

花蓮港碼頭波高預測模式作業化研究

傅怡釤¹ 鄭采誼² 林雅雯³

¹ 交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

² 數位地球科技有限公司系統工程師

³ 交通部運輸研究所運輸技術研究中心科長

摘要

花蓮港東臨遼闊的太平洋，因其港口形狀及開口方向關係，港內常受長浪（湧浪）影響振盪，致使船舶出港避湧，近年臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司（以下簡稱花蓮港務分公司）辦理船舶進出港管制作業，以參考外港區及內港區碼頭波高觀測資訊做為其決策依據。本研究蒐集 109 年~112 年交通部運輸研究所「臺灣近岸海象預測系統 2.0」產製之 1 日 1 次及 1 日 4 次花蓮港外波浪模擬資料，以及 17 號及 25 號碼頭港內波高觀測資料，應用倒傳遞神經網路，分別以 H-BPNN 或 HTM-BPNN 2 種網路架構進行訓練、驗證及測試工作，完成 17 號及 25 號碼頭波高預測模式。另為能將預測模式能即時介接最新之港外波浪模擬預測資訊及港內即時波高，以提供 17 號及 25 號碼頭未來 24 小時內之波高預測資訊，規劃相關作業化流程及辦理程式編寫工作，完成「花蓮港碼頭波高預測作業化模式」，目前先提供作業化模式於測試網頁試行 17 號碼頭波高預測模式及康芮颱風之執行情形。依試行結果，其預測成果主要提供港內碼頭波高未來變化趨勢，後續可再視預測資料準確度，訂定作業化模式上線後實際運行的預測時數。本研究提供港內碼頭波高預測之變化趨勢，期望協助花蓮港務分公司辦理港區防災管理作業。

一、研究區域

交通部運輸研究所（以下簡稱運研所）於 89 年在花蓮港東防波堤外設置挪威 Nortek 公司生產的底碇式波流儀（Acoustic Waves and Currents，以下簡稱 AWAC），開始辦理花蓮港外波浪及海流觀測資料蒐集及分析工作。近年考量花蓮港域內波浪震盪深受颱風長浪影響，自 109 年 5 月起陸續於花蓮港 9 號碼頭（內港區）及 17、25 號碼頭（外港區）等 3 處設置波潮即時監測站，蒐集港內波浪觀測資料，港內波潮監測站與港外波流儀形成花蓮港外、港內波浪聯合觀測站網，站網分布位置及基本資料如圖 1、表 1 所示，蒐集之波高觀測資料均即時展示於「花蓮港區靜穩展示」網頁，供花蓮港務分公司使用。另運研所發展「臺灣近岸海象預測系統 2.0」（以下簡稱 TaiCOMS2.0 系統），每日介接中央氣象署預報風場，以執行 1 日 1 次、1 日 4 次作業化方式，提供花蓮港未來 48 小時港外波浪預測資料，與花蓮港波浪觀測資料即時展示於「港灣環境資訊網」。



圖 1 花蓮港外、港內波浪聯合觀測站網位置示意圖

表 1 花蓮港外、港內波浪聯合觀測站網基本資料

花蓮港	位置		經度	緯度	觀測期間	備註
AWAC 波流儀 (港外)	東防波堤外海南邊 200m 外，水深 33m 處		23°58'00"N	121°37'34"E	89/09-迄今	➤ 持續觀測中，每小時輸出 1 筆觀測資料。 ➤ 113 年 1 月 3 日下午 1 時 開始，每小時輸出 2 筆觀 測資料。
波潮即時 監測站 (港內)	內港區	9 號碼頭	24°00'02.5"N	121°38'14.6"E	109/05-迄今	持續觀測中，每 20 分鐘輸出 1 筆觀測資料。
	外港區	17 號碼頭	23°59'19.8"N	121°38'3.8"E	109/05- 110/10 111/06-迄今	➤ 每 20 分鐘輸出 1 筆觀測 資料。 ➤ 110 年 10 月 12 日因圓規 颱風毀損，111 年 6 月完 成復站持續監測中。
		25 號碼頭	23°58'24.9"N	121°37'35.9"E	110/06-迄今	➤ 每 20 分鐘輸出 1 筆觀測 資料。 ➤ 測站於 113 年 10 月 31 日 康芮颱風期間資料中斷， 於 11 月上旬恢復。

1.1 港外波浪觀測、模擬資料與港內碼頭波高觀測資料統計分析

本研究蒐集 109 年~112 年期間花蓮港 AWAC 波浪觀測資料，以及 TaiCOMS 2.0 系統產製之花蓮港模擬資料（含示性波高、週期及方向），花蓮港 AWAC 測站與模擬點位相對位置，如圖 2 所示，其中 109 年~111 年波浪觀測及模擬統計資料，可參閱運研所 112 年「應用倒傳遞類神

經網路建置花蓮港碼頭波高預測模式」(以下簡稱 112 年前期研究)，本文列出分析花蓮港 112 年期間港外波高觀測及模擬資料統計結果，如表 2 所示。

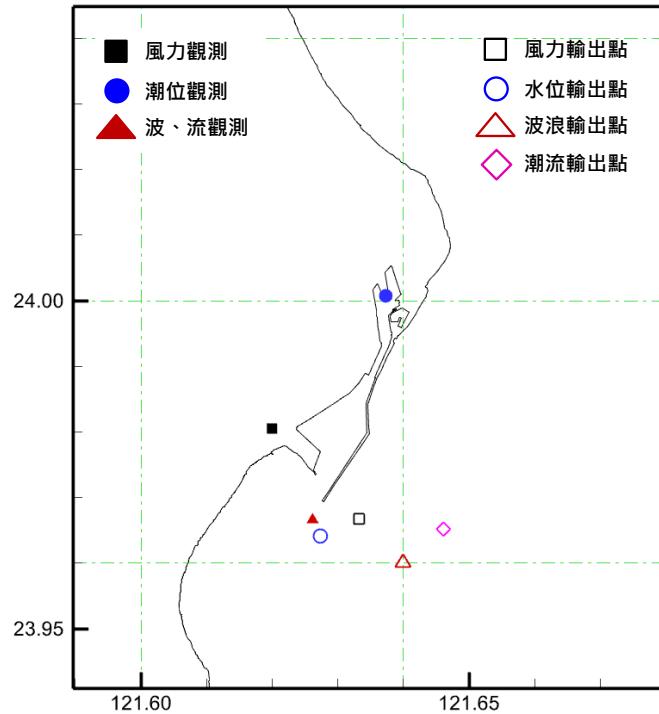


圖 2 花蓮港波浪模擬輸出點位之位置示意圖

表 2 花蓮港 112 年期間港外波高觀測及模擬資料統計結果

年/月	AWAC 量測波高觀測資料		TaiCOMS2.0 系統產製花蓮港波高模擬資料			
	示性波高 $H_{m0(ast)}$ (m)		蒐集率 (%)	示性波高 H_s (m)		蒐集率 (%)
	平均值	最大值		平均值	最大值	
112/01	1.61	3.86	95.83	1.82	5.93	100.00
112/02	1.50	2.95	99.93	1.73	3.71	100.00
112/03	1.13	2.86	99.66	1.22	3.64	100.00
112/04	1.04	2.52	99.86	1.36	3.17	100.00
112/05	1.24	4.48	92.74	1.65	6.12	100.00
112/06	0.93	3.44	90.76	1.28	5.51	100.00
112/07	1.11	4.73	93.55	1.58	7.03	100.00
112/08	0.92	3.71	95.23	1.47	4.19	100.00
112/09	0.87	5.47	95.00	1.14	9.28	100.00
112/10	1.21	3.91	99.40	1.66	7.34	100.00
112/11	1.26	2.83	97.78	1.42	3.96	100.00
112/12	1.52	3.38	97.24	1.84	4.18	100.00

註:1.波高觀測資料為本研究分析超音波訊號所得。

2.波高模擬資料則使用運研所「2023 年海象作業化預測評估年報」、「2024 年海象作業化預測評估年報」資料。

由表 2 可知，112 年期間花蓮港 AWAC 波高最大值發生於 9 月海葵颱風期間，波高達 5.47 m 最大、7 月杜蘇芮颱風期間波高為 4.73m 次之，而 5 月瑪娃颱風期間波高為 4.48m 排第 3；模

擬波高 9 月時為 9.28m 最大、10 月小犬颱風期間波高為 7.34m 次之、7 月杜蘇芮颱風期間波高為 7.03m 排第 3，而 5 月瑪娃颱風期間波高為 6.12m 排第 4，整體而言，港外波高模擬值較波高觀測值高。

本研究蒐集 109 年~112 年期間花蓮港 17、25 號碼頭波高觀測資料，其中 109 年~111 年期間之碼頭波高觀測資料，可參閱運研所 112 年前期研究報告，本文僅列 113 年度分析花蓮港 112 年期間 17、25 號碼頭波高觀測資料統計結果，如表 3 所示。由表 3 可知，17 號碼頭波高最大值發生於 5 月瑪娃颱風期間波高為 3.37m，10 月小犬颱風期間波高為 3.05m 次之，而 9 月海葵颱風期間波高為 2.86m 排第 3；25 號碼頭波高最大值發生於 9 月海葵颱風期間波高為 3.48m 最大，5 月瑪娃颱風期間波高為 3.23m 次之，10 月小犬颱風期間波高為 2.61m 排第 3。

表 3 花蓮港 112 年期間 17、25 號碼頭波高觀測資料統計結果

年/月	17 號碼頭			25 號碼頭			蒐集率 (%)	
	示性波高 H_s (m)		蒐集率 (%)	示性波高 H_s (m)		蒐集率 (%)		
	平均值	最大值		平均值	最大值			
112/01	0.33	1.10	0.13	100.00	0.41	0.96	0.14	100.00
112/02	0.29	1.02	0.13	100.00	0.35	1.07	0.19	100.00
112/03	0.19	0.49	0.09	100.00	0.25	0.51	0.13	100.00
112/04	0.18	0.62	0.08	99.77	0.21	0.64	0.11	99.86
112/05	0.42	3.37	0.09	100.00	0.42	3.23	0.11	100.00
112/06	0.24	1.92	0.07	100.00	0.28	1.52	0.10	100.00
112/07	0.33	2.30	0.06	99.46	0.40	2.53	0.09	99.51
112/08	0.28	1.43	0.07	90.46	0.30	1.36	0.09	90.46
112/09	0.21	2.86	0.07	99.58	0.24	3.48	0.08	99.58
112/10	0.27	3.05	0.07	99.96	0.29	2.61	0.10	99.96
112/11	0.17	0.33	0.07	99.35	0.22	0.41	0.12	99.35
112/12	0.22	0.46	0.10	97.22	0.30	0.66	0.15	97.18

1.2 花蓮港 112 年發布船舶出港避湧事件

花蓮港務分公司於 111 年 5 月訂定「花蓮港颱風湧浪期間船舶靠泊作業注意事項」(後又於 112 年 2 月修正)，其定義颱風及湧浪期間外港、內港分區管制標準，其中所述之「如觀測外港 25 號碼頭湧浪起伏達 1 公尺以上，…」，係指查看運研所於 25 碼頭設置之監測站觀測之湧浪起伏情況，此說明在未達管制標準前，決策單位得研判颱風後續路徑及湧浪趨勢，適時請在港船舶出港避風避湧。

整理 112 年期間有 7 件發布船舶出港避湧事件，如表 4 所示。由上述注意事項規定之花蓮港船舶進出港管制標準可知，現行進出港管制作業已非常仰賴外港區及內港區碼頭波高觀測資訊，若能進一步提供碼頭波高預測變化趨勢，將有助於花蓮港務分公司辦理港區防災管理作業。

表 4 花蓮港 112 年期間-船舶出港避湧事件彙整表

颱風	發布船舶出港避湧時間	恢復進港時間	避湧時間
瑪娃*	112 年 05 月 28 日 12 時	112 年 06 月 01 日 07 時	3 日 19 時
谷超	112 年 06 月 09 日 18 時	112 年 06 月 11 日 12 時	1 日 18 時
杜蘇芮*	112 年 07 月 24 日 10 時	112 年 07 月 28 日 12 時	3 日 22 時
卡努*	112 年 07 月 31 日 23 時	112 年 08 月 1 日 15 時	0 日 16 時
蘇拉*	112 年 08 月 29 日 17 時	112 年 08 月 31 日 06 時	1 日 13 時
海葵*	112 年 09 月 02 日 10 時	112 年 09 月 04 日 16 時	2 日 06 時
小犬*	112 年 10 月 03 日 10 時	112 年 10 月 06 日 10 時	3 日 00 時

