港灣季刊

（原港灣報導季刊）

第 112 期

交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

「港灣季刊」第 112 期

刊期頻率：季刊
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 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：朱金元、謝明志、楊美華、柯正龍、蔡立宏、蘇青和、陳正義、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
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：10485 臺北市中山區松江路 209 號 1F•電話：(02)25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：2007700020　　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、風力作用下船舶纜繩受力模式建置 ……1

蔡立宏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
吳南靖　國立嘉義大學土木與水資源工程學系專案助理教授
魏志強　國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系教授
蔡加正　國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系暨研究所教授
吳冠德　國立嘉義大學土木與水資源工程學系專任助理

二、波浪通過臺灣中部海域離岸風電場址之初步探討 ……22

傅怡釧　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
蘇青和　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員兼科長
謝佳紘　國立成功大學水工試驗所工程師

三、臺灣離岸風電建置與航安技術發展之可行性評估 ……33

高瑞鍾　國立高雄科技大學海洋事務與產業管理研究所副教授
蔡立宏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
黃茂信　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
鍾少慈　國立高雄科技大學供應鏈管理研究所研究生

四、建置高雄港區即時空氣品質推估系統 ……52

吳義林　國立成功大學環境工程學系教授
張鴻良　國立成功大學環境工程學系研究助理
楊榮元　國立成功大學環境工程學系研究助理
邱永芳　海洋委員會國家海洋研究院籌備處主任
柯正龍　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

五、臺灣商港水下金屬材料一年期腐蝕速率調查研究 ……70

羅建明　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
胡啟文　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
黃宇謙　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
柯正龍　交通部運輸研究所港灣技術研究中心第一科科長

風力作用下船舶纜繩受力模式建置

蔡立宏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
洪維屏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
吳南靖　國立嘉義大學土木與水資源工程學系專案助理教授
魏志強　國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系教授
蔡加正　國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系暨研究所教授
吳冠德　國立嘉義大學土木與水資源工程學系專任助理

摘要

船舶繫纜之受力與船舶間的運動是一個非常複雜的問題。在風、浪作用下，繫泊於碼頭邊之船舶眾多纜繩中，那一條受力最大，受力多大，為高度複雜的非線性問題。本計畫利用水工模型試驗的方式，量測模型船在眾多風、波作 用情境之下，繫纜船舶之纜繩最大受力。然後利用因次分析的方法，將這些情境的風、波條件，以及船型尺寸諸元，予以無因次化，再將這些無因次參數，丟到類神經網路進行訓練，試圖找出風、波條件、船型尺寸諸元，與纜繩最大受力之間的關聯函數關係。

經實驗發現，風對船舶的作用，遠大於浪，故在我們建立的模式中，暫且不需要輸入波浪條件。而和國外文獻比對，本計畫所量測之風對於船舶作用力，有相當高的可信度。本計畫製作兩艘模型船，考量兩種不同繫纜方式、5種風向、多種吃水載重條件與風速條件，總計完成 244 個情境之試驗。最後將類神經網路訓練的結果，分別建置貨櫃輪與油輪之船舶繫纜力預報模式。

一、計畫緣起及目的

近年來隨著氣候的變化，全球暖化所造成的環境及經濟社會問題是全人類所要面對的挑戰，臺灣是一個海島型國家，因氣候之變遷 ，也要被迫面臨到極端的氣候事件和天災頻繁的發生，尤其是 2009 年莫拉克風災發生後，在相關環境治理和災害應變處理措施之制定亦刻不容緩。

臺灣位於亞洲重要運輸島國，且在全球經濟發展迅速下，海上運輸貨物顯得極為重要，考慮停靠碼頭岸邊之船舶體積噸位龐大，裝載與卸貨之作業時間

長，假若是港口靜穩度不佳，則停靠於碼頭之船舶將受到風、潮流及波浪等外力之作用，將會使船舶受到較劇烈之船體運動，其不僅會影響到裝載及卸載貨物間之作業，也將對繫纜於船舶間之纜繩施予一張力，並將使其施力於繫船柱及繫纜樁上，而船舶與碼頭間的防舷材將會受到壓力亦或是衝擊力，使得碼頭結構將間接受到影響。

船舶繫纜之受力與船舶間的運動是一個非常複雜的問題，其間涉及到船舶會受到風、潮流及波浪等外力作用，以及碼頭防舷材和纜繩受力等對船舶的非線性運動之約束。若繫纜方式不佳或是繫纜纜繩不堅固，可能將會導致船舶有斷纜之風險。在繫纜纜繩拉力之問題，不單只能單純考慮波浪及潮流，其受到風之影響也是很大，實際上當風速較高時，其所造成的風速擾動能量較大，將會使得繫泊之船舶有明顯的運動，所引發的繫纜拉力將會是纜繩斷纜的關鍵因素之一。

二、船舶斷纜事件蒐集

因本研究的目的在於瞭解船舶繫纜在風力作用下其所能承載的最大繫纜力，當船舶停靠於碼頭時，船舶受到強烈陣風或是波浪的牽引，造成船舶產生劇烈的搖晃時，會使船舶與繫於碼頭上的繫纜樁間的纜繩產生一極大的拉應力，當纜繩的拉應力超過其所能乘載的臨界力時，船舶的繫纜將會斷裂，導致船舶處於危險之狀態，而近年來因氣候變遷的因素，使得颱風所產生的強陣風已讓臺灣近年來發生船舶 斷纜事件有增多的趨勢，為了瞭解近年臺灣各港區船舶斷纜事件，委請臺灣港務公司協助統計近年臺灣各港區船舶斷纜事件，（如表 1 所示）。

船舶繫泊是將船舶停靠於碼頭，繫泊需要用到纜繩，靠纜繩固定船舶，纜繩的一端繫於碼頭岸上的繫纜樁上，而另一端則繫於船上的纜車或繫纜樁上，繫纜設計考量一為輕細利於操持，二為結實便於有力固定位置。船舶繫泊於碼頭按纜繩的位置、出纜方向和作用不同，分為首纜、尾纜、前向纜、後向纜、橫纜、撇纜、穿演。圖 1 為船舶繫纜位置。如圖 2 為纜繩套於繫纜樁之套法，有兩個眼環套於同一個繫纜樁上，第二個眼環需先穿入第一個眼環，然後再套入繫纜樁，如此二者均可各別鬆出。

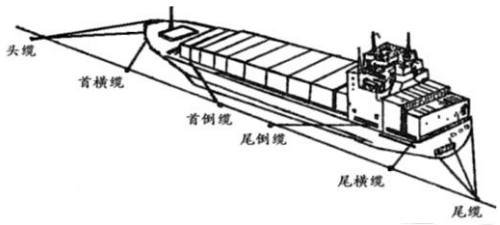


圖 1　船舶繫纜位置
（網站 https://www.getit01.com/p20171227547256809/）

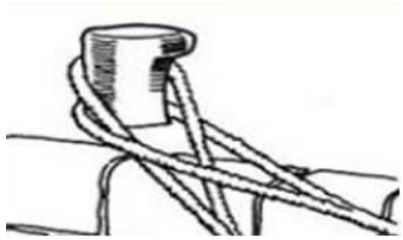


圖 2　船舶纜繩套於繫纜樁上
（網站 https://www.getit01.com/p20171227547256809/）

表 1　船舶斷纜統計數一覽表

港口	件數	年度	件數	風力級數	件數	船型	件數
基隆港	1	101	8	1	7	油輪	12
臺中港	7	102	9	2	8	全貨櫃	11
安平港	1	103	13	3	6	散裝船	7
高雄港	56	104	9	4	5	運輸駁船	6
		105	19	5	3	雜貨船	6
		106	7	6	2	油化船	5
				7	11	液化氣體船	4
				8	2	液體化學船	2
				9	2	解體船	2
				10	4	軍用船舶	2
				11	8	液化石油氣	1
				12		高速船	1
				13		礦砂船	1
				14		客貨船	1
				15		軍艦	1
				16	5	拖船	1
				17	2	煤炭船	1
						漁船	1

三、研究方法

3.1 因次分析

船舶靠泊於港內時，影響纜繩受力之因素，主要為船舶之船型大小，當時港內之海象、氣象狀況，以及地表上的幾個基本物理量。各因素詳列如下：

船舶之長度(m)：L_{OA}

船舶之寬度(m)：B

船舶之吃水深度(m)：D_s

船舶含貨物之總質量(kg)：M_s

船舶之淨出水高度(m)：H_{BR}

船舶之乾舷出水高度(m)：H_{SR}

船舶之重心到船首之距離(m): L_C

船舶之重心到船底之距離(m): D_C

水面上軸向投影面積(m2)：A_T

水面上側向投影面積(m2)：A_L

水面上側向投影形心至船首之距離(m)：C

水面上側向投影形心至水面之距離(m)：H_C

甲板上微小物件之側向投影形心至船首距離(m)：S

船舶之浮心位置(與靜水面之距離，m)：D_b

靠泊位置之水深(m)：h

靠泊位置之碼頭出水高(m)：H_D

靠泊位置之波高(m)：H

靠泊位置之波浪週期(s)：T

海水密度(kg/m3)：ρ_w

靠泊位置之風速(m/s)：V_a

風向與船首夾角：θ

空氣密度(kg/m3)：ρ_a

重力加速度(m/s2)：g

上述甲板上微小物件，乃桅桿、階梯、欄杆等，不含艦橋及船艦本體。不同的繫纜方式，亦對纜繩受力有所影響。繫纜時，纜繩不只一條，且每條纜繩之受力亦不斷隨時間而改變。在斷纜發生時，只要有一條斷，其他纜繩會因要分擔更多的力而接二連三跟著斷，故只要取所有纜繩中最大的受力來評估安全性即可。此受力為纜繩最大受力（N）：$F_{\max}$

綜合以上，可知纜繩最大受力$F_{\max}$為至少 23 個變因之函數。即表示為

$$F_{\max} = f(L_{OA}, B, D_s, M_s, H_{BR}, H_{SR}, L_c, D_c, A_T, A_L, C, H_C, S, D_b, h, H_D, H, T, \rho_w, V_a, \theta, \rho_a, g) \quad (3\text{-}1)$$

由於變因相當多，屬多變量分析的問題，若直接拿 23 個因素來做分析，勢必需要大量的樣本或情境，且現實環境也不允許。

為使研究能夠順利進行，乃蒐集國內外相關研究之文獻，從前述 23 個變數中，挑出較為重要的，進行因次分析，得到若干無因次參數，再利用水工模型試驗的方式，得到這些參數的情境樣本，然後利用類神經網路，將這些情境樣本的關聯性建立起來。

依據 Isherwood（1972）之研究，在風力作用下，影響船舶受力之因子有以下幾項：

空氣密度(kg/m3)：ρ_a

風速(m/s)：V_a

水面上軸向投影面積(m2)： A_T

水面上側向投影面積(m2)： A_L

水面上側向投影形心至船首之距離(m)： C

船舶之長度(m)：L_{OA}

船舶之寬度(m)：B

甲板上微小物件之側向投影形心至船首距離(m)： S

風向與船首夾角：θ

經過無因次化，得船舶受力公式如下：

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho_a V_a^2 A_T \tag{3-2}$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_y \rho_a V_a^2 A_L \tag{3-3}$$

其中，F_x 與 F_y 分別為軸向受力與側向受力；C_x 與 C_y 分別為軸向與側向之風壓係數，以下為若干無因次參數之函數。

$$C_x = C_x\left(\frac{A_L}{L_{OA}^2}, \frac{A_T}{B^2}, \frac{L_{OA}}{B}, \frac{S}{L_{OA}}, \frac{C}{L_{OA}}, \theta\right) \tag{3-4}$$

$$C_y = C_y\left(\frac{A_L}{L_{OA}^2}, \frac{A_T}{B^2}, \frac{L_{OA}}{B}, \frac{S}{L_{OA}}, \frac{C}{L_{OA}}, \theta\right) \tag{3-5}$$

依據 Fujiwara et. al （1998）及藤原敏文等（2005）之研究，在風力作用下，影響船舶受力之因子有以下幾項：

空氣密度(kg/m3)：ρ_a

風速(m/s)：V_a

水面上軸向投影面積(m2)： A_T

水面上側向投影面積(m2)： A_L

甲板上側向投影面積(m2)： A_{OD}

水面上側向投影形心至船首之距離(m)： C

船舶之長度(m)：L_{OA}

船舶之寬度(m)：B

淨出水高度(m)： H_{BR}

水面上側向投影形心至水面之距離(m)： H_C

類似 Isherwood（1972）之做法，Fujiwara et. al （1998）及藤原敏文等（2005）亦得到如同式(3-2)及式(3-3)之公式，但不同在於 C_x 與 C_y 這兩個風壓係數：

$$C_x = C_x\left(\frac{B}{L_{OA}}, \frac{H_{BR}}{L_{OA}}, \frac{H_C}{L_{OA}}, \frac{C}{L_{OA}}, \frac{A_T}{L_{OA}^2}, \frac{A_L}{L_{OA}^2}, \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2}, \theta\right) \tag{3-6}$$

$$C_x = C_x\left(\frac{B}{L_{OA}}, \frac{H_{BR}}{L_{OA}}, \frac{H_C}{L_{OA}}, \frac{C}{L_{OA}}, \frac{A_T}{L_{OA}^2}, \frac{A_L}{L_{OA}^2}, \frac{A_{OD}}{L_{OA}^2}, \theta\right) \tag{3-7}$$

Ueno et. al （2012）在其研究中指出，$\frac{A_T}{L_{OA}^2}$、$\frac{A_L}{L_{OA}^2}$、$\frac{A_{OD}}{L_{OA}^2}$ 這三個無因次量，其實和船的總長度 L_{OA}、船的寬度 B，以及載貨的程度有關，並且可迴歸出一條公式。這裡的載貨程度，指的是介於滿載與空船之間的一個數字。可惜，該文獻只以圖形展示成果，並無列出公式裡係數之確實數字，且展示的圖形僅有滿載及空船的 $\frac{A_T}{L_{OA}^2}$ 與 $\frac{A_L}{L_{OA}^2}$ 部分，缺 $\frac{A_{OD}}{L_{OA}^2}$，故無法進一步與本計畫試驗量測結果做進一步分析比對。

依據船舶的幾何特性，一艘船的總長度L_{OA}、寬度B若確定，則其吃水程度其實就是和其淨出水高度H_{BR}與乾舷出水高度H_{SR}有關。故依循 Ueno et. al（2012）的研究成果，可用H_{BR}、H_{SR}取代A_T、A_L、A_{OD}及D_s。況且，在 Isherwood（1972）中，A_{OD}並未被納入考量，故此舉當為可行。

考量實用性，要製作繫纜力快速預報模式給使用單位在颱風來襲時使用，應以考量最重要之參數為原則。水面上側向投影形心至船首之距離C、水面上側向投影形心至水面之距離H_C，還有甲板上側向投影形心至船首之距離S這三個參數，或確有其影響性，但在本研究中不予納入。

另靠泊於碼頭之船舶，其受力也有受到碼頭岸壁出水高H_D之影響。當風正向吹襲船之側面，要將船吹離碼頭，碼頭岸壁之出水高度可減少一部分受風面積，進而使纜繩受力略為降低。故碼頭岸壁出水高H_D，雖在 Isherwood（1972）之做法，Fujiwara et. Al（1998）及藤原敏文等（2005）文獻中並未提及，但必需納入考量。

綜合以上文獻資料之蒐集與歸納，以及考量本研究其實用性之需求，以船寬為特徵長度，則靠泊於碼頭之船舶在風力作用下，分析船舶受力需考量之無因次參數為$\frac{B}{L_{OA}}$、$\frac{H_{BR}}{L_{OA}}$、$\frac{H_{SR}}{L_{OA}}$、$\frac{H_D}{L_{OA}}$、θ這幾項，而力的無因次參數，則為$F_{\max}\Big/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$。

在波浪作用力方面，其相關的參數有船舶之長度L_{OA}、船舶含貨物之總質量M_s、靠泊位置之水深h、靠泊位置之波高H、靠泊位置之波浪週期T、重力加速度g等。經無因次化，得無因次參數$F_{\max}\Big/\left(M_s g\right)$、$\frac{h}{L_{OA}}$、$\frac{H}{L_{OA}}$、$\frac{L_{OA}}{T}\Big/\sqrt{gh}$。其中，$\frac{L_{OA}}{T}\Big/\sqrt{gh}$這一項，由於在前面已用$L_{OA}$、$\rho_a$、$V_a$當因次分析之基底參數，基於參數相互獨立的特性，乃可用$\frac{L_{OA}^{\frac{1}{2}}}{g^{\frac{1}{2}}T}$替代之。同理，這一項$F_{\max}\Big/\left(M_s g\right)$，也可改成$\left(M_s g\right)\Big/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$。

綜合以上之說明，可建立一組無因次參數之間的函數關係

$$\frac{F_{\max}}{\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)}=\Phi\left(\frac{B}{L_{OA}},\frac{H_{BR}}{L_{OA}},\frac{H_{SR}}{L_{OA}},\frac{H_D}{L_{OA}},\theta,\frac{h}{L_{OA}},\frac{H}{L_{OA}},\frac{L_{OA}}{T}\Big/\sqrt{gh},\left(M_s g\right)\Big/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)\right) \tag{3-8}$$

其中Φ即為我們要用類神經網路找出來的函數，而$F_{\max}$則為所有纜繩在風力作用歷程下其受力之最大值。假使有 8 條纜繩，則這 8 條纜繩在風力作用歷程下，各有其受力之最大值，而這 8 個受力最大值再取最大，即為$F_{\max}$。未來在應用時，只要當時的$\frac{B}{L_{OA}}$、$\frac{H_{BR}}{L_{OA}}$、$\frac{H_{SR}}{L_{OA}}$、$\frac{H_{SR}}{L_{OA}}$、θ、$\frac{h}{L_{OA}}$、$\frac{H}{L_{OA}}$、$\frac{L_{OA}}{T}\Big/\sqrt{gh}$、$\left(M_s g\right)\Big/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$這 9 個無因次參數有包括在本研究以水工模型試驗所產生情境之範圍內，則可應用本研究所建構之數值模式，快速把Φ值算出來，然後乘上$\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2$，即可得知這些纜繩之受

力最大可到什麼程度。

3.2 水工模型試驗

本計畫為了進行水工模型試驗，特別考量可能之情境及縮尺比例，製作一實驗水槽，詳圖 3 所示。此水槽之內緣大小分別為長 2.4m，寬 1.3m，高 0.3m，其結構為鋼板所製作而成。水槽內平鋪壓克力板，以調整試驗情境之水深。試驗情境之碼頭，亦為壓克力板所製。在壓克力製的模型碼頭上，我們鎖上金屬轉向環，做為繫船柱。船身繫纜至轉向環，纜繩再接到拉力計，不論模型船如何晃動，拉力計記錄到纜繩的最大拉力值，皆是船身到繫纜樁的拉力值。圖 4 為纜繩繫纜於船身及拉力計之繫纜圖。

試驗用之纜繩，為漁船捲線機專用之高拉力低延展性 PE 編織線。試驗不考慮是否會斷纜，纜繩所受之張力，全數傳遞至轉向環後方之拉力計。由於轉向環為金屬所製，與 PE 編織線之接觸面極為光滑，但為確保試驗結果之正確性，在轉向環內緣處塗抹凡士林，以增加光滑度。基於力學上之靜力平衡，纜繩經過轉向環，纜繩兩端之拉力必定相等。如圖 5 所示，繫於船體那一端的拉力為 T，繫於拉力計那一端的拉力亦為 T。本研究採用之拉力計，為可記錄峰值之拉力計。

圖 6 為造波機，為了配合實驗水槽，製作一個符合此次實驗之造波機，其結構為馬達帶動曲柄軸，讓下方的造波板進行有頻率性的上下運動，使造波板碰觸水槽表面的水，進而產生週期性之波浪，此造波機可調節其馬達轉速，其產生的波浪有快慢的週期差異。造波機連結在推車上，可由推車之油壓缸將造波機做上下調整，可使造波機所造出的浪有大小區分。

在進行船舶模型水工試驗時，在還沒把船放下去之前，將先另行使用波高計，率定出該試次之波浪條件。待率定完成後，才開始進行船舶模型水工試驗。在各試次中，利用壓克力板、壓克力基座等材料，調整該試次之底床高程與碼頭高度。

本研究之目的乃在探討風力作用下船舶繫纜力的大小，為了能夠產生有如颱風般的陣風，乃改造原本放在溫室內的抽風扇，將風扇葉片放大。另為了能夠讓風扇所產生的風集中，在風扇前面加裝一導風流道，一來可使風集中吹出，讓風力變強，二來可讓風集中吹向放置在實驗水槽內的模型船，強力風扇之出風口寬 120cm，高 60cm，圖 7 為本次試驗所用的強力風扇。依據前面的無因次分析，模型與實體之風速比例關係為 $\frac{V_p}{V_m}=\sqrt{\frac{L_p}{L_m}}$，其中，下標 p 表示實體，下標 m 表示模型。本研究風扇可產生之風速為 4~12 m/s, 若模型為 1/200，則相當於實際現場 56~170m/s 之風速；若模型為 1/100，則相當於實際現場 40~120m/s 之風速；若模型為 1/50，則相當於實際現場 28~85m/s 之風速。圖 8 為此次試驗所使用的風力測速計，可以知道強力風扇所產生的風速是多少。

本計畫製作兩艘模型船，由前述的船舶斷纜統計分析可知，油輪與貨櫃輪在斷纜事件中經常發生，於是在此研究將製作油輪與貨櫃輪之模型船。油輪模型船是依照賓坦油輪的船舶資料按比例尺縮小製作，貨櫃輪模型船則是依照

平多魯貨櫃船的船舶資料按比例尺縮小製作。圖 9 為此次試驗所製作的貨櫃輪模型船，模型船大小分別為全長 110cm，模寬 15.3cm，船總高 19.0cm，船底至船舷最高點為 9.5cm。在不同的吃水深度 d 之條件下，乾舷出水高為（9.5-d）cm，船的淨出水高則為（19-d）cm。未加載貨物之船體質量為 4.4 公斤，吃水深度為 2.9cm。載滿貨物時含貨物之總質量為 6.53 公斤，吃水深度為 4.6cm。

圖 10 為此次試驗所製作的油輪模型船，模型船全長為 120cm，模寬 19.cm，船總高 27.0cm，船底至船舷最高點為 12.2cm。在不同的吃水深度 d 之條件下，乾舷出水高為（12.2-d）cm，船的淨出水高則為（27-d）cm。模型船之甲板可打開，如圖 11 所示。可在模型船內部放置配重鉛塊以調整不同的吃水深度。由於在下水前有在船隻前後各畫上刻度，在配重時，可從船隻前後的水位刻度之判斷重心和形心是否在相同位置，並且藉此調整配重鉛塊的位置。當船隻前後的水位刻度一致，則表示重心、形心、浮心三心在同一垂直線上，可開始進行試驗。

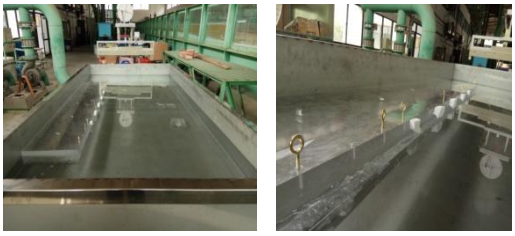


圖 3　為試驗水槽（左）與繫纜碼頭及轉向環（右）

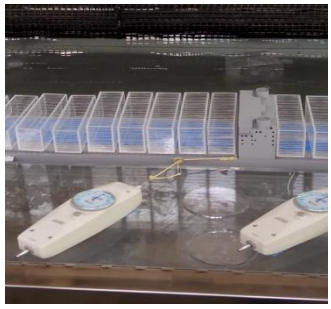


圖 4　纜繩繫纜於船身與拉力計之繫纜圖

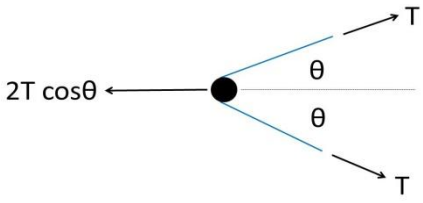


圖 5　纜繩經過轉向環之拉力平衡示意圖

圖 6　為試驗所用之造波機

圖 7　為強力風扇（左），導風流道（中），出風口（右）

圖 8　為風力計（左），拉力計（右）

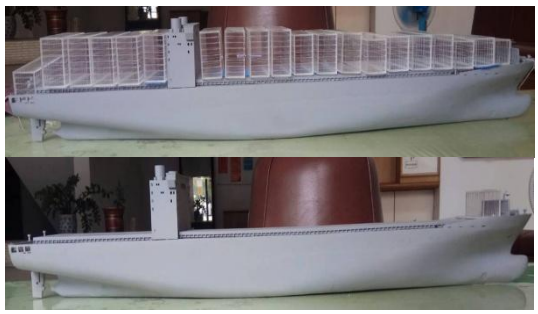


圖 9　貨櫃輪船模型圖，滿載貨櫃輪（上），空船貨櫃輪（下）

圖 10　油輪船模型圖

圖 11　油輪船甲板上蓋及配重鉛塊之照片

3.3 類神經網路

依據前面的說明，先利用水工模型的方式，先產生出式（3-8）對應關係之統計樣本。由於一般傳統的統計方法大多用於單變數函數，對於多變數函數無法處理，而本研究要分析的屬於多變數函數問題，因此需將計算出的結果透過類神經網路（Artificial neural network, ANN）訓練找出函數關係。

類神經網路於近十幾年興起，類神經網路是一種模仿生物（尤其是人類）神經網路系統結構和功能的數學計算預測模型，經過學習並獲得推論能力過程。通常透過高速電腦的計算能力，可順利進行非線性的統計方法建立輸入與輸出間複雜的關係。簡單的說，有人告訴它（ANN）什麼樣的情況會得到什麼樣的結果，當告訴它越多正確的範例它就能夠正確的回答，甚至於沒有學過的範例，它也能告訴你可能的結果。一般在類神經網路架構中，有所謂的「隱藏層」，利用隱藏層的大量節點連結輸入層與輸出層，每一條連結線代表不同的權重，電腦在隱藏層進行複雜的演算，經過機器學習過程，得到目標輸出值。

本計畫採用最廣被應用的倒傳遞類神經網路（Back-Propagation Network, BPN）來建立預測（或推估）模式以推算船舶在港內之受力情形。BPN 採用多層感知器（Multi-Layer Perception, MLP）架構，並以誤差倒傳遞演算法（Error Back Propagation）進行學習，屬於多層前饋式網路，以監督式學習（Supervised Learning）來處理輸入輸出間的映射關係。BPN 架構主要可分為三層（如圖 12），第一層是輸入層，做為外界輸入訊息的傳遞介面，並不對資料做特別處理，第二、三層之隱藏層與輸出層之神經元利用權重值乘積和偏權值調整並加上活化函數（Activation Function）處理進行模擬，其輸出、輸入層映射方程式如下：

$$y_r = f_2\left(\sum_{q=0}^{n_2} w_{qr}^2 \cdot f_1\left(\sum_{p=0}^{n_1} w_{pq}^1 \cdot x_p\right)\right) \quad r \in [1, n_3] \tag{3-9}$$

其中，p 是輸入層節點引數；q 是隱藏層節點引數；r 是輸出層節點引數；x_p 是輸入層輸入節點；w_{pq}^1 為輸入層神經元與隱藏層神經元之連結權重；w_{qr}^2 為隱藏層神經元與輸出層神經元之連結權重；y_r 為輸出層輸出值；$f_1(\cdot)$ 是隱藏層活化函數；$f_2(\cdot)$ 是輸出層活化函數。n_1 是輸入層神經元的個數，n_2 是隱藏層神經元的個數，n_3 是輸出層神經元的個數。

圖 10 中，輸入項參數為船舶總長度、寬度、…等參數，而輸出項則為纜繩最大受力。(3-9)式中 n_1, n_2, n_3 即圖中的 n_in, n_h, n_out。

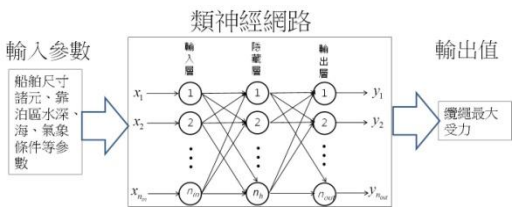


圖 12　類神經網路模型示意圖

監督式學習法為利用目標輸出值與相對應之輸入值共同訓練類神經網路，其方法為計算網路輸出值與目標輸出值之間的誤差，不斷修正使其誤差最小，誤差方程式如下：

$$E = \frac{1}{2}\sum_k (d_k - y_k)^2 \tag{3-10}$$

其中，d_k 為輸出層中第 k 個神經元之目標值；y_k 為輸出層中第 k 個神經元之網路輸出值。

倒傳遞類神經網路是使用最陡坡降法以疊代方式將誤差值最小化，在學習階段，利用已知的輸入值與輸出值進行資料訓練，求得一組隱藏層連接的權重，使輸入資料經過此權重運算後得出目標輸出結果；在回想階段使用一筆新的輸入值，經過學習階段求出之權重，得到新的輸出值，即預測值。在建立 MLP 模式時，本研究採用三層類神經網路結構（即輸入層、隱藏層和輸出層各為一層），隱藏層的活化函數（Activity function）採用最常用的 S 型函數（sigmoid function）；MLP 主要有三個參數需設定，一為隱藏層神經元數量（The number of neurons in hidden layer），二是學習速率（Learning rate），三為是動量修正係數（Momentum）。其中，隱藏層神經元數量可採用 Trenn（2008）所建議的方式，即（輸入層神經元個數+輸出層神經元個數-1）/2 作為參數設定；學習速率和動量修正係數則可採用試誤法進行評估。

在模式訓練過程中，將收集的資料分割為訓練集（Training set）和驗證集（Validation set）。將採前面實驗所分析的資料進行切割，一部分數據作為訓練集、另一部分為驗證集。本研究在模式訓練過程中，可再針對各項參數項研擬不同的資料集組合方案，以便在多種預測結果下評選出最佳的預測值或推估值。

