



計畫編號：103-D0106

研究機構能源科技專案
103 年度執行報告

離岸風場作業安全評估技術開發計畫
(定稿版)

年度計畫：自 103 年 01 月 01 日至 103 年 12 月 31 日
執行單位：財團法人船舶暨海洋產業研發中心

中華民國 104 年 3 月

目 錄

103年度執行報告	1
一、 前 言	1
(一) 研究背景	1
(二) 研究目的	1
二、 技術應用之情境	2
(一) 技術需求	2
(二) 專利佈局說明	10
(三) 產業化佈局	11
三、 計畫執行情形	13
(一) 計畫實際執行內容.....	13
(二) 實際進度與預定進度比較.....	173
(三) 查核點說明	175
(四) 目標達成情形	177
(五) 計畫延長或變更執行情形.....	178
四、 執行績效說明	錯誤! 尚未定義書籤。
(一) 人力運用情形	錯誤! 尚未定義書籤。
(二) 經費運用情形	錯誤! 尚未定義書籤。
(三) 研發成果收入	錯誤! 尚未定義書籤。
(四) 研發成果統計	錯誤! 尚未定義書籤。
(五) 重要成果清單	錯誤! 尚未定義書籤。
(六) 重要績效指標(KPI)統計	錯誤! 尚未定義書籤。
(七) 重要成果說明	錯誤! 尚未定義書籤。
(八) 設備使用情形	錯誤! 尚未定義書籤。
(九) 性別主流化推動成果說明.....	錯誤! 尚未定義書籤。
五、 結論與檢討.....	179

(一) 離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發.....	179
(二) 離岸海事施工船舶運動安全評估技術開發	181
六、 參考文獻	182
七、 附件	185
附件一、研究成果照片及說明.....	185
附件二、分包計畫摘要說明.....	190
附錄、節能與環保成效自評說明.....	192

圖目錄

圖 1 全球離岸風力發電市場規模與趨勢(裝置容量)	3
圖 2 全球前十大離岸風電市場(2013 年累計裝置容量)	3
圖 3 歐洲離岸與陸域風場建置成本結構分析.....	5
圖 4 離岸風電海事工程產業價值鏈	7
圖 5 本年度計畫架構	13
圖 6 風力機主要安裝模式.....	16
圖 7 全球離岸風場安裝船起吊重量趨勢	18
圖 8 全球離岸風場安裝船吊車最大作業半徑趨勢.....	19
圖 9 全球離岸風場安裝船載重與甲板可用空間趨勢.....	19
圖 10 平台傾斜示意圖	28
圖 11 平台 GZ 值隨橫傾角變化之曲線.....	29
圖 12 船體受強風橫搖標準.....	30
圖 13 船體受強風傾覆標準(完整穩度).....	32
圖 14 吊裝系統各部名稱.....	35
圖 15 吊裝分析程序	36
圖 16 四條鋼索吊裝情況.....	39
圖 17 雙鈎起吊情況	40
圖 18 主動式捲揚補償系統.....	41
圖 19 自升式施工船上視圖.....	43
圖 20 自升式施工船側視圖.....	44
圖 21 自升式安裝船 3D 示意圖	44
圖 22 自升式平台船受風區域.....	45
圖 23 GHS 穩度計算軟體之艙間及甲板受風面積建置圖	46
圖 24 CSTC 70 穩度計算結果.....	47
圖 25 每月有義波高(significant wave height)小於 x m 之發生機率	49
圖 26 波浪玫瑰圖	50
圖 27 桁架式基礎之主要尺寸(左：正視圖/中：側視圖/右：透視圖).....	51
圖 28 自升式起重船俯視圖及配置	52
圖 29 自升式起重船側視圖及配置	53
圖 30 GLC-800-ED 起重機曲線.....	54
圖 31 索具配置示意圖	56

圖 32	接環詳細規格示意圖.....	56
圖 33	吊裝作業流程示意圖(俯視圖).....	57
圖 34	吊裝作業流程示意圖(前視圖).....	58
圖 35	基礎下降過程中靜態吊鉤負荷與距離海床平面之關係圖	62
圖 36	基礎下降過程中靜態吊索負荷示意圖	62
圖 37	桁架式基礎於不同沒水深度之動態負荷分析.....	65
圖 38	不同有義波高(Hs)情況下之吊索張力示意圖	66
圖 39	不同波峰週期(Tp)情況下之吊索張力示意圖.....	66
圖 40	考慮隨機負荷造成之最大吊索負荷示意圖	67
圖 41	第一個波擊負荷發生時之吊索負荷	67
圖 42	最大波擊負荷發生時之吊索負荷	68
圖 43	桁架式基礎各構件最大負荷比示意圖(藍<0.3，綠>0.3，深藍色表示 沒水部分).....	69
圖 44	桁架式基礎各構件波擊負荷比示意圖(藍<0.3，綠>0.3).....	69
圖 45	接環與螺栓之有限元素模型與吊索負荷示意圖	70
圖 46	螺栓之固定邊界條件示意圖	71
圖 47	接環與螺栓之負荷-應力圖	72
圖 48	接環與螺栓之應力分布圖	72
圖 49	單樁基礎式離岸風力機安裝之總工序	73
圖 50	多樁基礎式離岸風力機安裝之總工序	73
圖 51	各式鋼構基礎之安裝工序	74
圖 52	重力式混凝土基礎之安裝工序	74
圖 53	2014 年國際風力機廠商發展之 4~6MW 風力機已近成熟，未來 10 年內 8~10MW 可期待。	77
圖 54	支撐結構型式有 Monopile、Tripod、Tripile、Jacket、Gravity。	78
圖 55	大型 Upend 機具.....	80
圖 56	中型 Upend 機具.....	80
圖 57	Lifting beam	80
圖 58	Tower gripper	80
圖 59	Georgia Blade yoke	81
圖 60	Seafastenings for towers and nacelles on the deck	81
圖 61	Seafastenings for blade above the deck	81
圖 62	吊車船與平台駁船.....	82
圖 63	拖船與平台駁船	82

圖 64 宏華營造宏禹號	84
圖 65 樺棋營造海岸一號.....	84
圖 66 環島工程平台	84
圖 67 穩晉十六	84
圖 68 第八大寬號	85
圖 69 榮吉號	85
圖 70 Gantry crane	85
圖 71 Shear leg crane.....	85
圖 72 Revolving crane	86
圖 73 Ringer Crane、Mast Crane、Round-Leg Crane-1、Round-Leg Crane-2。	86
圖 74 穩晉、基隆港務局現有的吊車船之舉吊能力不足以符合風電所需。	87
圖 75 取沉箱浮沉台運送安裝基礎或風力機。.....	88
圖 76 架高吊車。.....	88
圖 77 取基隆港務局現有吊車船增設一組 Spud 及架高吊車，在好天候使 用。.....	88
圖 78 雙胴船體斧狀頭交通船	89
圖 79 雙胴船體 SWASH 交通船 123	89
圖 80 輕型自升安裝船	89
圖 81 大型自升安裝船	90
圖 82 方法一：一艘半升式船穿梭運輸、一艘自升式平台現場安裝.....	90
圖 83 方法二：一艘補償台運輸船運輸、一艘自升式平台現場安裝.....	91
圖 84 方法三：二或三艘運輸船運輸、一艘自升式母船現場安裝	91
圖 85 大型自升式運輸安裝船.....	91
圖 86 IHC 之整機安裝安裝船構想，採浮式大船運作。.....	92
圖 87 A2SEA 構想採大型油輪改裝成基礎安裝船，亦採浮式大船運作。	92
圖 88 東石離岸海氣象觀測站之建置	93
圖 89 梧棲測站平均月雨量與氣溫圖	96
圖 90 台中港 2006-2010 年風玫瑰圖.....	98
圖 91 台中港四季風玫瑰圖.....	98
圖 92 台中港 2006-2010 年表面海流玫瑰圖	101
圖 93 台中港四季表面海流玫瑰圖	101
圖 94 台中港 2006-2010 年波浪玫瑰圖.....	103

圖 95	台中港四季波浪玫瑰圖	103
圖 96	新竹浮標資料 2005~2013 年風玫瑰圖	107
圖 97	新竹浮標資料 2005~2013 年四季風玫瑰圖	107
圖 98	新竹浮標資料天候窗(2005~2013 年).....	110
圖 99	新竹浮標資料 2005~2013 年波浪玫瑰圖	111
圖 100	新竹浮標資料 2005~2013 年每季波浪玫瑰圖.....	111
圖 101	新竹浮標 2005-2013 年極值波高箱型圖	120
圖 102	數值波浪模式計算區域水深圖與巢狀網格計算範圍	123
圖 103	SWAN 波浪驗證結果在新竹資料浮標站之示性波高時序列比對圖 ..	124
圖 104	波浪驗證結果在彌陀資料浮標站之示性波高時序列比對圖.....	125
圖 105	波浪驗證結果在澎湖資料浮標站之示性波高時序列比對圖.....	125
圖 106	台電風場十年模擬波浪歷時圖	128
圖 107	台電風場十年模擬波浪歷時圖	128
圖 108	海洋風場十年模擬波浪歷時圖	129
圖 109	2004 年 6 月~2014 年 7 月侵臺颱風路徑分類統計圖	133
圖 110	天秤及芭瑪颱風路徑圖	133
圖 111	台電風場十年波浪玫瑰圖	136
圖 112	台電風場十年四季波浪玫瑰圖	137
圖 113	台電風場極值波高箱型圖	144
圖 114	船體運動的六個自由度	147
圖 115	從規則波導出 RAO.....	149
圖 116	由波浪頻譜與 RAO 求取運動響應之能量譜.....	150
圖 117	設計海況波譜	156
圖 118	船體運動 RAO	157
圖 119	船體加速度 RAO	158
圖 120	設計海況時，船體運動響應之方均根植.....	159
圖 121	設計海況時，船體加速度響應之方均根植.....	160
圖 122	主要運輸船舶之運動安全評估	163
圖 123	重心起伏運動隨時間變化圖	166
圖 124	重心縱搖運動隨時間變化圖	166
圖 125	甲板無上浪(船速度為 0)	166
圖 126	不同頻率對縱搖的影響	167
圖 127	甲板上浪示意圖.....	168

圖 128	甲板上浪時序列圖(時間間距 $\Delta t=0.1$ 秒).....	169
圖 129	台電彰濱南區風場 2013 年波浪模擬歷時圖.....	186
圖 130	福海風場(永傳公司)2013 年波浪模擬歷時圖	186
圖 131	海洋風場(上緯公司)2013 年波浪模擬歷時圖	187
圖 132	2013 年 7 月及 8 月蘇力及潭美颱風侵台路徑圖.....	187
圖 133	研究團隊拜訪海大河工系會後留影	188
圖 134	研究團隊拜訪宏華營造商會後留影	189

表目錄

表 1 離岸風電海事工程作業安全評估技術需求.....	9
表 2 離岸風電安裝船選用/設計要素.....	15
表 3 風力機預組模式與各部件重量對照表	17
表 4 自升式安裝船新船之吊車規格	20
表 5 國內離岸示範風場基本條件	21
表 6 國內現階段基礎、觀測塔、風力機之運輸安裝船機能量	22
表 7 國內現有浮船塢	23
表 8 國內規劃新造自升式安裝船之規格表	23
表 9 國外主要海事工程作業準則(或規範).....	24
表 10 國外主要海事工程準則(或規範)可借鏡處	25
表 11 完整穩度範圍	31
表 12 船舶最小吃水與俯仰差	32
表 13 歐洲海上吊裝規範書、手冊及準則之蒐集-施工管理類	33
表 14 歐洲海上吊裝規範書、手冊及準則之蒐集-設計技術類	34
表 15 空氣中吊裝時之 DAF 因子	38
表 16 結果因子	41
表 17 DNV 之 DAF 建議值.....	42
表 18 DNV 在靜不定四點吊裝時之 SKL 建議值.....	42
表 19 自升式施工船之主要尺寸表	43
表 20 5MW 風力發電機組詳細重量表	46
表 21 CSTC 70 之穩度評估	47
表 22 CSTC 70 天氣衡準要求之穩度評估	48
表 23 風況、海流及波浪之環境條件	49
表 24 桁架式基礎之主要尺寸與材料係數	50
表 25 起重船之規格與操作條件.....	51
表 26 起重機之規格	53
表 27 吊索與接環詳細規格.....	55
表 28 主吊索靜態負荷確認(針對空中吊裝施工).....	59
表 29 連接吊索靜態負荷確認(針對空中吊裝施工).....	59
表 30 水動力計算之各項係數.....	61
表 31 桁架式基礎於不同沒水深度之計算參數.....	63
表 32 吊索相關之安全係數.....	63

表 33	主吊索動態負荷確認.....	64
表 34	連接吊索動態負荷確認.....	64
表 35	接環之材料規格	70
表 36	螺栓與接環之有限元素分析結果	70
表 37	螺栓與接環之有限元素分析結果	71
表 38	預測未來通行之 5~7MW 風力機構件可能技術資料	77
表 39	不同 MW 風力機所採 Monopile 在不同水深之各式重量.....	78
表 40	不同 MW 風力機所採 Tripod 及 Jacket 在不同水深之各式重量	79
表 41	國際風電安裝船的演進.....	82
表 42	國內目前最大的兩艘自升船之技術能量.....	83
表 43	梧棲測站氣象資料觀測統計表	96
表 44	台中港風速風向觀測資料結果統計(2006-2010 年).....	97
表 45	台中港 2006-2010 年風速及風向聯合機率分佈百分比(%)統計表	99
表 46	台中港表面海流觀測資料結果統計(2006-2010 年).....	100
表 47	台中港波浪觀測資料結果統計(2006-2010 年).....	102
表 48	台中港 2006-2010 年有義波高及有義週期聯合機率分佈百分比(%) 統計表	104
表 49	台中港 2006-2010 年有義波高及波向聯合機率分佈百分比(%)統計 表.....	105
表 50	蒲福風級浪高對照表.....	108
表 51	新竹浮標(2005~2013 年)每月波高統計	110
表 52	新竹浮標波浪觀測資料結果統計(2005-2013 年).....	112
表 53	海洋氣象降低因素表.....	113
表 54	DNV·GL Noble Denton 海事操作回歸期.....	113
表 55	各分布函數 MOM 參數推定表.....	114
表 56	LSM 推定參數表.....	115
表 57	K-S(Kolmogorov-Smirnov) Test 中的臨界值.....	117
表 58	新竹浮標波浪月極值統計表(單位：公尺).....	118
表 59	新竹浮標 2005-2013 年每月波高之箱型圖分析表(單位：公尺).....	120
表 60	新竹浮標各月份重現期波高表(單位：公尺).....	120
表 61	參數驗證統計誤差值.....	126
表 62	三座示範風場經緯度座標及水深	127
表 63	2004/6~2014/7 年有發警報颱風列表	129
表 64	2004/6~2014/7 年有發警報颱風各年月次數統計表.....	132

表 65	海事工程施工允許波高值.....	134
表 66	台電風場(2004/6~2014/7)全年示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表.....	138
表 67	台電風場(2004/6~2014/7)春季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表.....	139
表 68	台電風場(2004/6~2014/7)夏季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表.....	140
表 69	台電風場(2004/6~2014/7)秋季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表.....	141
表 70	台電風場(2004/6~2014/7)冬季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表.....	142
表 71	台電風場模擬資料統計結果.....	143
表 72	台電風場月極值波高統計表(單位：公尺).....	143
表 73	台電風場每月波高之箱型圖分析表(單位：公尺).....	144
表 74	台電風場各月份重現期極值波高表(單位：公尺).....	145
表 75	台電風場連續 24 小時波高小於 1.5 公尺天數統計.....	146
表 76	流體動力方程式的含意.....	147
表 77	Noble Denton 建議的船體運動預設值.....	152
表 78	配置與慣量計算表.....	155
表 79	靜水性能.....	155
表 80	國內駁船能量.....	161
表 81	國內自升平台能量.....	162
表 82	船模主要尺寸.....	164
表 83	船模壓載船況資訊.....	164
表 84	數值模擬條件.....	165

103年度政府部門科技計畫年度摘要報告

計畫名稱：離岸風場作業安全評估技術開發計畫		計畫編號：103-D0106		
主管機關：經濟部能源局		執行單位：財團法人船舶暨海洋產業研發中心		
計畫主持人：周顯光		協同主持人：鍾承憲		計畫聯絡人：柯家豪
聯絡電話：(02)28085899分機456		傳真號碼：(02)28085866		
年度期程：自 民國103年01月01日 至 民國103年12月31日				
經費：新臺幣		19,000	千元	
		投入人力：		9
				人年
執行進度 (%)	期 間	預 定 (A)	實 際 (B)	比 較 (A-B)
	當 年	100	100	0
經費支用 (新臺幣千元)	期 間	預 定(C)	實 際(D)	支 用 率(D/C) (%)
	當 年	19,000	17,076	89.87

主要執行成果：

一、計畫內容概要

歐美建置風場，相當重視安全評估，一般在先期規劃期即納入風險評估，為奠定國內海事工程之基礎、培養跨國作業之能力，確認採用之施工方法與搭配機具能符合國際海事擔保調查認證之標準，本計畫將對離岸風場開發之海事工程階段，特別是海上施工時所涉及之裝載、運輸、吊裝等相關作業之關鍵技術進行研究，包含施工作業所需之波浪模擬等環境資料乃至各作業之評估方法，期能建立使用工法在符合國際認證組織標準下之海事作業評估能力，確認施工時之各關鍵步驟均能符合安全需求，並從中研擬出適於我國施工環境與施工能量之安全作業準則，對我國海事工程產業切入離岸風電場建置有所助益。

二、計畫執行成果

- 對已開發離岸風場之運輸與吊裝機具進行調查與分析：參考歐洲具代表性之離岸風場，對其設置場址、安裝方式等項目歸整，檢討標準離岸風場開發時，符合作業安全需求時所需之設備與機具規格、配合條件等資料，並進行趨勢探討。
- 針對台灣之環境條件進行所需運輸能量與吊裝機具規格之評估：依照國內海氣象與海域地質觀測資料，與離岸風場場址，盤點國內現有基礎及風力機相關運輸/打樁/安裝之船舶及浮式起重船的能量，並提出規格建議。
- 施工船靜水與動穩度性能評估分析：以船長73 m、船重3400 ton之自升式平台安裝船為例，搭載2具3.6 MW的風機進行裝載分析，並考慮強風橫搖與關鍵構件吊裝條件進行大傾角穩度分析，確認施工船裝載分析之流程。
- 海事工程海上吊裝作業評估分析：已建立由空氣中吊裝、沒水過程吊裝等評估分析能力，從結構、索具靜態與動態負荷，至安全評估標準應用、結構強度評估均建立技術能力，對我國海事作業之事前評估、掌握工法可行性，有相當大之助益。
- 收集與整理示範風場附近環境資訊，以了解風場海域特性，並可作為施工船舶安全評估資料依據，由氣象局新竹浮標長期(2005~2013年)波浪觀測資料收集與分析，並藉由統計分析方式，以Gumbel及Weibull分布函數，針對逐月波浪資料極值，確認Gumbel及Weibull機率函數分布型式。
- 台灣海峽十年波況重現分析中，將SWAN模式以資料浮標(新竹及彰濱)實測資料率定參數後，並以氣象局新竹、澎湖及彌陀浮標進行相關性分析，可以發現模擬與觀測值為高度相關(相關係數大於0.8)，並進行十年波況重現模擬與相關統計分析，輸出三座風場的波浪逐時資料進行分析與統計。
- 建立船隻進行船舶運動安全分析能力，確認施工船運輸過程之運動特性標準與狀況，並對國內船舶進行安全性評估。

三、預期產業效益

- 與海事工程廠商合作，對其所規劃之施工方式先行進行符合國際規範之標準之安全評估，確認其可行性，以與國際接軌、協助其建立跨國作業之能力，促進海事工程業之發展。
- 本計畫與接續的計畫所建立之技術，配合政府「千架海陸風力機」計畫的逐步實現，將可使我國之海事工程產業能獲得健全發展，且將能力擴展到離岸的場域，對近岸的重大工程也可以自主實施，不需再租用外商機具。

計畫變更說明：

無。

落後原因：

無。

因應對策（檢討與建議）：

無。

（請以兩頁內完成）

一、前言

(一) 研究背景

台灣具有可觀的風力資源，目前陸域風能較少且大致上已建置或完成規劃，海域風能則蘊含豐富但尚未開發；台灣西岸海域具備離岸風場開發潛能(工研院，2004)，國家推動「千架海陸風力機計畫」，目標為在 2030 年以前建設千架海陸域風力機，使風力發電累計裝置容量達 4.2 GW，其中，離岸風力機裝置量將達 3.0 GW，在此目標之下，經濟部在 2012 年 7 月 3 日公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」[1]，應在 2015 年底前完成示範風機及海氣象觀測塔。

離岸風場建設與營運的複雜度遠遠超過陸上風電場的建設，除規劃設計外，水下支撐結構、離岸風力機與相關元件之運輸、吊裝、安裝施工，以及後續之維護與營運均與海事工程與海上作業有關；況且在台灣，海事工程施工需與時間賽跑，一年之中扣除東北季風(10 月~4 月)，颱風(7 月~9 月)及夜間無法施工，台灣一年中最適合海上施工的天數平均只有 120 天，其中，只有小浪、中浪的最好天候僅 50 天，可工作的時數甚為有限；施工前的氣、海象、地質及既有水下物之調查、乃至於人、機、料的期前調度計畫準備，都是工程成敗的關鍵因素，如何在安全之前提下，確保相關作業能如期如質完工，為相當重要的議題。

海上施工現場受地形及作業環境限制，技術與機具門檻高，致使建置成本高居不下；目前我國離岸海事工程技術較為薄弱，主要實績多以港灣等近岸工程為主，無離岸風場施工相關經驗，更無自有的專屬離岸風電吊裝船及安裝船隊，且現階段國內專業人員之技能與經驗不足、對機具與工法操作不熟，導致海事工程施工品質與安全性較無保障；示範風場推動在即，若仰賴歐洲海事工程產業，可能會有機具調度距離過遠、時間過長、成本過高之問題，若依靠亞洲鄰國資源，則會有時程受制於人、對施工掌握之程度不足之疑慮，一般而言，海事工程產業距離風場愈近，愈有其成本優勢，故應藉國內離岸風場開發之契機，逐步建立與提升國內海事工程之施工及管理的自主技術能量，促進國內海事工程產業之發展。

(二) 研究目的

歐美建置風場，相當重視安全評估，一般在先期規劃期即納入風險評估的項目中，國際認證單位 ABS、DNV 等在運輸、吊裝等技術上亦有明確的規範，然目

前我國離岸海事工程技術較為薄弱，由於投資成本高、風險高，國內產業進入相當困難，以往施工機具均以租用為主，亦無自有的吊裝船及安裝船隊，故以往均未被要求所使用之施工船舶或機具需通過認證，更遑論海事施工過程之安全與可行性評估以及相關安全評估規範的建立；實際上，歐洲建置海上風場時，海事工程中之施工方法多經過如 GL Noble Denton 之海事擔保調查(Marine Warranty Survey)機構的認證，以事前確認施工方式之可行性與安全需求。

為奠定國內海事工程之基礎、培養跨國作業之能力，確認採用之施工方法與搭配機具能符合國際海事擔保調查認證之標準，海事工程服務關聯的安全評估技術實不可或缺。本計畫將對離岸風場開發之海事工程階段，特別是海上施工時所涉及之裝載、運輸、吊裝等相關作業之關鍵技術進行研究，包含施工作業所需之波浪模擬等環境資料乃至各作業之評估方法，期能建立使用工法在符合國際認證組織標準下之海事作業評估能力，確認施工時之各關鍵步驟均能符合安全需求，並從中研擬出適於我國施工環境與施工能量之安全作業準則，對我國海事工程產業切入離岸風電場建置有所助益。

二、技術應用之情境

(一) 技術需求

1、本計畫之關聯產業現況

現階段全球風力發電之開發以陸域型為主，但基於噪音問題、腹地受限等因素，且由於離岸具有風況較佳且平穩等優勢，近年離岸型風電比重逐漸提升。2013 年全球離岸風電新增裝置容量約 1.7 GW，占整體風電比重約 5%，累計裝置容量達 7.2GW (錯誤! 找不到參照來源。)

展望未來五年離岸風電市場發展趨勢，依據 GWEC[2]的預測，2018 年全球離岸風電新增裝置容量占整體風電之比重將近 15%，累計裝置容量約可達 36.5 GW，2013~2018 年之年複合成長率(CAGR)與過去五年無異，預估約達 40%。依據 EWEA 之調查與預測，2020 年以前，歐洲離岸風電累計裝置容量將達 40 GW，全球市占約八成。

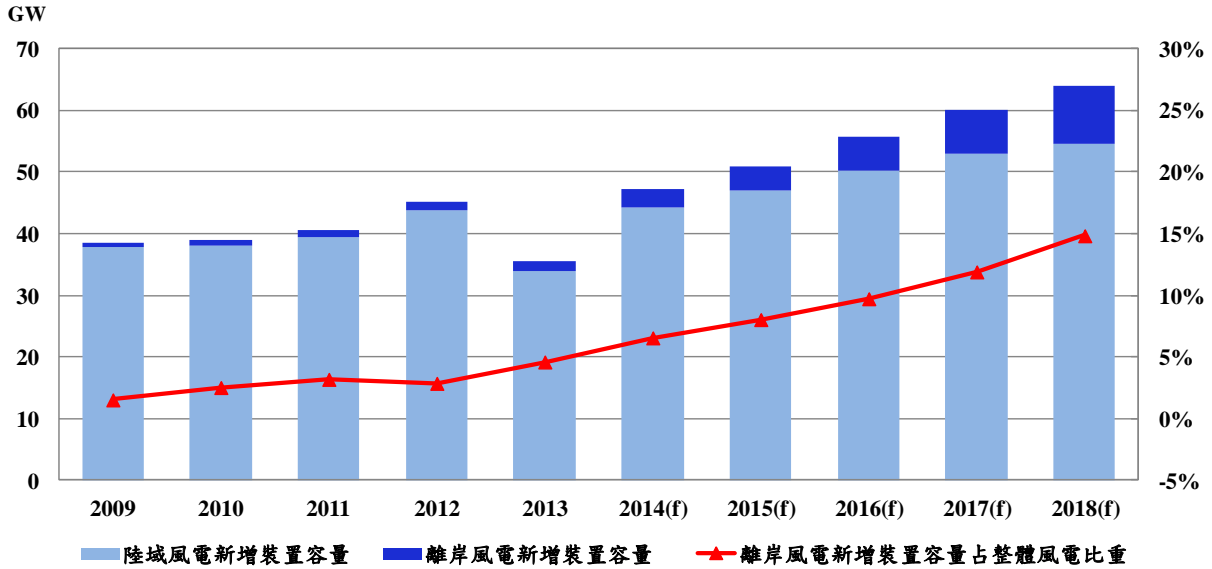


圖 1 全球離岸風力發電市場規模與趨勢(裝置容量)

資料來源：GWEC(2014 / 2)，船舶中心；2014 / 5

歐洲為主要區域市場，全球市占達九成以上。2013 年全球前五大離岸風電國依序是英國、丹麥、比利時、德國、中國大陸，其中，英國的全球市占達五成以上；其他如荷蘭、瑞典、日本、芬蘭、愛爾蘭、南韓、西班牙、挪威、葡萄牙、美國等國亦有少量裝置實績 (錯誤! 找不到參照來源。)，而法國正投入建置中。

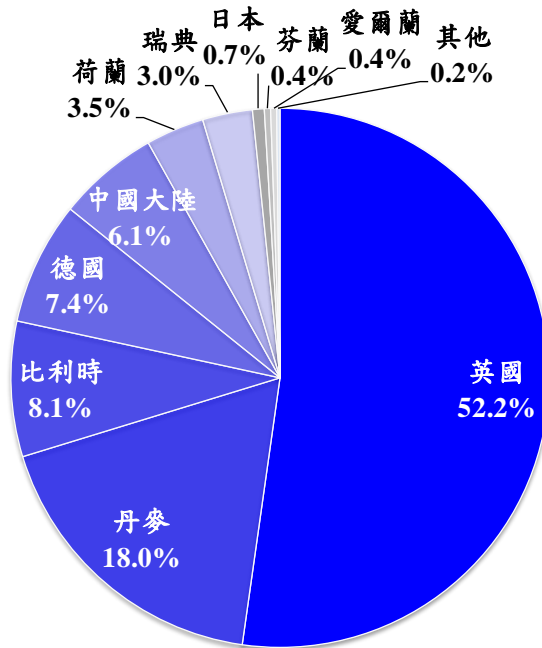


圖 2 全球前十大離岸風電市場(2013 年累計裝置容量)

資料來源：GWEC(2014 / 4)，船舶中心整理；2014 / 6

現階段離岸風電市場主要集中於歐洲地區，而亞洲市場亦開始萌芽，未來成長性可期，其中，中國大陸、日本、南韓是亞洲主要離岸風電發展國。中國大陸 2012 年離岸風電累計裝置容量排行全球第三，僅次於英國、丹麥；2013 年因政策推動負面因素，被比利時、德國迎頭趕上，累計裝置容量約 430 MW。中國大陸在亞洲國家中排名第一，其 2020 年政策目標極具企圖心，設定為 30 GW。日本 2013 年離岸風電累計裝置容量尚少，約 50 MW，其 2030 年的裝置目標為 7.6 GW。日本為取得技術領先地位，選擇現階段全球技術發展尚在萌芽期的浮動式離岸風力機系統，作為技術佈局重點；依據日本風力發電協會(JWPA)的預測，日本離岸風電浮動式風力機系統累計裝置容量將於 2027 年超越固定式。南韓 2013 年離岸風電累計裝置容量僅 5 MW，規劃 2019 年先完成 2.5 GW，再漸次於 2030 年完成 9 GW 的目標。

臺灣沿岸風力資源豐富，根據工研院之評估[3]，我國西部及澎湖水深 5 至 20 m 海域的風能可開發量約 1.2 GW，水深 20~50 m 海域約 5 GW，水深 50m 以上深海海域則高達 9 GW 以上，相當具有開發價值。受惠於此天然優渥條件，為拓展再生能源，我國已於 2011 年 6 月宣佈 2030 年以前建設千架海陸域風力機，風力發電累計裝置容量達 4.2 GW 之目標，其中離岸風力機裝置量將達 3.0 GW。為推動此重大建設，已於 2012 年 7 月正式公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」[1]，鼓勵企業投入建置離岸風電之示範風力機機組及風場，並於 2013 年 1 月公佈由台電、永傳、上緯三家廠商得標，預定在 2015 年以前完成示範機組並開始商轉(目前展延一年至 2016 年)，並於 2020 年以前完成示範風場並開始商轉。

相較於陸域風場，離岸風場的開發成本較高，且成本結構差異大。如圖 3 所示，參考歐盟風場建置專案之成本結構分析，風力機系統在陸域風場建置成本約占 80%，而在離岸風場建置成本中僅占 41%，其他如水下基礎建造占 19%、變電站建造占 5%，風力機與水下基礎安裝占 15%，海底電纜安裝占 13%。海事工程服務成本總計達三成以上(風力機、水下基礎、海底電纜之安裝及其它海上工程)，該成本主要分為用地費(風場、港埠基地)、工程規劃設計費及施工監造費三大項；其中占比最高的施工監造費之直接成本又可分為船舶機具成本及人工成本。

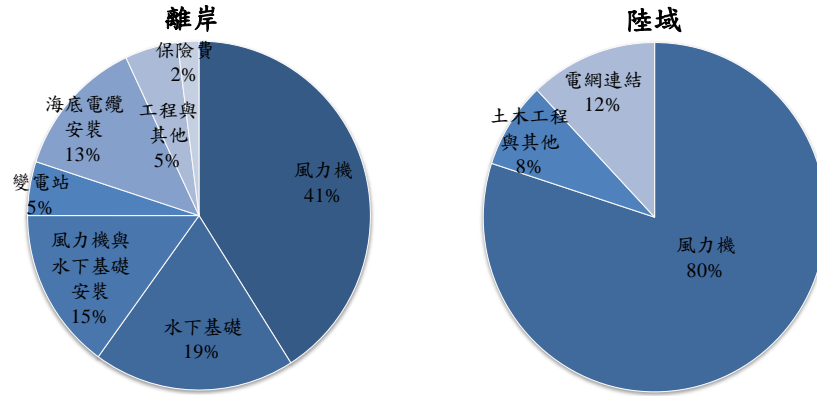


圖 3 歐洲離岸與陸域風場建置成本結構分析

資料來源：HSBC Global Banking and Markets, Offshore Wind Discussion Materials, (2011 / 7) ; 船舶中心整理，2013 / 10

離岸風電的海事工程服務成本占比高且含括產業範疇廣，所需的人力、船機、儀器/系統等可帶動關聯產業發展，發揮範疇經濟效果，且可提升傳統產業或既有產業技術能量、擴大產品線。此外，由於風力機組、水下基礎、海底電纜、海上變電站等系統的套件重量往往以噸計算，運輸、安裝所需之工程船舶及海事工程服務，距離風場愈近，愈有其成本優勢。再者，每個海域環境不同，儘管歐洲產業鍊在離岸風場建置上已累積豐富實績，仍難以直接複製至亞洲海域。台灣在離岸風電相關產業發展上較其他先進國家晚，但針對國內離岸風場，台灣產業在海事工程服務上具有地域上的優勢，應記取過去未在發展陸上風電時落實產業本土化之教訓，掌握離岸風電產業帶動經濟發展的機會。

離岸風電海事工程的複雜度遠遠超過陸上風電建置工程，無論基礎(基樁、水下支撐結構)或風力機組的運輸與安裝，均有其工程技術門檻，亦隱含安全上的隱憂，在安裝過程中，若打樁與固著作業無法確實掌握與評估，除造成時程延宕、成本損失外，亦有可能造成施工品質不良，對後續之營運維護有極大之影響，因此亟需相關之安全評估技術，以事前分析該作業方式之可行性。

風力機之水下基礎技術型式的選擇，主要取決於水深、海床地質、海浪、海流以及成本、船舶機具設備能量等。水下基礎由工程顧問公司或其他具設計能力的業者負責設計，由鋼構業者負責建造，由海事工程業者負責安裝，其中打樁、安裝水下支撐結構、灌漿作業通常分別由不同業者進行。以英國 Walney 2 離岸風場為例，該風場的單樁式(Monopile)基礎由丹麥工程顧問公司 Ramboll 設計，由德國海管與鋼結構物供應商 EEW 建造，由比利時海事工程業者 DEME 集團下的 GeoSea 承包安裝作業，並負責安裝上部轉接構件(Transition Piece)，

打樁作業分包給荷蘭工程業者 VSF，灌漿作業分包給丹麥灌漿工程業者 ITW Densit。海上安裝作業的專業分工，顯示人員操作樁錘、吊車、灌漿裝置等船上相關裝備需具備高度技術，亦凸顯各項作業之搭配的複雜性，而事前的安全評估分析結果可作為各介面溝通協調的重要依據。

在海氣象資料分析技術方面，依據歐洲風場開發經驗，需蒐集十年海氣象資料，才可決定環境資訊，提供相關船舶機具之設計及安全評估，在船舶機具設計規範方面，ABS[4]、DNV[5]等認證單位已制定自升式平台(Self-Elevating)船、起重船等安裝船的相關法規，而 A2SEA、SEAJACK 等公司已取得認證；ABS[6]、DNV[7]、GL[8]等已制定海上吊車的相關法規，而 IHC、FAVELLE FAVCO、AMCLYDE 等公司已取得認證。在海事工程施工規範方面，除了歐美各國，如挪威 DNV[9][10]、德國 GL[11]、英國標準學會(British Standards Institution, BSI)[12]外，中國電力企業聯合會(China Electricity Council, CEC)[13]等單位亦已制定離岸風電海事工程施工規範，針對施工規劃、施工前的船機準備/人員訓練、施工方法、施工安全管理等項目加以規範。

反觀國內發展現況，國內中央氣象局、水利署在西岸設有多個海氣象監測站，但皆位於近岸，且非設置在現階段已規劃的苗栗、彰化離岸風場位址附近，加上海象的部分並未有長達十年的完整資料。在船舶機具設計規範方面，國內產業在離岸海事工程的實績寥寥可數，且不具跨國作業之能力，故以往均未被要求應用於國內海事工程的施工船舶或機具需通過國際認證，更遑論安全評估規範的建立。由於風力機組、水下基礎、海底電纜、海上變電站等系統的套件重量動輒達百噸等級，海事工程服務及其所需工程船隊規模亦較大，以歐洲與亞洲持續開發離岸風場之態勢，若仰賴歐洲海事工程產業，可能會有機具調度距離過遠、時間過長、成本過高之問題，若依靠亞洲鄰國資源，則會有時程受制於人、對施工掌握之程度不足之疑慮，使得我國離岸風場未能如預期般之建置，一般而言，海事工程產業距離風場愈近，愈有其成本優勢；再者，每個海域之風況、海況不同，且台灣為颱風與地震高潛勢區，平均每年有 3~4 個颱風侵襲，由於位處環太平洋地震帶，平均 15~20 年發生一次劇災型地震[14]，儘管歐洲產業在離岸風場建置上已累積豐富實績，但仍難以直接複製其經驗至台灣風場。換言之，針對國內離岸風場建置與維護，本土海事工程服務產業有絕對的優勢，同時也有提升技術的必要性，而海事工程服務關聯的安全評估技術實不可或缺。

2、產業價值鏈分析

離岸風電海事工程相關領域主要分為建置期及運維期二大期程的工作。建置期包含水下基礎、海上變電站、海底電纜之評估/設計、採購、建造與施工(安裝)等工作項目，評估/設計一般由工程顧問業者統籌，另可能分包給量測服務業者、學研單位，建造相關的業者有海事工程業者、鋼構業者，安裝的部分主要由海事工程業者負責。運維期的工作項目主要是風場各系統之監控、維護。此二期程的涵蓋範圍廣，不僅需要各種專業技術，亦需跨領域的專案管理，在歐洲的離岸風電產業價值鏈中，建置期的工程總承包商稱為 EPCI (Engineering, Procurement, Construction and Installation；工程設計、採購、建造、安裝)，運維期的承包商則稱為 EPCM (Engineering, Procurement, Construction and Maintenance；工程設計、採購、建造、維護)(錯誤! 找不到參照來源。)



圖 4 離岸風電海事工程產業價值鏈
資料來源：船舶中心；2014 / 5

離岸風電在建造施工期與營運維護期皆需要安全評估技術。在建造施工期的運輸吊裝階段，安全評估技術主要可分裝船(Load-Outs)技術、運輸(Transportation)技術、海上吊裝(Marine Lifting)技術；安裝階段則分為打樁(Piling)技術、固著技術(Grouting)等。在營運維護期所需的安全評估技術統稱為維運技術，包含監測技術、維護維修技術等。現階段國內海事工程供應端的技術能量與缺口分析如下 (錯誤! 找不到參照來源。):

(1) 波浪與船體運動技術需求

國內欠缺長期連續性的西部風場位址之海氣象資料，作為相關設計及

安全評估的依據，其中海浪對海事工程的影響尤大，因此亟需透過波浪重現技術，進行環境資訊收集分析。此外，短期在建置示範風力機時，預期國內尚缺乏自升式安裝船等工程船舶，需運用國內既有船舶，因此發展船舶適用性評估技術益顯重要。

(2) 裝船技術需求

目前國內外運用的岸邊裝船技術，包含陸上吊裝、壓艙控制、船上吊裝、佈置裝載以及運件繫固等技術。各項技術在台灣海事工程業及航運業皆已運用已久，但因尚未應用在離岸風電安裝施工等大型工程，佈置裝載等技術項目有待提升。

(3) 運輸技術需求

運輸技術主要包含駁船拖航、動力船運輸、人員運輸及浮船法等技術項目。除了浮船法之外，各項技術在國內海事工程上已累積許多實績，但在離岸較遠的大型海事工程中尚未有運用實績，加上這些技術需進行模擬分析，以確保機具或船體之穩度或負載；此部分技術需引進國外專業廠商的技術，以進行技術升級。

(4) 海上吊裝技術需求

目前國內外運用的海上吊裝關鍵技術，主要包含起重船的浮式吊裝技術、自升式船的吊裝技術，以及操作系統機具設計技術、船況補償技術、水下基礎定位技術等。自升式平台船除了應用於台灣中油股份有限公司的鑽油平台之外，以往國內較缺乏執行這類海事工程的實績，現階段國內海事工程業者僅擁有無自航能力的自升式平台。在起重船的部分，國內一般只使用在台灣沿岸或港灣地區，可配合陸上吊車使用，但吊車能量不足以應用於離岸風場建置。

(5) 打樁技術需求

打樁主要包含施工期水下環境監測、後打樁、預打樁等技術項目。在打樁施工期間，可能對水中生物造成不良影響，但以往國內並不注重施工期的水下環境監測，這方面的技術有待建立。另外，國內慣常採用後打樁的方式，較欠缺預打樁的經驗。

(6) 固著技術需求

國際上固著的核心技術項目包含水平調整、灌漿固著、機械固鎖及防

蝕封裝等。國內僅具有防蝕封裝的應用實績，缺乏其他經驗，尤其在機械固鎖技術的能量有待提升。

(7) 維運技術需求

除了建造施工期，營運維護期亦潛藏安全上的隱憂。維運技術關鍵技術項目包含水下結構監測、可靠度分析、維修、船舶登風力機、交通船人員運輸技術等。國內近岸/港灣工程具有水下結構監測、可靠度分析、維修等技術應用的實績，但缺乏離岸海事工程應用實績，技術能量待提升。此外，國內營運團隊不應僅有風力機系統廠，應包含業主/營運商、海事工程業者、當地漁民及擁有小船能進行維護管理的單位，以確保營運維護期間達到多贏的局面，使離岸風場可經營長達 20 年以上。

表 1 離岸風電海事工程作業安全評估技術需求

技術應用階段	技術需求類別	技術細項	國內技術能量
建造施工期	波浪與船體運動技術	波浪重現技術	△
		環境資訊收集分析	△
		施工船舶適用性評估技術	×
	裝船技術	陸上吊裝技術	○
		壓艙控制技術	○
		船上吊裝技術	○
		佈置裝載技術	△
		運件繫固技術	△
	運輸技術	駁船拖航技術	△
		動力船運輸技術	△
		人員運輸技術	△
		浮船法	×
	海上吊裝技術	浮式吊裝技術	△
		操作系統機具設計技術	△
		船況補償技術	△
		自升式船吊裝技術	×
		水下基礎定位技術	△
	打樁技術	施工期水下環境監測技術	×
		後打樁技術	△

	固著技術	預打樁技術	×
		水平調整技術	△
		灌漿固著技術	×
		機械固鎖技術	×
		防蝕封裝技術	△
營運維護期	維運技術	水下結構監測技術	△
		可靠度分析技術	△
		維修技術	△
		船舶登風力機技術	×
		交通船人員運輸技術	△

備註：○表示成熟技術；△表示有近岸/港灣工程應用實績，離岸工程技術能量待提升；X表示欠缺相關技術

本計畫針對離岸風場海上施工時運輸與吊裝過程中與安全有關之關鍵技術，期望能由國內離岸示範風場之開發建置，對所發展之評估技術進行驗證分析，以從中建立可行之安全作業評估能量，使我國海事工程產業能在後續大規模之離岸風場的建置與維護，能切入此一龐大商機，在符合國內環境條件及國際海上作業安全之要求下，確實達成目標、並帶動國內相關產業發展。

(二) 專利佈局說明

為使國內海事工程產業切入即將到來之離岸風場開發與營運需求，國內必須建立相關海事工程安全評估技術，本年度計畫著重在風電安裝船舶的裝載及運輸方面，針對適用於台灣海域之風電安裝船舶進行分析探討，並建立整體評估模式。

在考量風場離岸距離產生的船舶運輸成本，以及船機承載、吊升能力等因素下，歸納現階段全球風力機預組與安裝模式，主要有4種，可分別評估其排水量或載重量等浮體基本性能要求；在施工船之運動分析方面，可針對船舶或是海上浮式結構物之頻率域下6個自由度運動性能進行計算分析評估，結合風場區域十年波浪統計資料，據以評估在何種海況下出海安全無虞。

因海上裝載與運輸風機、水下基礎之過程，需確保相關零組件其能固定於該有之位置，因此，繫固方法之規劃與評估為離岸海事工程相當重要之議題，本年度技術開發著重於施工船之運輸特性探討，預計將成果應用於繫固評估技術，申

請"離岸風電工作船不同裝載之穩度、運動及繫固評估方法"之專利，結合船舶在波浪中之運動及受力技術，分析船舶航行在波浪中之運動特性及波浪負荷，由此評估施工船裝載物件的繫固設計與分析工作。

(三) 產業化佈局

依據 GWEC 的調查預測，2013~2018 年全球離岸風電新增裝置容量之年複合成長率(CAGR)與過去五年無異，預估約可達 40%。風力發電產業受到多國政府政策支持，加上風力機技術、海事施工經驗逐漸成熟，全球離岸風能市場未來發展樂觀。臺灣國內現行政策亦已規劃將風能開發重心由陸域逐步延伸至離岸，2020 年國內預計完成首座離岸風電示範風場，累計裝置容量達 600 MW，2030 年累計裝置容量達 3 GW。

離岸風場建置與運維的複雜度遠遠超過陸上風場，除規劃設計外，水下基礎、風力機系統/部件之運輸、吊裝、打樁、固著等施工作業，以及後續之維護與營運，均與海事工程有關，如何在安全之前提下，確保相關作業能如期如質完工，並保障投資利益，為相當重要的議題。如前所述，國際上，船級協會 DNV GL、標準學會 BSI 等單位已制定離岸風電海事工程施工規範，亦有民間企業提供海事擔保調查(marine warranty survey)服務，例如德國 TÜV Rheinland 公司。國內尚無離岸風場施工實績，亦缺乏相關海事作業安全評估機制，本計畫首先針對水下基礎、風力機系統/部件之運輸、吊裝作業，透過模擬計算，檢測運輸船舶與吊裝機具，以及吊裝物，以檢視各項作業的安全性。

由於國內初期離岸風電裝置量尚不具規模，基於成本考量，近程之示範風機所使用的船舶機具與施工方式，宜就國內現有能量進行，然而國內海事工程業者傾向採行土法煉鋼的方式施工，這對於執行離岸海事工程的安全性風險極高，本計畫建立之安全評估技術亦將優先針對國內既有的船機與工法進行檢測。中長期而言，為投入示範風場及大規模風場開發、運維，將需建造自升式安裝船、交通船等，屆時本安全評估技術亦可被運用。本中心將鎖定國內開發商及海事工程業者，了解其在離岸風場建置之運輸與吊裝技術上可能面臨的安全性問題及需求，以提供客製化的安全評估服務，並透過技術授權，促進船廠/相關機具製造商、海事工程業者等通過船機/施工技術相關國際認證，培養其投入國內暨國外市場的安全評估技術能量。

在 2020 年累計安裝容量 600 MW 的政策目標下，預期可促成相關產業投資達 1.6 億元。在離岸風場海事施工計畫管理的部分，將透過技術移轉的方式，

協助海事工程統包商，如中鋼運通，建構施工安裝及維運所需的海事施工管理平台軟硬體，預期 2020 年促成投資額達 25 億元。

三、計畫執行情形

本年度計畫內容包括相關於運輸與吊裝作業安全之關鍵技術開發、波浪重現技術建立與環境資訊收集分析，以建立離岸風場海事施工在國際標準下之安全評估能力，協助國內海事工程廠商培養跨國作業能量，並由此訂定符合國內施工環境與施工能量之安全作業標準，配合國內離岸風場開發，建立自主海事工程能力及掌握最大可能比例的風場建設本土化為目標，計畫之執行分為 2 個子項計畫，架構如圖 5：

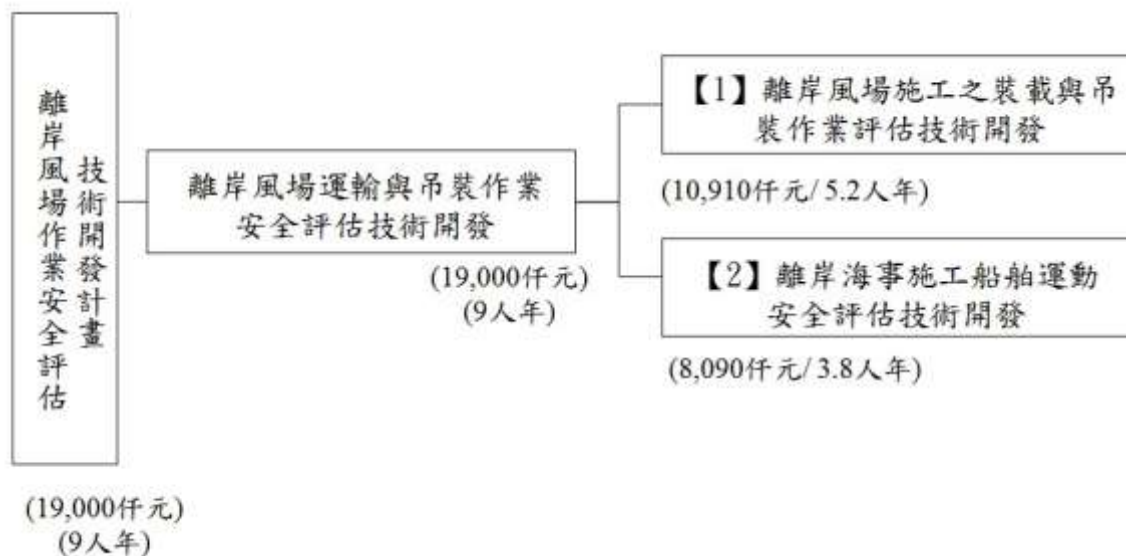


圖 5 本年度計畫架構

(一) 計畫實際執行內容

1、實際工作內容與進展說明

以下，就各子項之工作內容與進展分述說明之：

(1) 離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發

A、對已開發離岸風場之運輸與吊裝機具進行調查與分析

參考歐洲具代表性之離岸風場，對其設置場址、安裝方式、基地母港、港口設施、腹地功能、運輸船隊、吊裝機具、施工機具等項目歸整，檢討標準離岸風場開發時，符合作業安全需求時所需之設備與機具規格、配合條件等資料，以做為開發大規模離岸風場時之參考。

其中，對丹麥、英國等歐洲先進國家已開發離岸風場所需之運輸船舶種類蒐集相關資料文獻彙整後發現，依照離岸風場建置及維運各期程需求，工程船舶之船種多達 10~20 種，其中與運輸、吊裝技術關係最密切的船種是運輸/打樁/安裝船及浮式起重船，各種船舶功能簡述如下：

- 運輸平台/船：海床基樁、水下結構、風力機組皆須透過運輸平台/船運輸至風場。
- 打樁平台/船：打樁一般採用自升式平台/船(jack-up platform/vessel)或浮式起重船(floating crane)，船上備有液壓樁錘。自升式平台/船的優點在於定位精確，且平台升至海面上，作業較不受天候影響，但工作水深較受限制；起重船之吊升能力較佳，可用來吊裝噸數高的重力式水下結構，且工作水深較深，但較受天候影響。
- 安裝平台/船：為增加一年可施工天數，安裝水下結構、風力機組一般採用自升式平台/船。進入營運與維護階段後，可繼續延用於風力機等的維護。
- 拖船：運輸、打樁、安裝時，若採用無推進的自升式平台或駁船，須仰賴拖船拖拉，協助定位。
- 浮式起重船：除運用於海床地質鬆軟的離岸風場之風力機運輸/安裝之外，主要用於運輸/安裝重量達數千噸的海上變電站，須具備 1000 噸以上的吊車。因船身浮動，定位困難，亦需仰賴拖船輔助，且易受天候影響。

選用或設計離岸風電安裝船時，針對運輸方面的需求，主要需考量風力機之輪轂直徑、機艙尺寸、塔架尺寸以及基礎尺寸等，以做為甲板可用空間之設計依據。若風場規模較大，則另需考量機艙重量、塔架重量、基礎重量等，以做為船舶載重之設計依據。

針對吊裝方面的需求，如**錯誤! 找不到參照來源**。所示，主要需考量風力機的機艙重量、葉片重量、塔架重量、基礎重量，以做為吊車之吊臂長度、工作半徑、安全工作負載(SWL)等規格之選用依據，另需考量風力機的輪轂高度、輪轂直徑，以做為吊車之吊勾高度及吊臂長度規格之選用依據。

表 2 離岸風電安裝船選用/設計要素

離岸風電技術項目	相關參數	安裝船設計要素
機艙重量	• 吊車能量	• 吊臂長度 • 工作半徑 • 安全工作負載 • 舉升能量
葉片重量	• 吊車能量	• 吊臂長度 • 工作半徑 • 安全工作負載
塔架重量	• 吊車能量	• 吊臂長度 • 工作半徑 • 安全工作負載 • 舉升能量
基礎重量	• 吊車能量	• 吊臂長度 • 工作半徑 • 安全工作負載 • 舉升能量
輪轂高度	• 吊勾高度 (與甲板之間的距離)	• 吊勾高度 • 吊臂長度
輪轂直徑	• 吊勾高度 (與甲板之間的距離) • 甲板可用空間	• 吊勾高度 • 吊臂長度 • 甲板可用空間
機艙尺寸	• 甲板可用空間	• 甲板可用空間 • 舉升能量
塔架尺寸 (塔底直徑)	• 甲板可用空間	• 甲板可用空間 • 舉升能量
基礎尺寸	• 甲板可用空間	• 甲板可用空間 • 舉升能量
風場總裝置容量	• 風力機安裝工法 • 載重 • 宿泊人數	• 甲板可用空間 • 載重 • 舉升能量 • 宿泊空間
風場水深	• 樁腳長度	• 樁腳長度
風場離岸距離	• 風力機安裝工法 • 載重 • 宿泊人數	• 甲板可用空間 • 載重 • 舉升能量 • 自升式系統 • 宿泊空間

備註：粗體字部分與吊車規格相關。

資料來源：BTM Consult, A Part of Navigant(2103 / 9)，船舶中心整理；2014 / 7

在考量風場離岸距離產生的船舶運輸成本，以及安裝船的載重、吊升能量等因素下，歸納現階段全球風力機預組與安裝模式，主要有以下 4 種 (圖 6)。其中 A、B、C 三種模式另可將塔架拆成兩個部分安裝。

■ A 模式：塔架→機艙+輪轂→1 組葉片→1 組葉片→1 組葉片

風力機不經預組施工，在離岸風場直接將各部分組立起來。由於未來風場將朝離岸距離更遠的位置發展，為節省運輸安裝船來回載運的時間成本，預期此模式將成主流模式。

■ B 模式：塔架→機艙+輪轂+2 組葉片→1 組葉片

先完成塔架安裝，而後安裝機艙、輪轂方面與裝上的 2 組葉片，而後再裝置另 1 組葉片。由於預組的 2 組葉片像兔子的耳朵，此模式又稱為「Bunny」。由於 2 組葉片在岸上預組好，船舶運輸數量受限，較適合離岸距離較近的風場。

■ C 模式：塔架→機艙→輪轂+3 組葉片

3 組葉片已預先裝設在輪轂上，在塔架、機艙安裝完後，再直接將整個葉片輪轂裝上。由於 3 組葉片在岸上預組好，船舶運輸數量受限，較適合離岸距離較近的風場。

■ D 模式：整機

整機預先組裝完畢，再由運輸船運送至現場安裝。岸上整機預組且測試完畢，較無品質上的風險，但由於整機安裝，重量因素使得安裝時受天候影響較大，且往往受限於船機的吊升能力不足而難以實行。

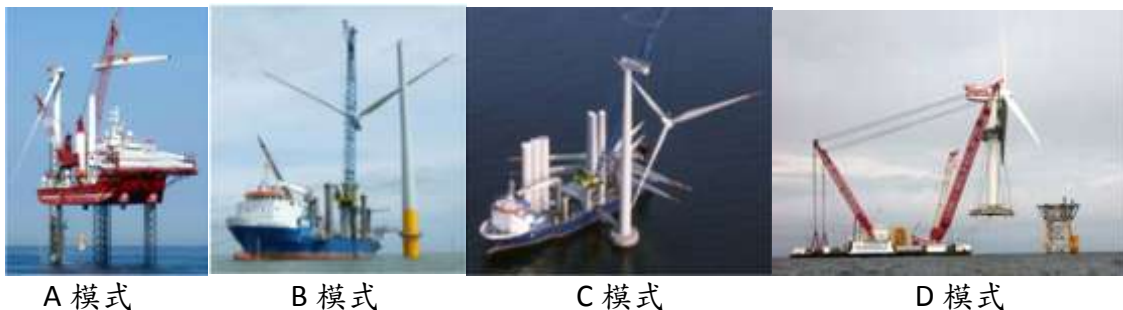


圖 6 風力機主要安裝模式

現階段全球主流風力機發電容量為 3.6~5MW，錯誤！找不到參照來源。

為目前主流市場中 3.6 MW 以上風力機在不同預組模式下之重量對照表，若選用 3.6MW 風力機組，以 Siemens 機型 SWT-3.6-107(3.6MW)為例，D 模式所需起重能力最大，需在 420 噸以上，C 模式所需起重能力最小，需在 200 噸以上。若選用 5MW 風力機組，以 REpower 機型 5M(5MW)為例，D 模式所需起重能力最大，需 655 噸以上，C 模式所需起重能力最小，需在 325 噸以上；以 Areva Wind 機型 M5000-116(5MW)為例，D 模式所需起重能力最大，需在 545 噸以上，C 模式所需起重能力最小，需在 233 噸以上。現階段 6MW 以上的風力機組亦已商用化，以 REpower 機型 6M(6.15MW)為例，D 模式所需起重能力最大，需在 665 噸以上，C 模式所需起重能力最小，需在 325 噸以上。

