港灣季刊

（原港灣報導季刊）

第 118 期

交通部運輸研究所

中華民國 110 年 2 月

「港灣季刊」第 118 期

刊期頻率：季刊
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號
網　　址：www.iot.gov.tw
電　　話：(02)23496789
總 編 輯：林繼國
編輯委員：蔡立宏、柯正龍、蔣家榮、賴瑞應、李俊穎、林雅雯、
蔡世璿、周于楨
出版年月：每年 2、6、10 月
創刊年月：中華民國 77 年 2 月 1 日
定　　價：100 元
本次出刊：100 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
印 刷 者：九茹印刷有限公司•電話：(02)29660816
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496887
國家書店松江門市：104472 臺北市中山區松江路 209 號 1F•電話：(02)25180207
五南文化廣場：400002 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：20077000020　　ISSN：1019-2603
著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部
運輸研究所書面授權。

目　錄

一、蘇澳港防波堤沉箱圖像資料調查分析評估 ……1
洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
薛憲文　國立中山大學海洋環境及工程學系教授

二、花蓮港與蘇澳港開口胸牆防波堤沉箱維修探討 ……16
林受勳　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
羅冠顯　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
李政達　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
郭少谷　台灣世曦工程顧問股份有限公司專案經理與水利技師

三、蘇澳港及花蓮港風波條件之可工作機率探討 ……26
羅冠顯　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
陳子健　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究助理

四、結合離散小波轉換與深度學習技術預測短期風速研究 ‥41
江文山　國立成功大學水工試驗所研究員
賴志峰　國立成功大學水工試驗所技術師
黃國展　國立成功大學水工試驗所技術師
蔡宜秦　國立成功大學水工試驗所助理技術師
衛紀淮　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

五、港區風力資料品管與補遺 ……52
賴志峰　國立成功大學水工試驗所技術師
江文山　國立成功大學水工試驗所研究員
黃國展　國立成功大學水工試驗所技術師
蔡宜秦　國立成功大學水工試驗所助理技術師
衛紀淮　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

六、臺中港風力及波浪之季節變化與預報特性分析 ……59
陳昭銘　國立高雄科技大學海事資訊科技系教授
談珮華　國立嘉義大學應用歷史學系教授
蘇青和　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
劉明鑫　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳慧珊　國立高雄科技大學海事資訊科技系專任研究助理

蘇澳港防波堤沉箱圖像資料調查分析評估

洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
林受勳　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
薛憲文　國立中山大學海洋環境及工程學系教授

摘要

蘇澳港位於宜蘭縣蘭陽平原南端之蘇澳灣內，北距基隆港 50 浬，南距花蓮港 40 浬，港口中心位置為北緯(N) 24 度 35 分 60 秒，東經(E)121 度 52 分 24 秒。因應蘇澳港部份碼頭結構物損壞，本研究針對其防波堤沉箱進行水面上目視水面下攝影調查，分析颱風期間前後結構物破壞情形，研擬短期及長期的維護措施及估算工程經費，並提出沉箱式防波堤維護工法建議，以防範未然，提供蘇澳港於防波堤遭受颱風侵襲後，能有一完整的應變措施。

一、前言

蘇澳港位於臺灣東部，東臨太平洋，每年受到颱風侵襲，使得防波堤在颱風期間受波浪之作用，導致消波胸牆的破壞，防波堤受到惡劣波浪與颱風期間極端大浪的侵襲作用，造成每年必須加以維修與復建，故在蘇澳港整體規劃及未來發展，預定利用平面折繞射數值模式，評估防波堤所承受之堤址外力。

藉由堤址附近圖像資料調查分析；水面上下攝影調查作業；港區內水深背景地形調查；水面以上結構物檢測評估，以進行各項檢測成果比對，並針對沉箱安全評估探討分析等項進行蘇澳港防波堤沉箱圖像資料調查分析評估。

二、蘇澳港防波堤沉箱圖像資料調查

2.1 現況環境

本研究調查分析評估地點為蘇澳港港區內，以及南、北外廓防波堤附近海域範圍。

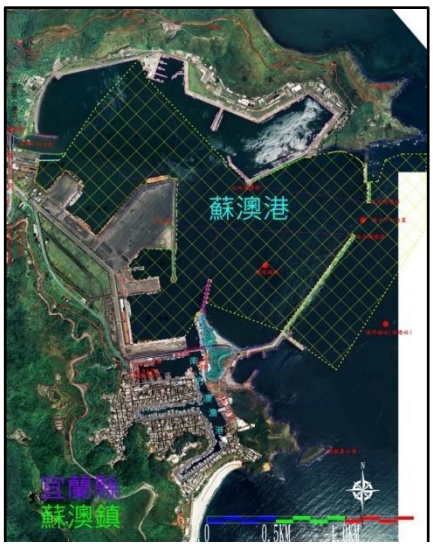


圖 1 港區內水深背景地形調查範圍(斜線區域)

範圍包含(1)南外廓防波堤：測區範圍沿著南外廓防波堤(含南突堤岸沉箱)，內外側各 50 公尺，自碼頭堤岸區，至堤頭燈塔處，測帶寬約 100 公尺，全長約 2 公里，面積約 0.2 平方公里。(2)北外廓防波堤：測區範圍沿著北外廓防波堤內外側各 50 公尺，自碼頭堤岸區，至堤頭燈塔處，測帶寬約 100 公尺，全長約 500 公尺，面積約

0.05 平方公里。其中，港區內水深背景地形調查範圍，如圖 1 斜線區域所示；堤址附近圖像資料調查分析範圍，如圖 2 斜線區域所示。

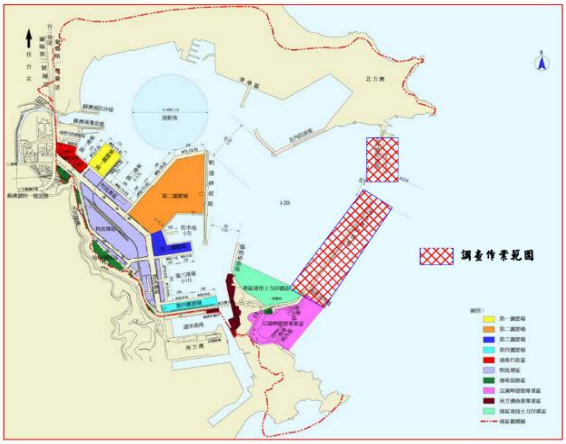


圖 2 堤址附近圖像資料調查分析範圍

2.2 蘇澳港內水深調查

1. 堤址附近圖像資料調查分析

本調查分析主要採用多音束測深系統進行施測。作業步驟除包含：事前準備工作、測線規劃、儀器檢校、儀器架設及疊合測試(patch test)外，於水深測量(測深)施測時，需再進行船隻導航及定位、水位觀測、水中聲速量測、船隻姿態角觀測等工作項目，將所有觀測資料進行內業處理與計算，才可得到歸算後的水深地形成果(成果詳如圖 3 所示)。

2. 港區內水深背景地形調查

本調查使用多音束測深系統測量蘇澳港港區內及港外至 30 公尺處水深地形(成果詳如圖 4 所示)。

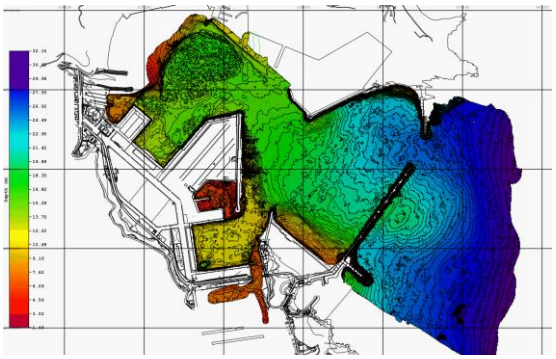


圖 3 堤址附近圖像資料調查成果

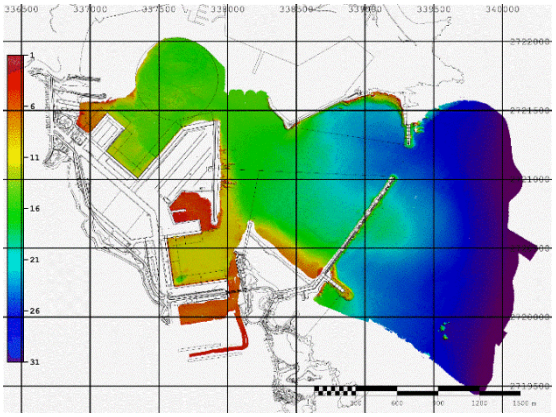


圖 4 港區內水深背景地形調查成果

2.3 水面上下攝影調查作業

於蘇澳港南、北外廓防波堤進行堤腳及堤址水下目視檢查及攝影，主要由潛水夫進行水下攝影調查作業，可即時判斷並以錄影和人工量測方式，描述堤區消波塊堆置現況。

1. 第 1 次攝影調查作業

本次攝影調查作業成果，如表 1 所示。檢查沉箱數量分別為南外廓防波堤 39 座、漁港北外堤 7 座及北外廓防波堤 12 座。防波堤沉箱編號如圖 5 所示。

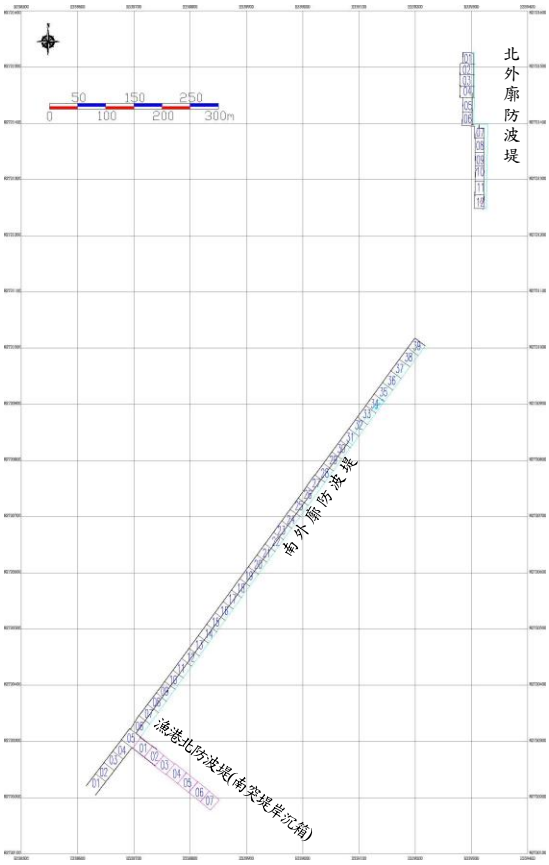


圖 5 蘇澳港防波堤沉箱編號

調查時，N12 沉箱海側水面下發現明顯橢圓形破孔，橫向長度約為 2.5m，高度約為 1m，鋼筋已明顯裸露，疑似船隻碰撞造成，水面岸壁亦發現疑似擦撞脫漆痕跡。南外廓防波堤外側 S21 沉箱外側底部(已施工修復)發現掏空狀態，長度約 3.5m，高度約 2.6m，內部縱深約為 2.5m，疑似為修復施工灌漿流失瑕疵，S23 沉箱底部發現破孔，長度約為 1.5m，高度約為 1.4m，內部縱深約為 1.5m。S05/S04 內側堤腳銜接處海床發現礫石區，疑似沉箱內部流失的礫石。

2. 第 2 次攝影調查作業

本次攝影調查作業成果如表 2，檢查沉箱數量同第 1 次作業。

調查時，N07 及 N10 沉箱已明顯曾經修復，底部較為凌亂。惟 N12 沉箱海側水面下於 108 年 3 月份發現橢圓形鋼筋裸露破孔尚未進行修復。N10 堤腳內外側海床均發現礫石區，疑似沉箱內部灌漿流失的新礫石。S19 外側沉箱底部(已施工修復)發現掏空狀態，長度約 6～8m，高度約 1.9m，內部縱深約為 3.0m，疑似為修復施工灌漿流失瑕疵。S21 沉箱底部(已施工修復)發現掏空狀態，疑似為修復施工灌漿流失瑕疵，但因安全考量，未進入施工架結構內部測量。

表 1 第 1 次水下攝影調查成果(僅標出異常處)調查日期:108 年 3 月

沉箱編號	堤腳狀況及異常說明
N02	外側護基方塊位移
N03	外側護基方塊位移
N07	沉箱外突鋼板模修補底部長約1m高約1.2m未封模 疑似兩處原破損沉箱壁
N12	沉箱壁面破損橢圓形孔長約2.5m高約1m 鋼筋裸露
S21	縫隙20cm施工修補底部明顯掏空疑似施工瑕疵
S23	沉箱底部發現破孔
E07	外堤角延伸右外側頂部損毀

註 N：北外廓防波堤
S：南外廓防波堤
E：漁港北外堤

表 2 第 2 次水下攝影調查成果(僅標出異常處)調查日期：108 年 10 月

沉箱編號	堤腳狀況及異常說明
N06	護基方塊位移
N07	沉箱外突鋼板模修補部分鋼筋裸露
N11	疑似修補灌漿礫石釋出海床大型消波塊，外側護基方塊位移80cm
N12	水面檢查壁面破孔
N11	疑似修補灌漿礫石釋出海床大型消波塊
S19	沉箱底部疑似施工瑕疵造成坑洞
S21	底部明顯掏空疑似施工瑕疵
E07	外堤角延伸右外側頂部損毀

2.4 水面以上結構物檢測評估

北外廓防波堤堤體現況檢視可知其主體係採沉箱堤。由兩次現勘成果可知，防波堤堤體無位移及破壞等情形發生。整體而言，並無明顯損壞，其中堤面場鑄混凝土破損、部分消波胸牆混泥土剝落、沉箱大小不一等現象，初步評估應暫不影響堤體功能及安全性，尚不需立即辦理修繕作業，建議後續應持續辦理巡查檢視。

南外廓防波堤堤體之主體係採消波沉箱堤，現勘期間正在進行「蘇澳港外廓防波堤災損修復工程(含漁港外堤)」，雖正進行修復工程，惟第 1 次現勘仍可見到堤面及胸牆出現數處裂縫，堤頂亦有部份陷落及修補情形，推測係因修復工程尚未完成所致，而過往已破壞之堤體大致已修復完成。第 2 次現勘時，沉箱堤體已修復完畢，惟堤面仍有些許破損之情形。

漁港北外堤堤體為沉箱合成堤，E04 沉箱前緣有發現 H 型鋼版樁，研判應為修復沉箱壁面時所留下，其 E04 沉箱堤面場鑄混凝土出現破洞之情形。

本研究參考 101 年及 102 年於蘇澳港之現勘記錄、104 年蘇迪勒颱風災損現勘、105 年梅姬颱風災損現勘與 108 年現勘紀錄進行比較；將以往之現勘之成果分析，漁港北外堤之沉箱破洞已修復完成；南外廓防波堤 SB6 沉箱，為主體破壞之沉箱，於第 1 次現勘時已修繕完畢，而 S14 沉箱，也於第 1 次現勘時已修復完成，其 S23～S24、S31、S34～S35 及 S37 沉箱則於第 2 次現勘時已修復完成；北外廓防波堤之 N10 及 N06 沉箱，過去胸牆破壞之情形，本次現勘則呈現修復之狀態，其大部分胸牆及沉箱堤面混凝土產生剝落情形，可能為原設計上方之胸牆及堤面混凝土因混凝土強度較低或是配筋不足等原因，導致大浪來襲發生越波時，在保護不足的情況下而發生破壞。

南外廓防波堤現況

南外廓防波堤海側現況

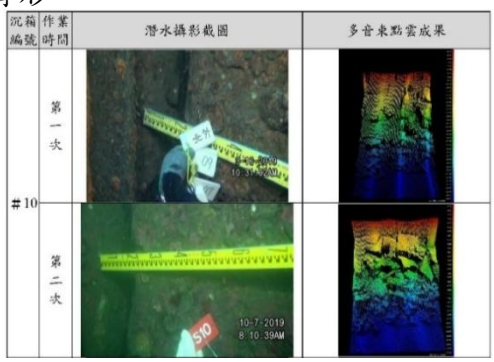
北外廓防波堤現況

圖 6 堤體現況檢視照片

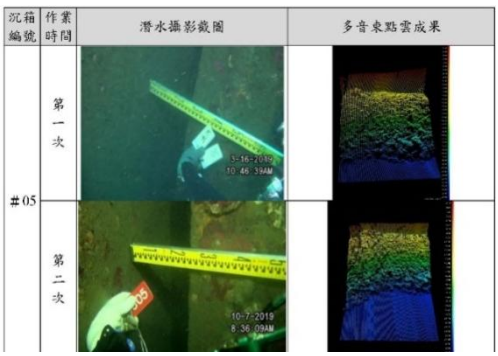
整體而言，由於本研究現勘期間亦正進行「蘇澳港外廓防波堤災損修復工程(含漁港外堤)」，故現勘成果無明顯損壞，現況防波堤堤體亦未發現明顯位移及破壞等情形發生，以往破壞之部分已於第 2 次現勘時修復完畢，可見之破壞主要以堤面場鑄混凝土破損、部分消波胸牆混凝土剝落等現象為主，且因堤體修復後無顯著破壞情形，經評估應暫不影響堤體功能及安全性，尚不需立即辦理修繕作業，建議後續仍應持續辦理巡查檢視。

三、成果資料比對

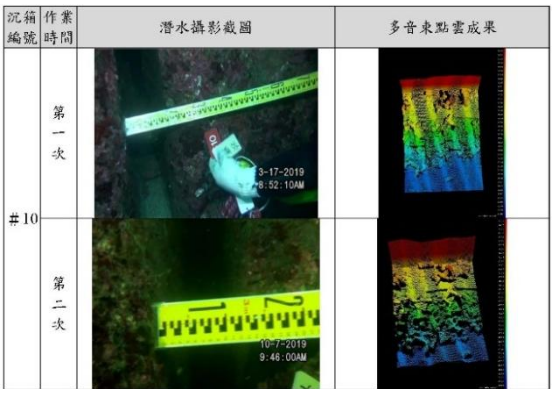
本研究比對蘇澳港外廓防波堤颱風期間前後 2 次檢測成果，經檢視北外廓防波堤海測 N05、N10、港測 N05 沉箱、南外廓防波堤海測 S10 沉箱及漁港北外堤港測 E06 沉箱之颱風期間前後水深點雲成果，並無明顯之變異情形。



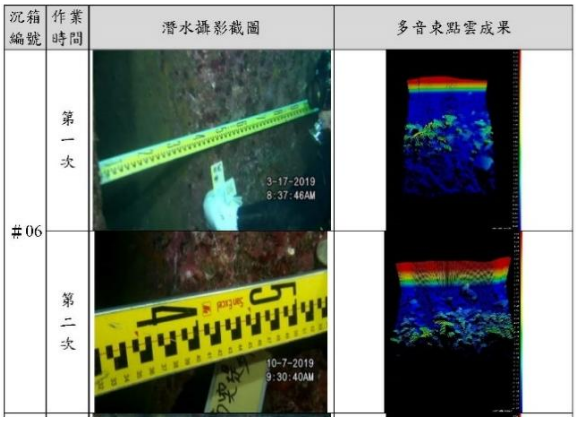
北外廓防波堤海測



北外廓防波堤港測



南外廓防波堤海測



南外廓防波堤港測

圖 7 光學與聲學資料比對成果

光學與聲學資料比對成果，部分摘錄如圖 7 所示。

四、沉箱安全評估探討分析

4.1 結構物堤址波浪外力評估

1. 資料蒐集及分析-颱風波浪

本研究區位於臺灣東海岸，平均每年約有 1.76 個颱風侵襲附近海域，故附近港灣構造物之設計皆須以颱風波浪為基準。因此，颱風資料之完整蒐集及颱風波浪之準確推算，將直接影響海上工程之安全及結構物之安定；以港灣構造物設計之 50 年迴歸期設計條件而言，本研

究區受 ENE 向影響最大，其外海波浪條件 Ho=17.4m、To=17.7sec，並逐漸向南遞減，至 S 方向時降為 Ho=10.9m、To=13.9sec(如表 3 所示)。

2. 折繞射平面數值分析

利用 MIKE21 數值模擬軟體之 SW 模組計算後，可得各方向颱風波浪之折、繞射係數 (Kr、Kd) 分佈詳圖 8 所示。

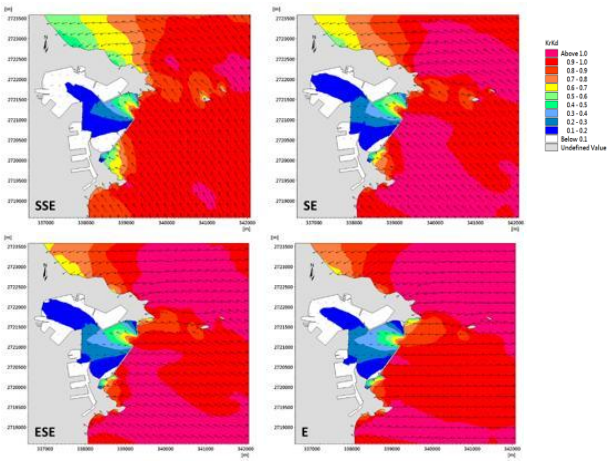


圖 8 50 年迴歸期颱風波浪波高分佈

藉由防波堤斷面設計時所採用之堤址波高值，與相對之波力、溯升及越波等物理量之推估所採用之深海波高，係為二維斷面波壓理論之結果，並未考量平面折繞射之影響因子，故在應用時，可採用 Goda 定義之等值深海波高 Ho' (equivalent deep water wave)觀念修正深海波高。由於 Ho'僅考量淺化現象，因此，實際採用 Ho'時，必須加入折射係數(Kr)、繞射係數(Kd)修正，得出等值深海波高 Ho'＝Ho·Kr·Kd，後續進行結構安全性分析時，將以此結果做為評估外力條件之依據。

本研究以 S～N 向採逆時針方向之設計波浪推估堤址波高，由結果可知，ESE 向波浪對南外廓防波堤之影響最大。分析結果顯示南外廓防波堤各堤址高程範圍內之最大波浪作用值以 ESE 向波浪為主，其週期為 16.80sec，折繞射係數約為 0.6～1.10 間，堤址波高約介於 7.95m～15.79m。

表 3 蘇澳港外海各方向各迴歸期颱風設計波高分析表

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	13.7	14.7	13.3	14.6	12.1	14.3	10.9	13.9	9.6	13.4	9.2	13.2	7.8	12.7
SSE	14.0	15.0	13.7	14.9	12.8	14.7	11.8	14.4	10.7	14.0	10.4	13.9	9.2	13.5
SE	17.8	17.2	17.4	17.1	16.2	16.8	14.9	16.4	13.6	15.9	13.1	15.7	11.5	15.2
ESE	19.6	17.6	19.2	17.5	17.9	17.2	16.5	16.8	15.0	16.3	14.5	16.2	12.8	15.6
E	20.7	18.8	20.3	18.7	18.9	18.2	17.4	17.7	15.7	17.2	15.2	17.0	13.3	16.3
ENE	20.6	20.4	20.1	20.3	18.6	19.6	17.1	18.9	15.4	18.2	14.8	17.9	12.9	16.9
NE	18.6	20.9	18.1	20.7	16.7	19.9	15.2	19.1	13.6	18.1	13.0	17.8	11.2	16.6
NNE	14.9	21.3	14.5	21.0	13.4	20.0	12.1	19.0	10.7	17.8	10.3	17.3	8.7	15.9
N	12.9	19.1	12.5	18.9	11.4	18.0	10.2	16.9	8.8	15.7	8.4	15.3	6.9	13.8

3. 舊有及現今設計條件之比對檢討

本研究進行深海颱風波浪推算及暴潮位設計條件探討，並將分析結果與舊有設計條件比對，以瞭解設計條件是否適宜。

(1) 深海颱風波浪推算

於設計波浪部份，經由前述分析，本研究選定 1940～2017 年 148 個對本區影響較大的颱風，進行深海颱風波浪推算，而由推算結果與原設計 SSE、SE、ESE 及 E 向之深海波浪條件進行比對，顯示其波高與週期均明顯高於原設計，波高約增加 55%～69%，週期約增加約 12%～33%(如表 4 所示)；本研究長

期之深海波浪推算在主要波向(S～SE 向)有增加之趨勢，以南外廓防波堤過往損壞記錄顯示，原設計之波高條件有低估之虞。

表 4 深海颱風波浪推算波高與原設計條件比對結果

	原設計(13 年回歸期)		本計畫推算(50 年回歸期)		與原設計波浪比對結果	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
SSE	7.7	13.0	11.9	14.5	55%	12%
SE	9.0	13.0	14.9	16.2	66%	25%
ESE	9.9	13.0	16.0	16.8	62%	29%
E	10.0	13.0	16.9	17.3	69%	33%

(2) 暴潮位設計條件探討

由舊有設計條件資料顯示，原設計採用大潮平均高潮位+暴潮偏差+2.50m 進行設計，較歷年之實測最高高潮位+2.47m(中央氣象局 1981～2012 實測)為高，僅略低於與本研究推算之 50 年回歸期極端水位+2.57m，尚符合現況設計之需求，故建議暫不予調整。惟於考量未來氣候變遷之情況下，推估未來 50 年後之水位為+2.82m，原設計水位偏低量達 0.32m，對結構安全將有危險之影響。

4.2 舊有結構物防波堤結構安全性分析-計算結果與分析

1. 護基方塊護面石及堤址塊石重量計算

(1)原設計計算結果

本研究採 Hudson 公式及谷本勝利(Tanimoto)利用原設計颱風波浪條件計算結果得，方塊重量須達到 7.03 t～11.05 t，但由原設計圖斷面兩種護基方塊尺寸，分別為 3m x 2m x 2m(A 型)及 3m x 3m x 2m(B 型)，計算其重量分別為 27.6 t 及 41.4 t。經檢討護基方塊 A 型及 B 型重量皆大於 11.05 t，符合原設計之颱風波浪需求。

(2)本研究分析結果

由現場堤址攝影與測量結果可知，目前 SB19 與 SB21 沉箱於海側處，底部有明顯掏空現象，顯示護基方塊無法有效保護堤基，可能遭遇之颱風波浪條件已遠超過原設計。本研究以 50 年迴歸期颱風波浪推估近岸波場推算後，發現其所需護基方塊重量為 99.85 t～124.13 t，其中，於水深-21m～-22m 所需護基方塊重量最大(124.13t)，若採用開孔方塊，其重量需達 54.15 t，目前現況護基方塊之重量皆無法符合所需護面重量。

將其水深對應沉箱編碼得知水深-21m～-22m 為 SB21、SB22、SB33 等沉箱，由現場堤址調查結果得知，南外廓防波堤堤腳水下檢查發現得知 SB21 於海側處，其沉箱底部有明顯掏空現象；而有明顯施工修復現象分別為 SB21 沉箱前後堤腳，其分析結果與現況相符。另由實際颱風波浪觀測資料可發現，目前出現之最大波高為 14.8m，週期為 13.9sec。經計算其護基方塊重量約需 71t，仍大於現有方塊之 41.4t。

2.堤體穩定分析

(1)原設計條件計算結果探討

依原設計波浪條件考量採用 Goda 所建議之波壓折減係數檢討後，區分以不同波浪作用狀況的消波式沉箱波壓係數 Crest I、II a、II b 之波壓折減率加以考量其穩定結果，詳表 5 所示，本研究波壓修正

計算後，即使採用最大波力保守計算下，其滑動安全係數 SFs 介於為 1.24～1.86，皆可滿足於規範之需求。而設計之傾倒安全係數 SFo 介於為 2.05～2.68，亦可符合規範之要求。上述分析可顯示於原波浪設計條件下，對現有堤體穩定性並無疑慮。

另由本研究考量不同情況下波壓修正計算後，波力較原設計總波力(P)增減互見，其約介於 246.79～308.00t 間，而總揚力(U)增減變化較大，其範圍介於 0.08～129，由表得知，Crest I 情形下之波力及揚力皆有增加，導致滑動及傾倒安全係數與原設計結果相比略有減少，分別為 1.24 與 2.05；而 Crest II a 情況下之波力及揚力皆減小，導致滑動安全係數及傾倒安全係數增加，為 1.64 與 2.53；如依 Crest II b 之情形，其波力減小且總揚力接近於 0，因此，其滑動安全係數及傾倒安全係數分別為 1.76 與 2.56。均符合規範需求，顯示原設計與 Goda 波壓係數修正方式計算結果差異不大，皆符合規範安全係數 1.20。

(2)本研究設計條件之計算結果探討

表 6 為推算後與原設計之比較值，而在考量不同水深計算後之結果，其滑動安全係數(SFS)介於 0.65～1.19 間，；而傾倒安全係數(SFo)介於 0.97～1.82 間，由表中可看出，研究推算之設計條件下，於部份水深條件下無法滿足規範要求，顯示在計算推算條件下現有堤體有滑動及傾倒之可能。

而考量不同情況下波壓修正計算，Crest I 情形下之波力及揚力皆有增加，導致滑動及傾倒安全係數略有減少，其與原設計結果相比分別為 0.65～0.74 與 0.96～1.20；Crest II a 情況下之波力及揚力皆減小，導致滑動安全係數及傾倒安全係數增加，為 0.95～1.06 與 1.37～1.66；如依 Crest II b 之情形，其波力減小且總揚力極小，因此，其滑動安全係數及傾倒安全係數分別為 1.09～1.19 與 1.52～1.81。

另依據前述折繞射之分析成果，水深較淺處雖有波浪集中之現象，惟由波力計算結果可知，水深越深其所受波力越大；顯示本計畫區波力主要仍受水深主控，且安全係數有隨水深增加而下降之趨勢。

3.消波艙結構安全性探討

由前節之整體外力作用下堤體可符合安全之要求，但由現場消波艙破壞情況，顯示可能有大於消波艙所能負荷之外力作用發生，因而產生破壞。由於消波艙主要受側向波力作用，以下將針對消波艙之混凝土剪力破壞及在波力作用下滑動及傾倒之機制加以探討。

(1)消波艙之剪力破壞分析

消波艙開孔壁面所承受之波力雖增加至 58.71～65.89 t，但仍會小於混凝土可提供抗剪力強度(131.69 t)，故現況仍安全無虞。而由表 7 中可看出，在波力增加對於後側胸牆之混凝土抗剪力強度仍遠高波力作用，故現況仍亦屬安全無虞。

(2)消波艙胸牆滑動破壞分析

消波艙前側胸牆在現今波力

增加後，前側胸牆之滑動安全係數由 0.80～0.93，顯示會有立即性破壞之可能。而後側胸牆之滑動安全係數(0.17～0.20)仍遠小於規範之要求，因此，勢必會有破壞之虞。相關計算如表 8 所示。