四、模型試驗與分析

4.1 模型相似度與正確性之探討

1. Isherwood（1972）公式

利用 Isherwood（1972）公式計算船舶受風力作用下之受力時，風壓係數之計算公式如下：

$$C_x = A_0 + A_1\frac{2A_L}{L_{OA}^2} + A_2\frac{2A_T}{B^2} + A_3\frac{L_{OA}}{B} + A_4\frac{S}{L_{OA}} + A_4\frac{C}{L_{OA}} + A_6 M \quad (4\text{-}1)$$

$$C_y = B_0 + B_1\frac{2A_L}{L_{OA}^2} + B_2\frac{2A_T}{B^2} + B_3\frac{L_{OA}}{B} + B_4\frac{S}{L_{OA}} + B_5\frac{C}{L_{OA}} + B_6\frac{A_{SS}}{L_{OA}} \quad (4\text{-}2)$$

其中，A_0、A_1、…、A_6、B_0、B_1、…、B_6 為迴歸得到的係數，L_{OA} 為船舶之長度、B 為船舶之寬度、A_T 水面上軸向投影面積、A_L 為船側受風投影面積、C 為水面上側向投影形心至船首之距離、S 為甲板上微小物件桅桿、階梯、欄杆等之側向投影形心至船首距離，A_{SS} 為微小構件如桅桿、階梯、欄杆等之側向投影面積，一般予以不計，而 M 為軸向投影面看得到的面積團塊個數，如桅桿、階梯、欄杆等，不包括艦橋等主體。

當風向垂直於船軸中心線時，風壓係數為：

$$C_x = 0.355 - 0.247\frac{S}{L_{OA}} + 0.018M \quad (4\text{-}3)$$

$$C_y = 0.889 + 0.138\frac{2A_T}{B^2} - 0.66\frac{C}{L_{OA}} \quad (4\text{-}4)$$

2. 藤原敏文等（2005）公式

藤原敏文等（2005）比 Isherwood（1972）複雜許多，考慮的因素亦較多，但當風向垂直於船軸中心線時，計算側向受力之風壓係數所要用到的許多項值都變成 0，反而變得較為簡潔

$$C_x = 0 \quad (4\text{-}5)$$

$$C_y = 0.404 + 0.386\frac{A_T}{BH_{BR}} + 0.902\frac{H_{BR}}{L_{OA}} \quad (4\text{-}6)$$

其中，H_{BR} 為船舶之淨出水高度、L_{OA} 為船舶之長度、B 為船舶之寬度、A_T 水面上軸向投影面積。

3. 港灣構造物設計基準（2011）公式

我國交通部運輸研究所出版的文件「港灣構造物設計基準」亦有類似的公式，可以計算船舶受風力作用下之軸向受力與側向受力。其風壓係數如下：

$$\text{貨輪}C = 1.325 - 0.05\cos 2\theta - 0.35\cos 4\theta - 0.175\cos 6\theta \quad (4\text{-}7)$$

$$\text{客輪}C = 1.142 - 0.142\cos 2\theta - 0.367\cos 4\theta - 0.133\cos 6\theta \quad (4\text{-}8)$$

$$\text{油輪}C = 1.20 - 0.083\cos 2\theta - 0.25\cos 4\theta - 0.177\cos 6\theta \quad (4\text{-}9)$$

其中，θ 為風向與船軸中心線夾角

我國設計基準之公式，較為簡單，在判定船舶類型之後，直接算出船舶受力之合力大小

$$F = \frac{\rho_a}{2} C_x V_a^2 (A_T \cos^2\theta + A_L \sin^2\theta) \quad (4\text{-}10)$$

及合力方向

$$\varphi = \left[1 - 0.15\left(1 - \frac{\theta}{90}\right) - 0.80\left(1 - \frac{\theta}{90}\right)^3\right] \cdot 90 \quad (4\text{-}11)$$

當風向垂直於船軸中心線時，貨輪、客輪、油輪之風壓係數分別為 1.2、1.033 及 1.21。而合力方向之φ均為 90 度，即垂直於船軸中心線。

4. 試驗結果與公式計算值之比較

本研究採用只有兩條纜繩的綁法，以風向垂直於船軸中心線的方式，讓風吹襲模型船的側面，量測拉力，做進一步分析。採用兩種綁法，分別是有經過轉向環的和沒有經過轉向環的。圖 13 為兩種繫纜綁法之照片。以油輪模型船進行試驗。

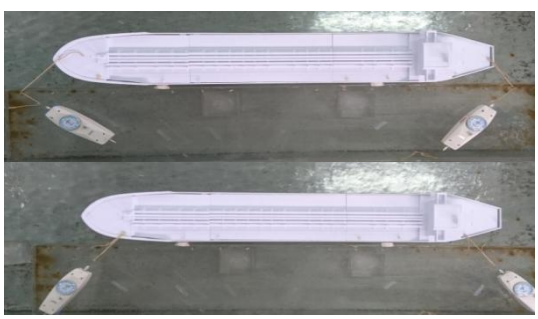


圖 13 驗證模型試驗正確性兩種不同繫纜綁法之照片

本研究採用三種不同的吃水深度，分別為 3cm、4.1cm、5.3cm。試驗之水深為 7cm，碼頭出水高度為 1cm。由於有一部分船的側投影面積被碼頭出水高度遮蔽，故用於計算所採用之受風投影面積要扣除被遮蔽的部分。試驗條件如下表 2：

表 2 驗證模型試驗正確性之試驗條件列表

吃水深（m）	D_S	0.030	0.041	0.053
船總長（m）	L_{OA}	1.200	1.200	1.200
船寬（m）	B	0.190	0.190	0.190
淨出水高（m）	H_{BR}	0.240	0.229	0.217
水面上正投影面積（m^2）	A_T	0.03223	0.03019	0.02796
水面上側投影面積（m^2）		0.10715	0.09504	0.08184
船側受風投影面積（m^2）	A_L	0.09615	0.08404	0.07084
船側受風投影面積形心到船首之距離（m）	C	0.660	0.660	0.660
Isherwood（1972）之風壓係數	C_x	0.355	0.355	0.355
藤原敏文等（2005）之風壓	C_y	0.772	0.757	0.740
我國設計基準（2011）之風壓	C_z	0.000	0.000	0.000
風速（m/s）	4.3~7.3，共 4 種			
繫纜綁法	有穿過轉向環和直接接拉力計，共 2 種			

比較結果顯示，在風壓合力大小方面，量測結果與藤原敏文等（2005）及 Isherwood（1972）之公式都相當接近，但港灣構造物設計基準（2011)公式之計算結果則明顯偏大，不過都在同一個階次（Order)內。由於設計考量的是結構

物是否會在使用年限內受到極限條件作用下是否會發生損壞，故設計基準公式之計算結果偏保守亦屬合理。在風壓合力之作用方向方面，量測結果之作用力方向平均往船尾偏 23 度，Isherwood（1972）公式則計算出作用力方向往船尾偏 10 度左右，而藤原敏文等（2005）之公式與港灣構造物設計基準（2011）之公式均算得作用力方向會和船軸中心線垂直。綜合風壓合力之大小及方向，本研究量測得到之結果與 Isherwood（1972）公式算是極為接近，而 Isherwood（1972）公式在國際期刊論文上已被引用三百餘次，在「船舶運動數值模式建立之研究（一）」（2006 年）及「船舶運動數值模式建立之研究（四）」（2009 年）報告書中，亦引用此公式做為風力計算結果之檢核依據，故本計畫模型試驗在風力方面的量測結果，可信度算是相當高。

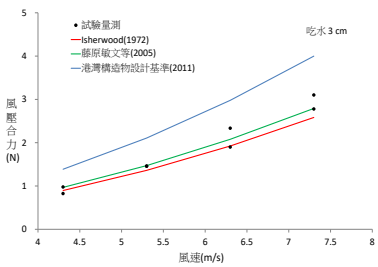


圖 14　試驗結果風壓合力與文獻公式計算結果比較（吃水 3 cm）

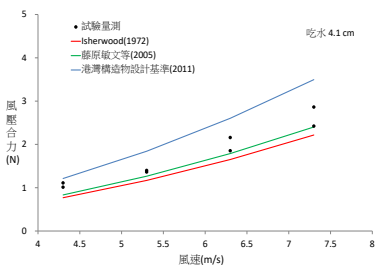


圖 15　試驗結果風壓合力與文獻公式計算結果比較（吃水 4.1 cm）

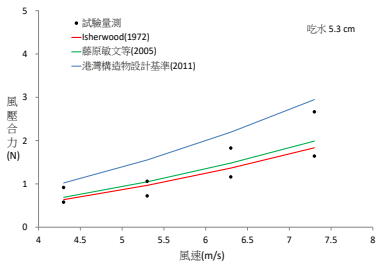


圖 16　試驗結果風壓合力與文獻公式計算結果比較（吃水 5.3 cm）

4.2 貨櫃輪在風力作用下之繫纜力

本研究在貨櫃輪的部分，考量以 8 條纜繩繫纜的方式，詳圖 17 所示。考量 3 種不同的載重，5 種風向，4 種不同的風速。合計 60 種情境。考量的方向，分別為與船軸中心線夾角 0 度、45 度、90 度、135 度，及 180 度。每種風向以 4 種不同的風速吹，風速的範圍為 7.21~10.68 m/s。以模型船縮尺 1/150，實體船長度 165m 來算，相當於現場風速 88~131 m/s，雖然驚人，實際風速不可能這麼大，但依據 Isherwood（1972）之理論，只要確保模型尺寸比例正確，即式（3-4）及式（3-5）裡的 $\frac{A_L}{L_{OA}^2}$、$\frac{A_T}{B^2}$、$\frac{L_{OA}}{B}$、$\frac{S}{L_{OA}}$、$\frac{C}{L_{OA}}$、θ 這幾個無因次參數一樣，則模型船和實體船的 C_x 就會一樣，船舶所受之 $F_x \Big/ \left(\frac{1}{2} C_x \rho_a V_a^2 A_T\right)$ 也會一樣。同樣的，模型船和實體船的 C_y 會一樣，船舶所受之 $F_y \Big/ \left(\frac{1}{2} C_y \rho_a V_a^2 A_L\right)$ 也會一樣，不需另外再考量模型船的 V_a 是否大到超過合理值。這一點在完成類神經網路數值模式的建置之後會再做進一步的測試。

量測結果詳表 4.3 所示。

由於我們只有製作一艘貨櫃輪的模型，船的長寬比、寬深比都是固定，加再上貨櫃堆疊上去之後，受風面積增加，但吃水增加，淨出水高減少，受力大小反而和淨出水高成負相關，故我們在貨櫃輪的分析上，改用

$$F_{\max}/(M_s g)=\Phi\left(\frac{H_{BR}}{L_{OA}},\frac{V_a}{\sqrt{gL_{OA}}},\theta\right) \qquad (4\text{-}13)$$

來迴歸風速情境與纜繩受力之函數關係。未來若計畫持續進行，能夠再多製作 2 至 3 艘貨櫃輪模型，則應可獲得更多的樣本來建構風速情境與纜繩受力之函數關係。表 4.4 為貨櫃輪風力試驗所得到之無因次參數。

我們取表 4.4 中的第 1、第 6、第 11、第 16 這 4 個情境來看。同一艘船，吃水深度一樣，吹風角度也一樣，只差在吹風之風速不同，而結果量得的纜繩最大拉力也不同。這 4 個情境之風速分別為 10.08 m/s、9.52 m/s、8.22 m/s、7.32 m/s，而 8 條纜繩中，最大的受力分別為 0.192 kgf、0.170 kgf、0.130 kgf、0.093 kgf，我們算出這四個情境的 $F_{\max}/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 B^2\right)$，分別為 1.23、1.22、1.25、1.12， 4 個值非常接近。因此，即使把模型試驗所採用之風速還原回現場的實境風速太大太驚人，對繫纜力預報數值模式之建構，並但不影響準確性，而反因風速大，力也大，在拉力計上面的讀數較易於判讀，會讓模式建構出來的輸出結果更加準確。

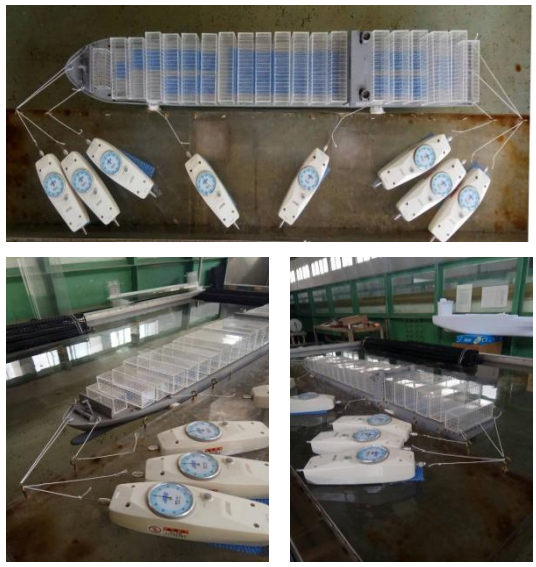


圖 17　貨櫃輪風力試驗之繫纜配置

4.2 油輪在風力作用下之繫纜力

本研究在油輪的部分，考量兩種繫纜的方式。第一種，為首纜、尾纜、前倒纜、後倒纜各 2 條，合計 8 條，和貨櫃輪試驗的纜繩數相同，但配置略有不同。第二種，則為首纜 2 條，尾纜 2 條，加前倒纜 1 條，合計 5 條。纜繩繫纜的方式，詳圖 18 及圖 19 所示。

圖 18　油輪風力試驗之繫纜配置(8 條)

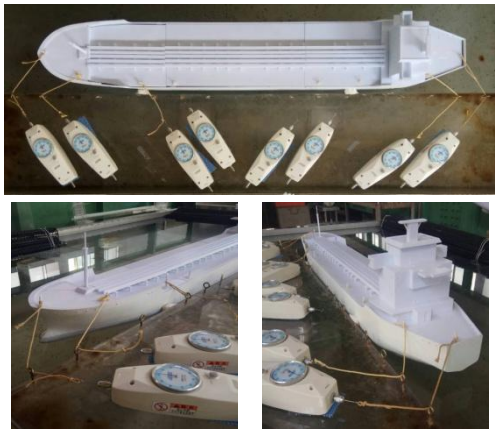


圖 19　油輪風力試驗之繫纜配置(5 條)

考量 3 種不同的吃水深度，5 種風向，4 種不同的風速，繫纜 8 條的有 60 個情境，繫纜 5 條的也有 60 個情境。另外，由於貨櫃輪於甲板上無貨物時，基本上其受風力作用之型態和油輪的類似，另外也針對貨櫃輪在和油輪一樣的風速風向情境下，量取拉力資料，並納入分析。為確保有足夠的樣本群集大小，我們在繫纜 8 條與繫纜 5 條的條件再另外多做 12 個情境之量測，故各有 92 個情境。碼頭出水高為 1 cm。

考量的方向，分別為與船軸中心線夾角 0 度、45 度、90 度、135 度，及 180 度。每種風向以 4 種不同的風速吹，風速的範圍為 3.8~8.43 m/s。以模型船縮尺 1/100，實體船長度 120m 來算，相當於現場風速 38~84.3 m/s，大約是蒲福風級之 12 級風至 17 級以上的風速。如同前面之論述，依據 Isherwood（1972）之理論，只要確保模型尺寸比例正確，即式(3-4)及式(3-5)裡的 $\frac{A_L}{L_{OA}^2}$ 、$\frac{A_T}{B^2}$ 、$\frac{L_{OA}}{B}$ 、$\frac{S}{L_{OA}}$ 、$\frac{C}{L_{OA}}$ 、θ 這幾個無因次參數一樣，則模型船和實體船的 C_x 就會一樣，船舶所受之 $F_x\Big/\left(\frac{1}{2}C_x\rho_a V_a^2 A_T\right)$ 也會一樣。同樣的，模型船和實體船的 C_y 會一樣，船舶所受之 $F_y\Big/\left(\frac{1}{2}C_y\rho_a V_a^2 A_L\right)$ 也會一樣，不需另外再考量模型船的 V_a 是否大到超過合理值。這一點在完成類神經網路數值模式的建置之後會再做進一步的測試。

由於樣本的船型仍然太少，只有兩艘，且用 L_{OA} 當基底參數，其前式(4-12)的前 4 個無因次參數的值都很接近 0，這樣在進行類神網路訓練時，要花比較久的時間才會收斂。用 L_{OA} 當基底參數和用 B 當基底參數，所得結果差異不大，但若用 B 當基底參數，可使無因次參數值的範圍變得大一點，後續類神經網路在訓練時能更快收斂。因此，在這裡改成用 B 當基底參數，故式(4-12)可改寫成

$$F_{\max}\Big/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 B^2\right)=\Phi\left(\frac{L_{OA}}{B},\frac{H_{BR}}{B},\frac{H_{SR}}{B},\frac{H_D}{B},\theta\right) \quad (4\text{-}14)$$

各無因次參數值詳列如表 4.7 及表 4.8 所示。

原本一艘船有只有一個 $\frac{L_{OA}}{B}$ ，碼頭出水高 1 cm，對應的也只有一個 $\frac{H_D}{B}$ ，而 $\frac{H_{SR}}{B}$ 和 $\frac{H_{BR}}{B}$ 則互為相依參數。經過我們把兩艘船的無因次參數放在同一個表之後，這幾個無因次參數的值則變得較為多元。雖然只有兩艘船的參數，尚嫌不足，但仍可從中找到各參數對纜繩最大拉力值影響之規律。

五、繫纜力預報模式之建置與測試

經過水工模型試驗得到建構類神經網路數值模式所需之資料群集後，則可用來建置繫纜力預報模式。

5.1 貨櫃輪類神經網路之訓練結果

我們得到貨櫃輪船總長：船寬＝7.19 、(淨出水高-乾舷出水高)：船總長＝0.0864，繫纜 8 條之資料群集共 60 筆。為了進行繫纜力預報模式之建置，我們首先將這 60 個情境資料進行正規化，讓其值的範圍變成 0～1。比如 H_{BR}/L_{OA}的值為 0.1309～0.1464，我們讓 $x_1=(H_{BR}/L_{OA}-0.1309)/(0.1464-0.1309)$，同樣我們也可得 $x_2=(V_a/\sqrt{gL_{OA}}-2.193)/(3.253-2.193)$及 $x_3=\theta/180$之正規化結果。這三個正規化的參數，即為要餵給類神經網路輸入神經元的 data，可同樣地用 $y=\left(\frac{F_{\max}}{M_s g}-0.0008\right)/(0.0294-0.0008)$來得到要餵給類神經網路輸出神經元的 data。

圖 20 為類神經網路最後之訓練結果。訓練組之均方差為 0.0398。驗證組之均方差為 0.0464。其中，均方差之計算方式如下：

$$E_r=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(y_{o,i}-y_{result,i}\right)^2\Big/N} \qquad (5\text{-}1)$$

式中，下標 i 表是樣本在該群集之編號。N 是指樣本個數，比如訓練組，其樣本個數就是 40，而驗證組之樣本個數就是 20。下標 o 表示是量測得到的資料，而下標 result 則是計算的結果。

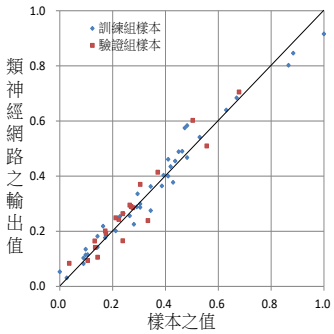


圖 20　貨櫃輪繫纜力預報模式之類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

我們將類神經網路之最後訓練結果還原為纜繩之最大受力，詳圖 21 所示。並計算整體相對誤差。經計算，相對整體相對誤差約為 10.9%。

$$E_{rr}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(y_{o,i}-y_{result,i}\right)^2\Big/\sum_{i=1}^{N}y_{o,i}^2} \qquad (5\text{-}2)$$

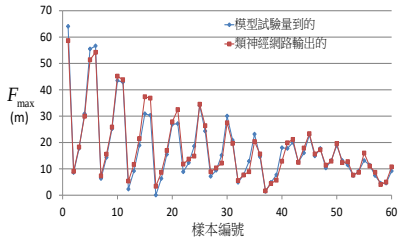


圖 21　貨櫃輪繫纜力預報模式之類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

5.2 貨櫃輪繫纜力預報模式

預報模式係由 Visual Basic 語言撰寫而成。圖 22 為情境編號 41、46、51、56 之模式計算結果。模式計算的結果分別為 0.0617 kgf、0.0492 kgf、0.396 kgf、0.356 kgf，而量測得到的力為 0.055 kgf、0.047 kgf、0.042 kgf、0.037 kgf。雖沒有完全一樣，但值接近，趨勢也接近。

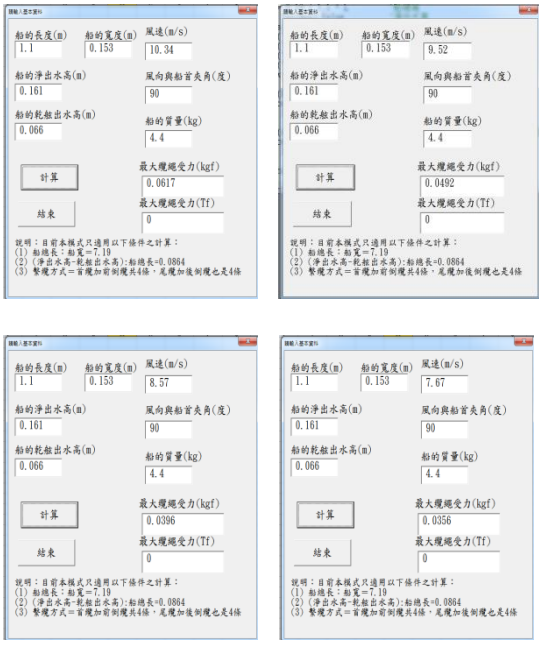


圖 22　貨櫃輪繫纜力預報模式之測試一：試驗情境之檢驗

5.3 油輪類神經網路之訓練結果

用亂數將兩種不同繫纜方式的 92 個樣本各分成兩群，第一群有 70 個樣本，第二群有 22 個樣本。然後第一群的樣本來進行類神經網路的訓練。我們測試採用 2～6 個隱藏層神經元之架構，最後決定採用 5 個隱藏層神經元。

圖 23 為繫纜 8 條之類神經網路最後之訓練結果，訓練組之均方差為 0.1134，驗證組之均方差為 0.1124。圖 24 為繫纜 5 條之類神經網路最後之訓練結果，訓練組之均方差為 0.1300，驗證組之均方差為 0.1090。

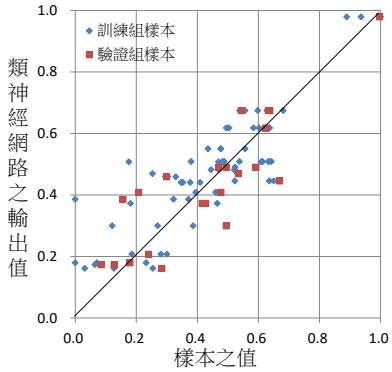


圖 23　油輪繫纜 8 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

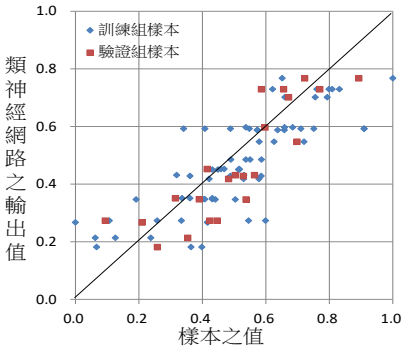


圖 24　油輪繫纜 5 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

我們將類神經網路之最後訓練結果還原為纜繩之最大受力，詳圖 25 及圖 26 所示。經計算，繫纜 8 條之整體相對誤差約為 18.8%，而繫纜 5 條之相對整體相對誤差約為 21.7%。

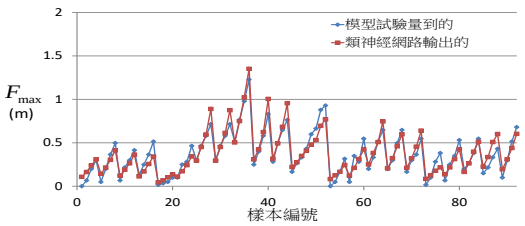


圖 25　油輪繫纜 8 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

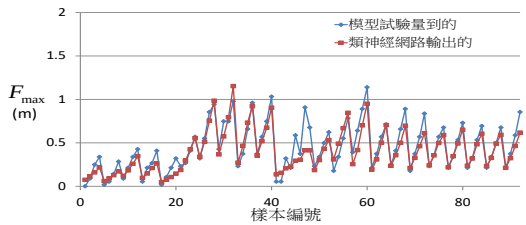


圖 26　油輪繫纜 5 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

5.3 油輪繫纜力預報模式

圖 27 為測試結果。這幾個情境之量測最大纜繩拉為分別為 0.050 kgf、0.0983 kgf、0.0650 kgf、0.0550 kgf，而模式的輸出值則分別為 0.041 kgf、0.103 kgf、0.06 kgf、0.051 kgf。雖沒有完全一樣，但值接近，趨勢也接近。

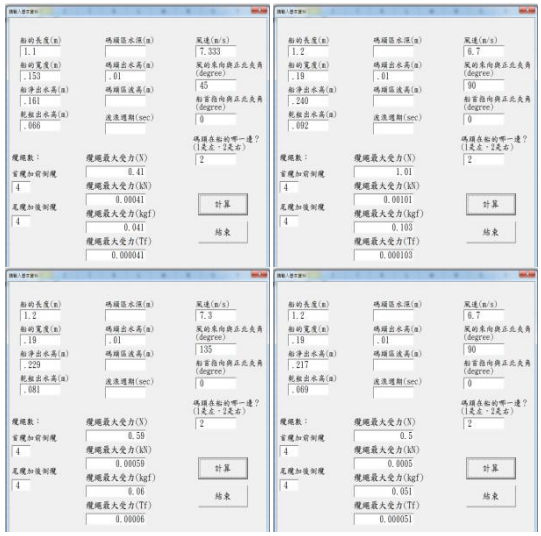


圖 27　油輪繫纜力預報模式之測試一：試驗情境之檢驗（繫纜 8 條）

圖 28 為測試結果。這幾個情境之量測最大纜繩拉為分別為 0.0383 kgf、0.0917 kgf、0.0833 kgf、0.0863 kgf，而模式的輸出值則分別為 0.025 kgf、0.108 kgf、0.066 kgf、0.061 kgf。雖沒有完全一樣，但值接近，趨勢也接近。

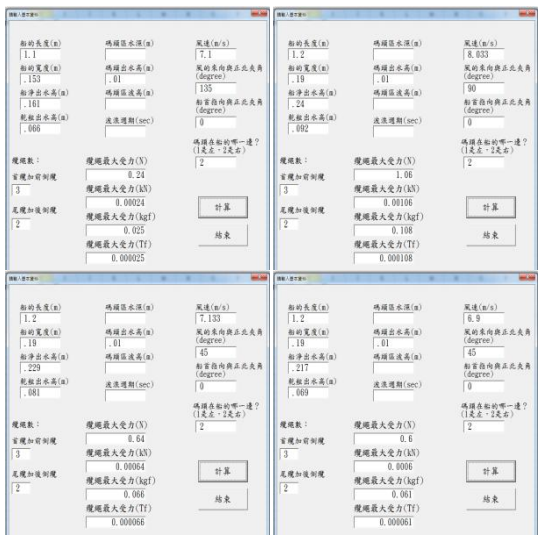


圖 28　油輪繫纜力預報模式之測試二：試驗情境之檢驗（繫纜 5 條）

同一艘船，相同的吃水深度，相同的風速與風向，繫 8 條纜繩和 繫 5 條纜繩所算出來的纜繩的最大受力就不一樣。繫纜數量少的，纜 繩的最大受力略大一些，詳圖 29 所示。

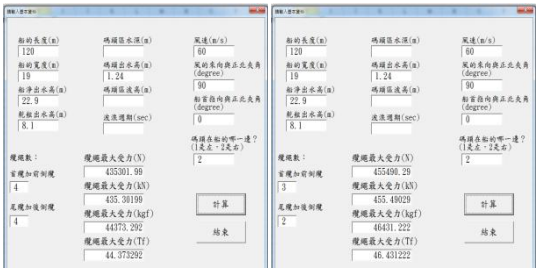


圖 29 油輪繫纜力預報模式之測試八：纜繩數量之影響

透過油輪繫纜力預報模式進行三種不同吃水深情境下計算纜繩最大受力，分別是 case1（船淨出水高 0.24 m、船舷出水高 0.092 m）、 case2 （船淨出水高 0.229 m、船舷出水高 0.081 m）與 case3（船淨出水高 0.217 m、船舷出水高 0.069 m），風速為固定 5 m/s，風向為 0～180°，每 15° 計算一次纜繩最大受力。圖 30 為三種不同吃水深之纜繩最大受力圖，由圖可以看到在當風向越往 90°時，其纜繩受力會越來越大，超過 90°後，其纜繩受力就開始往下，所以當風向在 75°～105°區間，纜繩將會有最大的受力值。由圖也可以看到 case1 的纜繩受力比較大，可得知當船淨出水高越大，其纜繩受力也會跟著越大。在 case1 與 case2 中，各有一個斷點，分別是 case1 在風向 75°與 case2 在風向 15°這兩個位置，在預報模式中都無法計算出其纜繩最大受力，會造成這樣的結果乃因試驗的船型有限、試驗之樣本數過少與量測之不確定等因素所導致。