註: *有發布颱風警報之颱風。

二、重建 17 號及 25 號碼頭波高預測模式

波浪資料屬於時間序列資料，適合預測時間序列資料方法常見的有倒傳遞神經網路（以下簡稱 BPNN）及長短期記憶模型（以下簡稱 LSTM），運研所在 111 年辦理「花蓮港內波浪預測方案初探」，即應用 BPNN 及 LSTM 等 2 種方法，以港外波浪觀測資料與港內 17 號碼頭波高觀測資料做訓練，建置 17 號碼頭波浪預測模式（以港外、港內波浪觀測資料訓練建置之神經網路），執行驗證及測試案例並比較評估指標結果，原以為 LSTM 較為擅長處理時間序列預測問題，結果顯示 BPNN 與 LSTM 驗證及預測效果良好且差異不大，BPNN 甚至在評估指標及歷線圖表現上略佳一些；而在輸入層考慮相同的參數架構下，又以 BPNN 網路架構最為簡單（神經元數量較少）。

基於上述 111 年研究成果及經驗，若繼續使用 LSTM 建置碼頭波高預測模式，其訓練集資料必須符合均是連續、不中斷之時間序列資料，而花蓮港 17 號碼頭又曾於 110 年 10 月因測站毀損而資料中斷，直至 111 年 6 月復站才恢復觀測（詳表 1），若使用 LSTM 建置模式，在訓練集資料上，須捨棄 109 年 5 月至 111 年 10 期間所蒐集的觀測資料，此外，考量 113 年度規劃將碼頭波高預測模式轉以作業化流程方式執行，輸入資料為即時港外波浪模擬預測資料及港內波高觀測資料，運作過程會遇到輸入值為異常值或資料中斷一段時間後才恢復觀測等情況，若使用 LSTM 建置之模式，其本身優勢為具有時間記憶的網路，遇到輸入值為異常值時，此異常性會影響一段時間預測資料品質；LSTM 遇到資料中斷一段時間後才恢復觀測的情況，需要執行一段時間的預測工作、將原本存在內部的時間記憶消除後，產生的模擬預測資料才會較合理，爰此，為讓所蒐集的波浪資料均能儘量使用，自 112 年起，本研究選用 BPNN 做為後續建置碼頭波高預測模式之方法，BPNN 本身具優異的容錯能力，若輸入資料混雜少許的雜訊或異常值，仍可正常運作；波浪模擬工作一般採用建置 2 維數值模式以獲取模擬波高資料，模擬時間長，但若使用 BPNN 建置，只需要足夠的輸入及輸出資料進行學習訓練，尋求出彼此間映射權重關係式，能夠反應自然界參數因子間複雜的非線性關係後，在後續執行預測模擬過程花費時間短、效率高。此外，在 17 號碼頭訓練工作部分，可因應其觀測資料曾中斷 8 個月，將所蒐集之觀測資料分 2 批對應訓練，以發揮最大的資料價值、避免浪費；至於在作業化研究部分，因本研究

規劃的作業化模式，預計每小時啟動執行 1 次，如遇到輸入值為異常值時，雖當下會影響該次產製的預測資料品質，但當下一小時重新啟動執行時，因即時輸入值已是正常值，之前被異常值影響到的預測資料會被覆蓋並以較合理的預測資料呈現，故 BPNN 方法不僅適合處理時間序列資料的調校、驗證及預測，在應用在作業化模式執行過程上，與使用 LSTM 相比，更為便利且具靈巧性。

112 年前期研究係以花蓮港 110 年至 111 年期間之港外波浪（含波高、週期及波向）模擬資料及港內波高觀測資料做為訓練集資料，建置 17 號及 25 號碼頭波高預測模式，但訓練集資料實際尚不足 2 年且缺少實際侵臺的颱風波浪資料。故本文將 112 年度 TaiCOMS 2.0 系統產製之花蓮港外波浪模擬資料，以及 17 號及 25 號碼頭港內波高觀測資料納入訓練，先辦理重建 17 號及 25 號碼頭波高預測模式工作。

2.1 倒傳遞神經網路 (BPNN) 介紹及訓練設定

本研究選用 BPNN 方法建置碼頭波高預測模式，此法由許多人工神經元組成，先由探討問題中取得相當數量訓練樣本並分做輸入訊號及輸出訊號 2 類，應用正向傳播 (forward propagation) 將輸入訊號由輸入層經相關權重處理後傳遞至隱藏層，再經轉換函數轉換得輸出值再傳向輸出層輸出，計算輸出結果與對應目標間之誤差值 (loss function)，若計算誤差值大於目標誤差值，則進行反向傳遞 (backward propagation)，以計算誤差值向前調整網路各層間之權重，如此反覆進行正向與反向傳遞之學習訓練過程，直至計算誤差值小於目標誤差值，或經過來回幾趟計算，誤差值已趨平穩，表示計算誤差已收斂，故停止網路訓練並輸出結果。

17 號及 25 號碼頭波高預測模式之神經網路，在輸入層參數上，分別考慮以 H-BPNN (港外模擬資料僅考慮波高參數) 及 HTM-BPNN (港外模擬資料考慮波高、週期及波向) 等 2 種網路架構，資料輸入神經網路前，將資料正規化至 -0.9~0.9 之間，採用 Levenberg-Marquardt (LM) 演算法；採用雙曲線正切函數做為輸入層至隱藏層間之轉換函數、線性函數做為隱藏層至輸出層間之轉換函數；每次網路學習速率設定為 0.001，訓練精度目標設定為 10^{-5} ，但為避免訓練時間過長，檢視實際執行時之收斂曲線變化，疊代至 250 次時訓練精度已趨於收斂，故設定最大疊代次數為 300 次。訓練好神經網路，為避免過度學習，選取其未學習過之時間序列資料以驗證其適用性，經執行驗證案例後，將神經網路計算之碼頭波高模擬值與實測值相比，並以相關係數 (R)、平均絕對誤差 (MAE)、均方根誤差 (RMSE) 做為評估指標；接著，進行案例測試，以預測 20min (1 time step) 方式，檢測其網路自身預測能力及穩定性。

2.2 17 號碼頭波高神經網路再訓練、驗證及測試結果

在訓練集資料擴充納入 112 年度花蓮港外波浪模擬資料及 17 號碼頭波高觀測資料，以 109 年度海神颱風、閃電颱風、夏季 (109 年 7 月) 及冬季 (109 年 12 月) 做驗證案例，海神及閃電以預測 20min 方式進行測試，其訓練集、驗證及測試案例資料區間及筆數，列如表

5 所示。在輸入層參數上，分別考慮以 H-BPNN (港外模擬資料僅考慮輸入波高參數，如圖 3) 及 HTM-BPNN (港外模擬資料考慮輸入波高、週期及波向，如圖 7) 等 2 種網路架構，資料正規化後進行神經網路重新訓練、驗證及測試工作。

表 5 重建 17 號碼頭神經網路之訓練集、驗證及測試案例資料區間及筆數

重建 17 號碼頭-訓練、驗證及測試集資料區間及資料筆數	
訓練集	110 年 1 月 1 日 00 時 00 分-110 年 10 月 12 日 06 時 00 分；111 年 7 月 1 日 00 時 00 分-112 年 12 月 31 日 23 時 00 分，共 39,523 筆。
驗證 案例	海神 109 年 9 月 01 日 20 時 00 分-109 年 9 月 8 日 02 時 00 分，共 451 筆。
	閃電 109 年 11 月 01 日 20 時 00 分-109 年 11 月 07 日 12 時 00 分，共 469 筆。
	夏季 109 年 7 月 1 日 00 時 00 分-109 年 7 月 31 日 23 時 40 分，共 2,232 筆。
	冬季 109 年 12 月 1 日 00 時 00 分-109 年 12 月 31 日 23 時 40 分，共 2,232 筆。
測試 案例	1 海神起始日 109 年 9 月 01 日 20 時 00 分，預測 20min，執行 8 日，共 577 筆。
	2 閃電起始日 109 年 11 月 01 日 20 時 00 分，預測 20min，執行 8 日，共 577 筆。

2.2.1 17 號碼頭 H-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試結果

H-BPNN 網路架構訓練驗證及測試流程，如圖 3 所示，經重新訓練後，17 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構[輸入層-隱藏層-輸出層]選取 [6-1-1]，其驗證案例結果與 112 年前研究結果相比，列如表 6；測試案例結果與 112 年前研究結果相比，列如表 7。

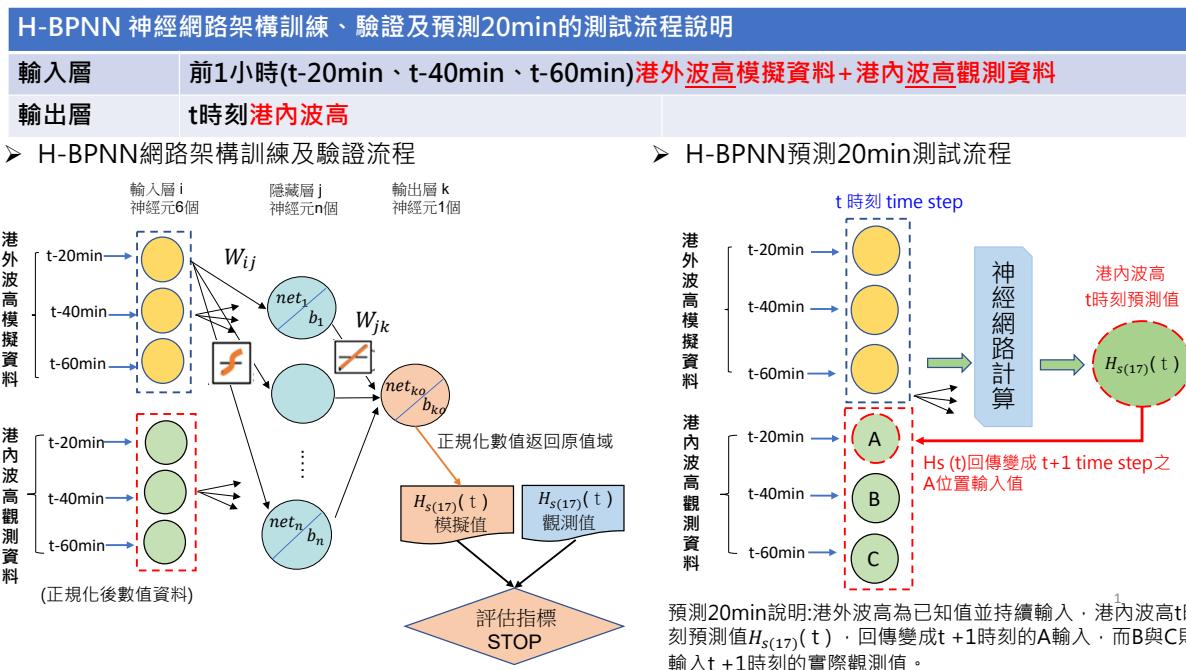


圖 3 H-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試流程

由表 6 可知，113 年度模擬海神颱風驗證結果，相關性 (R) 為 0.959，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.036m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.058；閃電颱風驗證結果，相關性 (R) 為 0.955，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.031m，均方根誤差 (RMSE) 0.047；夏季驗證結果，相關性 (R) 為 0.590，屬中度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.023m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.036；冬季驗證結果，相關性 (R) 為 0.963，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.021m，均方根誤差 (MAE) 0.029m。前述案例驗證結果與 112 年度模擬海神颱風、閃電颱風、夏季及冬季驗證結果相比，僅海神颱風峰值及夏季相關性略微提升。

