

2024 年凱米颱風案例颱風波浪模擬

劉正琪¹ 傅怡釗² 李兆芳³ 林雅雯⁴ 謝佳紘⁵

¹ 國立成功大學水工試驗所研究員

² 交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

³ 國立成功大學水工試驗所研究教授

⁴ 交通部運輸研究所運輸技術研究中心科長

⁵ 國立成功大學水工試驗所研究助理

摘要

本研究以交通部運輸研究所發展之「臺灣近岸海象預測系統 2.0」，重現凱米颱風期間基隆海域、蘇澳海域、花蓮海域及高雄海域小尺度風浪模組颱風波浪模擬結果，並使用基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港之波浪觀測資料校驗數值模擬結果，示性波高校驗結果以高雄港二港口相關性 0.982 最佳、花蓮港相關性 0.879 較差；譜峰週期校驗結果以高雄港二港口相關性 0.817 較佳、基隆港相關性 0.443 較差；平均波向校驗結果以高雄港一港口相關性 0.845 較佳，其餘港口如基隆港、蘇澳港及高雄港二港口相關性偏低，此與波向觀測值變異量較大有關。整體而言，凱米颱風期間各港近海颱風波浪模擬結果，以高雄海域風浪模組模擬表現最佳。

一、前言

臺灣四面環海，屬於海島型國家，各類物資及人員運輸多仰賴海洋交通，惟因海上觀測資訊不足及海象變化大，以致時有海事事件發生。為掌握商港海象環境預測資訊，交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)於民國 92 年起著手整合近岸海象數值模擬與海象觀測資料之研究計畫，發展推動近岸/近海防救災相關海象預測系統。2007 年由中山大學陳陽益教授帶領的研究團隊完成「臺灣近岸海象模擬系統(TaiCOMS)」雛型，並移轉給運研所維運至今。每年除了維持系統正常運作以外，持續進行颱風波浪及暴潮等關鍵課題模擬研究，並逐步新建各相關模組、擴增系統。經歷年執行努力，系統已發展成「臺灣近岸海象預測系統 2.0」(以下簡稱 TaiCOMS 2.0 系統)如圖 1 所示，由原本每日執行 1 次 72 小時海象(波、流及水位)模擬作業化流程，提升為每日執行 4 次 54 小時海象模擬作業化流程，對於交通部轄管國際商港及國內商港，建置其所屬海域之小尺度風浪及水動力模組，以提供商港外海較細緻海象模擬預測資訊。

臺灣夏、秋之際為西太平洋颱風最活躍季節，平均每年約有 3 到 4 個颱風侵襲臺灣。凱米颱風為本(113)年度第 1 個侵臺颱風(編號 202403)，颱風肆虐期間造成多哥籍貨輪蘇菲亞號(SOPFIA)等 8 艘貨輪分別於台南、高雄、屏東縣沿海擱淺，坦尚尼亞籍貨輪富順(FU-SHUN)則於高雄港外海 16 海浬沉沒並有 5 船員失蹤，如圖 2 所示。因此，本研究利用

