

出國報告（出國類別：實習）

海上變電站基礎及支撐結構 設計及施工研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：洪紹智 土木工程監

派赴國家/地區：丹麥

出國期間：107/09/22~107/10/01

報告日期：107/11/12

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：海上變電站基礎及支撐結構設計及施工研習

頁數 31 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電公司/陳德隆/ (02)
23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

洪紹智/台電公司/輸變電工處中區施工處/土木工程監/ (04)
25211569

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：107.9.22. ~107.10.01. 出國地區：丹麥

報告日期：107.11.12.

分類號/目

關鍵詞：疲勞分析、地震、土壤液化

內容摘要：(二百至三百字)

本次實習透過會議研討、實例介紹及風場實地參訪，瞭解他國適用的法規、標準及技術規範，並收集相關資料，供本公司未來設計參考或作為圖審的依據。

海上變電站的結構設計除需考慮設備本身的自重需求與海域特殊環境造成支撐結構的負載，也需要分析施工期間各種吊裝方式引起的應力，尤其是考慮波浪及風造成構件的疲勞分析與台灣特有的地震頻繁狀況，參考國家相關法規及最新國際標準，設計時也要事先加入有利施工組裝的元素。

經由本次實習過程中，所吸取之國外寶貴經驗與觀念提出建議事項做為爾後精進之參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

(<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

第一章 計畫緣由及目的	1
第一節 計畫緣由	1
第二節 計畫目的	1
第二章 實習過程.....	2
第一節 出返國行程概述	2
第二節 Ørsted 公司簡介	4
第三節 Anholt 海上風電場簡介.....	5
第四節 Energinet 國家電網公司簡介.....	9
第三章 海上變電站結構設計與施工.....	11
第一節 海上變電站架構	11
第一項 海上變電站主要部分	12
(一) Topside	13
(二) Jacket	14
(三) J-tube.....	14
(四) Pile.....	14
第二項 設計前收集資料.....	15
(一) 與設備有關資訊.....	15
(二) 海洋環境資料	15
(三) 運維管理及安全性需求.....	16
(四) 與技術有關資料.....	16
第二節 結構設計分析.....	17
(一) 極端與運轉負載.....	17
(二) 疲勞分析.....	18
(三) 地震分析.....	18
(四) 施工期間荷載	19
第三節 海上變電站施工	19
第四章 建議事項.....	24

(一) 訪客逃生動線介紹	24
(二) 海上變電站及風機土壤液化問題	24
(三) 適度提升海上變電站及風機的耐震性能	24
(四) 建照程序突破	25

圖目錄

圖 1 Ørsted 參訪情形	4
圖 2 Anholt 海上風電場配置圖.....	5
圖 3 風力發電機葉片安裝圖.....	6
圖 4 Ørsted 巡修船	7
圖 5 維修器材整箱堆置	7
圖 6 訓練用模擬塔身	8
圖 7 高空模擬作業塔	8
圖 8 Anholt 風場變電站	9
圖 9 Energinet 參訪後合影.....	10
圖 10 海上風力發電系統圖.....	11
圖 11 Walney 1 風場海上變電站.....	12
圖 12 海上變電站主要部分.....	12
圖 13 海上變電站主變壓器設備層(CASE1)	13
圖 14 海上變電站主變壓器設備層(CASE2)	14
圖 15 海上變電站主變壓器.....	15
圖 16 波高散佈圖.....	16
圖 17 結構受力圖.....	17
圖 18 波浪循環負載模擬	18
圖 19 S-N 曲線.....	18
圖 20 變電設備平台結構組立.....	20
圖 21 變電設備平台設備安裝.....	20
圖 22 變電設備平台移動	20
圖 23 變電設備平台吊放至拖曳船	21
圖 24 套筒式基礎固定端切除.....	21
圖 25 套筒式基礎吊離拖曳船.....	21
圖 26 基樁假固定.....	22
圖 27 套筒式基礎於打樁銜接細部	22

圖 28 打設基樁	22
圖 29 變電設備平台固定端切除	23
圖 30 變電設備平台與套筒式基礎接合	23
圖 31 變電設備平台接合細部	23

表 目 錄

表 1 出返國行程概要表	3
--------------------	---

第一章 計畫緣由及目的

第一節 計畫緣由

離岸風力為良好替代能源之一，推動海上風電、減少化石燃料依賴為我國既定政策，針對風力發電，經濟部已擬定「風力發電 4 年推動計畫」，規劃短期厚植推動基礎，在 4 年內達成風力發電累計 1,334 MW（百萬瓦）設置量，並建立中長期治本措施，優化設置環境，進而達成 114 年 4.2 GW（十億瓦）（陸域 1.2GW、海上 3 GW）的設置目標，希望藉此促進能源多元化及自主供應，並帶動內需與就業，建構風力發電友善發展環境，展現我國積極推動再生能源發展之決心。