綜上所述，若選用 3.6~6MW 風力機組，整機吊裝的話，運輸安裝船的起重能力約需 500~700 噸以上；若採行 C 模式，運輸安裝船的起重能力需 200~400 噸以上。

表 3 風力機預組模式與各部件重量對照表

容量	機型	A 模式		B 模式		C 模式		D 模式	
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t	整機	≥420t
3.6 MW	Siemens SWT-107	輪轂&機艙	172t	輪轂&機艙 葉片 2 片	204t	機艙	125t	整機	≥420t
		葉片 1 片 x3	16t	葉片 1 片	16t	輪轂&葉片	95t		
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t		
4MW	Siemens SWT-4.0-120	輪轂&機艙	≒186t	輪轂&機艙 葉片 2 片	≒222t	機艙	140t	整機	≥440
		葉片 1 片 x3	≒18t	葉片 1 片	≒18t	輪轂&葉片	≒100t		
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t		
5 MW	REpower 5M	輪轂&機艙	397t	輪轂&機艙 葉片 2 片	436t	機艙	325t	整機	≥655t
		葉片 1 片 x3	19.5t	葉片 1 片	19.5t	輪轂&葉片	130t		
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t		
5 MW	AREVA M5000	輪轂&機艙	295t	輪轂&機艙 葉片 2 片	328t	機艙	233t	整機	≥545t
		葉片 1 片 x3	16.5t	葉片 1 片	16.5t	輪轂&葉片	112t		
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t		
6.15 MW	REpower 6M	輪轂&機艙	396t	輪轂&機艙	442t	機艙	325t	整機	≥665t
		塔架	≥200t	塔架	≥200t	塔架	≥200t		

容量	機型	A 模式		B 模式		C 模式		D 模式	
				葉片 2 片					
		葉片 1 片 x3	23t	葉片 1 片	23t	輪轂&葉片	140t		

資料來源：4C offshore、各公司，船舶中心整理；2014 / 12

備註：此處輪轂重量指 hub 重量

依據 4C Offshore 全球離岸風場安裝船調查報告，隨著風力機發電容量遞增，各構件重量增加，為因應上述各類型安裝模式，自升式平台安裝船之起吊重量不斷提升(錯誤! 找不到參照來源。)，2012 年起達 800 噸以上，2013~2015 年交船的新船吊車更朝 1200 噸進展。

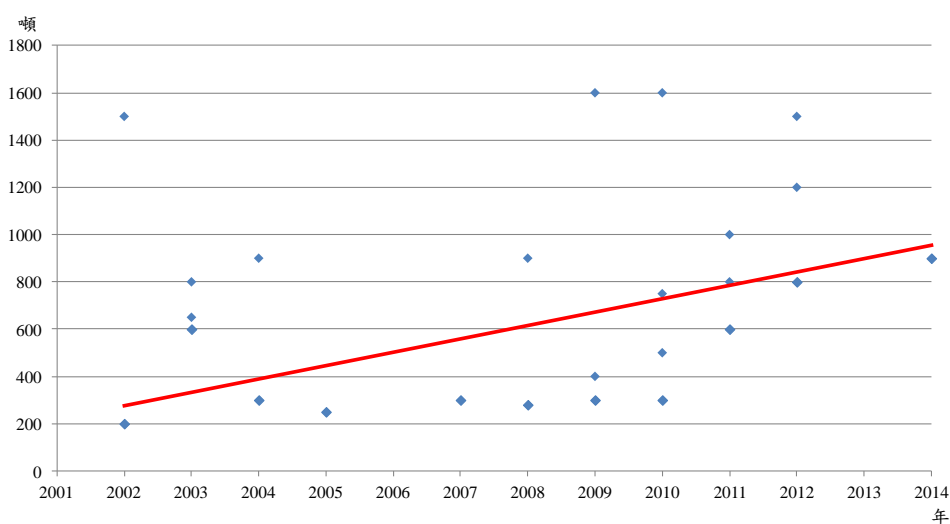


圖 7 全球離岸風場安裝船起吊重量趨勢

資料來源：各公司、4C Offshore，船舶中心整理；2014 / 6

安裝船的舉升能力，可由吊車之舉升高度及最大作業半徑觀察。依據 4C Offshore 的調查數據(圖 8)，全球離岸風場安裝船新船的舉升高度約 90~120 公尺，最大作業半徑逐漸由 20 公尺朝 30 公尺以上進展。

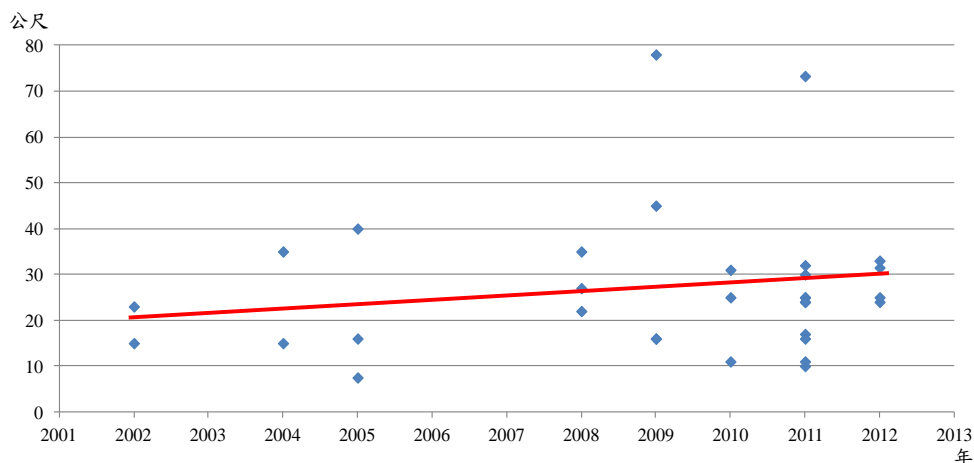


圖 8 全球離岸風場安裝船吊車最大作業半徑趨勢
資料來源：各公司、4C Offshore，船舶中心整理；2014 / 6

隨著風力機各部件重量增加，安裝船之載重亦逐年提升，2011 年起漸朝 4,000 噸以上進展(圖 9)；過去幾年，甲板可用空間主流規格為 1,000~4,000 平方公尺，但自 2011 年起，4,000 平方公尺以上的船舶數量明顯增加(圖 9)。

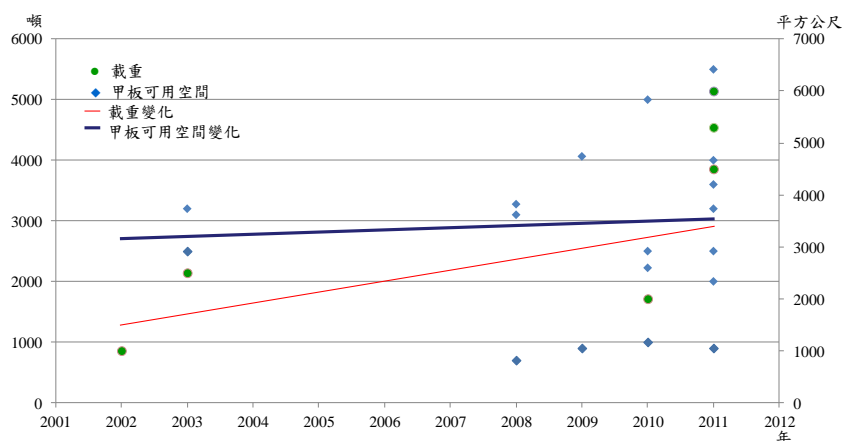


圖 9 全球離岸風場安裝船載重與甲板可用空間趨勢
資料來源：各公司、4C Offshore，船舶中心整理；2014 / 6

離岸風電安裝船常見的吊車車體技術型式可分為獨立式(pedestal)、抱腿式(leg-encircling)。吊車的驅動方式有電動、電動油壓、油壓、柴油、柴油電動、柴油油壓等。全球船用吊車品牌廠眾多，以歐美廠商為主，在離岸風電安裝船有供貨實績的品牌廠有荷商 GustoMSC、荷商 Huisman、德商 Liebherr、丹麥商 Kund E. Hansen、荷商 Kenz Figeo 等。2011 年以後交船的新船中，Neptune 的主吊車由 Huisman 供應，車體技術型式採用獨立式，驅動方式採用電動式；MPI Adventure 的主吊車由 GustoMSC 供應，車

體技術型式採用獨立式，驅動方式採用油壓式；Bold Tern、Sea Challenger 的主吊車皆由 GustoMSC 供應，車體技術型式採用抱腿式，驅動方式採用電動式；Seafox5、Innovation、VIDAR 的主吊車皆由 Liebherr 供應，技術型式採用抱腿式，驅動方式採用電動油壓式。吊車規格詳見表 4。

表 4 自升式安裝船新船之吊車規格

廠牌	型號	裝載之自升式安裝船船名	車體型式	驅動方式	吊車重量	最大吊重	相對最大工作半徑	相對最小工作半徑	最大舉升高度	吊臂長度	安全工作負載	風速限制
Huisman	PMC 20000-600	Neptune	獨立式	電動	580t (不含基座)	600t	25m	12.3m	—	—	600@25m	—
GustoMSC	GCC-100- HD	MPI Adventure	獨立式	油壓	1330t	1000t	25m	16m	105m	79.3m	1000@25m	25m/s
GustoMSC	GLC-800-ED	Bold Tern	抱腿式	電動	1050t	800t	24m	15m	102m	77m	800t@24m 480t@36m	16m/s
GustoMSC	GLC-900-ED-S	Sea Challenger	抱腿式	電動	1150t	900t	24m	14.5m	102m	77m	900t@24m 700t@28m 500t@35m	16m/s
Liebherr	CAL 45000-1200 Litronic	Seafox5	抱腿式	電動油壓	1500t	1200t	27.5m	13m	120m	108m	1200t@27.5	—
Liebherr	CAL 64000-1500 Litronic	Innovation	抱腿式	電動油壓	1500t	1500t	31.5	13m	120m	105m	1500t@31.5m 1250t@20m	—
Liebherr	CAL 45000-1200 Litronic	VIDAR	抱腿式	電動油壓	1500t	1200t	27.5m	13m	120m	108m	1200t@27.5	—

資料來源：各公司，船舶中心整理；2014 / 12

B、針對台灣之環境條件進行所需運輸能量與吊裝機具規格之評估

根據國內海氣象與海域地質觀測資料，對可能設置之離岸風場場址(如表 5)，包含永傳福海風場所在的彰化縣芳苑鄉外海、上緯海洋風場所在的苗栗縣竹南鎮外海，以及台電離岸風場所在的彰化縣境內外海等，考量其離岸距離、水深、地質、風況、海流、波浪等環境條件，並配合港口之施工條件等，進行綜合評估，以規劃出因應安全作業需求時，所需之載具運輸能量、運動狀態與吊裝機具規格，進一步做為國內機具能否配合之評估的基礎。

表 5 國內離岸示範風場基本條件

	上緯(海洋)	台電	永傳(福海)
風場位址	苗栗縣竹南鎮外海	彰化縣境內外海	彰化縣芳苑鄉外海
離岸距離	1~5 km	1.5~8 km	8~15 km
水深	5~30 m	5~30 m	25~40 m
波高	$H_{1/3}<1\text{m}$ 約 65.6%， 平均週期 3.0-6.0s 年平均 $H_{1/3}=0.90\text{m}$ ， $T_{1/3}=4.98\text{s}$ (新竹浮標)	$H_{1/3}<1\text{m}$ 約 46.3%， 平均週期 4.5-5s 年平均 $H_{1/3}=1.47\text{m}$ ， $T_{1/3}=4.98\text{s}$ (TORI 浮標)	—
年平均風速	3.4m/sec(台電通霄) 6.69m/sec(新竹浮標)	5.78m/sec(鹿港) 6.68m/sec(TORI)	—
海流	0.3~0.5m/sec (新竹市政府)	0.25~0.5m/sec(TORI)	—
平均潮差	3.3m(新竹及外埔)	3.57m(鹿港) 3.74m(台中港)	—
50 年颱風波浪條件	$H_{1/3}=9.2\text{m}$, $T_{1/3}=12.7\text{s}$	$H_{1/3}=6.6\text{m}$, $T_{1/3}=10.8\text{s}$	$H_{1/3}=7.15\text{m}$, $T_{1/3}=10.69\text{s}$

資料來源：永傳、上緯、台電公司、氣象局、港研中心，船舶中心整理；2014/12

盤點國內現有基礎及風力機相關運輸/打樁/安裝之船舶及浮式起重船的能量如表 6：

- 基礎運輸船：現有能量充足，最大載重約 1400 噸。由宏華營造股份有限公司(以下簡稱宏華)、樺棋營造股份有限公司(以下簡稱樺棋)等持有。
- 打樁船：國內現有自升平台載重約 1500 噸，工作水深約 20 公尺，運用於打樁，能量堪用，但缺乏海上吊車，需加裝陸上吊車。主要由宏華、樺棋、昭伸企業股份有限公司(以下簡稱昭伸)持有，皆無自航能力，需仰賴拖船拖拉。現有浮式起重船之起吊重量僅 150 噸，基樁採用群樁的話，能量堪用，若採用單樁等，則能量不足。
- 測風塔/風力機運輸與安裝船：國內西岸風場海象險峻，運輸與安裝測風塔/風力機時，採用自升式平台/船較佳。國內現有自升式平台的工作水深僅約 20 公尺，舉升能力不足，且缺乏海上吊車，用於運輸測風塔/風力機，勉強可用，但不足以用來安裝測風塔/風力機，需經改裝，甚至新建。
- 拖船：現有能量充足，最大馬力達 5200 HP。主要由台灣國際造船股份有限公司、樺棋、穩晉港灣工程有限公司、宏華、昭伸等持有。

表 6 國內現階段基礎、觀測塔、風力機之運輸安裝船機能量

作業期程	工程船舶	現況描述	船東(列舉)
水下基礎 運輸與 安裝	拖船	現有；最大馬力 5200HP	台船、樺棋、穩晉、宏華、昭伸
	運輸船	現有；載重 1400t	宏華、樺棋
	打樁用自升式平台	不足；載重 1500t 以內，工作水深約 20m，無海上吊車	宏華、樺棋、昭伸
	打樁用浮式起重船	不足；起重能力 150t 以內，吊升高度亦不足	基隆港務分公司、宏華、穩晉、昭伸
	基礎灌漿船	現有	宏華、樺棋
	駁船	不足；缺載重 3000t 以上的大型駁船，無壓載艙	台船、樺棋、宏華
觀測塔/ 風力機 運輸與 安裝	拖船	現有；最大馬力 5200HP	台船、樺棋、穩晉、宏華、昭伸
	運輸安裝用自升式平台	缺乏；載重 1500t 以內，舉升能力不足，工作水深約 20m，無海上吊車	宏華、樺棋

	運輸安裝用浮式起重船	缺乏；起重能力僅 150 噸，吊升高度亦不足	基隆港務分公司、宏華、穩晉、昭伸
--	-------------------	------------------------	------------------

資料來源：各公司，船舶中心整理；2014 / 12

綜上所述，由於國內自升式平台的載重能力僅 1500 噸以內，工作水深不足，且缺乏海上吊車，因此近程國內在離岸示範風機之建置階段，針對風機/海氣象觀測塔之水下基礎的運輸及吊裝作業，建議可採用國內現有的浮船塢(floating dock)(表 7)加裝 700 噸的陸上吊車進行。

表 7 國內現有浮船塢

船名	載重能力	尺寸(長×寬×深)	船東
駿逸 1 號	8,000t	75m×35m×4.1m	駿逸工程
駿逸 2 號	8,000t	75m×35m×4.1m	駿逸工程
合隆 108 號	5,600t	75m×26m×3.8m	樺棋營造
合隆 109 號	5,500t	70m×26m×4.2m	樺棋營造
第八大寬號	4,800t	47m×32m×4.0m	樺棋營造
榮吉	7,488t	62.4m×40m×3.9m	宏華營造
穩晉十六	6,382t	75m×35m×4.1m	穩晉港灣
穩晉十七	6,382t	75m×35m×4.1m	穩晉港灣

資料來源：各公司，船舶中心整理；2014 / 12

中長期在示範風場及大規模風場之建置階段，針對水下基礎及風機的運輸及吊裝作業，本中心與中鋼、台船正投入工合設計案，擬開發設計自航式的自升式安裝船，規格如表 8 所示，載重達 2,500 噸，一次可運輸約 5 套的 4MW 風機部件，工作水深可達 48 公尺，可滿足水深較深的福海風場建置需求，吊車的起吊重量達 800 噸，足以用於吊裝 500 噸左右的風機預組部件。

表 8 國內規劃新造自升式安裝船之規格表

尺寸(長×寬×深)	最大舉升能力	載重	起吊重量	腳樁長度	工作水深
76.2m×38.2m×7m	10,500t	2,500t	800t	85m	48m

C、檢討歐美現存各種不同運輸與吊裝作業之規範

本研究彙整國外主要海事工程作業準則之重點，依行政要求(文件要求、施工前期規劃)、設備要求(施工設備、交通運輸設備)、技術要求(運輸、吊裝、打樁及固著等施工)、安全管理要求(環境因素、人為安全、工作環境、緊急應變措施)等類別彙整國外已規範之項目如表 9。針對離岸風力海事工程海上作業時最具安全疑慮之運輸、吊裝、打樁及固著等施工階段，彙整值得借鏡處如表 10。

表 9 國外主要海事工程作業準則(或規範)

準則或 規範	重點 制定 單位	行政要求		設備要求		技術要求				安全管理要求			
		文件 要求	施工 前期 規劃	施工 設備	交通 運輸 設備	運 輸	吊 裝	打 樁	固 著	環 境 因 素	人 為 安 全	工 作 環 境	緊 急 應 變 措 施
海上風力發電工程 施工規範[13]	長江三 峽集團 公司 (中國)	○	○		○	○	○	○	○		○	○	
Guide for Building and Classing Offshore Wind Turbine Installations[4]	ABS (美國)	○	○					○	○	○			
Guide For Certification Of Lifting Appliances[6]	ABS (美國)	○		○			○			○			
Mobile Offshore Drilling Units[15]	ABS (美國)	○			○	○				○			
Marine Operations, General[9]	DNV (挪威)	○	○	○	○	○				○	○	○	○
Lifting Operations[7]	DNV (挪威)	○	○	○	○		○			○			

重點 準則或 規範	制定 單位	行政要求		設備要求		技術要求				安全管理要求			
		文件 要求	施工 前期 規劃	施工 設備	交通 運輸 設備	運 輸	吊 裝	打 樁	固 著	環 境 因 素	人 為 安 全	工 作 環 境	緊 急 應 變 措 施
Offshore Installation Operations[16]	DNV (挪威)	○	○	○	○			○	○				
Guidelines for Marine Transportations [17]	Noble Denton (德國)	○	○	○	○	○				○	○	○	○
Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations[8]	Noble Denton (德國)	○	○	○				○		○	○	○	
Guidelines for Concrete Gravity Structure Construction and Installation[18]	Noble Denton (德國)	○		○	○	○	○		○	○	○	○	
Guidelines for Offshore Wind Farm Infrastructure Installation[19]	Noble Denton (德國)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

表 10 國外主要海事工程準則(或規範)可借鏡處

重點 規範	制訂 單位	適用範圍	針對運輸、吊裝、打樁及固著等施工階段值得借鏡處
海上風力發電工程施工規範	長江三峽集團公司 (中國)	適用於新建、改建和擴建離岸風力發電工程施工。	1. 重力式基礎、樁基礎、導管架、塔架、風力發電機組及海上變電站之海上運輸規訂。 2. 重力式基礎、單(或多)樁基礎海上施工規定。 3. 職業健康、作業安全及環境管理之規定。
Guide for Building and Classing Offshore Wind Turbine	ABS (美國)	適用於離岸風機永久設置之支承結構設計、施工、安裝及調查工作標準	1. 鋼結構及混凝土結構海上設置前應準備之文件及工作。 2. 樁及重力式混凝土基礎施工前之現地調查作業及施工。

重點 規範	制訂 單位	適用範圍	針對運輸、吊裝、打樁及固著 等施工階段值得借鏡處
Installations			
Marine Operations, General	DNV (挪威)	提供基本之要求及建議適用於海事工程作業規劃、準備及執行。	1. 平台船及自浮式構件海上運輸之規定。 2. 海事工程作業船隻之規定。 3. 作業環境、人員安全及緊急應變措施之規定。
Guidelines for Marine Transportations	Noble Denton (德國)	適用船隻或平台船運送貨物，以及拖曳自浮式海事或油田設備、土木構造物及船隻等特殊海事運輸之核准標準。	1. 各種多船拖航運輸之規定。 2. 自升式平台船、一般作業船及自浮式結構拖航運輸之規定。 3. 作業環境、被拖曳構件載人安全及緊急應變措施之規定。
Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations	Noble Denton (德國)	適用於海事吊裝及水下固著作業之設計及核准依據。	1. 起重機及安裝船之海上吊裝作業規定。 2. 作業環境及人員安全之規定。
Guidelines for Concrete Gravity Structure Construction and Installation	Noble Denton (德國)	適用於有關離岸混凝土重力式構件在海事工程時施工、拖曳及安裝之核准依據。	1. 重力式構件海上運輸、吊裝及固著之規定。 2. 職業健康、作業安全及環境管理之規定。
Offshore Installation Operations	DNV (挪威)	提供具體之規定及建議，適用於導管架安裝作業及其他型式之構件。	1. 導管架定位、打樁及固著等施工規定。
Guidelines for Offshore Wind Farm Infrastructure Installation	Noble Denton (德國)	適用於各種型式之離岸風場安裝之核准依據。	1. 自浮式構件、重力式構件、風力機組及電纜之海上運輸規訂。 2. 各式基礎之吊裝、打樁或固著等施工規定。 3. 職業健康、作業安全及環境管理之規定。

整體而言，中國大陸規範"海上風力發電工程施工規範"適用於新建、改建、擴建離岸風場海事工程，涵蓋作業安全、環境管理相關規定，層面較廣，為我國海事工程作業草案研擬主要參考之對象，並搭配其他針對運輸、吊裝作業探討之規範。

就離岸海事工程相關於運輸與吊裝之作業中，有 3 個關鍵項目，即裝載、運輸、吊裝，本計畫蒐集彙整各主要認證機構或國家所制定離岸風電場海事工程規範，特別是針對裝載、運輸與吊裝之規定進行探討。

■ 穩度相關規範探討

船舶在水中受外力作用傾斜後，其於外力消除後回復到原靜平衡位置之抵抗傾側能力，稱之為穩度(Stability)。在眾多船舶性能中，穩度為其中最重要的基本特性之一。不僅保障船舶行駛之安全，且對於船舶安全、強度、裝載、人員旅客舒適度等，皆有密切的關係。

船舶穩度依照不同狀況而有不同分類：針對船舶幾何，穩度分為縱向穩度(Longitudinal Stability)及橫向穩度(Transverse Stability)，然而就一般船舶而言，縱向穩度較橫向穩度有餘裕，因此較少在安全性方面被討論，僅考慮船舶艏艉吃水差(Trim)，與船舶航行姿態；針對船身受損情形評估之穩度，若船舶處於完整無損的狀況下所得到之穩度評估，則稱其完整穩度(Intact Stability)。反之，為受損浸水的情況，則稱破損穩度(Damaged Stability)；根據橫傾角度大小，超過 10 度以上的船舶狀態屬於大傾角穩度(Stability at a large angle of heel)之範圍，至於小傾角穩度只適用於初穩度(Initial Stability)的判斷；其中在大傾角穩度下，又分成兩種運動狀況，一為無明顯角速度之橫傾，另一為受外圍環境干擾而有角速度之橫傾，例如惡劣海象下的風浪。前者稱之為靜穩度，後者則為動穩度。

就船舶裝載穩度評估而言，以圖 10 為例，船舶靜止於正浮位置(Upright position)時，其重心 G 與浮心 B 應在同一垂直線上，成平衡狀態。當船傾側一角度後其排水形體改變，浮心移動至一新位置 B1，而重心未變動，因此浮心 B1 與重心 G 不在同一垂直線上，而形成一力矩(Moment)，通過 B1 作一垂直線與 BG 直線相交於 M 點，此 M 點之位置或在重心 G 之上或在 G 之下，此與船舶傾側後能否再平正有極密切之關係，該 M 點稱為定傾中心(Metacenter)，而稱 GM 為定傾高(Metacentric Height)。

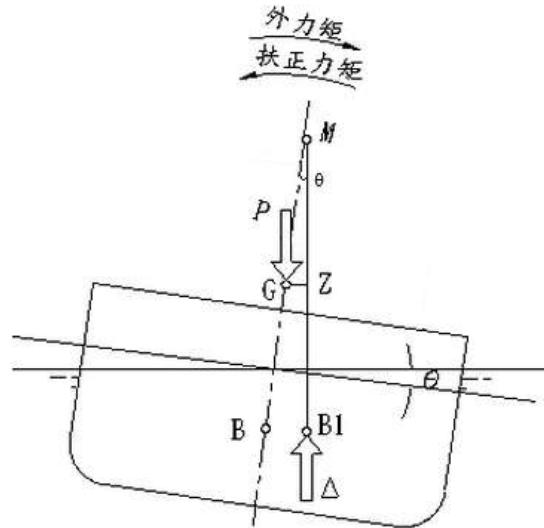


圖 10 平台傾斜示意圖

若 GM 為正值，當該船受外力傾斜一小角度時，原本各方平衡的力受到破壞，浮力與重力會對此產生一扶正之力矩(Righting Moment)，此力矩就是將平台扶正的恢復力，通常以此最為初穩度的依據，由圖 10，扶正力矩以下式計算：

$$M1 = \Delta \cdot GZ = \Delta \cdot GM \sin \theta$$

式中， Δ 為平台之排水量(Displacement)，GZ 為扶正力矩之力臂(Arm)，GZ 又與 GM 以及橫傾角(Angle of Heel) θ 值有關，所以 GM 值愈大時，扶正力矩愈大，故以 GM 值之大小作為船體初穩定之衡量標準。

船舶航行於海上有著各種危險與意外的存在，為了確保船舶於海上的安全以及減少事故的發生，早在 1912 年便公佈海上人命安全公約(Safety of Life at Sea, SOLAS)，用以規範與約束船舶安全性，防止與減少海上事故的發生。目前 SOLAS 公約是由國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)控管。除了 IMO 外，不同船級協會與認證組織分別制訂各種不同類型的規範或指引，例如 DNV·GL 下的 Noble Denton 和美國船級協會(American Bureau of Shipping, ABS)的 MODU，均有關於施工船舶穩度之需求。隨著現今的科技與事故現況，船舶與海洋結構物的種類的增加，相關的公約與法規也針對現有狀況，做最適合的調整與修改。本計畫將進行船舶穩度分析與安全性評估，並符合 IMO、DNV·GL 和 ABS 等所制定的相關規範。

a. IMO Code[20]

根據 IMO 法規，所有船隻需經過穩度評估，並提供一份穩度基礎準則，內容包含船舶相關的資訊與性能，供船長操作船隻時使用，其稱之「穩度手冊」，與離岸風場施工使用之自升式平台船類似之移動式海上鑽井裝置(Mobile offshore drilling units, MODUs)也有相關的規定，其被稱為「操作手冊」。

IMO 法規分為兩個部分，第一部分屬於強制性的規範，適用於一般 24 m 以上之船舶，包括貨船(Cargo ships)、甲板載木貨船(Carrying timber deck cargo ships)、客船(Passenger ships)、漁船(Fishing vessels)、特殊用途船(Special purpose ships)、離岸供應船(Offshore supply vessels)、移動式離岸鑽井裝置(Mobile offshore drilling units, MODUs)、浮台(Pontoons)、甲板載貨櫃貨船(Cargo ships carrying containers on deck)貨櫃船(Container ship)。而第二部分則是對於其中某些類型船舶，給予建議性的規範。

以下為 IMO 在強制性穩度規範的內容：

- 在扶正力臂曲線(GZ curve)下(圖 11)，至橫傾角度 30 度時，其面積不可小於 0.055 公尺-弧度；以及至橫傾角度 40 度或泛水角(Flooding Angle)時，其中面積較小者，則不可以小於 0.09 公尺-弧度；此外，扶正力臂曲線在橫傾角度 30 度至 40 度或泛水角範圍時，其面積不可小於 0.03 公尺-弧度。

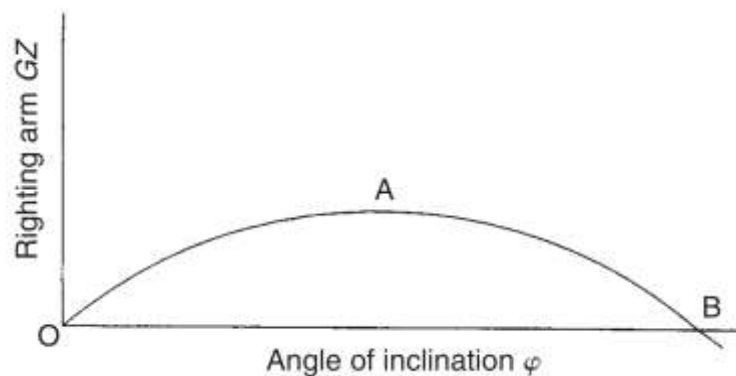


圖 11 平台 GZ 值隨橫傾角變化之曲線

- 橫傾角 30 度處的扶正力臂應不小於 0.20m。
- 最大復原力臂其對應角(極限靜傾角)(圖中 A 點)最好大於 30 度為佳，但至少不得小於 25 度。
- 初穩度(GMo)應不小於 0.15 公尺。

在考慮強風橫搖之狀況(Severe wind and rolling criterion)下，即評估平台在橫向風壓與傾側同時發生(Combined effects of beam wind and rolling)的情況下之穩度，在此標準下，扶正力臂與風壓傾側力臂曲線所構成的面積 b 需大於面積 a (圖 12)。

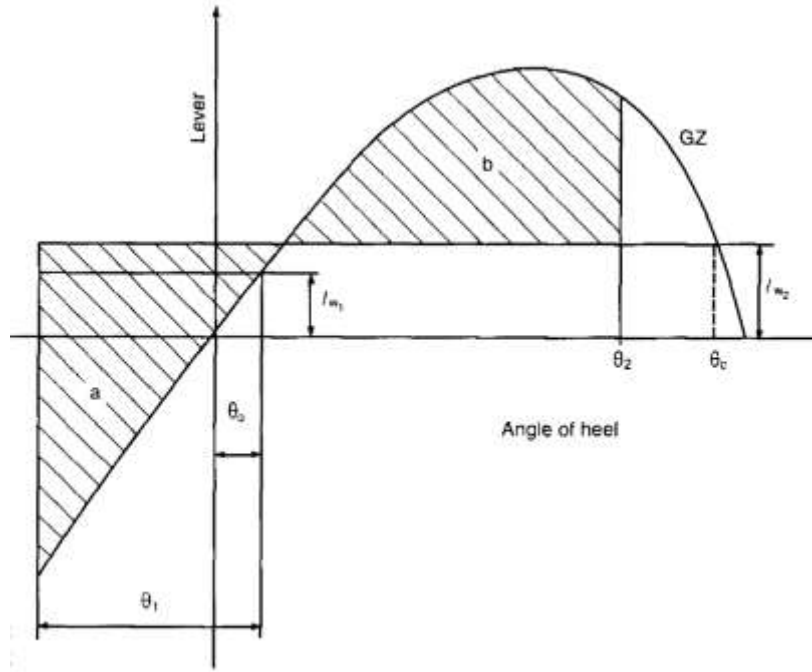


圖 12 船體受強風橫搖標準

於圖 12 中的符號定義如下：

l_{w_1} = 船舶受穩定風壓下所產生的風壓傾側力臂 (m)

l_{w_2} = 船舶受陣風風壓下所產生的風壓傾側力臂 (m)

θ_0 = 扶正力臂曲線於穩定風壓傾側力臂下的傾側角

θ_1 = 波浪作用下的迎風傾側角

θ_c = 扶正力臂曲線於陣風風壓傾側力臂下的第二對應傾側角

θ_2 = 泛水角(Angle of down-flooding)或陣風作用下第二對應傾側角或 50 度，取其角度較小者。

b. GL Noble Denton

Noble Denton[17]將穩度分為完整穩度、破損穩度、風傾覆力和俯仰差與吃水等，四個方面進行探討。以下則為 Noble Denton 於完整穩度與、風傾覆力和俯仰差之相關規定。

船舶從正浮角度 0 度至穩度消失角(即 GZ 為 0 對應之角度),此屬正扶正力臂範圍,其大小決定船舶之穩定性能。根據 Noble Denton, 在不同船型與標準裝載情況下,其穩度消失角應符合表 11 之限制。另外,在航行過程中,不論出發、到達、啟航、返航或航程中間,若裝載有任何的更動,造成穩度差異性,都需針對當中造成穩度影響最嚴重的狀況進行穩度評估。表中,LOA 為船長,B 為最大水線模寬。

表 11 完整穩度範圍

Vessel or towed object, type and size (施工船舶種類與尺寸)	完整穩度範圍 (Intact Range)
Large and medium vessels, LOA \geq 76 m and B \geq 23 m	36
Large cargo barges, LOA \geq 76 m and B \geq 23 m	36
Small cargo barges, LOA < 76 m or B < 23 m	40
Small vessels, LOA < 76 m or B < 23 m	44
Jack-ups with B, [2] > 23 m for ocean towages	36
Jack-ups with B, [2] > 23 m for 24-hour or location moves	28
Inland and sheltered water (in ice areas)	36
Inland and sheltered water (out of ice areas)	24

此外,在穩度方面還有以下之需求:

- 有效初穩度 GM0 約為 1 公尺,且不得小於 0.15 公尺。
- 貨物懸吊出船身時,於風速 15m/s 的靜水條件下,仍需保持貨物位置不會泛水。
- 需考慮自由液面效應對於穩度的影響。
- 在完整穩度的情況下,扶正力臂下曲線的面積應不低於風傾覆力臂曲線下的 1.4 倍。詳細的穩度定義如圖 13,其中風傾覆力臂應考慮在風速 52m/s(100 knots)的情況下。

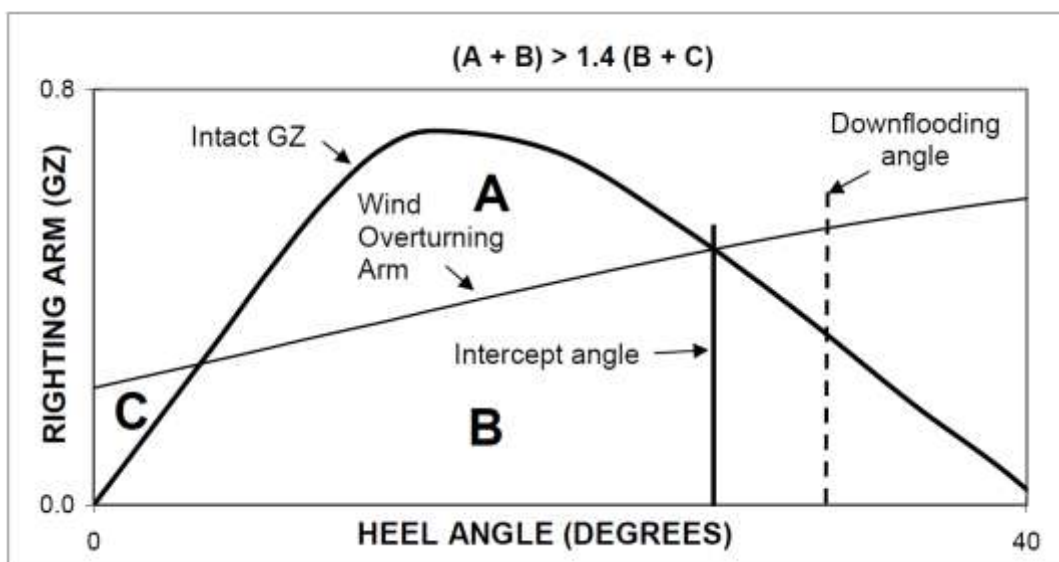


圖 13 船體受強風傾覆標準(完整穩度)

裝載部分，Noble Denton 有如下之規定：

- 對於船和駁船在任何控制條件下的裝載，皆需符合載重線公約。
- 吃水多寡會影響船舶的乾舷(freeboard)、穩度與運動性能，對於駁船(barge towages)，吃水約位於船深的 35%與 60%之間。
- 對於拖移船隻的負載，其最小吃水俯仰差限制應根據表 12 所示。

表 12 船舶最小吃水與俯仰差

Length of Towed Vessel	Minimum Draught Forward	Minimum Trim by Stern
30 metres	1.0 metre	0.3 metre
60 metres	1.7 metres	0.6 metre
90 metres	2.4 metres	0.8 metre
120 metres	3.1 metres	1.0 metre
150 metres	3.7 metres	1.2 metres
200 metres	4.0 metres	1.5 metres

c. ABS MODUs

MODUs 主要是針對離岸浮體所建立的相關法規，因此相較於 IMO 對於一般船舶的規範，MODUs 則是針對離岸浮體，有更為詳細的限制。每個浮體皆具有穩度，無論有動力之船舶或無動力之平台，針對不同的狀況或有不同的影響。因此，也必須考慮推進器或繫泊對於浮體的穩度影響。

ABS MODUs 將穩度分為完整穩度和破損穩度兩方面進行探討，以下為完整穩度的相關限制與規範：

- 對於所有類型浮體，都需能承受標準風傾覆力的影響。其中法規中所使用的風速並非實際環境風速。
- 離岸浮體裝置與鑽油平台，需能承受相當於從任何水平方向，風速為 36 m/s (70 knots) 下的傾覆力矩；此外，該浮體要能承受劇烈風暴條件，風速為 51.5 m/s (100 knots) 下的傾覆力矩；若浮體不能承受上述的傾覆力矩，則將被分類為有限服務(Restricted Service)的離岸浮體裝置與工作船舶，無法在所有情況下，進行所有項目的工作內容。同時，即便為“有限服務”分類的浮體，也仍需承受最低風速 25.8 m/s (50knots) 下的傾覆力矩。
- 在完整穩度的情況下，半潛式浮體扶正力臂下曲線的面積應不低於風傾覆力臂曲線下的 1.4 倍，如圖 13。其中風傾覆力臂的風速則依照不同浮體其相關規定。
- 在完整穩度的情況下，穩定樁柱體扶正力臂下曲線的面積應不低於風傾覆力臂曲線下的 1.3 倍，如圖 13。其中風傾覆力臂的風速則依照不同浮體其相關規定。

■ 吊裝相關規範探討

歐洲各國一般遵循的相關吊裝規範、手冊及準則，大約可整理成兩類，一類為施工管理類，另一類為設計技術類。其中，管理面如表 13，分別為由 HSE(Health and Safety Executive)、IMCA(International Marine Contractors Association)、NORSOK(Norwegian petroleum industry)等組織訂定，此類指引不同於技術手冊，係針對施工管理層面說明，例如：在執行吊裝專案工程時需注意的事項，文中並建議填寫查核表，以利掌控工程品質。

表 13 歐洲海上吊裝規範書、手冊及準則之蒐集-施工管理類

管理手冊	出版單位	篇名
	HSE	Technical guidance on the safe use of lifting equipment offshore[21]
	IMCA	Guidelines for lifting operations[22]
	NORSOK	Safe use of Lifting equipment[23]

而另一為技術面，彙整出如表 14 所示之相關吊裝規範、手冊及準則，ABS 之「Guide For Certification of Lifting appliances」[6]著重於設備認證(如：支撐平台、起重機等)的部分；BV 之「Rules for the Certification of Lifting Appliances onboard Ships and Offshore Units」[24]、Llyod Register 之「Code for Lifting Appliances in a Marine Environment」[25]、「Safe use of Lifting equipment」[23]此三份文件內容可看出除增加一些吊裝計算外，也增列其他設備的說明。

DNV 之「Marine Operations」[9] 的 Part2 Ch5 Lifting、Noble Denton 之「Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations(0027/ND)」內容針對吊車、繩索及扣環等吊裝設備安全評估皆列出需進行的分析項目，且有詳細的執行步驟與流程，方便參考。整體而言，兩者內容約略相同，僅有些許差異，本計畫係以建立海事擔保調查之評估能力為主，因此，將以海事擔保調查認證單位 Noble Denton 0027/ND 的最新版本為主要參考資料，唯 Noble Denton 中部份分析未詳述流程之部分，則輔以對計算方法有更進一步說明與描述之「Modelling and Analysis of Marine Operations」[26]參考之。

表 14 歐洲海上吊裝規範書、手冊及準則之蒐集-設計技術類

技術手冊	出版單位	篇名
	ABS	Guide For Certification of Lifting appliances
	Bureau Veritas	Rules for the Certification of Lifting Appliances onboard Ships and Offshore Units (NR 526 DT R01 E)
	Llyod Register	Lifting Appliances in a Marine Environment
	NORSOK	Safe use of Lifting equipment
	DNV	Marine Operations Part2 Ch5 Lifting
	Noble Denton	Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations (0027/ND)
	DNV	Modelling and Analysis of Marine Operations (DNV-RP-H103)

a. GL Noble Denton

Noble Denton 規範中，適用於自升式起重船(Jack-up crane vessels)與如起重駁船 (crane barges)、起重船 (crane ships)、半潛式起重船 (semi-submersible crane vessels)等浮式起重船(floating crane vessels)之吊裝作業評估。

欲取得吊裝作業之認證證書，需對下列項目進行確認：

- 吊裝結構之強度，特別是吊點(lifting point)之強度。
- 吊車的承載能力(capacity)，如吊車迴轉半徑。
- 使用多個吊鉤時，吊鉤的承載能力。
- 索具配置(Rigging Arrangement)，包括吊索(Sling)、接環(Shackle)、吊架(Spread bar)其他索具之認證。吊裝系統各部名稱詳圖 14 吊裝系統各部名稱說明。
- 吊裝過程起重船之穩度，特別在壓艙出狀況之場合。
- 起重船之繫泊系統配置(Mooring Arrangement)。
- 極限設計氣候條件(limiting design weather conditions)，起重船在該氣候條件操作下預期之行為。
- 起重船周圍的其他船隻安排。
- 吊裝前繫固件的拆除。
- 吊裝工作組織與程序變更管理。
- 風險評估。
- 同步作業手冊(Simultaneous Marine Operations (SIMOPS))。



圖 14 吊裝系統各部名稱

對吊裝評估之計算項目包含容許值(allowances)、安全係數(safety

factors)、負荷(loads)與負荷效應(load effects)，Noble Denton 建議之吊裝評估程序如圖 15 吊裝分析程序所示。

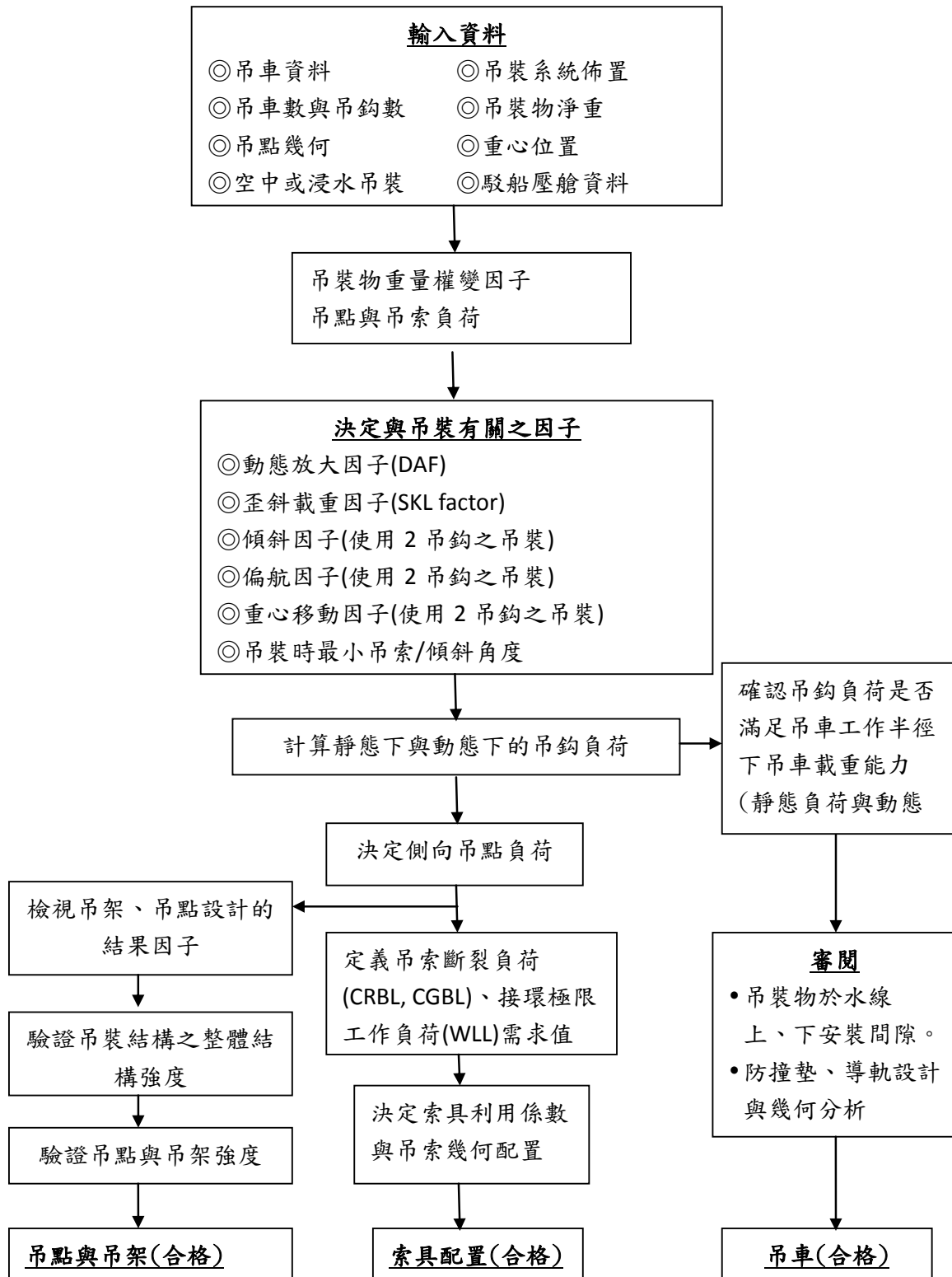


圖 15 吊裝分析程序

吊裝分析程序中，首先為分析資料之輸入，包含使用之吊車、吊裝結構幾何、吊點與吊鉤數、結構重量、重心位置、吊裝環境等。

吊裝重量部分視估算之不準確性加以不同的重量權變因子(weight contingency factors)，其依照 ISO 19901-5：2003（篇名：石油與天然氣產業的海事工程特別需求－施工重量控制）之分類，可依不同重量控制等級有不同之值：

- Class A：針對具完整、有可靠來源或估算經過驗證之重量與重心資料的結構，取最小重量權變因子值為 1.03。
- Class B：針對相對可靠來源或估算經過驗證之重量與重心資料的結構，取最小重量權變因子值為 1.10。
- Class C：為重量資料來源較不精確者，取最小重量權變因子值為 1.10。

估算後之重量乘上重量權變因子後即為吊裝結構總重(Gross Weight)。

接著，確認吊鉤負荷(Hook Loads)，其係考慮動態放大因子(Dynamic Amplification Factor-DAF)、歪斜載重因子(Skew Load Factor-SKL)、傾斜因子(Tilt Factor)、偏航因子(Yaw Factor)、重心移動因子(CoG Shift Factor)、最小吊索/傾斜角度等眾多因子後之值，一般而言，吊鉤負荷分為靜態與動態者：

- 靜態吊鉤負荷(Static Hook Load) = 總重或淨重(Gross Weight or NTE weight)+索具重量(Rigging Weight)
- 動態吊鉤負荷(Dynamic Hook Load) = 靜態吊鉤負荷 × 動態放大因子(DAF)

對單一吊車於空氣中吊裝時，DAF 可依表 15 決定之；表 15 亦可適用於下列狀況之空氣中吊裝：

- 相同施工船上配置 2 具吊車。
- 在岸上用超過 2 具吊車。
- 使用相同吊臂的 2 個以上吊鉤。
- 在遮蔽水域以 2 艘以上起重船吊裝之狀況。

表 15 空氣中吊裝時之 DAF 因子

淨重 W (Ton)	離岸吊裝	岸邊吊裝 (浮船情況)	岸上吊裝 (移動情況)	岸上吊裝 (靜態情況)
$W \leq 100$	1.3	1.15	1.15	1.00
$100 < W \leq 500$	1.25	1.10	1.10	1.00
$500 < W \leq 1000$	1.2	1.10	1.10	1.00
$1000 < W \leq 2500$	1.15	1.05	1.05	1.00
$2500 < W \leq 10000$	1.10	1.05	1.05	1.00

若吊車置於自升式平台船上，採用表 15 之"離岸吊裝"或"岸邊吊裝"之值，若吊車置於固定平台上，則使用"岸邊吊裝"之值。

對採用 2 艘以上施工船之離岸吊裝作業而言，DAF 應以動態分析決定之；對於吊裝結構於水面升降之狀況，分析上需另外考量：

- 求得結構全沒水時之吊裝重量，考慮重量載重、浮力、附加質量、吊臂尖端速度及加速度、慣性力、阻力等。
- 計算動態索具與吊鉤負荷，且確認索具能維持張力而不會鬆弛之狀況。
- 計算繩軸(spool)之局部與整體應力。
- 計算吊裝物波擊力(slamming loads)。
- 結構沒水或半沒水吊裝過程之動態分析結果中，索具與結構之 DAF 值可能會影響到此操作之可操作範圍。

除使用表 15 外，DAF 亦可由適當的計算或模型試驗取得，若吊裝係由起重船上將結構從駁船或運輸船吊起，吊臂頂端之運動分析亦應將駁船或運輸船之運動考慮進去。

歪斜載重因子(SKL)係考量吊索長度製造公差(tolerances)、吊索量測公差、吊裝配置與幾何、吊點組裝誤差、吊索受力伸長等因素之負荷分佈因子(load distribution factor)，對無法 100%掌握特性之索具配置與結構，需進行 SKL 評估，在新吊索用來與已使用吊索互相搭配作用時，應取較高之 SKL 值。

對於使用成對匹配吊索(matched pairs of slings)之靜不定(indeterminate)4 吊索吊裝(表 16)的情況，傾斜載重因子採 1.25，若吊索

為非匹配者，SKL 則需由結構計算決定之。

以靜定(determinate)吊索配置、在吊索長度誤差不會明顯影響負荷狀況或吊裝系統幾何時，載重因子可採 1.0；對於使用成對配置吊索之吊裝時，採用單吊架時，SKL 取 1.05、超過一具吊架時，SKL 取 1.10。

對採用單吊鉤、4 條非等長吊繩之索具配置時，SKL 需由設計者在考慮吊索長度公差與測量長度公差之條件下計算，並應用至結構與吊裝設計評估，若計算得之 SKL 小於 1.25，取 1.25。



圖 16 四條鋼索吊裝情況

對於同艘船上用雙鉤起吊(圖 17)的情況，因為吊鉤間高程可能有誤差，各別吊鉤所承受的淨重須乘上雙鉤吊裝因子(2-Hook lift factor)，分別為：

- 重心移轉因子(centre of gravity shift factor)=1.03
- 傾斜因子(tilt factor)=1.03

如果採用每一個吊鉤分別為雙吊索，需再考量偏航因子(Yaw factor)：

- 偏航因子=1.05



圖 17 雙鉤起吊情況

負荷決定後，分別針對吊車之載重能力、索具、吊裝結構、吊點與吊架等進行驗證。

在索具強度評估部分，需考慮下面之因子：

- 終端效率因子(Termination efficiency factor)：即吊索端部因固定、受損、彎曲等影響，強度會較原吊索強度為弱，使其斷裂負荷(breaking load)需以鋼索之斷裂負荷乘上終端效率因子值，終端效率因子值與鋼索端部固定有關，可取 0.75 至 1.0。
- 彎曲效率因子(Bending efficiency factor)：考慮鋼索彎曲使用，繞過接環、吊孔或吊鉤，鋼索破壞強度需加以折減。
- 吊索安全因子(Sling or Grommet safety factors)：以上各節折減因子都考量完畢後，最後設計鋼索強度需除以鋼索安全因子(Sling safety factor)來確保安全性。一般鋼索(steel slings)安全因子不小於 2.25，對於纖維索(fibre slings)(如麻繩)，安全因子不小於 4.00。

對於接環(shackle)部分，一般原則為接環強度應不低於靜態吊索負荷。另外，接環之最小破壞負荷(Minimum Breaking Load-MBL)(極限工作負荷(Working load limit, WLL)×安全係數)需至少為動態吊索負荷(靜態吊索負荷×DAF)之 3 倍。

對於吊點的垂直載重、側向載重，需另外增加結果因子(Consequence factor)如表 16：

表 16 結果因子

吊點本身，包括吊架或支架	1.30
吊點接至結構與繩軸之附屬物	1.30
吊點內的支撐機構	1.15
其他構件	1.00

在吊車與起重船方面，吊鈎載重不能超過吊車的載重能力。吊車載重能力需以載重—作業半徑關係圖來判斷。有時吊車載重能力須考量動力情況下的容許值，可用(DAF 因子×吊鈎載重)來計。

越來越多海事吊車裝有主動式起伏運動補償系統(Active Heave compensation-AHC，圖 18)，此套系統藉由監測海浪變化資料，自動調整絞盤的收放鋼索，使吊裝物不會因海浪起伏而晃動，有助於增加吊車安全性。如果裝有 AHC 系統，設計可考量減少折減因子。



圖 18 主動式捲揚補償系統

結構強度計算中，Noble Denton 建議依據前面所述的各項負荷因子，採用適當的負荷組合以驗證安全性，如對靜不定四點吊裝之狀況，應考慮：

- 針對總重或淨重，計算各吊點受力情況，不考慮傾斜載重因子 (SKL)。
- 針對總重或淨重，計算各吊點受力情況，但其中一對角吊點納入 SKL 考慮。
- 針對總重或淨重，計算各吊點受力情況，另一對角吊點納入 SKL 考慮。

有關材料容許應力，可參照國際上認可的海事工程規範說明，包括 LRFD 設計法、ASD/WSD 設計法的安全因子來計算。但需提出相關材質試

驗證明、非破壞性檢驗報告以資佐證。除此之外，AISC 及 API PR2A 兩種規範也可作為參考規範。

b. DNV

在此，以 DNV-OS-205 的海事工程吊裝操作準則(Guidelines For Marine Lifting Operation)2014 年版為主，大體上的流程與 GL Noble Denton 0027/ND 者類似，不同處在於 DAF、SKL 等之建議需求值(表 17、表 18)。

表 17 DNV 之 DAF 建議值

SHL (Static Hook Load)	DAF Onshore	DAF Inshore	DAF Offshore
3 ² – 100 t	1.10	$1.07 + 0.05\sqrt{100/SHL}$	$1 + 0.25\sqrt{100/SHL}$
100 - 300 t	1.05	1.12	1.25
300 - 1000 t	1.05	1.10	1.20
1000 - 2500 t	1.03	1.08	1.15
> 2500 t	1.03	1.05	1.10

備註：小於 3 噸之物體則假設為 3 噸進行計算

表 18 DNV 在靜不定四點吊裝時之 SKL 建議值

SKL	Associated diagonal load Distribution	Assumptions as defined in [3.3.2.5] valid (Yes) or modified as indicated below.				
		a)	b)	c)	d)	e)
1.25	5/8 – 3/8	Max. 0.3%	E ≤ 70 000MPa	Yes	Yes (60 deg.)	DF ≤ 4.0
1.33	2/3 – 1/3	Max. 0.3%			Ang. ≤ 70 deg.	DF ≤ 5.0
1.5	3/4 – 1/4	Yes (0.5%)			Yes (60 deg.)	DF ≤ 5.2
1.6	4/5 – 1/5	Yes (0.5%)			Ang. ≤ 70 deg.	DF ≤ 5.6

D、施工船靜水與動穩度性能評估分析

在此，係以 IMO 2008 IS CODE、GL Noble Denton 和 ABS MODUs 之規定，進行自升式施工船之完整穩度性能計算，其主要尺寸與規格如表 19 所示，本文簡稱此自升式施工船為 CSTC70，船長約 70 公尺、樁長 80 公尺；甲板平均載重 5 ton/m²，局部最大可載重 10 ton/m²；其支撐腳位置規劃於主甲板四角落，使甲板裝載使用面積做最大的利用；結構佈置則採用縱向結構系統，採雙重底結構規劃四道縱向水密隔艙壁與六道橫向水密隔艙壁；船體內部規劃有二層平台，上層用於廚房、用餐休閒空間、冷凍艙、貨艙及工具間，下層則為輪機、電機、幫浦艙間；並於船艏配備起重能力 600 ton 主吊車及 10 ton 貨艙輔助吊車各一部。圖 19 與錯誤! 找不

到參照來源。分別為自升式施工船之側視與上視圖，圖 21 為 3D 示意圖。

表 19 自升式施工船之主要尺寸表

Main Dimensions	
Length	73m
Breath	38m
Depth	6.6m
Load line Draft	3.8m
Leg 、Jacking System	
No of Tubular Leg	4
Leg Length	80m
Diameter of Legs	3.45m
Jacking system	Hydraulic
Speed	0.5m/min
Lifting Equipment	
Main Hook	600MT 20m~28.5m
Lifting height	93m above water level
Safety System	
Vessel is equipped with 2×60 men fully enclosed lift boat	
1×300HP Speedboat	
8×25 persons lift rafts shall be installed at port	