表 5 用原設計波浪條件之波壓修正穩定計算表

堤址水深 (m)	參數	CrestI	CrestIIa	CrestIIb
		數值	數值	數值
A (-20～-21)	總波力(P)	297.15	248.76	252.94
	總波力矩(Mp)	3698.55	3430.11	3795.64
	總揚壓力(U)	129.00	65.79	2.22
	總揚壓力矩(Mu)	2150.43	1024.58	-153.26
	總防波堤重力(WA)	1246.69	1246.69	1246.69
	總防波堤重力矩(MA)	16195.11	16195.11	16195.11
	總浮力(WB)	502.29	502.29	502.29
	總浮力矩(MB)	6278.62	6278.62	6278.62
	堤體水中重 (WA-WB-U)	615.40	678.61	742.18
	堤體水中重力矩 ($MA-MB-M_u$)	7766.06	8891.91	10069.75
	$SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P$	**1.24**	**1.64**	**1.76**
	$SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp$	2.10	2.59	2.65
B (-21～-22)	總波力(P)	295.55	246.79	250.60
	總波力矩(Mp)	3677.21	3405.86	3759.94
	總揚壓力(U)	128.00	65.34	2.25
	總揚壓力矩(Mu)	2133.76	1017.78	-150.94
	總防波堤重力(WA)	1246.69	1246.69	1246.69
	總防波堤重力矩(MA)	16195.11	16195.11	16195.11
	總浮力(WB)	502.29	502.29	502.29
	總浮力矩(MB)	6278.62	6278.62	6278.62
	堤體水中重 (WA-WB-U)	616.40	679.06	742.15
	堤體水中重力矩 ($MA-MB-M_u$)	7782.73	8898.71	10067.43
	$SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P$	1.25	1.65	1.78
	$SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp$	2.12	2.61	2.68
C (-22～-23)	總波力(P)	301.84	250.80	254.71
	總波力矩(Mp)	3921.11	3593.10	3973.62
	總揚壓力(U)	124.88	64.05	1.09
	總揚壓力矩(Mu)	2081.75	998.79	-168.32
	總防波堤重力(WA)	1298.37	1298.37	1298.37
	總防波堤重力矩(MA)	16841.01	16841.01	16841.01
	總浮力(WB)	528.04	528.04	528.04
	總浮力矩(MB)	6600.50	6600.50	6600.50
	堤體水中重 (WA-WB-U)	645.45	706.28	769.24
	堤體水中重力矩 ($MA-MB-M_u$)	8158.76	9241.72	10408.83
	$SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P$	1.28	1.69	1.81
	$SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp$	2.08	2.57	2.62

表 5 用原設計波浪條件之波壓修正穩定計算表(續)

堤址水深 (m)	參數	CrestI	CrestIIa	CrestIIb
		數值	數值	數值
D (-23～-24)	總波力(P)	308.00	255.06	258.84
	總波力矩(Mp)	4170.14	3787.85	4191.25
	總揚壓力(U)	122.00	62.82	0.12
	總揚壓力矩(Mu)	2033.74	980.39	-182.68
	總防波堤重力(WA)	1350.04	1350.04	1350.04
	總防波堤重力矩(MA)	17486.91	17486.91	17486.91
	總浮力(WB)	553.79	553.79	553.79
	總浮力矩(MB)	6922.37	6922.37	6922.37
	堤體水中重 (WA-WB-U)	674.25	733.43	796.13
	堤體水中重力矩 ($MA-MB-M_u$)	8530.80	9584.15	10747.22
	$SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P$	1.31	1.73	1.85
	$SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp$	**2.05**	**2.53**	**2.56**
E (-24～-25)	總波力(P)	305.78	252.66	256.38
	總波力矩(Mp)	4139.91	3754.96	4151.12
	總揚壓力(U)	120.75	62.25	0.08
	總揚壓力矩(Mu)	2012.90	971.58	-181.38
	總防波堤重力(WA)	1350.04	1350.04	1350.04
	總防波堤重力矩(MA)	17486.91	17486.91	17486.91
	總浮力(WB)	553.79	553.79	553.79
	總浮力矩(MB)	6922.37	6922.37	6922.37
	堤體水中重 (WA-WB-U)	675.50	734.00	796.17
	堤體水中重力矩 ($MA-MB-M_u$)	8551.64	9592.96	10745.92
	$SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P$	1.33	1.74	1.86
	$SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp$	2.07	2.55	2.59

表 6 本計畫 50 年颱風波浪之波壓修正穩定計算

斷面	穩定計算結果	CrestI		CrestIIa		CrestIIb	
		數值	比例	數值	比例	數值	比例
A (-20～-21)	總波力(P)	445.60	1.50	357.44	1.44	368.98	1.46
	總波力矩(Mp)	5468.60	1.48	4807.57	1.40	5472.01	1.44
	總揚壓力(U)	202.63	1.57	119.42	1.82	17.39	7.83
	總揚壓力矩(Mu)	3377.84	1.57	1914.82	1.87	23.43	-0.15
	總防波堤重力(WA)	1246.69	1.00	1246.69	1.00	1246.69	1.00
	總防波堤重力矩(MA)	16195.11	1.00	16195.11	1.00	16195.11	1.00
	總浮力(WB)	502.29	1.00	502.29	1.00	502.29	1.00
	總浮力矩(MB)	6278.62	1.00	6278.62	1.00	6278.62	1.00
	堤體水中重 (WA-WB-U)	541.77	0.88	624.98	0.92	727.01	0.98
	堤體水中重力矩 (MA-MB-M_u)	6538.65	0.84	8001.67	0.90	9893.06	0.98
	SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P	0.73	0.59	1.05	0.64	1.18	0.67
	SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp	1.20	0.57	1.66	0.64	1.81	0.68
B (-21～-22)	總波力(P)	464.13	1.57	370.19	1.50	380.51	1.52
	總波力矩(Mp)	5700.14	1.55	4996.63	1.47	5646.53	1.50
	總揚壓力(U)	208.75	1.63	123.09	1.88	17.91	7.96
	總揚壓力矩(Mu)	3479.86	1.63	1973.76	1.94	23.99	-0.16
	總防波堤重力(WA)	1246.69	1.00	1246.69	1.00	1246.69	1.00
	總防波堤重力矩(MA)	16195.11	1.00	16195.11	1.00	16195.11	1.00
	總浮力(WB)	502.29	1.00	502.29	1.00	502.29	1.00
	總浮力矩(MB)	6278.62	1.00	6278.62	1.00	6278.62	1.00
	堤體水中重 (WA-WB-U)	535.65	0.87	621.31	0.91	726.49	0.98
	堤體水中重力矩 (MA-MB-M_u)	6436.63	0.83	7942.73	0.89	9892.50	0.98
	SF_s=[f*(WA-WB-U)]/P	0.69	0.55	1.01	0.61	1.15	0.64
	SF_o=(MA-MB-Mu)/Mp	1.13	0.53	1.59	0.61	1.75	0.65
C (-22～-23)	總波力(P)	492.56	1.63	391.47	1.56	402.08	1.58
	總波力矩(Mp)	6310.69	1.61	5482.02	1.53	6199.52	1.56
	總揚壓力(U)	212.75	1.70	126.02	1.97	17.35	15.92
	總揚壓力矩(Mu)	3546.54	1.70	2022.75	2.03	7.53	-0.04
	總防波堤重力(WC)	1298.37	1.00	1298.37	1.00	1298.37	1.00
	總防波堤重力矩(MC)	16841.01	1.00	16841.01	1.00	16841.01	1.00
	總浮力(WB)	528.04	1.00	528.04	1.00	528.04	1.00
	總浮力矩(MB)	6600.50	1.00	6600.50	1.00	6600.50	1.00
	堤體水中重 (WC-WB-U)	557.58	0.86	644.31	0.91	752.98	0.98
	堤體水中重力矩 (MC-MB-Mu)	6693.97	0.82	8217.76	0.89	10232.98	0.98
	SFs=[f*(WC-WB-U)]/P	0.68	0.53	0.99	0.58	1.12	0.62
	SFo=(MC-MB-Mu)/Mp	1.06	0.51	1.50	0.58	1.65	0.63

表 6 本計畫 50 年颱風波浪之波壓修正穩定計算(續)

斷面	穩定計算結果	CrestI		CrestIIa		CrestIIb	
		數值	比例	數值	比例	數值	比例
D (-23～-24)	總波力(P)	523.72	1.70	414.51	1.63	425.28	1.64
	總波力矩(Mp)	6989.95	1.68	6020.29	1.59	6805.06	1.62
	總揚壓力(U)	216.88	1.78	128.91	2.05	16.68	139.00
	總揚壓力矩(Mu)	3615.39	1.78	2070.36	2.11	-11.61	0.06
	總防波堤重力(WD)	1350.04	1.00	1350.04	1.00	1350.04	1.00
	總防波堤重力矩(MD)	17486.91	1.00	17486.91	1.00	17486.91	1.00
	總浮力(WB)	553.79	1.00	553.79	1.00	553.79	1.00
	總浮力矩(MB)	6922.37	1.00	6922.37	1.00	6922.37	1.00
	堤體水中重 (WD-WB-U)	579.37	0.86	667.34	0.91	779.57	0.98
	堤體水中重力矩 (MD-MB-Mu)	6949.15	0.81	8494.18	0.89	10576.15	0.98
	SFs=[f*(WD-WB-U)]/P	0.66	0.51	0.97	0.56	1.10	0.60
	SFo=(MD-MB-Mu)/Mp	0.99	0.49	1.41	0.56	1.55	0.61
E (-24～-25)	總波力(P)	538.60	1.76	424.56	1.68	433.87	1.69
	總波力矩(Mp)	7192.60	1.74	6183.00	1.65	6945.67	1.67
	總揚壓力(U)	221.25	1.83	131.50	2.11	16.97	212.13
	總揚壓力矩(Mu)	3688.24	1.83	2112.00	2.17	-12.51	0.07
	總防波堤重力(WE)	1350.04	1.00	1350.04	1.00	1350.04	1.00
	總防波堤重力矩(ME)	17486.91	1.00	17486.91	1.00	17486.91	1.00
	總浮力(WB)	553.79	1.00	553.79	1.00	553.79	1.00
	總浮力矩(MB)	6922.37	1.00	6922.37	1.00	6922.37	1.00
	堤體水中重 (WE-WB-U)	575.00	0.85	664.75	0.91	779.28	0.98
	堤體水中重力矩 (ME-MB-Mu)	6876.30	0.80	8452.54	0.88	10577.05	0.98
	SFs=[f*(WE-WB-U)]/P	0.64	0.48	0.94	0.54	1.08	0.58
	SFo=(ME-MB-Mu)/Mp	0.96	0.46	1.37	0.54	1.52	0.59

表 7 後側胸牆所受波力及混凝土剪力關係表

離胸牆頂距離(m)	單位面積 (m^2)	剪力強度 (t)	波力 (t)
0.50	1.52	95.14	4.86～5.06
1.00	1.76	110.64	9.95～10.36
1.50	2.01	126.14	15.27～15.90
2.00	2.26	141.64	20.83～21.68
2.50	2.51	157.13	26.61～27.70
3.00	2.75	172.63	32.62～33.96
3.50	3.00	188.13	38.87～40.46

表 8 防波堤胸牆現況滑動安全分析表

斷面	抗滑動力		滑動力		分析結果	
A (-20～-21)	前側胸牆剪力栓(t)(A)=	37.63	前側胸牆平均波壓 (t/m²)=	18.46	前胸牆滑動安全係數	0.93
	前側重量 (t)(B_1)=	22.91	前側胸牆作用面積 (m²)=	2.87		
	前側摩擦力 (t)(C_1)=	49.08	前側胸牆平均波力 (t)=	53.00		
	後側重量 (t)(B_2)=	17.19	後側胸牆平均波壓 (t/m²)=	16.11		0.20
	後側摩擦力 (t)(C_2)=	8.59	後側胸牆作用面積 (m²)=	2.71		
			後側胸牆平均波力 (t)=	43.63		
B (-21～-22)	前側胸牆剪力栓(t)(A)=	37.63	前側胸牆平均波壓 (t/m²)=	19.56		0.87
	前側重量 (t)(B_1)=	22.91	前側胸牆作用面積 (m²)=	2.87		
	前側摩擦力 (t)(C_1)=	49.08	前側胸牆平均波力 (t)=	56.16		
	後側重量 (t)(B_2)=	17.19	後側胸牆平均波壓 (t/m²)=	16.70		0.19
	後側摩擦力 (t)(C_2)=	8.59	後側胸牆作用面積 (m²)=	2.71		
			後側胸牆平均波力 (t)=	45.21		
C (-22～-23)	前側胸牆剪力栓(t)(A)=	37.63	前側胸牆平均波壓 (t/m²)=	20.05		0.85
	前側重量 (t)(B_1)=	22.91	前側胸牆作用面積 (m²)=	2.87		
	前側摩擦力 (t)(C_1)=	49.08	前側胸牆平均波力 (t)=	57.57		
	後側重量 (t)(B_2)=	17.19	後側胸牆平均波壓 (t/m²)=	17.31		0.18
	後側摩擦力 (t)(C_2)=	8.59	後側胸牆作用面積 (m²)=	2.71		
			後側胸牆平均波力 (t)=	46.86		
D (-23～-24)	前側胸牆剪力栓(t)(A)=	37.63	前側胸牆平均波壓 (t/m²)=	20.40		0.84
	前側重量 (t)(B_1)=	22.91	前側胸牆作用面積 (m²)=	2.87		
	前側摩擦力 (t)(C_1)=	49.08	前側胸牆平均波力 (t)=	58.58		
	後側重量 (t)(B_2)=	17.19	後側胸牆平均波壓 (t/m²)=	17.75		0.18
	後側摩擦力 (t)(C_2)=	8.59	後側胸牆作用面積 (m²)=	2.71		
			後側胸牆平均波力 (t)=	48.07		
E (-24～-25)	前側胸牆剪力栓(t)(A)=	37.63	前側胸牆平均波壓 (t/m²)=	21.24		0.80
	前側重量 (t)(B_1)=	22.91	前側胸牆作用面積 (m²)=	2.87		
	前側摩擦力 (t)(C_1)=	49.08	前側胸牆平均波力 (t)=	61.00		
	後側重量 (t)(B_2)=	17.19	後側胸牆平均波壓 (t/m²)=	18.18		0.17
	後側摩擦力 (t)(C_2)=	8.59	後側胸牆作用面積 (m²)=	2.71		
			後側胸牆平均波力 (t)=	49.24		

4.3 受損結構補強方案評估研擬

1.短期補強(急迫性)方案研擬

臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司蘇澳港營運處辦理「蘇澳港外廓防波堤災損修復工程(含漁港北堤)」,於 107 年 5 月 31 日開工，其工程針對蘇澳港南、北外廓防波堤進行水上及水下之補強作業，包含沉箱破損修補、既有護基方塊重新吊排及堤面混凝土修補等，並於 108 年 4 月 25 日完工，故針對堤體結構補強暫無急迫性。

2.長期補強(逐年維護)方案研擬

(1)堤體穩定補強方案初探

經前述堤體穩定分析可知，其破壞可能發生於滑動或是傾倒上。由於沉箱主體為直接抵擋波浪作用，故如有沉箱發生移動或傾覆破壞，勢必會對港內造成影響。如要改善現有沉箱可能發生之移動或傾覆現象，其解決方式可將現有場鑄加高，以增加堤體自重方式因應，另亦可佐以堤後背填方式作為改善。惟依據前述波力計算結果可知，於本研究推算之設計條件下，堤體受波壓最大可達 536t/m，而滑動安全係數僅 0.64，因差異較大，若需補足堤體之重量，場鑄需加高甚多；故初步建議可採堤後背填或是加寬堤體之方式增加堤體抵抗波浪之能力，以解決堤體安全性欠佳之問題。

(2)方塊位移補強方案初探

考慮現有護基方塊移動，將造成堤基淘空並使沉箱發生前傾現象，些微掏空雖不致影響沉箱擋浪功能，但如長期持續淘空，不排除

會造成沉箱本體損傷而致破壞。故護基方塊之穩定性雖屬附屬保護設施,但其安全性亦需重視。基此，現場方塊雖未出現位移，但由過往破壞案例亦有發現方塊及消波塊流失等現象，且經結構計算可知，現有方塊重量已小於規範所需之重量。因此，除因密切注意現有方塊或消波塊之保護情況外，如有發生位移等情形，應考量以吊具將其歸位，防止堤基繼續淘空，或可利用水中混凝土修補方塊與沉箱之縫隙，防止堤基細料流失。另亦可考量製作符合重量需求之開孔方塊(>51.21t)，確保堤體安全。

(3) 消波艙胸牆破壞補強方案初探

消波艙胸牆破壞類型包括後側胸牆及側牆破壞兩種，但整體而論皆屬於消波艙本身結構性破壞。因此，消波艙胸牆補強方案初步建議採用以下幾種方法。

A. 消波艙後側胸牆及側牆面改進：經檢核，現有消波胸牆之後側胸牆主要破壞原因為滑動及傾倒破壞；而後側胸牆破壞後，則因消波艙整體失去穩固之結構型式，導致整體連鎖破壞。因此，如要改善後側胸牆之穩定性，可藉由增加剪力筋方式因應，改進其原本因抗剪力不足而發生滑動破壞之情形，且可增加胸牆與堤面混凝土之連結，以抵抗傾覆之可能；或以增厚胸牆方式來增加胸牆重量，以抵抗其抗傾覆之能力。除此之外，側牆發生破壞原因，亦有可能是波力作用於外牆時並非均勻分佈，如波力較偏於一側，則會造成側牆受彎矩作用產生破壞而分離，因此，建議將消波艙後側胸牆增厚至寬 3m 及 3.5m，高 3.5m，並植入 #6 號鋼筋 @0.1m，L=2.0m 作為剪力筋加強其抗剪強度，側牆則建議加厚至 1.0m，以增加抵抗彎矩破壞之作用力，詳圖 9 所示。

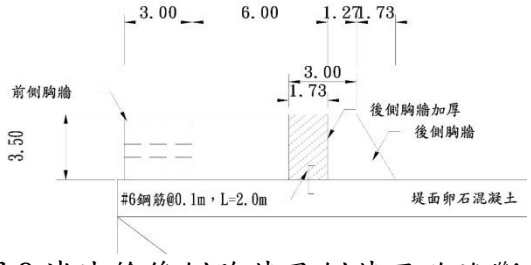


圖 9 消波艙後側胸牆及側牆面改進斷面示意圖

B. 消波艙內填放塊石或消波塊：此法係利用大型塊石填充於消波艙內，除可增加堤體自重外，亦可藉由填充艙內空間來增加消波艙開孔面及側牆抵抗力矩，惟此法需考量消波孔直徑與塊石大小之關係，亦即需採用大型塊石以防止塊石藉由消波孔流失，有關消波效果，則可以水工模型試驗加以確認。但考慮大型塊石取得不易，且容易由消波孔流失之問題，因此，亦可考量採用消波塊替代，惟填放之消波塊應慎選固定性較佳且適合蘇澳港既有消波艙尺寸之型式，詳圖 10 所示。

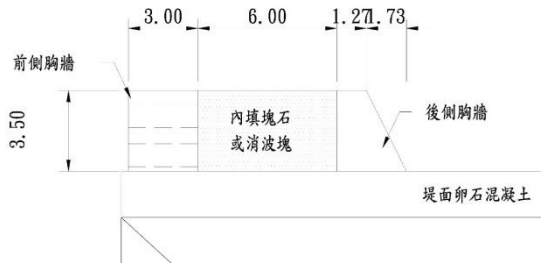


圖 10 消波艙內填放塊石或消波塊斷面示意圖

五、沉箱式防波堤維護工法探討

為配合沉箱式防波堤檢測評估項目，並綜合上述之維護管理工法依結構位置及劣化項目，概分為水上部份及水下部份，彙整如表 9 所示。

表 9 沉箱式防波堤維護管理工法

檢測位置和項目			劣化程度	維護管理工法
水上部份	胸牆	龜裂損傷	●輕微損傷（龜裂寬度目測約<3mm，龜裂長度目測約<5cm） ●明顯損傷（龜裂寬度目測約>3mm，龜裂長度目測約>5cm） ●胸牆斷落	●「裂縫注入工法」 ●「充填增厚工法」 ●「斷面修復工法」
		剝離與鋼筋外露	●局部混凝土剝落 ●胸牆損傷致高度不足 ●混凝土剝落致鋼筋外露	●「充填增厚工法」 ●「斷面修復工法」 ●「防蝕噴漿工法」
	堤面	龜裂損傷	●輕微損傷（龜裂寬度目測約<3mm，龜裂長度目測約<5cm） ●明顯損傷（龜裂寬度目測約>3mm，龜裂長度目測約>5cm） ●堤面混凝土斷裂	●「裂縫注入工法」 ●「充填增厚工法」 ●「鋪面修復工法」
		陷	●輕微不均勻沈陷（輕微積水） ●明顯不均勻沈陷（嚴重積水）	●「無筋頂面增厚工法」 ●「斷面修復工法」
		鋼筋外露	●局部混凝土剝落 ●混凝土剝落致鋼筋外露 ●堤面混凝土斷裂	●「充填增厚工法」 ●「防蝕噴漿工法」 ●「斷面修復工法」
	沈箱	變位	●堤體變位不明顯（變位量約<5cm） ●堤體變位明顯（變位量約量>5cm） ●堤體嚴重變位（變位量約>10cm）	●「沉箱間隙改善工法」 ●「沉箱間隙改善工法」 ●「堤體穩固工法」 ●「堤體穩固工法」 ●「波壓消減工法」
		傾斜	●輕微傾斜（傾斜率約<3%） ●明顯傾斜（傾斜率約 3～5%） ●嚴重傾斜（傾斜率約>5%）	●「沉箱間隙改善工法」 ●「堤體穩固工法」 ●「堤體穩固工法」 ●「堤體重置工法」
	沈箱	龜裂損傷	●堤體輕微損傷（龜裂寬度目測約<3mm，龜裂長度目測約<5cm） ●堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約>3mm，龜裂長度目測約>5cm) ●堤體混凝土斷裂	●「裂縫注入工法」 ●「充填增厚工法」 ●「斷面修復工法」
		鋼筋外露	●壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 ●壁體剝落致鋼筋外露 ●堤體混凝土破洞	●「充填增厚工法」 ●「防蝕灌漿工法」 ●「置換工法」 ●「鋼支堡工法」
水下部分	沈箱	龜裂損傷	●堤體輕微損傷（龜裂寬度目測約<3mm，龜裂長度目測約<5cm） ●堤體明顯損傷（龜裂寬度目測約>3mm，龜裂長度目測約>5cm） ●壁體剝落致鋼筋外露 ●堤體混凝土斷裂(破洞)	●「裂縫注入工法」 ●「充填增厚工法」 ●「防蝕灌漿工法」 ●「覆襯工法」 ●「鋼支堡工法」
	護基方塊	變位	●部分發生下陷位移（變位量約<5cm） ●小規模下陷位移（變位量約 5～10 cm） ●大範圍下陷位移（變位量約>10 cm）	●「方塊固結工法」 ●「重置改善工法」 ●「新製補強工法」
	消波塊	滑落與沈陷	●部分消波塊移動或滾落 ●消波塊散落沈陷達一層，堤體滑動安全率有減低之虞 ●消波斷面減少，堤體滑動安全率已減低	●「加拋改善工法」 ●「新製加重工法」 ●「加寬補強工法」
	基礎海床	沖刷	●輕微沖刷（沖刷坑深度約<50cm） ●大量沖刷（沖刷坑深度約 50 ～100cm） ●嚴重沖刷（沖刷坑深度約>100cm）	●「拋石護基工法」 ●「斷面修復工法」 ●「基礎加寬補強工法」

六、結論與建議

1. 蘇澳港防波堤原設計係採用 13 年迴歸期颱風波浪作為設計條件，依現行規範採用 50 年迴歸期颱風波浪做為檢核依據。綜合前述依據，針對堤基保護方塊重量、沉箱穩定性及消波艙安全性三部份分析，其結果分述如后：

(1) 現有堤基保護方塊之現場堤址攝影與測量結果，顯示並無滑動或流失情形。但依據本研究推算颱風波浪結果，堤基方塊重量應達 116.49 t 以上，空心方塊則需 51.21t 以上；另由實際颱風波浪觀測資料，最大波高為 14.8m，週期為 13.9sec，經計算其護基方塊約需 71t，均顯示現況方塊重量明顯不足(27.6 t 及 41.4 t)，未來可能發生移動破壞之風險。

(2) 依設計條件下波壓修正計算結果，沉箱滑動安全係數介於 0.65～1.19 間，而傾倒安全係數介於 0.97～1.82 間，顯示現有堤體並不符合 50 年迴歸期設計需求。經估算現況維持堤體穩定可承受之波高為 8.85m(安全係數≧1.2)及 10.12

m(安全係數≧1.2) ，與歷年實測最大颱風波浪比較可知，至少曾發生 4 次波高大於堤體穩定容許上限波高值之情形，顯示現有堤體結構安全已有立即性之危險。本計畫波力計算乃採用規範建議之 Goda 波壓公式，參考以往水工模型試驗經驗，此波力公式較為保守，故現場波浪大於設計波浪時，應有可能未發生破壞之情況。但以目前臺灣地區各大商港之胸牆破壞情形，以蘇澳港之破壞最為嚴重，顯示原設計波浪確有偏低之現象。

(3) 依本計畫推算 50 年迴歸期條件下就消波胸牆分析計算，前側胸牆考量受剪力及滑動分析中，現況所受剪力並不影響其結構安全，但其滑動安全係數 0.80~0.93，可能會有立即性之滑動破壞之虞；另後側胸牆在剪力作用下可保持安全，不過於滑動安全係數為 0.17~0.20 及傾倒安全係數為及 0.34~0.38，顯示有可能發生立即性破壞之情形。但後側胸牆一旦發生滑動或傾倒，則會使其與側牆連接面產生裂縫或間隙。隨著受大浪之侵襲，會使間隙處形成破壞面而逐漸加大，最後導致後側胸牆與側牆分離造成破壞。而在失去後側胸牆後亦會使原先穩固之前側胸牆、側牆及後側胸牆四邊固定形式發生改變，在無後側支撐之情況下，也將導致前側胸牆失去背後支持，而有傾覆之虞。

2. 為因應氣候變遷之影響，故於本計畫推算之深海颱風波浪條件及 50 年迴歸期最高高潮位下，根據國際航海協會針對氣候變遷對海事工程影響之建議，將深海颱風推算波高增加 10%、週期增加 5%，水位則以每年增加 5mm/yr 之速率重新計算，經 Goda 波壓修正係數檢核後，總波力由現況之 534.20t/m 增加至 560.97t/m，增加幅度約 5%，可見氣候變遷之影響對現況仍有一定程度之影響。其滑動安全係數自 0.65 略降至 0.60，仍未達 1.0 之安全需求，顯示有立即性發生破壞之風險，應儘速進行檢測及補強作業。另由氣候變遷情境下可滿足規範要求(安全係數≧1.2)或維持堤體穩定(安全係數≧1.0)可承受之最大波高分析結果可知，在滿足規範要求之條件下，沉箱僅可承受 8.55m 以下之波浪襲擊，而若需維持堤體穩定，沉箱最大僅可承受 9.98m 之波浪。

3. 依分析結果，初步研擬受損結構補強方案及防止舊有結構物受損之預防措施，分述如后：

(1) 現有沉箱如遭遇大浪時，可能發生之移動或傾覆現象，其解決方式建議可採堤後背填或增加堤寬之方式進行，均可確保堤體穩定之安全。惟考量堤後為一開闊水域，堤後背填將可能有回填料流失之問題，故建議以增加堤寬(新設沉箱 25m)之方式以抵抗波壓並增加堤體穩定。

(2) 於颱風過後，如發現方塊或消波塊有位移情形，則應立即以吊具將其歸位，以防止堤基繼續淘空，另亦可利用水中混凝土修補歸位後方塊與沉箱之細縫，以防止堤基細料流失。另亦可考量製作符合重量需求之開孔方塊(>51.21t)，以確保堤體安全。

(3) 消波艙後側胸牆可藉由增加剪力筋方式，改進其原本因抗剪力不足而發生滑動破壞之情形，且可增加胸牆與堤面混凝土之連結，以抵抗傾覆之可能；另以增厚胸牆方式來增加胸牆重量，以抵抗其抗傾覆之能力。因此，補強方案初步建議將消波艙後側胸牆增厚至寬 3m 及 3.5m，高 3.5m，並植入#6 號鋼筋@

0.1m，L=2.0m 作為剪力筋加強其抗剪強度，側牆則初步建議加厚為1.0m，以增加抵抗彎矩破壞之作用力。另亦可考量於消波艙內填放塊石或消波塊來增加消波艙開孔面及側牆抵抗力矩。

(4) 綜合結構安全改善之立即性及工程經費等因素之考量下，初步建議應優先針對消波艙胸牆之破壞進行補強，接著則針對方塊之位移問題進行改善，最後則俟經費許可進行堤體穩定之補強作業。

(5) 現今規範中規定，所使用之鋼筋混凝土最小混凝土設計強度則應達 280kg/cm^2，而無筋混凝土最小混凝土設計強度應達 210kg/cm^2。但現有蘇澳港防波堤於設計時沉箱主體混凝土(鋼筋混凝土)及堤面及胸牆混凝土(無筋混凝土)皆無法合於規範要求，故於後續整建時可逐步改善為合於規範之要求，增加抵禦波浪之能力。

七、參考文獻

1. 谷本勝利等，「不規則波實驗による混成堤マウンド被覆材の安定性に關する研究」，日本港灣技術研究所，1982。
2. 交通部運輸研究所，港灣海氣象觀測資料年報，民國 106 年。
3. 行政院公共工程委員會，公共工程施工綱要規範。
4. 臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，蘇澳港外廓防波堤災損修復工程(含漁港外堤)，民國 107 年。
5. Goda,Y., “The Fourth order approximation to the pressure of Standing Waves”,Coastal Engineering in Japan ,Vol. 10,1967,pp.1-11.
6. Goda,Y., “Experiments on the Transition from Nonbreaking to Postbreaking Wave Pressure”, Coastal Eng. in Japan,Vol.15,1971,pp.82-90.
7. Goda,Y.,and T.,Fukumori, “Laboratory Investigation of Wave Pressure Exerted upon Vertical and Composite Walls”,Report of the Port and Harbour Research Institute.,Vol.11,No.2,1972,pp.3-45.
8. Goda,Y., “New Wave Pressure Formulae for Composite Breakwaters”,Proc. 14th Coastal Eng.,Copenhagen,1974,pp.1702-1720.
9. Shore Protection Manual,1984.
10. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan,2009.

