



# 套筒式離岸風機下部結構之細部設計實務概述

中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部經理 / 徐偉朝  
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 夏瑄  
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 郭思伶  
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 杜昱石  
中興工程顧問股份有限公司電力及能源工程部工程師 / 林芄好

關鍵字：離岸風電、離岸風機下部結構、套筒式結構

## 摘要

為減少二氧化碳排放，全世界全力發展綠色能源，而離岸風電為其中之一。近年，在政府支持下，離岸風電產業蓬勃發展。然離岸風電工程技術係基於離岸油氣工程技術，國內工程界過去並無相關經驗。本設計團隊有幸執行並主導國內離岸風機下部結構設計案，擬藉本文分享執行過程所累積之技術經驗，期對國內工程界有所助益。

## 一、前言

空氣從高壓區域向低壓區域移動而產生風，人類很早便利用風力做為能源。西元前

5000年，人們利用風能推動尼羅河沿岸之帆船。至西元前200年，中國已有簡單之風力水泵，波斯和中東則有帶著編織蘆葦葉片的風車用於碾磨穀物。商人和十字軍將風能技術帶到歐洲。荷蘭人發展出大型風力泵來排乾萊茵河三角洲之湖泊和沼澤，以增加陸地面積[1]。在工業革命發明蒸氣機後，人類改以石化燃料做為主要能源。1970年代之石油危機，人們開始尋找替代能源，其中包括風能。1980年代在美國加州便已設置數千部風機。近年，為減少石化能源對全球氣候之影響，發展如風力發電之綠色能源成為世界各國共識。隨著風機容量大型化與陸地發展受限，人們開始將風力發電機設置於海上。



圖 1 Vindeby 離岸風場 [2]

1991年丹麥建置第一座離岸風力發電場 Vindeby Offshore Wind Farm，其裝置容量為11部450 kW風機（已於2017年除役），如圖1所示。隨後，離岸風電開始於歐洲地區蓬勃發展。後發展至亞洲、美洲。至2021年，全球已有21.1 GW容量併網，全球目標至2030年建置近380 GW離岸風機[3]。可預見離岸風電成為全球蓬勃發展之能源產業。

離岸風機支撐結構設計與傳統陸域結構設計思維極為不同[4]，離岸結構承受全天風浪作用，結構設計可能非由極端情境(如颱風、地震)所控制，而是平時長期風浪反覆作用造成之結構疲勞才是破壞主因。

離岸風電工程技術係基於已發展百年之離岸油氣工程技術，後者以美國API與歐洲DNV等兩系列標準為代表。由於離岸風電產業自歐洲開始發展，最早離岸風機支撐結構設計標準係由DNV於2004年制定DNV-OS-J101標準[5]，成為世界各國離岸風電工

程之主要設計依據。即使美國亦已發展離岸風機支撐結構設計標準[6]，但仍允許採用DNV系統標準進行設計。

風機下部結構始於初期概念設計，後續在風機商、電氣設備商、結構製造商、安裝商、運維商等加入後，將各廠商需求納入設計，使細部設計成果可符合製造、安裝與使用之需求。本文將依據本團隊執行套筒式離岸風機下部結構之細部設計過程中(其與單樁式下部結構設計有所不同)，概述其設計要點。

## 二、風機支撐結構組成

「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」[7]定義套筒式(jacket)風機支撐結構係從風機以下之塔架(tower)、下部結構(substructure)與基礎(foundation)所組成，如圖2所示。其中，下部結構包括轉接段(transition piece, TP)，亦常指包括基礎(基樁)的部分。

實務上，塔架由風機商設計，下部結構則由工程顧問公司(下部結構設計者)設計，兩者分工介面在塔架底部之法蘭接頭。接頭係由兩片法蘭以螺栓結合，上法蘭與塔架銲接，而下法蘭與轉接段銲接，風機商負責法蘭接頭設計。若下部結構設計者為配合轉接段而改變風機商之下法蘭設計(如壁厚)，則下部結構設計者亦可能須承擔設計

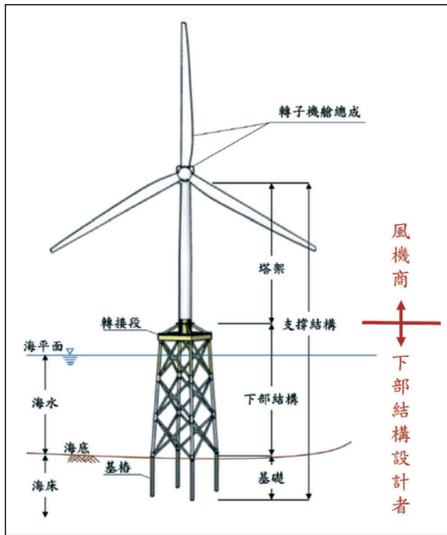


圖 2 套筒式風機下部結構組成與分工 [7]

