

港區海域波浪模擬導入 SCHISM 模式之可行性探討

陳鈞彥¹ 黃茂信² 林雅雯²

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心科長

摘要

交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)發展作業化之臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS (Taiwan Coastal Operational Modeling System)，應用交通部中央氣象署風、氣壓場預報資訊，經遠域(大尺度)風浪模組、近域(中尺度)風浪模組及近海(小尺度)風浪模組，以 WAM、SWAN 等風浪模式，針對商港進行模擬計算，提供預測模擬資料，並進行長期性模式校驗及維運。為提升作業化之海象模擬預測，本研究評估 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model)跨尺度海洋數值模式 WWM 結合第三代波浪模式於港區近岸海象模擬，本研究於建立 2 種不同範圍大小數值地形網格，建立耦合之風浪模式，針對花蓮港區進行數值模擬，及進行有無啟用波流耦合，以 2021 年至 2022 年共 4 場颱風為案例，模擬風浪情況，比較颱風期間波高、週期及波向模擬值與觀測值，評估未來將 SCHISM 模式導入 TaiCOMS 於港區波浪模擬之可行性。

一、前言

運研所作業化之臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS，提升商港海象模擬預測水準，應用氣象署風、氣壓場預報資訊，進行風浪模式、水動力模式等模擬計算並提供預測模擬資料，模擬成果應用於國內主要商港，提供波浪、水位及流場等海象模擬資訊，每年進行長期性模式校驗及維運，強化商港及近岸之海象模擬模組，以推動海岸災害防救科技發展。本研究評估三維跨尺度海洋數值模式 SCHISM 結合第三代波浪模式 WWM-III(以下簡稱 WWM)，針對花蓮港區耦合模擬颱風風浪情況，與 TaiCOMS 系統中採用 WAM-SWAN 模式之模擬結果比較，評估未來導入 SCHISM-WWM 模式於 TaiCOMS 港區波浪模擬之可行性，做為後續提升模擬準確度參考，俾利臺灣港務股份有限公司及交通部航港局掌握港灣海象變化情勢。

有關風浪數值模擬應用之模式，目前以第三代數值波浪模式最為普遍，包括 WAM(WAMDI Group, 1988)、SWAN(Booij et al., 1996)、NWW3(Tolman, 1997)及 WWM(Roland et al., 2012)，WAM 模式採用二維波浪能量平衡方程式，可描述方向波譜在時間、空間的變化過程。SWAN 模式由荷蘭 Delft 大學主導發展(The SWAN team, Delft University of Technology, 2021, 2022)，除具備第三代波浪模式特徵，亦同時考慮波浪在近岸海域的傳遞及變形效應，運研所之作業化 TaiCOMS 2.0，其風浪模擬部分即是採用 WAM、SWAN 模式，分別於遠域、近域及近海，建置

3 層巢狀網格波浪模擬子系統，模擬預測臺灣各商港區之波浪。WWM 模式為 Hsu 等人(2005)以有限元素法(FEM)改良採用有限差分法的 SWAN 模式，WWM 能利用非結構化網格，在同一個離散計算域中解決大尺度海洋與小尺度海岸波浪，可更精確地描述淺水區的複雜地形與不規則邊界、風能輸入、白帽、破碎、底床摩擦及非線性交互作用等過程，並可與 SCHISM 模式介接進行波流耦合模擬。

