

# 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 編印

中華民國 112 年 2 月



## 序

離岸風力發電為我國再生能源開發與建設的重點項目，歷經示範獎勵、潛力場址階段後，即將邁入區塊開發階段，除顯示臺灣擁有良好風場條件外，亦代表離岸風力發電將成為我國達成2050年淨零排放目標的關鍵推力之一。經濟部（以下簡稱本部）考量我國場址條件之特殊性（如極端天氣、腐蝕、地震、軟弱土層及海生物附著等），實與國外經驗不甚相同，可能影響離岸風場之設計、製造施工至運轉維護階段之參數設定或工法選定，進而影響離岸風場之整體供電穩定性與可靠度。因此，本部自109年起，責成標準檢驗局（以下簡稱標準局）推動我國離岸風力發電工程技術指引之建置，以國內外離岸風電相關法令、標準、規範、要點、指南及辦法等為主要參考依據，並綜整考量我國特殊場址條件、法規環境、產業現況以及技術成熟度等因素，著手訂定「離岸風力發電廠全生命週期之『場址調查及設計』、『製造及施工』及『運轉及維護』三大篇章之技術指引」（以下簡稱本技術指引），俾作為國內離岸風力發電廠之開發業者、工程設計顧問、技師、驗證機構、製造及施工業者、運轉及維護業者之參考指引，乃至落實國內離岸風電工程技術深耕以及工程人才之培育。

為順利推動離岸風力發電技術指引，標準局於109年10月29日訂定離岸風力發電技術規範指導審議會設置要點，成立離岸風力發電技術指引指導審議會並下設各篇技術指引之技術審議會以及資料庫平臺諮詢小組，除本部相關單位外，亦邀請行政院環境保護署、行政院農業委員會、內政部、交通部、勞動部、國家科學及技術委員會、文化部、海洋委員會等部會主管機關代表擔任審議委員，並廣邀國營事業單位、產業界、學術界及研究法人單位等各界專家，以臺灣本土工程環境特質為經，國際離岸風電工程技術經驗為緯，藉蒐集及盤整我國各部會海洋氣象數據資料建置場址條件研究資料庫，輔以相關議題研究及國內研究計畫成果，編訂本技術指引之主文與解說。歷經2年期間，召開共計近百場次技術指引審議會議、業者說明會以及對外意見徵詢程序後，完成本技術指引，本部將持

續以本技術指引，推動與國內外離岸風力發電產業各界之技術交流與合作。

本技術指引為行政指導，僅為參考性質，不具法律上強制力，業者仍應依相關法規要求或視實際工程及技術需求辦理。

## ※ 離岸風力發電場址調查及設計技術指引

國立臺北科技大學(以下簡稱北科大)以作為我國工業立國搖籃的優良傳統著稱，自109年起積極整合工程、電資與機電等三大學院跨領域學術能量，致力發展離岸風電產業之各項核心技術。除已成立離岸風電工程研究中心，亦橫向連結國立臺灣大學、國立成功大學、國立臺灣海洋大學、國立高雄科技大學和私立淡江大學等大專院校能量，以及財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心和行政院原子能委員會核能研究所之學研技術，再加上中興工程顧問股份有限公司和台灣世曦工程顧問股份有限公司的工程實務建議，建構橫跨產、學、研的離岸風電專業技術團隊，並邀集國內九大技師公會研討專業技師簽證事宜，協助我國政府發展再生能源和達成淨零排放的長遠目標。

北科大於110年至111年受標準局委託負責「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」(以下簡稱本指引)之編撰，為使本指引更切合現今離岸風電工程技術發展及國內外產業實務，北科大於109年起即著手進行資料蒐集及指引架構研擬，並協助標準局依「離岸風力發電技術規範指導審議會設置要點」，邀請產業、學研界及實務專家擔任審查委員，於110年組成「場址調查及設計技術指引技術審議會」，負責本指引內容的編修及審閱，另鑑於本指引內容與離岸風電開發乃至施工之整體設計概念息息相關，自110年底起即舉辦技術指引說明會，與開發商、製造商、供應商及各領域公協(學)會等相關利害關係人溝通協調，確保本指引之內容與國際作法接軌並滿足我國相關產業現況與需求。

本指引之編訂架構係以原則性之本文併列其詳細解說，進行各章節之編寫，內容主要著重於離岸風力發電廠設計階段之場址調查與設計技術要求，整體架

構包含離岸風力發電廠於其全生命週期內之安全需求、使用性能與服務水準等設計目標，以及離岸風力發電廠專案驗證與審查、場址環境條件調查要求與載重評估、離岸風力機支撐結構與電力系統設計等內容。場址環境條件主要集中於風、水位、波浪、海流、海床變動與淘刷、海嘯、地震、土壤液化、海洋附生物、腐蝕與雷擊等項目，而離岸風力機支撐結構則以設計原則、設計要求、大地工程設計、腐蝕防護系統等項目為主要考量。有關各章節內容之參考依據請參考「1.5 相關法令與標準」。

本指引係揭櫫離岸風場之場址調查及設計要求，惟規劃之製造及施工、運轉及維護計畫，均會影響場址調查及設計之作法，因此於場址調查及設計作業時，應同時參考「離岸風力發電製造及施工技術指引」及「離岸風力發電運轉及維護技術指引」之內容，以達到預期之離岸風力發電廠全生命週期性能及安全目標。

## ※ 場址條件研究資料庫

臺灣海峽為全球矚目的優質離岸風場，惟位處颱風與地震等天然災害高潛勢地區，亦具土壤液化、腐蝕環境及海生物附著等本土化特殊場址議題尚待研析。因此，建置「場址條件研究資料庫」（以下簡稱本資料庫）對於我國離岸風電場址環境條件研究係不可或缺主要工作項目之一。本資料庫主要透過架接相關部會現有資料庫方式，整合國內政府機關與研究機構之歷史調查或監測數據資料，亦作為本技術指引以及相關研究成果之展示平臺，提供離岸風電相關產業、政府機關、研究機構以及國內外大專院校進行場址條件等研究之參考來源。

本資料庫於建置初期（109年），經盤點全國離岸風電相關資料庫及網路資源後，即與相關場址條件原始數據資料庫主管機關接洽，並進行相關開放資料之架接工作，另於110至111年間，積極向開發商、製造商、專案驗證機構、設計顧問公司等利害關係人進行資料需求訪談，確保本資料庫內容和形式滿足各方使用者需求。另外，考量相關資料之機敏性及授權使用因素，本資料庫係以各部會政府機關之開放資料為基礎，依前述需求訪談結果，蒐集並篩選與離岸風電工程

設計相關之地質、地震、海洋氣象與海生物相關資料，其餘涉及機敏性或需取得主管機關授權使用之資料，則依循原始資料主管機關之申請辦法辦理。

本資料庫目前已提供資料檢索與查詢功能，並整合可交談的資料操作環境，使用者可客制化地操作與應用資料，而得以拓展資料應用範疇，更加契合各方使用者的需求，俾作為離岸風電工程實際應用之參考以及國內離岸風電工程研究及教育推廣用途。

# 離岸風力發電技術指引審議會

## ※離岸風力發電技術指引指導審議會

### 召集人

經濟部標準檢驗局謝代理局長翰璋

國立臺北科技大學王校長錫福

### 主管機關代表

行政院環境保護署、行政院農業委員會漁業署、海洋委員會海洋保育署、海洋委員會國家海洋研究院、內政部營建署、內政部消防署、內政部地政司、內政部國土測繪中心、交通部中央氣象局、交通部航港局、交通部運輸研究所、勞動部職業安全衛生署、文化部文化資產局、國家科學及技術委員會、經濟部標準檢驗局、經濟部能源局、經濟部工業局、經濟部水利署、經濟部中央地質調查所、台灣電力股份有限公司、臺灣港務股份有限公司

### 專家學者委員（依姓氏筆劃順序）

任職單位	姓名	職稱
國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系	江茂雄	特聘教授暨工學院副院長
國立臺北科技大學土木工程系	宋裕祺	特聘教授
財團法人船舶暨海洋產業研發中心	周顯光	執行長
台灣世曦工程顧問股份有限公司	施義芳	董事長
國立臺灣海洋大學	許泰文	校長
中興工程顧問股份有限公司	陳伸賢	董事長
財團法人中國驗船中心	鄭志文	執行長
國立成功大學水利及海工系	蕭士俊	特聘教授兼水工所所長

## ※場址調查及設計技術指引技術審議會

### 召集人

國立臺北科技大學土木工程系宋特聘教授裕祺

### 審議委員（依姓氏筆畫順序）

任職單位	姓名	職稱
國立臺北科技大學土木工程系	尹世洵	教授
台灣世曦工程顧問股份有限公司	吳淑珍	副理
中興工程顧問股份有限公司	徐偉朝	經理
國立成功大學土木工程學系	倪勝火	教授
國家實驗研究院國家地震工程研究中心	柴駿甫	副主任
國立臺灣海洋大學工學院	郭世榮	院長
經濟部中央地質調查所	陳松春	科長
國立臺灣大學土木工程學系	張家銘	副教授
經濟部標準檢驗局	黃志文	組長
行政院原子能委員會核能研究所	黃金城	組長
國立中央大學土木工程學系	黃俊鴻	教授
國立中興大學土木工程學系	熊彬成	副教授
交通部中央氣象局	鄧仁星	研究員
國立高雄科技大學 海事風電工程碩士學位學程	蔡原祥	助理教授
經濟部標準檢驗局	謝孟傑	組長
交通部運輸研究所港灣技術研究中心	簡仲璟	科長
國立臺北科技大學土木工程系	羅元隆	副教授
工業技術研究院	羅俊雄	博士
立恩威國際驗證股份有限公司	顧寶鼎	首席工程師

### 工作小組

任職單位	姓名	職稱
台灣世曦工程顧問股份有限公司	劉靖俞	正工程師
中興工程顧問股份有限公司	吳侑軒	工程師
中興工程顧問股份有限公司	林芃妤	工程師
國家實驗研究院國家地震工程研究中心	張毓文	研究員



任職單位	姓名	職稱
行政院原子能委員會核能研究所	林玉楚	助理研究員
行政院原子能委員會核能研究所	賴文政	助理研究員
維三企業有限公司	盧明德	經理
國立臺北科技大學 離岸風電工程研究中心	蘇進國	經理
	方賢健	經理
	林偉淞	副理
	劉小勤	副理
	王孟潔	副理
	黃瑞琪	助理研究員
	韓 靚	助理研究員
	簡子琦	助理研究員
	陳儀諺	助理研究員
	陳佳恩	助理研究員
	余嫻萱	助理研究員
	李紹緯	助理研究員
	李心惠	助理研究員
	林宗達	助理研究員
	陳宇晴	研究助理
羅方好	研究助理	

## ※離岸風力發電資料庫平臺諮詢小組

### 召集人

經濟部標準檢驗局第六組黃組長志文

### 場址條件原始資料主管機關

海洋委員會、交通部中央氣象局、交通部運輸研究所、經濟部水利署、經濟部能源局、經濟部標準檢驗局、經濟部中央地質調查所、台灣電力股份有限公司

### 工作小組

任職單位	職稱	姓名
國立臺北科技大學 離岸風電工程研究中心	計畫副理/副研究員	劉小勤
國立臺北科技大學 離岸風電工程研究中心	助理研究員	李紹緯
國立臺北科技大學 離岸風電工程研究中心	助理研究員	陳致融
維三企業有限公司	專案經理	盧明德

# 目錄

圖目錄.....	V
表目錄.....	VI
第一章 總則.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 主管機關.....	5
1.3 適用範圍.....	5
1.4 名詞與定義.....	6
1.5 相關法令與標準.....	20
1.6 設計、施工與運維之配合.....	26
1.7 場址調查及設計階段送審文件.....	27
第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查.....	28
2.1 通則.....	28
2.2 風環境條件與海洋環境條件調查.....	28
2.2.1 一般規定.....	28
2.2.2 風環境條件調查.....	29
2.2.3 海洋環境條件調查.....	30
2.3 水深地形與大地工程調查.....	32
2.3.1 一般規定.....	32
2.3.2 水深地形調查.....	33
2.3.3 地球物理探勘.....	34
2.3.4 大地工程調查與試驗.....	36
2.4 其他環境條件調查.....	41
2.4.1 腐蝕環境調查.....	41
2.4.2 雷擊調查.....	42
2.4.3 海洋附生物調查.....	43
2.5 特定場址環境條件資料提送.....	44
2.5.1 一般規定.....	44
2.5.2 風環境條件與海洋環境條件調查資料提送.....	44
2.5.3 水深地形及大地工程調查與試驗資料提送.....	45

2.5.4 其他環境條件調查資料提送.....	45
第三章 離岸風力發電廠性能及安全要求.....	46
3.1 通則.....	46
3.2 離岸風力發電廠驗證與審查.....	46
3.2.1 一般規定.....	46
3.2.2 專案驗證.....	47
3.2.3 專案驗證審查.....	47
3.3 離岸風力機性能及安全.....	47
3.3.1 設計原則.....	47
3.3.2 離岸風力機等級.....	49
3.3.3 安全等級.....	50
3.3.4 載重組合.....	51
3.3.5 離岸風力機共振效應.....	60
3.3.6 離岸風力機支撐結構附屬電氣.....	61
3.4 變電站性能及安全.....	61
3.5 輸電系統性能及安全.....	62
3.6 其他要求.....	63
3.6.1 安全警示與防護措施.....	63
3.6.2 液壓與氣壓設備安全.....	63
3.6.3 海洋公害防治.....	64
3.6.4 運維船舶航行安全.....	64
3.6.5 資訊安全防護.....	66
3.6.6 環境與結構監測.....	66
第四章 離岸風力發電廠場址環境條件評估.....	67
4.1 通則.....	67
4.2 風載重.....	68
4.3 水位.....	74
4.4 波浪載重.....	75
4.5 海流載重.....	78
4.6 海床變動與淘刷.....	80
4.7 海嘯載重.....	80

4.8 地震載重.....	81
4.9 土壤液化.....	83
4.10 海洋附生物.....	85
4.11 腐蝕.....	85
4.12 其他載重.....	88
第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計.....	89
5.1 通則.....	89
5.2 離岸風力機支撐結構設計原則.....	89
5.2.1 一般規定.....	89
5.2.2 結構設計年限.....	89
5.2.3 自然環境條件.....	90
5.2.4 運轉操作條件.....	91
5.2.5 臨時階段之設計考量.....	91
5.3 離岸風力機支撐結構設計要求.....	92
5.3.1 一般規定.....	92
5.3.2 結構分析與模擬.....	92
5.3.3 結構設計與檢核.....	96
5.3.4 鋼結構強度與挫屈設計.....	99
5.3.5 鋼結構疲勞設計.....	99
5.3.6 結構接合設計.....	100
5.3.7 灌漿接合設計.....	101
5.3.8 運維船舶撞擊.....	103
5.3.9 有限元素分析.....	103
5.3.10 臨時階段之結構檢核.....	104
5.4 大地工程設計.....	104
5.4.1 一般規定.....	104
5.4.2 樁基礎承载力與變位檢核.....	105
5.4.3 群樁效應.....	106
5.4.4 淘刷保護設計.....	106
5.4.5 海纜槽溝設計.....	107
5.5 腐蝕防護系統.....	107

5.6 電網連接與海纜設計.....	108
5.6.1 電網連接.....	108
5.6.2 海纜設計.....	109
附錄一.....	A

## 圖目錄

圖 1.1-1 離岸風力發電廠示意圖 .....	1
圖 1.1-2 離岸風力機之組成示意圖 .....	2
圖 1.1-3 離岸風力機結構頻率範圍示意圖 .....	3
圖 1.6-1 生命週期概念示意圖 .....	27
圖 2.4.2-1 離岸風力機之雷擊閃電匯集區 (CNS 15176-24).....	43
圖 3.3.5-1 離岸風力機結構共振頻率反應譜示意圖 .....	60
圖 3.6.4-1 離岸風力機運轉作業邊界圖 .....	65
圖 4.3-1 各種潮位及潮差的定義示意圖 .....	74
圖 4.8-1 離岸風力發電廠特定場址地震載重之評估程序圖 .....	82
圖 4.9-1 離岸風力機土壤液化潛勢評估及基礎設計檢核之流程圖 .....	85
圖 5.3.2-1 單樁式結構與分析模型示意圖 .....	93
圖 5.3.2-2 套筒式結構與分析模型示意圖 .....	94
圖 5.3.2-3 套筒式結構有限元素分析模型 .....	94
圖 5.3.2-4 結構動力分析之地震輸入運動歷時示意圖 .....	95
圖 5.3.3-1 限度狀態設計法之設計載重效應計算流程 (方法一).....	97
圖 5.3.3-2 限度狀態設計法之設計載重效應計算流程 (方法二).....	97
圖 5.3.3-3 全結構模型之設計載重效應計算示意圖 (方法一).....	98
圖 5.3.3-4 子結構模型之設計載重效應計算示意圖 (方法二).....	98
圖 5.3.7-1 灌漿接合圖例 .....	102
圖 5.3.7-2 灌漿接合誤差示意圖 .....	102

## 表目錄

表 2.2.1-1 風環境條件與海洋環境條件調查量測項目及規格參考資料 .....	29
表 2.2.3-1 海洋環境條件調查之觀測項目及要求 .....	31
表 2.3.2-1 水深測量等級 .....	33
表 2.3.3-1 地球物理探勘需求建議 .....	35
表 2.3.4-1 現地試驗需求建議 .....	38
表 2.3.4-2 室內試驗需求建議 .....	39
表 2.4.1-1 腐蝕環境條件調查之量測項目及精度規格 .....	42
表 2.4.3-1 海洋附生物調查內容 .....	44
表 2.5.2-1 風環境條件與海洋環境條件調查提送資料項目 .....	44
表 3.1-1 離岸風力發電廠各主要組成之性能及安全要求 .....	46
表 3.3.1-1 設計情境、性能及安全要求與檢核項目的組合 .....	48
表 3.3.1-2 設計情境、性能及安全要求與檢核項目的組合 (地震).....	49
表 3.3.2-1 離岸風力機等級之基本參數 .....	50
表 3.3.3-1 載重部分安全係數 (一般安全等級).....	51
表 3.3.4-1 一般設計載重組合 .....	52
表 3.3.4-2 地震設計載重組合 .....	55
表 3.3.4-3 支撐結構颱風設計載重組合 .....	55
表 3.3.4-4 載重組合之設計情境與注意事項 .....	56
表 3.3.4-5 地震及支撐結構颱風作用時載重組合之設計情境與注意事項 .....	59
表 4.11-1 腐蝕環境分類與說明 .....	86
表 4.11-2 表面被覆法之防蝕原理與設計要點 .....	87
表 5.3.5-1 DNV-ST-0126 規定之設計疲勞因子數值 .....	100
表 A-1 場址調查與設計階段送審文件 .....	A.1



# 第一章 總則

## 1.1 目的

為確保離岸風力發電廠於其全生命週期內具備預期的安全需求、使用性能與服務水準，特訂定離岸風力發電廠場址調查及設計技術指引（以下簡稱本指引）。

### 【解說】

本指引所稱「離岸風力發電廠」為離岸風力機 (Offshore Wind Turbine) 與輸電系統 (Transmission Systems)。輸電系統為包含風力機陣列海纜 (Wind Turbine Array Cables)、海上變電站連接海纜 (Substation Platform Connection Cable) 與輸出海纜 (Offshore Export Cable) 等海纜設備 (以下簡稱海纜) 及海上/陸上變電站 (以下簡稱變電站) 之統稱 (如圖 1.1-1)。「離岸風力機」由轉子機艙總成 (RNA) 與其下的支撐結構組成。離岸風力機支撐結構包含離岸風力機的塔架 (Tower)、下部結構 (Sub-Structure) 與基礎 (如圖 1.1-2)。

轉子機艙總成及塔架之設計與製造係由風力機製造商依其專業主責，惟離岸風力機整體系統之性能及安全須符合本指引規定。

離岸風力機及變電站之設計年限 (或設計壽命) 得由主管機關或開發商要求訂定之，惟不得低於 20 年；離岸風力機支撐結構之結構設計年限，參照第 5.2.2 節。

本指引所稱離岸風力機支撐結構係指離岸風力機採單樁式 (Monopile)、套筒式 (Jacket) 支撐結構者，亦統稱為固定式支撐結構。如採用其他結構型式如三腳式/三樁式 (Tripod/Tripile)、負壓沉箱 (Suction Bucket) 基礎或重力式基礎等，除本指引可適用者外，應就其特殊性另作考量，但須在設計文件中載明其設計依據。

離岸風力發電廠中的電業設備、電力輸配併網及附屬電氣等設計，應遵循國內電業設備相關法令辦理。

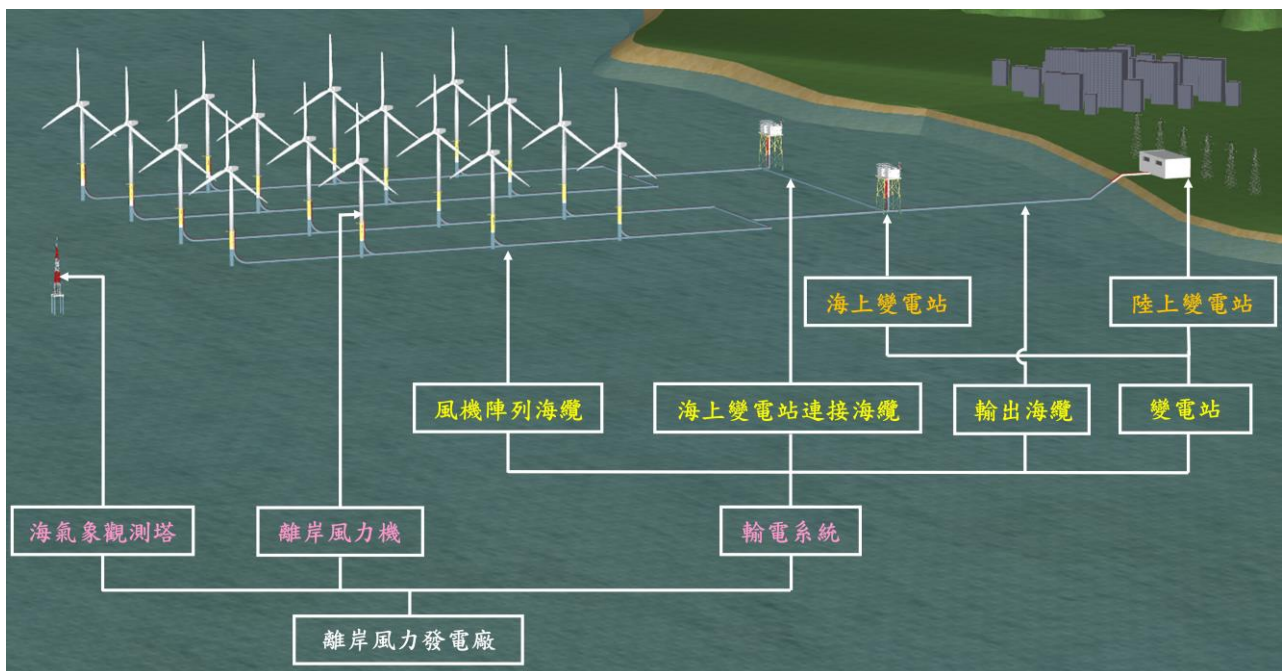


圖 1.1-1 離岸風力發電廠示意圖

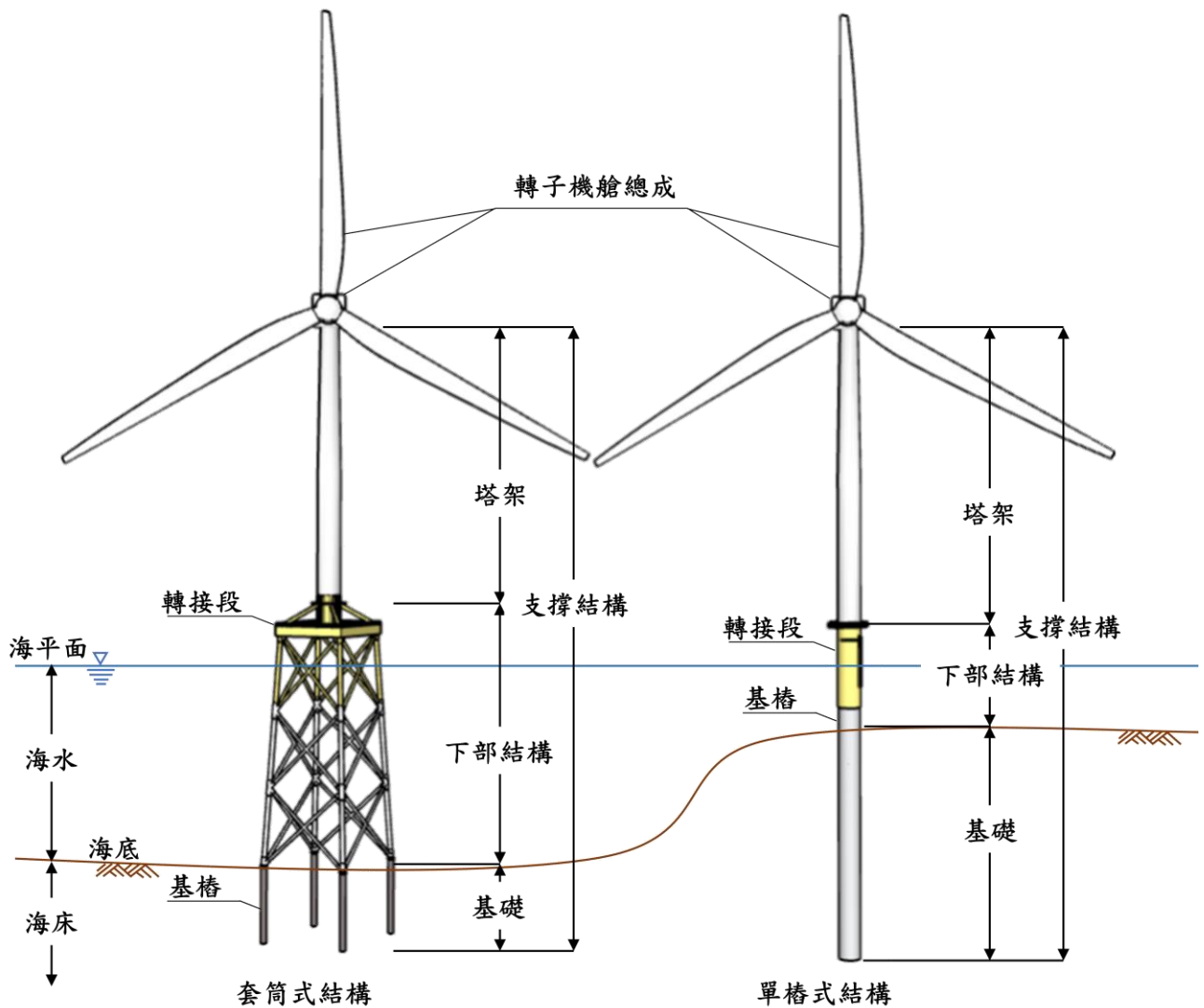


圖 1.1-2 離岸風力機之組成示意圖

設計階段須針對離岸風力發電廠於其全生命週期內之安全需求、使用性能與服務水準進行綜合考量：

## 1. 安全需求

### (1) 離岸風力機結構共振評估 (Resonance Assessment)

離岸風力機在正常運轉條件下，應避免結構主要振動頻率與離岸風力機轉子轉動及環境條件載重振動頻率相近而產生共振現象，以確保其安全性 (圖 1.1-3)。

- A. 離岸風力機應進行結構動力分析，避免發生下列共振情境引致應力變形過大或疲勞破壞。
  - (a) 離岸風力機轉子旋轉引致振動。
  - (b) 風、波浪及海流與結構間動態互制行為，引致作用頻率鎖定 (Lock-In) 共振。
  - (c) 離岸風力機塔架受風作用，而引致渦致振動 (VIV)。

- B. 離岸風力機進行上述結構動力分析時，應同時對於海床土壤勁度、淘刷深度及構件腐蝕等條件變化，進行結構共振分析。

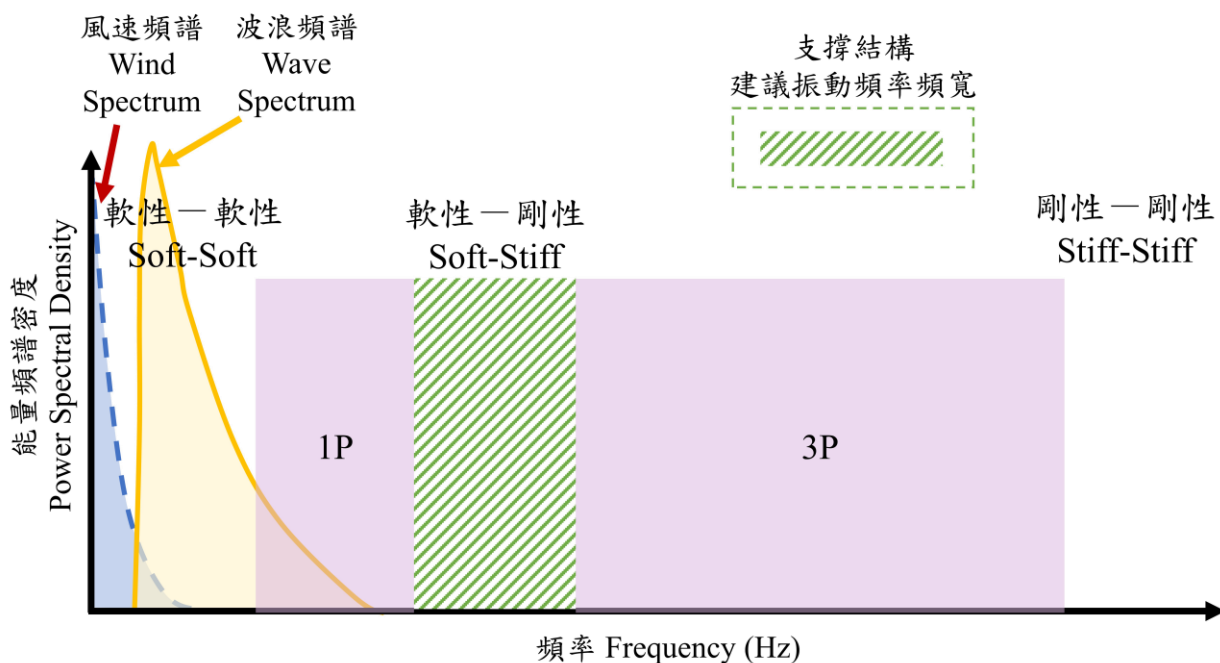


圖 1.1-3 離岸風力機結構頻率範圍示意圖

(2) 轉子機艙總成 (RNA)

- A. 極限程度狀態 (ULS)：在安全系統失效或當極端風速與電網故障同時發生時，轉子機艙總成所受應力不得超過其材料強度，且受力變形後之葉片不得與支撐結構碰觸。
- B. 意外程度狀態 (ALS)：在意外事件或運轉故障發生時，不得引致轉子機艙總成組件與構件損壞。
- C. 疲勞程度狀態 (FLS)：在正常或異常運轉條件下，如尾流效應和風場紊流等氣動彈性效應引致之反覆載重，轉子機艙總成組件與構件之累積疲勞損傷因子不得超過容許值。
- D. 使用程度狀態 (SLS)：在常時發電過程中，須考量風力機運轉對於結構體構件正常運作之影響，以及轉子機艙總成之振幅和加速度變化、裂縫成長、應力應變損傷、水密性影響等；且此程度狀態下，葉片朝向塔架之最大彈性撓度，不得超過葉片與塔架間隙的最低要求。(若離岸風力機發電運轉無特別規定，則不須限制其變形)

(3) 離岸風力機支撐結構 (Support Structure)

- A. 極限程度狀態 (ULS)：在極限載重作用下，其所受應力不得超過材料之設計強度；整體支撐結構不得產生崩塌、不穩定或過度變形等情況。
- B. 意外程度狀態 (ALS)：在異常載重作用下，容許局部構件損傷，惟受損結構仍須具備足夠的強度，以維持整體支撐結構的完整性。

- C. 疲勞限度狀態 (FLS)：在反覆載重作用下，引致構件與接頭之累積疲勞損傷因子不得超過容許值。
- D. 使用限度狀態 (SLS)：在使用限度狀態之設計載重效應作用下，支撐結構應符合以下條件：
  - (a) 變形不得超過容許值。
  - (b) 不得減損結構使用性能。
  - (c) 不得影響離岸風力機發電運轉效能。

#### (4) 海上變電站結構 (Offshore Substations)

海上變電站的結構及基礎，須避免其結構破壞或功能失效，導致人員傷亡、環境嚴重汙染以及社會與經濟損失等之後續效應。

- A. 極限限度狀態 (ULS)：在極限載重作用下，其所受應力不得超過材料之設計強度；整體支撐結構不得產生崩塌、不穩定或過度變形等情況，且基礎不允許產生破壞。
- B. 意外限度狀態 (ALS)：在異常載重作用下，容許局部構件損傷，惟受損結構仍須具備足夠的強度，以維持整體變電站結構的完整性 (須執行後損傷分析)。
- C. 疲勞限度狀態 (FLS)：在反覆載重作用下，引致構件與接頭之累積疲勞損傷因子不得超過容許值。
- D. 使用限度狀態 (SLS)：在使用限度狀態之設計載重效應作用下，變電站及支撐結構發生的永久撓度或結構振動應符合以下條件：
  - (a) 變形不得超過容許值。
  - (b) 不得減損結構使用性能。
  - (c) 不得影響非結構構造物使用功能。

#### (5) 海纜 (Subsea Power Cable)

- A. 極限限度狀態 (ULS)：海纜之電纜心 (Cable Core) 在緊急額定溫度 (Emergency Temperature Rating) 情境下，海纜須維持電力傳輸與光纖通訊功能。
- B. 意外限度狀態 (ALS)：在船舶錨具撞擊或海底物體掉落等情境下，仍須儘量維持海纜功能。
- C. 疲勞限度狀態 (FLS)：因海床變動 (如漂沙或淘刷等因素) 引致海纜受渦致振動之反覆載重作用下，海纜不得產生嚴重損傷，亦須維持電力傳輸與光纖通訊功能。
- D. 使用限度狀態 (SLS)：為確保海纜營運期間之穩定及安全性，在海纜安裝前後，海纜之遮蔽層 (Sheath) 與鎧裝 (Armour) 不得產生損傷。

## 2. 使用性能

- (1) 離岸風力發電廠功能失效情境下，須將所引致之人員傷亡、環境汙染以及社會與經濟損失降至最低程度。
- (2) 次要結構、附屬結構、相關設施及其作業空間均須符合正常使用需求。
- (3) 內外部作業平台、直升機起降平台、爬梯及休息平台等次要結構，須具有突發緊急避險（如海浪捲落）空間或防墜落安全措施。
- (4) 起重機（吊車）、靠船桿、航空障礙燈、海洋氣象觀測塔等附屬結構，須具有失效安全（Fail-Safe）設計。
- (5) 系統監測計畫（含環境與結構監測及海纜系統等）。

## 3. 服務水準

- (1) 維持離岸風力發電廠之發電效率與電力負載穩定。
- (2) 維持離岸風力機運轉控制與安全系統之穩定運作。
- (3) 離岸風力機維護管理策略須能符合服務水準。

本指引共分五章，依序為第一章 總則；第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查；第三章 離岸風力發電廠性能及安全要求；第四章 離岸風力發電廠場址環境條件評估；第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計。

### 1.2 主管機關

本指引之主管機關為經濟部。

### 1.3 適用範圍

本指引適用於離岸風力發電廠在設計階段工程技術所需的場址調查內容與方法，以及離岸風力機支撐結構與輸電系統之設計原則。

#### 【解說】

1. 離岸風力發電廠場址調查內容著重於與離岸風力發電廠設計階段工程技術相關之項目，包括各種環境條件如：風環境條件與海洋環境條件調查、水深地形與大地工程調查、腐蝕環境調查、雷擊調查及海洋附生物調查等。
2. 離岸風力機支撐結構相關說明如下：
  - (1) 單樁式支撐結構

支撐結構的塔架與下部結構為整體連續或透過連接段連接，其基礎採單樁貫入錨碇於海床，以承載離岸風力機及各種環境條件載重。

## (2) 套筒式支撐結構

支撐結構的塔架與下部結構透過連接段連接，其下部結構為三肢（含）支柱以上套筒式鋼結構，其基礎為延續各肢支柱並貫入錨碇於海床，以承載離岸風力機及各種環境條件載重。

3. 本指引得適用於海洋氣象觀測塔 (Meteorological Mast) 之設計，惟其設計年限應依主管機關或開發商另行訂定。
4. 海上變電站之支撐結構，因其結構設計年限、設計載重及使用性能不同於離岸風力機支撐結構，其設計得參考 DNV-ST-0145；陸上變電站之結構構造物，除本指引針對其性能要求另有規定外，應依「輸配電設備裝置規則」及國內相關建築設計法規辦理。

## 1.4 名詞與定義

本指引之名詞、定義、縮寫及符號，參照本節之解說。

### 【解說】

本指引名詞定義如下：

#### 1. 名詞與定義

##### (1) 置空間隙 (Air Gap)

係指極端環境條件下，最高水位面與不承受海浪衝擊之外露構件最低點間之垂直間距。

##### (2) 沿岸流 (Alongshore Current)

侷限於碎波帶內，沿著海岸平行流動之水流。

##### (3) 天文潮 (Astronomical Tide)

海水因天體引力所產生之水位變動稱之為天文潮。天文潮主要是由月球與太陽的引力所引起。

##### (4) 碎波 (Breaking Wave)

波浪自深水區到達淺水區，由於水深變淺波浪會向上疊加，當波形尖銳度太大時，導致波浪不穩定而崩解、破碎。

##### (5) 挫屈 (Buckling)

結構物構件承受軸向壓力時，當超過軸向壓力的臨界值後，突然朝向與受力方向呈正交方向變形的現象。

##### (6) 驗證機構 (Certification Bodies)

係指經標準檢驗局認可，得就一個以上專案驗證項目執行驗證之法人、機關（構）或團體。

(7) 特徵載重 (Characteristic Loads)