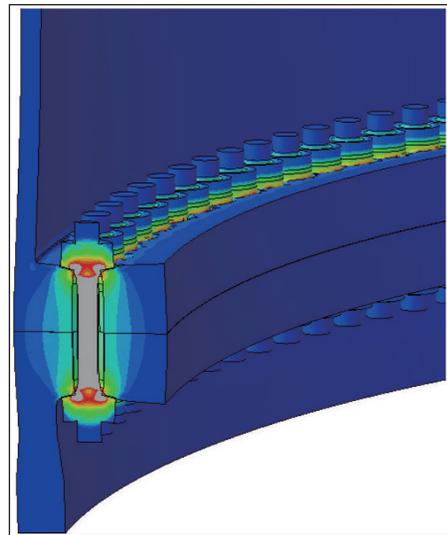


圖 3 法蘭接合之有限元素分析

責任。下部結構設計者可能須辦理包含下部結構與法蘭接頭之有限元素分析（如圖3所示），計算法蘭與螺栓應力之集中放大因子，供風機商設計。詳細分工需視風機商合約之約定。

### 三、設計流程

#### （一）設計準則

風機支撐結構細部設計流程圖可簡化如圖4所示，首先訂定設計準則，依據DNV-SE-0190第2.3節，可分為三個部分：

1. 設計準則A，通常由業主提供，用於說明場址條件、環境參數、設計需求或業主之額外需求等。

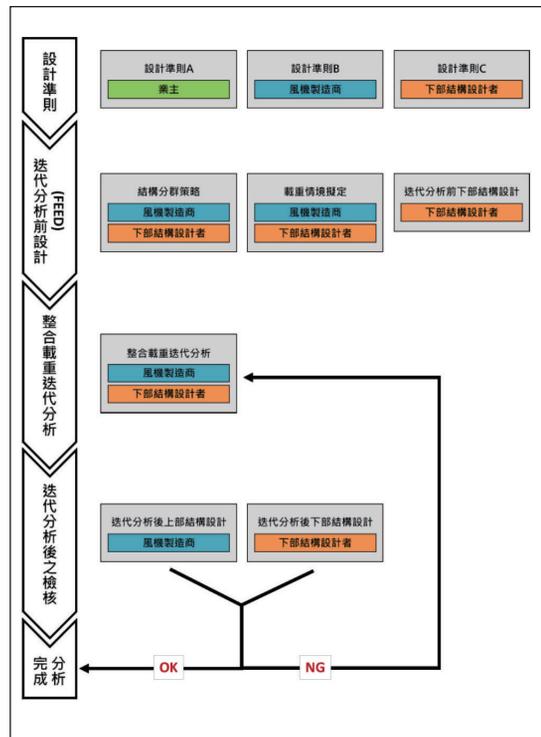


圖 4 風機下部結構設計流程概述

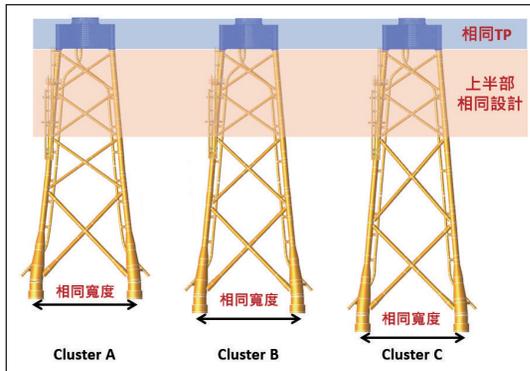


圖 5 三種群集之相同設計示意

2. 設計準則B，由風機商提供，說明風機特性、設計需求、設計方法、載重組合、風況設計參數等。
3. 設計準則C，由下部結構設計者負責，內容包括下部結構之設計需求、材料、設計方法、海況、土工設計參數等。

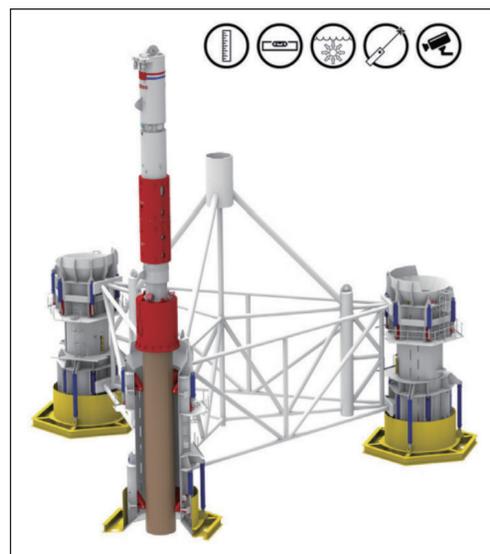
## (二) 分群策略

每座風機支撐結構設計所考量之載重組合可達上萬組，若針對風場內每座風機支撐結構進行個別歷時分析，雖在重量上可達最經濟設計，但極為耗時。較長之設計時程將導致較晚之併網發電時間，對整個計畫並非最經濟。為儘早併網發電，通常採用「群集策略 (cluster strategy)」，以減少需設計之結構數量，以減少設計時程。

