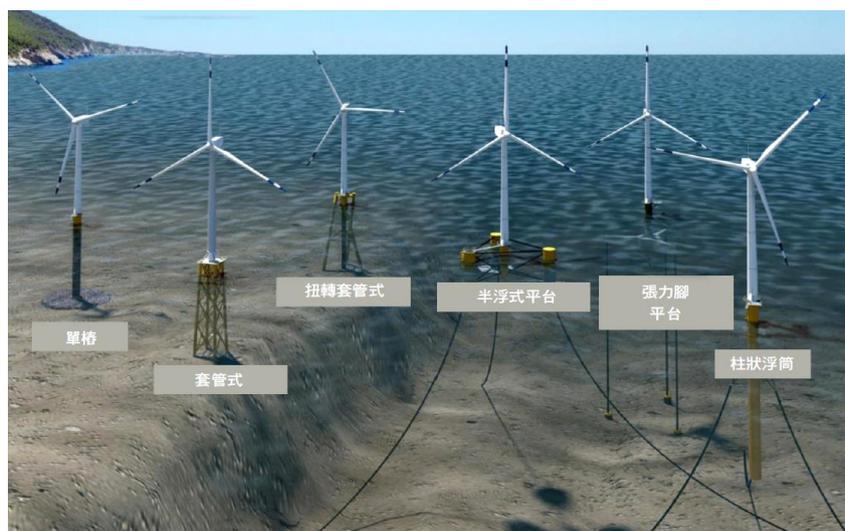


## 浮式基礎之應用—離岸風機及挪威跨海吊橋

蔡俊鏡 林同棧工程顧問股份有限公司 技術總監／博士

海洋占全球面積約 70%，海域離岸風電成為重要再生能源之一，離岸風電基礎依海床深度，可分為「固定式基礎」及「浮式基礎」，固定式基礎適用於水深小於 50 m，有「單樁式」( Mono Pile ) 及「套管式」( Jacket ) 兩種型式。浮式基礎則適用於水深大於 50 m 區域，由浮動平台、繫纜系統與錨定基礎組成，「有半浮式平台」( Semi-submersible )、「張力腳平台」( Tension Leg Platform, TLP )、「柱狀浮筒」( Spar Buoy ) 等三種型式 ( 黃金城、樊庭宇、朱棟樑, 2019 年 )，如圖一，原本應用於石油天然氣鑽油平台，全球海洋面積 92% 水深超過 200 m，浮式基礎有其發展潛能 ( DNV KEMA，2012 )。



圖一 離岸風機固定式及浮式基礎示意圖 (參考美國國家再生能源試驗室)

挪威政府 E39 公路長達 1100 km，沿線共有 8 處跨海渡輪區，擬花費 250 億美元興建跨海峽橋梁，達成全線免渡輪計畫 ( Ferry Free E39 )，但在某些區域海峽寬達 5 km，海床深達 1.5 km，目前跨海橋梁樁基施工紀錄約 100 m，長跨徑跨海大橋需考量用浮式吊橋。

## 浮式基礎易於施工安裝 但分析設計較困難

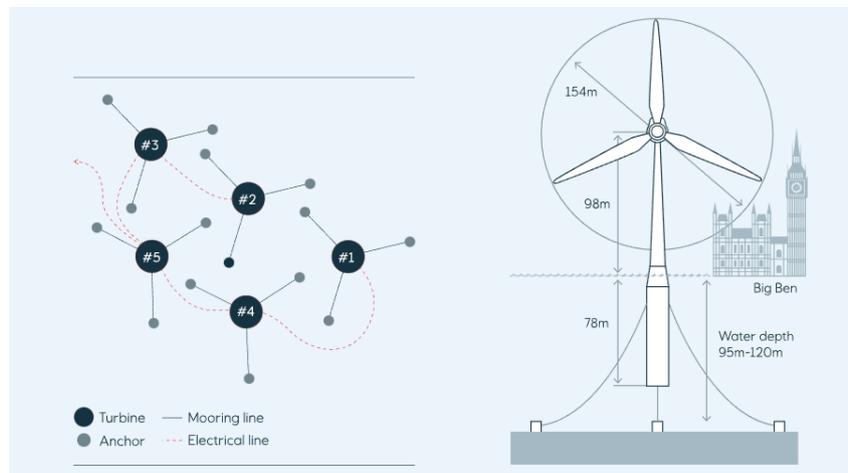
浮式基礎較固定式基礎之優點為易於施工安裝，不需要大型工作船機，不受海床土壤地質條件限制，在陸地製造後可以隨時拖拉至海域工址錨定。「半浮式平台」可以在岸邊碼頭組裝，易於維修，但焊接技術高，水中錨定採懸鍊式鐵鍊，需額外配置動態平衡系統及主動艙壓水系統以強化其穩定性。「張力腳平台」不需額外配置動態平衡系統及主動艙壓水系統，平台成本相對較半浮式低，錨定採垂直式預力鋼鍵，錨定鋼鍵長期處於高張力，及周遭海流引致之反覆應力，易產生金屬疲勞的問題。「柱狀浮筒」錨定採懸鍊式鐵鍊，不需額外配置動態平衡系統及主動艙壓水系統，但結構體相較前兩種更為巨大，無法在岸邊碼頭組裝，故障也無法拖回岸邊維修 ( 康志堅, 2017 年 )。