依據過去文獻，SCHISM 結合 WWM 模式之耦合模擬，廣泛應用於海流、風浪模擬，及應近岸海域之波流交互作用流場模擬。邱啟敏等(2016)應用 SCHISM 模式結合二維溢油傳輸擴散模式(2D-VOILS)，評估適用於港區海域油污擴散模擬之適用性，邱啟敏等人(2019)應用 SCHISM-WWM 耦合模式，探討臺南海域之海流變化趨勢。蕭士俊等(2019)應用 SCHISM-WWM 耦合模式，測試以 ERA5、MERA5 風場進行波、流模擬，經評估後可知採用 MERA5 颱風風場進行顯著波高模擬之表現優於使用 ERA5 風場，於 2015 年颱風蘇迪勒與 2016 年梅姬颱風案例中，使用 MERA5 風場可使模擬之波高峰值(波揚)提升約 1 至 2m。王敘民等(2020)以 SCHISM-WWM 耦合模式，探討裂流在宜蘭外澳近岸地區時空間的分布特性，模式可描述烏石漁港及龜山島近岸之波、流場特性。蕭士俊等(2020)應用 SCHISM-WWM 模式，以不同風場、不同波流耦合條件下，探討臺灣北部近岸海域之颱風波浪模擬之差異，研究結論得出潮流對颱風波浪模擬結果具有輕度敏感，潮流則對東北部與東部海域對敏感性則較低。Fu 等人(2023)應用 SCHISM-WWM 模式並耦合輸沙模式(MORSELEF)，模擬評估中國海南島瓊海市近岸人工島周圍，受波、流影響之漂沙、海岸侵淤情形。吳漢倫等(2024)以 SCHISM-WWM 耦合模式銜接 FUNWAVE 模式，模擬花蓮台 11 線人定勝天路段海岸之波浪溯升、越波情形。Tran HQ 等人(2024)應用 SCHISM-WWM 模式，探討澳洲墨爾本菲利普港灣，在不同平均海平面對極端風浪、非線性湧浪之潛在影響，模式可描述菲利普港灣之封閉海灣內之波、流場特性。

二、SCHISM 數值模式

2.1 模式介紹

SCHISM 模式為 SELFIE (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite Element model, Zhang and Baptista, 2008)模式於 2014 年後修改之無縫跨尺度網格水動力模式，可結合結構及非結構性網格，採用半隱式有限元素法，可使用較大時距進行數值計算，SCHISM 模式本身可介接物理模組(如圖 1)，可連帶模擬風浪、漂沙、油污、水質、生態等議題，因其具備可擴充性、穩定性及良好運算效能，而被廣泛應用。

WWM(Wind Wave Model III, Roland et al. 2012)為第三代頻譜風浪模式，可用於模擬近岸波場浪變化情況，可與 SCHISM 模式介接進行波、流耦合模擬，因此，本研究應用 SCHISM 與 WWM 之耦合模式進行港區風浪模擬。

SCHISM 模式採用水深積分之平面二維進行模擬，基於靜水壓假設與布氏近似假設 (Boussinesq approximations) 求解淺水方程式，其控制方程式包含連續方程式及動量方程式，連續方程式如(1)式。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$ 為水平速度， $w = w(x, y, z, t)$ 為垂直速度，為描述自由液面變化，可以水深積分求解將(1)式改寫為(2)式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (2)$$

其中 $\eta = \eta(x, y, t)$ 為自由液面高程， $h = h(x, y)$ 為地形深度，動量方程式如(3)式：

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -f\mathbf{k} \times \mathbf{u} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - g\nabla \eta - \frac{\nabla p_A}{\rho_0} + \alpha g \nabla \Psi + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + R_S \quad (3)$$

其中 ν 為垂直渦流黏度， g 為重力加速度， ρ_0 為參考水體密度， p_A 為大氣壓力， f 為科氏力參數， $\mathbf{k}$ 為垂直方向(z 軸)單位， α 為效率地球彈性因子， Ψ 為潮汐潛勢， R_S 為輻射應力。

WWM 模式依據波浪作用力平衡方程式(wave action balance equation)，以及源函數項等求解波浪作用力密度波譜(action density spectrum)，控制方程式如(4)至(8)式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

$$c_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x \quad (5)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y \quad (6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\sin \theta \frac{\partial d}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial y} \right) + \left(\sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U_x \frac{\partial d}{\partial x} + U_y \frac{\partial d}{\partial y} \right) - C_g k \left(-\cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial y} \right) \quad (8)$$

其中 N 為波浪作用力密度， σ 為頻率、 θ 為波浪方向角、 x 、 y 為直角座標系統之座標方向， c_x 、 c_y 、 c_θ 分別為波浪作用力在 x 、 y 、 θ 方向之傳遞速度、 c_σ 為波浪作用力在頻率空間之傳遞速度、 C_g 為波群速度、 U_x 、 U_y 為流速在 x 、 y 方向之分量、 k 為波數， S_{tot} 為波浪成長與消散之源函數，可以(9)式表示：

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (9)$$

其中 S_{in} 為風浪成長項、 S_{nl4} 、 S_{nl3} 為深海與淺水的波與波間非線性交互作用項， $S_{ds,w}$ 為白帽消散項、 $S_{ds,b}$ 為底床摩擦項、 $S_{ds,br}$ 為碎波消散項。