實務上，主要依據水深條件進行分群

(clustering)，其次則依據土壤條件。通常位於較深處之結構承受較大之海況載重，因此選擇群集內最深處作為代表位置，為確保此位置須能完整包絡該群內之所有位置，通常採較嚴苛的環境條件（土壤參數與環境外力）作為此群集之輸入參數。同一群集內之結構設計相同，以減少分析工作量，並可採用標準化製造程序以降低生產時間與成本。此外，若在不同群集間之結構能有部分保持一致性，更能製造上之複雜度。

上述概念展示於圖5，三種群集之結構設計具有相同之轉接段、套筒桁架上部、船靠設施、與各種工作平台等，僅套筒桁架下部因高度不同而有變化。此外，離岸風機套筒式結構之基樁安裝通常採用先打法，打樁前先將打樁導架（如圖6所示）放置於海床上，

圖 6 打樁導架示意（來源：<https://www.iqip.com/>）



以便基樁可精準貫入海床。由於打樁導架之基樁間距通常不可調整，因此各群集間具有相同基樁間距，以共同使用打樁導架。

基樁間距主要由運輸船舶寬度、基樁承载力、樁頭受力所決定。此間距愈大，樁頭受力越小，基樁所需之承载力愈小，但需要之運輸船舶寬度愈大。因此，在設計之初，需進行敏感性分析，並由業主提供船舶寬度限制，以決定最適基樁間距。

### （三）載重情境

風機支撐結構需承受風場運作期間之各項載重情境，包括風機操作條件、風況、海況及其作用方向，並將其組合。如前述，風機與塔架設計由風機商負責，以下之結構部分則由下部結構設計者負責。雙方須討論各自關注之設計載重，共同制定載重組合表（Load Case Table），其情境須符合IEC 61400-3-1[8]或DNV-ST-0437[9]。依據「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」及DNV-ST-0126[10]，離岸鋼結構設計除須檢核整體結構頻率外，亦需考量極限狀態（ULS）、疲勞極限狀態（FLS）、意外極限狀態（ALS）及使用極限狀態（SLS）等四類情境。

### （四）整合載重迭代分析與檢核

風機支撐結構設計係由風機商與下部結

構設計者共同完成，故雙方須交換各自分析與參數資料，供對方進行設計。下部結構設計者須提供之資料包括縮減（condense）至塔架-轉接段介面自由度之下部結構（含基樁）質量矩陣、勁度矩陣、阻尼矩陣、與外力向量等。風機商再據以進行整體模型之氣彈力分析，再將介面歷時提供予下部結構設計者，以進行結構檢核與進行結構設計調整，上述過程迭代至雙方無須再修改設計為止。

## 四、設計考量

### （一）設計規範

決定設計所遵循之規範係設計之首要工作，除須確認所採用之規範版本（年份）是否為業主、開發商及設計驗證單位所接受外，亦須與風機商共同制定載重組合表時討論並確認。

IEC 61400-3-1為固定式離岸風機支撐結構設計之「母法」，惟其對結構設計並無太多著墨。由於DNV系列標準提供完整規劃、設計、製造、安裝等各階段之具體要求，實務上多以DNV系列標準做為依據，其中DNV-ST-0126為結構永久階段設計依據，而DNV-ST-N001[11]則為海上作業（如運輸、吊裝）之設計與檢核依據。另外，NORSOK、ISO、API、EN等標準為DNV系統標準所常引用之依據。

綜觀現行離岸風機結構設計規範，雖內容大同小異、常有相互引用之狀況，但細節仍有些微不同、或有先後交錯改版之情況發生，故建議於設計工作啟動之初，即與各方確認主要規範依據及其版本，並據以編製設計準則C。

表1展示下部結構設計規範層級架構（standards hierarchy）例，層級1為DNV-ST-0126與DNV-ST-0437標準，前者為支撐結構之設計依據，後者為載重及場址條件之擬訂依據。層級2為層級1所允用之規範，後續層級依此規則延伸。

## （二）環境條件

風場範圍之環境條件需依據一系列之調查（如地質鑽探、潮位、風速、地震資料）、研究（如海氣象研究、風況分析、海床變動）與試驗（大地現場/室內試驗）等，彙整後綜合研擬訂設計條件與載重情境。