台灣海峽的海上風場有年發時數高，且風力平均密度、風速高之優勢，海上風電雖然面臨剛起步的未知因素挑戰，但如能取法歐洲多年來發展風電的寶貴經驗，加上政府強力支持，必能迎頭趕上歐洲的海上風電技術。然本公司尚無規劃海上變電站之實績，為配合政府積極推動海上風電政策，爰派員赴丹麥進行「海上變電站基礎及支撐結構設計及施工研習」實習。

第二節 計畫目的

歐洲各國近十年來均積極投入海上風場建設，海上變電站（亦可稱海上變電站）規劃實務技術成熟，Ørsted 是丹麥最大的電力生產商，在當地之海上風場亦有多件應用實績，值得派員出國觀摩，透過會議研討、交流分享及現場實習，同時經由實例的介紹，瞭解他國引用的法規、標準及技術規範，藉以收集相關應用技術與案例，供本公司未來設計參考或作為圖審的依據。

第二章 實習過程

第一節 出返國行程概述

本計畫核定實習期間為 107 年 9 月 22 日至 107 年 9 月 28 日共 7 天，原訂 26 日結束公務行程，於公畢後自費順道在丹麥觀光 3 天（9 月 27 日~9 月 29 日），9 月 30 日及 10 月 1 日為返程。原訂行程均為 Ørsted 哥本哈根分公司內部研討，但於行前廠商另告知可特別安排至 Anholt 風場及 ENERGINET 電網公司現場參訪，考量出國實習機會難得，惟為避免增加公務行程之時間及預算，便利用申請奉核於丹麥順道觀光 2 天的時間，配合廠商赴距哥本哈根飛機航程 1 小時之 Aarhus 參訪 Anholt 風場及車程 3 小時外之 ENERGINET 電網公司各觀摩 1 天，故僅餘 1 天於丹麥順道觀光。

表 1 出返國行程概要表

時 間	地 點	工 作 概 要
107年09月22日～ 09月23日	桃園國際機場→荷蘭阿姆斯特丹機場→丹麥哥本哈根機場	往程 (台北→荷蘭轉機 →丹麥哥本哈根)
107年09月24日～ 09月25日	Ørsted 哥本哈根分公司 (丹麥、哥本哈根)	風場建置研討
107年09月26日	丹麥哥本哈根→丹麥 Anholt 風場	Anholt 風場實地參訪
107年09月27日	Ørsted 哥本哈根分公司 (丹麥、哥本哈根)	海上升壓站設計及施工研討
107年09月28日	ENERGINET 電網公司 (丹麥、腓特列西亞)	電力調度穩定性研討
107年09月29日	丹麥哥本哈根	順道觀光
107年09月30日～ 10月01日	丹麥哥本哈根機場→荷蘭阿姆斯特丹機場→桃園國際機場	返程 (丹麥哥本哈根→荷蘭轉機 →台北)

第二節 Ø rsted 公司簡介

Ø rsted (中文為沃旭能源) 總部位於丹麥腓特列西亞 (Fredericia)，共有 5600 名員工，前身為 DONG ENERGY，因致力轉型為綠色能源而出售了石油及天然氣業務，並以發現電磁學之丹麥科學家 Hans Christian Ø rsted 之名更名為 Ø rsted。Ø rsted 是丹麥最大的電力生產商，擁有 3.8GW 的海上風場建置經驗，2013 年以 10 億丹麥克朗 (13.5 億歐元) 的成本完成了在卡特加特丹麥安霍爾特島附近建造 400MW 的 Anholt 海上風電場。採取經營模式為風場建造完成後釋出該風場 50% 的股權 (據稱頗多退休基金為尋求穩定投資而購入)，自身維持 50% 股權，得以主導後續的營運及維護，並利用釋出股權獲得的資金繼續開發新的風場。

在歐洲各國均有風場設置經驗，如丹麥的 Horns Rev 1、Horns Rev 2、Nysted 風場、英國的 Barrow、Gunfleet Sands、London Array 風場等。



圖 1 Ø rsted 參訪情形

第三節 Anholt 海上風電場簡介

本次另實地參訪丹麥最大的 Anholt 海上風電場，裝機容量為 400MW，大概可以為 40 萬戶家庭提供足夠的清潔能源。位於 Djursland 和 Anholt 島之間，場地面積 144 平方公里，長 20 公里，寬 4 公里至 12 公里，距離陸地岸邊約 15 公里，風場配置圖詳圖 2。共設置了 111 支西門子公司製造的 SWT3.6-120 風力渦輪機，每台風力發電機的裝置容量為 3.6MW，風機含風扇總高度為 141.6m，風扇直徑為 120m，使用直徑 5 公尺之單樁基礎打設於水深約 15~19 公尺之海床，單基樁埋設深度 18-36 公尺，可利用率高達 97.5%。