TaiCOMS 2.0 系統之臺海風浪模擬系統，進行凱米颱風期間風浪模擬工作，並使用花蓮港、蘇澳港、基隆港及高雄港波浪觀測資料校驗模擬結果。

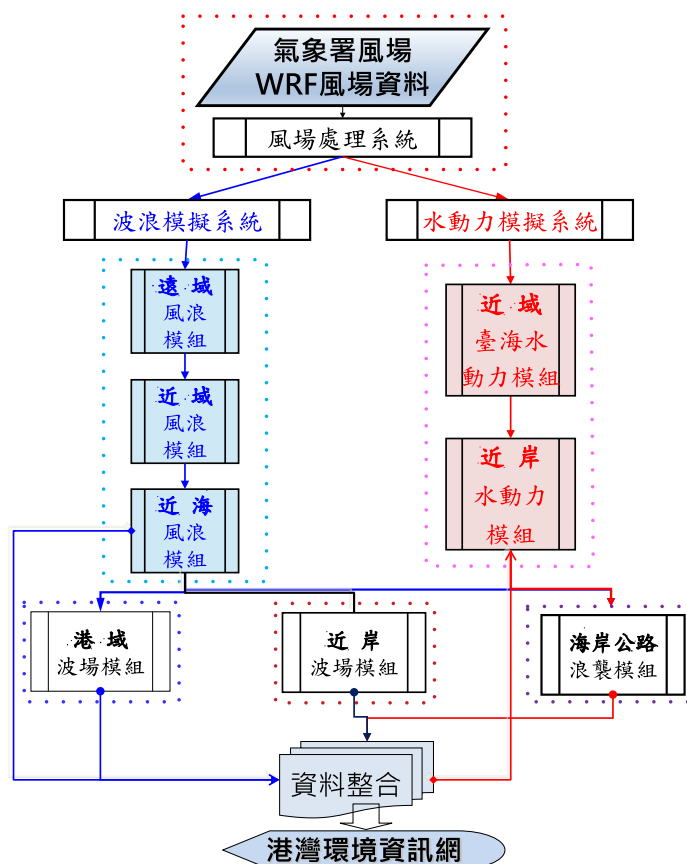


圖 1 海象模擬作業化系統整體架構圖

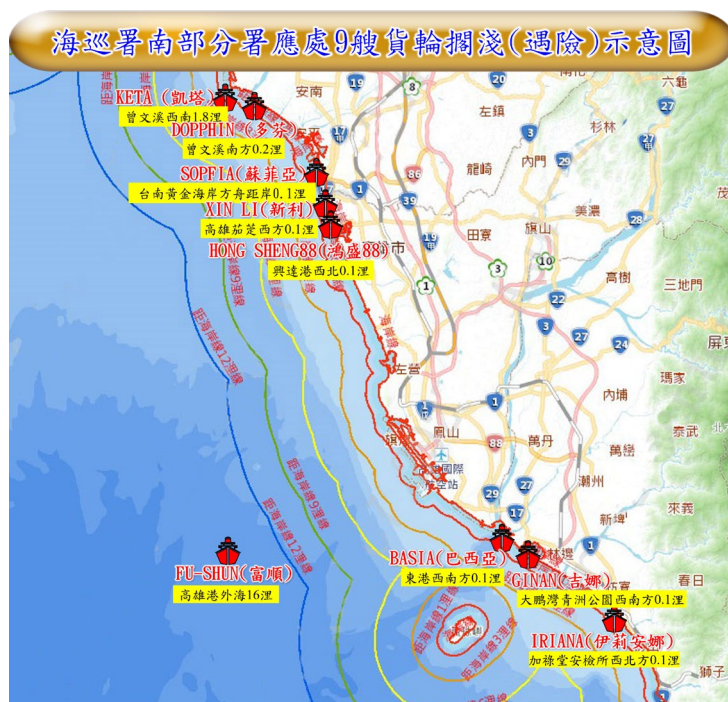


圖 2 凱米颱風期間擱淺及沉沒貨輪通報位置示意圖

二、臺海風浪模擬預測系統

在 TaiCOMS 2.0 系統架構下，針對臺灣周圍海域主要商港如基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港等 4 港口鄰近海域，以耦合第三代波譜風浪模式海洋波浪預測模式 WAM (WAVE Modeling)及荷蘭 Delft 大學近海風浪模式 SWAN (Simulating WAVes Nearshore)方式，建構三層巢狀網格模擬及預測各港域近海風浪，如圖 3 所示；圖中最外層稱為西太平洋遠域風浪模組，網格模擬範圍為西太平洋北緯 10°至 35°，東經 110°至 145°之海域，數值計算網格網格解析度 0.2° (或 12')，採用 ETOPO1 水深數值資料建構網格水深地形，簡稱大尺度網格；使用 WAM 模擬遠海波浪生成及傳播。

第二層為臺灣周圍近域風浪模組，網格採用的解析度為 0.04° (或 2.4')，模擬範圍為北緯 20.6°至 28°及東經 117.6°至 123.6°之海域，簡稱中尺度網格；針對中尺度網格之水深地形，則改用臺灣海洋科技研究中心解析度 500m 及 200m 之地形水深數值資料建置之；臺灣周圍近域風浪模組係依據 WAM 遠域風浪模擬結果提供邊界條件，採用 SWAN 模擬臺灣周圍海域波浪傳播過程之淺化、折射、波浪交互作用、白帽、底床摩擦、碎波等過程。

最後，利用臺灣海洋科技研究中心 200m 網格水深數值資料，分別針對基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港 4 港口，於基隆海域(KLsea)、蘇澳海域(SAsea)、花蓮海域(HLsea)及高雄海域(KHsea)建置更高解析度(0.008°)第三層網格，簡稱小尺度網格，4 海域小尺度網格資訊如表 1 所列，其模擬範圍及水深分布圖如圖 4、圖 5 所示；此階段系統由中尺度 SWAN 近域風浪模擬結果提供各小尺度網格邊界條件，同步以 SWAN 模擬基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港等近海波浪狀況，輸出較細緻化近海風浪模擬預測資料，供臺灣港務股份有限公司及各界參考。

表 1 小尺度風浪模組計算網格資訊表

模組名稱	模擬範圍		解析度 (°)	網格維度
	經度 (°) 最小值/最大值	緯度 (°) 最小值/最大值		
基隆海域風浪模組	121.56/122.40	25.00/25.80	0.008	106×101
蘇澳海域風浪模組	121.64/122.40	24.24/25.12	0.008	96×111
花蓮海域風浪模組	121.40/122.40	23.28/24.24	0.008	126×121
高雄海域風浪模組	121.56/122.40	25.00/25.80	0.008	136×161