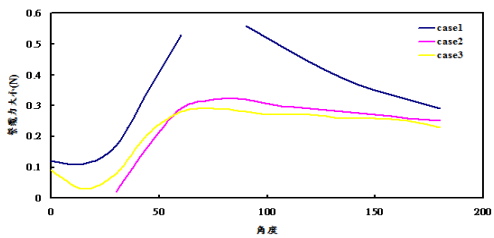


圖 30 油輪繫纜力預報模式：三種不同吃水深之纜繩最大受力

六、結論

在風力作用下，繫泊於碼頭邊之船舶眾多纜繩中，那一條受力最大，受力多大，為高度複雜的非線性問題。本計畫利用水工模型試驗的方式，量測模型船在眾多風、波作用情境之下，繫纜船舶之纜繩最大受力。然後利用因次分析的方法，將這些情境的風、波條件，以及船型尺寸諸元，予以無因次化，再將這些無因次參數，丟到類神經網路進行訓練，試圖找出風、波條件、船型尺寸諸元，與纜繩最大受力之間的關聯函數關係。本計畫製作兩艘模型船，考量兩種不同繫纜方式、5 種風向、多種吃水載重條件與風速條件，總計完成 244 個

情境之試驗。最後將類神經網路訓練的結果，分別建置貨櫃輪與油輪之船舶繫纜力預報模式。

6.1 結論

1. 在試驗正確性方面，我們將船舶用 2 條纜繩繫泊於岸邊，以垂直船身的風向吹襲，量得纜繩各自的拉力和角度，直接求出風作用之合力大小與方向，並文獻之經驗公式比較。由試驗量測數據算出來的風力大小，和 Isherwood（1972）之公式甚為接近。
2. 在我們的試驗中，波浪對船舶繫纜力的影響遠小於風的影響，即使打出來的水波波高已經是水深的 1/6，屬於高度非線性之波浪，肉眼看得到模型船隨著水波經過而有前後左右擺盪搖晃，但拉力計就是量不到讀數。
3. 由因次分析之理論、Isherwood（1972）、Fujiwara et. al（1998）、藤原敏文等（2005）之研究，均顯示風力的大小與風速平方成正比，本計畫試驗分析結果亦有此特性，與這些相關研究一致。
4. 在貨櫃輪的試驗及類神經網路訓練結果中，由於只有一艘貨櫃輪的模型，情境樣本數量有限，故雖亦能建構出一個模式，但未來還是應再多做一些相關試驗，取得更多情境樣本，才可能讓模式計算出來的纜繩受力更具可信度。
5. 由於貨櫃輪不載貨物時，船的外形和油輪的類似，故我們將貨櫃輪不載貨物的情境和油輪在不同載重吃水下的情境一起分析，以使模式的參數更為多元，參數範圍亦更為廣泛。所完成的模式，可計算兩種繫纜方式之纜繩受力計算，分別為首纜加前倒纜 4 條且尾纜加後倒纜 4 條，以及首纜加前倒纜 3 條且尾纜加後倒纜 2 條。只要輸入的船舶長寬比、寬高比是在本計畫試驗船型的長寬比與寬高比範圍內，模式都可輸出合理的計算值。

七、參考文獻

1. Herman Bomze, and Frederic R., 1974, Analytical determination of Ship Motion and Mooring Force, Proc Offshore Technology Coference, paper No 2072.
2. 洪憲忠、歐陽餘慶、邱逢深、黃清和、李勇榮、徐進華、曾相茂、邱永芳、廖慶堂、張富東、謝瑞豐、蔡金吉、蔡瑞成、何炳紹、李永勝、陳進冰、楊怡芸(1989)，潮流、波浪對船舶運動、繫纜受力之耦合效應研究
3. 劉順能、邱逢深、梁乃匡 (1988)，風浪作用下之繫泊船舶運動及繫纜拉力之統計分析。第 10 屆海洋工程研討會，pp. 435-462

4. Natarajan, R., and Ganapathy, C., 1995, “Analysis of Moorings of a Berthed Ship, Marine Structures, Vol. 8, pp. 481-499.
5. 邱逢琛、蔣德普、洪憲忠(1997)，蘇澳港防波堤改善工程規劃，第八子計畫，進出港操船及繫纜船舶運動計算系統之研究，省交通處基隆港務局蘇澳港分局
6. 向溢、譚家華(2001)，碼頭繫泊纜繩張力的蒙特卡洛算法，上海交通大學，Vol. 35，pp.548-551
7. 李焱、鄭寶友、高峰、孟祥瑋(2007)，浪流作用下繫泊船舶撞擊力和繫纜力試驗研究，海洋工程，Vol. 25，pp. 57-63
8. 蔣慶、葛宏徵、謝鵬(2007)，船舶類型及噸位因素對船舶繫纜力的影響。水運工程，第 9 期總第 407 期，pp.51-59
9. 彭詠耕、邱逢琛(2008)，環境外力作用下繫纜船舶之非線性反應分析。
10. 方銘川、陳韻茹(2008)，繫泊船船在浪流作用下之動態模擬。中國造船暨輪機工程學刊，27(4)
11. 孟祥瑋、高學平、張文忠、姜雲鵬(2011)，波浪作用下船舶繫纜力的計算方法。天津大學學報，第 44 卷第 7 期，pp. 593-596
12. Akers R, 2015. Why Good Mooring Systems Go Bad Fatigue Factors in Mooring Systems for Floating Offshore Wind Turbines, Maine Marine Composites
13. Trenn, S., 2008. Multilayer perceptrons: approximation order and necessary number of hidden units. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 19(5), pp. 836-844.
14. 港灣構造物設計基準，民國 100 年，交通部運輸研究所。
15. 船舶運動數值模式建立之研究(一)，民國 95 年，交通部運輸研究所。
16. 船舶運動數值模式建立之研究(四)，民國 98 年，交通部運輸研究所。
17. 藤原敏文、上野道雄、池田良穂，2005 年。成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法。日本船舶海洋工学会論文集，第二期，第 243-255 頁。
18. Fujiwara T. Ueno M. Nimura. Estimation Method of Wind Forces and Moments Acting on Ships. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.183, 1998 (in Japanese)
19. Fujiwara T. Ueno M. Nimura. An Estimation Method of Wind Forces and Moments Acting on Ships. Mini symposium on prediction of ship manoeuvring performance 18 October, 2001.
20. Ueno M. Kitamura F. Sogihara N. Fujiwara T. A Simple Method of Estimate Wind Loads on Ships. The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM’ 12), August 26-30, 2012.
21. Isherwood R.M. Wind Resistance of Merchant Ships. The Royal Institute of Naval Architects, 1972, pp327-338.

波浪通過臺灣中部海域離岸風電場址之初步探討

傅怡釧　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
蘇青和　交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員兼科長
謝佳紘　國立成功大學水工試驗所工程師

摘要

目前國內規劃之離岸風電潛力場址均集中於臺灣中部海域(臺中及彰化外海),為了解風機群設置後對局部區域海域影響，本研究先對於近年現況風、波觀測資料作局部區域海域特性探討，接著使用丹麥水利研究所開發之MIKE 21 Spectral Waves 第三代波譜模型暨中央氣象局提供 WRF 預報風場(Weather Research and Forecasting)，建置適用於臺灣中部海域波浪數值推算模式，最後藉由設定具有冬季及夏季特性之波浪條件環境下，模擬臺灣中部海域設置風機群前、後之改變情形並作初步探討。

一、前言

臺灣中部海域(臺中及彰化外海)位於臺灣海峽中段位置，而臺灣海峽處於臺灣與大陸之間致使傳遞至臺灣中部海域的風、浪及流均受限於兩岸陸地限制或受中央山脈地形影響，使得波浪狀況較其他直接面對大洋之海域更為複雜。此外，自 107 年度經濟部通過審核之離岸風場多位於臺灣中部海域，本區域海氣象資訊掌握更顯重要。

本研究著重於應用 MIKE21 Spectral Waves 風浪模式並採用中央氣象局所提供 WRF 預報風場，建置適用於臺灣中部海域波浪數值推算模組，對於離岸風機群設置後對區域海域影響作初步探討。

二、數值模式理論分析

本研究採用丹麥水力研究所 (Danish Hydraulic Institute,DHI)發展之

MIKE21 SW(MIKE 21 Spectral Wave)第三代波譜模型，其控制方程式為波浪守恆方程式(wave action conservation equation)，包含風生浪過程、波浪非線性交互作用、波浪折」繞射、反射和淺化及底摩擦效應等現象。控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\nabla\cdot(\vec{v}N)=\frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中，$N(\vec{x},\sigma,\theta,t)$ 為波浪作用密度函數(action density)，$E(\sigma,\theta)$ 為波能頻譜密度函數(wave energy density function)，關係為 $N=E/\sigma$；$\vec{x}=(x,y)$ 為卡氏坐標；t 為時間；σ 為角頻率；而 θ 則為波向角。

$\vec{v}=(c_x,c_y,c_\sigma,c_\theta)$ 為一個 4 維空間的向量，$(c_x,c_y)=d\vec{x}/dt=\vec{c}_g+\vec{U}$，代表群波在空間上的傳遞速度，其中 $\vec{c}_g$ 為群波速度，而 $\vec{U}$ 則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。$c_\sigma=d\sigma/dt$，代表角頻率 σ 之變化速度。$c_\theta=d\theta/dt$，代表波向角 θ 之變化速度。

$\nabla=(\partial/\partial x,\partial/\partial y,\partial/\partial\sigma,\partial/\partial\theta)$ 為一個 4 維空間的向量運算子，S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象，表示如下：

$$S=S_{in}+S_{nl}+S_{ds}+S_{bot}+S_{surf} \quad (2)$$

(2)式中 S_{in} 為風浪之成長項，S_{nl} 為波與波非線性交互作用項，S_{ds} 為白沫消散項，S_{bot} 為底床摩擦項，而 S_{surf} 則為碎波消耗項。

三、中部海域風、波特性探討

本研究臺灣中部海域測站選用臺中港北防波堤波流觀測站(TC)、澎湖浮標(PH)、彰濱浮標(CH3)等 3 站之海象觀測資料作風、波特性探討，位置詳圖 1 所示。以 2016 年 1 月、7 月海象觀測資料，分析臺灣中部海域測站之冬季、夏季波高及周期、風速及風向特性。

現況特性分析結果，3 測站波高及週期趨勢相近，如圖 2 所示。在風速風向部分，冬季風向多為 NNE 方向，TC 最大風速可達 26.8 cm/s，各站平均風速為 8.07~12.62 cm/s，夏季風向多為 SSW 方向，於 2016/07/06~07/09 尼伯特颱風期間 TC 最大風速可達 22.4 cm/s，各站平均風速為 4.12~6.56 cm/s，如圖 3 及表 1 所示。

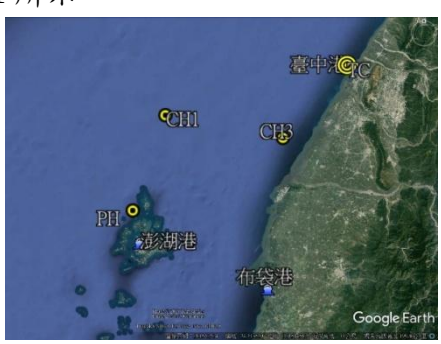


圖 1　臺灣中部海域波浪觀測位置示意圖

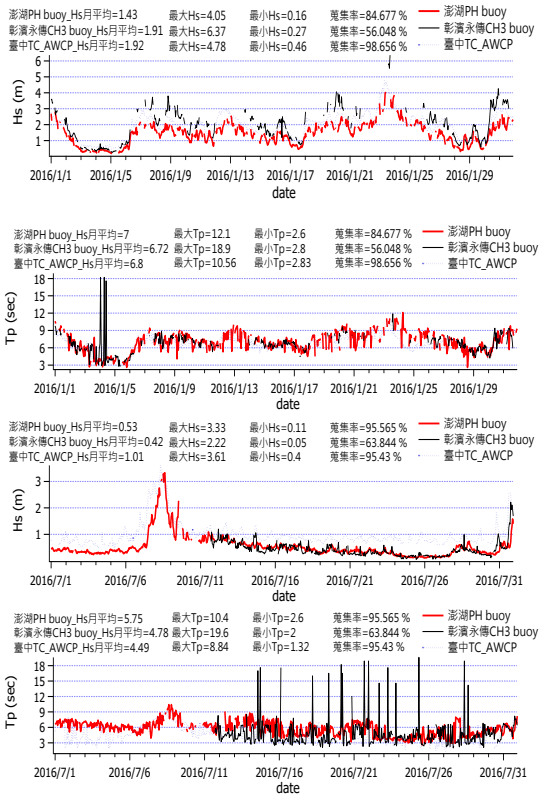


圖 2　2016 年臺灣中部海域冬、夏季波高周期歷線圖

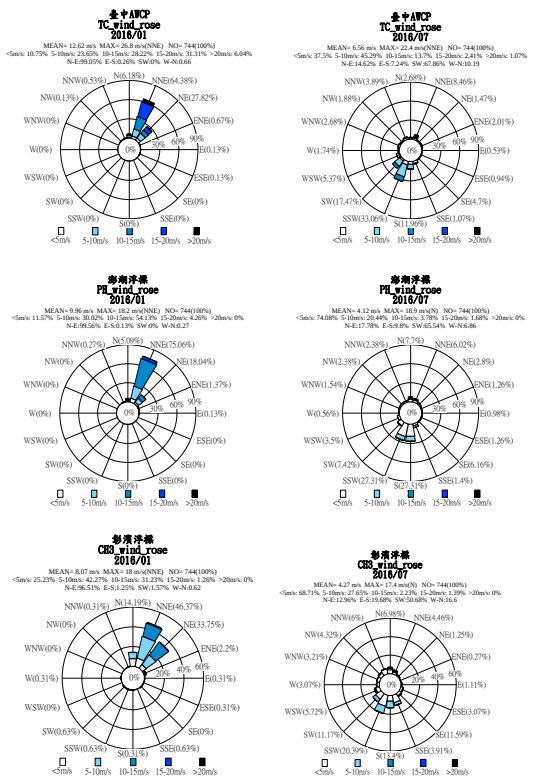


圖 3　2016 年臺灣中部海域冬季及夏季風速風向玫瑰圖

表 1　2016 年臺灣中部海域冬季及夏季風速、風向發生頻率分析表

site		風速(cm/s)					平均風速 (cm/s)	最大風速 (cm/s)
		<5	5~10	10~15	15~20	>20		
冬季 1月	TC	10.75	23.65	28.22	31.31	6.04	12.62	26.8
	PH	11.57	30.02	54.13	4.26	-	9.96	18.2
	CH3	25.23	42.27	31.23	1.26	-	8.07	18.0
夏季 7月	TC	37.50	45.29	13.7	2.41	1.07	6.56	22.4
	PH	74.08	20.44	3.78	1.68	-	4.12	18.9
	CH3	68.71	27.65	2.23	1.39	-	4.27	17.4

site		百分比(%)																最多
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	風向
冬 1月	TC	6.18	64.38	27.82	00.67	00.13	00.13	-	-	-	-	-	-	-	-	00.13	00.53	NNE
	PH	5.09	75.06	18.04	1.37	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.27	NNE
	CH3	14.19	46.37	33.75	2.20	0.31	0.31	0.63	-	0.31	0.63	0.63	-	0.31	-	-	0.31	NNE
夏 7月	TC	2.68	8.46	1.47	2.01	0.53	0.94	1.07	4.70	11.96	33.06	17.47	5.37	1.74	2.68	1.88	3.89	SSW
	PH	7.70	6.02	2.80	1.26	0.98	1.26	1.40	6.16	27.31	27.31	7.42	3.50	0.56	1.54	2.38	2.38	S.SSW
	CH3	6.98	4.46	1.25	0.27	1.11	3.07	3.91	11.59	13.40	20.39	11.17	5.72	3.07	3.21	4.32	6.00	SSW

四、數值模式建置

4.1 模型建置

本研究建構之風浪模式，水深地形由遠域到近域除了蒐集美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)之 ETOPO5 及 ETOPO1、台灣海洋科技研究中心彙編、發布之臺灣附近海域水深地形資料 200 m 網格，以及參考海軍大氣海洋局刊行之海軍水道圖(臺中港)資料，同時針對臺中、彰化沿海及臺中港區等海域，分別蒐集水利署第三及第四河川局海域測深資料、臺中港務公司之港域測深資料等，予以數化水深資料建立非結構性三角形元素網格提供 MIKE21 SW 數值模式計算使用，如表 2 所示。

表 2 模式水深資料彙整

項次	區域範圍	水深資料	資料來源
1	梧棲漁港	92 年刊行之海軍水道圖(臺中港)	海軍大氣海洋局
2	臺中港域	106 年港域測深資料	臺中港務公司
3	臺中沿岸	103 年 10 月海域測深資料	水利署第三河川局
4	彰化王功沿岸 8 km	103 年 10 月海域測深資料	水利署第四河川局
5	臺灣周圍海域	21-26℃N, 119-123℃E 200m 網格水深	台灣海洋科技研究中心
6	臺灣外海海域	ETOPO1	美國國家海洋暨大氣總署
7	上述地區以外之模式範圍	ETOPO5	

以上述資料建置本研究西太平洋波浪模擬區域非結構性網格模式，模式範圍為東經 105°至 150°、北緯 5°至 40°，共有 6,111 個節點及 10,533 個三角形元素，模式邊界網格大小約 1°;另為了有較佳數值模擬結果，針對本研究重點探討區域(臺灣中部海域) 則以局部區域、網格加密方式處理，局部區域網格大小約 0.03°，本研究模式計算範圍、網格及數值水深如圖 4、圖 5 所示。

模式風場資料使用中央氣象局 WRF 預報風場之組合風場，透過資料解碼內插後產生 45 km 網格之風(壓)場資料，輸出範圍為西太平洋北緯 0°至 35°，東經 99°至 150°，分別於每日四次 0 時、6 時、12 時及 18 時之預報中，擷取每次預報前 6 小時所組合成 1 日(24 小時)之風場資料作為模式作用力。

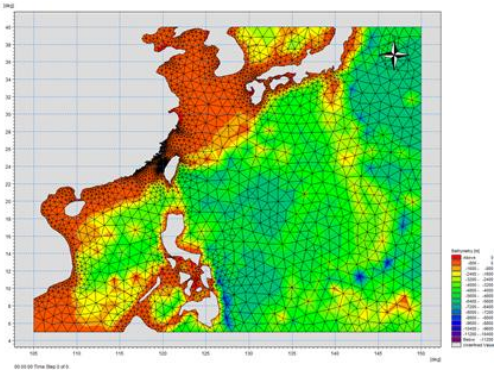


圖 4 西太平洋波浪模擬範圍、網格及數值水深圖

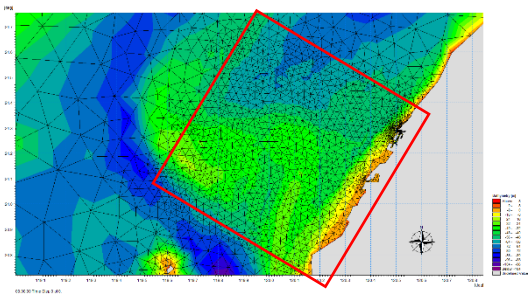


圖 5　中部海域局部區域加密網格及數值水深圖

4.2 數值模式驗證

模擬 2016 年冬季季風(1/6~2/6)、2017 年夏季季風期間(8/1~8/31)波浪，模擬結果如圖 6、圖 7 所示，季風模擬結果誤差如表 4 所示，其中 2017 年夏季季風期間彰濱浮標(CH3)無觀測資料，選用彰濱外海浮標(CH1)作驗證。

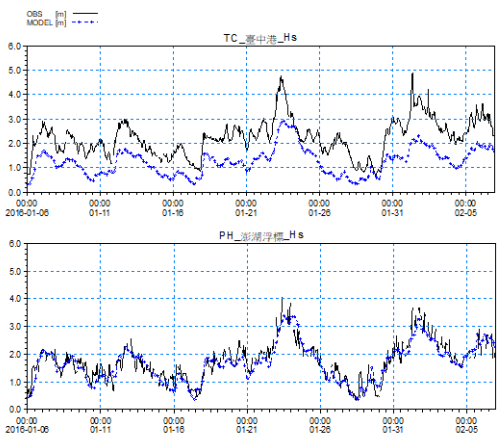


圖 6　2016 冬季季風期間波高驗證結果圖

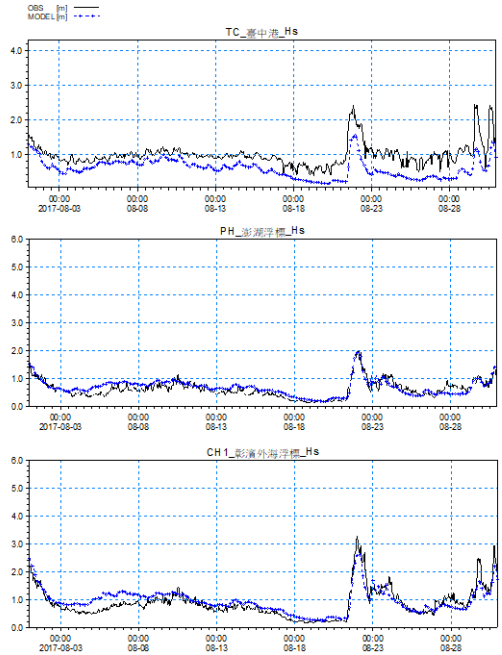


圖 7　2017 夏季季風期間波高驗證結果圖

表 4　季風期間示性波高模擬結果誤差情形表

年份	季風期間	測站	誤差值			
			最小值(m)	最大值(m)	平均誤差(m)	標準偏差
2016	冬季 1/6~2/6	TC	0.0017	2.691	0.896	0.416
		PH	0.0002	1.258	0.246	0.216
2017	夏季 8/1~8/31	TC	0.0032	1.751	0.432	0.241
		PH	0.0002	0.526	0.141	0.097
		CH1*	0.0001	2.872	0.287	0.326

由季風期間波浪驗證結果，臺中港於冬季(2016)、夏季(2017) 波高模擬結果大都均小於波高觀測值但波高變化趨勢相近，其餘測站在冬季、夏季期間波高模擬尖峰值及變化趨勢大都與觀

測值相近。推究臺中港於季風期間波高模擬值較實測觀測值偏小之原因，係本模式風場資料使用 WRF 預報風場，其在臺中港預報風速值較實測風速偏小緣故，如圖 8、圖 9 所示。

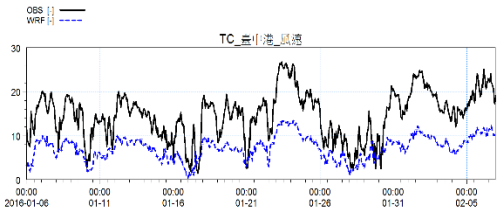


圖 8　2016 年冬季季風期間，臺中港實測風速與預報風場(WRF)風速比較情形圖

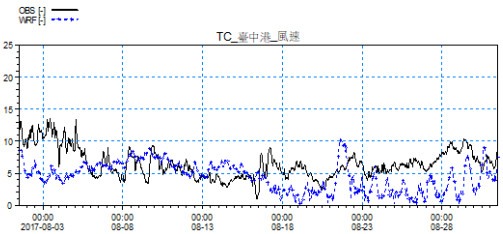
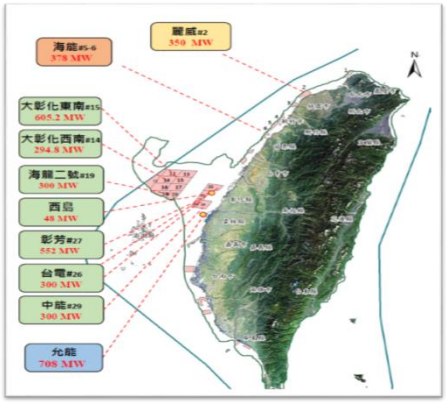


圖 9　2017 年夏季季風期間，臺中港實測風速與預報風場(WRF)風速比較情形圖

五、情境模擬

近年發展綠能政策，經濟部於 104 年 7 月 2 日公告「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，公開 36 處潛力場址基本資料與既有海域資料供各顧問公司、離岸風電開發商進行相關規劃設計評估工作，再經 106 年行政院核定經濟部「風力發電 4 年推動計畫」，進一步闡明離岸風電規劃係採「示範獎勵計畫、潛力場址要點、區塊開發」三階段方式推動。爰此，經濟部於 107 年 1 月 18 日公告「離岸風力發電規劃場址容量分配作業要點」，採「先遴選、後競價」原則進行分配，4 月 30 日公開遴選結果，計有 7 家業者(10 個離岸風場)獲選，10 個離岸風場遴選容量分布區域位置如圖 10 所示，總分配容量達 3,836 MW，其中大彰化東南、大彰化西南、海龍二號、西島、彰芳、台電及中能等共 7 個離岸風場位屬本研究探討臺灣中部海域範圍內。

為探討離岸風機群設置後對臺灣中部海域之影響，本研究先以通過遴選結果且位屬研究範圍內之 7 個離岸風電場址作情境模擬，初步探討 7 個離岸風電場址風機群設置前、後對於海域波浪影響情形。

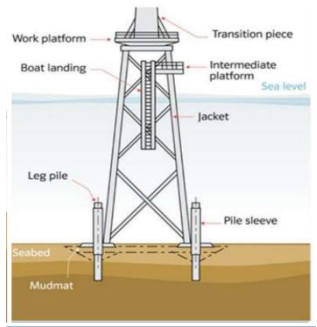


資料來源：經濟部能源局，2018

圖 10　離岸風場遴選容量分布區域

5.1 數值模式離岸風電場址配置

經參閱上述7個離岸風電場之風力發電計畫環境影響說明書後，選取各場址配置最多風機方案並依據其規劃風機群配置方案套用至模式內，此外，各離岸風場址目前規劃離岸風機下部基礎結構大都均以套筒(JACKET)形式為主，如圖 11 所示，每一風機具 4 個基樁，樁直徑約 3m 鋼管樁，分別打設於邊長約 20m 正方形頂點位置，爰本研究局部區域模式共配置 1,864 支風機群樁(466 座風機群)，風機樁位置示意圖及模擬樁數量表如圖 12 及表 5 所示。



圖片資料來源:離岸風場基礎設計關鍵技術之探討，2016

圖 11　套筒(JACKET)形式示意圖

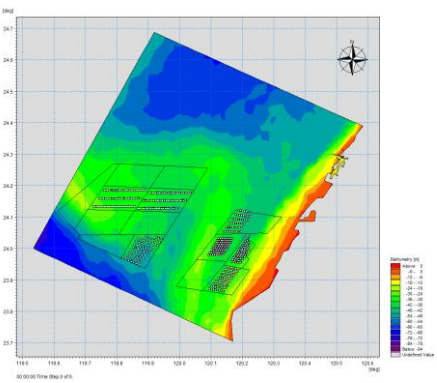


圖 12　局部區域模式內 7 場區離岸風電場址及風機群機樁位置示意圖

表 5　7 個離岸風場機樁數量彙整及機樁形式表

項次	風場名稱	風場編號	模擬風機(座)	模擬機樁數量(支)
1	大彰化西南	14	80	320
2	大彰化東南	15	76	304
3	海龍二號	19	63	252
4	台電	26	50	200
5	彰芳	27	72	288
6	中能	29	72	288
7	西島	非屬潛力場址	53	212
合計			466	1864

5.2 季風期間風機群設置後波浪情形

本節波浪模式係以局部區域範圍、模式邊界給定單一方向波浪條件方式，模擬冬季、夏季及颱風期間風機群設置前、設置後之波浪運動情形，並計算設置前、後示性波高差異及輸出 3 段波浪空間剖面圖，以此評估風機群設置完成後對海域環境、臺中港區影響，輸出空間剖面位置如圖 13 所示。

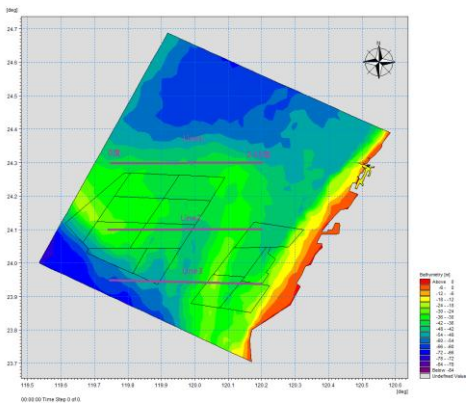


圖 13　波浪模式輸出 3 剖面波浪空間運動情形位置示意圖

5.2.1 冬季季風期間風機群設置後波浪模擬計算成果

依本中心「2016 年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)」之歷年臺中港域主要測站示性波高週期及波向統計量統計表及波向分佈百分率表，臺中港域主要測站歷年冬季波浪統計結果為平均示性波高 2.15m、尖峰周期為 6.9sec，波向係以 NNE 為主，以此統計分析結果作為局部區域模式邊界輸入之波浪特性條件，模擬冬季季風期間波浪運動情形如圖 14 所示。

模擬 7 個離岸風電場址風機群設置後，局部區域波浪運動情形如圖 15、波高改變情形如圖 16 及 3 剖面波浪運動情形如圖 17 所示，計算風機群設置後之示性波高改變量整體平均下降 0.002 m，且由圖 16、圖 17 可知，波浪僅於風機群周圍發生改變但不明顯，波高傳遞至臺中港域時改變量近乎為 0 m，表示風機群設置後對整體海域影響範圍有限。