花蓮港與蘇澳港開口胸牆防波堤沉箱維修探討

林受勳　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
羅冠顯　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
李政達　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
郭少谷　台灣世曦工程顧問股份有限公司專案經理與水利技師

摘要

臺灣東部港口開口胸牆防波堤因承受強大波力以及大量越波水量，造成沉箱和胸牆損害，拋石堤、消波塊流失問題與結構物裂縫、沉陷等破壞，且主要結構多已逼近使用年限，故對港灣安全及水域穩定性影響甚鉅，本研究針對此類防波堤沉箱結構物之防救災方案，進行各項深入調查評估和探討分析，完成結構安全評估工作與相關補強對策，提供港務公司編列未來養護所需經費及維修工法建議。

一、前言

臺灣東部港口極易受颱風影響，本研究針對花蓮及蘇澳港原有開口胸牆之防波堤、沉箱設計條件進行檢討(研究範圍如圖 1、圖 2 所示之虛線框內區域)，探討舊有結構物的安全性、破壞原因及研擬修護措施，提供主管機關未來執行參考。透過堤址現場攝影與測量數據，瞭解結構物破壞原因與沉箱位移狀況，並研擬短期修護措施，提供各港務分公司一套完整的維護策略，使結構物遭受颱風侵襲後，能有一完整的應變措施。

臺灣東部現有港灣構造物使用年期多已達到原設計使用年限，由於工程改建費用龐大，港埠建設基金恐無法容納，基於「維修重於重建」乃今後工程發展的導向，因此，如何維持構造物性能，延長其使用年限，實為國內港灣設施未來之重要課題。

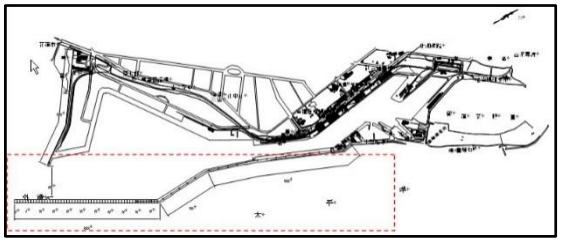


圖 1 花蓮港及東防波堤示意圖

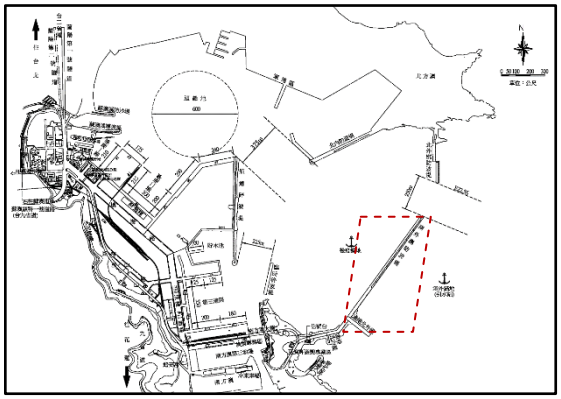


圖 2 蘇澳港及南外廓防波堤示意圖

二、結構物波力及安全性分析

本研究主要目的為分析檢討舊有沉箱式防波堤安全性及破壞原因、並研擬受損防波堤結構短期及長期補強工法，提供港務公司研擬沉箱式防波堤維護策略參考應用。研究項目包括：(1)沉箱式防波堤堤址波浪外力評估；(2)舊有沉箱式防波堤安全性分析及破壞原因檢討；(3)受損結構短期及長期補強方案研擬；(4)沉箱式防波堤開口胸牆維護工法探討。研究流程及分析方法，詳如圖 3 所示。

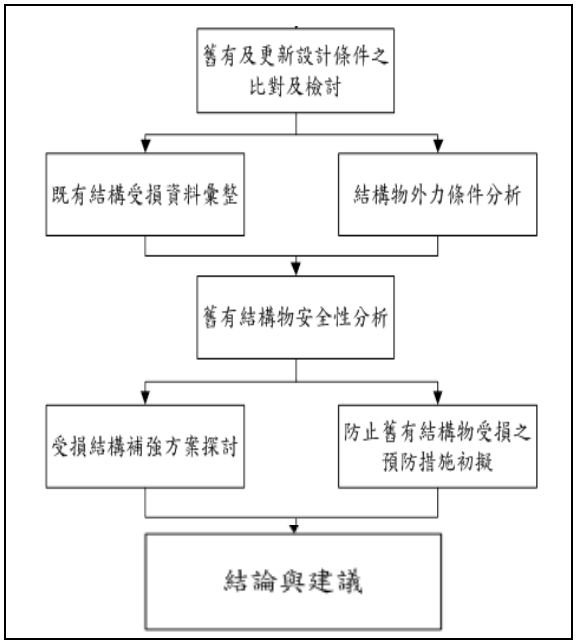
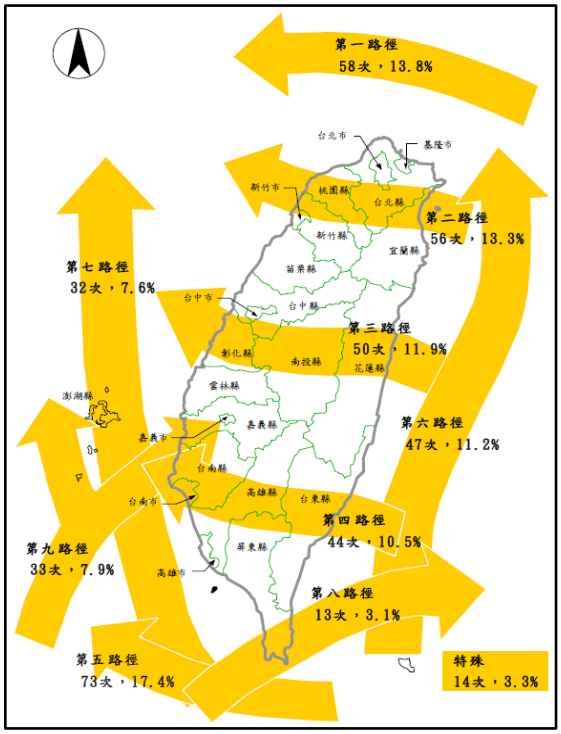


圖 3 研究流程及分析方法圖

2.1 結構物堤址波浪外力評估

颱風為威脅臺灣地區最嚴重之自然災害，歷年來因颱風而損失之生命財產實不可勝數，尤其當颱風直接侵襲時，不僅影響海上船隻作業，更對海岸結構物造成極大之衝擊，故對颱風各項資料及特性，須詳予蒐集分析。根據中央氣象局 1897~2019 年侵襲臺灣颱風路徑最新統計資料(如圖 4)。侵臺颱風路徑大致可劃分為 9 類，本文研究範圍位於臺灣東海岸，除第 2 與第 6 路徑之颱風將直接侵襲本區外，第 1 與第 3 路徑亦有甚大影響；平均每年約有 1.72 個颱風影響臺灣東部港口海域。



1. 2008年前颱風路徑採中央氣象局圖書館歷年颱風調查報告 (http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/clm/tyname.htm)，1897~2008年侵臺颱風綱要表9類路徑分類，2009年後採用TDB防災颱風資料庫分類(http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php)
2. 颱風編號191610、191710、194700、197426、199603無颱風路徑資料不列入統計分類，本統計侵臺颱風總數405次

圖 4 侵襲臺灣之颱風路徑統計圖

2.1.1 外海波浪條件重新探討

建構防波堤時有其原外海設計波浪條件，重新評估結構安全時，亦須將最新觀測資料納入考量，爰此，有必要重新探討相關波浪條件。本研究利用井島武士及湯麟武博士理論發展出之 TYPH 電腦程式，就影響本文研究範圍較大之颱風進行波浪模擬推算，將各方向颱風可能發生最大示性波高，依大小順序列表，再以極端值分佈法推算各復現期波高，進而得知各迴歸期颱風設計波高，如表 1、表 2 所示。

表 1 花蓮外海各迴歸期颱風設計波高

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	14.3	15.9	13.8	15.6	12.3	14.7	10.7	13.7	9.2	12.7	8.7	12.4	7.1	11.2
SSE	14.0	15.7	13.7	15.5	12.7	15	11.6	14.3	10.4	13.5	10.0	13.3	8.7	12.4
SE	16.4	17.0	16.1	16.9	14.9	16.2	13.6	15.5	12.3	14.7	11.8	14.4	10.3	13.5
ESE	18.2	17.9	17.8	17.7	16.5	17.1	15.2	16.4	13.7	15.5	13.2	15.3	11.6	14.3
E	19.0	18.3	18.6	18.1	17.3	17.5	15.9	16.7	14.4	15.9	13.9	15.7	12.2	14.7
ENE	19.8	18.7	19.3	18.5	17.9	17.8	16.3	17.0	14.7	16.1	14.1	15.8	12.2	14.7
NE	18.6	18.1	18.1	17.9	16.6	17.1	15.1	16.3	13.4	15.4	12.8	15.0	10.9	13.9
NNE	14.8	16.2	14.4	15.9	13.2	15.3	11.9	14.5	10.6	13.7	10.1	13.3	8.5	12.2
N	12.0	14.5	11.7	14.4	10.6	13.7	9.4	12.9	8.1	12.0	7.6	11.6	6.1	10.4

註：1.推算目標區為 121.68°E，24.25°N。
2.目標區水深為-141m。
3. Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

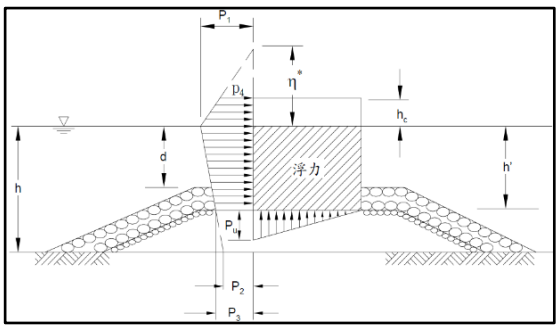
表 2 蘇澳外海各迴歸期颱風設計波高

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	13.7	14.7	13.3	14.6	12.1	14.3	10.9	13.9	9.6	13.4	9.2	13.2	7.8	12.7
SSE	14.0	15.0	13.7	14.9	12.8	14.7	11.8	14.4	10.7	14.0	10.4	13.9	9.2	13.5
SE	17.8	17.2	17.4	17.1	16.2	16.8	14.9	16.4	13.6	15.9	13.1	15.7	11.5	15.2
ESE	19.6	17.6	19.2	17.5	17.9	17.2	16.5	16.8	15.0	16.3	14.5	16.2	12.8	15.6
E	20.7	18.8	20.3	18.7	18.9	18.2	17.4	17.7	15.7	17.2	15.2	17.0	13.3	16.3
ENE	20.6	20.4	20.1	20.3	18.6	19.6	17.1	18.9	15.4	18.2	14.8	17.9	12.9	16.9
NE	18.6	20.9	18.1	20.7	16.7	19.9	15.2	19.1	13.6	18.1	13.0	17.8	11.2	16.6
NNE	14.9	21.3	14.5	21.0	13.4	20.0	12.1	19.0	10.7	17.8	10.3	17.3	8.7	15.9
N	12.9	19.1	12.5	18.9	11.4	18.0	10.2	16.9	8.8	15.7	8.4	15.3	6.9	13.8

註：1.推算目標區為 121.94°E，24.58°N。
2.目標區水深為-500m。
3.Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

2.1.2 沉箱堤址波力計算

本研究計算防波堤沉箱堤前波高，採用合田良實(Goda)[1]波壓公式，其壓力分佈如圖 5 所示，計算步驟詳述如下：



資料來源：Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan，本計畫整理

圖 5 防波堤直立部份波壓分佈圖

(一)示性波高與最大波高計算：

由 Goda 波壓公式計算堤體受力所得示性波高、最大波高與相當外海波高間關係式，如式 1、式 2。

$$Hs=\begin{cases} KsHo' & h/Lo\geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o H_o'+\beta_1 h),\ \beta_{max}H_o',\ K_sH_o'\} & h/Lo<0.2 \end{cases} \quad (式\ 1)$$

式中

$\beta_o=0.028(H_o'/L_o)-0.38\exp^{[20\tan 1.5\theta]}$

$\beta_1=0.52\exp^{[4.2\tan\theta]}$

$\beta_{max}=\max\{0.92,\ 0.32(Ho'/Lo)^{-0.29}\exp^{[2.4\tan\theta]}\}$

$$H_{max}=\begin{cases} 1.8KsHo' & h/Lo\geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o{}^*H_o'+\beta_1{}^*h),\ \beta_{max}{}^*H_o',\ 1.8K_sH_o'\} & h/Lo<0.2 \end{cases} \quad (式\ 2)$$

式中

H_o'：相當外海波高($H_o'=H_o\cdot K_r\cdot K_d$)

$\beta_o{}^*$：$0.052(H_o'/L_o)^{-0.38}\exp^{[20\tan 1.5\theta]}$

$\beta_1{}^*$：$0.63\exp^{[3.8\tan\theta]}$

$\beta_{max}{}^*$：$\max\{1.65,\ 0.53(H_o'/L_o)^{-0.29}\exp^{[2.4\tan\theta]}\}$

tanθ：堤址附近海底坡度

(二)波壓作用高程，如式 3：

$$\eta=0.75(1+\cos\beta)\lambda_1 H_{max} \quad (式\ 3)$$

式中

η：波壓作用在靜水位以上高度(m)

β：入射波向與海堤垂線之夾角±15°取其大者

λ_1：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8～1.0，通常沉箱堤設計採用 1.0;拋石堤則採用 0.9

(三)波壓強度，如式 4 至式 7：

$$P_1=1/2(1+\cos\beta)(\lambda_1\alpha_1+\lambda_2\alpha_2\cos 2\beta)W_oH_{max} \quad (式\ 4)$$

$$P_2=\frac{P_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (式\ 5)$$

$$P_3=\alpha_3\cdot P_1 \quad (式\ 6)$$

$$P_4=\alpha_4\cdot P_1 \quad (式\ 7)$$

β：入射波向與堤線垂線之夾角±15°，取其大者

λ_1：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8～1.0

λ_2：碎波波壓項之修正係數

λ_3：上揚壓力項之修正係數

$$\alpha_1 = 0.6 + 1/2\left(\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right)^2$$

$$\alpha_2 = \min\left[\frac{h_b - d}{3h_b}\left(\frac{H_{max}}{d}\right)^2,\ \frac{2d}{H_{max}}\right]$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h}\left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)}\right]$$

$\alpha_4 = 1 - h_c^*/\eta^*$

$h_c^* = \min[\eta^*, h_c]$

式中

P_1：靜水位之波壓強度(t/m^2)

P_2：海底之波壓強度(t/m^2)

P_3：堤底之波壓強度(t/m^2)

P_4：胸牆頂之波壓強度(t/m^2)

h ：堤趾水深(m)

h_b：堤前5倍$H_{1/3}$距離處之水深(m)

h' ：直立部份之水深(m)

d ：護基方塊或覆坡石(塊)中水深較小者(m)

W_o：海水單位重(t/m^3)

L ：水深h處之波長

min{a,b}：a,b 中取較小值

本研究防波堤為消波式沉箱結構，波力計算雖仍可採用 Goda 之波壓公式，但早期設計λ1(緩變波壓項之修正係數)於消波式沉箱中皆採用 0.9，惟該公式已有部分修正，隨著波浪作用狀況不同，λ_1、λ_2之值應做修正(如圖 6 及表 3 所示)，後續計算波力，將分別依 3 種不同波浪作用狀況，計算受力總合，結果則是採用最保守之波力條件檢核消波式沉箱外力條件。

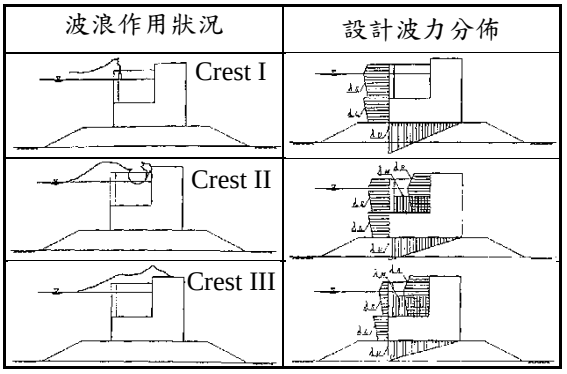


圖 6 消波式沉箱防波堤波壓作用分佈圖

表 3 消波式沉箱防波堤波壓係數表

		CrestI	CrestII	CrestIII
消能壁	λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{S2}	$\begin{cases}0.4 & (\alpha^* \le 0.75)\\ 0.3/\alpha^* & (\alpha^* > 0.75)\end{cases}$	0	0
前壁	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	$\begin{cases}0.4 & (\alpha^* \le 0.5)\\ 0.2/\alpha^* & (\alpha^* > 0.5)\end{cases}$	0	0
後壁	λ_{R1}	0	$\begin{cases}20\ell/3L' & (\ell/L' \le 0.15)\\ 1.0 & (\ell/L > 0.15)\end{cases}$	$\begin{cases}1.4 & (H/h \le 0.1)\\ 1.6-2H/h & (0.1 < H/h < 0.3)\\ 1.0 & (H/h \ge 0.3)\end{cases}$
	λ_{R2}	0	$\begin{cases}0.56 & (\alpha^* \le 25/28)\\ 0.5/\alpha^* & (\alpha^* > 25/28)\end{cases}$	0
底版	λ_{M1}	0	$\begin{cases}20\ell/3L' & (\ell/L' \le 0.15)\\ 1.0 & (\ell/L > 0.15)\end{cases}$	$\begin{cases}1.4 & (H/h \le 0.1)\\ 1.6-2H/h & (0.1 < H/h < 0.3)\\ 1.0 & (H/h \ge 0.3)\end{cases}$
	λ_{M2}	0	0	0
揚壓力	$\lambda_U(=\lambda_3)$	1.0	0.75	0.65

考量不同情況下之波壓修正計算，Crest I 之波力及揚力皆有增加，導致滑動及傾倒安全係數略有減少，Crest II 之波力及揚力皆減小，導致滑動及傾倒安全係數增加，Crest III 之波力減小且總揚力極小。

(四)浮力及上揚力浮力：

浮力僅考慮直立堤身於設計水位以下部份；上揚力則假設為三角形分佈，作用於直立堤身底部；最大上揚力 P_u 作用於海側堤趾，港側堤趾 P_u 為零，其計算公式，如式 8：

$$P_u = 1/2(1+\cos\beta)\cdot\lambda_3\cdot\alpha_1\cdot\alpha_3\cdot W_o\cdot H_{max} \quad (式\ 8)$$

(五)波力合成力及其力矩：

基於上述計算，波力合成力 P 及力矩 M_p 可依式 9、式 10 求得：

$$P=1/2(P1+P3)h'+1/2(P1+P4)h_c^* \quad (式\ 9)$$

$$M_p=1/6(2P_1+P_3)h'^2+1/2(P_1+P_4)h'\times h_c^*+1/6(P_1+2P_4)h_c^{*2} \quad (式\ 10)$$

上揚力之合成力 U 及力矩 M_u，如式 11、式 12 計算得知：

$$U=1/2P_u\cdot \ell_u \quad (式\ 11)$$

$$M_u=2/3U\cdot \ell_u \quad (式\ 12)$$

式中

ℓ_u：表示上揚力作用於堤底範圍，若直立堤身位於設計水位之下，則ℓ_u=B 堤底寬，若直立堤身位於設計水位以上則

$$\ell_u=\min\left\{B,\ 0.2\frac{(\eta^*+h')^2}{|h'|}\right\}$$

其中

h′：直立堤底部出水面高度(取負值)

2.1.3 防波堤結構安全性分析

堤體安全性分析方法：有關護基方塊護面石及堤址塊石重量計算，係採用 Hudson 類型之公式(如式 13)推算。

$$W=\frac{\gamma_s H_s^3}{N_s^3(S_r-1)^3} \quad (式\ 13)$$

式中

W：護面塊重量(t)

γ_s：護面塊單位重(t/m^3)

H_s：堤前設計波高($H_{1/3}$)

S_r：護面塊對海水比重

N_s 依谷本勝利(TANIMOTO)建議之計算方式(如式 14)，依護基型式不同如表 4 所示。

$$Ns=\max.\left\{1.8,\ \left[A\frac{1-k}{k^m}\frac{h'}{H_{1/3}}+NSC\exp\left(-B\frac{(1-k)^2}{k^m}\frac{h'}{H_{1/3}}\right)\right]\right\} \quad (式\ 14)$$

式中

$$k=\frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')}\sin^2\left[\frac{2\pi B_m}{L'}\right]$$

h'：護基方塊放置處之水深(m)

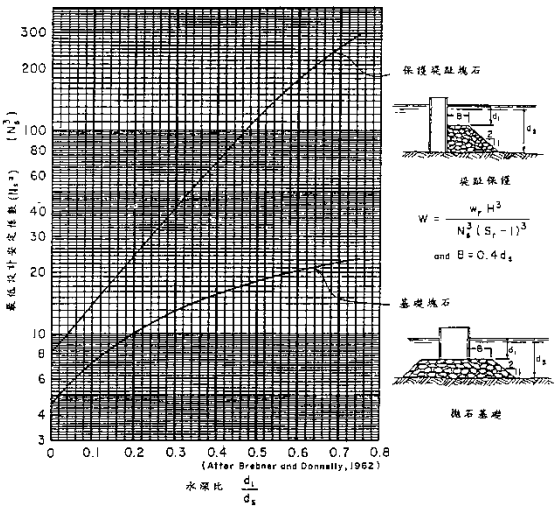
L'：h'水深處之波長(m)

B_m：堤前拋石平台寬(m)

表 4 A 型、m、NSC、B 型：係數，依護基型式而取不同值

護基型式	A	m	NSC	B
塊石	1.3	1/3	1.8	1.5
方塊	1.0	1/3	1.4	1.2
開孔方塊	0.82	1/2	1.6	0.9

另 Shore Protection Manual 依拋石功用區分為基礎保護用及護基用 2 大類型，具以提供安定係數 N_s^3 圖表選取之方式，如圖 7 所示。



資料來源：Shore Protection Manual

圖 7 護基及堤址拋石之安定係數圖

上述谷本勝利(Tanimoto)公式利用原設計颱風波浪條件計算結果，可得本研究方塊重量須達到 7.03t～11.05t，分別由原設計圖斷面兩種護基方塊尺寸，3mx2mx2m(A 型)及 3mx3mx2m(B 型)計算其重量分別為 27.6t 及 41.4t。經檢

討可知護基方塊A型及B型重量皆大於11.05t，可符合原設計颱風波浪需求。

2.1.4 堤體穩定性評估

有關堤體穩定分析，分別依滑動與傾倒驗算，如式15、式16：

(一)滑動驗算：

$$SF_s = \frac{\mu(W_A - W_B - U) + W_S}{P} \quad \text{(式 15)}$$

式中

SFs：滑動安全係數

μ：摩擦係數

W_A：堤體重量

W_B：堤體所受之浮力

U：堤體所受之上揚力

W_S：堤體所受之被動土壓力

P：堤體所受波浪之合力

(二)傾倒驗算：

$$SF_o = \frac{M_A - M_B - M_U + M_S}{M_P} \quad \text{(式 16)}$$

式中

SF_o：傾倒安全係數

M_A：由堤體自重產生之抗傾力矩

M_B：由堤體所受浮力產生之力矩

M_U：由堤體所受上揚力產生之力矩

M_S：由堤體所受被動土壓力產生之抗傾力矩

M_p：總波力矩

2.1.5 消波艙結構安全性探討

針對消波艙之混凝土剪力破壞，及分段施工造成之接合面破壞加以探討。

(一)消波艙之剪力破壞分析：

混凝土剪力計算強度公式如式17

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c'}\,b_w d \quad \text{(式 17)}$$

式中

V_c：剪力強度(kg)

f_c'：混凝土之抗壓強度(kg/cm^2)

b_w：寬度

以花蓮港消波艙開孔與開孔間之混凝土最短距離至少超過 80cm 且厚度至少 200cm 條件計算，可知以 175kg/cm^2 混凝土打設 30cm*200cm 之混凝土面積，至少可承受約 112 噸之外力作力，其遠大於波力所產生之外力，在混凝土結構一致之條件下，消波艙之混凝土結構應不致產生破壞。

(二)混凝土分段施工面之破壞分析：

花蓮港在混凝土結構完整之條件下本身可承受剪力；但由於消波艙之高度必須施作消波艙之開孔，故實際施工時，必須分次施工，依現場研判，每次澆鑄混擬土之厚度約為 1.0m~1.5m 左右，部份之破壞是由施工交接面所產生，消波艙外壁頂部與下層之混凝土間並未完整接合，當波力作用時，消波艙外壁僅能依靠重力所產生摩擦力保持穩定，當颱風大浪來襲時，如波力大於摩擦力及後側混凝土剪力總合時，就容易產生外壁破壞之情況。以 1 次澆鑄 2 艙，每艙 4m 寬、內隔牆厚度 0.8m、外壁厚 3m、混凝土高度 1.5m 及 50 年迴歸期颱風波浪所產生之堤頂波壓 11.17ton/m^2 做為初步驗核之基準波力計算。

受力面積：$1.5*(4*2+0.8)-4*\pi*1.4^2/4=7.04m^2$

波力總合：$11.17ton/m^2*7.04m^2=78.64ton$

(三)混凝土剪力計算：

花蓮港防波堤以後側牆高 1m 為條件，堤後可能破壞角及波力於破壞面上之分力，整理如表 5 與圖 8 所示。

表 5 堤後破壞角與波力及剪力關係表

破壞角 (度)	剪力 (ton)	波力(ton) (斜面分力)	差值 (ton)
10	323.01	77.44	245.57
20	164.00	73.89	90.10
30	112.18	68.10	44.08
40	87.26	60.24	27.02
50	73.22	50.55	22.67
60	64.77	39.32	25.45
70	59.69	26.90	32.79
80	56.96	13.66	43.30

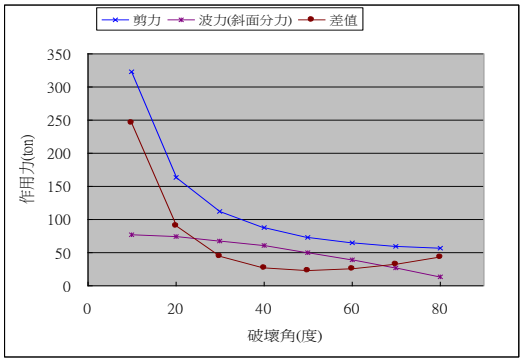


圖 8 堤後破壞角與波力及剪力關係圖

由以上計算結果顯示，花蓮港防波堤外牆後方側牆提供剪力均大於波力，當破壞角約為 50°時，兩者差值最小，剪力仍較波力多出約 22.67 噸，表示外牆受均勻力量作用時，側牆不致於產生剪力破壞。進一步探討側牆發生破壞原因之一，可能是作用於外牆之波力並非均勻分佈，如波力較偏於一側，側牆會因受彎矩作用而產生破壞分離。

(四)消波艙結構安全性計算：

花蓮港此處採用海側前消波艙，前寬 4m，內長 5m，高 7m，兩邊側牆厚 0.8m，後側版厚 2m、前側(含消波孔)版厚 3m，三邊固定，如圖 9 所示。計算可知，兩邊側牆厚僅需超過 0.51m 即可符合需求，而現況兩邊側牆厚度已超過標準，應屬安全設計。

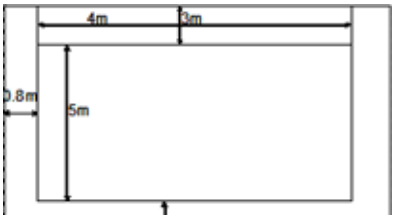


圖 9 消波艙尺寸示意圖

三、防波堤結構補強工法研擬

研擬之保護與維護工法區分為基礎淘空及護基方塊位移補強、消波艙破壞補強及沉箱隙縫探討，相關研擬方案如下詳述。

3.1 基礎淘空及護基方塊位移補強

沉箱之護基方塊已有位移且造成基礎淘空情況，雖然經由安全評估探討，此狀況對沉箱擋浪功能之影響較小，但若長時期之淘空，亦不排除造成沉箱本體損傷而致破壞，其安全性亦需重視。

為因應較嚴重之基礎淘空及護基方塊位移情況，研擬修補基礎淘空方案。

1. 短期方案研擬：

蘇澳港防波堤歷年沉箱內填沙外漏並造成解體破壞狀況影響最大，將直接影響堤體抵禦波浪能力及港內水域之靜穩外，未來混凝土材質劣化問題將愈加嚴重，初步建議可先行於堤面以鑽探方式以確認目前是否有漏沙情形，並視需要採用水中混凝土取代海側第 1 艙之回填沙以加固壁體，如圖 10 所示。

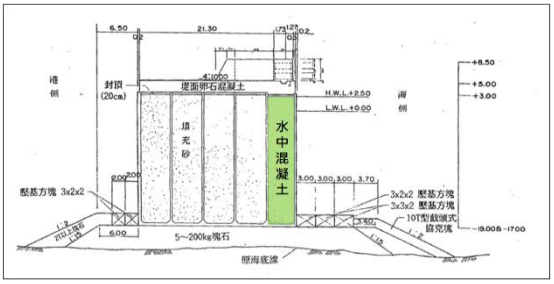


圖 10 沉箱壁體補強斷面示意圖

除對增加蘇澳港堤體穩定略有幫助之外，亦有效增加沉箱外壁強度並避免因 RC 劣化而毀損，確保堤體不致因外壁破壞於短時間內產生漏沙及解體連鎖效應。

2. 永久修復方案：

為防止現有堤基繼續淘空並使其護基方塊達到所需重量，可參考日本於阪神大地震後神戶港之修復工法，建議可採用水中混凝土將現有基礎淘空處及護基方塊一併澆置，如圖 11 所示。藉由水中混凝土修補現有淘空部位，以防止堤基細料繼續流失及使其重量達到 101t 以上，以確保現有堤基之穩定性。

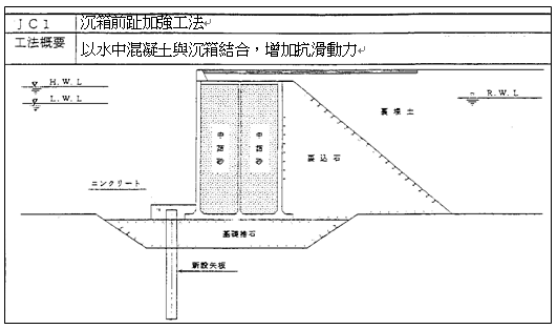


圖 11 永久修復方案示意圖

3. 緊急修復方案：

考量花蓮港現有護基方塊重量不足並已位移，建議可先以吊移或破碎方式將其清除，再利用石塊修補現有基礎淘空處及將堤前拋石基礎整平，最後重新放置開孔或實心方塊作為護基方塊。由前計算可知，若以更新設計條件所計算之 50 年迴歸期颱風波浪計算，其方塊重量需達 101t 或開孔方塊需達 46t 以上，方可確定不會移動，建議可直接採用開孔方塊 l(m)xb(m)xh(m)=5.0x2.5x2.0，t=0.3m 或空心方塊並回填塊石方式使其重量達到 101t 以上，做為本方案所需之護基方塊。