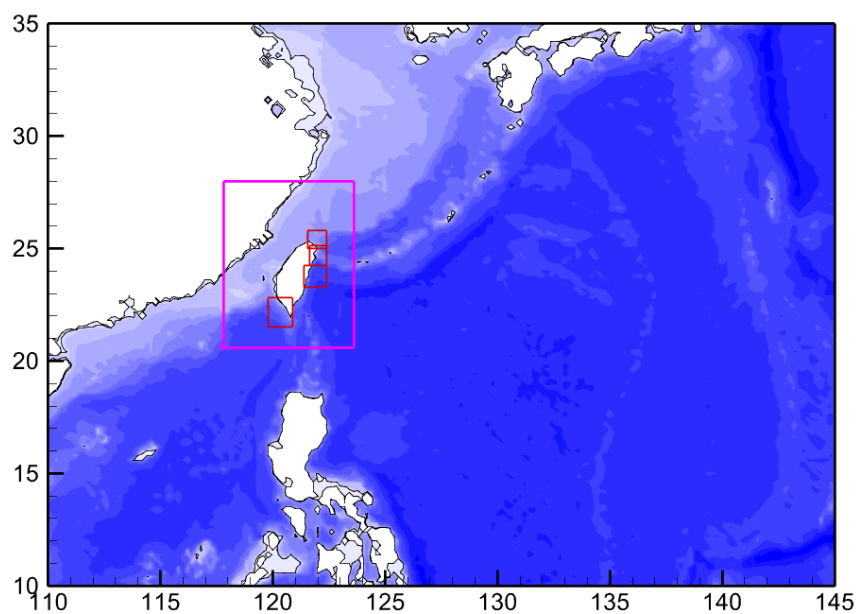


圖 3 臺海風浪模擬系統三層巢狀網格圖

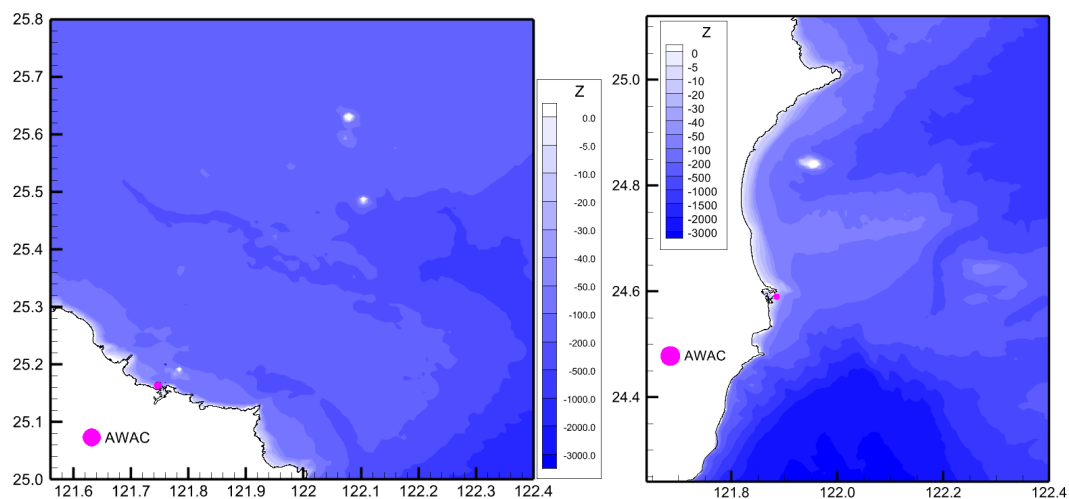


圖 4 基隆海域(左)、蘇澳海域(右)風浪模組模擬範圍及水深分布圖

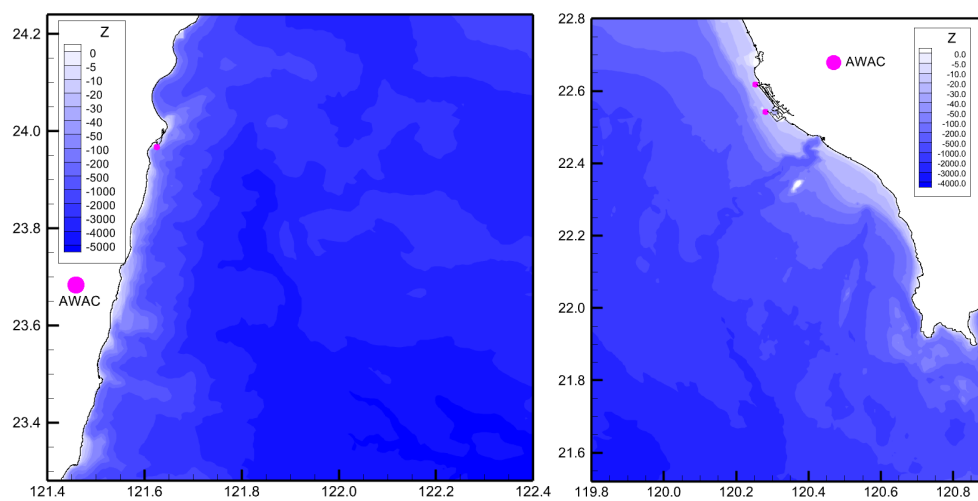


圖 5 花蓮海域(左)、高雄海域(右)風浪模組模擬範圍及水深分布圖

據此，整個風浪模擬系統之作業化模擬流程依序區分為大尺度 WAM 遠域風浪模擬、中尺度 SWAN 近域風浪模擬及小尺度 SWAN 近海風浪模擬等三階段，整體模擬流程架構，如圖 6 所示。

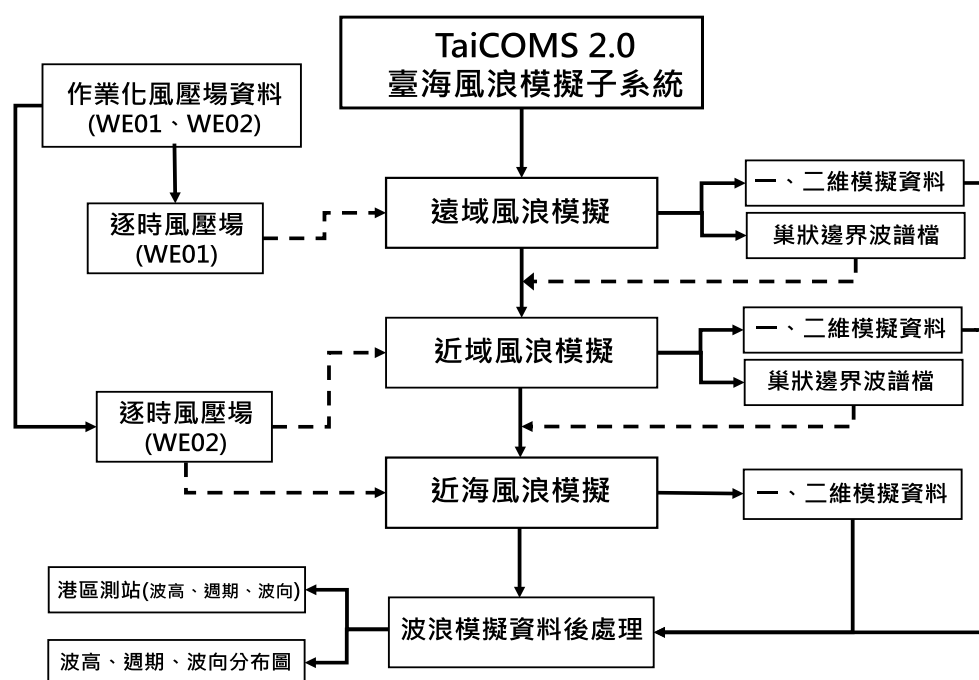


圖 6 臺海風浪模擬系統作業化模擬流程架構圖

每日會先下載交通部中央氣象署(以下簡稱氣象署)天氣數值預報資料(WRF 成員 M04)，下載頻率為每日 4 次(UTC 時間 0、6、12 及 18)，氣象署風場網格解析度分別為 15km(WD01)及 3km(WD02)；本研究 TaiCOMS 2.0 系統則採用臺灣標準時間，每日 0、6、12 及 18 時為作業模擬預測起始時間。故為配合系統作業流程及資料格式需求，在下載氣象署風場預報資料後，會再重組成 TaiCOMS 2.0 系統所使用之風壓場，其重組方式如圖 7 所示，重組風場之時間長度為 55 小時（00~54），其中前 6 小時（00~06）代表風浪追算模擬時段風場，後 49 小時（07~55）代表風浪預測模擬時段預測風場，重組後之 2 維風壓場網格資訊如表 2 所示。

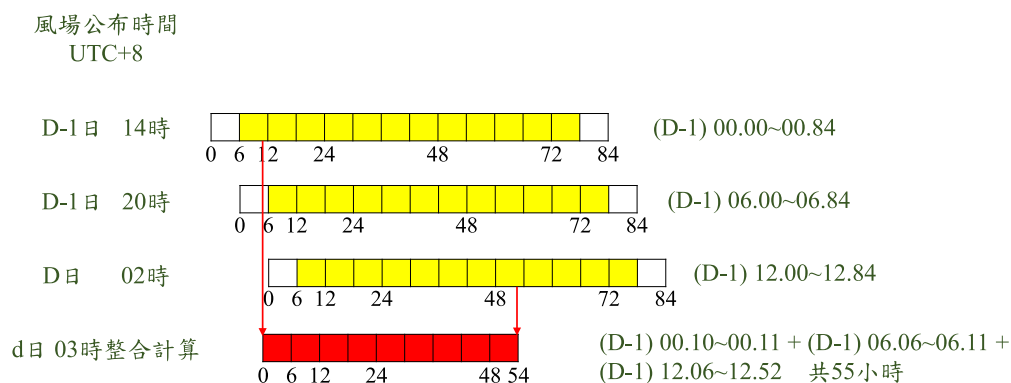


圖 7 TaiCOMS2.0 系統作業化預測風壓場重組方式示意圖

表 2 TaiCOMS 2.0 使用之作業化風壓場網格資訊表

模式	網格維度	模式格網度(°)	格點位置
西太平洋風壓場 (WE01)	271×181	$1/6^{\circ} \approx 0.167^{\circ}$	左下點 (10N,105E) 右上點 (40N,150E)
臺灣海域風壓場 (WE02)	271×271	$1/30^{\circ} \approx 0.033^{\circ}$	左下點 (20N,116E) 右上點 (29N,125E)