離岸風力機所承受之載重，包含自重、設備重量及環境影響所導致之載重。

(8) 特徵載重效應 (Characteristic Load Effects)

材料、斷面、組件或構件抵抗特徵載重引致之內力或變形，可能包含多個特徵載重同時作用。

(9) 特徵強度 (Characteristic Strength)

代表材料、斷面、組件或構件所能抵抗載重或載重效應的強度。

(10) 同向 (Co-Directional)

係指風的順風向與波浪的前進方向相同。

(11) 控制系統 (Control System)

接收風力機及/或其環境資訊，並調節風力機，使其保持在操作極限範圍內之控制與保護系統功能。

(12) 海流 (Current)

通過固定位置之海水流動，通常以海流速率與方向予以描述。

(13) 設計載重效應 (Design Load Effects)

考量載重部分安全係數之特徵載重效應，可能包含多個特徵載重同時作用。

(14) 設計波浪 (Design Wave)

具有已定義波高、週期與方向之確定波浪，用於離岸風力機結構之設計。設計波浪可能附帶使用特定週期波理論之相關要求。

(15) 設計者/設計廠商 (Designer)

負責設計離岸風力機之機構。

(16) 繞射 (Diffraction)

波浪繞向障礙物背後的現象。

(17) 漂沙 (Drift Sand)

海床底質受波浪及水流作用而移動之現象，則稱為漂沙。

(18) 環境條件 (Environmental Conditions)

影響離岸風力機運轉之環境特徵 (如風、波浪、海流、水位、腐蝕、雷擊、海洋附生物、地震、土壤條件與整體海床移動等)。



(19) 外部條件 (External Conditions)

影響離岸風力機運轉之外部因素，包括環境條件、電網狀況。

(20) 極端示性波高 (Extreme Significant Wave Height)

最高 (大) 示性波高 (3 小時平均) 之期望值，同時年超越機率為  $1/N$  (回歸期為  $N$  年)。

(21) 極端波高 (Extreme Wave Height)

最高 (大) 個別波高 (通常為零上切波高) 之期望值，其年超越機率為  $1/N$  (回歸期為  $N$  年)。

(22) 風域 (Fetch)

風以接近恆定風速與風向下，在海面上持續吹過之距離。

(23) 基礎 (Foundation)

離岸風力機支撐結構之一部分，可將作用於支撐結構之載重轉移至海床，得參照圖 1.1-2。

(24) 幾何非線性 (Geometric Nonlinearity)

結構或構件的非線性行為不是來自所使用的材料性質本身，而是由於結構或構材的幾何大變形所引起，或是由於作用載重所引起大的應變效應。

(25) 最高天文潮 (Highest Astronomical Tide)

在一般氣象條件及各種天文條件組合下，可預測之最高靜水位。由於氣象因素造成之暴潮本質上不規則，且疊加於潮汐變化之上，因此總靜水位可能高於最高天文潮。

(26) 輪轂高度 (Hub Height)

風力機之葉輪掃掠面積中央至平均海水位之高度。

(27) 水動力載重 (Hydrodynamic Loads)

海流及海流與離岸風力機支撐結構間之交互作用所產生之動態載重。

(28) 近岸流 (Inshore Current)

波浪接近岸邊時，波的能量驅動水分子而形成近岸流。若波前平行接近海岸，則會形成垂直海岸的離岸流；另一狀況為波前以一明顯角度接近海岸線，則形成平行海岸的沿岸流。

(29) 液化 (Liquefaction)

在地震反覆外力作用下，飽和疏鬆砂質土層會出現土壤壓縮現象而激發超額孔隙水壓，使有效應力降低。當土壤有效應力降至零時，即喪失抗剪強度而出現液化現象。

(30) 載重效應 (Load Effects)

施加於結構構件或系統之單一載重或組合載重所造成之效應，如內力、應力、應變、移動等。



(31) 最低天文潮 (Lowest Astronomical Tide)

在一般氣象條件及各種天文條件組合下，可預測之最低靜水位。由於氣象因素造成之暴潮本質上不規則，其疊加於潮汐變化之上，因此總靜水位可能低於最低天文潮。

(32) 製造廠商 (Manufacturer)

負責製造及/或建造 (如組裝、安裝或吊裝等) 離岸風力機之機構。

(33) 海洋環境條件 (Marine Conditions)

影響離岸風力機運轉之海洋環境特性，如波浪、海流、水位等。

(34) 海洋附生物 (Marine Growth)

結構構件表面因植物、動物及細菌等引致之被覆物。

(35) 平均海水位 (Mean Sea Level)

一段時間內之海洋平均水位，此段時間之長度須足夠去除因波浪、潮汐與暴潮所造成之變異。

(36) 氣象潮 (Meteorological Tide)

受各種氣象因素 (如颱風、氣壓場等) 所形成之海水水位漲落變化。

(37) 海洋氣象 (Metoccean)

海洋上的氣象條件。

(38) 錯位/風浪錯位 (Misaligned)

風的順風向與波浪的前進方向間之水平偏差。

(39) 多向 (Multi-Directional)

風的順風向及/或波浪的前進方向為非單一作用方向之分布。

(40) 洋流 (Ocean Current)

具有相對穩定流速與流向之大規模海水環流運動。

(41) 輸出海纜 (Offshore Export Cable)

海上變電站至陸域電網間之連接海纜。

(42) 離岸風力發電廠 (Offshore Wind Farm)

配置於海上由單群/多群離岸風力機與輸電系統所組成之離岸風力發電廠，參照圖 1.1-1。

(43) 離岸風力機 (Offshore Wind Turbine)

支撐結構須承受水動力載重之風力機。

(44) 離岸風力發電廠開發場址/特定場址 (Offshore Wind Turbine Site/Site-Specific)

離岸風力機預定安裝之開發場址範圍。

- (45) 載重部分安全係數 (Partial Safety Factor for Loads)  
個別特徵載重之安全係數。
- (46) 材料部分安全係數 (Partial Safety Factor for Materials)  
個別特徵強度之安全係數。
- (47) 變電站連接海纜 (Substation Platform Connection Cable)  
海上變電站與海上變電站間之連接海纜。
- (48) 回歸期 (Recurrence Period/Return Period)  
從一度發生超過某數值現象，到下一次發生為止的機率平均期間。
- (49) 轉子機艙總成 (Rotor-Nacelle Assembly)  
係屬於離岸風力機之一部分，由支撐結構承載其所傳遞之載重，參照圖 1.1-2。
- (50) 沙洲 (Sand Bar)  
一般由碎波攪亂海底沙、礫堆積而成，於低潮時仍潛沒海底且平行海岸之條狀突出物。
- (51) 沙波 (Sand Wave)  
在河口、砂質海底區域受波浪及海流等海洋營力作用下，所產生類似波浪狀的底床形貌型態。
- (52) 淘刷 (Scour)  
海流及波浪移動海床土壤，亦可能因結構構件阻斷海底上方之海流自然流動而造成。
- (53) 海底 (Sea Floor)  
海水及海床間之交接面，參照圖 1.1-2。
- (54) 海況 (Sea State)  
海洋統計資料維持平穩狀態之海洋條件。
- (55) 海床 (Seabed)  
海底下以承載支撐結構之物質，參照圖 1.1-2。
- (56) 海床變動 (Seabed Movement)  
海床因自然地質變化過程而產生之移動。
- (57) 海床淘刷 (Seabed Scouring)  
海床沉積物受外力 (如自然、人為因素等) 影響，產生侵蝕或淤積之量體動態變化。
- (58) 海水靜水壓 (Sea Water Hydrostatic Pressure)  
一定深度下之海水壓力與海平面大氣壓力之和。

(59) 示性波高 (Significant Wave Height)

示性波高又稱有義波高，指某觀測點長時間連續觀測海水面變動，以零上切（零下切）定義所有波高後，其中所有波高中選取波高最大的 1/3 平均之後所得得波高。海況之波浪高度之統計度量，定義為  $4 \times \sigma\eta$ ，其中  $\sigma\eta$  為海面高度之標準差。

(60) 飛濺區 (Splash Zone)

經常因波浪與潮汐變化而潮濕之支撐結構外部區域。

此區域定義為下列二者間之區域：

- A. 1 年回歸期之最高靜水位，加上 1 年回歸期示性波高波浪之波峰高度。
- B. 1 年回歸期之最低靜水位，減去 1 年回歸期示性波高波浪之波谷深度。

(61) 基準風速 (Standard Wind Speed)

用於定義離岸風力機等級的風速基本參數。

(62) 靜水位 (Still Water Level)

係指考量潮汐與暴潮效應，並排除波浪造成之變異等條件，經計算所得之水位。靜水位可能高於、等於或低於平均海水位。

(63) 暴潮 (Storm Surge)

因暴風的大氣壓力變化與/或風引致之不規則海水位變動。

(64) 下部結構 (Sub-Structure)

離岸風力機支撐結構之一部分。此部分係由海底處基礎頂部向上延伸，至風力機塔架底部間之範圍，參照圖 1.1-2。

(65) 支撐結構 (Support Structure)

離岸風力機的一部分，由塔架、下部結構與基礎等三部分所組成，參照圖 1.1-2。

(66) 潮流 (Tidal Current)

潮汐造成之海流。

(67) 潮差 (Tidal Range)

最高天文潮與最低天文潮間之距離。

(68) 潮汐 (Tide)

天文力所造成之規則且可預測的海洋運動。

(69) 塔架 (Tower)

離岸風力機支撐結構之一部分。此部分連接下部結構與轉子機艙總成，參照圖 1.1-2。

(70) 海嘯 (Tsunami)

海底快速垂直移動所造成之長週期海浪。

(71) 紊流強度 (Turbulence Intensity)

在某一時間長度內，由所測得之風速數據樣本其標準差與平均值之比值。

(72) 單向 (Uni-Directional)

風的順風向及/或波浪的前進方向作用於單一方向。

(73) 水深 (Water Depth)

海底和靜水位間之垂直距離。需注意有時會有數個靜水位，因此並未限定只有一個水深值。

(74) 波峰高度 (Wave Crest Elevation)

波峰與靜水位間之垂直距離。

(75) 波向 (Wave Direction)

波浪行進之平均方向。

(76) 波高 (Wave Height)

係指零上切 (零下切) 於平均零水位向上 (向下) 交叉波浪最高點與最低點間之垂直距離。

(77) 波浪週期 (Wave Period)

係指零上切波 (零下切波) 於二個相鄰零上切點 (零下切點) 之時間間隔。

(78) 波譜尖峰頻率 (Wave Spectral Peak Frequency)

波譜中尖峰能量之頻率。

(79) 波譜 (Wave Spectrum)

表示各種頻率的成分波重疊而成之不規則波浪中，某一頻率成分波的能量集中程度。

(80) 風驅流 (Wind-Driven Current)

海平面水體受到風力的吹送，而產生的水流運動。

(81) 風切 (Wind Shear)

與風向垂直之平面上的風速變化 (量)。

(82) 風力機陣列海纜 (Wind Turbine Array Cables)

各離岸風力機間及離岸風力機與海上變電站間之連接海纜。

(83) 風力機製造商 (The Manufacturer of Wind Turbine)

負責設計及/或製造離岸風力機之機構。

(84) 轉向控制 (Yaw Control)

係指控制離岸風力機轉子機艙總成水平轉動，用於控制方位以保護離岸風力機和維持最佳發電面向。

(85) 轉向錯位 (Yaw Misalignment)

離岸風力機葉輪軸與風向間之水平偏差。

(86) 轉向滑動 (Yaw Slippage)

風力機轉向系統出現控制指令與實際轉向位置不同之現象。

(87) 零下切波 (Zero Down-Crossing Wave)

介於零下切點間波浪高程歷時之部分，零下切發生於海面下降（而非升高）超過靜水位時。

(88) 零上切波 (Zero Up-Crossing Wave)

介於零上切點間波浪高程歷時之部分，零上切發生於海面升高（而非下降）超過靜水位時。

2. 縮寫

英文縮寫	中文名稱	全稱 (英文為主)
A	異常	Abnormal
ADCP	都卜勒流剖儀	Acoustic Doppler Current Profiler
AIS	自動識別系統	Automatic Identification System
ALS	意外限度狀態	Accidental Limit States
BSH	德國海事局	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (德語) Federal Maritime and Hydrographic Agency (英文)
CAU	非等向三軸壓密 不排水壓縮試驗	Consolidated Anisotropically Undrained Triaxial Compression Test
CCD	電荷耦合器件	Charge-Coupled Device

英文縮寫	中文名稱	全稱 (英文為主)
CID	等向三軸壓密 排水壓縮試驗	Consolidated Isotropically Drained Triaxial Compression Test
CIU	等向三軸壓密 不排水壓縮試驗	Consolidated Isotropically Undrained Triaxial Compression Test
COV	變異係數	Coefficient of Variation
CPT	圓錐貫入試驗	Cone Penetration Test
CPTU	圓錐貫入試驗 (可量測孔隙水壓)	Piezocone Penetration Test
CSR	地震引致土層之 平均反覆剪應力比	Cyclic Stress Ratio
CRR	土層之 抗液化剪力強度比	Cyclic Resistance Ratio
DFE	設計疲勞因子	Design Fatigue Factor
DLC	載重組合	Design Load Case
ECD	風向變化之 極端相干陣風	Extreme Coherent Gust with Direction Change
ECM	極端海流模式	Extreme Current Model
EDC	極端風向變化	Extreme Direction Change
EMF	電磁場	Electromagnetic Field
EOG	極端運轉陣風	Extreme Operating Gust
ESS	極端海況	Extreme Sea State
ETM	極端紊流模型	Extreme Turbulence Model
EWLR	極端水位範圍	Extreme Water Level Range
EWM	極端風速模型	Extreme Wind Speed Model
EWS	極端風切	Extreme Wind Shear
F	疲勞	Fatigue

英文縮寫	中文名稱	全稱 (英文為主)
FL	抗液化安全係數	Factor of Safety Against Liquefaction
FLS	疲勞限度狀態	Fatigue Limit States
GIR	土工詮釋報告	Geotechnical Interpretative Report
GIS	氣體絕緣開關	Gas Insulated Switchgear
HAT	最高天文潮	Highest Astronomical Tide
HSWL	最高靜水位	Highest Still Water Level
IALA	國際航標協會	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
ICPC	國際電纜保護協會	International Cable Protection Committee
IFORM	逆一階可靠度方法	Inverse First-Order Reliability Method
IGRF	國際地磁參考場	International Geomagnetic Reference Field
IHO	國際水文組織	International Hydrographic Organization
IPS	外圍中間結構物	Intermediate Peripheral Structure
LAT	最低天文潮	Lowest Astronomical Tide
LLT	孔內側向載重試驗 (孔內變形試驗)	Lateral Load Test (Borehole Deformation Test)
LSWL	最低靜水位	Lowest Still Water Level
MAG	磁力探測	Magnetometry
MBES	多音束探測儀	Multi-Beam Echo Sounder
MCS	多頻道反射震測	Multi-Channel Seismic Reflection
MHWS	大潮平均高潮位	Mean High Water Springs
MSE	最小平方差	Mean Squared Error
MSL	平均海水位	Mean Sea Level
N	正常	Normal

英文縮寫	中文名稱	全稱 (英文為主)
NCM	正常海流模式	Normal Current Model
NSS	正常海況	Normal Sea State
NTM	正常紊流模型	Normal Turbulence Model
NWLR	正常水位範圍	Normal Water Level Range
NWP	正常風剖面模型	Normal Wind Profile Model
PC	專案驗證	Project Certification
PSHA	機率式地震危害度分析	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
psu	實用鹽度單位	Practical Salinity Unit
RNA	轉子機艙總成	Rotor-Nacelle Assembly
ROV	遙控無人載具	Remotely Operated Vehicle
SBES	單音束探測儀	Single Beam Echo Sounder
SBP	底質剖面儀	Sub-Bottom Profiler
SCADA	監控及資料收集系統	Supervisory Control and Data Acquisition
SCPT	圓錐貫入震測試驗	Seismic Cone Penetration Test
SLS	使用限度狀態	Serviceability Limit States
SPS	外圍主要結構物	Significant Peripheral Structure
SPT	標準貫入試驗	Standard Penetration Test
SSRA	工址地震反應分析	Seismic Site Response Analyses
SSS	側掃聲納	Side Scan Sonar
SSS	嚴苛海況	Severe Sea State
SWL	靜水位	Still Water Level
TC	型式認證	Type Certification
TP	連接段	Transition Piece
ULS	極限限度狀態	Ultimate Limit States



英文縮寫	中文名稱	全稱 (英文為主)
UU	三軸不壓密 不排水壓縮試驗	Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test
VIV	渦致振動	Vortex Induced Vibrations
WRF	中尺度氣象模式	Weather Research and Forecasting

### 3. 符號與單位

符號	定 義	單位
$a$	固定水深誤差 (第 2.3.2 節)	m
$A_d$	雷擊閃電匯集區域面積	m <sup>2</sup>
$b$	從屬水深誤差因子 (第 2.3.2 節)	-
$C$	韋伯分布函數之尺度參數	-
$C_d$	環境因數	-
$D$	葉輪直徑 (第 3.6.4 節、第 4.2 節)	m
	疲勞損傷 (第 5.3.5 節)	-
$d$	水深 (第 2.3.2 節、第 4.4 節)	m
	海水水位深度 (第 4.7 節)	m
$DDF$	設計疲勞因子	-
$g$	重力加速度	m/s <sup>2</sup>
$H$	離岸風力機於平均海平面以上之高度 (含葉輪掃掠半徑, 第 2.4.2 節)	m
	極端個別波高 (第 3.3.4 節、第 4.4 節)	m
$H_N$	N 年回歸期之極端個別波高	m
$H_S$	示性波高	m
$H_{SN}$	N 年回歸期之示性波高	m
$H_{ST}$	運輸、安裝、維護及修理時之示性波高	m

符號	定 義	單位
$I_{ref}$	平均風速 15 m/s 時之紊流強度參考值	-
$k$	韋伯分布函數之形狀參數	-
$N$	S-N 曲線對應疲勞破壞時之反覆應力幅值作用次數	次
$n$	實際發生之反覆應力幅值作用次數	次
$N_D$	年平均雷擊次數	year <sup>-1</sup>
$N_g$	年平均閃電密度	km <sup>2</sup> · year <sup>-1</sup>
$R$	機艙轉向半徑	m
$t$	時間	s
$T$	風況作用時間 (第 4.2 節)	s
	波浪週期 (第 4.4 節)	s
$T_d$	每年落雷日數	year <sup>-1</sup>
$T_p$	波譜尖峰週期	s
$u$	海嘯接觸結構體時的流速	m/s
$U_N$	N 年回歸期之海流速度	m/s
$U_{ss}$	水面下之海流速度	m/s
$U_w$	風造成之海流速度	m/s
$V$	平均風速	m/s
$V_N$	N 年回歸期之最大 10 分鐘平均風速值	m/s
$V_{1-hour}$	靜水位以上 10 公尺高度之 1 小時平均風速值	m/s
$V_{10min,Nyr}$	N 年回歸期之 10 分鐘平均風速值	m/s
$V_{ave}$	年平均風速值	m/s
$V_{cg}$	風向變化時之極端相干陣風變化量	m/s

符號	定 義	單位
$V_{eN}$	N 年回歸期之最大 3 秒陣風風速值	m/s
$V_{gust}$	50 年回歸期之最大陣風	m/s
$V_{hub}$	輪轂高度之平均風速值	m/s
$V_{in}$	切入風速	m/s
$V_{out}$	切出風速	m/s
$V_r$	額定風速	m/s
$V_{ref}$	輪轂高度 10 分鐘平均基準風速	m/s
$V_{ref,T}$	適用於颱風之輪轂高度 10 分鐘平均基準風速	m/s
$V_T$	運輸、安裝、維護及修理時之風速	m/s
$z$	高度	m
$z_{hub}$	輪轂高度	m
$\eta$	線性增加係數 (第 4.2 節)	-
	海嘯於風力機處之水位抬升高度 (第 4.7 節)	m
$\theta$	風向角	度
$\theta_{cg}$	陣風條件下之最大風向偏差角	度
$\theta_e$	極端風向偏差角	度
$\Lambda_1$	紊流尺度參數	-
$\gamma_u$	超額孔隙水壓比	-
$\Delta u$	超額孔隙水壓	kN/m <sup>2</sup>
$\sigma_0$	為所選定之目標非超越機率百分比的紊流標準差。	m/s
$\sigma_l$	紊流標準差	m/s
$\sigma'_v$	初始垂直有效應力	kN/m <sup>2</sup>

## 1.5 相關法令與標準

本指引係以離岸風力發電廠場址調查及設計階段所需相關工程技術為基準作原則性規定，除電業法及其他相關子法或其他法令另有規定者外，應依本指引之規定。本指引未規定者，應參照相關法令及標準據以辦理。

### 【解說】

本指引中若涉及其他部會規定者，應遵從其他部會之法規、規範或相關要求。

#### 1. 國內法規、規範和標準

---

水下文化資產保存法

---

水下文化資產保存法施行細則

---

水中浮游植物採樣方法－採水法

---

水深測量作業規範

---

在中華民國大陸礁層鋪設維護變更海底電纜或管道之路線劃定許可辦法

---

用戶用電設備裝置規則

---

再生能源發展條例

---

台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點

---

各類場所消防安全設備設置標準

---

限制時變電場、磁場及電磁場曝露指引

---

航空障礙物標誌與障礙燈設置標準

---

航路標識設置技術規範

---

航路標識條例

---

船舶設備規則

---

電業法

---

電業供電電壓及頻率標準

---

電業竣工查驗作業要點

---

---

電業登記規則

---

輸配電設備裝置規則

---

離岸風力發電案場專案驗證審查示範輔導作業要點 (2020)

---

職業安全衛生法

---

## 2. 國家標準(CNS)

---

CNS 15091-6 深層海水檢驗法－溶氧量之測定

---

CNS 15176-1 風力機－第 1 部：設計要求

---

CNS 15176-2 風力機－第 2 部：小型風力機設計要求

---

CNS 15176-3 風力機－第 3 部：離岸風力機設計要求

---

CNS 15176-4 風力機－第 4 部：齒輪箱之設計及規範

---

CNS 15176-11 風力機－第 11 部：噪音量測技術

---

CNS 15176-12-1 風力機－第 12-1 部：發電用風力機之功率性能量測

---

CNS 15176-13 風力機－第 13 部：機械負載量測

---

CNS 15176-14 風力機－第 14 部：視在聲功率位準及聲值之宣告

---

CNS 15176-21 風力機－第 21 部：併網型風力機之電力品質特性量測與評鑑

---

CNS 15176-22 符合性測試與驗證

---

CNS 15176-23 風力機－第 23 部：轉子葉片全尺度結構測試

---

CNS 15176-24 風力機－第 24 部：雷擊保護

---

CNS 15176-26-1 風力發電機系統以時間為基礎之可利用率

---

CNS 15177 風力發電機組詞彙

---

### 3. 國際標準/規範

ACP OCRP-1-202x	ACP Offshore Compliance Recommended Practices (OCRP) , 2022
API RP 2A-WSD	Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design
API RP 2A-LRFD	Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Load and Resistance Factor Design
API RP 2GEO	Geotechnical and Foundation Design Considerations
AWEA OCRP	Recommended Practices for Design, Deployment, and Operation of Offshore Wind Turbines in the United States , 2012
EN 1993 (系列標準)	Eurocode 3: Design of steel structures
EN 1993-1-5	Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: General rules - Plated structural elements
EN 1993-1-6	Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-6: Strength and stability of shell structures
EN 1993-1-8	Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: Design of joints
EN 1993-1-9	Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-9: Fatigue
EN 1997-1	Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1:General rules
ISO 76	Rolling bearings-Static load ratings
ISO 281	Rolling bearings-Dynamic load ratings and rating life
ISO 2394	General principles on reliability structures
ISO 2533	Standard Atmosphere
ISO 4354	Wind actions on structures
ISO 6336 (系列標準)	Calculation of load capacity of spur and helical gears
ISO 9001	Quality management systems-Requirement
ISO 12944 (系列標準)	Paints and varnishes-Corrosion protection of steel structures by protective paint systems
ISO 15257	Cathodic protection-Competence levels of cathodic protection persons-Basis for a certification scheme

ISO 19900	Petroleum and natural gas industries-General requirements for offshore structures
ISO 19901-1	Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 1 : Metocean design and operating conditions
ISO 19901-3	Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 3: Topsides structure
ISO 19901-4	Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 4 : Geotechnical and foundation design conditions
ISO 19901-8	Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures - Part 8: Marine soil investigations
ISO 19902	Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures
ISO 19903	Petroleum and natural gas industries-Fixed concrete offshore structures
ISO 22475-1	Geotechnical investigation and testing-Sampling methods and groundwater measurements-Part 1: Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater
ISO 31000	Risk management
ISO/IEC 27001	INFORMATION SECURITY MANAGEMENT
IEC 60228	Conductors of insulated cables
IEC 60721-2-1	Classification of environmental conditions-Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature. Temperature and humidity
IEC 61024-1-1	Protection of Structures Against Lightning Part 1: General Principles Section 1: Guide A-Selection of Protection Levels for Lightning Protection Systems
IEC 61400-1	Wind energy generation systems-Part 1: Design requirements
IEC 61400-3-1	Wind energy generation systems-Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines
IEC 61400-3-2	Wind energy generation systems-Part 3-2 : Design requirements for floating offshore wind turbines
IEC 61400-6	Wind energy generation systems-Part 6: Tower and Foundation Design requirements
IEC 61400-12-1	Wind energy generation systems-Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines

IEC 61643 (系列標準)	Low-voltage surge protective devices
IEC 62305-3	Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard
IEC 62305-4	Protection against lightning-Part 4: Electrical and electronic systems within structures
IEC 62443-3-3	Industrial communication networks-Network and system security-Part 3-3: System security requirements and security levels
IEC 62443-4-1	Security for industrial automation and control systems -Part 4-1: Secure product development lifecycle requirements
IEC 62443-4-2	Security for industrial automation and control systems -Part 4-2: Technical security requirements for IACS components
IECRE OD-502	Project Certification Scheme
JIS C 1400-1	風車－第 1 部：設計要件
JIS C 1400-3	風車－第 3 部：洋上風車の設計要件
JIS C 1400-24	風車－第 24 部：雷保護
MEASNET	Evaluation of site-specific wind conditions
NACE SP0108	Corrosion Control of Offshore Structures by Protective Coatings
NACE SP0176	Corrosion Control of Submerged Areas of Permanently Installed Steel Offshore Structures Associated with Petroleum Production
NISTIR 7628	Smart Grid Cyber Security: Vol. 1, Smart Grid Cyber Security Strategy, Architecture, and High-Level Requirements Vol. 2, Privacy and the Smart Grid Vol. 3, Supportive Analyses and References
NORSOK M-501	Surface preparation and protective coating
NORSOK M-503	Cathodic protection
NORSOK N-004	Design of steel structures
Standard Design Minimum requirements concerning the constructive design of offshore	



---

structures within the Exclusive Economic Zone (EEZ), BSH

---

洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説，国土交通省洋上風力発電施設  
検討委員会

---

風力発電設備支持物構造設計指針・同解説，土木学会

---

#### 4. 第三方驗證標準參考

---

DNV-ST-0126 Support structures for wind turbines

---

DNV-ST-0145 Offshore substations

---

DNV-ST-0359 Subsea power cables for wind power plants

---

DNV-ST-0361 Machinery for wind turbines

---

DNV-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines

---

DNV-ST-C502 Offshore concrete structures

---

DNV-ST-N001 Marine operations and marine warranty

---

DNV-SE-0073 Project certification of wind farms according to IEC 61400-22

---

DNV-SE-0190 Project certification of wind power plants

---

DNV-OS-D301 Fire protection

---

DNV-RP-0360 Subsea power cables in shallow water

---

DNV-RP-0416 Corrosion protection for wind turbines

---

DNV-RP-0419 Analysis of grouted connections using the finite element method

---

DNV-RP-0585 Seismic design of wind power plants

---

DNV-RP-B401 Cathodic protection design

---

DNV-RP-C201 Buckling strength of plated structures

---

DNV-RP-C202 Buckling strength of shells

---

DNV-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures

---

DNV-RP-C205	Environmental conditions and environmental loads
DNV-RP-C208	Determination of structural capacity by non-linear FE analysis methods
DNV-RP-C212	Offshore soil mechanics and geotechnical engineering
NI605	Geotechnical and foundation design
NI682	Certification of fixed offshore substations for renewable energy projects
Germanischer Lloyd, Guideline for the Certification of Wind Turbines	
Germanischer Lloyd, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines	
Bureau Veritas, Guide on Wind Farm Project Certification	
ABS Guide for Building and Classing-BOTTOM-FOUNDED OFFSHORE WIND TURBINES, American Bureau of Shipping (以下簡稱「ABS BOWT 指引」)	

上述法規或規則若有註明年份者僅適用於該版次；未註明年份者，則以最新版為準。

## 1.6 設計、施工與運維之配合

設計階段須揭櫫設計理念與對應的離岸風力發電廠全生命週期內各項需求與性能水準，並編製明確的配套作業要求，以提供未來施工廠商編訂施工計畫書與開發商編訂運轉及維護計畫書之依據。

### 【解說】

為符合本指引預期之離岸風力發電廠全生命週期 (圖 1.6-1) 之安全需求、使用性能與服務水準，離岸風力發電廠設計時應考量本指引與「離岸風力發電製造與施工技術指引」及「離岸風力發電運轉及維護技術指引」三部指引間工程技術要求之配合。

設計階段應配合製造施工與運轉維護之需求，考量下列事項：

1. 設計廠商在設計階段應先就整體工程潛在的風險與施工可行性作初步評估，以適當的設計因應可行的施工方案並降低未來風險，提送設計成果。施工廠商再依據其內容做危害鑑別及風險分析，並編製完整施工計畫書，以確保施工過程如期如質與降低各種意外事件之發生。若設計階段已確定施工廠商者，設計與施工廠商亦可綜合檢討合併提出施工計畫書。
2. 設計廠商在設計階段應先編製管理維護初步計畫 (包含環境與結構監測及海纜系統等)，以提供管理維護廠商 (以下簡稱運維廠商) 編訂正式運轉及維護計畫之參考。

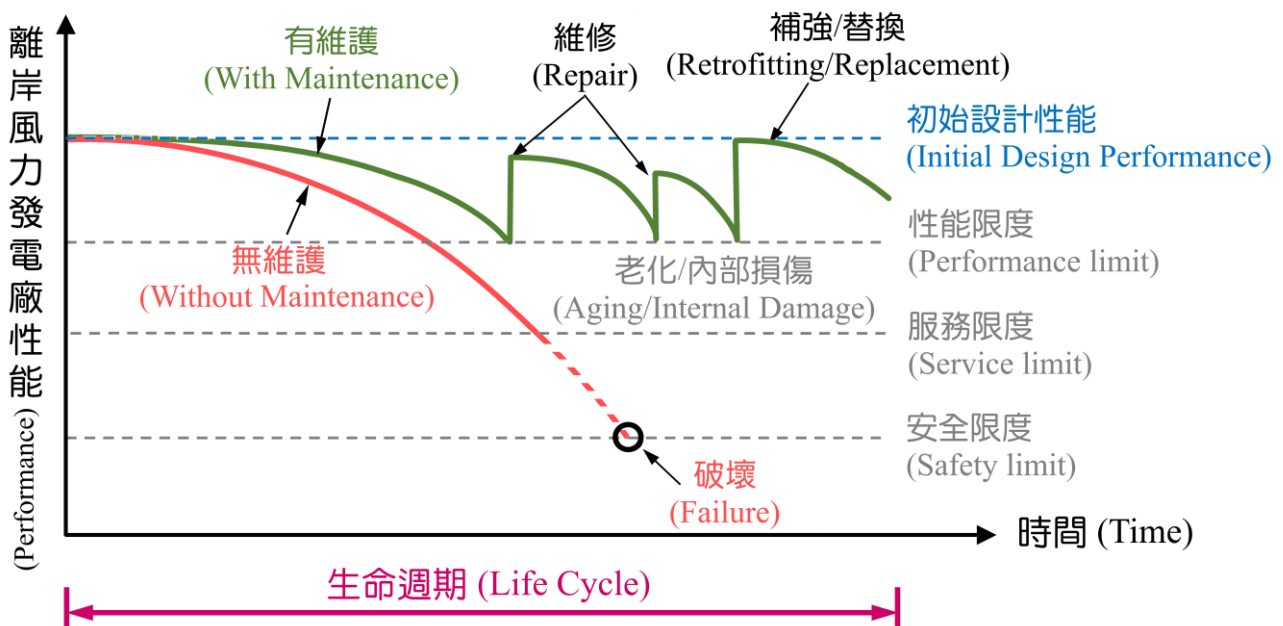


圖 1.6-1 生命週期概念示意圖

## 1.7 場址調查及設計階段送審文件

場址調查及設計階段應於完成各項作業時提送相關調查報告與設計成果，經專業技師簽證及/或驗證機構核可後，提送主管機關辦理專案驗證審查並核定之。

### 【解說】

本指引所稱簽證，係指專業技師依據「電業法」、「電業設備及用戶用電設備工程設計及監造範圍認定標準」、「電業竣工查驗作業要點」、「再生能源發電設備設置管理辦法」及「技師法」規定在本人或其監督下所製作之書圖簽署並加蓋技師執業圖記。

技師簽證計畫與資格證明文件須送經目的事業主管機關核備。技師簽證須依據目的事業主管機關之相關規則及「離岸風力發電機組支撐結構相關設計文件項目(參考範例)」辦理。

場址調查與設計階段完成各項作業時所需繳交文件之內容，包含但不限於附錄一所列舉之項目。

## 第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查

### 2.1 通則

離岸風力發電廠場址環境條件調查係以符合離岸風力發電廠於設計階段工程技術所需之條件進行調查。

#### 【解說】

調查作業應涵蓋基本設計與細部設計等階段之需求。

本章調查作業包含風環境條件與海洋環境條件調查、水深地形與大地工程調查及其他環境條件調查等。

風環境條件調查包含風速、風向、氣壓、氣溫、空氣濕度與淨輻射量等，海洋環境條件調查包含波浪、海流、水位與潮汐等。水深地形與大地工程調查包含水深地形調查、地球物理探勘與大地工程調查。其他環境條件調查包含腐蝕環境、雷擊與海洋附生物調查。

此外，對於腐蝕環境與海洋附生物等調查，如場址無法實際取樣調查時，得參考相關學理、文獻或國際標準，合理推估設計所需之參數。

若前期階段之調查成果顯示，特定場址有包含但不限於：海底斷層構造、海底蘊含天然氣或天然氣孔等特殊環境條件，應檢討調查內容是否符合工程需求，必要時得調整或增加調查項目。

### 2.2 風環境條件與海洋環境條件調查

#### 2.2.1 一般規定

須以現地持續觀測一年以上調查成果為原則，其調查成果須能反映開發場址（以下簡稱特定場址）的風況、波浪、海水水位、海流及潮汐等環境條件特性，其觀測資料須能符合各環境條件變數之間的統計關聯性、時期的同步性及紀錄的有效性等要求。

#### 【解說】

現地觀測係指於特定場址或其鄰近區域之調查行為。

風環境條件與海洋環境條件調查方法應以最新規範及調查技術訂定之。

特定場址觀測資料之監測期間應足以確保個別參數及相關參數之聯合機率分布為可靠統計值。惟觀測資料不足時，可輔以鄰近觀測地點之長期資料，運用數值工具轉換成為符合特定場址特性之等效資料。

有關風環境條件與海洋環境條件之調查要求，建議可參考「離岸風力發電示範獎勵辦法」之相關規定如表 2.2.1-1 所示，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性與設計需求訂定之。

表 2.2.1-1 風環境條件與海洋環境條件調查量測項目及規格參考資料

量測項目	物理量	量測頻率	量測範圍	解析度
風速	風速	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1sec 記錄一次。	0 至 70 m/s	≤0.1 m/s
風向	風向	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1sec 記錄一次。	0°至 360°	≤1°
氣壓	氣壓	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1min 記錄一次。	500 至 1100 mb	≤1.0 mb at 0 至 40°C
氣溫	溫度	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1min 記錄一次。	-40°C至 60°C	≤0.1°C
空氣濕度	濕度	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1min 記錄一次。	0.8 至 100 %	≤1%
降雨	降雨量	連續取樣率至少 1Hz 至少每 1min 記錄一次。	4.73ml/tip	0.5mm(per tip)
淨輻射量	淨輻射量	至少每 1hr 記錄一次每次連續量測 60min 連續取樣率至少為每 3sec 一次。	-	最大 0.01w/m <sup>2</sup>
水位	海面水位	至少每 6min 量測記錄一次。	至少 ±15m	最大 0.01 m
波浪	波高、週期、波向	至少每 1hr 記錄一次每次至少連續量測 20min 連續取樣率至少為 2Hz。	波高：至少 20m 週期：至少 30sec 波向 0°至 360°	波高 0.01m 週期 0.1sec 波向 0.1°
海流	流速、流向	至少每 1hr 記錄一次每次至少連續量測 5min 連續取樣率至少為 1Hz。	至少 ±5m/s	最大 0.01m/s
海水溫度、鹽度、密度	溫度、鹽度、密度	至少每 6min 量測記錄一次。	溫度：至少 0 至 40°C 鹽度：至少 0 至 40psu 密度：至少 1,000 至 1,040kg/m <sup>3</sup>	溫度：最大 0.01°C 鹽度：最大 0.01psu 密度：0.01kg/m <sup>3</sup>