離岸風機設計壽命約 20-25 年，跨海橋梁設計壽命約 50-150 年，浮式基礎設計考量結構自重、車輛載重 ( 橋梁 )、風、水位、波浪、海流、海嘯、地震、颱風、船舶撞擊力、海生物附著及浮力等載重。設計應檢討結構基本振動與其他風、風浪產生之互制效應，是否產生共振及疲勞之問題，並能承受極限載重的安全強度及穩定性要求。浮式基礎分析設計較固定式基礎困難，除結構安全強度外，須特別考慮平台定位、錨定基礎及飄動穩定。浮式平台 6 個自由度包含位移 ( surge, sway, heave ) 及旋轉 ( pitch, yaw, roll ) 運動，類似船舶分析，並考慮安裝、運輸、運轉、極端載重等穩定要求，動態分析及結構非線性行為。「張力腳平台」鋼鍵採預力式，受到波浪、海流及海生物附著，另需考慮水動力疲勞的問題 ( 劉浙仁、冀樹勇、譚志豪, 2019 年 )。

## 浮式風機 (The Floating Wind Turbine)

離岸風機由淺水區固定式基礎發展至深水區浮式基礎，更能擴大開發風場。浮式風機可以先在岸上組裝完成，再拖往外海放置，較固定式基礎可以節省海上施工與組裝時間。

浮式風機的發展程序須先進行示範風機計畫，藉由實測資料以驗證設計分析程序，2001 年 Hywind 計畫取得概念模型專利，2009 年挪威國家石油公司 Statoil 在挪威安裝全球首座全尺寸實體浮式風機測試機組，裝置容量 2.3MW，平台採用 SPAR 浮筒式，風場水深約為 220 m。2017 年 Statoil 在蘇格蘭彼得黑德外海「Hywind Scotland」，裝置容量 30 MW，使用 5 部 6 MW 風力發電機，浮式平台採用「SPAR 浮筒式」(圖二)，風場水深約為 95~120 m。



圖二 Hywind Scotland 浮筒式平台

(參考 <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>)

2021 年完工的「Kincardine」為目前全球規模最大的浮式風場，位於蘇格蘭亞伯丁沿岸，由西班牙風電開發商 Cobra Group 開發，使用 5 部 9.5 MW 加上 1 部 2 MW 風力發電機，裝置容量約 50 MW，每年可產生 218 GWh (百萬瓩小時) 的電力，採用三角形的「半浮式

平台」(圖三)，風場水深約為 60-80 m。台灣目前初估水深大於 50 m 風場可開發規模大於 10 GW，應即早投入浮式基礎的開發(劉浙仁、冀樹勇、譚志豪, 2019 年)。



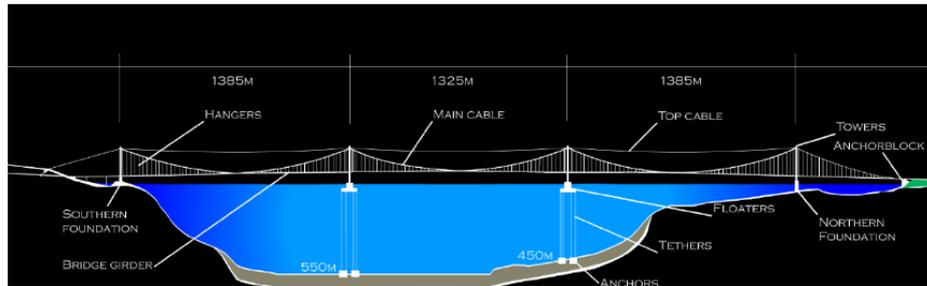
圖三 Kincardine 半浮式平台

(參考 <https://www.windtaiwan.com/ArticleView.aspx?ID=ART00226>)