三、凱米颱風波浪模擬校驗

編號 202403 凱米颱風於 7 月 20 日 14 時於菲律賓東方海面生成後，向西北轉北北西朝臺灣東方海面接近，氣象署於 22 日 23 時 30 發布海上颱風警報。23 日 11 時 30 分暴風圈逐漸接近臺灣東方海面，對新北、宜蘭、花蓮、臺東構成威脅，發布陸上颱風警報。25 日 0 時颱風中心登陸宜蘭南澳，4 時 20 分颱風中心於桃園新屋出海，19 時登陸中國福建。26 日 8 時 30 時解除海上陸上颱風警報。因此，本研究以臺海風浪模擬系統重現凱米颱風期間風浪，模擬時系統設定作業化模擬啟動時間為 2024 年 7 月 20 日 0 時，並選取追算模擬模態執行作業化模擬，模擬終止時間為 7 月 28 日 0 時。針對系統風浪追算模擬結果，本研究彙整 7 月 21 日 0 時至 7 月 28 日 0 時小尺度模組逐時模擬結果，並利用觀測資料校驗。

3.1 作業化模擬風場校驗

凱米颱風生命週期為 2024 年 7 月 20 日 14 時~ 7 月 27 日 8 時，其於 24 日 11 時發展成強烈颱風，25 日 0 時颱風中心自宜蘭南澳登陸，颱風強度減弱於 1 時轉為中度颱風，4 時 20 分颱風中心於桃園新屋出海；侵臺海上警報發布時間為 7 月 22 日 23 時 30 分、陸上警報發布時間為 7 月 23 日 11 時 30 分，陸上及海上警報解除時間為 7 月 26 日 8 時 30 分，颱風路徑屬於第 2 類侵臺路徑。

為檢核本研究海象模擬系統利用氣象署 WRF 成員 M04 預報風場重組產生的作業化預測風場，選取臺灣海域風壓場 (WE02) 為校驗對象，以氣象署發布凱米颱風侵臺期間海上及陸上颱風警報單之颱風中心觀測位置為依據，針對臺灣海域風壓場颱風中心模擬位置判斷，並以颱風中心附近最低氣壓值位置，視為凱米颱風中心模擬位置。據此，使用 2024 年 7 月 20 日 0 時~ 28 日 0 時每日 4 次(0、6、12 及 18 時)追算風場，彙整颱風中心逐時模擬位置與觀測位置比較，如圖 8 所示。

依圖 8 可知，作業化風場颱風中心模擬登陸時間為 25 日 0 時，與觀測時間相同，但登陸位置偏移至宜蘭南澳北側；颱風中心模擬出海位置則與觀測位置相近，但出海時間 25 日 3 時較觀測時間提前 1 小時。整體而言，凱米颱風作業化風場模擬之颱風中心，其移動路徑與觀測路徑相似性極高。

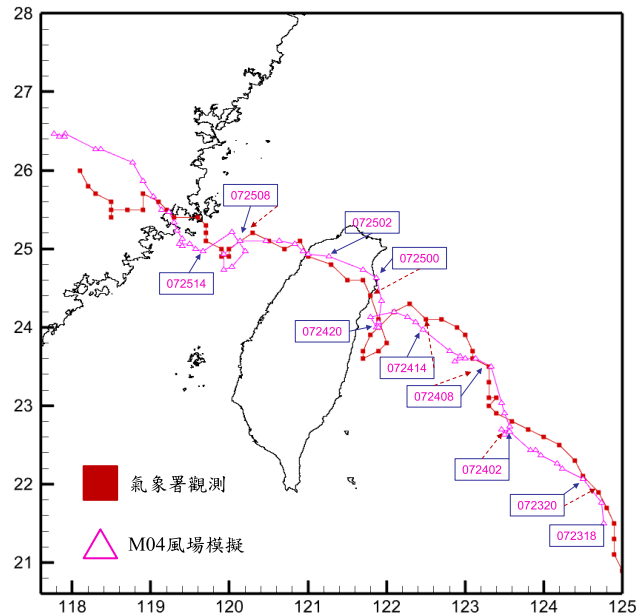


圖 8 凱米颱風侵臺期間颱風中心模擬與觀測路徑比較圖

3.2 小尺度模組模擬波浪檢驗

統計凱米颱風期間(2024 年 7 月 21 日 0 時至 7 月 28 日 0 時)，基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港等之示性波高、譜峰週期及平均波向等觀測資料，其平均值及最大示性波高與發生時間，如表 3 所列；其中，蘇澳港最大示性波高 12.29m 及高雄港一港口最大示性波高 9.29m，疑似觀測異常值；基隆港凱米颱風期間平均示性波高為 0.91m，明顯小於其他港口示性波高平均值，推論應與基隆嶼及東防波堤之遮蔽有關。

表 3 凱米颱風侵臺期間各港口波浪觀測平均值統計表

項目/單位	基隆港 AWAC06	蘇澳港 SAAW01	花蓮港 HLAW01	高雄港一港口 KHAW01	高雄港二港口 KHAW08
蒐集率*1	99.4	98.2	98.8	98.8	99.4
示性波高(Hs)/(m)	0.90	2.98	2.07	2.584	2.880
譜峰週期(Tp)/(s)	7.86	8.78	8.70	8.68	8.81
平均波向(Dm)/(°)	58.1	110.1	120.9	257.8	226.1
最大示性波高/(m)	3.12	12.29*2	5.52	9.29*2	7.76
最大示性波高 發生時間	07/24 14:00	07/24 16:00	07/24 18:00	07/25 15:00	07/25 12:00

*1 資料統計期間為 7/21 00:00 ~ 7/28 00:00 共 169 小時；*2 異常值。

本研究系統執行凱米颱風期間(2024 年 7 月 21 日 0 時至 7 月 28 日 0 時)，小尺度基隆海域風浪模組(KLsea)、蘇澳海域風浪模組(SAsea)、花蓮海域風浪模組(HLsea)及高雄海域風浪模組(KHsea)模擬計算工作，將 4 個港口波浪檢核點輸出之模擬結果，與運研所設置之基隆港波流站(KLAW06)、蘇澳港波流站(SAAW01)、花蓮港波流站(HLAW01)、高雄港波流站(KHAW01、KHAW08)所蒐集波浪觀測資料做校驗比對，各港口模擬檢核點與波流站位置如圖 9 所示。風浪模擬結果以示性波高(Hs)、譜峰週期(Tp)及平均波向(Dm)做校驗比對，