圖 2 Anholt 海上風電場配置圖

由於每一片風扇重達 18 噸，安裝的位置由高達 81.6m，因此必須在平靜無風的日子才能完成這精準的安裝工作。

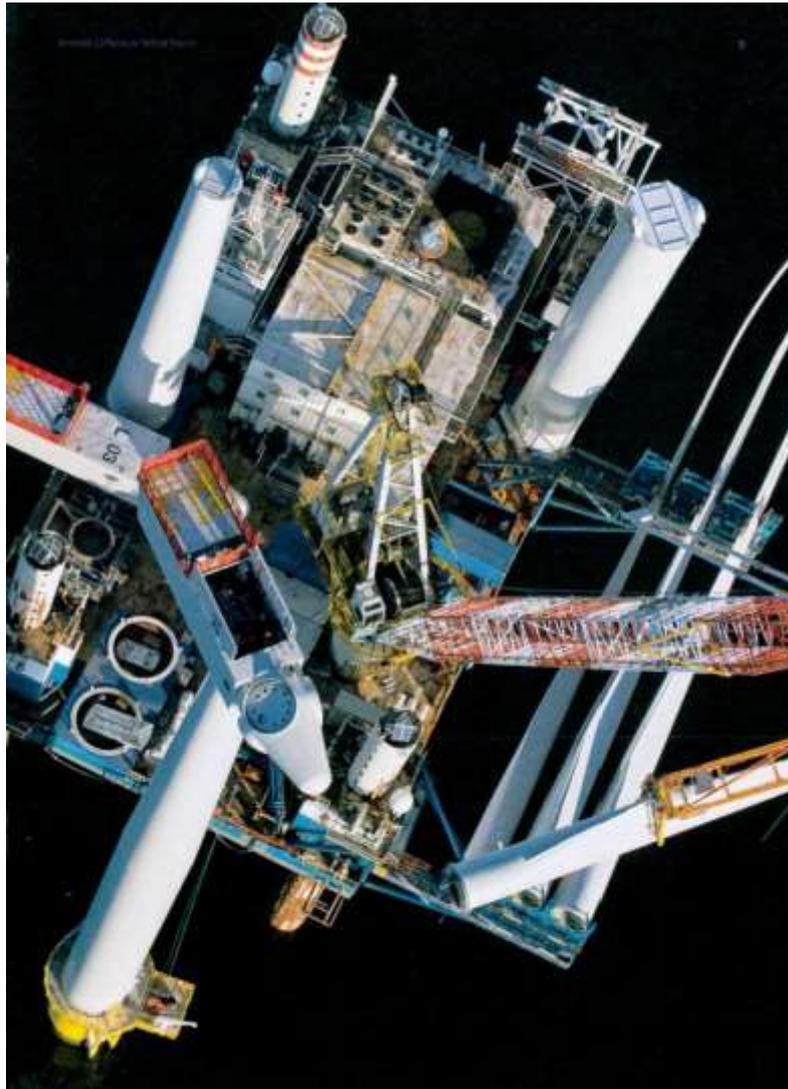


圖 3 風力發電機葉片安裝圖

Anholt 風場的股份分別由 Pension Danmark(丹麥的勞工退休基金)持有 30%、PKA(丹麥最大的退休基金)持有 20%及 Ørsted 持有 50%，這樣的經營模式可以為三方持續帶來穩定收益。

為了快速維護、檢修風機的需求，Anholt 風場備有 3 艘巡修船，參訪當日亦搭乘此船實地參訪風場，如圖 4，相關維修器材、備品放置於大型工具箱，採用整箱方式吊至船上，如圖 5，為便於人員定期模擬訓練需求，於岸邊設置模擬塔身，如圖 6，及設置高空模擬作業塔模擬風機塔身內的訓練如圖 7，現場參訪海上變電站如圖 8。Anholt 風場於 2013 年正式啟用，距今僅 5 年時間，惟在飛濺區已可見明顯的鏽蝕情形。



圖 4 Ørsted 巡修船



圖 5 維修器材整箱堆置



圖 6 訓練用模擬塔身



圖 7 高空模擬作業塔



圖 8 Anholt 風場變電站

第四節 **Energinet** 國家電網公司簡介

Energinet 是丹麥國家輸電系統營運公司，擁有並經營丹麥的所有電力及天然氣傳輸系統，最重要的任務是確保可靠的電源供應並保持電網穩定性。其性質很類似本公司的輸供電事業部，目前約有 1250 名員工。

本日參訪主題分別為：再生能源併網規範、如何利用丹麥電網的強項如強大的輸電網絡、國際電力市場、靈活可控制的發電系統及專業預測和運營規劃工具達成經濟且可靠的電力運輸。