## 浮式吊橋 (The Floating Suspension Bridge)

浮式橋梁由小而大，從跨湖泊短跨徑浮式梁橋，發展到跨海峽長跨徑浮式斜張橋及吊橋，實現在深海床建造跨海峽大橋之可行性。

全世界目前最長浮橋—美國西雅圖 Evergreen Point Floating Bridge，為浮式梁橋，全長 2350 m。挪威 Bjørnafjord 峽灣寬達 5 km，主跨徑無法以單跨跨越，海床深達 550 m，挪威公共道路管理部門( The Norwegian Road Public Administration, NPRA ) 自 2011 年進行可行性研究，以浮式吊橋方案跨越深海床，2015 年提出連續三跨浮式吊橋，配置跨徑 1385+1385+1385 m，2018 年修改為 1385+1325+1385 m，橋寬 30.6 m，流線型箱梁深 3.92 m，橋下通航淨空 45 m，四座主塔頂端並串聯主纜索增加抗風穩定(圖四)。



圖四 挪威浮式吊橋研究設計

(參考 Multi-span Suspension Bridge on Floating Foundation, NPRA, 2018)

海床地質為海洋黏土層，深海區配置兩座浮式基礎，深度分別為 550 m、450 m，其他淺水區為固定式基礎。浮式橋塔基礎採用「張力腳平台」(圖五)，錨定鋼鍵永遠保持垂直及平行在初始平台的位置，對於偏擺 (yaw) 耦合波浪影響仍能維持頂端及底部鋼鍵之距離，鋼鍵無張力減少問題，且頂端漂浮物受到波浪作用，無俯仰 (pitch) 運動。



圖五 浮式橋塔「張力腳平台」

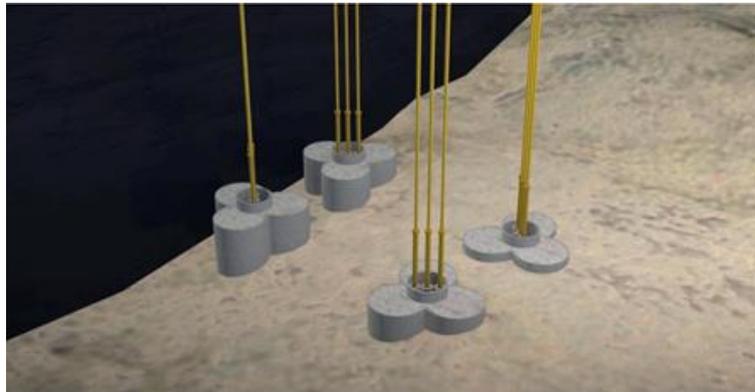
(參考 <https://www.youtube.com/watch?v=BiUVG0ksrVk>)

每座橋塔「張力腳平台」由 4-6 處錨定鋼鍵固定，包含三部分：鋼鍵頂端連接器、鋼鍵、鋼鍵底部錨定區 (圖六、七)，底部海床錨定區為抗鋼鍵拉力，採取負壓式沉箱基樁 (suction piles) 結合重力式基礎。每處錨定鋼鍵配置多根鋼鍵，俾利維修時逐根更換維持安全，並為維持每根鋼鍵預力狀態，可以藉著長度調整節點 (Length adjustment joint, LAJ) 調整長度。



圖六 浮式吊橋基礎

(參考 <https://www.youtube.com/watch?v=BiUVG0ksrVk>)



圖七 浮式吊橋基礎鋼鍵錨定區

(參考 <https://www.youtube.com/watch?v=BiUVG0ksrVk>)

## 海中段結構採水動力分析法 考慮波浪影響

浮式橋梁基礎分析設計比浮式風機複雜，浮式風機為單一個體，而浮式橋梁為連續多跨結構，且須確保橋面行車安全。最大環境載重考慮風及浪(100年回歸期)，海中段結構採用水動力(hydrodynamic)分析方法，考慮波浪作用之影響及確認其穩定性。結構分析採用商用程式(如Abaqus、USFOS、SIMA、SOFiStik等)建立3D數值模型，以幾何非線性數值分析吊橋主塔及主梁、浮式基礎、錨定鋼鍵等構件受不同載重之互制影響。

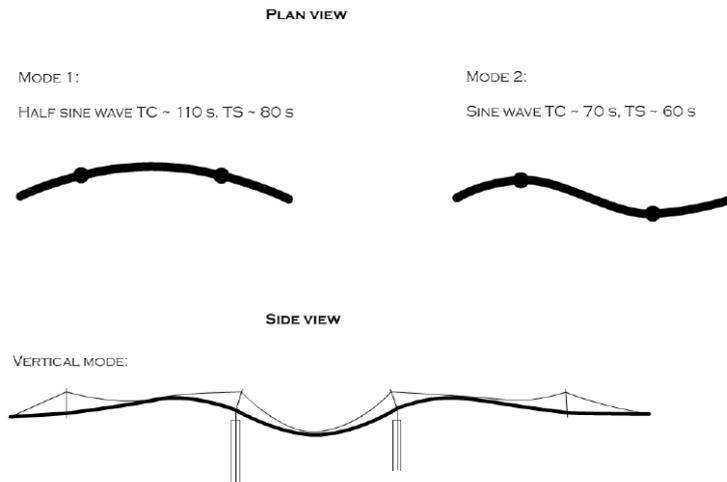
載重組合需考慮服務 ( Serviceability Limit States, SLS )、極限 ( Ultimate Limit States, ULS )、疲勞 ( Fatigue Limit Stated, FLS )、意外事故及受損 ( Accidental Limit States, ALS ) 等情況，並確保正常情況結構安全 ( 1 年回歸期暴風 )、極端氣候不會坍塌 ( 100 年回歸期暴風 )。主梁在橋軸向設置緩衝器，可以承受慢速運動 ( 溫度 ) 引致水平向 1.4 m 變位，對快速運動 ( 車輛、風、浪、地震 ) 可以發揮阻尼效應降低運動變位，當變位超過 1.4 m 時，將鎖定如同固定式支承，並使每個橋塔承受水平力約 60 MN ( Veie J. & Holtberget S.H., 2015 )。