使用評估指標為均方根誤差(RMSE)、常態均方根誤差(NRMSE)及相關係數(R)，其定義如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \dots\dots\dots (1)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} / \bar{O} \dots\dots\dots (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \dots\dots\dots (3)$$

式中 P_i 代表模擬值， O_i 代表觀測值， $\bar{O}$ 為觀測量平均值， N 為觀測值或模擬值數量(取對應數量較小者)， $\bar{P}$ 代表模擬值 P_i 之平均值。相關係數 $R > 0$ 代表二者呈現正相關，其中 $1 \geq R > 0.7$ 代表高度相關， $0.7 \geq R > 0.3$ 代表中度相關， $0.3 \geq R > 0$ 代表低度相關； $R < 0$ 代表二者為負相關， $R = 0$ 代表二者無相關性。

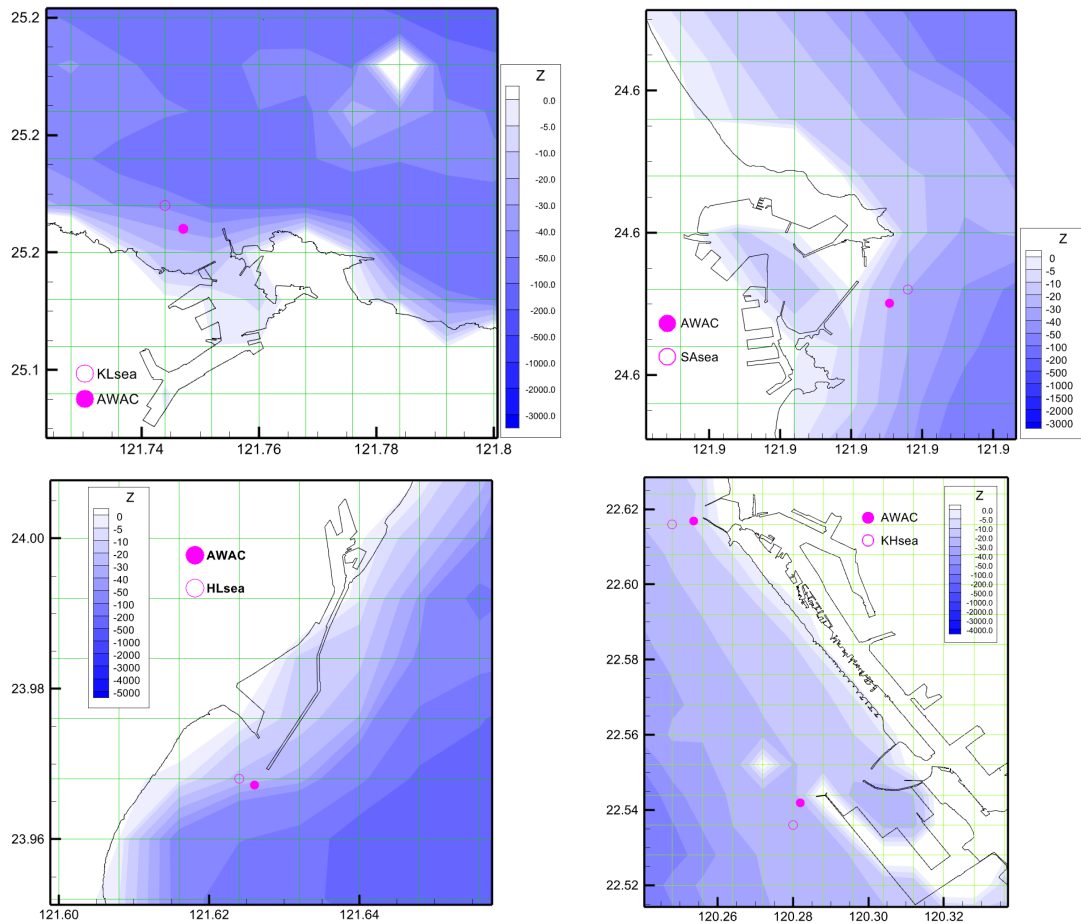


圖 9 基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港之波浪模擬檢核點與波流站位置圖

3.2.1 示性波高校驗

凱米颱風期間，基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港等港口檢核點波浪模擬示性波高值與觀測值之比較，如圖 10～圖 14 所示；示性波高模擬值與觀測值間常態均方根誤差與相關係數分析結果，如表 4 所列。依據校驗結果得知，各港口示性波高模擬值與觀測值之相

關係數均大於 0.9，呈現高度之相關性；常態均方根誤差呈現以基隆港模擬值最差，其次花蓮港。其中基隆港示性波高模擬值呈現偏大之原因，除了基隆港觀測值受到東防波堤遮蔽影響偏小外，亦與基隆海域風浪模組網格解析度無法反應基隆港東防波堤效應有關；由時序比較圖(圖 10)得知於陸上颱風警報發布後(約 23 日 12 時)，示性波高模擬值與觀測值之偏差逐漸擴大。花蓮港示性波高模擬值同樣存在偏大現象，偏差擴大發生時機約在凱米颱風登陸前 6 小時，此時凱米颱風中心在花蓮外海打轉(詳圖 8)，偏差擴大因素判斷預測風場誤差大應為主因。同樣，凱米颱風中心登陸前後蘇澳港示性波高模擬值出現雙峰變化，主要是受凱米颱風中心在花蓮外海打轉影響所致。由高雄港一、二港口示性波高模擬值之變化得知，24 日清晨波浪模擬值上升幅度明顯擴大，13 時示性波高模擬值已達 3m 以上，此時海巡署獲報(13 時 30 分)，首艘多哥籍貨輪蘇菲亞號(SOPFIA)擱淺在臺南安平外海；之後，因凱米颱風中心延遲登陸，示性波高模擬值於 17 時出現第一個峰值(近 5m)；4 小時後示性波高模擬值再度逐漸增大，代表西南海域海象開始惡化，之後陸續傳出貨輪擱淺事件。