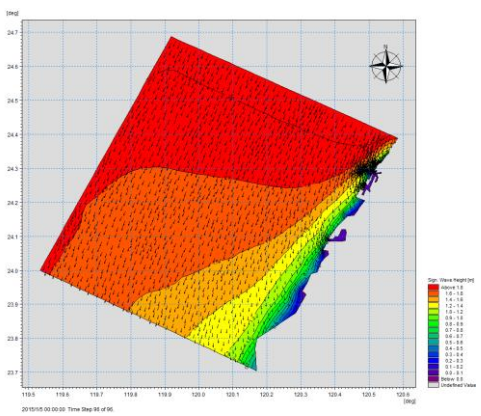


圖 14 模擬冬季季風期間局部區域波浪運動情形

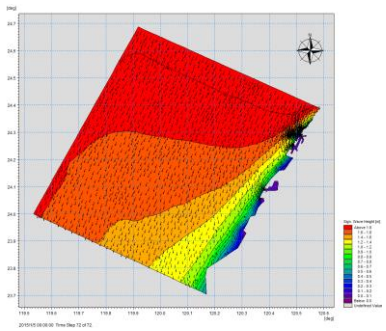


圖 15 冬季季風期間風機群設置後局部區域波浪運動情形

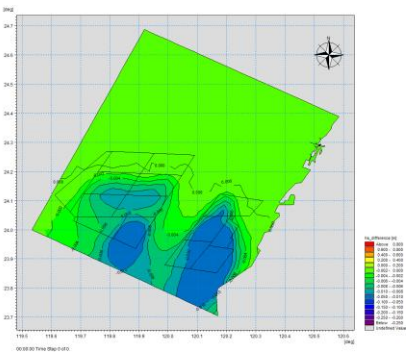


圖 16 冬季季風期間風機群設置後之示性波高改變情形

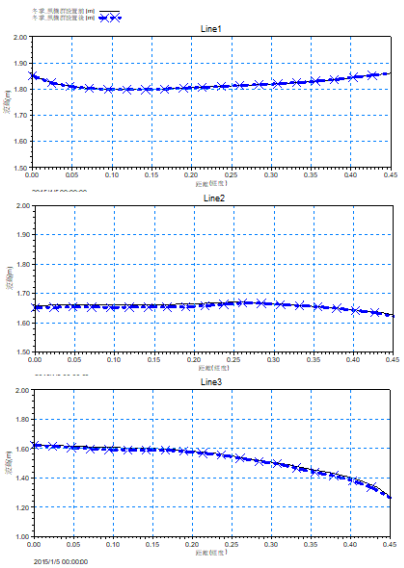


圖 17 冬季季風期間風機群設置前、後局部區域模式 3 剖面波浪空間運動情形

5.2.2 夏季風期間風機群設置後波浪情形

依本中心「2016 年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)」之歷年臺中港域主要測站示性波高週期及波向統計量統計表及波向分佈百分率表，臺中港域主要測站歷年夏季波浪統計結果為平均示性波高 0.87m、尖峰周期為 5.7sec 及波向係以 W 為主，以此結果作為局部區域模式邊界輸入之波浪特性條件，模擬夏季季風期間波浪運動情形如圖 18 所示。

模擬 7 個離岸風電場址風機群設置後，局部區域波浪運動情形如圖 19、波高改變情形如圖 20 及 3 剖面波浪運動情形如圖 21 所示，計算風機群設置後之示性波高改變量整體平均下降 0.002 m，且由圖 20、圖 21 可知，波浪僅於風機群周圍發生改變但不明顯，波高傳遞至臺中港域時改變量近乎為 0 m，表示風機群設置後對整體海域影響範圍有限。

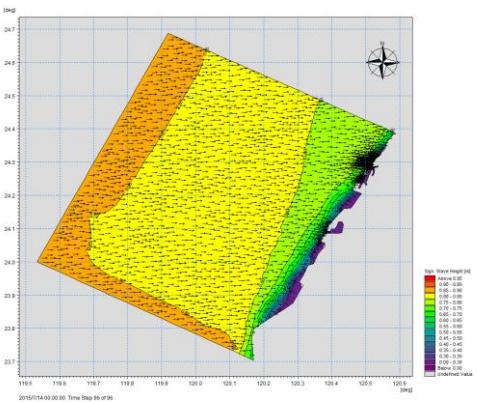


圖 18 模擬冬季季風期間局部區域波浪運動情形

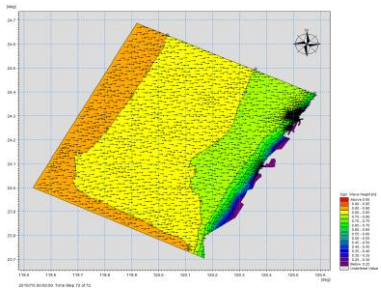


圖 19 夏季季風期間風機群設置後局部區域波浪運動情形

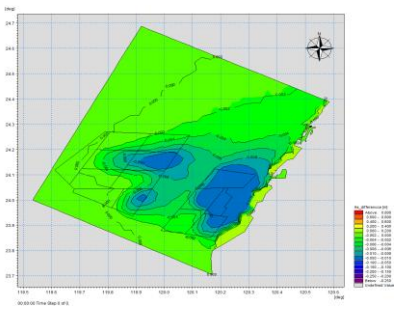


圖 20 夏季季風期間風機群設置後之示性波高改變情形

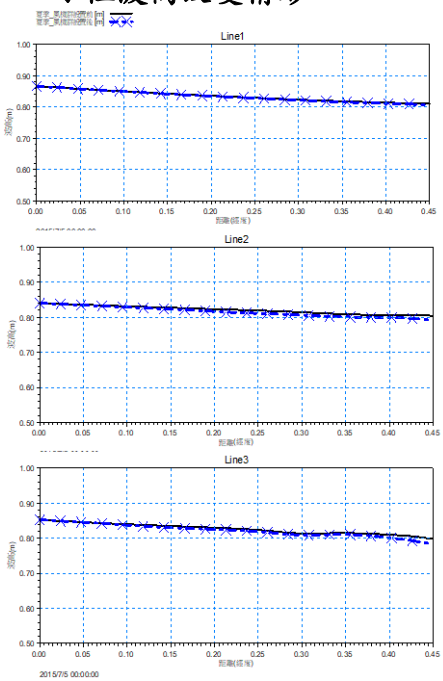


圖 21 夏季季風期間風機群設置前、後局部區域模式 3 剖面波浪空間運動情形

六、結論

經比對各測站波高觀測值可知觀測資料均有良好相關性，本研究波高模擬值較觀測值平均誤差均小於 1m、標準偏差小於 0.5，模擬波高變化趨勢與觀測波高值趨勢相近，表示本研究建置之波浪數值模式可描述臺灣中部海域波高變化特性。但由臺中港測站模擬結果均較實際觀測值小，將預報風場及實測風場繪出比較結果，反應出 WRF 預報風場在臺中港預報風速值較實測風速偏小。此外，臺中測站因受中央山脈影響或其近內陸等因素均易影響預報風場準確度，後續於模擬評估作業應留意臺中港外海風速差異所導致之風浪差異。

經模擬 7 個離岸風電場址設置風機群樁後於冬季、夏季期間對整體海域影響結果可知，設置風機群後僅對海域圓柱結構體周圍有局部反射及遮蔽效應，但波浪通過後變形效應衰減，海域環境僅局部受設置風機群影響。

參考文獻

1. 許朝敏、林銘崇、楊文榮、曾瓊蓉(2010)「波浪通過離岸風田之變形研究」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，第 375-456 頁。
2. 劉勁成、張憲國(2012)「輸入逐時波浪及水位對數值模擬海岸地形變遷之影響」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，第 405-410 頁。
3. 范揚洺、陳家銘、許顥騰、周顯光、劉愛慈(2014)「波浪模擬與預測於離岸風場址之應用」，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 721-726 頁。
4. 張君名 (2016)「基隆外海不同點位波浪設計條件之探討」，第 38 屆水利工程研討會論文集，第 17-22 頁。
5. 張君名、錢樺 (2017)「西北太平洋颱風波浪波高推算」，第 39 屆水利工程研討會論文集，第 25-30 頁。
6. 宋芷萱(1993)颱風侵襲下東沙島海岸地形變遷之研究，私立弘光科技大學環境工程研究所碩士論文。
7. 許弘莒、蔡立宏、楊炳達、郭平巧、李孟學(2016)「臺中港鄰近海域之波流場模擬」，港灣技術季刊，第 1 卷，第 103 期，第 42-63 頁。
8. 交通部運輸研究所，2014，”臺灣主要港口附近海域混合波浪統計特性及推算模式建置研究(2/4)”，報告。
9. 交通部運輸研究所，2017，” 2016 年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)”，報告。
10. 大彰化西南離岸風力發電股份有限

公司籌備處(2018)，”大彰化西南離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
11. 大彰化東南離岸風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”大彰化東南離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
12. 西島風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”彰化西島離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
13. 彰芳風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”彰化彰芳離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
14. 中能發電股份有限公司籌備處(2018)，” 中能離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
15. 海龍二號風電股份有限公司籌備處(2018)，”海龍二號離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。

臺灣離岸風電建置與航安技術發展之可行性評估

高瑞鍾　國立高雄科技大學海洋事務與產業管理研究所副教授
蔡立宏　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
黃茂信　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
鍾少蕊　國立高雄科技大學供應鏈管理研究所研究生

摘要

本研究藉由參酌國際組織及先進國家在離岸風電區建置的規劃、設計，做為對臺灣制定離岸風電建置之航安技術的「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」參考依據，並針對現階段實務進行「船舶資料量化統計及航行交通流量分析」、「建置離岸風電區 AIS 資料庫顯示介面系統」。

本研究將船舶資料進行篩選，並依風電區統計進入區域內船舶數量，由圖表呈現統計分析結果，依圖表分析結果可明確了解船舶在風電區內航行數量，並可看出經常有船舶航行在離本島較近的風電區，因此對風電區規劃需相當謹慎。本研究主要是收集風電區國內外的技術和資訊，並加強開發中之系統功能，使此系統更加人性化，讓相關單位能快速上手，方便管理掌控船舶動態。

關鍵字：離岸風電、航安技術、航運安全風險管理、海難搜救

Abstract

In accordance with sustainable plans and designs standards set by international organizations and developed countries, this project has developed the “Risk Safety Management Guide” under the following headings：(1) Quantitative Statistical Vessel data and Vessel traffic flow Analysis, and (2) Automatic Identification System in Offshore Wind Farm Areas. According to the analysis of the results, the number of ships sailing in the Offshore Wind Farm Areas is clearly understood, and it can be seen that the frequency of ships sailing in the area is relatively high. This research will also continue to collect and develop technological information relating to domestic and foreign Offshore Wind

Farm Areas.

According to the Guide Book and sample of navigation guide of the Ministry of Transport and Communication which is in charge of shipwrecks, it can enforce responsibilities and delegate related detailed planning. The National Rescue Command Center can also make related disaster plans for conducting search and rescue operations. The Coast Guard Administration can adopt such operation procedures for search and rescue operations in the future.

Keywords：Offshore Wind Power, Navigation Safety Technology, Navigation Safety Risk Management, Marine Rescue

一、緒論

綜觀我國海難搜救之主管、通報、指揮及執行等分工體系，與美國等其它國家不甚相同，且各自訂有其行政規則(如交通部海難災害防救業務計畫、國家搜救指揮中心作業手冊、海岸巡防機關執行海上救難作業程序、空中勤務總隊航空器申請暨派遣作業規定等)，就整體運作上仍有諸多闕漏或扞格之處，尤其是在風電區環境海上急難搜救規範更是付之闕如。因此，因應離岸風電建置與航安技術發展，制定一航運安全之「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」有其必要性存在。

本研究主要方向為離岸風電建置與航安技術發展，其重點在於整體之風險評估及提出一符合我國風電發展需求的配套措施與船舶航行安全監測機制。政府在發展能源政策之離岸風電政策當下，尤應注意風險辨識評估與管理機制，故本研究蒐集國際上組織及先進國家之離岸風電建置有關風險辨識評估與管理機制的政策與法令，並加以歸納分析做為日後政府制定相關政策與法令的參考。

二、相關背景與國際規定及應用

本研究主要蒐集我國及現階段國際先進國家之離岸風電區建置與航安技術發展之相關文獻、政策與法令於離岸風電建置時有關航安發展部分之相關規定與措施一一討論，並做為本研究之主要基礎。其相關文獻資論述如下：

2.1 船舶自動識別系統技術規範

AIS 是一種輔助船舶航行的系統與設備，能有效提升船舶於海上航行的安全性，其主要功能可分為四項，分別為船舶識別、協助追蹤目標、簡化的資訊交流與提供其它輔助資訊，且 AIS 發展

則有助於加強海上生命安全、提高航行和管控效率以及有利於海洋環境保護。有鑑於此，人們積極針對船舶自動識別系統進行探討，除了發展出許多的應用方式與相關研究之外，亦利用電子資通訊技術來優化系統本身的效能。

AIS 資訊的應用上常見的形式為資訊網頁的建置，結合 AIS 資料庫以網頁的形式呈現船舶位置以及相關資訊包括 MMSI、IMO 編號、呼號與船名、船隻大小、船舶類型、座標位置、航速與航向、行駛狀態等。

圖 1　AIS 系統平台提供之船舶資訊

2.2 日本之航安技術發展

日本在發展離岸風電建置政策之下，強調在船舶交通以及其他水域利用方面，離岸風力發電商需掌握設置了離岸風電海域週邊的船舶交通(船舶的航行、停留、拋錨)、漁船和娛樂漁船、遊艇等其他水域利用的實際情況，做為離岸風電建置的風險管理的安全控管。而船舶交通以及其他水域利用實際情況掌握、可根據以下方式來進行：

1. 使用雷達掌握船舶航行實際情況(包括目視船型、船種等確認)。
2. AIS 收信數據的解析。
3. 採訪水域利用者。
4. 船舶出入港數據的解析。
5. 重新評估其他途徑所實施的船舶交通實際情況調查等結果。

2.3 英國之航安技術發展

世界上超過 90%的離岸風場位於歐洲海域，且英國為國際上離岸風力發

展最先進的國家，綜觀分析英國之概況，除了環境上的優勢外，政府的積極態度、技術研發以及海事工程能量充足的條件相互加成促使其在離岸風力的發展領先全球，且低碳的電力供應將是英國電力持續的未來發展方向並以建構完善的離岸風電產業供應鏈。

英國為風電場訂定緊急合作計劃(Emergency Response Co-operation Plan；ERCoP)，該計劃將在離岸風機施工前進行。而該計劃所需的項目如下：

1. 設計方面

(1) 所有風力發電機(Wind Turbine Generators; WTG)及其他海上可再生能源安裝(Offshore Renewable Energy Installations；OREI) 獨立構造均將標有清晰可見的獨特識別標誌，這些標識可從海平面上的所有的船隻及上空的飛機(直升機及固定翼(fixed wing))看到。

(2) 每個標誌都應由船隻可見的低強度光照亮，從而使構造能夠以合適的距離目視以避免與其發生碰撞。識別標誌的大小與照明亮度相結合將使得在正常的能見度條件及所有已知的潮汐條件下，觀察員(observer)可以清楚地看到它們位於海平面以上 3 公尺處，並且距離風力機至少為 150 公尺。

2. 運作方面

(1) 海事控制中心(Marine Control Centre)或雙方同意的單一聯絡點，於每天 24 小時都有人值班。

(2) 所有的海上搜救協調中心(Maritime Rescue Co-ordination Centre ; MRCC)將被告知中央控制室(Central Control Room)的聯繫電話號碼或單個聯絡點(反之亦然)。

(3) 控制室操作員或單個聯絡點將依據海上搜救協調中心(MRCC)的要求立即啟動風力發電機組(Wind Turbine Generators；WTGs)的關閉程序，並依照 MRCC 的要求將 WTGs 保持在適當的關閉位置，直到從 MRCC 接收到重新啟動 WTGs 安全的通知。

在風險來源規定方面，開發商對於離岸風場的環境研究及完整可行的規劃，皆需申請獲得英國皇家財產局(Crown Estate)同意時所需的法定程序與文件。英國海事及海岸救援局有義務在海上可再生能源裝置(OREI)佔用的海域提供 SAR 應變，因此，英國海事及海岸救援局為離岸風電風險及安全的主要負責機關。

在執行方面，英國海事及海岸救援局為該行業提供海上緊急應變管理課程，以使海事協調員、安裝管理者、船員轉移船(Crew Transfer Vessel；CTV)船員以及任何其他可能參與緊急情況管理和應變的公司工作人員都能接受培訓並了解正確的程序和在特區及其他緊急情況下應遵循的程序。

綜上所述，英國海事及海岸救援局於 2016 年 12 月制定「離岸可再生能源安裝：搜索與救助及緊急應變的要求、指南及操作注意事項」(Offshore Renewable Energy Installations : Requirements, Guidance and Operational Considerations for Search and Rescue and Emergency Response)，內容包含英國海事及海岸救援局的政策，以及指

南、建議及具體要求(如有必要)，以協助和實施搜索與救援以及其他緊急應變。

2.4 瑞典之航安技術發展

根據瑞典的離岸風場船舶航行風險評估方法論(Methodology for Assessing Risks to Ship Traffic from Offshore Wind Farms)報告中指出，離岸風場的航行風險評估之不同步驟。包括危險識別、碰撞機率及估計的後果，關於不確定性或敏感性以及風險的討論。茲敘述如下：

1. 初步定性評估(Initial Qualitative Assessment)

作為擬定或現有離岸風場的航行風險評估的第一步，應進行危害性質識別。因此可以透過舉辦公聽會，訪談或在選定的利益關係人群體組織(涉及的各方及相關海事利益相關方)進行會議，並詢問他們對建立離岸風電場可能造成的危害擔憂及意見。

2. 需要慮及風險類型的定義(Definition of Types of Risks to be Considered)

離岸風場的建設及運營可能會對涉及在風電場附近海運運行船舶的各類事件產生風險。建立離岸風場可能造成航行風險包括：

(1) 船舶與風機或離岸風場構造碰撞或接觸的風險。
(2) 避免風電場的面積使船舶碰撞導致的風險。
(3) 地面風險。
(4) 離岸風場對雷達運轉的影響可能造成二次風險。

因此應該包括評估這些類型的風險。而這些風險在不同階段會有所不同。儘管與風電場運行階段相比，建設時間及退役相對較短，但在風險評估過程中仍應對其進行一些考慮因素。此外，應對未來船舶交通量增加及船舶變化情況進行比較，如平均速度增加，以及吃水及噸位之變化。

3. 降低風險的措施(Risk Reduction Measures)

主要提出建議評估風險降低措施的方法，風險降低措施可以分為以下幾類：

(1) 降低事故及事故機率的措施
(2) 減輕損害的措施(與船相關的損害、環境損害等)

而風險降低措施的實例包括改進拖船的抵達時間，在風力渦輪機桅杆上安裝燈光和導航設備，以及製定安全管理計劃。此外，有些措施可加以評估，例如以定量方式改善拖船的抵達時間，而其他措施(例如減少人為錯誤的措施)可以進行定性評估。這些措施可以根據主要應用領域分為以下幾類：

(1) 在風電場應用的措施。
(2) 船舶措施，包括運輸危險貨物的具體措施。
(3) 適用於風場周圍整個海域的措施。

此外，北海與歐洲共同體亦出版「Bonn 協議反污染手冊」(Bonn Agreement Counter-Pollution Manual)，對於離岸風電航安風險及可能發生的海域污染做了許多的規範，而「Bonn 協議」係指北海與歐洲共同體共同合作打擊北海石油污染並執行監測以檢測污染的機制。

Bonn 協議在執行方面，手冊第 8

章討論了為降低風電場附近漏油風險而採取的各種措施。可能的應對機制是向風電場漂移的情況如下：

1. 在機械回收可行的情況下，需要允許回收船進入風場。建議即使船舶與轉子葉片之間有足夠的間隙，也應關閉風力機。
2. 如果建議使用分散劑，則應從船上進行分散劑噴塗，噴塗飛機不得在風電場內運行。

Bonn 協議在需考慮的風險項目方面，包括：

1. 碰撞風險

(1) 船舶與風機或離岸風場構造碰撞或接觸的風險。
(2) 避免風電場的面積使船舶碰撞導致的風險。
(3) 地面風險。
(4) 離岸風場對雷達運轉的影響可能造成二次風險。

2. 海域減少碰撞概率的措施

(1) 建立一個交通分離計劃。
(2) 通過船舶交通管理(Vessel Traffic Management；VTM)持續監測及觀察過海區域、過往交通及風電場。基於經驗數據之研究表明，船舶交通管理(VTM)可能促使減少動力碰撞的 2~10 倍。
(3) 政府機關觀察及控制船隻與其操作。
(4) 緊急管理。
(5) 船舶通過即漂移的監測與報告機制。例如在荷蘭，專屬經濟區內的每艘事故船舶都有義務立即向荷蘭海岸警衛隊報告。
(6) 拖船在接近碰撞及擱淺頻率高的地區時的配置位置，而在惡劣天氣下的拖船配置位置尤為重要。
(7) 修改航線的標記以避免船舶碰撞與接地或擱淺(groundings)。
(8) 船隊應自始至終可以隨時進入，協助船員與救助拖船建立聯繫。
(9) 顯示風電場的最新海圖應儘早向大眾提供。
(10) 應在風電場周圍設置安全區。
(11) 禁止在風電場中航行。

3. 海域減少後果的措施

(1) 私人或公務的拖船協助需要能夠及時到達發生事故的船舶，並且應該有足夠的拉力來防止事故船舶的漂移。
(2) 應制定溢油緊急應變計劃，並提供足夠的應變能力。
(3) 應在風電場內或附近進行特定區域與溢油緊急應變部門的定期培訓。
(4) 應由引水人引入從作業船基地港到工作區的導航通道，以及協調作業船的航行管制員。

2.5 美國之航安技術發展

美國針對離岸風電的航安觀點，認為空中交通管制、空中監視、天氣和導航雷達系統可能會受到離岸風電渦輪機的影響，雜波可能影響目標探測，增加錯誤目標的產生，干擾跟蹤，並擾亂天氣預報。

此外，以 2017 年 12 月出版的「紐約州海上風電總體規劃」(New York State Offshore Wind Master Plan)為例，其中由紐約能源研究和發展局(New York State Energy Research and Development Authority)主導的「紐約海上風電總體規劃航運和航行研究」(New

York State Offshore Wind Master Plan Shipping and Navigation Study)報告指出，離岸風場在航運和航海領域所面臨的主要潛在風險已被廣泛記錄。由於80%的海上災害都是人為錯誤造成的，因此船舶和海上構造之間的某些安全緩衝是必要的，並且是確保船舶安全運輸和機動性的必要條件。

為了充分評估特定離岸風場在其整個生命週期中可能帶來的潛在航行風險，通常採用特定地點的航行安全評估(Navigation Safety Risk Assessment；NSRA)。依據 NSRA 的調查結果，可以理解和處理航行風險，並且可以實施潛在的緩解措施(包括海上緊急應變)。

三、離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)之制定

依據前揭之「航安技術發展背景知識與相關研究及於國際規定及各國之應用」有關國際(歐洲)、日本、英國、瑞典、美國等先進國家之「離岸風電建置與航安技術發展相關」的風險管理安全攸關規定，及檢視臺灣缺乏(不足)之部分，擬定出針對臺灣此議題的「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」。

「行政機關風險管理與危機處理作業基準」第二十七條明定：「對處理危機結果發現異常事項，應提出矯正或預防改善措施，並確認該等措施之有效性及回饋風險管理機制持續監控」。故「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」亦同，在必要時進行更新。在這些更新中，必須考慮吸取的教訓、工作性質的變化、新技術或程序的開發或法律與規範要求進行更改。如果需要修改「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」，需要將修改後的手冊提交給該目的事業主管機關，且本手冊將每兩年進行一次審查。

3.1 離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)之制定依據

行政院研究發展考核委員會訂定「風險管理及危機處理作業手冊」係根據相關法令及「行政院所屬各機關風險管理及危機處理作業基準」而建立、實施及維持。具承上啟下之功能，以期提供行政院所屬各級機關風險管理與危機處理正確觀念、統一溝通語言及整合性架構與實務運用，有效建立風險管理與危機處理能量，順利推動並落實風險管理與危機處理，全力達成機關目標並提升施政績效與民眾滿意度。根據此手冊擬定「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」提供風險管理、緩解措施及急難救助方面的規劃，可於離岸風場發生海上事故時使用這些資訊。此手冊目的在於確定離岸風電場發展的主要或潛在風險，並揭示這些風險如何控制，離岸風電相關業者如何與風險管理合作並提供建議。

3.2 風險管理及急難救助手冊之必要性

綜合前面各節中國際及各國有關

離岸風電建置之航安技術發展應用之論述，皆與風險評估與安全管理息息相關，且亦制定相關手冊(或計畫)作為離岸風電建置之航安技術發展考量之因素。

目前各國皆制定風險評估與安全管理相關手冊(或計畫)作為離岸風電建置之航安技術發展考量之因素。臺灣針對風力發電，經濟部已擬定「風力發電4年推動計畫」(106-109年)，規劃短期厚植推動基礎。由於臺灣擁有全世界最好風場可以發展離岸風力發電，也有機械、電子等製造基礎，政府將會善用此優勢條件，全力協助業者加速風力發電的開發與興建，為使臺灣發展離岸風電更加順遂，離岸風電建置之航安技術發展扮演著十分重要之角色，因此，風險管理及急難救助手冊之制定，有其必要性。

有關「風險管理及急難救助手冊」之內容如下（表1）：

表1　風險管理及急難救助手冊

項目	內容
序言	
風險分析	1. 風險情境分析 2. 風險辨識 3. 需考慮的風險類型的定義 4. 評估風險等級
風險項目考量之因素	1. 風險管理目標設定 2. 風險管理規劃 3. 風險管理執行 4. 擬定風險情境 5. 參與風險辨識的人員
風險項目考量之區域	1. 環境條件 2. 注意事項 3. 風場航行安全 4. 安全通行距離 5. 高風險地區
風險項目考量之措施	1. 影響減緩措施 2. 降低風險的措施 3. 緩解措施 4. 緩解措施(開發商與營運商遵循) 5. 降低漏油風險措施
風險管理之緊急應變計畫	1. 緊急應變計畫 2. 制定撤離及逃生手冊 3. 海上救難作業程序 4. 目的事業主管機關的注意事項與聯繫方式 5. 評估風險應變之程序範例報告程序之應用 6. 報告程序之應用

四、臺灣離岸風電建置與航安技術發展之探討

臺灣的離岸風電之發展並未如歐洲、日本、英國、瑞典、美國等國家在發展離岸風電之前(或建置時)先有一套「離岸風電建置之航安技術發展」相關的「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」的評估或應對計畫，實乃不足之處，本節將從「政策、組織、法令、執行、人員能力」等面向，依據前述「航安技術發展背景知識與相關研究及於國際規定及各國之應用」逐一探討目前臺灣相關規定中不足或缺乏之處，期能了解當前臺灣離岸風電建置之航安技術發展問題所在，進而修正補充之。

4.1 適用於我國政策之規定

檢視我國有關離岸風電之相關政策，諸如：風力發電 4 年推動計畫、災害防救白皮書、災害防救基本計畫和海難災害防救業務計畫，茲將其論述如下。

4.1.1 風力發電 4 年推動計畫

目前臺灣離岸風電之發展基礎乃以「風力發電 4 年推動計畫」為主，並於經濟部能源局主導，此計畫以「能源安全、綠色經濟、環境永續」為主軸，但是海難發生時有可能產生海洋污染而導致海洋環境、資源破壞，因此本計畫既然強調環境永續(環境保育)，但卻缺乏航安技術、海難救助等相關議題討論。

4.1.2 災害防救白皮書

離岸風電建置之航安技術發展最相關之議題為「防災、減災、救災」，國際上皆針對有關在離岸風電區預防發生海難或意外著墨許多，諸如：風險評估與安全管理。基於國內「防災、減災、救災」概況，行政院於 106 年依據災害防救法第 17 條規定編定「災害防救白皮書」，針對「減災、整備、應變、復原」等四大主軸進行整體災害防救之工作，並綜整政府在災害防救施政之重點及努力，希望精進各項災害防救業務，提升災害防救工作效率，以改善災害防救機制。

然而，綜觀目前之災害防救白皮書，實仍欠缺離岸風電海域海難相關議題，如：

1. 海難、災害權責歸屬。
2. 海難、災害管轄競合。
3. 離岸風電海域不特定海難、災害情況歸類。
4. 離岸風電海域不特定海難、災害預防作為。

4.1.3 災害防救基本計畫

中央災害防救委員會每五年依災害防救法第 17 條第 2 項規定，就相關減災、整備、災害應變、災後復原重建、科學研究成果、災害發生狀況、因應對策等，進行勘查、評估，檢討災害防救基本計畫，目前此基本計畫最新版本為 2013 年 6 月出版，面對當前發展離岸風電之行程，當然皆未規範離岸風電海域海難相關議題。而根據此基本計畫之基本方針及策略目標，以災害預防、災前

整備、緊急應變及復原重建為架構，提出 5 年內應推動之優先施政對策。

4.1.4 海難災害防救業務計畫

交通部依災害防救法第 3 條規定為海難之中央災害防救業務主管機關，負責指揮、督導、協調各級海難災害防救相關行政機關及公共事業執行海難災害防救工作。交通部復依據災害防救法第 19 條第 2 項規定，依「災害防救基本計畫」擬訂「海難災害防救業務計畫」，其內容包含：海難預防、海難災害緊急應變、海事調查及復原重建等規範。

此業務計畫是與離岸風電建置之航安技術發展最相關之計畫，內容相關之海難僅區分為甲、乙、丙三級，綜觀國際上離岸風電區預防發生海難或意外皆以風險評估與安全管理之角度，認為離岸風電區可能伴隨著特殊性海難之發生情況，因此更需考慮其發生海難之嚴重性。

4.1.5 離岸風電海難緊急應變計畫之研擬

臺灣發展離岸風電至今，目前上位計畫僅為「風力發電 4 年推動計畫」，其內容針對航安技術發展的內容比較少，而在海難救助計畫方面，雖提及海難發生時之所有海難預防、災前整備、海難災害緊急應變，然離岸風電場區一但發生海難，往往有不可預知之特殊性災害發生，因此，其內容仍然不足。

綜上所述，臺灣應從各個上位政策檢視並修正(增訂)，而目前海難災害防救相關政策非常完備，僅需補充離岸風電發生的海難之相關規定即可。而政策內容亦須加入各種風險之評估，除了降低事故之發生，並可做為爾後海難救助之依據，此政策(計畫)才能更加完善。