由表 7 可知，113 年度進行海神颱風測試結果，相關性 (R) 為 0.950，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.037m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.062；閃電颱風測試結果，相關性 (R) 均是 0.942，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.035m，均方根誤差 (RMSE) 0.055，測試結果歷線圖及相關性圖，如圖 4~圖 6 所示。113 年度執行 2 場颱風案例測試結果與 112 年度測試結果相比，海神颱風預測峰值及相關性略微提升，閃電颱風預測峰值及相關性略微下降，但整體而言，訓練集資料經擴充後之測試結果與 112 年度結果差異不大。

表 6 重建 17 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構下驗證結果

17 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構[6-1-1]							
輸入層參數	考慮 t-20min、t-40min、t-60min 之時間序列資料 TaiCOMS 產製之花蓮港外波高模擬資料；港內波高觀測資料，共 6 個參數。						
輸出層參數	t 時刻港內波高資料，共 1 個參數。						
驗證案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
海神颱風 (109 年 9 月 1 日~9 月 8 日)	觀測值	0.36	1.20	0.13	-	-	-
	112 年模擬值	0.36	1.09	0.14	0.959	0.036	0.058
	113 年模擬值	0.36	1.10	0.14	0.959	0.036	0.058
閃電颱風 (109 年 11 月 1 日~11 月 7 日)	觀測值	0.34	0.99	0.12	-	-	-
	112 年模擬值	0.34	0.97	0.13	0.955	0.031	0.047
	113 年模擬值	0.34	0.97	0.13	0.955	0.031	0.047
夏季 (109 年 7 月)	觀測值	0.13	0.37	0.06	-	-	-
	112 年模擬值	0.13	0.33	0.06	0.589	0.023	0.036
	113 年模擬值	0.13	0.33	0.06	0.590	0.023	0.036
冬季 (109 年 12 月)	觀測值	0.30	0.62	0.10	-	-	-
	112 年模擬值	0.30	0.58	0.11	0.963	0.021	0.029
	113 年模擬值	0.30	0.58	0.11	0.963	0.021	0.029

註:112 年模擬值採用運研所「應用倒傳遞類神經網路建置花蓮港碼頭波高預測模式」報告。

表 7 重建 17 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構下，預測 20min 測試結果

17 號碼頭-H-BPNN 神經網路架構[6-1-1]，預測 20min，執行 8 日							
測試案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
海神颱風起始日起， 執行 8 日	觀測值	0.32	1.20	0.11	-	-	-
	112 年度模擬值	0.32	1.00	0.12	0.949	0.037	0.062
	113 年度模擬值	0.32	1.01	0.12	0.950	0.037	0.062
閃電颱風起始日起， 執行 8 日	觀測值	0.31	0.99	0.09	-	-	-
	112 年度模擬值	0.31	0.97	0.11	0.943	0.034	0.054
	113 年度模擬值	0.31	0.91	0.11	0.942	0.035	0.055

註:112 年模擬值採用運研所「應用倒傳遞類神經網路建置花蓮港碼頭波高預測模式」報告。

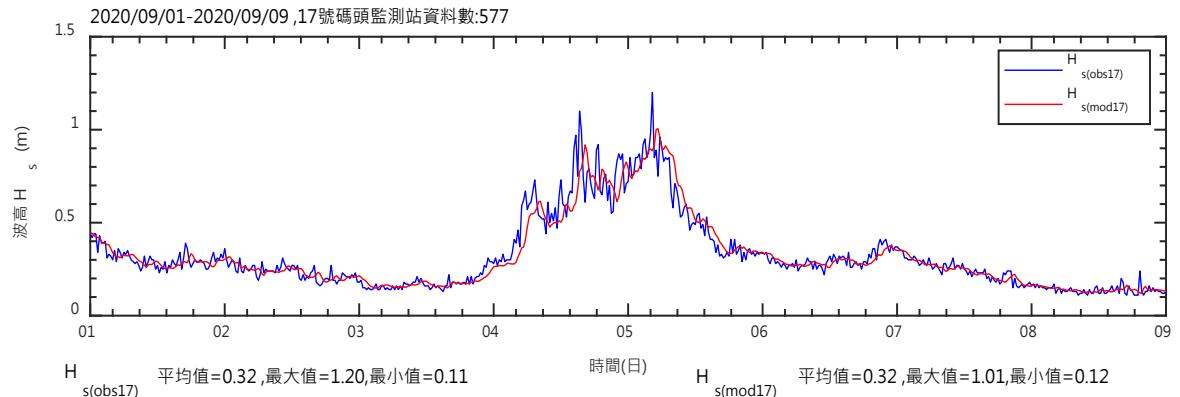


圖 4 17 號碼頭 H-BPNN 架構，以海神颱風起始日起預測 20min 之測試結果歷線圖

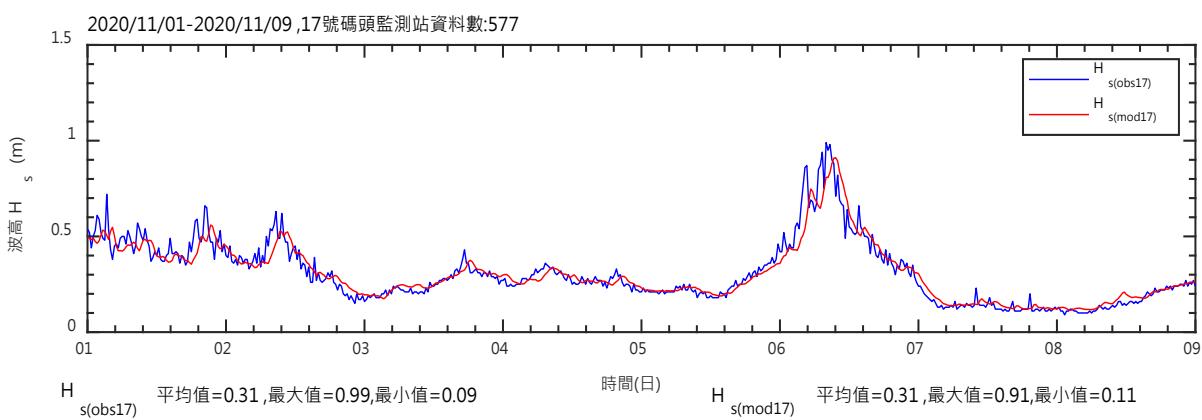


圖 5 17 號碼頭 H-BPNN 架構，以閃電颱風起始日起預測 20min 之測試結果歷線圖

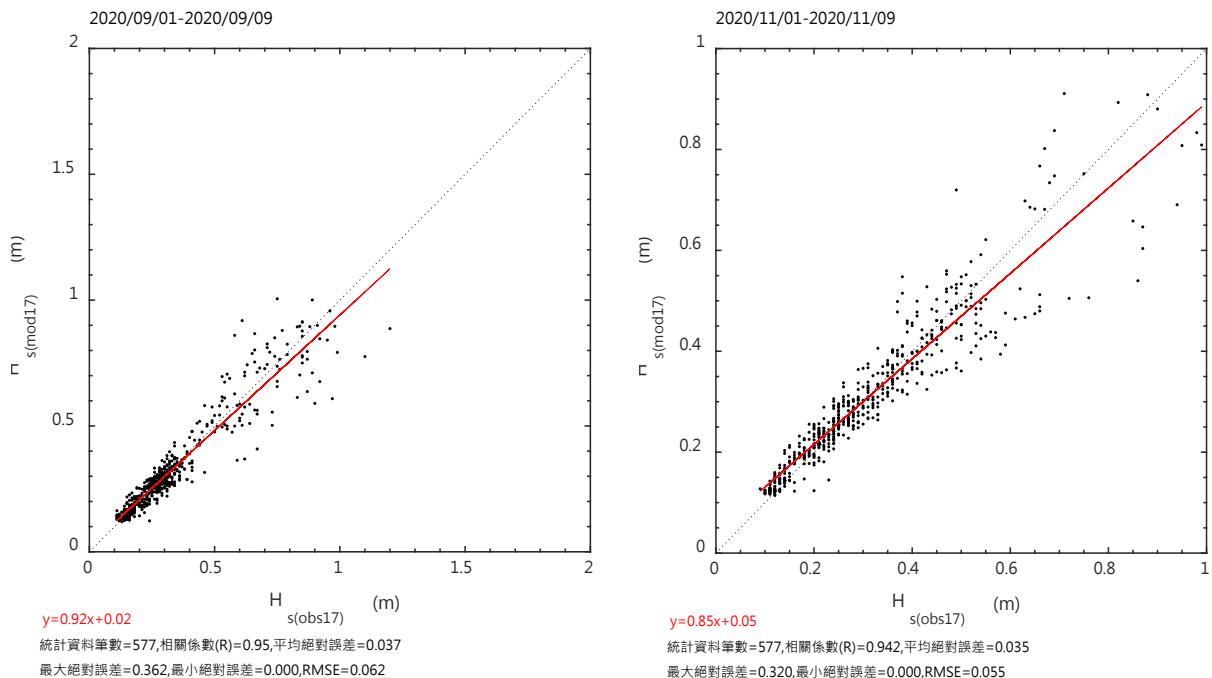


圖 6 17 號碼頭 H-BPNN 架構，海神颱風（左）及閃電颱風（右）測試結果相關性圖

2.2.2 17 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試結果

17 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試流程，如圖 7 所示，經重新訓練後，17 號碼頭 HTM-BPNN 神經網路架構[輸入層-隱藏層-輸出層]選取 [12-1-1]，其驗證案例之評估指標結果，例如表 8，測試案例之評估指標結果，例如表 9。

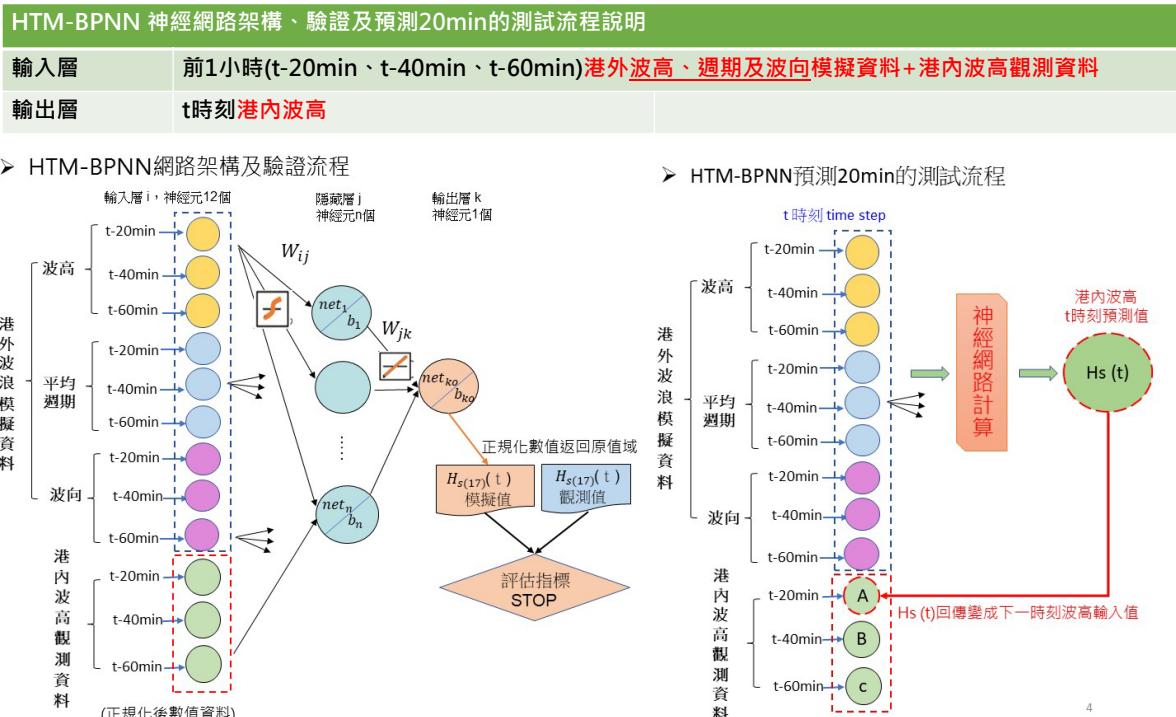


圖 7 HTM-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試流程

由表 8 可知，113 年度在模擬海神颱風驗證結果，相關性 (R) 為 0.958，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.037m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.059；閃電颱風驗證結果，相關性 (R) 均是 0.955，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.031m，均方根誤差 (RMSE) 0.047；夏季驗證結果，相關性 (R) 為 0.590，屬中度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.023m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.036；冬季驗證結果，相關性 (R) 為 0.963，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.021m，均方根誤差 (MAE) 0.029m。前述案例驗證結果與 112 年度結果相比，海神颱風峰值及相關性略有提升，夏季相關性略降。