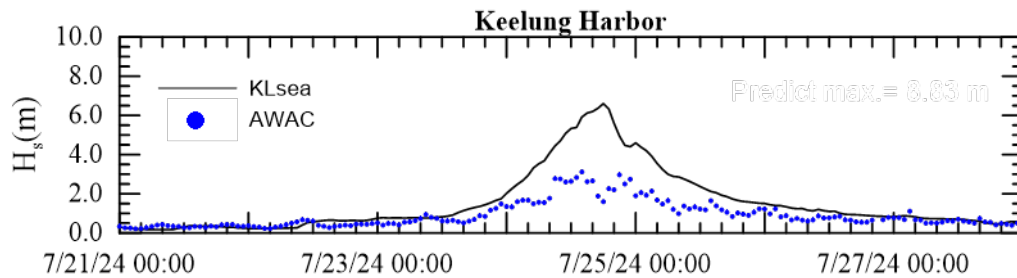


圖 10 基隆港波浪示性波高(H_s)模擬值與觀測值比較圖

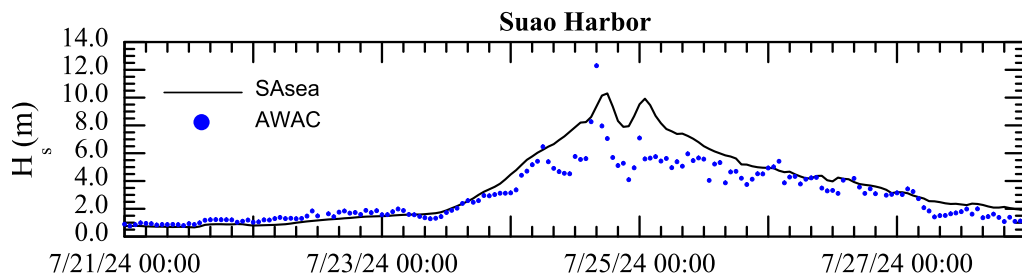


圖 11 蘇澳港波浪示性波高(H_s)模擬值與觀測值比較圖

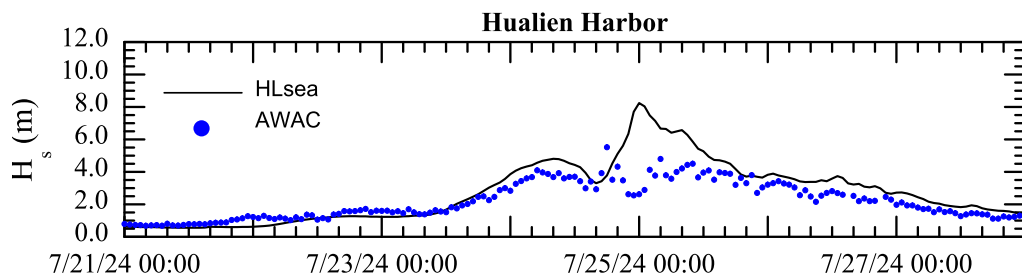


圖 12 花蓮港波浪示性波高(H_s)模擬值與觀測值比較圖

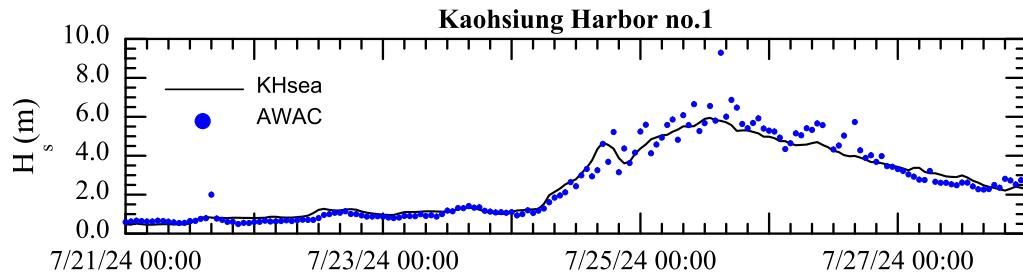


圖 13 高雄港一港口波浪示性波高(H_s)模擬值與觀測值比較圖

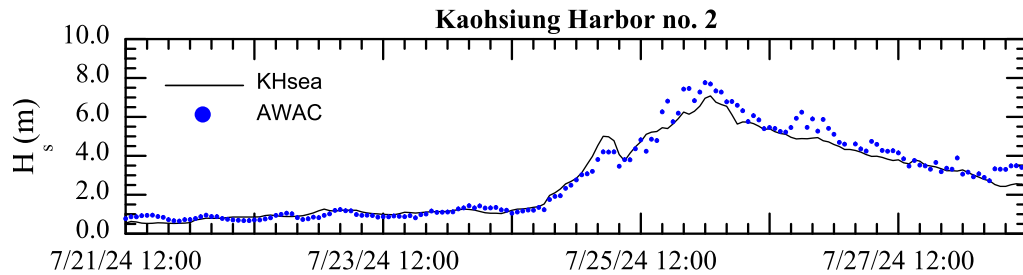


圖 14 高雄港二港口波浪示性波高(H_s)模擬值與觀測值比較圖

表 4 凱米颱風期間各港口檢核點波浪示性波高評估指標分析表

	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港一港口	高雄港二港口
常態均方根誤差	1.271	0.418	0.515	0.196	0.153
相關係數	0.936	0.932	0.879	0.970	0.982

3.2.2 譜峰週期校驗

凱米颱風期間各港口檢核點波浪譜峰週期模擬值與觀測值之比較，如圖 15～圖 19 所示；譜峰週期模擬值與觀測值間常態均方根誤差與相關係數分析結果，如表 5 所列。由譜峰週期校驗結果得知，各港口譜峰週期模擬值與觀測值相關係數以高雄港二港口 0.817 表現較佳，達到高度相關性；其餘港口譜峰週期模擬值與觀測值之相關係數僅達中度相關，其中以基隆港 0.443 最低。常態均方根誤差值同樣以高雄港二港口 0.115 最低，基隆港 0.338 最高，其餘 3 個檢核點常態均方根誤差值排序與相關係數排序相反。其中基隆港譜峰週期表現較差之原因，推測與基隆港波浪觀測在陸上颱風警報發布前測到較多的長浪有關。