4.2 組織架構之擬定

檢視我國有關離岸風電之災害防救組織架構，諸如：中央災害防救委員會、國家搜救指揮中心、各機關實施海難救助事項和地方政府實施海難救助事項，茲將其論述如下。

4.2.1 中央災害防救委員會

本委員會置委員 26 人，其中 1 人為主任委員，由行政院副院長兼任，承行政院院長之命，綜理本委員會事務。本委員會設行政院國家搜救指揮中心，統籌、調度國內各搜救單位資源，執行災害事故之人員搜救及緊急救護之運送任務。然離岸風電之主管機關為經濟部能源局，海難之主管機關為交通部，海難執行機關為海洋委員會海岸巡防署，若有海洋污染之情事，海洋委員會海岸巡防署為主要負責機關。因此，臺灣離岸風電建置之航安技術發展下，相關海難發生時之所有海難預防、災前整備、海難災害緊急應變事涉多個機關勤業務，然而離岸風電場區一但發生海難，往往有不可預知之特殊性災害發生。再者，離岸風電海域所發生之海、空難，若為船舶、飛機碰撞風機組設備導致輸電線路災害，此時主管機關有可能產生管轄競合的問題。

4.2.2 國家搜救指揮中心

依據災害防救法規定：「為有效整合運用救災資源，中央災害防救委員會設行政院國家搜救指揮中心，統籌、調度國內各搜救單位資源，執行災害事故之人員搜救及緊急救護之運送任務。」據此，未來參與離岸風電海難救災相關

之公部門皆將面臨更嚴峻的危機應變的挑戰。而救災首重人命救援，搜救效率又攸關政府跨部門運作整合效能，為因應快速遽變的複合性大規模災害類型，政府應針對離岸風電海難救災檢討國搜中心現行編組、建構高效能的搜救機制、補強合理的搜救能量。

4.2.3 各機關實施海難救助事項

目前海難主管機關(交通部)與執行機關(海洋委員會海岸巡防署)制定:「海洋委員會海岸巡防署與交通部協調聯繫辦法」，但是離岸風電之主管機關為經濟部能源局，目前三造之間尚未制定相關因離岸風電場區所發生海難之協調聯繫辦法。因此，為因應離岸風電場區所發生海難救助事務、權責，可朝向制定：「海洋委員會海岸巡防署與經濟部協調聯繫辦法」，或：「海洋委員會海岸巡防署、交通部、經濟部之協調聯繫辦法」因應之。

4.2.4 地方政府實施海難救助事項

海岸管理法規定：「海岸災害：指在海岸地區因地震、海嘯、暴潮、波浪、海平面上升、地盤變動或其他自然及人為因素所造成之災害」、「船舶航行有影響海岸保護或肇致海洋污染之虞者，得由中央主管機關會商航政主管機關調整航道，並公告之」，因此，倘若離岸風電場區所發生海難事件為離岸三海里之內，地方政府、內政部、海洋委員會海岸巡防署地方海巡隊亦負有救助之責，倘若又有溢油污染之虞，海洋委員會海洋保育署主要負責機關。再者，依據海岸管理法規定：「主管機關及海岸巡防機關就前項及本法所定事項，得要求軍事、海關、港務、水利、環境保護、生態保育、漁業養護或其他目的事業主管機關協助辦理。」

4.2.5 離岸風電海難救助組織架構之擬定

可朝向以國家搜救指揮中心為離岸風電最高統籌、調度機構，並搭配災害防救法相關法令、災害防救白皮書、經濟部制定相關的離岸風電海難救助政策，做為執行依據。

4.3 法制化之建構方式

檢視我國有關離岸風電之組織架構，諸如：中央災害防救委員會、國家搜救指揮中心、各機關實施海難救助事項和地方政府實施海難救助事項，茲將其論述如下。

4.3.1 災害防救法

災害防救法規定：「水災、旱災、礦災、工業管線災害、公用氣體與油料管線、輸電線路災害：經濟部」、「空難、海難、陸上交通事故：交通部」、「為緊急應變所需警報訊號之種類、內容、樣式、方法及其發布時機，除其他法律有特別規定者外，由各中央災害防救業務主管機關擬訂，報請中央災害防救會報核定後公告之」。

然而離岸風電海域所發生之海、空難，所衍生出來的事故亦有可能為複合式災害，此時主管機關有可能產生管轄競合的問題。而此時將會有「權責、指揮、督導及協調」等問題有待解決。

4.3.2 海污染防治法

海洋污染防治法規定：「依本法執行取締、蒐證、移送等事項，由海岸巡防機關辦理。主管機關及海岸巡防機關就前項所定事項，得要求軍事、海關或其他機關協助辦理」、「船舶發生海難

或因其他意外事件，致污染海域或有污染之虞時，船長及船舶所有人應即採取措施以防止、排除或減輕污染，主管機關得命採取必要之應變措施，必要時，得逕行採取處理措施」。

依據海洋污染防治法規定而制定「重大海洋油污染緊急應變計畫」，其中：「因海難事件導致海洋污染發生，由交通部開設之海難災害應變中心統籌應變處理及執行油污染應變、事故船船貨、殘油與外洩油料、船體移除及相關應變作為，直至環境復原完成。」

又離岸風電之主管機關為經濟部能源局，可朝向因海難事件導致海洋污染發生時，經濟部能源局應該納入相關之處置機關。

4.3.3 各機關之海難救助規定

交通部依「災害防救法」第 3 條規定為海難之中央災害防救業務主管機關，負責指揮、督導、協調各級海難災害防救相關行政機關及公共事業執行海難災害防救工作。交通部復依據災害防救法第 19 條第 2 項規定，依「災害防救基本計畫」擬訂「海難災害防救業務計畫」。雖然交通部為海難業務主管機關，而海洋委員會海岸巡防署本身亦有訂定與海難搜救相關法令之內容規範。

檢視各機關海難救助事項後，目前我國缺乏離岸風電區海難急難救助之規定。為整合災害防救事權，發揮最大救難能量，有關涉及離岸風力發電建置之海難災害預防、整備、通報、應變及後續復原重建，應由經濟部能源局主政辦理，並擔任啟動緊急應變之召集機關。

4.3.4 離岸風電海難救助法制化建構之建議

可朝向各機關之海難救助規定應納入因應離岸風電海域所發生之海、空難之相關救助規定。且可從各個上位法令檢視並修正(增訂)。

4.4 執行機制之規劃

檢視我國有關離岸風電之執行機制，諸如：中央災害防救會報、國家搜救指揮中心、海難災害防救應變標準作業流程、漁船海難災害緊急通報及應變作業程序和海岸巡防機關執行海上救難作業程序，茲將其論述如下。

4.4.1 中央災害防救會報

災害防救法規定：「中央災害防救業務主管機關執行災害資源統籌、資訊彙整與防救業務，並應協同相關機關執行全民防災預防教育。」基此，離岸風電海域之海難統籌，可朝向由國家搜救指揮中心主導，俾利離岸風電海域海難管轄競合之執行。

4.4.2 海難災害防救應變標準作業流程

為健全海難災害緊急應變機制，增加各業務單位「垂直及橫向聯繫」，各部會機關及單位應就其所負責災害防救業務及執掌，研修訂定防救災計畫及作業程序。惟目前缺乏離岸風電特殊性海難應變標準作業流程、缺乏與經濟部能源局之協調機制、作業機制，可朝向視不同情況制定不同的標準作業流程，俾利離岸風電海域海難之緊急應變。

4.4.3 漁船海難災害緊急通報及應變作業程序

目前漁船海難達甲級或乙級災害規模者，通報至交通部、內政部消防

署、行政院國家搜救指揮中心及海洋委員會海岸巡防署等單位。漁船海難災害由漁業署負責應變，漁船與離岸風電特殊性海難之應變標準作業流程，亦應由漁業署與能源局進行相關協調及作業機制之擬定。惟目前此作業程序缺乏離岸風電特殊性海難應變標準作業流程、缺乏與經濟部能源局之協調機制、作業機制，可朝向視不同情況制定不同的標準作業流程，俾利漁船於離岸風電海域發生海難之緊急應變。

4.4.4 海岸巡防機關執行海上救難作業程序

海岸巡防機關為執行海上遇難船舶、平臺、航空器與人員之搜索、救助及緊急醫療救護事項，特訂定本作業程序。惟目前缺乏航空器碰障離岸風電區機組設備之海難應變標準作業流程、缺乏與經濟部能源局之協調機制、作業機制，可朝向視不同情況制定不同的標準作業流程，尤其行政院海岸巡防署已經組織改制為海洋委員會，因此可以一併納入組織改制討埨之議題。

4.4.5 離岸風電海難救助執行機制之規劃

可朝向從經濟部能源局之法令檢視並修正(增訂)，目前所有海難相關法令已經非常完備，因此僅需補充離岸風電發生的「特殊海難」之相關規定即可，並與經濟部能源局共同參與規劃相關的協調機制、作業機制之建置。

4.5 人員能力之培養

檢視我國有關離岸風電之人員能力，諸如：離岸風電海難救助教育和離岸風電海難救助訓練，茲將其論述如下。

4.5.1 離岸風電海難救助教育

由於目前缺乏離岸風電海難相關專業人員，而目前各個海難統籌、執行機關、作業程序皆有明定教育訓練、演習計畫，目前尚缺離岸風電海難相關教育訓練，可朝向由離岸風電主管機關經濟部能源局負責統籌、規劃、協調、辦理，並結合海難相關主管(交通部航港局)、執行機關、地方相關單位、海事專業高等院校共同規畫相關細節。

4.5.2 離岸風電海難救助訓練

檢視各個海難統籌、執行機關、作業程序皆有明定救助訓練、演習計畫，目前缺乏離岸風電救助訓練，可朝向由離岸風電主管機關經濟部能源局負責推動，並結合海難相關主管、執行機關、地方相關單位、海事專業高等院校共同規畫救助訓練課程。

全球風能組織（GWO）係由風場業主和風機製造商所組成之非營利組織，其將協助制定風場開發時相關之標準與規範，亦提供離岸風電建設所需的海上求生及其他技能的標準國際課程。離岸風電在國外業界已逐漸形成共識將以全球風能組織（GWO）安全訓練為基本要求，情況就如同全世界跨國航行的商船船員必須要接受航海人員訓練、發證及航行當值標準（STCW）訓練課程取得受訓證書一樣。因此，可朝向借鑒全球風能組織（GWO）之訓練為離岸風電海難救助訓練奠定根基。

4.5.3 離岸風電海難救助人員能力培養之規劃

目前交通部及海洋委員會海岸巡防署之所有海難相關教育與訓練(包括演習)非常落實，因此僅需補充離岸風電

發生的「特殊海難」之相關教育與訓練(包括演習)即可。此外，亦可參考各國之作法，例如：歐洲的緊急應變演習、日本的「緊急時對應計畫」之緊急培訓、英國的海上緊急應變管理課程等。

4.6 我國撈救業能量分析與發展策略

離岸風電建置後，倘若船舶於離岸風電區航行，發生海難事故需要撈救時之相關撈救能量因應，因此有必要探討我國撈救業能量分析與發展策略。本節主要針對政府、民間、鄰近國家(中國大陸、香港、日本）、國際海上救援協會等之救援能量及相關發展策略進行論述。

4.6.1 我國撈救業能量分析

船舶於離岸風電區航行，發生海難事故需要撈救時，依「災害防救法」第三條第四款規定海難交通事故之主管機關為交通部。我國目前執行搜救任務機關(構)為：海巡署、空勤總隊、海軍水下作業大隊、港務公司港勤拖船，除上述政府搜救機關(構)外，我國亦有民間搜救單位，諸如：民間海難救護公司、民間團體。若發生大型海難事故需請求鄰近國家支援，如中國大陸、香港、日本，亦可向國際海上救援協會(International Maritime Rescue Federation, IMRF)尋求撈救資源。

4.6.2 我國撈救業發展策略

我國撈救業發展策略，細分為政府撈救業發展策略、民間撈救業發展策略及支援撈救能量發展策略，茲將其論述如下。

4.6.2.1 政府撈救業發展策略

由於離岸風場海難事故自身的特殊性，從現行搜救體制來看，單靠海巡署、空勤總隊、海軍水下作業大隊、港務公司港勤拖船等的力量是不夠的，需搭配民間搜救能量，而我國目前撈救作業的經費是由中央撥款，這些資金用於實際海上撈救是不夠的，若透過政府事先統籌撈救基金或撈救費用，可用於提升政府機關(構)於離岸風場撈救船型，亦可彌補民間搜救的經濟補償。

4.6.2.2 民間撈救業發展策略

民間撈救業之「商業性撈救」是以船舶動力協助被拖船方行進或移動為目的；而「救助性撈救」是將人命撈救於安全狀態為目的。故可將「商業性撈救」視為不以危險存在要件；而「救助性撈救」是以危險存在及救助成功為要件。以危險存在為要件，可解決撈救費用及拖帶範疇之問題釐清。

4.6.2.3 支援撈救能量發展策略

茲將民間撈救業發展策略分為：建立人道救援合作機制和多邊海上撈救協定之面向，茲將其論述如下：

1. 建立人道救援合作機制

中華搜救協會經交通部核准指定為我國之兩岸搜救聯繫協調窗口，直接對中國大陸海上搜救中心協調海難搜救事宜，多年來海峽兩岸海難搜救機構基於互信互惠原則及海難搜救合作，共同維護臺灣海峽航運安全，建立人道救援合作機制，提升整體海域安全以及建立兩岸海峽航安機制及開發搜救資訊管理系統。

2. 多邊海上撈救協定

在亞洲太平洋地區，各國正快速的發展搜救能量，並積極與周邊國家尋求搜救方面的各種合作，故臺灣可朝向締結鄰近國家之「多邊海上撈救協定」，

避免所需他國資源的當下，鄰近國家之船舶、飛行器、協助撈救人員進入我國海域產生主權之問題。

4.6.2.4 政府、民間和支援搭配撈救能量發展策略

茲將政府、民間和支援搭配撈救能量發展策略分為：搭配撈救之協調性、設立民間自願撈救者組織和建立撈救能量資料庫之面向，茲將其論述如下：

1. 搭配撈救之協調性

我國搜救指揮體系縱向為各級政府機關(構)，橫向為各級政府機關(構)下的指揮系統，難以實現統一民間撈救及協調支援撈救的指揮體系，將影響撈救效率。故可朝向透過定期召開會議，於各方相互交流之情況下達成各種共識，並於召開會議時，交流離岸風電之撈救專業特性。

2. 設立民間自願撈救者組織

事先設立民間自願撈救者組織，此方法是國外普遍採用的協助撈救人員的構成模式，此舉可節省大量人力成本，更提供撈救能量有效的人力資源。透過民間自願撈救者推廣離岸風電海難撈救之安全常識，逐步構成對民間自願撈救者的訓練，進而成為民間自願撈救者之隊伍。

3. 建立撈救能量資料庫

經檢視「海難災害防救業務計畫」其附表五為海難災害救援能量表，可進而建立撈救能量資料庫，明確各地撈救單位與各地撈救資源之直接協調關係，可提高緊急應變之撈救協調效率，以因應離岸風電區海難之複雜性及專業性。

4.7 政府緊急情況介入權與時機

為使離岸風場發生海難事故時之緊急應變機制能夠迅速、有序、高效和協調，以減少海難事故造成的人員傷亡及損失，政府應廣泛調動各方資源，充分發揮各方力量的自身優勢及整體效能，本節將針對政府緊急情況介入權與介入時機進行論述。

4.7.1 政府緊急情況介入權

有關政府緊急情況介入權之部分，建議政府改善現有搜救體制，建立適於離岸風電區之調配機制、統一災害防救事權及海上搜救能量的協調與指揮權，茲將其面向分述如下：

1. 改善現有搜救體制，建立適於離岸風電區之調配機制

考量離岸風場發生海難涉及經濟部能源局、交通部航港局、海巡署，在組織協調上存在一定的困難，因離岸風電區海難救助具有複雜性和很強的專業性，檢視目前我國之情況，尚無哪個機關(構)能獨立承擔此項職能，因此我國海上搜救體制是在中央指導下的多元化搜救。這樣的體制雖有利於發揮各部門作用，整合共享強大的海難搜救能量，提高海難救助的成功率，但在多元機關(構)也會存在職責不清、分工不明，易影響救助工作時效。

2. 統一災害防救事權

離岸風電區海難涉及多個機關，為統一災害防救事權，建議政府參照相關緊急應變機制，指定一主管機關統籌指揮，調度資源並運用各相關部會專業，以期發揮最大搜救能量。

3. 海上搜救能量的協調與指揮權

經檢視我國「海岸巡防機關執行海上救難作業程序」之規定，海難估計有

十五人以上傷亡、失蹤或災害有擴大之虞時，海巡署即成立緊急應變中心。其指揮權係指重大災難發生而轄區人力不足時，應即報請上級單位調派人員或艦艇參與救援，各支援人員及艦艇由災難發生轄區之單位主官統一指揮。緊急應變中心應與軍事指揮機關建立資訊溝通管道，協調軍事力量參與海上搜救之緊急應變。

4.7.2 政府緊急情況介入時機

有關政府緊急情況介入時機之部分，分為搜救效果評估與決策調整、介入協調民間資源和參與及搜救後期處置之時機，茲將其面向分述如下：

1. 搜救效果評估與決策調整

追蹤緊急應變中心之搜救措施，判斷海難事故之發展趨勢，對危險進行控制、處置及分析，並及時調整搜救決策，採取有效措施，減少損失、提高緊急應變率和提高搜救成功率。

2. 介入協調民間資源和參與

當政府機關(構)資源能量不足時，由當地港口主管機關協調民間能量參與或支援海上救援行動，需由政府方指導民間進行救援工作之安排與配置。

3. 搜救後期之處置

政府於事故後成立專責單位，負責搜救成效之調查工作，將每次海上緊急救援經驗與專家進行評估，提出改進建議，作為爾後強化預防，並統計於離岸風場發生海難事故之發生原因、規律並吸取經驗，以降低於離岸風場海難事故之發生率。

五、船舶監測系統建置與交通流量分析

船舶交通流資料主要是對離岸風電區禁航範圍內的船舶數量做一追蹤統計，並以此判斷離岸風電區內外的船舶航行交通流量，藉以探討在離岸風電區設置後，航道縮減與離岸風電禁航區設立問題對於海上船舶航行密度與航道設置之影響性。

在船舶位置判斷方面，判斷 AIS 船舶是否處於離岸風電區的方式，主要是透過演算法判斷船舶是否在離岸風電區範圍，由於離岸風電區所規劃之區域範圍為不規則形狀，因此在判斷船舶是否處於離岸風電區內有一定困難度。為解決此問題，本研究使用 point in polygon 演算法做為計算船舶座標點是否在範圍內方法，首先需將風電區與船舶的座標由「二度分帶座標系統」轉換成「經緯度座標系統」，轉換後再透過 PIP 演算法判斷船舶是否在離岸風電區內。

考量風險管理及急難救助手冊與離岸風電風險管理之相關制定辦法對於航道規劃後船舶密度與熱點分佈等狀況亦須有一定程度的瞭解，在確認離岸風電區範圍與預設南北向航道規劃後，本研究更一步針對航道縮減與南北向航道設立對於海上船舶航行密度影響性做一熱點分佈模擬。

六、結論與建議

6.1 結論

離岸風電建置後之船舶於離岸風電區航行，發生海難事故之相關撈救能量因應能量明顯不足，由於離岸風電建置時將會有各種大型之工作船舶航行於港口與建置區之間，政府與民間之搜救船舶目前皆缺乏針對此類海難之搜救能量，在技術方面，皆缺乏此類的搜救經驗與專家，國外之搜救能量亦屬民間支援居多，台灣若發生此類海難事故時尋求國外搜救能量支援，將付出大筆救難費用。

而臺灣現行海難搜救實務所面臨的問題，在於沒有一套完整離岸風電建置之航安技術發展的「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」可供參考，也因此導致也許在未來實務上，在「防災、減災、 救災」之議題將會常常面臨海難、災害權責歸屬及管轄競合、責任區劃分、搜救作業流程不明確等的問題。爰此，本研究以「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」為主要研究目的，除針對不同類型之海事案件建立明確完整之風險管理外，更希冀未來本研究內容能擴大應用於臺灣離岸風電海域海難搜救實務上，臺灣離岸風電建置之航安技術發展作出貢獻。

此手冊需要定期、在發生重大事故之後、在發生任何變化(例如：人員、設備等)後進行審查並在必要時進行更新。在這些更新中，必須考慮吸取的教訓、工作性質的變化、新技術或程序的開發或法律與規範要求進行更改。

可能參與風險管理和急難救助的離岸風電相關業者及工作人員都能了解離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)之正確程序並於其他緊急情況下應遵循程序，以提高對緊急應變的理解與認識，並加強與國家搜救和應變人員的合作。

急難救助之緊急應變計畫，應包括危機應變小組、應變策略、善後處理等標準作業程序，並應力求機動與彈性，以適應特殊緊急事故，並透過測試與演練，驗證計畫之有效性。

6.2 建議

目前我國離岸風場發生海難之撈救能量明顯不足，建議可事先提出各機關(構)適可用於離岸風力機間、離岸風場航道之各種拖船船型。政府可規劃與民間海難救難公司建立合作關係，以便緊急事故時可以縮短決策時間，並透過政府事先統籌撈救基金或撈救費用，可用於提升政府機關(構)於離岸風場撈救船型，亦可彌補民間搜救的經濟補償。

在成果效益方面，經分析我國離岸風電區域及鄰近港區之船舶交通流資料統計，系統開發時，透過建構一個由 AIS 資料庫，達到船舶位置判斷技術、系統後端資料庫建置。AIS 船舶資訊系統可使離岸工作船航行於離岸風電區

之限制水域時，可自動獲得來往船隻的各類資訊，在很大程度上可以減少船舶和各類海難事故的發生。

故於實際應用時，由於離岸風電區之障礙物，會使雷達無線電波被阻擋，無法探測到障礙於離岸風電區海域環境情況，盲目相信雷達會使離岸工作船之駕駛員措手不及，因此在識別 AIS 船舶是否處於風電禁航區內有一定難度。為解決此問題，使用 point in polygon 演算法做為計算船舶座標點是否在範圍內方法，首先需將風電區與船舶的座標由「二度分帶座標系統」轉換成「經緯度座標系統」，轉換後再透過 PIP 演算法識別船舶是否在風電區內。

基此，擬定「離岸風電區航行風險管理及急難救助手冊(草案)」提供風險管理方面的規劃，並結合離岸風電區船舶 AIS 資料庫與顯示介面系統，做為離岸風場航行安全之依據。

參考文獻

1. IMO & ICAO, International Aeronautical & Maritime Search and Rescue Manual (IAMSAR), 1998.
2. “Report on Horns-Rev VHF Radio and Marine Radar”, Elsam Engineering, DK report to Cap Wind Associates, Doc. No. 186829, Mar. 2004.
3. Swedish Rescue Service Agency, Rescue Services in Sweden,2008.
4. Guardex 2012: Responding to Offshore Wind Farm Emergencies United States National Search and Rescue Supplement to the International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, COMDTINST M16130.2E, September 2009.
5. U. Glasser, P. Jackson, A. K. Araghi, and H. Y. Shahir, “Intelligent decision support for marine safety and security operations,” 2010 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI 2010), pp. 101-107, May 2010.
6. “Guidelines on How to Assess the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors”, EUROCONTROL (European organisation for the safety of air navigation) 9/2010.
7. International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual; IAMSAR Manual, London/ Montreal, 2010.
8. X. Gao, S. Shiotani, and H. Makino, “The study of effective communication of water depth information for prevention of accidents in marine traffic,” 2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET 2012), pp.

265-269, Nov. 2012.
9. International Maritime Organization, Ships' Routeing, 2013 Edition, IMO.
10. Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band, Recommendation ITU-R M.1371-5, 2014.
11. Maritime & Coastguard Agency, Offshore Renewable Energy Installations：Requirements, Guidance and Operational Considerations for Search and Rescue and Emergency Response, 2016.12.
12. UK Royal National Lifeboat Institution, Maritime Search and Rescue Service Implementation Guide, March 2017.
13. The Renewables Consulting Group LLC, New York State Offshore Wind Master Plan, 2017.12.
14. US National Search and Rescue Committee, United States NATIONAL Search and Rescue Supplement to the International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual Version 2.0, 23 April 2018.
15. Swedish Search and Rescue Services, Management Mission Co-ordination Mobile Facilities.

建置高雄港區即時空氣品質推估系統

吳義林　國立成功大學環境工程學系教授
張鴻良　國立成功大學環境工程學系研究助理
楊榮元　國立成功大學環境工程學系研究助理
邱永芳　海洋委員會國家海洋研究院籌備處主任
柯正龍　交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

摘要

高雄港為國內第一大商港，依據國內外研究顯示，港區空氣污染物排放量對該區域污染排放總量的佔比頗高，尤其是硫氧化物(SO_x)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。環保署於 101 年 5 月 14 日增訂細懸浮微粒($PM_{2.5}$)周界空氣品質標準之 24 小時值與年平均值分別為 35 μg/m^3 與 15 μg/m^3。故高雄港在達成國際優質港與綠色港口之目標中，因應空氣品質之改善與緊急防制應變作業，須建置高雄港區之即時空氣品質推估系統。本研究係以美國環保署公布之 AERMOD 模式，結合氣象局之氣象觀測資料與臺灣海域船舶自動辨識系統(AIS)之即時船舶動態資料，建置高雄港區之即時空氣品質推估系統，瞭解其一次原生性空氣污染物(如：NO_x 及 SO_x)之增量，其中港區空污排放量推估來源計有船舶、機具、車輛等。

一、前言

世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切，遠洋船舶肩負貨運或客運在國際間交流的重任，但伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重，再加上港口內運輸工具船舶、裝卸設備與重型卡車等污染排放問題，已不容忽視。

高雄港區現有的監測資料來自港區附近環保單位的測站，或是自行委託民間檢測公司進行移動性的短期監測，亦即透過空氣品質監測車進行監測。如圖 1.1，高雄港附近之環保署空氣品質監測站(紅色三角形)與高雄港之間，都有工廠或工業區，因此其數據較難以代表高雄港區污染排放，對於高雄市周邊的空氣品質狀況。此外，環保署監測項目亦僅針對一般需求或交通源

而設，並非針對港區的影響。另外，空氣品質監測車僅能定期監測，並無法如空氣品質監測站一般，提供長期且連續性的監測數據，因此較難藉此判斷空氣品質的變化，較難掌握各種不同天氣與氣候型態下的污染變化情形。

圖 1.1 高雄港鄰近 EPA 空氣品質監測站位置圖

長期以來國內港埠地區空氣污染物未被列入環保管制項目重點，但依據國內外研究顯示，港區空氣污染物排放量對不容忽視，尤其是硫氧化物(SO_x)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。此外，為提昇環境品質及維護國人健康，環保署於 101 年 5 月 14 日增訂細懸浮微粒($PM_{2.5}$)周界空氣品質標準之 24 小時值與年平均值分別為 35 μg/m^3 與 15 μg/m^3；而為了因應細懸浮微粒之管制，環保署於 104 年 11 月 17 日預告「空氣品質嚴重惡化緊急防制辦法」部分修正。另外，在立法 16 年之後，環保署會同經濟部於 104 年 6 月 30 日公告實施「高屏地區空氣污染總量管制計畫」。故高雄港在達成國際優質港與綠色港口之目標中，因應空氣品質之改善與緊急防制應變作業，有必要建置高雄港區之即時空氣品質推估系統。

1991 年美國氣象協會(AMS)及美國環保署(EPA)的科學家為了共同研究地球表面上控制空氣污染物的傳輸模式，組成 AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee(簡稱 AERMIC)，初始目標焦點放在估計工業污染源鄰近周邊的污染程度，發展了 AMERMOD 模式，AERMOD 模式乃美國環保署最新公告之煙流擴散模式，用以模擬惰性空氣污染物於小範圍(50 公里內)之擴散情形。本研究針對高雄港區建置 AERMOD 模擬平臺，結合交通部氣象局之氣象觀測資料與交通部運輸研究所之臺灣海域船舶自動辨識系統(AIS)之即時船舶動態資料，建置高雄港區之即時空氣品質推估系統，以精進深化高雄港綠色港口形象，使之符合國際海事組織(IMO)與歐洲海港組織(ESPO)規範，提升港口國際形象，確保港區環境安全。

二、文獻回顧

1. 混合層高度

AERMOD 模式所需之氣象資料必須有大氣混合層之高度，當污染物排入大氣邊界層(Atmospheric boundary layer, ABL)後，可經由大氣紊流的作用，在水平及垂直方向上逐漸擴散，若

擴散的時間夠長及無沉降或移除等機制作用，則污染物最終可在大氣邊界層內完全混合。因此，在空氣污染的研究上，習慣將上述之大氣邊界層稱為『混合層』(Mixing layer)。在穩定的大氣環境下，完全混合是很難達成的，此時『混合層』一詞的使用亦較大氣邊界層為佳，因為前者是強調混合的過程而非指結果。Seibert et al(2000)對混合層高度定義：『混合層高度，係指由地面往上至某一大氣層高度，任何被排入或捲入此高度範圍內之污染物或其他物質，可經由大氣對流或機械紊流作用，在大致 1 小時內擴散至此高度範圍內之其他地方』。故若將大氣邊界層僅定義為緊鄰地面紊流主控的高度範圍，則混合層與大氣邊界顯然同義。不過有時大氣邊界層有其他定義，例如當其定義為夜間輻射影響的高度範圍時，此時混合層與大氣邊界層的高度是明顯不同的，在此情況下，大氣邊界層高度通常大於混合層高度。

