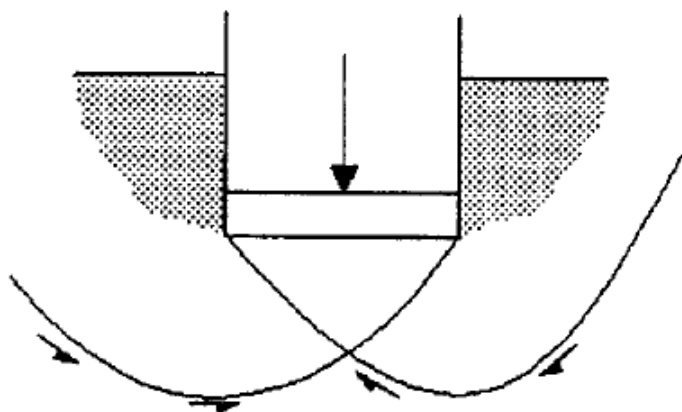


圖 15 Bearing capacity failure: uniform soils (SNAME, 2008)

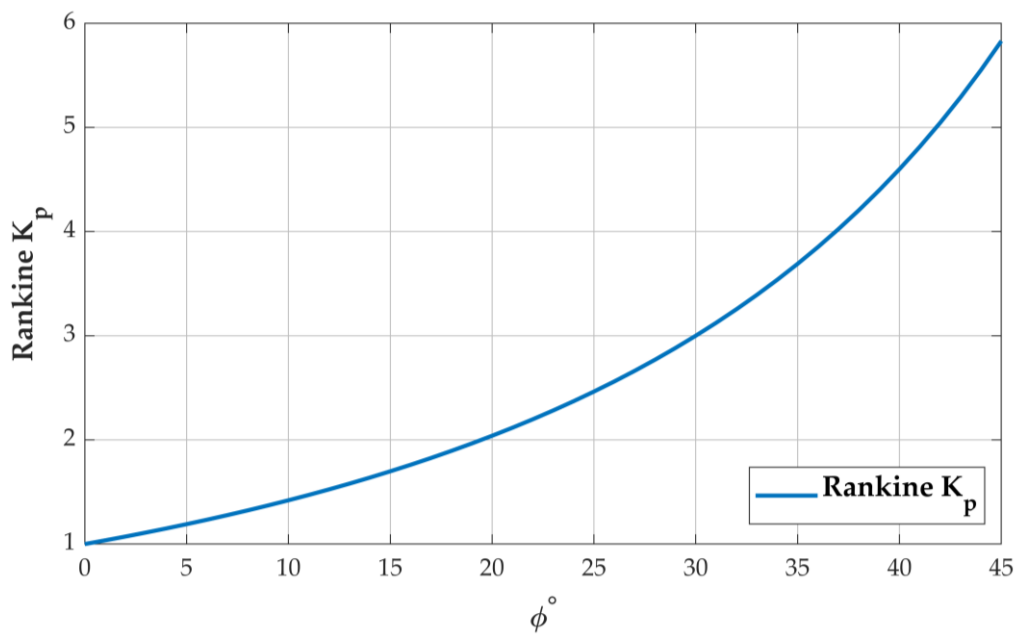


圖 16 Rankine K_p

基於 Meyerhof (1974) 與 Meyerhof & Hanna (1978) 分析貫穿剪力破壞 (punch-through failure) 之模型，可將基礎極限承载力 (q_{ult}) 表示為:

$$q_{ult} = q_{clay} - H\gamma + \frac{2H}{B}(H\gamma + 2D\gamma)K_s \tan\phi \quad \text{式 2}$$

其中：

q_{ult} 為基礎發生貫穿剪力破壞時所對應的極限承载力

q_{clay} 為下層黏土發生全面剪力破壞極限承载力

H 為基礎底板至黏土層間距離

ϕ 為砂土內摩擦角

D 為基礎埋置深度

K_s 為貫穿剪力係數 (punch shear coefficient)