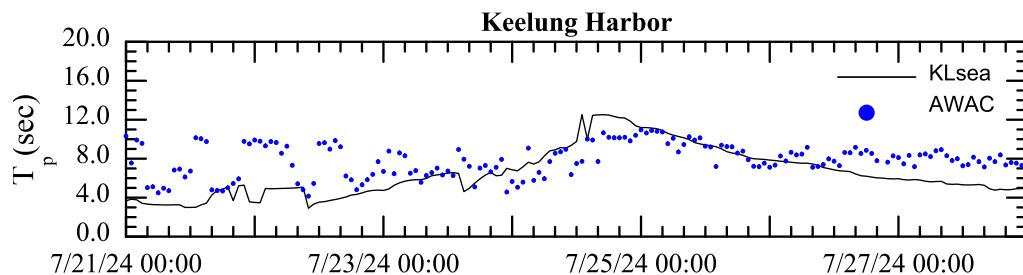


圖 15 基隆港波浪譜峰週期(T_p)模擬值與觀測值比較圖

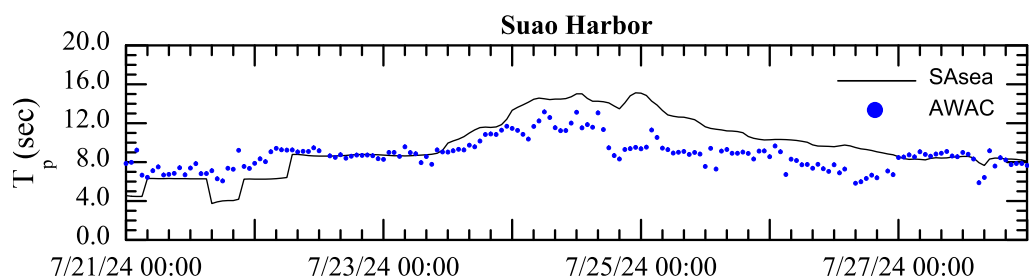


圖 16 蘇澳港波浪譜峰週期(T_p)模擬值與觀測值比較圖

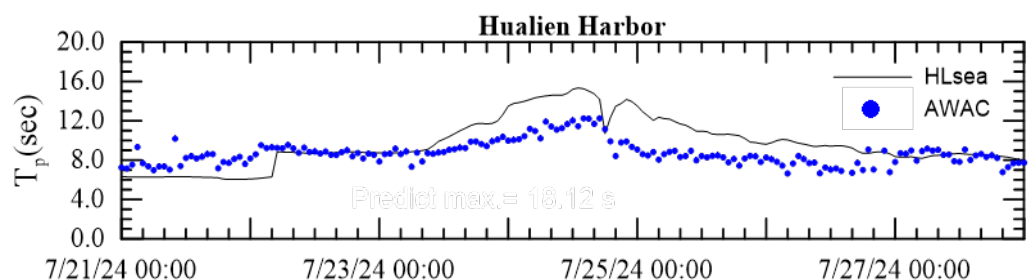


圖 17 花蓮港波浪譜峰週期(T_p)模擬值與觀測值比較圖

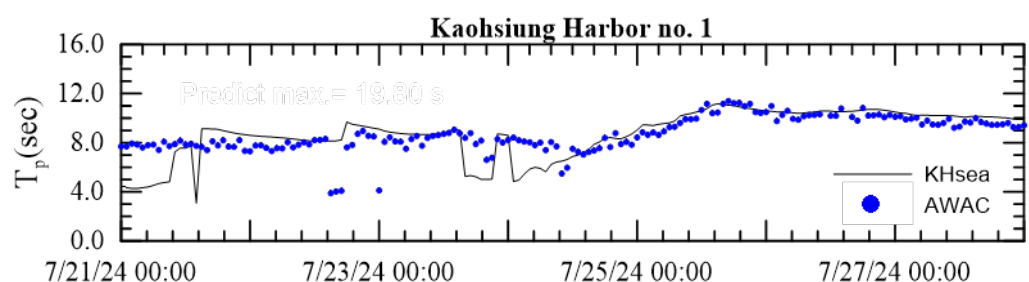


圖 18 高雄港一港口波浪譜峰週期(T_p)模擬值與觀測值比較圖

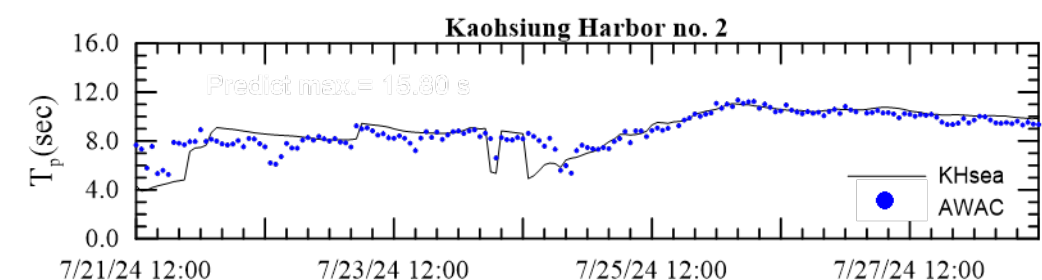


圖 19 高雄港二港口波浪譜峰週期(T_p)模擬值與觀測值比較圖

表 5 凱米颱風期間各港口檢核點波浪譜峰週期評估指標分析表

	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港一港口	高雄港二港口
常態均方根誤差	0.338	0.261	0.247	0.169	0.115
相關係數	0.443	0.699	0.671	0.644	0.817

3.2.3 平均波向校驗

凱米颱風期間各港口檢核點波浪平均波向模擬值與觀測值之比較，如圖 20～圖 24 所示；平均波向模擬值與觀測值之均方根誤差及相關係數分析結果，如表 6 所列。依據平均波向校驗結果得知，基隆港模擬之波向與觀測值之均方根誤差最小(約 14.84°)，但相關係數呈現負低度相關(-0.104)，；同樣地模擬趨勢亦出現在高雄港二港口及蘇澳港(正低度相關)。整體而言，各檢核點平均波向模擬校結果，均方根誤差均小於 30° 。

