

馬祖海域數值模式建置研究(1/2)-水動力模式

林有騰¹ 林雅雯² 蔡立宏³

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心 助理研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心 科長

³交通部運輸研究所運輸技術研究中心 主任

摘要

本研究針對臺灣海峽西北方馬祖四鄉五島海域，利用 MIKE21 水動力模式建立非結構性網格數值模型，並針對南竿福澳港區進行局部網格加密，旨在探討不同潮位邊界及波流耦合條件組合下之模擬準確度。研究以 2024 年康芮颱風期間之實測潮位與海流資料為驗證基礎，比較方式先以歷線及散布圖做視覺化的呈現與分析，接著運用均方根誤差(RMSE)、決定係數(R^2)、Willmott 一致性指數(WI)等多項評估指標，配合敏感度分析，客觀評估模式效能。

驗證結果顯示，模式能高度重現現場潮汐及主要海流變化。在邊界條件比較上，採 MIKE21 潮位模式資料並以單純水動力模式且無耦合方式模擬，其結果優於不同潮位邊界及波流耦合條件組合模式。分析主因為福澳港區屬半封閉水域，波浪輻射應力對流場影響有限，過度複雜的耦合反而可能因誤差疊加降低模擬準確度；同時，底床地形水深資料的解析度和更新頻率為影響模擬精度的關鍵因素。

基於驗證良好的模式成果，進一步解析流場動力特徵發現，馬祖福澳港海域屬強潮區，研究期間最大潮差達 5 公尺，外海潮汐流向呈現典型往復流。模擬顯示，漲潮時港內形成的入流渦流結構比退潮出流更為封閉且強烈，導致淨物質輸送趨勢指向港內；並且港灣特定區域底部缺少足夠剪切應力啟動泥沙，該處將成為潛在的長期淤積熱點。此外，港口入口處存在強烈的流速剪切，進出港船舶需特別警戒橫向推力影響。

綜上所述，建議未來馬祖類似港灣之模擬可優先採用簡化水動力模型配置，以兼顧計算效率與穩定性。本研究除提供高精度之海象數值模擬架構外，亦明確揭示港區淤積機制與航安風險，可做為後續港口管理及工程規劃之科學依據。

一、前言

馬祖四鄉五島位於臺灣海峽西北方，為連江縣所轄之南竿、北竿、莒光、東引四鄉及南竿、北竿、東莒、西莒、東引等島嶼組成的群島，總面積約 29.6 平方公里，地理上與福建閩江口隔海相望，具有重要的地緣戰略與海洋環境特徵。該區域海岸多為海蝕岩岸、沙灘及岬灣式地形，潮流湍急、風浪強勁，部分島嶼因地形效應導致潮差顯著，形成複雜的近岸水動力環境。近年來，隨著港灣結構物的興建與海岸開發活動增加，港口鄰近海域的流場結構發生顯著改變，進而引發海岸地形變遷與港口淤沙等問題。尤其在颱風、大潮等極端氣候事件影響下，上述現象

更為突出，對港口營運安全與海岸管理構成挑戰。因此，針對馬祖地區港口鄰近海域的波流場模擬，已成為海岸工程與海洋環境研究的重要課題。

然而，現有數值模擬研究多集中於單一物理過程(如純水動力或純波浪)，對於波流耦合效應的影響評估或觀察仍顯不足，且在不同潮位邊界條件與耦合方式組合下的模擬準確性，尚待系統性驗證。此外，馬祖港區多屬半封閉水域，其流場特性受地形、潮汐與波浪輻射應力等多重因素交互作用，如何在計算效率與模擬精度之間取得平衡，亦為模式應用的關鍵議題。

在臺灣近岸水動力與波浪模擬研究中，最常採用的模式為丹麥水利研究所(DHI)所發展的 MIKE21 水動力數值模式及波浪模式。兩者於波流場計算時可分別考慮單向波流交互作用(即分離耦合)或雙向波流交互作用(即全耦合)，具備良好的物理描述能力與彈性。然而，就馬祖海域而言，鮮少有研究同時利用 MIKE21 進行波流場之整合模擬。僅林(2024)以 MIKE21 初步探討南竿福澳港區潮位與流場變化特性，分析不同季節及颱風期間流速、流向與潮位差異；其他與港灣及近岸流場相關的應用研究則多集中於臺灣本島地區，如莊(2002)等人以 MIKE21 水動力模式模擬計算並探討臺灣南部及高雄港海域之潮流與潮位特性；蘇(2003)以 MIKE21 水動力模式來探討臺北港海域流場之潮汐及海流特性；楊(2004)等人以 MIKE21 模擬核四廠進水口附近海域波流場及漂砂趨勢；羅(2010)以 MIKE21 水動力模式模擬基隆港海域並與觀測資料驗證，分析探討港灣結構物對港口流況的影響；陳(2012)等人以 MIKE21 數值模式針對淡水第二漁港，進行潮流、波浪及漂沙模擬；宋芷萱(2014)則以 MIKE21 模擬東沙島海域颱風侵襲下之波流場，探討東沙島海岸地形變遷，而國際間如 Michael B. Kabiling(2009)等人以 MIKE21 Coupled Model FM 於美國佛羅里達州海域研究水動力與波浪間的交互作用。

至於模擬成果的準確率與模式表現評估，研究者常結合多項統計指標，如均方根誤差(RMSE)、平均絕對誤差(MAE)、相關係數、決定係數(R^2)、Willmott 一致性指數(WI)等，以量化模式的預測能力。相關研究如 Peter Kalverla(2018)等人使用系統性偏誤(Bias)、隨機誤差標準差、RMSE、MAE、 R^2 與垂直剖面誤差等指標，評估 3 種主流天氣預報模式在北海風場預測之表現；Gamal El Afandi (2022)等人使用 WI、 R^2 、NRMSE 與 NMBE 等統計指標，來探討 WRF 模式在非洲地區風速模擬之準確性；Stefano Materia(2024)等人進一步應用 Brier skill score (BSS)、Critical score index (CSI)、RMSE、MAE、馬修斯相關係數(MCC)、相對作業特性(ROC)、排序概率技巧分數(RPSS)與 SHapley Additive exPlanations (SHAP)等評估指標，探討人工智慧技術於極端氣候事件預測中的效能與挑戰。

二、研究範圍及方法

2.1 研究範圍

本研究針對馬祖海域使用 MIKE21 建置臺灣馬祖離島模擬區域非結構性網格模式(水動力模式)，模式範圍為東經 119.511 度至 120.879 度、北緯 25.765 度至 26.666 度，共有 18542 個節點

和 35210 個三角形元素，模式邊界網格大小約 0.007 度，模式範圍網格及數值水深，如圖 1 所示，對於波浪模式則另建置較大範圍模擬區域非結構性網格模式，模式範圍為東經 117.102 度至 123.058 度、北緯 20.941 度至 26.992 度，共有 20001 個節點和 38152 個三角形元素，模式邊界網格大小約 0.2 度，模式範圍網格及數值水深，如圖 2 所示，另為獲得較佳的數值模擬結果，本研究重點探討區域(南竿福澳港區)以局部區域網格加密方式處理，局部加密網格大小約 0.0007 度，如圖 3 所示。