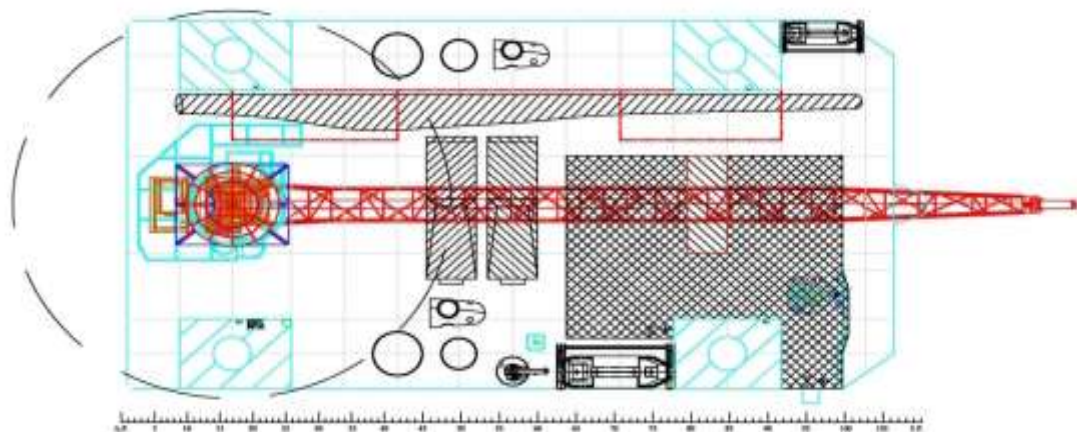


圖 19 自升式施工船上視圖

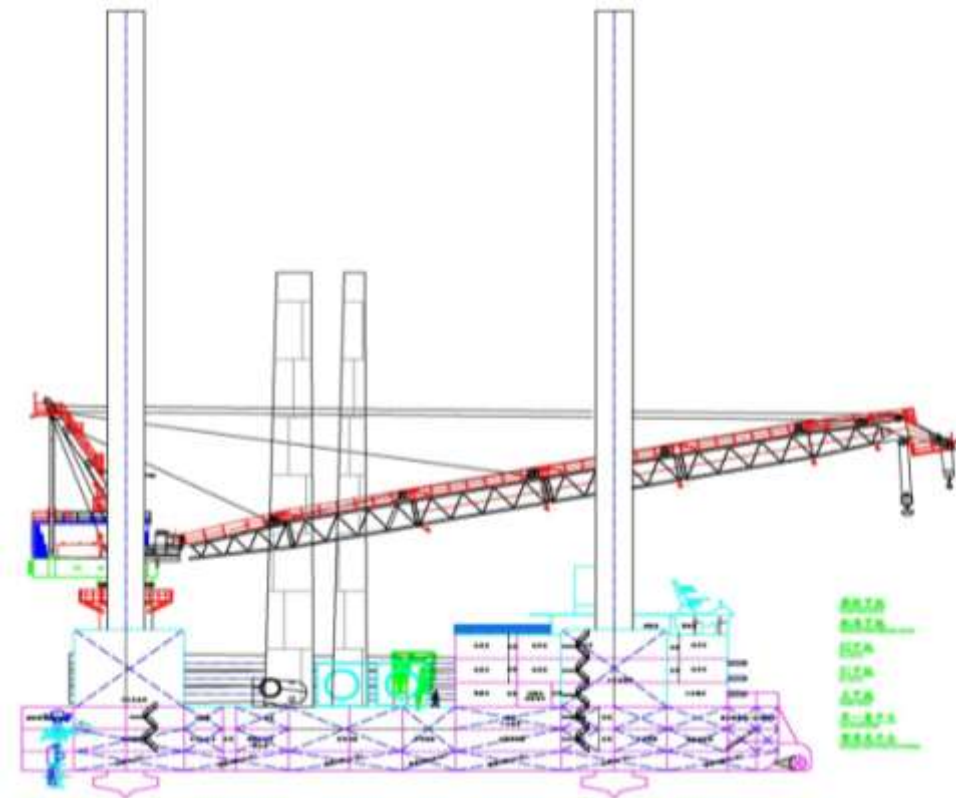


圖 20 自升式施工船側視圖



圖 21 自升式安裝船 3D 示意圖

本船計算方法，是由 Creative Systems 公司於 1972 年起所發展至今的一套船體計算程式 GHS (General HydroStatic)，其最早源於 1970 年由 Bill Plice 撰寫計算船舶程式 SCEND 開始，之後至 1982 年 Creative Systems 發

表第一版 BHS (Basic HydroStatic)，美國驗船協會(ABS)則於 1989 年開始使用 GHS 程式作為計算穩度之基礎，GHS 迄今發展已經有三十多年歷史，本中心亦有多艘船舶以 GHS 設計與計算經驗，因此，本分析例之完整穩度計算皆採用 GHS 為計算基礎與分析工具。

利用 GHS 穩度計算軟體進行平台船於靜水狀態之橫向穩度計算，做為安全評估之基礎，圖 22 為自升式平台船受風區域、圖 23 為 GHS 穩度計算軟體之艙間及甲板受風面積建置圖。計算條件為甲板裝載 2 組 5MW 風力發電機組，機組詳細重量如表 20 所示，分別探討不同裝載狀態、不同橫傾角度扶正力臂(GZ 值)之變化，並加入強風傾覆力矩分別為每秒 36 公尺(70 Knots)運輸、操作狀態及 51.5 公尺(100 Knots)劇烈風暴狀態，本自升式施工船恢復力矩曲線與風壓傾覆力矩曲線計算結果如圖 24 所示。

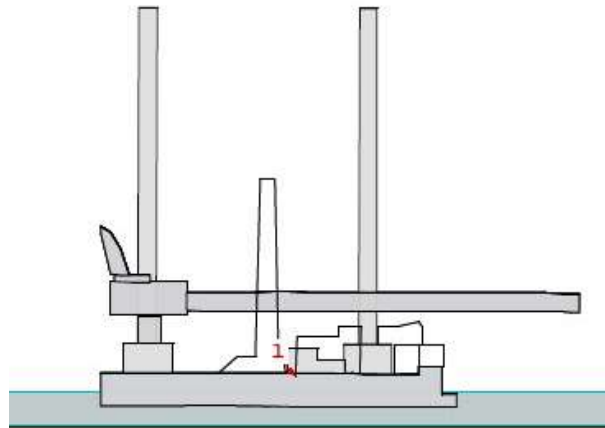


圖 22 自升式平台船受風區域

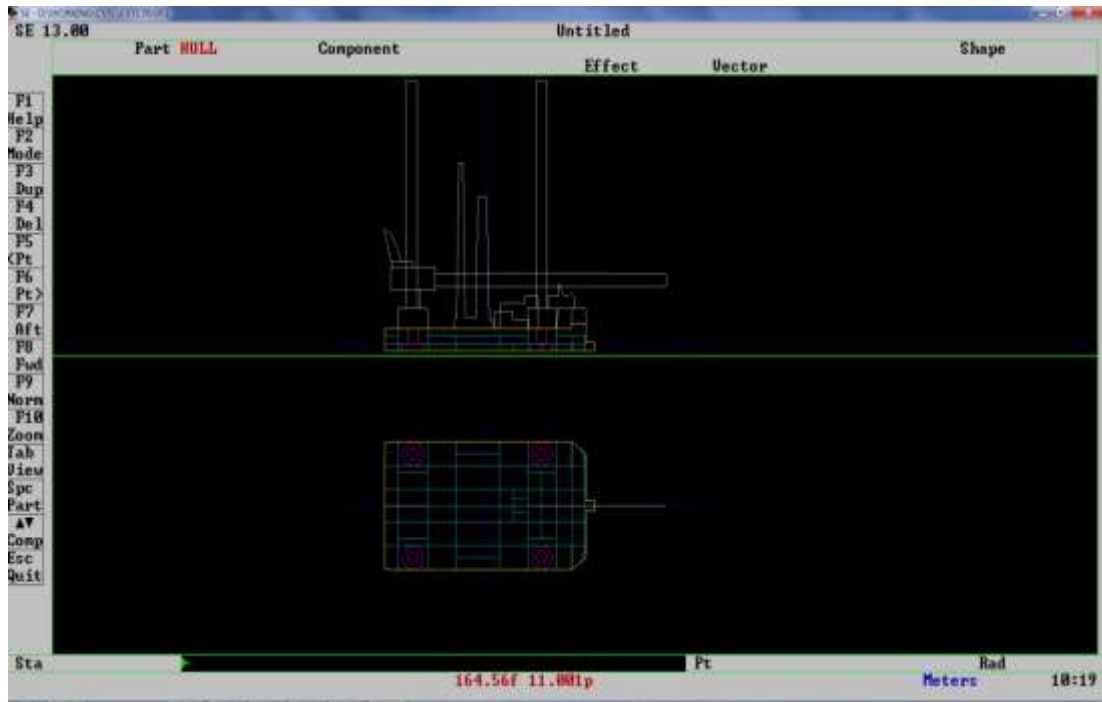


圖 23 GHS 穩度計算軟體之艙間及甲板受風面積建置圖

表 20 5MW 風力發電機組詳細重量表

Multibrid 5M	Units	Weight (ton)
1a	Hub	84
1b	Blades	24
1a+1b	Hub+Blades	156
2	Nacelle	290
3	Tower (approx.)	210
(1+2+3)	Total Assembly	656

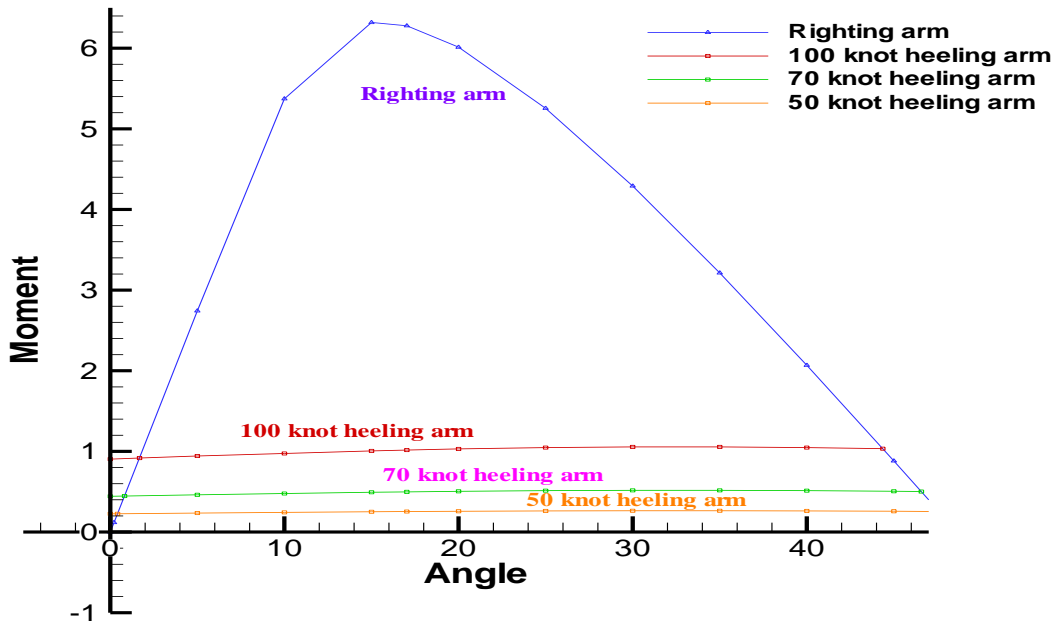


圖 24 CSTC 70 穩度計算結果

根據 GHS 計算 CSTC70 在滿載貨物與由水艙的情況下，其初穩度以及恢復力矩在不同橫傾角下的變化，並加入最低第傾覆條件—風速 25.8 m/s (50 knots)、風速為 36 m/s (70 knots)之一般運輸與操作情況以及風速 51.5 公尺(100 Knots)之劇烈風暴狀態，進行天氣衡準評估。

驗證大傾角穩度方面，根據 IMO 與 GL Noble Denton 的規範，需符合表 21 之要求。另外，天氣衡準方面則使用 GL Noble Denton 和 ABS MODUs 的穩度法規驗證，對於自升式平台或水面式平台恢復力矩曲線至第二交點或泛水點下的面積，至少應比同一限制角風壓傾覆力矩之面積大 40%，其評估結果如表 22 所示。根據表 21 與表 22，顯示離岸自升式施工船 CSTC70 完全符合 IMO、GL Noble Denton 和 ABS MODUs 的穩度規範。

表 21 CSTC 70 之穩度評估

	IMO	Noble Denton	CSTC70	驗證 (F/P)
初穩度(GM ₀)	> 0.15m	> 0.15m	31.09m	P
扶正力臂 ($\theta = 30^\circ$)	> 0.02m	-	4.28m	P
最大復原力臂之對應角	> 30°	-	15.14°	P
穩度	> 0.055m-rad	-	2.45m-rad	P

$(\theta = 0 \sim 30)$				
穩度 $(\theta = 0 \sim 40^\circ \text{ or } 0 \sim \theta_2)$	> 0.09 m-rad	-	3.01m-rad	P
穩度 $(\theta = 30 \sim 40)$	> 0.03m-rad	-	0.56m-rad	P
完整穩度 範圍	-	> 40	48.6	P

表 22 CSTC 70 天氣衡準要求之穩度評估

Load condition : 燃油、淡水滿載				
編號	GM (m)	Mid Draft (m)	$(A+B) / (B+C) > 1.4$	驗證(F/P)
50 knot	31.09	2.8	21.57	P
70 knot	31.09	2.8	10.95	P
100 knot	31.09	2.8	5.29	P

E、海事工程海上吊裝評估分析

本部份係針對 GL Noble Denton 與 DNV 之程序，對施工船於海上吊裝水下基座之過程進行海事擔保調查所需求之分析。

施工狀況假設以自升式平台船(Jack-up vessel)進行，且船舶處於定位並升起支撐腳之狀態。一般來說，MW 級之風機安裝在文件中應包括施工流程，若以浮式起重船進行施工還必須附上壓艙(ballast)配置之報告，以下為依據 Noble Denton 需求所進行之分析過程說明。

■ 環境條件

本計算案例之施工處設定水深為 48 m，風況資料取美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)在座標 25°N120°E 之分析資料；波浪量測取資料點位於 24°45'36"N120°50'37"E 者，其量測深度為 24 m 深。

● 風況、海流及波浪

根據 NCAR 之統計資料，探討位置 75 % 的時間風速小於 15 knots，因此本研究之風況條件以 15 knots 當作風速造成之穩態負荷；海流由於受風

速影響較小，以流速 0.5 m/s 當作海流造成之負荷；波浪統計資料是由浮標量測而得，表 23 為施工地點之環境條件資料，其波峰週期(peak period)可由有義波高推算(錯誤! 找不到參照來源。)

表 23 風況、海流及波浪之環境條件

Environmental Conditions	
Significant Wave Height	1.0, 1.5, 2.0 m
Peak Period	$\sqrt{13H_s}$ to $\sqrt{30H_s}$
Heading	0, 270 Degree
Spectrum	JONSWAP
Current	current of 0.5 m/s
Wind velocity	15 knots
Rules	Meets all necessary requirements of I.M.O and Solas
Wave Measurements	
Location	24°45'36"N120°50'37"E
Type	Buoy
Date	2005-2013
Source	Central Weather Bureau Taiwan
Depth	24 m

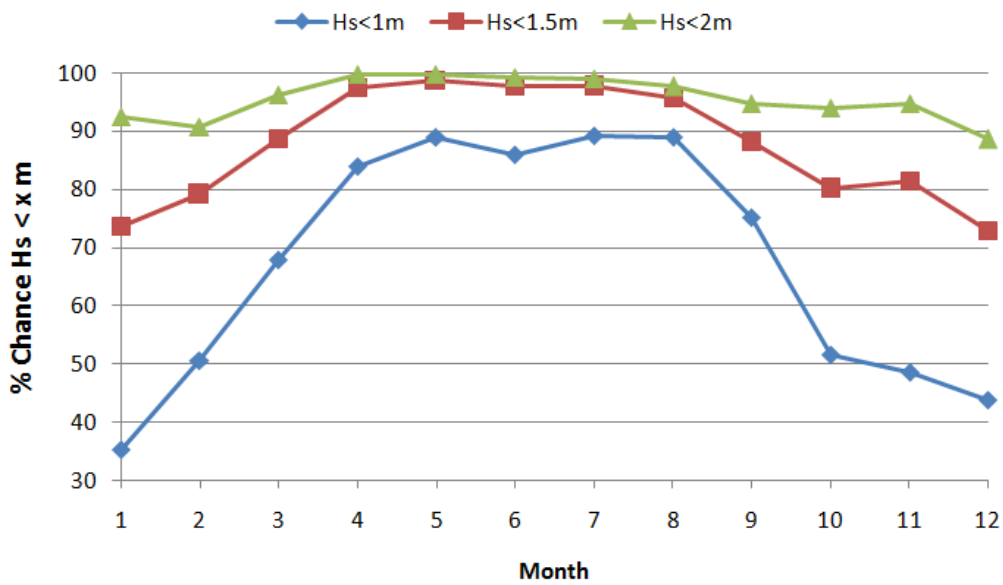


圖 25 每月有義波高(significant wave height)小於 x m 之發生機率

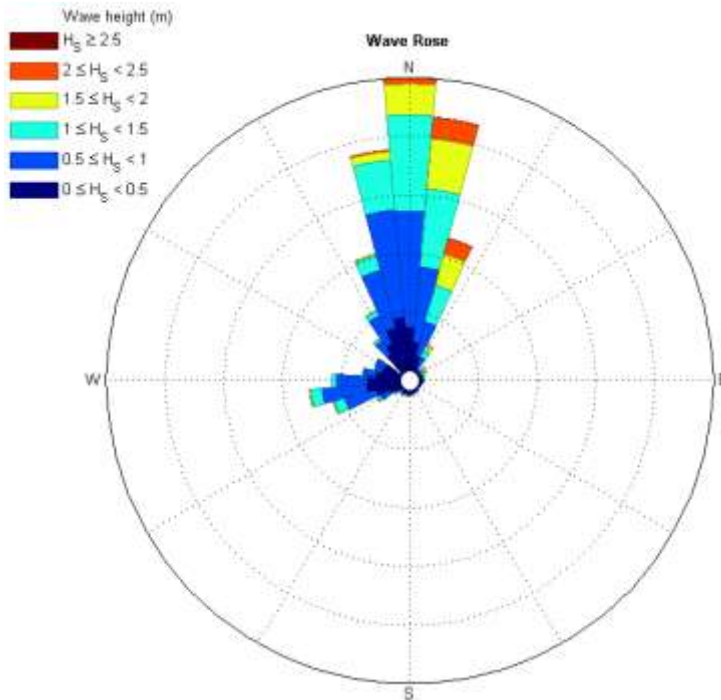


圖 26 波浪玫瑰圖

■ 桁架式基礎

本研究以一 641 噸之桁架式基礎為吊裝目標，相關資料如表 24，其結構底部面積為 25m × 25m，頂部面積則為 12.11m × 12.11m；鋼管直徑變化由頂部至底部為 0.388m 至 1.645m，且其厚度變化由 12mm 至 49mm，3D 圖如圖 27 所示。

表 24 桁架式基礎之主要尺寸與材料係數

Summary of the Jacket	
Type	Jacket
Footprint	25 m × 25 m
Length	50 m
Mass	641356 kg
COG (x, y, z)	(-0.007, 0.622, 20)
No. of Beams	199
No. of Sections	100
Material properties	
Density	7850 kg/m ³
Young's Modulus	200E3 MPa
Yield Strength	250 MPa

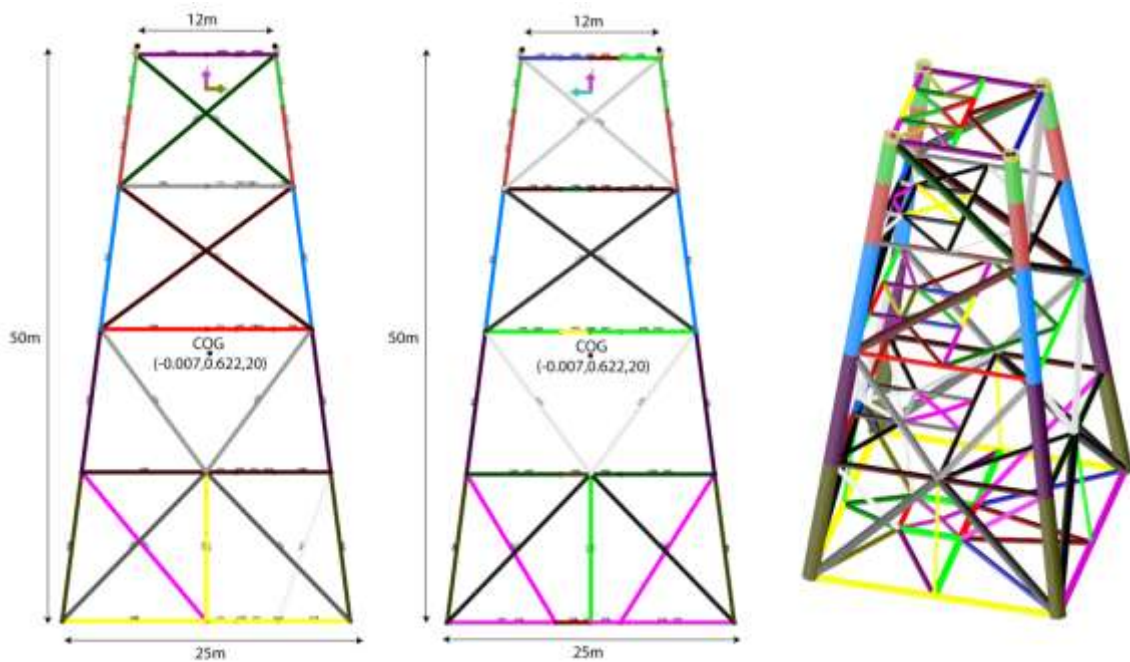


圖 27 桁架式基礎之主要尺寸(左：正視圖/中：側視圖/右：透視圖)

■ 起重船

目前國內正積極著手於自升式平台船與風機安裝船等，離岸風場建置能量之建立，本研究以參與多次歐洲風場建置之起重船舶 SeaJacks Zaratan 進行分析，表 25 為其規格與操作條件，圖 28、圖 29 分別為其俯視圖與側視圖。

表 25 起重船之規格與操作條件

Classification and Rules	
Name	Seajacks Zaratan
Type	GustoMSC NG5500C
Built	2012
Yard	Lamprell Energy, Dubai
Class	ABS A1 Self-elevating Unit AMS+ACCU+DPS 2, Self-propelled, Helideck + Wind MR
Flag	Panama
Rules	Meets all necessary requirements of I.M.O and Solas
Main Dimensions	
Length Waterline	81 m
Length Overall	108.7 m
Width Overall	41 m
Distance Between Legs	
Longitudinal	48 m

Transverse	29.5 m
Draft	4.6 m
Light Ship Weight* [5]	9704 kg
LS COG (x,y,z) *	(54.35m, -0.83 m, 8.6 m)
Operating Conditions	
Water Depth	55 m
Survival Air Gap (LAT)	7 m
Maximum Wave height	10m
Wind Speed	35 m/s
Current	1.2 m/s
Variable load	3607 t
Positioning/Jacking	
Significant Wave Height	2m
Current	1.2 m/s
Wind Velocity	10.8 m/s

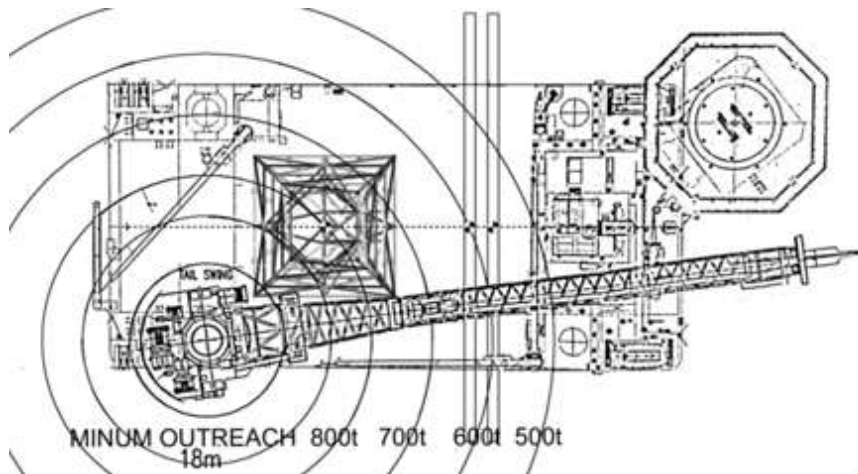


圖 28 自升式起重船俯視圖及配置

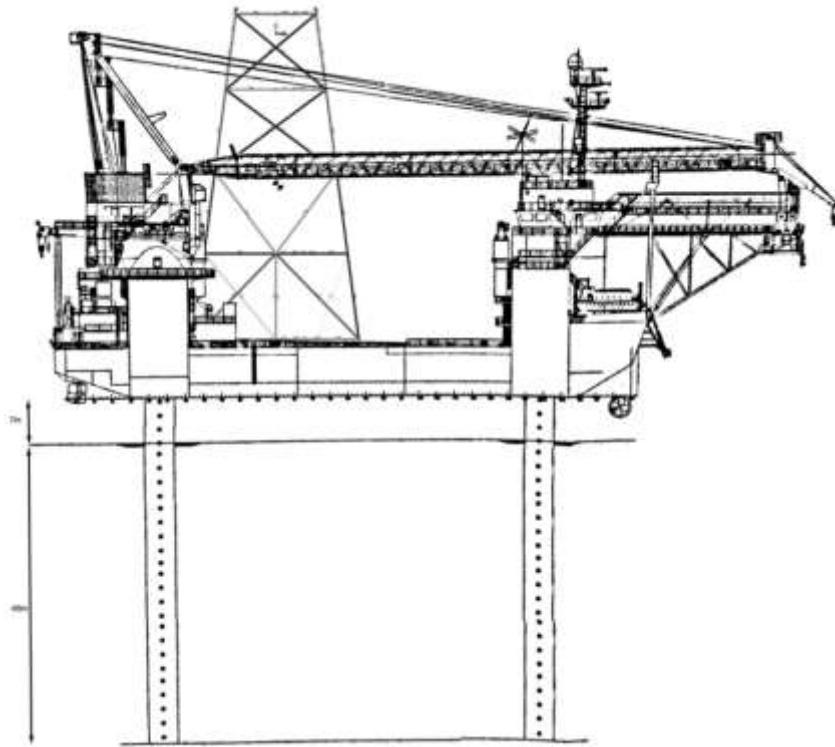


圖 29 自升式起重船側視圖及配置

■ 起重機規格

起重船 Seajacks Zaratan 配備一 800 噸吊車，吊車型號為 GLC-800-ED，奇在最大迴轉半徑 24 m 時承載力為 800 tons 且動態負荷因子 DAF 為 1.1，其他詳細規格如表 26 所示，圖 30 為施工吊車之操作曲線。

表 26 起重機之規格

Cranes capacities	
Type	GLC-800-ED
• Main hoist	800 tons @ 24 m
Main hoist "split mode"	480 tons @ 36 m
Minimum outreach	15-18 m
Hoisting height	77 m
DAF	1.1
• Auxiliary Cranes	50 tons @ 91 m
Minimum outreach	18.3
Hoisting height	85.5 m
DAF	1.3
Man riding capacity	3 tons
Tugger winches	2 × 5 tons

Operation conditions	
Operational wind speed	16 m/s
Max platform inclination	1 degree
Slewing speed	0.3 rpm
Slewing range	N× 360 degree
Boom hoist time	Approx. 12 min.

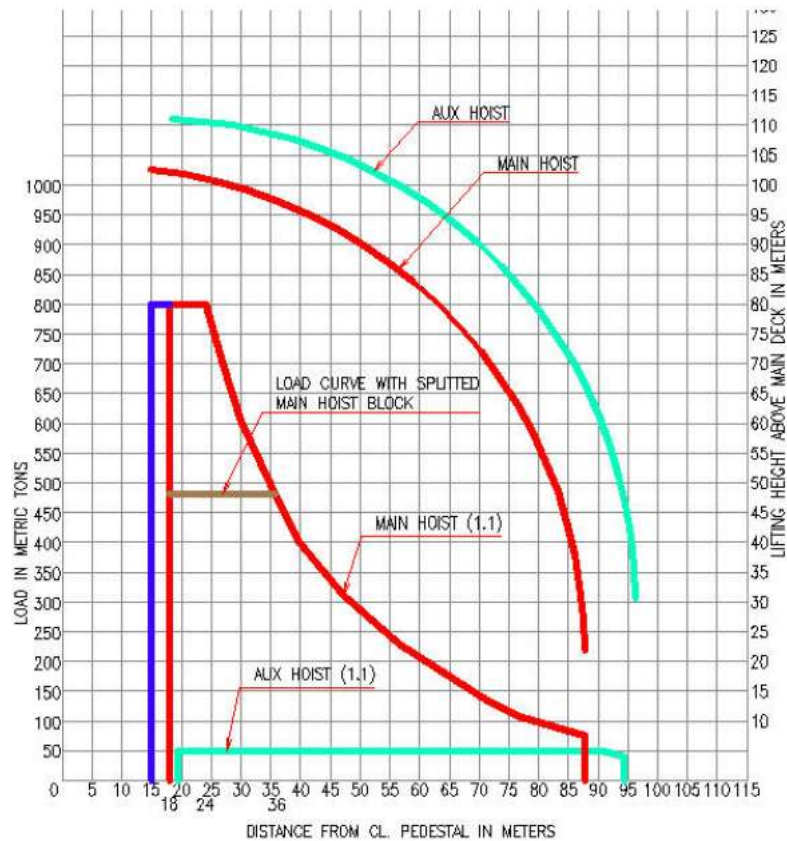


圖 30 GLC-800-ED 起重機曲線

- MAIN HOIST CAPACITY STATIC OPERATION (1.1)
- AUX HOIST CAPACITY (1.1)
- MAIN HOIST LIFTING HEIGHT
- AUX HOIST LIFTING HEIGHT
- MIN. OUTREACH 15m FOR SPECIAL CONDITIONS & OPERATIONS

■ 索具配置

進行吊裝作業計算時，表 27 與圖 32 為本研究中主吊索(main sling)、連接吊索(connector sling)與接環(shackle)之規格及尺寸，索具配置則如圖 31 所示：

表 27 吊索與接環詳細規格

Main Sling	
Type	KIMFLEX
Manufacturer	KTL Offshore
Position	Connects the crane and hook
ID number	5
Length	45-107 m
Diameter	332 mm
CSBL	3550 tons
WLL	887 tons
Grade	EEIPS
Design safety factor	4:1
Weight	261 kg/m
Connector Slings	
Type	KIMFLEX
Manufacturer	KTL Offshore
Position	Connects hook and shackles
ID number	1-4
Length	16.97 m
Diameter	208 mm
CSBL	1418 tons
WLL	355 tons
Grade	EEIPS
Design safety factor	4:1
Weight	99 kg/m
Shackles	
Type	Heavy Lift
Manufacturer	GreenPin
Position	Connects structure and connector slings
ID number	1-4
CSBL	2000 tons
WLL	400 tons
Grade	8
Design safety factor	5:1
Weight	0.560 t

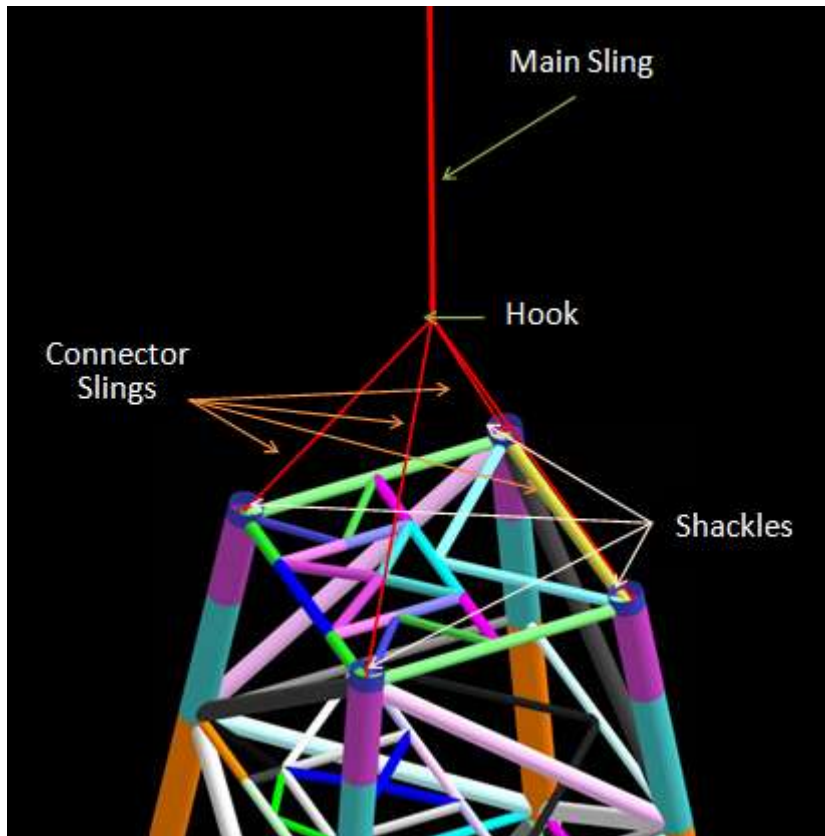


圖 31 索具配置示意圖

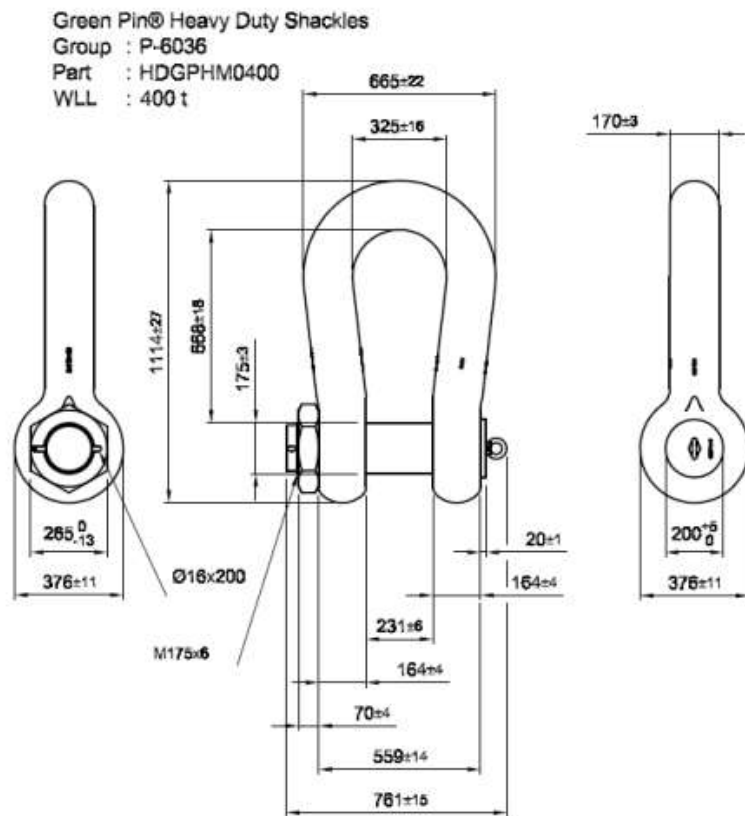


圖 32 接環詳細規格示意圖

■ 吊裝作業流程說明

本研究將以一 5MW 風機之桁架式基礎為例，安裝地點位於台灣西部海岸約 5 km 處，且水深約 48 m。吊裝作業流程分為兩階段進行探討，第一階段為將桁架式基礎由起重船甲板吊起並移動至右舷，第二階段則是將桁架式基礎由空中經過海平面放置於海床上，以下將針對兩階段分別探討。

- 桁架式基礎由起重船甲板吊至右舷

在第一階段的吊裝作業是將桁架式基礎由甲板移至起重船右舷處，整體作業流程均在空中，施工過程則如圖 33 與圖 34 所示。

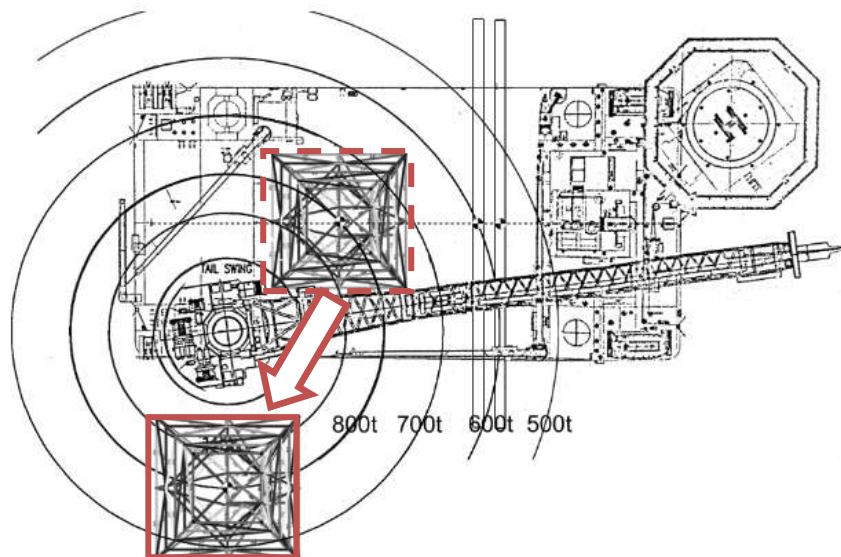


圖 33 吊裝作業流程示意圖(俯視圖)

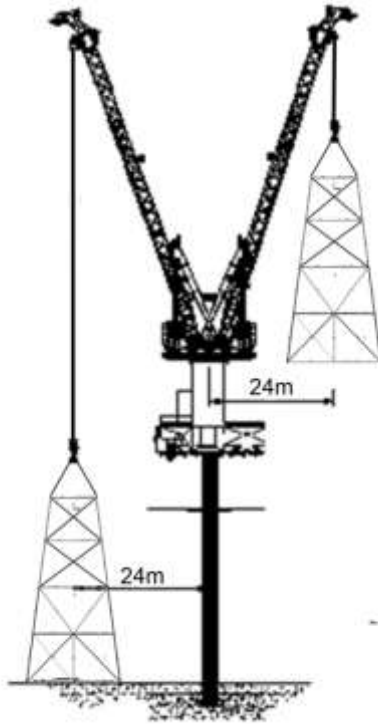


圖 34 吊裝作業流程示意圖(前視圖)

計算時，動態負荷因子(DAF)可參照表 15，動態吊鉤負荷(DHL)如以下所示：

$$DHL = (W_{air} + W_R)\gamma_w DAF$$

其中， W_{air} 為空氣中的桁架式基礎重量； W_R 為索具自重； γ_w 為重量權變因子；吊索負荷則以下式定義：

$$F_{Sling_i} = \frac{W_{air}\gamma_w DAF \cdot D_{W_i}}{\sin(\alpha_i)} \gamma_{SKL} \cdot \gamma_{COG}$$

D_{W_i} 為垂直方向重量分佈(vertical weight distribution)； γ_{COG} 為重心之公差因子，在此取 1.03； α_i 為吊索與水平平面所夾之角度。

並以吊索負荷進一步確認其極限工作負荷(WLL)與最大斷裂負荷(MBL)； γ_{sf} 則為一綜合負荷因子，包括結果因子(consequence factor)、折減因子(reduction factor)、彎矩折減因子(bending factor)、磨耗因子(wear factor)與材料因子(material factor)等：

$$WLL > F_{Sling\ static}$$

$$\frac{MBL}{\gamma_{sf}} > F_{Sling\ dynamic}$$

$$\gamma_{sf} = \gamma_f \gamma_c \gamma_r \gamma_w \gamma_m \gamma_{tw}$$

表 28 主吊索靜態負荷確認(針對空中吊裝施工)

Main sling	
Static Sling Load	705 tonnes
Design safety factor slings	4
Sling WLL	877 tonnes
Sling WLL > F_{Sling static}	OK
Dynamic Sling Load	776 tonnes
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}}$	805 tonnes
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK

表 29 連接吊索靜態負荷確認(針對空中吊裝施工)

Connector sling load	Sling 1	Sling 2	Sling 3	Sling 4
Vertical weight distribution: Dwi	0.2243	0.2238	0.2756	0.2762
CoG inaccuracy factor	1.03	1.03	1.03	1.03
C1 Skew load factor: γ_{SKL}	1.25	-	1.25	-
LC2 Skew load factor: γ_{SKL}	-	1.25	-	1.25
Angle (Degree)	60	60	60	60
LC1: Static Sling Load	235tonnes	187tonnes	289tonnes	231tonnes
LC2: Static Sling Load	188tonnes	234tonnes	231tonnes	289tonnes
Sling WLL	355 tonnes			
Sling WLL > F_{Sling static}	OK	OK	OK	OK
LC1: Dynamic Sling Load	258tonnes	206tonnes	317tonnes	255tonnes
LC2: Dynamic Sling Load	207tonnes	258tonnes	254tonnes	319tonnes
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}}$	326 tonnes			
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK	OK	OK	OK
$\frac{\text{Shackle MBL}}{\gamma_{sf}}$	459 tonnes			
$\frac{\text{Shackle MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK	OK	OK	OK

- 桁架式基礎置於海床

第二階段的吊裝作業桁架式基礎由空中降至海床的過程中，將會受到不規則波浪的影響，結構物的受力計算則需考慮靜態與動態負荷，這部分不若空氣中吊裝分析，僅需以靜態吊裝負荷考慮 DAF 即可，而需進行水動力分析(hydrodynamic analysis)，本研究使用專業海事工程軟體 Bentley MOSES，Bentley MOSES 在近幾年應用於多個海事工程計畫，並藉由多個認證機構驗證其設計與計算結果。

桁架式基礎吊裝過程中，其運動方程式可以表示為：

$$(M + A)\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F$$

其中 M 為結構質量、A 為附加質量、C 為阻尼矩陣、K：勁度矩陣，F 則為外力，在 MOSES 中外力包括重力、浮力、風力、黏性阻力(viscous drag)、波浪激振力(wave exciting force)、波擊力()、科氏加速度(Coriolis acceleration)、附加質量加速度、質量加速度等。

桁架式基礎在水中移動時，考慮到周圍的流體會受到其影響一起運動，造成附加質量，根據 DNV-RP-H103 中圓柱之附加質量計算如下：

$$A_{33} = \rho C_A V_R$$

其中 A_{33} 為附加質量， ρ 為流體密度， V_R 為圓柱體積，而 C_A 則是附加質量係數且理想值為 1：

$$C_M = 1 + C_A$$

慣性力則為：

$$F_I = C_M V_S \rho v_r$$

其中 V_S 為沉入水中體積， v_r 則為圓柱與流體間之相對速度，較準確之值則需經由計算流體力學(CFD)方法或實驗得到。

桁架式基礎造成之黏性阻力計算如下：

$$F_D = 0.5\rho C_D A_P v_r |v_r|$$

其中 A_P 為水平投影面積， C_D 則為阻力係數。當桁架式基礎經過海平面時會遭受波擊，根據以下公式：

$$F_S = 0.5\rho C_S A_P v_{rs}^2$$

v_{rs} 為圓柱與自由液面之相對速度，波擊力係數 C_S 則以以下公式表示：

$$C_S = 2/\rho A_P \cdot \delta A_{33}/\delta s$$

其中 s 為海平面與圓柱底部間之距離，且接近自由液面之附加阻力係數可參考 DNV-RP-C205。分析過程中之水動力各項係數可參照表 30。

表 30 水動力計算之各項係數

Hydrodynamic coefficients		
C_A	1	
C_M	2	
C_D	Re	C_D
	1.00E+03	1.2
	2.00E+05	1.2
	3.00E+05	1
	4.00E+05	0.32
	5.00E+05	0.27
	9.00E+05	0.40
	2.00E+06	0.57
	5.00E+06	0.62
	1.00E+08	0.62
C_S	from added mass	

桁架式基礎之下降過程中，其靜態吊裝分析在本研究中是以 MOSES 進行計算，包括吊鉤與吊索負荷、桁架式基礎底部距海床距離及重心(CoG)的軌跡。下降過程由平均海平面(MSL)上 20 m 開始，每間隔 0.5 m 計算一次，**錯誤! 找不到參照來源**。顯示下降過程中之靜態吊鉤負荷，**錯誤! 找不到參照來源**。則顯示四條靜態連接吊索負荷，由圖中可看出當基礎下降經過水面時，浮力增加造成吊鉤與吊索負荷減少。

$$F_{static} = W_{air}g - \rho V_{submerged}g$$

由於桁架式基礎之重心在 y 方向有些許偏移，其吊索負荷在 Sling 3 及 4 的部分約比 Sling 1 與 2 高出 6%；在 x 方向的僅偏移 7 mm，因此負荷差異較小僅 0.1%。

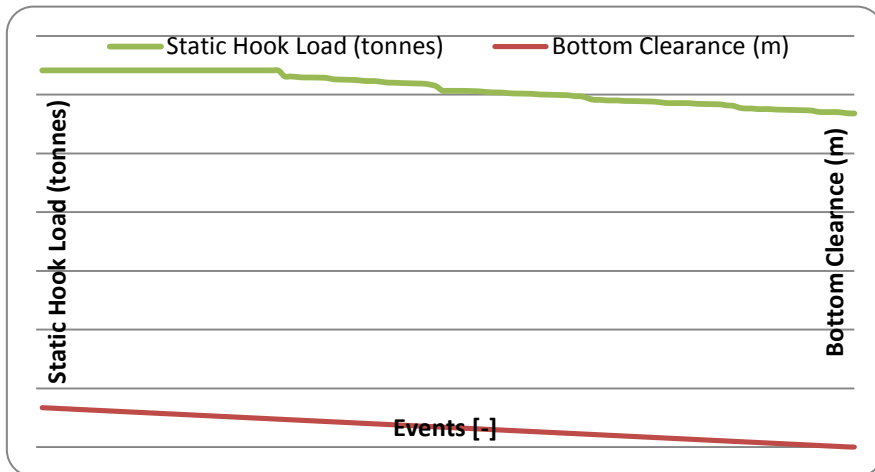


圖 35 基礎下降過程中靜態吊鉤負荷與距離海床平面之關係圖

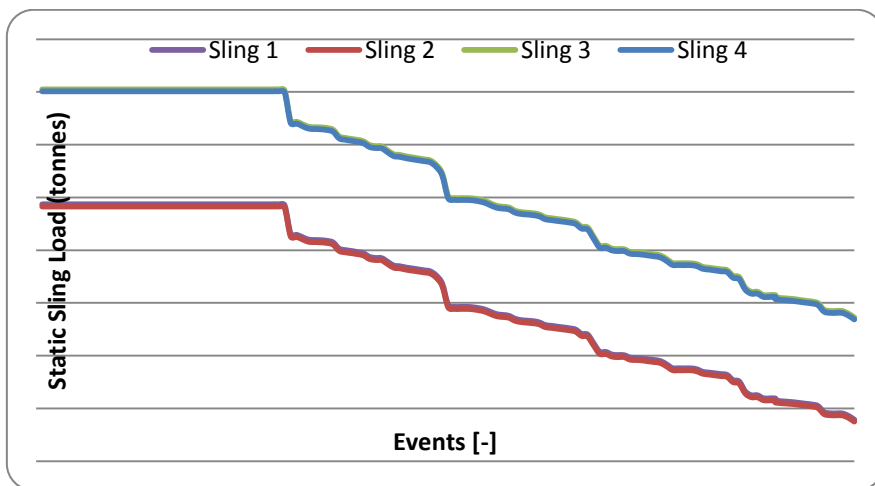


圖 36 基礎下降過程中靜態吊索負荷示意圖

動態吊裝分析根據 GL Noble Denton 0027 中表示應包含：

- 動態吊索與吊鉤負荷，避免鬆弛吊索之情況發生。
- 提供離岸施工時之極限海況資料。
- 繩環處局部與整體應力。
- 吊裝過程中結構物承受之波擊負荷。

DNV 規範建議在吊裝過程中應針對不同沒水深度進行至少 30 分鐘的動態負荷分析，本研究共對 4 個深度進行計算，分別為距離海床 0 m、13 m、25.5 m 及 44 m，如圖 37 所示。表 31 則為基礎位於各深度時之計算參數，且最大負荷發生於沒水深度 13 m 時，有義波高 2 m，波峰週期 5.1 sec.及波向 270 degrees。

表 31 桁架式基礎於不同沒水深度之計算參數

Level of submergence (m)	Hs (m)	DAF (-)	Tp (sec.)	Heading
0	1	1.04	3.6	0
0	1.5	1.04	4.4	0
0	2	1.04	7.1	0
13	1	1.05	5.1	0
13	1.5	1.09	5.4	0
13	2	1.11	5.1	270
25.5	1	1.03	5.1	0
25.5	1.5	1.04	6.4	0
25.5	2	1.07	7.6	0
44	1	1.03	5.1	0
44	1.5	1.02	6.4	0
44	2	1.03	7.6	0

其中動態放大因子 DAF 之計算根據 GL Noble Denton 0027：

$$DAF = \frac{F_{static} + F_{hydrodynamic}}{F_{static}}$$

$$F_{static} = \text{Mass} - \text{Buoyancy}$$

$$F_{hydrodynamic} = \Sigma \text{slam, varying buoyancy, drag and inertia}$$

水動力產生之負荷應小於 90% 的靜態負荷：

$$F_{hydrodynamic} \leq 0.9 F_{static}$$

表 32 為吊索動態負荷計算時各項安全係數，針對最大負荷發生之條件(有義波高 2 m，波峰週期 5.1 sec.及波向 270 degrees)，可進一步確認吊索與接環負荷是否符合法規要求，如表 33 與表 34 所示。

表 32 吊索相關之安全係數

Safety factors	
Load factor	1.3
Consequence Factor	1.3
Termination Factor	1.25
Bending Factor	1.72
Reduction Factor	1.72
Wear Factor	1

Material Factor	1.5
Total	4.36

表 33 主吊索動態負荷確認

Main sling	
Dynamic Sling Load	768 tonnes
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}}$	805 tonnes
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK

表 34 連接吊索動態負荷確認

Connector sling load	Sling 1	Sling 2	Sling 3	Sling 4
F_{Sling MOSES}	216.4 tonnes	211.2 tonnes	227.1 tonnes	229.1 tonnes
F_{Sling MOSES}γ_wγ_{SKL}γ_{CoG}	306.5 tonnes	299.1 tonnes	321.7 tonnes	324.5 tonnes
Design safety factor Slings	4			
Sling WLL	355 tonnes			
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}}$	326 tonnes			
$\frac{\text{Sling MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK	OK	OK	OK
Design safety factor Shackle	5			
Shackle WLL	400 tonnes			
$\frac{\text{Shackle MBL}}{\gamma_{sf}}$	459 tonnes			
$\frac{\text{Shackle MBL}}{\gamma_{sf}} > F_{\text{Sling dynamic}}$	OK	OK	OK	OK

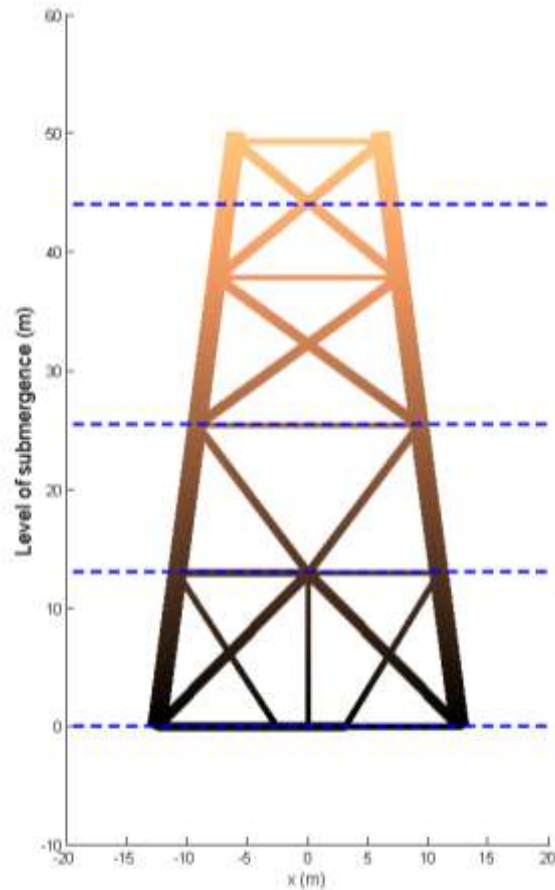


圖 37 桁架式基礎於不同沒水深度之動態負荷分析

最小吊索張力在不同的有義波高時如**錯誤! 找不到參照來源**。所示，以吊索張力剪去吊索重量當作上限，並以沒水之桁架式基礎重量的 10%當作其下限值。由 MOSES 計算得到之最大吊索張力需再乘上一重量權變因子(weight contingency factor)，圖中顯示當有義波高為 2 m 時，其吊索張力已逼近圖中上限值。圖 39 則為不同波峰週期(T_p)情況下之吊索張力，並由圖中可看出考慮重量權變因子(weight contingency factor)與否之差異。

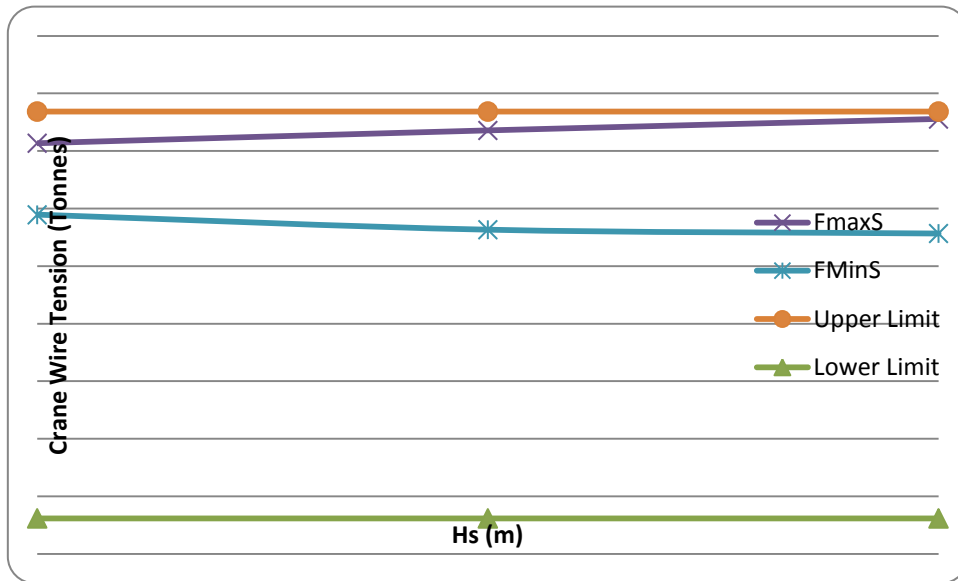


圖 38 不同有義波高(Hs)情況下之吊索張力示意圖

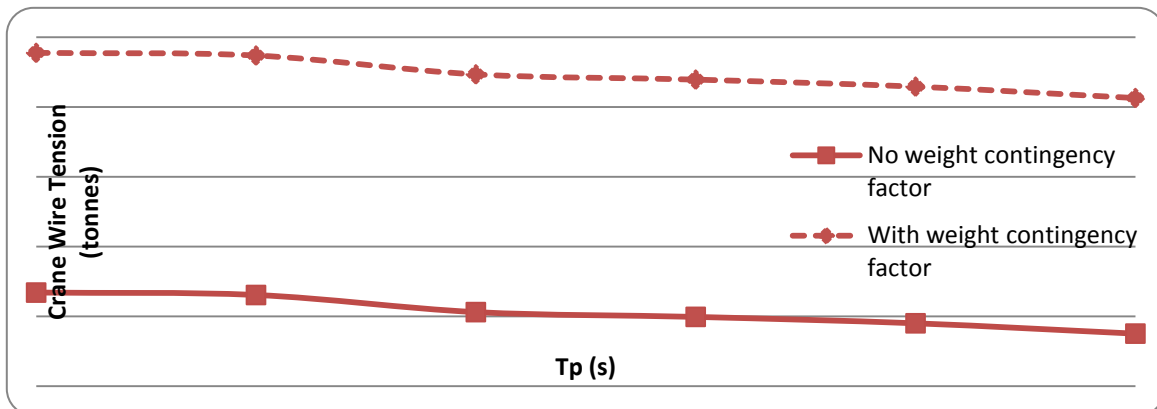


圖 39 不同波峰週期(Tp)情況下之吊索張力示意圖

隨機負荷的計算假設為一 Rayleigh 分佈，可由以下表示：

$$R_{\max} = \sigma_r \sqrt{2 \ln \left(\frac{t}{T_z} \right)}$$

其中 σ_r 為負荷標準差， t 為單位為秒之模擬時間(最少 30 分鐘)， T_z 則為平均週期。受隨機負荷造成之最大與最小吊索張力負荷可見**錯誤! 找不到參照來源。**，分別為：

$$F_{\max} = F_{\text{static}} + R_{\max}$$

$$F_{\min} = F_{\text{static}} - R_{\max}$$

由圖中可看出當考慮隨機負荷之情況下，可進行吊裝作業之有義波高

(Hs)降為約 1.8 m。

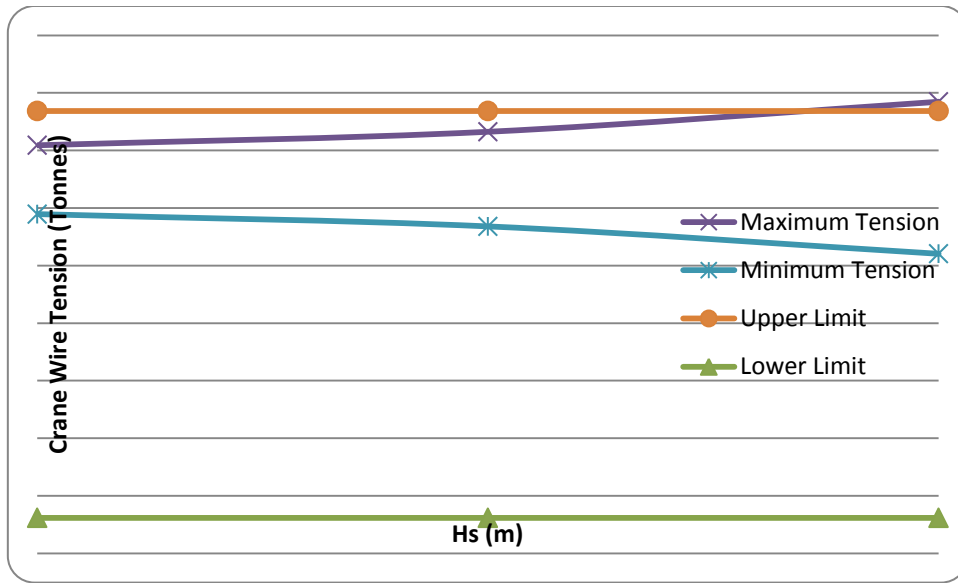


圖 40 考慮隨機負荷造成之最大吊索負荷示意圖

桁架式基礎下降至海床的過程中，在經過海平面時需考慮波擊負荷 (slamming load) 造成之影響，第一次波擊發生與波擊造成最大負荷如圖 41 與圖 43 所示。由圖中可看出因波擊產生最大負荷僅約 655 tonnes，相較於其他因素造成之負荷來的較小(其動態放大因子為 1.023)，且由於基礎重量較高，波擊造成吊索鬆弛的機率較小。