由表 9 可知，113 年度進行海神颱風測試結果，相關性 (R) 為 0.946，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.039m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.064；閃電颱風測試結果，相關性 (R) 均是 0.943，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.034m，均方根誤差 (RMSE) 0.054，測試結果歷線圖及相關性圖，如圖 8~圖 10 所示。113 年度執行 2 場颱風案例測試結果與 112 年度測試結果相比，海神預測峰值略升、相關性略微下降，閃電預測峰值略降，但整體而言，訓練集資料經擴充後之測試結果與 112 年度差異不大。

表 8 17 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構下驗證結果表

輸入層參數	考慮 $t-20\text{min}$ 、 $t-40\text{min}$ 、 $t-60\text{min}$ 之時間序列資料 TaiCOMS 產製之花蓮港外波高、週期、波向模擬資料；港內波高觀測資料，共 12 個參數。						
輸出層參數	t 時刻港內波高資料，共 1 個參數。						
驗證案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
海神颱風 (109 年 9 月 1 日~9 月 8 日)	觀測值	0.36	1.20	0.13	-	-	-
	112 年模擬值	0.36	1.13	0.14	0.955	0.037	0.060
	113 年模擬值	0.36	1.20	0.13	0.958	0.037	0.059
閃電颱風 (109 年 11 月 1 日~11 月 7 日)	觀測值	0.34	0.99	0.12	-	-	-
	112 年模擬值	0.34	0.98	0.13	0.955	0.031	0.047
	113 年模擬值	0.34	0.99	0.12	0.955	0.031	0.047
夏季 (109 年 7 月)	觀測值	0.13	0.37	0.06	-	-	-
	112 年模擬值	0.14	0.31	0.07	0.594	0.024	0.036
	113 年模擬值	0.13	0.37	0.06	0.590	0.023	0.036
冬季 (109 年 12 月)	觀測值	0.30	0.62	0.10	-	-	-
	112 年模擬值	0.30	0.59	0.11	0.963	0.021	0.029
	113 年模擬值	0.30	0.62	0.10	0.963	0.021	0.029

表 9 17 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構下預測 20min 之測試結果表

17 號碼頭 HTM-BPNN 神經網路架構[12-1-1]，預測 20min，執行 8 日							
測試案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
海神颱風起始日起，執行 8 日	觀測值	0.32	1.20	0.11	-	-	-
	112 年模擬值	0.32	0.99	0.12	0.948	0.038	0.063
	113 年模擬值	0.32	1.01	0.12	0.946	0.039	0.064
閃電颱風起始日起，執行 8 日	觀測值	0.31	0.99	0.09	-	-	-
	112 年模擬值	0.31	0.94	0.11	0.943	0.035	0.054
	113 年模擬值	0.31	0.91	0.11	0.943	0.034	0.054

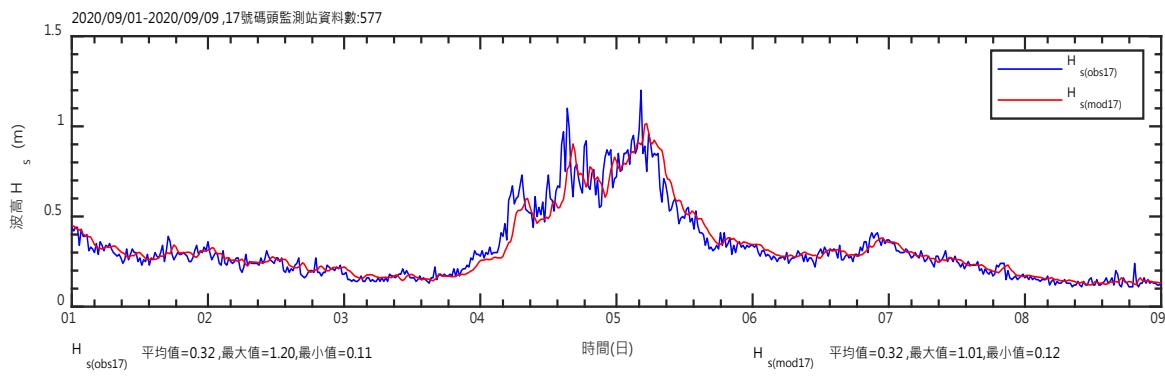


圖 8 17 號碼頭 HTM-BPNN 架構下，海神颱風預測 20min 之測試結果歷線圖

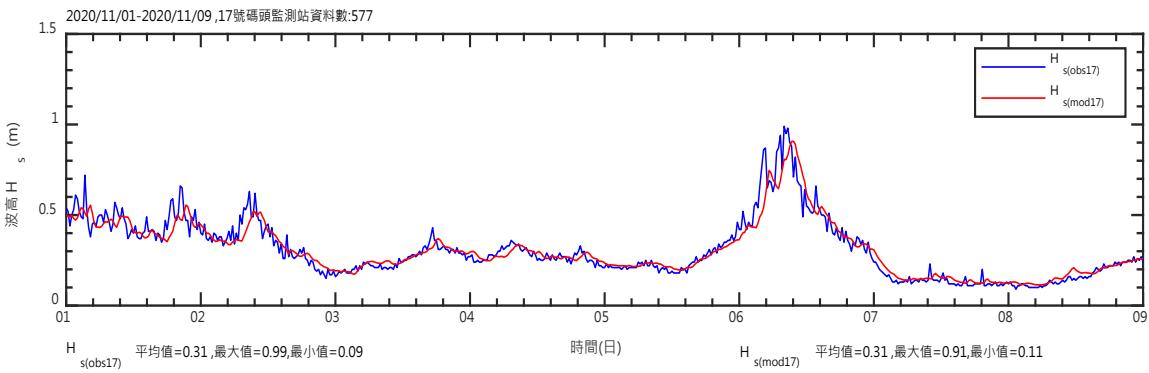


圖 9 17 號碼頭 HTM-BPNN 架構下，閃電颱風預測 20min 之測試結果歷線圖

比較 113 年度 H-BPNN/HTM-BPNN 2 種網路架構下驗證及測試結果，在驗證結果比較，4 場驗證案例相關性、均方根誤差及絕對誤差差異不大；在測試結果比較，H-BPNN 架構之海神颱風測試案例相關性 ($R=0.95$) 較 HTM-BPNN 海神颱風測試案例相關性 ($R=0.946$) 略佳，其餘絕對誤差及均方根誤差值均差異不大。

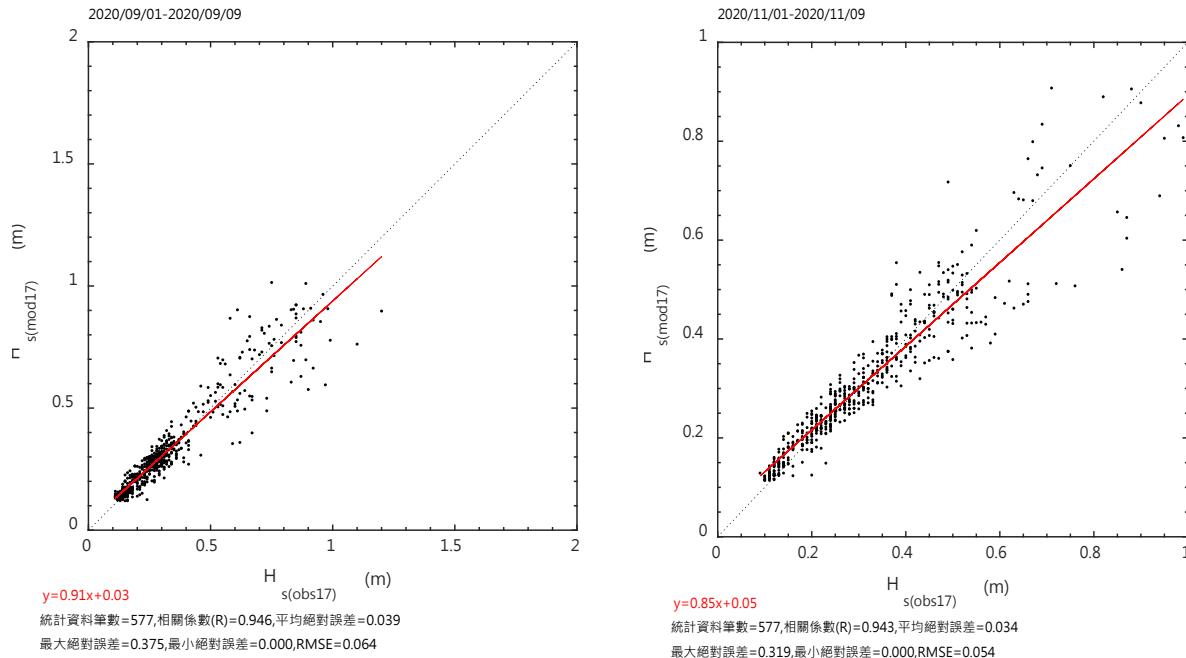


圖 10 海神颱風 (左)、閃電颱風 (右) 測試結果相關性圖 (HTM-BPNN)

2.3 25 號碼頭波高神經網路再訓練、驗證及測試結果

在 112 年度建置 25 號碼頭波高神經網路時，訓練集資料僅使用 110 年 1 月 1 日至 111 年 9 月 7 日期間之港外模擬資料及港內觀測資料，並以 111 年度梅花颱風及 111 年 10 月做驗證案例；測試案例則以梅花颱風起始日起，以預測 20min 方式執行 8 日。113 年度納入 112 年度資料進行 25 號碼頭波高神經網路重新訓練，訓練集資料使用 110 年 1 月 1 日至 112 年 9 月 28 日期間之港外波浪模擬資料及港內波高觀測資料（即梅花颱風、111 年 10 月資料已轉成訓練資料內容），同樣以 H-BPNN 及 HTM-BPNN 2 種網路架構，進行 25 號碼頭神經網路再訓練、驗證及測試工作，並以 112 年度之小犬颱風及冬季（112 年 12 月）做驗證案例，測試案例則以小犬颱風起始日起，以預測 20min 方式執行 8 日，其使用的訓練集、驗證及測試案例資料區間及筆數，列如表 10 所示。

表 10 重建 25 號碼頭神經網路之訓練集、驗證及測試案例資料區間及筆數

25 號碼頭訓練、驗證及測試集資料區間及資料筆數		
訓練集	110 年 5 月 15 日 01 時 00 分-112 年 9 月 28 日 23 時 40 分，共 62,421 筆	
驗證集	小犬颱風	112 年 9 月 29 日 18 時 00 分-112 年 10 月 9 日 12 時 00 分，共 703 筆
	冬季	112 年 12 月 1 日 01 時 00 分-112 年 12 月 31 日 23 時 40 分，共 2,227 筆
測試案例	小犬起始日 112 年 9 月 29 日 18 時 00 分，預測 20min，執行 8 日，共 577 筆	

2.3.1 25 號碼頭 H-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試結果

25 號碼頭 H-BPNN 網路架構說明、驗證及測試流程同圖 3，惟圖上 $H_s(17)$ 改成 $H_s(25)$ ，經重新訓練後，其[輸入層-隱藏層-輸出層]選取 [6-3-1]，其驗證及測試結果，如表 11、表 12 所示。依表 11 所示，小犬颱風驗證結果相關性 (R) 為 0.983，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.057m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.102；在冬季驗證結果，相關性 (R) 均是 0.935，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.022m，均方根誤差 (RMSE) 0.031。依表 12 所示，小犬颱風測試結果相關性 (R) 為 0.973，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.078m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.134，歷線圖及相關性圖，如圖 11 及圖 13 (左圖) 所示。