此外，SNAME (2008) 建議可利用式 3 獲得下界近似表示式

$$K_s \tan\phi \approx \frac{3S_u}{B\gamma'} \quad \text{式 3}$$

三、研究結果

砂土內摩擦角 (ϕ) 大小在此假設條件下掌控破壞模式發展，在內摩擦角 (ϕ) 較小時下層黏土效應可忽略，破壞單純發生於上部砂土層。然而隨土壤內摩擦角 (ϕ) 逐漸提高，所對應的土壤破壞弧範圍逐步擴大並可能切過土層線 (strata line) 或進入下土層，故分析基礎承载力時應考量下土層對整體基礎承载力的影響。若考量基礎寬度為 $B = 1$ (m)、上土層厚度為 $H = 0.5$ (m) 及有效土壤單位重為 $\gamma' = 8$ kN/m³ 及下層黏土不排水剪力強度為 $S_u = 5$ kPa，所得基礎承载力隨砂土內摩擦角變化曲線如圖 17 所示。圖中顯示基礎極限承载力將隨上層砂土內摩擦角 (ϕ) 增加而變大，然而當 ϕ 值成長至一定值後基礎承载力不再有所改變。另一方面，若將整體基礎承载力 (圖 17) 與上砂土層全面剪力破壞所對應的極限承载力做無因次分析可得，圖 18，圖中所顯示的基礎承载力變化趨勢類似於圖 17。

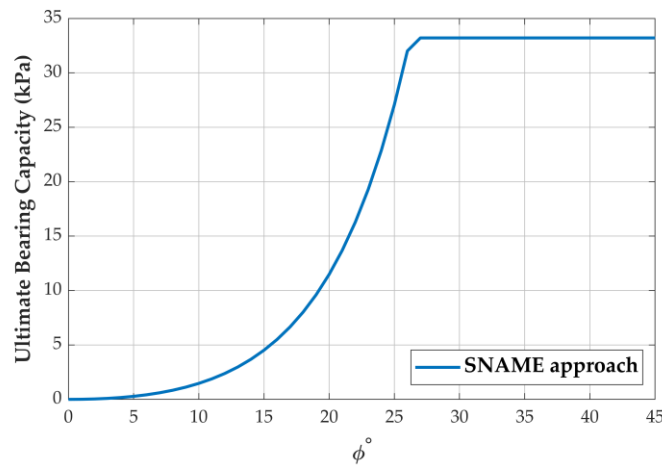


圖 17 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化 (SNAME approach)

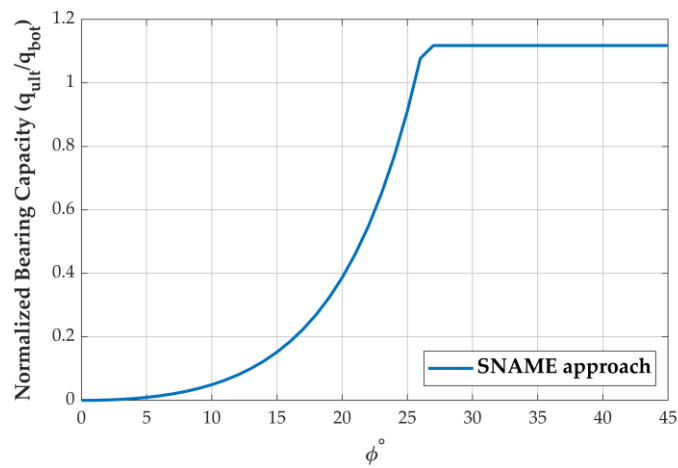


圖 18 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME approach)

圖 19 顯示，隨砂土內摩擦角增加 (ϕ) 下層軟弱土層將會影響整體承载力的發展。當砂土內摩擦角 (ϕ) 較大，若單以均質土層進行承载力分析，可能嚴重高估實際的基礎承载力。以 $\phi = 30^\circ$ 為例，基礎發生貫穿剪力破壞時所對應的承载力僅為基礎發生全面剪力破壞時的 52.99%；而砂土內摩擦角增加至 $\phi = 35^\circ$ 時，更僅存 22.35%。