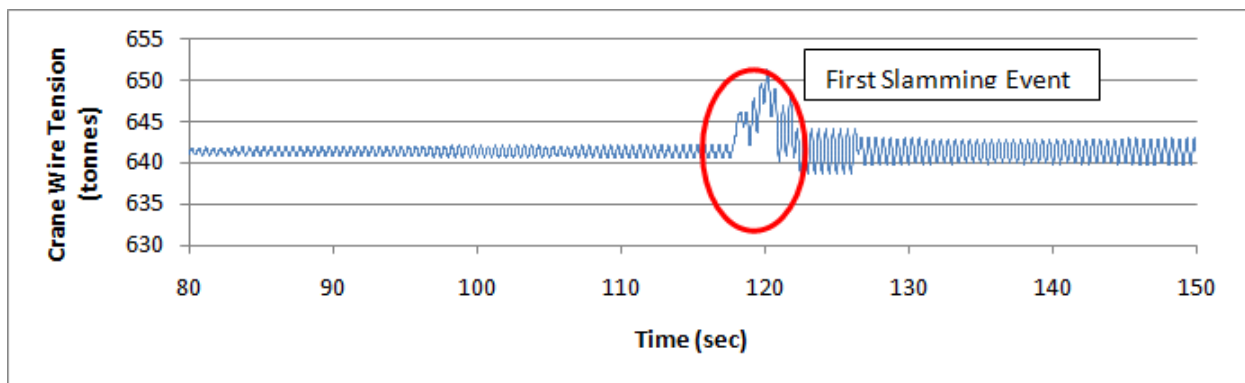


圖 41 第一個波擊負荷發生時之吊索負荷

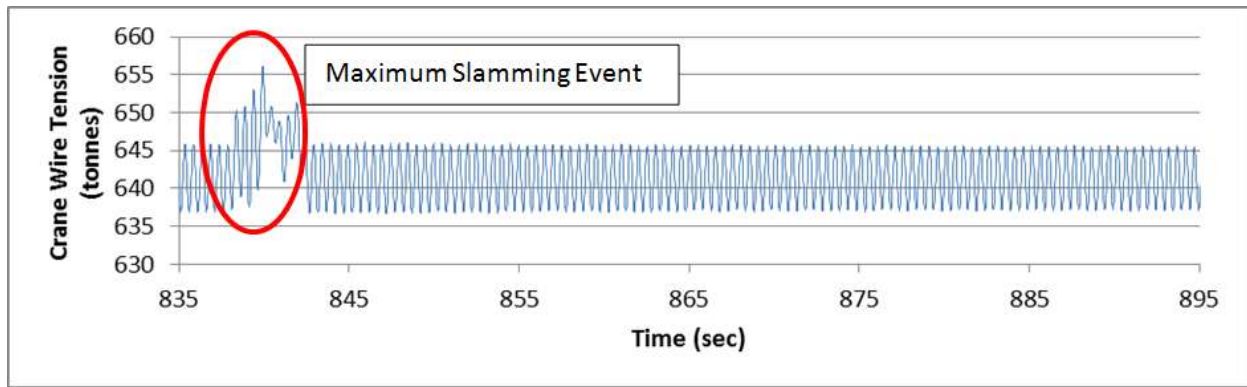


圖 42 最大波擊負荷發生時之吊索負荷

- 吊裝過程吊點處有限元素結構強度分析

根據前一節的計算結果，將繼續對桁架式基礎與吊點處接環進行結構強度分析，桁架式基礎之主要尺寸如圖 27 所示，本研究以最大負荷條件進行結構強度分析，發生於桁架式基礎沒水深度 13 m，有義波高 2 m，波峰週期 5.1 sec 及波向 270 degrees。

依據規範 API-RP-2A WSD 第 3.3 章檢查構件受力及局部挫曲等項目，最大負荷發生於桁架式基礎沒水 13 m、有義波高 2 m、波峰週期 5.1 sec. 及波向 270 degrees，計算結果以構件於最大負荷情況下之應力比顯示，如圖 43 所示，構件負荷比之定義如下：

$$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1$$

其中 F_y 為降伏強度 250MPa、 F_b ：容許彎曲應力、 f_a ：軸向應力、 f_b ：MOSES 計算之彎曲應力，最大波擊負荷造成之應力比如圖 44 所示，其最大值為 0.42。

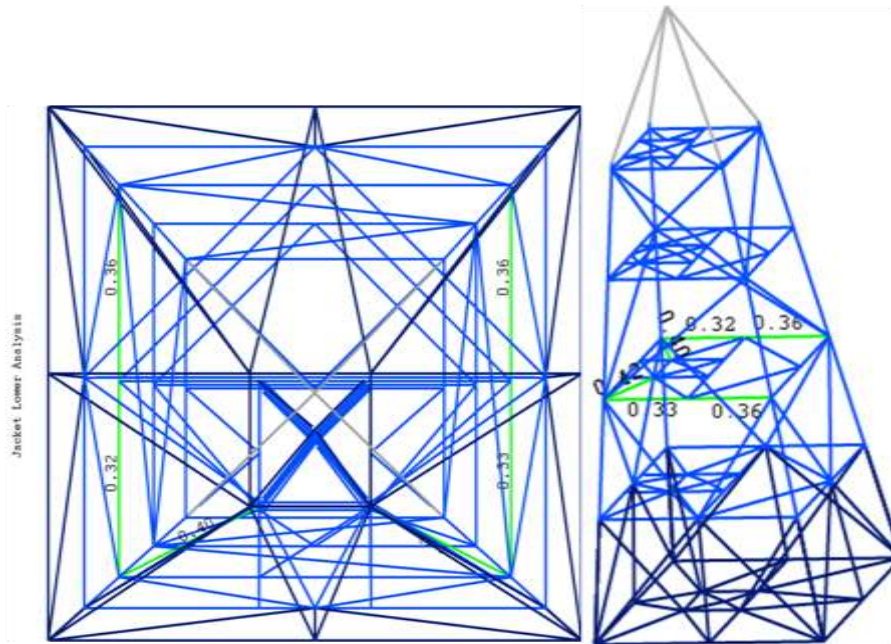


圖 43 桁架式基礎各構件最大負荷比示意圖(藍<0.3，綠>0.3，深藍色表示沒水部分)

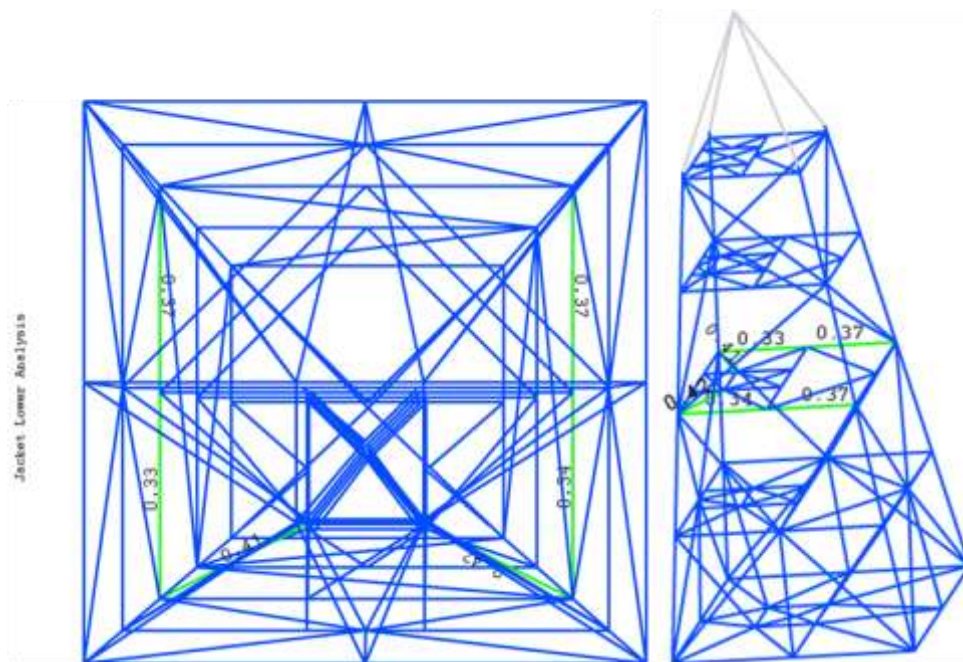


圖 44 桁架式基礎各構件波擊負荷比示意圖(藍<0.3，綠>0.3)

在吊裝作業中，接環連接桁架式基礎與吊索，其詳細尺寸如圖 32 所示；材料之楊氏係數為 210E3 MPa、蒲松比為 0.3 且降伏應力為 900MPa，圖 45 則為有限元素模型與受力邊界條件示意圖，且根據 GL Noble Denton 0027 中提到應以 5% 的主要負荷當作其水平負荷，圖 46 中顯示固定邊界條件設定於螺栓上。

表 35 接環之材料規格

Material properties for shackle		
Grade	8 quenched and tempered	
Density	7850	Kg/m3
Young's Modulus	210E3	MPa
Poission ratio	0.3	-
Yield Strength	900	MPa

表 36 螺栓與接環之有限元素分析結果

Yield Strength	900 MPa
γ_m Bolt	1.25
γ_m Shackle	1.15
Stress bolt at design load	646 MPa
$S_d \leq R_d$	OK
Stress shackle at design load	690 MPa
$S_d \leq R_d$	OK

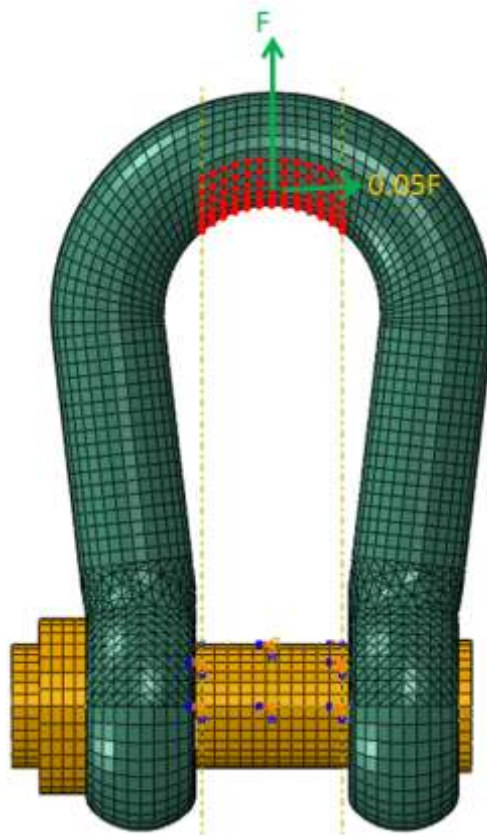


圖 45 接環與螺栓之有限元素模型與吊索負荷示意圖

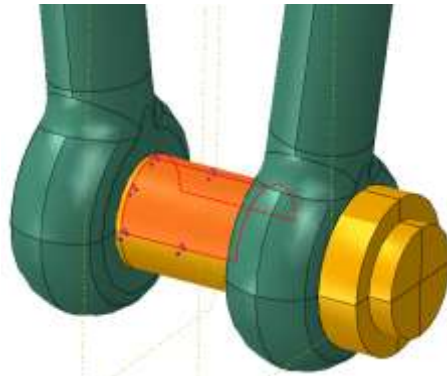


圖 46 螺栓之固定邊界條件示意圖

接環之有限元素分析是以動態負荷分析中最大吊索負荷，來計算其設計負荷，由以下公式可得 F_{design} 為 5372 kN 且水平負荷 F_{lat} 為 269 kN：

$$F_{design} = F_{dynamic\ sling} \cdot \gamma_{load} \cdot \gamma_{consequence}$$

式中， $F_{dynamic\ sling}$ 為最大吊索負荷； γ_{load} 為負荷因子，吊裝作業時根據 DNV-OS-H102 應取 1.3； $\gamma_{consequence}$ 為後果因子。

根據 DNV-OS-H102 中以 LRFD(Load and Resistance Factor Design) 方法檢測接環分析結果，當設計負荷未達到其阻力則接環結構是安全的。

$$S_d \leq R_d$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m}$$

其中

S_d ：設計負荷

R_k ：材料阻力，本研究中以降伏應力 900MPa 進行計算

γ_m ：材料安全係數，一般鋼構件為 1.15，螺栓取 1.25

圖 47 顯示接環與螺栓在各負荷下造成之應力，並由表 37 與圖 48 之應力分布可知接環與螺栓之結構是安全的。

表 37 螺栓與接環之有限元素分析結果

Yield Strength	900 MPa
----------------	---------

γ_m Shackle	1.15
γ_m Bolt	1.25
Stress bolt at design load	646 MPa
$S_d \leq R_d$	OK
Stress shackle at design load	690 MPa
$S_d \leq R_d$	OK

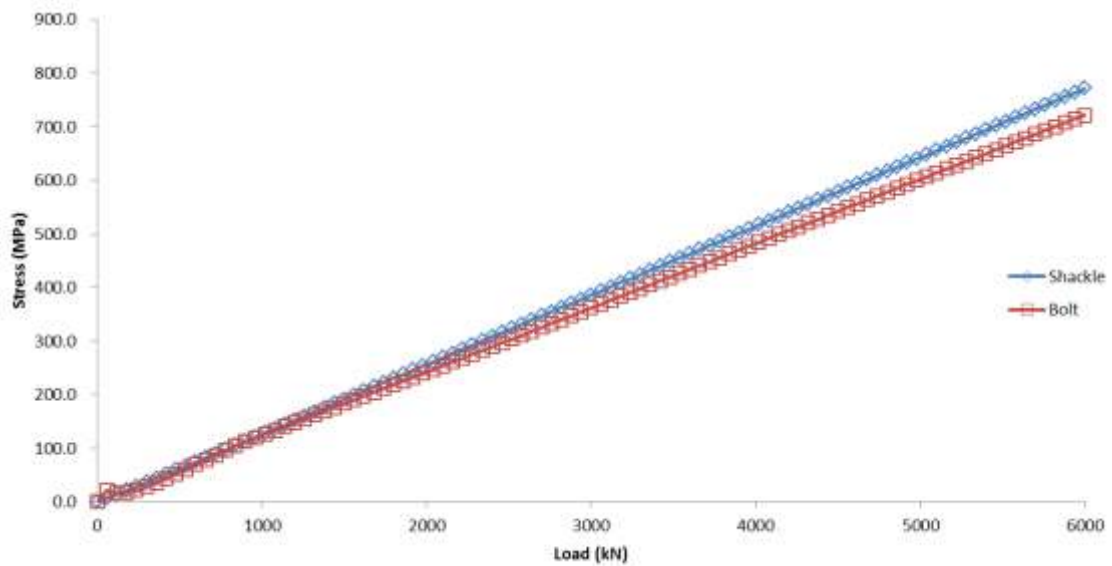


圖 47 接環與螺栓之負荷-應力圖

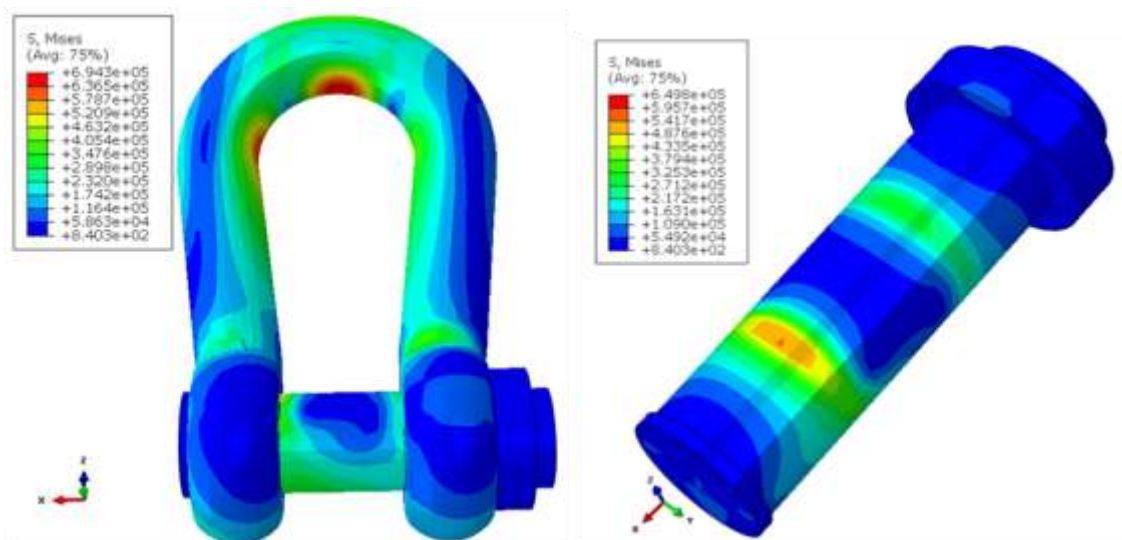


圖 48 接環與螺栓之應力分布圖

F、對國內短、中、長期可能之運輸與吊裝設備進行分析與評估

國內目前尚無離岸風場施工之實績，然在離岸風場示範獎勵辦法推行之際，已有開發商將設置先導型之二座離岸風力機，作為後續大規模風場開發之基礎，由於初期設置量尚不具規模，受限於成本，所使用之機具與施工方式，勢必無法與大規模設置者等量齊觀，故需就現有國內能量與機具進行評估，藉由國內環境條件所檢討出之所需運輸能量與吊裝機具規格，擬定短、中、長期之能量提升與機具開發策略，短期措施係屬臨時性，不適於日後套用。不論短、中或長期，所用之工件或工序都一樣，工法及機具可能因應現有條件而有所不同。

■ 工法探討

不同之基座型式會有不同之施工方式，圖 49~圖 52 列出單樁、多樁、各式鋼構基座、重力式混凝土等工序，其中，圖 50 說明多樁部份尚分為預打樁(Pre-piling)與後打樁(Post-piling)之安裝方式。

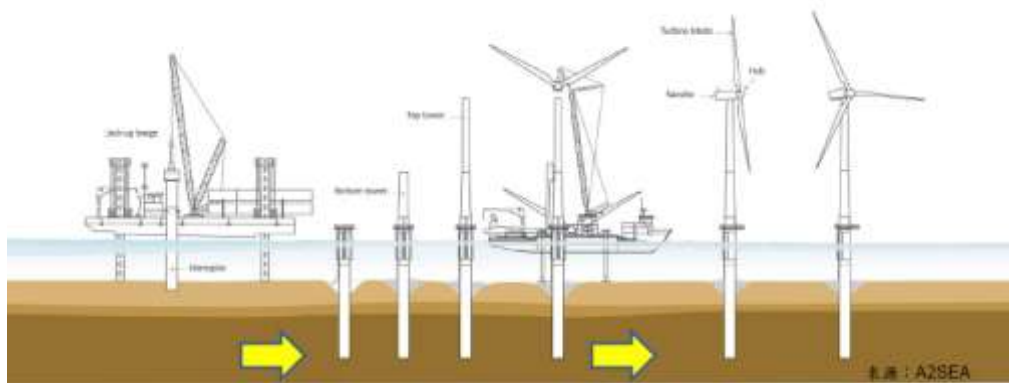


圖 49 單樁基礎式離岸風力機安裝之總工序



圖 50 多樁基礎式離岸風力機安裝之總工序



圖 51 各式鋼構基礎之安裝工序



圖 52 重力式混凝土基礎之安裝工序

■ 工件對象

離岸風電不同工序或工法都須動用到船舶及吊車，執行前，暫不談天候及海況，首先須調查離岸運輸與吊裝之工件對象及現況所需，再依況採取適當對策予以配合實現，工件介面及作業注意事項，依序略述如下：

- a. 工件類別(打樁模板、海床基礎、支撐結構、打樁機、翻樁機、塔架、機艙、葉片、葉輪、兔頭、灌漿設施、樁柱洗淨機、小型活動吊車、高空作業車、作業機具、人員吊籃、補給物資、作業貨櫃、

ROV、搭配索具等須搬上工作船，其中以海床支撐結構、風力機為主，但不可忽略其他)

- b. 個別貨件之形狀、尺寸與特徵(吊車吊具之搭配)
- c. 陸上平面運輸使用何種吊車或載具(設法取得共用之吊點或支撐點)
- d. 地面預組與排程狀況(銜接吊裝上船之程序)
- e. 碼頭配置與準備(承載力、補強作業架、位置、碼頭淨空條件)
- f. 安裝船或運輸船之形式(浮船或自升船)
- g. 船隻停泊狀態與碼頭距離(視港務單位要求)
- h. 使用何方吊車吊貨上船(碼頭或安裝船)
- i. 船上吊車形式(Derrick Cargo Gear, Shear leg 或 Revolving Crane)
- j. 船上吊車位設(獨立式、抱腿式)
- k. 船上吊車俯仰中心高度(貼近甲板、筒柱架高)
- l. 安裝船現址操作端(舷側式、艏端式)
- m. 吊桿角度限制(吊裝高度、距離及條件)
- n. 吊裝有效半徑 (岸邊不足者須搭配駁船轉吊)
- o. 吊裝有效高度(直立或橫躺，可否 Jacking 補救)
- p. 吊裝輔助機具(Slings、Lifting beam、Spreader)
- q. 吊件上船之位態與船重心調配(吊車範圍能力)
- r. 上下船吊裝干擾與排除(吊件形狀與擺位)
- s. 上下船吊裝排序與整船重心調配(穩度為主)
- t. 各式吊件繫固需求(牢固、快捷與安全)
- u. 吊件離船作業形式(水面上、水面間、水面下)
- v. 吊件離船就現址定位之姿態(吊件是否須翻轉)
- w. 其他配合。

以上所述係以離岸風電運輸與吊裝所需條件考量，供作業基本依循，至於工件之運輸吊裝作業，將與選用之船舶及吊車有直接關係，通常另有保固需求，依況有不同程度的安排，將篩選出三項重點工件詳述如下：

● 風力機

在離岸風電工件中，風力機最為精緻且脆弱，且體積龐大，通常以零散件或局部預組方式交運，其運輸及吊裝方式是否安全並足以投保，將受制於風力機廠商之特定考量及保險公司之意願；為避免爭議，執行前，選用品工作條件應依明文規定，送審相關單位取得其認可。

除出航之天候限制外，安裝船或運輸船的性能、吊車能力、各式甲板

佈置、繫固系統及住艙人員配置等，都須事先送審給風力機廠商，安裝前先得其同意，才可執行。慣例上，風力機的保固責任就交由風力機廠商全責承擔，若不照其意，則保固責任將不在風力機廠商。

通常風力機廠商會保守地要求採用自升船當作裝運載具，即使吊裝狀態亦然。至於浮船載具之使用，可能須在嚴苛限制條件下才被允許，但大多情況仍不准。

若安裝業者自採獨創之風力機安裝方式，此類海事操作與相關計算，應事先請海事擔保調查(Marine Warranty Survey-MWS)認證公司認可，以確保技術作業之安全，如此較能獲取保險公司及風力機廠商之認同，否則仍應依照風力機廠商規定的做法與機具去施作，其間有權益利害關係，係此行業之既有行規。

風力機主要構件包括：塔架(Tower)、機艙(Nacelle)、葉片(Blade)、或葉輪(Rotor)、或兔頭(Bunny Ears)，依不同風力機廠商之設計與製造而異，目前沒有所謂的標準化，造成承攬安裝之業者在執行上相當的困擾。

風力機之重量、尺寸及高度是決定採用安裝法及吊車容量之判斷因素，當地當季的風速限制約如下：

葉片： 8m/s 以內。

塔架： 10m/s 以內。

機艙： 12m/s 以內。

然隨著趨勢發展及經濟規模之需求，風力機容量將越作越大，2009~2014年，3.6~6.0 MW 容量獨領風騷()，未來五年內，應是 4.0~8.0 MW 的天下()，機艙的重量將挺進到 400~500 t(除非採無齒輪直驅式才有機會降重)，葉片長度將達到 70~80 m，Hub 高度將提高到 100~110 m(圖 53)，現有之機具、吊車高度、舉重容量、船舶尺寸及繫固系統將跟著配合改變，也許單機容量極限在 10 MW，目前台灣開發商暫時鎖定 4.0 MW 起跳，未來會再跟進提升。

風場離岸距離會影響風力機構件預組的安排程度，早期兔頭(Bunny Ears)、葉輪(Rotor)係因應近程的便利所為，但有運送受損的顧慮，現今風力機廠商漸不同意如此預組方式，改為葉片集體運輸，一葉葉安裝。唯塔架的預組，風力機廠商則傾向全組出航，以簡化海上組裝。

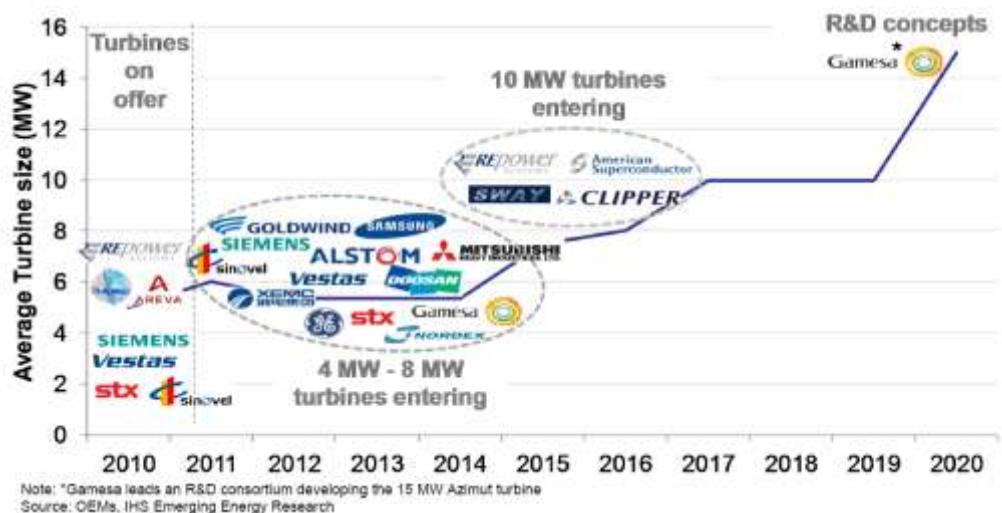


圖 53 2014 年國際風力機廠商發展之 4~6MW 風力機已近成熟，未來 10 年內 8~10MW 可期待。

表 38 預測未來通行之 5~7MW 風力機構件可能技術資料

Likely weights / Dimensions for 5 MW wind turbine

- Nacelle (exc. Hub and Blades) ~ 285 tons
- Blade Weight ~ 18 tons each
- Hub Weight ~ 61 tons
- Nacelle Weight (inc Hub and Blades) ~ 400 tons
- Tower Weight ~ 500 tons (2 sections)
- Blade Length ~ 61.5 m
- Hub Height ~ 85 – 100 m

Attributes	3.6MW	5MW	7MW
Tip height (m) above MHWS	130	155	180
Hub Height (m) above MHWS	76	90	105
Rotor diameter (m)	107	120	150
Nacelle dimensions (m)	13 x 4 x 4	16 x 10 x 8	20 x 14 x 10
Operating speed (m/sec) cut-in	3	20	30
Blade clearance (m) above MHWS	22	25	30

來源：SCOTTISH; Offshore Wind Power Development Asia, Workshop A, Learning Effective Techniques and Technologies to Develop and Deliver Large Scale Offshore Wind Projects.; March 25th 2011

• 海床支撐結構

海床支撐結構之設計及製造大都由開發商自行安排，其構造相較風力機強壯且粗大許多，面臨情況不同。

鋼構基礎最被普遍採用，除腐蝕外，其比較不怕一般運輸撞擊所造成的受損，唯應注意防蝕處理、疲勞及裂損現象。至於混凝土的重力式基礎，本身不怕腐蝕，其大都採類似 Shear Leg 式吊車船來進行吊裝，或自浮。

以上兩者吊裝、海固、運輸與安裝的方式，通常走海事擔保調查(MWS)

認證公司之認可方式，因重量大，吊運貨件裝船出航條件，應注意天候海況限制、船舶穩度等相關安全，事前需專業的計算與評估並送審通過。

支撐結構與選用風力機容量、水深、浪高、海流及海床地質等有關，有 Monopile、Tripod、Tripile、Jacket、Gravity 型式(圖 54)，隨著機組容量提升，台灣採 Jacket 機會大。

台灣特有的地質、地震、颱風、腐蝕，對基礎及海事工程確實影響深遠，尤其地質的風險，重要而被遺忘。

海床土質的條件不一定能支撐得住大容量風力機，其間包括土質是否提供足夠承载力供自升船前往站腳作業也是關鍵，若否，則將變更改用船及工法或根本放棄風場。確認風電的施工性，應先在地質安全作好詳盡考量，經判斷工法可採自升船或另允用浮船，才有樹立風力機的可能，接著再考慮整體承抗地震與颱風的能力，這是國內研擬區塊開發時應有的思考次序，以台灣而言，海床地質的承載條件才是決定允建風電的真正技術門檻。

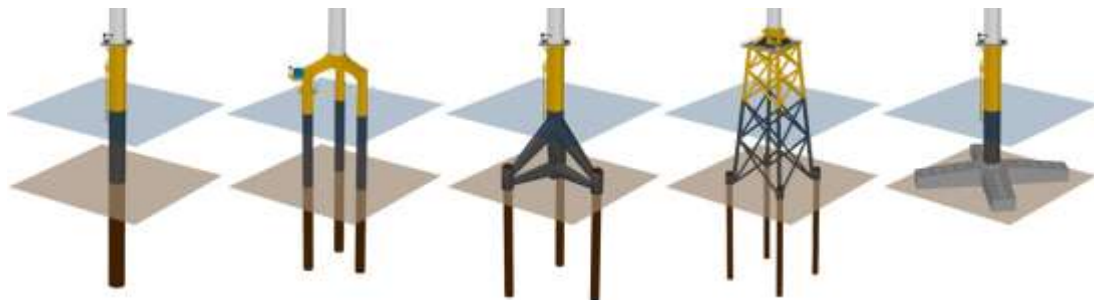


圖 54 支撐結構型式有 Monopile、Tripod、Tripile、Jacket、Gravity。


台灣中部以南之西海岸屬爛泥海床地質，前往施工的自升船取輕巧型為宜，風力機所採用之支撐結構多為 Jacket 型式，工作船要設置足夠舉升距離及能力的吊車，表 39、表 40 是不同基礎形式、風力機容量、水深的重量表。

表 39 不同 MW 風力機所採 Monopile 在不同水深之各式重量


Wassertiefe [m]	Masse Monopile [t]				Masse Transitionpiece [t]				Masse Monopile + Transitionpiece [t]			
	Leistung [MW]				Leistung [MW]				Leistung [MW]			
	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0
10	145	180	250	320	115	120	125	130	260	300	375	450
20		275	375	475		125	130	135		400	505	610
30		370	515	635		130	135	140		500	650	775
40			665	805			140	145			805	950
50												

Source: IMS Ingenieurgesellschaft mbH

表 40 不同 MW 風力機所採 Tripod 及 Jacket 在不同水深之各式重量



Water depth [m]	Mass Tripod (Tpd) [t]				Mass Pile [t]				Mass Tripod + Pile [t]			
	Power [MW]				Power [MW]				Power [MW]			
	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0
10												
20		350	480	640		160	210	260		510	690	900
30		470	665	920		200	240	280		670	905	1200
40			815	1090			270	300			1085	1390
50				1230				320				1550



Water depth [m]	Mass Jacket [t]				Mass Pile [t]				Mass Jacket + Pile [t]			
	Power [MW]				Power [MW]				Power [MW]			
	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0	1,8 - 2,9	3,0 - 3,5	3,6 - 4,4	4,5 - 6,0
10												
20		360	420	550		110	120	140		470	540	690
30		450	520	780		130	140	160		580	660	940
40			650	880			160	180			810	1060
50				960				200				1160

Source: IMS Ingenieurgesellschaft mbH

- 相關作業所需之活動機具

作業機具(圖 55~圖 61)的能量隨風力機而變，一向比船舶容量容易受到限制，其尺寸與重量相較前述兩者小，適用性大都能被已滿足上者條件的吊車能力所概含，故問題不大。



圖 55 大型 Upend 機具



圖 56 中型 Upend 機具



圖 57 Lifting beam



圖 58 Tower gripper



圖 59 Georgia Blade yoke



圖 60 Seafastenings for towers and nacelles on the deck



圖 61 Seafastenings for blade above the deck

■ 運輸設施

海上運輸設施以船為單位，根據航程的遠近及適航性的需求，船型有內河、近海及遠洋之別，還有乘載量，由業者依況判斷採用。

- **純運輸**：拖船搭配平台駁船，或自推式運輸船(圖 62)。



圖 62 吊車船與平台駁船



圖 63 拖船與平台駁船

- **純吊裝**：吊車船(母體為自升船或駁船，唯不作運輸)
吊車船有 Shear leg 型及 Revolving Crane 型兩種為主。
- **運輸兼安裝**：裝吊車之自升船或平台駁船(留運輸空間)

表 41 國際風電安裝船的演進

1、第一代：起重駁船(Crane Barge)	
<ul style="list-style-type: none"> • 無自升，無自推。 • 僅在平靜海況操作。 	
2、第二代：起重駁船/船(Crane Barge/Ship)	
<ul style="list-style-type: none"> • 無自升，有自推或 DP。 • 僅在平靜海況操作。 	
3、第三代：起重自升駁船(Jack-up Barge with cranes)	

<ul style="list-style-type: none"> • Winch wire/ Hydraulic Cylinder 自升系統，無自推。 • 在約 1m 浪高近海操作(第一代 Jack-up) 	
4、第四代：專業自升風電安裝船(Expertise WTIV)	
<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulic Cylinder 自升系統，有自推。 • 在約 1.5~1.8m 浪高近海操作(第二代 Jack-up) 	
5、第四 1/2 代：專業大型自升安裝船(Expertise WTIV of wider service)	
<ul style="list-style-type: none"> • Electric Rack & Pinion 自升系統，有自推。 • 採桁架式支腳，作業水深可達 50~60m，在約 2m 浪高海況操作。 • 大船體、大甲板面積、大住艙，續航停留日較長。 • 大承載、大吊車，容量達 1500t @35m，可吊裝大型水下基礎。 	

風能豐富的海域，常態海況大多惡劣，工作船舶之尺寸及性能將影響作業順利及人命安全，慎選符合海域的船型如自升船或浮船，並進行船隊搭配，將是規劃離岸風電施工之首要重點。

經近年查訪與調查，發現開發台灣海峽風能的所需之離岸工程船隊目前難能完整，按照不同開發階段需求可知，最欠缺的船種應是可避開海浪、工作水深足夠且能負載機具或風力機構件的自升船，其中最需要的是海床鑽探用及安裝用之自升船。

近期喧囂一時的大陸籍自升安裝船入台之國安問題事件，凸顯台灣缺船之嚴重性。若基礎之設計走向需用大吊車、大型油壓錘及大口徑抱樁機的單樁工法，則船舶選擇已受到限制，非借調自升船不可，歐洲船動員費動輒數億元，難以承受，只能靠亞洲極少數自升船施工，國內工作船隊的調查狀況已於國內目前施工機具評估部分探討(表 6)，國內現有浮船塢列於表 7，表 42 則為國內目前最大之 2 艘自升船技術能量。

表 42 國內目前最大的兩艘自升船之技術能量

船名	宏華營造—宏禹號	樺棋營造—海岸一號
船級	無	無
交船年	2013 年	—
長寬深	55.9m x 30m x 3.6m	48mx18mx3m

最大舉升能力	3,000t	≒ 700t
船體重量	1,500t	222t
載重	1,500t	≒ 400t
腳樁長度	45m	30m
工作水深	20m	15m



圖 64 宏華營造宏禹號



圖 65 樺棋營造海岸一號



圖 66 環島工程平台



圖 67 穩晉十六



圖 68 第八大寬號



圖 69 榮吉號

在國內、沉箱浮沉台相當普遍；若離岸風力機採重力式混凝土基礎，則沉箱浮沉台適合當作運輸或安裝的工具；國內現有的自升船能量不足，若將沉箱浮沉台架設陸用大吊車，採座底方式作業，也許可扮演風力機之安裝平台以因應租不到國外自升船之孔急。

■ 吊裝設施

常見之離岸風電吊車，有如下主要種類：



圖 70 Gantry crane



圖 71 Shear leg crane



圖 72 Revolving crane

自升安裝船使用的旋轉式(Revolving)離岸吊車約如下：



圖 73 Ringer Crane、Mast Crane、Round-Leg Crane-1、Round-Leg Crane-2。

自升安裝船吊車有如下基本性能可供判斷及選用：

- 吊重能力：風力機為主兼吊海床基礎約 600~1500t，折衷取 800~900t@25m。超過 1000t 者，宜取浮式吊車船施工。
- 舉高(從主甲板)：90~110m，搭配風力機機艙之高度。
- 最大吊重之工作半徑範圍：20~35m，可俯仰(Luffing)至水平或更低，搭配遠離海床防掏沙之範圍，避免將之踏損。
- 迴轉：360°，採電刷傳遞動力及控制訊號。
- 機房外型：全罩柱狀(Column type)、A 架+方屋狀。
- 站立型式：獨立式、抱腿式、懸柱式，luffing centr 須架高，底座都採 Pedestal。
- 驅動方式：電動、電動油壓、柴油、柴油電動、柴油油壓。

自升安裝船甲板面安排之介面考慮：

- 操作端：船艉端操作、船舷端操作
- 運作與外伸長度之樁腿及甲板艙房之避衝方式

- 各吊車停架方式與住艙或 Jacking House 的關係

樁腳之外伸長度來自作業水深影響，依況長短不一，應注意相互干擾的情況；迴轉式吊車必須免除運桿動作造成妨礙或碰撞之災難，並減少與有用甲板空間的衝突，針對船況作各方干擾演練以敲定佈置，其中以採抱腿式吊車最為有利。整體運作產生的動態負荷，與工件、就位、旋角、俯仰(遠近外伸)、站姿及操作速度有關。



圖 74 穩晉、基隆港務局現有的吊車船之舉吊能力不足以符合風電所需。

■ 開發策略

目前台灣建置離岸風場所需之工程船隊難能完整，新購或新建自升船皆緩不濟急，國內正規劃針對此類船舶，因應來年所需，開發策略架構分短、中、長期如下：

a. 短期之能量提升與機具開發策略(3 年內)

- **運輸設備**：取現有的駁船或浮沉台或吊車船改裝，搭配拖船拉曳，或租用海況補償器以平衡浮船的海吊需求，或依隨條件進行有限的運輸支援，或採重力式者以自浮方式...等。
- **吊裝設備**：除非得體改裝本土現有船舶加設陸用大吊車，而大吊車還要搭配打樁機及扶正機，或者改變工法將就既有資源，否則目前仍以洽租外籍工作船及機具才為可行對策。



圖 75 取沉箱浮沉台運送安裝基礎或風力機。



圖 76 架高吊車。

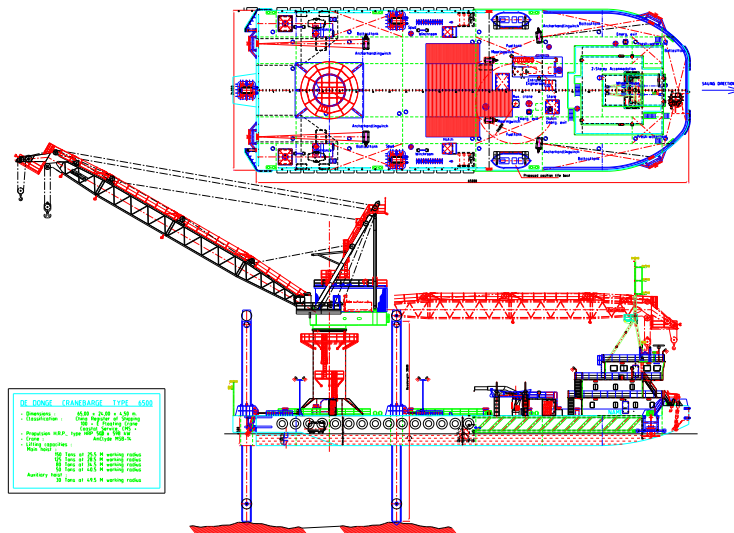


圖 77 取基隆港務局現有吊車船增設一組 Spud 及架高吊車，在好天候使用。

b. 中期之能量提升與機具開發策略(3~6 年)

- **運輸設備**：取現有的駁船搭配拖船拉曳進行運輸，或設置海況補償器以平衡浮船的海吊需求，或積極另新建輕型自升安裝船，運輸兼安裝，也同時設置專業的人員運送船隊。



圖 78 雙胴船體斧狀頭交通船



圖 79 雙胴船體 SWASH 交通船 123

- **吊裝設備**：在歐洲跨國海域執行大型且遠距的廣闊風場建置，大型自升船及千噸大吊車確有其優勢，其初期投資及維運都較貴；對台灣偏小海域，且海床地質能否允許 8MW 以上風力機設置或自升船站立施工而不見得適用，宜走輕型自升安裝船具 800t 吊重。



圖 80 輕型自升安裝船



圖 81 大型自升安裝船

c. 長期之能量提升與機具開發策略(6~12 年)

- 運輸設備

- (a) 運補與安裝分船合作

以 Feeder Service 方式分工為：船舶分穿梭運補、現址安裝兩類，讓造價低廉的運輸船來回港口與風場之間，其運輸容量取一台風力機即可，採一或多艘運輸船穿梭以達成快速支援的目的，若採浮式運輸船需配備海況運動補償措施，方利於海吊，否則須具備自升或半自升系統者為佳。至於人員的更替，則以高速且舒適的交通船為之。為讓昂貴的安裝船專注安裝作業，其在現址僅針對各風力機移位而盡量不回港，如此增加安裝量，降低成本。五年後風力機主流容量約為 8MW，風場規模與船運量須重新考量與搭配。若扣除東部及敏感禁建區後，台灣富風能之海域區塊將位於偏北的西區，距離附近港口較遠，大規模風場若取用大型安裝船，其船較重容易陷於某區站不起來，來往不經濟，反而取多艘輕型自升安裝船搭配多艘運輸船，調度及備份上會較有利，屆時運輸船的匹配可能變成關鍵要角，有三法參考(圖 82~圖 84)。



圖 82 方法一：一艘半升式船穿梭運輸、一艘自升式平台現場安裝



圖 83 方法二：一艘補償台運輸船運輸、一艘自升式平台現場安裝

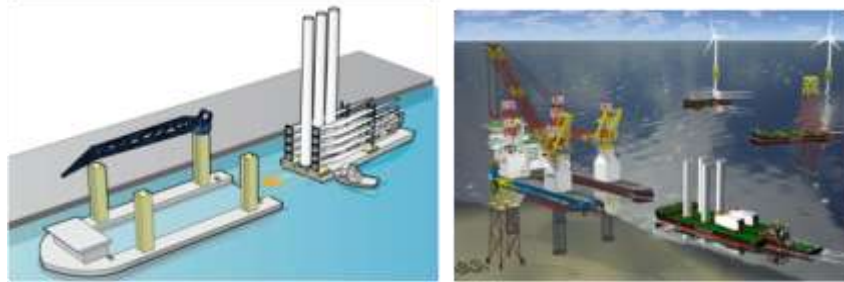


圖 84 方法三：二或三艘運輸船運輸、一艘自升式母船現場安裝

(b) 自升式運輸安裝船

以大型自升式運輸安裝船來回穿梭運補兼職現址安裝的方式是最近三年內常見之景象，其裝機速度已進步到一天一台風力機或更快，畢竟此成績係發生在風場開發興盛的歐洲海域，如今快速安裝及大量新船湧入反陷歐洲於需求過剩的後果，台灣本土是否有同等條件？值得再深思。



圖 85 大型自升式運輸安裝船

(c) 浮船式運輸安裝船

若所用船隻之尺寸大到足以抵抗海浪造成的運動，如十萬噸級左右者，以浮船運作應可跳脫自升船的思維，就沒有自升船站不起爛泥海床的顧慮與風險，未來可考慮藉此建立風力機整機安裝或兼作海床基礎安裝之能量方向，每趟安裝容量之風力機套數份量可擴大到

十組左右，將匹配更大的舉重及就位能力的吊車。



圖 86 IHC 之整機安裝安裝船構想，採浮式大船運作。

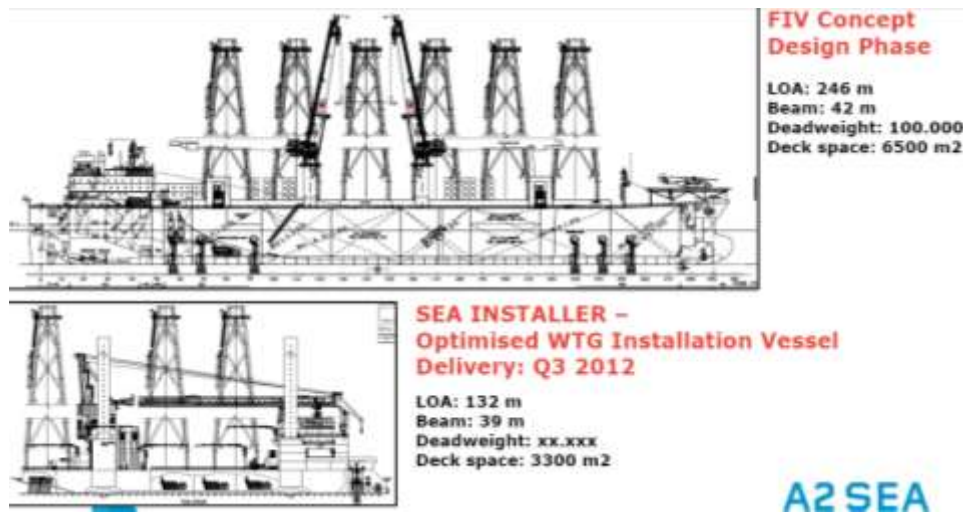


圖 87 A2SEA 構想採大型油輪改裝成基礎安裝船，亦採浮式大船運作。

- **吊裝設備**：6 年後安裝船設置的吊車，將以風力機容量 8MW 以上為目標，其吊重能力將落在 900~1500t@35m，吊高將達 120m 以上，也許考慮匹配運輸吊裝海床基礎，要有足夠的吊裝有效距離；配合大型構件運輸之安裝船，船上須備水平搬移的重機才行。

G、進行小規模離岸風場開發時運輸與吊裝施工法與關鍵技術評估

進行小規模離岸風場開發以短期者為多，如國內離岸風場示範獎勵辦法推行案，本獎勵辦法共計上緯、永傳及台電等三家開發商獲選。開發商將設置離岸海氣象觀測站一座及先導型離岸風力機二座，雖享有政府補助，

但在欠缺施工船機的情況，如此量少，吸引不到業務及銀行融資的興趣，先是漁民抗爭，租船又受阻，執行變得非常困難，這是兩家民營業者當初所想像不到。

三家所選場址之海床地質迥異，水下基礎之工法不一樣，目前首要解決離岸海氣象觀測站的建置問題，其次才為風力機之採購及建置問題，對此兩問題，三家開發商各有難處，效取國外設計完後，接後執行發生問題。

離岸海氣象觀測站的建置問題，舉過去工研院建置東石離岸海氣象觀測站之經驗，即為克服當時缺乏機具之困境自行創新的工法，係靠**浮船法**及**伸塔法**完成。



圖 88 東石離岸海氣象觀測站之建置

新竹苗栗地區，地震少，颱風侵害輕，海床多為礫石層，海床深處有岩盤，底質硬，不利直接打樁，若採鑽掘方式來設置基樁，成本又太高，若取重力式基礎可能會是比較好的選擇，畢竟重力式基礎的施工佈放係屬靜音工法，除役時又可輕易撤離，有利於滿足環保要求。

因應國內缺乏海上大吊車之事實，採重力式基礎，基礎本體宜取自浮式的設計，盡量利用造船浮體技術來控制運送與定位的需求，以策安全，順便解決載具問題。

台中、彰化、雲林、嘉義地區之地層偏向泥沙交錯之分布，且鬆軟地質深厚，80m 深仍碰不到岩盤，上層泥層段無法承受負荷，計算上有人將之不計。若取單樁基礎設計，樁長則須設計很深，對裝載、船運、吊重、施工運轉、成本皆不利，因此可能傾向採用 Jacket 的設計，至少多樁比較保險；這些設計判斷對未來裝載船隻及吊車能力之配合有絕對影響，然台灣海峽情況多端，颱風過後造成地貌不規則的變化，掏沙現象也許擴大，

連地質積層內容也跟著變了，其實國外專家對如此現象可能比本國更陌生，不見得能幫上太多忙。

除基礎設計的考量外，自升船在泥沙交錯分布之地層的穿傾風險也是關鍵之一，大船較重，容易發生站不起來的現象，為避免如此，支腳下方採用大型 Spud Can，但仍可能發生入泥過深的情況，如插深到十數米，極可能拔不太出來；若用小型 Spud Can，同樣情況插深到 20 m，拔腳一事即耗費達一週；這些安裝的耗時全部記在租金上，沒幾個開發商能受得了，如何避免穿傾災難及入泥過深之現象，一開始選用輕型自升安裝船或浮式安裝船也許是比較妥善的對策，也許保留半升狀態的操作，選好天候及海況為之，也是對策之一。

早期離岸油氣工業之淺海吊裝作業，已有採用**船舶座底法**之案例，本國離岸風電工作水深從 15m 開始起跳，一般的船舶座底後所得之乾舷恐怕不夠高，建議選用較高塢壁的沉箱浮沉台或浮塢來進行有關，其等座底前後，依仍保有足夠構造露出水面提供穩度及機具之運作空間，事前貼邊架設高架之陸用大吊車於船側以得穩固，藉以進行離岸海氣象觀測站上構或風力機的吊裝；設計使用狀態應考慮潮差的變化，不可被水面越過。

只要海床水平傾斜不嚴重，沉箱浮沉台或浮塢非常適合在爛泥海床座底作業，事前船體略傾進行刮地拉平再座底，形成臨時人工島，解決缺乏自升平台之困境。

海床土壤不均之現象很正常，事前之地質調查可預知狀況而閃避可能的大石或硬障礙，打樁的風險才有機會降低，然目前所知，開發商並未投資在每個風力機下的鑽探，這對基礎設計及施工而言，可能會過於保守，也可能過於寬鬆，因無法確認，潛在著不明風險。

針對進行小規模離岸風場開發時運輸與吊裝施工法與關鍵技術，約如前建議：

- **運輸設備**：取浮沉台改裝，依隨條件進行作有限的運輸支援，搭配拖船拉曳，若採重力式基礎或多樁式平台者，可取自浮方式運輸。
- **吊裝設備**：改裝本土現有浮沉台，加設陸用大吊車，而大吊車還是要搭配打樁機及扶正機，同時能兼用風力機之吊裝，使作業延續。

若以上建議仍作不到，也許洽租外籍自升船及機具是可行方法，但要注意在不明台灣海峽地質之情況下，自升船施工將遇到比浮船式或座底式

施工法還更高的風險，尤其在彰濱地區。

(2) 離岸海事施工船舶運動安全評估技術開發

台灣近岸水深地形呈現西部平緩東部陡峭，西部以沙質沉積海岸為主，而東部則多為礫石或岩岸地質，從海事工程觀點而言，由於底床坡度陡峭與地質條件等因素，增加了於東部海域進行風海觀測塔與風機基礎施工之困難度。由於台灣的經濟活動及海事工程所需之港埠設施多集中於西部沿岸，目前規劃以臺中港 2 號碼頭為施工船停靠碼頭，因此本計畫也針對台中港海域進行相關資料收集與分析。

A、示範風場海域環境資料收集與分析

在此，以台中港為例，說明資料內容。

台灣為海島型氣候，西有台灣海峽，東臨太平洋，常常受來自太平洋的颱風危害，台中處於台灣中西部，受中央山脈群保護因而遭受颱風侵襲的影響相對減少許多。台中年平均氣溫約為 23.3°C，年降雨量約為 1773 毫米，夏季(6-8 月)平均氣溫較高且雨量豐沛，冬季(10 月至次年 1 月)平均月降雨量較低且氣溫較溫和，屬於副熱帶季風氣候。

■ 氣溫及雨量

依中央氣象局梧棲(台中)氣象站統計資料表顯示(表 43 及圖 89)，觀測期間(2006~2011 年)年平均溫度為 23.1°C，月均溫最高則為 7 月(29.0°C)，最低為 1 月(15.7°C)。另資料統計期間月最高氣溫發生於 2009 年 8 月 2 日(35.4°C)，而最低溫則發生於 2009 年 1 月 11 日(7.5°C)。台中港地區平均總降雨量約為 1,328.3 mm，其中以 6 月份之降雨量為最高(292.1 mm)，1 月份之降雨量最低(21.6 mm)。另資料統計期間平均年總降雨日數為 91.4 日，其中以 6 月份之降雨日數最多(12.0 日)，10 月份之降雨日數最少(3.3 日)。

表 43 梧棲測站氣象資料觀測統計表

月份	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最高溫度日期	最低溫度 (°C)	最低溫度日期	平均相對溼度 (%)	平均氣壓 (百帕)	平均降雨量 (mm)	平均降雨日數 (≥0.1 mm)
1	15.7	28.7	2008/01/12	7.5	2009/01/11	79.3	1016.8	21.6	6.0
2	16.9	29.9	2009/02/13	8.7	2007/02/03	81.2	1014.8	42.1	6.0
3	18.7	30.3	2006/03/18	8.0	2010/03/11	77.2	1013.3	75.4	8.0
4	22.1	30.9	2006/04/12 2010/04/12	11.5	2007/04/04	77.0	1010.6	87.9	9.8
5	25.3	32.8	2011/05/11	16.9	2008/05/05	77.7	1007.1	142.3	10.0
6	27.7	34.0	2011/06/11	18.9	2006/06/10	78.5	1004.8	292.1	12.0
7	29.0	33.9	2010/07/06	23.0	2008/07/18	75.3	1003.7	172.8	8.7
8	28.9	35.4	2009/08/02	23.4	2007/08/19 2008/08/23	76.0	1003.2	207.8	9.8
9	27.9	34.7	2007/09/30	20.3	2008/09/29	76.2	1004.9	146.7	7.8
10	24.9	32.5	2007/10/01	17.0	2010/10/29	75.0	1009.3	55.2	3.3
11	21.7	29.2	2008/11/02 2011/11/03	12.3	2008/11/30	76.7	1012.6	57.5	6.2
12	17.8	27.0	2006/12/08	8.3	2010/12/18	74.8	1015.3	26.9	3.8
年合計	—	—	—	—	—	—	—	1328.3	91.4
年平均	23.1	—	—	—	—	77.1	1009.7	—	—

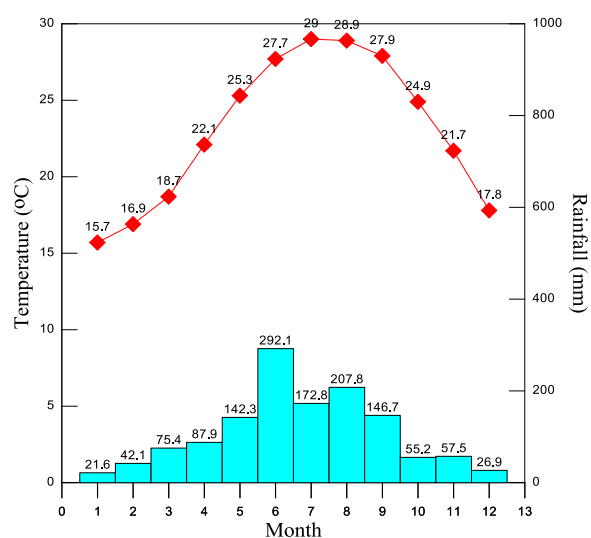


圖 89 梧棲測站平均月雨量與氣溫圖

■ 風速及風向

風力大小直接影響到船隻在碼頭卸貨等港埠作業，風力也直接作用於船隻，對船隻進港操船安全也有影響。其次風力也是造成波浪之主要外力，而風吹海面引起之風驅流，皆為影響整個海面及港池靜穩重要因素。依據交通部港灣技術研究中心台中港 2006~2010 觀測資料統計分析(表 44)，儀器高度 10 m，每小時測定前十分鐘之風速、風向數據加以平均，本計畫以每小時之平均風速、平均風向為主。其全年與四季之風玫瑰圖如圖 90 及圖 91 至所示。資料中，風向係表示風吹來的方向，以角度量表示，從北向來為 0 度，以順時針方向計算，例如 180 度為南方吹來的風。

