離岸風機基礎設計技術初探

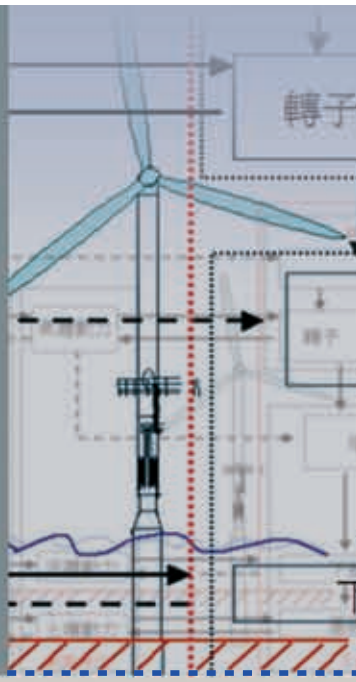
關鍵詞：離岸風力機組、自然振動頻率、LCP

台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／資深協理／廖學瑞 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／技術經理／丁金彪 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／副理／林俶寬 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／港灣部／正工程師／劉育明 ❹

摘 要 ABSTRACT

離岸風力機組因環境外力及運轉承受多重振動源作用，為避免產生共振，須謹慎、評估該整體離岸風力機組於所考量設計條件的結構動力特性變化。此自然振動頻率改變主要是來自系統質量增加或勁度衰減；海生物增生覆蓋於水下結構表面，使得風力機組振動週期增加，在無相關海生物資料可供設計參考的前提下，基於基礎量體經濟性考量，假定海生物增生厚度搭配定期檢測、清除方式，以達自然振動頻率設計需求。地震引發之土壤液化及構件腐蝕引致風力機組系統勁度衰減，未來於基礎型式評估及防蝕系統擬定須納入考量，藉以降低自然振動頻率變動性。

就台灣的地域地質、海氣象條件特性言，離岸風力機基礎設計須考慮現役風場所沒有或忽略的設計情境，諸如：颱風、東北季風及地震等；針對颱風此熱帶氣旋的設計考量，GL於2013年所發行之技術文件開始討論，未來將依其適用性參考引用；就東北季風的海氣象條件特性，須就所搭配的風力機運轉情境予以討論；另因地震所誘發諸如基礎穩定性、系統勁度衰減及可能產生共振等劣化現象須依據風場特性進行討論。探此，現行離岸風力機組設計所採規範及台灣既有設計規範等之適用性宜須進一步探討。



壹、前言

隨著能源需求的增加，在兼顧生態保護原則下，能源供需也從原本的油、氣及核能等來源，進而尋求其他永續再生替代能源；風力發電是再生能源的一種，為了更有效應用此風能，風力機設置亦也由陸地而推向離岸海域，台灣為因應此再生能源需求已朝向積極開發離岸風場努力。

雖然有歐洲離岸現役風場的開發經驗可依循參考，但就海氣象條件、地質特性及所位處區域比較，台灣離岸風場開發尚須考慮以往所沒有或忽略的設計情境。本文對於離岸風力機基礎設計探討，將以台灣的地域特性、海氣象條件分就基礎型式及設計考量(設計載重)予以探討，並簡單介紹一般離岸風力機基礎的載重計算程序(LCP, Load Calculation Process)。

貳、基礎型式

現役風場所採離岸風力機基礎型式，應用較多者計有重力式（Gravity base)、單樁式(Monopile)、Tripod及Jacket等基礎，分別說明如后(如圖1所示)；另因Tripile基礎型式涉及專利權、而Suction bucket及浮式(Floating)基礎型式尚在開發階段故暫不討論。

一、重力式基礎(Gravity base)