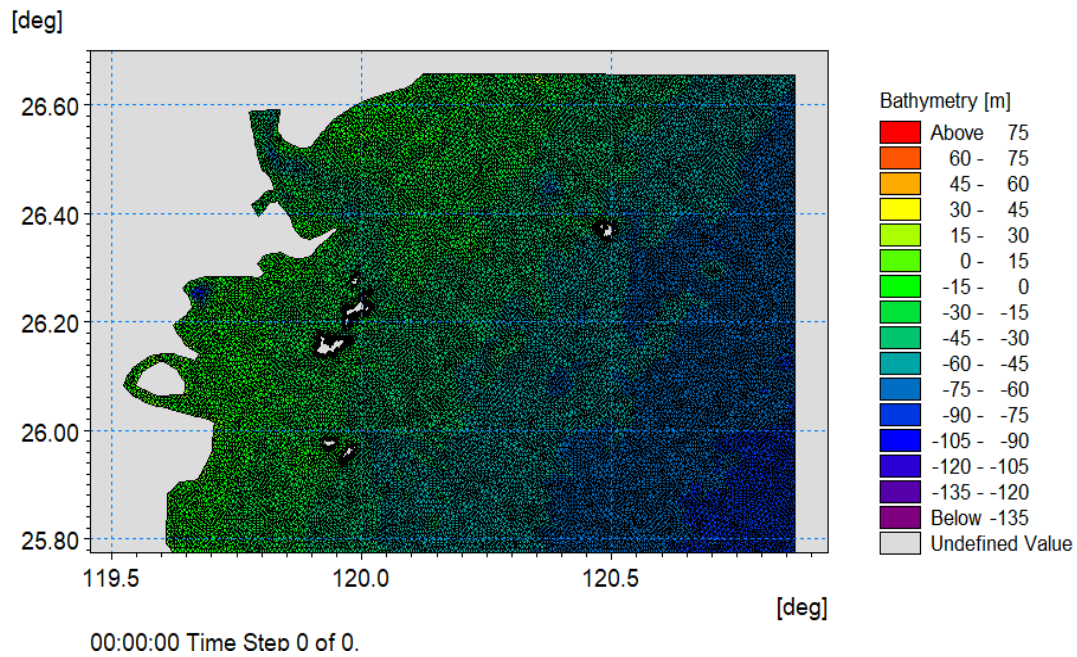


圖 1 水動力模式範圍網格及數值水深圖

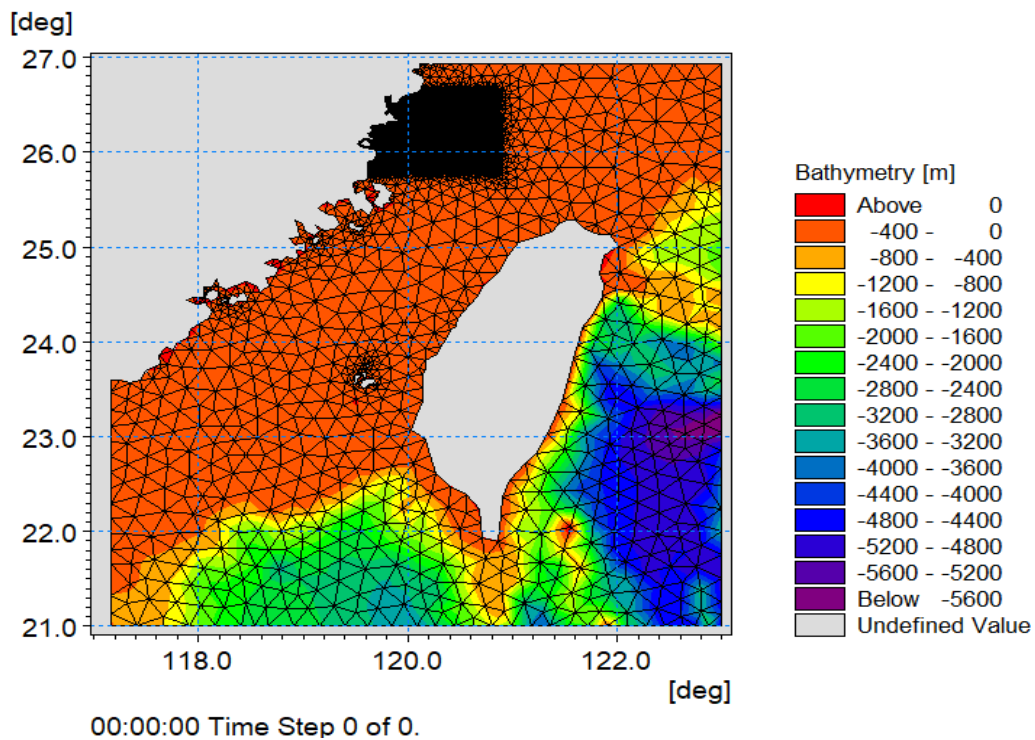


圖 2 波浪模式範圍網格及數值水深圖

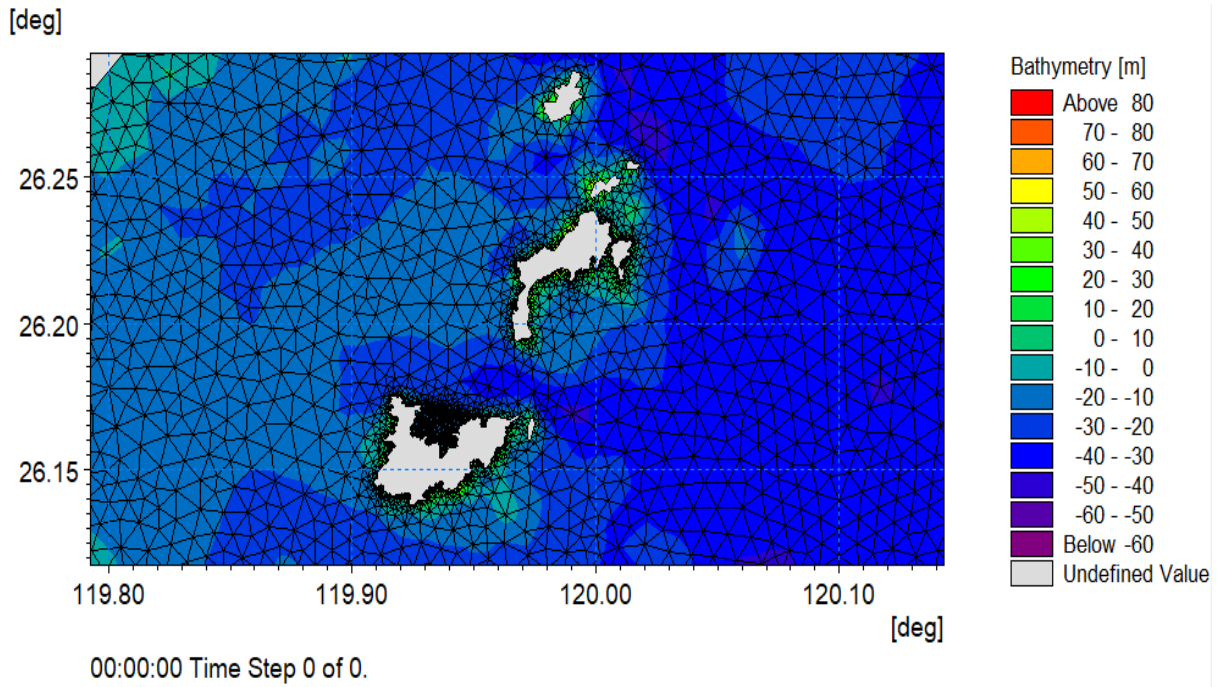


圖 3 南竿福澳港區局部區域網格加密圖

2.2 研究方法

本研究希望透過 MIKE21 水動力模式，並輔以波浪數值模式，結合非結構性網格與局部加密技術，系統性探討南竿福澳港區在不同潮位邊界及波流耦合條件組合下的模擬表現，如表 1 所示，由於海流在觀測與模擬趨勢的比較上較為複雜，因此援用相關文獻提供之多項客觀評估指標，透過適當標準化、應用敏感度分析及加權綜合評估指標的量化分析方式，期能提供馬祖地區港口流場模擬的科學依據與實務建議，提供後續研究人員參酌應用。

表 1 不同潮位邊界、波流耦合條件組合及名稱設定

潮位邊界	波流耦合	潮位模擬	海流模擬
MIKE21 潮位預報	分離耦合	T1_MODEL_MIKE21TIDE_WR	A3_MODEL_MIKE21TIDE_WR
	全耦合	T1_MODEL_COUPLED_WR	A3_MODEL_COUPLED_WR
	無耦合	T1_MODEL_MIKE21TIDE	A3_MODEL_MIKE21TIDE
MIKE21 FM 模擬暴 潮變化	分離耦合	T1_MODEL_FMTIDE_WR	A3_MODEL_FMTIDE_WR
	無耦合	T1_MODEL_FMTIDE	A3_MODEL_FMTIDE

2.2.1 水動力、波浪模式設定及模擬條件

水動力模式使用之地形水深資料由遠域到近域，除蒐集美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)之 ETOPO2022(15 arcseconds)資料外，對於馬祖南竿福澳港區部分則使用運技中心代辦連江縣政府「國內商港未來發展及建設計畫(111-115 年)-馬祖港埠建設計畫」子項目「港埠經營管理資訊系統維護更新」案 107 年委託詠翔測量工程有限公司辦理馬祖四鄉五島地形水深測量資料(南竿福澳港 10M 地形水深資料)等；波浪模式所建置模擬區域則延伸至臺灣本島東面及南面海域，因此

增加了臺灣海洋科技研究中心彙編之臺灣周圍附近 200 公尺海域水深地形資料，以上如表 2 所示。

表 2 模式地形水深資料

項次	區域範圍	水深資料	資料來源
1	臺灣周圍海域	21-26°N,119-123°E 200 m 網格水深	臺灣海洋科技研究中心
2	臺灣周圍海域	ETOPO2022	美國國家海洋暨大氣總署
3	南竿福澳港區	南竿福澳港 10 m 地形水深資料	運技中心

模擬條件設定分為風、氣壓、波浪輻射應力場、潮位邊界與其他參數設定，自 2017 年 7 月起，中央氣象署啟用第四代數值天氣預報系統，其區域模式 WRF (Weather Research and Forecasting) M04 每日固定提供 4 次數值預報(UTC 0、6、12、18 時)。M04 採用兩層巢狀網格，分別為 15km(WD01)與 3km(WD02)，網格資訊與模擬範圍如表 3 及圖 4 所示。本中心建置的臺灣近岸海象預報系統(Taiwan Coastal Operational Modeling System, TaiCOMS)，會下載中央氣象署 WRF 的風場資料，並透過自動化流程完成解碼、重組與內插，最後將 WD01 與 WD02 的預報結果，轉換成各作業模式所需的輸入資料。本研究使用的是 WD02 風、氣壓場資料，經 TaiCOMS 處理再輸出成 WE02 預報資料，如表 4 所示。在應用上，每次模擬會擷取每筆預報的前 6 小時資料，再加以拼接與組合，形成模擬所需的連續風場與氣壓場輸入。最終組合完成的 2 維平面風、氣壓場涵蓋範圍為：西太平洋北緯 20°至 29°、東經 116°至 125°，其網格解析度為 0.033°。資料內容包含：海面 10 公尺高度的 u、v 方向風速資料、海面氣壓場資料(p)，這些資料會被轉換成 MIKE21 所需的風、氣壓場檔案格式(.dfs2)，供做本計畫波浪與水動力模式的驅動力來源，如圖 5 所示。

波浪輻射應力場資料來自 MIKE 21 波浪模式模擬結果。該模式採用全譜方程式進行求解，能完整描述波浪能量在頻率與方向上的分布，在波浪頻率設定方面，最小頻率採 0.055HZ，並以 1.1 倍參數的指數型式劃分成 25 個頻率帶；在角度設定方面，以 22.5 度為 1 個角度單位，共計分割成 16 個方向角；風浪能量消散機制則考量 4 波交互作用、碎波效應、底床摩擦、白帽耗散等物理機制，各項參數設定如表 5 所示。