風浪成長項與白帽消散項依模式使用手冊建議，根據 Hasselmann(1974)提出之理論，可表示如(10)、(11)式，其中 $\tilde{\sigma}$ 為平均頻率、 $\tilde{k}$ 為平均波數、 Γ 為波浪尖銳度係數、 $E(\sigma, \theta)$ 為波能譜， $\tilde{S}$ 為平均波浪尖銳度、 $\tilde{S}_{PM}$ 為 Pierson-Moskowitz 頻譜的平均波浪尖銳度， C_{ds} 為白帽消散速率、 p 波

浪尖銳度之冪次、 δ 為白帽消散對波數之依賴係數，根據 Komen(1984)建議，模式以 $C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$ 、 $\delta=0$ 、 $p=2$ 、 $\tilde{S}_{PM}=3.02 \times 10^{-5}$ 為參數預設值。

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma}^{\frac{k}{k}} E(\sigma, \theta) \quad (10)$$

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left[(1 - \delta) + \delta \frac{k}{k} \right] \left(\frac{\tilde{S}}{\tilde{S}_{PM}} \right)^p \quad (11)$$

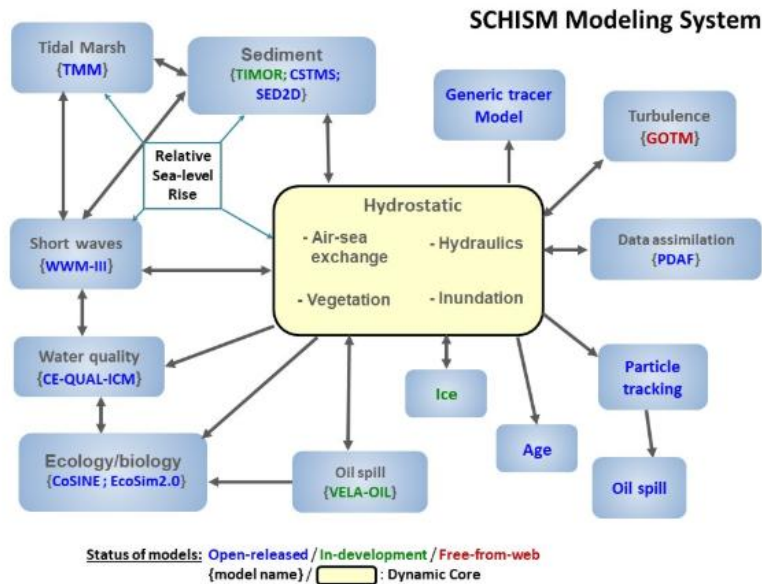
波浪在接近淺水與深水區傳遞之非線性波與波之間交互作用分別為 S_{nl3} 、 S_{nl4} ，根據使用手冊，WWM 模式採用與 SWAN 模式相同設定，使用參數及參數建議值如表 1、表 2，底床摩擦項根據 Hasselmann(1973)之理論採用 JONSWAP 實驗歸納結果，可表示如(12)式，碎波消散項根據 Battjes & Janssen (1978)之理論，可表示如(13)式，

$$S_{ds,b} = -C_{bottom} \cdot \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} \cdot E(\sigma, \theta) \quad (12)$$

$$S_{ds,br} = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} \cdot E(\sigma, \theta) \quad (13)$$

其中， C_{bottom} 為底床摩擦係數，根據 Hasselmann(1973)提出之建議， $C_{bottom}=0.067 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ ， E_{tot} 為總波能、 D_{tot} 為消散波能，根據 Battjes and Stive(1985)提出之建議，碎波消散項由碎波指標 γ 控制， γ 建議值為 0.73，如(14)式，其中 d 為水深、 H_{max} 為最大可能波高。

$$\gamma = \frac{H_{max}}{d} \quad (14)$$



資料來源 SCHISM 模式官網，<https://ccrm.vims.edu/schismweb/>

圖 1 SCHISM-WWM 模式架構圖

2.2 模式設定

本研究使用 SCHISM-WWM 耦合模式，採用 Linux 作業系統執行模擬，因模式網格與 SMS(Surface Water Modeling System)模式使用網格格式相同，故本研究使用 SMS 模式之網格製