2006~2010 年台中港最大風速為 37.51 m/s，平均風速為 6.83 m/s，風向以北北東向(NNE)最多(圖 90)，四季風向除夏季以南向(S)為主外，春、秋、冬三季多以北北東向(NNE)為主(圖 91)。風的強弱程度，通常用風力等級來表示，可依據風速大小將其分為十八級，一般稱為蒲福風級(Beaufort scale)，其各級所對應風速為距離地面 10m 之平均風速值。依據蒲福風級分類整理，如表 45 台中港附近海域風速主要分布於 2 級風(1.6~3.3 m/s)，其次為 3 級風(3.4~5.4 m/s)、4 級風(5.5~7.9 m/s)與 5 級風(8~10.7 m/s)，發生機率分別為 22.64%、18.04%、15.03%及 13.27%，風向主要集中於北北東向(NNE)與東北向(NE)，發生機率分別為 32.11%與 22.17%

表 44 台中港風速風向觀測資料結果統計(2006-2010 年)

月分	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
最大風速 (m/s)	26.74	25.60	28.30	24.00	25.06	18.70	18.29	37.51	32.60	20.79	24.80	30.30	37.51
平均風速 (m/s)	10.04	8.81	7.17	6.50	5.31	4.97	4.34	4.51	4.94	7.35	8.51	9.47	6.83
最多風向	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	SSW	S	S	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE

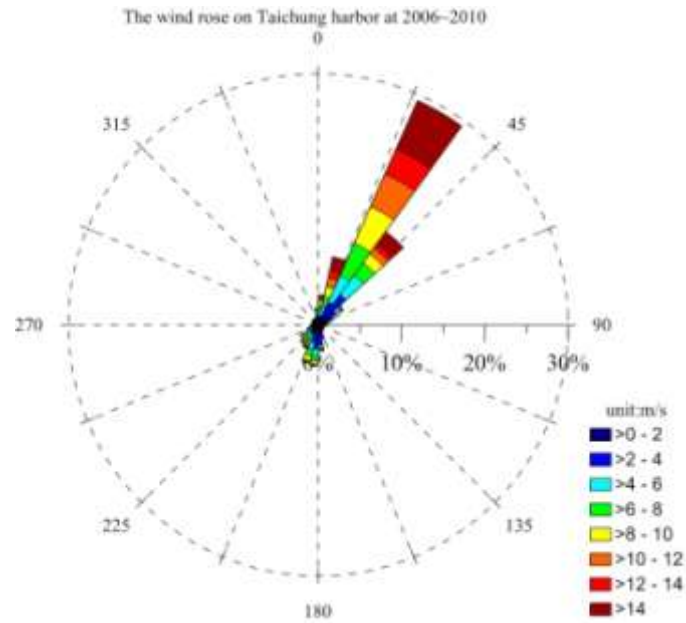


圖 90 台中港 2006-2010 年風玫瑰圖
(色條代表風速大小(m/s))

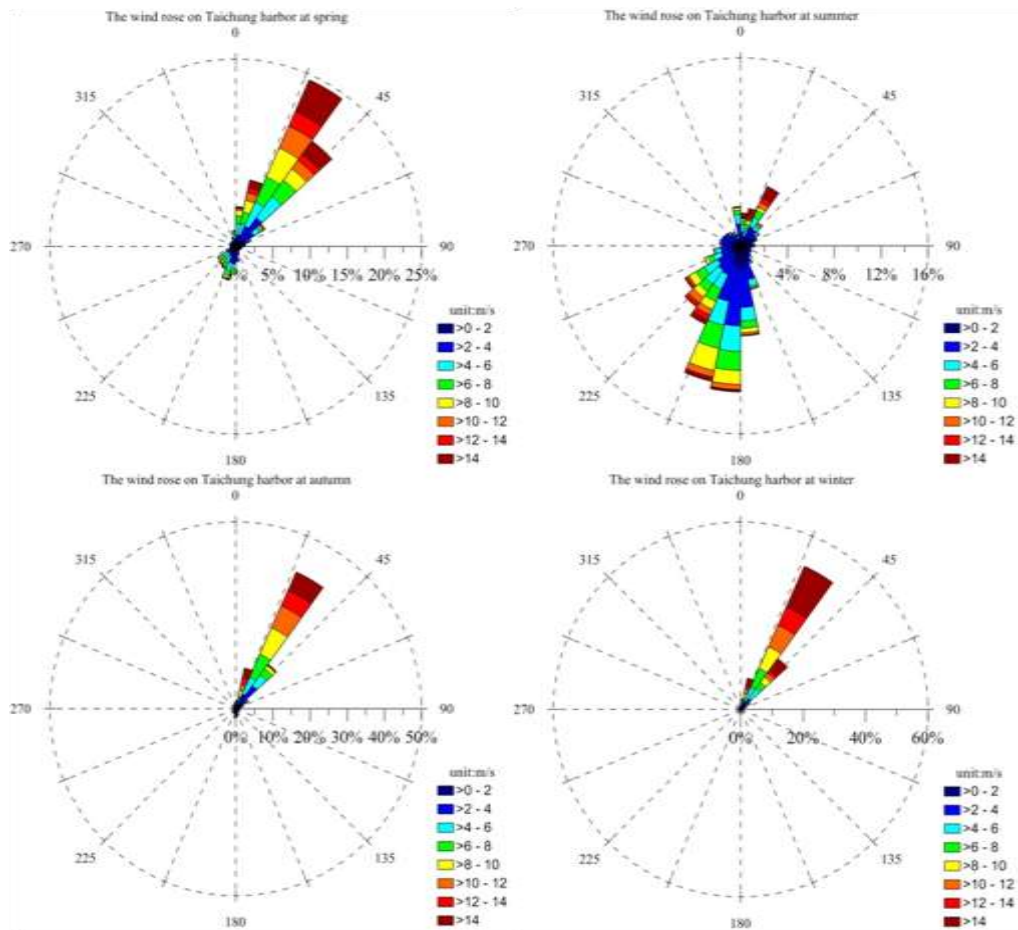


圖 91 台中港四季風玫瑰圖
(色條代表風速大小(m/s)，由左上至右下依序為春、夏、秋、冬)

表 45 台中港 2006-2010 年風速及風向聯合機率分佈百分比(%)統計表

U(m/s) Udir(°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	蒲福風級	
	<0.3	0.3 -1.5	1.6 -3.3	3.4 -5.4	5.5 -7.9	8- 10.7	10.8-1 3.8	13.9-1 7.1	17.2-2 0.7	20.8-2 4.4	24.5-2 8.4	28.5-3 2.6	>32.6	總頻次	(%)
N	0.00	0.34	1.09	1.52	1.02	0.67	0.41	0.12	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00	1918	5.30
NNE	0.02	0.57	1.76	3.66	5.60	7.00	6.36	3.82	2.45	0.74	0.11	0.02	0.00	11615	32.11
NE	0.01	1.00	4.54	4.64	3.98	3.09	1.90	1.16	1.21	0.54	0.10	0.00	0.00	8017	22.17
ENE	0.01	1.31	1.45	0.47	0.12	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1234	3.41
E	0.01	0.97	0.67	0.15	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	677	1.87
ESE	0.00	0.77	0.49	0.07	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	500	1.38
SE	0.01	0.70	0.59	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	525	1.45
SSE	0.00	0.77	1.37	0.44	0.13	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	999	2.76
S	0.00	0.85	3.43	1.62	0.99	0.54	0.16	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2752	7.61
SSW	0.01	0.69	2.02	1.85	1.52	1.00	0.34	0.12	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	2751	7.61
SW	0.00	0.50	1.30	1.58	0.98	0.62	0.33	0.09	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	1953	5.40
WSW	0.00	0.46	0.84	0.74	0.37	0.20	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	957	2.65
W	0.01	0.41	0.77	0.33	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	562	1.55
WNW	0.01	0.53	0.81	0.14	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	547	1.51
NW	0.01	0.38	0.83	0.26	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	560	1.55
NNW	0.02	0.26	0.68	0.46	0.16	0.04	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	601	1.66
總頻次	46	3805	8188	6526	5436	4800	3467	1936	1383	477	89	13	2	36168	
(%)	0.13	10.52	22.64	18.04	15.03	13.27	9.59	5.35	3.82	1.32	0.25	0.04	0.01		(%)

■ 潮汐與海流

臺中港潮汐資料可參考表 46，大潮平均高潮位約為 2.31 m，平均高潮位約 1.98 m，平均潮位約為 0.12 m，平均低潮位約為-1.77 m，大潮平均低潮為約-2.38 m，其平均潮差為 3.74 m。

依據港研中心台中港 2006~2010 觀測資料進行統計分析如圖 92 及圖 93，資料中整點流速及流向表示該小時平均流速及流向(去向)。流向由正北為零度開始，順時針為正，表示海流之去向。由時序列及海流玫瑰圖可知台中港口附近表面海流隨季節之變化。台中港最大流速為 240.16 cm/s，平均流速為 43.89 cm/s，流向多為北北西向(NNW)，其流向隨季節改變，春夏兩季以北北西向(NNW)為主，秋冬兩季流向則以西南西(WSW)為主。

表 46 台中港表面海流觀測資料結果統計(2006-2010 年)

統計時間	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
最大流速 (cm/s)	182.85	170.88	151.14	193.88	150.00	189.00	150.22	140.38	240.16	168.78	182.56	165.34	240.16
平均流速 (cm/s)	52.51	50.99	37.98	34.54	38.63	44.25	49.17	43.29	39.30	47.15	43.80	45.07	43.89
最多流向	NNW	W	N	NNW	NNW	NNW	N	NNW	N	WSW	WSW	WSW	NNW

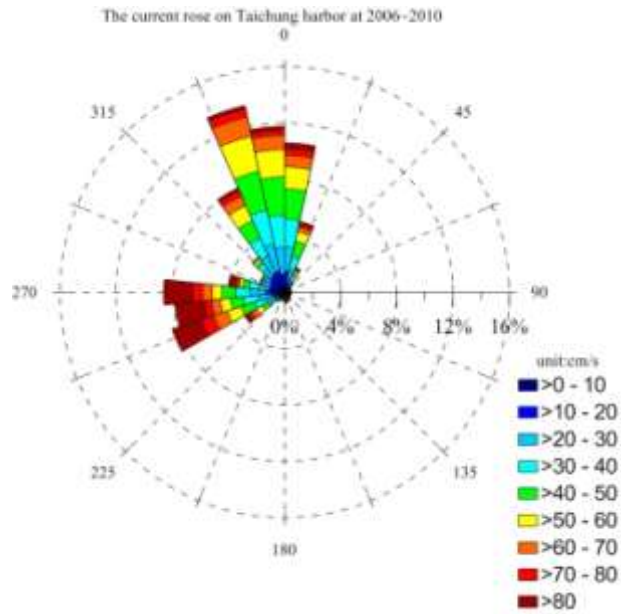


圖 92 台中港 2006-2010 年表面海流玫瑰圖
(色條代表流速大小(cm/s))

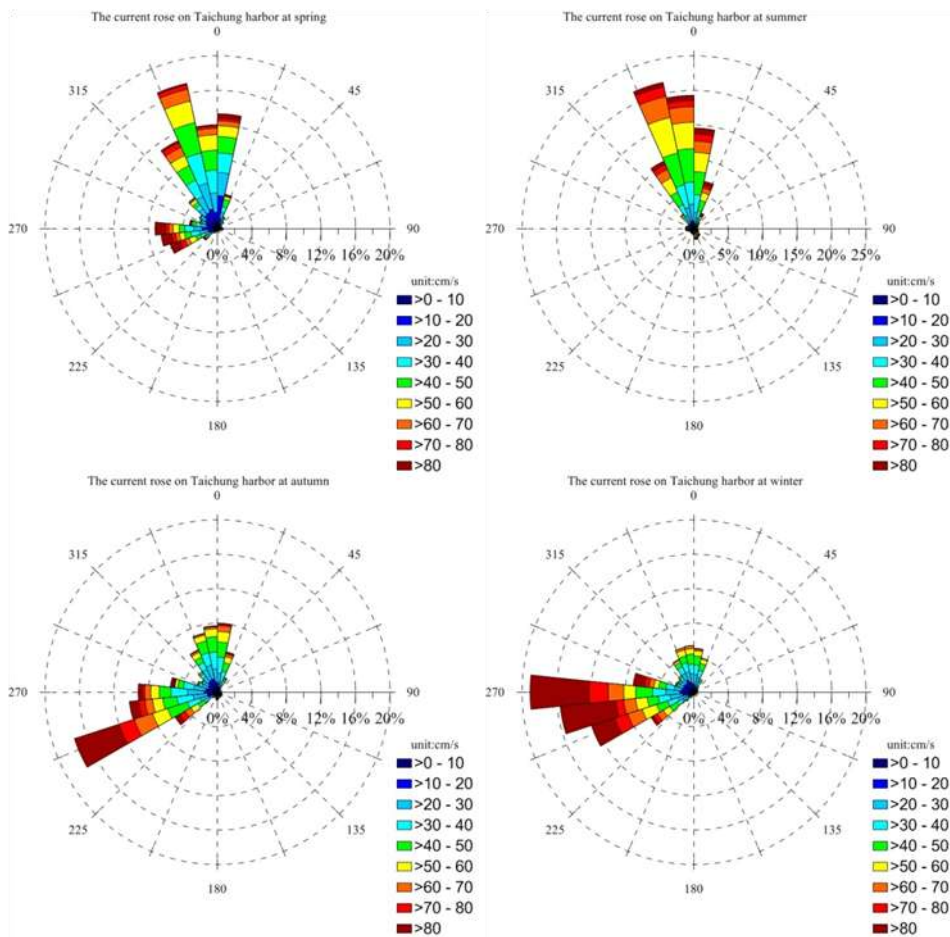


圖 93 台中港四季表面海流玫瑰圖
(色條代表流速大小(cm/s),由左上至右下依序為春、夏、秋、冬)

■ 波浪

本計畫以每小時之示性波高平均值、有示性週期平均值、平均示性波高最大值及對應於平均示性波高最大值時之週期(稱對應週期)為主。如表 47 所示,台中港有義波高之最大值為 14.49 m,對應於最大示性波高之週期為 3.5 sec,示性週期之最大值为 16.5 sec,平均示性波高為 1.6 m,平均示性週期為 6.43 sec,波向主要為北向(N),而波向除 6、7 月以西向(W)為主外,其餘月份為北向(N),全年與四季之波浪玫瑰圖(Wave rose)如圖 94 與圖 95 所示。

表 48 與表 49 為台中港在 2006~2010 年觀測期間之波高波向聯合機率分布表與對應於波高之週期分布表,分析結果顯示台中港附近海域波高主要分布於 0.3~1 m 之間,其次為 1.5~2.5 m 之間,發生機率分別為 38.17%及 23.82%。對應於波高之週期主要分布於 6~7 sec,其次為 7~8 sec 及 5~6 sec,發生機率分別為 28.34%、25.31%及 15.84%。波向主要集中於北向(N)與北北東向(NNE),發生機率分別為 41.42%與 28.21%。

表 47 台中港波浪觀測資料結果統計(2006-2010 年)

統計月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
有義波高之最大值(m)	5.28	5.02	6.91	5.86	4.93	3.52	6.24	7.78	7.29	6.74	5.36	8.44	8.44
對應週期(sec)	7.60	8.50	6.20	9.30	12.10	6.30	7.70	8.70	10.80	9.80	11.20	11.10	11.10
平均有義波高(m)	2.29	2.08	1.76	1.63	1.07	0.83	0.80	0.84	1.47	2.20	2.07	2.10	1.60
平均有義週期(sec)	7.11	6.75	6.57	6.42	5.53	5.50	5.44	6.01	6.78	7.06	7.15	6.93	6.43
有義週期之最大值(sec)	10.60	10.30	10.40	12.20	12.60	12.80	12.20	16.50	12.10	10.90	11.90	11.20	16.50
最多波向	N	N	N	N	N	W	W	N	N	N	N	N	N

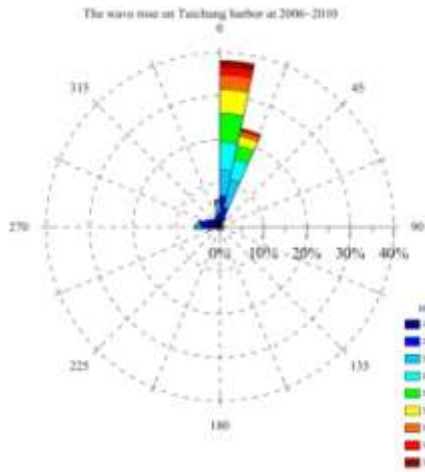


圖 94 台中港 2006-2010 年波浪玫瑰圖
(色條代表有義波高大小(m))

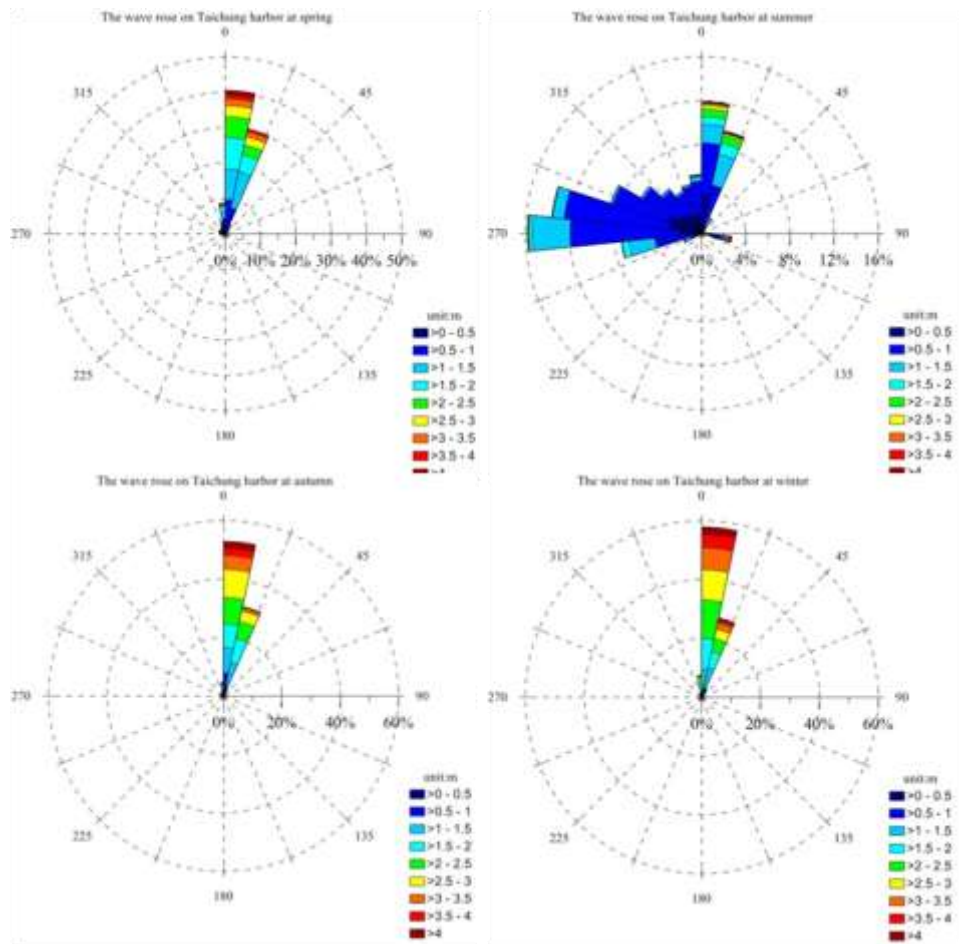


圖 95 台中港四季波浪玫瑰圖
(色條代表有義波高大小(m)，由左上至右下依序為春、夏、秋、冬)

表 48 台中港 2006-2010 年有義波高及有義週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ \ $T_s(s)$	< 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 -10	10-11	11-12	12-13	>13	總頻次	(%)
<0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
0.1-0.3	0.08	0.10	0.22	1.07	0.27	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	571	1.77
0.3-1	8.23	5.98	7.97	9.26	5.10	1.20	0.41	0.10	0.04	0.07	0.00	12361	38.37
1-1.5	0.85	2.69	5.08	6.69	2.31	0.48	0.13	0.04	0.02	0.01	0.00	5893	18.29
1.5-2.5	0.03	0.13	2.30	9.24	10.22	1.65	0.16	0.07	0.02	0.00	0.00	7674	23.82
2.5-4	0.00	0.01	0.24	1.95	6.93	5.36	1.14	0.07	0.00	0.00	0.00	5058	15.70
4-5.5	0.00	0.00	0.02	0.13	0.46	0.61	0.48	0.16	0.02	0.00	0.00	607	1.88
5.5-7.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00	46	0.14
7.5-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	4	0.01
10-12.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
12.5-16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
>16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00
總頻次	2961	2867	5103	9130	8153	3018	768	148	36	29	1	32214	
(%)	9.19	8.90	15.84	28.34	25.31	9.37	2.38	0.46	0.11	0.09	0.00		(%)

表 49 台中港 2006-2010 年有義波高及波向聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ $H_{dir}(^\circ)$	<0.1	0.1-0.3	0.3-1	1-1.5	1.5-2.5	2.5-4	4-5.5	5.5-7.5	7.5-10	10-12.5	12.5-16	>16	總頻次	(%)
N	0.00	0.87	8.81	6.27	13.34	10.57	1.48	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	13343	41.42
NNE	0.00	0.10	5.42	7.99	9.50	4.84	0.34	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	9089	28.21
NE	0.00	0.02	0.32	0.13	0.05	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	179	0.56
ENE	0.00	0.02	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60	0.19
E	0.00	0.22	0.51	0.05	0.07	0.06	0.05	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	322	1.00
ESE	0.00	0.00	0.13	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70	0.22
SE	0.00	0.00	0.10	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52	0.16
SSE	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19	0.06
S	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20	0.06
SSW	0.00	0.00	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34	0.11
SW	0.00	0.00	0.13	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51	0.16
WSW	0.00	0.02	1.01	0.74	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	637	1.98
W	0.00	0.05	7.08	2.03	0.38	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3085	9.58
WNW	0.00	0.12	6.65	0.39	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2324	7.21
NW	0.00	0.14	3.86	0.19	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1374	4.26
NNW	0.00	0.22	4.03	0.40	0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1557	4.83
總頻次	0	571	12363	5893	7674	5058	607	46	4	0	0	0	32216	
(%)	0.00	1.77	38.37	18.29	23.82	15.70	1.88	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00		(%)

B、海洋風場波浪觀測資料分析

本研究以新竹浮標觀測資料，自 2005 年至 2013 年共計 9 年時間之資料量進行相關統計分析操作，其中浮標風速有高程 $z=2$ 公尺及 3 公尺二種資料，量測時間皆為 10 分鐘，為方便使用及說明，本計畫統一使用高程 $z=2$ 公尺之風速資料(因資料筆數較多)，並依據 DNV-OS-H101 指引建議將其轉換為 10 公尺高程風速資料，轉換式如下式所示，

$$U(z, t_{mean}) = U(z, t_{r,mean}) \left[1 + 0.137 \times \ln\left(\frac{z}{z_r}\right) - 0.047 \times \ln\left(\frac{t_{mean}}{t_{r,mean}}\right) \right]$$

上式 z 為量測儀器高度、 $z_r=10\text{m}$ 、 $U(z, t_{mean})$ 是量測儀器的平均風速、 $U(z, t_{r,mean})$ 為 10 公尺高度的平均風速、 t_{mean} 為儀器量測時間、 $t_{r,mean}$ 是 10 分鐘。將 9 年平均風速資料整理依風向整理成圖 96 之風玫瑰圖，可見風集中於東北及北北東向，另外西南及西南西向佔比較低。若以四季分類繪製成圖 97，可以發現此區域夏季主要風向分布範圍為南南西至西南西向外，其餘三季(春、夏及冬季)風向主要為東北及北北東向，其佔比會隨著春、夏及冬季增加。為了解風速及風向聯合機率分佈，首先將風速依蒲福風級表(表 50)分類至 12 級風，並將風向等角度劃分成 16 等分(22.5°)。此區域春季風向主要集中在北北東及東北向佔約 43%；而風速集中在 2~6 級風(1.6–13.8m/sec)，約佔 88.49%。夏季風向主要分布介於南南西至西南西向，約佔 47.37%；風速集中在 2~6 級風，約佔 90.35。秋季風向集中於北北東及東北向佔約 61.46%，風速集中在 2~7 級風，約佔 90.35。冬季風向集中於北北東及東北向佔約 66.02%，風速集中在 2~7 級風，約佔 93.06。由上述的結果可知，此區域風速會因東北季風的緣故，在秋冬季風速會明顯增大。

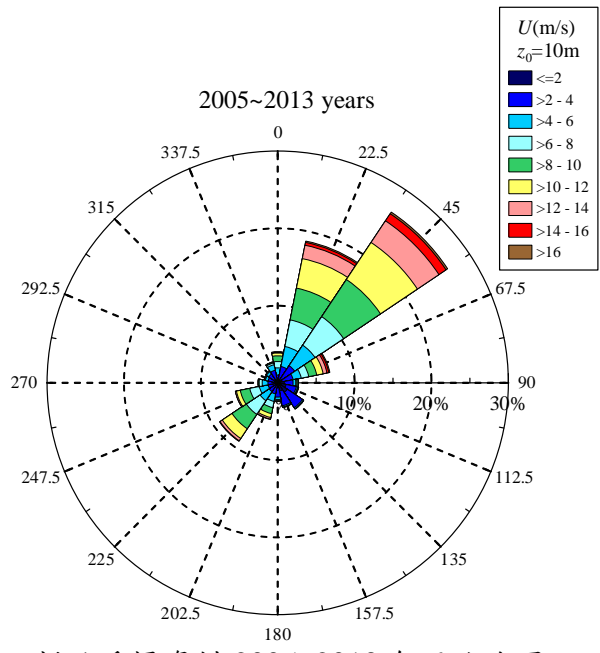


圖 96 新竹浮標資料 2005~2013 年風玫瑰圖

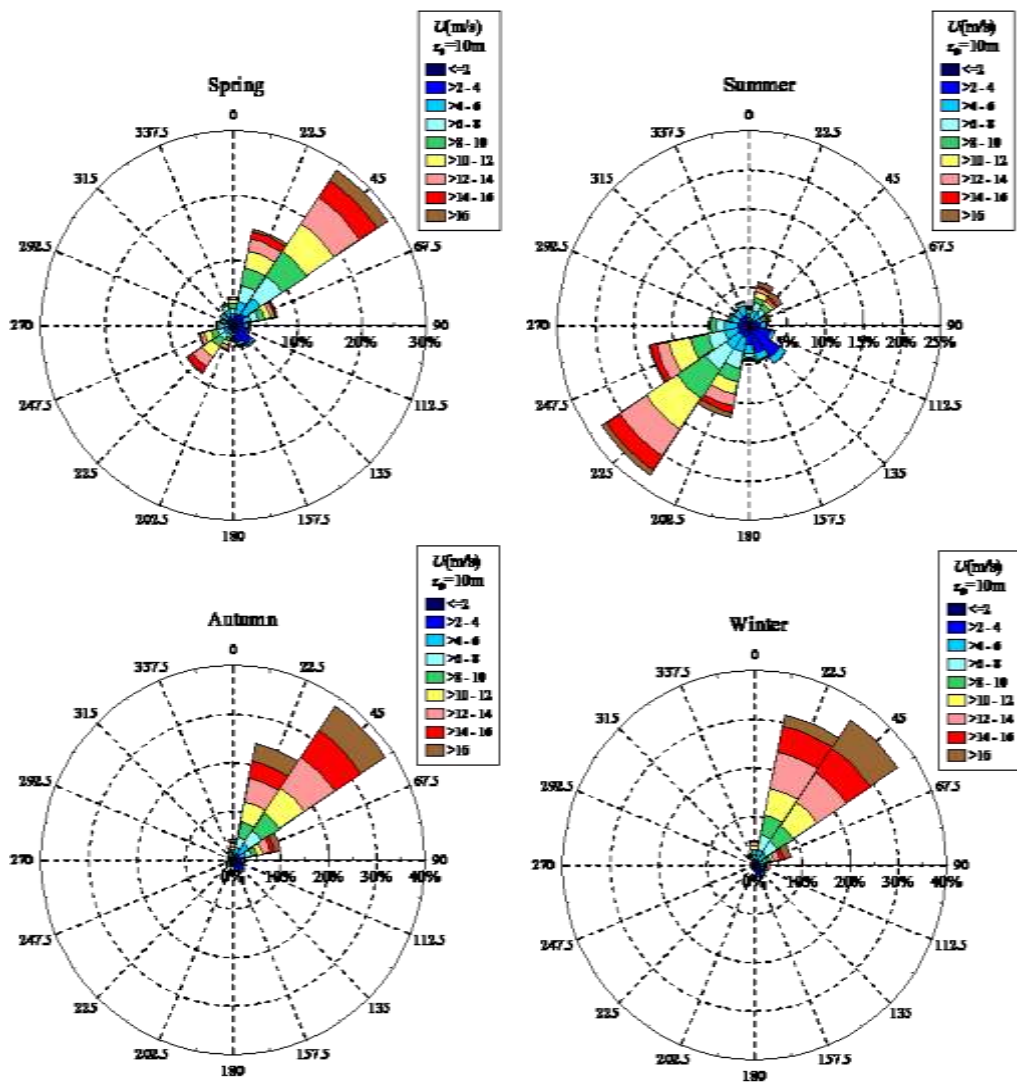


圖 97 新竹浮標資料 2005~2013 年四季風玫瑰圖

表 50 蒲福風級浪高對照表

蒲福風級	狀態		風速		波高(m)	
	風	浪	哩/時	公尺/秒	一般	最高
0	無風	—	< 1	0-0.2	—	—
1	軟風	微波	1-3	0.3-1.5	0.1	0.1
2	輕風	微波	4-6	1.6-3.3	0.2	0.3
3	微風	小波	7-10	3.4-5.4	0.6	1
4	和風	小浪	11-16	5.5-7.9	1	1.5
5	清風	中浪	17-21	8-10.7	2	2.5
6	強風	大浪	22-27	10.8-13.8	3	4
7	疾風	大浪	28-33	13.9-17.1	4	5.5
8	大風	巨浪	34-40	17.2-20.7	6	7.5
9	烈風	猛浪	41-47	20.8-24.4	7	10
10	暴風	猛浪	48-55	24.5-28.4	9	12.5
11	狂風	狂濤	56-63	28.5-32.6	11.5	16
12	颶風	狂濤	64-71	32.7-36.9	14	>16
13	颶風	狂濤	72-80	37-41.4	>14	>16
14	颶風	狂濤	81-89	41.5-46.1	>14	>16
15	颶風	狂濤	90-99	46.2-50.9	>14	>16
16	颶風	狂濤	100-108	51-56	>14	>16
17	颶風	狂濤	109-118	56.1-61.2	>14	>16

其次為了解全年波高與週期的分布情形，整理 9 年之資料並製作波高週期聯合機率表，由表中可以發現波浪週期主要分布在 3~6 秒間，約佔 96.65%，而波高在 1.5m 以下則約佔 86.64%。為瞭解在不同波高限制下，此區域每月份可工作天數，統計 $H_{1/3}$ 分別為 1.0m、1.5m 及 2.0m 三種狀況下佔該月份的百分比，將其資料在限制條件下之資料數除以該月份所有資料數，並繪製成表 51、新竹浮標(2005~2013 年)每月波高統計百分比，及圖 98 為其天候窗(weather window)。除 1、2、11 及 12 月份波高小於 1m 之機率小於 50%外，其餘月份皆大於 50%，4~8 月更高達 80%以上，此也說明夏季時波浪是比較小。另 1、2、10 及 12 月份波高小於 1.5m 之機率小於 80.0%；另 4~9 月波高小於 1.5m 之機率皆在 9 成以上。而全年度波高小於 2.0m 之機率，除 12 月份以外均可達 90%以上，顯見 12 月份在此區域波況是相當不好的。以天候窗圖來看以 4~9 月 $H_{1/3}$ 小於 1.0 公尺條件下均可達 70%以上，每年 10 月至翌年 2 月之海況條件較差，若以全年度均須滿足 70%以上之條件進行考量，則波高必須提升到 1.5 公尺。

若以四季來討論每季波浪即可了解營運時間的限制，可以發現春季波浪週期主要分布在 3~6 秒間，約佔 96.65%，波高在 1.5m 以下則約佔 94.71；夏季波浪週期主要分布在 3~6 秒間，約佔 97.18%，波高在 1.5m 以下則約佔 96.81%；秋季波浪週期主要分布在 3~6 秒間，約佔 97.18%，波高在 1.5m 以下則約佔 82.59%；而冬秋季波浪週期主要分布在 3~6 秒間，約佔 95.94%，波高在 1.5m 以下則約佔 74.49%。故由四季的分布情形可以發現，週期分布在四季的變化並不明顯，然而波高在秋冬二季會明顯比春夏高。將 9 年資料整理繪製成圖 99，可知年主要波向以北及北北西向為主，共約佔 55%，而北北東及西南西向各約 10%。另依四季整理繪製成圖 100，春季波向主要集中在北及北北西向，機率約可達 75%；而夏季波向 50%主要集中在西及西南西向；另秋季 70%及冬季 80%主要集中在北及北北西向。另依月分逐年統計其波高與週期如表 52，可以發現示性波高最大值為 12.45 公尺，對應週期為 9.7 秒，週期最大值 9.8 秒，皆發生在 9 月份；年平均波高為 0.90 公尺，平均週期為 4.6 秒；月平均波高以 1 月份最大，可達 1.23 公尺，其平均週期為 4.35 秒。

表 51 新竹浮標(2005~2013 年)每月波高統計

月份 \ 波高	$H_{1/3} < 1.0\text{m}$	$H_{1/3} < 1.5\text{m}$	$H_{1/3} < 2.0\text{m}$
1	34.77%	73.05%	92.17%
2	49.78%	78.65%	90.44%
3	67.18%	88.58%	96.12%
4	83.83%	97.48%	99.72%
5	88.61%	98.55%	99.70%
6	85.32%	97.44%	99.24%
7	88.72%	97.49%	98.85%
8	88.49%	95.55%	97.47%
9	74.12%	87.82%	94.59%
10	50.46%	79.38%	93.51%
11	47.84%	80.94%	94.63%
12	42.95%	72.40%	88.29%
平均	65.56%	86.64%	95.19%

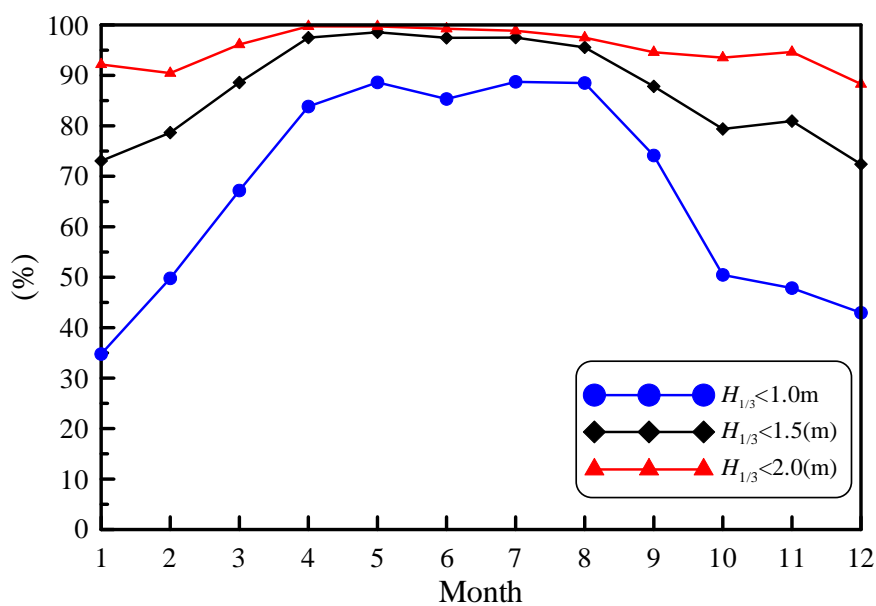


圖 98 新竹浮標資料天候窗(2005~2013 年)

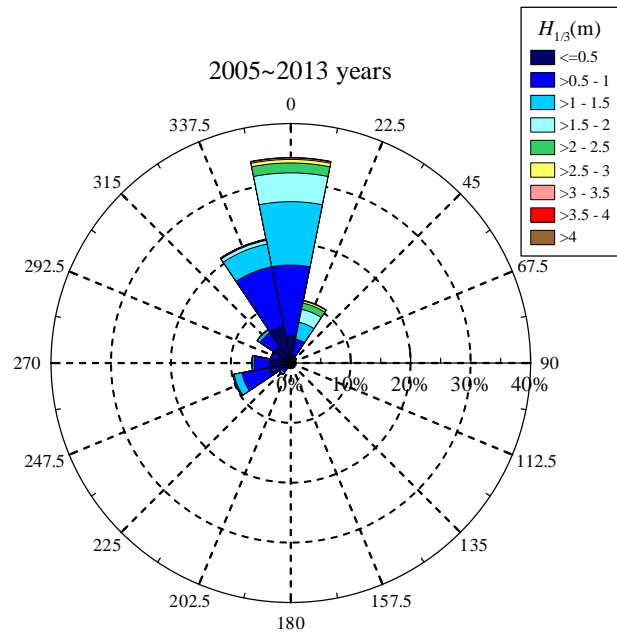


圖 99 新竹浮標資料 2005~2013 年波浪玫瑰圖

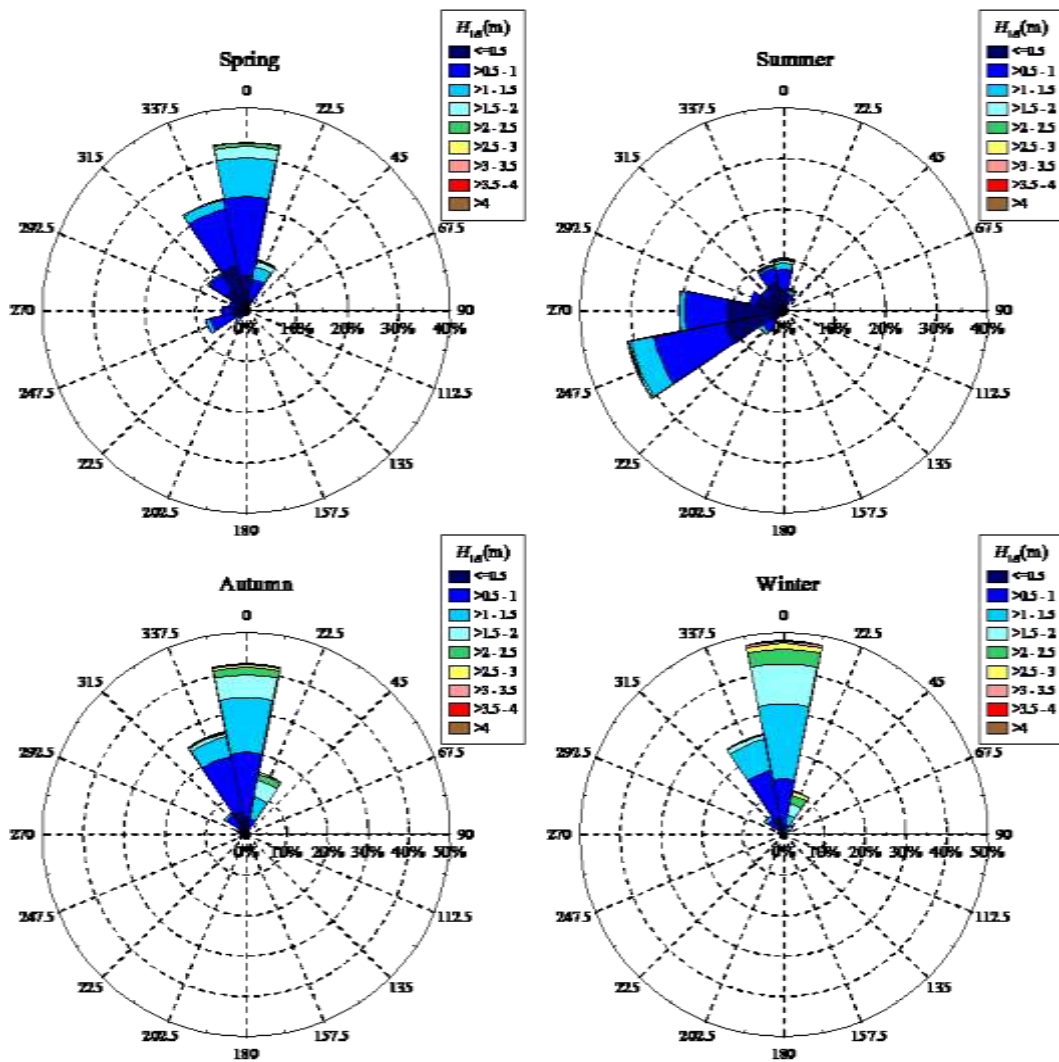


圖 100 新竹浮標資料 2005~2013 年每季波浪玫瑰圖

表 52 新竹浮標波浪觀測資料結果統計(2005-2013 年)

統計月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
示性波高之 最大值(m)	4.36	4.35	5.18	2.58	2.68	3.49	5.78	4.76	12.45	8.94	3.17	4.95	12.45
對應週期 (sec)	8.30	7.40	8.60	6.40	6.20	7.10	7.50	7.00	9.70	8.60	7.10	8.20	9.70
平均示性波 高(m)	1.23	1.09	0.88	0.69	0.61	0.65	0.59	0.60	0.83	1.10	1.08	1.21	0.90
平均週期 (sec)	4.35	4.18	4.05	3.80	3.69	3.72	3.59	3.82	4.17	4.19	4.26	4.33	4.60
平均週期之 最大值(sec)	8.50	8.40	9.70	7.10	8.70	9.50	7.70	8.00	9.80	8.80	7.10	8.30	9.80
最多波向	N	N	N	N	N	WSW	WSW	WSW	N	N	N	N	N

C、新竹浮標波浪觀測資料極值分析

依據 DNV-GL Noble Denton “GENERAL GUIDELINES FOR MARINE PROJECTS”指引規定，此此部分是適用於海上作業和運輸的海洋氣象條件一般性通則，明確陳述在營運基準期大於一個可信賴的天氣預測(一般不超過 72 小時)的限制下的可靠操作(表 53)，其設計氣象條件必須反映統計極端的區域和季節特性，設計回歸期(return periods)建議如表 54 所示。此表也說明一般海洋結構物設置必須考慮 50 年回歸期進行波浪極值分析，而對於海事施工船進行海事操作時，必須依據操作期間長短進行波浪月極值 10 年回歸分析。因此本研究以新竹浮標觀測資料，自 2005 年至 2013 年共計 9 年時間之資料量進行極值相關統計分析操作，以了解及提供未來施工船安全評估及設計波高參考。

表 53 海洋氣象降低因素表

Case	Weather Forecast Provision	Operational Reference Period (hours)			
		≤ 12	≤ 24	≤ 48	≤ 72
1	No project-specific forecast (i.e. public domain forecast only)	0.53	0.50	0.45	0.42
2	One project-specific forecast source	0.69	0.65	0.59	0.54
3	Two project-specific forecast sources				
4	One project-specific forecast source plus in-field wind and wave monitoring (e.g. wave rider buoy) without regular feedback to forecast source	0.71	0.67	0.60	0.55
5	Two project-specific forecast sources plus in-field wind and wave monitoring (e.g. wave rider buoy) without regular feedback to forecast source	0.73	0.68	0.62	0.56
6	as #4 but with regular feedback to forecast sources	0.75	0.70	0.63	0.58
7	as #5 but with regular feedback to forecast sources	0.76	0.72	0.65	0.59
8	One project-specific forecast source plus in-field wind and wave monitoring & offshore meteorologist	0.80	0.75	0.68	0.62
9	Two project-specific forecast sources plus in-field wind and wave monitoring & offshore meteorologist	0.82	0.77	0.70	0.64

表 54 DNV·GL Noble Denton 海事操作回歸期

操作期間	環境設計標準
3 天以內	特定的 weather window，海洋氣象降低因素如表 3-24。
3 天至一星期	1.月獨立極端之 10 年回歸期， 2.或使用縮小曝露拖船/運輸計算(對於拖船或運輸，操作天數小於 30 天)用最少 1 年的季節性回歸。
一星期至一年	月獨立極端之 10 年回歸期。
一年以上	全年獨立極端之 50 年回歸期。

為瞭解每月波高分布函數，將每月波高時序列值採用 Gumbel 分布以及 Weibull 分布機率函數進行統計分析，相關函數簡述如下：

■ Gumbel 分布

機率密度函數

$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A}} e^{-\frac{x-B}{A}}$$

累積機率密度函數

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}$$

其中 x 為樣本變數， $f(x)$ 為機率密度函數(probability density function)， $F(x)$ 為累積機率密度函數(cumulative probability function)；參數 A 及 B 與機率密度函數形狀有關， A 為尺度參數(scale parameter)與樣本標準偏差(standard deviation)有關，而 B 為位置參數(location parameter)與樣本平均值(mean)有關。

■ Weibull 分布

機率密度函數

$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}$$

累積機率密度函數

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}$$

其中 A 為尺度參數， k 為形狀參數(shape parameter)與機率函數的形狀有關。

當資料選取方法及分布函數確定後，上述所提參數要如何決定？一般分布函數參數推定法有很多種，本文使用動差法(Method of Moment, MOM)、最大概似法(Maximum Likelihood Estimates, MLE)及最小二乘法(Least squared method, LSM)，其中 MOM 為最簡單之參數推定法，而 MLE 及 LSM 是相當常用的參數推定法。相關方法簡述如下：

■ MOM 參數推定法

動差法乃利用平均值與變異數和模式參數之間的關係來計算模式參數，依統計樣本計算出相關統計量，例如平均值及標準偏差，則分布函數參數可依

帶入相關參數與統計量即可求得。其中 $\Gamma(\cdot)$ 為伽瑪函數(Gamma function)， γ 為尤拉(Euler)常數，約為 $\gamma = 0.5772$ 。

表 55 各分布函數 MOM 參數推定表

分布函數	平均值	標準偏差
Gumbel	$B+A\gamma$	$\pi A/\sqrt{6}$
Weibull	$B+A\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$	$A\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)\right]^2$

■ MLE 參數推定法

假設波高資料符合一機率密度函數 $f(x; \theta)$ ，其中 θ 值為模式參數，若有 n 個觀測之波高值 x_1, x_2, \dots, x_n 。為了推求出最可能之模式參數 θ ，可以假設在隨機取樣的條件下，發生某特定波高值 x_i 的機率為 $f(x_i; \theta)$ ，而得到 n 個相互獨立的波高值 x_1, x_2, \dots, x_n 的可能性為：

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = f(x_1; \theta)f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta)$$

上式 $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 稱為觀測值 x_1, x_2, \dots, x_n 的概似函數(Likelihood function)，使得此概似函數為最大之 θ 可稱為最大概似推定值，將概似函數對參數 θ 微分使其為零即可求得，亦即：

$$\frac{\partial L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)}{\partial \theta} = 0$$

若樣本數目 n 很大，用最大概似法推定參數常被認為是最佳推定。

■ 最小二乘法

LSM 法首先要決定樣本之排序機率，以 Goda(2000)建議不同極值分布之劃位，當資料筆數為 n 筆時，先將 n 筆資料依大小順序排列，再計算第 m 順位資料的累積機率 F_m ，其公式如下，

$$F_m = 1 - \frac{m-\alpha}{n+\beta}, \quad m=1, 2, \dots, n$$

α 及 β 值在不同分布函數可參考下表(Goda, 2000)

表 56 LSM 推定參數表

分布函數	α 值	β 值
Gumbel	0.44	0.12
Weibull	$0.20+0.27/\sqrt{k}$	$0.20+0.23/\sqrt{k}$

為了檢定實際觀測值之機率分佈與理論機率函數之間的密合程度，本研究採用 K-S(Kolmogorov-Smirnov)檢定來探討上述二種機率分佈的密合程度，以決定最佳之機率函數。K-S 檢定是比較檢定所得的累積機率與所假設的理論累積分佈函數，首先將樣本數為 n 的資料由小至大排列為 x_1, x_2, \dots, x_n ，可由樣本值得到階梯式的累積機率曲線：

$$S_n(x_k) = \frac{k}{n}$$

再由階梯式累積機率曲線 $S_n(x_k)$ 與理論累積機率密度函數 $F(x)$ 所產生的最大誤差，來檢定理論模式與觀測資料間的差異情況，假設所產生的最大誤差為 D_n

$$D_n = \max|F(x) - S_n(x)|$$

而 K-S 檢定就是要比較在某一顯著水準 (Significance level) α 之下，由上式所得的最大觀測誤差 D_n 與臨界值 D_n^α ，其定義為：

$$P(D_n \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha$$

其中各種不同的 n 值，在不同的 α 值下之 D_n^α 值可查表 57。

如果最大觀測誤差 D_n 小於臨界值 D_n^α ，則在有效水準 α 下，接受所假設的機率分布型式；反之，所假設之機率分佈型式不符合實測值。一般常使用有效水準 $\alpha = 5\%$ 或 1% 。

其次為整體評估各排序機率下之波高與樣本間之誤差，常以均方根誤差(Root of Mean Square Error, RMSE)以及相關係數(Correlation Coefficient, CR)作為評估依據。誤差均方根係指分布函數輸出變數(x_i)的平均誤差均方根，其計算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2}$$

其中 N 為樣本資料筆數， x_m 為推估各排序機率下的波高值。而相關係數可參上式，其中 \bar{x} 為樣本平均值， \bar{x}_m 為推估各排序機率下的波高平均值。

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(x_m - \bar{x}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (x_m - \bar{x}_m)^2}}$$

D_n

表 57 K-S(Kolmogorov-Smirnov) Test 中的臨界值

$n \backslash \alpha$	0.20	0.10	0.05	0.01
5	0.45	0.51	0.56	0.67
10	0.32	0.37	0.41	0.49
15	0.27	0.30	0.34	0.40
20	0.23	0.26	0.29	0.36
25	0.21	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.20	0.23	0.27
40	0.17	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.18	0.20	0.24
50	0.15	0.17	0.19	0.23
>50	$1.07/\sqrt{n}$	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

以月與年為單位時間間隔，將波高資料由大至小的順序排列後，選取每個單位時間間隔內的最大波高值，做為分析月極值波高的樣本資料。受限於觀測儀器的妥善率，當有某月份缺乏整個月的觀測資料，為保持整體資料的完整性並考慮資料的平均趨勢，本文將波浪資料以前一年及後一年該月份的平均值補齊資料(如表 58 灰色網底)。另 2007 及 2009 年 12 月最大波高偏低，經檢視原時序列值資料長度，發現其資料長度並無異常，研判該年 12 月應是東北季風比往年較不強導致波浪較小所致。

表 58 新竹浮標波浪月極值統計表(單位：公尺)

月份 年代	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2005	2.40	2.45	3.09	1.50	1.69	1.53	3.47	3.22	4.95	4.12	2.33	2.66
2006	4.14	3.14	5.18	1.87	2.13	1.89	3.34	1.20	4.98	1.52	1.67	2.09
2007	1.88	1.78	1.67	2.58	1.28	1.35	1.56	1.87	3.13	8.94	2.74	1.59
2008	2.54	2.13	1.69	1.38	1.62	1.52	3.41	1.73	12.45	2.13	2.04	3.26
2009	2.62	1.91	2.62	1.63	1.42	3.49	1.43	4.02	1.42	2.56	3.14	1.99
2010	2.04	2.62	2.01	1.81	1.76	1.57	1.67	1.35	2.25	2.69	2.09	4.95
2011	2.64	2.26	2.24	2.08	1.64	1.85	2.09	2.00	2.88	3.76	3.17	3.91
2012	3.52	3.94	3.43	2.35	2.38	3.14	2.50	4.76	3.74	2.91	2.44	3.28
2013	4.36	4.35	3.87	2.12	2.68	2.41	5.78	4.43	3.53	3.24	2.99	3.80
平均	2.90	2.73	2.87	1.92	1.84	2.08	2.81	2.73	4.37	3.54	2.51	3.06

利用觀測儀器蒐集現場資料的過程中，有可能會因電壓的不穩定或其它不明原因而產生異常的雜訊，本研究分析的對象為波高極值資料，有可能會發生和異常雜訊混淆不清，因此在進行相關極值分析前，必需進一步檢定觀測資料的合理性。在此引用統計學上的箱型圖(Box Plot)理論進行資料之篩檢，並參考當時氣象局所發布的資訊以研判資料的合理性。箱型圖架構如圖 101 所示。三個四分位數(即圖上 p_1 、 p_2 、 p_3 點位值)構成箱型結構，組成箱型圖主體。其箱型之長度為 p_3-p_1 的值，稱為分位數間隔(interquartile range, IQR)。進行箱型圖檢定時，首先將所有資料從小至大排序，之後判定四分位數值。

$$I_i = \frac{(N+1)*i}{4}, \quad i=1, 2, 3, 4$$

式中， N 為總資料個數。 I_i 為排序資料中第 i 個四分位數的位置， p_i 為該位置處的資料值，稱之為第 i 個四分位數。估算第一四分位數(p_1)與第三四分位數(p_3)時，分別取 $i=1, 3$ ，即排序為第 25%與 75%位置處的資料值，用以描述資料之離散程度；估算第二四分位數(p_2)時，取 $i=2$ ，為排序第 50%處的資料值，描述資料的中位數，若中位數偏左代表多數樣本數據偏小；反之，若中位數偏右代表多數樣本數據偏大。計

算出四分位數，繪出箱型主體後，須判定大於 75%與小於 25%的極值波高，以 1.5 倍與 3 倍的 IQR 分別定義為雜訊(outlier)與極端雜訊(extreme outlier)之界線，以符號x及●表示之。另外樣本之範圍則以觸鬚(whisker)表示之，觸鬚範圍為箱型外向兩側延伸至樣本不大於 1.5 倍 IQR 之最大值及最小值；若樣本最大值或最小值超過觸鬚範圍時，則以十字表示。若樣本最大值介於 1.5 倍與 3 倍 IQR 資料間，此即為雜訊，而樣本最大值大於 3 倍 IQR 時，稱為極端雜訊。以月最大法選取的新竹浮標資料如表 59 所示。由圖 101 及表 59 發現，9、10 月有兩筆資料需進行觀測資料的驗證分析。由中央氣象局颱風歷史資料，2007 年 10 月柯羅莎(KROSA)強烈颱風侵台路徑分類 2，頭城及三貂角間，影響時間 10 月 4 日~7 日(海上颱風警報)，波高最大值為 8.94 公尺，紀錄時間為 10 月 6 日下午 4 時。另 2008 年 9 月有 3 個颱風辛樂克(SINLAKU，強烈颱風、侵台路徑分類 2、影響時間 09 月 11 日至 09 月 16 日)、哈格比(HAGUPIT，中度颱風、未侵台、影響時間 09 月 21 日至 09 月 23 日)及薔蜜(JANGMI，強烈颱風、侵台路徑分類 2、影響時間 09 月 26 日至 09 月 29 日)，波高最大值為 12.45 公尺，紀錄時間為 9 月 28 日下午 6 時。故箱型圖分析所得之極端雜訊波高發生於颱風侵襲臺灣之際，該極值波高極有可能是颱風造成，並非儀器產生之異常雜訊，故保留進行後續的分析。而重現期的極值波高統計，可利用前述不同參數推定法推得知參數帶入 Gumbel 及 Weibull 分布函數推算個重現期的極值波高。以欲求的重現期年 T (年)，帶入下式

$$F_T = 1 - 1/T$$

將上式計算求得之 F_T ，即可求得 T 年重現期的極值波高 x_T ，以三種參數推定法選其均方根誤差最小者作為該月份重現期波高並整理成表 60，可以發現在春季時(3、4 及 5 月份)，除 3 月份因還有東北季風的影響，其十年重現期波高約 4.2 公尺外，4 及 5 月份其十年重現期波高約 2.5 公尺左右。夏秋季因有颱風的影響，明顯十年重現期波高值都比較大，在 11 月份因受東北季風的效應較強，然因此時颱風侵臺發生頻率很低，十年重現期波高約 3.3 公尺。此海域在冬季時，其十年重現期

波高至少都在 3.9 公尺以上，顯示東北季風造成的海浪狀況不佳。由收集之海洋風場報告[37]可知，其 50 年重現期颱風波浪 $H_{1/3}$ 為 9.2 公尺，而本計畫推估為 9.95 公尺。