混合層高度在不同的地區與時間均不相同，影響混合層高度變化的原因包含大氣水平傳輸及日照輻射所引起之對流作用，通常在晴朗無雲的夜晚，混合層高度達到最低，可能僅有數十公尺高，清晨以後因日照作用，大氣在垂直方向之對流增強，混合層高度亦逐漸昇高，在午後大氣垂直對流到達最強時，混合層高度可上昇至 1000~2000 公尺，傍晚後因日照減弱及地表輻射冷却作用，混合層高度會迅速降低。就四季變化整體而言，當中以夏天的日照對流最強，因此平均混合層較高；而冬天則因日照對流最弱，因此平均混合層高度最低。

混合層高度(Mixing height, MH)為空氣污染模式之重要輸入參數，混合層高度決定了污染物在垂直方向上可以擴散的最大高度，許多空氣品質模式的前處理都必須進行混合層高度的計算，例如傳統的高斯煙流模式，美國環保署之 ISC(Industrial Source Complex)空氣品質模式之輸入必須包括逐時之混合層高度資料，而模式內假設污染物僅能在混合層內擴散，無法穿越混合層高度，因此混合層高度之低估(或高估)將直接導致模式高估(或低估)污染物地面濃度；對於複雜之網格或軌跡空氣品質模式，混合層高度則是估算垂直擴散係數 Kz 之重要參數，垂直擴散係數為污染物在垂直方向上擴散之主要控制機制，一般之空氣品質模式，包括國內在使用之 TAQM(Taiwan Air Quality modeling，張，2001)、CMAQ(Community Multiscale Air Quality，吳，2001)、CAMX(Comprehensive Air Quality Model，曠，2001；陳，2001)，其模式內部均假設 Kz 在混合層內具有一定的分佈特性。如圖 2.1，在不穩定的大氣條件下，一般是假設在 1/2 混合層高度處，垂直擴散係數為最大，在此高度往上延升至混合層高度，Kz 由最大值下降至零；同理，在 1/2 混合層高度處往下至地面，Kz 值亦由最大值下降至零。由此可知混合層高度之估算錯誤，將致使空氣品質模式有關 Kz 值估算之錯誤，間接導致模式估算結果之誤差。

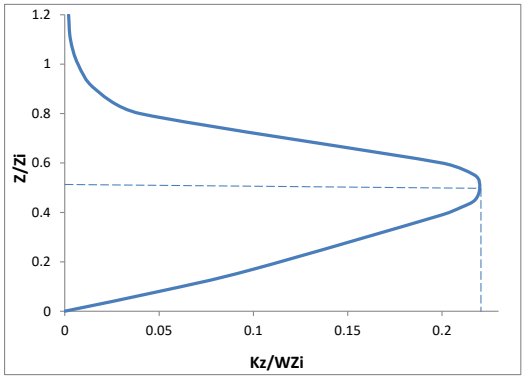


圖 2.1 混合層高度與垂直擴散係數之關係

2. 空污擴散模式

AERMOD 模式屬高斯擴散模式，常被使用於計算污染源下風處的濃度，而由於環境中的空氣污染物來源種類眾多，排放物種又多有重疊，因此國內外普遍作法皆為建立排放清冊，從源頭具體瞭解污染排放的比重。然而眾多的排放量中，不等同於對環境的影響比重，因為污染物從排放源排到大氣後，會受到排放高度、氣流、風速、風向、溫度、濕度、地面輻射.....等等各式各樣大氣條件的影響，造成污染物擴散、稀釋、移動或沈降。雖然可以建置空氣品質測站，取得最直接的影響數據，但是監測標的物種通常為最終產物，並無法釐清來源，因此亦無法知道此期間污染源造成的影響比重。

若要釐清污染源對環境的實際影響，可以間接使用模式模擬的方式進行。目前可行的方式有兩類，一為受體模式，另一為大氣擴散模式。其中受體模式是利用質量平衡的原理，必須先知道各主要污染源的排放特徵組成(Source Profile)。而大氣擴散模式除了以各污染源作為重要的推估依據外，還需代入各項大氣條件，以模擬污染源排出後擴散至環境中的情形，並呈現出污染物的空間分布情形。如圖 2.2。

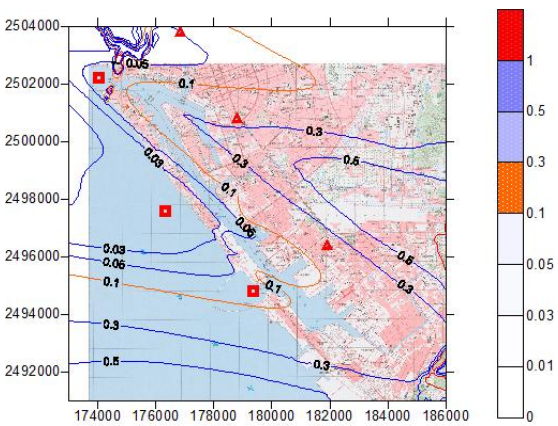


圖 2.2 污染物擴散空間分布示意圖

三、研究方法

本研究之執行流程如圖 3.1，建置高雄港區之地形資料，同時藉由即時下載之地面氣象觀測資料，用以計算大氣穩定度，之後再利用穩定度及其他氣象參數推算混合層高度，以建置執行 AERMOD 模擬所需之氣象資料；另外經由 AIS 系統及勞氏資料庫取得船舶相關資訊，用以推估船舶之污染物排放量，藉此建立模式模擬相關資訊。待模式建置完成後，則能利用此模式系統推

估污染物之即時空氣品質影響。

其中羅氏法為 1973 年 Nozaki 等人所提出之一種利用地面氣象資料估算混合層高度之方法，考慮大氣邊界層上部之大氣運動情況與氣象參數互相有所關聯，因此可用地面氣象資料來估算混合層高度，本方法之優點為不需要探空之氣象資料即可估算，其估算公式如下：

$$L = \frac{121}{6}(6 - P)(T - Td) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \times \ln(\frac{Z}{Z_0})} \quad \text{……..(3-1)}$$

其中：

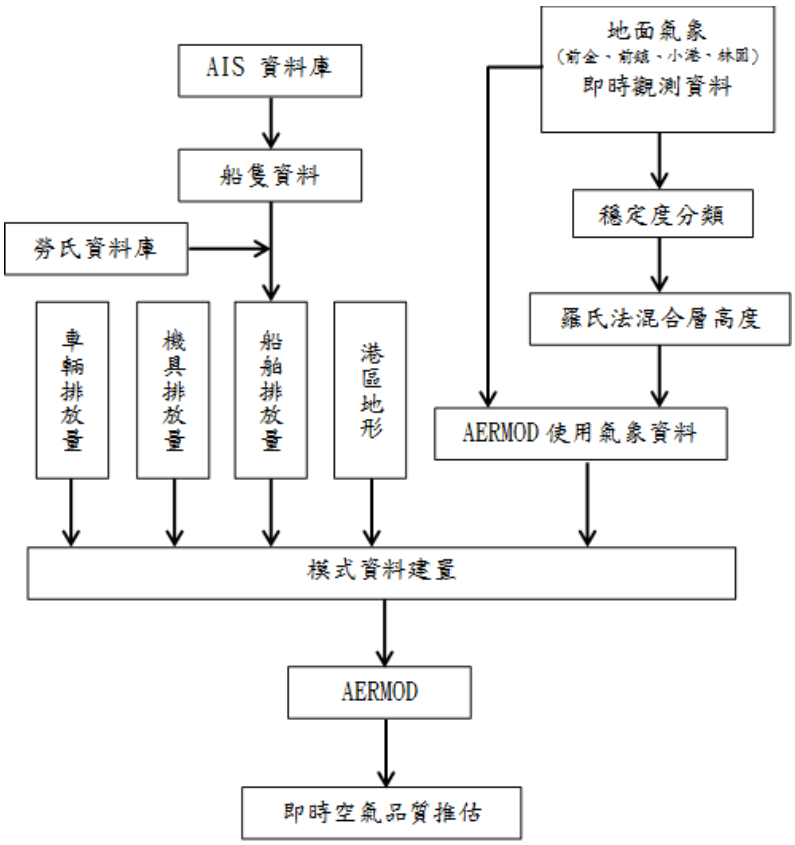


圖 3.1 空氣品質推估建置流程圖

本研究模擬範圍以高雄港為主，及鄰近部分高雄市區之地形高程資料；若為複雜地形則可模擬煙流隨著地形擴散的情形，藉以了解污染物擴散的影響範圍。其中地表資料運用交通部運輸研究所 2013 年度 UAV 攝影測量所得之地表高程資料，初始網格間距為 5m*5m，因僅有包含高雄港區域，故搭配模式支

援中心提供之 terr200 地形高程資料，補足攝影高程缺值的部分，利用克利金內差修正為 100m*100m 網格，使高程資料能夠遍布模擬範圍。

高雄港區排放量推估計有遠洋船舶、港區船舶、機具、車輛等四種，由於機具、車輛並無即時資料，本研究依 2015 年高雄港區空氣污染擴散與監測系統規劃之研究所建置之機具、車輛排放量使用之；而船舶類排放推估則可透過圖 3.2 排放量推估流程圖推估。

透過 AIS 資料庫抓取船舶 IMO 編號，對應勞氏資料庫中之 IMO 編號，若有符合之船舶，則再度抓取 AIS 資料中同一船舶之呼號，若同一筆船舶資料中，其 IMO 編號與呼號均相同，則認定勞式資料庫與 AIS 資料為同一艘船；接著撈取勞式資料庫中此一船舶之船舶種類、最大船速、主引擎功率、輔助引擎功率以及鍋爐功率等參數。

其中最大船速搭配 AIS 資料中之船速、航行狀態，以計算該船舶之負載(LF)，同時抓取之引擎功率再利用引擎排放係數(EF)、燃油校正係數(FCF)以及負載情況，計算船舶排放量。

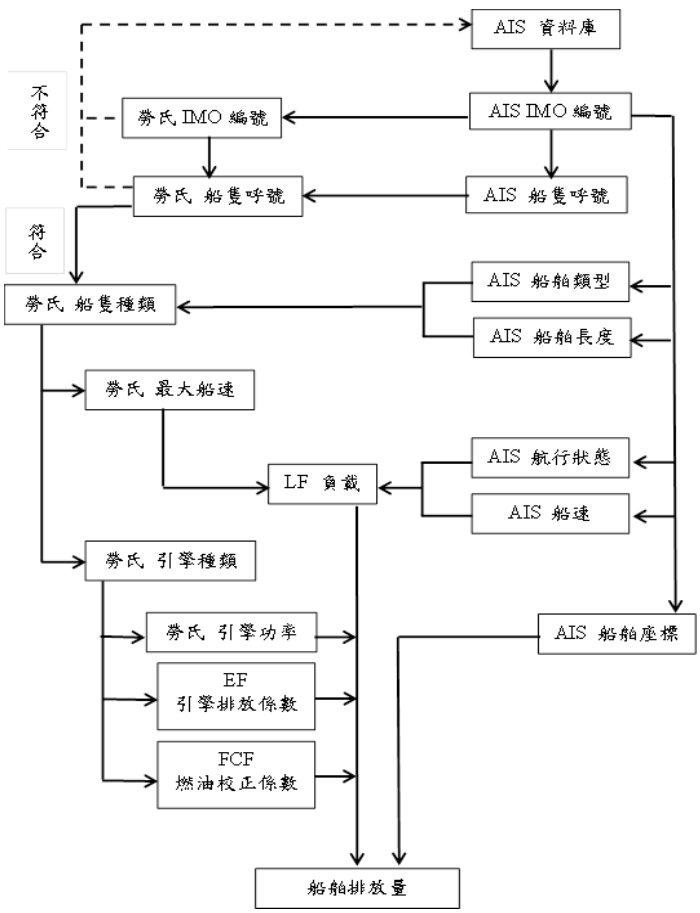


圖 3.2 排放量推估流程圖

1. AIS 資料庫

依據交通部運輸研究所之 AIS 系統，其檔案格式為逗號分隔之 csv 檔案，資料共計有 10 個欄位，依序分別為 IMO 編號、船舶呼號、航行狀態、航速、經度、緯度、船舶類型、船長 A、船長 B 以及記錄時間。

又 AERMOD 模式模擬時，船舶之座標系統須轉換為直角坐標系統，本研究使用之座標系統為 TWD97 座標；故 AIS 資料中之經緯度座標必須另外再做轉換。一般座標轉換公式為一漸進收斂方式，應用上雖然較廣泛，但使用上較不方便；故本研究運用回歸方式，取得高雄港區附近之回歸公式，可直接利用公式轉換座標，應用範圍侷限高雄港區，但精確度以及轉換效率皆有提高。回歸結果如圖 3.3 及圖 3.4 所示，其中 X 軸方向之轉換公式為 y = -0.0015x2 + 103.51x + 147095，Y 軸方向之轉換公式為 y = 110773x - 3313.1。

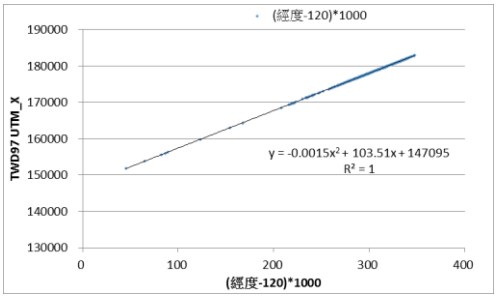


圖 3.3　高雄港區經度座標回歸

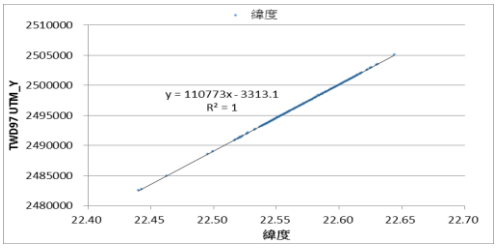


圖 3.4　高雄港區緯度座標回歸

2. 勞氏資料庫

勞氏資料庫格式為 Access 資料庫格式，供 AIS 對照並篩選引擎工率使用，欄位名稱依序為 IMO 編號、呼號、總噸、總長、主船種、引擎數量、轉速、引擎馬力、引擎種類、最大船速、標準貨櫃數、輔助引擎功率、鍋爐功率以及引擎判斷 Tier 之時間。

3. 船舶排放量

由於船舶種類眾多，若依據 California Air Resources Board(CARB)定義，只要符合下列三項其中一項條件，則歸屬於遠洋船舶類型(Ocean Going Vessel, OGV)：

1. 船舶長度總長(Length Overall, LOA) 400 呎(122 公尺)或以上。
2. 船舶重量總噸位(Gross Tonnage, GT) 10,000 頓或以上。
3. 船舶使用柴油引擎，且汽缸排氣量達 30L 或以上。

遠洋船舶排放量推估公式如下：

$$E = Energy \times EF \times FCF \quad \text{.....(3-2)}$$

其中：

E：引擎的排放量(g)

Energy：所需要的能量(kW·h)

EF：排放係數(g/kW·h)

FCF：(HFO)燃料校正係數

又排放量推估公式中所需要的能量，可藉由下列公式推估之：

$$Energy = MCR \times LF \times Act \quad \text{.....(3-3)}$$

其中：

MCR：最大引擎動力(kW)

LF：負載係數

Act：活動量(hr)

因為在船舶註冊資料中如勞氏資

料庫，一般只有少數船舶登記輔助引擎甚至鍋爐的資料，其船舶資料或有缺值的情況產生，因此只能藉由相關研究資料取得各型船舶的船重、最大船速及引擎功率等資料，作為無資料船舶的預設值。

主引擎的排放係數與引擎的製造年份、引擎種類以及引擎轉速的快慢有關，柴油引擎依照引擎的製造年份，2000 年以前由於 IMO 並未規範引擎的環保標準，因此為 0 期引擎(Tier 0)，又 2000 至 2010 年生產的引擎為 1 期引擎(Tier 1)，而 2011 至 2015 年生產的引擎則為 2 期引擎(Tier 2)，共區分為 3 個期別。其中引擎最大轉速又可區分為轉速低於 130rpm 的慢速引擎(Slow Speed Diesel)以及轉速大於 130rpm，一般則介於 400~2000rpm 之間的中速引擎。另亦區分有氣體渦輪機引擎(Gas Turbine)及蒸汽渦輪引擎(Steam Turbine)兩種。一般船舶使用含硫量 2.7%之重油(HFO)的排放係數，若船舶進港之前即將重油切換為柴油，則需使用柴油之係數，另外再根據硫含量以不同的油料校正係數校正之。船舶引擎使用不同的燃油，其污染排放量會隨之變化，主要為油中含硫量的差異，會造成 SO_2 的排放量不同，而 SO_2 又是衍生性粒狀物的主要生成來源，因此連帶會影響 PM_{10} 、$PM_{2.5}$ 及 DPM 的產生。

四、研究結果

1. 高雄港附近高程地形之建置

圖 4.1 為已完成之高雄港區 100 m 網格間距地形之等高線圖。由圖中可知，港區外圍靠海處往內陸高雄市區約 8 公里之陸地處，地形高程起伏僅上升約 10 公尺上下，顯現模擬範圍內地形尚屬平坦，唯有西北側之壽山，最大高度 356 公尺，然而模擬範圍內最大高度則為 158.46 公尺，位於 (174700, 2504000)處，東南側竹坑區域，亦有少部分區域超過 100 公尺。

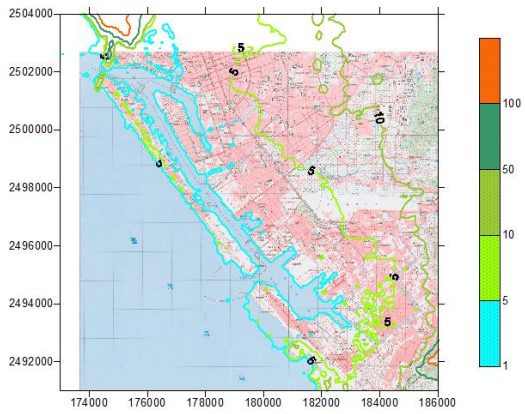


圖 4.1 高雄港附近高程地形

2. 混合層高度比較

當取得地面測站觀測數值後，可先行計算 Pasquill 的穩定度，再依據不同的穩定度結果代入羅氏法公式，以計算混合層高度，在計算混合層高度使用參數中，地表粗糙度為 0.0001 m，地轉角

速度則為 7.27E-05 rad/s。若以 2014 年取得之地面測站觀測值，計算各測站混合層的高度，其結果依照穩定度計算之不同，列舉 1 月、4 月、7 月及 10 月結果如圖 4.2。其中 1 月混合層最大高度介於 800m~2200m 之間，4 月混合層最大高度介於 400m~1400m 之間，7 月混合層最大高度介於 600m~1400m 之間，10 月混合層最大高度則介於 800m~1400m 之間。

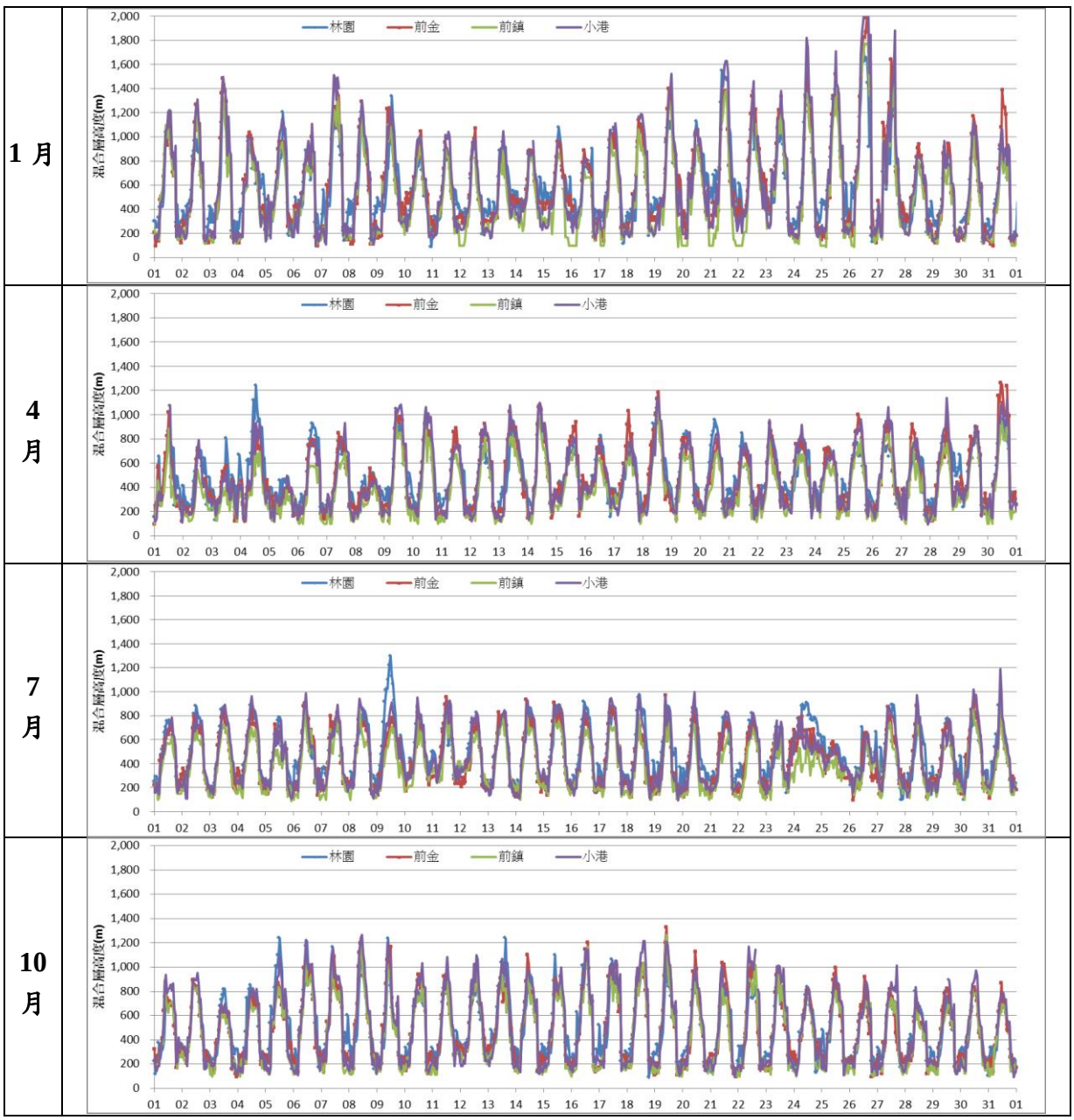


圖 4.2　混合層高度計算比較

3. 日夜變化差異

若將4站之混合層高度全年計算結果，分別將各站同時段之混合層高度平均；同理，亦將 AQMC(空氣品質模式支援中心)全年之同時段結果平均。將平均結果依序由 0 時至 23 時製作成圖，形成日夜變化趨勢圖，結果如圖 4.3。若將混合層推估值定義為 A，AQMC 實際混合層高度為 B，則定義混合層高度差異百分比為(A–B)/B，絕對差異百分比為(A–B/B)之絕對值，如圖 4.4。混合層日夜變化中，前金混合層最大高度783.8 m，與實際混合層高度差異值介於-19.36%~28.82%，差異絕對值則介於2.82% ~28.82%；前鎮最大高度686.5m，差異值介於-32.57%~17.23%，差異絕對值則介於 3.22%~32.57%；小港最大高度 810.7m，差異值介於-23.85%~26.69%，差異絕對值則介於0.81%~26.69%；林園最大高度772.3m，差異值介於-12.89%~31.89%，差異絕對值則介於 2.19%~31.89%。四站混合層最大高度均發生在 13 時。

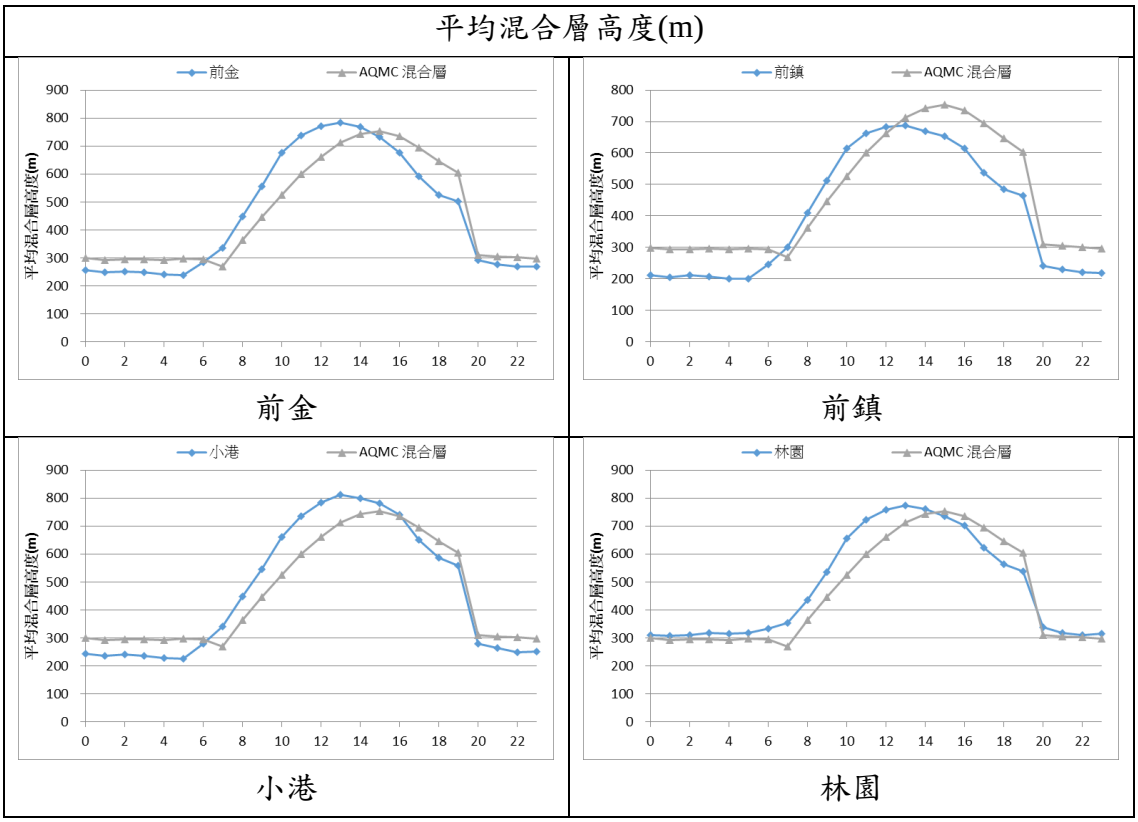


圖 4.3　逐時平均混合層高度

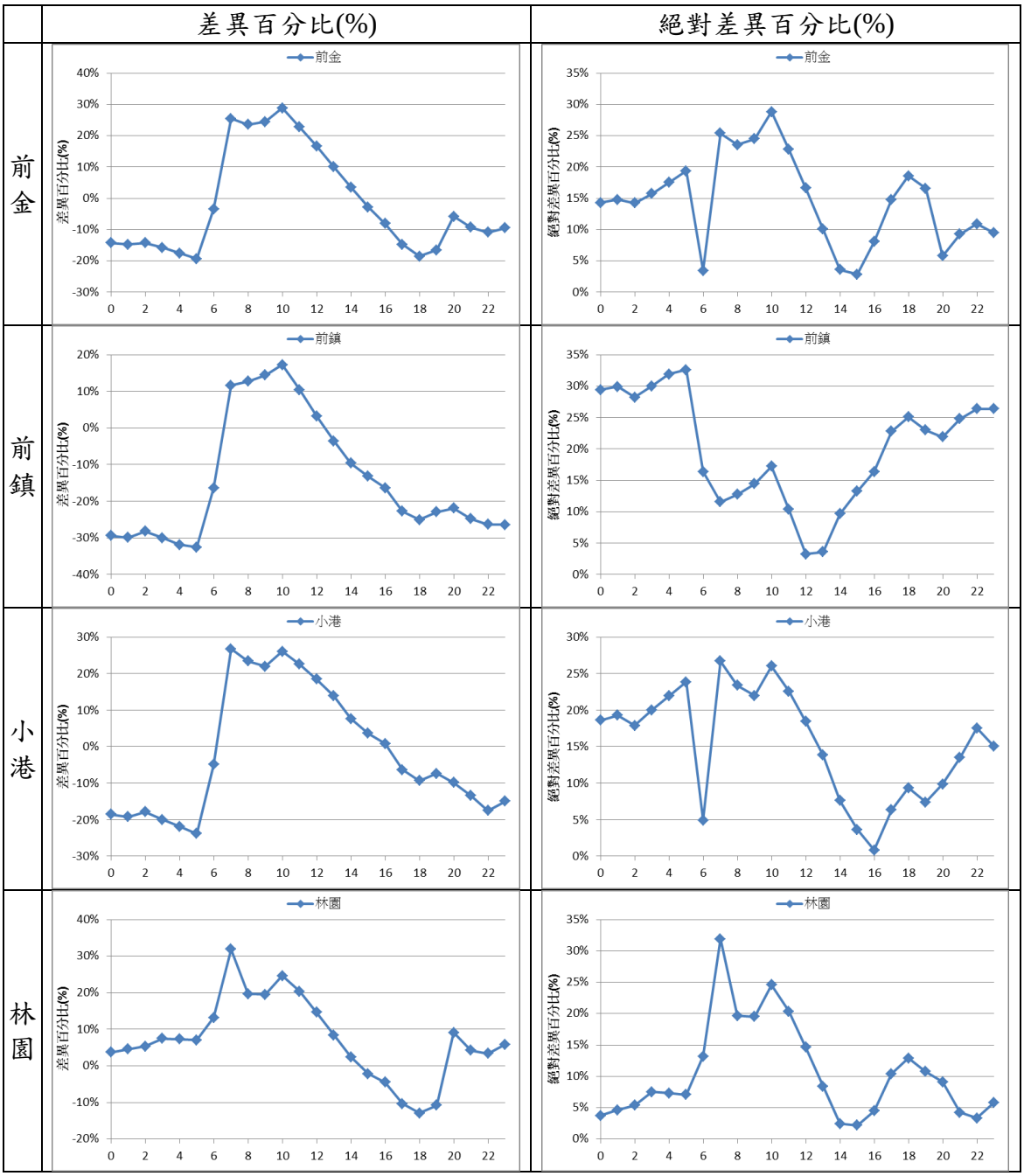


圖 4.4　逐時日夜變化差異比較

4. 季節變化差異

若將四站之混合層高度全年計算結果，分別將各站同月份之混合層高度平均；同理亦將 AQMC 全年之同月份結果平均，將平均結果依序由 1 月至 12 月製圖成全年變化趨勢圖，如圖 4.5，差異變化則如圖 4.6。混合層季節變化中，前金混合層最大高度 597.0 m，與