作工具產製數值地形網格，本研究建立 2 種不同大小範圍，並涵蓋臺灣之西太平洋海域範圍建立數值模式網格進行模擬比較，較大範圍之網格東經 112°至 140°，北緯 16.5°至 29°，網格之節點數為 96339 個，共組成 187732 個三角形元素，較小範圍網格以東經 114°至 130°，北緯 19°至 29°，涵蓋臺灣之西太平洋海域範圍建立數值模式網格，網格之節點數為 67746 個，共組成 132117 個三角形元素，於近岸處皆採用相對細緻網格，數值地形則由美國國家海洋暨大氣總署之 ETOPO1、ETOPO5、及國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心之臺灣周圍海域 200m 解析度水深資料為來源、以非結構性網格(三角形網格)建立，2 種不同大小範圍網格資訊整理如圖 2、圖 3 及表 3。

模式之輸入風、氣壓場參考運研所 TaiCOMS 架構中，採用氣象署提供之 WRF(Weather Research and Forecast)成員之 M04 風、氣壓場資料(如圖 4 之紅框範圍)，經 TaiCOMS 之風場處理作業系統解算後得到該成員之解析度為 15km、3km 逐時資料，以 WD01 及 WD02 代號表示(如表 4)，分別擷取海平面高度 10m 之風場及海平面氣壓場資料後，提供 TaiCOMS 模擬使用，擷取後之資料依範圍及網格解析度，區分為西太平洋風場及氣壓(以 WE01 表示)及臺灣海域風場及氣壓(以 WE02 表示)資料，WE01 及 WE02 風、氣壓場之範圍與網格資料，如圖 5 及表 5，本研究將 WE01 及 WE02 風、氣壓場內插至數值地形網格做為使用之風、氣壓場，風浪模組模擬值輸出點位參考 TaiCOMS，選擇運研所於花蓮港設置之波流觀測站附近為模擬輸出點(圖 6 中黃點位置)。

SCHISM-WWM 模式於風浪模擬之基本設定參數，如表 5 所列，波浪頻率設定於 0.03Hz 至 1Hz 間共分割 36 個頻率帶，波向於 0 至 360 度之間分割 40 個方向角，最小水深為 0.01m，時間步長為 120sec，耦合頻率為每 5 個時間步長(每 600sec)進行波流耦合。