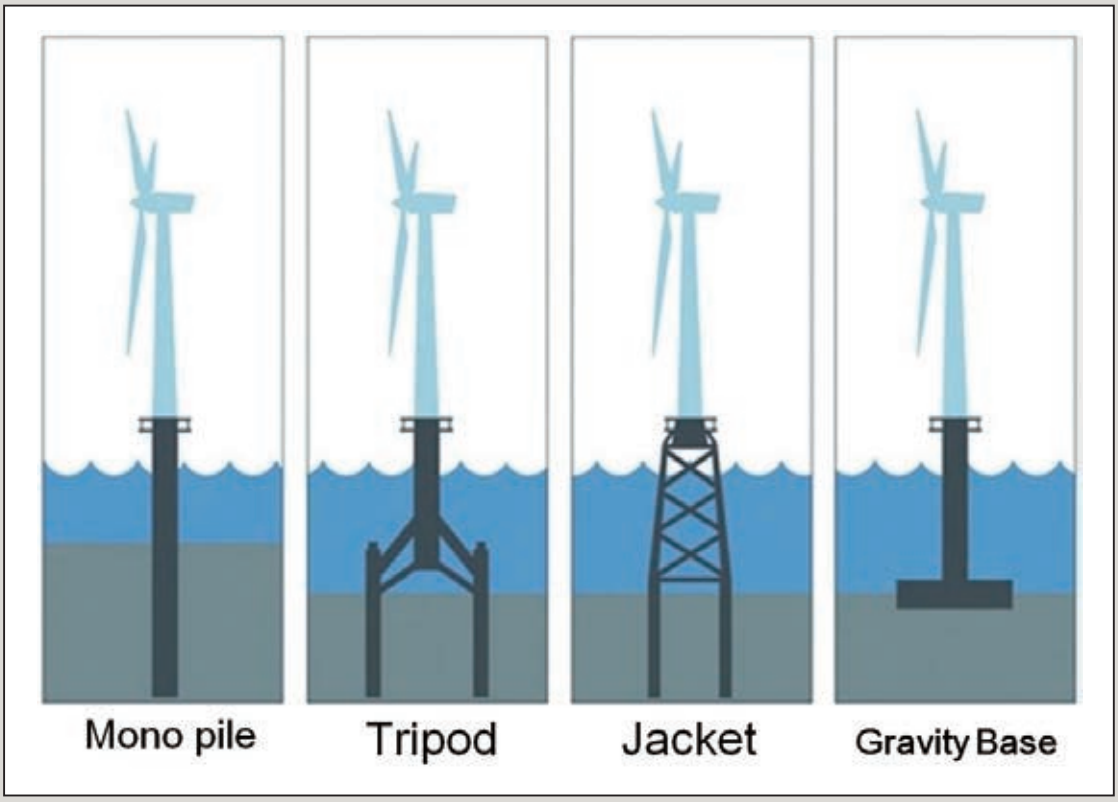
係藉由重力方式保持基礎穩定，並傳遞上方構造載重至所承載的海床上。決定採此種基礎型式的因素說明如次：

(一)支撐基礎的土體強度。

(二)基礎所在海床之相對地形穩定程度。

(三)水深條件，目前多應用於水深10公尺以內水域。

(四)基礎製作場地及運輸、安裝成本評估。



資料來源：http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/wind-energy-gets-%20serial/1012449.article

圖1 離岸固定式風機基礎型式

二、單樁(Monopile)

單樁基礎為一大口徑鋼管樁，風力機塔架(Tower)藉由法蘭接合(Flanged Connection)或是灌漿接合(Grouted Connection)與基樁銜接，並傳遞上方載重至所承載的海床上。就歐洲經驗，該型式基礎多應用於水深小於20公尺的水域。未來風場開發針對該基礎型式選用考量因素建議如次：

(一)支撐基礎的地質條件。地質條件可能導致基樁量體過大，或是基樁無法施工。
(二)海氣象條件(颱風、東北季風)、地震引致液化問題。
(三)樁體量體與運輸、安裝成本評估。
(四)適用水深條件的碎波(Breaking Wave)影響程度評估。

三、Tripod

Tripod利用三支水下斜撐(Bracing)支撐一垂直鋼管(或稱為轉接段,Transition Piece)，該垂直鋼管與塔架(Tower)以法蘭接合(Flanged Connection)或是灌漿接合(Grouted Connection)連接，水下斜撐藉由套管(Sleeve)與所打設的基樁連接。未來風場開發針對該基礎型式選用考量因素建議如次：