資料來源：離岸風力發電示範獎勵辦法，經濟部，2019。

註：本表僅供參考，實際執行時，仍須依風場所在區域之自然環境特性與設計需求檢討訂定之。

## 2.2.2 風環境條件調查

現地觀測成果須能反映特定場址的風環境設計參數，其歷史紀錄資料調查成果須與特定場址風環境條件具合理的相關性，並符合第2.2.1節之要求。

### 【解說】

風環境條件調查以包含但不限於現地觀測、歷史氣象紀錄資料調查及環境風場理論數值模擬等調查方式，取得特定場址處離岸風力機設計所需之風環境條件設計參數，其調查應符合 CNS 15176-12-1、IEC 61400-12-1 與 MEASNET 等標準/規範之要求。

設計階段須於特定場址或其鄰近區域設置可信賴的量測方式 (如浮式雷射光達或海洋氣象觀測塔等)，風環境條件調查的規劃原則如下：

### 1. 正常風況 (Normal Wind)

- (1) 調查目的：驗證正常風況之平均風速、紊流強度及風力機等級適用性。
- (2) 風速範圍：離岸風力機運轉風速區間 ( $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ )。
- (3) 調查資料：特定場址之現地觀測資料及附近氣象站至少 1 年以上資料。

### 2. 極端風況 (Extreme Wind)

- (1) 調查目的：評估極端風況之平均風速、紊流強度。若為颱風條件時，應評估颱風下之風況。
- (2) 風速範圍：離岸風力機停機以上風速 ( $> V_{out}$ )。
- (3) 調查資料：特定場址之現地觀測資料及附近氣象站至少 7 年以上資料。若為颱風條件時，應盡可能調查附近氣象站之長期颱風歷史資料，以確保推估合理性。

若現地觀測的可用資料年數長度較短，欲採用鄰近氣象站的長期觀測歷史資料進行相關性分析 (Correlation Analysis) 時，須考量鄰近氣象站與特定場址位置二者的環境條件相似性。由於臺灣地形變化甚大，擇取鄰近氣象站時應盡量以與特定場址相似性高者為原則。惟須確認特定場址之短期觀測資料與長期觀測歷史資料間，須能維持合理的相關性及觀測期間儀器與資料的合格性。

以海洋氣象觀測塔建構特定場址之風速剖面時，風環境觀測紀錄應涵蓋至少四個高程位置處之資料，確保風速剖面之完整性。

然而須特別注意的是，根據光達都卜勒原理所取得之觀測資料多以數秒移動平均且數公尺以上之空間平均的方式呈現，因此以光達觀測之資料通常無法達到如表 2.2.1-1 所列之觀測風速頻率要求。採用浮式雷射光達遠距遙測風速風向裝置進行海洋風場的風速風向資料量測前，建議先與近海沿岸之觀測塔進行風速風向資料的驗證，供為評估特定場址處離岸風力機設計所需之風環境條件設計參數。

### 2.2.3 海洋環境條件調查

應包含但不限於波浪、海流及水位，以符合設計階段所需之設計參數。

#### 【解說】

海洋環境資料可由特定場址或其鄰近區域之觀測紀錄，依月別、季別及全年資料加以整理求得。有關海洋環境條件調查資料統計之相關建議，參照第 4.1 節。

#### 1. 海象觀測調查：

蒐集各年、季之相關海洋環境資料，包括：水位 (天文潮、氣象潮、暴潮位)、波浪 (大小、方向、季節性、颱風波浪) 及流場 (流向與流速，包括潮流、風趨流、沿岸流、洋流) 等。海洋環境之腐蝕調查，參照第 2.4.1 節。

2. 波浪觀測調查：

- (1) 蒐集波浪資料，通常包括波高、週期與波向等。
- (2) 波浪調查原則應在西南季風與東北季風盛行期間進行，建議現地觀測及附近波浪測站資料宜有 1 年以上且應與風同步觀測。若遇颱風侵襲，應持續觀測完成。

3. 水位觀測調查：

- (1) 水位觀測之目的在於掌握現有地形下水位與暴潮之變動特性，分析天文潮位與設計水位。
- (2) 應於特定場址或鄰近區域設置水位觀測站，觀測一年以上之水位觀測資料。如鄰近區域已有其他單位（如中央氣象局、內政部、水利署、港務公司等）設置之水位觀測站，經高程連測比對無誤後方能採用。

4. 流場觀測調查：

- (1) 調查特定場址地形之海水流動方向、速度及空間分布。
- (2) 建議現地定點流場觀測及附近流場測站之觀測資料宜有 1 年以上，並視需要選擇 1 至數個具代表性的觀測點，以掌握流場分布狀況。

海洋環境條件調查需求，除主管機關另有規定外，調查量測項目及規格得依表 2.2.1-1 辦理；調查量測項目及規格彙整如表 2.2.3-1，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性與設計需求訂定之。

表 2.2.3-1 海洋環境條件調查之觀測項目及要求

觀測項目	設計參數	觀測位置	觀測儀器及要求
水位	最高天文潮 (HAT)	海水面	觀測儀器：浮筒式、水壓式、超音波式等型式之水位感應計。  觀測要求：連續觀測一年以上之潮位觀測資料；資料取樣間隔應不大於 6 分鐘 1 筆。
	平均海水位 (MSL)	海水面	
	最低天文潮 (LAT)	海水面	
	正常水位範圍 (NWLR)	海水面	
波浪	波高 (Wave Height)	海水面	觀測儀器： 1. 電阻式或電容式、波高觀測樁、水面上或海底超音波波高計。 2. 水壓式波高計、雙軸式流速儀、測波浮球 (Wave Rider)、資料浮標 (Data Buoy) 等。  觀測要求： 1. 至少需 100 個波之資料長度，平時每隔約 1hr 定時觀測記錄。 2. 觀測精度至少應在 1cm 以內。
	週期 (Wave Period)		
	波向 (Wave Direction)		

觀測項目	設計參數	觀測位置	觀測儀器及要求
海流	平均流速 (Current Speed)	海面下	觀測儀器： 1. 機械式、電磁式 (EMF)、都卜勒式超音波海流儀、電子流速計進行。 2. 漂流浮標配合衛星定位儀進行觀測，浮標追蹤亦可採用測量儀器進行。 3. 船碇式海流儀 (如 ADCP)。 4. 雷達與 CCD 影像進行平面表面流場觀測。  觀測要求： 1. 流速及流向每公尺深度擷取一層剖面，擷取深度須超過水深 2/3 以下。 2. 海流觀測點設置之層數： 深度 < 10m：至少中層一層； 10m < 深度 < 30m：至少上下兩層； 深度 > 30m：至少上中下三層。 3. 海水觀測點設置之層數： 至少最低低潮位下 1m 處一點； 10m < 深度 < 30m：增設底層一點； 深度 > 30m：增設中、底兩點。 4. 測定精度應在 0.01m/s 以內。
	流向 (Current Direction)		
	流速剖面 (Current Profile)		

## 2.3 水深地形與大地工程調查

### 2.3.1 一般規定

調查目的在於取得並建立離岸風力發電廠全生命週期之水深、地形、地質與大地工程所需之工程技術相關資料，以涵蓋可能之水深、地形與地層等之變異性及大地工程所需之設計參數。

#### 【解說】

水深地形與大地工程調查分為水深地形調查 (Bathymetric Survey)、地球物理探勘 (Geophysical Prospecting) 與大地工程調查 (Geotechnical Engineering Surveys) 共三個部分。

地球物理探勘與大地工程調查成果至少應能提供大地工程設計所需之地形、地層與地工參數資料。調查範圍與深度應涵蓋離岸風力機基礎、海上變電站基礎及海纜路由等之區域地質與地層情況與鄰近可能造成特定場址大地工程災害潛勢之區域。

調查成果須足以建立各別基礎及設施之地層工程性質涵蓋可能之地層變異性，並提供地震危害度分析、土壤液化潛勢分析、海床地形變動、沙波，以及海床整體淘刷、結構基礎附近局部淘刷、電纜路徑海床淘刷分析等所需之相關資料。



### 2.3.2 水深地形調查

應包含設計階段所需之水深及地形資料，並註明座標系統、高程系統與量測精度，如地形具變化潛勢者（如沙波、漂沙或侵淤者），應另行編訂監測計畫。

#### 【解說】

調查目的應能獲取特定場址水深地形之變動特性。測量基準及參考系統如下：

1. 控制測量、測深系統檢查、水深地形測量及數值地形模型等成果之大地基準為 1997 坐標系統 (TWD97TM2)；臺灣本島地區之高程基準為 2001 高程系統 (TWVD2001)。離島地區高程基準以內政部公告最新離島高程測量成果為依據。
2. 數值成果檔之大地基準為 WGS84；高程基準為 2001 高程系統 (TWVD2001)或離島高程，深度以最低天文潮位面(LAT)為基準。

水深地形調查之項目、內容與等級 (如表 2.3.2-1) 應符合內政部「水深測量作業規範」之規定，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性與設計需求訂定之。

如水深調查結果顯示場址海床地形具動態變化潛勢特徵 (如沙波或淘刷等漂沙特性者) 者，應另行編訂調查計畫 (至少包含颱風季前、中、後之精密水深地形測量、漂沙調查或數值模擬等方式)，以掌握場址海床之動態變化趨勢，據以評估其影響並納入設計考量。

表 2.3.2-1 水深測量等級

等級	專等	特等	1 等		2 等
			1a	1b	
平面不確定度 (95%信心區間)	1m	2m	5m+5%×水深	5m+5%×水深	20m+10%×水深
深度不確定度 <sup>註1</sup> (95%信心區間)	a = 0.15m b = 0.0075	a = 0.25m b = 0.0075	a = 0.5m b = 0.013	a = 0.5m b = 0.013	a = 1.0m b = 0.023
水下特徵物偵測	特徵物 大於 0.5m	特徵物 大於 1m	水深 40m 內， 特徵物大於 2m；水深超過 40m，特徵物 大於 10% 水深 <sup>註5</sup>	未標明	未標明
水下特徵物搜尋	200%	100%	100%	非必要	非必要
測深覆蓋率	200%	100%	≤100% <sup>註6</sup>	5%	5%
固定助導航設施、重要 地形特徵物 (水平)	1m	2m	2m	2m	5m
固定助導航設施、重要 地形特徵物 (垂直)	0.25m	0.5m	1m	2m	2m

等級	專等	特等	1 等		2 等
			1a	1b	
浮動的助導航設施 (水平)	5m	10m	10m	10m	20m
海岸線 (水平)	5m	10m	10m	10m	20m
次要地形特徵物 (水平)	5m	10m	20m	20m	20m
次要地形特徵物 (垂直)	0.3m	0.5m	1m	2m	3m
適用水域描述	船底淨空需求更嚴格的水域 <sup>註4</sup>	船底淨空需求很重要的水域 <sup>註3</sup>	水深 100m 以內船底淨空需求較低，但可能存在影響航安的特徵物水域 <sup>註2</sup>	水面船舶可能通過，但沒有船底淨空需求之水深 100m 以內的水域	水深超過 100m 的水域
<p>註 1：以 <math>[a^2+(b*d)^2]^{1/2}</math> 公式計算，其中 <math>a</math>：固定水深誤差；<math>b</math>：從屬水深誤差因子；<math>d</math>：水深 (m)。</p> <p>註 2：例如沿岸水域、港口、航道。</p> <p>註 3：例如泊區、港區，以及主航道和航道(Shipping Channels)中的極重要區域。</p> <p>註 4：前述特等適用水域中的淺水區，船底淨空極關鍵且海床底質對船舶有潛在危險。</p> <p>註 5：水深超過 40 公尺以上，要偵測的特徵物尺寸隨著深度增加而增加。</p> <p>註 6：但必須取得所有顯著特徵物的最淺深度。</p>					

### 2.3.3 地球物理探勘

探勘資料須能建立離岸風力發電廠特定場址地質構造、分層及其水平分布情況等資料，以提供離岸風力機與變電站之基礎設計。

#### 【解說】

海底下淺層震測之測線間距應足以測繪出對離岸風力機結構設計有顯著影響之地層。

海床地質探測與地貌調查可分別採縱橫雙向測線或連續迴路測線以涵蓋整體風場區域；上岸海纜路由廊帶，則多數採平行複數測線，其測線含括的總寬度應考量海纜施工或維護作業可能之變動範圍。

海纜路由廊帶等重要區域應至少以底質剖面與海床底質沉積物（亦稱為土壤）岩心採樣分析以瞭解海床淺層沉積層之沉積物組成及分類，必要時得採用海床影像探測調查加以記錄比對。對於其他區域，若使用多音束 (MBES) 測深或任何間接推論方法進行海床底質調查時，仍應配合海床底質沉積物岩心採樣驗證之。

#### 1. 側掃聲納探測

側掃聲納探測應符合國際水文組織 (IHO) 水文測量標準，初步調查階段須對計畫開發區進行全覆式海床探測，並採用 100 kHz 或更高聲納頻率，沿著測線之側掃範圍可依水深調整斜距（二側各 50 至 200 m），海床特徵物偵側應符合 IHO 1a 等級以上標準。

側掃聲納施測時，平面定位應符合 IHO 1a 等級以上標準，大地座標基準應採 1997 臺灣大地基準 (TWD97TM2) 或 World Geodetic System 84 (WGS84) 座標基準。

## 2. 底質剖面探測

探測測線須配合側掃聲納規劃測線同時執行，在泥質沉積層穿透深度至少為 20 公尺。平面定位應符合 IHO 1a 等級以上標準，提供目標物調查影像及解釋。

## 3. 磁力探測

磁力探測應配合側掃聲納規劃之測線，平面定位應符合 IHO 1a 等級以上標準，磁力儀之準確度應小於 2nT (gamma)，並須經國際地磁參考場 (IGRF) 及日變化等修正。

## 4. 震波測勘

震波測勘應調查可能之地質危害如斷層、凹坑及流體移棲，其測勘結果應能顯示海床地層之沉積物層次，並與地質鑽探資料比對。

## 5. 沉積物岩心採集

採集沉積物岩心以進行沉積物統體密度 (Bulk Density)、粒徑分析、組成及沉積物分類等分析，並與底質剖面、側掃聲納及海床影像觀測探測結果進行比對分析。

## 6. 海床影像探測

海床影像探測應採用可即時傳輸影像之設備包含但不限於遙控無人載具 (ROV) 或拖曳式的海床影像觀測等，以清楚記錄海床影像為原則。

海域之地球物理探勘需求，除主管機關另有規定外可依照下列要求辦理，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性及設計需求訂定之。

表 2.3.3-1 地球物理探勘需求建議

調查項目	探測方法	調查目的/調查要求
深部地層調查	多頻道反射震測 (MCS)	探查離岸風場之海床深部地層結構，用於判斷斷層、流體煙囪、不整合面或其他地質構造特徵。
淺部地層 高解析調查	高解析淺層震測 (如電火花 (Sparker))	探查離岸風場之海床淺部地層結構，用於地質構造分析及地質安全評估。
	底質剖面 (SBP)	1. 探查海纜路由之海床沉積層地層特徵分析。 2. 在泥質沉積層須能解析海床下深度20m內沉積層。
海床地貌調查	側掃聲納探測 (SSS)	1. 探查海床地貌特徵、表層沉積物特性、海底管線鋪設及海底崩移調查。 2. 須能達到解析度至少IHO 1a等級以上。
	磁力探測 (MAG)	1. 探查海床上管線、可能沈船或未爆彈 (Unexploded Ordnance) 分布。 2. 須能達到解析度約50cm內。

調查項目	探測方法	調查目的/調查要求
海床底質調查	單/多音束探測 (SBES/MBES)	1. 利用聲納反射資料，進行地質特性分類、海床線形、沙波地形特徵分析。 2. 須能達到解析度至少IHO 1a等級以上。
	海床影像探測 (Seafloor Imaging)	即時動態影像觀測，了解海床表層特徵，確認側掃聲納所觀測到的海床地貌特徵。
	表層底泥採樣或岩心採樣 (Core Sampling)	採集沉積物岩心，了解沉積物特性。

### 2.3.4 大地工程調查與試驗

應能提供設計所需之地層分布與土壤性質資料，並應於製造及施工前完成。

#### 【解說】

大地工程（以下簡稱地工）地質鑽探前應先依離岸風力機及變電站之設計需求，初步規劃建置地點及基礎型式，擬定地質鑽探及土壤（岩石）試驗計畫，並依其試驗結果，評估特定場址地層之物理及力學性質。

大地工程調查應取得離岸風力機支撐結構預定位置基礎設計所需深度範圍內之地層參數資料（包含地層之物理、靜態及動態力學等特性），以作為基礎設計與分析之依據。

#### 1. 調查方法

大地工程調查項目包括：地質條件與構造調查、地質鑽探與取樣、現地試驗與室內試驗等；調查方法與程度之決定，應考量計畫執行之階段性、離岸風力機之數量/位置/尺寸/基礎型式、地層種類、地層與地形之複雜性。調查成果須足以建立各別風力機基礎地層之工程性質，資料包含但不限於土壤與岩石之分類及描述資料、執行分析所需要之剪力強度、變形參數、現地應力狀態等，並涵蓋可能之地層變異性。相關內容可參考 ISO 19901-8 與 DNV Classification Notes No. 30.4 等之規定。

現地試驗通常採用圓錐貫入試驗 (CPT) 及靜壓薄管取樣或輔以標準貫入試驗 (SPT)，藉以推估地層土壤參數，並獲得現地原狀土樣 (Intact Samples)，決定地層土壤之物理、靜態及動態力學等性質。

現地試驗項目包含但不限於如表 2.3.4-1 所示內容。

#### 2. 調查深度與數量

大地工程調查深度應能涵蓋影響基礎結構之地層範圍，每個獨立離岸風力機之基礎位置，至少應配置一孔足夠深度之探查孔，並應進行相關現地試驗，取得室內試驗所需之土樣。海

上變電站之基礎位置與海纜路由之大地工程調查深度、探查孔數量及現地試驗需求，得依特定場址之環境特性與設計需求訂定之。

樁基礎最小調查深度為基樁貫入深度加上應力影響範圍，基樁設計由側向承載力控制者，調查深度至少應達樁底以下 1 倍樁徑深度，由軸向承載力控制者，調查深度至少應達樁底以下 3 倍樁徑深度。

### 3. 取樣方法與室內試驗

應採用靜壓式薄管取樣，取得足夠數量之原狀土樣，以提供室內土壤力學試驗使用。

室內試驗計畫應包含不同類型之靜力、動力試驗及足夠試驗組數，決定各地層強度與變形等性質以提供基礎細部設計使用。

地工探查以圓錐貫入試驗 (CPT) 為原則，惟須於適當深度規劃靜壓式薄管取樣，以獲得試驗所需之現地原狀土樣，提供岩心判讀及相關土壤/岩石試驗之用。另於水深較淺區域 (約 <20m)，可考量部分鑽孔採用自升式平台進行鑽探，並於每隔 1.5m 處之土層進行標準貫入試驗 (SPT)，以提供土壤參數率定及液化潛勢評估參考。

現地取得之土樣須精確標記，紀錄目視檢查之結果及拍照，妥善封存後，送至具公信力之實驗室進行室內試驗，有關土壤與岩石取樣品質、樣品之處理與運送、土壤與岩石識別可參照 ISO 22475-1 之規定。

以探勘船進行海上鑽探時，可於探勘船上進行簡易土壤試驗，如：無圍壓縮試驗、迷你十字葉片剪等。地質鑽探取得之擾動土樣應進行土壤基本物理性質試驗及土壤化學試驗，鑽探所取得之原狀土樣除進行土壤物理性質試驗及剪力強度試驗外，並須進行土壤動態性質試驗如共振柱試驗、反覆單剪試驗及動力三軸試驗，以獲得土壤之動態剪力模數及阻尼比對應於剪應變之關係曲線，以及土壤抗液化強度參數。含水量、單位重等試驗，若在採用探勘船進行鑽探之情況下，建議於船上完成；否則，應儘快送回陸上進行室內試驗。

室內試驗項目包含但不限於如表 2.3.4-2 所示內容。

室內試驗之單軸壓縮試驗可用來決定岩石強度；環剪試驗可用來決定低腐植質泥炭土之剪力強度參數。直接剪力與三軸壓縮試驗不適用於纖維泥炭土。

規劃土壤現地取樣及動態試驗時，應以取得薄管原狀土樣為主，求得反應土壤受到反覆載重外力特性、反覆載重循環次數等因素之試驗參數，以提供基礎分析模擬或設計之用。

為符合特定場址地震力評估之需求，須獲得土壤動態性質以供地盤反應分析之用。除卵礫石與岩層外，各分區地質模型應取得現地原狀或重模代表性土樣進行共振柱試驗、動態三軸試驗或反覆單剪試驗，以求取土壤動態性質曲線，包含剪力模數與阻尼比隨剪應變之變化關係曲線；針對特定場址地盤反應分析用之簡化土壤剖面，應至少獲得一組具代表性之土壤動態性質曲線。

海域之地工現地試驗及室內試驗需求，除主管機關另有規定外，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性及設計需求訂定之。大地工程調查所辦理之相關試驗 (含基樁載重試驗) 應提送詳細試驗報告，另圓錐貫入試驗 (CPTU) 並應提送現地試驗電子檔案。



表 2.3.4-1 現地試驗需求建議

現地試驗 (In-Situ Test)			
調查項目	試驗項目	調查目的/調查要求	標準/規範
土壤貫入試驗	標準貫入試驗 (SPT)	(1) 適用於堅硬地盤或近岸海床現地試驗。 (2) 求取標準貫入SPT-N值，透過現地劈管取樣試體求得土壤物理性參數。	ASTM D1586
	圓錐貫入試驗 (CPT)	(1) CPT適用於沉積層或高度風化的海床地層，可概分為適合近岸調查的平台式圓錐貫入試驗 (Normal CPT System)、海纜路由調查的海床式圓錐貫入試驗 (Seabed CPT) 及通用型的下孔式圓錐貫入試驗 (Down-hole CPT)。 (2) 須透過CPTU貫入值推估地層參數或進行土壤分類，電子錐須能測定貫入時錐尖阻抗 (Tip Resistance) $q_c$ 、袖套摩擦力 (Sleeve Friction) $f_s$ 與孔隙水壓 (Pore Water Pressure) $u$ 。	CNS A3298 ASTM D3441 ASTM D5778
地層動態特性試驗	下孔式震測試驗 (Downhole Seismic Test)	土層動態彈性模數。 地層剪力波速 $V_s$ 、壓力波速 $V_p$ 、波松比。	ASTM D7400 ASTM D5778
	圓錐貫入震測試驗 (SCPT)		
	懸盪式震測試驗 (PS Suspension Logging)		
土壤力學試驗	十字葉片剪力試驗 (Vane Shear Test)	黏土層不排水剪力強度。 黏土層不排水殘餘剪力強度。	ASTM D2573
	孔內側向載重試驗 (LLT)	現地應力、降伏與極限壓力、變形模數、彈性模數、靜止土壓力係數及地盤反力係數。	ASTM D4719
其他試驗	土壤熱阻抗 (熱傳導) 試驗	海纜路由調查時，可透過熱阻抗試驗儀檢測海纜埋設深度處土壤之熱阻抗/熱傳導特性，以作為布設與規劃參考。	-
	土壤電阻率試驗	海纜路由調查時，可透過電阻率試驗儀檢測海纜埋設深度處土壤之電阻特性，以作為布設與規劃參考。	-

表 2.3.4-2 室內試驗需求建議

室內試驗 (Laboratory Test)			
調查項目	試驗項目	調查目的/調查要求	擾動土樣 (D) 原狀土樣 (U) 標準/規範
土壤物性試驗	單位重試驗 (Unit Weight Test)	統體單位重 (Bulk Unit Weight) $\gamma$ 。 浸水單位重 (Buoyant Unit Weight) $\gamma_b$ 或 $\gamma'$ 。 濕土單位重 (Moist Unit Weight) $\gamma_m$ 。 乾單位重 (Dry Unit Weight) $\gamma_d$ 。	D
	比重試驗 (Specific Gravity Test)	顆粒密度 $\rho_s$ 。	D CNS 5090 ASTM D854
	相對密度試驗 (Relative Density Test)	相對密度 $D_r$ 。	D ASTM D4253 ASTM D4254
	含水量試驗 (Moisture Content Test)	土壤自然含水量 $\omega$ 。	D CNS5091 ASTM D2216
	阿太堡試驗 (Atterberg's Limit Test)	液性限度 $LL$ 、塑性限度 $PL$ 。	D CNS 5087 CNS 5088 ASTM D4318
		縮性限度 $SL$ 。	U CNS 5263 ASTM D4943
	篩分析試驗 (Sieve Analysis)	粗粒料土壤粒徑分析。	D CNS 11776 ASTM D422 ASTM D6913
比重計沉降分析試驗 (Hydrometer Analysis)	細粒料土壤粒徑分析。	D CNS 11776 ASTM D422 ASTM D7928	
土壤力學試驗	十字葉片剪力 (口袋式) 試驗	求取不排水剪力強度。	U
	三軸不壓密不排水壓縮 (UU) 試驗	求取黏性土壤不排水剪力強度。	U ASTM D2850
	等向三軸壓密不排水壓縮 (CIU) 試驗	求取黏性土壤不排水剪力強度。	U ASTM D4767
	非等向三軸壓密不排水壓縮 (CAU) 試驗	求取黏性土壤不排水剪力強度。	U
	等向三軸壓密排水壓縮 (CID) 試驗	求取砂性土壤排水剪力強度。	U ASTM D7181
	無圍壓縮試驗 (Unconfined Compression Test)	求取凝聚性土壤或岩石剪力強度。	U CNS 12384 ASTM D2166

室內試驗 (Laboratory Test)			
調查項目	試驗項目	調查目的/調查要求	擾動土樣 (D) 原狀土樣 (U) 標準/規範
土壤力學試驗 (續)	環剪試驗 (Torsional Ring Shear Test)	求取細顆粒土壤殘餘剪力強度。	D ASTM D6467
	直接剪力試驗 (Direct Shear Test)	求取非凝聚性土壤剪力強度。	D CNS 11778 ASTM D3080
	壓密不排水直接單剪試驗 (Consolidated-Undrained Direct Simple Shear Test)	求取凝聚性土壤剪力強度及應力應變關係曲線。	D ASTM D6528
	單向度壓密試驗	求取壓密係數 $C_v$ 、體積壓縮係數 $m_v$ 、壓縮性指數 $C_c$ 、再壓縮性指數 $C_r$ 以及滲透係數 $K$ 等參數。	U CNS 12239 ASTM D2435
	三軸透水試驗	求取三軸應力與排水條件下之土壤滲透係數。	U
土壤動態力學試驗	反覆三軸強度試驗 (Cyclic Triaxial Test, for determination of the cyclic strength of soils)	求取土壤之動態強度 (或抗液化強度)。	U ASTM D5311
	三軸動態性質試驗 (Cyclic Triaxial Test, for the determination of the modulus and damping properties of soils)	求取土壤動態剪力模數及阻尼比。	U ASTM D3999
	反覆單剪試驗 (Cyclic Simple Shear Test)	(1) 模擬土壤試體在地震反覆反覆載重作用下，土壤動態性質行為及液化行為。 (2) 動態不排水剪力強度。	U ASTM D8296
	彎曲元件試驗 (Bender Element Test)	求取土壤低應變下的剪力波速與剪力模數。	U ASTM D8295
	共振柱試驗 (Resonant Column Test)	進行扭轉試體共振以求取其共振頻率及扭轉自由振動衰減曲線，測得土壤剪力波速、剪力模數及阻尼比。	U ASTM D4015 ASTM D8295
其他試驗	X光繞射檢測 (X-ray Diffractometer)	(地層岩心組成分析) 黏土礦物試片。 XRD繞射圖譜分析，得各黏土礦物半定量結果與地層和埋藏深度之關係。	ASTM D 5758



## 2.4 其他環境條件調查

### 2.4.1 腐蝕環境調查

調查內容應包含但不限於海水溫度、海水中溶氧量、導電度（電阻率）、鹽度、酸鹼度、氯鹽、硫酸鹽、海流、潮汐、海洋附生物及淺層土壤細菌等影響結構腐蝕之因素，俾利評估選材、防蝕方法、腐蝕餘裕等腐蝕防護系統之訂定。

#### 【解說】

海洋環境中的腐蝕現象呈現多樣性，在不同的溫度、濕度、海水鹽度、溶氧量、流速、潮汐、浪擊、海洋附生物及細菌（如硫酸鹽還原菌）等因素影響下，腐蝕程度及種類亦有極大的差異。臺灣位處熱帶及亞熱帶氣候環境，平均溫度及濕度均高，離岸結構承受嚴峻之海洋腐蝕條件而須進行詳細調查。

1. 溶氧量：海水中之溶氧量越高，金屬表面發生氧化反應機率越高，越容易產生腐蝕反應。
2. 鹽度：全球海洋海水的平均鹽度約為 34.7‰，臺灣海峽表層鹽度較低（約 33.5‰）、底層 50m 處較高約 34.4‰。除海淡交接位置外，海水氯鹽濃度大致維持在 30 至 35‰ 區間，碳鋼的腐蝕速率會隨著氯鹽濃度的增加而增加；但當海水氯鹽濃度增加超過 35‰ 以時，碳鋼的腐蝕速率反呈下降的趨勢，主要是因海水中溶氧量會隨著氯鹽濃度增加而降低，腐蝕速率降低。
3. 海水溫度：一般而言，海水溫度越高時，將加速腐蝕現象產生。
4. 海流：海流流速越高時，水中溶氧量越高，金屬腐蝕的速率增加，同時伴隨海水流動造成的渦流，進而產生與海流同向之渦穴和沖蝕等現象。
5. 潮汐及飛沫：位於飛濺區之離岸風力機支撐結構，容易遭受波浪拍打並貼附大量水分與鹽分，鋼結構於外力作用、水分、含氧量充足、溶解鹽及乾濕循環等綜合因素影響下，將發生嚴重的腐蝕現象。
6. 海洋附生物及細菌：海洋附生物及細菌之吸附容易造成支撐結構表面諸如塗層 (Coating) 或內襯 (Linings) 等塗裝系統失效，而其代謝產物通常含有不同成分之酸性物質，亦將造成鋼結構的腐蝕加劇。有關海洋附生物附著之調查，參照第 2.4.3 節。此外，在海域中，如有硫化氫 (H<sub>2</sub>S) 或硫酸鹽還原菌存在時，會加速金屬的腐蝕反應，因此應進行此項調查。
7. 導電度 (或電導率 Conductivity)：導電度和溶液中離子的有無、離子濃度、活性、價數及離子間相對濃度有關，和溶液的溫度也有關係。導電度之單位以 mmho/cm 或 Siemens/cm 表示。海水之導電度是決定金屬腐蝕速率的一個重要因素；此外，在有伽凡尼耦合作用 (Galvanic Coupling) 及金屬有間隙存在的地方，亦會產生腐蝕。從腐蝕工程之觀點來看，海水與其他水溶液相比較時，最主要的特徵是海水具有很高的比導電度 (25°C 時的導電度)，約比一般水溶液高 250 倍以上。海水之高比導電度是造成金屬發生腐蝕的原因，尤其是金屬表面之陽極面積小而陰極面積大時，陽極區域的腐蝕更是嚴重，最終會形成局部腐蝕。導電度之倒數稱之為電阻率 (Resistivity 或比電阻 Specific resistance)，為陰極保護設計時犧牲陽極放電 (消耗) 大小之主要影響因子。
8. 非自然因素影響：離岸風力機支撐結構受海面漂流物衝擊時，容易發生塗裝系統或陰極

保護系統等防蝕保護力損失或降低，造成腐蝕現象提早發生。此外，非預期之大氣或海水汙染，亦可能引致其他腐蝕的發生。

腐蝕環境條件調查之量測項目及精度規格可參照表 2.4.1-1，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性及設計需求訂定之。

表 2.4.1-1 腐蝕環境條件調查之量測項目及精度規格

量測項目	物理量	量測位置	量測頻率	量測範圍	解析度
溶氧量 <sup>註1</sup>	海水中溶解氧濃度	至少涵蓋最低低潮位下1.0m處一點；深度大於10m至30m，增設底層一點；深度大於30m，增中、底二點。	至少每小時量測記錄一次	0至30mg/L	±0.2mg/L
鹽度	鹽度	至少涵蓋最低低潮位下1.0m處一點；深度大於10m至30m，增設底層一點；深度大於30m，增設中、底二點。	至少每小時量測記錄一次	至少0至40psu	最大0.01psu
海水溫度	溫度			至少0至40°C	最大0.01°C
酸鹼度	PH值	-	每季一次	0至14	0.01PH單位
氯鹽 硫酸鹽	重量百分比 濃度 (µg/L)	-	每季一次	-	-
導電度 <sup>註3</sup> (或電阻率)	mmho/cm (ohm.cm)	同溶氧量量測位置。	每季一次	-	-
非自然 因素 <sup>註2</sup>	大氣 或海水汙染	-	-	-	-

註1：溶氧量可採用多參數水質監測紀錄儀進行檢驗，或參考行政院環境保護署環境檢驗所公布之水中溶氧檢測方法—電極法 (NIEA W455.52C)、碘定量法 (NIEA W422.53B)、CNS 15091-6深層海水檢驗法-溶氧量之測定、ASTM D888-05。

註2：波浪、海流、潮汐之調查參照第2.2.3節；海洋附生物之調查，參照第2.4.3節。

註3：海水電阻率的調查可取特定深度的海水樣品，依CNS 14811以土壤盒盛裝，再以維納四極法測定。若場址調查階段發現具有大氣或海水汙染等現象，得視需求辦理汙染物相關調查。

## 2.4.2 雷擊調查

調查內容應包含但不限於特定場址所在區域之年平均閃電密度及雷擊閃電次數，俾利進行避雷及接地系統等保護措施之設計。

### 【解說】

雷擊閃電對於結構物所造成之風險，主要依據結構物高度、場址地形及場址雷擊活動之等級而定，評估雷擊閃電落在離岸風力機之次數時，須調查或收集場址年平均閃電密度  $N_g$  (Ground Flash Density)。若無法取得場址年平均閃電密度時，得根據 CNS 15176-24、IEC 62305-2 或 IEC 61024-1-1 之建議，透過下列公式進行預測：

1. 由等雷電強度分布圖取得之每年落雷日數  $T_d(\text{year}^{-1})$  估算平均閃電密度  $N_g(\text{km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1})$  :

$$N_g \approx 0.1 \times T_d \quad (2.4.2-1)$$

2. 由離岸風力機之雷擊閃電匯集區估算年平均次數  $N_D(\text{year}^{-1})$  :

$$N_D = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (2.4.2-2)$$

上式中， $A_d(\text{m}^2)$  為雷擊閃電匯集區， $C_d$  為環境因數。依據 CNS 15176-24 之規定，平地上之陸域風力機  $C_d=1$ 、山區地形  $C_d=2$ 。離岸風力機應指定  $C_d$  為 3 至 5 之區間，俾利評估實際之落雷次數。此外，離岸風力機之雷擊閃電匯集區  $A_d$ ，係指以風力機所在位置為圓心，3 倍之海平面至轉子機艙總成最高點 (H) 為半徑，框列出之圓形面積區域，參照圖 2.4.2-1。

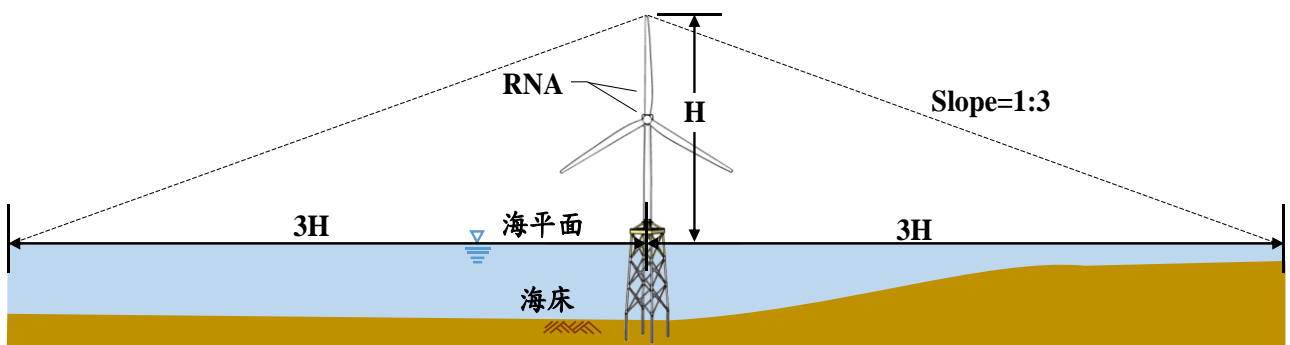


圖 2.4.2-1 離岸風力機之雷擊閃電匯集區 (CNS 15176-24)

3. 由其他方式估算雷擊閃電年平均次數：

可參考 CNS 15176-24 或 IEC 62305-2 之建議，另由離岸風力機附近 250m 範圍內之匯集區的雷擊閃電年平均次數  $N_M(\text{year}^{-1})$  進行估算，或考量電力及通訊電纜連接範圍之雷擊閃電年平均次數  $N_L(\text{year}^{-1})$  或  $N_I(\text{year}^{-1})$  進行評估，惟須說明評估依據、計算方法和結果。

### 2.4.3 海洋附生物調查

調查內容應包含但不限於海洋附生物附著密度、附著厚度及其分布與水下溫度和深度之關聯性等。

#### 【解說】

海洋附生物及其與海平面以下深度之相關性，應以場址附近之歷史量測數據、當地經驗、學術研究或適當的參考依據加以評估。必要時須進行場址特定研究，以瞭解海洋附生物之特性、可能厚度及深度的關聯性。