## 預測結構動態行為 建立模型計算振態

浮式吊橋基礎面臨設計新挑戰為預測結構動態行為，包含下部結構 ( 浮式基礎及水下繫泊設施 ) 與上部結構 ( 橋塔及主梁 ) 之結構與流體複雜的互制行為，水動力 ( hydrodynamic ) 及氣動力 ( aerodynamic ) 模擬是一個重要課題。

流體及結構互制動態模擬包含水彈力、氣彈力及非線性結構行為模擬，可以採取頻率域 ( 概率 ) 或時域 ( 確定性 ) 進行動力分析，「頻率域分析」優點較省時間，缺點對非線性及短暫反應需要提供非線性方程式進行解析；「時域分析」優點可精確模擬所有非線性模式，缺點為分析時間較長。結構分析特別觀察結構在強風大浪下之穩定性，預測嚴苛環境下極端動態反應，確保維持橋梁及行車穩定，當橋塔振動時激發主梁的變位，須限制橋塔傾斜動態反應。

分析流程首先建立整體模型，計算水平及垂直向結構基本振態如圖八所示，考慮規則及非規則波浪運動效應，並考慮風、風浪之個別作用影響，風力動態分析考慮 100 年回歸期歷時紀錄，並考慮不同橋塔承受風、風浪及湧浪動態載重之多支承歷時效應。



圖八 浮式吊橋基本振態

(參考 Multi-span Suspension Bridge on Floating Foundation, NPRA, 2016)

浮式基礎採用「張力腳平台」在北海已驗證可承受浪高 20 m，在墨西哥灣可承受颶風吹襲 ( American Society of Mechanical, 2004 )。在 1 年回歸期暴風服務載重情況下，橋軸橫向容許變位控制在 1/200 內，錨定鋼鍵頂端側向水平位移約 21 m ( 圖九 )。



圖九 浮式吊橋基礎橋軸橫向變位(參考 Veie J. &amp; Holtberget S.H.)

## 浮式基礎解決深海難題 經評估為可行方案

浮式基礎提供深海床設置離岸風機及跨海橋梁之可行方案，目前商轉離岸風機浮式基礎採用「浮筒式」及「半浮式」平台，解決離岸風機水深超過 50 m 設置難題，擴大了離岸風場設置範圍，增加再生能源的開發。挪威提出創新浮式吊橋構想，解決深海床橋梁基礎的配

置問題，浮式基礎採用「張力腳平台」，經評估是可行性方案，唯在極端氣候下（如颱風、海嘯、地震等）需考慮橋梁之安全性及穩定性，並訂定運營階段暫停通車之封橋標準。

## 參考文獻

1. 康志堅(2017),「浮體式離岸風電技術發展現況與未來展望」, 工業技術研究院產經中心。
2. 黃金城、樊庭宇、朱棟樑(2019),「離岸風機水下結構的設計—海上巨型風扇的支撐者」,科學發展,2019年8月,560期,pp.20-27。
3. 劉浙仁、冀樹勇、譚志豪(2019),「台灣本土離岸風機下部結構工程之展望」,中興工程,第114期,2019年7月,pp.5-13。
4. American Society of Mechanical, E. (2004), Omae, 2004, “ 23<sup>rd</sup> International Conference On Offshore Mechanics and Architects And Artic Engineering”, June 20-25, 2004, Vancouver, Canada : Proceedings, New York, Asme.
5. DNV KEMA(2012)The Crown Estate, “UK Market Potential and Technology Assessment for Floating Offshore Wind Power : An Assessment of the Commercialization Potential of The Floating Wind Industry
6. Veie J. & Holtberget S.H.(2015), “Three Span Floating Suspension Bridge Crossing the Bjørnafjord”, Multi-span Large Bridges-Pacheco & Magalhaes (Eds.), pp. 373-380