波浪的初始條件由 JONSWAP 經驗譜公式給定，參數如表 6 所示，邊界條件共分成 2 種邊界形式，一為陸域邊界，不考慮入射波浪的能量通量，另一為海域邊界，均設定為封閉邊界，即外部無波浪能量進入模式內，內部波浪能量傳至邊界時，完全由邊界吸收。

本研究主要使用 MIKE21 水動力模式進行模擬，邊界條件則採用兩種不同來源的資料，第一種為 MIKE21 提供的全球潮汐模式資料庫(解析度 0.125 度)，於模擬範圍邊界擷取對應時間並內插出潮汐水位時間序列，做為邊界輸入條件，由於該水位資料已包含分潮效應，因此本模式未再額外設定分潮引力(以 MIKE21TIDE 表示，天文潮)。第二種則是利用 MIKE21 水動力模式

模擬大範圍區域，以獲得本研究範圍邊界的水位模擬結果(以 FMTIDE 表示，天文潮及風暴潮)，其餘模式之參數設定，如表 7 所示。

表 3 中央氣象署 WRF 成員 M04 水平兩層巢狀網格資訊

DMS FLAP	座標系統	dimension	relocation	格點位置
WD01	Lambert Conformal mapping	661×385	15 km	Center(120E), true (10N, 40N) , 座標(340,214)位置位於(30N,120E) , 中心點座標為(331,192)位置位於 (26.926N,118.5908E) 底圖左下點(-5.693677N,78.02554E) 右上點(43.28705N,-179.5461E)
WD02	Lambert conformal mapping	1158×673	3 km	Center(120E), true (10N, 40N) , 座標(522,547)位置位於(30N,120E) , 中心點座標為(579.5,337)位置位於 (24.1285N,121.7601E) 底圖左下點(14.02224N,105.2500E) 右上點(32.12021N,140.91388E) 座標(1,1)對應至 45 km MESH 之(89,22)座標位置

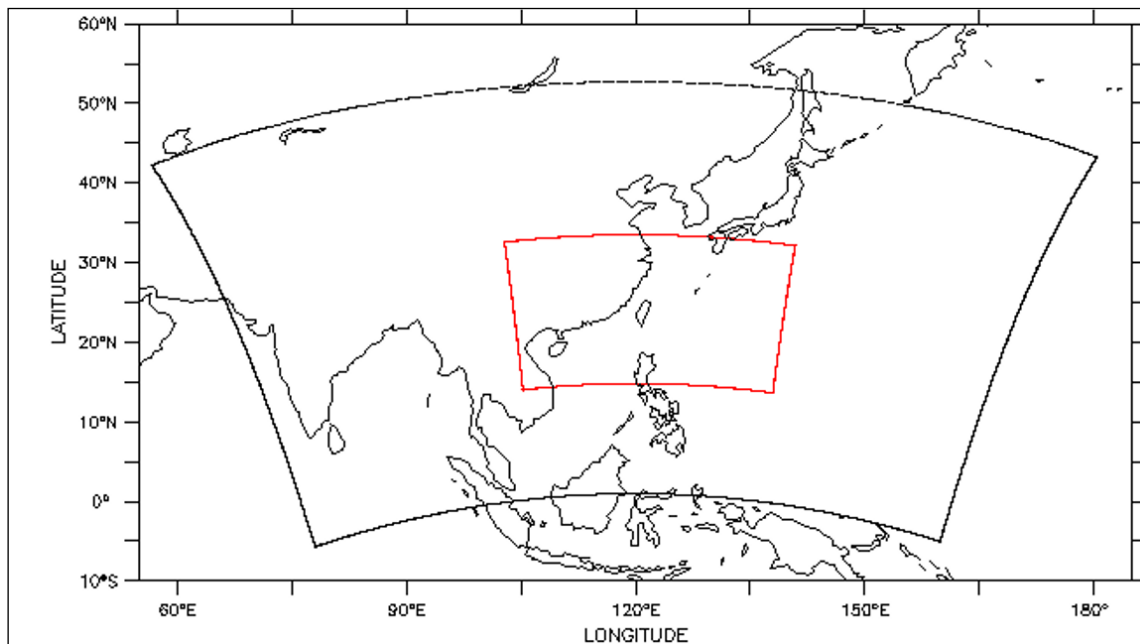


圖 4 中央氣象署 WRF 成員 M04 水平網格模擬範圍圖

表 4 中央氣象署 WRF 成員 M04 水平兩層巢狀網格資訊

模式	Dimension	模式格網度(°)	格點位置
西太平洋風壓場 WE01	271x181	1/6°≈0.167°	左下點(10N,105E) 右上點(40N,150E)
臺灣海域風壓場 WE02	271x271	1/30°≈0.033°	左下點(20N,116E) 右上點(29N,125E)

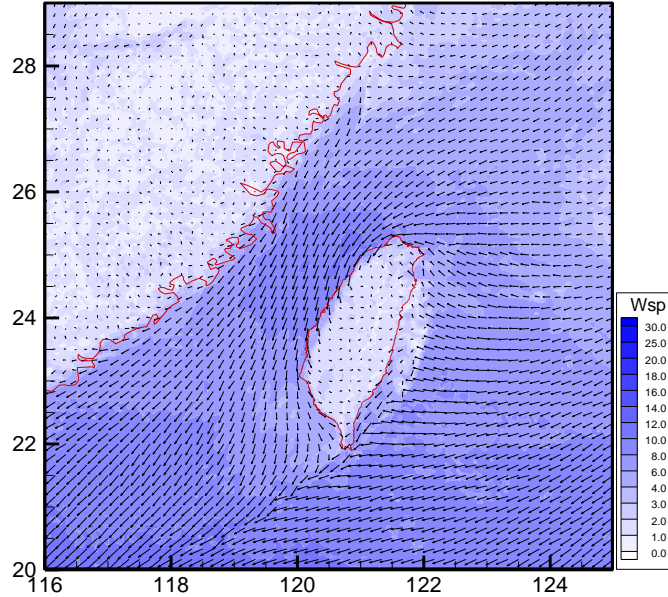


圖 5 臺灣海域風壓場(WE02)風場輸出範圍圖

表 5 波浪模式參數設定彙整表

相關參數	設定
最小頻率	0.055 Hz
角度設定	0°~360°、 $\Delta\theta = 22.5^\circ$
碎波指標	$\gamma = 0.8$
底床摩擦	$K_N = 0.04 \text{ m}$
白帽耗散	$C_{ds} = 4.5$ 、 $\delta_{ds} = 0.5$

表 6 波浪初始條件及 JONSWAP 譜參數表

波浪條件		JONSWAP 參數	
Maximum fetch length	10000(m)	Shape parameter, sigma a	0.07
Max peak frequency	0.4(Hz)	Shape parameter, sigma b	0.09
Max Philips constant	0.0081	Peakness parameter	3.3

表 7 水動力模式參數設定

相關參數	設定值
紊流渦度係數	0.28
底床摩擦係數	$32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
風摩擦係數	7 m/s 0.001255 25 m/s 0.002425
風暖啟動時間	2 days
邊界暖啟動時間	2 days

2.2.2 評估指標及應用

在本研究中，為了檢驗模式模擬結果與實測資料之間的差異與一致性，選用 3 種常用的統計評估指標，分別為 RMSE、 R^2 及 WI，接著透過無因次標準化處理，然後應用變異係數來進行敏感度分析，並且定義各自的權重，最後透過加權加總計算方式建立「綜合評估指標(Composite Index, CI)」，以下說明其意義與計算方式。

RMSE 用來衡量模型模擬值與觀測值之間的誤差大小，單位與原始資料相同，數值越小，代表模擬結果與觀測值越接近，其中 N 為樣本數， P_i 為模擬值， O_i 為觀測值。

$$\text{相關公式：RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

評估指標(RMSE)具體標準化方式採用 Min-Max Normalization，並且由於 RMSE 屬於「越小越好」的負向指標，而 R^2 、WI 等指標為「越大越好」的正向指標，為確保在計算綜合評估指標(CI)加權加總時的邏輯合理性與可解釋性，本研究對標準化後的 RMSE 進行了方向一致化(正向化)處理。

$$\text{相關公式：RMSE}_{\text{normalized}} = (\text{RMSE} - \text{RMSE}_{\text{min}}) / (\text{RMSE}_{\text{max}} - \text{RMSE}_{\text{min}})$$

$$\text{RMSE}_{\text{final}} = 1 - \text{RMSE}_{\text{normalized}}$$

R^2 用於衡量模型對觀測資料變異的解釋能力，其值介於 0 到 1 之間，數值愈接近 1，代表模型擬合度愈佳；反之，若接近 0，則代表模型解釋能力不足，其中 N 為樣本數， P_i 為模擬值， O_i 為觀測值， \bar{P} 為模擬值的平均值，分子 $\sum (P_i - O_i)^2$ 代表「殘差平方和(SSE)」，是模型沒解釋到的誤差，分母 $\sum (P_i - \bar{P})^2$ 代表「總平方和(SST)」，是數據本身的總變異。

$$\text{相關公式：} R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}$$

WI 主要用於評估模擬與觀測資料的一致程度，其值介於 0 到 1 之間。當 WI=1 時，表示模擬與觀測完全一致；當 WI 趨近於 0，則顯示一致性極低，其中 N 為樣本數， P_i 為模擬值， O_i 為觀測值， \bar{P} 為模擬值的平均值。

$$\text{相關公式：} WI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|O_i - \bar{P}| + |P_i - \bar{P}|)^2}$$

