

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承載的臨界力時，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。

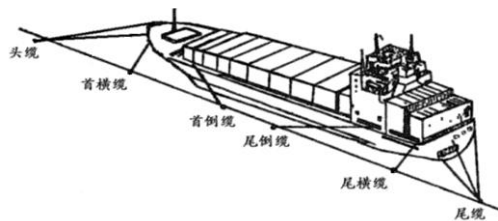


圖 1 船舶繫纜位置
(網站 <https://www.getit01.com/p20171227547256809/>)



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，不含艦橋及船艙本體。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

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

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：

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

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

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。

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

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

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：

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

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

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 $F_{\max}/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$ 。

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 $F_{\max}/(M_s g)$ 、 $\frac{h}{L_{OA}}$ 、 $\frac{H}{L_{OA}}$ 、 $\frac{L_{OA}}{T}/\sqrt{gh}$ 。

其中， $\frac{L_{OA}}{T}/\sqrt{gh}$ 這一項，由於在前面已用 L_{OA} 、 ρ_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 $F_{\max}/(M_s g)$ ，也可改成 $(M_s g)/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$ 。

綜合以上之說明，可建立一組無因次參數之間的函數關係

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

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 $\frac{B}{L_{OA}}$ 、 $\frac{H_{BR}}{L_{OA}}$ 、 $\frac{H_{SR}}{L_{OA}}$ 、 $\frac{H_D}{L_{OA}}$ 、 θ 、 $\frac{h}{L_{OA}}$ 、 $\frac{H}{L_{OA}}$ 、 $\frac{L_{OA}}{T}/\sqrt{gh}$ 、 $(M_s g)/\left(\frac{1}{2}\rho_a V_a^2 L_{OA}^2\right)$ 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 19cm，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

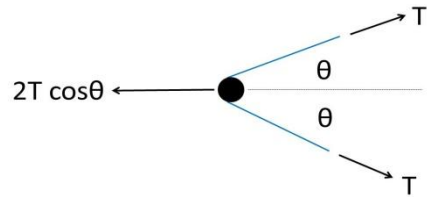


圖 5 纜繩經過轉向環之拉力平衡示意圖



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）

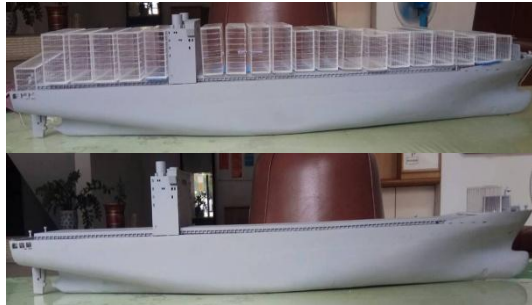


圖 9 貨櫃輪船模型圖，滿載貨櫃輪（上），空船貨櫃輪（下）



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：

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

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} 。

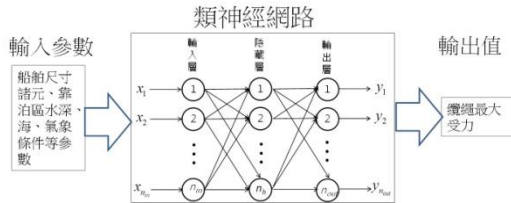


圖 12 類神經網路模型示意圖

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：

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

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：

$$C_x = A_0 + A_1 \frac{2A_t}{L_{OA}^2} + A_2 \frac{2A_t}{B^2} + A_3 \frac{L_{OA}}{B} + A_4 \frac{S}{L_{OA}} + A_5 \frac{C}{L_{OA}} + A_6 M \quad (4-1)$$