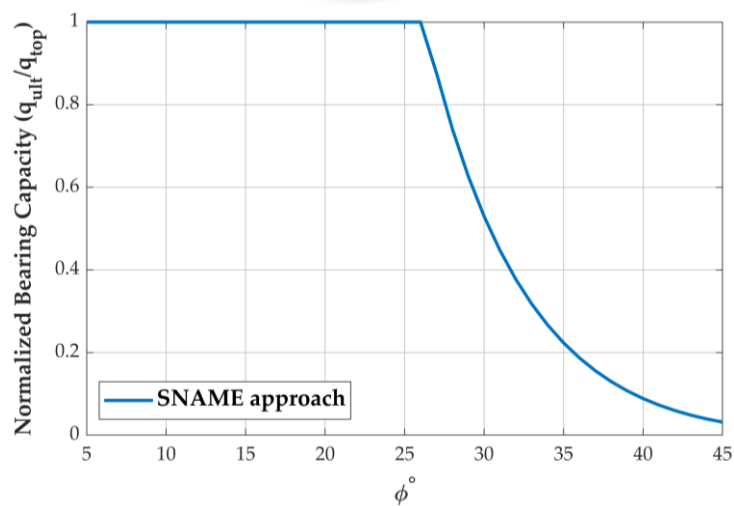


圖 19 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME approach)

另一方面，若考量基礎寬度為 $B = 1$ (m)、上土層厚度為 $H = 1.0$ (m) 及有效土壤單位重為 $\gamma' = 8$ kN/m³ 及下層黏土不排水剪力強度為 $S_u = 5$ kPa，所得基礎承载力隨砂土內摩擦角變化無因次曲線如圖 20 所示。由圖可見，當 H/B 提升，基礎承载力有向上增加的趨勢。此可解釋為隨 H/B 增加，下土層影響整體基礎承载力的因素逐漸消失。因此，當基礎尺寸 (B) 較大、 H/B 較小或土壤內摩擦角 (ϕ) 較大的條件下進行評估基礎承载力時，考量互層土壤的效應是必須的。

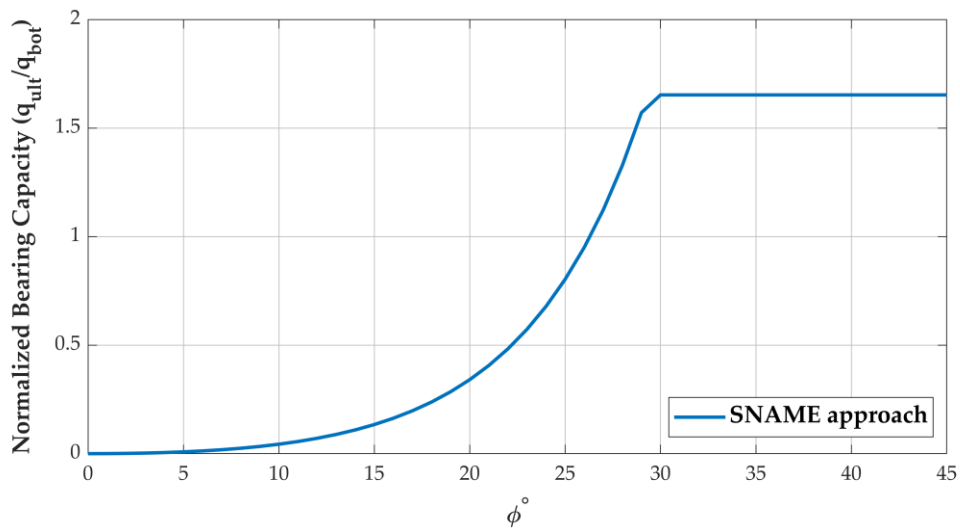


圖 20 基礎極限承载力與砂土內摩擦角變化無因次結果 (SNAME approach)