(一)支撐基礎的地質條件。地質條件不適打擊樁工法者，不適採用。
(二)基礎製作工藝。
(三)基礎量體與運輸、安裝成本評估。
(四)風場水深分布範圍較大者，較淺水域不適該基礎型式。

四、Jacket

Jacket係由鋼管所組成的構架系統，於此鋼構架上方平台設置轉接段以法蘭接合(Flanged Connection)或是灌漿接合(Grouted Connection)與塔架(Tower)連接。該鋼構架四支主桿件(leg) 藉由套管(Sleeve)與所打設的基樁連接。未來風場開發針對該基礎型式選用考量因素建議如次：

(一)支撐基礎的地質條件。地質條件不適打擊樁工法者，不適採用。

(二)因基樁打設較為費時，因此施工階段自然環境的氣候、海域靜穩度要求較高。

(三)風場水深分布範圍較大者，較淺水域不適該基礎型式。

參、設計載重及設計考量

離岸風力機組與環境載重的交互關係(如圖2所示)，因為波浪、流等載重作用因素不同於陸上風力機組；也因為風力機運轉因素不同於傳統的海上工作平台。離岸風力機組與其周邊環境載重交互影響關係依時改變，就此，離岸風力機組的結構動力特性是規劃設計所需考量的參數。台灣海氣象條件、地質特性及地處地震帶，與現役歐洲風場不盡相同，因此，須將台灣地域、海氣象特性融入未來的風場開發考量。

一、設計載重

(一) 永久載重

永久載重係指載重大小、作用位置、方向於風力機設計使用年限內，皆不隨時間改變者。永久載重包括：

1. 基礎結構量體。
2. 永久設備附屬設施重量。
3. 水位線下構件的靜水壓力。
4. 浮力。
5. 風力機及塔架量體。

(二) 變動性載重

風力機運轉、維護人員作業行經爬梯平台、起重設備操作及工作船繫靠需求，其所引致載重大小、方向及作用位置將因

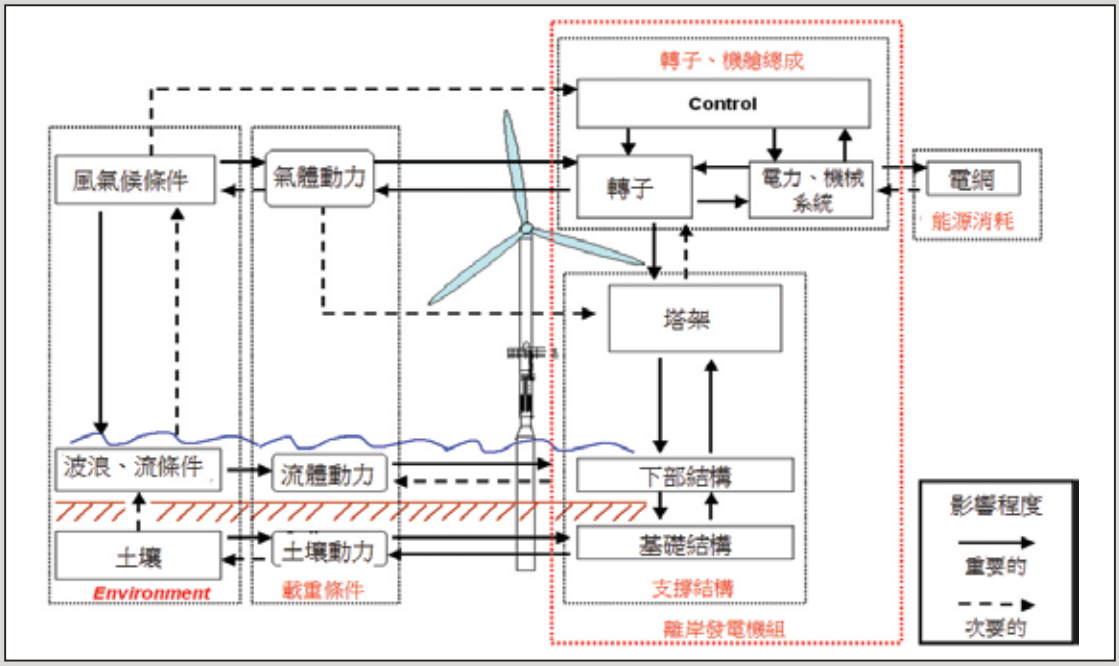


圖2 離岸風力機組與環境載重關係示意圖[1]