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

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：

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

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

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

$$C_x = 0 \quad (4-5)$$

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

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：

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

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

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

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

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

及合力方向

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

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。

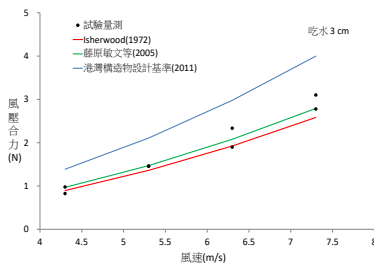


圖 14 試驗結果風壓合力與文獻公式計算結果比較（吃水 3 cm）

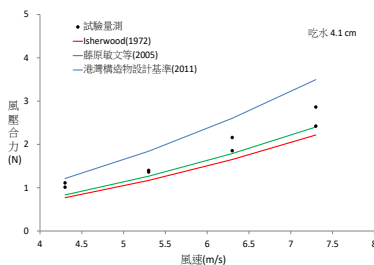


圖 15 試驗結果風壓合力與文獻公式

計算結果比較（吃水 4.1 cm）

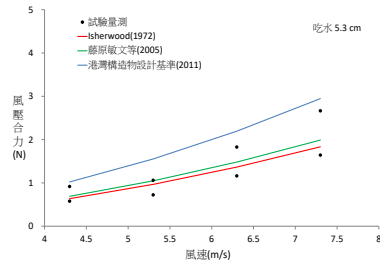


圖 16 試驗結果風壓合力與文獻公式計算結果比較（吃水 5.3 cm）

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 $F_x / \left(\frac{1}{2} C_x \rho_a V_a^2 A_T \right)$ 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 $F_y / \left(\frac{1}{2} C_y \rho_a V_a^2 A_L \right)$ 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

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

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。

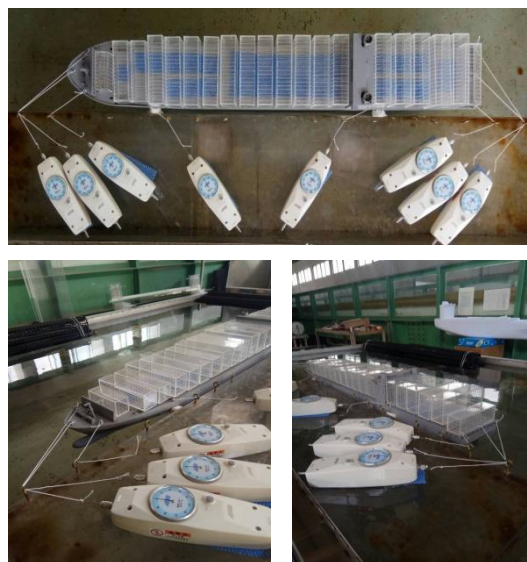


圖 17 貨櫃輪風力試驗之繫纜配置

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)

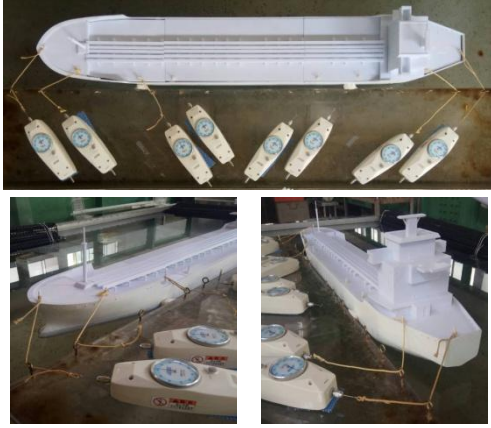


圖 19 油輪風力試驗之繫纜配置(5條)

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 $F_x / \left(\frac{1}{2} C_x \rho_a V_a^2 A_T \right)$ 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 $F_y / \left(\frac{1}{2} C_y \rho_a V_a^2 A_L \right)$ 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，這樣在進行類神經網路訓練時，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

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

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：

$$E_r = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{o,i} - y_{result,i})^2 / N} \quad (5-1)$$

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。

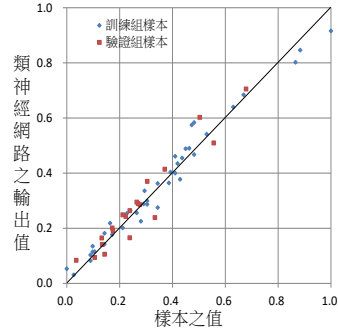


圖20 貨櫃輪繫纜力預報模式之類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

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%。

$$E_{rr} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{o,i} - y_{result,i})^2 / \sum_{i=1}^N y_{o,i}^2} \quad (5-2)$$