海洋附生物調查內容可參照表 2.4.3-1，惟開發商可針對特定場址之環境特性與設計需求調整之。實際調查項目仍須依特定場址之環境特性及設計需求訂定之。

表 2.4.3-1 海洋附生物調查內容

量測項目	量測方法	參考規定	量測頻率
海洋附生物	海洋浮游動物檢測方法	NIEA E701.20C	場址調查階段 至少一季記錄一次
	軟底質海域底棲生物採樣通則	NIEA E103.20C	
	硬底質海域表棲生物採樣通則	NIEA E104.20C	
	水中浮游植物採樣方法－採水法	NIEA E505.50C	

## 2.5 特定場址環境條件資料提送

### 2.5.1 一般規定

開發商應將調查成果提交至目的事業主管機關。

#### 【解說】

特定場址環境資料提送內容應包含第 2.2 節風環境條件與海洋環境條件調查資料、第 2.3 節水深地形與大地工程調查及第 2.4 節其他環境條件調查所述內容，資料之類型及規格應依目的事業主管機關規定辦理，並於申請施工許可時提交。

### 2.5.2 風環境條件與海洋環境條件調查資料提送

提送資料應包含但不限於風況、波浪、海水水位、海流及潮汐等調查成果。

#### 【解說】

所需提送之資料至少如表 2.5.2-1 所列內容，除應包含各項所需之物理量外，亦應提供相關之測量座標點位置、量測時間及水深條件等。

表 2.5.2-1 風環境條件與海洋環境條件調查提送資料項目

量測項目	物理量	其他項目	提送單位
風速	風速	測點座標值 (N,E)、量測時間	目的事業 主管機關
風向	風向	測點座標值 (N,E)、量測時間	
氣壓	氣壓	測點座標值 (N,E)、量測時間	
氣溫	溫度	測點座標值 (N,E)、量測時間	
空氣濕度	濕度	測點座標值 (N,E)、量測時間	
降水	降雨量	測點座標值 (N,E)、量測時間	
淨輻射量	淨輻射量	測點座標值 (N,E)、量測時間	
水位	海面水位	測點座標值 (N,E)、量測時間	
波浪	波高、週期、波向	測點座標值 (N,E)、量測時間、水深	
海流	流速、流向	測點座標值 (N,E)、量測時間、水深	
海水溫度、鹽度、密度	溫度、鹽度、密度	測點座標值 (N,E)、量測時間	

### 2.5.3 水深地形及大地工程調查與試驗資料提送

提送資料應包含但不限於水深、地形、地質及大地工程等調查與試驗成果。

#### 【解說】

大地工程調查成果所須提交之內容至少應包含但不限於探查基本資料、過程記錄、鑽孔柱狀圖、地球物理探勘、現場探測與試驗及相關試驗成果等各項資料，概述如下：

1. 基本資料

包含探查孔位置及探查孔深度等基本資料。

2. 過程記錄

過程應做成紀錄，包含文字及圖片等紀錄。

3. 探查孔成果

應包含柱狀圖、CPT 資料、SPT 資料、波速調查及對應之文字描述。

4. 試驗資料

應依各探查孔實際進行之試驗項目提送。

### 2.5.4 其他環境條件調查資料提送

提送資料應包含但不限於腐蝕環境、雷擊及海洋附生物等調查成果。

#### 【解說】

提送內容至少應涵蓋第 2.4.1 節腐蝕環境調查、第 2.4.2 節雷擊調查及第 2.4.3 節海洋附生物調查之調查成果。

### 第三章 離岸風力發電廠性能及安全要求

#### 3.1 通則

離岸風力發電廠於其全生命週期內應符合預期的性能及安全等目標所需之工程技術要求。

#### 【解說】

離岸風力發電廠性能及安全要求分類為 5 項，彙整如表 3.1-1 與第 3.2 節至第 3.6 節所述內容。相關規定主要是參考國際標準 (ISO 19902、IEC 61400-1、IEC 61400-3-1、IEC 61400-6 與 IEC 60228 等)、中華民國國家標準 (CNS 15176-1 與 CNS 15176-3 等)、API 標準 (API-RP 2A-LRFD)、NORSOK 標準 (NORSOK N-004)、Eurocode 標準 (EN 1993)、ABS 標準 (ABS BOWT 指引)、DNV 標準 (DNV-ST-0126、DNV-ST-0145、DNV-ST-0359、DNV-RP-0360 與 DNV-ST-0437 等)、Bureau Veritas 技術標準 (NI605 與 NI682) 以及國內相關標準。

表 3.1-1 離岸風力發電廠各主要組成之性能及安全要求

章節	項目	離岸風力發電廠		
		離岸風力機	變電站	海纜
第 3.2 節	離岸風力發電廠驗證與審查	○	○	○
第 3.3 節	離岸風力機性能及安全	○	-	-
第 3.4 節	變電站性能及安全	-	○	-
第 3.5 節	輸電系統性能及安全	-	○	○
第 3.6 節	其他要求	○	○	○

#### 3.2 離岸風力發電廠驗證與審查

##### 3.2.1 一般規定

離岸風力發電廠之設計成果須完成專案驗證及專案驗證審查。

#### 【解說】

專案驗證及專案驗證審查之目的，係以確認設計成果符合離岸風力發電廠預期之安全需求、使用性能與服務水準。

### 3.2.2 專案驗證

開發商應提供符合第1.7節規定之相關文件，依據離岸風力發電廠專案驗證審查作業要點，提送經驗證機構完成專案驗證。

#### 【解說】

本指引適用於固定式離岸風力機開發專案之專案驗證。

開發商應依據 CNS 15176-22、IECRE OD-502、DNV-SE-0073 或 DNV-SE-0190 等相關標準之規定，提供包含但不限於第 1.7 節經技師簽證文件接受驗證機構之評估，以確認符合本指引之技術要求。

執行專案驗證前，離岸風力機應先完成型式認證 (Type Certificate) 或取得臨時型式認證 (Provisional Type Certificate)，或於專案驗證中完成型式認證之強制模組 (the Mandatory Phases of the Type Certification)。若以臨時型式認證申請專案驗證，應遵照主管機關認可之專案驗證標準進行。

### 3.2.3 專案驗證審查

開發商應提供符合第1.7節規定之相關文件及第3.2.2節專案驗證之符合性聲明，依據電業登記規則，提送標準檢驗局及其認可之審查機構完成專案驗證審查。

#### 【解說】

開發商應依據「電業登記規則」、「離岸風力發電案場專案驗證審查示範輔導作業要點」與「電業竣工查驗作業要點」等相關規定，將設計各階段完成相關設計成果 (參照第 1.7 節)，經專業技師簽證及/或驗證機構審查後出具書面證明，提送審查機構辦理專案驗證審查。

## 3.3 離岸風力機性能及安全

### 3.3.1 設計原則

離岸風力機於全生命週期內須至少符合以下性能及安全要求：

1. 應綜合考量離岸風力機的特性、等級及自然環境等設計條件。
2. 於設計年限內，不得因風、波浪、海流、颱風、地震、海嘯、土壤液化、腐蝕、雷擊與海洋附生物等作用，而損及原設計要求之性能，並維持其發電功能。

#### 【解說】

1. 載重之考量與性能及安全要求

本節規定之設計載重及載重組合設計情境為使支撐結構具備最低限度的安全性及穩定



性。若配合特定場址的自然環境條件及地質條件等，須考量本指引所定內容以外的載重時，則應另行適當訂定額外設計載重。

支撐結構設計時須考量規定的設計載重及載重組合，亦須涵蓋離岸風力機的重力與慣性力載重及對自然環境的影響、經濟性與拆除容易性等，其相關考量事項如下：

### (1) 風、波浪及海流等環境條件載重的設計考量

設計載重組合須考量極限限度狀態 (ULS) 與疲勞限度狀態 (FLS) 等二種設計，其對應的設計情境與檢核目標、性能及安全要求如表3.3.1-1所示。檢核項目包含安全性及穩定性等二種，前者適用於檢核組件與構件的應力強度和疲勞損傷程度；後者適用於檢核基礎的承載力、滑動和傾斜等。

表 3.3.1-1 設計情境、性能及安全要求與檢核項目的組合

設計情境	載重組合	檢核目標	性能及安全要求	檢核項目
• 發電	DLC 1.1 至 1.6	轉子機艙 總成、塔 架	無損傷、符合其原有發電功能。	結構組件及構件的安全性 (1)應力強度 (ULS)。 (2)疲勞損傷程度 (FLS)。
• 發電及故障發生	DLC 2.1 至 2.5			
• 啟動	DLC 3.1 至 3.3			
• 正常停機	DLC 4.1 至 4.2	下部結構	無損傷、符合其原有發電功能。	結構的安全性 (1)構件應力強度 (ULS)。 (2)疲勞損傷程度 (FLS)。
• 緊急停機	DLC 5.1			
• 待機 (待機狀態或惰轉)	DLC 6.1 至 6.4	基礎	無損傷、符合其原有發電功能。	結構的穩定性 <sup>註1</sup> (1)承載力。 (2)滑動。 (3)傾斜。
• 待機與故障情況	DLC 7.1 至 7.2			
• 運輸、安裝、維護及修理	DLC 8.1 至 8.6			
• 支撐結構颱風	DLC 10.1 至 10.2			
註 1：穩定性檢核適用於下部結構與基礎。				
註 2：離岸風力機支撐結構，於其設計年限內累積的永久變形與傾角應符合使用限度狀態 (SLS) 之性能要求。				

### (2) 地震載重的設計考量

設計情境與其檢核目標、性能及安全要求如表3.3.1-2所示。檢核項目包含極限限度狀態 (ULS) 與使用限度狀態 (SLS) 等二種，前者須考量475年回歸期之地震載重；後者須考量95年回歸期之地震載重。地震載重依第4.8節之規定。



表 3.3.1-2 設計情境、性能及安全要求與檢核項目的組合 (地震)

設計情境	載重組合	檢核目標	性能及安全要求	檢核項目
地震	DLC 9.1 至 9.4	轉子機艙總成、塔架	(1)回歸期 475 年地震(ULS)： 轉子機艙總成允許損傷， 支撐結構保持彈性變形。	極限限度狀態 (ULS) (1)應力強度。
		下部結構	(1)回歸期 475 年地震(ULS)： 支撐結構保持彈性變形。	極限限度狀態 (ULS) (1)構件應力強度。 (2)基樁承载力。
		基礎	(2)回歸期 95 年地震 (SLS)： 須符合離岸風力機運轉之 基礎永久變位與傾角限制。	使用限度狀態 <sup>註1</sup> (SLS) (1)基礎震後變形量。
註 1：使用限度狀態適用於 DLC 9.4 之檢核。				

### 3.3.2 離岸風力機等級

為符合特定場址之離岸風力機設置要求，應綜合考量場址之風速及紊流強度等風況條件，以選用適合之離岸風力機等級。

#### 【解說】

離岸風力機等級之分類如表 3.3.2-1 所示，主要可分為標準離岸風力機等級 (I、II 及 III) 與離岸風力機等級 S 二大類，其目的在於涵蓋大多數的安裝場址，所訂定的風速及紊流參數用於代表不同場址之風環境條件，非屬特定場址的特定環境條件。離岸風力機等級主要依據離岸風力機等級所定義的風況。此外，離岸風力機的安裝場址如位處於熱帶性低氣壓 (颱風) 來襲地區，當風況超出標準離岸風力機等級 I、II 及 III 時，可在採用之離岸風力機等級加入颱風 (T) 基準風速條件，以此基準風速與 I 至 III 級之年平均風速與 A<sup>+</sup>至 C 級之紊流強度並用。對於標準離岸風力機等級之表示法，例如 II 級之年平均風速、B 級紊流與基準風速 T，可以等級 II<sub>B,T</sub> 表示之。未盡事項可參考 IEC 61400-1 之相關規定。

離岸風力機等級 S 適用於針對開發商要求之特殊風況、其他外部條件、特殊安全等級 (參照第 3.3.3 節) 與設計年限不為 20 年時等情況。有關此特殊設計，設計條件中所選擇之數值應反映離岸風力機使用之環境中可預期之嚴苛狀況。

表 3.3.2-1 離岸風力機等級之基本參數

基本參數		離岸風力機等級		I	II	III	S
年平均風速	$V_{ave}$ (m/s)			10.0	8.5	7.5	由設計者 自行訂定之
基準風速	$V_{ref}$ (m/s)	一般		50.0	42.5	37.5	
	$V_{ref,T}$ (m/s)	T級		57.0			
紊流強度參考值	$I_{ref}$	A+ (極高紊流特徵類別)		0.18			
		A (較高紊流特徵類別)		0.16			
		B (中等紊流特徵類別)		0.14			
		C (較低紊流特徵類別)		0.12			

表中相關風速與紊流強度名詞定義之說明參照第 1.4 節；A+：表示極高紊流特徵類別；A：表示較高紊流特徵類別；B：表示中等紊流特徵類別；C：表示較低紊流特徵類別。

離岸風力機應取得驗證機構之型式驗證證書（包含離岸風力機等級、安全等級、品質保證、轉子機艙總成標示等），並須符合安裝特定場址條件之需求。

### 3.3.3 安全等級

離岸風力機之設計應符合下列任一項等級之要求：

1. 一般安全等級：考量離岸風力機破壞時，可能導致人員傷亡、社會或經濟損失之影響。
2. 特殊安全等級：離岸風力機安全等級之規定及要求，除須符合相關法令規定外，亦可由開發商與風力機製造商共同協議之，並經主管機關或專案驗證機構審查認可。

#### 【解說】

一般安全等級離岸風力機（標準離岸風力機等級 I 至 III）須採用表 3.3.3-1 規定之載重部分安全係數。

特殊安全等級離岸風力機（離岸風力機等級 S）之載重部分安全係數，得由開發商與風力機製造商共同協議之，並經主管機關或專案驗證機構審查認可。

表 3.3.3-1 載重部分安全係數 (一般安全等級)

功能載重與環境條件載重		永久載重			
極限程度狀態 (ULS)		疲勞程度狀態 (FLS) 意外程度狀態 (ALS) 使用程度狀態 (SLS)	極限程度狀態 (ULS)		疲勞程度狀態 (FLS) 意外程度狀態 (ALS) 使用程度狀態 (SLS)
正常 (N)	異常 (A)		有利載重 (Favourable)	不利載重 (Unfavourable)	
1.35 <sup>註3</sup>	1.1	1.0	0.9 <sup>註2</sup>	1.1 <sup>註1</sup>	1.0

註1：永久載重包括支撐結構設計的靜載重、預(張)力載重；功能載重(參照第4.12節)。

對於浸沒的水下結構，例如放置在海床上的重力式基礎 (Gravity-Based Structure)，永久載重為總重量減去其在水中之浮力。

註2：如果採取適當的措施，極限程度狀態永久載重的部分安全係數可為1.0。

註3：載重組合DLC 1.1之載重部分安全係數應為1.25；載重組合DLC 2.5之載重部分安全係數應為1.2。

意外程度狀態所適用之設計情境(包含掉落的物件、碰撞衝擊、爆炸以及直升機、船舶或其他物體的意外撞擊等)，船舶撞擊得參照第4.12節與第5.3.8節，其他情境得參考DNV-ST-0126進行評估。

使用程度狀態所適用之設計情境，風機葉片最大撓度、塔頂最大加速度及最高轉速得參考DNV-ST-0437，支撐結構的最大容許傾角與樁頭的最大容許水平位移得參考DNV-ST-0126進行評估。

註4：表中縮寫說明參照第1.4節。

### 3.3.4 載重組合

離岸風力機之設計應考量包含離岸風力機操作條件、風環境條件與海洋環境條件載重、地震及電網狀態等各種綜合情境下必須考量的載重組合，各項載重組合設計情境須搭配適當之正常或極端外部條件。

#### 【解說】

1. 載重組合的分類如下：

- (1) 一般設計載重組合 (如表 3.3.4-1，其中亦包含使用颱風之載重組合)。
- (2) 地震設計載重組合 (如表 3.3.4-2)。
- (3) 支撐結構颱風設計載重組合 (如表 3.3.4-3)。

表 3.3.4-1 至表 3.3.4-3 中所使用之縮寫說明參照第 1.4 節。

表 3.3.4-1 一般設計載重組合

設計情境		載重組合 (DLC)	設計載重					其他條件	分析種類	載重部分安全係數
			風況	波浪	風與波浪方向	海流	水位			
(1)	發電	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ 轉子機艙總成	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	用於外插計算轉子機艙總成設計之極限載重。	ULS	N (1.25)
		1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s, T_p, V_{hub}$ 之聯合機率分布	錯位、多向	無海流	正常水位範圍或 $\geq$ 平均海水位		FLS	F
		1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位		ULS	N
		1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}, V_r, V_r + 2 \text{ m/s}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	錯位、風向變化	NCM	平均海水位		ULS	N
		1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位		ULS	N
		1.6	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	SSS $H_s = H_{s,SSS}$	同向、單向	NCM	正常水位範圍		ULS	N
(2)	發電及故障發生	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	正常控制系統故障、電網損失或主要控制功能故障。	ULS	N
		2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	異常控制系統故障或第二層保護功能故障。	ULS	A
		2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	外部或內部電力故障，包括電網損失。	ULS	A

設計情境		載重組合 (DLC)	設計載重				其他條件	分析種類	載重部分安全係數	
			風況	波浪	風與波浪方向	海流				水位
(2)	發電及故障發生 (續)	2.3 (替代方案)	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	外部或內部電力故障，包括電網損失。	ULS	N
		2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	無海流	正常水位範圍或 $\geq$ 平均海水位	控制系統故障、電力故障或電網損失。	FLS	F
		2.5	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	低電壓穿越。	ULS	N (1.2)
(3)	啟動	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	無海流	正常水位範圍或 $\geq$ 平均海水位		FLS	F
		3.2	EOG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	陣風的時間點與啟動事件，須至少選擇4個不同點。	ULS	N
		3.3	EDC $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	錯位、風向改變	NCM	平均海水位		ULS	N
(4)	正常停機	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	無海流	正常水位範圍或 $\geq$ 平均海水位		FLS	F
		4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	陣風的時間點與啟動事件，須至少選擇6個不同點。	ULS	N
(5)	緊急停機	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 及 $V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s   V_{hub}]$	同向、單向	NCM	平均海水位	當緊急停止時方位角位置應隨機選擇。	ULS	N
(6)	待機 (待機狀況或惰轉)	6.1	EWM 紊流風速模型 <sup>註1</sup> $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s50}$	錯位、多向	ECM $U=U_{50}$	極端水位範圍	轉向錯位 $\pm 8$ 度。 可能的滑動。	ULS	N
		6.2	EWM 紊流風速模型 <sup>註1</sup> $V_{hub} = V_{ref}$	ESS $H_s = H_{s50}$	錯位、多向	ECM $U=U_{50}$	極端水位範圍	電網損失。 轉向錯位 $\pm 180$ 度。	ULS	A

設計情境		載重組合 (DLC)	設計載重				其他條件	分析種類	載重部分安全係數	
			風況	波浪	風與波浪方向	海流				水位
(6)	待機 (待機狀況或惰轉) (續)	6.3	EWM 紊流風速模型 $V_{hub} = V_I$	ESS $H_s = H_{sI}$	錯位、多向	ECM $U=U_I$	正常水位範圍	極端轉向錯位。 轉向錯位±20度。	ULS	N
		6.4	NTM $V_{out} < V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	NSS $H_s, T_p, V_{hub}$ 之聯合機率分布	同向、多向	無海流	正常水位範圍 或≥平均海水位	惰轉時的自然頻率分析。	FLS	F
(7)	待機與故障情況	7.1	EWM $V_{hub} = V_I$	ESS $H_s = H_{sI}$	錯位、多向	ECM $U=U_I$	正常水位範圍	故障產生離岸風力機偏離正常行為導致待機，包括電網損失。	ULS	A
		7.2	NTM $V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s, T_p, V_{hub}$ 之聯合機率分布	同向、多向	無海流	正常水位範圍 或≥平均海水位		FLS	F
(8)	運輸、安裝、維護及修理	8.1	由製造廠商說明						ULS	N
		8.2	EWM $V_{hub} = V_I$	ESS $H_s = H_{sI}$	同向、單向	ECM $U=U_I$	正常水位範圍		ULS	A
		8.3	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$	NSS $H_s, T_p, V_{hub}$ 之聯合機率分布	同向、多向	無海流	正常水位範圍 或≥平均海水位	安裝期間無併聯電網。	FLS	F
		8.4	由製造廠商說明						FLS	F
		8.5	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	同向、多向	ECM $U=U_I$	正常水位範圍	正常船舶撞擊 (參照第 4.12 節) 和直升機載重。	ULS	N
		8.6	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	同向、多向	ECM $U=U_I$	正常水位範圍	異常船舶撞擊 (參照第 4.12 節)。	ULS	A

註 1：若離岸風力機採用颱風 (T) 基準風速條件，則在極端風速模型 (EWM) 中使用  $V_{ref,T}$  取代  $V_{ref}$ 。

註 2：在 DLC 6.1 及 6.2 中的載重部分安全係數是基於年最大風速的變異係數 COV 小於 15% 的假設。然而針對屬於颱風好發區域而言，50 年回歸期的極端風速主要由颱風事件控制，且由於我國颱風路徑多變，變異係數 COV 大於 15% 之可能性高。因此若 COV 大於 15% 時，應適度調整設計風速，參照第 4.2 節風載重。

表 3.3.4-2 地震設計載重組合

設計情境		載重組合 (DLC)	設計載重					其他條件	分析 種類	載重部分 安全係數
			風況	波浪	風與波浪方向	海流	水位			
(9)	發電	9.1	NWP $V_{hub} = V_r$	$H = H_s(V)$	同向、單向	NCM	正常水位範圍		ULS	1.0
	發電 (故障)	9.2	NWP $V_{hub} = V_r$	$H = H_s(V)$	同向、單向	NCM	正常水位範圍	內部故障 (過度振動)或 外部故障 (電網損失)。	ULS	1.0
	待機 (待機狀況或惰轉)	9.3	NWP $V_{hub} = V_l$	$H = H_s(V)$	同向、單向	NCM	正常水位範圍	電網損失。	ULS	1.0
	發電	9.4	NWP $V_{hub} = V_r$	$H = H_s(V)$	同向、單向	NCM	正常水位範圍		SLS	1.0

表 3.3.4-3 支撐結構颱風設計載重組合<sup>註1</sup>

設計情境		載重組合 (DLC)	設計載重					其他條件	分析 種類	載重部分 安全係數
			風況	波浪	風與波浪方向	海流	水位			
(10)	待機 (待機狀況或惰轉)	10.1	EWM $V_{hub} = V_{10min,500yr}$	ESS $H_s = H_{s500}$	錯位、多向	ECM	極端水位範圍		ULS	1.0
		10.2	EWM $V_{hub} = V_{10min,Nyr}$ <sup>註2</sup>	ESS $H_s = H_{sN}$	錯位、多向	ECM	極端水位範圍	電網損失。	ULS	1.0

註1：支撐結構於進行颱風作用期間之設計時，應採用DLC 6.1與6.2之設計載重進行設計。然若增加穩健性 (Robustness) 檢核時，得參考IEC 61400-3-1附錄I，採用本表所建議之DLC 10.1與10.2之設計載重進行設計。

註2：回歸期 N 值的選用是依據在極端環境條件下，同時失去轉向電力及控制的機率為1/500或等效回歸期為500年。N 值應由設計者選擇並證明其合理性，在電網損失的情況下，保守值可選用500年；除非備用電力 (Power Back-up) 可讓控制與轉向系統維持至少6小時之轉向校正能力，否則應分析風向變化高達 ±180度的影響。



2. 載重組合之設計情境與注意事項：

表 3.3.4-4 至表 3.3.4-5 載重組合設計情境與注意事項如下，未盡事項可參考 IEC 61400-3-1、DNV-ST-0437 與 DNV-RP-0585 等之相關規定。

表 3.3.4-4 載重組合之設計情境與注意事項

設計情境		注意事項
(1)	發電	<p>本設計情境用於考量離岸風力機處於正常運轉及連接於電力系統的狀況，運轉載重分析中應考慮與理論最佳運轉狀態之偏差，如轉向錯位與控制系統追蹤錯誤。</p> <p>DLC 1.1：發電時遭遇正常紊流的狀況，此分析僅計算作用於轉子機艙總成之極限載重。</p> <p>DLC 1.2：發電時遭遇正常紊流的狀況，並考慮海洋環境條件的多方向性之疲勞損傷，設計者應確認所考慮之正常海況之數目與解析度足以考量與海洋氣象參數完整長期分布有關之疲勞損害。</p> <p>DLC 1.3：發電時遭遇極端紊流的狀況。</p> <p>DLC 1.4：發電時遭遇風向變化之極端持續陣風的狀況，可假設在風向發生瞬間變化之前，風與浪之方向可為同向。</p> <p>DLC 1.5：發電時遭遇極端風切的狀況。</p> <p>DLC 1.6：發電時遭遇可能產生嚴苛海況的狀況。</p>
(2)	發電及故障發生	<p>本設計情境用於考量離岸風力機運轉發電時可能發生故障而引發的狀況，且各種故障皆不同時發生。</p> <p>DLC 2.1：正常控制系統故障、電網損失或主要控制功能<sup>註1</sup>故障的狀況。</p> <p>DLC 2.2：異常控制系統故障或第二層保護功能<sup>註2</sup>故障的狀況。</p> <p>DLC 2.3：發生外部或內部電力系統故障的狀況。</p>



設計情境		注意事項
(2)	發電及故障發生 (續)	<p>關於DLC 2.3，存在兩種模擬方案，僅需要模擬其中一個方案：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 對於方案一，電網損失可能發生在陣風過程中的任何時間，應考慮最不利的組合。對於所考慮的每個風速，至少應考慮以下三種電網損失和極端運轉陣風： <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 電網損失發生在最低風速。</li> <li>(2) 電網損失發生在最高陣風加速。</li> <li>(3) 電網損失發生在最大風速。</li> </ol> </li> <li>2. 對於替代方案，應執行對所考慮的每一平均風速至少12種不同隨機模擬，以應用於與電網損失所組合之正常紊流模型風況。對於每一平均風速，極端載重為計算12次模擬的平均值加上3倍所模擬之標準偏差。</li> </ol> <p>DLC 2.4：評估在正常紊流狀況發生故障時的疲勞損傷。</p> <p>DLC 2.5：發生低電壓穿越的狀況。</p>
(3)	啟動	<p>本設計情境用於考量離岸風力機從停止（或惰轉）之狀況進入發電運轉的瞬間狀況。</p> <p>DLC 3.1：評估啟動離岸風力機所發生的疲勞損傷。</p> <p>DLC 3.2：啟動離岸風力機時，發生極端運轉陣風的狀況。</p> <p>DLC 3.3：啟動離岸風力機時，發生風向變化的狀況。</p>
(4)	正常停機	<p>本設計情境用於考量從離岸風力機發電情況進入待機（或惰轉）的狀態。</p> <p>DLC 4.1：評估正常停止離岸風力機所發生之疲勞損傷。</p> <p>DLC 4.2：正常停止離岸風力機運轉時，評估發生極端運轉陣風的狀況。</p>
(5)	緊急停機	<p>DLC 5.1：用於考量離岸風力機從發電中的情況轉移為透過手動操作等緊急停止的狀況。</p>

設計情境		注意事項
(6)	待機 (待機狀態或惰轉)	<p>本設計情境用於考量離岸風力機處於待機或惰轉的狀況。在DLC 6.1至6.3中，風與波浪方向之錯位須依場址資料訂定；若無適當資料，應考慮正負30度範圍內之錯位。</p> <p>DLC 6.1：考慮50年回歸期的極端風速及極端海況之影響，若可確定無轉向系統之滑動時，則具有主動式轉向系統之離岸風力機採用紊流極端風速模型時應施加<math>\pm 8</math>度之平均轉向錯位。</p> <p>DLC 6.2：考慮50年回歸期的極端風速及極端海況之影響，且不因電力系統喪失而不發揮轉向系統功能的狀況。除非備用電力可讓控制與轉向系統維持至少6小時之轉向校正能力，否則應分析最大<math>\pm 180</math>度轉向錯位之風向變化效應。</p> <p>DLC 6.3：考慮1年回歸期的極端風速及極端海況之影響，且發生極端轉向錯位的狀況。</p> <p>DLC 6.4：評估待機時之疲勞損傷。</p>
(7)	待機與 故障發生	<p>本設計情境用於考量因待機時暴風而造成離岸風力機或電力系統故障。</p> <p>DLC 7.1：此故障是發生在1年回歸期的極端風速及極端海況的組合下。風與波浪方向之錯位須依場址資料訂定；若無適當資料，應考慮造成最大載重之錯位。當轉向系統出現故障時，應考慮<math>\pm 180</math>度之轉向錯位；在其他故障中，轉向錯位應與DLC 6.1一致。若在DLC 7.1之特徵載重下可能出現轉向系統滑動時，應考慮最大可能之不利滑動。</p> <p>DLC 7.2：評估待機中故障時之疲勞損傷。</p>
(8)	運輸、安裝、 維護及修理	<p>本設計情境用於考量離岸風力機的運輸、安裝、維護及修理的狀況。</p> <p>DLC 8.1：製造廠商應說明離岸風力機之運輸、安裝、維護及修理作業中假設之所有風況、海況與設計情境。</p> <p>DLC 8.2：考量運輸、安裝、維護及修理時可能發生極端風速及極端海況的狀況。</p> <p>DLC 8.3：考量在離岸風力機建置期間至連接至電力系統為止所產生的疲勞損傷。</p> <p>DLC 8.4：製造廠商應評估離岸風力機的運輸、安裝、維護及修理作業時所產生的疲勞損傷。</p>

設計情境		注意事項
(8)	運輸、安裝、 維護及修理 (續)	DLC 8.5：正常船舶撞擊情境，應考慮運維船舶正常操作下之撞擊。 DLC 8.6：異常船舶撞擊情境，應考慮運維船舶意外漂流之撞擊。 有關DLC 8.5及DLC 8.6環境條件 $V_T$ 與 $H_{sT}$ 參數應由運維廠商依據運轉及維護計畫說明，其碰撞載重參照第4.12節及碰撞設計參照第5.3.8節。
<p>註1：主要控制功能：將離岸風力機運轉參數保持在正常操作和設計範圍內。</p> <p>註2：第二層保護功能：用於主要控制功能失效以及外部、內部電力故障或是危險事件發生時所產生之保護機制。</p>		

表 3.3.4-5 地震及支撐結構颱風作用時載重組合之設計情境與注意事項

設計情境		注意事項
(9)	地震	<p>本設計情境用於考量地震影響離岸風力機運轉安全的狀況 (如表3.3.4-2)。</p> <p>DLC 9.1：在正常運轉期間發生地震的狀況 (回歸期475年)。</p> <p>DLC 9.2：包括地震與其他環境條件載重的疊加和可能由地震引發的離岸風力機關閉程序，應考慮內部故障 (過度振動) 或外部故障 (電網損失)，以及由地震引發的振動傳感器對安全系統的啟動 (回歸期475年)。</p> <p>DLC 9.3：地震與其他環境條件載重的疊加和電網損失 (回歸期475年)。</p> <p>DLC 9.4：在正常運轉期間發生地震的狀況，此情境為離岸風力機基礎永久變位與傾角之檢核 (回歸期95年)。</p>
(10)	支撐結構颱風	<p>本設計情境用於考量颱風影響離岸風力機運轉安全的狀況，僅適用於支撐結構設計且為非強制性 (如表3.3.4-3)。</p> <p>DLC 10.1：500年回歸期的極端風速及極端波浪之影響且轉向系統處於正常功能的狀況。</p> <p>DLC 10.2：N年回歸期的極端風速及極端波浪之影響且不因電力系統喪失而不發揮轉向系統功能的狀況。</p>

### 3.3.5 離岸風力機共振效應

離岸風力機應避免因共振效應而損及原設計要求之性能。

#### 【解說】

風力機製造商如有指定整體結構系統的容許頻率頻寬時，須執行符合該指定頻寬的支撐結構設計，以下說明以使用三片式葉片轉子之振動頻率為例。轉子是離岸風力機最顯著的振動源，在轉子速度的 1P 和 3P 上會顯現峰值，其中 1P 為轉子轉動頻率 (Rotor Rotating Frequency)，3P 為葉片通過頻率 (Bladed Passing Frequency)，圖 3.3.5-1 為此二種頻率範圍之頻率反應譜示意圖。橫軸為頻率 (Hz)，縱軸為能量頻譜密度。為了讓一階自然振動頻率 (First Mode Natural Frequency) 不與 1P 及 3P 產生共振，一般是採用在軟性-剛性 (Soft-Stiff) 領域設計支撐結構。

1. 軟性-軟性 (Soft-Soft) 領域：一階自然振動頻率小於 1P，剛性低的支撐結構。
2. 軟性-剛性 (Soft-Stiff) 領域：一階自然振動頻率介於 1P 和 3P 之間的支撐結構。
3. 剛性-剛性 (Stiff-Stiff) 領域：一階自然振動頻率大於 3P，剛性高的支撐結構。

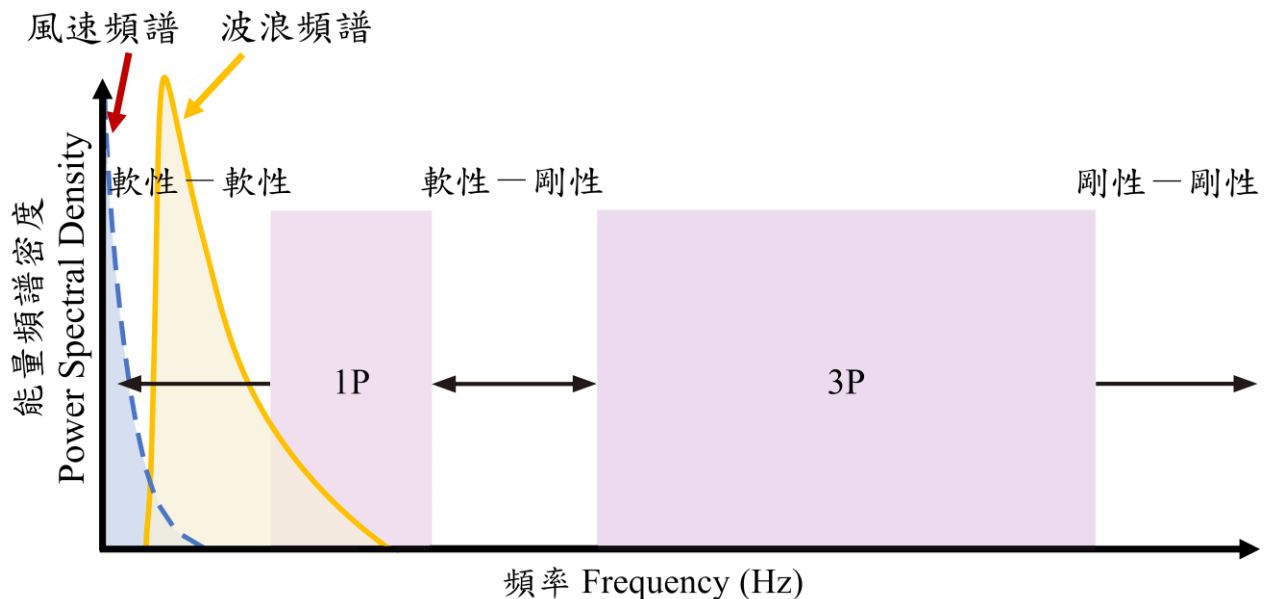


圖 3.3.5-1 離岸風力機結構共振頻率反應譜示意圖

離岸風力機應進行結構動力分析，避免發生下列共振情境引致應力變形過大或疲勞破壞：

1. 離岸風力機轉子旋轉引致振動。
2. 風、波浪及海流與結構間動態互制行為，引致作用頻率鎖定共振。
3. 離岸風力機塔架受風作用，而引致渦致振動。

除上述設計考量外，必要時仍須採用適當的對策以防止共振效應，相關規定可參考 DNV-ST-0126。此外，在使用限度狀態設計須檢核地質條件對風機系統主要結構頻率之影響。

### 3.3.6 離岸風力機支撐結構附屬電氣

電氣設計應符合下列事項：

1. 電氣設備之規格及配置方式，應依據用戶用電設備裝置規則、發電設備裝置規則及輸配電設備裝置規則辦理。
2. 為使船舶與飛行器可明確辨識，離岸風力機本體外應裝置航行輔助照明燈具，包含但不限於航空障礙燈、外圍主要結構物導航燈、外圍中間結構物導航燈，其設計應符合航路標識設置技術規範、國際航標協會及航運管理單位規範。
3. 設置火警及自動滅火系統，電氣設備應具備火災自熄性。
4. 電氣設備如位於支撐結構外部，應於連接之供電線路及通訊線路裝設突波吸收保護裝置或避雷器。

#### 【解說】

離岸風力機支撐結構之附屬電氣設備，包含但不限於照明、通風機、電纜、吊車、升降電梯、監測設備、警戒燈號與接地系統等，須符合經濟部頒佈之「用戶用電設備裝置規則」、「發電設備裝置規則」與「輸配電設備裝置規則」等規定。

離岸風力機設計時應考量設置航行船舶及飛行器之警示設備，且須符合交通部頒佈之「航空障礙物標誌與障礙燈設置標準」、「航路標識設置技術規範」或國際航標協會 (IALA) 規範之規定。

離岸風力機支撐結構內部之機電設施所在空間應設置火警及自動滅火系統，電氣設備應採用非自燃性材料，可參考 DNV-OS-D301 之規定。

特定場址之雷擊調查依第2.4.2節規定辦理，以確保電氣使用安全。離岸風力機支撐結構外部機電設施，容易因為雷擊導致連接線路產生或感應高電壓雷突波，使連接在供電線路或通訊線路上的相關機電設施損壞。應於連接線路適當處裝設突波吸收保護裝置或避雷器，以消除雷擊突波產生的過電壓危害。突波吸收裝置及避雷器之規格及裝設方式，可參考 IEC 62305-4、IEC 61643系列與IEEE C62系列等規定。