表 11 25 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構下驗證結果表

25 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構[6-3-1]							
輸入層參數	考慮 $t-20\text{min}$ 、 $t-40\text{min}$ 、 $t-60\text{min}$ 之時間序列資料 TaiCOMS2.0 產製之花蓮港外波高模擬資料；港內波高觀測資料，共 12 個參數。						
輸出層參數	t 時刻港內波高資料，共 1 個參數。						
驗證案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
小犬颱風 (112 年 9 月 29 日~10 月 9 日)	觀測值	0.52	2.61	0.10	-	-	-
	113 年度模擬值	0.52	2.55	0.10	0.983	0.057	0.102
冬季 (112 年 12 月 1 日~12 月 31 日)	觀測值	0.30	0.66	0.15	-	-	-
	113 年度模擬值	0.30	0.63	0.16	0.935	0.022	0.031

表 12 25 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構下預測 20min 測試結果表

25 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構[6-3-1]，預測 20min，執行 8 日之測試結果							
測試案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
小犬颱風起始日起，執行 8 日	觀測值	0.59	2.61	0.10	-	-	-
	113 年度模擬值	0.59	2.44	0.11	0.973	0.078	0.134

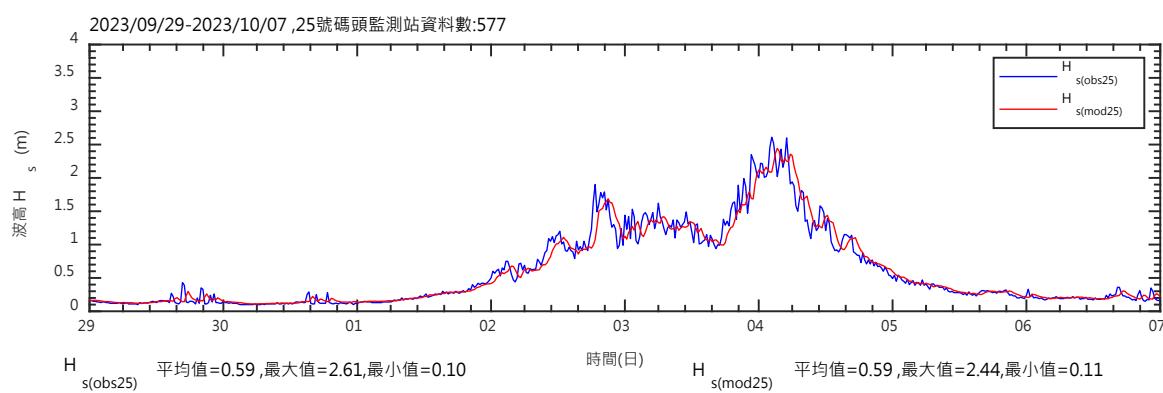


圖 11 25 號碼頭 H-BPNN 架構下，小犬颱風預測 20min 之測試結果歷線圖

2.3.2 25 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試結果

25 號碼頭 HTM-BPNN 網路架構訓練、驗證及測試流程同圖 7，惟圖上 $H_s(17)$ 改成 $H_s(25)$ ，經重新訓練後，其[輸入層-隱藏層-輸出層]選取 [12-6-1]，其驗證及測試結果，如表 13 及表 14 所示。

由表 13 可知，小犬颱風驗證結果相關性 (R) 為 0.979，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.061m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.114；在冬季驗證結果，相關性 (R) 均是 0.936，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 0.022m，均方根誤差 (RMSE) 0.031；由表 14 可知，小犬颱風測試結果相關性 (R) 為 0.968，屬高度相關，絕對誤差 (MAE) 為 0.084m，均方根誤差 (RMSE) 為 0.147，歷線圖及相關性圖，如圖 12 及圖 13 (右圖) 所示。

另比較 25 號碼頭使用 H-BPNN 、HTM-BPNN 2 種神經網路架構之驗證及測試結果（參考表 11~表 14），在 H-BPNN 架構下，小犬颱風驗證及測試結果，其相關性、絕對誤差 (MAE) 及均方根誤差表現較 HTM-BPNN 佳。

表 13 25 號碼頭 HTM-BPNN 神經網路架構下驗證結果表

25 號碼頭 HTM-BPNN 神經網路架構[12-6-1]							
輸入層參數	考慮 $t-20\text{min}$ 、 $t-40\text{min}$ 、 $t-60\text{min}$ 之時間序列資料 TaiCOMS 2.0 產製之花蓮港外 <u>波高</u> 、 <u>週期</u> 、 <u>波向</u> 模擬資料；港內 <u>波高</u> 觀測資料， 共 12 個參數。						
輸出層參數	t 時刻港內波高資料，共 1 個參數。						
驗證案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
小犬颱風 (112 年 9 月 29 日~10 月 9 日)	觀測值	0.52	2.61	0.10	-	-	-
	113 年模擬值	0.51	2.25	0.10	0.979	0.061	0.114
冬季 (112 年 12 月 1 日~12 月 31 日)	觀測值	0.30	0.66	0.15	-	-	-
	113 年模擬值	0.30	0.63	0.16	0.936	0.022	0.031

表 14 25 號碼頭 HTM-BPNN 神經網路架構下，預測 20min 測試結果表

25 號碼頭 H-BPNN 神經網路架構[12-6-1]，預測 20min，執行 8 日之測試結果							
測試案例	資料	平均值 (m)	最大值 (m)	最小值 (m)	R	MAE (m)	RMSE (m)
小犬颱風起始日 起，執行 8 日	觀測值	0.59	2.61	0.10	-	-	-
	113 年模擬值	0.58	2.17	0.10	0.968	0.084	0.147

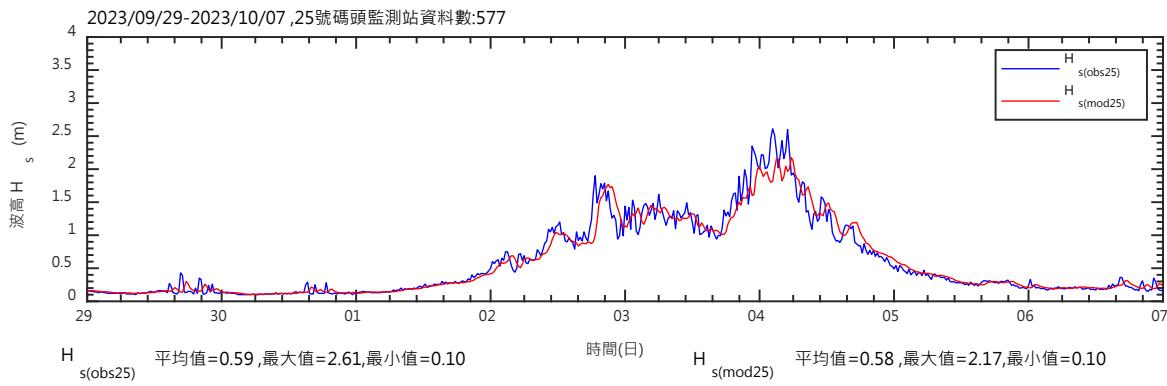


圖 12 25 號碼頭 HTM-BPNN 架構下，小犬颱風預測 20min 之測試結果歷線圖

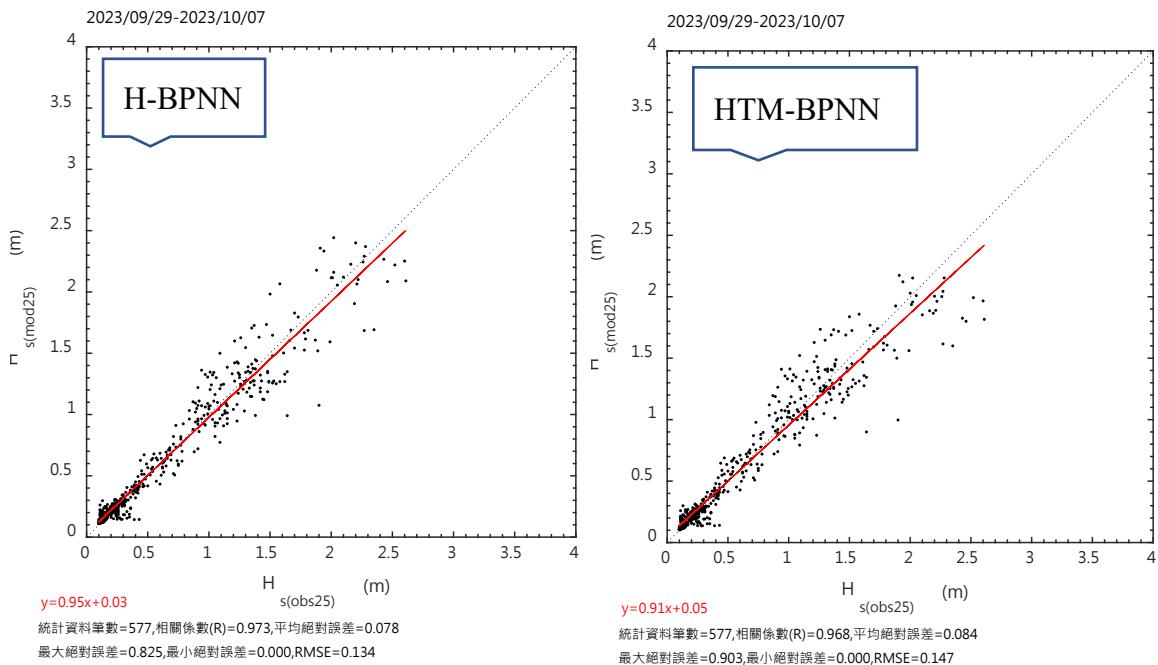


圖 13 H-BPNN 與 HTM-BPNN 架構下，小犬颱風測試結果相關性圖

三、花蓮港碼頭波高預測作業化模式

依前節完成 17、25 號碼頭波高預測模式（含 H-BPNN、HTM-BPNN 架構），規劃作業化流程，期望程式啟動時可下載花蓮港 17、25 號碼頭波潮站之港內即時波高觀測資料，以及 TaiCOMS 2.0 系統 1 日 1 次及 1 日 4 次之港外波浪模擬預測資料（最多 48 小時資料），經處理後輸入至 17、25 碼頭波高預測模式進行神經網路計算，以獲取 17、25 號碼頭預測波高資訊。故本研究編寫連線下載資料庫資料，以及針對即時資料進行資料檢核、補遺、內插及正規化等前處理程式，目前已初步整合 17 號及 25 號碼頭波高預測模式，完成「花蓮港碼頭波高預測作業化模式」。「花蓮港碼頭波高預測作業化模式」整體流程分 2 階段，將 2 個主程式封裝成執行檔，並由排程串聯、設定每小時啟動執行。

3.1 第 1 階段作業化流程

主程式 main1_connSQL.exe，初始設定檔 set_conn.txt，如圖 14 所示，目前設定下載 17 號及 25 號碼頭港內波高資料，港外模擬資料下載 1 日 1 次及 1 日 4 次之波浪模擬資料；在神經網路運算，預設執行 24 小時預測工作（20 分鐘=1 個 time step，即執行 72 個 time step），同時，使用 H-BPNN 、HTM-BPNN 等 2 種神經網路架構計算推估未來波高。