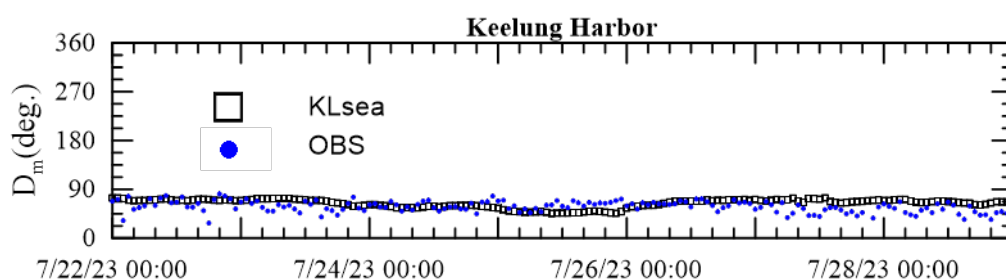


圖 20 基隆港波浪波向(D_m)模擬值與觀測值比較圖

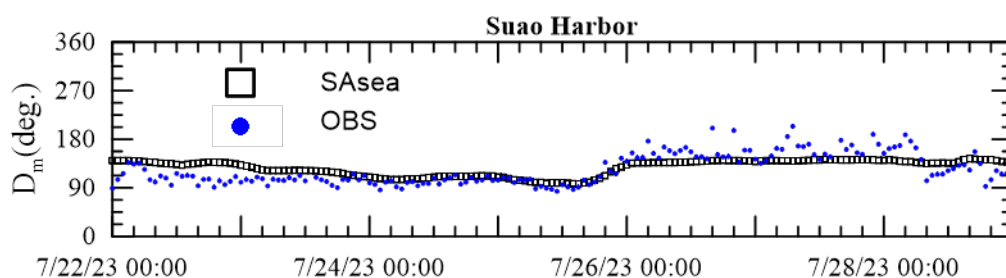


圖 21 蘇澳港波浪波向(D_m)模擬值與觀測值比較圖

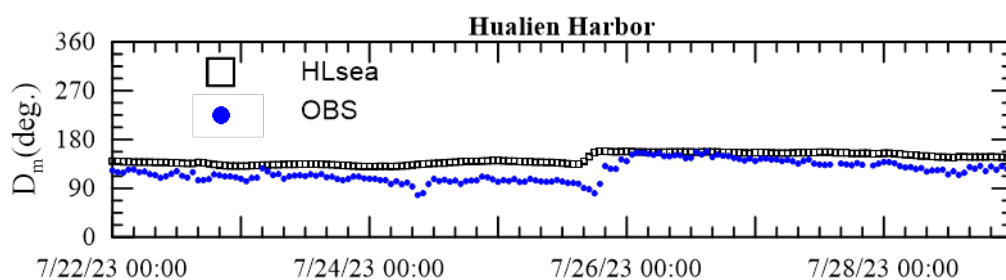


圖 22 花蓮港波浪波向(D_m)模擬值與觀測值比較圖

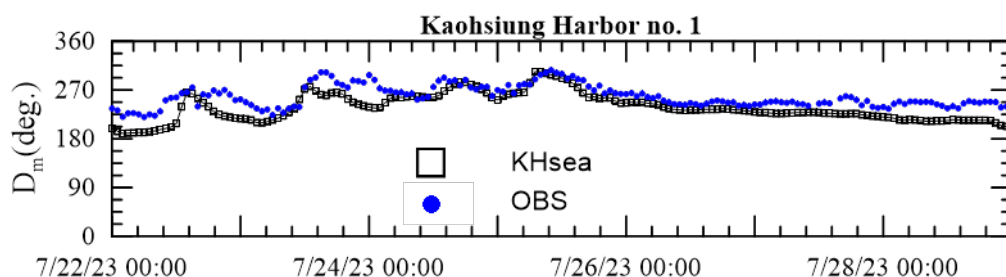


圖 23 高雄港一港口波浪波向(D_m)模擬值與觀測值比較圖

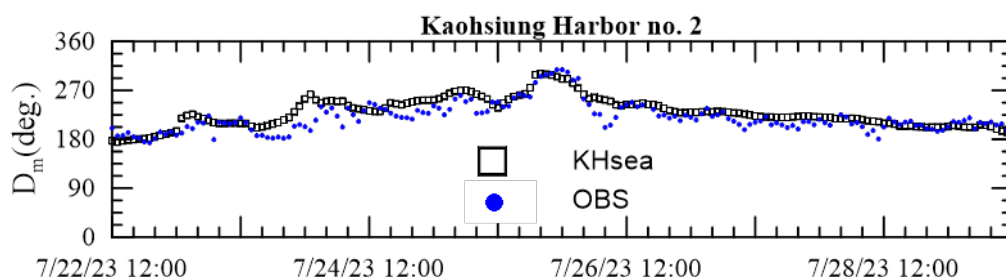


圖 24 高雄港二港口波浪波向(Dm)模擬值與觀測值比較圖

表 6 凱米颱風期間各港口檢核點波浪平均波向評估指標分析表

	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港一港口	高雄港二港口
均方根誤差(°)	14.84	21.84	25.92	24.25	17.89
相關係數	-0.1038	0.1290	0.8008	0.8450	-0.0041

3.2.4 最大示性波高校驗

凱米颱風期間，基隆港檢核點模擬之最大示性波高值為 6.60m，發生時間為 07 月 24 日 18 時，比 KLA06 最大示性波高觀測時間 07 月 24 日 14 時延遲 4 小時；蘇澳港檢核點最大示性波高模擬值為 10.31m，發生時間為 07 月 24 日 18 時，比 SAAW01 最大示性波高觀測時間 07 月 24 日 16 時延遲 2 小時；花蓮港檢核點最大示性波高模擬值為 8.24m，發生時間為 07 月 25 日 00 時，比 HLA01 最大示性波高觀測時間 07 月 24 日 18 時延遲 6 小時；高雄港一港口檢核點最大示性波高模擬值為 5.95m，發生時間為 07 月 25 日 13 時，比 KHA01 最大示性波高觀測時間 07 月 25 日 15 時提前 2 小時；二港口檢核點最大示性波高模擬值為 7.08m，發生時間為 07 月 25 日 13 時，比 KHA08 最大示性波高觀測時間 07 月 25 日 12 時延後 1 小時。

四、結論

2024 年凱米颱風以第 2 類侵臺路徑自臺灣東部宜蘭南澳登陸，由西部桃園新屋出海，對臺灣周圍海域造成明顯影響，西南海岸發生多艘貨輪擱淺及一艘貨輪沉沒。本研究以運研所發展之「臺灣近岸海象預測系統 2.0」，重現凱米颱風期間，基隆海域、蘇澳海域、花蓮海域及高雄海域等小尺度風浪模組颱風波浪模擬結果，並利用基隆港、蘇澳港、花蓮港及高雄港等波浪觀測資料校驗數值模擬結果。整體而言，凱米颱風期間颱風波浪模擬結果以高雄海域風浪模組模擬成果最佳，其次為蘇澳海域風浪模組，基隆海域及花蓮海域模擬成果較差原因，推測與波浪測站位置可能受到港口防波堤遮蔽效應影響、小尺度網格解析度 0.008°仍不足以反應基隆港及花蓮港等港口水深地形陡變之真實情境有關。因此，對於基隆海域及花蓮海域等風浪模擬成果，後續仍有持續改進空間。

參考文獻

1. 李兆芳、江朕榮、傅怡釧、林雅雯、劉正琪、謝佳紘(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。
2. 劉正琪、傅怡釧、林雅雯、李兆芳、謝佳紘、江朕榮(2023)，「海氣象預測模擬系統之維運與精進(1/4)-精進基隆海域模組」，交通部運輸研究所。
3. 劉正琪、林雅雯、傅怡釧、李兆芳、謝佳紘、江朕榮(2022)，「110 年海氣象自動化預報模擬系統作業化校修與維運」，交通部運輸研究所。
4. 劉正琪、李兆芳、傅怡釧、李俊穎、謝佳紘、江朕榮(2021)，「109 年海氣象自動化預報模擬系統作業化校修與維運」，交通部運輸研究所。
5. Booij, N., J.G. Haagsma, L.H. Holthuijsen, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris, A.J. van der Westhuysen, M. Zijlema (2004), SWAN Cycle III version 40.41 USER MANUAL, Delft University of Technology.
6. WAMDI group (1988), The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol.18, pp.1775–1810.