### 3.4 變電站性能及安全

海上變電站於全生命週期內須至少符合以下之性能及安全要求：

1. 須提供離岸風力發電廠電力併入電網之服務，並應避免變電站於結構破壞或功能失效，導致人員傷亡、環境嚴重汙染以及社會與經濟損失等後續效應。
2. 應考量人員使用空間、逃生通道與消防設備之安全，以提升人員與變電站設備之使用安全。

陸上變電站應符合輸配電設備裝置規則及國內相關建築設計法規。

#### 【解說】

變電站主要功能為電力傳輸與提升輸送效率，並使電壓提升達到減少電纜鋪設成本。為維持變電站之運作服務，得參考 DNV-ST-0145 進行結構設計評估與提升電力可靠性之應考慮事項。

變電站須提供離岸風力發電廠可靠之電力收集、傳輸、發電功率併網及提升離岸風力機發電效率等功能，且應透過結構設計，以確保變電站於設計年限內可維持結構安全、人員作業安全與耐久性。此外，為避免變電站運轉系統電力中斷導致功能失效，應配置發電設備以保證變電站用電的可靠性，為變電站之自動化、照明及安全等設備，提供發生變電站從主系統脫離時之備用電力。

變電站之設計須考量住居頻率、最大容納人員數、量體規模、進出方式及氣候條件限制、緊急逃生方式、通訊方式、環境條件載重及意外事故影響等因素，訂定性能及安全之設計目標。若有直升機平台、發電機與燃油系統配置規劃時，須設置於變電站底或頂層與其他電氣設備隔離，採空間隔離及安全風險評估方式進行規劃，以提高變電站之防火、消防與防爆安全。

### 3.5 輸電系統性能及安全

輸電系統於全生命週期內須至少符合以下之性能及安全要求：

1. 輸電系統在責任分界點與電網相連，應符合台灣電力股份有限公司相關電網併聯要求與規範。
2. 輸電系統應設置故障保護措施。另經考量電力系統之需求、重要性或系統穩定度分析確認有額外需要時，得增設保護設備。
3. 海纜採埋設方式鋪設者，應設計適當埋設深度，確保足夠保護層厚度。採非埋設方式鋪設者，應避免海纜系統功能失效。
4. 海纜的鋪設不得影響港口、航運及漁業使用，並應避免對現有管線造成影響。

#### 【解說】

輸電系統應符合以下之性能及安全要求。

#### 1. 電網併聯要求與規範

離岸風電係屬於再生能源，台灣電力股份有限公司針對再生能源發電設備併網已制定電網併聯要求與規範，發電設備應按其總容量拼接至適當電壓等級之系統，責任分界點即再生能源發電系統與台灣電力股份有限公司系統之產權分界點，並據此分界點確認離岸風力發電廠開發商與台灣電力股份有限公司雙方維護責任之歸屬。

輸電系統於責任分界點與電網相連，應符合台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點及相關電網併聯要求與規範等之規定，包含但不限於保護協調之規劃與設計安裝、故障電流、電壓變動率、系統穩定度、離岸風力機之低電壓忍受能力、發電機組電壓運轉規定、功率因數、諧波管制、調度與通訊等規定，以避免離岸風力發電廠運轉發電對於電網所產生之系統衝擊。

#### 2. 輸電線路故障保護措施

離岸風力發電設備之間的輸電線路應加入故障保護措施，依線路之重要性規劃保護電驛設置，並應與台灣電力股份有限公司之系統保護設備協調。另可依電力系統之需求、重要性或經系統穩定度分析須特別考量者，增設多套保護設備。相關要求與規範應遵循「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點」之規定。

### 3. 海纜性能及安全要求

輸電系統之海纜為避免因走錨、流網漁業及海況的擾動等因素而受損，原則上採用埋設方式鋪設。埋設時，應考量海纜的水中重量及海床土質，並評估波浪、海流、潮汐及漂沙等海岸作用對海床之影響，設計適當埋設深度，確保有足夠保護層厚度，以保護海纜免遭錨害或漁船拖網勾損。採非埋設方式鋪設者，應考量海底不利之環境，包括船舶錨具撞擊、海底物體掉落、海床變動、潮流引起的渦致振動作用與海水腐蝕效應等情境下，不得折損電力傳輸或光纖通訊功能，必要時應採取保護措施，避免海纜系統功能失效。

關於海纜的鋪設，應遵循在「中華民國大陸礁層鋪設維護變更海纜或管道之路線劃定許可辦法」，不得影響港口、航運及漁業使用，若海纜跨過或交錯現有的海底管線，如天然氣管、油管及通訊線路，應使用相關工程技術提高安全防護，以避免對現有管線造成影響。海纜構造部分可參考 IEC 60228 之規定。此外，詳細設計方法得參考 DNV-ST-0359 及 DNV-RP-0360 等。

### 3.6 其他要求

#### 3.6.1 安全警示與防護措施

為確保離岸風力發電廠的作業安全及人員健康，應設置職業安全衛生必要之警示設備、安全防護裝置或安全衛生設備等措施。

##### 【解說】

應符合「職業安全衛生法」之相關規定，設置包含但不限於以下措施：

1. 應於適當地點標示作業設備之危險訊息，並設置相關安全警示與防護措施。
2. 應提供作業人員必要之預防設備或措施，以避免發生職業災害。
3. 針對不同工作場所應放置配備充足及適用之防護具，人員應佩戴適合當下作業環境之防護具，並使人員確實使用。

惟「職業安全衛生法」之安全警示與防護措施相關規定若有不足之處，設計者得參考相關國際標準/規範擇優適用之。

#### 3.6.2 液壓與氣壓設備安全

為維護離岸風力發電廠之安全運作，應維持液壓及氣壓設備之功能。

##### 【解說】

液壓及氣壓有關設備，應具備抑制壓力上升、壓力控制等功能的措施或裝置，以維持設備運作安全。壓力設備須使用能因應作業環境或內容物之耐腐蝕性材料，其設備結構體應具備耐高壓下安全性與使用性。



### 3.6.3 海洋公害防治

離岸風力發電廠所設置之輸送或貯存等設備，應採取必要之維護及防範措施，以有效防治海洋公害。

#### 【解說】

為避免因離岸風力發電廠疏漏污染物而破壞週邊海域，應考量包含但不限於以下事項：

1. 離岸風力發電廠有關液壓油、潤滑油及絕緣油等之輸送或貯存設備，須符合水污染防治法與水污染防治法施行細則之相關規定。若輸送或貯存設備有疏漏污染物或廢(污)水外洩之虞者，應採取維護及防範措施。
2. 離岸風力發電廠之設置及運轉作業須符合海洋污染防治法之相關規定，相關作業有導致嚴重污染之虞者，應即採取措施以防止、排除或減輕污染。
3. 離岸風力機葉片旋角驅動系統與轉向系統等設備，須採取防止油品外洩措施。

### 3.6.4 運維船舶航行安全

1. 無論在白天或夜晚等全天候條件，皆應確保並維持對船舶之警示與識別功能。
2. 應規劃航行安全之配套機制，避免離岸風力發電廠建置及運轉維護期間發生船舶碰撞事件。
3. 離岸風力機之轉子運轉時掃掠範圍不得觸及航行之船舶。

#### 【解說】

離岸風力發電廠航行船舶安全應考量事項如下：

1. 為提升離岸風力發電廠內的船舶航行安全，應參考「航路標識條例」與「航路標識設置技術規範」，以設置必要之航路標識及漆色、燈光和標識板標示等。船舶接近離岸風力發電廠海上浮動設施時，須可隨時於一定距離外識別該設備，以確保航行安全與達到警示為目的。因此，無論白天或夜晚和任何海洋環境條件視線下，應採取以下措施，以隨時維持離岸風力發電廠的警示效果和識別性。
  - (1) 採用提高設備可見度的漆色。
  - (2) 在夜間和視野不佳狀態下，設置用於辨識設備的燈光。
  - (3) 如有配置多台離岸風力機，則應於各支撐結構上設置用於辨識個體的識別板。
2. 各類船舶航行於離岸風力發電廠作業水域時，為避免船舶間發生碰撞，應規劃風場建置期與營運期之通信規定，相關規定應參考「離岸風場建置及營運期間工作船航行安全規範」，以建立船舶間之通信與確認彼此識別。離岸風力發電廠內之助航設施使用規則與安



全區 (避航區) 規劃，應參考「航路標識設置技術規範」之相關規定，以維護離岸風力發電廠及船舶航行安全。對於船舶於離岸風力發電廠內之碰撞防止措施，應使用碰撞墊與護舷系統，以減少船舶泊靠之碰撞危害。為避免與減少船舶於離岸風力發電廠內發生碰撞與意外，應遵守我國「船舶設備規則」裝設船舶自動識別系統船載台，使鄰近船舶可採取必要之避讓、溝通與指揮，且除漁船 (第十四級船) 可裝設 B 級規範之自動識別系統 (AIS) (離岸風力機、海纜與變電站須加設 AIS)，其餘等級之船舶皆須裝設符合 A 級規範之自動識別系統。

3. 各類船舶航行於離岸風力發電廠作業水域時，應考量離岸風力機追蹤風向時所影響之空間，包含機艙轉向半徑 ( $R$ ) 與葉輪掃掠面積半徑 ( $0.5D$ ) 所組成之空間，離岸風力機運轉作業邊界如圖 3.6.4-1。除上述範圍之外，應另外考量離岸風力機轉子運轉時，葉片最底端與大潮平均高潮位 (MHWS) (係指大潮期間每天較高高潮之平均水位) 海平面之安全距離，避免船舶與離岸風力機發生碰撞，可參考 Safety of Navigation: Offshore Renewable Energy Installations (OREIs) - Guidance on UK Navigational Practice, Safety and Emergency Response MARINE GUIDANCE NOTE MGN 654 (M+F), Maritime and Coastguard Agency，確保轉子運轉時葉片最底端與海平面高度至少相距 22 公尺以上，或由開發商提出任何船型皆可安全通過小於此最小安全距離需求的證明。

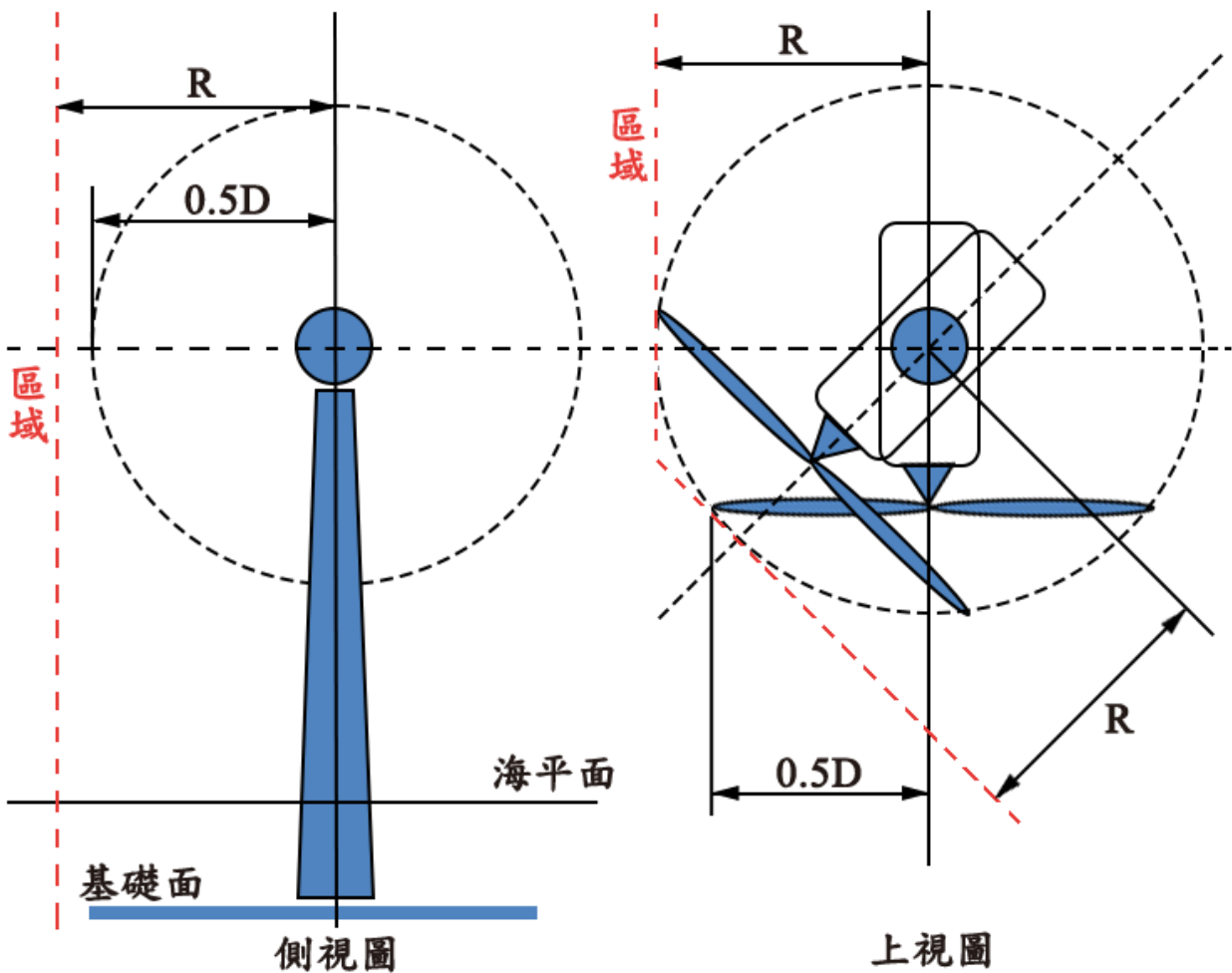


圖 3.6.4-1 離岸風力機運轉作業邊界圖

### 3.6.5 資訊安全防護

具網路傳輸功能之離岸風力發電廠的設備，應加入資安防護考量，其範圍包含設備本身及該設備之周邊環境。

#### 【解說】

離岸風力發電廠之相關設備若具備網路傳輸功能者，應考量資訊安全防護，除了選用符合資安規範 (如 IEC 62443-4-1、IEC 62443-4-2 與 NISTIR 7628 等國際標準/規範) 之設備，並視資安防護需求，於周邊環境增加相關資安防護措施 (可參考 ISO/IEC 27001、IEC 62443-3-3 與 NISTIR 7628 等標準/規範)。

前述所列參考規範與標準，如國家另有頒布者應優先適用之。

### 3.6.6 環境與結構監測

為使離岸風力發電廠於運轉與維護階段能符合預期之性能與安全目標，設計階段應考量風環境條件與海洋環境條件、海洋附生物、海床變動、淘刷與地震等載重效應對結構性能與安全要求之影響，編訂監測計畫。

#### 【解說】

離岸風力發電廠須於設計階段擬定特定場址環境與結構監測計畫，並提送主管機關核可備查。場址環境與結構監測計畫須說明結構與海洋氣象監測項目、物理量、量測取樣頻率、量測範圍及解析度，並適當規劃監測感測器 (Sensors)、資料擷取器 (Data Acquisition)、電源供應及備援電力計畫、資料傳輸 (Data Transmission) 計畫、監測設備定期維護校正計畫、監測管理值及緊急應變計畫。

## 第四章 離岸風力發電廠場址環境條件評估

### 4.1 通則

設計時應考慮特定場址環境條件作用之影響，包含風環境條件、海洋環境條件、水深地形與大地工程及其他環境條件等，且應在設計文件中詳細說明。

#### 【解說】

離岸風力發電廠之設計應考慮本節所述之環境條件，其中環境條件可分為風環境條件、海洋環境條件、水深地形與大地工程及其他環境條件等。風環境條件為影響轉子機艙總成結構完整性之主要外部環境條件。水深地形與大地工程為包含隨時間變化之海床移動、淘刷與其他海床不穩定要素。其他環境條件包含但不限於地震、海嘯、雷擊、腐蝕、土壤液化與海洋附生物等。

環境條件可分為正常環境條件與極端環境條件。正常環境條件一般代表風力機正常運作期間頻繁發生之情況，並與重複發生之結構載重狀況有關；而極端環境條件則代表罕見之情況，通常以 1 年或 50 年回歸期之極端值決定，惟在某些非常特殊之極端事件分析時，應特別注意統計資料之數量及品質是否具有代表性。

設計時應依特定場址之特性，統計分析離岸風力發電廠特定場址之風環境條件、海洋環境條件、水深地形及大地工程與其他環境條件等之數據，彙整於設計文件中。設計文件內容須包含但不限於以下資訊：

1. 風速與風向。
2. 示性波高、波浪週期與波向。
3. 風與波浪統計之相關性。
4. 海流流速與流向。
5. 水位。
6. 海床變動、淘刷。
7. 大地工程條件。
8. 海洋氣象與其他相關之環境參數，如空氣與海水之溫度與密度、海水鹽度、場址水深、海洋附生物、腐蝕等。

風環境條件與海洋環境條件數據之統計宜有 10 年以上資料，用於極值分析之統計則宜有 30 年以上資料。若特定場址之數據樣本數量或觀測時間長度不足，可利用經與觀測資料驗證後之數值模擬（後報）結果取代之。

若使用特定場址之觀測資料進行分析前，應選擇與鄰近特定場址（一般為 50 公里範圍內）及外在條件（觀測位置之水深、地形、風域等）近似之觀測站的觀測資料進行比對，必要時亦可採用數值模擬，以估算或比對特定場址之海洋氣象統計資料。

## 4.2 風載重

應根據現地實測資料或鄰近氣象測站資料之推算值，合理評估各種限度狀態下之設計風載重。

### 【解說】

作用於離岸風力機的風載重時間序列可參考下列方式設定正常條件及極端條件的風況，以針對各載重組合 (DLC) 之設計情境進行後續之動力分析。

設定風況時應於現地進行風況觀測，以取得具備場址特性的氣象量測資料。氣象量測項目應包含但不限於：風速、風向、風速標準偏差（紊流）等。量測資料的調查原則應符合第 2.2.2 節。量測地點應於可代表風力發電廠所在區域之風況特性的位置。量測相關項目、位置和方法，可參照最新 MEASNET，亦可參考最新版之 CNS 15176-12-1 或 IEC 61400-12-1。當現地進行風況觀測的資料不足以評估風況條件時，可參考場址附近之氣象測站資料，合理推估風況之設定條件。

風況可分類為正常條件及極端條件，此二類風況應涵蓋我國本土化氣候特徵，例如颱風特性以及東北季風特性。對於正常條件及極端條件而言，應基於風環境條件調查資料之評估結果，決定平均風速及紊流強度等風場特性。

對於屬於颱風的極端條件而言，在觀測時間通常不足的前提下，可藉由中尺度氣象模式 (WRF)、蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo Simulation) 及測量相關推測法 (Measure-Correlate-Predict) 等方法，考量颱風來襲頻率、強度和局部地形效果，來決定 50 年回歸期的設計風速及紊流強度。以上述方法決定極端條件之設計參數時，應針對各參數設定提出合理之說明以確保評估之品質，且應具本土化特性及偏保守之原則。以數值模擬進行氣流解析或以物理模擬縮尺風洞試驗來考量局部地形效應時，應說明採用的數值解析條件或流場模擬品質。

對於屬於颱風的極端條件而言，在觀測資料足夠的狀況下，可藉由現地實際觀測之風況資料，以甘保分布 (Gumbel Distribution) 等機率分布進行極值分析，決定 50 年回歸期的設計風速，亦可藉由現地實際觀測之風況資料決定紊流強度。以上述方法決定極端條件之設計參數時，應說明所選擇之機率分布適用性以及評估結果的不確定性。上述所提及之方法可參照 CNS 15176-1、IEC 61400-1 及相關文獻 (Hsiao et al., 2010, 2012, 2015)。此外，亦可基於現有相關規範 (如建築物耐風設計規範及解說) 對各地方分區所建議的基本設計風速，以合理的方式考量局部地形效果、表面粗糙度區分、從海平面起算高度等因素下進行評估並說明評估方法之不確定性。

風況設定可參考 CNS 15176-1 或 IEC 61400-1，針對不同情境予以分類，如下述所列，惟以下風況條件設計參數得依本土觀測資料之評估結果予以修正。

### 1. 正常風剖面模型 (NWP)

風剖面  $V(z)$  表示海平面以上高度  $z$  函數的平均風速。在標準離岸風力機等級中，正常風剖面模型應由下列冪次律求得：

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^{\alpha} \quad (4.2-1)$$

冪次律指數應假設為 0.14。假設之風剖面係用於定義葉輪掃掠面積之平均垂直風切。

## 2. 正常紊流模型 (NTM)

正常紊流模型中，紊流標準差之代表值  $\sigma_1$  應由已知輪轂高度風速之 90%分位數 (Quantile) 求得。標準離岸風力機等級之此數值應由下列公式決定：

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) ; b = 5.6m/s \quad (4.2-2)$$

除了採用式 (4.2-2) 外，亦可選擇具有適當尺度與形狀參數的韋伯分布來評估  $\sigma_1$ ，如式 (4.2-3) 所示。其中， $\sigma_0$  為所選定目標非超越機率百分比之  $\sigma_1$ 。

$$P_W(\sigma_1 < \sigma_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_0}{c}\right)^k\right] \quad (4.2-3)$$

$$k = 0.27V_{hub}\left(\frac{s}{m}\right) + 1.4 \quad (4.2-4)$$

$$c = I_{ref}(0.75V_{hub} + 3.3m/s) \quad (4.2-5)$$

## 3. 極端風速模型 (EWM, 包含颱風模式)

極端風速模型可分為穩定極端風速模型與紊流極端風速模型，根據基準風速  $V_{ref}$  及固定紊流標準差  $\sigma_1$  建立。若風力機採用 T 級標準風速條件，則在極端風速模型中使用  $V_{ref,T}$  取代  $V_{ref}$ 。

對穩定極端風速模型而言，應使用下列公式以高度  $z$  為函數計算 50 年回歸期之極端風速  $V_{e50}$  及 1 年回歸期之極端風速  $V_{e1}$ ：

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0.11} \quad (4.2-6)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (4.2-7)$$

在穩定極端風速模型中，應假設一穩定之  $\pm 15^\circ$  轉向錯位以便進行與平均風向之短期偏移。

對紊流極端風速模型而言，50 年與 1 年回歸期及高度  $z$  函數之 10 分鐘平均風速應分別由下列二項公式求得：

$$V_{50}(z) = V_{ref}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^{0.11} \quad (4.2-8)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (4.2-9)$$

縱向紊流標準差應為：

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (4.2-10)$$

紊流極端風速模型之縱向紊流標準差與正常 (NTM) 或極端紊流模型 (ETM) 無關。穩定極端風速模型與紊流極端風速模型之間的關係約為 3.5 倍之尖峰因子。

我國屬於颱風好發地區，應參照 IEC 61400-3-1 建議，針對 50 年回歸期設計風速考量變異係數的影響修正。對颱風的 50 年回歸期設計風速進行變異係數評估時，在特定場址之觀測資料不足的前提下，得採用鄰近氣象測站資料進行合理推估，抑或提出不考量變異係數修正之對應設計因應措施，但須在設計文件中載明其設計依據。

表 3.3.4-1 中 DLC 6.1 及 6.2 中的載重部分安全係數是基於年最大風速的變異係數小於 15% 的假設。如果變異係數大於 15%，則設計載重應乘以線性增加係數  $\eta$ 。當變異係數等於 15% 時，線性增加係數  $\eta = 1$ ；當變異係數等於 30% 時，線性增加係數  $\eta = 1.15$ 。若以調整設計風速的方式進行修改，則可採用下列公式修正設計風速  $V_{50}$ 。

$$\tilde{V}_{50} = \sqrt{\eta}V_{50} \quad (4.2-11)$$

變異係數計算方式可以基於甘保分布假設，採用 50 年回歸期設計風速及 100 年回歸期設計風速求得，如下式所列：

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\frac{\beta}{\alpha} + 0.5772} \quad (4.2-12)$$

其中，

$$\alpha = \frac{V_{100} - V_{50}}{P_{100} - P_{50}}, \beta = V_{50} - \alpha P_{50} \quad (4.2-13)$$

$$P_{100} = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{100}\right)\right], P_{50} = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{50}\right)\right] \quad (4.2-14)$$

此外，在颱風好發地區，得參考 IEC 61400-3-1 附錄 I 中所建議的二種針對支撐結構的設計載重情境，如表 3.3.4-3 中的 DLC 10.1 及 10.2，進行下部結構和基礎的整體結構穩健性驗證。

DLC 10.1 為 IEC 61400-3-1 參考美國石油協會 (API) Recommended Practice 2A, 22<sup>nd</sup> Edition 的建議，針對颱風條件的地理區域使用穩健性水平標準來驗證下部結構和基礎的整體結構完整性。而考慮強風暴中無人或疏散且具有中等故障後果 (暴露類別 L-2) 的結構而言，50 年回歸期條件定義為設計水平標準，500 年回歸期條件則定義為穩健性水平標準。EWM 風況的  $V_{hub}$  可修正為：

$$V_{hub} = V_{10min,500yr} \quad (4.2-15)$$

對於 DLC 10.2 來說，極端環境條件中 N 年回歸期的 N 值選定主要為，考量風力機在此極端環境條件下，同時失去轉向電力與控制的機率為 1/500，或相當於 500 年回歸期的涵義。EWM 風況的  $V_{hub}$  可修正為：

$$V_{hub} = V_{10min,Nyr} \quad (4.2-16)$$

此 N 值的選定應由設計者決定及調整。設計者預期在極端環境條件時會發生電網電力損失 (Loss of Network Power) 或者設計者並未針對場址於極端環境條件進行電網電力可靠度評估時，若未具備 IEC 61400-3-1 第 7.4.7 節中所規定的備用電力條件，設計者可考量採用 500 年回歸期的環境條件進行保守原則的設計。

#### 4. 極端運轉陣風 (EOG)

標準離岸風力機等級之輪轂高度預期 50 年回歸期的最大風速值  $V_{gust}$  應以下式求得：

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{hub}); 3.3 \left( \frac{\sigma_1}{1+0.1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)} \right) \right\} \quad (4.2-17)$$

式中  $\sigma_1$  由式 (4.2-2) 所求得； $D$  為葉輪直徑； $\Lambda_1$  為輪轂高度  $z$  之縱向紊流尺度參數，應由下式決定：

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60m \\ 42m, & z \geq 60m \end{cases} \quad (4.2-18)$$

$V_{gust}$  為考量風力機運轉事件 (例如啟動或停止) 發生機率之 50 年回歸期陣風風速。

風速應以下式定義：

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) - 0.37V_{gust} \sin(3\pi t/T)(1 - \cos 2\pi t/T) & 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \text{非風況作用時間} \end{cases} \quad (4.2-19)$$

其中， $V(z)$  係由式 (4.2-1) 定義， $0 \leq t \leq T$  為該風況作用時間， $T = 10.5$  秒為作用時間長度。

#### 5. 極端紊流模型 (ETM)

極端紊流模型應採用式 (4.2-1) 定義之正常風剖面模型及具有由下式所求得之縱向分量標準差之紊流：

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^\alpha$$

$$\sigma_1 = c I_{ref} \left( 0.072 \left( \frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left( \frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right); \quad c = 2 \text{ m/s} \quad (4.2-20)$$

#### 6. 極端風向變化 (EDC)

極端風向變化強度應以下式計算：

$$\theta_e = \pm 4 \arctan \left( \frac{\sigma_1}{V_{hub} \left( 1+0.1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right) \right)} \right) \quad (4.2-21)$$

式中  $\sigma_1$  由式 (4.2-2) 求得 (針對正常紊流模型)； $\theta_e$  限制於  $\pm 180^\circ$  之區間內； $\Lambda_1$  為式 (4.2-17) 之紊流尺度參數； $D$  為葉輪直徑。

極端風向瞬間變化  $\theta_t$  應以下式計算：

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_e (1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \theta_e & t > T \end{cases} \quad (4.2-22)$$

式中， $0 \leq t \leq T$  為該風況作用時間， $T=6$  秒為極端風向變化之持續時間。正負號應適當選擇，使其產生最不利之瞬間載重。在極端風向瞬間變化結束時，風向假設不變。風速應依式 (4.2-1) 所述之正常風剖面模型。

#### 7. 風向變化之極端相干陣風 (ECD)

風速應由下式定義：

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) & t \leq 0 \\ V(z) + 0.5V_{cg}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg} & t \geq T \end{cases} \quad (4.2-23)$$

式中， $0 \leq t \leq T$  為該風況作用時間， $T=10$  秒為風速上升時間，而風速  $V(z)$  係由式 (4.2-1) 之正常風剖面模型所求得。 $V_{cg}$  為風向變化時之極端相干陣風變化量。

風速上升應考量與風向變化 ( $\theta$  由  $0^\circ$  至  $\theta_{cg}$ ) 同時發生， $\theta_{cg}$  係由下式所定義：

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180 & V_{hub} < 4m/s \\ \frac{720 (m/s)}{V_{hub}} & 4m/s < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (4.2-24)$$

風向變化特性如下式：

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \pm 0.5\theta_{cg}(1 - \cos(\pi t/T)) & 0 \leq t \leq T \\ \pm\theta_{cg} & t > T \end{cases} \quad (4.2-25)$$

#### 8. 極端風切 (EWS)

瞬間 (正向與負向) 垂直風切：

$$V(z, t) = \begin{cases} \text{① 為 } 0 \leq t \leq T, & V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \pm \left(\frac{z-z_{hub}}{D}\right) \left(2.5[m/s] + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{A_1}\right)^{1/4}\right) (1 - \cos(2\pi t/T)) \\ \text{② 為非風況作用時間,} & V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \end{cases} \quad (4.2-26)$$



瞬間水平風切：

$$V(y, z, t) = \begin{cases} \textcircled{1} \text{ 為 } 0 \leq t \leq T, & V_{hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \pm \left( \frac{y}{D} \right) \left( 2.5[m/s] + 0.2\beta\sigma_1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4} \right) (1 - \cos(2\pi t/T)) \\ \textcircled{2} \text{ 為非風況作用時間,} & V_{hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \end{cases} \quad (4.2-27)$$

上二式中， $\alpha = 0.2$ ； $\beta = 6.4$ ； $0 \leq t \leq T$ 為該風況作用時間； $T = 12$ 秒，為作用時間長度； $\sigma_1$ 由式(4.2-2)求得（針對正常紊流模型）； $\Lambda_1$ 為式(4.2-18)之紊流尺度參數； $D$ 為葉輪直徑。

極端風切可以分為瞬間垂直風切以及瞬間水平風切二種。瞬間垂直風切含有二種可能（正向、負向）都要考量；瞬間水平風切則是由正、負號產生的結果中取較為不利者。因此極端風切（EWS）風況的考量可拆分為三種：(1) 正向瞬間垂直風切；(2) 負向瞬間垂直風切；(3) 正號或者負號（導致較不利者）的瞬間水平風切。

上述所列風況之正常與極端條件設計參數，得以長期本土觀測資料予以修正。

進行歷時反應分析時，可用上述正常條件及極端條件下之設計參數，產生不同風況之風速歷時資料。根據風力機運轉狀態，適當選擇不同風況以進行第3.3.4節載重組合分析。評估各風況之風載重時，應說明離岸風力機之氣動力（風力或風壓）係數及氣動力載重之計算依據，且應檢核不同風況下均不得有氣動力不穩定現象。

氣動力載重分為擬靜態載重與動態載重等二種形式，依照相關載重組合之規定考量之，主要由氣流與靜止狀態及運轉狀態的風力機組件之間的交互作用而成。氣動力載重取決於葉輪旋轉速度、橫跨葉輪截面上的平均風速、三維紊流強度、風切、風向變化、空氣密度和風力機組件的形狀與其間之交互效應（包含氣動彈性效應）。評估風力機風載重時，應考慮下列影響：

1. 由風力機本身引起的風場擾動，例如尾流引發的速度、塔架本體影響、塔架上風效應等。
2. 三維流場對葉片空氣動力特性的影響，例如三維失速和空氣動力葉片尖端損失。
3. 氣流引致的葉片動態失速效應。
4. 氣動彈性效應。
5. 葉輪葉片的生產或安裝公差可能造成的氣動不對稱性。應檢核該等公差是否符合經驗公差，在未能確認該等公差時，可假設葉片攻角的偏差為 $\pm 0.3$ 度（以三葉片風力機而言，第一葉片設為0度；第二葉片設為-0.3度；第三葉片設為+0.3度）。
6. 結構構件的氣動載重（升力、阻力、扭矩）。

結構構件的空氣動力係數應按照 EN 1991-1-4 或同等的國際耐風設計標準計算之。對於標準中未明列空氣動力係數可供參考者，得以風洞試驗或其他合適方式進行空氣動力係數之測定作為評估氣動載重之手段。

風力機設置若受上游風力機尾流影響時，有可能增加在該風機上的載重。故應提出位於迎風處單一或複數風力機尾流對風載重所造成的影響評估。一般而言，評估對載重造成的影響，也會在疲勞計算時考量到增加的紊流強度。相關評估方法，可參考 CNS 15176-1 風力機-第一部：設計要求，2018 年版附錄 D 的 Frandsen 模式、或 IEC 61400-1,2019 附錄 E.2 的 Dynamic wake meandering model 模式。

### 4.3 水位

水位分析應考量潮汐及暴潮等水位變化因素，以特定場址之長期水位資料進行統計，並考量天文潮與氣象潮分析等，評估相關水位範圍、分潮特性及極端水位。

#### 【解說】

除非經證明水位變化並不顯著，離岸風力機於評估水動力載重時，應考量特定場址之水位變化，並於註明高程基準下，確認以下水位參數，如圖 4.3-1 所示。

1. 平均海水位 (MSL)。
2. 最高天文潮 (HAT) 和最低天文潮 (LAT)。
3. 包含正暴潮之最高靜水位 (HSWL)。
4. 包含負暴潮之最低靜水位 (LSWL)。

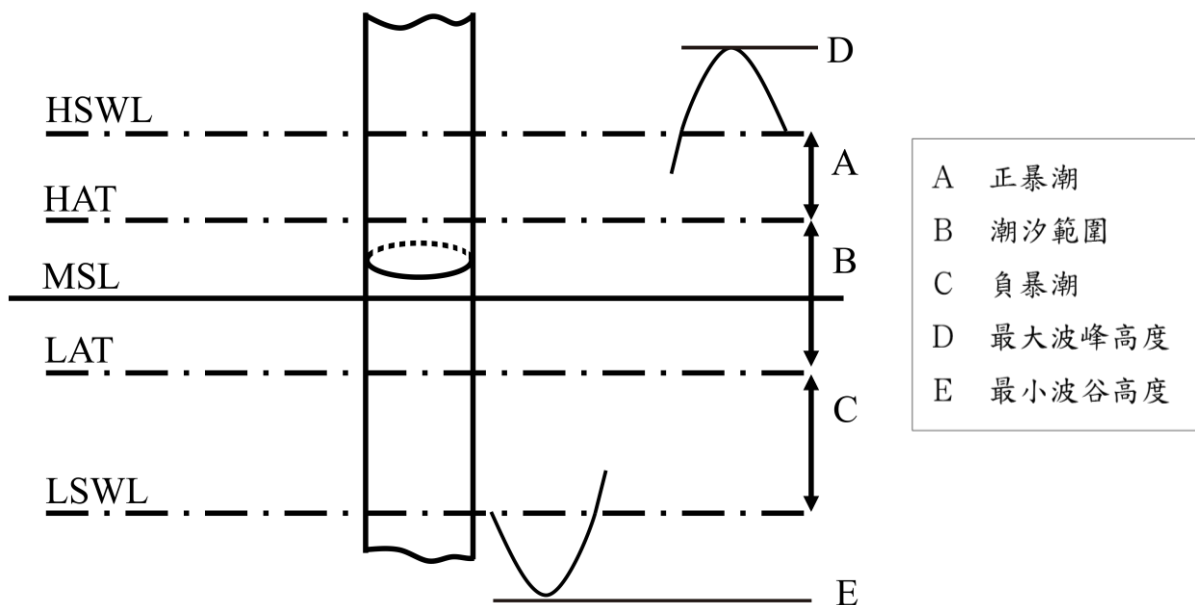


圖 4.3-1 各種潮位及潮差的定義示意圖

相關參數應從特定場址之海洋氣象數據中統計分析而得。有關天文潮及暴潮之分析原則，可參考 ISO 19901-1 之說明。

設計時須評估之水位範圍應包含：

#### 1. 正常水位範圍 (NWLR)

對於海況與風速之聯合機率分布 ( $H_s$ 、 $T_p$ 、 $V_{hub}$ ) 相關之正常海況模型，其疲勞限度狀態 (FLS) 和極限限度狀態 (ULS) 分析的載重組合，應假設其水位條件採用正常水位範圍。正常水位範圍亦適用於與下列設計載重有關之極限限度狀態 (ULS)：

- (1) 嚴苛海況。
- (2) 1 年回歸期之波浪條件。

對於進行極限限度狀態 (ULS) 分析之載重組合，應於正常水位範圍中，選取造成最大載重之水位進行計算，或適當考慮正常水位範圍內水位之機率分布。對於與嚴苛海況有關之極限限度狀態 (ULS)，符合正常水位範圍之水位可能導致波高受水深限制而降低，故可於極端水位範圍中假設較高之水位以保守避免此狀況發生。

對於水動力疲勞載重計算之水位設定，若水位變化對疲勞載重之影響可以忽略不計，設計者應藉由適當分析證明，或者以大於或等於平均海水位之固定水位值保守設定之。

#### 2. 極端水位範圍 (EWLR)

極端水位範圍應綜合考量天文潮及暴潮等之影響因素，並得視需要納入氣候變遷海水位上升之影響，以 50 年回歸期之最高及最低靜水位設定之。對於與 50 年回歸期波浪條件有關之極限限度狀態 (ULS)，其關聯水位須以極端水位範圍進行考量，且進行各相關載重計算時，應考量對離岸風力機造成最大載重之水位。