此外，除風速、波浪、海流直接影響環境載重外，水深、潮位、風浪流方向與其聯合機率分佈、結構構件尺寸、海生物附着厚度、土壤條件、與基樁伸出海床長度（stick-up length）均影響設計成果。在設計前期，須進行敏感性分析（如高、低水位情境），以瞭解前述參數對結構設計之影響，進而選用較保守之條件組合進行設計，亦能減少載重組合數量。

表 1 規範 / 指引之階層

	項目	層級 2	層級 3
載重及載重條件	載重組合	IEC 61400-3-1	
	離岸特定荷載	IEC 61400-3-1	
	水動力參數	DNV-RP-C205	
	瑕疵	NORSOK N-004	
	地震	DNV-RP-0585 CNS 15176-1	
結構檢核	鋼結構設計 一般通則	NORSOK N-004 EN 1993 DNV-RP-C208	
	鋼結構 疲勞設計	DNV-RP-C203 NORSOK N-004	IIW recommend EN 1993- 1-9
	板殼鋼結構 強度及穩定度 設計	EN 1993-1-6 DNV-RP-C208	
	鋼結構接合設 計	EN 1993-1-8	
	灌漿接合	DNV-RP-0419	DNV- ST-C502
材料	鋼材規格 （鋼板）	EN 1993	EN 10025 EN 10164
	金屬製品 - 檢驗檔案的類型	EN 10204	
	螺栓材料	ISO 898-1	
	銲接接頭 品質等級	EN 1993 EN 1090-2	EN ISO 5817
製造	製造公差	ISO 19902 DNV-OS-C401	
防蝕保護	海水中陰極保 護一般通則	ISO 24656 DNV-RP-0416	
	固定離岸結構 防蝕保護一般 通則	ISO 24656 DNV-RP-0416	
	塗層系統	ISO 12944 ISO 24656 NORSOK-M501	
註：層級 1 為 DNV-ST-0126（針對支撐結構）及 DNV-ST-0437（針對負載和場址條件）			



### (三) 載重組合表

載重組合表列出風機商與下部結構設計者共同制定之所有設計情境，主要為極限限度狀態（ULS）、疲勞限度狀態（FLS）之載重情境。其內容包含下列主要設計條件：

1. 風機操作狀態、風向、風速、風況
2. 示性波高、週期、波向、波況
3. 海流流速、流向、流況
4. 潮位
5. 地震

此表格包含各種載重情境之編號、描述、載重方向、組合方式等信息，載重組合表之研擬步驟如下：

1. 確定載重條件：根據設計規範要求，確定與特定場址風機支撐結構相關之所有載重類型，包括永久載重（如結構自重）、環境載重（如風載）、臨時載重（如施工載荷）等。
2. 確定載重情境：根據設計規範和要求，確定載重條件之組合方式，主要針對極限限度狀態（ULS）、疲勞限度狀態（FLS）等。亦須考慮載重同時發生、逐步發生、最不利（保守）等組合。
3. 制定載重組合表：將前述擬訂之載重情境列在表內（通常以 excel 格式呈現）。

4. 複核與修訂：制定完載重組合表後，風機商與下部結構設計者需進行複核和修訂，確保所有重要之載重情境均納入其中，並符合規範要求。

### (四) 頻率限制

風機下部結構設計時，應考量結構基本自然頻率範圍，避免與風力機運轉之頻率發生共振（如圖7所示），即避開風力機之1P與3P轉動頻率範圍。由於葉片轉速隨風速變化，1P與3P轉動頻率並非定值，而是呈現頻率範圍。若結構基本自然頻率小於1P（軟性—軟性設計），易與波浪或風速等環境頻率共振，實際上，固定式之套筒式下部結構較難設計具低自然頻率特性。若結構基本自然頻率大於3P（剛性—剛性設計），則桿件設計尺寸偏大，並不經濟。

綜合上述，通常結構基本自然頻率設計於1P與3P之間（軟性—剛性設計），並由風機商提供此區間，風機商與下部結構設計者

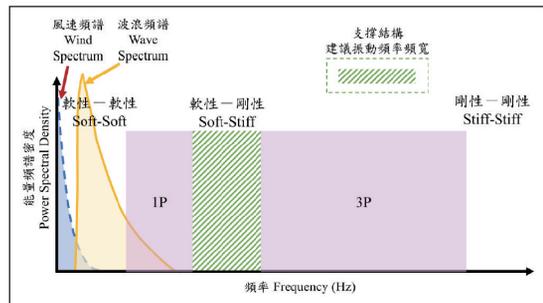


圖 7 風機整體頻率區間限制 [6]