3.2 消波艙破壞補強及沉箱隙縫探討

1. 消波艙破壞補強，屬防波堤上部胸牆結構，其損壞對防波堤主體結構影響較低。由消波艙安全評估探討可知，其破壞類型包括開孔面及側牆破壞，但整體而論皆屬於消波艙本身結構性破壞，因此消波艙之補強方案初步可採用以下方法：
   (1) 消波艙開孔面及側牆面加厚，消波艙側牆會發生破壞之原因，其中可能是波力作用於外牆時並非均勻分佈，例如波力較偏於一側，則會造側牆受彎矩作用產生破壞而分離。因此，補強方案可採用消波艙開孔面及側牆加厚方式來增加抵抗彎矩破壞作用力，惟此法可能因降低開孔之孔隙率而使堤面承受正向之波力增大，由堤體穩定評估可知，因滑動安全係數依原設計條件估算尚達 1.27，故增加部分波力應不致影響堤體結構安全。
   (2) 消波艙內填放塊石或消波塊，此項方法係利用大型塊石填充於消波艙內，除可增加堤體自重外，亦可藉由填充艙內空間來增加消波艙開孔面及側牆抵抗力矩。惟此法須考量消波孔直徑與塊石大小之關係，亦即需採用大型塊石以防止塊石藉由消波孔流失。
   (3) 若考慮大型塊石取得不易或容易由消波孔流失問題，則可考量採用消波塊替代，惟填放之消波塊應慎選固定性較佳且適合既有消波艙尺寸之型式。
2. 沉箱隙縫探討經結構穩定計算可知，無論是原設計或本計畫重新推算之波浪條件，其滑動及傾倒之安全係數都大於 1.0，顯示現有沉箱尚無受波浪外力而產生移動之可能。故現有沉箱隙縫應屬施工時所造成，亦即現有沉箱隙縫應為完成初期即發生之情形。由現況調查發現，現有沉箱隙縫尚未造成護基方塊移動或堤基石料淘空情形，是以尚無結構安全疑慮。

未來仍需藉由持續監測瞭解是否有上述之損壞情形，若一經發現因沉箱隙縫所造成淘空之情形，將可比照上述所建議之基礎淘空及護基方塊位移補強方案辦理後續維護。

四、結論

為進一步瞭解部分沉箱堤址較嚴重掏空之內部填充粒料是否有溢出情形，本研究辦理沉箱堤體鑽探工作，由鑽探調查的結果進行探討，可以得知沉箱內填沙所產生之空隙，可能的原因為長年外力震動而導致沙料緊實所致，初期尚無發生沉箱漏沙之可能。而沉箱之內艙雖有空隙，尚無結構安全之影響。目前針對沉箱堤體採用透地雷達及回聲敲擊法調查方式，嘗試新方法之探究和判斷解析之可行性。

護基方塊乃為沉箱堤腳保護之重要一環，護基方塊移動則致使堤基拋石外露，進一步將造成堤基淘空而有傾斜之危險，臺灣東部港口開口胸牆防波堤多為低基式沉箱堤，堤基淘空後將使沉箱發生前傾現象，對沉箱擋浪功能之影響有限，但若長時期之淘空，亦不排除造成沉箱本體損傷而致破壞，故護基方塊之穩定性雖屬附屬保護設施，但其安全性亦需重視，有鑑於現況護基方塊已有移動之情形，顯示現況波浪條件已有超過原設計波浪條件(相當於 10 年颱風波浪條件)，但尚未超過本計畫推算之 50 年颱風波浪設計條件。

堤體穩定分析方面，採用原設計波浪條件及 50 年設計波浪條件進行穩定計算，結果發現若以原設計波浪條件(相當 10 年颱風波浪設計條件)保守估計安全係數皆大於 1.2 而滿足規範需求，而若以本計畫 50 年颱風波浪比對可知，其滑動安全係數保守估計已降為 1.09 而低於規範需求之 1.2，但若以大於 1.0 作為破壞依據，則約可承受 50 年颱風波浪侵襲，此與現況沉箱本體並無產生結構性破壞之現狀相符。

參考文獻

1. Goda, Yoshimi, Random Seas and Design of Maritime Structures, Tokyo: University of Tokyo Press, Japan, 1985.
2. US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual- Part II, Official Publications of HQ USACE Website, Publications / Engineer Manuals,2002,EM 1110-2-1100.
3. Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT),National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Port and Airport Research Institute,Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilitiesin Japan, The Overseas Coastal AreaDevelopment Institute of Japan, 2009.
4. 交通部運輸研究所、台灣世曦工程顧問股份有限公司，蘇澳港防波堤沉箱安全評估及港池靜穩度探討，港灣技術研究中心工作計畫書，2020。
5. 交通部運輸研究所，港灣海氣象觀測資料統計年報，港灣技術研究中心報告，2016~2018。
6. 交通部運輸研究所、台灣世曦工程顧問股份有限公司，蘇澳港灣防波堤沉箱安全評估探討及構造物維護管理資訊系統調查建置工作，港灣技術研究中心報告，2012。
7. 何良勝、曾相茂、吳基、林柏青、蘇青和，臺灣主要港口附近海域長期性海氣象觀測及資料特性應用之研究，交通部運輸研究所，2009~2012。
8. 何良勝、曾相茂、吳基、林柏青、蘇青和，臺灣地區主要港口附近海域海

氣象觀測調查及資料庫建立之研究，交通部運輸研究所，2005~2008。
9. 臺灣港務公司高雄港務分公司，高雄港港灣設施維護管理手冊及港灣設施維護管理制度，2006。
10. 交通部運輸研究所，港灣設施防災技術之研究(一)－港灣構造物維護管理準則之研究，2004。
11. 交通部，港灣構造物安全檢測與評估之研究，2001。
12. 湯麟武，港灣及海域工程-中國工程師手冊水利類第 11 篇，中國土木水利工程學會，1999。
13. 日本運輸省港湾技術研究所，港湾構造物の維持・補修マニュアル，財団法人沿岸開発技術研究センター，1999。
14. 臺灣省政府交通處基隆港務局，基隆港務局港埠設施維護檢修作業規定，1998。
15. 日本運輸省港灣技術研究所，港湾構造物の維持・補修手冊，1996。
16. 湯麟武，淺灘海岸上波浪推算方法之研究，成功大學土木水利學術彙刊第 1 期，1970，pp.105~164。
17. 湯麟武，波浪學綱要，臺南水工試驗所印行，1986。
18. 井島武士等，數值計算颱風域內波分佈-海洋上颱風場合，日本第 14 回海岸工程學講演會論文集，1967。

蘇澳港及花蓮港風波條件之可工作機率探討

羅冠顯　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
陳子健　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究助理

摘要

蘇澳港及花蓮港位處臺灣東北部海域，每年除受季風影響外，亦常遭受颱風之侵襲，海事工程施工品質、工作效率及工期長短與海氣象環境息息相關，如何掌握海域作業環境、氣候條件及可工作日，在有限作業天數內，達到最高施工效率，為專案管理者相當重要之課題。

本研究以交通部運輸研究所港研中心設置於蘇澳港及花蓮港海氣象觀測站歷年蒐集之波高及風速資料為分析依據，探討東北部海域在不同波高、風速持續 6、12、18 及 24 小時可工作機率，並依月、季提出可工作機率圖表，提供港域工程、規劃單位，做為規劃工期、安排工班及趕工之參考，提升整體作業效率。

波高可工作機率分析結果，蘇澳港及花蓮港海域於波高 0.5 m 作業條件下，各月可工作機率均低於 25%，10~4 月間可工作機率最低，連續 6~24 小時可工作機率約為 0%，夏季雖為颱風好發期，整體而言，海況條件仍優於其餘 3 季，進入冬季後，海域受東北季風影響，作業條件較差，以作業波高 0.8 m 為例，蘇澳港冬夏 2 季連續作業 6 小時，可工作機率相差約 28 倍，花蓮港則相差約 34 倍。

風速可工作機率分析結果顯示，風速作業門檻為 7.9 m/s 時，蘇澳港及花蓮港連續作業 6 小時可工作機率均超過 90%，以離岸風機安裝船 Seajacks Zaratan，現場作業所允許之最大風速 13.8 m/s 分析，四季 2 港域持續作業 6~24 小時可工作機率可達 95%。

一、緣起及目的

蘇澳港及花蓮港分別位處臺灣東北側海域，兩港相距約 70 公里，為我國重要之國際商港及輔助港，亦為海上運輸重要樞紐，配合港區未來發展計畫，相關工程逐漸孕育而生，由於臺灣地理位置特殊，每年易受季風及颱風影響，雖可帶來豐沛雨量，卻也使現場施工效率降低，長延時劇烈天氣變化，導致工程無法進行，而造成工期延宕。工期的管控對施工專案而言，為相當重要之環節，妥善安排工期可提高施工效率及生產力，尤以海事工程更是顯著，相較於陸地施工，海上作業需克服風、波浪等因素影響，因此，如何使工程如期(On time)、如預算(On budget)及如質(On quality)完成，為施工管理者重要之課題。

前人亦有針對港區現場可工作機率，採用不同分析方式探討，朱等人(2000)就波浪、風速及過繼時間對可工作日數之各別及共同影響進行研究，其研究目的在建立海事施工工程規劃，可工作日數分析之方法，估算各種影響因素的發生機率特性，推導可工作日數，可工作日數的估算分為風速、波高的單一因素影響、受波高與風速同時影響，及加入過繼時間的影響，並以龍洞海域實測海氣象資料為例，估算其可工作日數。陳等人(2018)採用波浪擾動模擬(MIKE 21 BW)與大範圍長期波浪模式(MIKE 21 SW)對桃園觀塘海域施工區域之不可作業時間進行分析，以不同海上作業項目做為波高標準區隔，沉箱拖放區域

以波高 0.5 m 做為標準，較大之船機設備以 0.8 m 做為標準，而對於浚深區域，則分別以 1.0、1.25 及 1.5 m 為作業標準，統計不可作業時間。黃等人(2012)以 SWAN 模式推算 1948~2008 年臺灣周邊海域可工作天數，以有義波高 0.6 m 為門檻，探討每個月波高小於該門檻並且持續 6、12、18、24 小時等四種延時條件發生機率，其方法為從重建的 60 年歷史資料庫中，分別針對臺灣東西岸找出符合可工作條件的事件次數，除以每個月的總時數，計算可工作機率的 60 年平均值。

本研究參考前人文獻，蒐集蘇澳港及花蓮港 2002~2019 年波高、風速逐時觀測資料，分析不同波高、風速門檻持續 6、12、18 及 24 小時可工作機率，分析成果可提供本研究港口鄰近海域相關單位，做為現場工期規劃、工程施作及趕工安排等作業應用參考。

二、港區海氣象觀測系統

臺灣四面環海，位處大陸棚與西太平洋交接處，氣候多變，冬夏兩季常遭受季風、颱風、熱帶性低氣壓影響，顯示海氣象環境的複雜與特殊性。本所港研中心陸續在基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、臺中港、臺北港及馬祖港等 9 港區，設置長期性海氣象監測系統，提供港務、學術及顧問公司等產官學研相關單位，做為港埠建設、航行安全及營運維護參考依據。

本研究選用蘇澳港及花蓮港現場海氣象觀測系統歷年所觀測蒐集之波高與風速資料，執行可工作機率分析探討，各港波浪及風速觀測站係用於量測分析港區範圍內波浪與風力場之變化，所有觀測站皆採太陽能供電，控制箱內置資料記錄器、無線傳輸設備及電源控制等模組，將各測站觀測資料即時回傳儲存、加值及應用，2 港域波浪及風力觀測站位置及系統架構如圖 1~圖 2 所示。

（a）蘇澳港

（b）花蓮港

圖 1 海氣象觀測站位置示意圖

圖 2 海氣象觀測系統架構圖

三、港區可工作機率分析

3.1 機率統計方式

考量單日資料完整性，每日至少需包含 23 筆（即 23 小時）觀測資料，統計分析至 2019 年 8 月 31 日，依此範疇篩選符合之資料，蘇澳港波浪觀測資料自 2004~2019 年 8 月共計 115,243 筆，風觀測資料自 2003~2019 年 8 月共計 121,879 筆；花蓮港波浪觀測資料自 2004~2019 年 8 月共計 117,921 筆，風觀測資料自 2002~2019 年 8 月共計 146,703 筆，如表 1 所示。

表 1 波高及風速觀測資料分析筆數表

港口	波高（蒐集率）	風速（蒐集率）
蘇澳港	115,243（85.2%）	121,879（85.8%）
花蓮港	117,921（87.4%）	146,703（97.3%）

本研究參考陳等人(2018)，依據不同海事作業項目將波高分為 0.5、0.6、0.8、1.0 及 1.5 m 等作業條件統計分析，風速門檻值擬定參考蒲福風級表，依據不同波高所對應之風速分級，分別以 5.4、7.9、10.7、12.0 及 13.8 m/s 執行分析。作業延時之訂定，則參考黃等人(2012)之建議，以特定海氣象限制條件下持續作業 6、12、18 及 24 小時，估算可工作機率，如式(1.1)所示，季節劃分方式，12 月至 2 月間歸屬於冬季，3 月至 5 月為春季，6 月至 8 月為夏季，9 月至 11 月為秋季，以此原則執行統計分析。

$$\text{可工作機率} = \left(\frac{\text{符合連續 N 小時筆數}}{\text{資料總筆數}}\right) \times 100\% \quad (1.1)$$

3.2 每月波高可工作機率分析

蘇澳港及花蓮港海域各月於 0.5、0.6、0.8、1.0 及 1.5 m 波高條件下，持續 6、12、18 及 24 小時可工作機率統計分析，如表 2~表 6、圖 3~圖 7 所示。

依據 2 港歷年各月可工作機率統計資料，於波高 0.5 m 作業條件下，各月可工作機率均低於 25%，10~4 月間可工作機率最低，連續 6~24 小時可工作機率約為 0%，7~8 月間雖為汛期，惟颱風仍屬非常態性事件，整體而言，仍可提供較高之可工作機率，以花蓮港為例，7 月可連續作業 6 小時機率為 24.42%（約 7.5 天），連續 12 小時為 12.21%，連續 18 小時機率為 8.83%，連續 24 小時機率為 3.90%（僅餘 1 天），工作機率隨所需作業時間延長而降低。

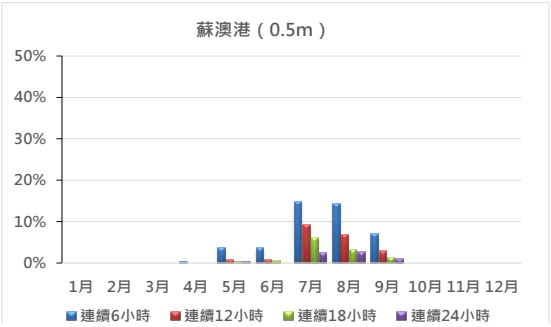
表 2 波高 0.5 m 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

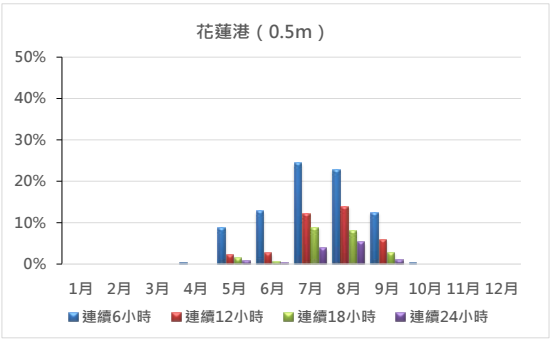
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4 月	0.29%	0.00%	0.00%	0.00%
5 月	3.66%	0.78%	0.26%	0.26%
6 月	3.57%	0.77%	0.51%	0.00%
7 月	14.77%	9.20%	6.05%	2.42%
8 月	14.35%	6.82%	3.29%	2.59%
9 月	6.94%	2.83%	1.29%	1.03%
10 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
11 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
12 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4 月	0.28%	0.00%	0.00%	0.00%
5 月	8.81%	2.27%	1.42%	0.85%
6 月	12.84%	2.69%	0.60%	0.30%
7 月	24.42%	12.21%	8.83%	3.90%
8 月	22.79%	13.95%	8.14%	5.35%
9 月	12.50%	5.90%	2.83%	0.94%
10 月	0.25%	0.00%	0.00%	0.00%
11 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
12 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 3 波高 0.5 m 可工作機率分佈圖

作業條件波高 0.6 m，2 港均於 7 月可提供較高之可工作機率，蘇澳港連續作業 6 小時可工作機率為 25.67%（約 8 天），連續 12 小時為 15.25%，連續 18 小時為 11.38%，連續 24 小時為 4.84%；花蓮港連續作業 6 小時機率為 37.14%（約 12 天），連續 12 小時為 22.86%，連續 18 小時為 16.10%，連續 24 小時為 10.65%。

10~2 月間東部海域因受東北季風影響，可工作機率急遽下降，2 港連續作業 6 小時、12 小時、18 小時及 24 小時可工作機率趨近於 0%，工程單位如欲於花蓮港施工，於 0.6 m 波高作業條件下持續施工 12 小時，可選擇於 8 月進場，以爭取較佳之工作機率。

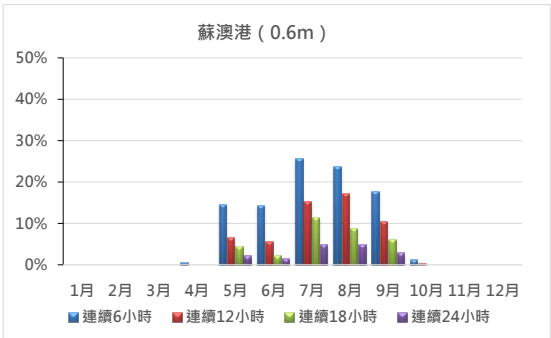
表 3 波高 0.6 m 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

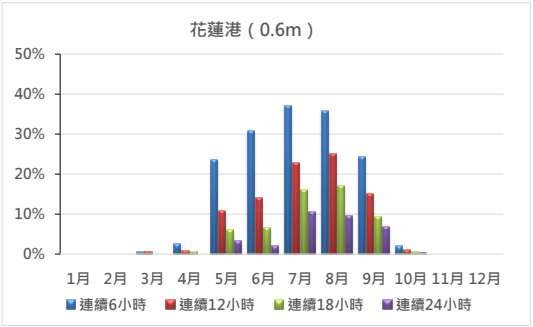
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
4 月	0.59%	0.00%	0.00%	0.00%
5 月	14.62%	6.53%	4.44%	2.09%
6 月	14.29%	5.61%	2.30%	1.53%
7 月	25.67%	15.25%	11.38%	4.84%
8 月	23.76%	17.18%	8.71%	4.94%
9 月	17.74%	10.28%	6.17%	2.83%
10 月	1.17%	0.29%	0.00%	0.00%
11 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
12 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3 月	0.51%	0.51%	0.00%	0.00%
4 月	2.50%	0.83%	0.56%	0.00%
5 月	23.58%	10.80%	5.97%	3.41%
6 月	30.75%	14.03%	6.57%	2.09%
7 月	37.14%	22.86%	16.10%	10.65%
8 月	35.81%	25.12%	16.98%	9.53%
9 月	24.29%	15.09%	9.43%	6.84%
10 月	1.99%	1.00%	0.50%	0.25%
11 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
12 月	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 4 波高 0.6 m 可工作機率分佈圖

波高條件 0.8 m 時，蘇澳港及花蓮港海域於 6~8 月間，連續作業 6 小時、12 小時、18 小時及 24 小時均可提供較佳之可工作機率，以連續作業 6 小時分析，蘇澳港於 6~8 月間約有 45 天可工作天數，花蓮港則約有 57 天之工作天數可供進場作業；廠商如需較長工作時數，以持續作業 12 小時為例，蘇澳港於 6~8 月間約有 30 天可工作天數，花蓮港則約有 41 天可提供進場作業。

10~2 月可工作機率較低，以連續作業 6 小估算，蘇澳港於 10~2 月間僅約有 4 天可作業，花蓮港約有 7 天；以連續作業 12 小時分析，蘇澳港可工作天數為 1 天，花蓮港為 3 天，整體而言雖將作業許可波高放寬至 0.8 m，10~2 月間蘇澳港及花蓮港海域仍不適合規劃現場海域作業。

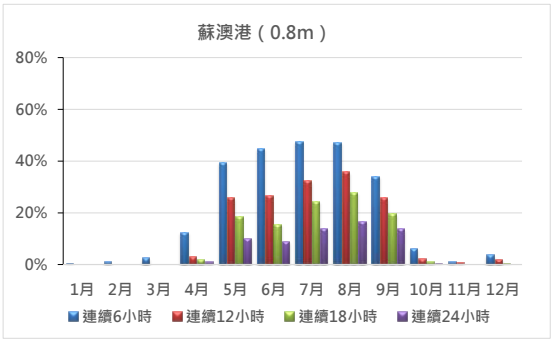
表 4 波高 0.8 m 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

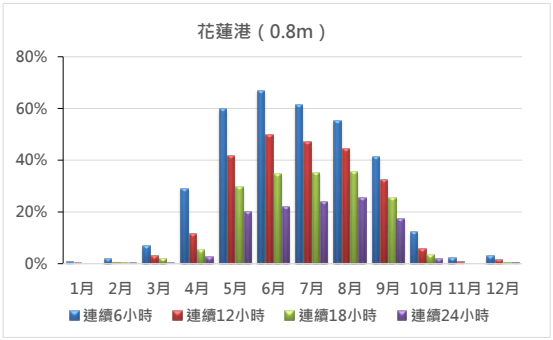
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.34%	0.00%	0.00%	0.00%
2 月	0.96%	0.00%	0.00%	0.00%
3 月	2.39%	0.00%	0.00%	0.00%
4 月	12.35%	2.94%	1.76%	0.88%
5 月	39.43%	25.59%	18.28%	9.92%
6 月	44.90%	26.53%	15.31%	8.93%
7 月	47.46%	32.20%	24.46%	13.80%
8 月	47.06%	35.76%	27.76%	16.71%
9 月	33.93%	25.71%	19.54%	13.62%
10 月	6.14%	2.05%	0.88%	0.29%
11 月	0.88%	0.59%	0.00%	0.00%
12 月	3.62%	1.95%	0.28%	0.00%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	0.72%	0.24%	0.00%	0.00%
2 月	1.75%	0.29%	0.29%	0.29%
3 月	6.82%	3.03%	2.02%	0.25%
4 月	28.89%	11.39%	5.28%	2.50%
5 月	59.66%	41.76%	29.55%	19.89%
6 月	66.87%	49.85%	34.63%	22.09%
7 月	61.30%	47.01%	35.06%	23.90%
8 月	55.35%	44.42%	35.35%	25.58%
9 月	41.27%	32.31%	25.47%	17.45%
10 月	12.19%	5.72%	3.48%	1.74%
11 月	2.11%	0.60%	0.00%	0.00%
12 月	2.99%	1.38%	0.46%	0.46%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 5 波高 0.8 m 可工作機率分佈圖

作業波高放寬至 1.0 m 時，5~8 月可提供較高可工作機率，如於蘇澳港需連續作業 6 小時，5~8 月間可工作機率均可達 6 成，尤以 6 月可工作機率 71.43%（約 22 天）最高，5 月 68.93%（約 21 天）次之，亦表示於 6~8 月間，如需於現場持續作業 6 小時，每月均有 2 星

期作業時間可提供海域規劃作業。12~1月可工作機率較差，連續作業 6 小時可工作機率均低於 10%（約 2 天）。

花蓮港 5~8 月連續作業 6 小時可工作機率為 70~80%，以可工作機率最高之 6 月為例，可工作天數約 25 天，5~8 月連續作業 12 小時可工作機率約 60~70%，連續作業 18 小時可工作機率仍約 50%；可工作機率較低之月份為 12 月，連續作業 6 小時機率 7.82%，整體而言，10~2 月可工作機率仍屬較差之月份，工程單位，如需於本海域作業，在允許作業波高 1.0 m 條件下，規劃於 5~8 月施工可獲得較佳之作業海況，提升整體工作效率。

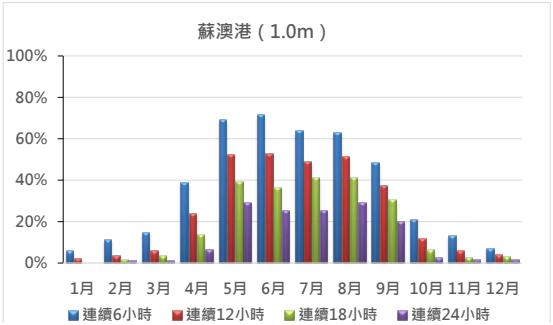
表 5 波高 1.0 m 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

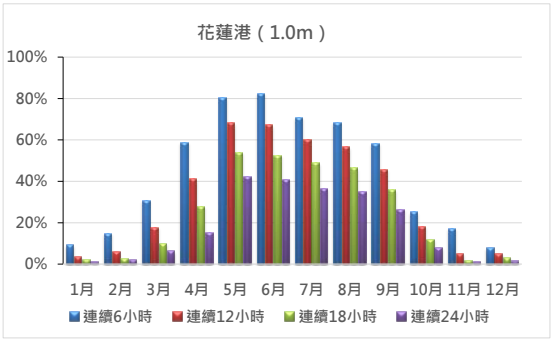
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	5.70%	2.01%	0.00%	0.00%
2 月	10.90%	3.53%	1.60%	0.96%
3 月	14.36%	5.85%	3.46%	1.06%
4 月	38.53%	23.53%	13.53%	6.47%
5 月	68.93%	52.22%	39.43%	28.98%
6 月	71.43%	52.55%	36.48%	25.00%
7 月	63.68%	48.67%	40.92%	25.42%
8 月	63.06%	51.29%	40.94%	28.94%
9 月	48.33%	37.28%	30.33%	19.79%
10 月	21.05%	11.70%	6.14%	2.34%
11 月	12.98%	5.60%	2.65%	1.47%
12 月	6.96%	3.90%	3.06%	1.39%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	9.16%	3.61%	2.17%	1.20%
2 月	14.58%	6.12%	2.62%	2.04%
3 月	30.81%	17.68%	9.85%	6.31%
4 月	58.61%	41.11%	27.78%	15.00%
5 月	80.40%	68.18%	53.69%	42.05%
6 月	82.39%	67.16%	52.54%	40.90%
7 月	70.65%	60.00%	48.83%	36.62%
8 月	68.37%	56.51%	46.28%	34.88%
9 月	58.25%	45.52%	35.61%	26.18%
10 月	25.12%	18.16%	11.94%	7.96%
11 月	17.22%	5.14%	1.81%	1.21%
12 月	7.82%	5.06%	2.99%	1.38%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 6 波高 1.0 m 可工作機率分佈圖

波高限制為 1.5 m 時，各月可工作機率有明顯上昇之趨勢，蘇澳港連續作業 6 小時全年度可工作機率為 55~95%，連續作業 12 小時機率為 30~90%，以 4~6 月可工作機率最高，4 月連續作業 6 小時機率為 92.94%，連續 12 小時為 79.71%，5 月連續 6 小時機率為 95.04%，連續 12 小時為 89.56%，6 月連續作業 6 小時機率 94.13%，連續 12 小時為 84.44%。可工作機率最低之月份為 12 月，連續作業 6 小時機率為 54.32%，連續 18 小時為 20.89%。

花蓮港 4~6 月可工作機率最高，單月連續作業 6 小時機率約 95%，連續工作 12 小時機率為 90%，連續 18 小時為 70~80%，連續工作 24 小時約 60~70%，可工作機率較差之月份與蘇澳港分析結果相同，以 12 月可工作機率最低，連續作業 6 小時機率為 47.59%，連續 12 小

時為 32.41%，連續 18 小時為 20.92%，持續作業 1 整天機率則為 12.87%。

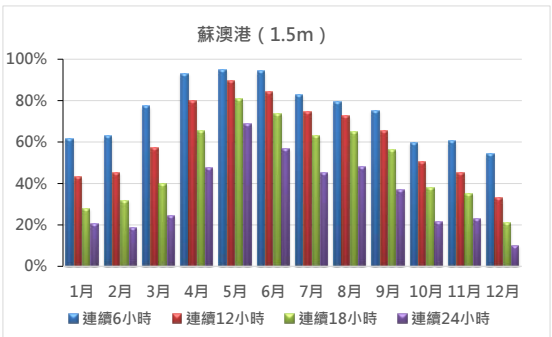
表 6 波高 1.5 m 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

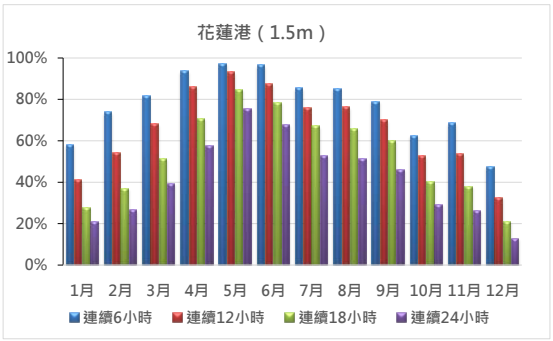
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	61.74%	42.95%	27.85%	20.47%
2 月	62.82%	45.19%	31.73%	18.59%
3 月	77.39%	57.45%	39.89%	24.47%
4 月	92.94%	79.71%	65.29%	47.65%
5 月	95.04%	89.56%	80.68%	68.67%
6 月	94.13%	84.44%	73.47%	56.89%
7 月	82.81%	74.58%	63.20%	45.28%
8 月	79.29%	72.47%	64.71%	48.00%
9 月	75.06%	65.55%	56.30%	37.02%
10 月	59.65%	50.29%	38.01%	21.35%
11 月	60.47%	45.13%	35.10%	23.01%
12 月	54.32%	32.87%	20.89%	10.03%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	58.07%	40.96%	27.71%	20.96%
2 月	73.76%	54.23%	36.73%	26.53%
3 月	81.57%	67.93%	51.26%	39.39%
4 月	93.61%	86.11%	70.83%	57.78%
5 月	97.16%	93.18%	84.66%	75.57%
6 月	96.42%	87.46%	78.51%	67.76%
7 月	85.45%	76.10%	67.01%	52.73%
8 月	85.12%	76.28%	65.81%	51.40%
9 月	78.77%	70.05%	60.14%	45.99%
10 月	62.44%	52.49%	40.05%	29.10%
11 月	68.58%	53.47%	37.76%	26.28%
12 月	47.59%	32.41%	20.92%	12.87%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 7 波高 1.5 m 可工作機率分佈圖

3.3 每季波高可工作機率分析

蘇澳港及花蓮港相距約 70 公里，依據各月波高可工作機率分析結果，2 港成正相關，將分析資料區分為春（3~5 月）、夏（6~8 月）、秋（9~11 月）及冬（12~2 月）四季論述，如表 7 及圖 8 所示。