四、結論

互層土壤之基礎承载力分析不僅與單一土層相關，更是受到整體土壤參數交互作用 (interaction) 的結果。以砂土(上層)-黏土(下層)互層土壤而言，基礎承载力不僅與砂土內摩擦角 (ϕ) 與基礎寬 (B) 有關，砂土層厚度 (H) 與下土層強度特徵也須納入整體考量。

Meyerhof and Hanna (1978) 所建議的貫穿剪力係數 (K_s) 其值之適用範圍、條件仍有待進一步的討論。其中，以 Rankine 所定義之主動土壓力係數 (K_a)、被動土壓力係數 (K_p) 配合摩爾庫倫破壞準則 (Mohr Coulomb Yield Criterion) 可知，土體分析所得側向土壓力係數應介於 K_a 與 K_p 之間。然而，Meyerhof and Hanna (1978) 所建立之貫穿剪力係數 (K_s) 可能落於此區間外，此仍需更進一步的討論與研究。

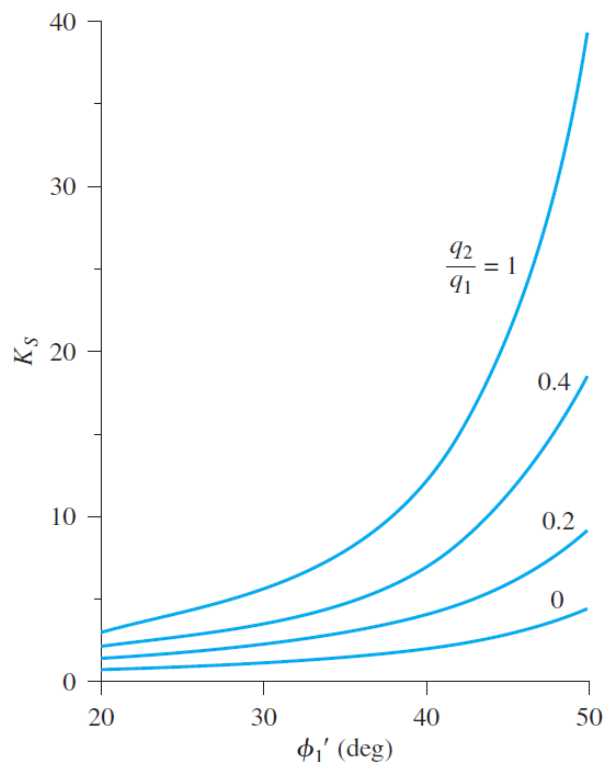


圖 21 Meyerhof and Hanna's punching shear coefficient (K_s) (Das, 2016)

參考文獻

台灣電力公司 (2018), 「離岸風電第二期計畫可行性研究」, 台灣。

紀昭銘、林正山、康裕明 (2019), 「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。

紀昭銘、黃普源、林正山 (2020), 「非均質互層黏性土壤的擠壓現象對獨立基礎之承載力因子影響」, 第二十二屆水下技術研討會暨科技部、文化部成果發表會論文集, 第 209-217 頁。

Cassidy, Mark and Gaudin, Christophe. (2009). Physical Modelling of the Push-Over Capacity of a Jack-Up Structure on Sand in a Geotechnical Centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 190.

Chi, C. -M. and Lin, Z. -S. (2020). The Footing Size Effect on Punch-through Bearing Capacity Assessment of Jack-up Barges in Western Taiwan Offshore Layered Soil. *Proc. 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, China*, 2, 1717.

Das, B. M. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (8th edition). Cengage Learning.

Hansen, J. B. (1970). *A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity*. Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.

LEE, K. K. (2009). *Investigation of Potential Spudcan Punch-Through Failure on Sand Overlying Clay Soils* [PhD Thesis]. University of Western Australia.

Meyerhof, G. G. (1951). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Geotechnique*, 2, 301.

Meyerhof, G. G. (1963). Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16.

Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 223.

Meyerhof, G. G. and Hanna, A. M. (1978). Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soils Under Inclined Load. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565.

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

Vesic, A. S. (1973). Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 99(1), 45.