如無法取得包含水位之海洋氣象參數長期聯合機率分布，設計者至少應依下列水位進行計算：

- (1) 50 年回歸期之最高靜水位，以最高天文潮及正暴潮之適當組合為基準。
- (2) 50 年回歸期之最低靜水位，以最低天文潮及負暴潮之適當組合為基準。
- (3) 與最大碎波載重有關之水位。

### 4.4 波浪載重

應綜合考量風況與波浪之相關性，以特定場址之長期海洋氣象資料進行統計分析，評估各種海況下之波浪特性及設計波浪載重。

#### 【解說】

波浪之形狀並不規則，且在波高、波長及波傳速度上有著諸多變化，並可能從一個或多個方向同時傳遞至離岸風力發電廠。一般可採用隨機波浪模型 (Stochastic Wave Model) 描述海況，以反映海況之實際特徵。隨機波浪模型將海況視為由許多個不同振幅、頻率、相位及波傳方向之週期性成分波疊加而成，故可由波譜 ( $S_\eta$ )、示性波高 ( $H_s$ )、波譜尖峰週期 ( $T_p$ ) 以及平均波向 ( $\theta_{wm}$ ) 加以描述。若有分析需要時，波譜可使用方向擴散函數 (Directional Spread Function) 加以補充，相關標準波譜可參考 ISO 19901-1。

在某些載重計算情境中，可採用週期波或規則波代表實際海況，其設計波浪應以波浪高度、週期及方向表示。

設計時應考慮風況與波浪之相關性。此相關性應就下列參數之長期聯合機率分布加以考慮：

1. 平均風速  $V$ 。
2. 示性波高  $H_s$ 。
3. 波譜尖峰週期  $T_p$ 。
4. 水深  $d$ 。

參數之聯合機率分布受風域、水深及海域地形等場址局部條件影響。因此，該分布應由合宜之長期觀測資料訂定之，或視需要採用經與觀測資料驗證後之數值後報模式以取得分析所需之長期資料。

正常風況和海況之相關性亦須綜合考量平均風向及波向之風浪錯位 (Wind-wave Misalignment)，風向和波向之多向性分布對作用在支撐結構上之載重有重要影響。影響之程度取決於二者之方向與支撐結構之特性，例如特徵頻率 (Eigen-frequency)、模態阻尼 (Modal Damping)、模態振型 (Mode Shape) 與幾何對稱性等。設計者於適當分析後，若可證明風與波浪同向 (在對結構影響最大之方向上) 作用之假設為保守考量時，可採用此假設進行評估。此外，於考量風浪錯位時，應特別注意方向性之數據資料及風力機模擬技術之可靠性。

設計時應評估碎波 (Wave Breaking) 之影響。碎波可分為溢外型 (Spilling)、捲入型 (Plunging) 及洶湧型 (Surging)，碎波發生類型與特定場址之波浪及海床等條件有關，取決於場址水深、海床坡度和波浪週期等條件，相關原則性說明可參考 IEC 61400-3-1 附錄 B。

計算水動力載重時應依場址特性、理論適用範圍及計算需求等因素，選定適合於描述特定場址水動力特性之理論及方式。在水中構件尺寸  $D$  小於波長  $0.2\lambda$  ( $D < 0.2\lambda$ ) 情況下，於選擇適當之波浪理論描述水分子運動後，可採莫利森公式 (Morison's Equation) 計算作用於水中細長構件之黏滯拖曳力及慣性載重；惟若水中構件尺寸相對較大 ( $D > 0.2\lambda$ ) 時，因繞射 (Diffraction) 效應顯著，莫利森公式不再適用，而應依循波浪理論，並附加無流體通過繞射結構之邊界條件進行計算，一般而言可採用匯源法 (Sink-source Method) 或有限元素法等數值方法分析。有關波浪理論之相關原則性說明，可參考 IEC 61400-3-1 附錄 B；有關水動力載重計算之相關原則性說明，則可參考 IEC 61400-3-1 附錄 C。

流體中之渦流形成並通過圓柱基礎時，將對結構體造成動態載重，並可能造成結構自然頻率與激發頻率間之共振。一般渦致振動可能起因於穩定海流或長週期波相關之水分子流速，設計時應避免可能發生共振之條件，或採取特定方法防範共振產生，相關評估原則可參考 IEC 61400-3-1 附錄 C。

下列之波浪模型以隨機線性波浪模型之代表資料及規則之非線性設計波浪所定義，隨機海況應以適用於離岸風力發電廠特定場址之波譜為基礎。

#### 1. 正常海況 (NSS)

正常海況定義為於相關聯之平均風速條件下，示性波高之期望值。設計時應依特定場址之海洋氣象數據，分析以下參數之長期聯合機率分布：

- (1) 輪轂高度處之平均風速  $V_{hub}$ 。
- (2) 示性波高  $H_s$ 。
- (3) 波譜尖峰週期  $T_p$ 。

計算疲勞限度狀態 (FLS) 之疲勞載重時，設計者應確認所考慮正常海況之數量與解析度足以描述與海洋氣象參數之長期分布相關之疲勞損傷。

計算極限限度狀態 (ULS) 載重組合時所考量之正常海況，應於給定平均風速值下，以示性波高 ( $H_s$ ) 及波譜尖峰週期 ( $T_p$ ) 加以描述，設計者應考量適用於每個示性波高 ( $H_s$ ) 之波譜尖峰週期 ( $T_p$ ) 範圍，且設計時應以上述對離岸風力機造成最大載重之波譜尖峰週期值為基礎。

分析風與波浪聯合機率分布時，應注意風及海況之所採用平均週期，並視需要進行轉換。如有必要，聯合機率分布得包括風向和波向等資訊。對於聯合機率分布之區間解析度而言，風速之區間間隔應小於或等於 2 m/sec，示性波高之區間間隔應小於或等於 0.5 m，波浪週期之區間間隔應小於或等於 0.5 sec。若有方向統計資料，風和波浪方向之扇區間隔應小於或等於 30°。

波譜和方向擴散函數可參考 ISO 19901-1，並配合適當且可靠之觀測資料訂定之。

## 2. 嚴苛海況 (SSS)

嚴苛海況一般用於與正常風況之組合，以計算離岸風力機在發電時之極限限度狀態 (ULS) 載重組合，故應建立離岸風力機可發電範圍內之正常風況與嚴苛海況間之關聯性，每一特定平均風速 ( $V_{hub}$ ) 所對應之嚴苛海況，通常應依特定場址之海洋氣象數據進行外插計算，以求得與特定平均風速 ( $V_{hub}$ ) 之組合具 50 年回歸期載重效應之嚴苛海況示性波高 ( $H_{s,SSS}(V)$ ) 及相關之極端個別波高。設計者應考量適合每個極端波高之波浪週期範圍，若缺乏相關之機率評估，設計計算應以上述波浪週期範圍內對離岸風力機造成最大載重之波浪週期值為基礎。

若缺乏風和波浪之長期聯合機率分布時，對於所有平均風速而言，可將回歸期為 50 年之無特定條件極端示性波高 ( $H_{s50}$ ) 視為嚴苛海況示性波高 ( $H_{s,SSS}(V)$ ) 之保守值，對於嚴苛海況下之極端個別波高，亦可保守採用極端個別波高 ( $H_{50}$ )。

以外插方式計算嚴苛海況時，可採用逆一階可靠度方法 (IFORM)，以特定場址之海洋氣象數據分析推算平均風速 ( $V_{hub}$ ) 及示性波高 ( $H_s$ ) 具 50 年回歸期載重效應組合之環境等值線 (Environmental Contour)，據以訂定嚴苛海況之示性波高 ( $H_{s,SSS}(V)$ )，相關說明可參考 IEC 61400-3-1 附錄 F。

## 3. 極端海況 (ESS)

極端海況定義為具特定回歸期 (一般為 1 年或 50 年) 之無特定條件示性波高 ( $H_{s,ESS}$ )，設計者須依特定場址之海洋氣象數據進行分析評估，並考量與其他海況條件 (如水位變化及海流等，參照第 4.3 節或第 4.5 節解說) 之組合，以確定極端示性波高 ( $H_{s50}$ 、 $H_{s1}$ ) 與極端個別波高 ( $H_{50}$ 、 $H_1$ ) 等適當極端海況之設計參數。設計者應考量適合每個極端波高之波浪週期範圍，並以上述波浪週期範圍內對離岸風力機造成最大載重之波浪週期值為依據。

若缺乏風和波浪長期聯合機率分布時，可假設特定回歸期之 10 分鐘極端風速 ( $V_{e50}$ 、 $V_{e1}$ ) 於相同回歸期之 3 小時極端海況期間發生。在模擬極端海況期間，應假設極端個別波高隨機發生。

計算極端海況時，應考量下列參數：

- (1) 50 年回歸期之示性波高  $H_{s50}$  (海況期間一般假設為 3 小時)。
- (2) 1 年回歸期之示性波高  $H_{s1}$  (海況期間一般假設為 3 小時)。
- (3) 50 年回歸期之極端個別波高  $H_{50}$ ，以及其波浪週期之對應範圍。
- (4) 1 年回歸期之極端個別波高  $H_1$ ，以及其波浪週期之對應範圍。
- (5) 50 年回歸期之極端波峰高度。

在臺灣，颱風為影響極端波浪之主要因素之一，故設計時應審慎考量；通常在海上缺乏充足觀測資料之限制下，可考量採用適當之模型颱風建立颱風風場，並搭配波浪數值模式進行推算，以評估颱風條件下之極端波浪，相關原則性說明可參考 IEC 61400-3 附錄 H。

極端示性波高和極端個別波高可由多種方式訂定，極端示性波高一般係依據特定場址之海洋氣象數據，以極值統計分析方法求得，極端個別波高可透過示性波高  $H_s$  及波譜尖峰週期  $T_p$  長期分布與特定示性波高對應之個別波高短期分布卷積 (Convolution) 求得，且極端波高值可能受特定場址水深條件而有所限制，相關說明可參考 ISO 19901-1。

若既有資料不足以評估極端波高和相關波浪週期範圍，在深水條件下，極端個別波高 (最有可能發生之極端個別波高) 可假設為：

$$H = 1.86H_s \quad (4.4-1)$$

此關聯係基於假設波高之統計機率分布符合瑞利分布 (Rayleigh distribution)，且在 3 小時海況與個別波數為 1,000 時 (相當於波浪平均週期約為 10.8 秒) 之瑞利分布最大波高眾數，與此波高相關聯之波浪週期範圍則可假設為：

$$11.1\sqrt{H_s/g} \leq T \leq 14.3\sqrt{H_s/g} \quad (4.4-2)$$

對於給定之波高，其波浪週期具有與水深相關之下限值，該下限值與碎波高度之限制有關，可參考 IEC 61400-3-1 附錄 B。

須注意在深水條件下  $H_{50}/H_{s50}$  和  $H_1/H_{s1}$  之比值通常在 1.9 至 2.0 範圍間，對於無法進行觀測之淺水區域，若  $H_{50}$  和  $H_1$  小於對應示性波高值之 2 倍時，可將其波高值視為碎波之波高。

## 4.5 海流載重

應綜合考量包含潮流、洋流、風驅流或近岸流等海流分量，以特定場址之長期海流資料進行統計分析，評估設計海流流速、海流模式及設計海流載重。

### 【解說】

海流除影響離岸風力機支撐結構載重，亦會影響運維船靠泊與防舷材之位置及方向，並可能造成海床淘刷。海流雖隨空間及時間變化，但通常可視為速度與方向恆定之水平均勻流場，流速僅隨深度而變化，下列有關海流速度之分量應考慮在內：

1. 潮汐、暴潮及大氣壓力變化等因素造成之水面下海流。
2. 風造成之近表面流 (風驅流)。

海流之每一重要分量之速度與方向特性，應分別予以評估，海流速度即為上述分量之向量和。相關參數應從特定場址之海洋氣象數據中統計分析而得，或參考以下方式訂定：

### 1. 水面下海流

水面下海流剖面可由簡單冪次律及水深 ( $d$ ) 描述之。其中，海流速度 ( $U_{ss}(z)$ ) 為靜水位 (SWL) 以上高度  $z$  之函數：

$$U_{ss}(z) = U_{ss}(0)[(z + d)/d]^{1/7} \quad (4.5-1)$$

水面流速 ( $U_{ss}(0)$ ) 之 1 年及 50 年回歸期數值，可藉由分析特定場址之觀測或後報數據求得。一般狀況下，可保守假設水面下海流與波向相同。

海流速度隨深度之變化可依上述剖面訂定。若有適當且可靠之觀測數據，特定場址之海流流速剖面可由分析統計求得，以作為離岸風力機之設計及/或設計驗證之基礎。

### 2. 風造成之近表面流 (風驅流)

風造成之海流可由速度 ( $U_w(z)$ ) 之線性分布描述，並由水面流速 ( $U_w(0)$ ) 漸減至靜水位 (SWL) 以下 20 公尺處之流速為 0：

$$U_w(z) = U_w(0)(1 + z/20) \quad (4.5-2)$$

在水深小於 20 公尺之位置，風在海底造成之海流速度將不等於 0 m/s。

風造成之水面流速可假設為與風同向，並可由下列公式估算：

$$U_w(0) = 0.01V_{1-hour}(z = 10m) \quad (4.5-3)$$

式 (4.5-3) 中， $V_{1-hour}(z = 10m)$  定義為靜水位 (SWL) 以上 10m 高度之 1 小時平均風速。 $V_{1-hour}(z = 10m)$  之 1 年及 50 年回歸期數值，可藉由分析特定場址之觀測或後報數據求得，以估算風造成之水面流速之 1 年及 50 年回歸期數值。

由波浪引致之水分子速度及流速，應以向量方式加入。海流對波浪之波長與週期之影響通常極小，因此可忽略不計，相關說明可參考 ISO 19901-1。另依場址特性，有可能有其他海流分量存在，例如波浪於近岸碎波引致平行海岸之沿岸流，設計時應加以考量。

海流在總海流流速遠小於波浪於波峰引致之水分子速度，不致於造成支撐結構渦致振動，對離岸風力機之疲勞載重影響較小。設計者應藉由適當之場址資料評估，判定計算疲勞限度狀態時是否可忽略海流載重。

設計時須考量之海流模式如下：

#### 1. 正常海流模式 (NCM)

正常海流模式定義為場址於非極端條件下風驅流及潮流之組合，在正常海流模式 (NCM) 中，潮流流速應以平均值考量。

對於與正常海況 (NSS) 與嚴苛海況 (SSS) 相關之極限限度狀態載重組合，其海流模式應採用正常海流模式 (NCM)，且各個載重組合之風驅流海流流速可藉由風與流關係式 (4.5-3) 之平均風速加以估算。

## 2. 極端海流模式 (ECM)

極端海流模式應分別考量具 1 年或 50 年回歸期之極端海流流速  $U_1$  及  $U_{50}$ ，並與對應相同回歸期之極端海況 (ESS) 進行載重組合。 $U_1$  及  $U_{50}$  之相關極值應由分析特定場址的觀測或後報數據求得。

對於與極端海況 (ESS) 相關之極限程度狀態載重組合，應採用極端海流模式。在缺乏長期極端情境聯合機率分布資料之情況下，可保守假設海流與波浪同向。

## 4.6 海床變動與淘刷

應依據既有案例、合理之理論評估分析模型或模型試驗等方式，評估特定場址因基礎淘刷及整體海床移動等因素造成之海床高程變化量及範圍，並納入相關設計考量。

### 【解說】

設計基礎結構時，應考慮基礎淘刷及海床變動之影響。基礎淘刷及整體海床變動之分析以及適當防護設計，應符合 ISO 19901-4、API RP 2A-LRFD 或 DNV-ST-0126 等之相關規定。

海床變動包含沙波 (Sand Wave)、沙脊 (Sand Ridge) 或沙洲 (Sand Shoal) 等整體海床移動 (Seabed Mobility) 之現象。

基礎淘刷主要包含以下二項：

1. 局部淘刷 (Local Scour)。
2. 全域淘刷 (Global Scour)。

海床變動與基礎淘刷可能導致基礎結構失去垂直及側向之承载力或超出預期之沉陷及位移，使基礎結構承受過大應力及改變風力機結構動態特性。在可能發生海床變動或淘刷處，設計時應將海床高程之變化列入考量，及/或應考慮緩和措施。

淘刷造成之海床變化可依下列方式分析評估，以估算結構生命週期內，海床面變化範圍及可能淘刷深度之上下限值，並納入結構設計分析考量。

1. 參考鄰近場址或海底特徵類似場址之歷史資料、監測資料或案例分析成果。
2. 特定場址之水工模型試驗或數值模型。
3. 依不同條件之試驗成果，經校正計算或採經驗公式。

## 4.7 海嘯載重

如特定場址具海嘯侵襲疑慮時，設計時應考量海嘯發生機制、特定場址水深與海底地形特性等因素，以歷史紀錄蒐集、經驗公式或海嘯數值模擬等方式，評估海嘯載重。

### 【解說】

有鑑於海嘯為離岸風力發電廠可能之危害來源，應考慮離岸風力機支撐結構全生命週期內可能發生之海嘯致災情境 (包含但不限於海底山崩及海溝海嘯等)，並據以進行水位分析及



潮湧力評估。潮湧力包含靜水壓力及動水壓力，以離岸風力發電廠而言，海嘯所引起的動水壓力對結構設計影響較大，除了數值模擬外，其簡易評估方法可以式 (4.7-1) 計算海嘯接觸結構體時的流速後，代入莫利森公式 (Morison's Equation) 計算動水壓力之拖曳力，如其值明顯小於其他設計載重情況者，經工程評估後，可免除詳細的海嘯載重評估。否則須委託專業機構進行詳細評估。

$$u = \frac{\eta}{d} \sqrt{gd} \quad (4.7-1)$$

其中， $u$ ：海嘯接觸結構體時的流速； $\eta$ ：海嘯於風力機處之水位抬升高度，應考慮地震規模、地震機制、震源位置等因素評估之； $d$ ：海水水位深度； $g$ ：重力加速度。

#### 4.8 地震載重

應考慮不同限度狀態對應之地震載重，以機率式地震危害度分析程序求得堅實地盤之譜加速度反應譜，並考量該場址之土層特性求得結構動力分析所需之輸入地震歷時與設計地震反應譜。

##### 【解說】

離岸風力發電廠特定場址地震載重之評估程序如圖 4.8-1 所示。極限度狀態 (ULS) 須考慮 475 年回歸期之地震載重；使用限度狀態 (SLS) 則須考慮 95 年回歸期之地震載重。以機率式地震危害度分析 (PSHA) 分別求得特定場址堅實地盤 ( $V_{s30} \geq 360\text{m/s}$ ) 在 475 年與 95 年回歸期下之譜加速度反應譜 (5% 阻尼比)，配合特定場址主要危害貢獻之控制震源參數及對每處風力機與變電站位置之地盤反應分析，獲得各個風力機與變電站位置結構動力分析所需輸入運動位置之地震歷時。地震載重評估程序作業細節，可參考 CNS 15176-1 (2018) 附錄 H 之規定。

特定回歸期之地震載重評估程序說明如下：

##### 1. 特定場址堅實地盤 ( $V_{s30} \geq 360\text{m/s}$ ) 譜加速度反應譜之建立

執行機率式地震危害度分析時，應先研判特定場址範圍內須進行分析之代表點位與數量，以反映我國地震源特徵分布不均、風場幅員範圍內各點位危害度分析結果可能之差異性。地震危害度分析所採用之地震源模型須包含特定場址半徑至少 200 公里範圍內所有影響震源，配合對應堅實地盤的地震動評估公式進行分析。堅實地盤譜加速度反應譜須能代表特定場址之地震危害潛勢，其週期範圍至少在 0.01 秒至 10 秒間。

堅實地盤之垂直向譜加速度反應譜，至少應為水平向譜加速度反應譜的 1/2。

若特定場址土層經探查未達堅實地盤條件，則應採用可反映特定場址地盤條件之地震動評估公式進行地震危害度分析，以求得取代堅實地盤 (視為堅實地盤) 之譜加速度反應譜，據以進行後續地盤反應分析。

##### 2. 每處風力機與變電站位置地盤反應分析之要求

地盤反應分析輸入運動歷時之位置為堅實地盤處。輸入運動歷時所篩選之原始歷時紀錄，須能反映特定場址主要危害貢獻之控制震源特性。

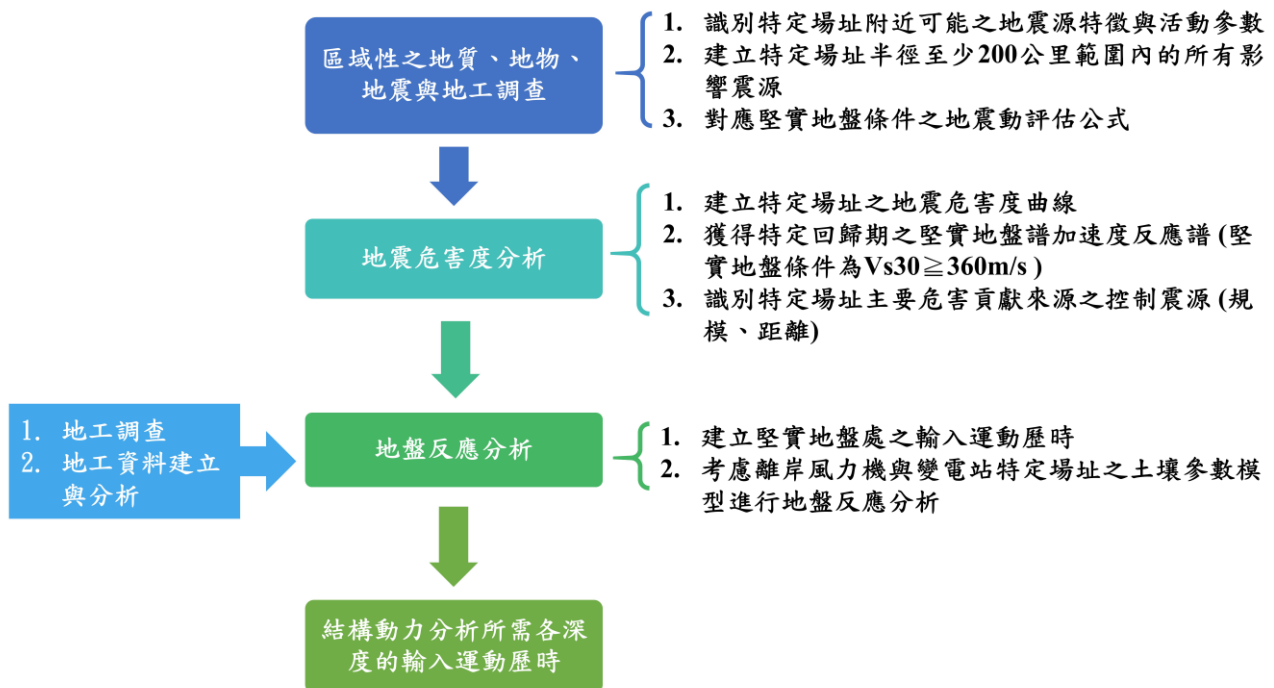
地盤反應分析時，應考慮特定場址所在之地層分布、土層材料性質及地形特徵。地層的靜態及動態工程性質應考量風場地層之變化、剪力模數衰減與阻尼曲線 (Shear Modulus Reduction and Damping Curve) 的變異性。

地盤反應分析時，在堅實地盤處應至少採用 7 組 (各組包含二筆水平向與一筆垂直向地震紀錄) 輸入運動歷時。各組運動歷時之建立應以特定場址堅實地盤之譜加速度反應譜為目標反應譜，並符合下列二項要求之一：

- (1) 與反應譜相符的人造地震歷時 (Spectrum Compatible Time History)：其地震反應譜週期範圍內，任一週期點的譜加速度值與目標反應譜值之差異須在  $\pm 10\%$  以內。
- (2) 依比例調整之實際地震歷時 (Scaled Time History)：由各組二水平向實際地震紀錄組合旋轉角度求得最大地震反應譜，即為最大方向 (Maximum Direction) 的地震反應譜，以其與目標反應譜相比求取比例調整因子 (Scaling Factor)。比例調整因子之計算以求得結構週期範圍內實際反應譜與目標反應譜之最小的平方差 (MSE) 為主。候選 7 組地震反應譜在週期範圍內之任一週期點的平均值，不得低於目標反應譜值的 90%。進行地盤反應分析時，各組二水平向輸入運動歷時應採用相同之比例調整因子。

考量垂直向地震效應時，不同深度土層之輸入運動歷時可逕行採用堅實地盤者，得不須考慮垂直向場址放大效應。

評估土壤液化對基礎設計之影響時，除須檢核極限狀態 (ULS) 下地震動造成之基礎結構最大受力與變位及其震後變位與傾角外，另須檢核使用限度狀態 (SLS) 下地震動造成之基礎結構震後變位與傾角，詳細內容參照本指引第 4.9 節。土壤-基樁結構互制效應之非線性土壤性質模擬，須符合第 5.3.2 節之規定。



## 4.9 土壤液化

如基礎座落於具土壤液化潛勢地層，其設計應先進行土壤液化潛勢分析，評估土壤液化對基礎之影響，確認基礎於地震液化過程中之最大受力及震後永久位移及傾角等須能符合性能需求。

### 【解說】

地震時飽和疏鬆砂層或砂質粉土層於地震力反覆作用下，將激發土壤之超額孔隙水壓，當超額孔隙水壓等於土壤初始有效應力時，土壤有效應力為零，將喪失其強度與承載能力，稱之為土壤液化。場址發生液化將影響風力機基礎結構之承載行為。若經評估，場址具有液化潛勢時，應合理模擬液化土壤與風力機基礎結構互制之受震反應，檢核地震液化條件下基礎結構之受力與變形是否符合離岸風力機之安全與功能需求。風力機基礎耐震設計，應分別考量土壤發生液化與未發生液化等二種分析情境，並採用較保守之分析結果進行設計。

離岸風力機土壤液化潛勢評估及基礎設計檢核之流程如圖 4.9-1 所示，說明如下：

#### 1. 土壤液化潛勢評估

場址內每處風力機與變電站之位置均須進行土壤液化潛勢評估。海床下 20m 深度範圍內之土壤液化潛勢評估宜採用 SPT-N 或 CPT-*qc* 之簡易評估法進行分析；海床下 20m 深度以下土壤之液化潛勢評估應採用地盤反應分析搭配室內液化試驗之方法進行分析，後者可稱之為地盤反應分析法，又可區分為總應力法與有效應力法。

##### (1) 簡易法

此法為實務界最常見之分析方法，係以常見之現地試驗包含標準貫入試驗 (SPT)、圓錐貫入試驗 (CPT) 所得之貫入參數 (如 SPT-N 與 CPT-*qc*) 評估土層抗液化剪力強度比 (CRR)，分別稱為 SPT-N 與 CPT 簡易法。再利用對應 475 年回歸期地震之海床最大水平加速度與地震規模，以經驗公式評估地震引致各深度土層之平均反覆剪應力比 (CSR)，最後計算各地層之抗液化安全係數  $F_L = CRR/CSR$ 。當  $F_L$  小於 1 時，即可判斷該地層於設計地震作用下會發生液化。

離岸風力發電廠之現地試驗主要為 SPT 與 CPT，其評估用之 SPT-N 簡易法建議採用 HBF 法 (Hwang et al., 2019)<sup>1</sup>、NCEER 法 (Youd et al., 2001)<sup>2</sup>、AIJ 法 (日本建築學會, 2001)<sup>3</sup> 與 JRA 法 (日本道路協會, 1996)<sup>4</sup> 等方法進行評估。CPT 簡易法則建議採用 Robertson 法 (Robertson et. al, 2009)<sup>5</sup>、B&I 法 (Boulanger and Idriss, 2016)<sup>6</sup>、HBF 法 (黃俊鴻等人, 2005；Lu et al., 2021)<sup>7,8</sup> 與 K-J 法 (Ku and Juang, 2012)<sup>9</sup> 等方法進行評估。

1. Hwang, J.H., Lu, C.C., Chen, C.H., and Juang, C.H., 2019, "A new simplified method for assessing liquefaction potential of soils: Twenty years development of HBF method," International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taipei, Taiwan.
2. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Liam, Finn, W.D., Harder Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Laio, S.S.C., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe II, K.H., 2001. "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 1, pp 297-313.
3. 社團法人日本建築學會，建築基礎構造設計指針，社團法人日本建築學會，日本，2001年。
4. 社團法人日本道路協會，道路橋示方書同解說，V耐震設計編，社團法人日本道路協會，日本，1996年。
5. Robertson, P.K., 2009. "Interpretation of cone penetration tests — a unified approach," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 11, pp. 1337-1355.
6. Boulanger R.W., and Idriss, I.M., 2016. "CPT-based liquefaction triggering procedure," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 142, No. 2, pp. 04015065-1-11
7. 黃俊鴻、楊志文、陳正興，2005，「本土化液化評估方法之建議-雙曲線液化強度曲線」，土工技術，第 103 期，第 53-64 頁。
8. Lu, C.C., Hwang, J.H., and Wang, J.S., 2021, "An introduction of the local CPT-based simplified procedure," No. 120, pp. 10.
9. Ku, C.S. and Juang, C.H., 2012. "Liquefaction and cyclic softening potential of soils – a unified piezocone penetration testing-based approach," Geotechnique, Vol. 62, No. 5, pp. 457-461

這些簡易法均經長時間之發展與應用，原則上都有參考價值。惟各法都有其發展背景、基本資料庫、以及限制條件等，使用時應謹慎評估。

## (2) 地盤反應分析總應力法

此法無評估深度之限制。地震引致各深度土層之平均反覆剪應力比 (CSR) 係以頻率域波傳理論為基礎的分析軟體，進行地盤受震反應分析求得。其土層抗液化剪力強度比 (CRR) 係在實驗室以不擾動土樣，分別進行動力三軸試驗或反覆單剪試驗，並經現地應力以及多向度地震動作用等因子修正後，求得土層抗液化剪力強度比 (CRR)。再計算各地層之抗液化安全係數  $F_L = CRR/CSR$ 。當  $F_L$  小於 1 時，即可判斷該地層於設計地震作用下會發生液化。

## (3) 地盤反應分析有效應力法

此法亦無評估深度之限制，其地盤反應分析係在時間域進行，可考慮地震期間土壤因孔隙水壓上升而軟化之非線性行為，可求得較合理之地盤受震反應。因需使用複雜的土壤組成模式與孔隙水壓激發模式，其土壤參數須進行擬合室內試驗所得之抗液化曲線進行參數校正，分析結果方具代表性。在地震歷時分析過程中若土層之超額孔隙水壓 ( $\Delta u$ ) 趨近於初始有效應力 ( $\sigma'_v$ )，即超額孔隙水壓比 ( $r_u = \Delta u/\sigma'_v$ ) 趨近於 1.0，可視為發生液化。

## 2. 液化對基礎設計之影響及檢核

土壤液化將降低離岸風力機基礎之承载力與增大其變形量。

檢核工作包含以下二階段：

### (1) 以簡易分析法採用擬靜態分析方式檢核極限狀態 (ULS) 下之基礎結構受力與基礎承载力。

依據液化土層之抗液化安全係數與土層深度，評估其地盤參數折減係數，對其未液化強度與模數加以折減，此即為土壤強度參數折減法。折減係數可參考內政部最新版之「建築物耐震設計規範」或其他國際相關標準/規範辦理。

極限狀態 (ULS) 之液化評估須採用 475 年回歸期之地震載重。

### (2) 以動力歷時分析法進行下列液化土層與基礎動態互制分析：

應以可反映風力機全結構模型行為之方法 (如全結構模型、模型試驗或其他經審查認可之方法) 進行地震動力歷時分析與模擬，全結構模型之模擬應包含液化/未液化土層、支撐結構 (含基礎) 與轉子機艙總成質量等要素，以考慮土壤液化、轉子機艙總成與塔架慣性力對基礎受力及變形的影響。地震載重以外之其餘環境載重，可採用靜力方式進行加載。

- A. 以有效應力分析法檢核使用極限狀態 (SLS) 下之基礎結構震後變位與傾角，其容許值應依據相關規範或由風力機製造商提供，此時須採用 95 年回歸期之地震載重。
- B. 以有效應力分析法檢核極限狀態 (ULS) 下之基礎結構最大受力與變位，以及其震後變位與傾角，以確定引致的損傷程度在可接受的範圍內，此時須採用 475 年回歸期之地震載重。
- C. 各設計分群 (Cluster) 應至少選擇一處土壤液化影響最嚴重的風力機場址進行上述 A 與 B 項之分析。

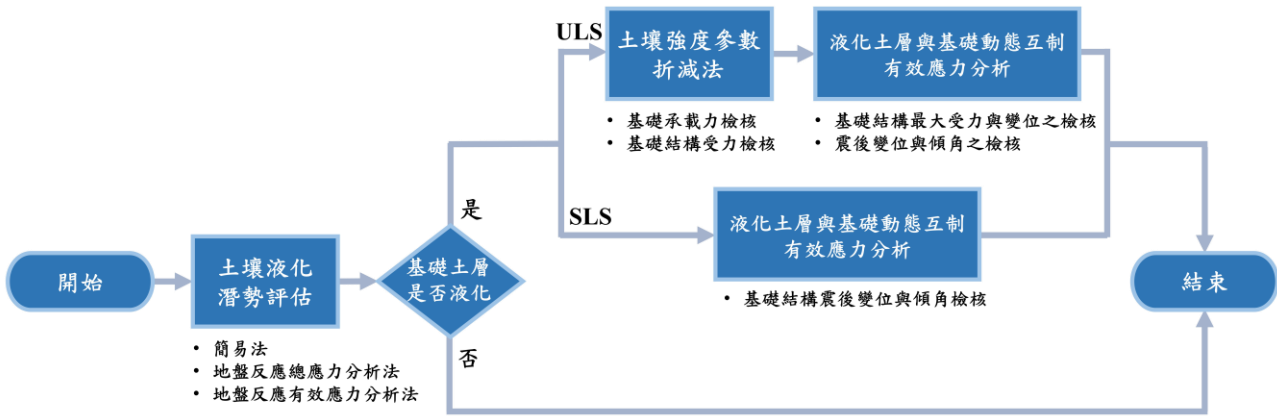


圖 4.9-1 離岸風力機土壤液化潛勢評估及基礎設計檢核之流程圖

#### 4.10 海洋附生物

應參考既有觀測資料或鄰近區域之案例經驗，評估海洋附生物之成長潛勢，並納入包含海洋環境條件載重、鋼材腐蝕速率及離岸風力機動態反應等之設計考量。

##### 【解說】

海洋附生物會對下部結構與基礎之質量、幾何形狀以及表面粗糙度產生影響，設計時應將海洋附生物可能附著之型式、容許厚度及深度等條件計入結構外管徑尺寸，並將其粗糙度對水動力參數之影響納入考量，以正確反映海流及波浪引致之水動力載重。

海洋附生物大致可分為「硬質」(通常為貽貝及藤壺等動物)及「軟質」(海草及海藻)等二種，通常在下部結構與基礎安裝後，海洋附生物很快開始附著，但數年之後，增長率會逐漸下降。海洋附生物之性質與厚度，一般與結構構件相對於海平面之位置、相對於主海流之方向、壽命和維護策略有關，亦與其他場址環境條件，例如鹽分、含氧量、pH 值、海流及溫度相關。

海洋附生物之設計容許厚度須參考相關規範之建議、既有觀測資料或當地之案例經驗加以考量，並提出配套的運轉及維護計畫。

#### 4.11 腐蝕

應依據特定場址之腐蝕環境、構件屬性、高程分區及維護條件，擇定腐蝕防護系統，以符合耐久性與安全性之要求。

##### 【解說】

依據 ISO 9223 及 ISO 12944-2 腐蝕環境分類，可分為大氣環境及水中和土壤環境等二種之腐蝕環境分類。大氣環境之腐蝕分類，由低至高為 C1、C2、C3、C4、C5、CX 等六級，其中 CX 為極端的腐蝕性，離岸環境中構造物外露面即屬之；水中和土壤環境之腐蝕分類則為 Im1-Im4，相關分級定義與說明如表 4.11-1 所示。

就固定式離岸風力機之構件，塔架、轉子機艙總成及位於海上大氣帶之下部結構等曝露於大氣環境部分，構件的外部腐蝕防護須適用 CX 腐蝕環境的防蝕保護，無封閉構件的內部須適用 C4 腐蝕環境的防蝕保護，而封閉構件的內部則須採用 C3 腐蝕環境的防蝕保護；位於浸沒區之下部結構，腐蝕防護須適用於 Im4 腐蝕環境的防蝕保護；而埋置於海床下之結構，腐蝕防護須適用於 Im3 腐蝕環境以上的防蝕保護。除因大氣或海洋條件使鋼材產生腐蝕外，另海床附近如有漂沙活動，亦會造成鋼材表面之腐蝕（沖蝕腐蝕），應納入評估考量。

表 4.11-1 腐蝕環境分類與說明

腐蝕環境分類		說明
大氣環境	C1	非常低的腐蝕性。
	C2	低的腐蝕性。
	C3	中等的腐蝕性。
	C4	高的腐蝕性。
	C5	非常高的腐蝕性。
	CX	極端的腐蝕性。
水中和土壤環境	Im1	浸沒在淡水河川內的設備，水力發電廠。
	Im2	浸沒在海水或河海交界的鹹淡水中且無陰極保護的結構，例如港口區域之閘門、水閘、防波堤。
	Im3	土壤環境中的儲槽、鋼樁和管線。
	Im4	浸沒在海水或河海交界的鹹淡水中且有陰極保護的結構，例如離岸結構。