運轉情境、作業需求而不同。各種變動性載重設計考量敘明如次：

1. 風力機運轉、控制所致的制動載重(actuation load)，將是由風力機設計製造廠商轉化提供的界面載重(塔架底部載重)以供風力機基礎設計之用。
2. 維護人員、起重機操作載重，僅作為設計諸如平台、爬梯等局部附屬構件之用。其中起重機操作動態衝擊效應須依照所依據設計規範規定予以考量。
3. 風力機基礎及轉接段的爬梯須將工作船繫靠載重納入考量

(三) 環境載重

環境載重係依風場所在的氣候、地形、水深及地質條件而定，其包括風、波浪(流)及地震等，環境載重依時(time dependent)變化其作用力大小、方向及作用位置。以下將就各種環境載重特性說明如次：

1. 風

風力機基礎所採設計風載重依據設計目的分為常態風載(Normal Wind Condition)及極端風載(Extreme Wind Condition)，相關各風力載重的適用分析及其考慮環境因素如表1所示。

目前離岸風力機組規劃設計所參考規範諸如IEC、DNV對熱帶氣旋(颱風)並無相關議題討論，主要是現役已開發風場多不具此氣候條件，未來台灣風場開發須將此颱風所引致環境載重特性(風、浪、流)納入考量。另須配合IEC規範所描述風力載重釐清東北季風特性。

2. 波浪

離岸風力機基礎設計對於波浪載重考量，主要係依據風場所在海域的海況(sea state)條件選用適用的波浪譜(諸如Pierson-Moskowitz spectrum、Jonswap spectrum)進行模擬。一般風力機基礎構件斷面尺寸相對所考慮波浪條件波長的比值小於0.2，因此應用Morison's公式計算此水動力載重。考量瞬時海面高程變化(instantaneous seasurface elevation)影響，再以Wheeler stretching經驗方法修正此水動力載重計算。

位於淺水區域的風力機基礎，碎波(breaking wave)所引致高能量水動力效應須納入考量。

3. 地震

就歐洲現役風場開發案例言，地震相對於風、波浪條件等其他環境載重，不是一個主要控制設計載重因素。但台灣地處地震帶且海域地質特性與北海等已開發風場不盡相同，因此，未來進行風場開發須將地震載重因素納入考量。對於地震力考量宜針對下列議題予以釐清：

表1 風力載重分類說明

	常態風載 (normal wind load)	極端風載 (extreme wind load)
載重分析考量	疲勞載重 (fatigue load)	極限載重 (extreme load)
風載定義參數	→空氣密度 →10分鐘平均風速(long term distribution) →依高度變化的平均風速梯度(風切)	→極端氣候條件空氣密度 →極端氣候(暴風或極端紊流)之風速及風切 →風速、風向急遽改變參數

註：紊流強度(Turbulence Intensity)，因應風力機運轉情境可分別採常態紊流模型(Normal Turbulence Model)及極端紊流模型(Extreme Turbulence Model)進行分析，惟須先針對風力機配置所引致的尾流(wind wake)影響程度進行評估，方可確認所引用分析模型的適用性。

(1) 設計地震力決定

國內既有耐震規範係針對建築及橋梁結構訂定，離岸風力機組結構型式皆非上述規範所定義結構系統，故無法直接引用國內耐震規範計算地震力。油、氣產業所引用ISO或API規範，對離岸構造物地震力計算有相關規定(於ISO規範亦可查得回歸期1000年台灣海域的譜加速度)，但離岸油、氣工作平台設計年限為100年，離岸風力機組設計年限20~25年，若直接引用ISO等規範直接計算地震力是否有過於保守之虞。