敏感度分析是一種用來評估模型輸入參數變化對輸出結果影響程度的方法，它的核心目的在於判斷哪些輸入參數對模型輸出影響最大，以便於模型校正及參數選定，本研究使用變異係數(CV)來進行敏感度分析，這是一個常見且直觀的方法，較大的 CV 表示該評估指標受不同模擬條件影響較大，敏感度較高，計算後權重也較大；較小的 CV 則相反，其中 σ 為標準差， μ 為平均值。

$$\text{相關公式：} CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

綜合評估指標(CI)為各指標數值經轉換至 0~1 區間後，依權重進行加總，計算公式如下，其中 I_j 為標準化後的指標值， ω_j 為各指標權重， m 為評估指標總數，綜合評估指標的數值愈高，表示模式模擬表現愈佳，能更全面反映模式不同評估面向的整體效能。

$$\text{相關公式：} CI = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot I_j, \text{ 其中 } \omega_j = CV_j / \Sigma CV, \sum_{j=1}^m \omega_j = 1$$

三、研究成果

3.1 資料及研究期間選定

考量馬祖南竿各潮位及海流觀測站海象資料蒐集完整性，本研究選取 2024 年康芮颱風期間做為模式模擬颱風期間之潮位與海流變化之情況，並將模擬結果與運技中心設置之觀測站進行驗證比對，為避免觀測資料異常值影響比對結果，驗證前觀測資料一律通過品管檢核，其中運技中心使用之潮位站為 T1，海流測站(AWAC)為 A3，各測站詳細資訊如表 8，位置如圖 6，颱風路徑如圖 7。

表 8 南竿福澳港區潮位、海流驗證觀測站位置

測站序號	量測儀器	緯度	經度	使用資料期間	觀測單位
T1	潮位計 (壓力式)	26°09'39"N	119°56'36"E	康芮颱風 2024/10/25~2024/11/03	運技中心
A3	AWAC (底碇式波流觀測站)	26°09'55"N	119°56'8"E	康芮颱風 2024/10/25~2024/11/03	

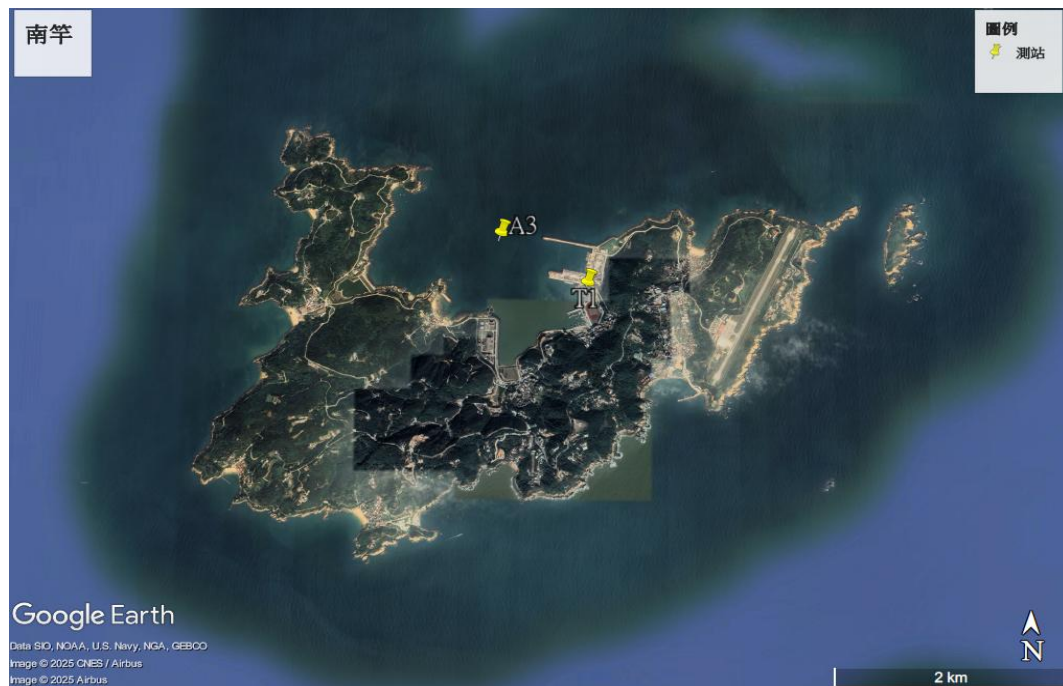


圖 6 南竿福澳港區潮位、海流驗證觀測站位置示意圖

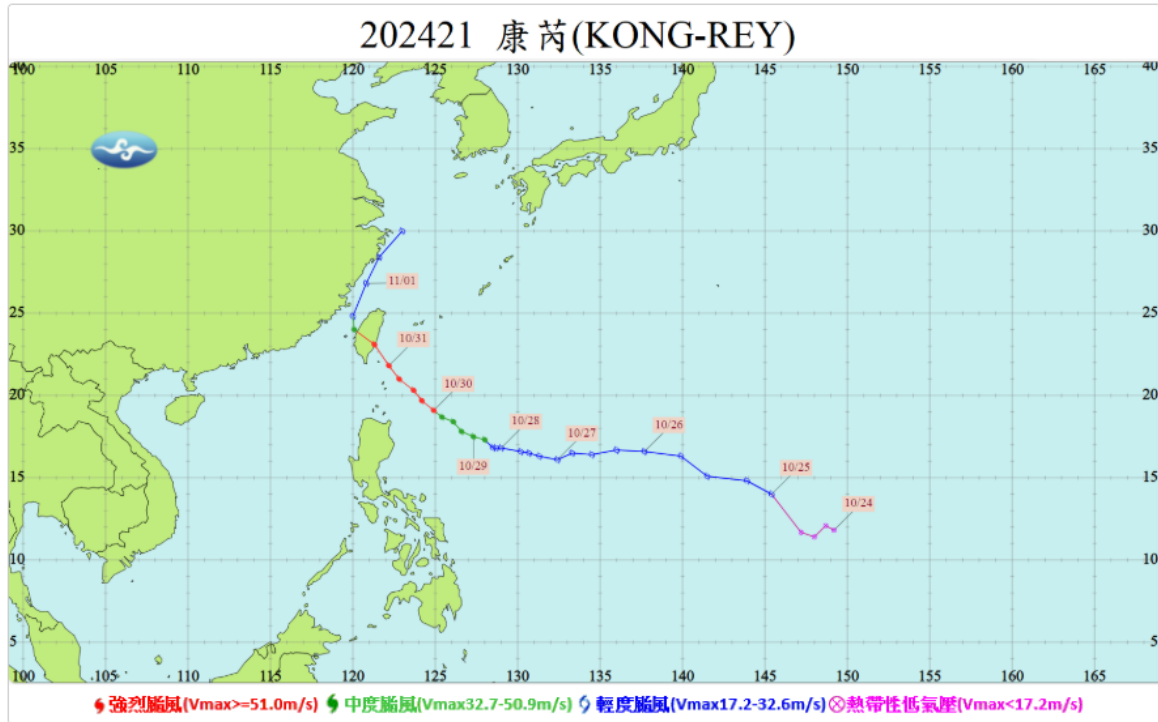


圖 7 2024 年康芮颱風路徑(資料來源：交通部中央氣象署)

3.2 水動力模擬計算成果

本模式颱風期間率定進行模擬 2024 年 10 月 23 日至 11 月 7 日潮汐、海流變化情形，風與邊界暖啟動時間皆為 2 天，因此以 2024 年 10 月 25 日至 11 月 3 日(涵蓋颱風生成至消散後 2 日)模擬計算成果與馬祖南竿福澳港潮位觀測站(T1 測站)及海流觀測站(A3 測站)數據進行比對。

針對 A3 (AWAC)測站之流速驗證，需特別說明數據處理原則：本研究採用 AWAC 測得之水面下約總深度 1/3 處之流速(原廠設定)進行比對。在物理意義上，依據明渠水力學之流速垂直剖面理論，近表層流速通常略大於 MIKE21 輸出之水深平均流速，故觀測值略高於模擬值屬預期之系統性誤差。儘管數值上存在差異，但在流向與潮汐相位上，近表層流體與整體水柱運動趨勢一致。

在上述驗證基礎下，本研究進一步比較不同潮位邊界及耦合條件組合情形，相關驗證與比較結果，詳如圖 8 至圖 19 所示。

3.2.1 不同潮位邊界條件比較

由圖 8 中可看出兩組模式模擬結果(綠、紅線)與觀測值(黑線)高度重疊，不論高潮、低潮或漲退轉折，都與現場測值幾乎一致，模式誤差極小，多數時間完全重疊，僅在極值點(如某些高潮或低潮)有細微偏差，且誤差在 0.1~0.2 m 以內；MIKE21TIDE 與 FMTIDE 模式表現幾乎一樣，偶爾在部分時段有些微差別，但大部分時間彼此與觀測值都高度吻合。