蘇澳港及花蓮港分析結果，大致以夏季可提供較高之可工作機率，以連續作業 6 小時為例，蘇澳港於波高 0.5 m 作業限制下，可工作機率為 10.90%，波高 0.6 m 機率為 21.24%，波高 0.8 m 機率為 46.47%，波高 1.0 m 機率則為 66.06%，花蓮港於波高 0.5 m 可工作機率為 20.02%，波高 0.6 m 機率為 34.57%，波高 0.8 m 為 61.17%，波高 1.0 m 機率為 73.80%，工程單位應選擇於夏季施工，可獲得最佳之作業條件。冬季 2 海域因受東北季風影響，依據本所「108 年國際商港風波潮流觀測與特性分析」報告統計成果，蘇澳港及花蓮港歷年冬季波高平均同為 1.5 m，於此波場下，冬季可工作機率低於各季，以連續作業 12 小時條件分析，蘇澳港作業波高 0.5 m 可工作機率為 0.00%，波高 0.8 m 為 0.65%，波高 1.0 m 為 3.15%，花蓮港作業波高 0.5 m 可工作機率同為 0.00%，波高 0.8 m 為 0.64%，波高 1.0 m 為 4.93%。

夏季雖為颱風好發期，整體而言海況條件仍優於其餘 3 季，進入冬季後，東北季風對蘇澳港及花蓮港海域影響顯

著，海域作業條件相對較差，以作業波高 0.8 m 為例，蘇澳港冬夏 2 季連續作業 6 小時，可工作機率分別為 1.64%（冬季）、46.47%（夏季），2 者相差約 28 倍，花蓮港為 1.82%（冬季）、61.17%（夏季），相差約 34 倍，足以顯示施工進場時機重要性，此分析成果可提供港域工程、規劃單位，做為工期規劃、工班安排及趕工評估之參考，提升整體作業效率。

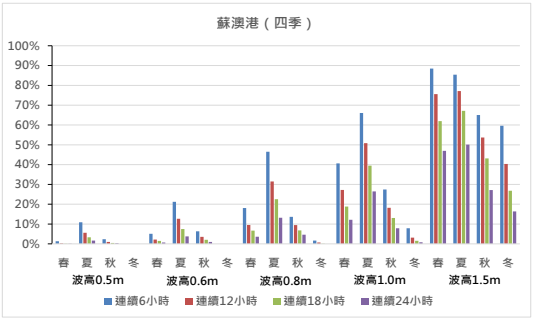
表 7 波高四季可工作機率統計表

（a）蘇澳港

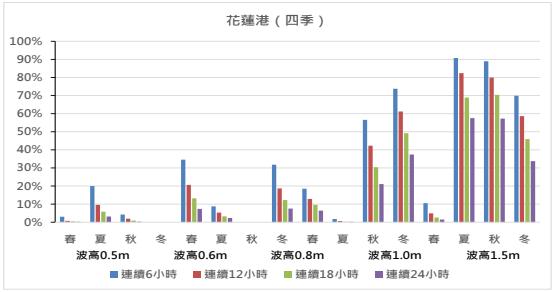
波高 0.5 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	1.32%	0.26%	0.09%	0.09%
夏	10.90%	5.60%	3.28%	1.67%
秋	2.31%	0.94%	0.43%	0.34%
冬	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
波高 0.6 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	5.07%	2.18%	1.48%	0.70%
夏	21.24%	12.68%	7.46%	3.77%
秋	6.30%	3.52%	2.06%	0.94%
冬	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
波高 0.8 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	18.06%	9.51%	6.68%	3.60%
夏	46.47%	31.50%	22.51%	13.15%
秋	13.65%	9.45%	6.81%	4.64%
冬	1.64%	0.65%	0.09%	0.00%
波高 1.0 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	40.61%	27.20%	18.81%	12.17%
夏	66.06%	50.84%	39.45%	26.45%
秋	27.45%	18.19%	13.04%	7.87%
冬	7.85%	3.15%	1.55%	0.78%
波高 1.5 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	88.46%	75.57%	61.95%	46.93%
夏	85.41%	77.16%	67.13%	50.06%
秋	65.06%	53.66%	43.14%	27.13%
冬	59.63%	40.34%	26.82%	16.36%

（b）花蓮港

波高 0.5 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	3.03%	0.76%	0.47%	0.28%
夏	20.02%	9.62%	5.86%	3.18%
秋	4.25%	1.97%	0.94%	0.31%
冬	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
波高 0.6 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	8.86%	4.05%	2.18%	1.14%
夏	34.57%	20.67%	13.22%	7.42%
秋	8.76%	5.36%	3.31%	2.36%
冬	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
波高 0.8 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	31.79%	18.73%	12.28%	7.55%
夏	61.17%	47.09%	35.01%	23.86%
秋	18.52%	12.88%	9.65%	6.40%
冬	1.82%	0.64%	0.25%	0.25%
波高 1.0 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	56.61%	42.32%	30.44%	21.12%
夏	73.80%	61.22%	49.22%	37.47%
秋	33.53%	22.94%	16.45%	11.78%
冬	10.52%	4.93%	2.59%	1.54%
波高 1.5 m				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	90.78%	82.41%	68.92%	57.58%
夏	89.00%	79.95%	70.44%	57.30%
秋	69.93%	58.67%	45.98%	33.79%
冬	59.81%	42.53%	28.45%	20.12%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 8 波高分季可工作機率分佈圖

3.4 每月風速可工作機率分析

本海域於風速 5.4、7.9、10.7、12.0 及 13.8 m/s 條件下，持續 6、12、18 及 24 小時可工作機率統計分析，如表 8~表 12、圖 9~圖 13 所示。

根據歷年各月可工作機率統計資料，風速 5.4 m/s 作業限制，以連續作業 6 小時分析，蘇澳港可工作機率除 10 月較低（仍有 80%），整體仍可提供 85~97%之工作機率，連續作業 18 小時，各月分析結果，仍有 40~65%可工作機率，與波高呈現截然不同分佈型態。花蓮港連續作業 6 小時可工作機率介於 90~99%，除 12 月 89.78%較低，其餘各月均有超過 9 成可工作機率，以連續作業 18 小時分析，各月可工作機率介於 35~60%間。

依據「108 年國際商港風波潮流觀測與特性分析」歷年風速統計資料，蘇澳港平均風速為 3.6 m/s，花蓮港為 3.4 m/s，平均風速較低之特性，使港域全年可工作機率增加。

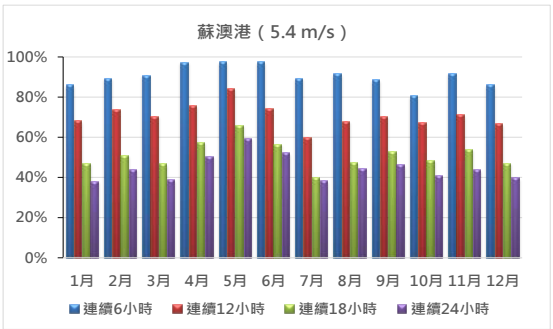
表 8 風速 5.4 m/s 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

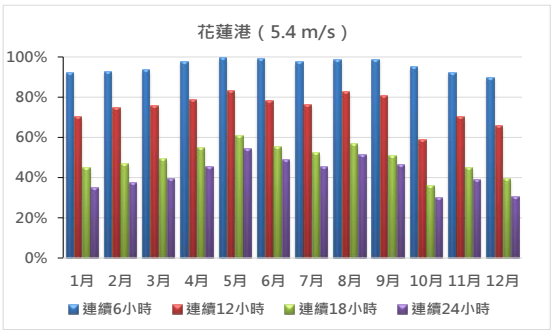
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	85.93%	67.96%	47.01%	38.02%
2 月	89.13%	73.60%	50.93%	43.79%
3 月	90.68%	70.34%	46.61%	38.70%
4 月	97.26%	75.56%	57.36%	50.37%
5 月	97.36%	84.17%	65.95%	59.23%
6 月	97.32%	74.21%	56.45%	52.07%
7 月	89.22%	59.91%	39.66%	38.15%
8 月	91.41%	67.89%	47.44%	44.38%
9 月	88.52%	70.26%	52.69%	46.14%
10 月	80.42%	66.98%	48.35%	40.57%
11 月	91.63%	70.94%	53.94%	43.60%
12 月	85.88%	66.67%	46.89%	39.55%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	92.16%	70.10%	44.95%	35.05%
2 月	92.63%	74.65%	46.77%	37.56%
3 月	93.57%	75.52%	49.17%	39.42%
4 月	97.65%	78.63%	54.91%	45.51%
5 月	99.42%	83.11%	60.58%	54.17%
6 月	99.18%	78.40%	55.14%	48.56%
7 月	97.37%	76.13%	52.26%	45.30%
8 月	98.50%	82.62%	56.64%	51.40%
9 月	98.56%	80.70%	50.92%	46.41%
10 月	94.91%	58.51%	35.62%	30.14%
11 月	92.34%	70.19%	44.72%	38.92%
12 月	89.78%	65.62%	39.29%	30.26%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 9 風速 5.4 m/s 可工作機率分佈圖

風速 7.9 m/s 作業門檻分析，蘇澳港及花蓮港連續作業 6 小時可工作機率均超過 9 成，將現場作業時間延長至 18 小時分析，蘇澳港可工作機率較低之月份為 7 月 59.27%，其餘各月可工作機率

仍約有 8 成，連續 24 小時分析結果，7 月 57.54%為個月最低，餘各月仍約有 70~80%。

花蓮港連續作業 6 小時可工作機率，全年各月份分析結果均超過 95%，連續作業 12 小時亦有 9 成可工作機率，連續 18 小時、連續 24 小時可工作機率略為降低，約 70~85%，可工作機率隨現場作業風速條件放寬大幅增加。

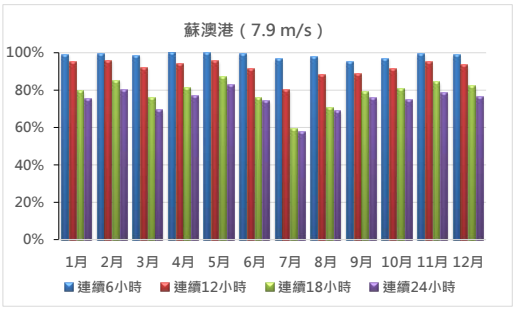
表 9 風速 7.9 m/s 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

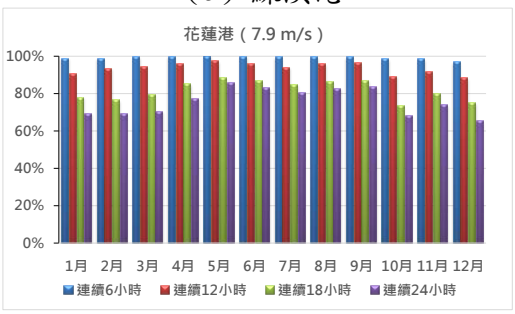
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	99.10%	94.91%	79.64%	75.45%
2 月	99.69%	95.96%	85.09%	80.12%
3 月	98.59%	92.09%	75.99%	69.21%
4 月	100.00%	94.26%	81.30%	76.81%
5 月	99.76%	95.68%	87.05%	82.73%
6 月	99.51%	91.48%	75.67%	74.21%
7 月	96.77%	80.17%	59.27%	57.54%
8 月	97.96%	88.34%	70.76%	68.71%
9 月	95.32%	88.76%	79.39%	75.88%
10 月	96.93%	91.27%	80.90%	74.76%
11 月	99.26%	95.07%	84.48%	78.82%
12 月	98.87%	93.50%	82.20%	76.55%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	98.76%	90.52%	77.94%	69.28%
2 月	98.85%	93.32%	76.73%	69.35%
3 月	99.59%	94.40%	79.46%	70.33%
4 月	99.79%	95.73%	85.26%	77.35%
5 月	100.00%	97.48%	88.54%	86.02%
6 月	99.79%	95.88%	86.83%	83.13%
7 月	99.44%	93.98%	84.77%	80.64%
8 月	99.63%	95.70%	86.54%	82.62%
9 月	99.59%	96.30%	87.06%	83.57%
10 月	98.63%	89.24%	73.39%	68.30%
11 月	98.55%	91.51%	79.92%	73.91%
12 月	96.86%	88.41%	74.85%	65.42%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 10 風速 7.9 m/s 可工作機率分佈圖

最大作業風速為 10.7 m/s 時，連續工作 6~12 小時可工作機率，2 港均可達 95%。屬於颱風好發期之 7~9 月，依據分析結果，蘇澳港及花蓮港工作機率雖略為降低，單月仍有 25 天工作天數可規劃施工，以 8 月為例，蘇澳港連續 6 小時可工作機率為 99.59%、12 小時 96.93%、18 小時 93.87%及 24 小時 92.02%，花蓮港連續 6 小時機率為 99.63%、12 小時 98.32%、18 小時 93.27%及 24 小時 90.28%。

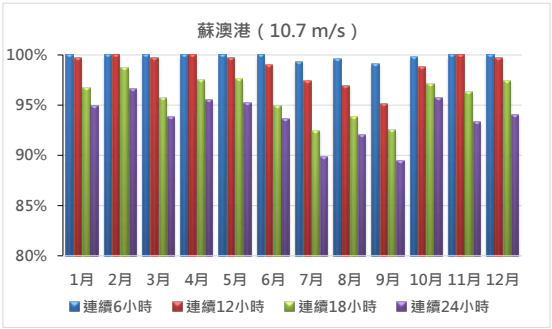
表 10 風速 10.7 m/s 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

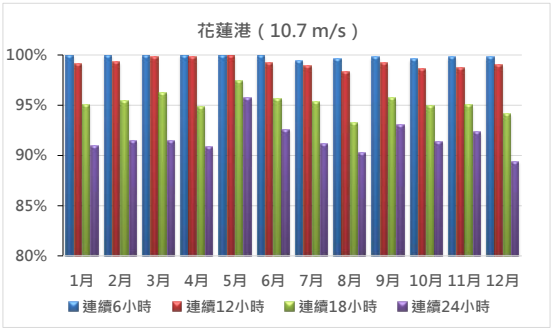
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	99.70%	96.71%	94.91%
2 月	100.00%	100.00%	98.76%	96.58%
3 月	100.00%	99.72%	95.76%	93.79%
4 月	100.00%	100.00%	97.51%	95.51%
5 月	100.00%	99.76%	97.60%	95.20%
6 月	100.00%	99.03%	94.89%	93.67%
7 月	99.35%	97.41%	92.46%	89.87%
8 月	99.59%	96.93%	93.87%	92.02%
9 月	99.06%	95.08%	92.51%	89.46%
10 月	99.76%	98.82%	97.17%	95.75%
11 月	100.00%	100.00%	96.31%	93.35%
12 月	100.00%	99.72%	97.46%	94.07%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	99.18%	95.05%	90.93%
2 月	100.00%	99.31%	95.39%	91.47%
3 月	100.00%	99.79%	96.27%	91.49%
4 月	100.00%	99.79%	94.87%	90.81%
5 月	100.00%	100.00%	97.48%	95.73%
6 月	100.00%	99.18%	95.68%	92.59%
7 月	99.44%	98.87%	95.30%	91.17%
8 月	99.63%	98.32%	93.27%	90.28%
9 月	99.79%	99.18%	95.69%	93.02%
10 月	99.61%	98.63%	94.91%	91.39%
11 月	99.79%	98.76%	95.03%	92.34%
12 月	99.80%	99.02%	94.11%	89.39%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 11 風速 10.7 m/s 可工作機率分佈圖

作業風速為 12.0 m/s 時，蘇澳港及花蓮港連續作業 24 小時可工作機率約為 95%，12~2 月臺灣大氣環境雖以東北季風為主，惟根據「108 年國際商港風波潮流觀測與特性分析」統計資料顯示，蘇澳港及花蓮港 12~2 月平均風速均為 3.8 m/s，且風速小於 5 m/s 以下者佔多數（約 70%），此風速分佈特性，使 2 港域於東北季風期間，在現場作業風速 12.0 m/s 條件下，仍有較高之可工作機率。

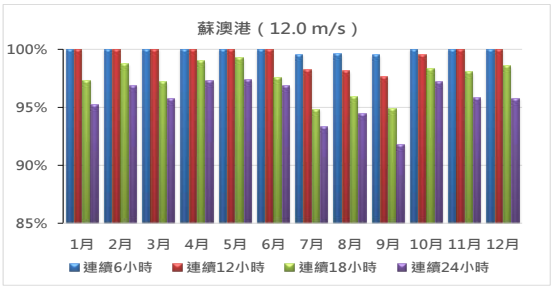
表 11 風速 12.0 m/s 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

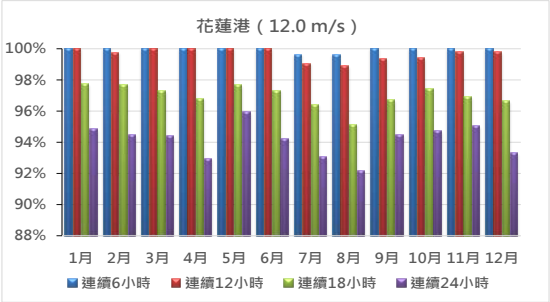
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	100.00%	97.31%	95.21%
2 月	100.00%	100.00%	98.76%	96.89%
3 月	100.00%	100.00%	97.18%	95.76%
4 月	100.00%	100.00%	99.00%	97.26%
5 月	100.00%	100.00%	99.28%	97.36%
6 月	100.00%	100.00%	97.57%	96.84%
7 月	99.57%	98.28%	94.83%	93.32%
8 月	99.59%	98.16%	95.91%	94.48%
9 月	99.53%	97.66%	94.85%	91.80%
10 月	100.00%	99.53%	98.35%	97.17%
11 月	100.00%	100.00%	98.03%	95.81%
12 月	100.00%	100.00%	98.59%	95.76%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	100.00%	97.73%	94.85%
2 月	100.00%	99.77%	97.70%	94.47%
3 月	100.00%	100.00%	97.30%	94.40%
4 月	100.00%	100.00%	96.79%	92.95%
5 月	100.00%	100.00%	97.67%	95.92%
6 月	100.00%	100.00%	97.33%	94.24%
7 月	99.62%	99.06%	96.43%	93.05%
8 月	99.63%	98.88%	95.14%	92.15%
9 月	100.00%	99.38%	96.71%	94.46%
10 月	100.00%	99.41%	97.46%	94.72%
11 月	100.00%	99.79%	96.89%	95.03%
12 月	100.00%	99.80%	96.66%	93.32%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 12 風速 12.0 m/s 可工作機率分佈圖

作業風速 13.8 m/s，此亦為「西門子歌美颯離岸風力再生能源股份有限公司」使用之離岸風機安裝船 Seajacks Zaratan，現場作業所允許之最大風速，該船如需持續作業 6~24 小時，於蘇澳港及花蓮港海域可工作機率可達 95%，蘇澳港及花蓮港年平均風速分別為 3.6 m/s 及 3.4 m/s，於此風場特性下，如不考慮突發性風速劇增事件（如颱風）及波浪影響，本次所分析之蘇澳港及花蓮港海域，可提供相對較高之可工作機率及作業天數，做為 Seajacks Zaratan 團隊規劃應用。

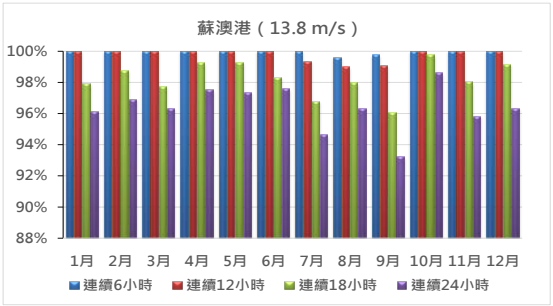
表 12 風速 13.8 m/s 可工作機率統計表

（a）蘇澳港

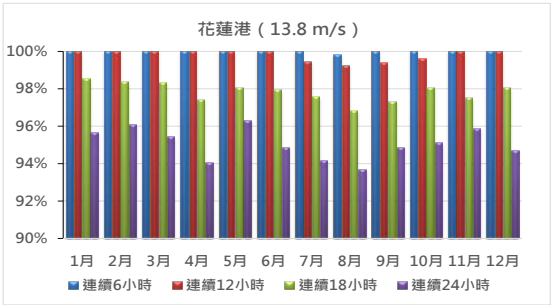
月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	100.00%	97.90%	96.11%
2 月	100.00%	100.00%	98.76%	96.89%
3 月	100.00%	100.00%	97.74%	96.33%
4 月	100.00%	100.00%	99.25%	97.51%
5 月	100.00%	100.00%	99.28%	97.36%
6 月	100.00%	100.00%	98.30%	97.57%
7 月	100.00%	99.35%	96.77%	94.61%
8 月	99.59%	98.98%	97.96%	96.32%
9 月	99.77%	99.06%	96.02%	93.21%
10 月	100.00%	100.00%	99.76%	98.58%
11 月	100.00%	100.00%	98.03%	95.81%
12 月	100.00%	100.00%	99.15%	96.33%

（b）花蓮港

月份	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
1 月	100.00%	100.00%	98.56%	95.67%
2 月	100.00%	100.00%	98.39%	96.08%
3 月	100.00%	100.00%	98.34%	95.44%
4 月	100.00%	100.00%	97.44%	94.02%
5 月	100.00%	100.00%	98.06%	96.31%
6 月	100.00%	100.00%	97.94%	94.86%
7 月	100.00%	99.44%	97.56%	94.17%
8 月	99.81%	99.25%	96.82%	93.64%
9 月	100.00%	99.38%	97.33%	94.87%
10 月	100.00%	99.61%	98.04%	95.11%
11 月	100.00%	100.00%	97.52%	95.86%
12 月	100.00%	100.00%	98.04%	94.70%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 13 風速 13.8 m/s 可工作機率分佈圖

3.5 每季風速可工作機率分析

四季風速可工作機率如表 13 及圖 14 所示，以風速 5.4 m/s 分析時，蘇澳港春季可工作機率為四個季節中最高，連續 6 小時為 95.10%、12 小時 76.69%、1

8 小時 56.64%及 24 小時 49.43%，夏秋冬 3 季可工作機率則隨作業延時不同而互有增減，連續作業 6 小時，可工作機率依序分別為夏季 92.65%、冬季 86.98%及秋季 86.86%，連續 18 小時機率為秋季 51.66%、冬季 48.28%及夏季 47.85%。此機率分佈特性與位處較南邊之花蓮港略有差異，花蓮港機率分佈主要可分為春夏與秋冬兩區塊，秋冬季海域受東北季風影響，可工作機率較春夏季低，風速 5.4 m/s，連續 6 小時機率為春季 96.88%、夏季 98.35%、秋季 95.27%及冬季 91.53%，連續 18 小時可工作機率為春季 54.89%、夏季 54.68%、秋季 43.75%及冬季 43.67%。

風速 10.7 m/s 時，蘇澳港及花蓮港連續作業 6~24 小時，各季可工作機率均已達 90%，如花蓮港，分析作業風速 12 m/s 時，春季連續 6 小時機率 100%、連續 12 小時 100%、連續 18 小時 97.26%及連續 24 小時 94.42%；以「西門子歌美颯離岸風力再生能源股份有限公司」離岸風機安裝船 Seajacks Zaratan，現場作業所允許之最大風速 13.8 m/s 分析，2 港域持續作業 6~24 小時可工作機率可達 95%，以蘇澳港為例，春季可工作機率連續 6~12 小時為 100%，連續 18 小時 98.76%，持續作業 1 天（24 小時）工作機率仍有 97.07%。

綜上所述，蘇澳港及花蓮港年平均風速約 3.5 m/s，除劇烈天氣所造成之短期風速震盪，依據歷年統計資料，2 港風速小於 5 m/s 佔全年 80%，依據本研究分析，現場作業限制風速達 10.7 m/s 時，四季連續工作 6~24 小時，港域均可穩定提供 90%之可工作機率，此分析數據可提供港域吊掛作業、工程規劃及施工調度應用參考。

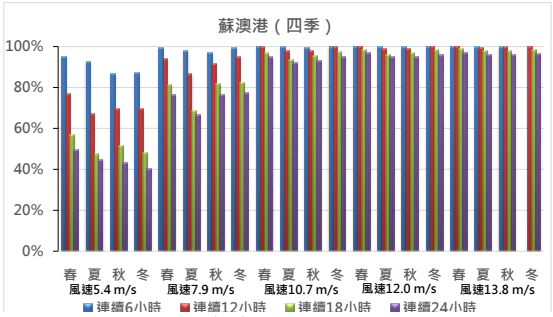
表 13 風速四季可工作機率統計表

（a）蘇澳港

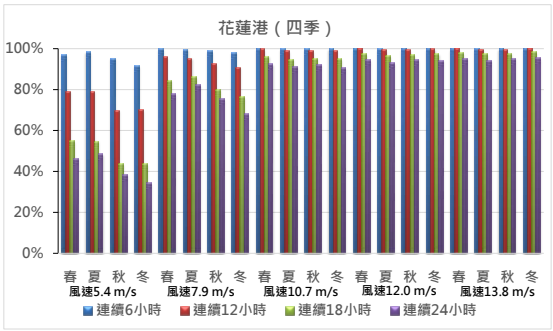
風速 5.4 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	95.10%	76.69%	56.64%	49.43%
夏	92.65%	67.34%	47.85%	44.87%
秋	86.86%	69.39%	51.66%	43.44%
冬	86.98%	69.41%	48.28%	40.45%
風速 7.9 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	99.45%	94.01%	81.45%	76.25%
夏	98.08%	86.67%	68.56%	66.82%
秋	97.17%	91.70%	81.59%	76.49%
冬	99.22%	94.79%	82.31%	77.38%
風速 10.7 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	99.83%	96.96%	94.83%
夏	99.65%	97.79%	93.74%	91.86%
秋	99.61%	97.97%	95.33%	92.86%
冬	100.00%	99.81%	97.64%	95.19%
風速 12.0 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	100.00%	98.49%	96.79%
夏	99.72%	98.81%	96.10%	94.88%
秋	99.84%	99.06%	97.08%	94.93%
冬	100.00%	100.00%	98.22%	95.96%
風速 13.8 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	100.00%	98.76%	97.07%
夏	99.86%	99.44%	97.67%	96.17%
秋	99.92%	99.69%	97.94%	95.87%
冬	100.00%%	100.00%	98.60%	96.44%

（b）花蓮港

風速 5.4 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	96.88%	79.09%	54.89%	46.37%
夏	98.35%	79.05%	54.68%	48.42%
秋	95.27%	69.80%	43.75%	38.49%
冬	91.53%	70.13%	43.67%	34.29%
風速 7.9 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	99.79%	95.87%	84.42%	77.90%
夏	99.62%	95.19%	86.05%	82.13%
秋	98.92%	92.35%	80.12%	75.26%
冬	98.16%	90.75%	76.51%	68.02%
風速 10.7 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	99.86%	96.20%	92.68%
夏	99.69%	98.79%	94.75%	91.35%
秋	99.73%	98.86%	95.21%	92.25%
冬	99.93%	99.17%	94.85%	90.60%
風速 12.0 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	100.00%	97.26%	94.42%
夏	99.75%	99.31%	96.30%	93.14%
秋	100.00%	99.53%	97.02%	94.73%
冬	100.00%	99.86%	97.36%	94.21%
風速 13.8 m/s				
季節	連續 6 小時	連續 12 小時	連續 18 小時	連續 24 小時
春	100.00%	100.00%	97.94%	95.25%
夏	99.94%	99.56%	97.44%	94.22%
秋	100.00%	99.66%	97.63%	95.28%
冬	100.00%	100.00%	98.33%	95.48%



（a）蘇澳港



（b）花蓮港

圖 14 風速分季可工作機率分佈圖

四、結論及建議

本研究以交通部運輸研究所港研中心設置於蘇澳港及花蓮港海氣象觀測站，歷年蒐集之波高及風速資料為分析依據，探討東北部海域在不同波高、風速持續 6、12、18 及 24 小時可工作機率，根據分析結果，蘇澳港及花蓮海域於波高 0.5 m 作業條件下，各月可工作機率均低於 25%，10~4 月間可工作機率最低，連續 6~24 小時可工作機率約為 0%，波高條件 0.8 m 時，以連續作業 6 小時分析，蘇澳港於 6~8 月間約有 45 天可工作天數，花蓮港則約有 57 天之工作天數可供進場作業，波高限制為 1.5 m 時，月可工作機率有明顯上昇之趨勢，蘇澳港連續作業 6 小時全年度可工作機率為 55~95%，花蓮港連續作業 6 小時機率約 95%。

四季波高可工作機率分析結果，大致以夏季可提供較高之可工作機率，夏季雖為颱風好發期，整體而言，海況條件仍優於其餘 3 季，進入冬季後，東北季風對蘇澳港及花蓮港海域影響顯著，海域作業條件相對較差，以作業波高 0.8 m 為例，蘇澳港冬夏 2 季連續作業 6 小時，可工作機率分別為 1.64%（冬季）、46.47%（夏季），2 者相差約 28 倍，花蓮港為 1.82%（冬季）、61.17%（夏季），相差約 34 倍。

根據歷年各月可工作機率統計資料，風速 7.9 m/s 作業門檻分析，蘇澳港及花蓮港連續作業 6 小時可工作機率均超過 9 成，最大作業風速為 10.7 m/s 時，連續工作 6~12 小時可工作機率，2 港均可達 95%，依據分析結果，屬於颱風好發期之 7~9 月，蘇澳港及花蓮港工作機率雖略為降低，單月仍有 25 天工作天數，以「西門子歌美颯離岸風力再生能源股份有限公司」使用之離岸風機安裝船 Seajacks Zaratan，現場作業所允許之最大作業風速 13.8 m/s 分析，該船如需持續作業 6~24 小時，於蘇澳港及花蓮港海域可工作機率可達 95%。

四季風速可工作機率分析顯示，風速 10.7 m/s 時，蘇澳港及花蓮港連續作業 6~24 小時，各季可工作機率均已達 90%，如花蓮港，分析作業風速 12 m/s 時，春季連續 6 小時機率 100%、連續 12 小時 100%及連續 24 小時 94.42%，以離岸風機安裝船 Seajacks Zaratan，現場作業所允許之最大風速 13.8 m/s 分析，2 港域持續作業 6~24 小時可工作機率可達 95%，蘇澳港及花蓮港年平均風速約 3.5 m/s，風速小於 5 m/s 佔全年 80%，依據本研究分析，現場作業限制風速達 10.7 m/s 時，四季連續工作 6~24 小時，港域均可穩定提供 90%之可工作機率。