(2) 地震力作用時之其他環境載重條件

依據德國認證單位GL相關認證準則(Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines)說明，採回歸期475年地震力分別與運轉(Operation)、停機(shut-down)及電網損壞(grid failure)三種情境下的風、波浪條件組合進行極限載重分析。然而就台灣的氣候條件言，與地震力組合所考慮的風、波浪是否可如同歐洲風場定義方式決定，宜須進一步探討，畢竟受地質特性影響，土壤液化常因地震而產生。

依據台灣海域地質特性，可能因地震事件而引發土壤液化，該液化現象對於風力機組可能的損傷說明如次：

(1) 單就土壤液化事件，風力機基礎承載能力因而降低、局部區域不均勻沉陷或產生側向位移(就tripod或jacket基礎型式為例)。

(2) 連同周邊環境載重作考量，土壤液化將改變風力機組結構動力特性，使得對於長週期性環境載重更為敏感，相對危害構件疲勞強度。同時亦須檢核整體風力機組的自然振動頻率是否仍落於風力機製造廠商所律定的頻寬範圍。

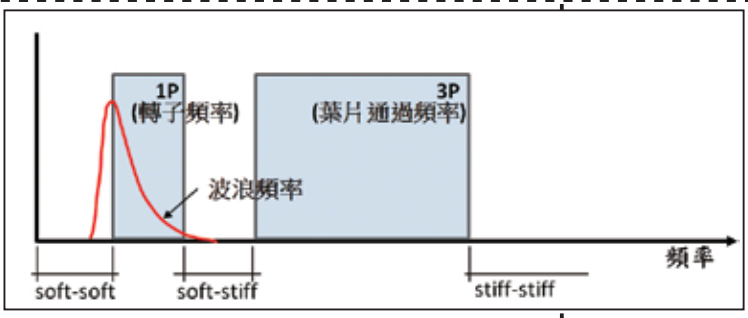


圖3 風力機組自然振動頻率及頻寬

二、設計考量

(一) 基本振動頻率

離岸風力機組(發電機組、塔架、支撐結構和基礎)的結構動力特性是基礎設計所須考慮的一個重要因素。風力機運轉其整體系統承受多重振動源，一是來自風力機運轉所引致的塔架振動，同時，波浪反覆載重帶動整體系統振動。為避免共振造成載重效應放大，離岸風力機組配置的基本振動頻率須落於風力機製造廠商所律定的頻寬範圍內，這個頻寬界定為轉子(rotor)轉動頻率(1P)及葉片通過頻率(3P)之間(如圖3)。海上工作平台的振動源是來自波浪反覆載重作用，因此該構造配置須控制其基本振動頻率大於波浪主控頻率即可，故針對海上工作平台的波浪載重分析多採靜力或擬靜力方式進行。然針對離岸風力機組則採動力分析，藉以考量不同振動來源的耦合效應(Coupling)。

(二) 極限載重狀態

風力機基礎必須於所考量的載重作用下不得崩塌(Collapse)以符合極限載重設計原則。

風場內風力機組彼此設計考量相似度高，所須面對危害風險相同度亦高，所以極可能在單一極端環境載重作用下造成多部風力機組損壞。以1995年日本阪神地震

Hanshin快速道路損壞事件為例，多處橋墩於此地震事件同時破壞因而造成橋梁崩塌。因此，為避免多部風力機組損壞衝擊風場經濟效益，風力機組於設計年限的設計考量是應予以檢討的。

(三) 疲勞載重狀態

離岸風力機組隨著運轉模式改變、海氣象條件不同，其所承受的反覆振動程度亦隨時變動，如是持續的應力大小變化將引致結構材料逐漸劣化，承受應力較大位置(或稱應力尖端)產生裂縫，屆時，應力持續反覆作用促使這些位於母材或接合部的初始瑕疵(Initial Crack)或已產生之微裂縫伸展延伸，終將導致桿件或接合部產生斷裂破壞。就風力機基礎結構配置言，控制疲勞強度的主要因素在於整體結構勁度(Stiffness)，勁度控制該離岸風力機組自然振動頻率特性，但位於海水中的風力機基礎將因為結構斷面腐蝕(Corrosion)、基礎淘刷(Scour)等因素降低基礎結構勁度而降低整體系統的自然振動頻率。此時，基礎結構對於波浪條件所造成的反覆振動更為敏感，其所表現振動反應加大，進而逐漸折損結構疲勞使用年限。此乃說明亦同時解釋現役風場風力機基礎所須採結構斷面厚度的原因。