皆需建立含塔架之完整模型，並檢核結構自然頻率核。通常，套筒式下部結構之基本自然頻率偏高，容易接近頻率上限（即接近3P頻率）。此外，頻率檢核模型需考慮整體結構系統自然頻率最高與最低之情境（此受海生物附著厚度、腐蝕、潮位、土壤等因素影響），以確認其頻率仍在限制範圍。

### （五）製造限制

套筒桁架之製造限制通常包含圓管板厚、圓管長度、厚度直徑比、錐管長度、銲接型式（單邊銲、雙邊銲、內部銲道之管徑限制）與背襯板形式等。此外，國內離岸風場開發有朝深水區發展趨勢，即套筒桁架高度需隨之增加，考量製造廠房與吊裝機具限制，通常需將套筒桁架分為上、下部分，並在最後階段時進行大組接合。而接合位置通常需由下部結構設計者與製造者共同討論擬訂，並需考慮組立時之塗層修復或噴塗時之遮蔽事宜。若在結構配置許可下，於初步規劃分層時，可將塗裝區域一併考慮，以有效減少施工成本及時間。如受限於海上運輸與吊裝能力，可能需要在海上接合，則施工商亦需納入設計討論。

轉接段可能採用箱梁式結構（如圖9(b)所示），其存在密閉空間，部分銲道須採用單邊銲接，或可於低應力處設置臨時人孔進入內部銲接，完成後再將其封閉。由於銲接形式對疲勞強度具顯著影響，故在設計階段，須將製

造方法、工序與銲接形式一併納入考量。

綜上所述，製造限制影響設計成果甚鉅，若在製造階段才發現問題，可能嚴重影響計畫時程。因此，製造商應在設計初期參與設計討論，提供明確製造限制，避免日後變更設計，增加設計時程。

### （六）施工限制

海上作業屬高技術且高風險之工作，為減少海上作業時間，通常避免在海上安裝現場進行加工，多在陸上完成整體結構組立及相關設備安裝。因此，於吊裝、運輸等階段時，即需將下部結構之幾何和重量（含設備）納入考量。尤其，其作業與吊具高度、吊重能力等因素息息相關，為關鍵控制因子。業主宜在計畫初期即提供下部結構設計者關於海上作業需求，以避免施工船舶無法配合。

常見之套筒式離岸風機下部結構吊裝方法（如圖8所示）包含：

1. 法蘭提吊
2. 吊耳提吊
3. 耳軸提吊

可用提吊方式之選定則與轉接段幾何配置相關，通常下部結構之初步幾何及重量在基本設計完成後即可得知，因此業主宜先行

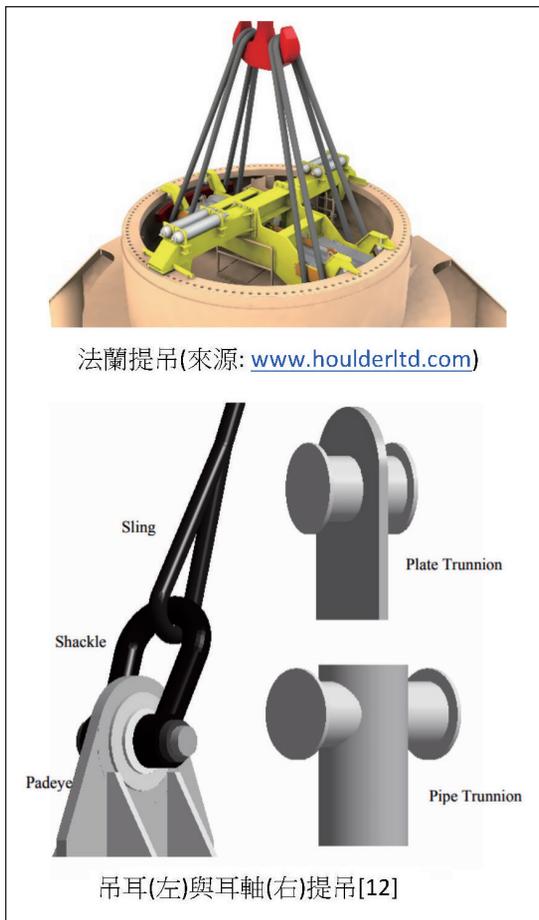


圖 8 提吊方式



圖 9 常見之轉接段型式

採用此初步設計資料確認施工船舶可配合提吊作業。

### (七) 轉接段結構設計

轉接段之功能係將塔架所傳遞之載重分散至下部結構，首先設計者需先確認擬採用之轉接段形式，常見之套筒式下部結構之轉接段有支撐式 (strut) 與箱梁式 (box

girder)，如圖9所示。除製造限制外，提吊需求亦會對於轉接段之幾何有所影響，須一併納入幾何選定之考量。此外，業主可能需考量成本、時程…等因素，經通盤考量後，方能決定最終採用形式。