金屬結構腐蝕防護方法主要有表面被覆法、陰極保護法與腐蝕容許量。表面被覆法主要是以塗料塗裝、熱浸鍍鋅層或金屬熔射層作為表面被覆，其防蝕原理與設計要點如表 4.11-2 所示。陰極保護法包含外加電流法與犧牲陽極法。

採用腐蝕容許量時須考量構件屬性與高程分區之腐蝕速率。鋼材腐蝕速率會依照大氣區 (Atmosphere Zone, 或稱大氣帶)、飛濺區 (Splash Zone, 包含飛沫帶、潮汐帶及少部分水下帶)、浸沒區 (Submerged Zone, 主要為水下帶) 與海床區 (Buried Zone 或稱海泥帶) 等不同區域而有差異。

腐蝕速率應參考鄰近場址的案例或相似環境條件之調查結果，如無適當之調查資料可供依循時，可參考相關國際標準/規範之規定，並配合特定場址之環境特性予以適當調整。

海底面附近的基礎如位於碎波帶時，會因波浪流動所伴隨海底砂的移動，而產生構件表面之沖擊磨損作用，須採取適當措施因應之。



表 4.11-2 表面被覆法之防蝕原理與設計要點

表面被覆法		說 明
塗料 塗裝	防蝕 原理	(1) 利用塗料塗膜構成被覆層，以阻絕腐蝕因子侵入。
	設計 要點	(1) 表面處理應充分考慮清潔度與粗糙度，以增加塗膜附著性與防蝕能力。 (2) 塗料材料須具足夠抗蝕能力、耐候性與耐久性。 (3) 各層塗料塗膜之密著性要良好。 (4) 要有足夠之塗膜厚度。 (5) 各層塗裝間須有適當間隔時間。
熱浸 鍍鋅	防蝕 原理	(1) 利用鍍鋅層構成被覆層。 (2) 利用鋅具有較鋼鐵電位較負之特性，可以犧牲陽極方式保護鋼材。
	設計 要點	(1) 依據腐蝕環境，要有適當之鍍鋅量。 (2) 應考慮構件尺寸、形狀、斷面及重量，使能完全浸鍍於鍍鋅槽。 (3) 斷面應要避免熱浸時產生變形與扭曲，並注意殘留應力之影響。 (4) 為使螺栓接合之鋼板間滑動係數符合規定，鋼板須作掃砂粗糙處理；並注意高強度螺栓經高溫鍍鋅後之影響。 (5) 不適於單獨使用於潮汐帶及水下帶之防蝕保護。
金屬 熔射	防蝕 原理	(1) 利用鋅、鋁或鋅鋁面層構成被覆層。 (2) 鋅可以犧牲陽極方式保護鋼材，鋁可以形成緻密氧化膜方式阻絕腐蝕因子。
	設計 要點	(1) 表面之清潔度與粗糙度應符合標準，以確保附著性。 (2) 各層材料之選用應以防蝕性、功能性為考量原則。 (3) 依據腐蝕環境，採用適當材料（如鋅鋁合金之組成比率）及熔射層厚度。 (4) 不適於單獨使用於潮汐帶及水下帶之防蝕保護。

## 4.12 其他載重

離岸風力發電廠在設計階段時，除須考量環境條件外，對於其全生命週期內各階段可能發生之預期載重情境，須合理評估並納入設計考量。

### 【解說】

設計階段應考量離岸風力發電廠於其全生命週期內可能發生之其他載重：如維修載重、運輸與施工載重、離岸風力機安裝與拆除引致與運維船舶撞擊等之功能載重 (Functional Loads)。

#### 1. 維修載重

至少須包含維修作業員和所需設備或機器等載重。

#### 2. 運輸與施工載重

設計階段應考量運輸、施工、動線、保養與維修等情境所發生的載重，至少須包含下列項目：

- (1) 施工機具與材料之重量。
- (2) 操作起重設備時引致之載重 (含衝擊載重)。

#### 3. 離岸風力機安裝與拆除引致之載重

設計階段應考量離岸風力機安裝與拆除活動所引致之載重。

#### 4. 運維船舶撞擊

正常船舶撞擊須考量下列情況，其載重組合應依 DLC 8.5 之規定。次要結構船撞桿之船舶撞擊力可參考 IEC 61400-3-1 第 7.4.9.2.2 節。

- (1) 船舶速率不應小於 0.5m/s。
- (2) 允許運維船舶靠近風力機作業之最嚴重海況。

異常船舶撞擊須考量下列情況，其載重組合應依 DLC 8.6 之規定。

- (1) 船舶速率應按實評估，如無詳細合理之評估，撞擊速度不應小於 2.0m/s。
- (2) 結構物所吸收之能量，應視撞擊部位之結構物與船舶相對強度與勁度而定。

設計階段應依據運維廠商所規劃之運維船舶規格 (包含但不限於船速及噸位)，並反映至設計中。納入設計考量之船舶應僅限於預計靠近船靠設施或進出動線系統之運維船舶，而允許於特定場址航行之補給船舶或海上旅館船舶，如不會接近離岸風力機或海上變電站，則毋須考量。



## 第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計

### 5.1 通則

本章適用於固定式離岸風力機支撐結構與相關電力系統之設計。

#### 【解說】

本指引適用於離岸風力機採單樁式 (Monopile)、套筒式 (Jacket) 之固定式支撐結構。如採用其他結構型式如三腳式/三樁式 (Tripod/Tripile)、負壓沉箱 (Suction Bucket) 基礎或重力式基礎等，除本指引可適用者外，應就其特殊性另作考量，但須在設計文件中載明其設計依據。

### 5.2 離岸風力機支撐結構設計原則

#### 5.2.1 一般規定

離岸風力機支撐結構之設計，須考量其全生命週期內可能發生之設計載重效應如下：

1. 永久階段之各項設計載重效應。
2. 臨時階段之各項設計載重效應。

#### 【解說】

臨時階段係指結構製造、儲放/安置、運輸與施工、離岸風力機至完成安裝前及結構拆除 (拆除部分之考量詳運維指引) 之過程，離岸風力機完成安裝後至拆除前之期間則屬於永久階段。設計時應考慮此二階段可能產生之設計載重效應與其對離岸風力機之結構性能影響。

#### 5.2.2 結構設計年限

係指離岸風力機支撐結構自安裝完成到拆除前之連續期間。於此年限內，結構應能承受所有設計載重效應，不得發生影響離岸風力機長期使用性能之結構損害。

#### 【解說】

離岸風力機支撐結構完成安裝後，即開始承受環境載重，尤其風與波浪產生之疲勞載重，此類載重持續反復作用至結構拆除為止，故結構設計年限 (或設計壽命) 應較離岸風力機之設計年限 (本指引規定至少 20 年) 為長。設計時應妥善考慮結構安裝與拆除所需時間，以決定結構設計年限。安裝完成前，可能造成疲勞效應之載重亦應納入考量，參照第 5.2.5 節。

### 5.2.3 自然環境條件

結構設計時應考量下列因素，作為個別特徵載重效應之計算依據：

1. 風況（包含但不限於風速、風向及紊流條件）。
2. 海況（包含但不限於波浪、海流、海水靜水壓、波浪及海流方向）。
3. 水位（包含但不限於潮位及暴潮）。
4. 空氣之溫度、濕度、密度。
5. 海水之溫度、鹽度、密度、電阻率。
6. 土壤或岩石（含長短期效應）。
7. 地震（含土壤液化）。
8. 海洋附生物附著厚度、粗糙度、密度。
9. 材料腐蝕速率。
10. 海床高程變動。

相鄰離岸風力機設置位置之環境條件可能存在差異，亦可能隨時間而改變，此類差異性應納入設計考量。

#### 【解說】

設計階段應將所考量之海洋附生物之設計容許厚度估算（參照第 4.10 節）詳列於設計文件中，提供運轉及維護計畫編定之參考。運轉及維護計畫之內容至少包含海洋附生物之相關檢測/監測方法與海洋附生物去除準則等項目。

每座離岸風力發電廠可能包含數十部以上離岸風力機，場址邊緣二端可相距數公里以上，其海床高程、土壤或岩石、土壤液化、海況、風況等條件可能顯著不同，亦可能因時間而變化。故分群原則應能涵蓋分群範圍內自然環境條件之差異性，且各分群應至少選取一座具代表性的離岸風力機支撐結構進行設計。

設計階段除須依相關章節之規定考量主文所列項目外，尚須注意長期風浪作用與颱風事件作用下，土壤可能產生塑性變形或強度弱化效應。有關颱風事件之反覆弱化土壤參數評估可參考德國海事局 (BSH) 之經濟海域內離岸結構設計規範，惟此效應評估與特定載重組合 (DLC) 或變位檢核情境無關。

#### 5.2.4 運轉操作條件

結構設計時應考量下列因素，作為個別特徵載重效應之計算依據：

1. 結構與各項設備重量。
2. 人員與臨時設備重量。
3. 設備運轉。
4. 土壤沉陷與結構變位。
5. 離岸風力機與環境條件載重產生之結構共振。
6. 運維船舶撞擊。
7. 工作平台高程與其下方之置空間隙。

#### 【解說】

設計階段除須依相關章節之規定考量主文所列項目外，尚須注意以下要點：

1. 設計時應考量風、波浪與海流對於套筒式支撐結構之斜撐、J型管及靠船桿等細長構件因渦致振動造成之疲勞損傷，其檢核可參考規範 DNV-RP-C205。
2. 工作平台及連接段底部應保有足夠的置空間隙 (Air Gap) 以避免受波浪衝擊，相關設計可參考 ABS BOWT 指引或 DNV-ST-0126。

#### 5.2.5 臨時階段之設計考量

結構設計時應考量下列因素，作為個別特徵載重效應之計算依據：

1. 製造、運輸與安裝期間產生之載重。
2. 運輸與安裝期間，結構承受反覆載重之疲勞效應。
3. 製造公差與安裝誤差。

#### 【解說】

設計階段應考量結構儲放、組立、運輸與安裝過程之吊裝與繫固等過程對結構構件產生之應力與變形，不得影響風力機後續永久階段之運轉功能。

設計階段應考量海上運輸與打樁過程對結構構件產生反覆載重之疲勞效應。

製造公差應符合結構設計標準/規範之要求；安裝誤差應於結構分析時考量之，並於設計文件內註明製造與安裝之要求，作為製造與安裝工作執行之依據。

## 5.3 離岸風力機支撐結構設計要求

### 5.3.1 一般規定

結構設計應採用國際普遍認可之固定式離岸風力機支撐結構設計標準/規範，並應採用單一或相同系統之設計標準/規範與結構材料標準/規範。除非可以確認具備較高或同等之可靠度水準，否則不得混用標準/規範。

#### 【解說】

設計者可自行選擇國際普遍認可之固定式離岸風力機支撐結構設計標準/規範，如國際標準化組織 (ISO 19902)、歐洲 (如 EN 1993 與 NORSOK N-004 等) 或美國 (如 API RP 2A-LRFD) 等，並配合本指引之相關規定進行結構設計。

目前歐洲與美國採用不同的標準/規範系統，有關結構材料、載重與材料因子、安全係數與製造公差等要求或有不同規定，設計者應採用單一或相同系統進行設計。除非可以確認具備較高或同等之可靠度水準，否則不得混用標準/規範。

### 5.3.2 結構分析與模擬

結構分析與模擬方法，應能合理反映離岸風力機整體靜態與動態結構行為，並考量下列原則：

1. 整體離岸風力機支撐結構可採用梁元素模擬。
2. 複雜結構或局部構造，宜採精準適切之有限元素模型進行分析與驗證。
3. 結構耐震分析應採用動力歷時分析法。
4. 以非線性土壤性質模擬土壤-基樁結構互制效應。

#### 【解說】

本章所指之有限元素法，係採用梁 (Beam) 元素以外之板 (Plate)、殼 (Shell) 與實體 (Solid) 或其他特殊元素建立結構分析模型進行分析，其細部規定參照第 5.3.9 節。

極限程度狀態 (ULS) 相關設計分析，可依據 ISO 19902、EN 1993-1-1、API RP 2A-LRFD、NORSOK N-004、ABS BOWT 指引或 DNV-ST-0126 等之相關規定。設計時應確保結構不發生過度降伏及挫屈。

疲勞程度狀態 (FLS) 宜採用有限元素分析，並參考 DNV-RP-C203 之規定進行檢核，其細部規定參照第 5.3.9 節。若非採用有限元素分析時，可參考 EN 1993-1-9 或 DNV-RP-C203 等之相關規定。

離岸風力機支撐結構分析模型應考量轉子機艙總成、塔架、下部結構與基礎等要件，得採全結構模型或子結構模型進行分析，其相關注意事項如下：

1. 離岸風力機受力屬於氣動彈性分析，須設定離岸風力機規格、結構模式、氣動模式、轉子不平衡、動力傳動系統及控制模式等條件，通常由風力機製造商完成。

2. 子結構模型可區分為「轉子機艙總成一塔架」與「下部結構－基礎」等二種，惟須考量風載重、波浪載重及地震載重須於此二種子結構模型間進行反饋與迭代分析。其程序如下：
- (1) 下部結構與基礎設計者須依據「下部結構－基礎」子結構模型分析結果，提供子結構於其與「轉子機艙總成一塔架」銜接介面處對應自由度之等值勁度矩陣、等值阻尼矩陣與等值質量矩陣等資料，交付風力機製造商。
  - (2) 風力機製造商須依據「轉子機艙總成一塔架」子結構模型進行氣動彈性分析，提供子結構於其與「下部結構－基礎」銜接介面處對應自由度之受力，回饋下部結構與基礎設計者。
  - (3) 返回程序 (1) 進行重複迭代分析，直至分析成果符合設計需求。
3. 單樁式與套筒式支撐結構應考量其土壤-基樁結構互制效應，相關模擬方式如下：

(1) 單樁式

單樁式支撐結構與其基礎可採用梁元素進行模擬 (如圖 5.3.2-1 所示)；土壤-基樁結構互制效應之模擬，應符合本項第 (3) 點之規定。

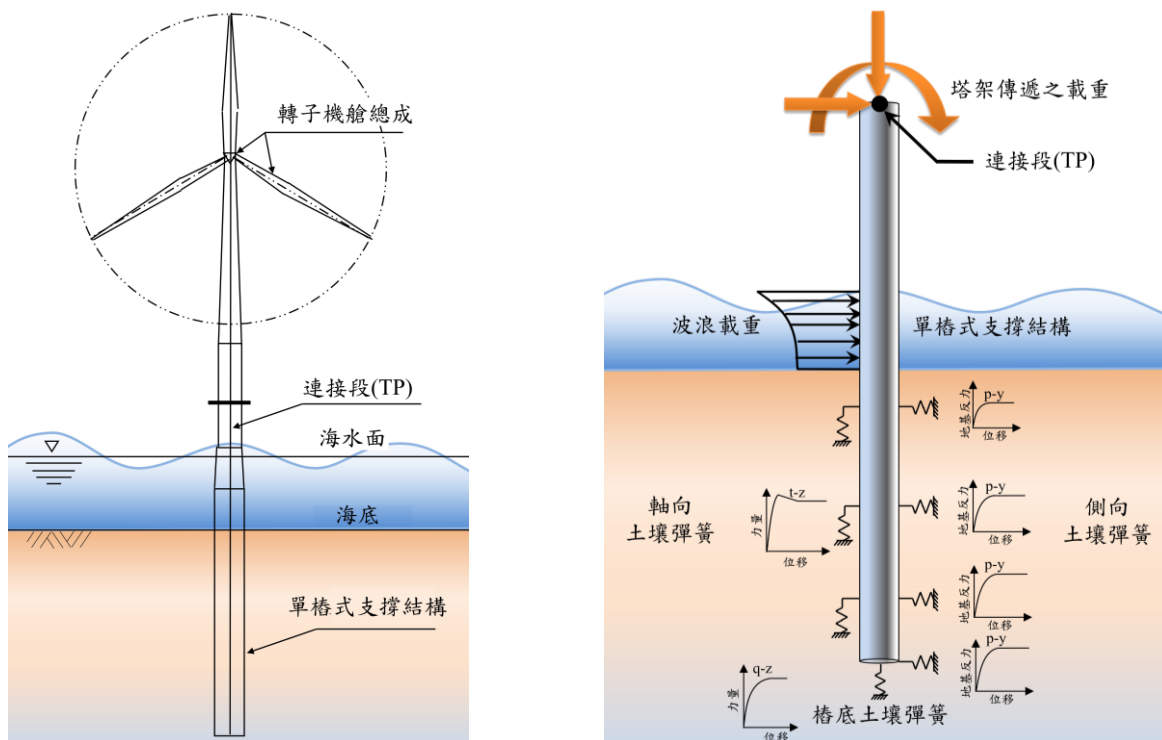


圖 5.3.2-1 單樁式結構與分析模型示意圖

(2) 套筒式

套筒式支撐結構與其基礎可採用三維梁元素進行模擬 (如圖 5.3.2-2 所示)，惟下部結構之連接段及結構構件接頭通常具有形狀或力學行為複雜特性，宜以有限元素法模擬應力分布參照第 5.3.9 節 (如圖 5.3.2-3 所示)；土壤-基樁結構互制效應之模擬，應符合本項第 (3) 點之規定。

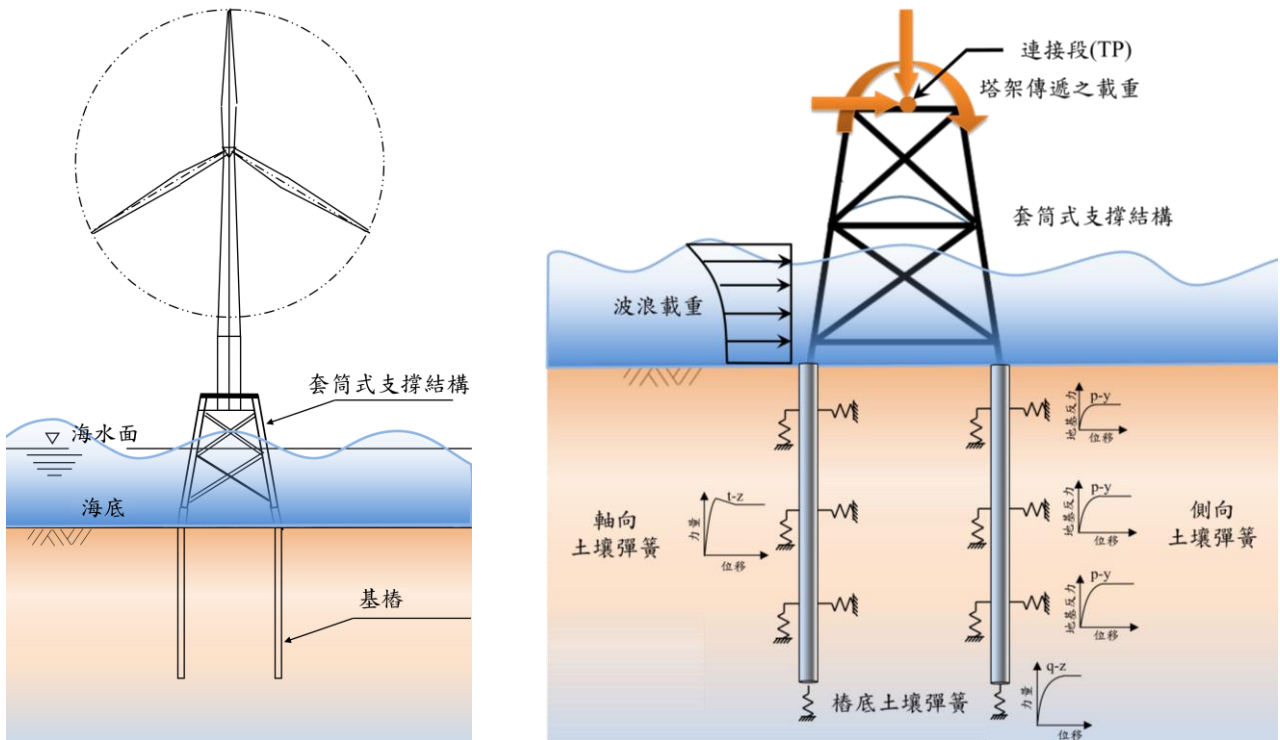
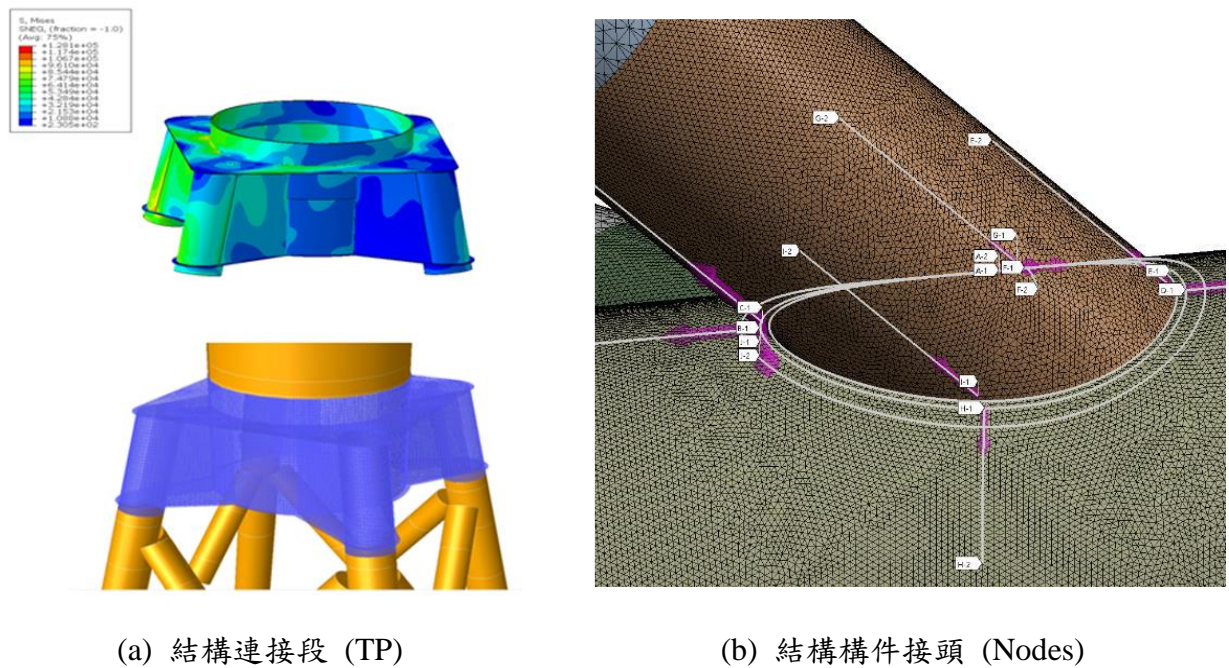


圖 5.3.2-2 套筒式結構與分析模型示意圖



(a) 結構連接段 (TP)

(b) 結構構件接頭 (Nodes)

圖 5.3.2-3 套筒式結構有限元素分析模型

(3) 非線性土壤性質之模擬

得參考 API RP 2 GEO 與 API RP 2A-LRFD 之說明並考量以下要求：

- A. 土壤-基樁結構互制分析須考量隨深度變化之非線性土壤性質，以土壤彈簧或有限元素等方式模擬之。若採土壤彈簧模擬時，可將基樁視為數個節點並連結各

結構元素，再將土壤彈簧分別設置於各節點上 (p-y 曲線與 t-z 曲線) 與樁底 (q-z 曲線)；其中，p-y 曲線代表側向 (指垂直樁中心軸方向)、t-z 曲線與 q-z 曲線代表軸向 (指平行樁中心軸方向) 之土壤反力-位移關係。分析時應考量反覆加載對土壤彈簧之弱化影響。

- B. 結構分析須於基礎結構範圍內或下部結構之樁頭處，依各限度狀態結構分析之目的，以非線性或等值線性之土壤彈簧模擬之，相關規定可參考 DNV-ST-0126。
- C. 考量結構長期承受風與波浪之反覆作用，造成基樁受力及邊界周圍土壤勁度與強度之弱化效應。
- D. 海床變動 (含淘刷)、液化等造成受力與邊界假設變化之情境。

地震載重參照第 4.8 節，應採用歷時分析法進行結構分析，各組三軸向地震歷時應採 100% 同時輸入，相關規定可參考 DNV-RP-0585。

以第 4.8 節地盤反應分析所得不同土層深度之輸出運動歷時，作為結構動力分析之輸入運動歷時 (圖 5.3.2-4)。若設計者不使用深度變化輸入，而採用相同之地震輸入應用於全樁，設計者應說明如何選擇此單一地震輸入，設計者也應說明此簡化分析結果，如何近似於較詳細之不同深度輸入分析結果。

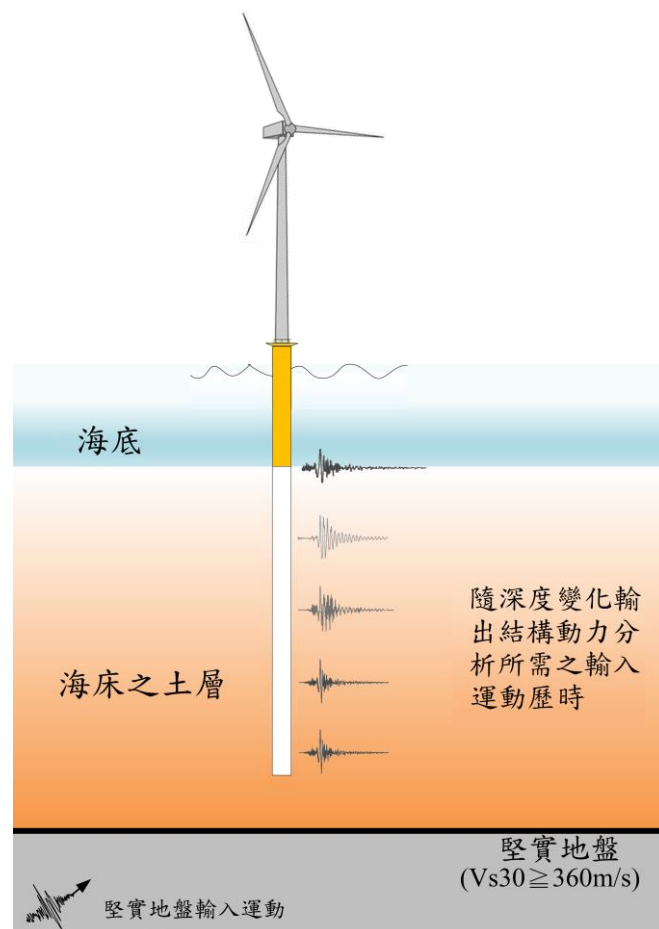


圖 5.3.2-4 結構動力分析之地震輸入運動歷時示意圖



### 5.3.3 結構設計與檢核

結構設計應採用限度狀態設計法，並符合以下檢核原則：

$$S_d \leq R_d \quad (5.3.3-1)$$

或以下二式表示：

$$\sum_{i=1}^n S_{di} \leq \frac{1}{\gamma_m} \times R_k \quad (5.3.3-2)$$

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{fi} \times S_{ki} \leq \frac{1}{\gamma_m} \times R_k \quad (5.3.3-3)$$

其中，

$S_d$ ：設計載重效應

$R_d$ ：設計強度

$S_{di}$ ：個別設計載重效應

$S_{ki}$ ：個別特徵載重效應

$\gamma_{fi}$ ：載重部分安全係數

$R_k$ ：特徵強度

$\gamma_m$ ：材料部分安全係數

#### 【解說】

特徵載重 (Characteristic Loads) 為依現地資料或相關理論換算之載重。特徵強度 (Characteristic Strength) 為設計所選用之材料強度，可包含如土壤承载力或結構構件之降伏強度等。

特徵載重效應 (Characteristic Load Effects) 則是由特徵載重所引發之截面內應力或變形量等效應。惟為確保分析過程完整考量載重大小及材料強度之變異性，特徵載重、特徵強度及特徵載重效應均應以載重部分安全係數或材料部分安全係數調整。

設計過程採用之載重部分安全係數及材料部分安全係數均應遵守擇定之國際標準/規範 (參照第 5.3.1 節)。承上所述，設計載重效應  $S_d$  之計算方式可分為二種方法，詳述如下：

1. 方法一：於結構模型中輸入特徵載重  $F_k$ ，結構分析推求其對應之結構反應 (如內力與變位)，即為特徵載重效應  $S_k$ 。再將此特徵載重效應  $S_k$  乘上載重部分安全係數  $\gamma_f$ ，即為設計載重效應  $S_d$ ，計算流程如圖 5.3.3-1 所示。
2. 方法二：在結構分析之前，先將特徵載重  $F_k$  乘上載重部分安全係數  $\gamma_f$  以求出設計載重  $F_d$ ，再將其輸入結構模型中進行分析，即可求得相對應之設計載重效應  $S_d$ ，計算流程如圖 5.3.3-2 所示。





圖 5.3.3-1 限度狀態設計法之設計載重效應計算流程 (方法一)

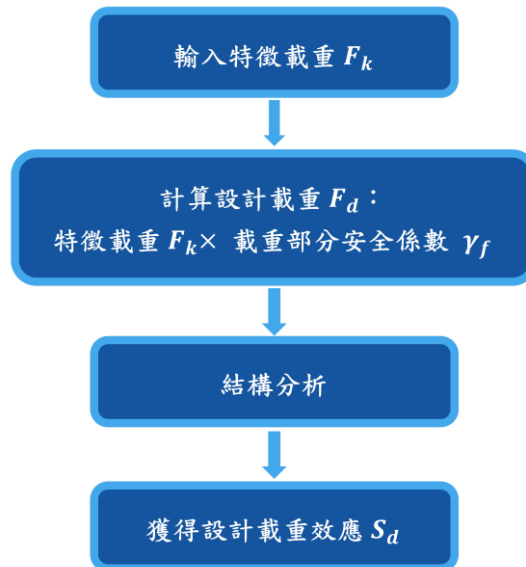


圖 5.3.3-2 限度狀態設計法之設計載重效應計算流程 (方法二)

方法一與方法二之適用性如下：

1. 採離岸風力機全結構模型 (包含轉子機艙總成、塔架、下部結構與基礎) 分析，通常適用方法一。
2. 若以風載重作用於風力機之轉子機艙總成並傳給支撐結構，所引致之動態反應為主要考量時，採方法一。
3. 採「轉子機艙總成—塔架」與「下部結構—基礎」等子結構模型分析，通常適用方法二。
4. 若欲考量非線性材料行為、幾何非線性或甚至兩者，採方法二。

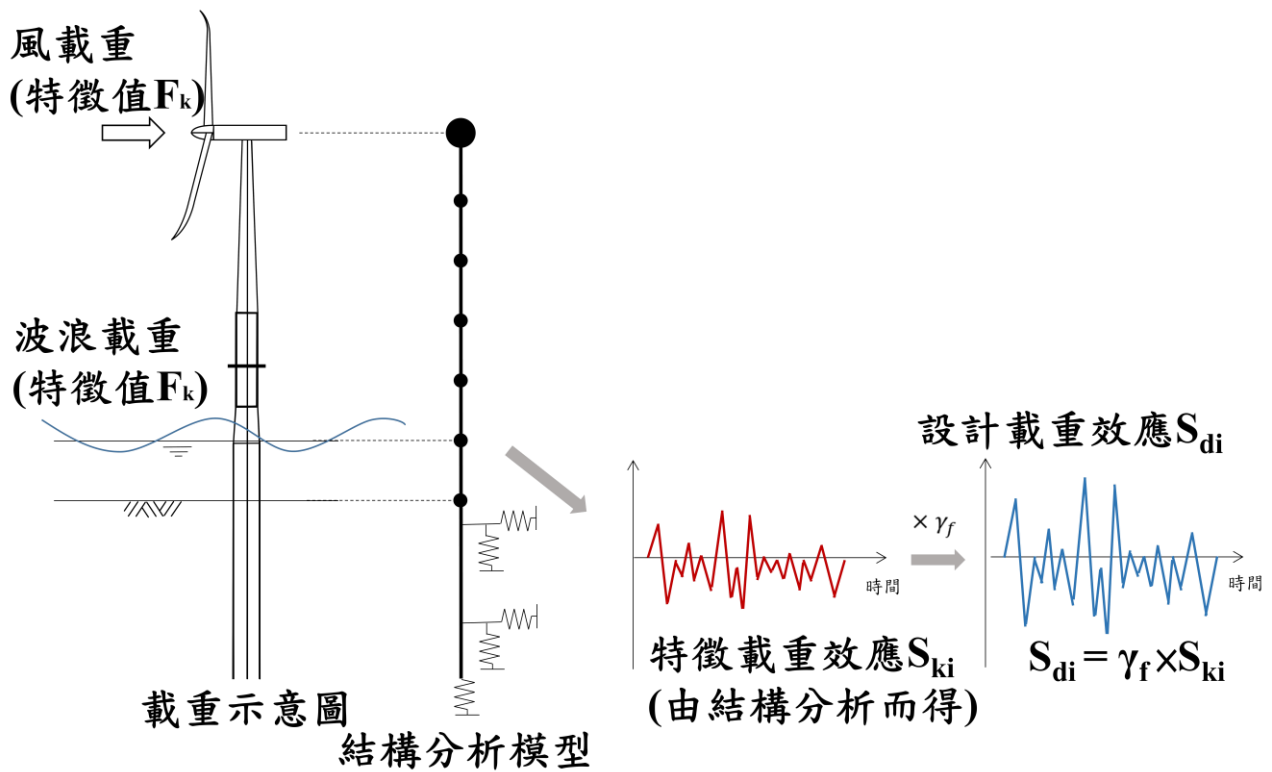


圖 5.3.3-3 全結構模型之設計載重效應計算示意圖 (方法一)

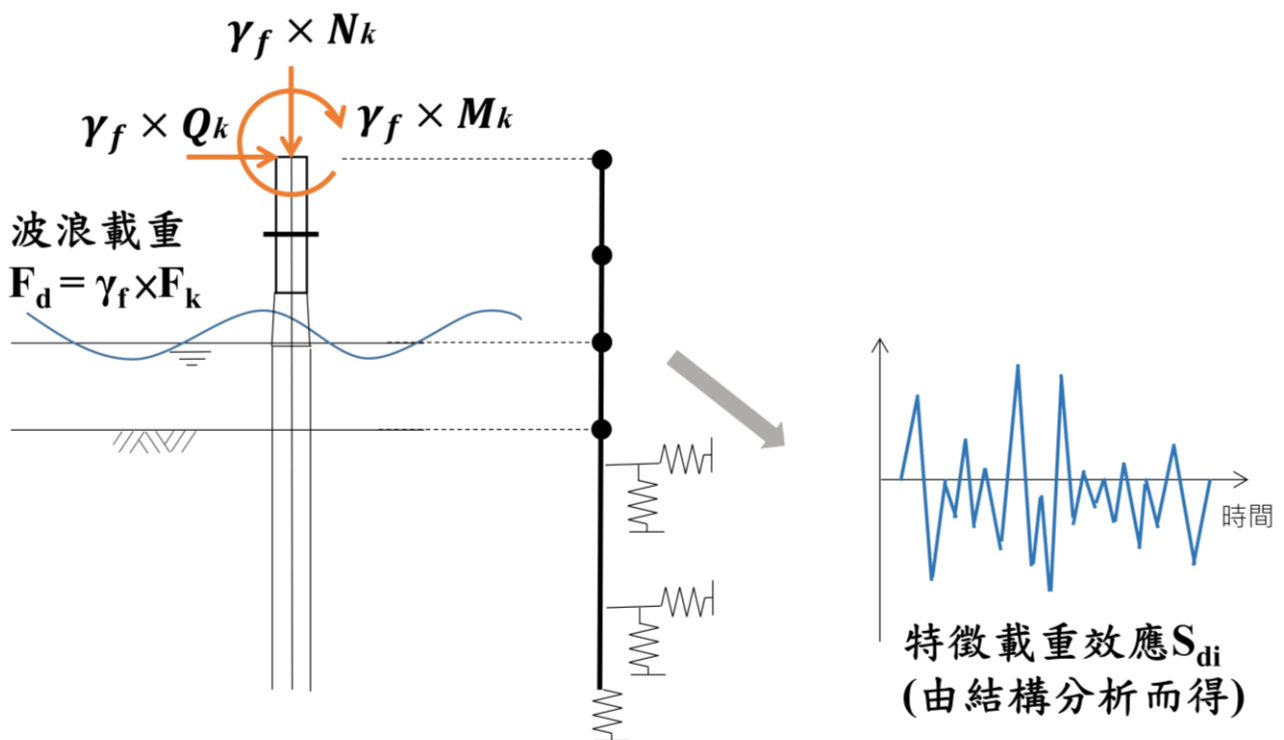


圖 5.3.3-4 子結構模型之設計載重效應計算示意圖 (方法二)

### 5.3.4 鋼結構強度與挫屈設計

鋼結構強度與挫屈之設計，應符合本指引第5.3.1節之規定。

#### 【解說】

離岸鋼結構係由管狀桁架構件及其他非管狀構件（如工字型或板殼結構構件或其他斷面）接合而成。管狀鋼結構構件之強度設計，歐洲主要依據 ISO 19902、EN 1993 系列及 NORSOK N-004 等標準設計，而美國則以 ISO 19902 與 API RP 2A-LRFD 為主，設計者應依第 5.3.1 節所採用之固定式離岸風力機支撐結構設計標準/規範要求，選用符合之鋼結構設計標準/規範。

對於非管狀鋼結構（工字型或其他斷面），設計亦可採 EN 1993、美國 AISC 或其他適合之標準/規範。設計之載重部分安全係數應參照第 3.3.3 節之規定，材料部分安全係數則依據 EN 1993、美國 AISC 或其他適合標準/規範等之規定。此載重/材料部分安全係數之搭配，應具備結構可靠度之一致性，設計者可參考 ISO 19901-3 規範中之建築規範對應係數 (Building Code Correspondence Factor)，擬定適合之調整係數。