1. 下載 17 號碼頭最新 3 筆波高觀測資料：啟動後，連線至運研所「港灣環境資訊平台」各商港碼頭即時波浪資料庫 (wap_HSN)，下載最近 1 小時內 3 筆港內波高觀測資料，流程如圖 15 所示，該次執行下載 17 號、25 號碼頭最新 3 筆波高資料時間 (yyyyMMddhhmmss)，時間由新到舊排序為 20241029102000、20241029100000、20241029094000 等 3 筆，檢查下載的港內 3 筆波高資料是否為連續時間序列資料（即檢查時間間隔是否都是 20 分鐘），以這 3 筆港內波高資料時間，訂出本趟執行流程輸出第 1 筆預測時間為 20241029104000 (t+1 個 time step)，據此，做為該趟作業化流程所有輸出檔案的檔名時間資訊（輸出檔名_20241029104000.txt），以及決定時間參數“start_time17”及“start_time25”（在此案例 start_time17 及 start_time25 均為 20241029090000），最後輸出下載之 3 筆港內波高資料，檔名為 pier17_20241029104000.txt 及 pier25_20241029104000.txt；若經檢查下載的 3 筆港內波高資料非連續時間序列資料（有缺漏資料），則將下載 3 筆波高時間資料進行內插，變成每 20 分鐘 1 筆資料，選取內插後 20241029102000、20241029100000、20241029094000 等 3 筆港內波高資料後再輸出。
2. 下載花蓮港模擬預測資料部分：連線至「港灣環境資訊平台」儲存波浪模擬預測資料庫 (wap_FormalB)，TaiCOMS 2.0 系統之風浪模擬系統，其執行 1 日 1 次產製之波浪模擬預測資料存在 SimSwanUReal 資料表，執行 1 日 4 次產製之波浪模擬預測資料則存在 SimSwanUFTReal 資料表，以時間參數 start_time17、start_time25 為起始時間，在 2 個資料表自 start_time17/start_time25 開始下載至目前資料庫所有波浪模擬資料（含波高、週期及波向），以做為 17、25 號碼頭波高預測模式使用之港外波浪模擬輸入資料，如自 20241029090000 起開始下載 1 日 1 次花蓮港外波浪模擬預測資料，其時間自 20241029090000 起至 2024103000000 止，每小時 1 筆，共計 16 小時，並輸出至 readdata\taiHL17_20241029104000.txt；如自 20241029090000 起開始下載 1 日 4 次花蓮港外波浪模擬預測資料，其時間自 202410290900000 起至 20241030120000 止，每小時 1 筆，共計 28 小時，並輸出至 readdata\taiHL17r4_20241029104000.txt，最後依該次下載資料實際情況，製作設定檔 set_NN.txt，如圖 16 所示，供第 2 階段執行碼頭波高預測模式使用。如下載之港外波浪模擬預測資料不足 24 小時，第 1 階段在製作 set_NN.txt 時，圖 16 第 1 列會改輸出 10；如無下載到 1 日 1 次或 1 日 4 次之港外波浪模擬預測資料，圖 16 第 4 列或第 5 列會改輸出 0。

```
%%
連線資料庫、下載設定
%%
1    %設定是否要下載 17 號碼頭資料 / 1 下載 ; 0 不下載;
1    %設定是否要下載 25 號碼頭資料 / 1 下載 ; 0 不下載;
1    %設定是否要下載 09 號碼頭資料 / 1 下載 ; 0 不下載;
1    %設定是否要下載 1 日 1run 資料 / 1 下載 ; 0 不下載;
1    %設定是否要下載 1 日 4run 資料 / 1 下載 ; 0 不下載;
%%
----- 神經網路計算設定 -----
12    %設定 BPNN 預測時數，24 小時
1    %是否使用 H-BPNN 計算 / 1 使用 ; 0 不使用;
1    %是否使用 HTM-BPNN 計算 / 1 使用 ; 0 不使用;
```

圖 14 設定檔 set_conn.txt

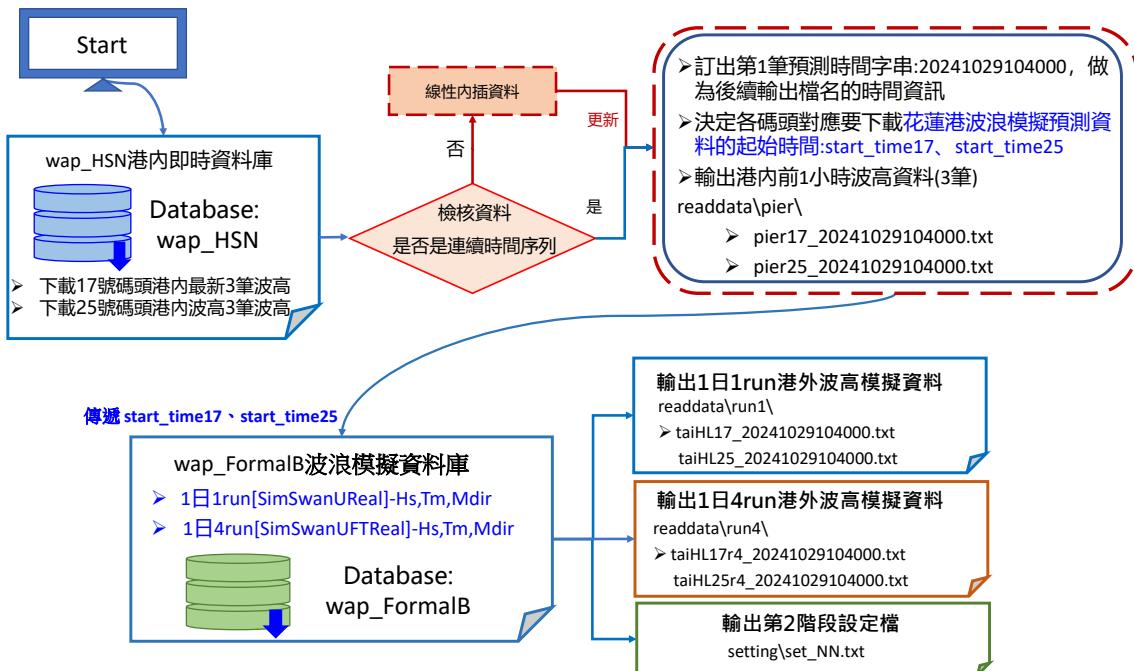


圖 15 第 1 階段主程式 (main1_connSQL.exe) 處理流程

```
12    %設定 BPNN 預測時數
1    %設定執行 17 號碼頭 NN / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定執行 25 號碼頭 NN / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定執行 9 號碼頭 NN / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定是否要使用 1 日 1run data / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定是否要使用 1 日 4run data / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定執行 HBPNN / 1 執行 ; 0 不執行
1    %設定執行 HTMBPNN / 1 執行 ; 0 不執行
```

圖 16 設定檔 set_NN.txt

3.2 第 2 階段作業化流程

主程式 main2_HLNNs.exe，讀取設定檔 set_NN.txt (圖 16)，其內容會依第 1 階段下載港外、港內資料情形做變動，如下載之港外波浪模擬預測資料不足 24 小時，第 1 階段在製作 set_NN.txt 時，圖 16 第 1 列會改輸出 10，則第 2 階段執行波高預測模式，將會依設定檔 set_NN.txt 內容，採連續預測 10 小時並輸出未來 10 小時預測波高方式辦理。

main2_HLNNs.exe 主要將港外、港內資料讀取輸入，經資料檢核、正規化後進入神經網路，神經網路以連續預測方式預測獲取預測波高，以 17 號碼頭為例說明此流程，如圖 17 所示。

1. 處理港內波高即時觀測資料:讀取 pier17_20241029104000.txt，因後續需以正規化數值輸入至神經網路運算，先檢核本次下載後之港內波高資料是否在設定波高最大值及最小值範圍內，若波高超過最大值則以最大值替換，若低於最小值則以最小值替換，以避免剛好下載到異常值波高，導致後續計算預測波高異常情形。港內波高資料經檢查後，正規化至 0.9 至 -0.9 間。
2. 處理港外波浪模擬預測資料:假設該次作業有每日執行 1 日 1 次所得 taiHL17_2024102911000.txt，及 1 日 4 次預測所得 taiHL17r4_20241029110000.txt，先檢核輸入之港外波浪模擬預測資料 (含波高、週期及波向) 是否在設定波高、週期及波向之最大值及最小值範圍內，若波高、週期或波向超過最大值則以最大值替換，若低於最小值則以最小值替換，以避免遇到模擬資料經正規化後還超過本研究設定範圍，導致後續計算預測波高異常；接著，再將檢核過的波浪資料 (1 小時 1 筆) 內差為每 20 分鐘 1 筆資料；最後，正規化至 0.9 至 -0.9 間。
3. 執行碼頭波高預測模式:因港內波高僅提供 3 筆波高 (即最近 1 小時資訊)，而下載下來的港外波浪模擬資料包含最近 1 小時 (已知歷史資料) 至未來 10~48 小時不等之預測資料 (每次下載的資料最多不超過 48 小時)，在執行碼頭波高預測模式運算，係採連續預測方式，詳如圖 18 所示，即在執行 72 個 time step (3*24=72) 過程中，每 1 次神經網路計算，港外波高模擬資料視為已知值且持續輸入；而港內波高資料僅已知 3 筆波高 (即最近 1 小時資訊)，在第 1 時間步長 (time step=1) 經神經網路計算獲得港內波高預測值 $H_s(t)$ $^{step=1}$ ，回傳變成第 2 時間步長 (time step=2) 的 $t-20min$ 輸入值，即圖 18 之 A 位置數值 $^{step=2}$ ，原 A 位置數值 $^{step=1}$ 下移變成 B 位置數值 $^{step=2}$ ，原 B 位置數值 $^{step=1}$ 下移變成 C 位置數值 $^{step=2}$ ，再經神經網路計算獲得 $H_s(t+1)$ $^{step=2}$ ，再回傳變成第 3 時間步長 (time step =3) 的 $t-20min$ 輸入值，即圖 18 之 A 位置數值 $^{step=3}$ ，原 A 位置數值 $^{step=2}$ 下移變成 B 位置數值 $^{step=3}$ ，原 B 位置數值 $^{step=2}$ 下移變成 C 位置數值 $^{step=3}$ ，再經神經網路計算獲得 $H_s(t+2)$ $^{step=3}$ ，以此不斷回傳、預測、再回傳、再預測...直至完成執行 72 個 time step，獲得未來 24 小時港內波高預測資料。其中，神經網路架構分別使用 H-BPNN 及 HTM-BPNN 等 2 種計算，故 1 日 1 次港外波浪資料 taiHL17_20241029104000.txt 與港內波高資料 pier1

7_20241029104000.txt，經正規化輸入至 H-BPNN 及 HTM-BPNN 神經網路架構計算，產出 nn17_20241029104000data01H.txt、nn17_20241029104000data01HTM.txt 等 2 種資料；1 日 4 次港外波浪資料 taiHL17r4_20241029104000.txt 與港內波高資料 pier17_20241029104000.txt，經正規化輸入至 H-BPNN 及 HTM-BPNN 神經網路架構計算，產出 nn17_20241029104000data02H.txt、nn17_20241029104000data02HTM.txt 等 2 種資料。