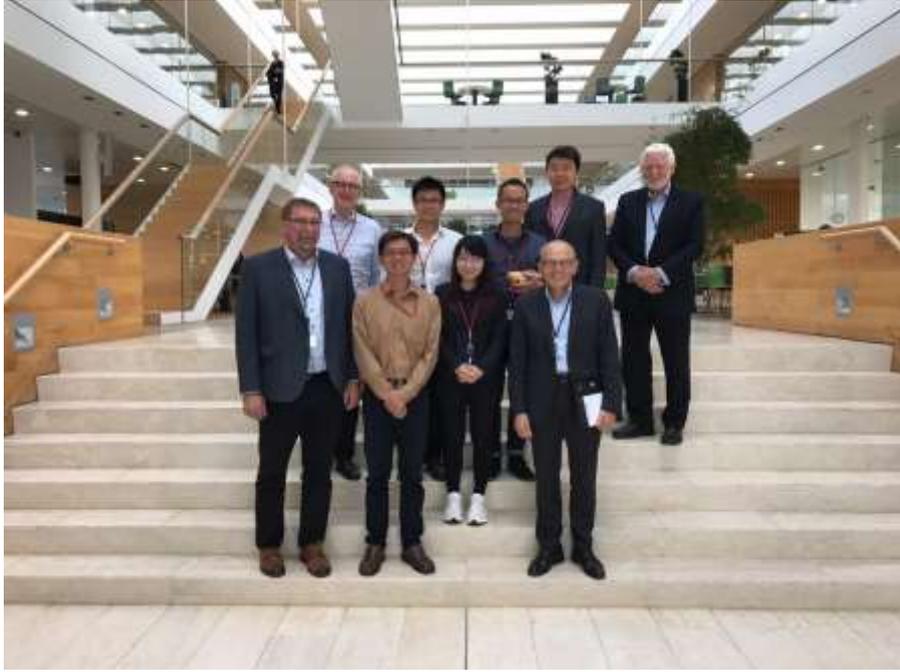


圖 9 Energinet 參訪後合影

第三章 海上變電站結構設計與施工

第一節 海上變電站架構

由於海上風場的規模愈來愈大、離陸地愈來愈遠及海纜數量愈來愈多，丹麥 Horns Rev 風場為了降低電力損失及改善功率因素，其次則是減少上岸電纜數量而設置世界上第一座海上變電站，採用三腳架支撐結構，變電站面積 20*28 平方公尺，海上變電站（offshore substation）與風機、岸上變電站連結關係如下圖，相關設備如下（Horns Rev 變電站總重量約 1200 噸）：36kV 的開關設備、36/150kV 的變壓設備、150kV 的開關設備、控制、儀表、通信系統、緊急發電機及燃料、海水滅火裝置、直升機起降平台。

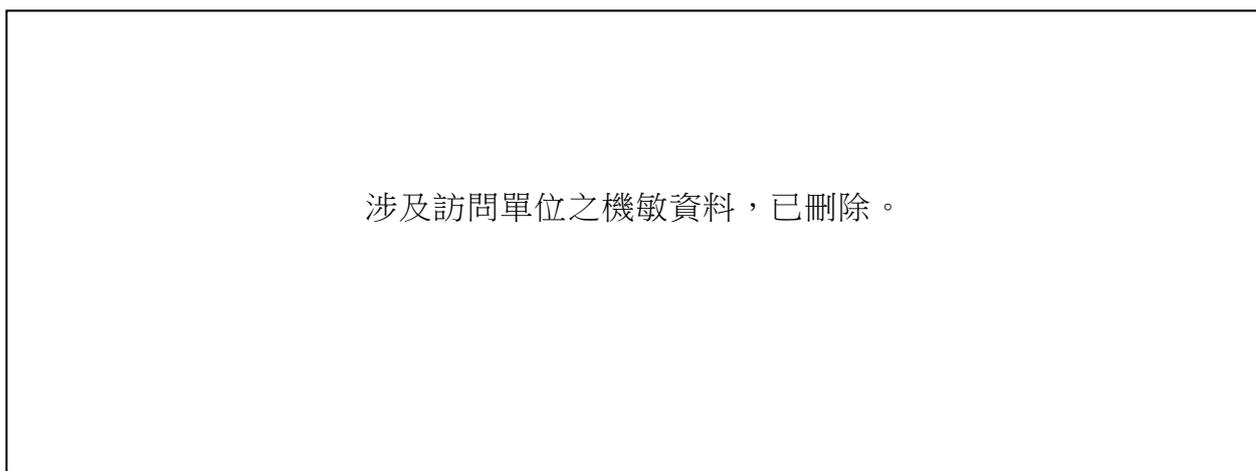


圖 10 海上風力發電系統圖

在 Ørsted 的建置海上變電站經驗中，僅有英國的 Walney 1 風場因為距陸地較近，考量居民的景觀影響將變電站整個包覆起來，如圖 11。

涉及訪問單位之機敏資料，已刪除。

圖 11 Walney 1 風場海上變電站

第一項 海上變電站主要部分

海上變電站可以概分為 4 項主要部分，詳圖 12：

涉及訪問單位之機敏資料，已刪除。

圖 12 海上變電站主要部分

(一) Topside (變電設備平台) :

主要設備層一般來說都是指最上層的甲板，配置有站內大項設備，如昇壓變壓器、並聯電抗器、高壓開關設備、中壓開關設備、緊急發電機及起重機，還有一項比較特殊的就是直昇機停機坪，主要是為了使運維人員能夠在最短時間內到達站內處理緊急事件。Ørsted 介紹 2 種 400MW 配置主變壓器之方式如下圖 13、圖 14。下層甲板則是輔助設備層，規劃有控制室、電纜支架，另外宿舍主要是供風機及變電站維護保養期間，人員短期住宿用，儲水槽則可提供人員乾淨的飲用水。由於臨時宿舍有限，也無法做為施工期間人員的休息場所，Ørsted 正在打造類似豪華遊輪的施工船，提供施工、檢修人員足夠的休息場所。