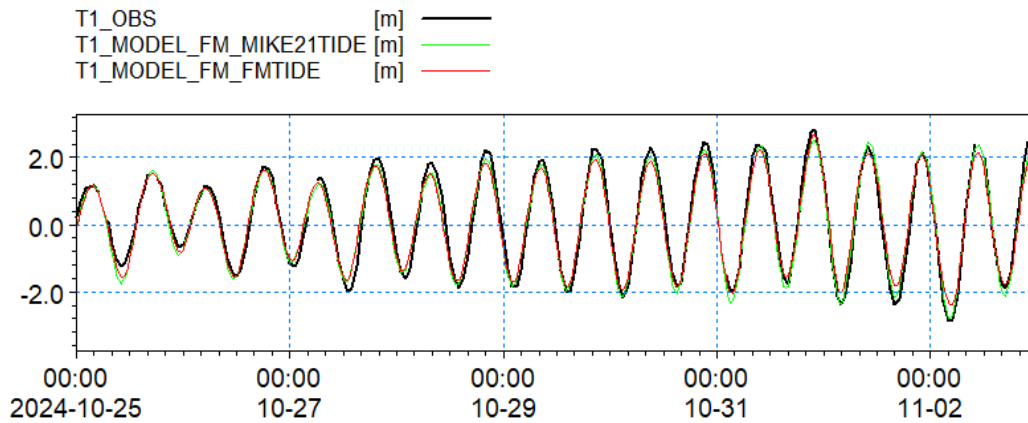


圖 8 不同潮位邊界條件下潮位模擬值與觀測值之比較

海流的模擬計算成果，如圖 9 及圖 10 所示，觀測值有較明顯的變化起伏，流速高低變動幅度最大，局部會出現尖峰，顯示觀測現場存在較多短期擾動或浪湧事件，兩組模擬值大致呈現和觀測值一致的週期性變化，均能反映出主要潮汐波動，週期性明顯，惟模擬值整體流速振幅略小於觀測值，部分高峰無法完全捕捉到，但低值時段與觀測值較為接近。MIKE21TIDE 偶爾在高峰時略高於 FMTIDE，但兩者差距不大。雖然模擬結果大致能反映潮汐變化，但對觀測中的突發高峰及低頻擾動捕捉有限，預測較平滑，缺乏短時間高頻變動。觀測值與模擬值的峰值(如 10 月 27 日、11 月 1 日及 11 月 2 日部分時段)的差異較為明顯，推測可能與模式條件未完全考慮(如更新的水深地形測量資料、微氣候擾動等)或觀測位置受局部地形結構物影響有關。低流速時，觀測值與模擬值表現較為接近，顯示在靜穩的潮汐背景下，模式有良好的趨勢一致性能力；流向部分，觀測流向角度分布在 0° 到 360° 之間，呈現典型潮流場的雙峰分布與劇烈跳動，主流向區約在 40° ~ 120° 及 240° ~ 320° 兩大區間，反映現場流向受潮汐及局部擾動影響頻繁變化。兩組模擬結果多數時段能重疊或接近觀測主要分布群，但在高變異時段或突然轉流時，部分模擬角度落在不同象限，顯示模式對極端或突發流向的趨勢一致性有限，且過渡段與週期轉流時，觀測值橫跨分布範圍較大，模式仍以主流向為主，呈現分布集中但廣度較不足的情形，模式間彼此角度分布大致相似。

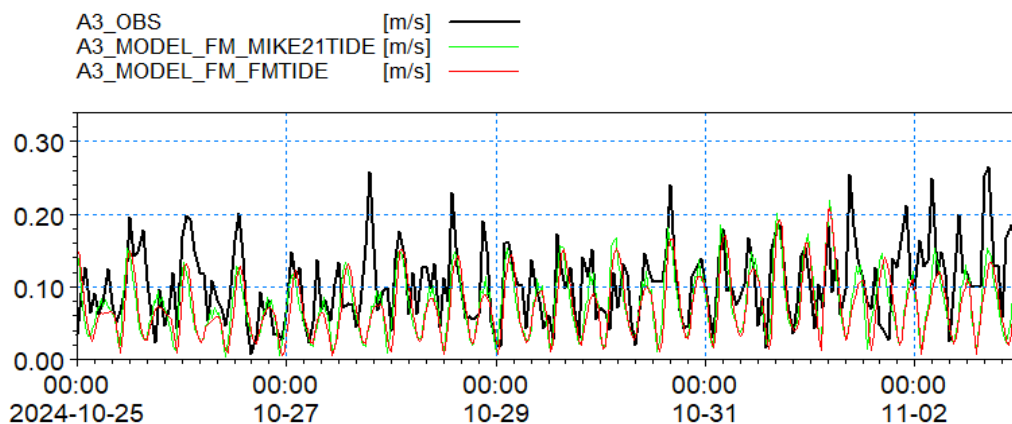


圖 9 不同潮位邊界條件下流速模擬值與觀測值之比較

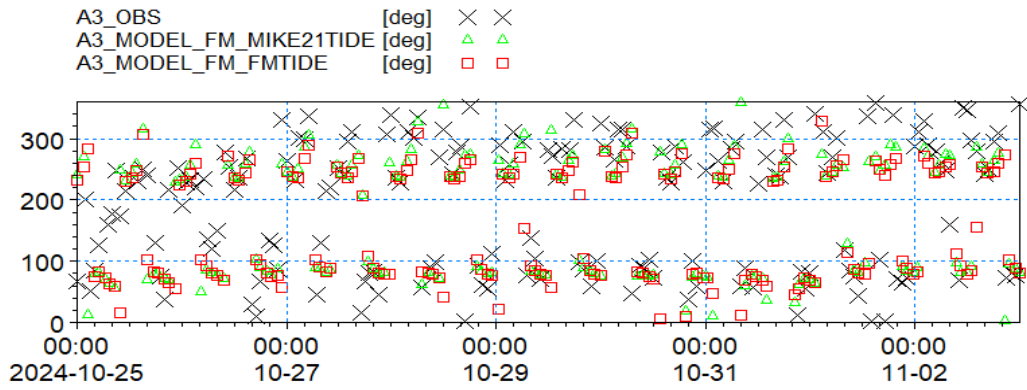


圖 10 不同潮位邊界條件下流向模擬值與觀測值之比較

3.2.2 無分離耦合(MIKE21TIDE)與分離耦合(MIKE21TIDE_WR)之結果比較

由圖 11 中可看出兩組模式模擬結果幾乎與觀測值重疊，週期、幅度和漲退潮轉折之趨勢一致性非常好，僅在部分極值(如高峰或低谷)有細微差異，代表模式在該測站的潮位趨勢一致性佳。

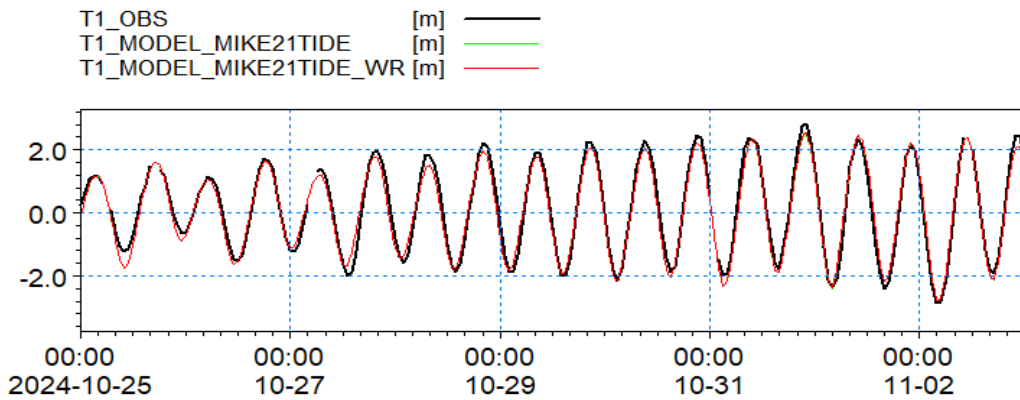


圖 11 MIKE21TIDE 與 MIKE21TIDE_WR 潮位模擬值與觀測值之比較

海流的模擬計算成果，如圖 12 及圖 13 所示，兩組模式模擬均能反映主要潮汐週期性律動，MIKE21TIDE_WR 在部分時段尖峰較為突出，與觀測高值有較好吻合，其振幅通常略大於原模式，三者於低谷時數值較為一致；在流向部分，兩組模式模擬結果在主要流向集中的時段與觀測值重疊度高，MIKE21TIDE_WR 在部分時段(如轉折流向、高變異區)較原模式更貼近觀測的流向分布，但兩者間主要差異不大。

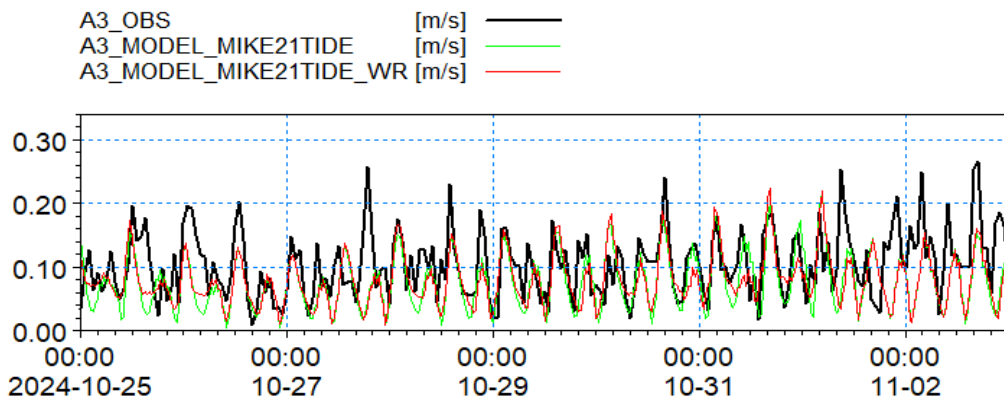


圖 12 MIKE21TIDE 與 MIKE21TIDE_WR 流速模擬值與觀測值之比較

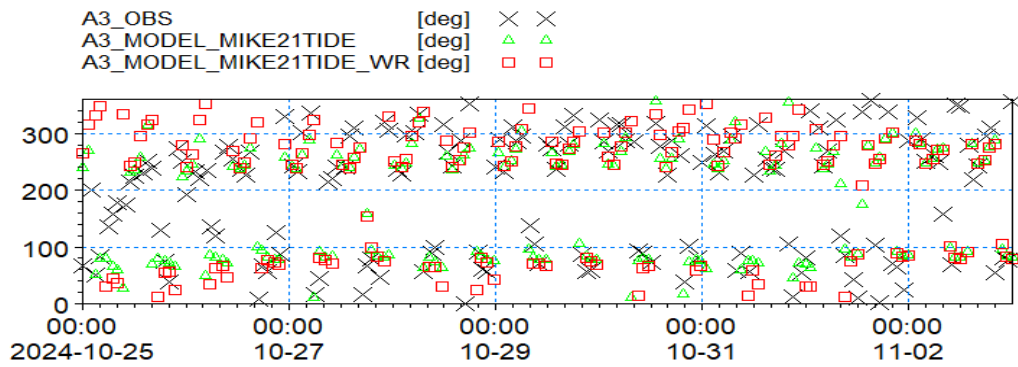


圖 13 MIKE21TIDE 與 MIKE21TIDE_WR 流向模擬值與觀測值之比較

3.2.3 無分離耦合(FMTIDE)與分離耦合(FMTIDE_WR)之結果比較

由圖 14 中可看出 FMTIDE 與 FMTIDE_WR 幾乎重疊共線，並且與觀測值重疊，週期、幅度和漲退潮轉折之趨勢一致性效果良好，模式與觀測值間僅於極少數極值點(如高潮或低潮瞬間)有極為細微的偏差。