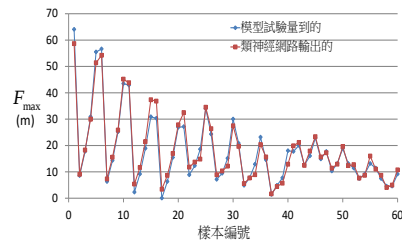


圖21 貨櫃輪繫纜力預報模式之類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

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。

Figure 22 displays four screenshots of the '貨櫃輪繫纜力預報模式' (Container Ship Mooring Force Prediction Mode) software interface. Each screenshot shows input fields for ship length, width, wind speed, draft, and weight, and output fields for maximum mooring force (kgf) and tension (Tf). The results shown are 0.0617, 0.0492, 0.396, and 0.356 kgf respectively.

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。

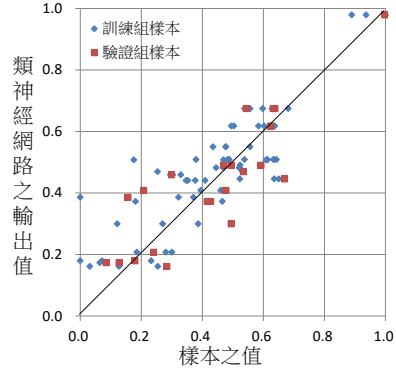


圖 23 油輪繫纜 8 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

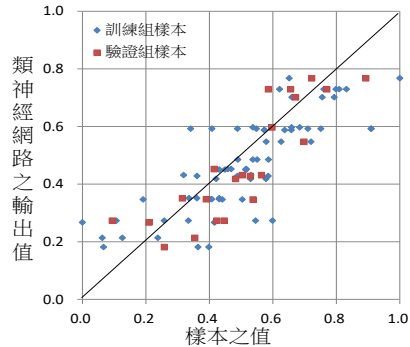


圖 24 油輪繫纜 5 條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之一：正規化輸出值

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%。

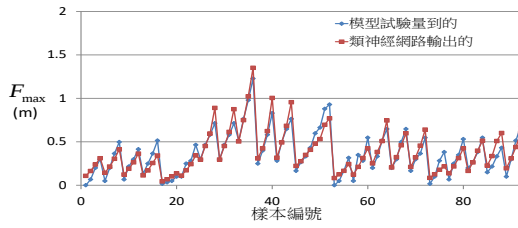


圖 25 油輪繫纜8條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

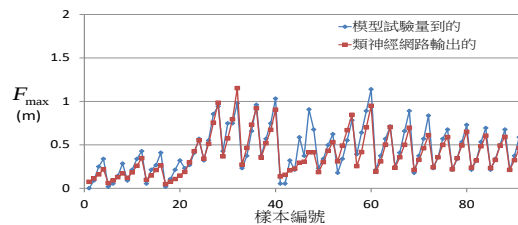


圖 26 油輪繫纜5條之繫纜力預報模式類神經網路訓練結果之二：將正規化輸出值還原為力的大小

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。

情境	量測最大纜繩拉 (kgf)	模式輸出值 (kgf)
1	0.050	0.041
2	0.0983	0.103
3	0.0650	0.06
4	0.0550	0.051

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。

情境	量測最大纜繩拉 (kgf)	模式輸出值 (kgf)
1	0.0383	0.025
2	0.0917	0.108
3	0.0833	0.066
4	0.0863	0.061

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。

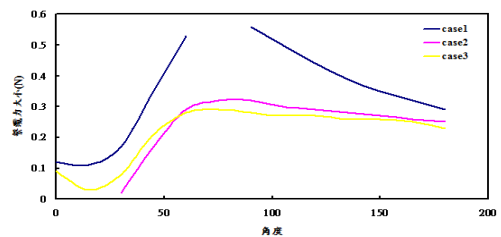


圖 30 油輪繫纜力預報模式：三種不同吃水深之纜繩最大受力

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 Conference, 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), 繫泊船舶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、池田良穗, 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.