圖 13 海上變電站主變壓器設備層(CASE1)

涉及訪問單位之機敏資料，已刪除。

圖 14 海上變電站主變壓器設備層(CASE2)

(二) Jacket：

套筒式基礎 (jacket type foundation)，相較於單樁基礎 (monopile) 的結構系統無贅餘度，使用套筒式基礎可容許在部分構件破壞時，尚不致影響結構安全。風機或海上變電站使用套筒式基礎在受到風、波浪、海流引致之水平側向載重時，水平側向力透過上部結構傳遞至下方樁基礎時，將作用於海床基礎面之彎矩轉為各基樁之軸向作用力 (couple of moment)。Ørsted 也將於彰濱區的大彰化離岸風電計畫採用此型式基礎。

(三) J-tube：

電纜引接通道，J 形管是具有字母” J” 的導管 J 形管可保護從基礎到海上變電站或風力發電機的電力電纜免承受海洋環境外力。

(四) Pile：

基樁主要承受重力 (受壓) 及水平側向力造成海床基礎面之彎矩轉化為各基樁之軸向作用力 (受拉及受壓)，在經過載重組合之後，基樁可能為受拉力狀態，樁基礎尺寸則依照風機或海上變電站設置點位的土壤條件決定。

第二項 設計前收集資料

(一) 與設備有關資訊

設備空間配置方式、設備的尺寸及重量，部分設備的特殊需求如發熱設備如何冷卻、濕度控制等等。主變壓器概況如下圖，不同引接方式、重量當然影響後續的設計。

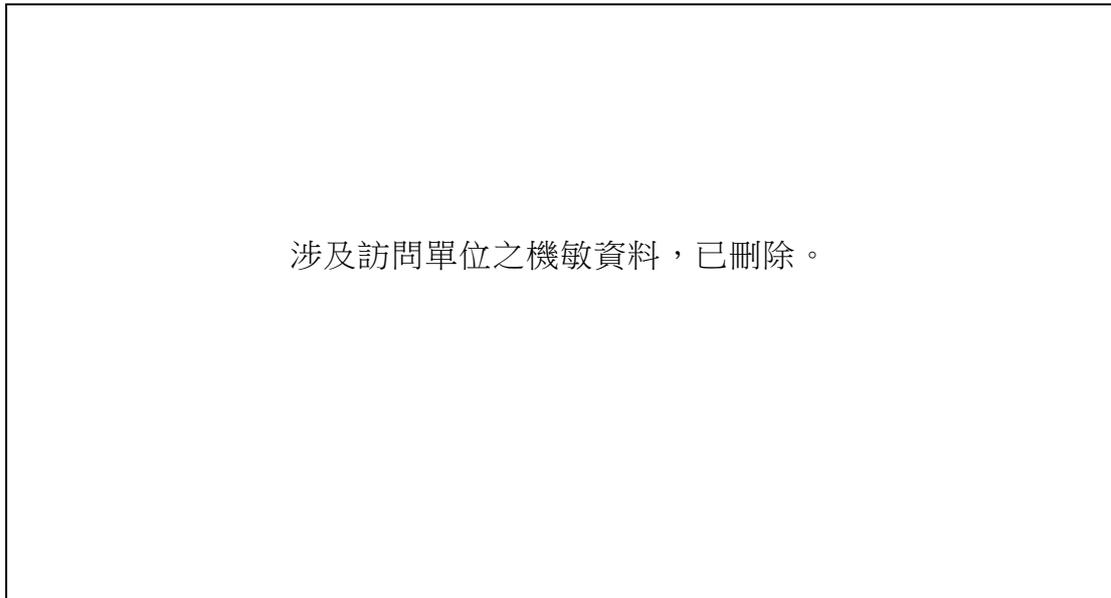


圖 15 海上變電站主變壓器

(二) 海洋環境資料

土層資料：海床土壤是地球經過數億年沉積下的成果，因為各地方的海流、潮汐情形都不同，在不同海域會有不同的土壤層分布，可能是疏鬆、中等緊實、緊實的沙土層或黏土層，可透過實地取樣得知土層參數及特性。土層疏鬆或緊實反應土壤承載力，並進而影響基樁入土的長度。

水深：受潮汐影響，海水的水位會有明顯起伏。

風、波浪及海流：在各地均有不同數值，在同一地點的不同時間點也有不同的海象，務須找出平靜無風浪、最適合安裝的時間出海施工。此外亦須收集極端狀況（100 年才發生一次）及運轉狀況（1 年才發生一次）的浪高數據、海流速度、平均風速。

地震參數：海上結構物設計時仍須考慮能承受 200 年發生一次及

2000 年才發生一次的強烈地震，此部分與我國現行建築物耐震設計規範與解說所考量地震回歸期為 475 年及 2000 年不同。

波浪的散佈圖 (scatter diagram)：通過測量海表面高程隨時間 (年) 的數據，我們可以使用統計方法為特定場地建立設計波浪的散佈圖 (scatter diagram)。