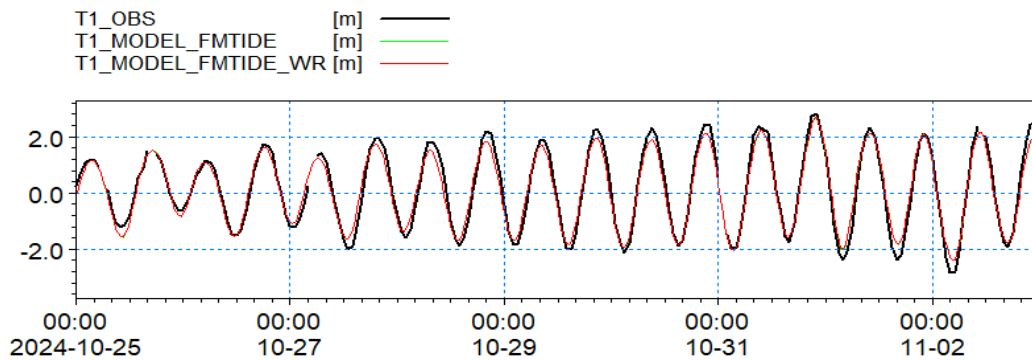


圖 14 FMTIDE 與 FMTIDE_WR 潮位模擬值與觀測值之比較

海流的模擬計算成果，如圖 15 及圖 16 所示，兩組模式模擬皆可反映主要潮汐週期，但流速振幅普遍低於觀測值，整體曲線較為平滑，T1_MODEL_FMTIDE_WR 在局部尖峰時偶爾能稍微貼近觀測高值，但主趨勢與原模式差別不大，平穩時段三者趨勢一致，尖峰時則模式低估之現象明顯；在流向部分，兩組模式模擬結果與觀測值流向分布重疊良好，都能反映主要漲退潮流向，T1_MODEL_FMTIDE_WR 在部分離群角度時，有時分布較廣，稍能補足部分觀測突變之跳動。

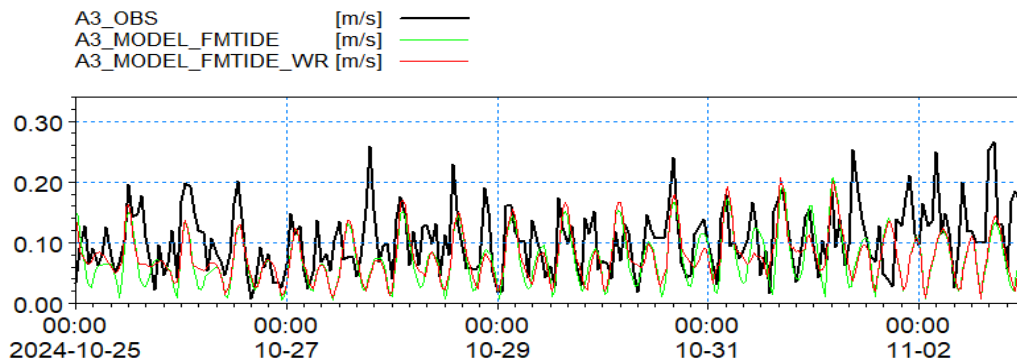


圖 15 FMTIDE 與 FMTIDE_WR 流速模擬值與觀測值之比較

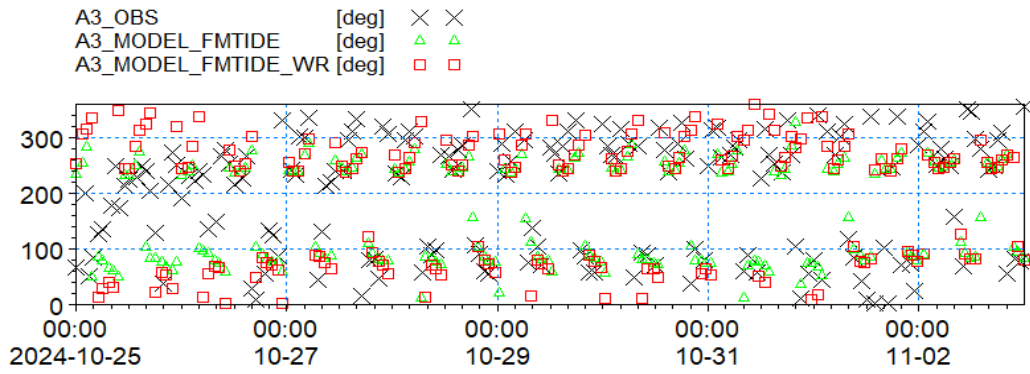


圖 16 FMTIDE 與 FMTIDE_WR 流向模擬值與觀測值之比較

3.2.4 分離耦合與全耦合條件(COUPLED_WR)比較

由圖 17 中可看出 3 組模式模擬結果(紅、綠及藍線)彼此高度重疊，且與觀測值(黑線)吻合度高，表示模式間差異較小，趨勢一致性佳。

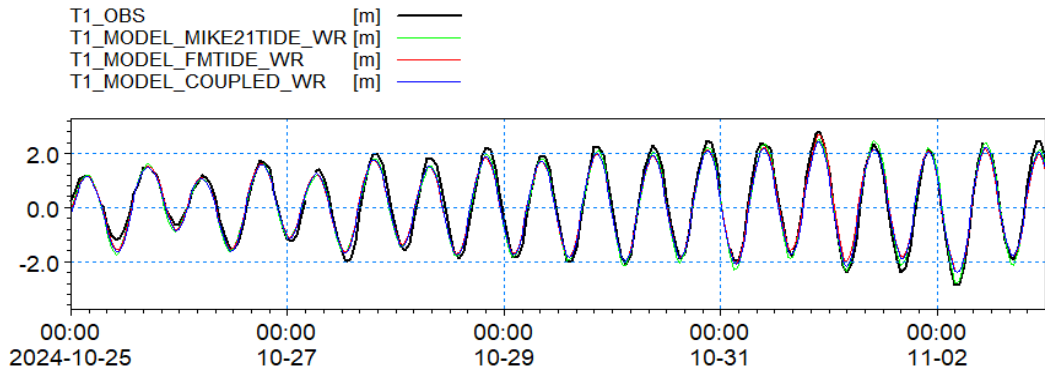


圖 17 分離耦合及全耦合條件下潮位模擬值與觀測值之比較

海流的模擬計算成果，如圖 18 及圖 19 所示，3 組模式皆能反映主要潮汐週期，但流速振幅均較低，且曲線較為平滑，尖峰出現時間與觀測部分重疊但幅度明顯低於觀測，T1_MODEL_MIKE21TIDE_WR 在部分時段流速峰值較高，與觀測尖峰較為貼近，T1_MODEL_COUPLED_WR 整體週期、低流速時段的表現與其他模式相近，但在高流速尖峰區稍有低估，平滑性高但極值難以全部捕捉；在流向部分，3 組模式均能集中反映主流向群，大多數時間點模擬落在觀測主流向分布位置，模式彼此差異極小，僅瞬時跳動現象時稍有偏離。