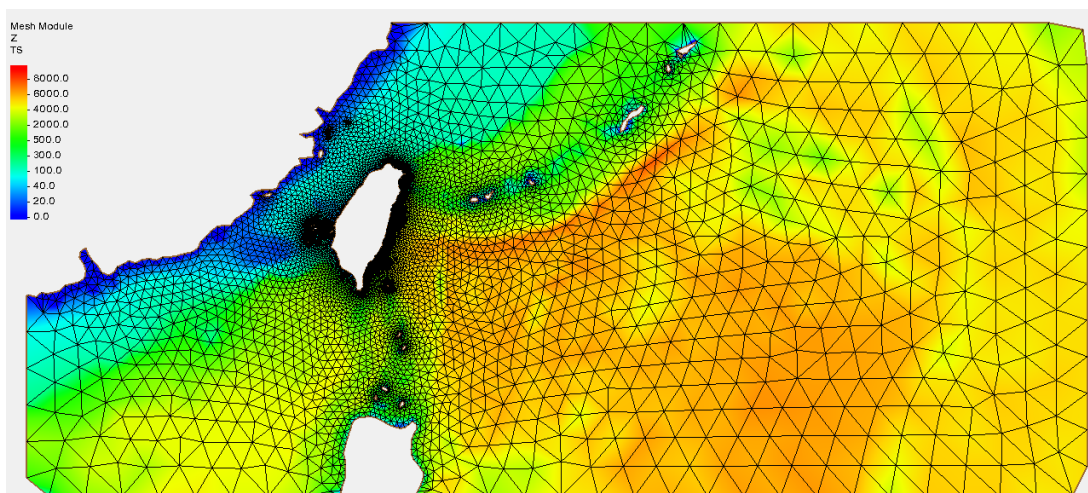


圖 2 較大範圍水深地形與網格分布

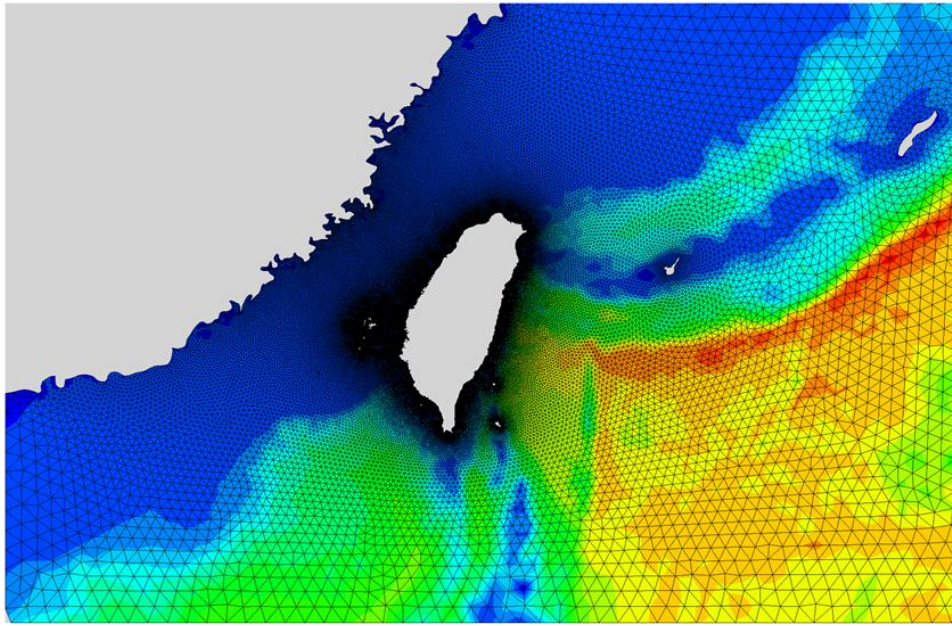


圖 3 較小範圍水深地形與網格分布

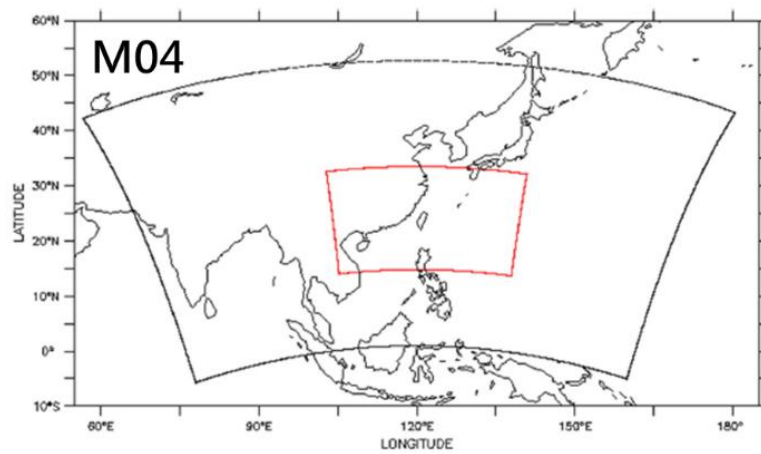


圖 4 中央氣象署 WRF 成員 M04 範圍圖

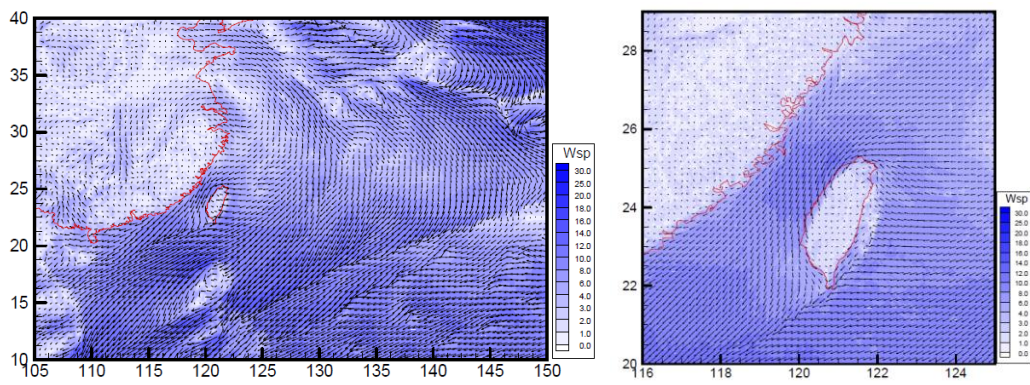


圖 5 TaiCOMS 作業化風、氣壓場 WE01(左)、WE02(右)範圍圖



圖 6 花蓮海域風浪模擬比對位置

表 1 三波非線性交互作用參數表

參數	參數值
Trfac 相稱係數	0.05
Cutfr 最大頻率/平均頻率之比值	2.5
TRIURS 臨界厄塞爾數(Ursell number)	0.2
Urslim 最低厄塞爾數	0.01