圖 16 波高散佈圖

對於海中結構物的影響主要是影響結構物構件的疲勞強度。與陸地結構物深受地震力的影響不同，地震力並非每天 24 小時重複作用，而是累積足夠大的地中應力一次釋放，所以地震力可以一次作用即摧毀結構物。支撐結構每天遭受風及波浪的衝擊，使構件慢慢惡化，開始產生裂縫，最終導致疲勞破壞。

(三) 運維管理及安全性需求

如何到達及離開、維護及檢查需求、火警偵測與預防、緊急疏散動線

(四) 與技術有關資料

最新技術文獻、材料類型、規範及標準、符合性認證。如 ISO 19901-4 適用於海床土壤及基礎設計考慮的規範，ISO 19900 適用於完整結構的設計，包括下部結構，上部結構，船體，基礎和繫泊系統，API RP 2A 為美國石油協會針對固定式海上平台設計及建造的規範。

DNVGL-ST-0145 為海上變電站規範； DNVGL-RP-C205 考量環境因素及負載；DNVGL-OS-C101 為海上及線強度設技法之鋼結構設計規範。

第二節 結構設計分析

支撐結構受力狀況如下圖，除了重力外，並須考慮風力、波浪、地震力甚至安裝時之吊裝應力。

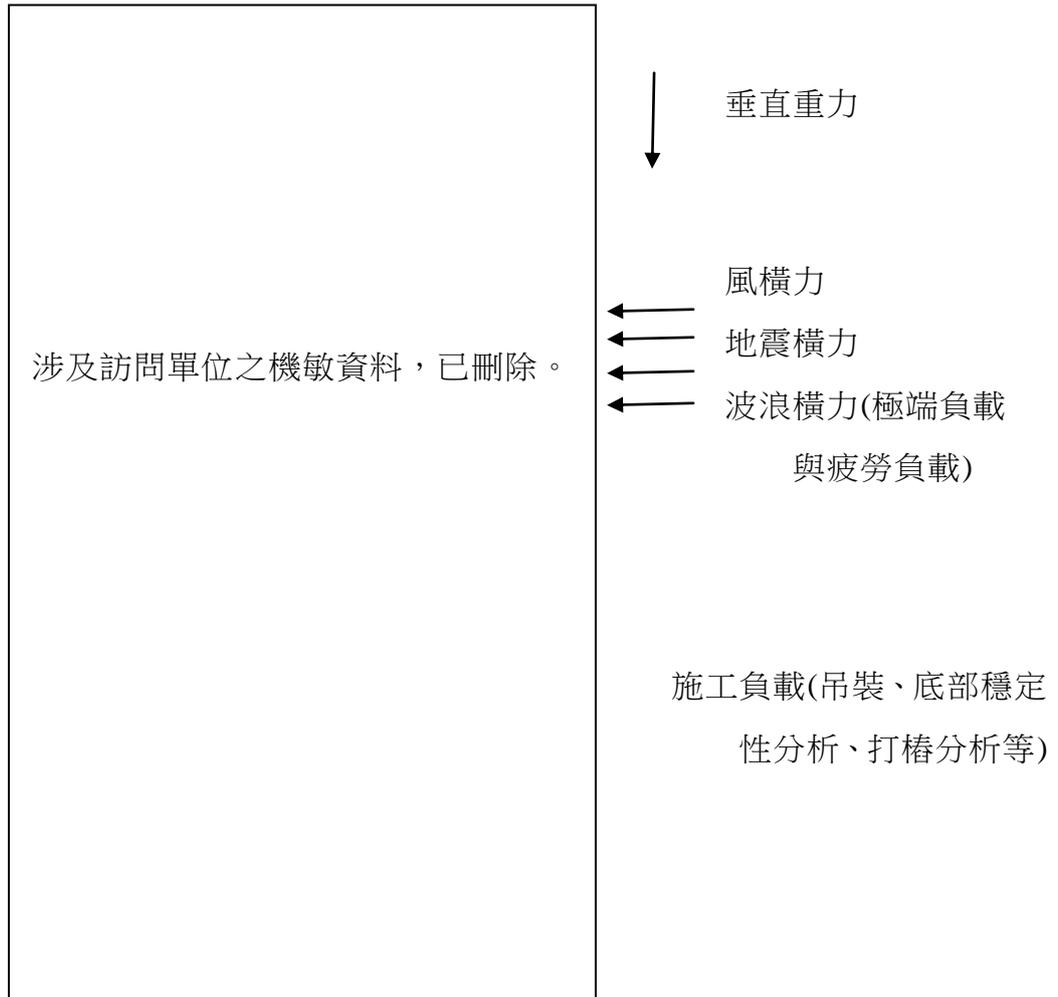


圖 17 結構受力圖

(一) 極端與運轉負載

考量設備重量、極端狀況（100 年才發生一次）及運轉狀況（1 年才發生一次）的浪高數據、海流速度、平均風速對海中變電站的負載。

(二) 疲勞分析

波浪的連續負載會造成桿件及結構銲接處因疲勞而減損使用壽命。每個波高循環相當於造成桿件持續受張力及壓力，如圖 18。每一個應力範圍在持續夠多次數循環後將產生斷裂破壞，不同應力範圍 S 將對應不同的破壞循環次數 N ，如圖 19。當結構細部的 $S-N$ 曲線確定後，取波高的散佈圖所有應力等級範圍發生次數與破壞次數比值，即可得知結構桿件在使用壽命中是否因疲勞而破壞。