考量設計、施工、製造、分析、安裝等成本，通常轉接段僅有一種設計，應用於整個風場。設計時，可採用包絡整體風場之設



計條件進行分析檢核。由於轉接段與與套筒桁架為一體，下部結構模型須能精確反映轉接段動態反應特性。

轉接段在營運階段主要承受來自於風機及次要結構之載重。依據DNV-ST-0126，需執行極限（ULS）、疲勞（FLS）、使用（SLS）、意外（ALS）等限度狀態及地震情境之檢核。

在ULS情境中，結構需進行降伏強度及挫屈強度檢核，由於介面載重歷時數量眾多，須在分析前先進行整理，選取包絡值作為分析載重。為考量經濟性，在非關鍵處之局部應力若略大於降伏應力，則可執行非線性分析，確保其塑性應變符合規定即可。

在FLS情境中，可採用等效損傷載重（Damage Equivalent Load, DEL）、馬可夫矩陣（Markov matrix）或時間歷時等不同形式之載重進行分析。一般而言，由於板殼模型之元素數量龐大，執行疲勞分析時，需先依節點幾何及銲接形式將接合處(joint)分類，僅針對各類接合處之關鍵元素進行檢核。惟所選定之關鍵元素須具足夠代表性，且可包絡整個生命週期之疲勞情境。進行細部設計時，需依賴自撰程式處理關鍵元素之應力歷時，依規範計算其累積疲勞損傷[4]，以進行檢核。

地震情境可能不會控制轉接段設計，惟

執行耐震設計時，須選定兩個模型進行分析，一為最軟模型、另一則為最硬模型，以確保設計模型已完整包絡整個風場之結構頻率上下界。影響結構頻率之因素包含土壤彈簧、水深、套筒桁架、海生物附著厚度等。選用分析位置所對應之套筒桁架模型及分析載重，建立有限元素模型，方能進行後續分析。

SLS情境一般考量整體結構之偏移轉角及工作平台之垂直撓度。而整體結構之偏移轉角於套筒桁架分析模型之傾角檢核時檢討，無需於轉接段分析進行檢核。工作平台屬次要結構，設計時獨自檢核其支撐梁之垂直撓度。

ALS情境主要考慮船隻撞擊，由於轉接段之設置高程並無船隻撞擊的風險，基本上不予考慮。

## （八）套筒結構設計

套筒桁架設計主要受到風機載重、海況環境載重與土壤條件等影響。在各限度狀態檢核中，極限限度狀態（ULS）與疲勞限度狀態（FLS）為設計關鍵。

套筒桁架之幾何佈置與轉接段、基樁及次要結構等下部結構其他部分之設計環環相扣，故進行下部結構設計前，需先擬訂套筒桁架之幾何佈置。



對於ULS情境檢核，主要設計考量包含桿件檢核、接頭檢核、基樁受力等，皆與套筒桁架幾何佈置息息相關。相較於FLS情境，ULS情境分析時間較短，故先考量ULS情境，初步擬訂套筒桁架幾何佈置，包含套筒桁架頂部與底部寬度、斜撐數量與間距、主桿斜率與支撐腳轉折處等，其中套筒桁架之頂部寬度直接影響轉接段（TP）尺寸，底部寬度（footprint）則直接影響基樁受力，進而影響基樁尺寸與貫入深度。

對於FLS情境檢核，主要設計考量為接頭疲勞損傷檢核，其影響因素包含設計年限、接頭幾何尺寸、銲道型式、防蝕系統、載重歷時、結構動態特性…等。累積疲勞損傷須經大量時間歷時分析後，將個別疲勞損傷疊加而得。由於影響因素眾多複雜，不易直觀調整設計，故較ULS分析繁瑣耗時。

除了各情境之檢核外，接頭幾何設計亦須符合規範之限制條件，並與下部結構其他部分設計互相配合，例如與轉接段之接合方式、次要結構之配置、基樁受力回饋等，各部分彼此關聯，需互相配合來完成設計。

### （九）基樁設計

無論採用何種下部結構型式，載重最終皆透過基樁傳遞至土壤，故土壤承載力須足以承擔基樁受力。土壤承載力主要受土壤條件、基樁樁徑與長度等因素影響，而基樁受

力則與套筒桁架設計及環境外力有關，尤其套筒桁架底部寬度（即基樁間距）相當於提供彎矩之力臂，直接影響樁頭受力。因此，如先前所述，在設計之始，便應綜合各種考量，進行敏感性分析，擬訂下部結構之幾何佈置。