實際混合層高度差異值介於 -14.27% ~ 19.06%，差異絕對值則介於 0.36% ~ 19.06%；前鎮最大高度 513.6 m，差異值介於 -28.35% ~ 10.37%，差異絕對值則介於 1.56% ~ 28.35%；小港最大高度 599.0 m，差異值介於 -13.62% ~ 19.19%，差異絕對值則介於 0.40% ~ 19.19%；林園最大高度 605.5 m，差異值介於 -6.57% ~ 20.94%，差異絕對值則介於 0.01% ~ 20.94%。四站混合層最大高度均發生在 1 月。

5. 四站平均

將前金、前鎮、小港及林園四站之混合層計算高度平均，再與 AQMC 所提供之同一時間混合層高度做比較，其結果如圖 4.7 所示。其中 1 月混合層最大高度介於 800m~2000m，4 月混合層最大高度介於 400m~1200m，7 月混合層最大高度介於 600m~1000m，10 月混合層最大高度則介於 600m~1400m。

混合層日夜變化最大高度 763.3 m，發生於 13 時，與實際混合層高度差異值介於 -17.17% ~ 24.16%，差異絕對值則介於 0.99% ~ 24.16%，如圖 4.8；混合層季節變化中，最大高度 580.2 m，與實際混合層高度差異值介於 -15.69% ~ 17.43%，差異絕對值則介於 0.50% ~ 17.43%，如圖 4.9。

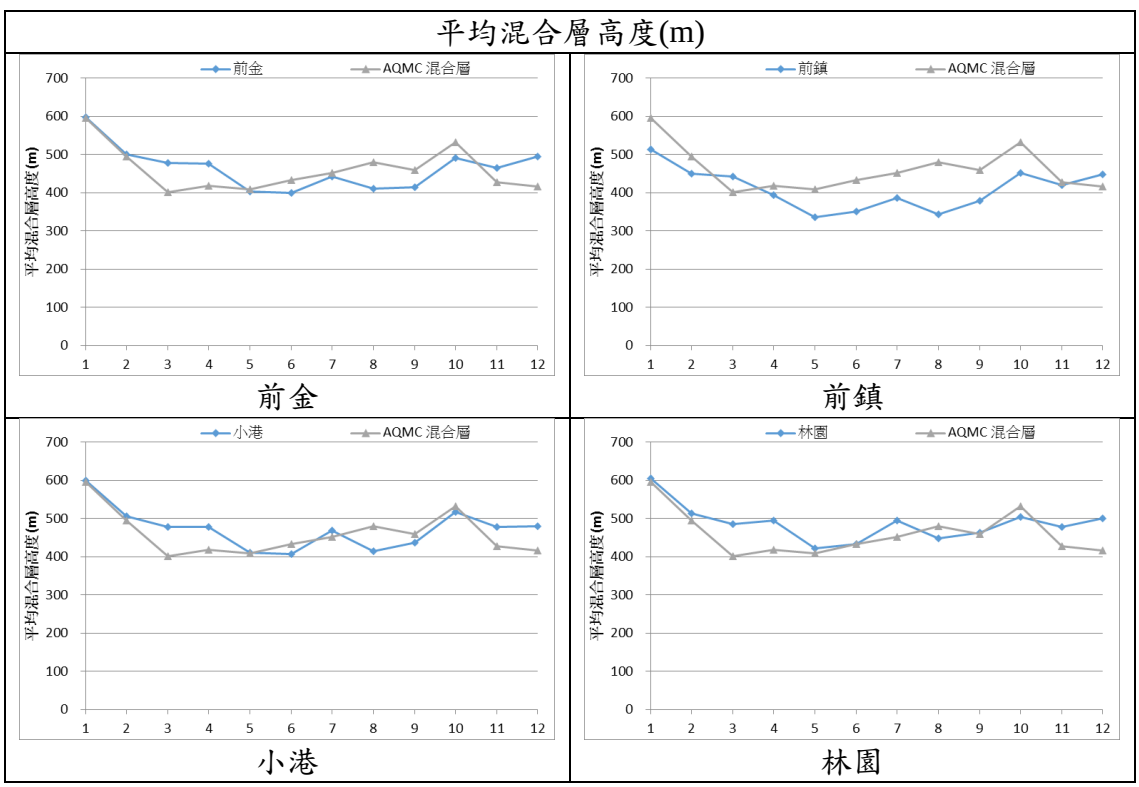


圖 4.5　逐月平均混合層高度

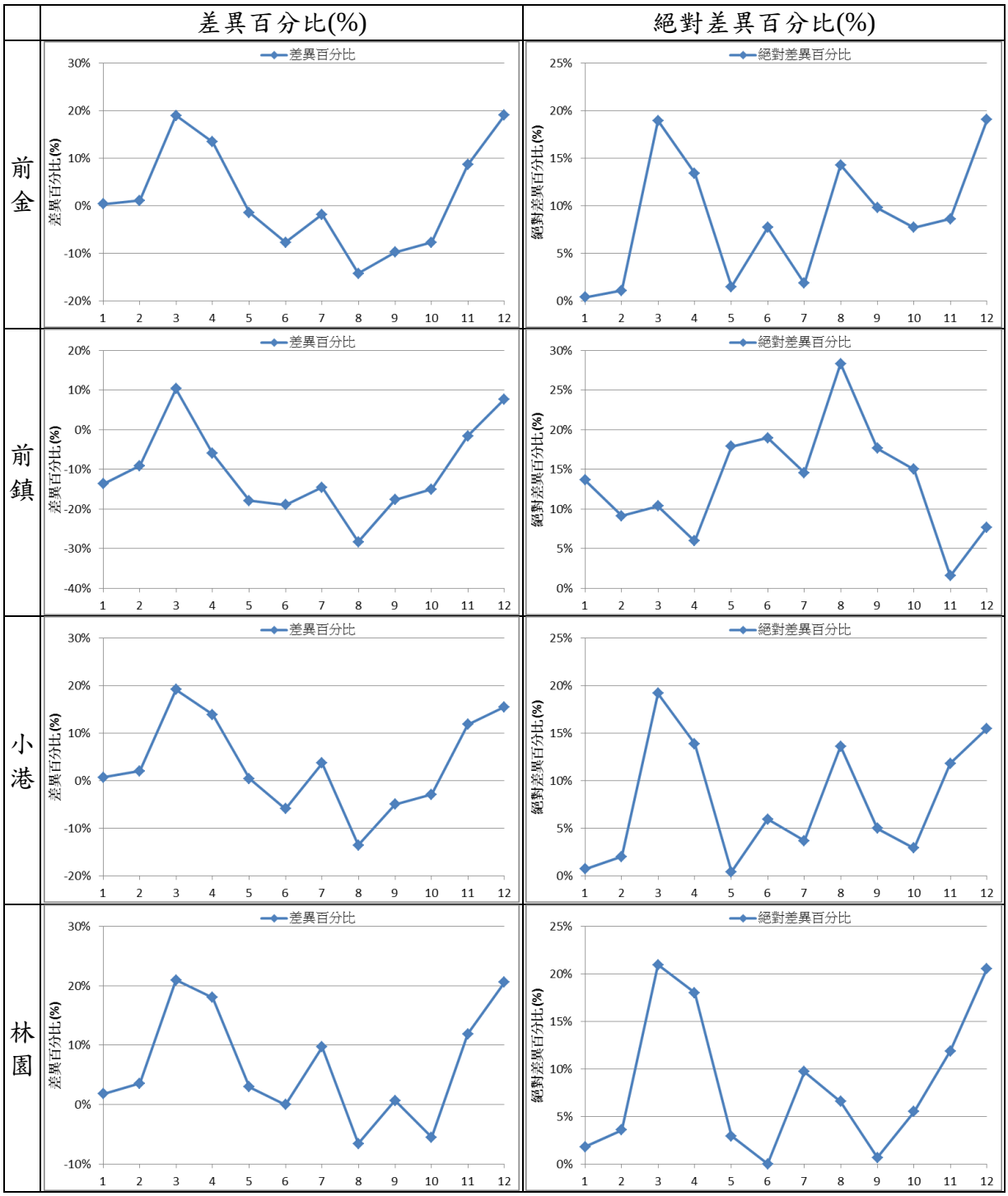


圖 4.6　逐月季節變化差異比較

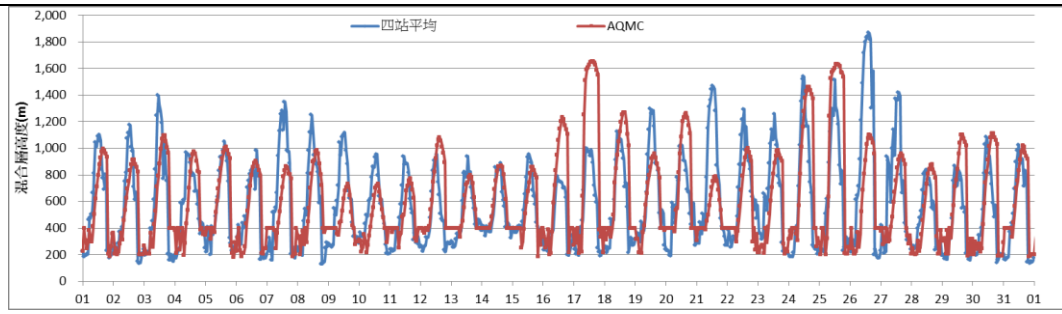
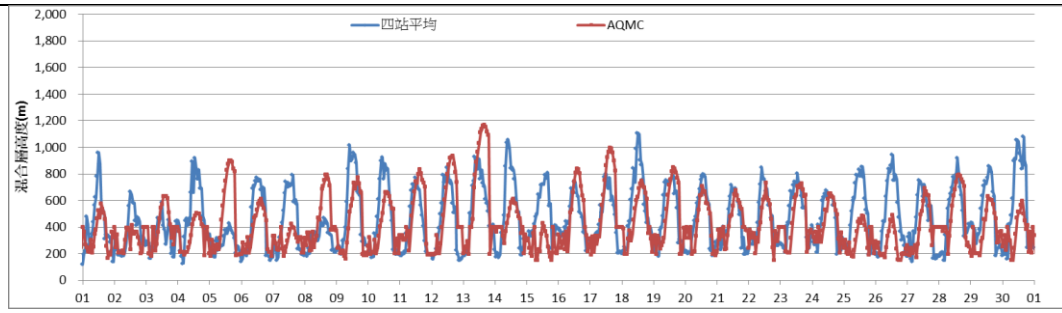
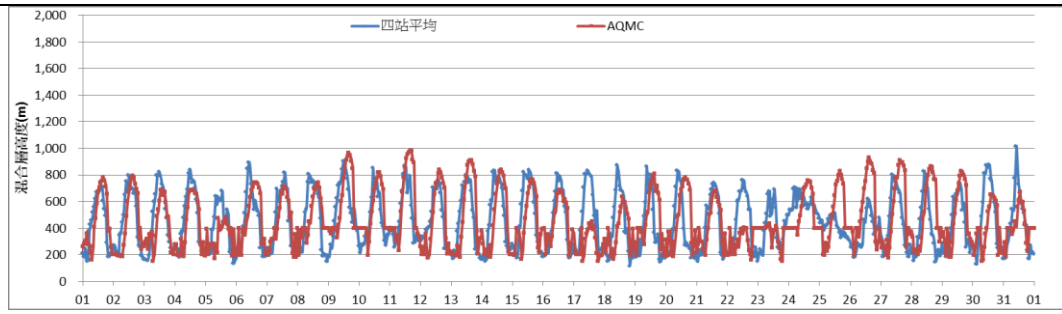
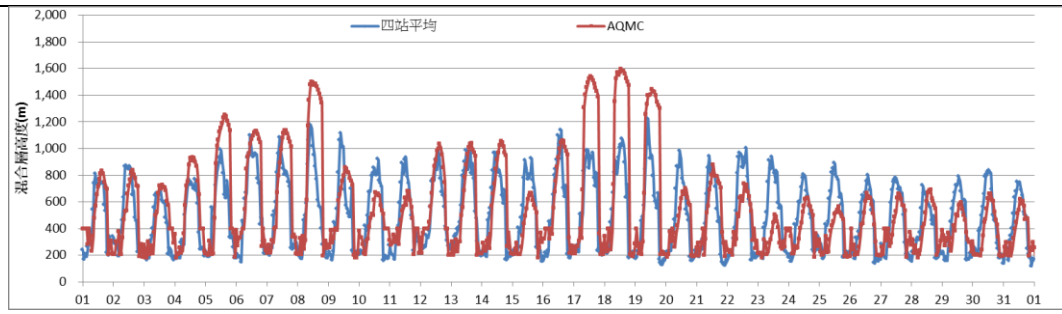
1月	
4月	
7月	
10月	

圖 4.7　四站平均混合層高度比較

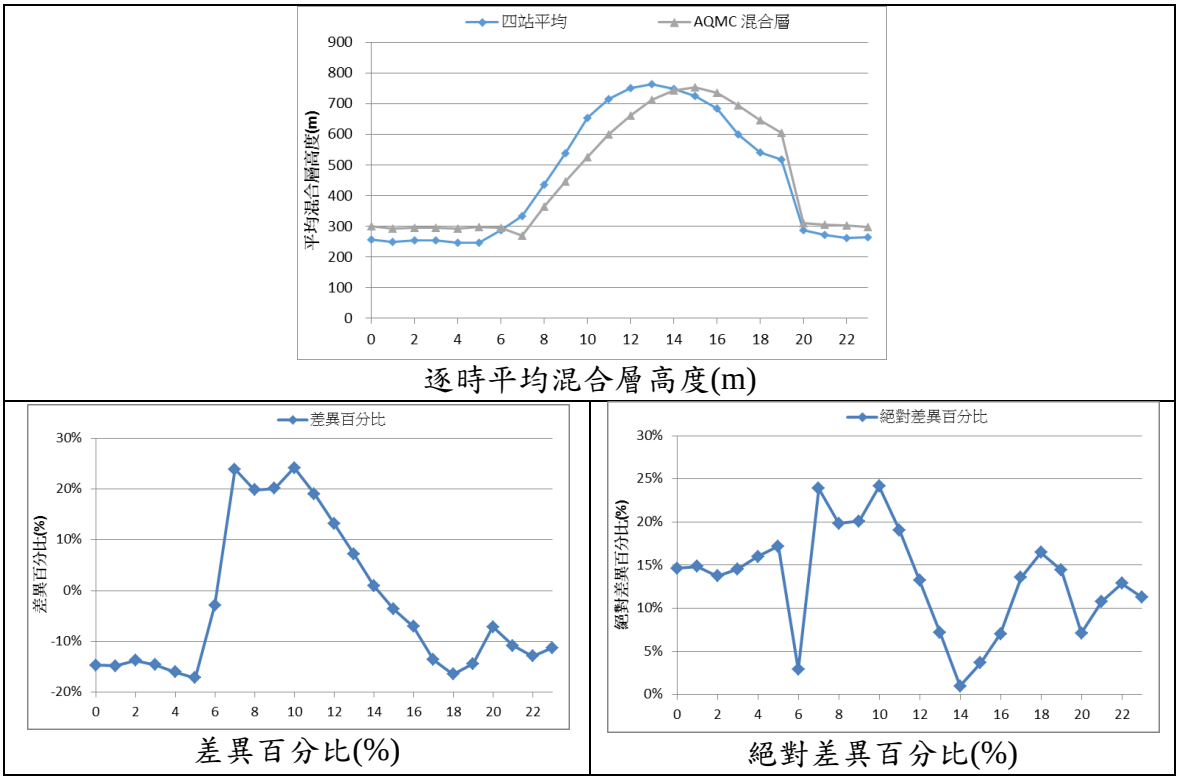


圖 4.8　四站逐時平均日夜變化比較

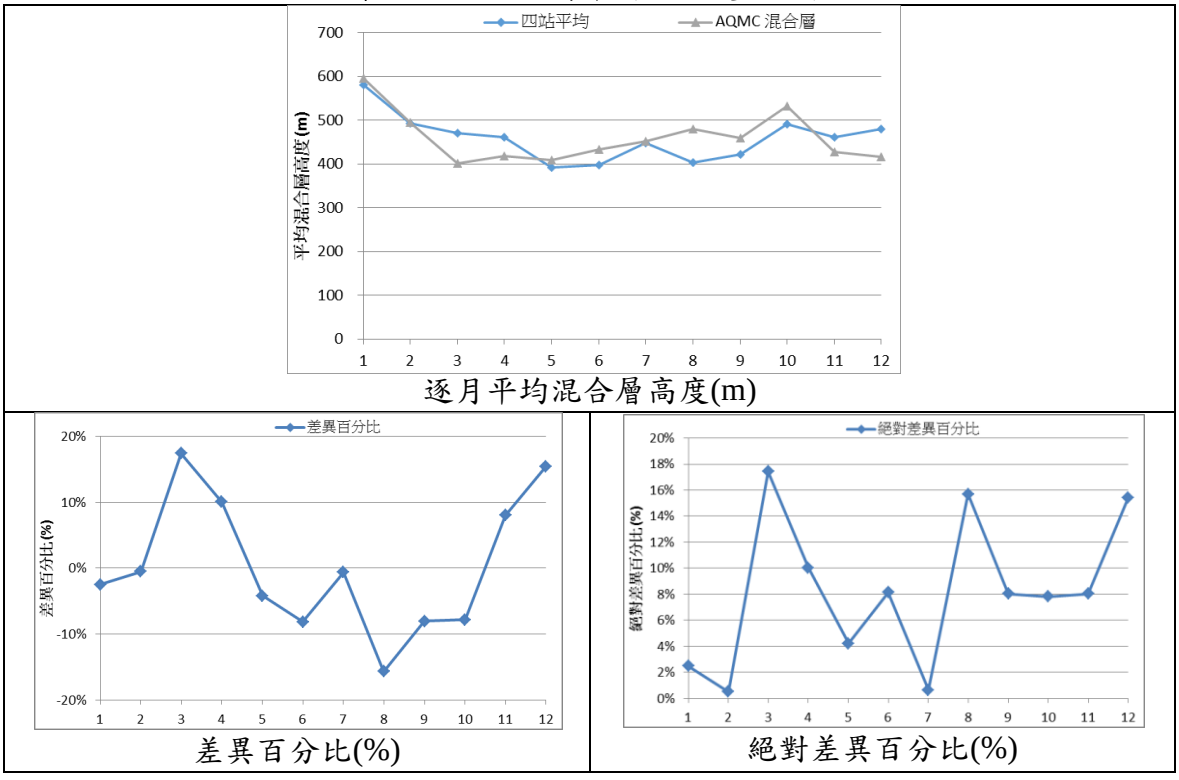


圖 4.9　四站逐月平均季節變化比較

6. 即時推估系統執行結果

即時推估系統模擬結果將於螢幕顯現出各敏感點之推估增量濃度結果，如圖 4.10，並應用 Surfer 繪圖軟體自動繪製出等值圖，以顯現高污染主要分布及擴散區域，如圖 4.11 及圖 4.12。

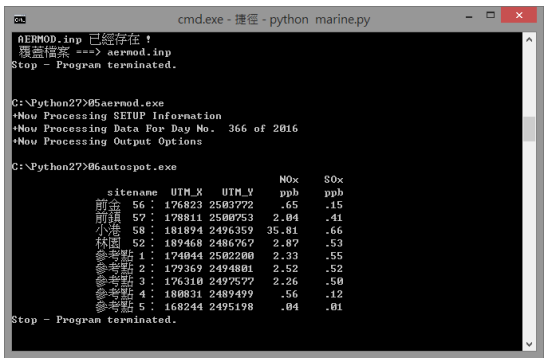


圖 4.10　模擬推估結果

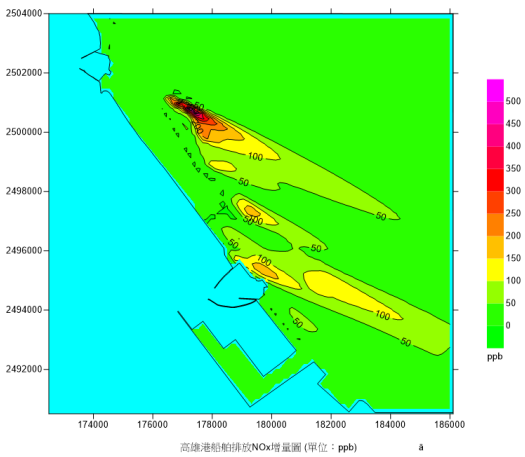


圖 4.11　NO_x 自動繪圖結果

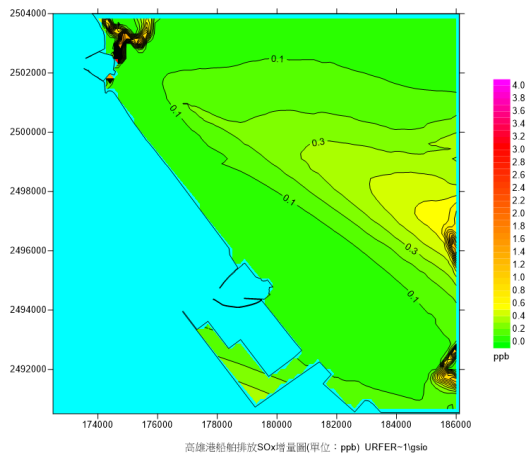


圖 4.12　SO_x 自動繪圖結果

五、結論與建議

1. 四站混合層高度比較，日夜變化最大高度均發生在 13 時，介於 686.5 m ~ 810.7 m，差異值介於-32.57% ~ 31.89%，而差異絕對值則介於 0.81% ~ 32.57%。

2. 四站混合層高度比較，季節變化最大高度均發生在 1 月，介於 513.6 m ~ 605.5 m，差異值介於-28.35% ~ 20.94%，而差異絕對值則介於 0.01% ~ 28.35%。

3. 推估最大值大於環保署測值，顯示系統於該時段有高估之情形，其可能原因包括車輛及機具排放量非即時排放量資料與船舶排放量高估等。推估結果後續可供港區空氣品質管制參考。
4. 系統執行時，建議於獨立之主機進行，並連接有線固定 IP 網路，避免網路因素造成系統無法執行。

參考文獻

1. U.S. EPA. (2004)，“AERMOD: description of model formulation”, pp.1-89.
2. U.S. EPA. (2004)，“User’s guide for the AERMOD meteorological preprocessor.”
3. U.S. EPA. (2004)，“User’s Guide For the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD.”
4. Kumar, A., and Dixit, S. (2006)，"Evaluation of the AERMOD dispersion model as a function of atmospheric stability for an urban area." Environmental Progress 25(2): 141-151.
5. Faulkner, W.B., and Shaw, B.W. (2007)，“Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source.” Journal of the Air & Waste Management Association 58(10): 1288-1296.
6. Zou, B., and Zhan, F.B. (2010)，"Performance of AERMOD at different time scales." Simulation Modelling Practice and Theory 18(5): 612-623.
7. Seibert, P., F. Beyrich, S. E. Gryning, S. Joffre, A. Rasmussen, and P. Tercier (2000) Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height, Atmos. Environ., 34, 1001–1027.
8. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2007)，Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2005. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
9. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2011)，Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2010. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
10. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2012)，Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2011. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo,

WA, 98370.
11. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2013) ，Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2012. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
12. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2014)， Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2013. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
13. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015)， Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
14. Pasquill, F. (1961)， The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. Meteorol. Mag. 90, 33-49
15. Pasquill, F. (1974) ， Atmospheric diffusion. John Wiley and Sons, New York. NY.
16. Pasquill, F. (1974) ， Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling, Part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values, U.S. EPA, EPA-600/4-76-030b.
17. 吳義林、蔡德明(2001)，「The simulation of photochemical reactions in southern Taiwan by Models-3/ CMAQ」，高雄市空氣品質模式技術研討會。
18. 曠永銓、張豐藤、鄭清山、林燦銘、莊銘棟(2001)，「全省性風場建置與全年反軌跡分析」，2001 年空氣品質模式技術研討會。
19. Nozaki K.Y. (1973), “Mixing depth model using hourly surface observations”, Report 7053, USAF Environmental Technical Applications Center.
20. 曠永銓、許佩蒨(2005)，「AERMOD 煙流模式在臺灣地區之應用研究」，中興工程，Vol.88，pp.55-62。
21. 交通部運輸研究所(2015)，「高雄港區空氣污染擴散與監測系統規畫之研究」。
22. 交通部運輸研究所 (2016)，「104 年高雄港區空氣污染擴散與監測
23. 系統規劃之研究」
24. 陳茂雄(2016)，「高雄港區空氣品質影響之模擬分析」，輔英科技大學環境工程與科學研究所碩士論文。
25. http://www.cwb.gov.tw/V7/forecast/ UVI/uviknowledge.pdf。
26. https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm

臺灣商港水下金屬材料一年期腐蝕速率調查研究

羅建明　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
胡啟文　交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
黃宇謙　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
柯正龍　交通部運輸研究所港灣技術研究中心第一科科長

摘要

臺灣地處亞熱帶，屬高溫、高濕、高鹽的海島型氣候，金屬構件甚易腐蝕。為此，有必要建置屬於本土的水下腐蝕環境資料及腐蝕因子資料庫，以利日後結構物於防蝕設計與維護管理的依據。

本研究主要工作項目包括：1.水下金屬材料腐蝕長期暴露試驗，2.建立水下腐蝕因子資料庫，3.研究成果分析比較，4 完成臺灣腐蝕環境資訊系統水下腐蝕速率資料庫建置工作。

各港區第 1 年不同位置金屬腐蝕速率分析調查結果發現，飛沫帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 347~591(μm/yr)，最大腐蝕速率於高雄港#10 碼頭 591(μm/yr)，低碳鋼介於 377~584 (μm/yr)，最大腐蝕速率於馬祖福澳港 584(μm/yr)。潮汐帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 222~963(μm/yr)，最大腐蝕速率於布袋港 963(μm/yr)，低碳鋼介於 239~931(μm/yr)，最大腐蝕速率於布袋港 931(μm/yr)。水中帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 123~513(μm/yr)，最大腐蝕速率於高雄港 #75 碼頭 513(μm/yr)，低碳鋼介於 118~504 (μm/yr)，最大腐蝕速率於布袋港 504(μm/yr)。

不同金屬水下腐蝕速率分析，第 1 年碳鋼金屬暴露試驗結果，飛沫帶最大腐蝕速率發生於基隆港 871(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率於布袋港 969(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率於高雄港#75 碼頭 513(μm/yr)。第 1 年低碳鋼金屬暴露試驗結果飛沫帶最大腐蝕速率於基隆港 960(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率於布袋港 931(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率於基隆港 519 (μm/yr)。

一、前言

臺灣為四面環海，沿海除了有海港碼頭、防波堤等港工設施外，鑽油平

台、跨海大橋等皆處於海洋環境中。而一遇颱風來襲則造成重大損失，如民國八十三年提姆、道格颱風過境，造成花蓮港、蘇澳港、龍洞遊艇港及高雄港等各港口，多處港工設施之破壞、沉陷等重大損害。究其原因，各港工結構面臨險惡之海洋環境而被腐蝕、侵襲，造成材料之彈性疲乏，強度損失，以致使用年限大為縮短應為重要因素之一。

港工結構所使用的材料，除了石料之外、主要為鋼構材料及混凝土或鋼筋混凝土材料為主。其中鋼構材料如鋼板樁、鋼管樁及配合使用之拉縴鋼纜等各型鋼料，材質均有不同。其腐蝕之現象，由於在不同海域環境、季節、深度會產生不同腐蝕速率。根據本所過去所做相關研究報告中，在臺灣各大港口中，使用鋼構材料的碼頭大多為鋼版樁式。發現其鋼版樁有嚴重破損、穿孔之腐蝕現象，以致部分碼頭壁後砂石掏空，岸肩沈陷，嚴重影碼頭之結構安全。如蘇澳港之駁船碼頭，鋼板樁年腐蝕率超過 0.2mm/yr，其他各港口亦有類似現象。隨著時空、氣候變遷，為達到結構物**耐久性**與防蝕設計須求，若仍引用過時且不完整之調查數據，對結構物之耐久性與腐蝕速率的估算恐會產生過與不及的虞慮；臺灣近 10 年來並無任何單位進行完整性全島區域之水下腐蝕因子之調查與研究，因此延續過去相關研究，進行水下環境腐蝕因子及金屬材料水下長期曝放試驗與資料庫建置計畫，作為新建與既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考。今將過去臺灣地區水下腐蝕試驗相關研究歷程整理(如表 1)所示。

表 1 臺灣地區水下腐蝕試驗相關研究歷程

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
交通處港灣技術研究所 中國鋼鐵公司 工材所	臺灣海域腐蝕特性防蝕設計 材料選用及開發特性[1][2]	本研究主要探討海洋結構物與鋼筋混凝土材料於各海域腐蝕特性，開發設計陰極防蝕工程、防蝕塗料材料、表面被覆構件腐蝕偵測技術及比較各種金屬〈如碳鋼、不銹鋼、鋁合金等〉之水下腐蝕速率，並邀請國內外專家學者來講述防蝕技術及推廣教育工作，並協調各施工單位，擬定長期合作計畫。	1986.07-1991.06
交通處港灣技術研究所	港灣 R.C 結構物之耐久性研究[3]	針對港灣 R.C 結構物之耐久性提供良好之設計與施工規範，提出港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究計劃，並對各港之 RC 結構物之腐蝕特性作一通盤性之了解。	1986.07-1991.06
交通處港灣技術研究所	澎湖跨海大橋腐蝕問題研究調查[4]	1986 年中美聯合防蝕研討會中指出我國交通橋樑及主要公共措施應定期舉行腐蝕調查及安全性評估。會後行政院科技顧問組即指示進行初步調查研究。成果如下:了解澎湖跨海大橋腐蝕惡化現象之機理，作為新建工程設計及施工防範及維修參考，提高施工技術及工程品質，減少腐蝕造成損失。增進對鋼筋混凝土等營建材料耐	1987.01-1987.12