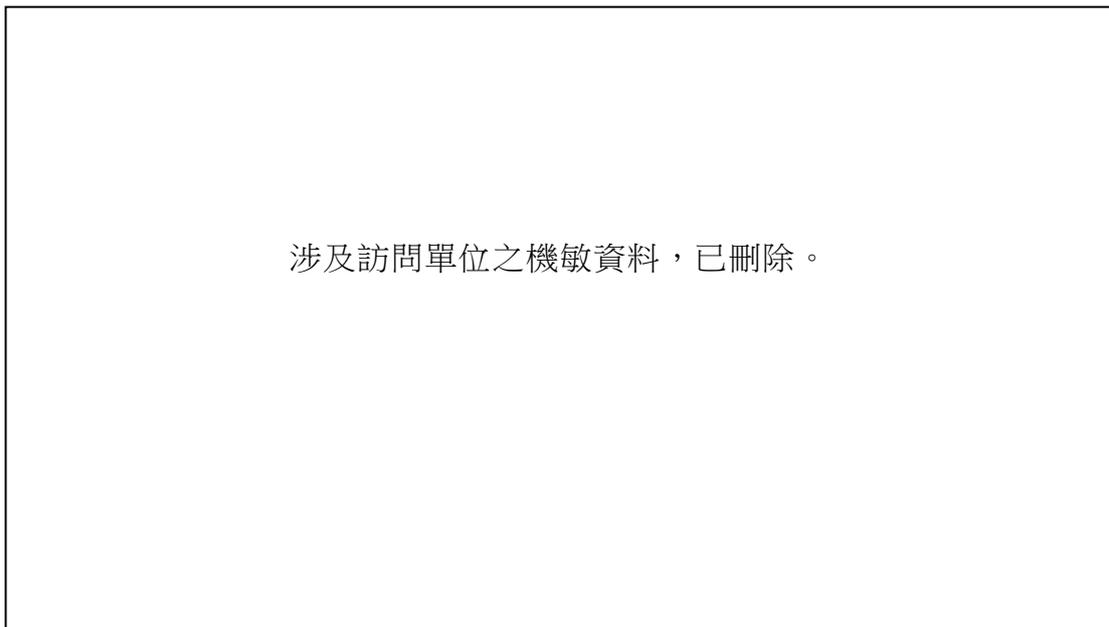


圖 18 波浪循環負載模擬

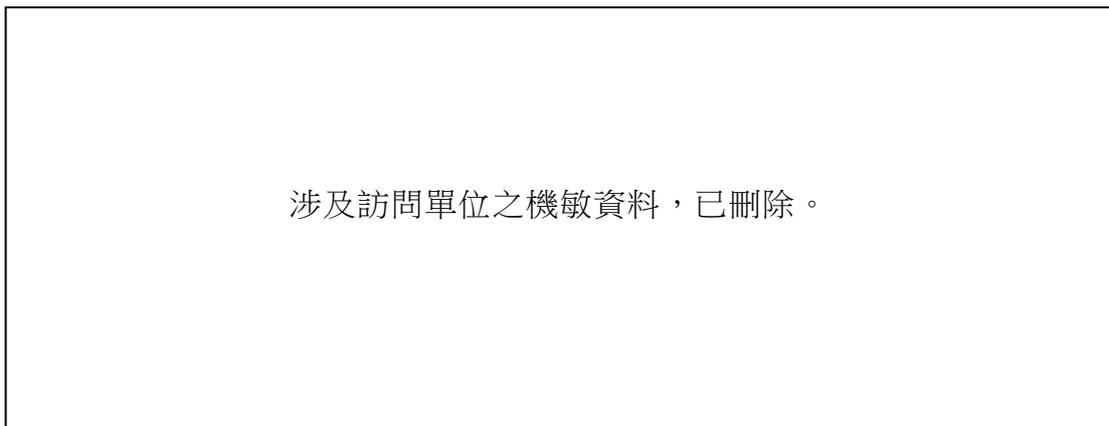


圖 19 S-N 曲線

(三) 地震分析

歐洲相對是一個地震發生不頻繁的地區，在討論時對於地震分析的著墨不多，但如能建立本土台灣海峽的水平譜加速度係數，在應用

上應與陸域結構物相同。較有疑慮者其一為土壤液化問題，台灣位處地震頻繁地區，依中央地質調查所-土壤液化潛勢查詢系統得知，在台中港至彰化縣、雲林縣臨海區域為土壤液化中、高潛勢區。此外，日本 2011 年發生 311 地震時，地震引致土壤液化導致風機支撐結構傾斜角度超過風機運轉容許傾斜量 ($\theta < 0.5^\circ$)，可見土壤液化發生將影響風機支撐結構之穩定性。面對彰化縣到雲林縣中、高液化潛勢海上風場海床環境，必須審慎評估液化海床中海上風機及變電站支撐結構穩定性，以確保海上風機運轉年限內安全無疑。第二項疑慮為對於地震安全的態度是否仍維持與建築物相同的大震不倒、中震可修、小震不壞。畢竟在 25 年的使用壽命中仍有相當機率會遇到中震，如經分析後發現地震力將控制支撐結構、基樁的破壞模式，考量海上的環境不容易對支撐結構及基樁進行修復，所以適度提高抗震能力應為可行之作法。