本研究蒐集東北海域之蘇澳港及花蓮港歷年波高、風速觀測資料，以統計方式估算海域於不同月份、季節可工作

機率，分析成果可提供蘇澳港及花蓮港鄰近海域相關單位，做為現場工期規劃、工程施作及趕工安排等作業應用參考。

五、參考文獻

1. 朱宗蔚、錢樺、高家俊、莊士賢（2000）「海事工程可工作日分析之探討」第 22 屆海洋工程研討會論文集，第 480-486 頁。
2. 游微娟（2012）「台灣海域波候長期變遷趨勢研究」，建國科技大學土木與防災研究所碩士論文。
3. 黃清和、錢樺、李文欽、游微娟、洪子軒等（2012）「台灣周邊海域可工作日數分析」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，第 607-612 頁。
4. 莊文傑、曾相茂、張憲國（2015）「AWCP 之波浪監測紀錄分析與其統計特性」第 37 屆海洋工程研討會論文集，第 77-82 頁。
5. 蔡立宏、羅冠顯等「105 年臺灣國際港附近海域海氣象調查分析研究」，交通部運輸研究所，2017 年 4 月。
6. 邱永芳、何良勝、廖慶堂等「105 年國內商港海氣象觀測與特性分析」，交通部運輸研究所，2017 年 4 月。
7. 邱永芳、蔡立宏、廖慶堂等「2016 年 12 港域海氣象觀測資料年報」，交通部運輸研究所，2017 年 6 月。
8. 莊文傑、曾相茂(2016)「臺灣海域之東北季風與國內五大商港海域之長浪特性」，105 年天氣分析與預報研討會論文集，A5 海象測報與應用，中央氣象局。
9. 陳宗邦、劉恩昊、張君名等(2018)“桃園觀塘海域海上可施工日探討”，第 40 屆海洋工程研討會論文集，第 185-190 頁。
10. 邱永芳、蔡立宏、羅冠顯等「106 年國際商港海氣象觀測與特性分析」，交通部運輸研究所，2018 年 3 月。
11. 邱永芳、蔡立宏、廖慶堂等「106 年國內商港海氣象觀測與特性分析」，交通部運輸研究所，2018 年 3 月。
12. 邱永芳、蔡立宏、廖慶堂等「2017 年 12 港域海氣象觀測資料年報」，交通部運輸研究所，2018 年 3 月。
13. 羅冠顯、蘇青和、蔡嘉和等「108 年國際商港風波潮流觀測與特性分析」，交通部運輸研究所，2020 年 2 月。

結合離散小波轉換與深度學習技術預測短期風速研究

江文山　國立成功大學水工試驗所研究員
賴志峰　國立成功大學水工試驗所技術師
黃國展　國立成功大學水工試驗所技術師
蔡宜秦　國立成功大學水工試驗所助理技術師
衛紀淮　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

摘要

交通部運輸研究所港研中心將蒐集的風力資料經品管分析後，針對強風特性進行研究，並結合離散小波轉換與深度學習技術，以探討定點風力預報之基礎模型。本文藉由對風速資料的特性分析與掌握，進而嘗試建立風速短期預報的技術，並以臺中港測站 6 的過去資料為預測因子，進行臺中港測站 6 的短期風速預測。

經由離散小波轉換所得到之各模態實測風速與所建構模型訓練得到之風速比較，經過訓練後的模型可以合理的反應實測風速的變動，越低頻率的模態，訓練的結果越好，根據不同月份的預測分析結果，顯示預測模型具有穩定特性。

就預測未來某一個時間的風速而言，以高頻率取樣的資料所建置的模型，相較於以低頻率取樣，需要預測更多的步階，且結果未必更準確。然而高頻率取樣建置的模型，優點是可以預測時間領域更細緻的資料細節。

一、風力預測方法

由於風速的變化高度複雜，為了提高預測的精準度，可能做法包括(一)建構更複雜的人工智慧網路架構；(二)結合更多的環境資訊甚至是數值天氣預報資料；(三)將複雜的風速資料拆解成數個單純分量，各別預測再整合。本研究採用(三)的方法進行預測。

風速與海浪的時間序列內存在非穩態和非線性的自然隨機性，是沿海和海事工程應用和預測中最重要的挑戰之一。

非穩態特徵導致在序列中呈現非常態性，雙峰性，不對稱循環和非線性。為了處理非穩態性特徵，需要對輸入數據進行適當的前處理，以利後續的分析預測。

傳統上，使用傅立葉變換進行數據內不同時間或是空間尺度的區分，但是它僅以頻率分辨率執行變換，因此，失去數據中隱含的時間訊息。離散小波變換(Discrete Wavelet Transform，以下簡稱 DWT)是一種處理數據具有多重尺度混合的解析工具，已廣泛用於許多預測應用中。然而，DWT 有一個關鍵的弱點，即抽取效應。在 DWT 的頻率分辨率轉換過程中，只有一半的小波係數會生成，另外一半會以較粗糙的分辨率進行遞歸轉換，可能導致重要信息被忽略。最大重疊離散小波變換(Maximal Overlap Discrete Wavelet Transformation，以下簡稱 MODWT)應用非抽取小波工具，可以合理地克服重要信息被忽略的問題。小波(包括 DWT 和 MODWT)的另一個問題是，它們需要先選擇一個合適的小波母函數，目前這問題沒有明確依據可供判斷，須藉由冗長的反複試驗過程提供。

另一方面，由 Huang 等人(1998)開發的經驗模式分解(Empirical Mode

Decomposition，以下簡稱 EMD)，其分析程序可避免任何基函數或母小波，提供了依據數據本身特性所推演的自適應性。 EMD 是完全數據自適應的，它使用時間局部分解方法提取突出特徵。然後，EMD 將這些重要特徵分離為代表時間序列物理結構的子序列。因此，基於 EMD 的模型亦用相關的應用在預測自然環境參數，包括 EMD 自回歸(AR)模型和 EMD 支持向量回歸(SVR)。但是，固有的“模式混合”缺點削弱了 EMD 的性能。集成經驗模式分解(Empirical Mode Decomposition，以下簡稱 EEMD)，通過將高斯雜訊添加到原始(未分解)時間序列來解決此問題，然後提取嵌入的周期性和趨勢信息。但是，EEMD 分解數據的重建並不是完全沒有雜訊。因此，為了解決雜訊問題，Torres 等學者提出具有自調適雜訊的完整集成經驗模式分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise，簡稱 CEEMDAN)。 CEEMDAN 要求在每個分解階段都相繼添加高斯雜訊，因此，增加計算負擔而降低效率，所以其性能要比 EEMD 慢。為了解決以前的基於 EMD 的算法的缺點，後續的研究開發一種更新的，具有自調適雜訊改進的整體經驗模式分解 (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise，簡稱 ICEEMDAN)。綜觀前述的發展歷程可見各種模式的發展亦趨複雜，同時效率隨之降低，但對預測結果的改善卻未顯著提升。

基於實務應用需求，考量常態作業化預測的可能性，本研究利用小波轉換進行模態分解，並配合非線性自回歸類神經網路，對各種模態建置預測模型，最後將各個模態的預測結果整合得到完整的預測風速。

2.1 離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform)

1983 年，法國學者 Morlet 提出連續小波轉換理論，並將小波概念引入於地震波的局部性質信號分析。小波理論的主要精神在於透過一個原型函數所產生的基底函數來對信號做多重解析度的描述與分析。

小波變換主要分成兩個大類：離散小波變換和連續小波變換。兩者的主要區別在於，連續變換在所有可能的縮放和平移上操作，而離散變換採用所有縮放和平移值的特定子集。小波的應用包括訊號不連續點的偵測、頻率鑑別、濾波與壓縮等，且是訊號處理上另一項有用的分析技術，常被用來做為各種訊號處理和工程領域上的應用。

一般數學轉換的基本原理是將訊號根據分析之需求以不同之基底函數表示之，藉由一適當函數的轉移與擴張的方式將信號分解，此一有限且具震盪性的適當函數即為小波。而小波之定義則為在某個時間區段內，波形振幅的平均值為零，其函數值之分佈是有限的，小波轉換是以一連串小波函數之放大縮小、以及平移為其基底函數，並將訊號以這些基底函數之組成表示。小波轉換能得到時間與頻率的關係，其可大略知道在某時間下，會有那些頻率範圍之訊號存在。

2.2 非線性自迴歸模式(Nonlinear Auto Regressive)

自迴歸模型是統計上一種處理時間序列的方法，根據時間序列 y(t)的過去值進行預測其未來值，這種預測模式稱為非線性自迴歸 (Nonlinear Auto Regressive，以下簡稱 NAR)，自迴歸模型被廣泛運用在經濟學、資訊學、自然現象的預測。其數學函數表示如下：

$$y(t) = f(y(t-1), ..., y(t-d))$$

其中 $\nu(t+1)$: 預測在時間 $(t+1)$ 之風速值，$\nu(t), \nu(t-1), ... \nu(t-k)$: 是時間 $t, t-1, ..., t-k$ 之風速觀測值。

2.3 人工智慧網路(Artificial Neural Network)

人工神經網絡(Artificial Neural Network，以下簡稱ANN)由稱為神經元的單位組成。計算能力由連接權重、網絡體系結構和訓練算法決定。人工神經網絡可以解決非線性函數逼近、數據分類、群聚分析、模擬預測和負荷預測，資料補遺等，近年來快速發展，並廣泛應用於不同的科學和技術領域，包括預測不同的環境參數，例如太陽輻射、風速等以及功率預測。人工神經網絡基本邏輯是從數據中萃取信息以發展輸入和輸出之間的複雜關係。輸入變量乘以連接權重及其乘積，添加偏差並通過傳遞函數傳遞以預測輸出。該網絡由架構活化函數和訓練算法決定。該架構決定了神經元之間的連接方式。在訓練期間，將更新連接權重和偏差的值，以達到最小的均方根誤差。ANN主要特點是大量的平行處理、非線性輸出及利用多層結構的預測能力，是一種基於腦與神經系統研究而啟發的資料處理技術。類神經網路以神經元的運作去模仿生物的學習的行為，透過數學模型的資訊處理系統，因此可以視為特殊型式之統計迴歸。類神經網路的優點是可以接受不同種類的變數作為輸入，不需要了解系統的數學模型，只要給予訓練輸入值與訓練目標值，將可以找到輸出與輸入的相關性，其缺點是缺乏解釋能力，在訓練過程中無法得知要多少神經元個數、需要層數，神經元多寡也將影響類神經網路的準確性，所以需要靠嘗試錯誤法(Trial and error)來決定層數和神經元個數。神經元(Neuron)為神經網路的基本處理單位(Processing Element, PE)，也是組成隱藏層的主要元素，利用資料不斷的學習及錯誤去修正神經元的權重 (Weight)與偏權值(Bias)以達到正確的輸出。在隱藏層的神經元輸出主要連接至下一層神經元的輸入，下一層的神經元輸入值為上一層的神經元輸出值的加總，其同一層之間神經元不互相連結。

上述為單一神經元的狀況下，要構成類神經網路必須將神經元彼此相互連接，藉由隱藏層中的每一個神經元，連結其輸出與輸入，建構起一個類神經網路的架構，如圖1所示。

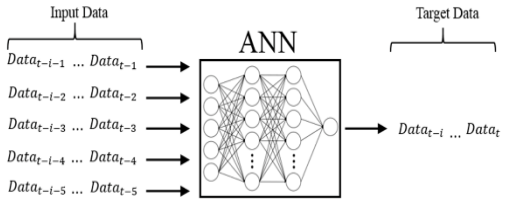


圖1 類神經網路的架構圖

這裡可以分為輸入層(Input layer)、輸出層(Output layer)、隱藏層(Output layer)共三種。「層」的定義是由多個神經元組成，各層神經元與神經元之間的連結，可以簡化看成層與層之間的連結，在同層內神經元互不相接。輸入層在類神經網路架構中被視為資料輸入接受資料的一方，用以表示網路的輸入變數，輸入層並不納入輸入網路層數(Number of layers)的計算。輸出層(Output layer)在類神經網路模型中視為提供資料輸出的一方，也是模型的最後一層。隱藏層(Hidden layer)隱藏層介於輸入層與輸出層之間，主要功能是增加類神經網路的複雜性，來模擬複雜的非線性關係，該層神經元常用非線性轉換函數。目前並沒有明確的標準決定隱藏層神經元個數，所以一般常用嘗試錯誤法(Trial and error)來決定隱藏層的神經元個數。隱藏層數的層數也和神經元個數一樣，沒有標準方式去決定。隱藏層的層數決定了事件的複雜度，越多隱藏層就會越複雜也越難收斂。

結合前述三種方法本研究使用的風速預測模型架構，如圖2所示。

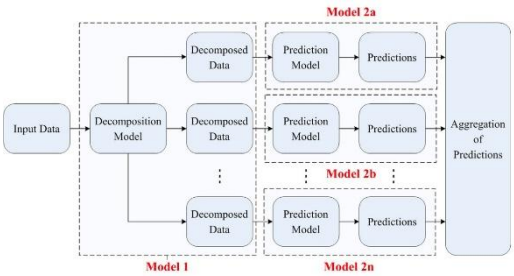


Fig. 2. Flowchart of combined approaches including data pre-processing techniques.

圖 2 風速預測模型架構圖

首先將實測風速數據，利用小波轉換分離出各種不同成份，其次各個成份分別以一組由非線性自迴歸模式與人工智慧網路所合成模型進行訓練與預測，之後將各別成份所預測的結果疊加，得到整體的預測風速。模型長時間預測的執行程序是以一定長度的資料作為模式訓練用，再根據訓練得到的模式進行數個時階預測，隨著時間演進，用以訓練的資料隨之平移，並更新預測。

二、實際案例分析

本項工作目的期藉由對風速資料的特性分析與掌握，進而嘗試建立風速短期預報的技術。初步測試以臺中港 6 號測站的過去資料為預測因子，進行臺中港測站 6 號測站的短期風速預測。圖 3 為臺中港 6 號風速站(北堤燈塔)與 7 號風速站(防風林)2020 年 1 月至 5 月份風速資料的風速風向時序列圖。

明顯可見北堤燈塔站風速較高，判斷是其外於相對接近海域，周遭環境較為開闊；相對地，防風林站位處較內陸且鄰近防風林區，受到陸地、建築物與防風林等影響，因此，出現上述風速的明顯差異。

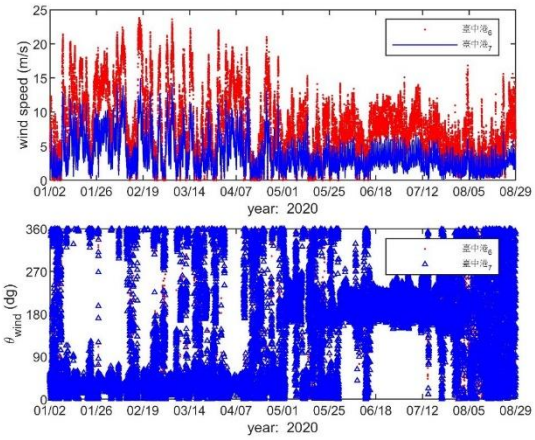


圖 3 臺中港風速站 6、7 號測站風速風向時序列圖

圖 4 為風速發生機率分布與相關性散佈圖，其中防風林站的機率分布接近 Weibull 分布，機率分布尖峰在風速約 3m/s；而北堤燈塔站則呈現近似雙峰結構，分別在風速約 3m/s 與 12m/s 附近有機率分布尖峰，研判這與測站位置的局部特性有關。

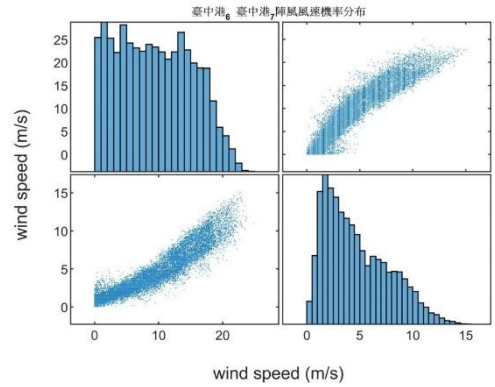


圖 4 風速發生機率分布與相關性散佈圖

兩站的平均風速與陣風的關係如圖 5(上)，兩站平均風速與陣風的散佈圖顯示兩這約略呈線性關係，進一步定義平均風速與陣風的差異值與平均風速的比值為擾動量繪如圖 5(下)，可見擾動量隨風速增大約略逐漸收斂到一個穩定值，此穩定值在 6 號測站相對較大。

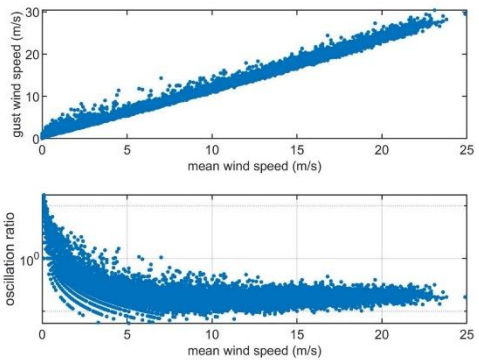


圖 5 平均風速與陣風的關係圖、擾動風速對小時平均風速的比值圖

因為離散小波轉換進行模態折解的過程中與輸入數據量有直接的關係，為能一致性比較，因此以每個月的數據進行小波轉換模態分解後，以 15 天的資料進行模型訓練，並預測當月另外的資料。各模態的最適參數是透過參數空間的計算分析，以最小誤差的條件先初步決定。

然而各模態以最適參數進行預測，再整合各模態的預測得到整體預測結果確未必是較佳的結果，因此最終模型參數的波定尚必須輔以整體誤差作決定，以台中港 6 號測站的 2020 年 1 月份資料為例，圖 6 為小波分析得到之各模態的風速。

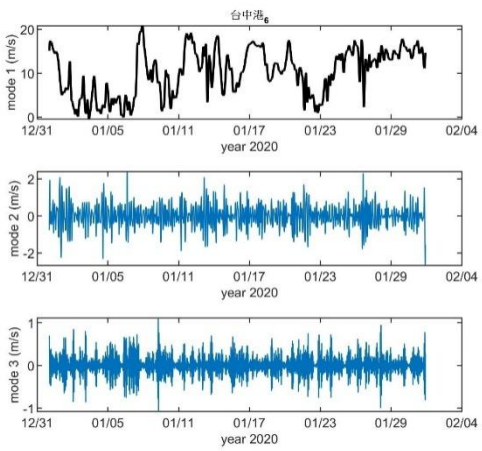


圖 6 小波分析得到之各模態的風速

圖 7~圖 9 分別是各模態實測風速與所建構之非線性自迴歸類神經網路模型訓練得到之風速比較，可見經過訓練後的模型可以非常吻合的反應實測風速的變動。

從頻率之角度切入來看，上述結果亦顯示通常越低頻的模態，訓練的結果越好。

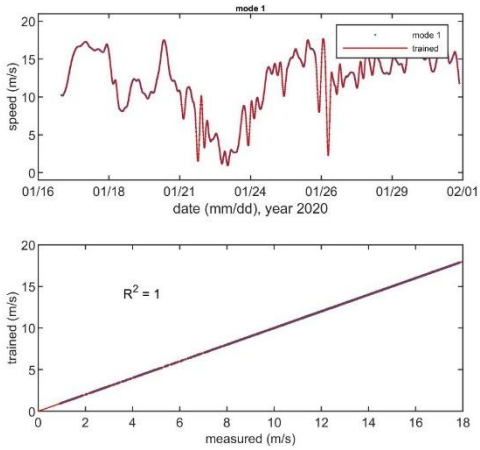


圖 7 第一模態模型訓練得到之風速與實測風速比較

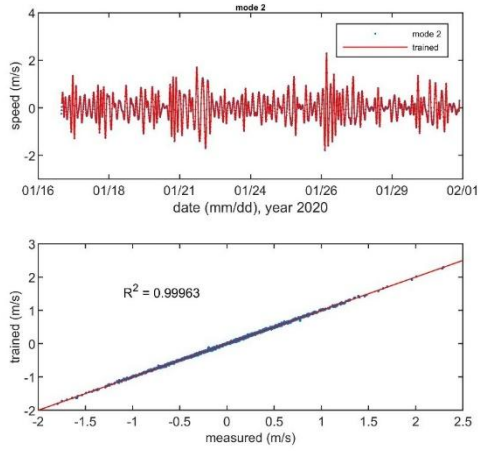


圖 8 第二模態模型訓練得到之風速與實測風速比較

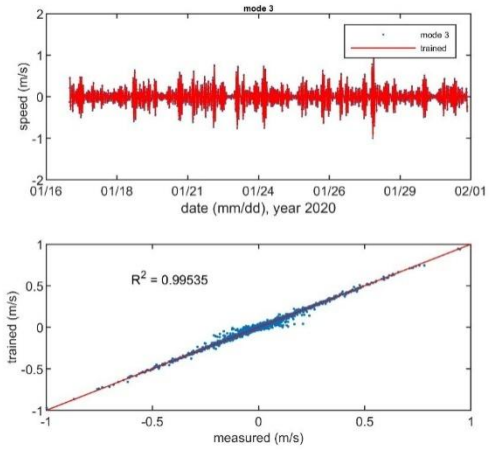


圖 9 第三模態模型訓練得到之風速與實測風速比較

進一步以訓練後的模型預測未來的風速並與實測比較，圖 10~圖 17 為預測 1 個時階後 8 個月份各自的風速與實測風速的比較，對應的平均誤差時序列則呈現於圖 18；圖 19~26 則是預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較，對應的平均誤差則呈現於圖 27。

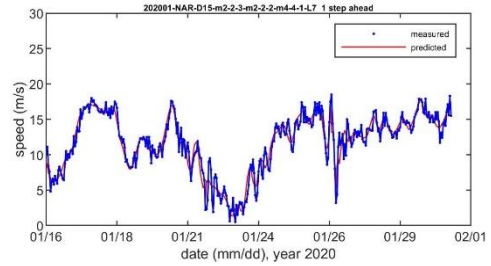


圖 10 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(1 月份)

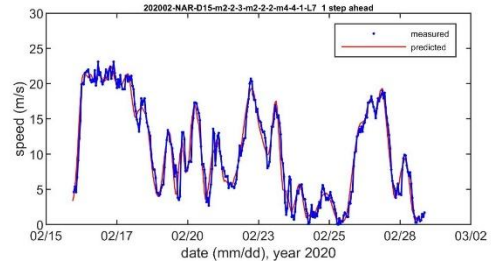


圖 11 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(2 月份)

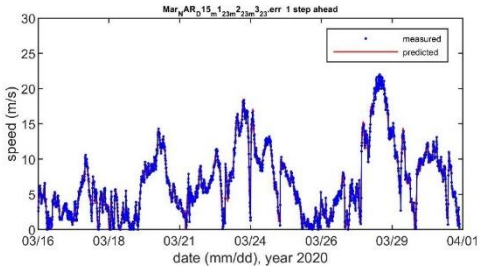


圖 12 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(3 月份)

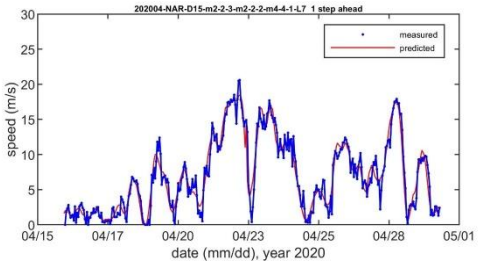


圖 13 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(4 月份)

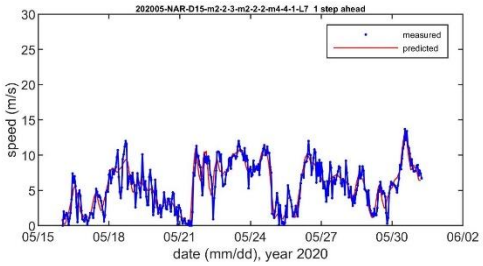


圖 14 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(5 月份)

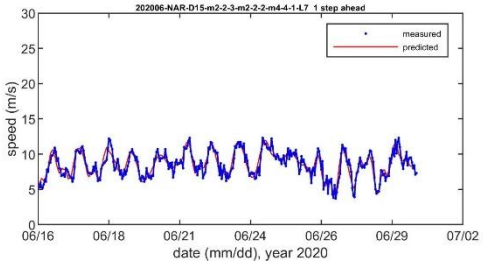


圖 15 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(6 月份)

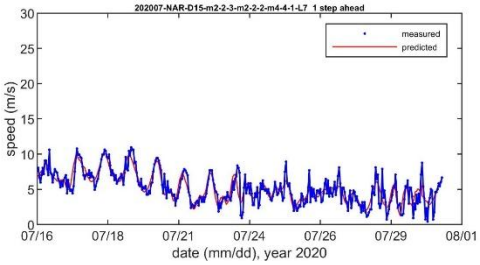


圖 16 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(7 月份)

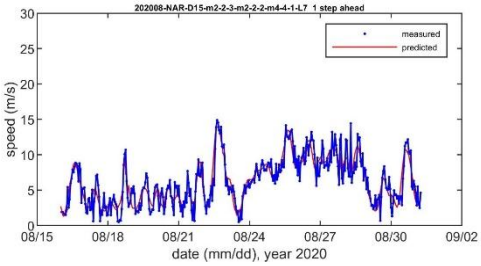


圖 17 預測 1 個時階後的風速與實測風速的比較(8 月份)

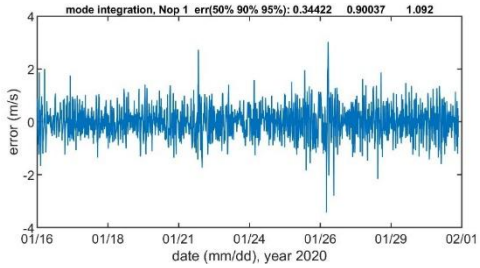


圖 18 預測 1 個時階後的風速誤差(1 月份)

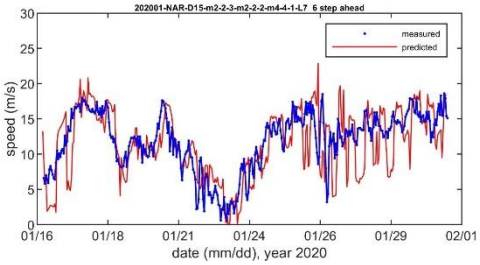


圖 19 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(1 月份)

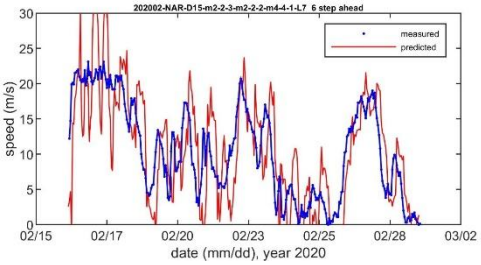


圖 20 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(2 月份)

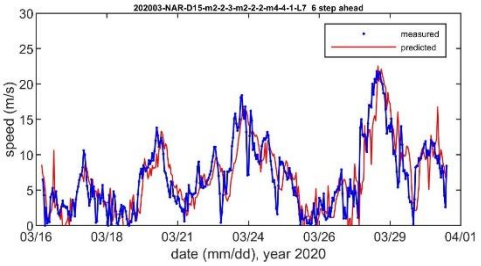


圖 21 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(3 月份)

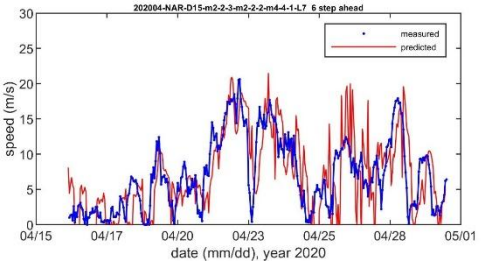


圖 22 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(4 月份)

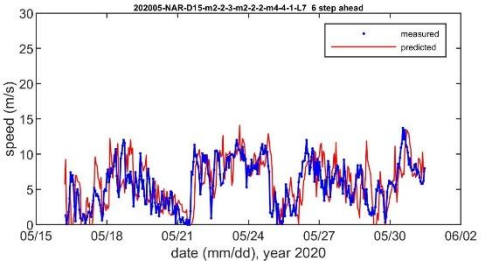


圖 23 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(5 月份)

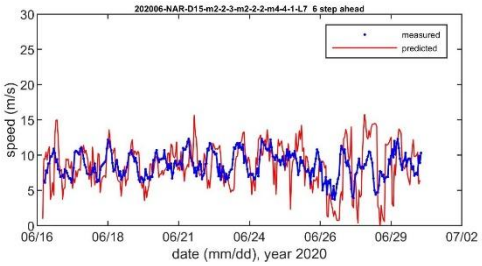


圖 24 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(6 月份)

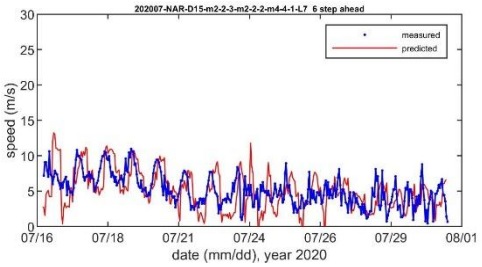


圖 25 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(7 月份)

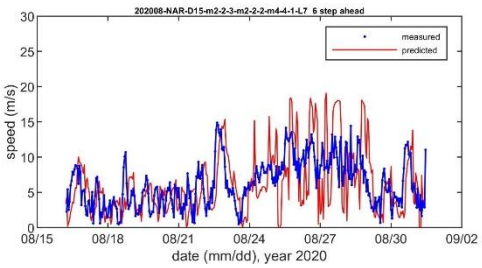


圖 26 預測 6 個時階後的風速與實測風速的比較(8 月份)

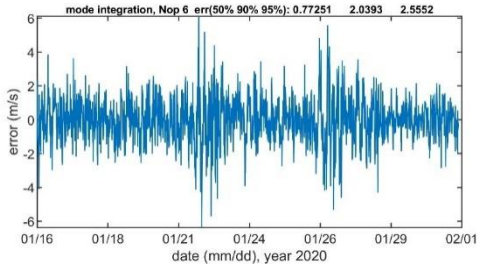


圖 27 預測 6 個時階後的風速誤差(1 月份)

從平均誤差的分布觀察，可見較大的平均誤差發生在風速快速轉折的時間，藉由調整模型參數對於此部份的改善有限。低頻模態包含風速變動的主要趨勢，時間上的變動較為緩和，短時間的預測相對較為準確。另外，週期性較不明顯，較缺乏規則性，所以長時間的預測可能出現未掌握到變動趨勢而產生較大誤差。至於高頻模態主要呈現一定振幅範圍內的正負跳動，其變動速率快，不易精準掌握，是短時間預測誤差的主要來源，但是因數據變動侷限在一定範圍，預測產生的誤差並不會隨時間顯著增大。

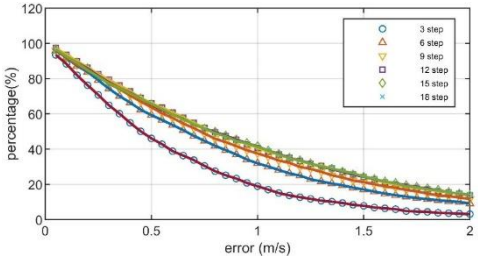


圖 28 不同預測時階風速誤差百分比的分佈(10 分鐘間距)