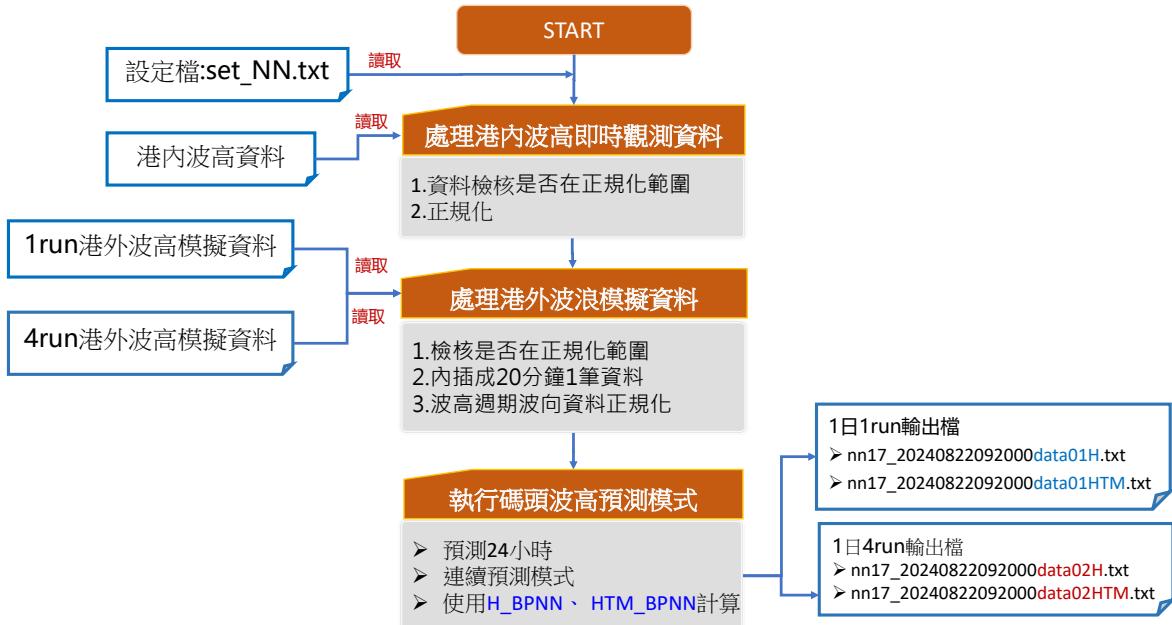


圖 17 第 2 階段主程式 (main2_HLNNs.exe) 處理流程-以 17 號碼頭為例說明

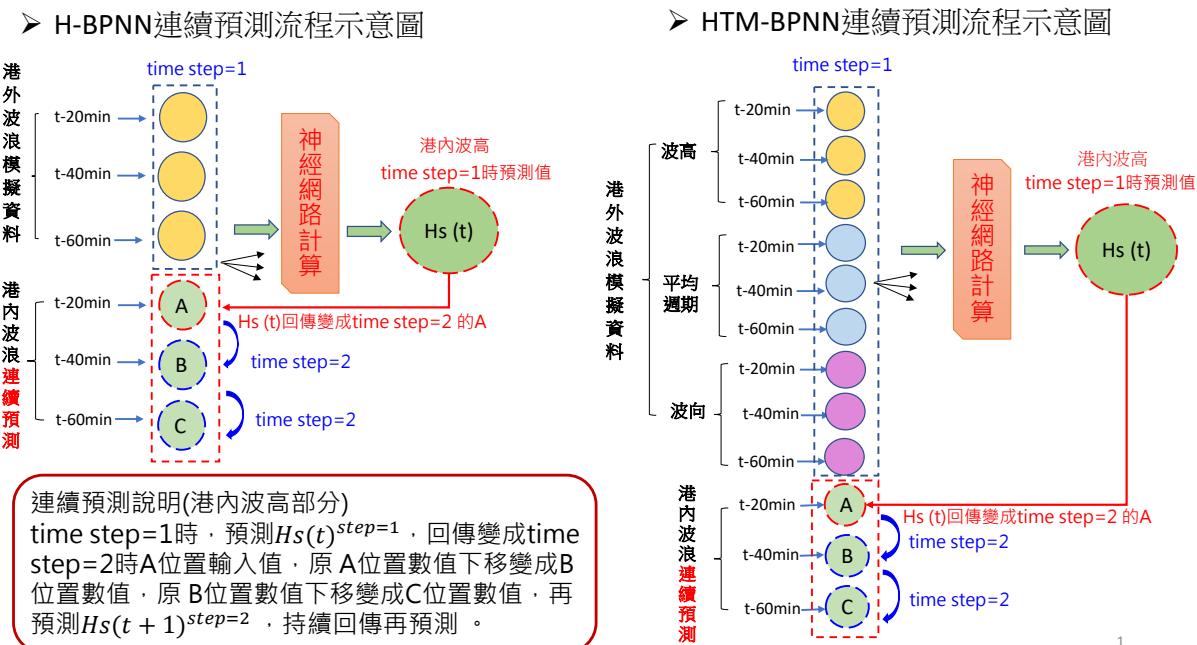


圖 18 連續預測流程示意圖

3.3 作業化模式上線測試執行情形

3.2 節初步完成「花蓮港碼頭波高預測作業化模式」(17 號及 25 號碼頭部分)，但尚未上線執行，本研究在完成只有 17 號碼頭波高預測作業化模式時，先行封裝製成執行檔 NN17_op2024.exe，並於 10 月中旬時放置於測試網頁試行，藉此先檢視規劃流程是否可行，試行運作有發生問題並已逐一排除，本節說明 17 號碼頭波高預測作業化模式 (NN17_op2024.exe) 之上線執行情形。

執行檔設定每小時啟動 1 次，每次啟動會下載當時刻最新 3 筆花蓮港港內波高資料，以及當時刻起至未來數小時期間內，所有港外波浪模擬預測資料 (1 日 1 次及 1 日 4 次模擬資料)，再經資料檢核、正規化後輸入至 H-BPNN、HTM-BPNN 神經網路計算，故每執行 1 次會產出 4 種輸出資料 (詳 3.2 節圖 14~圖 18)，目前預設預測時間為 24 小時，但碼頭波高預測資料需仰賴當下花蓮港外波浪模擬預測資料之時間長度，若當下港外模擬資料小於 24 小時，則視下載資料時間長度，更新設定的預測時間。

在 17 號碼頭波高預測作業化模式上線後，遇康芮颱風 (113 年 10 月 25 日 00 時至 11 月 1 日 12 時)，路徑如圖 19 所示，擷取 10 月 29 日測試網頁並查看其執行情形，如圖 20 所示，此時康芮颱風為中度颱風，花蓮港 17 號碼頭觀測波高 (綠點) 已大於 0.5m 並仍持續上升，查看其預測資料推估情形，其呈現港內碼頭波高未來 24 小時內之變化趨勢；比較使用的港外波浪模擬資料差異，使用 1 日 4 次港外波高模擬預測資料，其碼頭波高預測結果均較使用 1 日 1 次港外波高模擬預測資料高 (02H>01H;02HTM>01HTM)；在使用同樣的港外波高模擬預測資料，比較使用神經網路架構差異，HTM-BPNN 之碼頭波高預測結果均會高於 H-BPNN 碼頭波高預測結果 (01HTM>01H;02HTM>02H)，推測因其架構考慮波高、週期及波向 3 種物理量，每個物理量模擬值與觀測值本身會有誤差，每經過 1 個 time step 亦會有誤差，預測係採用不斷連續預測方式，即本時刻預測值會帶回輸入層做下 1 時刻輸入值，反覆預測、回傳、再預測、再回傳直至模擬時間結束，故在連續預測過程中，誤差會持續累積。

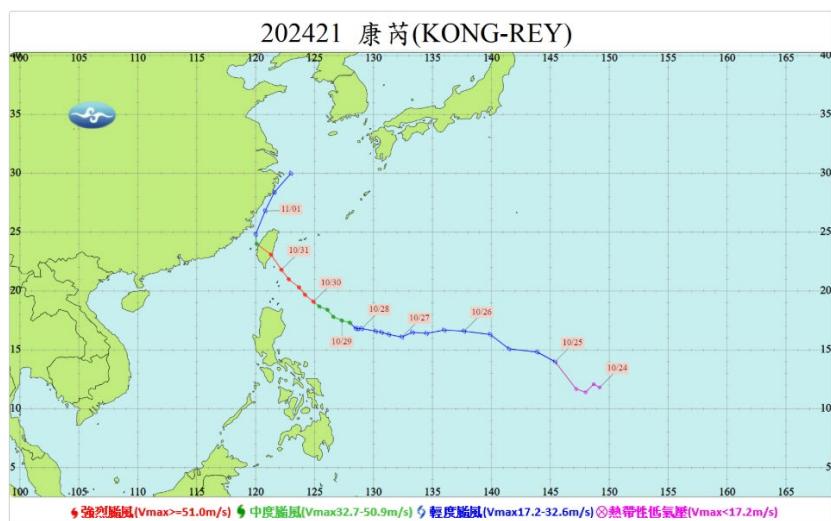


圖 19 康芮颱風路徑示意圖

17 號碼頭波高觀測資料因康芮颱風，於 10 月 31 日下午 4 時 20 分資料中斷，後於 11 月 1 日下午 3 時 20 分恢復。擷取 11 月 3 日 10 時測試網頁，如圖 21 所示，資料中斷後，每次啟動仍會下載最後 3 筆波高資料進行預測 24 小時工作，此時因每次下載港內資料均一樣，所以每次輸出 4 種資料亦一樣，直到 11 月 1 日下午港內觀測資料恢復後，依當下最新港內波高資料情形進行預測。另使用 1 日 1 次波浪模擬預測資料，以 H-BPNN、HTM-BPNN 進行康芮颱風驗證模擬（後測），結果如圖 22~圖 24，2 者神經網路架構驗證結果差異不大，且相關性均 0.985 屬高度相關。