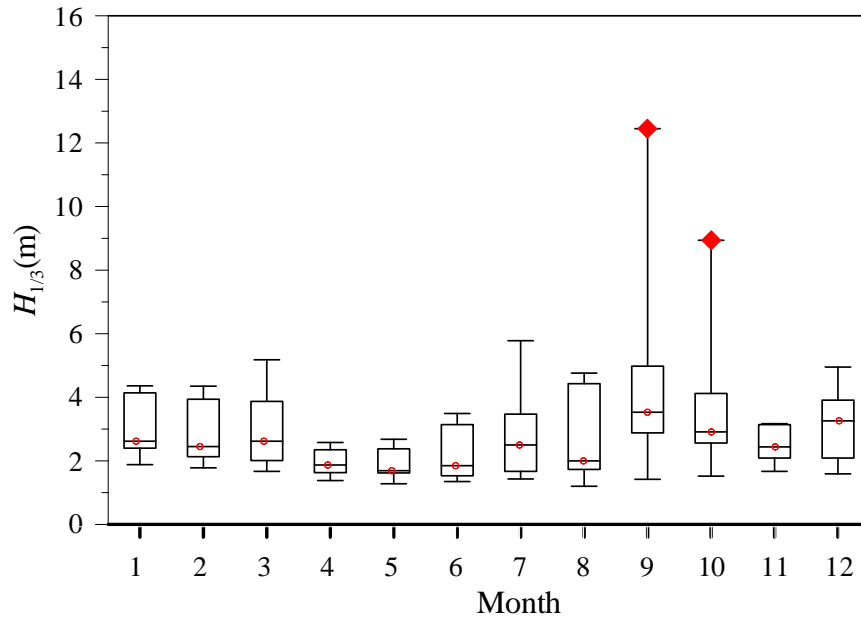


圖 101 新竹浮標 2005-2013 年極值波高箱型圖

表 59 新竹浮標 2005-2013 年每月波高之箱型圖分析表(單位：公尺)

月份	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
第一四分位數	2.22	2.02	1.85	1.57	1.52	1.53	1.62	1.54	2.57	2.35	2.07	2.04
中位數	2.62	2.45	2.62	1.87	1.69	1.85	2.50	2.00	3.53	2.91	2.44	3.26
第三四分位數	3.83	3.54	3.65	2.24	2.26	2.78	3.44	4.23	4.97	3.94	3.07	3.86
IQR	1.61	1.52	1.80	0.67	0.74	1.25	1.83	2.69	2.40	1.60	1.00	1.82
1.5×IQR	2.42	2.28	2.70	1.01	1.10	1.88	2.74	4.03	3.60	2.39	1.50	2.72
3.0×IQR	4.83	4.56	5.40	2.01	2.21	3.75	5.48	8.06	7.20	4.79	3.00	5.45
觸鬚上界線	6.25	5.82	6.35	3.24	3.36	4.65	6.18	8.25	8.57	6.33	4.57	6.58
雜訊上界線	8.66	8.10	9.05	4.25	4.46	6.53	8.92	12.28	12.17	8.73	6.07	9.30

表 60 新竹浮標各月份重現期波高表(單位：公尺)

重現期	10 年	25 年	50 年	100 年
月份	(m)	(m)	(m)	(m)

1	4.0675	4.7266	5.2155	5.7009
2	3.9073	4.5738	5.0683	5.5591
3	4.1971	4.9674	5.5389	6.1062
4	2.4677	2.7731	2.9997	3.2247
5	2.3937	2.7095	2.9438	3.1764
6	3.0852	3.6529	4.0741	4.4922
7	4.3161	5.1964	5.8494	6.4976
8	4.8472	6.0187	6.8878	7.7505
9	7.0873	8.7296	9.9480	11.1574
10	5.3927	6.5083	7.3359	8.1575
11	3.3252	3.7754	4.1093	4.4407
12	4.4683	5.2670	5.8595	6.4476

D、SWAN 波浪驗證

由於目前示範計畫風場海域尚未設置風海觀測塔，缺乏符合風能驗證之海、氣象觀測資料，致使風能計算、經濟性評估、結構安全性、風機招標及驗收機制等均無法精確規劃設計。因此，本計畫除了將收集示範風場鄰近海域之海、氣象歷史資料進行統計分析，以力求場址環境資料之完備，用以瞭解該海域之歷史與近年特性。另由於示範場址並無長期波浪觀測資料，本計畫擬運用國內既有之研究能量，進行分包研究案，以 SWAN 模式進行過去十年波浪重現推估，並使用統計分析，以獲得示範場址波浪統計資料，完整評估波浪資訊，提供設計及船舶安全運動評估相關訊息，力求降低開發風險。在海洋及海岸工程設計中，波浪為最重要考慮因素之一，實際海洋中，因波浪極不規則，很難以數學方式描述每一個波浪的運動，因此常用統計方法分析代表波浪，例如以示性波高及示性週期表示波浪狀態，再以迴歸分析歸納工程設計所需設計值。

波浪模式演變迄今已達所謂的第三代模式，它是指以波浪方向波譜(wave directional spectrum)為計算元素的相位平均模式(Phase-averaged Model)，也就是關於波浪的生成、非線性交互作

用與碎波能量消散的機制，皆以頻率域的源函數項來描述，也稱為波譜模式。相較於相位解析模式(Phase-resolving Model)直接計算波列水位之變化，相位平均模式可以模擬風浪生成與碎波能量消散的現象，同時模擬計算域涵蓋面積大，計算量資源需求較小且計算較為快速。現今的第三代波譜模式包括荷蘭 Delft 工業大學開發的 SWAN (Simulation of Wave in Nearshore)、位於德國漢堡的 Max-Planck 研究所 Hasselmann 領導 WAMDI Group 開發的 WAM 以及美國海洋大氣總署開發的 WAVEWATCH III。SWAN 研發團隊將其原始碼放在網頁上供任何人非營利之使用，在使用社群的貢獻下，目前已可以直接應用於大洋或是近岸的波浪模擬。目前除 WAM 與 WAVEWATCH III 波浪模式外，SWAN 亦成為研究者廣為使用的波譜模式。

由於本計畫目標為探討台灣海峽淺水波浪，又波浪傳遞至近岸會產生淺化、波與波的非線性交互作用、波浪受風之成長、碎波與底床造成波浪能量衰減及受到海流與地形變化而產生之頻率位移與折射等現象，SWAN 模式考慮上述波浪在時間與空間領域中變化的現象，因此，SWAN 模式具有推算近岸波浪的功能，故分包研究案中選用 SWAN 數值波浪模式為推算台灣海域歷史波浪的工具。為了有效率的進行參數率定，採用巢狀網格的進行波浪模擬，由深海計算到近岸共分為二層，深海計算範圍為北緯 16 度至北緯 28 度，東經 112 度至東經 126 度，網格解析度為 0.2 度，如圖 102 所示，其中圖中紅色虛線方框為第二層計算範圍，北緯 22 度至北緯 27 度，東經 117.5 度至東經 122.5 度，網格解析度為 0.05 度。本計畫使用美國 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)的國家地球物理資料中心 NGDC (National Geophysical Data Center)的全球陸地與海底地形資料組 ETOPO1，資料範圍涵蓋整個地球，資料格網間距為 1 弧分。模式運算的地形資料範圍與空間解析度依照數值波浪模式的範圍與空間解析度進行設定。

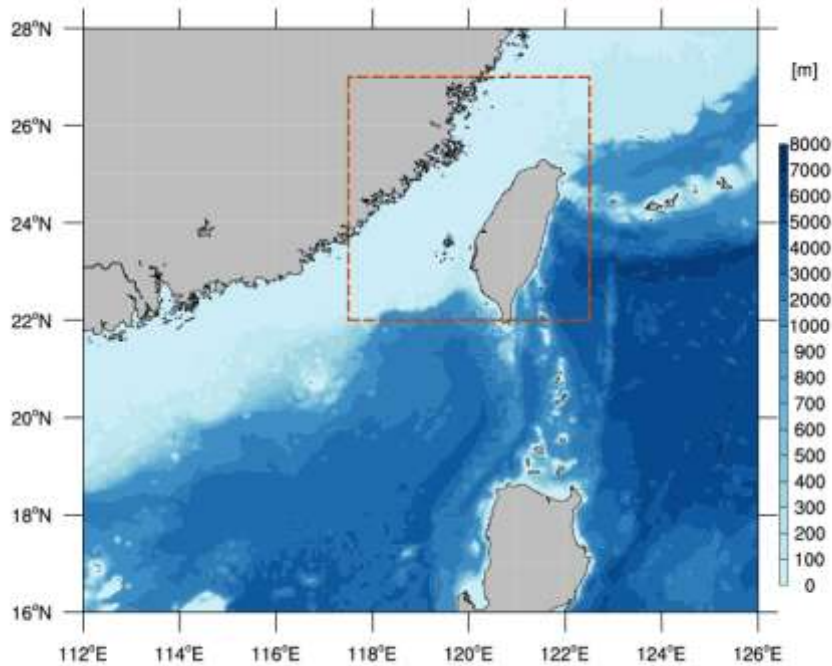


圖 102 數值波浪模式計算區域水深圖與巢狀網格計算範圍

波浪數值模式的主要驅動力為風場，準確的風場輸入模式中才可推算準確的波浪場現象。本計畫使用的輸入風場資料為中央氣象局非靜力平衡預報系統(Non- hydrostatical Forecast System，簡稱 NFS)提供之區域性大氣模式輸出的海面風場資料。模式運算的大氣風場範圍為北緯 16 度至北緯 28 度，東經 112 度至東經 126 度，網格解析度為 0.25 度。

參數率定為數值波浪模式應用前之基本步驟，由於數值波浪模式中有許多經驗以及可調整之參數，其參數值為透過觀測資料迴歸所獲得。但在不同的海域必須對參數做進一步的率定，使其適用於特定區域。經過率定後之模式參數應與實際波浪觀測作比較，以驗證模式及參數值之可靠性。因此，參數率定為模式應用於特地區域之必要程序。研究團隊曾於 2009 年整合參數敏感度分析與 ARS (Adaptive Random Search)法獲得的數值模式校驗方法(Lee 等人, 2009)對 WAVEWATCH III 數值波浪模式進行校驗。數值波浪模式中包含經驗參數，而這些經驗參數必須由實際計算與實測資料的比對後才能率定出適合之參數值，因此為了合理模擬波浪，有必要對 SWAN 數值波浪模式進行率定。

依據 SWAN 波浪模式使用者說明手冊找到影響模式輸出結

果最為顯著之經驗參數，選取的參數為在第三代模組採用的 Westhuysen 組態中 Cavaleri 和 Malanotte-Rizzoli(1981)波浪成長項比例係數(預設值=0.0015)與底床磨擦項採用的 JONSWAP 公式中磨擦係數(預設值=0.038)兩個模式參數進行經驗參數率定，參數率定時間長度為一年(2012 年 8 月~2013 年 7 月)。又由於本計畫著重於規劃中的苗栗及彰化離岸示範風場的海況分析，因此以台灣海峽的新竹資料浮標站和彰濱資料浮標站觀測資料進行 ARS 法率定波浪模式參數，參數率定前後統計誤差結果顯示參數率定後可有效改善波浪模式計算結果。

為了合理驗證上述率定的結果，本計畫採用的資料浮標觀測資料時間不同於率定所使用的觀測資料時間，校驗時間為自 2013 年 8 月 1 日至 2014 年 1 月 31 日，為期共六個月。以新竹、彌陀及澎湖浮標為驗證實測資料，選取最靠近資料浮標站的網格點的波高資料進行比對，驗證結果如圖 103~圖 105，圖中以黑色圓點表示測站浮標示性波高資料、紅色虛線表示經浮標波高資料率定所得參數之模式計算結果，結果顯示率定後產出在台灣西部沿海的波浪模擬結果與資料浮標的變化趨勢一致，尤其颱風期間的模擬結果。

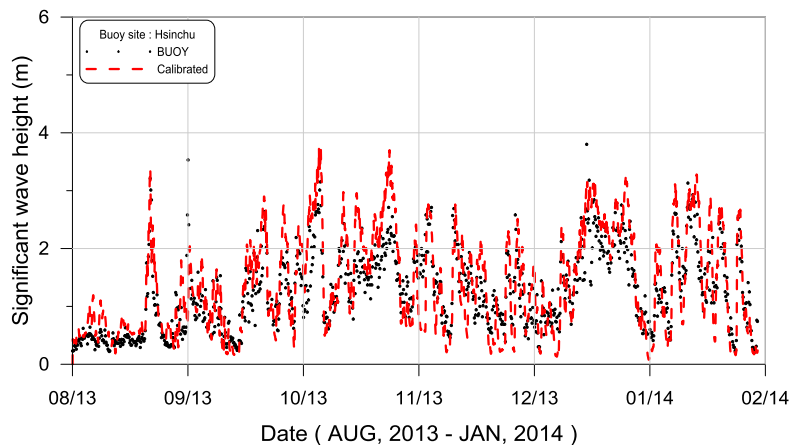


圖 103 SWAN 波浪驗證結果在新竹資料浮標站之示性波高時序列比對圖

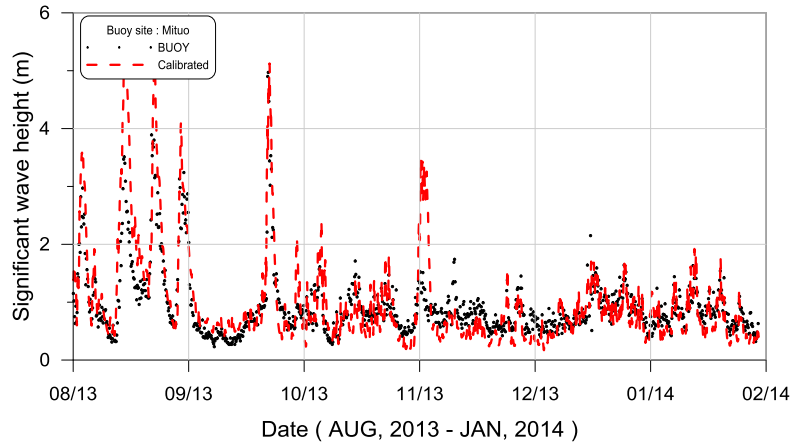


圖 104 波浪驗證結果在彌陀資料浮標站之示性波高時序列比對圖

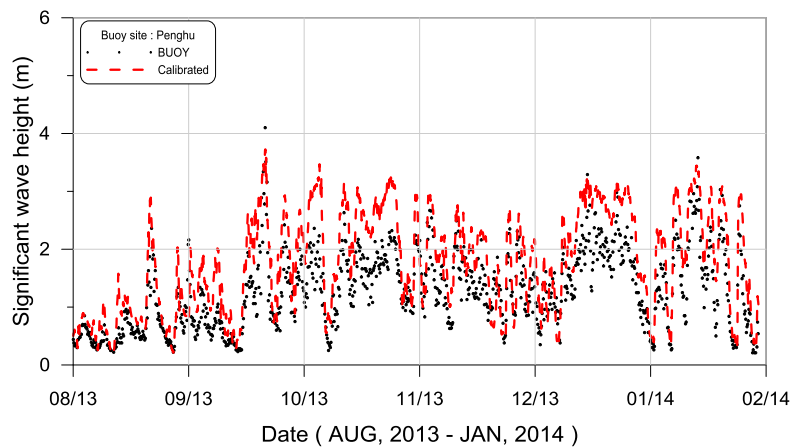


圖 105 波浪驗證結果在澎湖資料浮標站之示性波高時序列比對圖

進一步進行統計分析，表 61 中顯示驗證期間資料浮標實測資料與率定後模式結果的統計分析結果，以相關係數(CR)為例，資料浮標實測資料與率定後模式結果為高度相關。但是由標準偏差(BIAS)值可以知道，數值模式結果與新竹及澎湖測站觀測資料相比，其值分別為-0.135 及-0.507 明顯偏低；與彌陀測站比較其值為 0.045，結果偏高，顯示本研究模擬結果應用於新竹海域及中部海域時，其值會明顯比觀測值低，故引用本研究報告成果時，應特別注意此問題，推論此乃與模式限制有關。

表 61 參數驗證統計誤差值

測站 \ 統計誤差	<i>BIAS</i>	<i>RMSE</i>	<i>CR</i>	<i>SI</i>
新竹資料浮標站	-0.135	0.484	0.850	0.676
彌陀資料浮標站	0.045	0.480	0.844	0.901
澎湖資料浮標站	-0.507	0.650	0.889	0.704

本計畫為建置適用於台灣西部海域歷史波浪推算之數值波浪模式，應用巢狀嵌合運算技巧以準確計算深海至近岸波浪，利用 2012 年 8 月至 2013 年 7 月長達一年之現場觀測資料，完成波浪模式參數率定。接續以 2013 年 8 月至 2014 年 1 月長達六個月的資料浮標波浪進行驗證，結果顯示率定後的 SWN 波浪模式與實測波浪間呈現高度相關。因此，在經過嚴謹的校驗程序後，本計畫所建置 SWAN 波浪模式可合理推算台灣海域歷史海氣象資料。

因分包案委託單位原有之歷史風場資料因硬碟毀損導致 2004 年 1-5 月份及 2007 年 11 月資料有缺漏，經詢問國內其他研究單位並無此時段之風場資料可供模擬，故模擬時間經船舶中心同意後改為自 2004 年 6 月開始至 2014 年 7 月(2007 年 11 月及 12 月 1 日資料有缺漏)結束，總計十年 1 個月的資料供後續進行統計分析使用。本計畫著重於三座示範風場波浪資料分析與使用，故參照相關可行性評估報告及環評計畫書以取得三座風場中心座標大略位置，由於波浪模式網格位置不見得會剛好在輸出座標點上，故必須以內插方式處理輸出點相關物理量，整理座標及水深如表 62 所示，由表中的水深資料可以發現，台電風場點位的波浪輸出資料水深最淺，大約 10.2 公尺，福海風場輸出點位水深最深，約為 21.8 公尺，海洋風場點位水深約 16 公尺。此乃因為模式網格點並不算小及座標水深採用大域資料，無法精確展現出實際坐標點水深資料。

表 62 三座示範風場經緯度座標及水深

風場名稱	經緯度座標	水深(公尺)
台電風場	東經 120°14'30"，北緯 23°56'。	10.2
福海風場	東經 120°14'，北緯 24°02'。	21.8
海洋風場	東經 120°49'，北緯 24°42'。	16.0

將十年模擬結果以時序列值表示成圖 106~圖 108，綜觀三座風場的波浪歷時圖，可以知道台電風場的波高十年來之最大波高值皆小於 4 公尺，福海及海洋風場的波高明顯較大，然而台電風場及福海風場距離並不遠，推斷應與輸出點位水深的深淺有極大關係。若以福海及海洋二風場之波高歷時圖分析，偶有波高值大於 4 公尺發生的機會，研判與颱風的影響有極密切的關係，故整理 2004 年 6 月至 2014 年 7 月期間，氣象局有發布颱風警報的資料如表 63 所示，合計於此十年期間，發布警報之颱風共有 64 個，平均每年約有 6.4 個颱風，顯示此期間颱風的影響是較頻繁，或許與全球氣候變遷有相關性，未來在風場開發時對於夏季可工作天時評估時，此現象應特別注意。為瞭解十年中颱風侵襲在每月份之分布狀況，整理每年中之月份發生次數及機率統計分析如表 64，可以知道在十年之中以 7、8 及 9 月發生的機率最大，尤其是 8 月份幾乎佔了三成的比例(29.7%)，7 及 9 月各約占 20.3%。10 月以後因大陸高氣壓南移造成東北季風增強，次數會變得很少，2004 年 12 月份還有發生一次是比較特殊的例子；而 4 月份(含)以前在此十年中是沒有發生過颱風侵臺的例子，因此在春季東北季風慢慢減弱時，夏季梅雨季節未到時，可預期海象狀況對於施工限制會比較小。其次為明瞭颱風襲臺路徑對於風場的影響，依氣象局颱風路徑進行分類，並整理十年的資料繪製成圖 109，由圖中可以明瞭在此十年中共有 38 次襲臺的紀錄，比較特殊是其中有二次特殊路徑(天秤及芭瑪颱風，圖 110)，颱風襲臺路徑對於三座示範風場危害較大的路徑為路徑 2(7 次)及路徑 3(9 次)，合計佔比約 40.5%，顯示最近十年來侵臺颱風對於三座示範風場

所在位置威脅甚大。

影響海上施工環境因素主要以海象為主，海上工程施工條件限制，依各類工程之工程性質、精度要求及施工機具種類而不同，往昔之經驗建議其工作之允許波高詳見表 65。然風場開發除建置施工外，尚包含後續維運與除役工作，故必須整體考量波高限制問題；一般海上波高大於 1.5 公尺時，不適合維運船隻出海工作，因此後續討論海上工作天數限制，會以波高 1.5 公尺為限制條件，進行相關統計分析與討論。

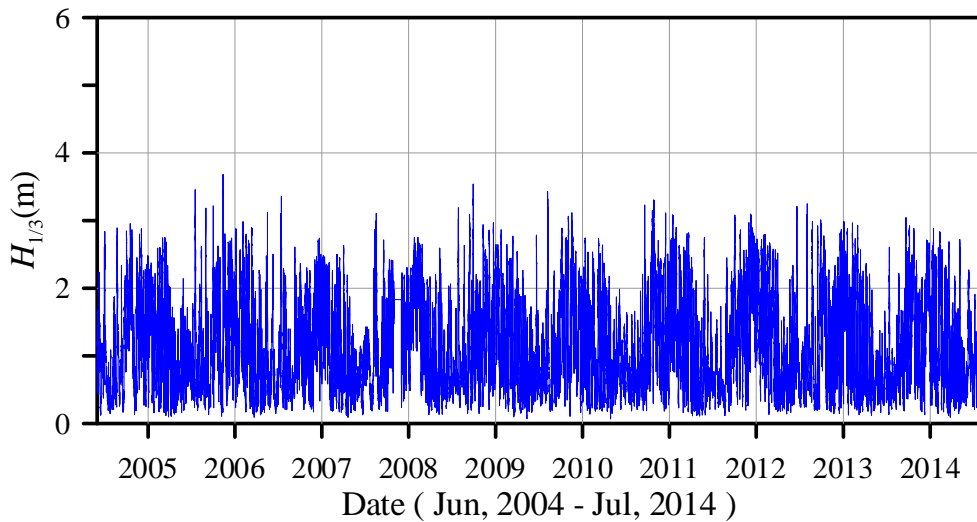


圖 106 台電風場十年模擬波浪歷時圖

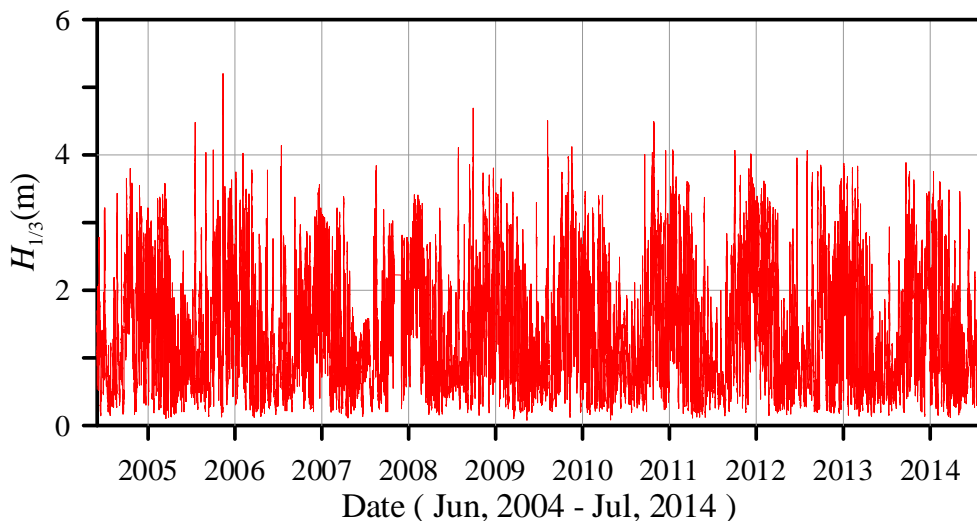


圖 107 台電風場十年模擬波浪歷時圖

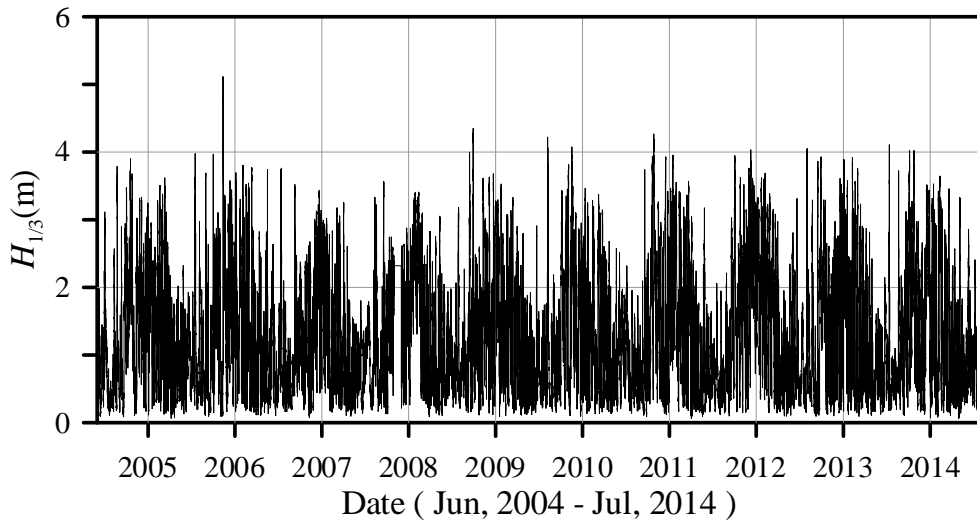


圖 108 海洋風場十年模擬波浪歷時圖

表 63 2004/6~2014/7 年有發警報颱風列表

編號	年份	中文名稱	英文名稱	侵臺路徑分類	警報期間	近臺強度	生命期近中心最低氣壓(hPa)	近臺近中心最大風速(m/s)
1	2014	麥德姆	MATMO	3	2014-07-21 17:30 2014-07-23 23:30	中度	960	38
2	2014	哈吉貝	HAGIBIS	---	2014-06-14 23:30 2014-06-15 17:30	輕度	992	20
3	2013	菲特	FITOW	1	2013-10-04 23:30 2013-10-07 08:30	中度	960	38
4	2013	天兔	USAGI	5	2013-09-19 23:30 2013-09-22 14:30	強烈	910	55
5	2013	康芮	KONG-REY	6	2013-08-27 11:30 2013-08-29 20:30	輕度	985	25
6	2013	潭美	TRAMI	1	2013-08-20 11:30 2013-08-22 08:30	輕度	970	30
7	2013	西馬隆	CIMARON	---	2013-07-17 10:30 2013-07-18 11:30	輕度	998	18
8	2013	蘇力	SOULIK	2	2013-07-11 08:30 2013-07-13 23:30	強烈	925	51
9	2012	杰拉華	JELAWAT	---	2012-09-27 02:30 2012-09-28 20:30	強烈	910	55
10	2012	天秤	TEMBIN	特殊	2012-08-21 14:30 2012-08-25 14:30	中度	945	45
					2012-08-26 11:30 2012-08-28 23:30	中度	945	35
11	2012	啟德	KAI-TAK	---	2012-08-14 14:30 2012-08-15 17:30	輕度	995	20
12	2012	海葵	HAIKUI	---	2012-08-06 11:30 2012-08-07 17:30	中度	960	35
13	2012	蘇拉	SAOLA	2	2012-07-30 20:30 2012-08-03 14:30	中度	960	38
14	2012	杜蘇芮	DOKSURI	---	2012-06-28 05:30 2012-06-29 08:30	輕度	995	23
15	2012	泰利	TALIM	9	2012-06-19 05:30	輕度	985	25

編號	年份	中文名稱	英文名稱	侵臺路徑分類	警報期間	近臺強度	生命期近中心最低氣壓(hPa)	近臺近中心最大風速(m/s)
					2012-06-21 05:30			
16	2011	南瑪都	NANMADOL	4	2011-08-27 05:30 2011-08-31 08:30	強烈	920	53
17	2011	梅花	MUIFA	---	2011-08-04 17:30 2011-08-06 11:30	中度	928	43
18	2011	米雷	MEARI	---	2011-06-23 23:30 2011-06-25 14:30	輕度	982	28
19	2011	桑達	SONGDA	---	2011-05-27 02:30 2011-05-28 14:30	強烈	920	55
20	2011	艾利	AERE	---	2011-05-09 05:30 2011-05-10 17:30	輕度	990	23
21	2010	梅姬	MEGI	9	2010-10-21 02:30 2010-10-23 23:30	中度	935	48
22	2010	凡那比	FANAPI	4	2010-09-17 23:30 2010-09-20 14:30	中度	940	45
23	2010	莫蘭蒂	MERANTI	---	2010-09-09 10:00 2010-09-10 11:30	輕度	990	23
24	2010	南修	NAMTHEUN	---	2010-08-30 22:30 2010-08-31 20:30	輕度	995	18
25	2010	萊羅克	LIONROCK	9	2010-08-31 20:30 2010-09-02 14:30	輕度	990	23
26	2009	芭瑪	PARMA	特殊	2009-10-03 05:30 2009-10-06 17:30	中度	920	43
27	2009	莫拉克	MORAKOT	3	2009-08-05 20:30 2009-08-10 05:30	中度	955	40
28	2009	莫拉菲	MOLAVE	---	2009-07-16 22:00 2009-07-18 08:30	輕度	978	28
29	2009	蓮花	LINFA	9	2009-06-19 20:30 2009-06-22 08:30	輕度	980	28
30	2008	薔蜜	JANGMI	2	2008-09-26 23:30 2008-09-29 23:30	強烈	925	53
31	2008	哈格比	HAGUPIT	---	2008-09-21 14:30 2008-09-23 08:30	中度	940	45
32	2008	辛樂克	SINLAKU	2	2008-09-11 08:30 2008-09-16 14:30	強烈	925	51
33	2008	如麗	NURI	---	2008-08-19 11:30 2008-08-21 08:30	中度	955	40
34	2008	鳳凰	FUNG-WONG	3	2008-07-26 11:30 2008-07-29 11:30	中度	948	43
35	2008	卡玫基	KALMAEGI	2	2008-07-16 14:30 2008-07-18 23:30	中度	970	33
36	2007	米塔	MITAG	---	2007-11-26 05:30 2007-11-27 11:30	中度	955	35
37	2007	柯羅莎	KROSA	2	2007-10-04 17:30 2007-10-07 23:30	強烈	925	51
38	2007	韋帕	WIPHA	1	2007-09-17 05:30 2007-09-19 08:30	中度	935	48
39	2007	聖帕	SEPAT	3	2007-08-16 08:30 2007-08-19 14:30	強烈	920	53
40	2007	梧提	WUTIP	3	2007-08-08 11:30 2007-08-09 11:30	輕度	992	18

編號	年份	中文名稱	英文名稱	侵臺路徑分類	警報期間	近臺強度	生命期近中心最低氣壓(hPa)	近臺近中心最大風速(m/s)
41	2007	帕布	PABUK	4	2007-08-06 23:30 2007-08-08 14:30	輕度	980	28
42	2006	珊珊	SHANSHAN	---	2006-09-14 14:30 2006-09-16 14:30	中度	945	48
43	2006	寶發	BOPHA	4	2006-08-07 20:30 2006-08-09 14:30	輕度	985	23
44	2006	桑美	SAOMAI	---	2006-08-09 02:30 2006-08-10 23:30	中度	935	48
45	2006	凱米	KAEMI	3	2006-07-23 14:30 2006-07-26 02:30	中度	960	38
46	2006	碧利斯	BILIS	2	2006-07-12 02:30 2006-07-15 02:30	輕度	978	25
47	2006	艾維尼	EWINIAR	---	2006-07-07 23:30 2006-07-09 05:30	中度	925	43
48	2006	珍珠	CHANCHU	9	2006-05-16 17:30 2006-05-18 17:30	中度	943	45
49	2005	龍王	LONGWANG	3	2005-09-30 20:30 2005-10-03 08:30	強烈	925	51
50	2005	丹瑞	DAMREY	---	2005-09-21 10:30 2005-09-23 08:30	輕度	955	25
51	2005	卡努	KHANUN	---	2005-09-09 17:30 2005-09-11 14:30	中度	950	43
52	2005	泰利	TALIM	3	2005-08-30 08:30 2005-09-01 23:30	強烈	920	53
53	2005	珊瑚	SANVU	---	2005-08-11 16:00 2005-08-13 20:30	輕度	985	25
54	2005	馬莎	MATSA	1	2005-08-03 08:30 2005-08-06 08:30	中度	955	40
55	2005	海棠	HAITANG	3	2005-07-16 14:30 2005-07-20 02:30	強烈	912	55
56	2004	南瑪都	NANMADOL	9	2004-12-03 02:30 2004-12-04 14:30	中度	940	38
57	2004	納坦	NOCK-TEN	6	2004-10-23 20:30 2004-10-26 02:30	中度	945	43
58	2004	米雷	MEARI	---	2004-09-26 08:30 2004-09-27 14:30	中度	940	40
59	2004	海馬	HAIMA	6	2004-09-11 23:30 2004-09-13 08:30	輕度	998	18
60	2004	艾利	AERE	1	2004-08-23 02:30 2004-08-26 11:30	中度	960	38
61	2004	蘭寧	RANANIM	---	2004-08-10 23:30 2004-08-13 02:30	中度	955	40
62	2004	康柏斯	KOMPASU	---	2004-07-14 09:30 2004-07-15 11:30	輕度	995	20
63	2004	敏督利	MINDULLE	6	2004-06-28 17:30 2004-07-03 11:30	中度	942	45
64	2004	康森	CONSON	---	2004-06-07 17:30 2004-06-09 23:30	中度	970	33

資料來源：中央氣象局歷史颱風資料庫

http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning

船舶中心整理 2014/9

表 64 2004/6~2014/7 年有發警報颱風各年月次數統計表

月份 年份	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合計
2004	0	2	1	2	2	1	0	1	9
2005	0	0	1	3	3	0	0	0	7
2006	1	3	2	1	0	0	0	0	7
2007	0	0	0	3	1	1	1	0	6
2008	0	0	2	1	3	0	0	0	6
2009	1	1	1	0	1	0	0	0	4
2010	0	0	2	2	1	0	0	0	5
2011	2	1	0	2	0	0	0	0	5
2012	0	2	1	3	1	0	0	0	7
2013	0	0	2	2	1	1	0	0	6
2014	0	1	1	-	-	-	-	-	2
合計	4	10	13	19	13	3	1	1	64
百分比	6.3%	15.6%	20.3%	29.7%	20.3%	4.7%	1.6%	1.6%	100%

資料來源：中央氣象局歷史颱風資料庫 http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning
 船舶中心整理 2014/9，註：-未列入資料統計。

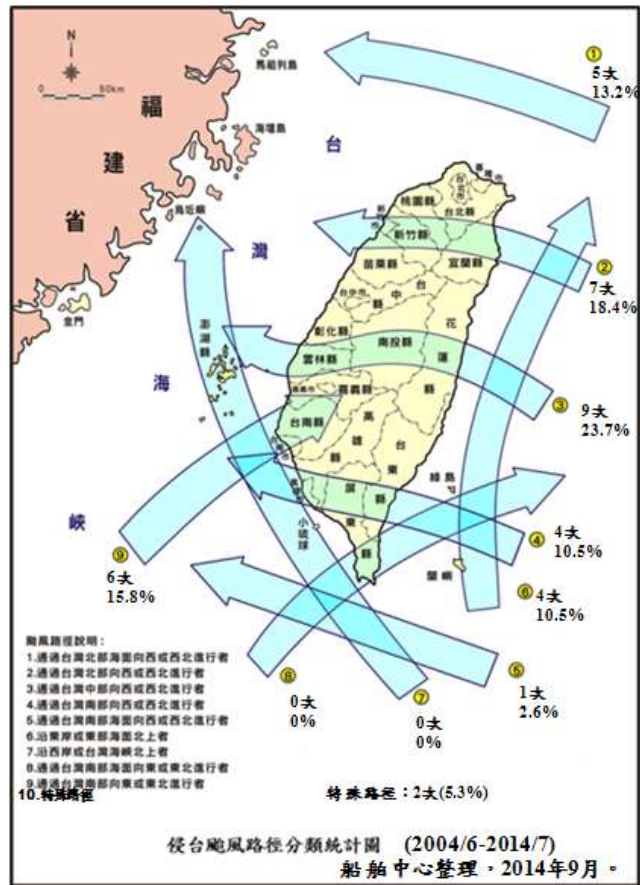


圖 109 2004 年 6 月~2014 年 7 月侵臺颱風路徑分類統計圖

資料來源：中央氣象局歷史颱風資料庫 http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning

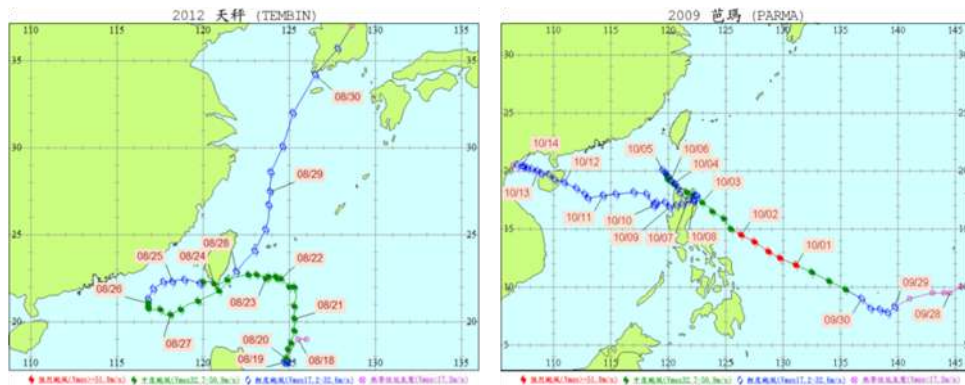


圖 110 天秤及芭瑪颱風路徑圖

表 65 海事工程施工允許波高值

項 目	可工作之允許最大波高
基礎拋石整平	1.0 公尺
水中整坡整平與水下織物鋪設	0.8 公尺
海上打樁	0.8 公尺
海上構件與消波塊吊放	0.5 公尺
上部結構安裝	0.5 公尺
現場澆置混凝土	0.5 公尺

資料來源：台電研究報告。

以下以台電風場模擬結果，進行統計分析方法說明以明瞭其特性。

首先將 2004 年 6 月至 2014 年 7 月資料整理成波浪玫瑰圖(圖 111)，可以發現在最近十年中，波向主要來自西南西向(30%)，另北及北北西向各約佔 20%。若以四季的波浪玫瑰圖來看其四季的波浪方向特性(圖 112)，春季受東北季風轉弱及西南季風漸增強，波向以北及北北東為主，西南西向的波向次之；夏季時主要受西南季風的影響，故波向以西南西向為主(約 50%)，西南波向約 10%次之。而秋冬季因東北季風的影響，波向完全以北及北北西向，至冬季時此二方向幾乎占約八成。其次整理全年波高及週期聯合機率表如表 66，以了解此風場之波高與週期分布狀況，由表中可以知道波高小於 1.5 公尺約佔 70.82%，週期 2~7 秒約佔 95.59%。波高小於 0.5 公尺時，週期主要分布介於 2~4 秒約佔 20.65%；波高大於 0.5 公尺且小於 1 公尺時，週期主要分布介於 3~5 秒約佔 25.43%；波高介於 1.0~1.5 公尺之間，週期介於 5~6 秒約佔 10.29%；而波高介於 1.5~2.0 公尺間，週期介於 6~7 秒約佔 10.22%。另將四季波高及週期聯合機率表如表 67~表 70，由表 67 風場春季之波高及週期聯合機率分布情形可知，波高小於 1.5 公尺約佔 81.12%，而週期主要分布在 2~7 秒約佔 92.59%，而 3~4 秒佔約 25.06%；表 68 為夏季分布狀況，波高小於 1.5 公尺約佔 90.39%，而週期主要分布在 2~6 秒約佔 86.92%，其中 3~5 秒佔約 58.60%。而此風場在秋季時(表 69)，波高小於 1.5 公尺約佔 61.01%，而週期主要分布在 3~8 秒約佔 89.45%，其中以 5~7 秒合約佔 48.65%最多；在冬季(表 70)波高小於 1.5 公尺約佔 48.59%，而週期主要分布在 3~8 秒約佔 92.33%，其中僅 6~7 秒就約佔三成(30.07%)，顯示此風場受東北季風影響甚大，在秋冬

季節不僅波高較高且週期會較長，海事施工條件較嚴苛，且船舶航行舒適性也較差。

整理台電風場模擬結果，針對月極值及平均波高統計成**錯誤! 找不到參照來源。**，可見此區域最近十年波高最大值為 3.68 公尺，對應週期為 9.42 秒，最大平均週期為 10.07 秒發生在 8 月份，應與颱風的作用有關。年平均示性波高為 1.11 公尺，年平均週期為 4.93 秒，其中 4~9 月之平均波高是低於年平均波高，且大多小於 1 公尺，其中在 4 月之示性波高極值是相對較小(波高 2.63 公尺對應週期 7.64 秒)，1 月之平均示性波高最大可達 1.58 公尺。波向全年段主要以西南西向為主，自 9 月至隔年 1 月皆以北向(東北季風)為主，2 及 3 月以北北西向為主，而 5~8 月以西南西向為主(西南季風)。其次整理波高月極值分布如**錯誤! 找不到參照來源。**，其中不在模擬的時程及無資料以“-”表示，並將波高小於 2 公尺以藍色字體標示，可以發現此區域月極值波高僅有在春季(4 月以後)及夏季無颱風影響下，其月極值波高才有可能小於 2.0 公尺。若以月平均波高值不大於 1.0 公尺來看，每年 4~9 月應是海上波高較小的時間，而 10 月份因東北季風的緣故，平均波高就會慢慢增大，且此時仍會有颱風的影響，因此初步研判此乃造成 10 月份之平均波高值大於 11 月份；若排除颱風的影響，僅考慮東北季風的效，此風場在每年的 12 月~1 月之波浪條件最嚴苛，其月平均波高皆超過 1.5 公尺，後續建議在維運期應該納入工作期程規劃考量。

以月極值波高進行重現期波高統計分析，**錯誤! 找不到參照來源。**為台電風場月極值波高統計表，選用 2004 年 6 月至 2014 年 5 月共十年的月極值波高資料進行分析，其中 2007 年 11 月份的缺漏資料以 2006 及 2008 年 11 月份資料平均給定，標示為灰底黑色字(**錯誤! 找不到參照來源。**)。可以發現此區域月極值平均波高皆大於 2.0 公尺，以 6 月份 2.17 公尺最小，而 1、9、10 及 12 月份較高約 2.80 公尺。將此區域波高進行箱型圖統計分析可得**錯誤! 找不到參照來源。**，其中 IQR 表示第三四分位數與第一四分位數差值，除在颱風影響季節中(5-9 月)其值皆高於 0.5 公尺以上，其餘季節皆小於 0.3 公尺；以觸鬚上界線檢視相關資料，發現其值皆在界線內(**錯誤! 找不到參照來源。**)，因此不再檢測

波高直接進行後續重現期波高分析。以三種參數推定法進行參數推定，並經 K-S 檢定、相關係數(CR)及均方根誤差比較分析，在有效水準 95%下，接受所假設的機率分布型式，並將三種參數推定法其均方根誤差較小者標示為藍色字體，以辨別在某月份以 Gumbel 或 Weibull 分布函數搭配何種參數推定法其均方根誤差較小，並作為後續重現期波高評估，根據上述均方根誤差較小之評估結果，整理成**錯誤! 找不到參照來源**。台電風場各月份重現期極值波高表，10 年重現期來看，7 月至翌年 1 月皆超過 3.0 公尺，並以 7 月之 3.54 公尺最大；若排除颱風效應可能影響的月份，10 年重現期以 12 月份 3.12 公尺最大。若是進行船舶設計波高之選定，因未來進行海事施工時，會結合海氣象預報技術，在排除颱風影響的月份下，其月極值 10 年重現期之設計波高推估值為 3.12 公尺，其推算標準偏量為 0.19 公尺，若假設推算標準偏量符合正常分布且考慮 95%信賴度，則推算 10 年重現期之波高在 $3.12 \pm 1.96 \times 0.19$ 公尺之間，即 2.75-3.49 公尺，然實際應用時，尚須考量模式結果比觀測值偏低之現象，換言之必須進行安全係數評估。

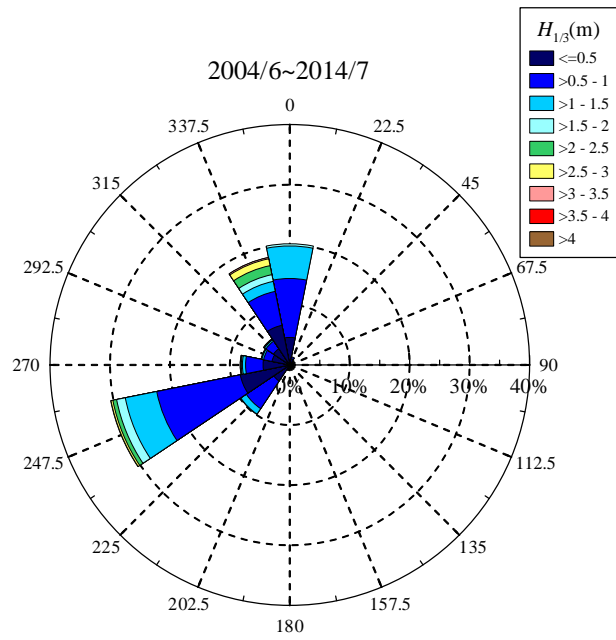


圖 111 台電風場十年波浪玫瑰圖

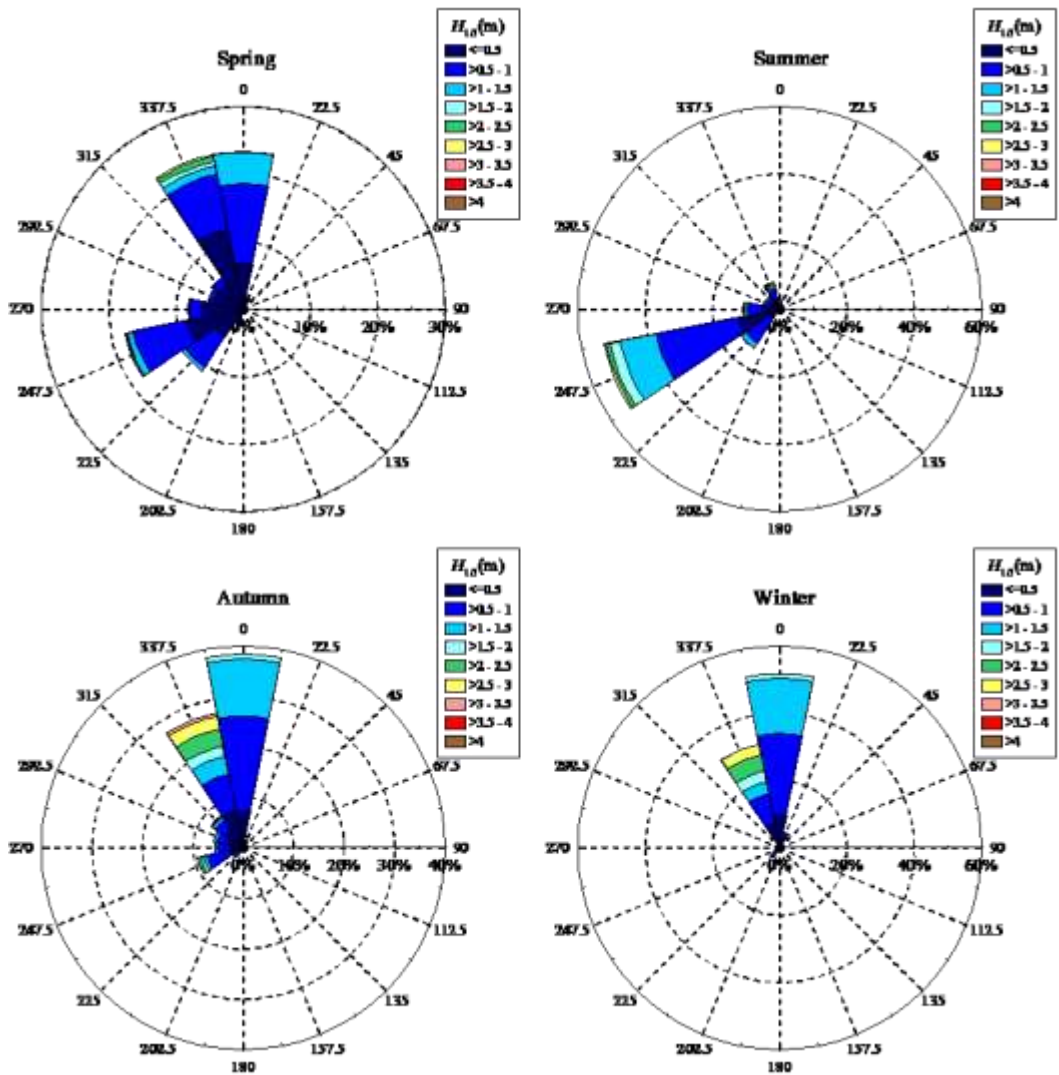


圖 112 台電風場十年四季波浪玫瑰圖

表 66 台電風場(2004/6~2014/7)全年示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ $T_{avg}(sec)$	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	>=5	小計
0~1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1~2	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.07
2~3	11.73	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.81
3~4	8.92	10.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.26
4~5	1.10	15.09	4.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.23
5~6	0.08	4.35	10.29	3.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.44
6~7	0.01	0.82	2.45	10.22	5.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.57
7~8	0.00	0.13	0.24	0.30	5.89	2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.25
8~9	0.00	0.02	0.05	0.05	0.02	0.88	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	1.31
9~10	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07
>=10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
小計	22.90	30.83	17.09	14.30	10.99	3.57	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00	100.00

表 67 台電風場(2004/6~2014/7)春季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ $T_{avg}(sec)$	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	>=5	小計
0~1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1~2	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.56
2~3	18.71	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.81
3~4	12.23	12.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.06
4~5	0.97	15.62	4.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.68
5~6	0.01	3.67	8.76	3.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.71
6~7	0.00	0.27	1.30	7.64	3.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.33
7~8	0.00	0.00	0.00	0.05	3.11	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.53
8~9	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.21	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
9~10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
>=10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
小計	34.47	32.50	14.15	11.00	6.26	1.59	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

表 68 台電風場(2004/6~2014/7)夏季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ $T_{avg}(sec)$	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	>=5	小計
0~1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1~2	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
2~3	14.26	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.35
3~4	12.92	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.52
4~5	1.55	21.86	4.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.08
5~6	0.14	5.11	9.19	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.97
6~7	0.02	1.21	1.91	3.28	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.51
7~8	0.00	0.39	0.51	0.32	1.29	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.25
8~9	0.00	0.04	0.16	0.14	0.03	0.81	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
9~10	0.00	0.02	0.06	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
>=10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
小計	29.58	44.33	16.48	5.31	2.42	1.55	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

表 69 台電風場(2004/6~2014/7)秋季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$H_s(m)$ $T_{avg}(sec)$	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	>=5	小計
0~1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1~2	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57
2~3	7.75	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.81
3~4	6.24	6.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.40
4~5	1.34	12.33	3.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.78
5~6	0.10	5.62	11.89	5.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.02
6~7	0.00	1.25	4.10	14.30	5.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.63
7~8	0.00	0.09	0.33	0.35	7.34	3.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.62
8~9	0.00	0.02	0.03	0.03	0.04	1.24	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
9~10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.17
>=10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
小計	16.00	25.53	19.48	20.09	13.39	4.77	0.70	0.04	0.00	0.00	0.00	100.00

表 70 台電風場(2004/6~2014/7)冬季示性波高及週期聯合機率分佈百分比(%)統計表

$T_{avg}(sec) \backslash H_s(m)$	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	>=5	小計
0~1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1~2	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45
2~3	5.73	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.78
3~4	3.81	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.95
4~5	0.49	9.86	4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.59
5~6	0.06	2.99	11.47	4.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.43
6~7	0.01	0.55	2.59	16.41	10.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.07
7~8	0.00	0.02	0.12	0.50	12.32	5.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.29
8~9	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.28	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44
9~10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>=10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
小計	10.54	19.61	18.44	21.82	22.82	6.61	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

表 71 台電風場模擬資料統計結果

統計月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
示性波高之最大值(m)	3.08	2.98	2.93	2.63	3.12	3.21	3.46	3.43	3.54	3.30	3.68	3.11	3.68
對應週期(sec)	8.39	8.18	8.14	7.64	8.85	9.08	8.79	8.84	9.17	8.69	9.42	8.52	9.42
平均示性波高(m)	1.58	1.35	1.13	0.83	0.72	0.83	0.80	0.85	1.00	1.57	1.29	1.51	1.11
平均週期(sec)	5.37	4.84	4.39	3.80	3.63	3.97	3.86	4.50	4.83	5.93	5.36	5.77	4.93
平均週期之最大值(sec)	8.48	8.48	8.24	7.64	9.13	9.61	9.17	10.07	9.82	9.63	9.68	8.68	10.07
最多波向	N	NNW	NNW	N	WSW	WSW	WSW	WSW	N	N	N	N	WSW

表 72 台電風場月極值波高統計表(單位：公尺)

年 \ 月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2004	-	-	-	-	-	2.23	2.84	2.89	2.33	2.95	2.80	2.88
2005	2.48	2.60	2.75	2.02	2.14	1.71	3.46	2.74	3.18	3.22	3.68	2.74
2006	2.88	2.98	2.89	2.27	3.12	2.50	3.36	2.19	2.61	2.36	2.26	2.74
2007	2.48	2.38	2.50	2.63	1.46	1.30	1.43	3.11	2.71	2.42	2.60	2.31
2008	2.75	2.75	2.17	2.20	2.59	2.06	3.19	2.63	3.54	2.20	2.94	2.97
2009	2.86	2.65	2.77	2.54	1.89	2.79	1.49	3.43	2.26	2.89	3.11	2.55
2010	2.74	2.53	2.73	2.37	1.87	1.99	1.64	1.66	3.23	3.30	2.71	3.11
2011	3.08	2.63	2.82	2.46	2.74	2.20	1.53	2.45	2.25	3.08	2.56	3.10
2012	2.73	2.80	2.58	1.94	2.18	3.21	2.93	3.25	3.01	2.77	2.34	2.87
2013	2.98	2.97	2.93	2.37	1.97	1.66	2.61	2.22	3.05	2.92	2.41	2.71
2014	2.89	2.83	2.69	2.18	2.72	2.27	-	-	-	-	-	-
月極值平均	2.79	2.71	2.68	2.30	2.27	2.17	2.45	2.66	2.82	2.81	2.74	2.80

表 73 台電風場每月波高之箱型圖分析表(單位：公尺)

月份	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
第一四分位數	2.73	2.60	2.58	2.18	1.89	1.71	1.53	2.22	2.33	2.42	2.41	2.71
中位數	2.81	2.70	2.74	2.32	2.16	2.13	2.73	2.69	2.86	2.91	2.66	2.81
第三四分位數	2.89	2.83	2.82	2.46	2.72	2.50	3.19	3.11	3.18	3.08	2.94	2.97
IQR	0.16	0.23	0.24	0.28	0.83	0.79	1.66	0.89	0.85	0.66	0.53	0.26
1.5×IQR	0.24	0.35	0.36	0.42	1.25	1.19	2.49	1.34	1.28	0.99	0.80	0.39
3.0×IQR	0.48	0.69	0.72	0.84	2.49	2.37	4.98	2.67	2.55	1.98	1.59	0.78
觸鬚上界線	3.13	3.18	3.18	2.88	3.97	3.69	5.68	4.45	4.46	4.07	3.74	3.36
雜訊上界線	3.37	3.52	3.54	3.30	5.21	4.87	8.17	5.78	5.73	5.06	4.53	3.75

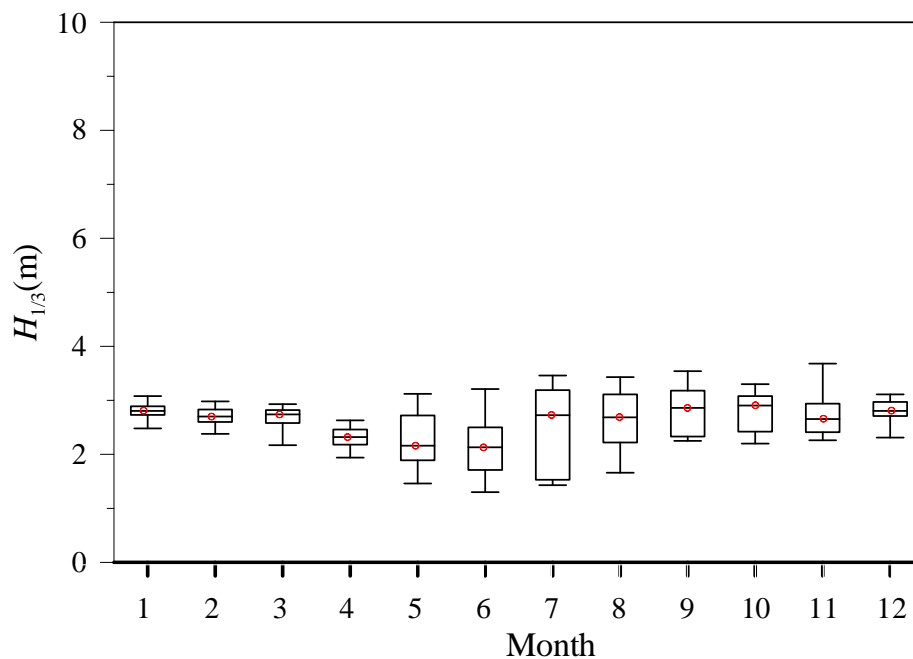


圖 113 台電風場極值波高箱型圖

表 74 台電風場各月份重現期極值波高表(單位：公尺)