(四) 施工期間荷載

- a. 支撐結構在陸地組裝完成後經過裝船、海路運輸及吊裝的過程，均需仔細分析個別操作過程對結構的影響。
- b. 支撐結構吊放在海床上尚未打設基樁前是靠一種防沉墊保持平衡，因此要進行底部穩定性分析。
- c. 打樁分析：並非打樁過程對於支撐結構產生額外應力，重點是要評估選擇適當的打樁工具，可採用波動方程式分析不同能量的夯錘於打樁時的土壤阻力。

第三節 海上變電站施工

海上變電站包含鋼管、設備等各部零件並非全部在同一地點製造，而是依組裝進度分別匯集至組裝廠，考量組裝完成後直接出海的方便性，組裝廠均位於大型碼頭旁，各階段施工情形以圖片方式分述如後。



圖 20 變電設備平台結構組立



圖 21 變電設備平台設備安裝



圖 22 變電設備平台移動



圖 23 變電設備平台吊放至拖曳船



圖 24 套筒式基礎固定端切除



圖 25 套筒式基礎吊離拖曳船



圖 26 基樁假固定



圖 27 套筒式基礎於打樁銜接細部



圖 28 打設基樁



圖 29 變電設備平台固定端切除



圖 30 變電設備平台與套筒式基礎接合



圖 31 變電設備平台接合細部

第四章 建議事項

首先，感謝本處黃處長清松、林副處長國源與施經理正聖的肯定與提攜，選派職參與本次的出國實習計畫，學習新知，充實自我。另感謝 Ørsted 台灣分公司李經理俊誼及 Ørsted、Energinet 等相關人員安排的研討會與參訪行程，並且提供了相當寶貴的經驗與技術資料，使職此趟實習收穫更為豐富外，亦讓人深刻感受到該公司致力於海上實務的用心與投入。

本次實習有幾點建議事項如以下說明。

(一) 訪客逃生動線介紹

參訪 Ørsted、Energinet 公司及 Anholt 風場時，進入辦公室後的第一頁簡報都是該辦公廠區的緊急逃生動線介紹。即使辦公室僅作為文書作業、開會用途，仍對於初來乍到的訪客提供一份明確的逃生路線，於緊急事故發生時的疏散迫切性有很大幫助，這種對於工安風險的認識值得效法。

(二) 海上變電站及風機土壤液化問題

台灣位處地震頻繁地區，與歐洲風力發電所面臨的狀況不同。依中央地質調查所-土壤液化潛勢查詢系統得知，在台中港至彰化縣、雲林縣臨海區域為土壤液化中、高潛勢區。此外，日本 2011 年發生 311 地震時，亦發生地震引致土壤液化導致風機支撐結構傾斜角度超過風機運轉容許傾斜量 ($\theta < 0.5^\circ$)，可見土壤液化發生將影響風機支撐結構之穩定性。面對彰化縣到雲林縣中、高液化潛勢海上風場海床環境，必須審慎評估液化海床中海上風機及變電站支撐結構穩定性，以確保海上風機運轉年限內安全無疑。

(三) 適度提升海上變電站及風機的耐震性能

建築物耐震設計規範對於地震安全的態度是小震不壞、中震可修、大震不倒的耐震標準，其重點在取得人員安全性與設計經濟性的平衡，即使是非公眾使用的陸域建築物也常有人員出入及使用，所以

希望利用建築物的韌性換取設計時能夠採用更經濟的斷面，結果便是在中震襲擊後必須稍做維修。如經分析後發現地震力將控制支撐結構、基樁的破壞模式，考量相同的中震發生在海上時，海上的環境並不容易對支撐結構進行修復，以海上變電站在 25 年的使用壽命中仍有相當機率會遇到中震來看，適度提高抗震能力應較為可行。

(四) 建照程序突破

在參訪過程中與 Ørsted 人員進行討論時曾提問海上變電站是否及如何申請建造執照，但並無肯定答案。陸域的變電站有梁、柱、板、牆的建築物毫無例外均需申請建造執照，類似的海上變電站有梁、柱、板、牆的構造，也有人員維修時的宿舍空間，但以陸域申請建照的標準套用在海上變電站卻顯得難以執行，因為並不具備一般申請建照時基本所需要的地籍資料、建築線指示等條件，由於 Ørsted 在現階段進度尚未觸及此一議題，可能後續需要透過協調及修正行政規則解除限制。