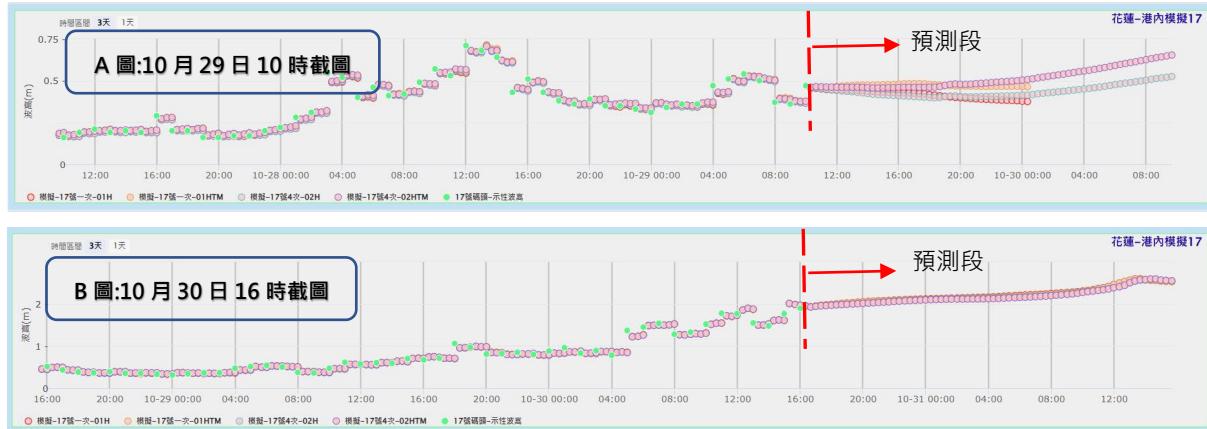


圖 20 17 號碼頭波高預測作業化模式於康芮颱風期間測試執行情形

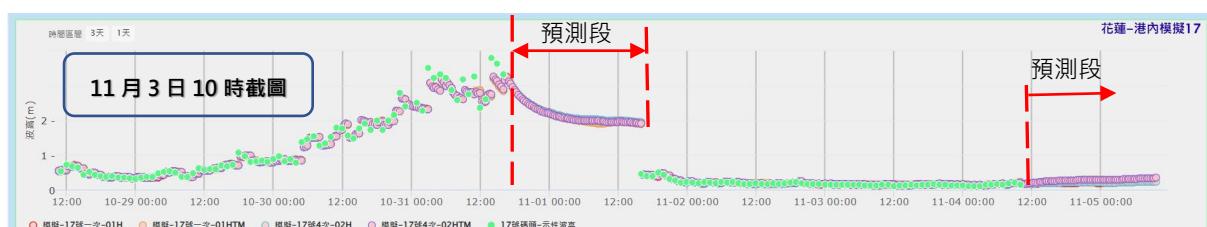


圖 21 17 號碼頭波高預測作業化模式於康芮颱風期間遇資料中斷、恢復之執行情形

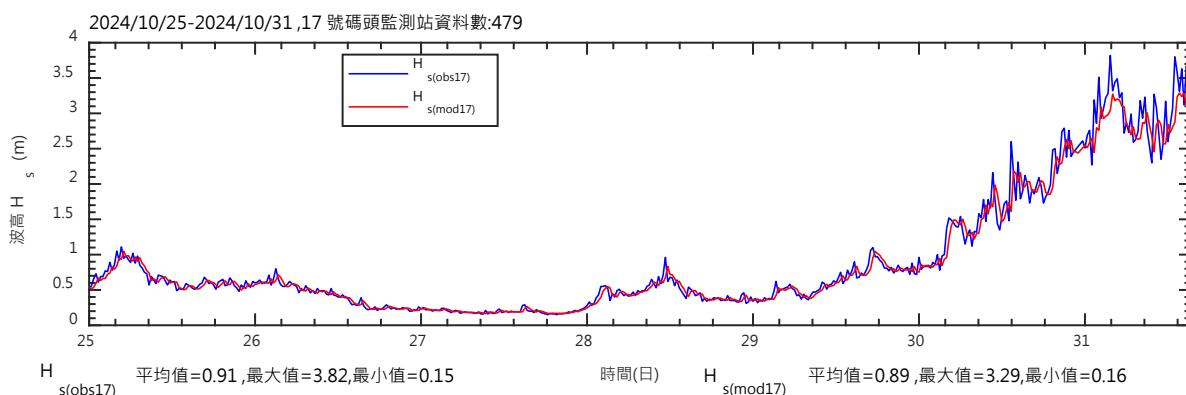


圖 22 使用 H-BPNN 網路架構，康芮颱風驗證（後測）結果歷線圖

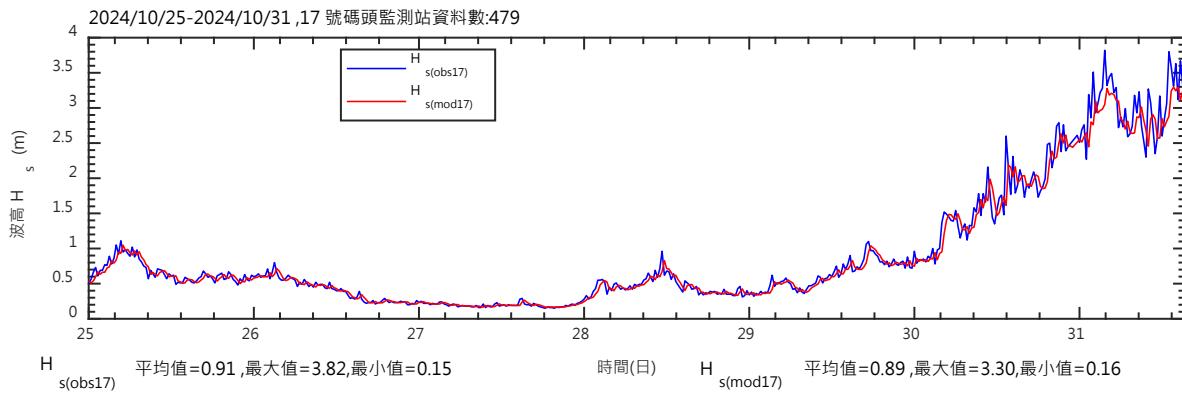


圖 23 使用 HTM-BPNN 網路架構，康芮颱風驗證（後測）結果歷線圖

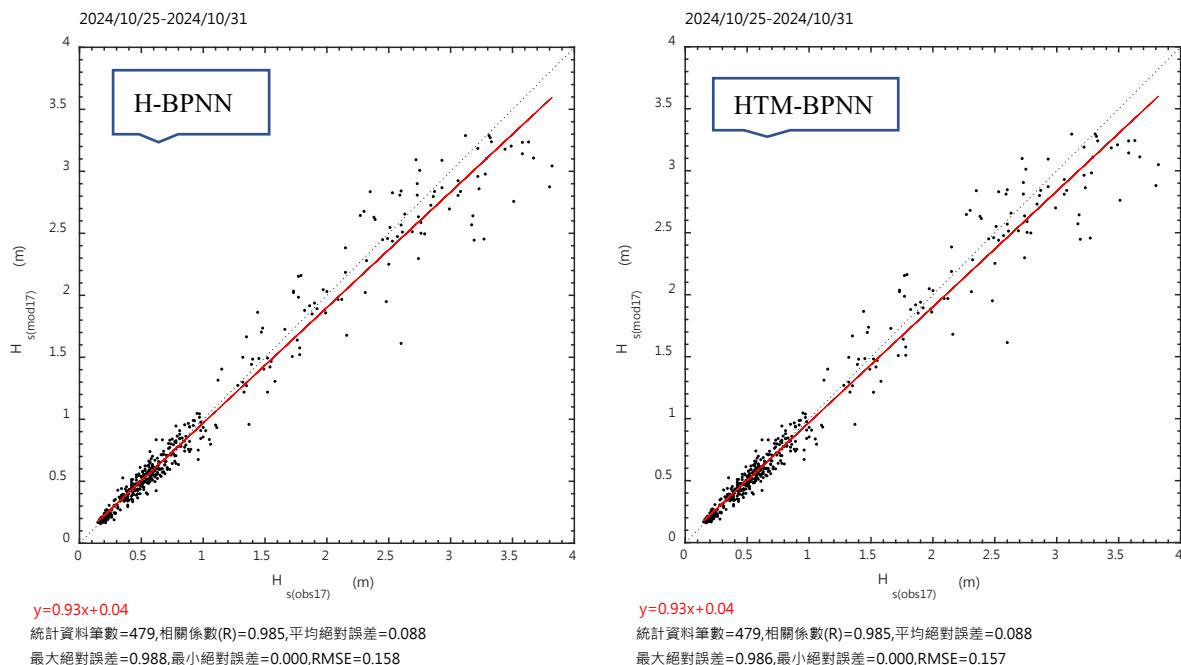


圖 24 H-BPNN (左) 及 HTM-BPNN (右) 架構，康芮颱風驗證（後測）相關性圖

四、結論與建議

因現行進出港管制作業已非常仰賴外港區及內港區碼頭波高觀測資訊，本研究延續 112 年「應用倒傳遞類神經網路建置花蓮港碼頭波高預測模式」之研究方法，使用 109 年~112 年期間 TaiCOMS 2.0 系統產製花蓮港外波浪模擬資料，以及 17 號及 25 號碼頭港內波高觀測資料，分別以 H-BPNN 及 HTM-BPNN 2 種神經網路架構進行訓練、驗證及測試工作。17 號碼頭波高預測模式在 2 種神經網路架構計算下之驗證及測試結果，海神測試案例 H-BPNN 相關性 0.95 較 HTM-BPNN 相關性 0.946 略佳，但均屬高度相關，其餘各案例比較結果均差異不大；25 號碼頭波高預測模式，以小犬颱風為測試案例，在使用 H-BPNN 架構計算下，其相關性、絕對誤差（MAE）及均方根誤差表現較使用 HTM-BPNN 略佳，但實際 2 者結果差異亦不大。

將上述 17 號及 25 號碼頭波高預測模式，規劃相關作業化流程並編寫程式，目前初步完成「花蓮港碼頭波高預測作業化模式」(HLNNs.exe)，可以作業化方式即時下載花蓮港 17、25 號碼頭最新 3 筆波高觀測資料、TaiCOMS 2.0 系統以 1 日 1 次及 1 日 4 次所產製之花蓮港港外波浪模擬預測資料（最多 48 小時資料），再經資料檢核、正規化後，進入 17、25 碼頭波高預測模式以 H-BPNN 及 HTM-BPNN 2 種神經網路架構計算，獲得 17、25 號碼頭未來 24 小時預測波高資訊，後續還需上測試網頁試行運作。

目前上線運作執行檔為 NN17_op2024.exe，其以作業化方式執行 17 號碼頭波高預測工作，查看其在康芮颱風期間執行情形，主要以提供未來 24 小時內港內碼頭波高變化情形為主；而在康芮颱風驗證案例結果（後測結果），不管使用 H-BPNN 或 HTM-BPNN 網路架構，驗證結果均相關性高、誤差小且結果相似，顯示若僅是探討颱風案例或模擬其他歷史時間，使用本研究建置之碼頭波高預測模式應會有良好的驗證模擬（後測）結果，但若應用在作業化層面上，則可視為提供港內碼頭波高未來變化趨勢之參採依據。

依 NN17_op2024.exe 上線執行情形，其預測成果主要提供港內碼頭波高未來變化趨勢，建議明（114）年花蓮港碼頭波高預測作業化模式，除了重新訓練 17、25 及 9 號碼頭神經網路部分，作業化模式納入增加執行 9 號碼頭波高預測模式部分，同時，可考慮減少作業化模式預設的預測時數，故後續可再針對作業化執行預測結果，評估預測 6 小時、12 小時或 18 小時之預測資訊，與實際觀測資料準確性，以訂定作業化模式的實際上線運作之預測時數。

參考文獻

1. 傅怡釤、鄭采誼、林雅雯（2024），應用倒傳遞類神經網路建置花蓮港碼頭波高預測模式，交通部運輸研究所。
2. 劉正琪、傅怡釤、林雅雯、李兆芳、謝佳紜、江朕榮（2024），海氣象預測模擬系統之維運與精進（2/4）-建置高雄海域模組，交通部運輸研究所。
3. 傅怡釤、林雅雯（2023），花蓮港內波浪預測方案初探，港灣季刊第 124 期，10-28 頁。
4. 林達遠（2023），112 年港內波潮即時監測及調查，交通部運輸研究所。
5. 傅怡釤、林雅雯、劉清松、陳鈞彥、謝佳紜、鄭采誼（2022），港灣風波潮流模擬及長浪預警之研究（4/4）-模擬評估及靜穩預警研究，交通部運輸研究所。
6. 林達遠（2022），111 年港內波潮即時監測及調查，交通部運輸研究所。
7. 李俊穎、傅怡釤、劉清松、陳鈞彥、謝佳紜、鄭采誼（2021），港灣風波潮流模擬及長浪預警之研究（3/4）-模擬評估及港內靜穩研究，交通部運輸研究所。
8. 林達遠（2021），110 年港內波潮即時監測及調查，交通部運輸研究所。
9. 趙偉廷、余鴻申、余欣卉（2021），應用機器學習理論發展離岸風場之颱風波浪預測模式與極值分析，國立臺灣海洋大學海洋工程科技中心。
10. 傅怡釤、羅冠顯、林達遠、鄭采誼（2021），花蓮港防颱避湧作業波浪分析，2021 臺灣災

害管理研討會暨 110 年科技部自然科學及永續研究發展司防災科技學門計畫成果發表會論文集，245-255 頁。

11. 趙偉廷、楊智傑（2021），應用改良型參數化颱風及倒傳遞類神經網路系統進行長前置時間暴潮預測，第 43 屆海洋工程研討會論文集，154-159 頁。
12. 陳威成、陳盈智、陳憲宗、董東璟（2021），人工智慧演算法在瘋狗浪機率預警系統建置之研究，第 43 屆海洋工程研討會論文集，331-336 頁。
13. 林達遠（2020），109 年港內波潮即時監測及調查，交通部運輸研究所。
14. 賴彥鈞、賴思璇、徐松圻（2020），人工智慧演算法在瘋狗浪機率預警系統建置之研究，第 43 屆海洋工程研討會論文集，331-336 頁。
15. 張書豪、何昊哲（2020），機器學習結合數值模式對集水區土砂收支預報之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。
16. 陳宇文、朱宏杰、張良正、傅怡釧（2009），多湖區系統地表地下聯合操作之最佳化研究，中國土木水利工程學刊，21 (3)，295-305 頁。
17. 傅怡釧、張良正（2006），多湖區系統最佳地表地下聯合操作之研究，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
18. 陳祖憲、吳青俊、鍾侑達（2004），遞迴式類神經模式於日流量預測之應用，中華水土保持學報，35 (3)，187-195 頁。
19. RNN, LSTM & GRU,<http://dprogrammer.org/rnn-lstm-gru>。
20. Juan, N. P., & Valdecantos, V. N. (2022). Review of the application of Artificial Neural Networks in ocean engineering. *Ocean Engineering*, 259, 111947.
21. Yao, J., & Wu, W.(2022). Wave height forecast method with multi-step training set extension LSTM neural network. *Ocean Engineering*, 263, 112432.
22. Zheng, Z., Ma, X., Huang, X., Ma, Y., & Dong, G.(2022). Wave forecasting within a port using WAVEWATCH III and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 255, 111475.
23. Jörges, C., Berkenbrink, C., & Stumpe, B.(2021). Prediction and reconstruction of ocean wave heights based on bathymetric data using LSTM neural networks. *Ocean Engineering*, 232, 109046.
24. Wei, Z.(2021). Forecasting wind waves in the US Atlantic Coast using an artificial neural network model: Towards an AI-based storm forecast system. *Ocean Engineering*, 237, 109646.
25. Fan, S., Xiao, N., & Dong, S.(2020). A novel model to predict significant wave height based on long short-term memory network. *Ocean Engineering*, 205, 107298.
26. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1985). Learning internal representations by error propagation. California Univ San Diego La Jolla Inst for Cognitive Science.
27. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J.(1997).Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.