重現期 月份	10 年		95%信心之波高範圍 (公尺)
	波高	推算標準偏差	
1	3.0417	0.1523	2.7432 ~ 3.3402
2	2.9415	0.0613	2.8214 ~ 3.0616
3	2.9737	0.0585	2.8590 ~ 3.0884
4	2.5849	0.1716	2.2486 ~ 2.9212
5	2.9309	0.3965	2.1538 ~ 3.7080
6	2.8994	0.4393	2.0384 ~ 3.7604
7	3.5367	0.6512	2.2603 ~ 4.8131
8	3.3665	0.4244	2.5347 ~ 4.1983
9	3.4068	0.3528	2.7153 ~ 4.0983
10	3.2967	0.2905	2.7273 ~ 3.8661
11	3.2938	0.3307	2.6456 ~ 3.9420
12	3.1188	0.1919	2.7427 ~ 3.4949

海上工作有其連續性，除須考量船隻從工作母港航行至風場之時間外，且須考量船隻及人員可連續工作時間，以避免不必要的往返時間浪費，因此考量以連續 24 小時波高小於 1.5 公尺為限制條件，進行可工作天數統計分析，若連續天數有跨兩個月份，且有影響連續天數統計時，則前一月份統計天數自動加 1 天並捨棄小數點後之天數，而後一月份統計天數則直接捨棄原小數點後之天數，以完整呈現實際可工作天數。舉例說明如下：假設 1 月份最後幾天連續波高小於 1.5 公尺有 1.2 天，且 2 月份銜接自 1 月份連續波高小於 1.5 公尺有 2.9 天，則 1 月份最後統計上設定為 2 天，而 2 月份天數一開始統計上為 2 天，其連續天數跨月為 4 天。若 2 月份銜接自 1 月份連續波高小於 1.5 公尺有 2.7 天，則 1 月份最後統計上為 1 天，而 2 月份最初統計上為 2 天，其連續天數跨月為 3 天。可是假設 2 月份一開始期連續波高小於 1.5 公尺天數並無銜接自 1 月份，則 1 月份最後幾天

在本計畫統計上為 1 天，而 2 月份另外再統計其他天之波高狀況。為方便整體評估將模擬期間波高以連續 24 小時波高小於 1.5m 進行天數統計，並依年份及月份進行分類統計成**錯誤! 找不到參照來源。**，以全年平均來看約佔 61.3%，其中 5-8 月佔比都有 80% 以上，並以 7 月份最高可達約 89.4%；而佔比較低的月份主要分布在 10(24.5%)、12(35.3%)及 1 月份(31.6%)，研判應是 10 月開始東北季風強度慢慢增強，加上除 2006、08、11 及 12 年外，都有颱風侵臺的問題，故造成此區域 10 月份佔比最低，11 月份至翌年 2 月主要以東北季風的影響為主海象狀況不佳，佔比皆低於 50%；而 4~9 月合佔約 80.1%，其餘月份佔約 38.6%，典型夏季適合施工類型，因此後續營運規劃時，應需要規劃高耐波性能的船隻進行相關維護。

表 75 台電風場連續 24 小時波高小於 1.5 公尺天數統計

月份 年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合計
2004						24	27	24	22	3	15	12	127
2005	11	14	17	26	27	27	24	25	24	8	15	8	226
2006	15	10	20	25	24	25	22	28	17	6	18	8	218
2007	7	16	20	21	31	30	31	20	21	5	—	11	213
2008	4	3	16	25	21	24	26	28	19	15	10	14	205
2009	10	16	15	18	21	26	31	23	19	6	11	13	209
2010	16	16	20	17	29	23	28	29	19	9	7	18	231
2011	3	11	11	21	25	27	30	25	17	8	13	3	194
2012	6	9	13	27	27	21	30	22	19	9	17	11	211
2013	10	10	18	22	30	28	28	28	15	7	16	11	223
2014	16	13	19	24	29								101
合計天數	98	118	169	226	264	255	277	252	192	76	122	109	2158
總天數	310	282	310	300	310	300	310	310	300	310	270	309	3621
百分比	31.6%	41.8%	54.5%	75.3%	85.2%	85.0%	89.4%	81.3%	64.0%	24.5%	45.2%	35.3%	59.6%

註：統計時間自 2004 年 6 月至 2014 年 5 月，其中 2007 年 11 月及 12 月 1 日資料有缺漏。

E、示範風場施工船安全評估分析

船舶在海上航行遇風浪時，會有沿著船體三個軸的 3 個線性運動及 3 個旋轉運動等共六種運動自由度 (如錯誤! 找不到參照來源。)，一般所謂的船體運動，係以船體座標系，探討六個軸向自由度，在 X、Y、Z 軸的水平運動分別稱為縱移 (Surge)、側移 (Sway)、起伏 (Heave)，而對 X、Y、Z 軸的旋轉運動稱為橫搖 (Roll)、縱搖 (Pitch)、平擺 (Yaw)，造成船體上下起伏等運動特性。六個軸向自由度的運動，可以位移、速度、加速度來表示，位移(如橫搖的旋轉角度)主要造成重力的水平向分力，加速度主要造成慣性力。

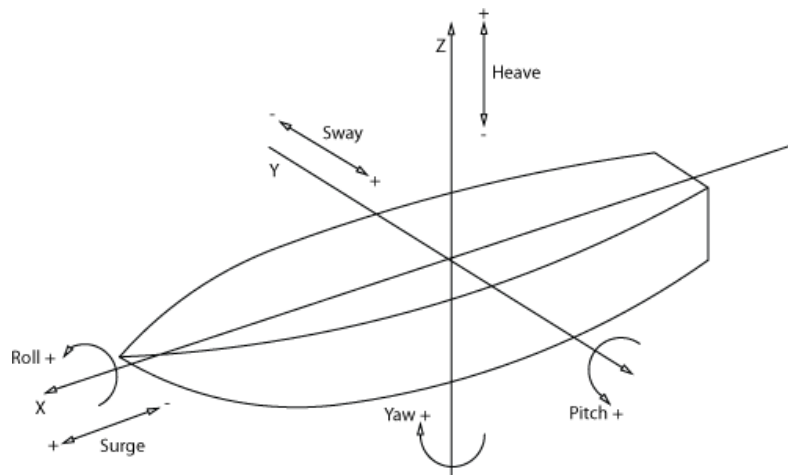


圖 114 船體運動的六個自由度

船體受波浪的影響，假設為線性(linear)的情況，單一自由度可以簡化成一種彈簧質量系統(Spring Mass System)如下：

$$mz'' + bz' + cz = F_a \cos(\omega t) \quad (5-1)$$

z 定義為某一自由度的振幅， m 定義為物體重量加上附加質量(added mass，試驗得知)， b 定義為線性阻尼(試驗得知)， c 恢復力係數與浮力相關，可寫成：

$$c = \rho g \nabla GM \quad (5-2)$$

ρ 是流體的比重， g 是加速度， ∇ 是體積， GM 是定傾中心至重心的距離。所以方程式的力學意義可寫成錯誤! 找不到參照來源。：

表 76 流體動力方程式的含意

$F_a(t)$	外部力	波浪產生的力，作用在重心上，受相角、頻率影響
cz	恢復力	阿基米德原理，及浮力
bz'	阻尼力	流體的阻尼效果
mz''	慣性力	物體質量+added mass

如以規則波來看，穩態解可以寫成式 5-2：

$$z(t) = z_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-3)$$

$$\varepsilon = a \tan \varphi \left(\frac{-b\omega}{-m\omega^2 + c} \right) \quad (5-4)$$

$$z_a = \sqrt{\frac{F_a^2}{(-m\omega^2 + c)^2 + b\omega^2}} \quad (5-5)$$

而 5-5 式中， z_a 是振幅， ω 是角頻率 (angular frequency)， ε 是相位角 (phase angle)。如以船體運動為例，對重心的六個自由度可解為

$$\text{Surge } X = X_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-6)$$

$$\text{Sway } Y = Y_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-7)$$

$$\text{Heave } Z = Z_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-8)$$

$$\text{Roll } \varphi = \varphi_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-9)$$

$$\text{Pitch } \theta = \theta_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-10)$$

$$\text{Yaw } \psi = \psi_a \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5-11)$$

上述微分方程式的解，將運動的振幅/波的振幅即是 RAO (Response Amplitude Operator)。RAO 有六個自由度，以 Surge 為例，

$$\text{RAO} = \frac{x}{\zeta} \quad (5-12)$$

速度微分是位移 (x)，而速度微分是加速度， ζ 是波浪振幅；所以了解位移的 RAO 就可以求解速度與加速的 RAO。

值得一提的是，RAO 的解屬於線性解，舉例來說，兩倍波浪振幅將會造成兩倍的波浪力，進而造成兩倍的船體運動，但可能與實際情況有落差。簡單的講，RAO 的含意就是『規則波的情況下，在某一周期範圍內，

波浪的振幅造成船振幅的比值』。舉例來說，對於波高 4m (振幅 2m) 的情況，Surge 的 RAO 如果是 0.5，代表船體會在 Surge 向-1m 到+1m 之間運動，如**錯誤! 找不到參照來源**。所示。

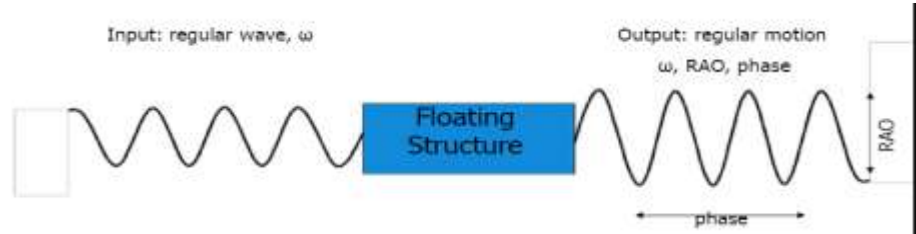


圖 115 從規則波導出 RAO

計算特定的 RAO 因子有：船體—特定的船殼幾何、浮心、重量、重心位置。海況—特定方向、特定周期、水深。有 RAO 之後，就可以進一步分析在自然海況下不規則波的行為，自然海況可以利用頻譜來表示，常見的有 Pierson-Moskowitz、JONSWAP，而台灣常用 JONSWAP 頻譜，只要給定不同有義波高和週期，可得到不同的 JONSWAP 波譜。任意波浪頻譜的方程式可定義為：

$$S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega = \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega) \quad (5-13)$$

運動響應的能量頻譜也可用同樣方式表示，以 Heave 運動響應為例：

$$S_z(\omega) \cdot d\omega = \frac{1}{2} z_a^2(\omega) = \left| \frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 \cdot \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega) = \left| \frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega \quad (5-14)$$

再藉由 RAO 的定義，可得知：

$$S_z(\omega) = \left| \frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 S_{\zeta}(\omega) = |\text{RAO}|^2 S_{\zeta}(\omega) \quad (5-15)$$

式 5-15 說明運動響應之能量譜可由 RAO 和波浪頻譜而得，整個過程可由進一步由**錯誤! 找不到參照來源**。說明，圖的最左下角為一個非規則波 $\zeta(t)$ 在時域的表現，可視為一連串的規則波所組成，每個規則波都有各自的波高、頻率和相角，其能量為 $1/2 \zeta_a^2(\omega)$ ，於是可得此非規則波在頻域的表現為 $S_{\zeta}(\omega)$ ，如圖的最左手邊所示。各個規則波成分經過 RAO 之後都會產生各自的規則運動響應，再相加起來就可得非規則運動響應 $z(t)$ 或是轉換為運動響應之能量譜 $S_z(\omega)$ 。也可藉由式 5-15 直接以 RAO 和波浪頻譜 $S_{\zeta}(\omega)$ 求得運動響應之能量譜 $S_z(\omega)$ 。

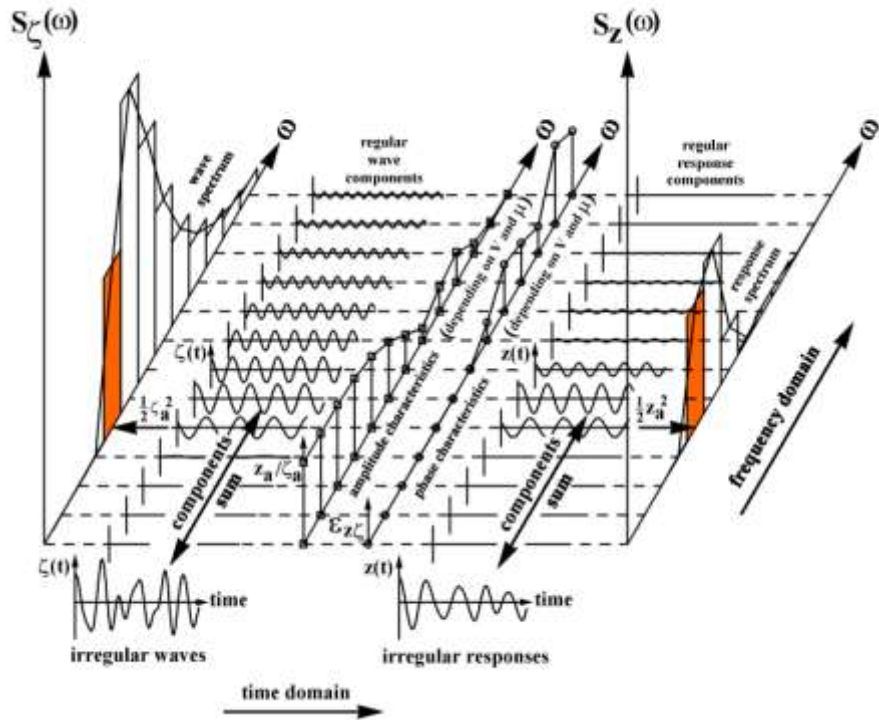


圖 116 由波浪頻譜與 RAO 求取運動響應之能量譜

如對運動響應之能量譜 $S_z(\omega)$ 積分，可得運動響應之方均根值：

$$\text{RMS} = \int_{\omega} S_z(\omega) d\omega \quad (5-16)$$

再取即觀測 3 小時內最可能發生之極值，即 1000 個波浪中之極值，可作為繫固用運動設計值：

$$\text{MAX} = \sqrt{2 \ln 1000} \times \text{RMS} = 3.72 \times \text{RMS} \quad (5-17)$$

■ 船體運動計算規定

氣候受限操作或非氣候受限操作

依據 GL Nobel Denton “GENERAL GUIDELINES FOR MARINE PROJECTS” 準則(guidelines)規定，此部分是適用於海上作業和運輸的海洋氣象條件一般性通則，明確陳述在營運基準期大於一個可信賴的天氣預測(一般不超過 72 小時)的限制下的可靠操作，其設計氣象條件必須反映統計極端的區域和季節特性，設計回歸期(return periods)已於前面探討(表 54)，此表也說明一般海洋結構物設置必須考慮 50 年回歸期進行波浪極值分析，而對於海事施工船進行海事操作時，必須依據操作期間長短進行波浪月極值 10

年回歸分析。

所謂『氣候受限』(weather-restricted)與『非氣候受限』(unrestricted)，指的是操作期間是否有限定海況，如屬於氣候受限操作，代表操作者可預測未來 72 小時的氣候變化，氣候變成可控制風險，故相關船體運動可利用設定特定的氣候條件來計算。

72 小時為參考目前氣象科技所能預測的極限，超過 72 小時氣候預測可能不夠準確，風險過高。反之，如果天氣屬於不可預測風險，則需以較長時間的統計回歸資料，作為設計海況。這種以工作時間判斷設定海況的技術，可參考 Noble Denton 的說明，如下表所示。表中第一欄即是操作時間(duration of use)，操作時間越長，設計的海況要越嚴苛，第一欄即為氣候受限操作。

一般 3 天到一年以下，以 10 年的季節性回歸資料。如以超過一年的操作(如自升式鑽油平台)，設計迴歸周期長達 50 年，就等同固定式結構物一樣設計標準。

一般操作時間的定義，是從繫纜解除開始、航行至定位、開始安裝作業、回港，算是一個循環，為一次作業時間。但因為離岸基礎安裝有切分成數個元件，每個元件不需要連續作業，如果安裝塔架時發生氣候突然變化(如颱風警報發佈)，可將基礎安裝完畢並立即回港，而總時間不需超過 72 小時，所以離岸風場海氣象觀測塔施工一般可定義為氣候受限操作。

參考 DNV 的定義，需要考慮預期的作業時間(Tpop)加上緊急應變時間(Tc)，如果無法解釋需要的緊急應變時間，則建議預期時間直接乘以兩倍。所謂的緊急應變時間，係為考慮以下因素。

- 操作時間的不確定性。
- 常見的技術上、操作上的延遲。
- 72 小時內氣象報告的不準確性。

船體運動取得方式

船體的設計運動可藉由模型試驗、預設值、或由水動力分析計算帶入計算。

- 模型試驗

模型試驗用於導出計算結果，並比對整體結構完整度。在一般模型試驗值是會有上下浮動，運動反應需以標準差統計，標準差值在乘上 $\sqrt{2 \cdot \log(N)}$ ，(N 是交會零點的次數)以取得 3 小時極限狀況 MEPE 以作為設計之用。個別試驗的最大值，不能直接用於設計中。之後帶入高斯響應(一般常用的波浪響應)，如果模型試驗結果不同於高斯響應，則必須採用其他方式。

模型試驗最大的速度、加速度、力，應能重現十次(ten realization)，亦或更大值，採用的值應要考慮數值彼此間變異。平均值與標準差要另外算出，設計值是中間值加兩個標準差。尺寸效應予考量，可再加上 10%設計值。模型試驗昂貴、費時，不太可能針對每一個專案進行，一般只是為了驗證特殊船型或水動力軟體才會採用模型試驗。而船體運動在零節零速度時的橫浪級最大速度的頂浪是船體最嚴重運動，在 GL-ND 所考慮的是風險機率的預估。

- Noble Denton 預設值

如果該船型沒有進行船模實驗，無計算水動力分析，亦或沒有相關應用軟體，也可採用 Noble Denton 建議的船體運動預設值帶入計算，如**錯誤! 找不到參照來源。**

預設值的資料來源主要是由歐洲的北海，波浪週期為 10 秒是屬於長浪，這在台灣並不常見，此數據在台灣幾乎等同颱風來襲時的海況，換言之，如果採用**錯誤! 找不到參照來源。**內容之預設值計算對台灣地區而言趨於保守。

表 77 Noble Denton 建議的船體運動預設值

Nature of Transportation	Case	LOA (m)	B ^[1] (m)	L/B ^[1]	Block Coeff	Full cycle period (secs)	Single amplitude		Heave
							Roll	Pitch	
Unrestricted (these values to be used unless any of the following apply)	1	> 140	and > 30	n/a	< 0.9	10	20°	10°	0.2 g
	2	> 76	and > 23	n/a	any	10	20°	12.5°	0.2 g
	3	≤ 76	or ≤ 23	≥ 2.5	< 0.9	10	30°	15°	0.2 g
	4				≥ 0.9				
	5	≤ 76	or ≤ 23	< 2.5	< 0.9	10	30°	30°	0.2 g
	6				≥ 0.9				
Weather restricted operations in non-benign areas for a duration <24 hours (see Section 7.9.2 d. For L/B < 1.4 use unrestricted case.	7	any		≥ 2.5	any	10	10°	5°	0.1 g
	8	any		< 2.5, ≥ 1.4	any	10	10°	10°	0.1 g
Weather restricted operations in benign areas ^[2] (see Section 7.9.2.e). For L/B < 1.4 use unrestricted case.	9	any		≥ 2.5	any	10	5°	2.5°	0.1 g
	10	any		< 2.5, ≥ 1.4	any	10	5°	5°	0.1 g
Inland and sheltered water transportations (see Section 7.9.2.f). For L/B < 1.4 use unrestricted case.	11	any		≥ 1.4	any	Static	Equivalent to 0.1 g in both directions		0.0
Independent leg jack-ups, ocean tow on own hull. For L/B ≥ 1.4 use unrestricted Cases 1 to 6	12	n/a	> 23	< 1.4	n/a	10	20°	20°	0.0
Independent leg jack-ups, 24-hour or location move. For L/B ≥ 1.4 use Case 7 or 8 as applicable	13	n/a	> 23	< 1.4	n/a	10	10°	10°	0.0
Mat-type jack-ups, ocean tow on own hull. For L/B ≥ 2.5 the pitch angle may be reduced to 8°	14	n/a	> 23	< 1.4	n/a	13	16°	16°	0.0
Mat-type jack-ups, 24-hour or location move.	15	n/a	> 23	n/a	n/a	13	8°	8°	0.0

錯誤! 找不到參照來源。 共有 15 種情境(case)，有幾個觀察重點：

一般風力機安裝船長寬比 L/B 均大於 1.4，pitch 會比鑽油平台來的小，固情境 12~15 主要為鑽油平台說明，不適用離岸風電。

平靜海域(benign)泛指赤道無風帶附近區域，台灣並不屬於平靜海域，可以由 GL-ND 10001_0_General 7.5 Weather area map 中查得，所以情境 9~10 也不適用。情境 11 指港內避風情況，這通常不是控制海況。一般離岸風電安裝船，海上作業時間通常大於 24 小時，情境 7~8 並不常用。

綜上，整個表中最常用的預設值是情境 1~6，船體運動的 roll 介於 20~30 度，pitch 介於 10~25 度，heave 皆為 0.2g，算是相當保守的設計值，較大的船體運動代表需要較穩當的繫固設計，也提高了成本，這也是目標船舶有採用水動力分析計算的價值處。

■ 國內主要運輸船舶運動計算

國內海事工程施工經驗大多為鄰近案邊之港灣施工或是近岸工程施工，傳統上因為離岸不遠，其施工船隻依據施作人員經驗進行相關裝載及

施工評估，然此方式應用於離岸風場施工風險極大，主要是因為風機重量較重且海上運輸及施工距離較遠。目前規劃中之台中港作為離岸風電母港，其距離苗栗及彰濱示範風場皆大於 20 海浬，不僅距離較遠且因海象條件瞬息萬變不易掌握，因此對於船舶之運動與上浪分析等安全評估工作顯得異常重要且需求迫切。本計畫擬針對目前國內海事工程廠商既有船舶，配合海象資料收集與分析，進行船舶運動安全評估，力求建立相關安全評估準則，確保在風場施工安全無虞，以順利完成風場開發，並建立本土化海事工程產業。

在此，亦以前面使用之船長 73m 自升式平台船進行運動評估，支撐腳為收起之狀況，裝載兩組 3.6MW 風機。

- 靜水性能

自升式平台船資料配置如所示，主要有兩組 3.6MW 風機，零件可分為 Pile、Tower、Nacelle 和 Hub。在計算船體運動量時，船舶的轉動慣量為重要參數，可以由重量、重心和形狀算出各個項目配置的轉動慣量為負載與慣量計算表，如

所示。錯誤! 找不到參照來源。則為此配置下靜水性能表。

表 78 配置與慣量計算表

項目	質量(kg)	Origin Coordinate (m)			CoG Coordinate (m)			Second Moment about CoG (kg*m ²)			Inertia Moment about CoG (kg*m ²)		
		X (m)	Y(m)	Z(m)	X	Y	Z	XX	YY	ZZ	Ixx	Iyy	Izz
輕船	4148000	37.00	-4.10	0.00	1.22	-10.38	0.00	4.5E+08	6.2E+06	4.5E+08	5.1E+08	2.2E+09	1.7E+09
pile1	355000	15.00	33.40	15.40	-20.78	27.12	15.40	3.5E+08	2.4E+08	4.1E+08	7.0E+05	1.9E+08	1.9E+08
pile2	355000	15.00	33.40	-15.40	-20.78	27.12	-15.40	3.5E+08	2.4E+08	4.1E+08	7.0E+05	1.9E+08	1.9E+08
pile3	355000	60.00	33.40	15.40	24.22	27.12	15.40	3.5E+08	2.9E+08	4.7E+08	7.0E+05	1.9E+08	1.9E+08
pile4	355000	60.00	33.40	-15.40	24.22	27.12	-15.40	3.5E+08	2.9E+08	4.7E+08	7.0E+05	1.9E+08	1.9E+08
crane	600000	24.00	13.00	0.00	-11.78	6.72	0.00	2.7E+07	8.3E+07	1.1E+08	1.3E+08	1.0E+06	1.3E+08
tower1-upper	155000	41.00	18.40	12.00	5.22	12.12	12.00	4.5E+07	2.7E+07	2.7E+07	3.7E+05	2.7E+07	2.7E+07
tower2-upper	155000	41.00	18.40	-12.00	5.22	12.12	-12.00	4.5E+07	2.7E+07	2.7E+07	3.7E+05	2.7E+07	2.7E+07
tower1-under	185000	35.00	13.40	12.00	-0.78	7.12	12.00	3.6E+07	2.7E+07	9.5E+06	9.7E+05	3.9E+07	3.9E+07
tower2-under	185000	35.00	13.40	-12.00	-0.78	7.12	-12.00	3.6E+07	2.7E+07	9.5E+06	9.7E+05	3.9E+07	3.9E+07
nacelle1	240000	37.00	-2.40	4.00	1.22	-8.68	4.00	2.2E+07	4.2E+06	1.8E+07	6.1E+05	2.7E+06	2.9E+06
nacelle2	240000	37.00	-2.40	-4.00	1.22	-8.68	-4.00	2.2E+07	4.2E+06	1.8E+07	6.1E+05	2.7E+06	2.9E+06
hub1	115000	25.50	-1.20	7.39	-10.28	-7.48	7.39	1.3E+07	1.8E+07	1.9E+07	1.3E+05	4.5E+05	4.5E+05
hub2	115000	25.50	-1.20	-7.39	-10.28	-7.48	-7.39	1.3E+07	1.8E+07	1.9E+07	1.3E+05	4.5E+05	4.5E+05
Total	Mass (kg)	CoG (m)						Second Moment about CoG (kg*m²)			Total Inertia Moment about CoG (kg*m²)		
		X	Y	Z				XX	YY	ZZ	Ixx	Iyy	Izz
	#####	35.78	6.28	0.00				2.1E+09	1.3E+09	2.5E+09	3.7E+08	3.3E+09	5.2E+09
											Radius of Gyration (m)		
											Kxx	Kyy	Kzz
											19.04	24.11	36.27

表 79 靜水性能

Hydrostatic and Inertia Properties					
LOA / Breadth	73.0 / 38.0	m	LCF	34.79	m
LCG	34.22	m	TCF	0	m
TCG	0	m	Draft at LCF	2.80	m
KG	16.68	m	GM _T	29.51	m
Displacement	7653	m ³	GM _L	127.85	m
LCB	34.66	m	Ixx	2.74E+09	kg*m ²
TCB	0	m	Iyy	5.22E+09	kg*m ²
KB	5.05	m	Izz	4.39E+09	kg*m ²

- 環境條件

有義波高設計為 2m，則工作船在夏季台灣西部海域可達 95%可操作期。再依 GL Noble Denton 規範，在有義波高 2m 的狀況，可能出現的尖峰週期為 $5.1 \leq T_p \leq 7.75$ 秒，以此有義波高和尖峰週期為設計海況，代入 Jonswap 波譜，波譜形式如下圖所示。波浪的方向以 45 度為間隔，共計算八個方向。

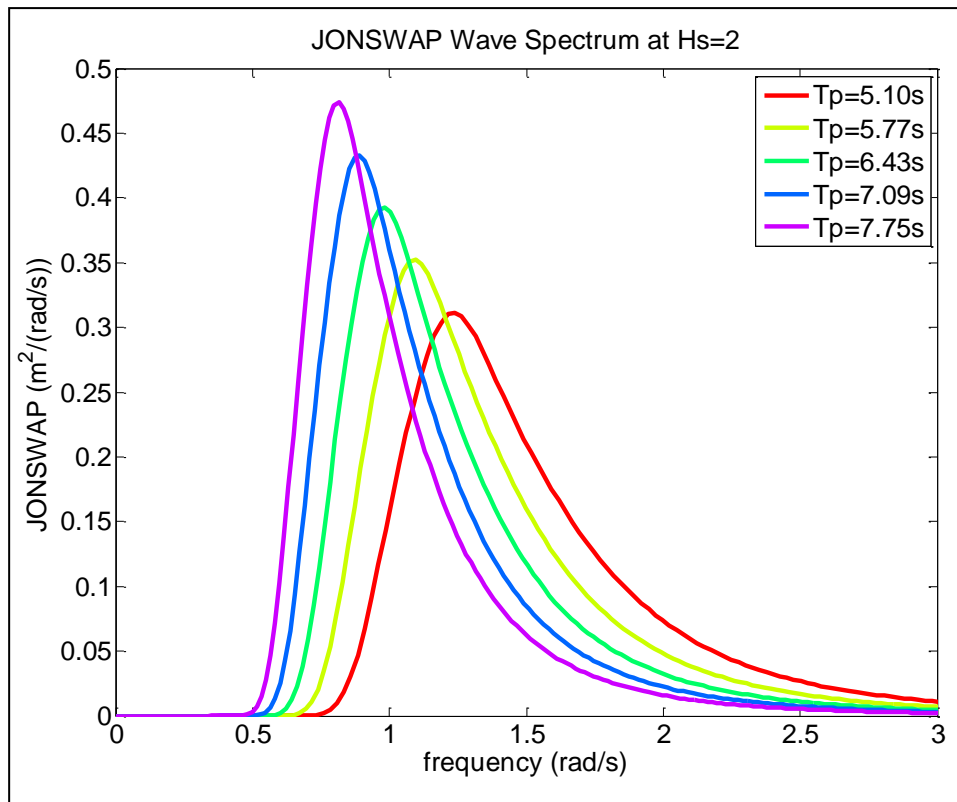


圖 117 設計海況波譜

運動 RAO 計算，以顏色分別表示不同波浪方向：

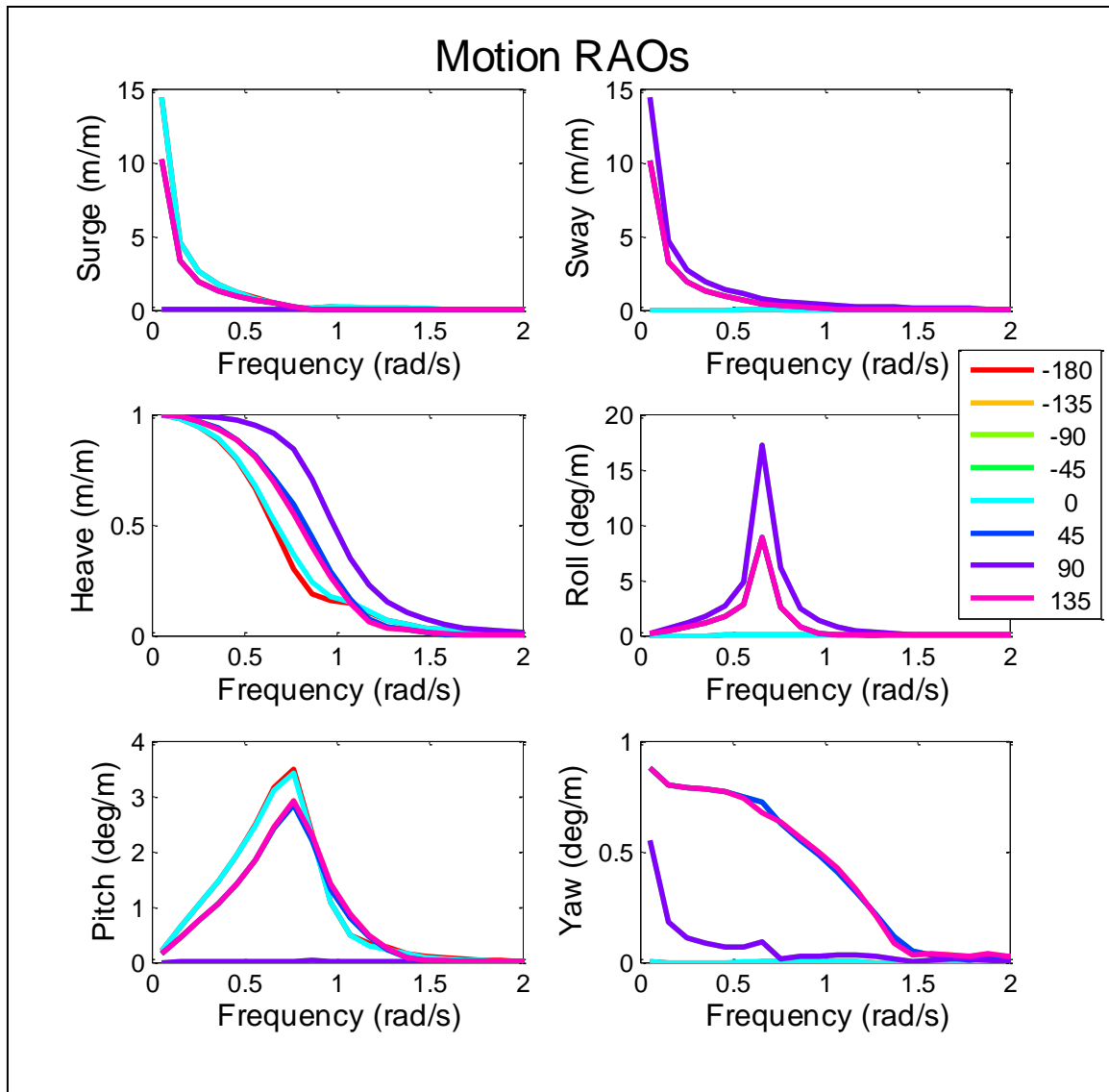


圖 118 船體運動 RAO

加速度 RAO 計算：

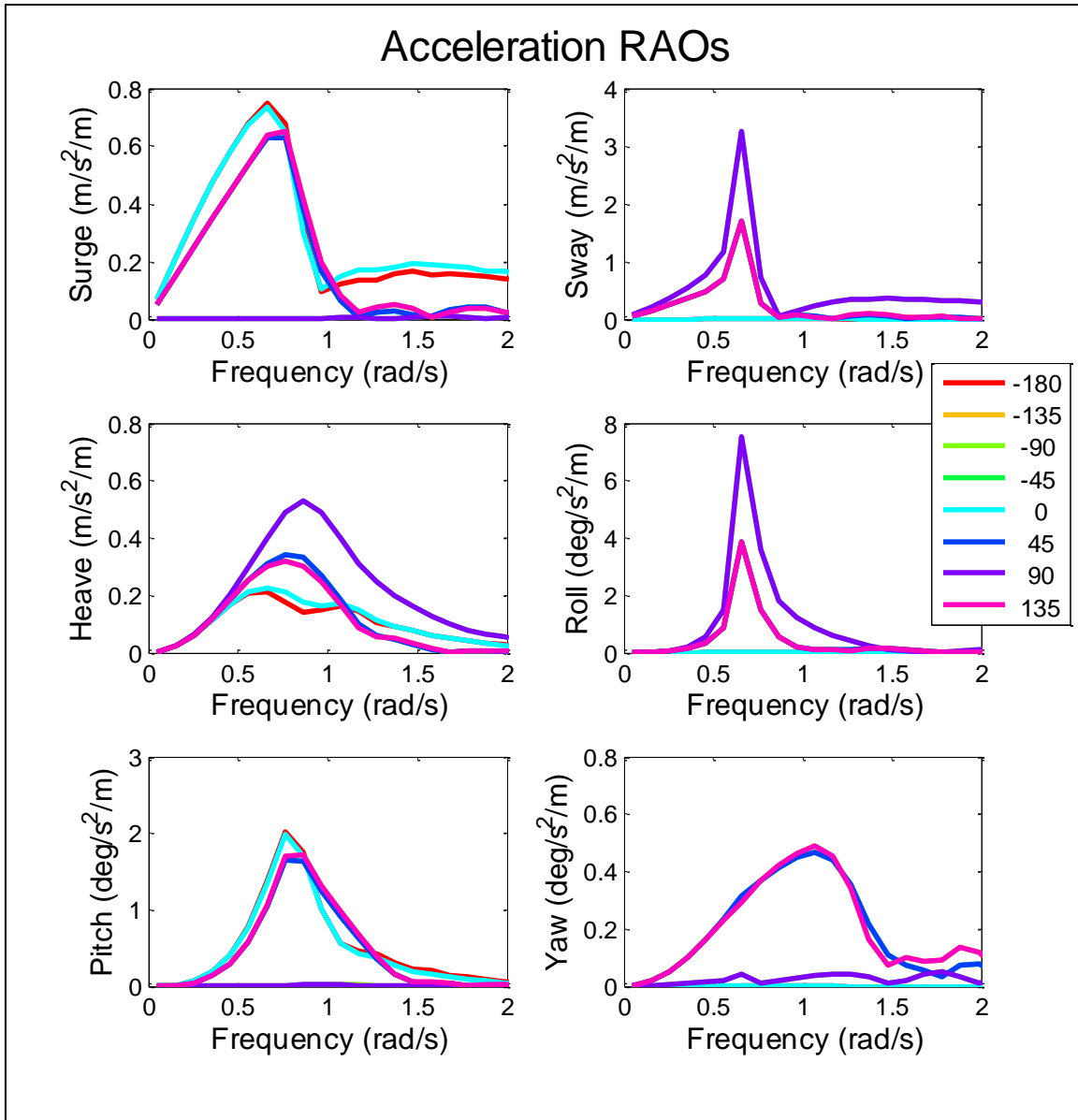


圖 119 船體加速度 RAO

- 運動量計算結果

將船體位移與加速度 RAO 與設計海況之有義波高 2m，尖峰週期 $5.1 \leq T_p \leq 7.75$ 秒，JONSWAP 波譜疊加計算，位移與加速度響應結果分別如錯誤! 找不到參照來源。和錯誤! 找不到參照來源。，橫軸為尖峰週期，縱軸為位移或加速度方均根值(RMS)，同 4.1.2 節所說明，由結果可知 Roll RMS 最大為 3.75 度，Pitch RMS 最大為 0.96 度。

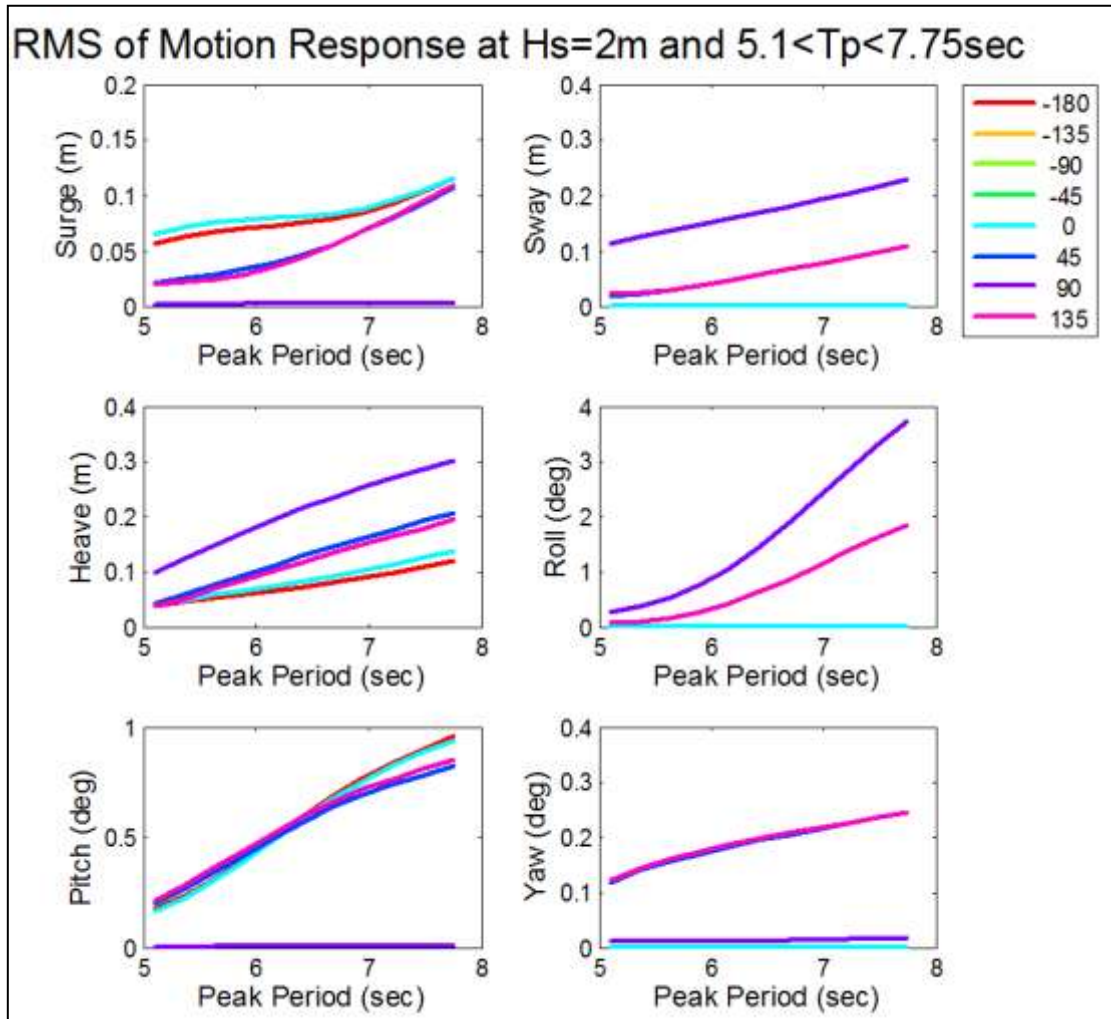


圖 120 設計海況時，船體運動響應之方均根植

- 加速度計算結果

將船體加速度 RAO 與設計海況波譜疊加計算，船體加速度量以方均根值(RMS)表示，如錯誤! 找不到參照來源。，其中 Heave 方向加速度 RMS 最大為 0.21m/s^2 。

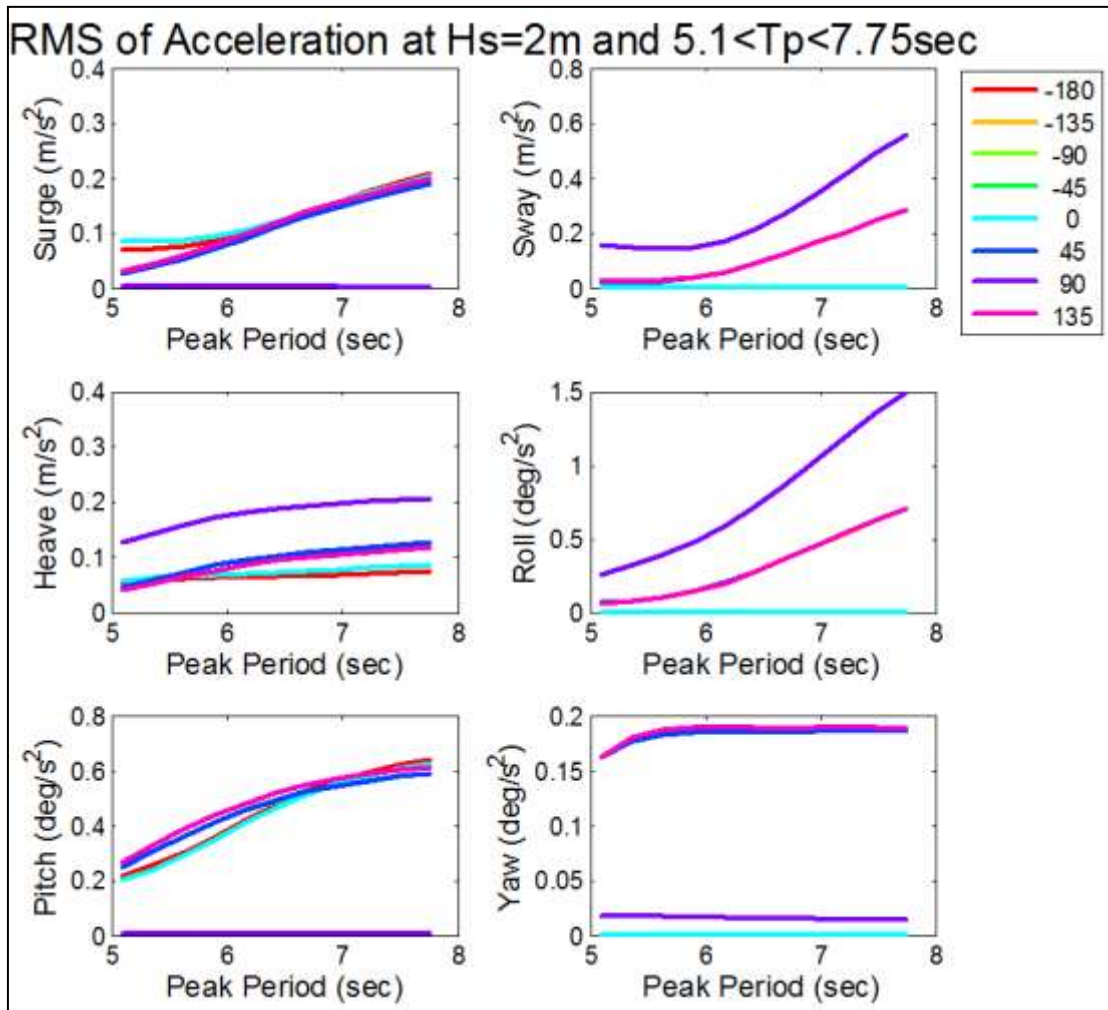


圖 121 設計海況時，船體加速度響應之方均根植

- 水動力計算運動結果整理

依上述計算結果，整理 Roll、Pitch 和 Heave 的最大方均根(RMS)值與最可能發生之極值為：

	Single Amplitude		Heave (m/s ²)
	Roll (deg)	Pitch (deg)	
RMS	3.75	0.96	0.21
MAX	13.95	3.56	0.78

GL Noble Denton 規範預設值如下表所示。計算之運動響應值都小於法規預設值。

	Case	LOA (m)	B (m)	L/B	CB	Full cycle Period (secs)	Maximum		
							Single Amplitude		Heave (g, g=9.81 m/s ²)
							Roll (deg)	Pitch (deg)	
Default	6	73	38	1.92	0.96	10	25	25	0.2
Calculated						5.1~7.75	13.95	3.56	0.08

假設波高和運動量呈線性關係，可得有義波高在 3.58m 時計算值會超過法規預設值。

- 國內主要運輸船舶運動安全評估

錯誤! 找不到參照來源。及錯誤! 找不到參照來源。分別為國內主要駁船與自升船能量列表，皆無自航能力，需仰賴拖船拖拉，用於運輸海底基座、風力機及打樁，能量堪用，但用於安裝海底基座、風力機，則需經改裝，甚至新建。

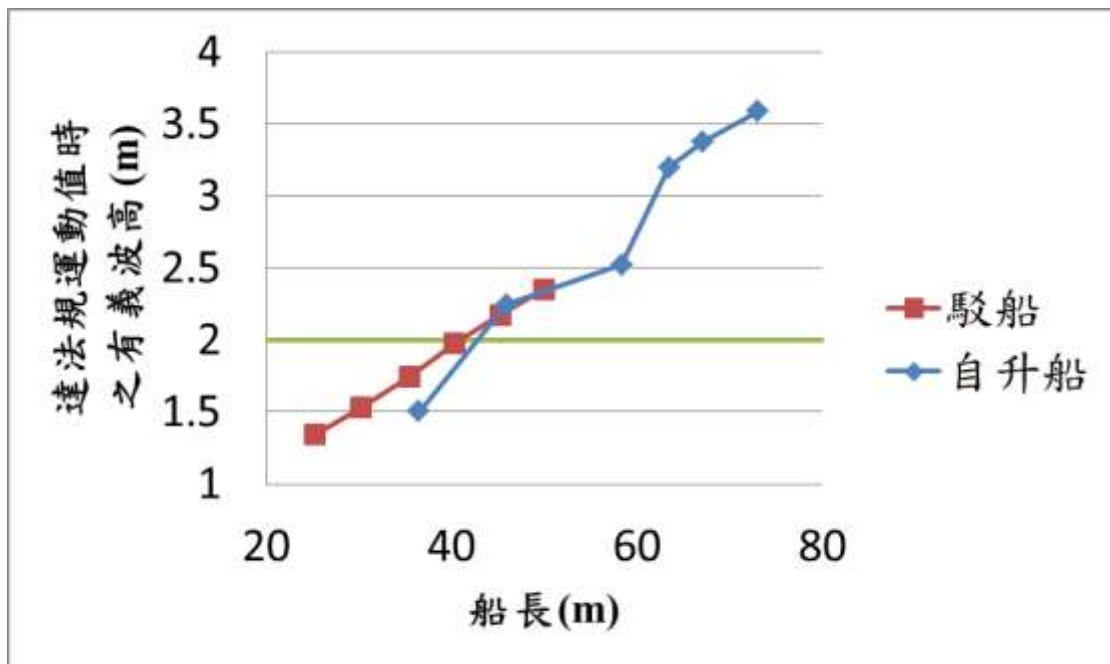
表 80 國內駁船能量

船名	規格							船齡	船主
	噸位 (T)	長 (M)	寬 (M)	深 (M)	吃水 (M)	航速 (kn ot)	功能		
合隆 201 號	760	49.8	12.4	4.7	4.0 4		開底駁船 淨噸位 638T 受泥量 1,000m ³		樺棋營造股份有限公司
昭伸 三號	543	43.89	15.2	3.0 5			多用途工作船 載重噸 1,280T		昭伸企業股份有限公司
昭伸 七號	407	36.0	15.0	2.4			多用途工作船 載重噸 745T		昭伸企業股份有限公司
昭伸 九號	492	48.0	13.0	2.8			多用途工作船 載重噸 625T 配備 PC-1600 挖土機		昭伸企業股份有限公司
慶富 二號	600	30	14.0	2.8				19	慶富造船股份有限公司
基 430	261	28.8	12.0	2.9	1.6 5		載重 499.1T		基隆港務局

表 81 國內自升平台能量

船名	規格							船齡	船主
	噸位 (T)	長 (M)	寬 (M)	深 (M)	吃水 (M)	航速 (kn ot)	功能		
宏富號	428	36.0	22.0	3.0			承載力 1,000T 定位樁: (直徑)1.5m× (長度)22m		宏華營造股份有限公司
榮富號	1,575	70.0	22.0	4.0			載重 7,124T 甲板面積 193m ²		宏華營造股份有限公司
海岸 1 號	740	48.0	18.0	3.0			淨噸位 222T 樁腳長 30m 工作水深限 15m 工作浪高 12m 工作風速限 6 級 工作水流限 2.5 節		樺棋營造股份有限公司

錯誤! 找不到參照來源。中的駁船船長範圍為 28~50m，錯誤! 找不到參照來源。的自升船船長範圍為 36~70m。依法規預設值區分，駁船屬於錯誤! 找不到參照來源。中的情境四，即 Roll 為 25 度，Pitch 為 15 度，Heave 加速度為 0.2g。自升船屬於情境六，即 Roll 為 25 度，Pitch 為 25 度，Heave 加速度為 0.2g。負載配置方面，依上節計算之船長 73m 自升式平台船推估各尺寸之負載配置，並由上節船體運動分析方法計算駁船和自升船各尺寸之運動量達到法規預設值時之有義波高，結果整理如錯誤! 找不到參照來源。。



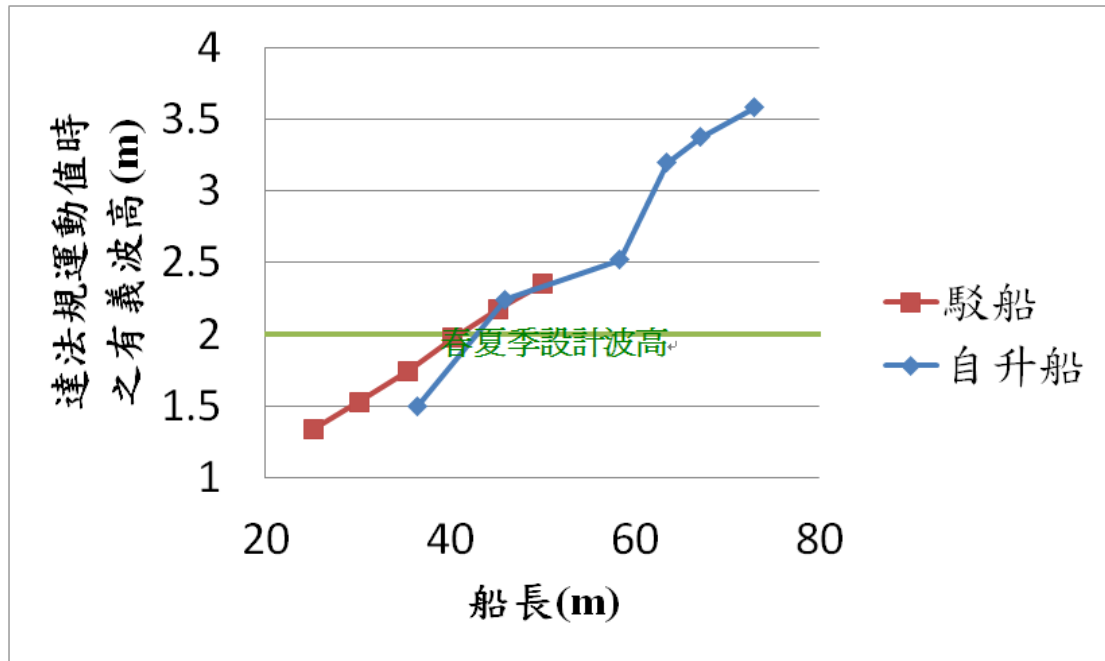


圖 122 主要運輸船舶之運動安全評估

錯誤! 找不到參照來源。中橫軸為船長尺寸，縱軸為船舶運動達法規值之有義波高，紅線為駁船，藍線為自升平台船，綠線為台灣西部海岸春夏季(4~8月)工作船常用之設計波高。40m 以上的運輸船在此設計條件較為可靠，40m 以下之運輸船則需注意工作時之海況。

■ 甲板上浪模擬說明

測試驗證模型資料如後所述，船模之主要尺寸如**錯誤! 找不到參照來源。**所示，船模壓載船況資訊如**錯誤! 找不到參照來源。**，船模長度為 3.5 公尺，重量約為 391 公斤，垂向重心約 0.453 公尺。而模擬條件如**錯誤! 找不到參照來源。**所示，波浪條件是波高固定 0.14 公尺、波長船長比分別為 1.0 及 1.2 的線性波。運動模擬也就是指船體位置會有六個自由度的變化，因此計算需要在每次疊代過程中進行網格自動重建，所以若是網格太粗會無法正確捕捉船體變動量，根據經驗網格大小需小於船長的 1/100；但是這樣會造成計算時間相當冗長，所以我們採用重疊式網格 (overlap grid) 的技巧，僅在船體附近採用小於船長 1/100 的網格，而在其他地方使用較粗的網格以節省計算時間，內層網格間距為 0.025 公尺，外層為 0.1

公尺。至於邊界條件則是依實驗水槽尺寸來設定模擬水槽情況，其中水槽深為 3.5 公尺、水槽寬度為 8 公尺、上下左右設定為不可穿透之壁面條件，而船艏前方為波浪入流條件，另船艉後方為一般出口設定。

表 82 船模主要尺寸

全長	3.500m
模寬	1.259m
模深	0.245m
設計模吃水	0.204m

表 83 船模壓載船況資訊

重量	約 391 Kg
排水體積	約 0.391 m ³
縱向重心(原點為 Fr. 0)	約 1.671 m
垂向重心(原點為 Base Line)	約 0.453 m
船艉模吃水	約 0.120 m
船艏模吃水	約 0.086 m
船舳模吃水	約 0.103 m

表 84 數值模擬條件

物理量 項次	波高(m)	船速(m/s)	波長船長比	波頻(rad/s)
1	0.14	0.00	1.0	4.19
2	0.14	0.00	1.2	3.83
3	0.14	0.41	1.0	4.19
4	0.14	0.41	1.2	3.83
5	0.14	0.68	1.0	4.19

6	0.14	0.68	1.2	3.83
---	------	------	-----	------

在模式模擬過程中，將縱移運動鎖定，如此才不會讓船因流體運動移出計算域外造成問題，經過初步分析我們可以得到在沒有船速的狀況下船舶的起伏、縱搖隨時間變化的關係圖，如**錯誤! 找不到參照來源。**及**錯誤! 找不到參照來源。**所示，我們可以發現起伏變化約在正負 2 公分之間、縱搖變化在正負 3 度之間，對於施工船這種方塊係數超過 0.9 的船舶來說，算是相當合理，而此時並沒有發生甲板上浪，如**錯誤! 找不到參照來源。**所示；而實驗的結果也是無甲板上浪的情形，故模擬與實驗相符合。