表 2 四波非線性交互作用參數表

參數	參數值
Lambda 四波配置係數	2.5
Cnl4 四波相稱係數	3×10^7
Cnl1 淺水縮放係數	5.5
Cnl2 淺水縮放係數	0.8333
Cnl3 淺水縮放係數	-1.25

表 3 SCHISM 模式不同範圍網格資訊

網格模式代號	網格範圍	Nodes	Elements
S	114°E - 130°E 19°N - 29°N	67746	132117
L	112°E - 140°E 16.5°N - 29°N	96339	187732

表 4 中央氣象署 WRF 成員 M04 水平兩層巢狀網格資訊表

DMS FLAP	座標系統	dimension	解析度	格點位置
WD01	Lambert conformal mapping	661×385	15km	Center(120E), true (10N, 40N) 坐標(340,214)位置位於(30N,120E) 中心點坐標為(331,192)位置位於 (26.926N,118.5908E) 底圖 左下點(-5.693677°N,78.02554°E) 右上點(43.28705°N,-179.5461°E)
WD02		1,158×673	3km	Center(120E), true (10N, 40N) 坐標(522,547)位置位於(30N,120E) 中心點坐標為(579.5,337)位置位於 (24.1285N,121.7601E) 底圖 左下點(14.02224°N,105.2500°E) 右上點(32.12021°N,140.91388°E)

表 5 TaiCOMS 海象模擬作業化系統之風、氣壓場資料格式

模式	dimension	模式格網(°)	格點位置
西太平洋風、氣壓 WE01	271×181	1/6° ≈ 0.167°	左下點(10N,105E) 右上點(40N,150E)
臺灣海域風、氣壓 WE02	271×271	1/30° ≈ 0.033°	左下點(20N,116E) 右上點(29N,125E)

表 6 WWM 模式基本參數表

參數	參數值	備註
msc2 頻率分割數	36	頻率最小值 = 0.03Hz 頻率最大值 = 1Hz
mdc2 角度分割數	40	
DMIN 最小水深	0.01m	
dt(time step) 時間步長	120 sec	
耦合頻率	5 time steps = 600 sec	

三、風浪模擬及分析

3.1 不同範圍網格模擬結果比較

完成 SCHISM-WWM 耦合模式參數設定後，以 2021 年之璨樹、圓規颱風，2022 年之軒蘭諾、梅花颱風，將模擬之示性波高、尖峰週期、平均波向與觀測值、TaiCOMS 之 SWAN 模式模擬值繪製歷線圖進行比較，並列出風速觀測、WRF 之風速模擬值及颱風路徑圖，如圖 7 至圖 30，其中黑點為觀測值，藍線為 SWAN(TaiCOMS)之模擬值，紅線及綠線分別為 SCHISM-WWM 模式依據表 3 中較小範圍及較大範圍網格之模擬值，各颱風案例之誤差分析如表 7 至表 10。

由圖 7 至圖 28 之歷線圖可看出 2 種不同計算範圍之網格條件下，於模擬的 4 場颱風事件中，模擬值之趨勢變化皆與觀測值大致相符，以璨樹颱風而言，圖 7 顯示出 SWAN(TaiCOMS) 及 SCHISM-WWM 模擬示性波高均高估於觀測值，且 SCHISM-WWM 案例模擬之示性波高值大於 SWAN(TaiCOMS)，平均絕對誤差、均方根誤差以 SWAN(TaiCOMS)為最低(如表 7)，SCHISM-WWM_S 略高於 SCHISM-WWM_L，由圖 8 及圖 9 顯示出受颱風影響之波高升高期間(2021/9/10~2021/9/14)，同時於尖峰週期、平均週期皆呈現 3 種模式模擬結果皆高估於觀測值，但與示性波高不同，2 種 SCHISM-WWM 案例模擬之模擬值與 SWAN(TaiCOMS)相比為偏低，平均絕對誤差、均方根誤差以 SCHISM-WWM_L 為最低，反而是 SWAN(TaiCOMS)最高，平均波向模擬結果(圖 10)亦與觀測值皆相近，誤差值相差不大，由圖 11 之風速歷線圖顯示出於 2021/9/11 至 2021/9/13 期間，風速模擬值大於觀測值，尤其於 2021/9/12 08:00，風速模擬值為 15.76m/s，明顯高於觀測值 4.97m/s，推測可能為波高及週期模擬結果均明顯高估之原因。