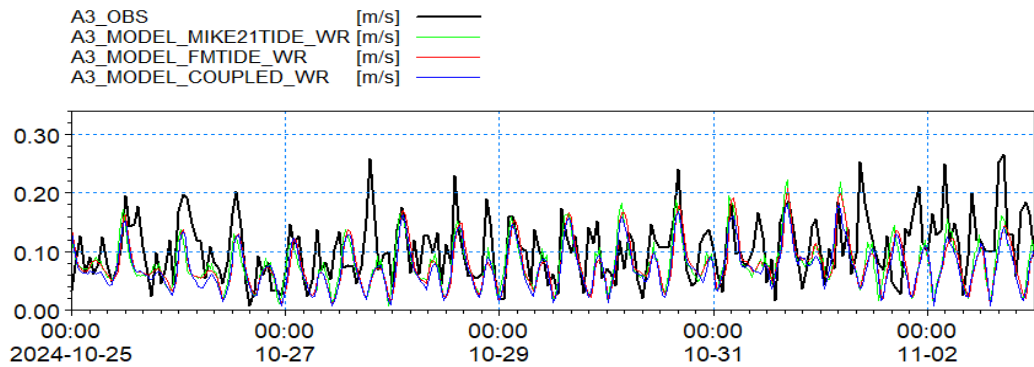


圖 18 分離耦合及全耦合條件下流速模擬值與觀測值之比較

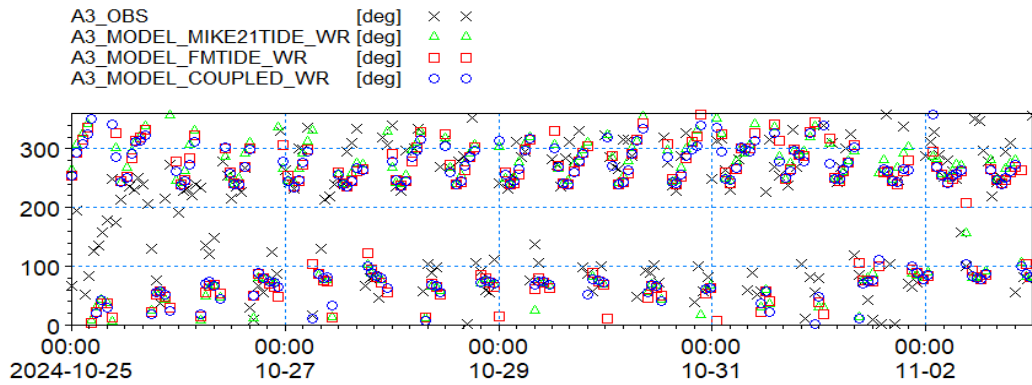


圖 19 分離耦合及全耦合條件下流向模擬值與觀測值之比較

3.3 準確率分析

由前節分析結果可知，流速及流向序列以線圖方式呈現時，往往因其高頻變動與多峰特性而難以直觀判讀模式表現之優劣。為確實量化不同條件下模式之模擬精度，本研究採用均方根誤差(RMSE)、決定係數(R^2)及 Willmot 一致性指數(WI)等統計指標，分別評估模式資料對於觀測值的吻合程度。進一步，本研究利用各評估指標之變異係數(CV)決定權重，對流速(純量)、流向(U、V 分量)進行差異化配置；透過客觀定義各統計指標對模擬精度的敏感度，建構融合多項指標的綜合評估指標，以此做為判斷模式整體表現之客觀依據，進而提升比較結果的科學性與代表性。

由表 9 流速比較來看，MIKE21 潮位預報(分離耦合、全耦合及無耦合)在 RMSE 方面，全組別均落在 0.0587~0.0599(m/s)的低值範圍，其中「分離耦合」條件流速均方根誤差最小 0.0587(m/s)，決定係數 R^2 表現以「無耦合」條件最高(0.204)，其餘條件 R^2 介於 0.16~0.1626，表示趨勢一致性稍有優於其他條件，WI 一致性指數則以「無耦合」條件最高(0.6246)，其次為分離耦合(0.6077)，顯示「無耦合」模擬下的吻合度最佳；MIKE21 FM 模擬暴潮變化(分離耦合及無耦合)在 RMSE 方面，兩種條件分別為 0.0599、0.061，與前述 MIKE21 潮位預報全耦合表現相近， R^2 、WI 分數略低於 MIKE21 潮位預報，但仍維持穩定中等水準(R^2 分別為 0.1275、0.1649，WI 分別為 0.5905、0.6074)；另外，由表 10 流向(U 分量)比較來看，MIKE21 潮位預報(分離耦合、全耦合及無耦合)在 RMSE 方面，全組別皆介於 0.0678~0.0752 之間，其中「無耦合」條件 RMSE 最低(0.0678)，顯示其對流向(U 分量)模擬之誤差最小，決定係數 R^2 表現以「無耦合」條件最高(0.5256)，其餘條件 R^2 介於 0.4225~0.4345，表示趨勢一致性稍有優於其他條件，WI 一致性指數則以「無耦合」條件最高(0.834)，顯示「無耦合」模擬下的吻合度最佳；MIKE21 FM 模擬暴潮變化(分離耦合及無耦合)在 RMSE、 R^2 及 WI 雖表現穩定，RMSE 分別約在 0.072、0.077(m/s)， R^2 分別約在 0.4026 及 0.4718，WI 分別約在 0.7713 及 0.8121，但各項及綜合評估指標值皆低於 MIKE21 潮位預報「無耦合」條件，接著，再由表 11 流向(V 分量)比較來看，MIKE21 潮位預報(分離耦合、全耦合及無耦合)在 RMSE 方面，全組別皆介於 0.0574~0.0627 之間，其中「無耦合」條件 RMSE 最低(0.0574)，顯示其對流向(V 分量)模擬之誤差最小，決定係數 R^2 表現以「無耦合」條件最高

(0.1949)，其餘條件 R^2 介於 0.0878~0.0918，表示趨勢一致性稍有優於其他條件，WI 一致性指數則以「無耦合」條件最高(0.5934)，顯示「無耦合」模擬下的吻合度最佳；MIKE21 FM 模擬暴潮變化(分離耦合及無耦合)在 RMSE、 R^2 及 WI 雖表現穩定，RMSE 分別約在 0.0608、0.066(m/s)， R^2 分別約在 0.0542 及 0.1473，WI 分別約在 0.5224 及 0.569，但各項及綜合評估指標值亦皆低於 MIKE21 潮位預報「無耦合」條件。以各條件統計與綜合評估指標值比較，MIKE21 潮位預報「無耦合」條件表現最優，兼顧誤差、吻合度及趨勢一致性，是康芮颱風期間 A3 測站流速及流向模擬的最推薦設定。

表 9 康芮颱風期間 A3 測站流速觀測與多模式模擬精度指標比較表

潮位邊界	波流耦合	RMSE(m/s)	R^2	WI	RMSE(標準化)	綜合評估指標
MIKE21 潮位預報	分離耦合	0.0587	0.16	0.6077	1.00	0.27
	全耦合	0.0599	0.1626	0.597	0.48	0.23
	無耦合	0.0593	0.204	0.6246	0.74	0.29
MIKE21 FM 模擬 暴潮變化	分離耦合	0.0599	0.1275	0.5905	0.48	0.20
	無耦合	0.061	0.1649	0.6074	0.00	0.20
變異係數分析					總和	
變異係數		0.01	0.17	0.02	0.20	
權重		0.07	0.82	0.11	1.00	

表 10 康芮颱風期間 A3 測站流向(U 分量)觀測與多模式模擬精度指標比較表

潮位邊界	波流耦合	RMSE(m/s)	R^2	WI	RMSE(標準化)	綜合評估指標
MIKE21 潮位預報	分離耦合	0.0749	0.4345	0.7809	0.23	0.44
	全耦合	0.0752	0.4225	0.7761	0.20	0.43
	無耦合	0.0678	0.5256	0.834	1.00	0.70
MIKE21 FM 模擬 暴潮變化	分離耦合	0.077	0.4026	0.7713	0.00	0.36
	無耦合	0.072	0.4718	0.8121	0.54	0.55
變異係數分析					總和	
變異係數		0.05	0.11	0.03	0.19	
權重		0.26	0.56	0.18	1.00	

表 11 康芮颱風期間 A3 測站流向(V 分量)觀測與多模式模擬精度指標比較表

潮位邊界	波流耦合	RMSE(m/s)	R ²	WI	RMSE(標準化)	綜合評估指標
MIKE21 潮位預報	分離耦合	0.0627	0.0918	0.5508	0.38	0.25
	全耦合	0.0622	0.0878	0.5422	0.44	0.26
	無耦合	0.0574	0.1949	0.5934	1.00	0.47
MIKE21 FM 模擬 暴潮變化	分離耦合	0.066	0.0542	0.5224	0.00	0.12
	無耦合	0.0608	0.1473	0.569	0.60	0.34
變異係數分析					總和	
變異係數		0.05	0.48	0.05	0.58	
權重		0.09	0.83	0.08	1.00	

3.4 流場向量圖成果展示

馬祖南竿福澳港海域於康芮颱風期間之漲潮、退潮模擬流場如圖 20 及 21 所示，兩者結合起來可以完整解構該港灣區域的潮汐動力循環，下方的水位歷線圖則顯示該區域有明顯的半日潮特徵，且每日的兩個高潮與低潮高度不等，屬於混合潮，潮差極大，最大潮差可達 5m 左右，屬於強潮區，也表示此處巨大的潮差驅動力必然伴隨著強烈的潮流。前者模擬時間為 113 年 11 月 1 日 05 時 30 分，外海主流向由東向西，流場特徵為流體分離顯著，港內形成渦漩，此時，外部水體帶著懸浮物質進入港內，並易於渦漩中心發生沉積；後者模擬時間為 113 年 10 月 31 日 23 時 30 分，外海主流向由西向東，流場特徵為港內水體可向外輸送，在港口出口處，港內流出的水體與外海主流發生匯流，流線呈現順時針轉向並併入向東的主流中，有助於將港內的汙染物排出，惟港灣底部的特定區域始終缺少足夠的底層剪應力來啟動泥沙，該處將是未來長期的淤積熱點，另外，從流場向量圖判斷，兩者於外海側的向量場為典型的往復流特徵，漲潮時的人流渦漩結構比退潮時的出流結構更為封閉且強烈，這表示淨輸送可能指向港內，即便有退潮的沖刷，長期的物質輸送趨勢仍可能於港內堆積；對於航行安全而言，在港口入口處存在強烈的流速剪力，特別是在強潮與颱風期間，船舶需特別注意流場梯度造成的橫向推力影響，以確保航行與靠泊安全。