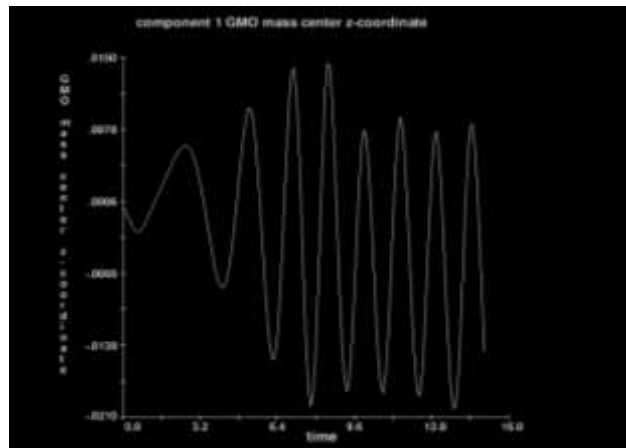


圖 123 重心起伏運動隨時間變化圖

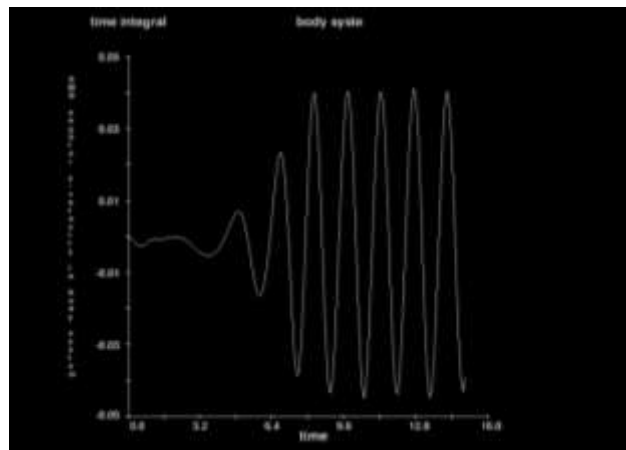


圖 124 重心縱搖運動隨時間變化圖

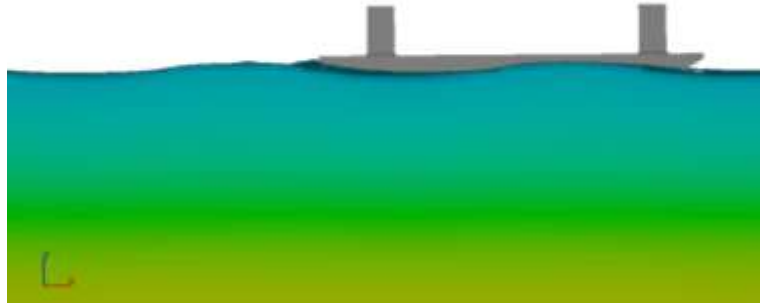


圖 125 甲板無上浪(船速度為 0)

其次改變模擬船速 0.41 及 0.68m/s，發現在波長船長比 1.0 及 1.2 的狀況下，僅有船速達到 0.68m/s 才會發生甲板上浪的問題，也就是依表 5-4 之模擬設定，僅有項次 5 及 6 的模擬案例才會發生甲板上浪的問題。在此選定項次 5 (波長船長比 1.0) 的設定進行模擬結果說明，項次 6 (波長船長比 1.2) 例子不再贅述；當船速 0.68m/s 時 (對應到實船為 5 節，是這艘施工船設計的最高船速)，此時波浪與船舶的遭遇頻率為 0.86 Hz，依據船舶中心對這艘施工船進行過運動反應因子 (Response Amplitude Operator, RAO) 的頻域分析 (如**錯誤! 找不到參照來源。**所示)，可以發現其縱搖最大變化的頻率與此時接近，在這種狀況下是最容易產生甲板上浪的狀況，果然分析結果如**錯誤! 找不到參照來源。**所示在船艙處有甲板上浪的現象發生。將甲板上浪時序列圖繪製成**錯誤! 找不到參照來源。**，其每張圖時間間距為 $\Delta t=0.1$ 秒，順序以阿拉伯數字編號，在第 1 及 2 號圖，此時波浪與船尚未遭遇，由 3 號圖可以明顯看出甲板上浪的現象，**錯誤! 找不到參照來源。**可視為其側視圖；而從其餘號圖可以發現當波浪上浪後，水會往船艙方向流動，不僅會造成甲板溼滑，更有可能會威脅船上人員之安全，必須謹慎小心。

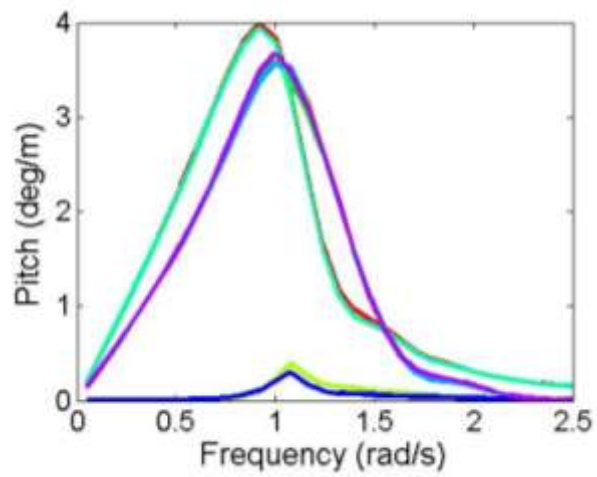


圖 126 不同頻率對縱搖的影響

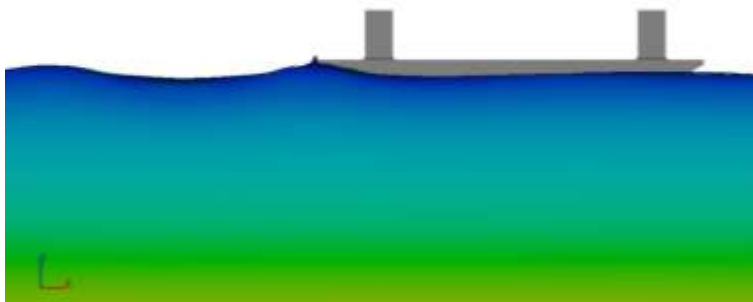
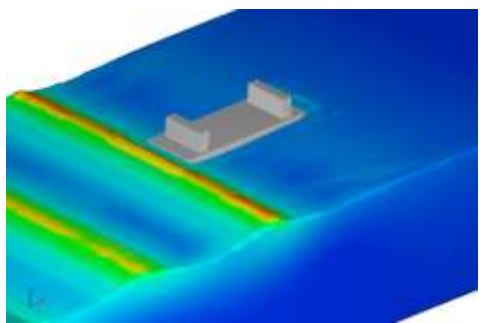
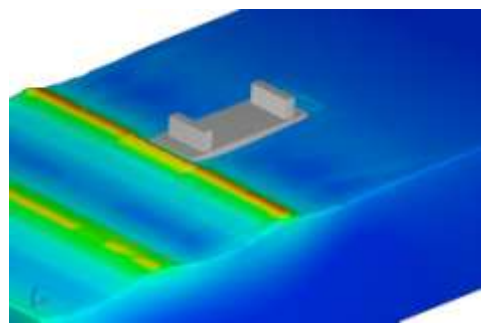


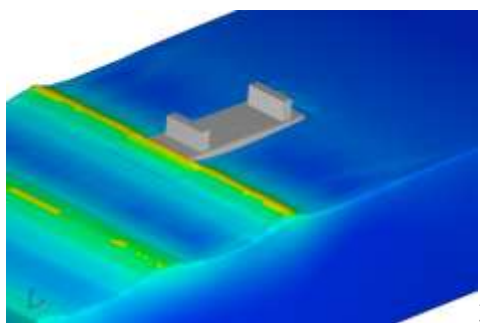
圖 127 甲板上浪示意圖



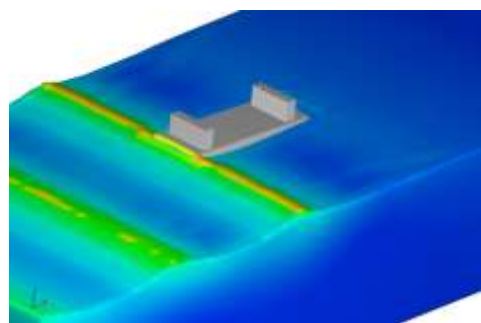
1



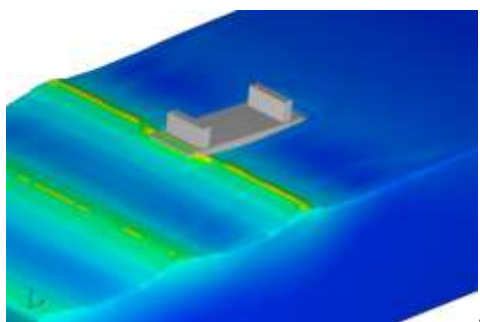
2



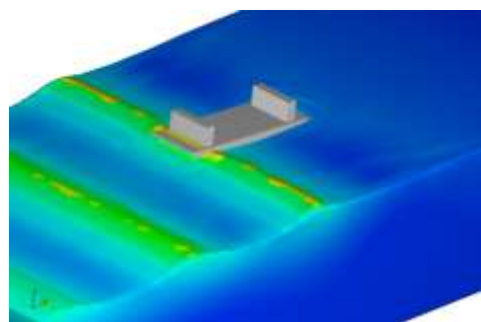
3



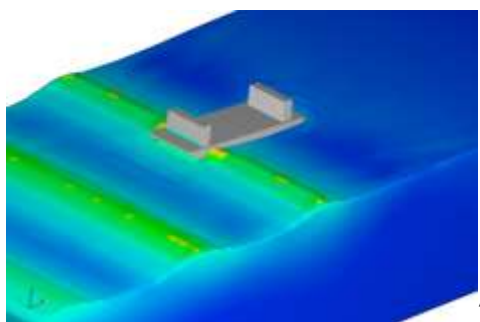
4



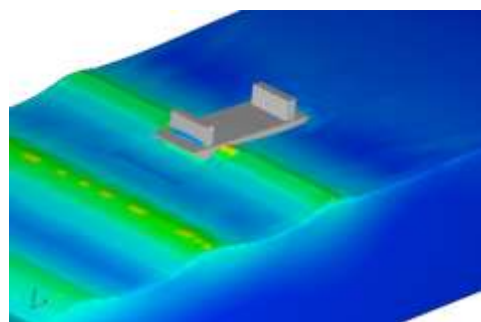
5



6



7



8

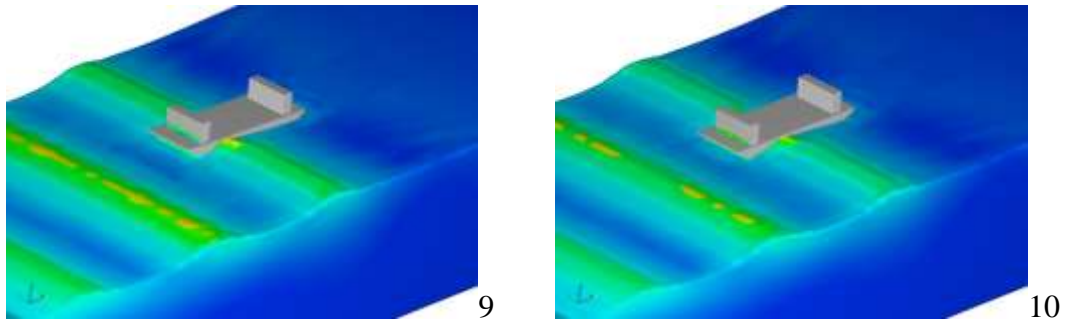


圖 128 甲板上浪時序列圖(時間間距 $\Delta t=0.1$ 秒)

2、研發技術之實際應用情形

離岸風場海事作業，除因距基地較遠、不易補救，而可能延緩施工時程外，相關機具之動員費用、時程與檔期等，都會增加建置成本；如有作業安全上的疏失，甚或造成人員傷亡，最終可能會導致停工的不良後果，所以，安全為海事工程作業之先決條件；國內尚未建立完整之海事工程產業，離岸海事工程的實績寥寥可數，且不具跨國作業之能力，故以往均未被要求所使用之施工船舶或機具需通過認證，更遑論安全評估規範的建立。

國內欠缺長期連續性的西部風場位址之海氣象觀測資料，作為相關設計及安全評估的依據，其中波浪對海事工程的影響尤大，因此亟需透過波浪重現技術，重建開發風場過去波浪資訊進行相關分析，未來不僅可提供風機及基礎設計參考，並可供海事施工船隊進行安全評估。

在建置示範風力機時，預期國內尚缺乏自升式安裝船等工程船舶，需運用國內既有船舶，因此發展船舶適用性評估技術益顯重要，除可協助國內將海事施工業者對其所規劃之海事施工及營運方式，進行符合國際規範之認證評估，亦可使廠商佈局國內市場外，刺激國內產業需求，帶動海事施工軟硬體的成長；另外對於國外市場之拓展及切入國際供應鏈做好準備，以從中發展我國之海事工程產業。

本計畫所開發之技術，將應用至國內海事工程廠商，目前已有海歷企業有限公司委託本中心進行施工船之改裝設計，將依據海事施工安全評估之標準進行規格訂定，本技術服務案之委託金額為 37.8 萬元；另外，中鋼運通公司預計委託本中心進行施工船運輸過程之海固評估，宏華營造則欲委託本中心對其自升式駁船進行運動性能評估，以確認其於離岸施工之適用性，兩案均將於本年

度下半年進行。

3、分包研究計畫執行說明

(1) 海事施工作業準則與安全評估研議

離岸風力發電機組建置構件複雜，海事工程所牽扯之層面甚廣，且我國尚無相關開發離岸式風力發電廠之施工準則可供參考使用。緣此，為提升國內離岸風力發電之施工及管理的自主技術能量，應建構符合台灣海域環境之施工作業準則。

為支援船舶中心執行離岸風場作業安全評估技術開發計畫之需求，本分包計畫以海事工程作業準則為研究主題，擬對離岸風場海事施工安全作業進行一有系統分析，藉由先進國家或認證單位之相關海事工程作業準則、國內現行法規規定，充分將台灣環境及產業能量納入整合規劃，綜合研析適宜台灣海域環境之海事工程作業準則並建立安全評估因子，同時也協助船舶中心，針對海事工程作業準則進行運用與推廣，可供相關海事工程業者施工參考，以提升台灣自主之離岸風場施工安全管理能力，亦做為後續推動本土化海事工程施工規範的基石。

計畫執行成果包括：

1. 完成先進國家或認證單位海事工程作業準則研析

期末階段補充美國 ABS(2010)規範要點及可借鏡處研析，已完成挪威、德國、美國及中國等相關規範或準則的規範目的、適用範圍等彙整，並將各規範依照行政要求、設備要求、技術要求及安全管理要求歸納，尤其在技術層面特別針對運輸、吊裝、打樁及固著等施工階段，建議各規範值得借鏡處。

2. 研析海事工程施工安全評估因子

參考一般營建工程及特殊專案工程在施工安全管理之經驗，進行離岸風電海事工程進行初步危害分析、施工災害分析，歸納運輸、吊裝、打樁及固著等施工階段的風險類別、風險因子及可能之災害狀態；綜整兩次海事工程專家諮詢會議的意見予以回饋，最終完成海事工程致災影響因子魚骨圖。

3. 協助研擬海事工程作業施工準則

與船舶中心討論後達成共識，離岸風電施工作業準則不針對特定形式，內容以一般性的注意事項為主，針對技術面，研擬條列式之離岸風電

施工作業準則。研究成果分為一般規定及分項作業準則，重點分別為以離岸風電施工相關項目予以研擬通用性規定共 7 點，包括施工作業前的準備與基本安全需求等；另針對運輸、吊裝、打樁、固著等分項作業，研擬分項作業的注意事項，內容包括工作企劃及施工中的技術性要求。

(2).台灣海峽波況十年重現分析

為了提供三座示範風場過去十年波浪模擬資料，本計畫進行「台灣海峽波況十年重現分析」委託財團法人成大研究發展基金會進行分包研究，使用 SWAN 數值模式並以氣象局風場模式作為輸入條件，進行過去十年台灣海峽波況重現，並利用現場觀測資料進行波浪模式中參數之率定與驗證，進行模式最佳化。隨即以最佳化之 SWAN 波浪數值模式模擬台灣海峽歷史波浪資料，又為了準確計算近岸波浪，模擬波浪過程中應用巢狀嵌合運算技巧。本研究計畫採用巢狀網格的進行波浪模擬，由深海計算到近岸共分為二層，深海計算範圍為北緯 16 度至北緯 28 度，東經 112 度至東經 126 度，網格解析度為 0.2 度，其中第二層計算範圍為北緯 22 度至北緯 27 度，東經 117.5 度至東經 122.5 度，網格解析度為 0.05 度。

因本計畫著重於規劃中的苗栗及彰化離岸示範風場的海況分析，因此模式以台灣海峽的氣象局新竹資料浮標站和海洋中心彰濱資料浮標站一年觀測資料(2012/8~2013/07)進行 ARS 法率定波浪模式參數值後，再以新竹、澎湖及彌陀測站 6 個月觀測資料進行相關係數分析(2013/8~2014/1)，結果顯示率定後的 SWAN 波浪模式與實測波浪間呈現高度相關(CR 大於 0.8)。依前述結果推論，分包計畫建置之 SWAN 波浪模式可合理推算台灣海域歷史海氣象資料，但是因為模式限制問題，模式模擬結果明顯比觀測值偏低，故引用研究結果時需一併考量安全係數問題。選定三座示範風場位址(台電、上緯及永傳風場)，輸出 2004 年 6 月至 2014 年 7 月歷史波浪模擬結果(缺 2011 年 11 月，函文經船舶中心同意，模擬總月數資料滿足十年長度)，並將逐時波浪資料送交船舶中心進行後續相關統計分析。

4、技術引進計畫執行說明

本計畫無技術引進項目。

(二) 實際進度與預定進度比較

工作項目	工作比重 (%)	工作進度 (%)	年 月	103年												
				1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1.分項計畫：離岸風場運輸與吊裝作業安全評估技術開發																
1.1 離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發	57															
(1) 收集離岸風場運輸船舶與吊裝機具之相關安全法規	預定進度	■■■■■ A1-1														
	實際進度	■■■■■														
(2) 進行運輸船舶於裝載風機元件時靜穩度分析	預定進度	■■■■■ A1-1														
	實際進度	■■■■■														
(3) 進行運輸船舶於港邊吊裝風機元件時之動穩度評估	預定進度	■■■■■ A1-2														
	實際進度	■■■■■														
(4) 針對離岸風機重要元件進行吊裝動態分析技術	預定進度	■■■■■ A1-3														
	實際進度	■■■■■														
(5) 吊裝過程吊點處有限元素結構強度分析	預定進度	■■■■■ A1-3														
	實際進度	■■■■■														
(6) 建立對離岸風機重要元件進行施工船舶選用、船舶裝載評估及吊裝流程規劃技術	預定進度	■■■■■ A1-4														
	實際進度	■■■■■														
(7) 期末報告	預定進度	■■■■ A1-4														
	實際進度	■■■■														

1.2 離岸海事施工 船舶運動安全評 估技術開發	43																				
(1)SWAN 模式 經 驗參數率定	預定進度		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	A2-1
	實際進度		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(2) 示範風場鄰近 海域資料收集與 初步分析	預定進度		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	A2-1
	實際進度		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
(3) 模式推算與實 測浮標波浪資料(3 測站)之校驗分析	預定進度																				A2-2
	實際進度																				
(4) 示範風場鄰近 海域觀測資料收 集與分析	預定進度																				A2-2
	實際進度																				
(6) 國內主要運輸 船舶之運動性能 分析	預定進度																				A2-3
	實際進度																				
(7)3座示範風場過 去十年歷史波浪 模擬	預定進度																				A2-3
	實際進度																				
(8) 示範風場波浪 統計分析	預定進度																				A2-4
	實際進度																				
(9) 施工船舶運輸 安全作業之運動 性能評估技術	預定進度																				A2-4
	實際進度																				
(10) 期末報告	預定進度																				A2-4
	實際進度																				
合 計	100	預定累計																			
			25%		50%		75%		100%												

(三) 查核點說明

分/子項計畫名稱	預定完成日期	查核點概述	執行情形
1.離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發	103年 3月 A1-1	(1)收集離岸風場運輸船舶之相關安全法規，含ABS、DNV、GL等至少3種不同國際標準。 (2)完成運輸船舶於裝載風機元件時靜穩度分析，乾舷需大於船長的百分之一，且船舶定傾高度(GM)需大於1公尺。	<ul style="list-style-type: none"> 已針對ABS、DNV、GL等在海事工程方面之準則進行收集與研討。 進行100 MW等級離岸風場開發之施工船種類與規格等資料收集，以做為運輸、吊裝評估技術之分析標的。 完成收集IMO在穩度方面之需求與研討
	103年 6月 A1-2	(1)收集歐洲已開發離岸風場與國內現有之吊裝機具相關規格。 (2)完成運輸船舶於港邊吊裝3.6 MW以上大型風機元件時之動穩度評估，不同吃水和載重配置其扶正力矩面積需大於1.3倍的傾覆力矩面積。	<ul style="list-style-type: none"> 已收集DNV、GL及Nobel Denton出版之吊裝機具相關規格。 完成3.6 MW以上風機元件預組模式與重量資料收集，並以一73 m之自升式平台施工船搭載兩具3.6 MW風機為例，其乾舷為2.8 m，定傾高為31 m。 本船的泛水角為25度，故需計算橫搖0度到25度間扶正力矩的面積，以及最大傾覆力矩(吊車臂長70 m*風機機艙240 ton)的面積，相除為1.73大於法規要求的1.4。
	103年 9月 A1-3	(1)針對離岸風機重要元件進行吊裝動態分析技術，以國際法規現有之DAF為基準，使動態分析後之系統要求降低20%。 (2)完成吊裝過程吊點處有限元素結構強度分析。	<ul style="list-style-type: none"> 以一安裝於45 m水深之650 ton套管式水下基座為例，結合水動力分析吊裝過程之動力負荷放大因子(DAF)，相較於Noble Denton簡算方法，有效減低DAF值達20%。 針對吊點處環扣進行有限元素模型建立與分析，確認所探討環扣

分/子項計畫名稱	預定完成日期	查核點概述	執行情形
			結構因應 Noble Denton 需求標準之適用性。
	103 年 12 月 A1-4	(1)開發海上吊裝規劃技術，使吊車於海上可在風、波浪、海流等因素影響下，安全平穩的進行吊裝作業。 (2)建立對 3.6MW 以上之離岸風機重要元件進行施工船舶選用、船舶裝載評估及吊裝流程規劃技術。	<ul style="list-style-type: none"> •已建立符合海事擔保調查需求之吊裝作業評估能力，涵蓋空中吊裝、入水等過程，動態負荷分析考慮波浪、波擊等水動力效應，並據以進行結構、索具結構之評估。 •完成裝載、吊裝作業安全評估所需分析項目與分析流程建立，並以 3.6 MW 以上之裝載與水深達 45 m 之基座為例進行分析驗證。
2.離岸海事施工船舶運動安全評估技術開發	103 年 3 月 A2-1	(1)完成 SWAN 模式經驗參數率定(以至少 1 年的實測資料進行參數率定)。 (2)收集示範風場鄰近海域資料收集與初步分析。	<ul style="list-style-type: none"> •3 月底已完成模式驗證。 •針對苗栗及彰濱海域進行波浪、海流及風等資料收集；包括交通部氣象局、港研中心及經濟部水利署相關測站及研究報告。
	103 年 6 月 A2-2	(1)完成模式推算與實測浮標波浪資料(3 測站)之校驗分析。 (2)完成示範風場鄰近海域觀測資料收集與分析。	<ul style="list-style-type: none"> •已完成 SWAN 模式經驗參數率定(氣象局新竹、澎湖及彌陀等 3 測站)，以確保及證明模式精確度。 •6 月中旬完成示範風場鄰近海域相關資料分析，針對新竹浮標及海洋中心彰濱浮標波浪資料進行統計分析，明瞭示範風場海域特性，作為安全評估相關依據。
	103 年 9 月 A2-3	(1)完成國內主要運輸船舶之運動性能分析。 (2)完成 3 座示範風場過去十年歷史波浪模擬。	<ul style="list-style-type: none"> •完成國內主要運輸船舶之運動性能分析。 •完成 2004/6~2014/7 年台灣海域波浪模擬，輸出三座示範風場波浪資料進行統計分析，可提供開

分/子項計畫名稱	預定完成日期	查核點概述	執行情形
			發單位及有意願之海事工程廠商參考。
	103 年 12 月 A2-4	(1)完成示範風場波浪統計分析。 (2)完成離岸施工船舶運輸安全作業下之運動性能評估技術。	<ul style="list-style-type: none"> •於 11 月中旬完成示範風場波浪統計及重現分析。 •以國際第三方認證規範要求下，完成驗證船隻橫搖運動甲板上浪分析，進行可工作天數探討分析。

(四) 目標達成情形

分/子項計畫名稱	計畫目標	實際達成情形	差異說明
1.離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發	<p>(1)開發運輸船舶於港邊裝載 3.6MW 以上大型風機元件過程之穩度評估分析技術，乾舷需大於船長的百分之一，且船舶定傾高度(GM)需大於 1 公尺。</p> <p>(2)開發運輸船舶於吊裝 3.6MW 以上大型風機元件過程之大傾角穩度進行計算，不同吃水和載重配置其扶正力矩面積需大於 1.3 倍的傾覆力矩面積。</p> <p>(3)開發海上吊裝規劃與動態分析技術，以國際法規現有之動態放大係數 (DAF) 為基準，使動態分析後之系統要求降低 20%。</p> <p>(4)建立對 3.6MW 以上</p>	<ul style="list-style-type: none"> •完成 3.6 MW 以上風機元件預組模式與重量資料收集，並以一 73 m 之自升式平台施工船搭載兩具 3.6 MW 風機為例，其乾舷為 2.8 m，定傾高為 31 m，符合 IMO 與 Noble Denton 規範需求。 •完成 3.6 MW 風機元件裝載大傾角穩度分析，在限制條件泛水角為 25 度下，橫搖 0 度到 25 度間扶正力矩的面積，以及最大傾覆力矩(100 knots 強風橫搖作用於吊車臂長 70 m*風機機艙 240 ton 下)的面積，相除為 1.73，大於法規要求的 1.4。 •以一安裝於 45 m 水深之 650 ton 套管式水下基座為例，結合水動力分析吊裝過程之動力負荷放大因子(DAF)，相較於 Noble Denton 簡算方法，有效減低 DAF 值達 20%。 •已建立符合海事擔保調查需求之吊裝作業評估能力，涵蓋空中 	<ul style="list-style-type: none"> •

分/子項計畫名稱	計畫目標	實際達成情形	差異說明
	之離岸風機重要元件之施工船舶選用、船舶裝載評估及吊裝流程規劃技術。	吊裝、入水等過程，動態負荷分析考慮波浪、波擊等水動力效應，並據以進行結構、索具結構之評估。	
2.離岸海事施工船舶運動安全評估技術開發	<p>(1)完成示範風場鄰近海域觀測資料收集與分析。</p> <p>(2)完成 3 座示範風場過去十年歷史波浪模擬。</p> <p>(3)完成離岸施工船舶運輸安全作業下之運動性能評估技術。</p>	<p>(1)本計畫除收集示範風場附近海域資料外，也購買氣象局新竹浮標及海洋中心彰濱浮標資料進行分析，期使能獲取較完整海域環境資訊。</p> <p>(2)以分包計畫引入學界發展之 SWAN 波浪模式，完成台灣海域過去十年(2004/6~2014/7)波浪歷史資料重現，有助於對示範風場波浪資訊的了解。</p> <p>(3)以廠商規劃中之施工船舶，配合波浪重現資料，進行施工船運動安全評估，並統計分析三座示範風場 24 小時連續可工作天數，可提供廠商進一步規劃參考。</p>	•

(五) 計畫延長或變更執行情形

無。

四、結論與檢討

本年度計畫內容包括相關於運輸與吊裝作業安全之關鍵技術開發、波浪重現技術建立與環境資訊收集分析，以輔導國內海事工程廠商提升跨國作業能力，訂定符合國內施工環境與施工能量之安全作業標準，配合國內離岸風場開發，建立自主海事工程能力及掌握最大可能比例的風場建設本土化為目標，計畫執行至期中階段，結論與檢討如下：

(一) 離岸風場施工之裝載與吊裝作業評估技術開發

1、對已開發離岸風場之運輸與吊裝機具進行調查與分析

參考歐洲具代表性之離岸風場，對其設置場址、安裝方式、基地母港、港口設施、腹地功能、運輸船隊、吊裝機具、施工機具等項目歸整，檢討標準離岸風場開發時，符合作業安全需求時所需之設備與機具規格、配合條件等資料。

選用或設計離岸風電安裝船時，主要需考量風力機之輪轂直徑、機艙尺寸、塔架尺寸以及基礎尺寸等，以做為甲板可用空間之設計依據。針對吊裝方面的需求，主要需考量風力機的機艙重量、葉片重量、塔架重量、基礎重量，以做為吊車之吊臂長度、工作半徑、安全工作負載(SWL)等規格之選用依據，另需考量風力機的輪轂高度、輪轂直徑，以做為吊車之吊勾高度及吊臂長度規格之選用依據。

安裝船的舉升能力，可由吊車之舉升高度及最大作業半徑觀察。依據 4C Offshore 的調查數據，全球離岸風場安裝船新船的舉升高度約 90~120 公尺，最大作業半徑逐漸由 20 公尺朝 30 公尺以上進展；隨著風力機各部件重量增加，安裝船之載重亦逐年提升，2011 年起漸朝 4,000 噸以上進展；過去幾年，甲板可用空間主流規格為 1,000~4,000 平方公尺，但自 2011 年起，4,000 平方公尺以上的船舶數量明顯增加。

2、針對台灣之環境條件進行所需運輸能量與吊裝機具規格之評估

根據國內海氣象與海域地質觀測資料，對可能設置之離岸風場場址，包含永傳福海風場所在的彰化縣芳苑鄉外海、上緯海洋風場所在的苗栗縣竹南鎮外海，以及台電離岸風場所在的彰化縣境內外海等，依其條件盤點國內現有基礎及風力機相關運輸/打樁/安裝之船舶及浮式起重船的能量如下：

(1) 基礎運輸船：現有能量充足，最大載重約 1400 噸。由宏華營造股份有限公

司(以下簡稱宏華)、樺棋營造股份有限公司(以下簡稱樺棋)等持有。

- (2) 打樁船：國內現有自升平台載重約 1000 噸，工作水深約 20 公尺，運用於打樁，能量堪用，但缺乏船用吊車，需加裝陸上吊車。主要由宏華、樺棋、昭伸企業股份有限公司(以下簡稱昭伸)持有，皆無自航能力，需仰賴拖船拖拉。現有浮式起重船之起吊重量僅 150 噸，基樁採用群樁的話，能量堪用，若採用單樁等，則能量不足。
- (3) 測風塔/風力機運輸與安裝船：國內西岸風場海象險峻，運輸與安裝測風塔/風力機時，採用自升式平台/船較佳。國內現有自升式平台的工作水深僅約 20 公尺，舉升能力不足，且缺乏船用吊車，用於運輸測風塔/風力機，勉強可用，但不足以用來安裝測風塔/風力機，需經改裝，甚至新建。
- (4) 拖船：現有能量充足，最大馬力達 5200HP。主要由台灣國際造船股份有限公司、樺棋、穩晉港灣工程有限公司、宏華、昭伸等持有。

3、施工船靜水與動穩度性能評估分析

本研究以船長 73 m、船重 3400 ton 之自升式平台安裝船為例，搭載 2 具 3.6 MW 的風機總重 7548 ton。在此配置下計算得到定傾高為 31 m，而此時乾舷為 2.8 m，對比 IMO 規範需求之定傾高應大於船長的 1/10(在此為 7.3 m)，乾舷需大於 1 m(在此為 2.8 m)，均符合 IMO 的規範，由於本計算例之主要尺寸與規格係參考歐洲主要施工船，故亦得知一般之運輸船在裝載風機後之靜穩度仍有相當之餘裕。

大傾角穩度方面，基本上仍遵循傳統船舶的計算方式，只有在安全值的限制上有所差別。其主要是探討傾覆力矩與扶正力矩，兩者隨者恆傾角的變化。在此，評估之對象其受風區域承受 100 knots 強風，加上吊車吊掛最重件機艙 (240 ton)時所產生的傾覆力矩，在本船設定之汎水角(downflooding angle) 25°下，在受強風吹襲及吊掛最重件狀況時，能造成最嚴重的大傾角橫搖，此時至傾斜至汎水角之扶正能量/傾覆能量=1.73，大於 IMO 所規定的 1.4，因此證明此船在吊裝過程之穩度安全無虞。

4、海事工程海上吊裝作業評估分析

本研究以一安裝於 45 m 水深之 650 ton 套管式水下基座為例，搭配 700 ton 吊裝能力之吊車，依照 Noble Denton 所需求之分析項目，吊裝結構沒入水中過程中，採用海事工程商用軟體 MOSES，進行結合水動力分析之吊裝過程動力分析，求得動態負荷放大因子(DAF)，並與 Noble Denton 與 DNV 之簡算方法進行比較，確認採用較為精確之水動力評估方式可有效減低吊裝負荷之 DAF 值。

本研究中已建立由空氣中吊裝、沒水過程吊裝等評估分析能力，從結構、索具靜態與動態負荷，至安全評估標準應用、結構強度評估均建立技術能力，對我國海事作業之事前評估、掌握工法可行性，有相當大之助益。

5、離岸海事工程施工作業準則研擬

離岸風電施工作業準則不針對特定形式，內容以一般性的注意事項為主，針對技術面，研擬條列式之離岸風電施工作業準則。研究成果分為一般規定及分項作業準則，重點分別為以離岸風電施工相關項目予以研擬通用性規定共 7 點，包括施工作業前的準備與基本安全需求等；另針對運輸、吊裝、打樁、固著等分項作業，研擬分項作業的注意事項，內容包括工作企劃及施工中的技術性要求。

(二) 離岸海事施工船舶運動安全評估技術開發

本研究收集與整理示範風場附近環境資訊，以了解風場海域特性，並可作為施工船舶安全評估資料依據，由氣象局新竹浮標長期(2005~2013 年)波浪觀測資料收集與分析，並藉由統計分析方式，以 Gumbel 及 Weibull 分布函數，針對逐月波浪資料極值，以動差法、最大概似法及最小二乘法推定相關參數，經由 K-S 檢定信心水準 95%情形下，接受所假設的 Gumbel 及 Weibull 機率函數分布型式；以觀測值與推估值進行相關係數分析，三種推定法計算之結果，發現每月均為高度相關，在逐月資料上以 9 及 10 月之均方根誤差最大，推測應與 2007 年 10 月柯羅莎及另 2008 年 9 月薔蜜颱風有關。另本文分析重現期(10, 25, 50, 100 年)下之新竹浮標月極值波高，其中 7~10 月因有颱風侵台問題，故極值波高會較大，在進行相關設計時須特別注意及考量。

而台灣海峽十年波況重現分析中，將 SWAN 模式以資料浮標(新竹及彰濱)實測資料率定參數後，並以氣象局新竹、澎湖及彌陀浮標進行相關性分析，可以發現模擬與觀測值為高度相關(相關係數大於 0.8)，並進行十年波況重現模擬與相關統計分析，以符合 DNV-Nobel Denton 準則(guidelines)建議下之海事操作回歸期分析，確認示範風場海域安全評估波高，以提供後續相關船舶靜穩度分析，讓台灣海事施工廠商真正與國際標準接軌。由於波浪瞬間變化複雜，即使預測技術已逐漸成熟，但瞬息萬變的天氣系統可能會引起大浪，使得預測很難百分之百準確，模式推估結果明顯比實測值低，故引用研究成果時須特別注意此現象。

五、參考文獻

- [1] "風力發電離岸系統示範獎勵辦法", 行政院公報, 第 018 卷, 第 125 期, 中華民國 101 年 7 月 3 日。
- [2] GWEC "Global wind Statistics-2014", 2014.
- [3] 工研院評估報告
- [4] ABS, "Guide for Building and Classing - Bottom-Founded Offshore Wind Turbine Installations", January 2013 (Updated July 2014).
- [5] DNV, "Rules for Classification of Self-Elevating Units", DNV-OSS-104, April 2012.
- [6] ABS, "Guide for Certification of Lifting Appliances", July 2007.
- [7] DNV, "Lifting Operations (VMO Standard - Part 2-5)", DNV-OS-H205, April 2014.
- [8] GL Noble Denton, "Guidelines for Marine Lifting & Lowering Operations", 0027/ND, June 2013.
- [9] DNV, "Marine Operation, General", DNV-OS-H101, October 2011.
- [10] DNV, "Marine Operations, Design and Fabrication", DNV-OS-H102, January 2012.
- [11] GL Noble Denton, "General Guidelines for Marine Projects", 0001/ND, June 2013.
- [12] BSI for Marine Operation
- [13] 中國電力企業聯合會, "海上風力發電工程施工規範", GB/T 50571-2010, 2010.
- [14] 國家實驗研究院電子報, "現地型強震即時警報系統之開發及應用", 第 13 期, 民國 100 年 04 月 15 日。
- [15] ABS, "Rules for Building and Classing-Mobile Offshore Drilling Units", 2014.
- [16] DNV, "Offshore Installation Operations (VMO Standard Part 2-4)", DNV-OS-H204, November 2013.
- [17] GL Noble Denton, "Guidelines for Marine Transportations", 0030/ND, June 2013.
- [18] GL Noble Denton, "Concrete Offshore Gravity Structure Construction and Installation", 0015/ND, June 2013.
- [19] GL Noble Denton, "Guidelines for Offshore Wind Farm Infrastructure Installation", 0035/ND, June 2013.
- [20] IMO, "Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments", Resolution A.749 (18), 1993.

- [21] HSE, "Technical Guidance on the Safe Use of Lifting Equipment Offshore", 2007.
- [22] IMCA, "Guidelines for Lifting Operations", IMCA SEL 19, IMCA M 187, October 2007.
- [23] NORSOK, "Lifting Equipment", R-002, December 2008.
- [24] BV, "Rules for the Certification of Lifting Appliances onboard Ships and Offshore Units", Rule Note, NR 526 DT R01 E, October 2011.
- [25] Lloyd's Register, "Code for Lifting Appliances in a Marine Environment", August 2013.
- [26] DNV, "Modelling and Analysis of Marine Operations", DNV-RP-H103, April 2011.
- [27] GWEC, "Global wind Statistics-2012", 2012.
- [28] Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli, "Wind-wave Prediction in Shallow Water: Theory and Applications", Journal of Geophysical Research, 86, pp. 10,961-10,973 (1981).
- [29] Goda, Y., "Random Seas and Design of Maritime Structures", Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 15, (2000).
- [30] Lee, B.C., Y. M. Fan, L. Z. H. Chuang and C. C. Kao, "Parametric Sensitivity Analysis of the WAVEWATCH III Model", Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, Vol.20, pp. 425-432 (2009).
- [31] Nobel Denton, "General Guidelines for Marine Projects", 0001/ND, 2013.
- [32] 台電公司, 「彰化離岸風力發電計畫可行性研究」, 中華民國 98 年。
- [33] 交通部運輸研究所, 「臺灣主要港口附近海域長期波浪統計特性及設計波推算之研究(2 / 4)」, 中華民國 100 年。
- [34] 交通部運輸研究所, 「台灣主要港口海域長期性海氣象觀測及資料特性應用之研究(1 / 4)」, 中華民國 99 年。
- [35] 交通部運輸研究所, 「2010 年港灣海氣地象觀測資料年報」, 中華民國 101 年。
- [36] 交通部氣象局, 颱風歷史資料庫
http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/ty_warning
- [37] 海洋風力發電股份有限公司籌備處, 「海洋竹南離岸式風力發電計畫環境影響說明書(第二次修訂本)」, 中華民國 102 年 11 月。
- [38] 經濟部工業局, 「彰化濱海工業區開發工程自然及地理背景資料手冊」, 中華

民國 85 年。

[39] 經濟部水利署，「竹苗海岸基本資料監測調查計畫」，中華民國 100 年。

[40] 經濟部能源局，「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，中華民國 101 年 7 月 3 日

[41] 財團法人船舶暨海洋產業研發中心，「兩岸快速運輸航線海況分析」，中華民國 101 年。

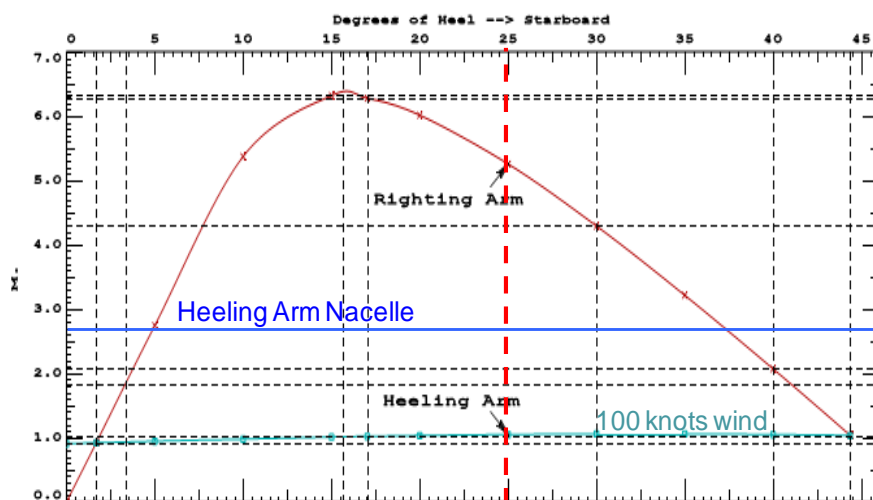
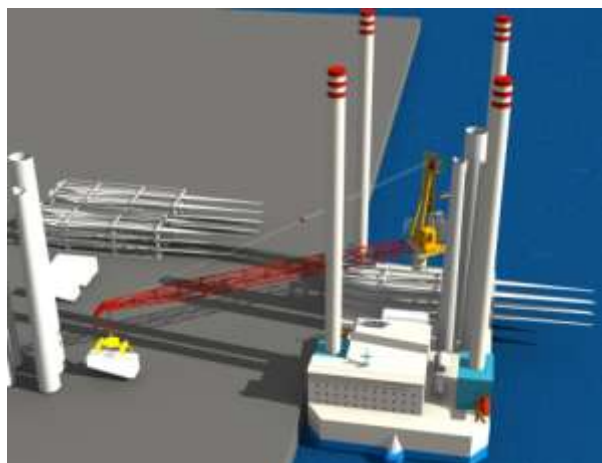
六、附件

附件一、研究成果照片及說明

1、離岸風電施工船吊裝時之大傾角穩度分析

紅線為計算例之 73 m 自升式平台安裝船的扶正力矩曲線，其紅線下面積為扶正能量，綠線為受風區域承受 100 knots 強風所造成之傾覆力矩，藍線為吊車吊掛最重件機艙(240 ton)時所產生的傾覆力矩，傾覆力矩曲線下的面積則為傾覆能量。

本船設定之汎水角(downflooding angle)為 25° ，即超過此角度後會有關鍵位置浸水之虞，因此傾斜角需低於此值；在受強風吹襲及吊掛最重件狀況下，能造成最嚴重的大傾角橫搖，此時至傾斜至汎水角之扶正能量/傾覆能量=1.73，大於 IMO 所規定的 1.4，因此證明此船在吊裝過程之穩度安全無虞。



汎水角
Flood Point = 25°

2、以 SWAN 波浪模式重現三個示範風場

2013 年全年度歷時圖如**錯誤! 找不到參照來源。**~**錯誤! 找不到參照來源。**所示，夏季波浪明顯較小，但是在 7 及 8 月時有 2 個尖峰值，對照氣象局颱風歷史資料庫，應為蘇力(SOULIK，強烈侵台路徑 2)及潭美(TRAMI，輕度侵台路徑 1)颱風的影響，相關路徑如**錯誤! 找不到參照來源。**。蘇力因路徑對於海洋風場威脅較大，因此波高(超過 4 公尺)是 2013 年度最大值，而台電風場在 2013 全年波高局部極值不超過 3.5 公尺，由模式模擬結果與觀測值相比明顯偏低，故使用上須特別注意。

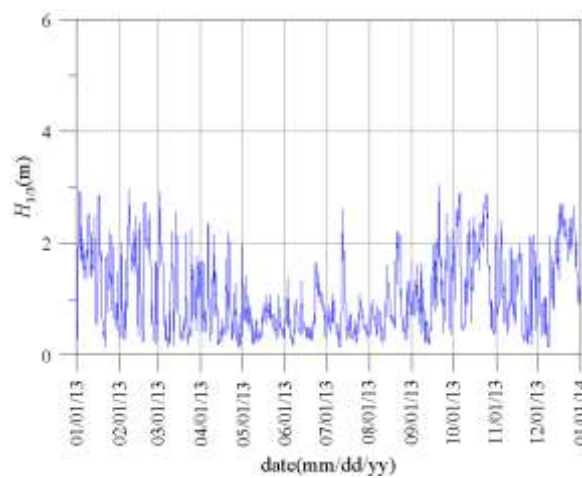


圖 129 台電彰濱南區風場 2013 年波浪模擬歷時圖

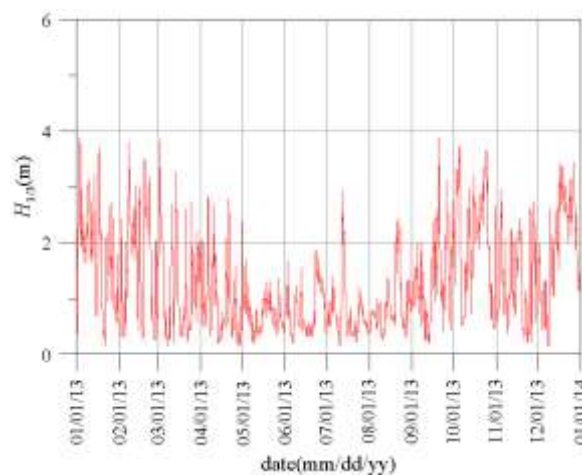


圖 130 福海風場(永傳公司)2013 年波浪模擬歷時圖

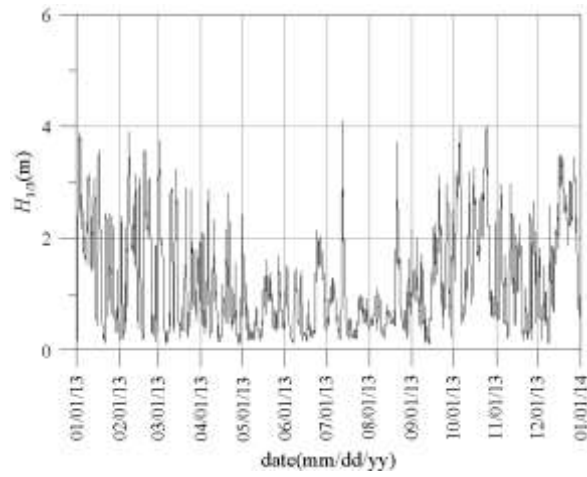


圖 131 海洋風場(上緯公司)2013 年波浪模擬歷時圖

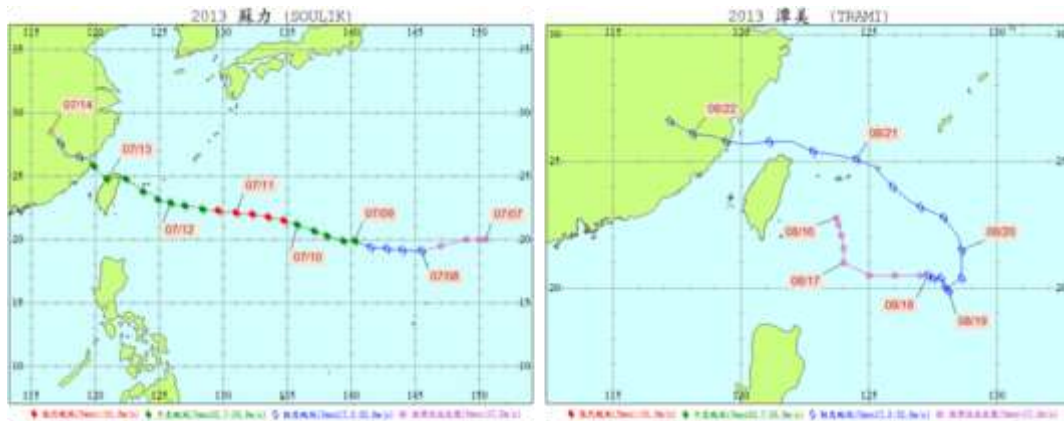


圖 132 2013 年 7 月及 8 月蘇力及潭美颱風侵台路徑圖

3、103 年 3 月 11 日，船舶中心海洋產業處周顯光處長帶隊拜訪國立臺灣海洋大學河海工程學系簡連貴教授，對如何推動本土化海事施工作業準則作法進行討論，並討論如何推動相關產業建立。

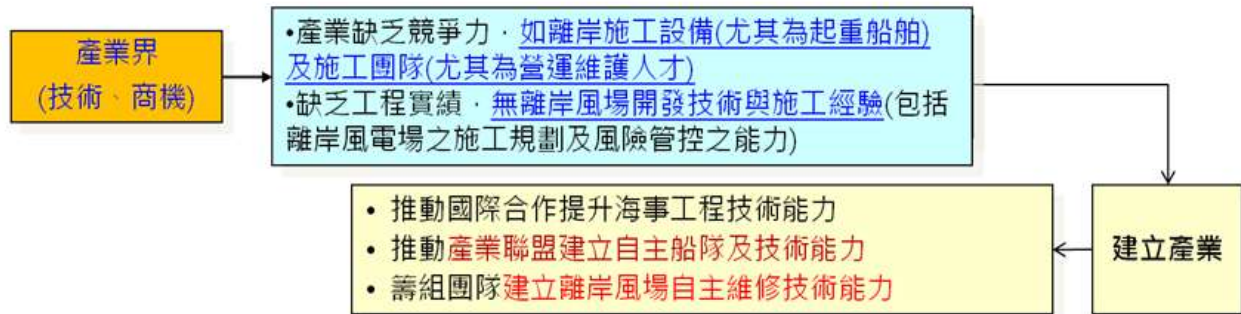


圖 133 研究團隊拜訪海大河工系會後留影
(周顯光處長右 3，簡連貴教授左 3)

4、3月31日，參訪施工安全廠商-宏華營造，因應台電通霄電場擴建計畫海底取排水管工程，宏華營造自建自升式平台船，取代傳統吊車船施工，命名為宏禹號。本次參訪宏禹號，了解自升系統運作原理，並對平台船操作與評估交換意見。



圖 134 研究團隊拜訪宏華營造商會後留影
(周顯光處長左下圖右 2)

附件二、分包計畫摘要說明

1、分包計畫名稱：「海事施工作業準則與安全評估研議」

離岸風力發電機組建置構件複雜，海事工程所牽扯之層面甚廣，且我國尚無相關開發離岸式風力發電廠之施工準則可供參考使用。緣此，為提升國內離岸風力發電之施工及管理的自主技術能量，應建構符合台灣海域環境之施工作業準則。

分包計畫以海事工程作業準則為研究主題，擬對離岸風場海事施工安全作業進行一有系統分析，藉由先進國家或認證單位之相關海事工程作業準則、國內現行法規規定，充分將台灣環境及產業能量納入整合規劃，綜合研析適宜台灣海域環境之海事工程作業準則並建立安全評估因子，同時也協助船舶中心，針對海事工程作業準則進行運用與推廣，可供相關海事工程業者施工參考，以提升台灣自主之離岸風場施工安全管理能力，亦做為後續推動本土化海事工程施工規範的基石。

目前已彙整能源國家型科技計畫-離岸風力主軸計畫「先導型離岸風電場海事工程規劃之研究(2 / 2)」(2013)配合離岸風電場開發，針對海事工程部分進行規範與案例之蒐集與重點，及「興達火力電廠離岸輸煤棧橋碼頭打樁工程」、「外傘頂洲離岸風速觀測塔工程」、「臺北港東 16、17 碼頭鋼管樁打設工程」等施工相關準則內容分析；本計畫後續將陸續依據本計畫此次蒐整之文獻依運輸、吊裝、打樁及固著工程，分別研析建議借鏡之內容，作為後續研擬離岸風電海事工程安全作業準則之參考。

初步危害分析之目的在於規劃初期進行危害項目的確認，並找出其因果關係，以減低細部設計或施工時發生重大危害，造成施工計畫變更、時間、人力或經費等損失，彙整相關資訊，後續將依據國內外相關施工經驗反覆檢討。

本計畫將依據國內過去海事施工經驗，依序分析離岸風電主要項目之施工災害初步分析，期中階段已規劃研析海上運輸、風機基礎海上施工、風力機組吊裝、海纜佈設及連接等工項對應墜落滾落、倒塌、開挖面崩塌、異常沉降、異常出水、感電及物體飛落等災害類型；期末階段將再依據分析結果，針對運輸工程、吊裝工程、打樁工程及固著工程，提出海事工程作業安全評估因子，作為未來進行施工規劃與管理的基礎。

2、分包計畫名稱：「台灣海峽波況十年重現分析」

依據歐洲風場開發經驗，至少需要蒐集十年海氣象資料才可決定環境資訊，

提供風場開發相關之設計及安全評估。然而，海氣象資訊因受限於現場觀測資料長度不足，無法真實呈現海氣象特性，尤其目前規劃中的苗栗及彰化離岸示範風場，並未有長達十年的觀測資料。近年諸多研究已採用數值波浪模式來彌補觀測資料不足之缺憾，並以計算所得波浪狀況描述實際海面波浪現象，進而分析海域之海氣象特性，據以提供開發商相關設計條件以保障離岸示範風場順利開發。

又由於本計畫著重於規劃中的苗栗及彰化離岸示範風場的海況分析，因此以台灣海峽的新竹資料浮標站和彰濱資料浮標站觀測資料進行 ARS 法率定波浪模式參數，參數率定前後統計誤差結果顯示參數率定後可有效改善波浪模式計算結果。為建置適用於台灣西部海域歷史波浪推算之數值波浪模式，本研究應用巢狀嵌合運算技巧以準確計算深海至近岸波浪，利用 2012 年 8 月至 2013 年 7 月長達一年之現場觀測資料，完成波浪模式參數率定。接續以 2013 年 8 月至 2014 年 1 月長達六個月的資料浮標波浪進行驗證，結果顯示率定後的 SWN 波浪模式與實測波浪間呈現高度相關。因此，在經過嚴謹的校驗程序後，本計畫所建置 SWAN 波浪模式可合理推算台灣海域歷史海氣象資料。

經過嚴謹的波浪數值模式率定及校驗程序後，分包計畫所建置 SWAN 波浪模式可合理應用於台灣海域歷史海氣象資料推算。而歷史風場蒐集及整理過程中有部分風場資料缺漏，風場缺漏期間為 2007 年 11 月 1 日 8 時~2007 年 12 月 1 日 7 時。歷史波浪推算期間為 2004 年 5 月 4 日至 2014 年 7 月 31 日，扣除風場缺漏期間無波浪資料，仍滿足十年歷史波浪資料長度。從歷史波浪模擬結果中，依船舶中心需求擷取三座示範風場波浪逐時資料，可提供海氣象相關統計及極值分析應用。由於波浪瞬間變化複雜，即使預測技術已逐漸成熟，但瞬息萬變的天氣系統可能會引起大浪，使得預測很難百分之百準確，尤其是單一模式，本研究使用之模式計算結果明顯比觀測值低，使用上須特別注意此現象。然而準確的波浪預測對離岸風場開發商及海事工程業者於海事工程施工、維護營運等作業相當重要，又目前世界各國於波浪預報作業已採用多模式系集預測方法進行波浪預報，建議未來海上作業應加入系集波浪預報工作，提高未來海象資訊之穩定可靠，增加海事工作人員之安全，進而降低營運成本。

附錄、節能與環保成效自評說明

財團法人船舶暨海洋產業研發中心在 2011 年底更名轉型後積極擴展新興海洋能源工程領域之技術發展，發展領域將包括海域結構與平台、海洋系統與裝備、離岸風電與海洋能源、海事工程與作業船舶、海域空間規劃等。針對我國離岸風電發展目標，船舶中心將整合現有產業基礎，並發展離岸風電關聯船機及浮動式風機平台之研究。

展望未來風力發電市場發展趨勢，同樣依據 GWEA 的調查與分析，未來幾年主要風電區域市場—歐洲、美國、中國大陸市場新增裝置容量成長性將趨緩，巴西、印度、加拿大、墨西哥等新興市場將成為市場成長的主要動力，但預期成長速度難以回補上述主要市場的停頓狀況；2016 年全球風力發電累計裝置容量預計可達 490 GW，約是 2012 年的 1.75 倍，2012~2016 年累計裝置容量年複合成長率約 14.8%，新增裝置容量年複合成長率約 7.3%。中長期而言，拉丁美洲、非洲、亞洲市場成長潛力較大；2020 年全球風力發電累計裝置容量預計可達 760 GW。

我國政府在黃金十年政策中，為台灣再生能源政策提出「陽光屋頂百萬座，千架海陸風力機」，預估可創造風能產業鏈高達數千億元的商機，而施工船舶機具及海事工程產業亦涵蓋其中。根據能源局的說明，我國離岸風場開發策略是先從淺海區域 (20 公尺水深以內) 推動業者設置示範風場，以 2015 年底完工共 4 部示範機組商轉為目標，待國內建立相關技術及經驗後，將採區塊開發方式來帶動大規模開發，並逐步擴展至深海區域，預定在 2020 年開發裝置容量達 600MW，在 2030 年達到 3GW。

在淺水區設置風力發電機採用在海床上打樁固定之方式，除了施工上需搭配海事工程之外，其他方面之技術與陸上型風力發電機大致相同；在歐洲丹麥、英國等已有在淺水區設立離岸型風力發電廠之經驗。然而，各國的海岸線長度、近岸區域畢竟有限，要提高風力發電的發電量，就必須擴大海上風田，因此需要往深水區域(deep water)發展。由 NREL 的研究顯示，風力發電之發展趨勢為陸上往海上、淺海至深海的發展方向。過去能源業者所裝設的風力發電機大都位於海岸邊，但是自 21 世紀以來，已有丹麥、德國和英國等先進國家開始在近海海域裝置離岸風機，雖然裝設成本遠高於陸上，但卻可省下購地的費用，又因海上風速較高，可發出更多電力，因此，成為各國競相發展的再生能源技術之一。因此相信本計對於離岸風電再生能源的相關技術與研發將對國內未來節能環保有所貢獻。