執行梁柱系統結構之挫屈檢核時，應確認所採用之檢核公式或方法已考慮殘留應力及初始誤差所造成之影響，可依據 ISO 19902、EN 1993 系列與 NORSOK N-004 等標準/規範進行檢核。

簡單板殼結構 (Shell Structure) 構件（如塔架及套筒桁架等大口徑圓管，或無肋梁之鋼板）之挫屈檢核，可參考 EN 1993 系列、NORSOK N-004、DNV-RP-C201 或 DNV-RP-C202 規範，以規範之檢核公式進行設計。複雜板殼結構構件（如連接段 (Transition Piece)）則須依據第 5.3.9 節之有限元素分析方法進行線性或非線性挫屈檢核。

### 5.3.5 鋼結構疲勞設計

應考量臨時階段與永久階段之載重效應，其引致之構件反覆應力不得造成疲勞損壞。

#### 【解說】

疲勞設計應考量離岸風力機支撐結構於臨時階段與永久階段期間所有疲勞損傷。

分析方法可採時域歷時 (Time History)、頻譜 (Spectrum) 或損傷等效力分析等。其中時域歷時分析為時間域之動力分析，並採雨流計數法進行疲勞損傷統計；頻譜分析則以能量譜 (Energy Spectrum) 及應力轉換函數 (Stress Transfer Function) 推算結構應力，以計算波浪引致之疲勞損傷；損傷等效力分析採用固定作用次數下，具代表性之循環載重（如風力機製造商提供之塔架一下部結構介面力）進行疲勞分析。

結構分析可計算某特定位置在某特定反覆載重作用下之應力，其作用過程產生之最大與最小應力差值稱為應力幅值 (Stress Range)。由 S-N 曲線可查得所對應疲勞破壞時之反覆應力幅值作用次數 ( $N$ )，若反覆應力幅值作用次數 ( $N$ ) 大於實際發生之次數 ( $n$ )，則結構不發生疲勞破壞。疲勞損傷因子 (Fatigue Damage Index,  $D$ ) 可表示為  $n$  對  $N$  的比值，由於結構

於設計年限間承受數千組以上之反覆載重，可採用 Palmgren-Miner Rule 以線性方式計算總累積疲勞損傷，即以線性累加各應力幅值下產生之疲勞損傷，其總和乘以設計疲勞因子 (DFI, 視為疲勞設計之安全係數，數值依規範不同，介於 1.0 至 3.0 之間，可參考表 5.3.5-1) 後不得超過 1.0，即

$$DFI \times \sum_{i=1}^N D_i = DFI \times \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \quad (5.3.5-1)$$

表 5.3.5-1 DNV-ST-0126 規定之設計疲勞因子數值

分區	是否可現場檢查及修復初始疲勞或塗裝損壞	設計疲勞因子數值
大氣區	否	3
	是	1
飛濺區	否	3
	是	2
浸沒區	否	3
	是	2
海床區	否	3

疲勞設計選用之標準/規範須符合第 5.3.1 節之要求，其永久階段之設計可參考 API RP 2A-LRFD 或 DNV-RP-C203；臨時階段之設計可參考 DNV-ST-N001。

### 5.3.6 結構接合設計

鋼結構得採用螺栓或銲接方式接合，其設計應符合以下原則：

1. 接合部位之設計強度須大於連接構件之設計強度。
2. 臨時階段與永久階段之載重效應，其引致之接合部位反覆應力不得造成疲勞損壞。

#### 【解說】

離岸鋼結構構件可採用螺栓與銲接方式接合，其接合部分必須可確實將受力傳遞至其他結構構件，且應符合 DNV-ST-0126 之要求。對於疲勞設計，S-N 曲線選用與節點接頭幾何、銲接製造及檢驗方式有高度之相關，須依據 DNV-RP-C203 附錄 A 選定。

接合部位不得採用塑性設計，應維持彈性狀態以確保結構具有足夠強度。單樁式與套筒式結構之螺栓與銲接接合設計要點說明如下。

螺栓材料、螺栓孔幾何與接合預力之規定須符合第 5.3.1 節標準/規範選用之原則。離岸風力機支撐結構應採用摩阻型螺栓接合，惟次要結構構材之螺栓接合可設計為普通螺栓接合 (亦即承壓型)。極限程度狀態下，應考量螺栓承受之軸向載重、剪力載重或其組合，可參考 EN 1993-1-8 或 AISC Steel Construction Manual 之規定。承受軸力與剪力組合載重之螺栓接合，應設計並估算其預力，使接合構件在結構設計年限內皆不發生相對滑動。

銲接類型、銲接材料與銲接品質之規定須符合第 5.3.1 節標準/規範選用之原則。離岸風力機支撐結構銲接接合型式得採用全滲透銲、部分滲透銲或填角銲，其中於結構之高應力處宜採用全滲透銲。極限程度狀態下，銲道尺寸之設計應使其設計強度不低於與其相接部位之設計強度；疲勞程度狀態下，應注意鋼板厚度變化與製造公差引致之局部偏移影響，應以額外之應力集中因子進行考量。

### 5.3.7 灌漿接合設計

須考量下列因素：

1. 永久階段之各項設計載重效應。
2. 臨時階段之各項設計載重效應。
3. 安裝容許誤差與施工精度控制之影響。
4. 灌漿接合之疲勞效應。

#### 【解說】

離岸風力機套筒式下部結構與基樁之間及單樁式結構連接段與基樁之間，二鋼結構構件以砂漿灌注空間接合，一般可分為同心狀之接合（管狀灌漿接合）及管狀與錐狀灌漿接合（錐狀灌漿接合），如圖 5.3.7-1 所示。通常單樁式基礎之灌漿段可採圓錐形結構避免滑落，套筒式基礎之錨樁灌漿段可設置剪力樺以增加鋼材與漿體間之握裹。設計時同心狀之接合段須設置導板，以避免間隙過小。

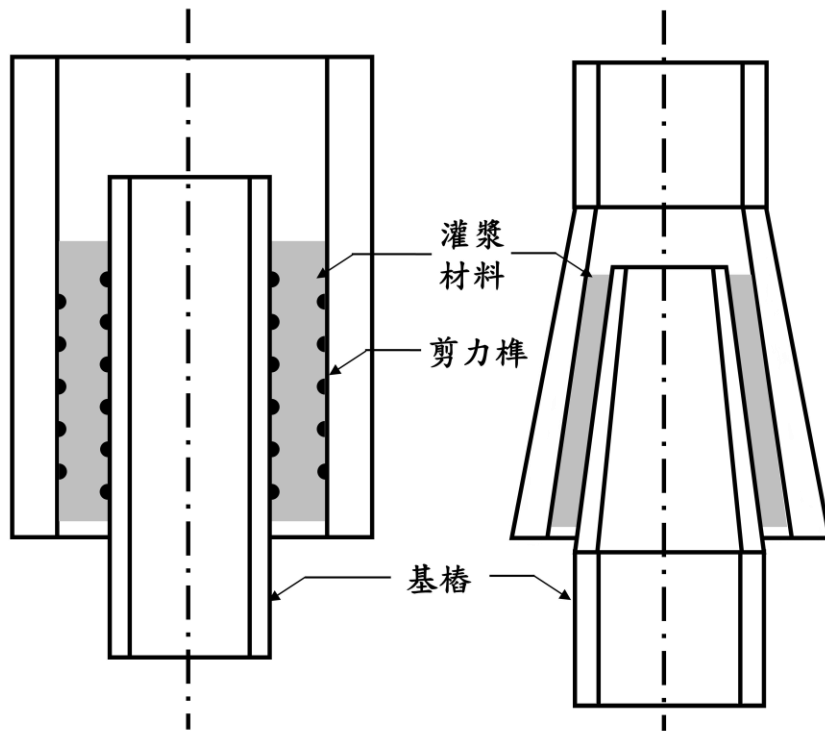
設計者應依實際採用之灌漿材料妥善進行設計，設計時亦應考量灌漿作業可行性、現場拌合之強度變異性、封底密封設計及砂漿收縮或膨脹等特性。另考量製造及安裝之公差，灌漿接合之砂漿最小厚度為 40mm。

砂漿材料須進行驗證，驗證項目至少包含材料試驗、產品性能驗證及相關試驗方法等。灌漿材料品管試驗可參考 DNV-ST-C502 之相關規定。

設計時應考量安裝（含打樁）過程可能造成誤差（如圖 5.3.7-2 所示），相關設計細節可參考 DNV-ST-0126 之規定。

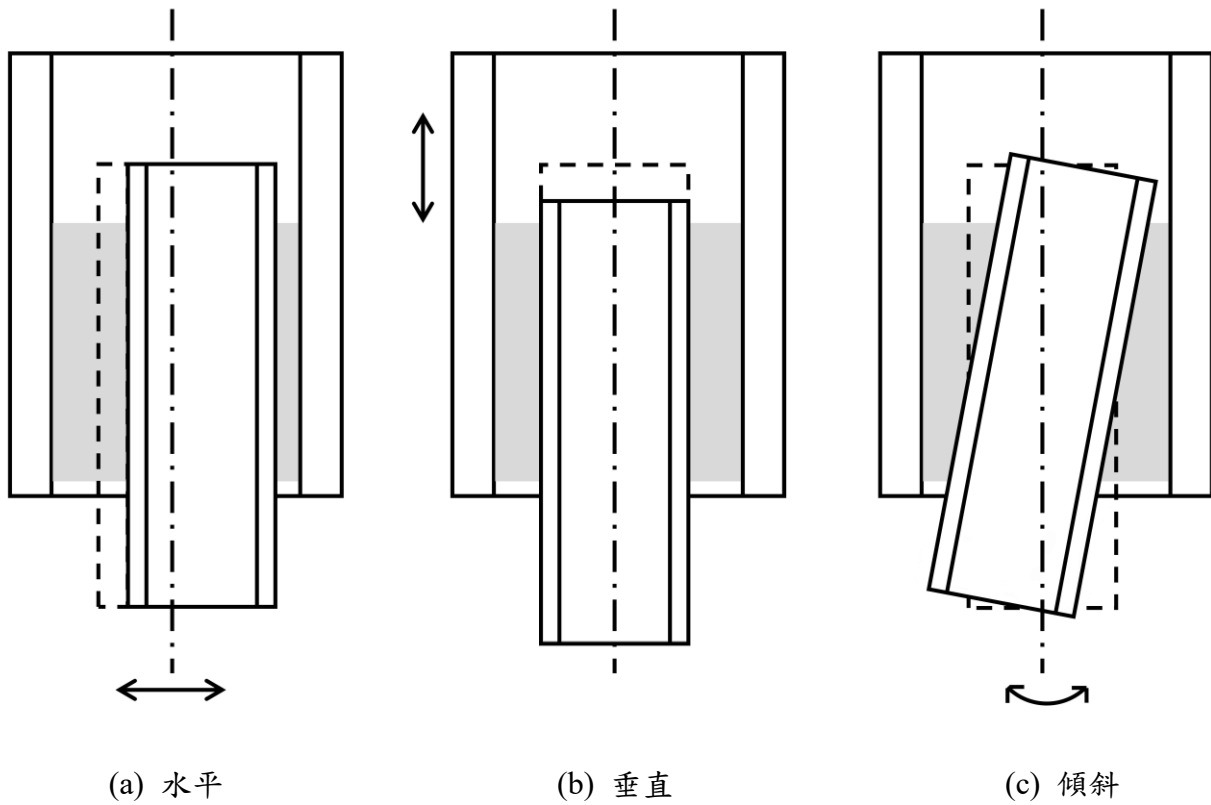
灌漿段極限程度狀態（如降伏或挫屈）、疲勞程度狀態及意外程度狀態之設計，可參考 DNV-ST-0126 之規定。其中單樁式支撐結構如採錐狀灌漿接合者，因垂直自重之軸向加載效應，須特別檢核其使用程度狀態（如塔架沉陷）。灌漿段之有限元素分析法須符合第 5.3.9 節之規定。

作用在剪力樺上的垂直作用力不得超過剪力樺之設計容許值，並須注意剪力樺鄰近區域的應力集中對鋼管與灌漿材料疲勞強度之影響，相關設計細節可參考 DNV-ST-0126 之規定。



(a) 管狀灌漿接合 (套筒式/單樁式)      (b) 錐狀灌漿接合 (單樁式)

圖 5.3.7-1 灌漿接合圖例



(a) 水平

(b) 垂直

(c) 傾斜

圖 5.3.7-2 灌漿接合誤差示意圖

### 5.3.8 運維船舶撞擊

離岸風力機支撐結構之運維船舶撞擊，其設計應符合以下原則：

1. 正常船舶撞擊後，主要結構與次要結構須仍維持使用功能。
2. 異常船舶撞擊下，主要結構應避免倒塌，並可被儘速修復，次要結構得發生可維修之損害。

#### 【解說】

運維船舶靠泊於離岸風力機支撐結構時，可能受環境外力驅動而撞擊結構。因此應考量可能撞擊事件的衝擊能量大小（包含運維船舶之噸位及船舶速度等），以評估其對結構可能造成之損傷。開發商應依據運維廠商之運轉及維護計畫，提供船舶噸位予設計者。此外設計時可適當考量船靠設施的可更換性、活動機構、消能方式等措施以降低衝擊能量、增加結構強度或降低結構損傷。

運維船舶撞擊應考量運維船舶之正常撞擊與異常撞擊二種情境，此二種情境分別對應載重組合 DLC 8.5 與 DLC 8.6。運維船舶正常船舶撞擊下，主要結構及次要結構不得失去原有功能；異常撞擊係指運維船舶失去動力漂流撞擊離岸風力機，此時次要結構之構件得發生可維修之破壞，主要結構仍應可承受載重組合 DLC 8.2 之載重條件。

船舶撞擊載重的能量與勁度分配之載重計算方式，可參考 IEC 61400-3-1、NORSOK N-004 與 DNV-ST-0437 等之規定。

### 5.3.9 有限元素分析

對於無法採用解析法計算之結構構造，宜採用有限元素模型進行分析。

#### 【解說】

複雜結構構件如連接段 (TP)、連接段之法蘭、灌漿接合或套筒結構構件之接頭 (Nodes) 等宜採用三維有限元素模型分析，相關檢核與設計方法可依據 EN 1993-1-5、EN 1993-1-6、DNV-ST-0126、DNV-RP-0419 (適用於灌漿接合) 或其他標準/規範之規定。

極限程度狀態可參考 EN 1993-1-5、EN 1993-1-6 及 DNV-RP-C208 辦理，確保結構不發生挫屈、降伏等造成過量塑性應變之失穩及拉力破壞。線性降伏分析時，構件應力比 (Von Mises 等效應力除以降伏強度) 應低於 1.0。若局部區域發生降伏，應確認該區域之應力重新分配後，不影響整體結構之穩定性。特徵挫屈分析則應計算結構挫屈強度，挫屈安全係數 (載重效應除以強度) 不得低於 1.0。前述非線性分析可參考前述規範以非線性有限元素模擬。

疲勞程度狀態可依規範 EN 1993-1-9 及 DNV-RP-C203 辦理，結構構件於臨時階段及永久階段因反覆載重造成之累積疲勞損傷，其總和乘以設計疲勞因子後不得超過 1.0。疲勞設計之分析方法應符合第 5.3.5 節之規定。

使用程度狀態及意外程度狀態可依規範 DNV-ST-0126 辦理。

### 5.3.10 臨時階段之結構檢核

臨時階段之結構檢核應考量運輸船舶、施工方法與施工機具等條件，得由設計廠商或施工廠商辦理；惟雙方應相互配合提供檢核所需之情境與條件，再依第1.6節之規定辦理。

#### 【解說】

施工者應詳實考量臨時階段所有施工程序，至少包含陸上儲存與運輸及裝船吊裝前、運輸階段與海上安裝階段等之情境與條件，作為結構強度與疲勞效應等資料檢討之用。

臨時階段至少包含轉子機艙總成、塔架、下部結構與基樁之運輸及安裝，其中轉子機艙總成及塔架由風力機製造商提供，並由海上施工廠商進行海上安裝。本指引著重於下部結構與基樁之臨時階段檢核，海上施工者應確保安裝過程符合結構設計之假設及考量。

打樁分析可參考 ISO 19901-8、DNV-ST-0126 與 DNV-RP-C203 等相關規範，推求打樁時之能量轉換率及貫入至設計深度所需之打擊應力、每單位深度打擊數、總打擊數及打樁引致之疲勞損傷等，納入結構設計年限內之結構完整性一併考量。

打樁過程中，由樁頭承受之應力應小於樁體材料之最小降伏應力；動態應力限制可參考 ABS BOWT 指引與 DNV-ST-N001 等規範。此外，宜將滑樁、樁錘損壞等施工風險條件納入評估，並提出應對措施。

## 5.4 大地工程設計

### 5.4.1 一般規定

離岸風力機之樁基礎設計應建立大地工程設計剖面，並至少考量各種設計載重效應、地震與土壤液化、風、波浪及海流引致之土壤反覆弱化、海床變動與淘刷、基樁安裝可行性、基樁疲勞效應、群樁與尺寸效應等作用，檢核基樁受地質條件影響之安全性、承載能力與變形性能。

#### 【解說】

大地工程須以本指引或國際通用的標準/規範進行設計，可參考如 ISO 19901-4、API RP 2GEO、DNV-ST-0126 與 DNV-RP-C212 等之規定。

進行樁基礎之承載能力與變形性能設計時，須符合下列章節之要求：地震與土壤液化（第 4.8 節與第 4.9 節）、土壤-基樁結構互制之分析與模擬（第 5.3.2 節）、海床變動與淘刷（第 5.4.4 節）、基樁安裝可行性、基樁疲勞效應（第 5.3.10 節）、群樁與尺寸效應（第 5.4.3 節）。

大口徑單樁式基礎應用 p-y 曲線時，須針對特定場址土壤特性以數值分析方法驗證其合理性；風、波浪及海流引致之土壤反覆弱化，可參考德國海事局 (BSH) 經濟海域內離岸結構設計規範。



## 5.4.2 樁基礎承载力與變位檢核

樁基礎設計應檢核基樁在各種極限程度狀態下具有足夠之軸向與側向承载力；在各種使用程度狀態下，其樁頭之長期變形量應小於其設計容許值。

### 【解說】

樁基礎設計應反映土壤-基樁結構互制效應之行為，並能夠承受安裝與運轉維護期間之載重；設計時應控制變位值（如傾角等）落於安裝與運轉維護期間之容許值內（容許值應依據相關規範或由風力機製造商提供）。

進行基樁承载力評估時，須考量包含但不限於以下事項：

1. 反覆載重引致弱化、土壤液化與基樁安裝後隨時間變化等效應，對基樁-土壤互制行為（即土壤彈簧  $p$ - $y$ ,  $t$ - $z$  與  $q$ - $z$  等曲線）之影響。
2. 基樁安裝方法（如打擊式、振動式或鑽掘式等）與安裝時可能造成地層之擾動（若適用）。
3. 基樁之群樁效應（第 5.4.3 節）。
4. 對於安裝與運轉維護期間之基樁狀態，進行基樁穩定性分析。

基樁於各程度狀態下之設計要求如下：

1. 軸向承载力樁
  - (1) 極限程度狀態 (ULS)：各單樁於各載重情境下（含地震），須具有足夠軸向承载力能力。
  - (2) 疲勞程度狀態 (FLS)：須考量如離岸風力機與波浪作用下之各式反覆載重。
  - (3) 使用程度狀態 (SLS)：於設計年限內累積軸向永久變位不得超過容許值。最大容許軸向變位依離岸風力機運轉與功能之需求決定。
2. 側向承载力樁
  - (1) 極限程度狀態 (ULS)：各單樁於各載重情境下（含地震），以及當基樁貫入深度由基樁側向強度控制時，須具有足夠側向承载力能力；各單樁側向承载力強度須大於施加於樁頭的側向力與彎矩載重組合之需求應力。
  - (2) 使用程度狀態 (SLS)：於設計年限內樁頭累積永久旋轉角不得超過容許值。最大容許旋轉角，依離岸風力機運轉與功能之需求決定。

土壤-基樁結構互制分析時，須注意以下事項：

1. 可採用單樁分析，詳見軸向承载力樁之設計要求。
2. 進行分析時將側向載重與傾覆彎矩作用力施加於樁頭，此外亦須將樁頭之軸向載重納入考量，探討其引致二次彎矩與土壤側向強度發揮產生之影響。
3. 土壤非線性性質之模擬（如  $p$ - $y$  曲線），須考量土壤強度與勁度承受反覆載重之弱化效應。

### 5.4.3 群樁效應

群樁基礎之各單樁間應保持適當間距；若其相鄰基樁間之中心距小於六倍樁徑時，須考慮群樁互制效應對基樁軸向與側向承載力之影響。

#### 【解說】

基樁間距小於六倍樁徑時，群樁之軸向承載力及側向承載力將會小於各單樁承載力之總和，則於承載力分析使用之 p-y 曲線、t-z 曲線及 q-z 曲線須根據群樁效應進行調整。

### 5.4.4 淘刷保護設計

離岸風力機支撐結構設計時，應評估基樁結構周圍流場變化可能引致海床淘刷之影響，必要時須設計保護措施。

#### 【解說】

基礎淘刷深度之估算應依第 4.6 節之規定。設計階段應將所考量之海床面變化範圍、可能淘刷深度之上下限值與淘刷保護設計等詳列於設計文件中，提供運轉及維護計畫編定之參考，以擬定相關監測計畫。未設置淘刷保護工之結構物，設計時應考慮淘刷之影響；設置淘刷保護工之結構物，則應考慮其淘刷保護工之穩定性。設計可參考 DNV-ST-0126 及 DNV-RP-0360 之建議。

#### 1. 未設置淘刷保護工之結構物

- (1) 對於位在非凝聚性沉積層之單樁式結構，其基樁周圍局部淘刷可參考 DNV-ST-0126 App.D 進行評估。
- (2) 如採用非單樁式結構、基礎坐落於凝聚性沉積層或結構受波浪環境條件載重主控者等條件下，建議透過模型試驗以評估其淘刷深度與範圍，參照第 4.6 節之規定。
- (3) 離岸風力機支撐結構設計須考量海床面變化範圍及可能淘刷深度之上下限值，並將未設置淘刷保護工之影響納入結構設計分析考量。
- (4) 設計階段應揭露海床面變化範圍及可能淘刷深度之上下限值，開發商應據以提出配套之監測與運轉及維護計畫。如監測結果顯示淘刷深度或海床高程已低於原設計高程，則應考量增設淘刷保護工。

#### 2. 設置淘刷保護工之結構物

淘刷保護工之設計應能保護基礎周圍海床以防止局部淘刷，且保護工設計應具備一定之穩定性，避免保護工表層過度侵蝕及保護工底部土壤淘出。淘刷保護工之防護效果可透過模型試驗進行評估，參照第 4.6 節之規定。

### 5.4.5 海纜槽溝設計

須考量包含鋪設機具、海床底質、開挖工法及與既有管線橫交等因素，以確保足夠的埋設深度。

#### 【解說】

離岸風力發電廠之海纜鋪設須具有足夠埋設深度，以儘量避免漁網拖深、船隻拋錨撞擊或沙波等造成海纜損害。

海纜槽溝設計須考量海床硬度及其鑽掘性，可參考 DNV-ST-0126、DNV-ST-0359 與 DNV-RP-0360 等之規定。若為岩層質海床者，海纜槽溝設計得採海床面之拋石保護。

若有沙波移動現象者，可於施工前整平海床以降低沙波之影響，惟海纜埋設深度應較沙波波谷面深，設計階段應標示該埋設深度，開發商應據以提出配套之監測與運轉及維護計畫。

海纜於上岸淺灘段、穿越堤防處或既有海底管線橫交處，設計階段宜考量採用免開挖之混凝土推管或水平導向鑽掘 (HDD) 工法以提供海纜鋪設之保護，並避免破壞相關設施如護岸工、蚵田搭架、堤防或既有管線等構造物。

### 5.5 腐蝕防護系統

腐蝕防護系統之設計應考量自然環境、經濟性、耐久性與施工性等條件，依據特定場址之腐蝕環境、構件屬性、高程分區及維護條件等，擇定適當腐蝕防護方法，以符合低維護性之長期防蝕設計目標。

開發商應提出腐蝕防護系統之設計依據，包含但不限於所引用之國際標準/規範、相關試驗成果或工程實績等，以佐證其設計之可行性，並提出配套之運轉及維護計畫。

#### 【解說】

離岸風力機支撐結構於全生命週期內容許發生可修復性之腐蝕，防蝕設計應符合低維護性之長期防蝕要求，開發商亦應依據腐蝕防護系統之設計理念提出配套之運轉及維護計畫。

離岸風力發電廠之金屬結構腐蝕防護方法主要有表面被覆法、陰極保護法與腐蝕容許量。表面被覆法主要是以塗料塗裝、熱浸鍍鋅層或金屬熔射層作為表面被覆。陰極保護法包含外加電流法與犧牲陽極法。腐蝕防護整體性策略 (含腐蝕容許量) 可參考 ISO 19902、ISO 24656 及 DNV-RP-0416，表面被覆可參考 ISO 12944、NORSOK M-501 或 NACE SP0108 進行設計，陰極保護可參考 ISO 24656、NORSOK M-503、NACE SP0176 或 DNV-RP-B401 進行設計。

考量臺灣外海腐蝕環境與國外離岸風場不盡相同，腐蝕防護系統之設計亦得綜合採用多重腐蝕防護方法。

腐蝕防護系統選用因構件所在位置之腐蝕環境而異，得依下列分區進行考量：

1. 大氣區為完全暴露於大氣中之區域。
2. 飛濺區為結構於海水間歇性乾溼交替分布之區域。
3. 浸沒區為完全浸漬於海水中之區域。
4. 海床區為結構構件被海床所掩蓋之區域。

以塗裝系統作為腐蝕防護方法時，應提出經過國際規範認證之相關試驗成果（如腐蝕加速試驗等）或工程實績佐證其設計之可行性，並提出運轉及維護計畫。

以陰極保護設計作為腐蝕防護方法者，其設計文件必須由具有國際認證資格的陰極保護專家簽核，並提出運轉及維護計畫。為驗證設計成果，陰極保護設備安裝完成後之第一次保護電位檢測，應依離岸風電運轉及維護技術指引第 3.3.2.5 節之規定。

以犧牲陽極作為陰極保護方法時，得視需求於代表性支撐結構設置監測系統；以外加電流作為陰極保護方法時，所有支撐結構均須設置監測系統，以確保腐蝕防護系統正常運作。

若採外加電流陰極防蝕系統，應具備即時性能數據 (Real Time Performance Data) 的顯示功能。局限空間（如單樁式結構之基樁內部）外加電流陰極防蝕系統應具備流通系統 (Venting System) 及氣體監測系統來降低危險氣體如氫氣、氯氣及硫化氫的濃度。

腐蝕防護系統或材料之選用應符合現行法規要求，以避免對海洋環境之影響。

## 5.6 電網連接與海纜設計

### 5.6.1 電網連接

電網連接及電力系統設計應符合下列基本規則：

1. 供電之電壓與頻率須符合電業法相關規定，交流電頻率定為60赫茲；其變動率之高低各不得超過標準頻率百分之四，供電電壓變動率之高低不得超過標稱電壓百分之三。
2. 設置電源線在責任分界點與電網相連，運轉發電對於電網所產生之系統衝擊，應符合台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點之規定。

#### 【解說】

依據「電業供電電壓及頻率標準」之規定，惟供電電壓變動率之要求與「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點」之規定不同時，因離岸風力發電須與台灣電力股份有限公司電網連接，故基本規則以符合「台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點」之規定為宜，將供電電壓變動率之高低統一規定為不得超過標稱電壓百分之三。

離岸風力發電係歸屬於再生能源，所產生電力如需透過電網輸送，應符合「台灣電力公司再生能源發電系統併聯技術要點」之規定，方得以連接電網。

## 5.6.2 海纜設計

海纜設計應符合下列事項：

1. 採用埋設方式鋪設海底輸電線及通信電纜時，不得影響港口、航運、漁業使用或安全防護，並應避免對港口、航運、漁業開發造成影響。
2. 鋪設時應避免永久性破壞環境，並儘量減少海床溫度上升及降低電磁場干擾。
3. 相鄰二條平行鋪設之海纜，水平應保持適當間距。
4. 於製造、運輸與安裝過程中，海纜所受之張力、彎矩、扭矩及擠壓力不得超過其設計極限。
5. 安裝完成後必須使海纜免於船隻拋錨、漁業活動或底部拖曳行為等外力破壞，亦須能免於淘刷懸空及地震等之破壞。
6. 根據熱分佈分析結果，採取合宜之設計以避免散熱不良引致高溫。

### 【解說】

海纜鋪設在調查前就必須規劃可能的路廊，再向內政部申請路由許可才能進行調查作業，再依調查結果研擬最佳路線並進行基本設計及研擬招標文件與規範進行發包，得標者再依原路線再詳細調查以進行細部設計再施工，施工完成後還需向內政部申請確定之路線再發海上公告。

海纜鋪設最重要的是最佳路線的選擇，再來是是否須埋深或採保護方式，以免受海浪海流侵蝕，另外亦須考量與其他管線交接時如何處理；電纜則須考量電力傳輸，及傳輸所產生之熱能與電磁之影響。

海纜鋪設必須進行環境影響評估 (EIA)，環評承諾至少應參照環保署訂定「限制時變電場、磁場及電磁場曝露指引」與 DNV-RP-0360 之規定，降低環境傷害。

海纜鋪設應避免互相重疊，並考量運轉維修所需安全距離，其最小間隔可依據國際電纜保護協會第 2 號建議文件 (ICPC Recommendation No.2-Recommended Routing and Reporting Criteria for Cables in Proximity to Others) 之建議值加以規定。

海纜破壞為離岸風力發電廠運維階段故障比重最高之項目，必須提供最大之保護。電纜可加鎧裝或埋深方式降低破壞機率；海纜於與海上構造物如變電站或離岸風力機支撐結構銜接處做妥淘刷懸垂及溫昇散熱保護，於與海上構造物銜接之 J 型管、海床埋設段及其他置於保護外管段皆須進行散熱分析，確保高溫低於運轉限制值。

# 附錄一

## 場址調查與設計階段送審文件



表 A-1 場址調查與設計階段送審文件

場址調查與設計階段						
送審文件		單位	主管機關	驗證機構	設計技術指引	備註/說明
		項次	文件名稱	專案驗證審查	專案驗證	
A. 整體工程(設計階段)						
1	地質鑽探及探測計畫書	○	-	2.3		
2	風機座標確認文件	○	-	第三章		
3	設計品質計畫書	○	-	1.7	支撐結構設計。	
4	整體施工綱要計畫書	○	-	1.6	轉子機艙總成、離岸風力機支撐結構、變電站及海纜。	
5	第三方獨立驗證計畫書	○	-	3.2		
6	第三方設計(計畫)驗證合格聲明	○	-	3.2		
7	專業技師簽證執行計畫書	○	-	3.2		
8	風力發電機組載重報告 <sup>註1</sup>	○	○	3.3 第四章	風力發電機組載重報告包含風力機設計之DLC載重表，以及轉子機艙總成與支撐結構之整體載重分析 (ILA)。	
9	電力系統分析、單線圖及計算書	○	○	3.3.6 3.4	包含但不限於下列項目： 1. 風力機支撐結構 <sup>註1</sup> ： 風力機下部結構內電氣設計圖及計算書、接地及避雷保護設計圖及計算書、附屬設備電氣設計圖及計算書等。 2. 變電站工程： (1) 主變壓器、GIS、配電設計、SCADA、高低壓及控制電纜路徑配置規劃、緊急發電機、UPS 容量等。 (2) 設備空調設計圖及計算書、避雷及接地系統設計圖、電纜接線設計圖。 (3) 陸域電纜、陸上電氣室、電力設備及雜項機電工程之設計基礎。 (4) 陸域電纜、陸上電氣室、電力設備及雜項機電工程設計圖及報告書 (含接地、避雷設計圖及各項計算書)。 3. 海底電纜： 海纜送電容量計算書。	



場址調查與設計階段						
送審文件		單位	主管機關	驗證機構	設計技術指引	備註/說明
		項次	文件名稱	專案驗證審查	專案驗證	
B.轉子機艙總成						
1	風力發電機組及其各類機電設備型錄資料	○	TC <sup>註2</sup>	3.2		
2	特定場址的風力機（轉子機艙總成及塔架）設計評估報告	○	○	3.3		
3	風力機型式驗證證書	○	TC <sup>註2</sup>	3.2.2 3.2.3		
C.固定式離岸風力機支撐結構						
1	設計基礎(Design Basis) <sup>註1</sup>	○	○	第五章	離岸風力機支撐結構。	
2	設計摘要(Design Brief)	○	○	第五章	1.永久階段。 2.大地工程。 3.地震工程。	
3	海洋氣象調查報告(Metocean Report)	○	○	2.2	波浪、風速等調查內容。	
4	海洋氣象評估報告	○	○	4.2至4.5	海洋氣象資料研究報告，支撐結構設計所需文件。	
5	海域測量報告及圖說(Geophysical Survey Report)	○	○	2.3.2	海域測量報告及圖說包含水深地形調查結果。	
6	土工調查紀實報告(Geotechnical Investigation Report)	○	○	2.3.4	土工調查紀實報告包含地球物理探勘、大地工程調查及試驗結果。	
7	土工詮釋報告(Geotechnical Interpretative Report, GIR)	○	○	4.8 4.9	設計土壤剖面、土工設計參數、土壤液化潛勢分析等內容。	
8	機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA)	○	○	4.8		
9	工址地震反應分析(Seismic Site Response Analyses, SSRA)	○	○	4.8		

場址調查與設計階段						
送審文件		單位	主管機關	驗證機構	設計技術指引	備註/說明
		項次	文件名稱	專案驗證審查	專案驗證	
10	海床變動評估報告 (Seabed Mobility Assessment)		○	○	4.6	
11	海床淘刷分析報告 /保護設施設計圖		○	○	4.6 5.4.4	
12	風力機塔架結構 設計圖及計算書 <sup>註1</sup>		○	○	3.3	
13	風力機下部結構之 結構設計圖及計算書		○	○	第五章	1.主要結構-含連接段與鋼管樁等。 2.次要結構。 3.灌漿結合設計。
14	大地工程設計圖及計算書		○	○	5.4	
15	下部結構打樁分析 計算書		○	○	5.3.10 5.4.2	含基樁貫入性及承载力靈敏度評估。
16	風場警戒系統		○	○	3.6.5 3.6.6	風場警戒系統包括但不限於助導航設施 (基點浮標、SPS燈標、IPS燈標、警示燈 標、霧號、雷達反射器及前述設備所需基 座)。
17	環境與結構安全監測系統		○	○	3.6.5 3.6.6	結構安全監測系統 (三軸向速度計、雙軸 向傾度計、應變計、中央集錄系統、監測 電腦、配線施工)。
18	防蝕保護 設計圖及計算書		○	○	5.5	下部結構、基礎結構。
D.變電站工程						
1	設計基礎 (Design Basis)		○	○	3.4 3.5 第五章	1.變電站機電工程及上部結構。 2.下部結構、基礎結構。
2	設計摘要 (Design Brief)		○	○	3.4 3.5 第五章	1.永久階段。 2.大地工程。 3.地震工程。

場址調查與設計階段						
送審文件		單位	主管機關	驗證機構	設計技術指引	備註/說明
		項次	文件名稱	專案驗證審查	專案驗證	
3-17	與C.固定式離岸風力機支撐結構相同 (除第12項與第13項)					
18	變電站整體佈置報告	○	○	3.4	含整體平面及立面配置圖。	
19	海上變電站下部結構之結構設計圖及計算書	○	○	3.4	含基礎結構。	
20	海上變電站上部結構之結構設計圖及計算書	○	○	3.4		
21	氣象塔、直升機平台及附屬設施設計圖及計算書	○	○	3.4		
22	火警及消防系統設計圖及計算書	○	○	3.4		
23	陸上電氣室土建設計及電氣設備圖資	-	-	3.4		
24	陸上地下管排圖資調查之設計圖及報告書	-	-	3.4		
E.水平導向鑽掘工程						
1	海域測量報告及圖說 (Geophysical Survey Report)	○	○	2.3.2	海陸域測量報告及圖說包含水深地形調查結果。	
2	地質調查及詮釋報告 (Geological Report)	○	○	2.3.3	地質調查及詮釋報告包含地球物理探勘結果。	
3	水平導向鑽掘設計圖及計算書	○	○	5.4.5		
4	水平導向鑽掘施工綱要計畫書	○	○	1.6		

場址調查與設計階段						
送審文件		單位	主管機關	驗證機構	設計技術指引	備註/說明
		項次	文件名稱	專案驗證審查	專案驗證	
F.海底電纜工程						
1	海域測量報告及圖說 (Geophysical Survey Report)		○	○	2.3.2	海陸域測量報告及圖說包含水深地形調查結果。
2	海域鑽探及地質調查報告 (海纜路徑範圍)		○	○	2.3.3 2.3.4 5.4.5	1. 地質調查及詮釋報告包含地球物理探勘及大地工程調查結果。 2. 含海纜路徑潮間帶熱阻抗量測及圓錐貫入試驗施工計畫。
3	海底電纜設計基礎		○	○	3.5 5.6.2	
4	海底電纜設計報告書/計算書		○	○	3.5 5.6.2	
5	海底電纜設計圖		○	○	3.5 5.6.2	須繳交相關「產品符合性聲明」。
<p>註1：若繳交文件涉及風力機製造商之機密資訊，該部分內容可經由閉門獨立技術澄清會議方式進行說明，亦可由風力機型式驗證或驗證機構檢具之聲明文件 (Statement Letter) 取代。</p> <p>註2：執行專案驗證前，離岸風力機應先完成型式認證 (TC)；或於專案驗證中完成型式認證之強制模組。</p>						