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
		久性之認知，提供各單位作相關研究基礎與方向。使用之調查方法及研究方法，可作為鋼筋混凝土腐蝕偵測之參考，並.提供修補及防蝕對策。	
交通處港灣技術研究所	港灣鋼結構物耐久性研究[5] [6] [7] [8]	1.了解港灣鋼結構物能在設計使用年限內安全發揮功能，建立定期檢查制度及優先考慮裝設適當之防蝕措施。 2.建立現有各港口鋼結構物耐久性之完整資料，以利日後新建鋼結構或維修現有鋼結構物之規範。	1989.07-1994.06
交通處港灣技術研究所	港灣 R.C 結構物修理系統評估研究[9]	各大港口 R.C 結構物之現況作一調查，並對其修理方法通盤瞭解並檢討優劣點。	1992.07-1993.06
交通處港灣技術研究所 海洋大學	港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究[10]	延續港灣鋼結構物之耐久性研究進行高雄港與基隆港之鋼板(管)樁腐蝕調查，探討水文及污損生物對陰極保護、防污塗料、混凝土、不銹鋼、裸鋼等材料腐蝕之影響。	1995.06-1996.07
交通處港灣技術研究所	水文及污損生物對材料腐蝕之探討研究[15]	於基隆港碼頭擺放試架觀察海生物附著種類，探討材料 Alsl1015 碳鋼、Alsl304 不銹鋼，防止海生物附著油漆塗料，犧牲陽極，水深與水文及污損生物之關係。	1995.01-1995.12
交通處港灣技術研究所	現有結構物安全評估及維護研究[11] [12] [13] [14]	調查基隆港、蘇澳港、高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，並檢討其對港灣常用材料如碳鋼及混凝土等之腐蝕及海生物附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。	1996.06-2001.07
交通部運研所港灣技術研究中心中山大學	高雄港港工結構材腐蝕與海生物附著研究[17]	調查高雄港區內港工結構材料之海生物附著種類，檢討其對港灣常用材料如碳鋼及混凝土等之腐蝕及附著影響，以及探討添加飛灰之混凝土與安裝犧牲陽極材料對於防制海生物附著或材料腐蝕之效果。	2000.01-2000.12
港灣技術研究中心	碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究[18]	進行基隆、花蓮、台中、高雄、蘇澳等港口之碼頭鋼板(管)樁調查，藉由對碼頭鋼板(管)樁腐蝕現況之長期監測，得以提供相關之本土資訊，作為設計及維護參考，並整理歸納影響鋼板(管)樁腐蝕之因子探討適用於本島碼頭鋼板(管)樁腐蝕防治方法。	2001.01-2001.12

研究單位	研究方向	研究說明	研究期間
港灣技術研究中心	金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2)[19] 金屬材料水下腐蝕調查研究(2/2)[20]	建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以作為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考需要，安裝水下金屬暴露試驗架於基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門尖山港等國內商港，藉此了解在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對港區金屬材料腐蝕之長期研究。	2015.01-2016.12
港灣技術研究中心	臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4)[21]	進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架試片第一年取樣作業及水質化學試驗相關分析。	2017.01～2018.12

二、研究目的及效益

2.1 研究目的

本研究計畫的主要目的為進行臺灣沿岸地區金屬材料在海水下腐蝕因子之調查試驗研究，為建立完整的腐蝕因子資料庫，完成臺灣水下金屬腐蝕資料庫建置，以利日後新建與既有金屬或鋼筋混凝土結構物之防蝕設計與維護管理的依據。

2.2 預期效益及其應用

1. 藉由水下長期暴露試驗數據，繪製金屬於各港在不同期程腐蝕趨勢變化圖，瞭解國內水下金屬材料與環境因子之關聯性。
2. 將臺灣沿岸金屬材料在海水腐蝕影響因子之調查試驗，建立數據資料庫，提供產官學研各界辦理構造物耐久性與防蝕設計之參據。
3. 研究成果可應用於後續相關研究及研擬臺灣地區防蝕手冊參酌。

三、研究架構及方法

3.1 研究架構

建立臺灣地區長期金屬材料水下腐蝕資料庫，以作為新建及既有結構物耐久性與防蝕設計及維護管理之參考需要，於 103 年安裝水下金屬曝露試驗架於臺中港、104 年安裝金門水頭及料

羅港、105 年安裝基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、蘇澳港、馬祖福澳港、澎湖龍門港等國內商港，藉此了解港區在不同環境、金屬材料、海洋生物附著、海水水質等對金屬材料腐蝕之長期研究。研究方法、規畫、試片設計與試驗期程(如圖 1)水下腐蝕研究方法與規劃分述：

3.2 研究方法工作項目

1. 國內外水下腐蝕文獻蒐集整理分析。
2. 水下腐蝕因子調查項目：包括海水成分中導電度、溶氧量、酸鹼度、溫度、氯鹽、硫酸鹽之水質環境因子及海生物附著等項目調查。
3. 暴露試驗期程:金屬材料將於第 1 年、第 2 年、第 5 年、第 8 年、第 10 年期程進行暴露試驗。
4. 水下金屬材料腐蝕暴露試驗：針對港灣工程結構金屬材料，碳鋼(SM490A)、不鏽鋼(SS316L)、低碳鋼(SS400)三種金屬，選擇臺灣各商港碼頭，於飛沫帶、潮汐帶、水中帶三個位置進行現地暴露試驗，自 2015 年起已陸續完成建置基隆港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、安平港、布袋港、高雄港#10 碼頭、高雄港#40、高雄港#75 碼頭、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等國內商港水下試驗架與試片安裝，共建置 14 個試驗點(如圖 2)所示。

   5.水質調查與分析：於基隆港、臺北港、蘇澳港、花蓮港、臺中港、布袋港、安平港、高雄港、馬祖福澳港、金門水頭與料羅港區、澎湖龍門港等商港碼頭進行每季海水水質量測海水成分中導電度、溶氧量、酸鹼度、溫度、氯鹽、硫酸鹽之水質環境因子等項目試驗分析工作，藉以了解金屬腐蝕、季節與區域之關聯性。
6. 研究成果：本研究為長達 10 年期暴露試驗，目前水下金屬材料腐蝕已完成臺中港 2 年期、金門水頭與料羅港區 2 年期及基隆港、花蓮港、蘇澳港、高雄港、安平港、布袋港、馬祖福澳港、澎湖龍門港 1 年期水下金屬材料腐蝕速率分析作業及各季試驗站所調查水質分析，歸納數據整理繪製比較圖，建置於臺灣腐蝕環境分類資訊系統水下腐蝕速率資料庫。

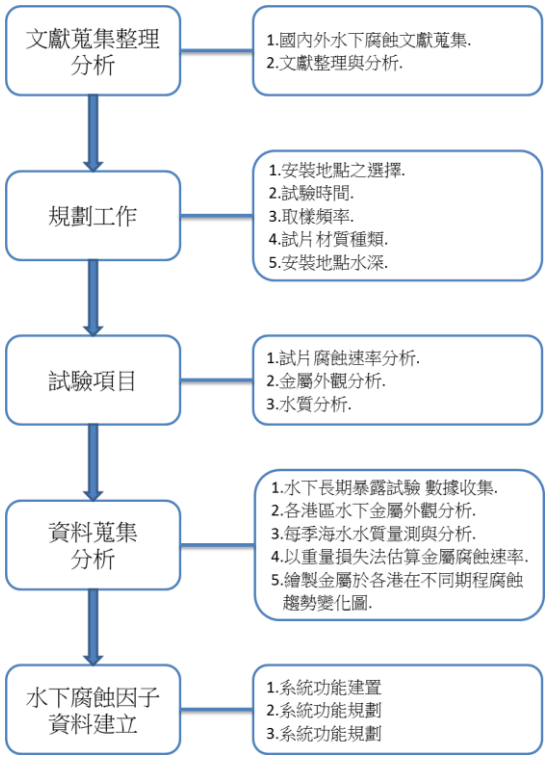


圖 1　水下腐蝕研究方法與規劃

3.3 各港區試片設計與試驗期程

試片大小，試片架之設計，試片架之安放工作以及各階段分批取樣時程，詳述如後：

1. 材質型式: 試片採用港工結構材使用之試片，分三種型式為銲接結構用鋼(SM490A)、不鏽鋼(SS316L)、低碳鋼(SS400) 。
2. 試片之大小:為適合海中附生物之附著。軋鋼材質料試片大小均為15cm×10cm，厚度則分別為銲接結構用鋼(SM490A)1.0cm、不鏽鋼(SS316L)1.0cm、一般碳鋼(SS400)1.0cm。
3. 試片架設計:為配合當地港工結構之條件，設計須考慮穩定性、試片置放及取樣難易程度等每一試片皆有兩只通孔，使用不鏽鋼螺栓及螺帽，固定於承載試片主架上，螺栓與螺帽使用絕緣材質墊片，以防止電化學腐蝕效應。
4. 試片架的曝露位置:安放於各港區碼頭岸壁分別於飛沫帶、潮汐帶、水中帶 3 個位置，每層架置 45 個試片，共 135 片如圖 2 所示，以膨脹螺絲接合施作於混凝土牆面固定。
5. 現場施放地點調查及試片架安裝:試片架之安裝經於各港區實地勘察，經協調各港務公司選定港區船隻進出較不妨礙之碼頭為安裝地點，試片架現場安裝時配合潛水人員施工完成。
6. 試驗期程：依實際需求規劃或 10 年期。
7. 取樣頻率：第 1、2、5、8、10 年期等。

圖 2 水下腐蝕調查試驗站

3.4 試片腐蝕速率分析方法

1. 試片定期採樣之處理分析方法：依規劃時間至安裝現場請潛水人員將試片取出，將樣品收集分類及拍照後，帶回實驗室作進一步海生物清除與腐蝕清洗分析。
2. 試片腐蝕分析步驟：採樣後試片於實驗室中進行腐蝕分析作業流程如圖 3，先將將附著海生物刮去處理後，依據 NACE Standard TM-01-69 方法，以濃鹽酸＋40 g/l $SnCl_2$ 溶液，在室溫下浸泡試片，達到除銹效果，並稱重以量測其平均腐蝕速率（重量損失法）。將試驗點曝放後取回之試片進行腐蝕速率量測。為確保除去腐蝕生成物的化學清洗方法不會損壞底材金屬，先使用腐蝕試

片進行重複清洗，以制定檢量線（俟重複清洗後之試片淨重達到一穩定值）。

3. 腐蝕速率計算板狀試片的腐蝕速率(Rcorr)單位以 μm/yr 表示，計算公式如下：

$$Rcorr = (\Delta m / A \cdot \rho \cdot t) \qquad (3.1)$$

式中，

Δm=質量損失(g)

A=試片曝露面積(m^2)

t=曝露時間 (year)，

ρ=金屬材料之密度 (g/cm^3)

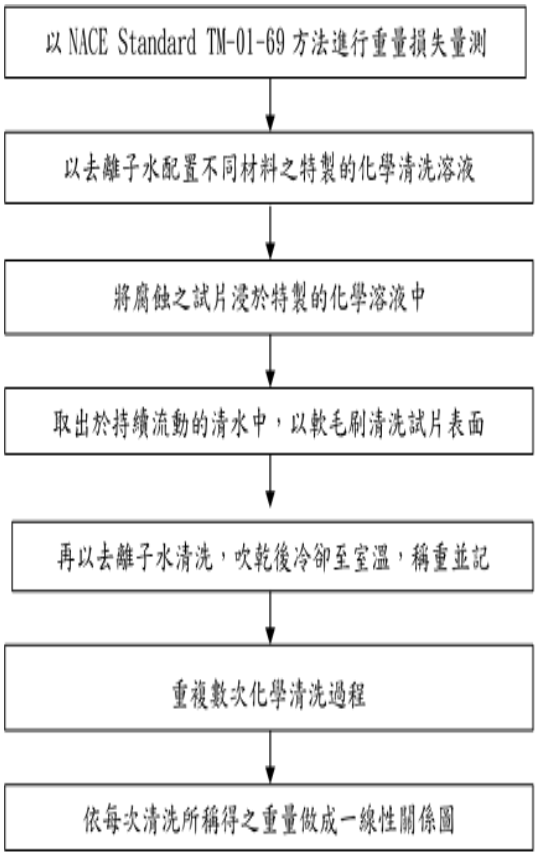


圖 3　水下金屬腐蝕生成物清除作業流程圖

第四章 水下金屬腐蝕速率分析過去文獻研究報告指出，金屬在海水中的腐蝕行為，會因海水中的 pH 值、氯離子濃度、溫度、溶氧量、水流速度、海生物附著、菌類活動、以及污染程度等參數的影響而產生不同的腐蝕現象。為推估港區內碳鋼腐蝕速率與水深變化的關係，今將不同形式碳鋼(SM490A)、不鏽鋼(SS316L)、低碳鋼(SS400) 三種金屬於不同位置(飛沫帶、潮汐帶與水中帶)採樣試片的腐蝕速率平均，以此平均值代表金屬材料在該碼頭不同位置的腐蝕速率。

4.1 各港區第一年不同位置金屬腐蝕速率分析

1.各港區第一年飛沫帶金屬腐蝕速率分析由各港區第 1 年飛沫帶金屬暴露試驗結果，如圖 4 試片平均腐蝕速率，可發現碳鋼介 347~591(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於高雄港#10 碼頭，低碳鋼介於 377~584(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於馬祖福澳港。

2. 各港區第一年潮汐帶金屬腐蝕速率分析：由各港區第 1 年潮汐帶金屬暴露試驗結果，如圖 5 試片平均腐蝕速率，可發現碳鋼介於 222~963(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於布袋港 #10 碼頭，低碳鋼介於 239~931(μm/yr)，最大腐蝕速率也發生於布袋港。

3. 各港區第一年水中帶金屬腐蝕速率分析：由各港區第 1 年水中帶金屬暴露試驗結果，如圖 6 試片平均腐蝕速率，可發現碳鋼介於 123~513(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於高雄

港 #75 碼 頭 ， 低 碳 鋼 介 於 於布袋港。
118~504(μm/yr)，最大腐蝕速率發生

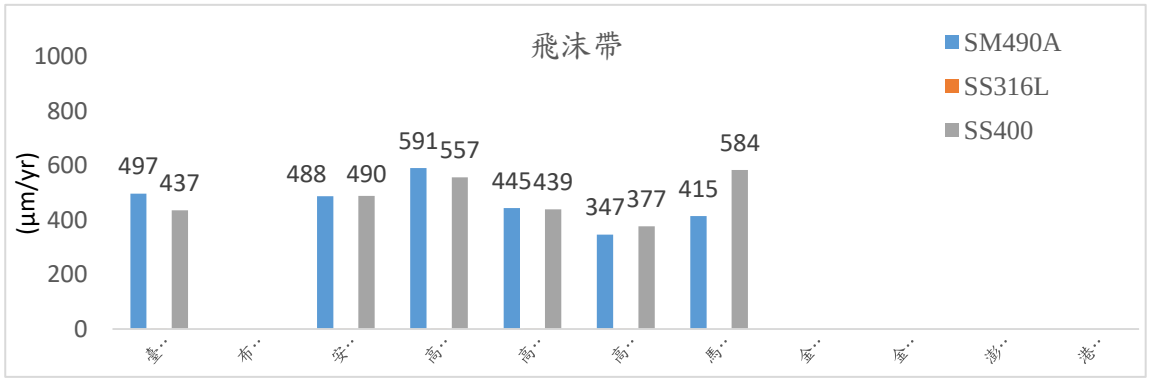


圖 4 各港區第一年飛沫帶金屬腐蝕速率分析

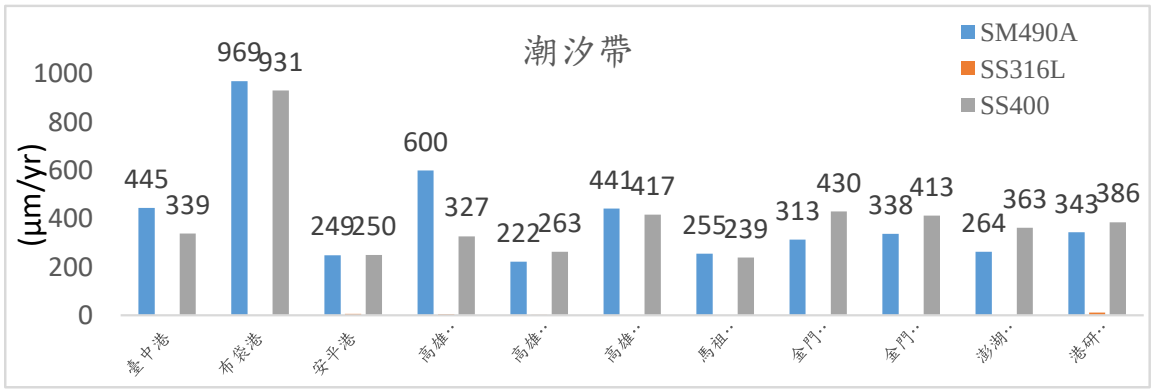


圖 5 各港區第一年潮汐帶金屬腐蝕速率分析

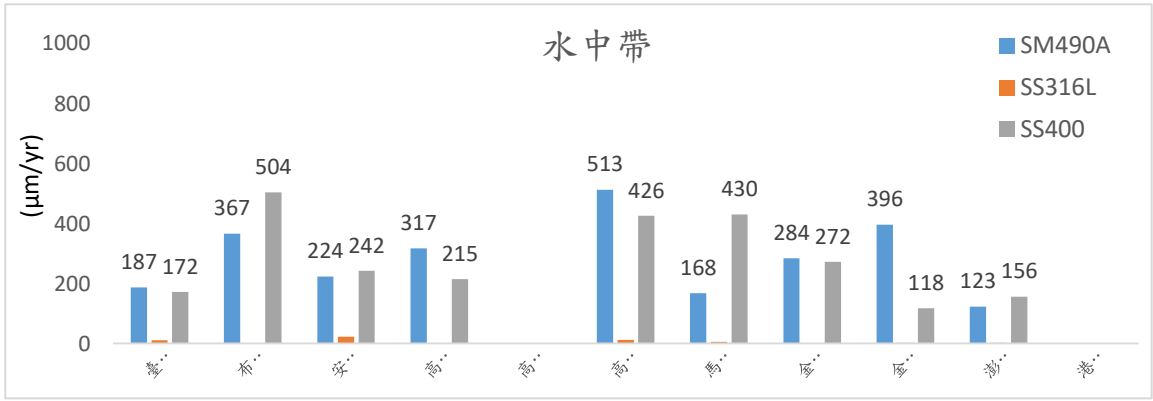


圖 6 各港區第一年水中帶金屬腐蝕速率分析

4.2 各港區第一年不同金屬水下腐蝕速率分析

由各港區第 1 年碳鋼金屬暴露試驗結果，如圖 7 試片平均腐蝕速率，可發現，飛沫帶最大腐蝕速率發生於基隆港(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發生於布袋港(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於高雄港#75 碼頭 (μm/yr)。由各港區第 1 年低碳鋼金屬暴露試驗結果，如圖 8 試片平均腐蝕速率，可發現，飛沫帶最大腐蝕速率發生於基隆港 960(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發生於布袋港 931(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於基隆港 519 (μm/yr)。由各港區第 1 年不銹鋼金屬暴露試驗結果，如圖 9 試片平均腐蝕速率，可發現，飛沫帶最大腐蝕速率發生於高雄港#10 碼頭 1.2(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發生於港研中心 11.3(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於安平港 22.8 (μm/yr)。

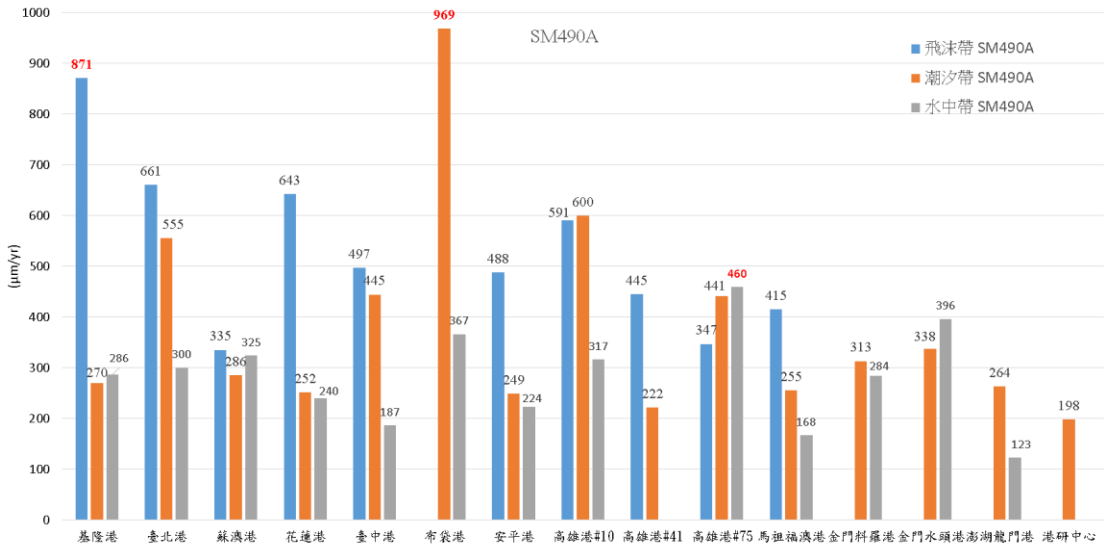


圖 7　各港區第一年碳鋼金屬水下腐蝕速率分析

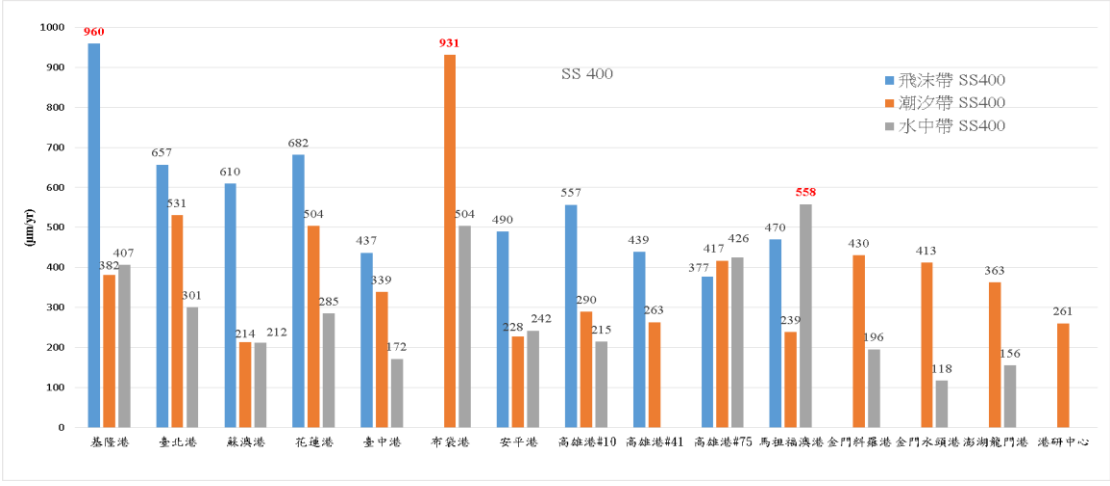


圖 8　各港區第一年低碳鋼金屬水下腐蝕速率分析

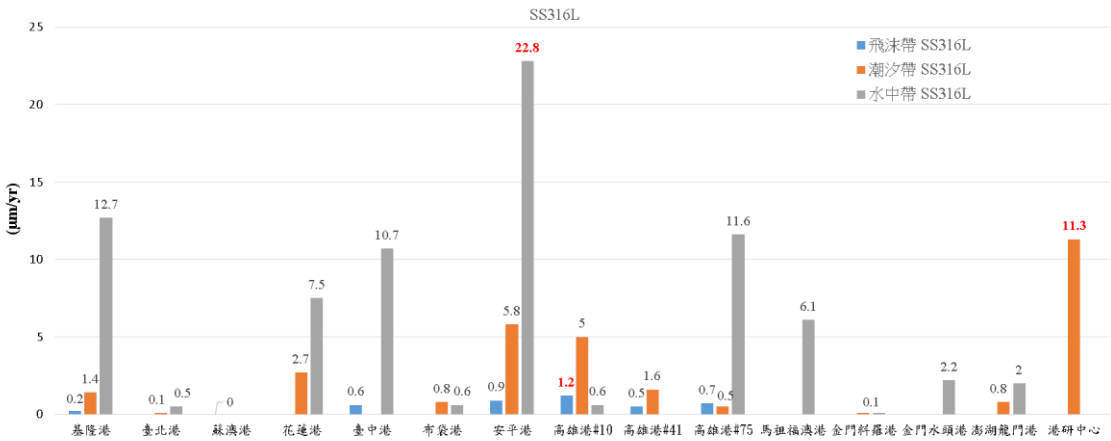


圖 9　各港區第一年不銹鋼金屬水下腐蝕速率分析

五、結論

1. 各港區第 1 年不同位置金屬腐蝕速率分析調查結果發現，由第 1 年飛沫帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 347~591(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於高雄港#10 碼頭 591(μm/yr)，低碳鋼介於 377~584(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於馬祖福澳港 584(μm/yr)。
2. 各港區潮汐帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 222~963(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於布袋港 963(μm/yr)，低碳鋼介於 239~931(μm/yr)，最大腐蝕速率也發生於布袋港 931(μm/yr)。
3. 各港區水中帶金屬暴露試驗結果，碳鋼介於 123~513(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於高雄港#75 碼頭 513(μm/yr)，低碳鋼介於 118~504(μm/yr)，最大腐蝕速率發生於布袋港 504(μm/yr)。
4. 各港區第 1 年不同金屬水下腐蝕速率分析，由各港區第 1 年碳鋼金屬(SM490)暴露試驗結果，飛沫帶最大腐蝕速率發生於基隆港 (μm/yr) 871(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發生於布袋港(μm/yr) 969(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於高雄港#75 碼頭 513(μm/yr)。
5. 由各港區第 1 年低碳鋼金屬暴露試驗結果，飛沫帶最大腐蝕速率發生於基隆港 960(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發生於布袋港 931(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於基隆港 519 (μm/yr)。
6. 各港區第 1 年不銹鋼金屬水下腐蝕速率分析，可發現，飛沫帶最大腐蝕速率發生於高雄港#10 碼頭 1.2(μm/yr)，潮汐帶最大腐蝕速率發

生於港研中心 11.3(μm/yr)，水中帶最大腐蝕速率發生於安平港 22.8 (μm/yr)。

7. 由水下金屬腐蝕調查結果可得，隨著暴露時間增加在飛沫帶、潮汐帶與水中帶金屬腐蝕速率皆有降低趨勢，推估應該是水中海生物附著形成保護膜，避免海水流速衝擊及海水環境因子影響。

參考文獻

1. 陳桂清、柯正龍、羅建明，港灣與濱海地區構造物現況調查與維護之研究，交通部運輸研究所，2014。
2. 林維明、饒正等「臺灣海域之腐蝕特性防蝕設計及材料選用與開發」，港灣技術研究所研究報告，1991。
3. 林維明、饒正「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
4. 饒正、林維明、陳桂清，「港灣 R.C 結構物修理系統評估研究」，港灣技術研究所研究報告，1994。
5. 林維明、饒正「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」，港灣技術研究所專刊第 41 號，1987。
6. 林維明、饒正等「港灣鋼構造物耐久性研究第一年報告」，港灣技術研究所，1990。
7. 饒正、柯正龍等「港灣鋼構造物耐久性研究第二年報告」，港灣技術研究所，1991。
8. 陳桂清、饒正、柯正龍等「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，港灣技術研究所，1992。
9. 陳桂清、饒正、柯正龍「港灣鋼構造物耐久性研究第四年報告」，1993。
10. 饒正、柯正龍等「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」，港灣技術研究所研究報告，1991。
11. 饒正、林維明，「港灣構造物腐蝕機理與維修防制之研究」，港灣技術研究所研究報告，1996。
12. 饒正、陳桂清、柯正龍、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(一) 」港灣技術研究所，1997。
13. 陳桂清、饒正、張道光、羅建明，「現有結構物安全評估及維護研究(二) 」港灣技術研究所，1998。
14. 饒正、李賢華、宋克義、羅俊雄，「現有結構物安全評估及維護研究(三) 」港灣技術研究所，1999。
15. 饒正、陳桂清、李釗、李賢華，「現有結構物安全評估及維護研究(四) 」交通部運輸研究所，2000。
16. 饒正、柯正龍，「水文及污損生物對材料腐蝕之探討研究」，港灣技術研究所研究報告，1995。
17. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港工結構材料海生物附著與對策研究」，港灣技術研究所，1997

。
18. 饒正、陳桂清、李賢華、羅俊雄，「高雄港港工結構腐蝕與海生物附著研究」，港灣技術研究所，1999。
19. 饒正、陳桂清、柯正龍、張道光，「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」，交通部運輸研究所，2002。
20. 羅建明、陳桂清、柯正龍、「金屬材料腐蝕環境調查研究(1/2)」，交通部運輸研究所，2015。
21. 羅建明、陳桂清、柯正龍、「金屬材料腐蝕環境調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2016。
22. 羅建明、陳桂清、柯正龍、「臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查研究(1/4)」，交通部運輸研究所，2017。

「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：
   43542 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