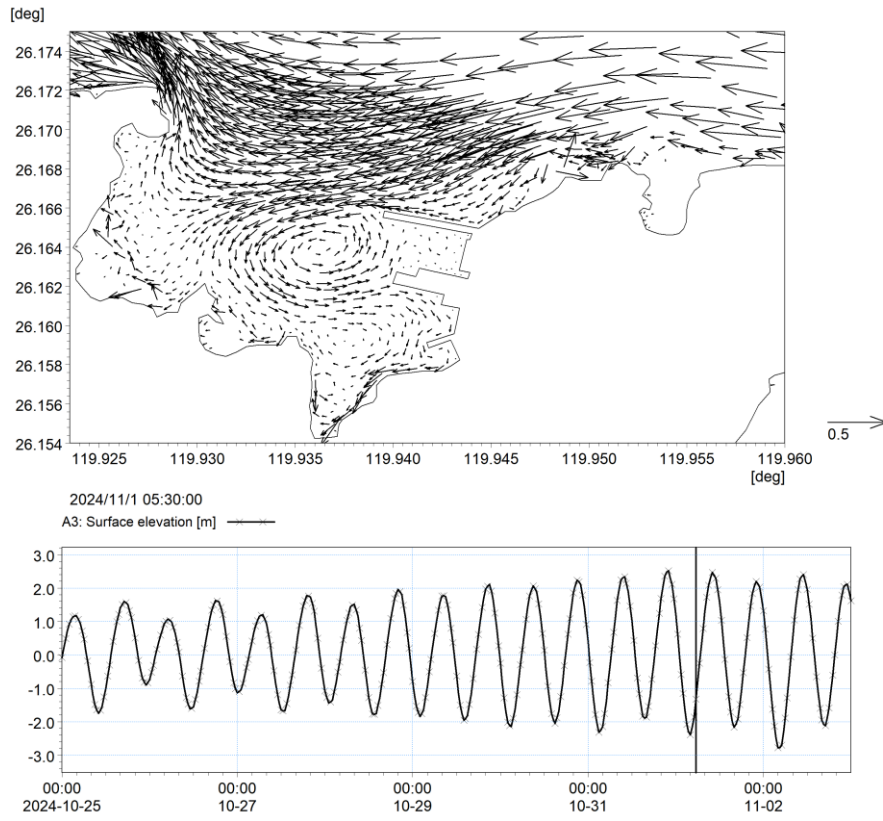


圖 20 康芮颱風期間模擬流場特徵與潮位變化(漲潮)

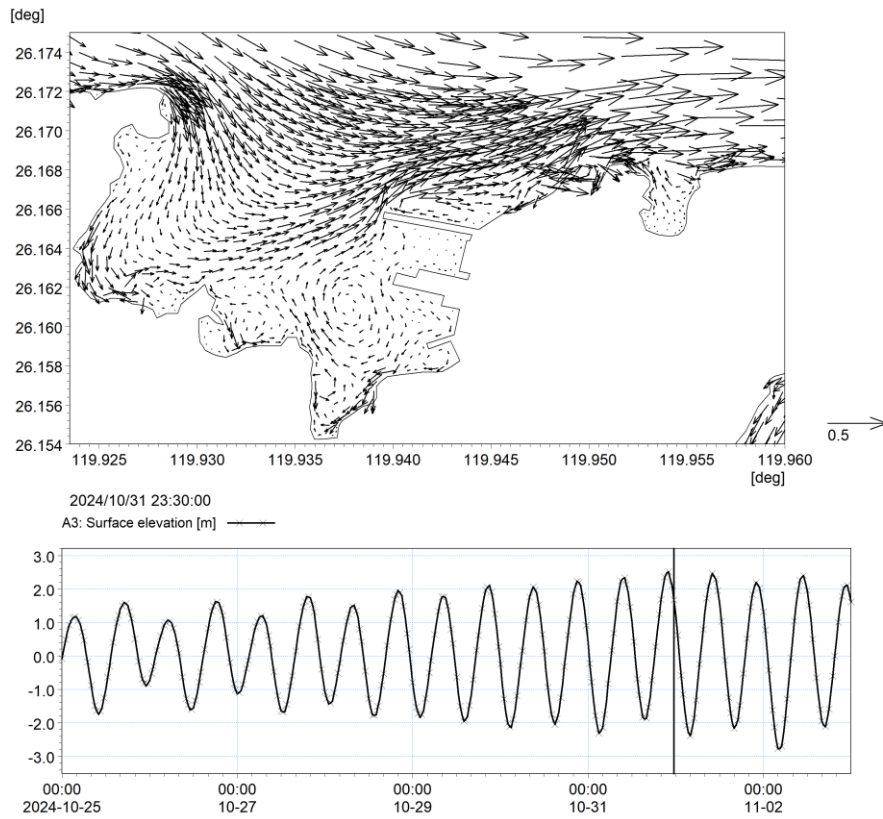


圖 21 康芮颱風期間模擬流場特徵與潮位變化(退潮)

四、結論

研究成果以邊界條件採用 MIKE21 提供之潮位邊界預報，並單純以水動力模式且無耦合方式進行模擬，其模擬成果較優，經研究分析，可能原因為港區(如商港或漁港)這類典型之半封閉水域，波浪進入港池時能量大幅衰減，波浪輻射應力對港內流場影響相對較小，因此，即使數值模式中加入波浪輻射應力及波流交互作用等細緻物理過程，對港區流場敏感性不高，並且過度複雜的耦合條件導致模型參數倍增，即使效果微弱，資料不確定性與邊界誤差容易在數值過程中放大，造成誤差累積，在分離耦合的情況下，如風場解析較低或與實測差異較大，波浪模型中的風浪生成階段會產生誤差傳遞，在全耦合情況下，波浪及流場若於資料品質不足時交互作用，誤差有可能會被耦合機制放大，導致反效果。

另外，港區內地形與水深資料變動頻繁，模擬使用之地形水深資料解析度及更新狀況受限測量頻率，複雜的耦合模式對地形水深極度依賴，更容易受到底床誤差影響，導致模擬結果不如簡化模式穩定。單純水動力模式這樣的簡化模式，雖不如耦合模式物理完整，但若底床資料更新頻率低或僅能採用低解析度資料時，這類模型反而因計算邏輯簡單、物理參數較少，不易受到地形誤差劇烈傳遞，結果較穩定。

國外學者 Alday (2022)等人亦指出數值波浪模式在沿岸海域通常比外海不精確，沿岸誤差更大，與岸線、地形複雜、風場資料不夠精準、強流、底床摩擦等因素有關。不同物理場(如風、波、潮、流)、解析度和參數選擇會在不同區域顯著影響波場特性，但各種設定的複雜交互作用，往往不容易抵消誤差，甚至因耦合可能放大。另外，G. W. Wilson(2014)等人在其研究表示水深地形誤差，已被特別指出為研究中整體模型準確性的根本障礙。

蘇等人(2021)分析 2019 年 12 港域海氣象觀測資料年報(風浪潮流資料)，馬祖福澳港平均潮差介於 4.25 公尺至 4.54 公尺，最大潮差介於 5.89 公尺至 6.67 公尺，基於驗證良好的模式成果，進一步解析本次流場動力特徵發現，馬祖福澳港海域屬巨潮汐(Davies 於 1964 年定義國際潮汐分類：微潮汐，平均潮差小於 2 公尺；中潮汐，平均潮差介於 2 至 4 公尺；巨潮汐，平均潮差大於 4 公尺)，研究期間最大潮差達 5 公尺，外海潮汐流向呈典型往復流。漲潮時港內形成封閉渦漩，易捲入懸浮物質；雖退潮有助水體排出，但因漲潮入流結構強於退潮，淨物質輸送仍指向港內。港灣特定區域底部因缺乏足夠剪應力，將成為長期淤積熱點。此外，港口入口處存在強烈流速剪力，船舶進出須特別警戒橫向推力，以確保航行安全。

參考文獻

1. 莊文傑、江中權，台灣四周海域海流數值模擬研究(二)高雄港海域潮汐與潮流之數值模擬研究，2002 年，交通部運輸研究所。
2. 蘇青和，2003 年，台北港海氣地象觀測資料專刊(1996~2002 年)(海流)，交通部運輸研究所。
3. 林有騰、林雅雯、鄭采誼、謝佳紘，2024 年，馬祖海氣象特性分析及應用研究，交通部運輸

研究所。

4. 羅政耀、蕭松山，2010 年，基隆港港口附近流況分析特性探討，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
5. 陳鈺龍、楊文衡，2012 年，淡水第二漁港波流與漂沙數值模擬之研究，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
6. 楊文衡、許泰文，2004 年，核能四廠鹽寮海岸漂砂數值模擬，台灣電力公司報告。
7. 宋芷萱，2014 年，颱風侵襲下-東沙島海岸地形變遷數值研究，海洋國家公園管理處成果報告。
8. 蘇青和、廖慶堂、黃茂信、羅冠顯、衛紀准、李政達、林達遠、洪維屏、許義宏、劉明鑫、林受勳、蔡金吉，2021 年，2019 年 12 港域海氣象觀測資料年報(風浪潮流資料)，交通部運輸研究所。
9. J. L. Davies et al. (1964), "A morphogenic approach to world shorelines".
10. Michael B. Kabiling et al. (2009), "Calibration and verification of a MIKE21 model for evaluating shoreline stabilization alternatives".
11. G. W. Wilson (2014), "Surf zone bathymetry and circulation predictions via data assimilation of remote sensing observations".
12. Peter Kalverla et al. (2018), "Evaluation of three mainstream numerical weather prediction models with observations from meteorological mast IJmuiden at the North Sea".
13. Gamal El Afandi et al. (2022), "Evaluating the Weather Research and Forecasting model to predict Wind Speed over Egypt, Sudan, and South Sudan".
14. Alday et al. (2022), "Accuracy of numerical wave model results: application to the Atlantic coasts of Europe(OS – Copernicus)".
15. Stefano Materia et al. (2024), "Artificial intelligence for climate prediction of extremes: State of the art, challenges, and future perspectives".