基樁設計往往是一體兩面的，從基樁受力之角度而言，套筒桁架底部寬度與基樁受力呈反比，雖較大之基樁間距對基樁承載力需求較低，但恐增加套筒桁架尺寸與重量，需要較大之運輸與起重船機。另一方面，樁徑與淘刷深度呈正比，樁徑越大致淘刷越深，需要增加基樁長度以滿足承載需求，然可設計之樁長受限於設計前已決定之鑽探深度，亦可能受限於製造、運輸及施工條件，故設計者需在敏感性分析中找到平衡點。

### （十）次要結構設計（內外部平台、靠船樁、J型管）

次要結構包含各種平台（platforms）、船撞設施（boat landing）、J型電纜管（J-tube）…等，其設計主要係使用功能性之考量。

外部平台主要用於提供作業空間供人員通行及貨物暫置；在安裝階段，提供如灌漿作業時之人員作業空間。考量維運作業需求。外部平台佈置須將平台起重機吊臂迴轉半徑及可達範圍一併檢討，包括吊臂外伸範圍是否超越下部結構投影範圍，以利吊放船



圖 10 人員運輸船靠泊方式（來源：<https://www.atlanticwindtransfers.com/>）

船上之貨物。貨物放置區位於塔架門口正前方，而塔架門口應位於背風側；臺灣海峽冬季受東北季風影響甚鉅，夏季雖有西南季風，但其強度不若前者強勁，故可設置於偏南側。另外，人員運輸船（Crew Transfer Vessel, CTV）需逆風浪頂靠於船撞設施（如圖10所示），因此，其設置方向須依場址海氣象條件而定，如前述之臺灣海峽條件，亦可設置於偏南側。為增加人員登上結構之安全性，Walk-to-Work系統可讓人員以步行方式從船舶走至外部平台（如圖11所示），如設置此系統，則外部平台須設置閘門。此外，在開口或閘門附近，須設置安全錨勾點，以防人員落海事件。

轉接段內部平台提供低壓電氣設備安置空間、臨時海纜儲放、與塔架安裝階段之人員作業空間等，涉及風機、海纜、低壓電氣等多個介面。設計時，需與各介面廠商共同討論與設計，檢核不同作業情境下之結構強度與空間衝突。因應電氣設備更換，內部平台格柵可能



圖 11 Walk-to-Work 系統（來源：<https://www.ampelmann.nl/>）

需要臨時移除，在格柵開口附近則需設置臨時欄杆支撐座，以確保作業安全。

船撞設施與J型管承受海浪、海流、船舶撞擊等載重，並傳遞至主要結構，其設計與套筒桁架相互影響，亦影響整體結構自然頻率，需一併建置於下部結構模型內，進行完整強度檢核。尤其需檢核主、次要結構接合處之疲勞損傷，主要結構可能因此需增加板厚，以提高抗疲勞能力。

## 五、整合載重分析

如先前所述，風機支撐結構設計係由風機商與下部結構設計者共同完成，其負責分工介面在塔架底部法蘭。結構設計涉及風機運轉控制之氣彈力分析（aero-elastic analysis），上部結構與風機模型須納入下部結構動態性質，以建立整合結構模型，以進行載重分析，即整合載重分析（Integrated Load Analysis, ILA）。



各風機商可能採用不同軟體分析，致存在不同檔案格式，為順利交換資料，下部結構設計者與風機商須先確認資料格式、內容與交換方式。由於交換資料量相當龐大，動輒數百GB位元組，無法使用電子郵件傳遞，可採用檔案傳輸協定FTP（File Transfer Protocol）進行資料交換。此外，雙方亦需確認文件檔案之編號識別與格式，正式整合載重分析前可進行少量測試，以確認此模式運作順暢。

在此少量測試裡，雙方比對各自分析（模型皆含風機、塔架）之模態頻率、振態形狀、介面載重與位移歷時等成果之一致性，以確認雙方後續交換資料、結構模型、與軟體計算程序之正確性。

完整設計過程需多次整合載重分析之迭代過程，如圖12所示。在分析之前，風機商需提供上部結構資料（含風機、塔架幾何、內部平台、設備、法蘭之質量與質心位置等）與通用介面載重，供下部結構設計者進行初步設計。與此同時，雙方須共同討論與擬訂用於後續整合載重迭代分析之載重組合表。

下部結構設計者先將下部結構模型（不含風機、塔架）與海況載重資訊濃縮（condense）至塔架-轉接段介面自由度之動態超元素（Dynamic super-element, DSE），其包含下部結構之質量矩陣、勁度矩陣、阻尼矩陣、與外力向量（不含風況載重）等（如圖13所示）。再將此動態超元素檔案提供風機商進行氣彈力分析，每個檔案對