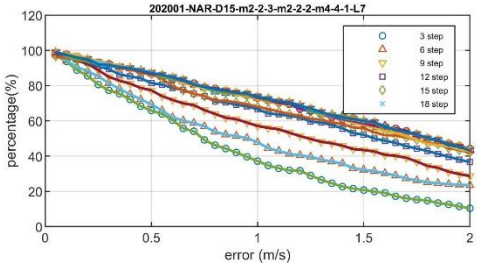


圖 29 不同預測時階風速誤差百分比的分佈(1 小時間距)

圖 28~29 為不同預測時階對應之風速平均誤差累積百分比的分佈，可見累積平均誤差百分比隨著平均誤差增大而減少，同時隨著預測時階增加而增大。設定風速平均誤差 1m/s 為指標，以高頻率(10 分鐘間距)取樣的數據進行不同預測時階風速平均誤差大於 1m/s 的百分比繪如圖 30。

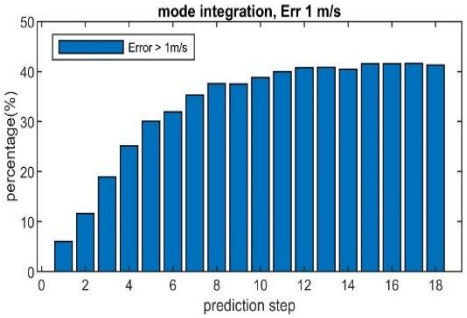


圖 30 不同預測時階風速平均誤差大於 1m/s 的百分比(10 分鐘間距)

顯示誤差在約略前 10 個時階內快速由接近零增大到約 40%，之後維持幾乎固定的數值。

另以低頻率(1 小時間距)取樣的數據進行不同預測時階風速平均誤差大於 1m/s 的百分比繪如圖 31。

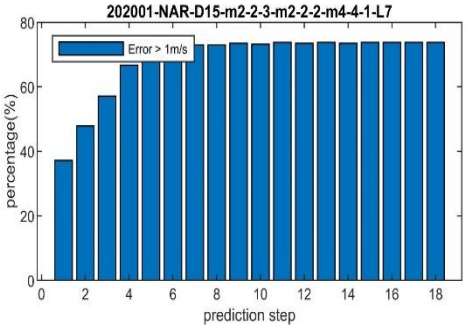


圖 31 不同預測時階風速平均誤差大於 1m/s 的百分比(1 小時間距)

每個月的誤差數值雖然略有不同，但是分布型態是幾乎一致，說明預測模型的表現具有穩定特性。

統計各月份的預測風速誤差統計如表 1~2，預測 1 個時階(10 分鐘)後的平均誤差約介於 0.30~0.35 m/s，預測 6 個時階(1 小時)後的平均誤差約介於 0.60~0.90 m/s。

表 1 各月份預測風速誤差統計(10 分鐘間距、預測 6 時階)

月份	預測時階	風速誤差 (m/s) 50%	風速誤差 (m/s) 90%	風速誤差 (m/s) 95%
1	6	0.0199	0.0527	0.0661
2	6	0.0338	0.0742	0.0855
3	6	0.0345	0.0779	0.0898
4	6	0.0221	0.0663	0.0754
5	6	0.0191	0.0387	0.0443
6	6	0.0060	0.0173	0.0220
7	6	0.0056	0.0168	0.0190
8	6	0.0141	0.0368	0.0448

表 2 各月份預測風速誤差統計(10 分鐘間距、預測 12 時階)

月份	預測時階	風速誤差 (m/s) 50%	風速誤差 (m/s) 90%	風速誤差 (m/s) 95%
1	12	0.0195	0.0519	0.0651
2	12	0.0332	0.0730	0.0841
3	12	0.0339	0.0767	0.088
4	12	0.0218	0.0652	0.0743
5	12	0.0188	0.0380	0.0434
6	12	0.0059	0.0170	0.0216
7	12	0.0056	0.0165	0.0187
8	12	0.0139	0.0362	0.0441

表 3 各月份預測風速誤差統計(10 分鐘間距、預測 18 時階)

月份	預測時階	風速誤差 (m/s) 50%	風速誤差 (m/s) 90%	風速誤差 (m/s) 95%
1	18	0.0193	0.0518	0.0651
2	18	0.0332	0.0729	0.0840
3	18	0.0339	0.0767	0.0885
4	18	0.0217	0.0652	0.0743
5	18	0.0188	0.0380	0.0432
6	18	0.0059	0.0170	0.0215
7	18	0.0055	0.0165	0.0186
8	18	0.0139	0.0362	0.0441

表4 各月份預測風速誤差統計(1小時間距、預測1時階)

月份	預測時階	誤差(m/s) 50%	誤差(m/s) 90%	誤差(m/s) 95%
1	1	0.1616	0.3251	0.3584
2	1	0.2825	0.5841	0.6575
3	1	0.2283	0.4755	0.5669
4	1	0.1426	0.5232	0.5801
5	1	0.1387	0.2933	0.3367
6	1	0.0387	0.0923	0.1144
7	1	0.0336	0.0902	0.1062
8	1	0.0798	0.2093	0.2672

表5 各月份預測風速誤差統計(1小時間距、預測2時階)

月份	預測時階	風速誤差(m/s) 50%	風速誤差(m/s) 90%	風速誤差(m/s) 95%
1	2	0.1073	0.2162	0.2376
2	2	0.1894	0.3910	0.4394
3	2	0.1515	0.3186	0.3769
4	2	0.1139	0.3478	0.3855
5	2	0.0919	0.1936	0.2169
6	2	0.0260	0.0612	0.0762
7	2	0.0225	0.0606	0.0699
8	2	0.0534	0.1389	0.1795

表6 各月份預測風速誤差統計(1小時間距、預測3時階)

月份	預測時階	風速誤差(m/s) 50%	風速誤差(m/s) 90%	風速誤差(m/s) 95%
1	3	0.1430	0.2883	0.3168
2	3	0.2526	0.5213	0.5858
3	3	0.2020	0.4247	0.5025
4	3	0.1292	0.4638	0.5140
5	3	0.1205	0.2428	0.2720
6	3	0.0346	0.0816	0.1015
7	3	0.0301	0.0809	0.0933
8	3	0.0712	0.1852	0.2393

嘗試以不同取樣頻率所得的資料，進行預測比較顯示模式中並未包含確切時間的資訊，純粹是就資料的序列預測之後數個步階會出現的數據，因此就預測未來某一個時間的數據而言，以高頻率取樣的資料所建置的模型，相較於以低頻率取樣的資料所建置的模型，需要預測更多的步階，結果未必較準確。然而高頻率取樣建置的模型，優點是可以預測時間領域更細緻的資料細節。

三、結論與建議

本研究結合離散小波轉換與深度學習的技術，針對臺中港風速測站的資料，發展一個定點短期風速預測的基礎模型。經由離散小波轉換所得到之各模態實測風速與所建構模型訓練得到之風速比較，可見經過訓練後的模型可以合理的反應實測風速的變動，而通常越低頻的模態，訓練的結果越好，且預測模型的表現根據不同月份的預測誤差分析結果具有穩定特性。

就預測未來某一個時間的數據而言，以高頻率取樣的資料所建置的模型，相較於以低頻率取樣的資料所建置的模型，需要預測更多的步階，結果未必較準確。然而高頻率取樣建置的模型，優點是可以預測時間領域更細緻的資料細節。

低頻模態與高頻模態都各有其優缺點，不同時階之誤差程度也不一，本研究之成果可應用於實際防災需求，惟須考慮可能之誤差值，並配合適宜之管理方法，以達防災之需求。

參考文獻

1. Huang., Shengzhi., et al.,“Monthly streamflow prediction using modified EMD-based support vector machine”, Journal of Hydrology 511, 2014, pp. 764-775.
2. Morlet., Jean.,“Sampling theory and wave propagation”, Issues in acoustic Signal—image processing and recognition, 1983,pp 233-261.

3. Norden E., Huang., et al.,“The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis.”, Proc. R. Soc. Lond. A, 1998, pp 903–995.
4. Zhaohua Wu and Norden E. Huang., “Ensemble Empirical Mode Decomposition:A Noise-Assisted Data Analysis Method”, Advances in Adaptive Data Analysis,Vol. 1, 2009, pp 1–41.
5. Torres ME., Colominas MA., Schlotthauer G., Flandrin P.,“A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise”,International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011, pp 4144–4147.
6. Colominas., Marcelo A., Gastón Schlotthauer and María E. Torres.,“Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing”, Biomedical Signal Processing and Control, 2014, pp 19-29.

港區風力資料品管與補遺

賴志峰　國立成功大學水工試驗所技術師
江文山　國立成功大學水工試驗所研究員
黃國展　國立成功大學水工試驗所技術師
蔡宜秦　國立成功大學水工試驗所助理技術師
衛紀淮　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

摘要

在氣候變遷劇烈的時代，越來越多極端的氣候現象出現，因而造成許多災難。強風一直是造成災害的重要原因之一，因其難以預測之特性，導致港區作業風險增加，亦是港區作業單位關注之議題。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)長期進行臺灣主要商港附近海域之風力觀測，每年提供不同種類風力統計分析年報供外界參考，以因應國內產、官、學、研各界之需求。

惟風力觀測存在很多不確定性，除現場端的儀器、電力、傳輸、線路等可能發生異常、資料中斷以外，儀器量測資料品質亦會隨著時間增加而降低，故風力觀測資料之品管更顯得重要(曾相茂，2013)，而中斷之資料則可透過鄰近測站風速、風向相關性高的特性來做補遺，本研究以 2020 年 1 月份臺灣主要傷港區之實測風力資料，參考美國國家資料浮標中心方法進行資料品管，並依各實測風力站間之相關性來做補遺(蘇青和，2017)，以提升港研中心量測資料品質之精確性，可做為未來風力相關研究之參考。

一、各港區風力站位置

港研中心於基隆港、臺北港、臺中港、布袋港、安平港、高雄港、花蓮港、蘇澳港 8 個港區共設置 18 個風力站，臺中港最多，共有 6 站，其次為高雄港 5 站、臺北港 3 站、安平港 2 站，基隆港、布袋港、花蓮港、蘇澳港皆只有 1 站風力站。各港區風力站經緯度座標如表 1 所示，觀測之資料儲存於港研中心海氣象資料庫。

表 1 各港區風力站經緯度座標

港區/測站	座標(N)	座標(E)
臺北港_5	25°09'23.7"	121°22'18.6"
臺北港_41	25°09'54.8"	121°23'38.7"
臺北港_4	25°10'53.1"	121°22'28.2"
基隆港_1	25°9'18.75"	121°45'7.86"
蘇澳港_2	24°35'49.28"	121°52'04.95"
花蓮港_3	23°58'49.34"	121°37'12.33"
臺中港_20	24°18'38.67"	120°31'34.60"
臺中港_7	24°18'18.66"	120°31'52.44"
臺中港_6	24°17'58.61"	120°29'11.82"
臺中港_17	24°16'13.17"	120°31'44.59"
臺中港_18	24°16'27.81"	120°30'58.82"
臺中港_19	24°14'23.28"	120°28'18.45"
布袋港_2	23°22'48.63"	120° 8'51.06"
安平港_8	22°57'37.74"	120° 8'56.40"
安平港_9	22°58'9.00"	120° 9'54.00"
高雄港_4	22°36'51.89"	120°17'17.67"
高雄港_12	22°33'4.08"	120°18'2.82"
高雄港_33	22°34'40.4"	120°18'19.8"
高雄港_34	22°33'23.5"	120°19'36.9"
高雄港_32	22°32'06.3"	120°19'35.6"

各港區風力站位置圖透過 GoogleEarth 輸出，如圖 1~圖 8 所示。

圖 1 基隆港風力站位置圖

圖 2 臺北港風力站位置圖

圖 3 臺中港風力站位置圖

圖 4 布袋港風力站位置圖

圖 5 安平港風力站位置圖

圖 6 高雄港風力站位置圖

圖 7 花蓮港風力站位置圖

圖 8 蘇澳港風力站位置圖

二、風力儀器簡介

本研究使用二維式超音波式風速計(如圖 9)，其原理係透過 4 個聲波探頭量測聲波資料進行解算，得出二維風速、風向資料，量測頻率為 1 秒鐘 1 筆，輸出頻率為 1 分鐘 1 筆(60 筆平均)及 10 分鐘 1 筆(600 筆平均)。

圖 9 二維式超音波式風速計

現場儀器傳輸包含壓力計、電力系統與傳輸系統(如圖 10)，其係透過電池及太陽能板給予儀器足夠電力量測風力值，儀器輸出資料傳輸至數據機，數據機再透過 4G 網路傳輸傳回港研中心資料庫。

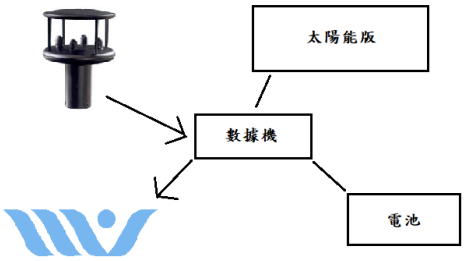


圖 10 儀器傳輸示意圖

三、各港區風力站高度與 10 公尺高風速轉換

由於地面摩擦力關係，風速量測資料與風力儀器放置高度有關，各港區風力站高度如表 3。

而氣象一般常以 10 公尺高度風速為作代表，如蒲福風級(臺灣颱風資訊中心，2013)即以離地面 10 公尺高度之風速大小做分級，本研究使用指數律之數學式計算，各港區風速 10 公尺高風速與原風速比值，如表 2 所示。

表 2 各港區 10 公尺高風速與原風速比值

港區/測站	原始高程(m)	10 公尺高風速與原高程風速比值
臺北港_5	9.35	1.010
臺北港_4	5.121	1.106
基隆港_1	10.158	0.998
蘇澳港_2	12.115	0.972
花蓮港_3	31.543	0.842
臺中港_20	5.97	1.080
臺中港_7	18.539	0.912
臺中港_6	16.616	0.927
臺中港_17	26.167	0.866
臺中港_18	9.47	1.008
臺中港_19	7.682	1.040
布袋港_2	16.756	0.925
安平港_8	22.953	0.883
安平港_9	35.271	0.828
高雄港_4	9.63	1.006
高雄港_12	16.73	0.926
高雄港_33	16.234	0.930
高雄港_34	24.459	0.874
高雄港_32	25.07	0.871

四、風力品管補遺原則

資料品管規範有區域性特性，因此本研究將以臺灣實測資料為分析對象，參考美國國家資料浮標中心(National Data Buoy Center ，NDBC) 所訂定的品管規範方法，以合理性、連續性以及關聯性三個原則來作自動品管的檢測，採用統計理論建立上述原則的檢測標準。

4.1 合理性品管

合理性檢定為品管中最基本的檢驗工作，一般而言，合理性品管分為兩種限制，第一是指觀測數據不超過量測儀器的可測範圍;第二則是觀測數據不超過量測地點的氣象臨界條件，亦即物理上的限制，一般而言，10m 高風速介於 0-60 m/s。

4.2 連續性品管

自然界中大部份物理量的變化是循序漸進的，連續性的品管基於此假設，認為各種觀制物理量在時間及空間上都有連續的變化存在，也就是說其時空的變化量應落在合理的範圍內，如果在時間上的改變量超過某一限度或是在空間上相鄰測點的資料無法以物理觀點解釋，都視為可疑資料。連續性品管分為時間連續性與空間連續性兩種品管。時間連續性是指物理量在某段時間內的變化量應小於某一容許值，NDBC 對時間連續性的檢測採$\sigma_T=0.58\delta\sqrt{\Delta T}$公式來推求容許變動值，式中$\sigma_T$為在時間間距$\Delta T$時所允許的最大變動量，$\delta$為一無因次變量，其值隨觀測物理量不同而變。同樣地，在某適當範圍內觀測的資料，必定存在空間演變上的連續特性，進行此檢驗時，應選擇空間條件相近的臨近測站，此檢驗可降低隨機取樣造成之隨機誤差。

4.3 關聯性品管與補遺

關聯性檢驗是檢驗所量測之資料與其他相關物理量之間，原有之關係是否有異常現象，海氣象特性往往受到外在環境的影響而改變(例如波浪與風之關係) ，利用不同物理量間之關連性，可互相檢驗資料的品質。此外，同一物理量使用不同測量儀器或是相同儀器同時量測，除可明顯比較資料正確性外，對於老化或毀損儀器，更可顯示出其偏差量。

五、風力品管補遺實際步驟

本研究風力資料之品管也是根據合理性、連續性與關聯性三個原則，其中合理性主要依儀器量測範圍而訂，連續性則是依相鄰資料應呈平緩變化為原則，依據機率理論而訂立異常門檻，近年因氣候變遷而有短時間之極端事件發生，因此，須比對及參考鄰近測站建立關聯，避免前述極端資料誤刪並做為相互補遺之依據。另資料一段時間無變化，通常是儀器發生故障、損壞或遭覆蓋等，可於輸出檔中去除(或標註)之，最終輔以人工檢視方式，判定資料之合理性。詳細步驟說明如下：

5.1 人工檢視風速合理性

繪製原始風力時序列，以人工檢視是否有明顯異常值，此並可比對同港同時期之資料。

5.2 利用移動平均評斷連續性

依照連續性原則，以移動平均法進行資料檢定，計算原始值與移動平均(2小時)差值之標準偏差，大於 3 倍處代表發生機率較低之異常值，標定為異常值並以移動平均法取代，處理過程案例如圖 10。至此資料為品管後結果。

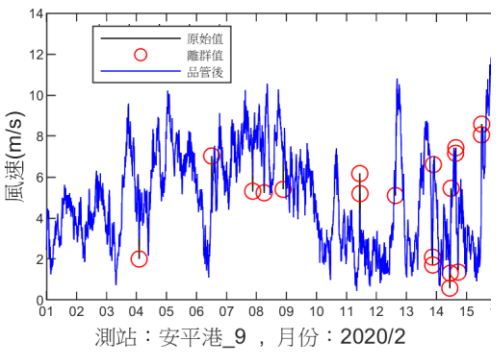


圖 10 移動平均研判離群值發生處

5.3 透過內插進行風速資料補遺

進行補遺，首先缺漏處如為短期資料以內插補遺。此處選取缺漏 1 小時內做為內插門檻，內插方式取保持形狀的片段式三次內插(pchip)，如圖 11。

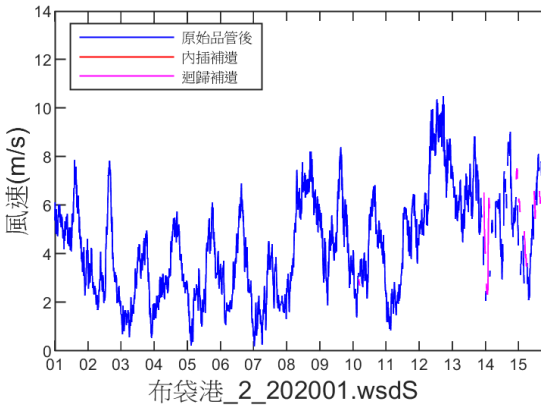


圖 11 移動平均研判離群值發生處

5.4 透過風速關聯性進行資料補遺

計算所有測站時序相關係數，依相關係數高(通常是相鄰測站)至低建立同時期之迴歸式，最高相關係數無法補遺完成者，再由次高者補遺之，直至相關係數小於0.3者(低度相關)不進行補遺，如圖 12。

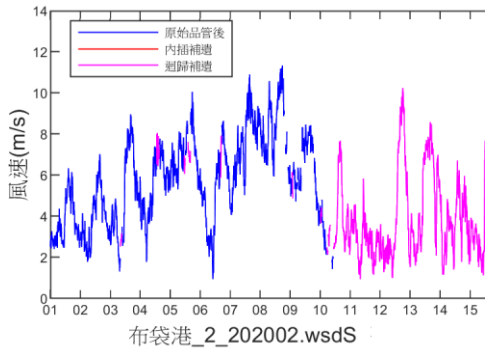


圖 12 經由內插、補遺後之資料

5.5 風向品管與補遺

風向之品管，則是將總風速分解為南-北與東-西風速分量，兩分量各別進行上述檢定及關連性分析補遺。

六、2020 年 1 月份各港區風力品管補遺結果

表 3 為 2020 年 1 月份各站原始資料蒐集率表，各港區後面的數字代表資料庫的 ID，其中安平港 8 號測站、布袋港 2 號測站、高雄港 12 號測站 1 月份蒐集率皆小於 90% 。

表 3 2020 年 1 月份各站原始資料蒐集率表

港區/測站	蒐集量(蒐集率)
基隆港_1	4464(100%)
安平港_8	1811(40.6%)
安平港_9	4464(100%)
布袋港_2	3846(86.2%)
臺中港_6	4464(100%)
臺中港_7	4464(100%)
臺北港_4	4435(99.4%)
臺北港_5	4312(96.6%)
花蓮港_3	4464(100%)
蘇澳港_2	4462(100%)
高雄港_12	2015(45.1%)
高雄港_32	4464(100%)
高雄港_33	4458(99.9%)
高雄港_34	4464(100%)
高雄港_4	4464(100%)

表 4 為 2020 年 1 月份各站原始風力資料統計表，平均風速最大的兩個測站為臺中港 6 號測站及臺北港 4 號測站，其風速各為 10.2 m/s 及 7.1 m/s，最大風最大的兩個測站同樣為為臺中港 6 號測站及

臺北港 4 號測站，其最大風速分別為 21.4 m/s 及 15.6 m/s，其對應的風向都為北北東風，應是受東北季風之影響。

表 4　2020 年 1 月份各站原始風力資料統計表

港區/測站	觀測數量	平均風速(m/s)	最大風速對應風向
基隆港_1	4464(100%)	4.2	13.4/N
安平港_8	1811(40.6%)	6.9	17.6/N
安平港_9	4464(100%)	5.4	13.7/N
布袋港_2	3846(86.2%)	5.1	14.0/NNW
臺中港_6	4464(100%)	10.2	21.4/NNE
臺中港_7	4464(100%)	5	12.9/NNE
臺北港_4	4435(99.4%)	7.1	15.6/NNE
臺北港_5	4312(96.6%)	5.1	11.9/E
花蓮港_3	4464(100%)	3.2	11.4/ENE
蘇澳港_2	4462(100%)	4.2	13.1/NNE
高雄港_12	2015(45.1%)	6.2	14.6/NNW
高雄港_32	4464(100%)	2.1	7.4/N
高雄港_33	4458(99.9%)	1.2	5.5/N
高雄港_34	4464(100%)	1.5	6.4/WNW
高雄港_4	4464(100%)	2.7	7.5/NNE

2020 年 1 月份各站品管補遺風力資料蒐集率表如表 5，各測站品管補遺後的資料蒐集率皆為 100%。

安平港 8 號測站、布袋港 2 號測站、高雄港 12 號測站平均風速由原來的 6.9 m/s、5.1 m/s、6.2 m/s 變為 6.8m/s、5.1m/s(與原先相同)、6.6m/s，最大風速則由原來的 17.6 m/s、14 m/s、14.6 m/s 變為 17.6 m/s(與原先相同)、12.9m/s(與原先相同)、17.3m/s 。

以高雄港風力站做為代表，5 站風力站原始風速時序列及品管補遺後時序列如圖 13 及圖 14，5 站風力站原始風向時序列及品管補遺後風向時序列如圖 15 及圖 16，由本研究品管補遺之方法步驟可增進資料蒐集率，以及資料統計或進一步使用之可用性。

表 5　2020 年 1 月份各站品管補遺後風力資料統計表

港區/測站	觀測數量	平均風速(m/s)	最大風速對應風向
基隆港_1	4464(100%)	4.2	13.4/N
安平港_8	4464(100%)	6.8	17.6/N
安平港_9	4464(100%)	5.4	13.7/N
布袋港_2	4464(100%)	5.1	12.9/NW
臺中港_6	4464(100%)	10.2	21.4/NNE
臺中港_7	4464(100%)	5	12.9/NNE
臺北港_4	4464(100%)	7.1	15.6/NNE
臺北港_5	4464(100%)	5.1	11.8/NW
花蓮港_3	4464(100%)	3.2	11.1/ENE
蘇澳港_2	4464(100%)	4.2	13.1/NNE
高雄港_12	4464(100%)	5.6	17.3/N
高雄港_32	4464(100%)	2.1	6.3/N
高雄港_33	4464(100%)	1.2	4.2/N
高雄港_34	4464(100%)	1.5	5.1/SSW
高雄港_4	4464(100%)	2.7	7.5/NNE

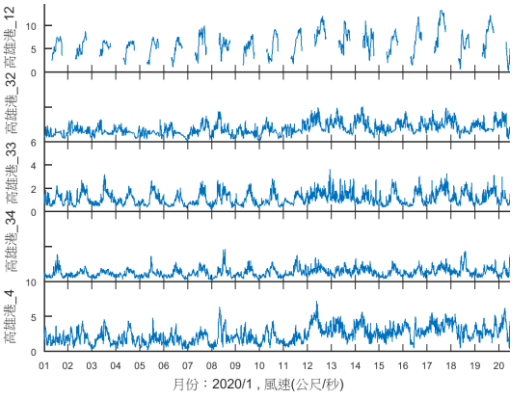


圖 13　各港區原始風速時序列

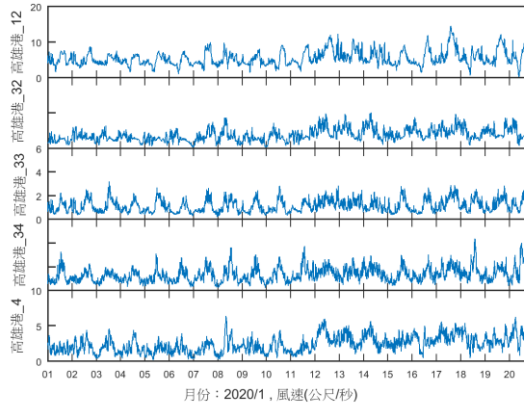


圖 14　各港區品管補遺後風速時序列

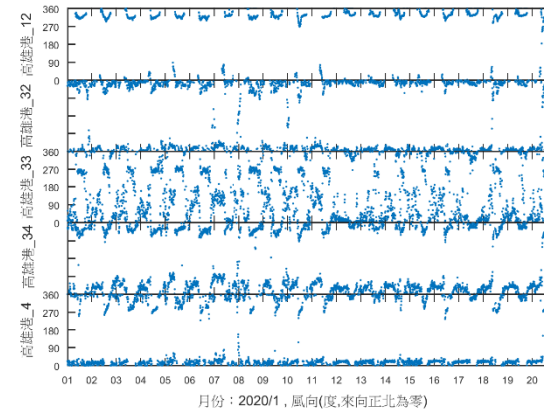


圖 15 各港區原始風向時序列

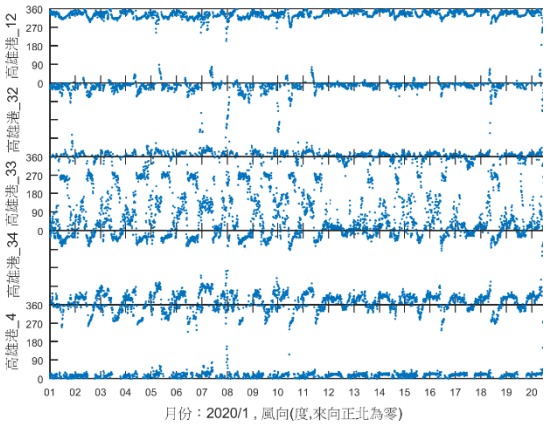


圖 16 各港區品管補遺後風向時序

七、 結論

本研究使用本所港研中心於基隆、臺北、臺中、布袋、安平、高雄、花蓮、蘇澳港區 2020 年 1 月份之風力實測資料，透過風力資料的合理性、連續性及相關性原則，進行資料的品管與補遺，除有效提升觀測資料品質外、亦可了解到各站之相關性，而透過補遺之方式補足資料量，對於風力統計分析結果有所幫助，所得之結果，可做為未來風力相關研究或進一步做為預警等相關參考應用。

參考文獻

1. 臺灣颱風資訊中心，「蒲氏風力級數」，https://isohe.ihmt.gov.tw/, 2013 年 9 月。
2. 曾相茂、何良勝、曾俊傑，「101 年臺灣地區國際港附近海域海氣象現場調查分析研究(4/4)」，2013 年。
3. 蘇青和，「港灣環境資訊網觀測資料年報：12 海域觀測風力資料」，2017 年。

臺中港風力及波浪之季節變化與預報特性分析

陳昭銘　國立高雄科技大學海事資訊科技系教授
談珮華　國立嘉義大學應用歷史學系教授
蘇青和　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
劉明鑫　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
陳慧珊　國立高雄科技大學海事資訊科技系專任研究助理

摘要

本文分析 2019 年臺中港區觀測風力及波浪之季節變化特性，再運用數值模式分析臺中港區與鄰近離岸風電區風速、波高之預報特性。研究成果顯示，臺中港區 5 個觀測站之風速，自鄰近外海之堤頭 T2 測站依次往鄰港區測站、陸地測站遞減，但各測站全年時間序列關聯性相當高，顯示臺中港區受到風場之均勻影響。風速-波高之關聯性，逐時資料之相關係數以 9 月-2 月最高(0.82-0.90)，3 月-5 月其次(0.68-0.76)，6 月-8 月最低(0.21-0.58)，反映強勁東北季風讓風、波變化特性趨向一致。預報模式對臺中港區風速與波高之預報能力，以 9 月-2 月最佳，3 月-5 月居中，6 月-8 月最低，也反應越強風速時期之預報能力越好。模式預報顯示，離岸風電區之風速強度與臺中港區相近，但預報波高明顯高於臺中港區。臺中港區預報風場與觀測風場之強度相當，但波高預報呈現偏弱誤差。

一、前言

國際間因應全球暖化之調適措施，以節能減碳為主軸，減少燃燒化石燃料，改推綠色能源來替代。臺灣綠能推動先以太陽能發電，再銜接陸上風力發電，近期延伸到離岸風力發電。國際間風力發電所產生的供電量，10 年前就已超過全世界用電量的 1%，且成長速度逐年增加。影響風力發電的因素包括各級風速的分布，並據以參考設置適當風力發電的機型(邱等，2016)。小型風力發電機的風力切入速度約為 3 m/s 做為基準，臺中港因風力效率較佳(高於 3 m/s 風速達 63.4%)，所以國內將 5 個主要離岸風電場址規劃於臺灣中部海域，並進一步分析附近海域之氣海象特性，做為選址建設、發電供電及後續維修的環境參考指標(傅等，2019; 羅等，2019)。因應離岸風電場域之開發，將有眾多工作船舶進出臺中港與鄰近海域，有鑑於該海域之強風、強浪，在航行安全考量之下，亟需對該海域之海氣象特性進行了解，在無觀測資料之海域，更需借助數值模式預報，提供海氣象資訊，做為船舶施工規劃之參考資訊，期以增進航行安全，提升港灣安全管理。