構件或接合部反覆載重分析結果經由如雨流計數法(Rainflow Counting)整理所得應力幅(Stress Amplitudes)及其相對應反覆作用數(number of cycles)，再配合SN曲線(Wohler’s Curves)評估其疲勞使用年限，即可以Palmgren-Miner法則評估該構件或接合部疲勞強度。

(四) 其他設計考量

1. 腐蝕

風力機基礎結構的防止腐蝕措施將依構件所在位置，分就大氣區(Atmospheric Zone)、飛濺區(Splash Zone)及沒水區

表2 防蝕措施分類說明

位置＼分區	大氣區 (atmospheric zone)	飛濺區 (splash zone)	沒水區 (submerged zone)
內部 (internal)	→塗裝 →腐蝕餘裕量(濕度非影響因素)	→塗裝＋腐蝕餘裕量	→陰極防蝕[3](CP) →腐蝕餘裕量
外部 (external)	→塗裝	→主構件：塗裝＋腐蝕餘裕量 →次要構件： ✓腐蝕餘裕量[1] ✓更換腐蝕構件 →繫靠及樓梯[2]： 塗裝＋腐蝕餘裕量 →螺栓：採防蝕材料 →位於平均水位面下： 陰極防蝕(CP)	→陰極防蝕[4](CP) →陰極防蝕＋塗裝[5]

註：1. 腐蝕餘裕量考慮，須將之維護人身安全、檢修維護頻率及經濟性納入考量，若腐蝕餘裕考量係屬一不經濟且未必符合安全需求方案者，直接替換腐蝕構件是另一種可採行方案。
2. 直接採用諸如不銹鋼等之防蝕材料製作該構件。
3. 應用於構件內部的陰極防蝕設計主要以犧牲陽極為主。外加電流陰極防蝕(ICCP)避免採用。
4. 陰極防蝕設計須將被防護構件之埋入海床外表面納入考量，相關設計細節敬請參詳DNV-RP-B401。
5. 塗裝系統必須相容於陰極防蝕。

(Submerged Zone)及各分屬區域內、外部位說明，詳如表2所示。

對於離岸風力機組，腐蝕餘裕量是必要的防蝕策略，腐蝕所致之整體系統結構動力特性改變，須予以確認整體系統的振動頻率仍否落於風機製作廠商所律定頻寬範圍內。

2. 淘刷(Scour)

風力機基礎座落之海床經由波浪、流的剪切作用將造成淘刷。為避免淘刷造成風力機組不穩定，須依風力機基礎型式設計合適的防止淘刷保護措施。位於淘刷保護頂層所配置材料重量須足敷抵抗設計波浪條件的侵蝕，整體淘刷保護採反濾層方式配置藉以保護海床避免淘蝕。

3. 海生物(Marine Growth)

位於水中的支撐、基礎構造表面會被附著增生的海生物包覆，海域生態環境及風場氣候條件決定海生物附著厚度，隨著海生物增生水下構體質量及其表面粗糙度增加，伴隨著波浪載重所引致的慣性作用力、拖曳力增加，進而影響水下構件的疲勞強度。水下構體質量增加亦伴隨著風力機組基本振動頻率縮短，因此，須就此情境分析風力機組基本振動頻率是否落於風力機製造廠商所律定的頻寬範圍內。就DNV-OS-J101所述位於亞熱帶地區的海生物增生調查，於設計使用年限可能達30公分的增生厚度，台灣對此海生物生長並無相關研究或調查資料可供設計參考，故未來規劃設計建議採一假定海生物增生厚度(以基礎設計量體經濟性作考量)，再配合以定期檢測、清除方式以達設計需求。