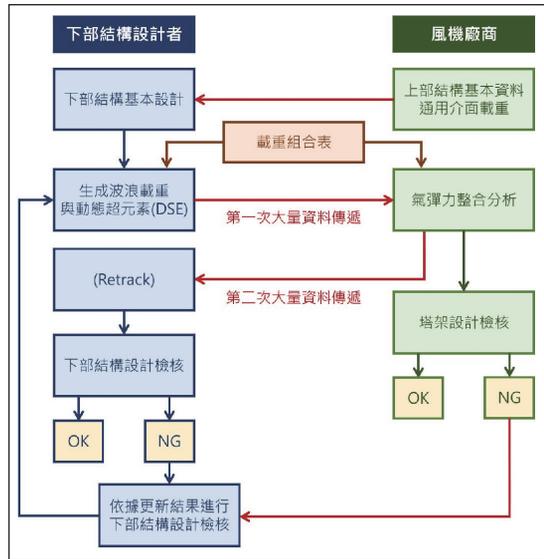


圖 12 整合載重迭代分析流程

應一組載重情境。

風機商將收到之超元素檔案配合各種風載重情境進行氣彈力分析，分析完成後，依載重組合表所列之載重情境，將介面載重與位移歷時回饋予下部結構設計者，供後續分析。

風機商依氣彈力分析成果，進行塔架強度檢核。下部結構設計者則輸入介面載重歷時，以原下部結構模型（不含風機、塔架）與環境載重條件重新分析（稱復位分析，retrack），以檢核原設計強度。若雙方檢核皆通過，則設計完成，反之，若其中一方檢核未通過，則須更新設計並調整模型，依前述程序，重新進行整合載重迭代分析。

通常在設計過程，需執行2至3次整合載

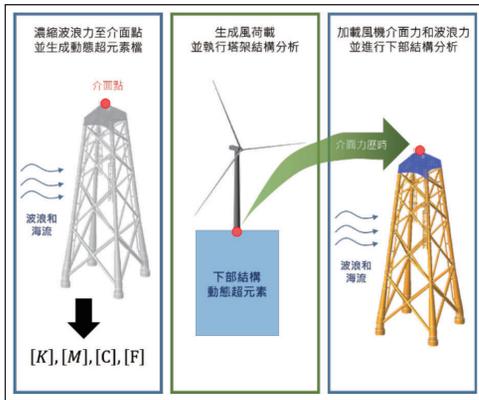


圖 13 整合載重迭代分析

重分析，每次迭代分析所需時間依據群集數量與載重情境數量而定。以4個模型為例，風機商與下部結構者之電腦計算與其準備時間可達2~4個月。

在整合載重分析過程之數月內，所有結構與環境條件必須維持一致，不得在復位分析期間改變結構或環境條件。因此，在整合載重分析前，應先確認環境條件（如海況、土壤等），以免耗費大量時間與成本後，分析成果作廢。

## 六、結語

離岸風機下部結構設計與傳統陸域或港灣工程極為不同，其設計涉及土木/結構、大地、海洋、大氣、電氣、機械…等領域，須考慮之製造與施工方式亦與陸域工程有極大差異。因此，下部結構設計者除須熟悉離岸結構設計規範與分析技術外，亦應對其它領域專業有所涉略，以將各項領域之功能需求

均能整合至結構設計中。

為配合政府綠能目標，通常設計時程極為有限，自動化處理大量載重組合與減少運算時間為設計最佳化之關鍵，唯有如此才有多餘時間進行測試，以調整設計。

本文概述本團隊執行細部設計過程之經驗，供國內工程界參考，期能對國內離岸風電工程技術有所助益。

## 參考文獻

1. “Wind explained - History of wind power”, U.S. Energy Information Administration <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>.
2. “Vindeby Offshore Wind Farm: For Demonstrating the Viability of Offshore Wind as a Clean Energy Powerhouse (Most Influential Projects: #32)”, PM Network, 33, 66–67 (2019).
3. Global Wind Energy Council (GWEC), “Global Offshore Wind Report 2022” (2022)
4. 徐偉朝、龔琬茜、郭思伶及夏瑄等，「離岸風機支撐結構設計之高效分析技術發展」，中興工程 147 期 P61 - 69 (2020).
5. DNV, “DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures” (2004).
6. American National Standards Institute “ANSI/ACR OCP-1-2022 Offshore Compliance Recommended Practices, Edition 2” (2022).
7. 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」，經濟部標準檢驗局 (2023)。
8. International Electrotechnical Commission, “IEC 61400-3-1: Wind energy generation systems—Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines” (2019)
9. DNV, “DNV-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines” (2021)
10. DNV, “DNV-ST-0126 Support Structures for Wind Turbines” (2021).
11. DNV, “DNV-ST-N001 Marine operations and marine warranty” (2021)
12. LI LIANG, “Heavy lift installation study of offshore structures”, Master thesis, Dept. of Civil Eng., National Univ. of Singapore. (2004).