國際間已普遍運用大氣預報之 WRF(Weather Research and Forecasting)模式(Skamarock et al. 2001; Skamarock et al. 2005; Skamarock et al. 2008)與波高預報之 NWW3 (NOAA WaveWatch-III)模式(Tolman et al. 2002)來提供離岸風電場域之海氣象環境資訊，包括風速、風向、波高、波向及週期等，均為掌握未來海面複雜環境動態變化的重要因素(Emmanouil et al., 2020; Seyr et al., 2019)。以歐洲為例，Hasager et al. (2020)將合成孔徑雷達(SAR)及衛星反演(ASCAT)海表面風場，整合 WRF 模擬結果以評估歐洲地區的 10 個風場區域，範圍從北歐斯堪地那維亞向南延伸至中南歐，及向東涵蓋地中海至土耳其等國的

近岸海域，完成「新歐洲風場堪輿圖」(New European Wind Atlas，簡稱 NEWA)。Hallgren et al. (2020)採用 LiDAR 剖風儀增加風力觀測精度，將其與 4 種數值模式輸出相比較，發現模式均能模擬波羅的海區域風場特性。北歐地區利用逐時 WRF 重分析資料，配合機率模型，模擬丹麥西部海域風力變化(Koivisto et al., 2020)。亞洲地區利用 LiDAR 剖風儀觀測日本千葉縣南邊海域實際風力，發現該地區海風較陸風強，且 WRF 能模擬出相同的風力變化特性(Goit et al. 2020)。在波浪方面，Sheng et al. (2019)運用 ECMWF 風場及 Holland 颱風模型，結合 NWW3 模式模擬颱風侵襲舟山群島所引起的 5 公尺波高，相較浮球觀測波高，其均方根誤差(RMSE)約為 0.79-1.12 公尺，呈現不錯模擬效果。Merrifield et al. (2019)同樣運用 ECMWF 風場驅動 NWW3 模式，模擬颱風經過帛琉產生湧浪及風浪，兩者最大的示性波高分布均與颱風路徑相符，且 4 公尺以上波高涵蓋範圍(150-200 公里)亦與颱風的暴風半徑一致。NWW3 也被用於模擬及預報颱風(颶風)造成太平洋及大西洋 4 公尺以上巨浪之分布特性(Sampson et al., 2016)。

為增進對臺中港區與鄰近離岸風電區海氣象特性的了解，本文將運用觀測料分析臺中港區變化特性，另外，也將運用 WRF 與 NWW3 模式進行數值預報，診斷數值模式之預報能力，評估模式預報結果做為提供離岸風電區海氣象資訊之適宜性，期以協助無觀測資料之離岸風電區的航行安全指引。

二、臺中港觀測風浪與預報模式

臺中港區建置有完整海氣象觀測系統(圖 1)，觀測位置涵蓋港區四周的堤頭及陸地區域，提供逐時資料，風場觀測站有下列 5 站:

- T2 站：北防波堤綠燈塔觀測站(24.2997°N, 120.4864°E 、高度 16.62m)。
- T8 站：北防沙堤觀測站(24.3122°N, 120.5269°E、高度 5.97m)。
- T1 站：防風林觀測站(24.3052°N, 120.5312°E、高度 18.54m)。
- T5 站：31 號碼頭觀測站(24.2744°N, 120.5163°E、高度 9.47m)。
- T6 站：港研中心觀測站(24.2703°N, 120.5289°E、高度 26.17m)。

資料來源: 交通部運輸研究所港灣技術研究中心

圖 1 臺中港區海氣象觀測站位置圖

波高觀測為 AWAC 站:北防波堤綠燈塔外海約 700-800 公尺(24.30333°N, 120.48193°E)，使用聲波式波向波高與剖面海流儀(Acoustic Doppler Wave and Current Profile)，以聲波與波壓監測海面波動(許等 2018)，提供逐時示性波高。

本文使用 WRF-3.7.1 版本模式做為臺中港灣區之風場預報系統，使用四層巢狀方式，將全球大尺度預報資訊，以動力降尺度方式，逐次提高網格點解析度，達到臺中港區所需求之高解析度預報資訊。WRF 模式之邊界條件採用美國 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Global Forecast System (GFS)模式之預報場，未使用資料同化，以 GFS 模式 0.5°x 0.5°(約 50 公里)網格之分析場，經由

WRF 的前置處理系統，將資料內插至 WRF 模式所設定之第一層模式網格點上，做為 WRF 初始場來執行預報。

WRF 降尺度預報採用 4 層巢狀系統，以 3 倍放大效率，依序使用 32 公里，10.8 公里，3.6 公里，1.2 公里等 4 種解析度，將全球預報資訊依序降尺度到：亞洲-太平洋地區(94.9682°-165.0318°E, 0.067°-48.7907°N)、東亞臨海地區(115.8041°-126.3365°E, 18.1860°-30.2649°N)、臺灣鄰近海域(119.0860°-123.6271°E, 20.5260°-26.4717°N)、臺中港鄰近海域(119.7983°-120.8541°E, 23.7655°-24.5547°N)，模式範圍如圖 2 所示。

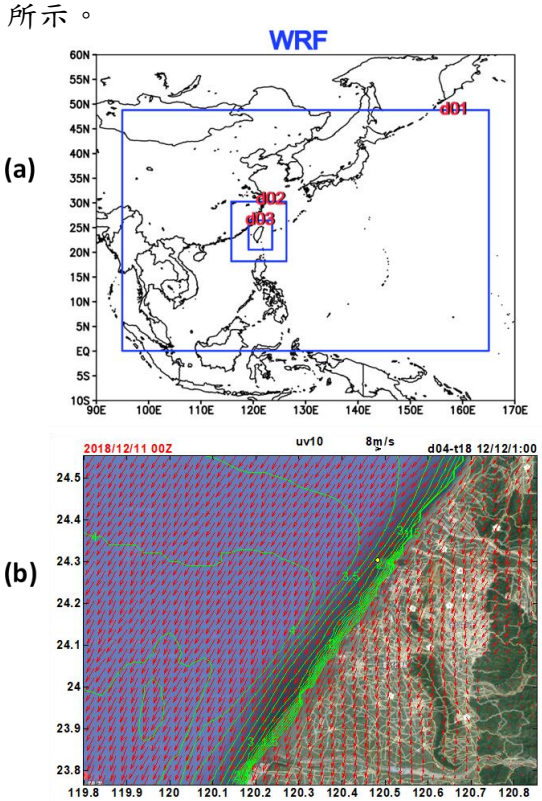


圖 2(a) WRF 模式之第一層到第三層巢狀降尺度空間範圍，(b)臺中港區之 WRF-1.2km 模式風場(箭號)與 NWW3-2km 模式波高(等值線)之預報結果

降尺度過程中，上一層預報結果經由內插到下一層模式之範圍與解析度來做為下一層之邊界條件，每 12 小時提供一次。本研究運用 3.6 公里網格點之第三層模式所預報之 10 米風場，內插成臺中港鄰近海域之 2 公里網格點，以初始場與每 12 小時預報場做為邊界條件，驅動臺中港區 NWW3 模式(119°-123°E, 21°-26°N)執行波高預報。NWW3 為風浪模式，僅由大氣模式表面風場來驅動即可，且以上一個預報結果做為下一個預報初始場之暖起動方式執行。臺中港區之風波預報係由 WRF 第四層 1.2 公里模式與 NWW3 之 2 公里模式的預報結果進行分析，其範圍如圖 2(b)所示。

三、臺中港觀測風浪之季節變化

圖 3 所示為 T1、T2、T5、T6、T8 等 5 站於 2019 年每天 08 時在地時間之風速時間序列，以全年風速平均值而言，T2 為 8.33m/s, T8 為 5.96m/s, T5 為 4.82m/s, T1 為 3.98m/s, T6 為 3.35m/s。越靠近港外，遮蔽越少之測站，風速越大(如 T2 站)，明顯大於陸地上、建物環繞之測站風速(如 T6 站)。取兩兩測站之風速時間序列進行相關係數分析，5 個測站彼此相關係數約在 0.81-0.95 間，呈現高度關聯性，反應臺中港受到均勻風場之影響。

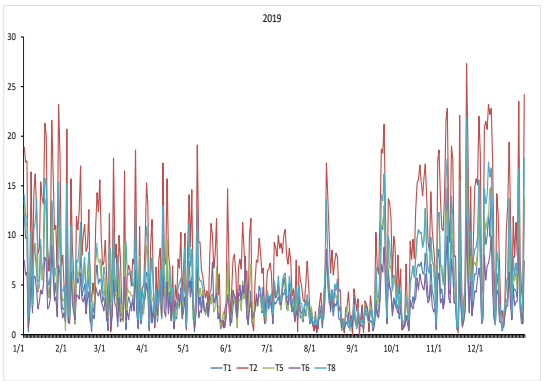


圖 3 2019 年各風速測站歷線圖

臺中港區風場之季節變化特性，以T2 測站之逐時資料為代表，其 1-12 月逐月風速強度之分布百分比，依蒲伏量表分級，分析結果顯示於表 1，T2 測站強風季節主要分布在 10-1 月，其中 8-9 級強風之百分比，以 11 月之 39%最高，12 月之 31%與 1 月之 30%次之。西南季風時期之 5-8 月，風級主要在 5 級風及以下。T2 測站風向之季節變化特性，以 16 方位分類，每方位 22.5 度，正北方向為 360 度或 0 度，北風方位之角度範圍為 348.75 度到 11.25 度，其餘方位依此類推。T2 測站之逐月風向分布百分比，如表 2 所示，1-3 月以東北風、北北東風為主。4-5 月在東北風、北北東風之外，西南風、南南西風開始明顯。6-8 月則轉以南風、南南西風、西南風為主。9-12 月又轉成東北風、北北東風為主。上述季節變化呈現 9 月到隔年 3 月為東北季風季節，6-8 月為西南季風季節，4-5 月則為中間過渡時期。

表 1　2019 年 T2 站風速百分比分布表

T2風速(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
3級風以下	11	22	34	34	41	32	33	51	38	17	16	20
4級風	11	13	16	23	20	31	21	22	11	14	8	9
5級風	15	17	19	21	15	28	31	13	10	15	11	13
6級風	14	26	16	12	12	8	12	5	14	16	9	16
7級風	19	18	10	8	8	1	2	7	15	21	17	10
8級風	24	3	6	1	3	0	1	3	8	15	21	12
9級風以上	6	1	1	0	0	0	0	0	4	2	18	19
總筆數	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744

表 2　2019 年 T2 站風向百分比分布表

T2風向(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
N	8	9	9	9	4	2	4	6	5	3	2	6
NNE	78	49	33	28	26	6	7	13	46	57	75	67
NE	8	29	28	14	25	8	3	8	21	25	16	17
ENE	1	3	4	3	2	2	1	3	2	2	1	1
E	0	0	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1
ESE	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
SE	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	1	1
SSE	1	1	1	1	1	6	3	8	3	1	1	0
S	0	1	2	8	7	18	17	16	4	2	0	1
SSW	0	1	6	16	10	31	37	22	5	3	1	1
SW	0	0	5	12	10	19	15	6	2	2	0	1
WSW	0	1	1	2	2	3	3	3	1	1	1	1
W	0	0	0	1	1	1	2	2	1	0	0	0
WNW	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
NW	1	1	1	1	4	1	2	4	3	1	1	1
NNW	2	2	4	2	4	1	2	4	4	3	1	2
總筆數	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744

2019 年臺中港 AWAC 測站觀測逐時波高之 1-12 月分布百分比，如表 3，依蒲伏量表分級，東北季風(9-4 月)普遍出現 5 級及以上波高，其中以 11 月-1 月為最強，約佔 43-60%，其中 6 級及以上之波高百分比為 11-20%，對應 T2 風速之最大強度時段。其餘 9 月-10 月與 2 月-4 月較大波高以 5 級為主。西南季風季節(5 月-8 月)之波高明顯減弱，5 月與 8 月為 5 級以下，6 月與 7 月為 4 級以下。

表 3　2019 年逐時波高百分比分布表

AWAC波高(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
3級以下	7	18	26	55	51	85	86	66	28	18	9	14
4級	44	44	53	30	36	15	12	24	49	46	31	44
5級	37	36	21	15	11	0	2	9	19	34	40	27
6級以上	11	2	1	0	2	0	0	1	5	2	20	16
總筆數	736	672	737	715	733	612	617	719	717	729	698	715

為分析風速-波高之關聯性，本文以月為單位，以逐時資料計算 T2 風速與 AWAC 波高之相關係數，表 4 顯示各月逐時資料計算所得之相關係數，分為 3 類，包括全部資料、5 級風以下資料、5 級風(含)以上資料。以全部資料之相關係數而言，大致以 9 月-2 月東北季風發展、強盛時期之相關係數最高，約在 0.82-0.90 之間。在東北季風過渡到西南季風之 3 月-5 月，相關係數略降為 0.68-0.76，但仍在 0.6 以上，具有相當程度之對應關係。而在 6 月-8 月西南季風時期，關聯性最低，相關係數僅有 0.21-0.58，降到 0.6 以下。從 5 級風以下與 5 級風以上之相關係數來看，5 級風以上為主要關聯性來源，相關係數為 0.54-0.91 之間，5 級風以下相關係數為 -0.20 到 0.47 之間，均在 0.5 以下，顯示較強風浪時之風-波關聯性較佳。

表 4　2019 年逐月風速-波高之相關係數

風-波相關係數	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
全部資料	0.84	0.83	0.68	0.68	0.76	0.21	0.58	0.55	0.88	0.82	0.90	0.89
5級風以下	0.25	0.47	0.02	0.12	0.24	-0.20	0.22	0.06	0.34	0.39	0.28	0.29
5級風(含)以上	0.84	0.71	0.78	0.70	0.74	0.62	0.54	0.67	0.83	0.78	0.88	0.91

四、臺中港風波預報特性分析

T2 與 AWAC 為逐時觀測資料，模式預報則是以每天 00Z(在地時間上午 8 點)、12Z(在地時間下午 8 點)為初始時間分別進行 48 小時預報，為與全年逐時觀測資料比對，故每一個預報個案取其第 1-12 小時預報結果，串成全年之逐時預報資料，再與對應時間之觀測資料進行迴歸分析。2019 年逐月之 T2 風速與 AWAC 波高之觀測-預報分析結果，如表 5 所示，包含對應 T2 風速與 AWAC 波高之逐月預報誤差之均方根誤差(RMSE)、相對均分根誤差 (relative RMSE, RRMSE)與預報值-觀測值之相關係數。其中，RRMSE=RMSE/觀測月平均值，代表誤差對應觀測場強度之比例。

表 5　2019 年觀測風場與波高模式預報誤差之相關係數

	T2(WRF)-T2(觀測)			AWAC(NWW3)-AWAC(觀測)		
2019	相關係數	RMSE	RRMSE	相關係數	RMSE	RRMSE
1月	0.93	2.37	0.18	0.91	0.59	0.29
2月	0.87	2.37	0.24	0.91	0.57	0.33
3月	0.84	2.8	0.33	0.81	0.72	0.49
4月	0.79	2.62	0.35	0.83	0.56	0.51
5月	0.85	2.54	0.36	0.86	0.53	0.46
6月	0.69	2.27	0.34	0.25	0.40	0.56
7月	0.70	2.82	0.40	0.50	0.41	0.54
8月	0.73	3.46	0.57	0.68	0.53	0.53
9月	0.90	2.77	0.30	0.94	0.58	0.38
10月	0.92	2.26	0.20	0.90	0.44	0.27
11月	0.95	2.24	0.16	0.95	0.51	0.23
12月	0.94	2.63	0.21	0.95	0.49	0.25

風場方面，相關係數顯示預報能力依 3 個時期變化，最佳時期為東北季風強盛之 9 月-2 月，相關係數為 0.87-0.95，其次為東北季風轉弱到西南季風過渡時期之 3 月-5 月，相關係數為 0.79-0.85，預報能力最低時期發生在西南季風之 6 月-8 月，相關係數為 0.69-0.73。9 月-2 月之 RMSE 為 2.24-2.77 m/s，RRMSE 為 0.16-0.30，但 6 月-8 月之 RMSE 增為 2.27-3.46 m/s，RRMSE 也增為 0.34-0.57，RRMSE 比 9 月-2 月為高，反映較大之誤差比例。3 月-5 月之 RMSE 與 RRMSE 值大致位於 9 月-2 月與 6 月-8 月之間。波高方面，相關係數於 9 月-2 月最高(0.90-0.95)，3 月-5 月其次 (0.81-0.86)，6 月-8 月最低 (0.25-0.68)。RMSE 於 9 月-2 月為 0.44-0.59m，3 月-5 月為 0.53-0.72m，6 月-8 月為 0.40-0.53m，RRMSE 於 9 月-2 月最低，為 0.23-0.38，3 月-5 月其次，為 0.46-0.51，6 月-8 月最高，為 0.53-0.56，顯示 RRMSE 所反映之誤差比例能合理反映相關係數之變化特性。上述結果反應持續性之強風，如東北季風，其風、波變化情形在穩定強風影響之下，較為單純，因此，也較容易為模式所掌握，誤差較小。但在夏季，雖然風場較為微弱，但西南氣流、颱風、午後雷陣雨等現象常會引發瞬間強風與大浪，模式對這些瞬間變化現象之預報能力常會有所不及，故預報能力較差，誤差值增大。運用模式預報資訊時，宜注意季節性差異，東北季風季節之預報能力與可信度當比西南季風時期為佳。

五、臺中港區與離岸風電區之風浪比較

本節將比較 T2、AWAC(基準點)之預報風、波與外海離岸風電區(目標點)預報風、波，逐月探討預報風、波於離岸風電區與臺中港區之差異與關聯性，

提供離岸風電區域預報風、波變化之概念模式。離岸風電區分析範圍之 4 個邊界點為 (120.091°E，24.255°N)、(120.284°E，24.245°N)、(119.822°E，23.908°N)、(120.030°E，23.872°N)，離岸風電區之預報值取分析範圍內所有點之區域平均值代表。

臺中港區與離岸風電區之預報風速與預報波高之逐時資料相關係數分析顯示，預報風速相關係數於 6 月-8 月略低，為 0.79-0.82，其餘月分都相當高，為 0.90-0.97。預報波高之相關係數普遍比預報風速為高，6 月-8 月為 0.84-0.87，其餘月份為 0.95-0.98。整體而言，臺中港區與離岸風電區之預報風速與預報波高均呈現高度正相關性，顯示容易受到相同天氣系統之均勻影響，但夏季常有區域性激烈天氣，因此，容易產生臺中港區與鄰近外海之區域性差異，而使相關性略微降低。

在分析模式預報風場與波高後，可將全年逐月之預報風級、波級分布與觀測風級、波級分布進行比對，藉以了解預報場在全年季節變化特性上，其分布特性與觀測場之異同。表 6 所示為 T2 觀測風速、T2 預報風速、離岸風電區預報風速之逐月風級分布百分比，7 級風(含)以上之強風百分比，T2 觀測風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 38%、56%、41%、49%，其餘月份為 27%以下。T2 預報風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 33%、52%、38%、42%，其餘月份為 25%以下。離岸風電區預報風場於 10 月、11 月、12 月、1 月分別為 30%、56%、41%、42%，其餘月份為 20%以下。顯示 T2 預報風場與 T2 觀測風場之強風分布百分比大致相近，且離岸風電區預報風場之強風分布特性與 T2 預報風場相近，顯示臺中港區與外海離岸風電區之風場，大致呈現強度相近之均勻風場分布特性。

表 6 觀測風速、預報風速及離岸風電區預報風速之風級分佈百分比

T2-觀測(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	19	18	10	8	8	1	2	7	15	21	17	10
8級風	24	3	6	1	3	0	1	3	8	15	21	12
9級風以上	6	1	1	0	0	0	0	0	4	2	18	19
T2-WRF(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	21	22	9	8	7	0	1	6	12	24	19	10
8級風	19	3	4	0	0	0	0	1	6	8	23	14
9級風以上	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1	10	14
離岸風電-WRF(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
7級風	24	19	11	8	7	0	3	7	10	25	24	14
8級風	18	1	3	0	1	0	0	2	8	5	26	20
9級風以上	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	7

表 7 所示為 AWAC 觀測波高、NWW3 對 AWAC 站預報波高、離岸風電區預報波高之逐月波級分布百分比，將 5 級、6 級以上之波高累加，AWAC 觀測波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 36%、60%、43%、 48%、38%，其餘月份為 24%以下。AWAC 之預報波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 19%、48%、36%、30%、16%，其餘月份為 13%以下。離岸風電區預報波高於 10 月、11 月、12 月、1 月、2 月分別為 49%、71%、51%、56%、41%，其餘月份為 38%以下。上述結果顯示 AWAC 預報波高比 AWAC 觀測波高為偏弱誤差。離岸風電區預報波高則明顯強過臺中港區 AWAC 觀測波高與預報波高，顯示離岸風電區波高明顯比近岸臺中港區波高來得強烈。

表 7 觀測波高、預報波高、離岸風電區預報波高之波級分佈百分比

AWAC-觀測(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級	37	36	21	15	11	0	2	9	19	34	40	27
6級以上	11	2	1	0	2	0	0	1	5	2	20	16
AWAC-NWW3(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級	29	16	9	5	3	0	0	5	11	18	40	25
6級以上	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	8	11
離岸風電-NWW3(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5級風	28	33	11	10	16	0	6	9	24	34	25	18
6級以上	28	8	9	4	3	0	0	3	12	15	46	33

為進一步檢驗模式之預報結果，取2019 年 9 月臺中港浮標資料進行比對，該浮標位於臺中港區與離岸風電區之間(120.4094°E，24.2108°N)。比對資料包括臺中港浮標之觀測資料(藍線)、對應臺中港浮標之預報資料(紫線)、離岸風電區之預報資料(綠線)，分別對風速與波高預報結果比對，結果如圖 4 所示。就風場而言，三條時間序列呈現相似之變化特性，但風速則是預報場比觀測場大，特別是較大風速發生之 9 月 14-30 日，顯示外海之預報風場應是比觀測風場為強。在波高方面，三條時間序列之變化特性相近，但強度則是臺中港浮標觀測波高與離岸風電區預報波高相近，且兩者均比臺中港浮標預報波高為強，顯示外海預報波高仍存有偏弱特性，浮標觀測風速與浮標預報風速、離岸風電區預報風速之相關係數分別為 0.91、0.90，浮標觀測波高與浮標預報波高、離岸風電區預報波高之相關係數分別為0.94、0.94，這些結果顯示預報風場與波高於外海空曠海域具有高度之準確性，足以預報臺中港區外海海氣象環境之變化狀態，唯有其強度仍需進行誤差修正。

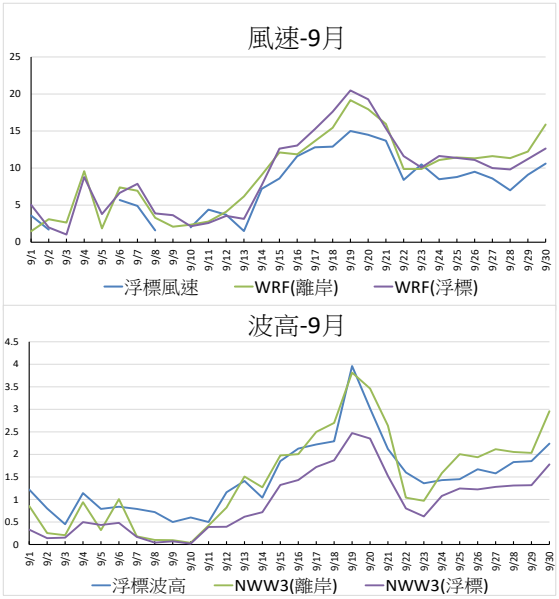


圖 4 模式預報比對結果歷線圖

六、結論及建議

本研究以 2019 年為分析對象，運用觀測資料分析臺中港區海氣象環境之變化特性與關聯性，再運用數值模式預報臺中港區與鄰近外海離岸風電區之風速與波高，期以提供較具代表性與準確性之離岸風電區海氣象預報資訊，協助航行安全與提升港埠管理績效。主要研究成果陳述如下:

- 臺中港區觀測風場自無遮蔽外海測站(T2)依次減弱到建物環繞之陸地測站(T6)。各測站全年時間序列之關聯性均相當高。
- 風速-波高之逐時資料關聯性以 9 月-2 月東北季風發展、強盛時期之相關係數最高(0.82-0.90)，在東北季風過渡到西南季風之 3 月-5 月略降(0.68-0.76)，以 6 月-8 月西南季風時期最低(0.21-0.58)。
- 對 T2 風速與 AWAC 波高之預報能力依 3 個時期變化，最佳時期為東北季風強盛之 9 月-2 月，其次為東北季風轉弱到西南季風過渡時期之 3 月-5 月，預報能力最低時期發生在西南季風之 6 月-8 月。
- 模式預報風場於臺中港區與離岸風電區強度相近，其關聯性於 6 月-8 月略低，其餘月分都相當高。預報波高於離岸風電區明顯高於臺中港區，兩區預報波高之相關係數普遍為高。臺中港區與離岸風電區之預報風速與波高均呈現高度正相關性，顯示容易受到相同天氣系統之均勻影響。

上述分析結果顯示波浪預報之誤差比風速預報為大，為提高波浪預報之精度，建議可朝下列修正方向進行:

- 本研究所驗證之 AWAC 波高測站位於鄰岸地區，其岸形與水下地形改變最大，不易為模式 2 公里網格所掌握，因此，呈現偏弱之波高預報誤差。未來可藉由置入較高解析度之陸上與海底地形、不同參數設定、提高空間網格解析度等方法來改進預報精度。
- 本研究波浪模式之範圍只限定在臺中港區域，對夏季颱風從遠處引發長浪傳送進來之特性不易掌握，以致波浪預報能力於夏季明顯降低。未來修正方向可考慮將波浪預報範圍擴充為全臺周邊海域，期以掌握長浪之預報，提高波浪預報精度。

參考文獻

1. 邱永芳、黃茂信、李賢華、余聿祥、方鉢淳，「風能應用於臺灣港灣之初步研究」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 104 期，2016 年，第 40-45 頁。
2. 許城榕、許弘莒、李孟學、羅冠顯、李政達、蔡立宏，「AWAC 波浪量測資料分析以金門海域為例」，第 40 屆海洋工程研討會論文集，高雄、臺灣，2018 年。
3. 傅怡釧、李俊穎、蘇青和、謝佳紘，「波浪通過臺灣中部海域離岸風電場址之初步探討」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 112 期，2019 年，第 22-32 頁。
4. 羅冠顯、蔡立宏、曾俊傑，「離岸風電基地母港(臺中港)鄰近海域海氣象特性分析」，交通部運輸研究所，港灣季刊，第 114 期，2019 年，第 50-66 頁。
5. Emmanouil, S., Aguilar, S. G., Nane, G. F., and Schouten, J.-J., “Statistical models for improving significant wave height predictions in offshore operations”, Ocean Engineering, 206, 2020,pp.1-10.
6. Goit, J. P., Yamaguchi, A., and Ishihara, T., “Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF”, Atmosphere, 11, 2020, pp.442-461.
7. Hallgren, C., Arnqvist, J., Ivanell, S., Körnich, H., Vakkari, V., and Sahlée, E., “Looking for an offshore low-level jet champion among recent reanalyses: a tight race over the Baltic Sea”, Energies, 13, 2020, pp.3670-3695.
8. Hasager, C. B., Hahmann, A. N., Ahsbahs, T., Karagali, I., Sile, T., Badger, M., and Mann, J., “Europe’s offshore winds assessed with synthetic aperture radar, ASCAT and WRF”, Wind Energy Science, 5, 2020, pp.375-390.
9. Koivisto, M., Jónsdóttir, G. M., Sørensen, P., Plakas, K., and Cutululis, N., “Combination of meteorological reanalysis data and stochastic simulation for modelling wind generation variability”, Renewable Energy, 159, 2020, pp.991-999.
10. Merrifield, S. T., Schramek, T.A., Celona, S., Bôas, A. B. V., Colin, P. L., and Terill, E. J., “Typhoon-forced waves around a western Pacific Island Nation”, Oceanography, 32, 2019, pp.56-65.
11. Skamarock, W. C., and Coauthors, “A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-4751STR”, 2008, p.125.
12. Sampson, C. R., Hansen, J. A., Wittmann, P. A., Knaff, J. A., and Schumacher, A., “Wave probabilities

consistent with official tropical cyclone forecasts", Weather and Forecasting, 31, 2016, pp.2035-2045.
13. Seyr, H., and Muskulus, M., "Decision support methods for operations and maintenance for offshore wind farms: a review", Applied Science, 9(2), 2019, pp.1-30.
14. Sheng, Y., Shao, W., Li, S., Zhang, Y., Yang, H., and Zuo, J., "Evaluation of typhoon waves simulated by WaveWatch-III model in shallow waters around Zhoushan Islands", Journal of Ocean University of China, 18, 2019, pp.365-375.
15. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., and Dudhia, J., "Prototype for the WRF (Weather Research and Forecasting) model", Preprints, Ninth Conf. on Mesoscale Processes, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., 2001, J11-J15.
16. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., and Powers, J. G., "A description of the Advanced Research WRF version 2", NCAR/TN-468_STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2005, p.88.
17. Tolman, H. L., Balasubramaniyan, B., Burroughs, L. D., Chalikov, D. V., Chao, Y. Y., Chen, H. S., and Gerald, V. V., "Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models", Wea. Forecasting, 17, 2002, pp.311–333.

「港灣季刊」徵稿簡訊

1. 本刊為提供國內港灣工程界同仁交換工作經驗與心得之園地，歡迎工程、學術界之同仁提供港灣工程相關之工程動態、實務、工程新聞、技術新知、地工技術、工程材料、營運規劃及其他有關之工程簡介或推動中之計畫等的報告、論著或譯述。
2. 投稿者應保證所投稿件無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情勢負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。
3. 來稿經本刊接受刊登後，作者應附具著作授權同意書，同意非專屬授權予本刊做下述利用：
   (1) 以紙本或是數位方式出版。
   (2) 進行數位化典藏、重製、透過網路公開傳輸、授權用戶下載、列印、瀏覽等資料庫銷售或提供服務之行為。
   (3) 再授權國家圖書館或其他資料庫業者將本論文納入資料庫中提供服務。
   (4) 為符合各資料庫之系統需求，並得進行格式之變更。
4. 作者應保證稿件為其所自行創作，有權為前項授權，且授權著作未侵害任何第三人之智慧財產權。
5. 稿件每篇以八頁（含圖）(4000~5000 字）以內為原則，稿酬從優；請附磁片或 E-mail，並請加註身分證字號及戶籍地址（含鄰、里)。
6. 本刊每年刊行 3 期，分別於 2 月、6 月、10 月出版。如蒙惠稿請於每期出版前 30 日寄交本刊。
7. 聯絡電話：(04)2658-7150　周于楨
   傳真電話：(04)2656-4189
   E-mail：chou@mail.ihmt.gov.tw
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：
   435058 臺中市梧棲區中橫十路 2 號
   交通部運輸研究所港灣技術研究中心「港灣季刊」編輯委員會　收