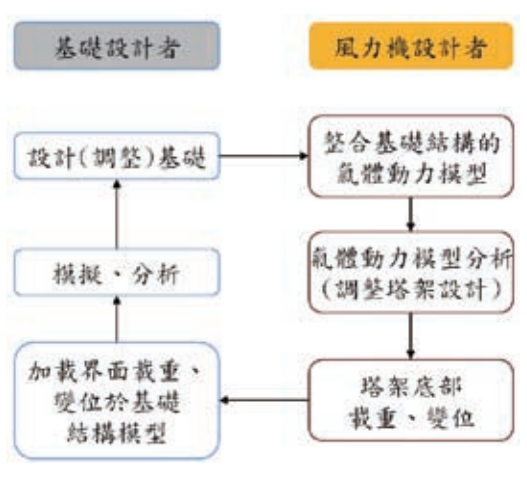


圖4 離岸風力機組設計流程示意圖

肆、計算流程

離岸風力機組設計流程如圖4所示，風力機及塔架係由風力機製造廠商設計，轉接段(Transition Piece)及基礎由基礎設計者設計。整個離岸風力機組設計是分工交替循環的設計流程。

整個離岸風力機組設計流程一般稱為LCP(Load Calculation Process)，其簡要說明如次：(以下基礎設計者簡稱FD，風力機設計者簡稱TD)

一、TD提供風力機及塔架設計資料(尺寸、質量、塔架底部固定邊界條件的基本振動頻率)、界面位置兩組通用載重(Generic Load, 兩平面正交方向載重)及離岸風力機組的頻寬(Frequency Band)給FD以作為建置整體分析模型之用。

二、FD建構有限元素分析模型(包含邊界條件設定、依據海氣象報告確認加載各分析情境的環境載重)。

三、依據TD需求，FD簡化基礎結構的分析模型及其相對應簡化環境載重。此簡化基礎模型即依頻譜收斂(Spectral Convergence)及空

間收斂(Spatial Convergence)兩項原則進行驗證。相關模型簡化及前述兩項驗證原則非本文主要探討主題，不予贅述。

四、TD將之前述簡化基礎模型及其相對應簡化環境載重，整合至風力機(包含塔架)的氣體動力分析模型，進行分析並且驗證FD所提供模型所呈現的自然振動頻率是否落於所律定的頻寬範圍內。

五、TD依據分析及優化的風機塔架設計結果(界面位置的力量及變位)傳遞給FD，FD重複前述二、三的分析工作，TD再依據FD提供資料重複前述四的工作。

六、前述交替循環的載重計算流程一般大約進行三次，直至TD、FD雙方得到最適切的設計結果。

伍、結語

他山之石，可以攻玉，參考現役風場的開發經驗是一種經歷的過程；然而離岸風力機組是一種因地制宜的客製化產品，因應台灣特屬的海氣象條件、地質地域特性需求所設計的離岸風力機基礎，須考慮現役風場所沒有或忽略的設計情境，諸如：颱風、東北季風及地震等；上述設計議題於現行設計規範並未多加說明討論，因此須搭配相關離岸油氣產業規範、台灣現行其他構造物規範及相關議題研究成果進行規劃設計以達需求，然設計參考資料彼此間引用的合理性及一致性須謹慎以避免過度或不及。離岸風力機基礎規劃設計非屬單一專業議題，須由相關專業、產業多方討論、磨合方能更臻至完善。

參考文獻

1. Patrik Passon, Martin Kühn, State-of-the-art and Development Needs of Simulation Codes for Offshore Wind Turbines
2. IEC 61400- 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2005
3. DNV (2013) Design of offshore wind turbine structures Det Norske Veritas, DNV-OS-J101
4. ISO 19901-2 (2004) Petroleum and natural gas industries specific requirements for offshore structures - Part 2: seismic design procedures and criteria Issued 2004-11-15 by the International Standards Organization
5. American petroleum institute; API RP 2A-WSD - Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design;, 21st edition, December 2000