從圓規颱風模擬結果中，圖 13 顯示出 SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM 模擬示性波高變化趨勢皆相近，受颱風影響之波高升高期間(2021/10/11 至 2021/10/13)略有差異，與觀測值相比皆呈現偏高，從誤差來看 SCHISM-WWM_L 平均絕對誤差為 0.559、均方根誤差為 0.785，明顯大於 SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM_S，圖 14 及圖 15 尖峰週期與平均週期，3 種模擬結果之間差異不大，其中以 SCHISM-WWM_S 之模擬值稍大於其他 2 種模擬結果，尖峰週期之誤差比較為 SCHISM-WWM_L 及 SWAN(TaiCOMS)略低於 SCHISM-WWM_S，平均週期則為 SCHISM-WWM_S 及 SWAN(TaiCOMS)略低於 SCHISM-WWM_L，以尖峰及平均週期來看，並無明顯何種模擬值表現較佳，平均波向模擬結果(圖 16)亦與觀測值皆相近，誤差值相差亦不大，觀察圖 17 之風速歷線圖，可發現風速模擬值與觀測值相比為偏低，與璨樹颱風期間不同，示性波高模擬值高估之現象於此應非主因。

以軒蘭諾颱風而言，圖 19 之示性波高歷線圖顯示出 SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM 模擬示性波高均高估於與觀測值，颱風影響之波高升高期間(2022/9/1 至 2022/9/5)，SCHISM-WWM_S 與 SCHISM-WWM_L 之間差異不大且皆低於 SWAN(TaiCOMS)之模擬值，由表 9 可知示性波高之平均絕對誤差、均方根誤差以 SCHISM-WWM 低於 SWAN(TaiCOMS)，其中 SCHISM-WWM_S 為最低，圖 20 顯示出尖峰週期之 3 種模擬結果差異不大，其中 SCHISM-WWM_S 於

2022/9/1 前，與其他模擬值相比似有相位差，其誤差以 SWAN(TaiCOMS)略低於 2 種 SCHISM-WWM 之模擬值(如表 9)，以平均週期而言(圖 21)，SCHISM-WWM_S 與 SCHISM-WWM_L 之模擬值差異很小，兩者皆略低於 SWAN(TaiCOMS)之模擬值，且誤差值皆低於 SWAN(TaiCOMS)之誤差值，平均波向模擬結果皆與觀測值相近(如圖 22)，誤差值以 SWAN(TaiCOMS)為最低，觀察圖 23 之風速歷線圖，風速模擬值與觀測值相比亦為偏低，尤其於 2022/9/2 至 2022/9/3，觀測風速平均高於模擬值約 2.8 倍，示性波高模擬值高估之現象於此應非主因。

以梅花颱風而言，圖 25 顯示出 SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM 之模擬示性波高變化趨勢相近，受颱風影響之波高升高期間(2022/9/10 至 2022/9/14)略有差異，與觀測值相比大致皆呈現偏高，其中 SWAN(TaiCOMS)較為偏高，由表 10 之誤差分析可知，SCHISM-WWM_S 最低，其次 SCHISM-WWM_L，SWAN(TaiCOMS)則誤差較大，圖 26 及圖 27 可看出，尖峰週期與平均週期於 3 種模擬結果之間差異不大，但在尖峰週期亦有出現 SCHISM-WWM 與 SWAN(TaiCOMS)模式之模擬值，似有相位差情況，平均週期則三者皆相當接近，從表 10 之誤差分析可知，尖峰週期之誤差以 SWAN(TaiCOMS)為最低，平均週期反而是 SWAN(TaiCOMS)為最高，SCHISM-WWM_S 與 SCHISM-WWM_L 之誤差幾乎相近，由圖 28 可看出，SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM 模擬之平均波向趨勢皆相近，誤差值以 SCHISM-WWM_L 之模擬值略大於 SWAN(TaiCOMS)及 SCHISM-WWM_S 之模擬值，由圖 29 之風速歷線圖之 2022/9/8 至 2022/9/11 及 2022/9/12 至 2022/9/13 期間，風速模擬值與觀測值相比亦為偏低。

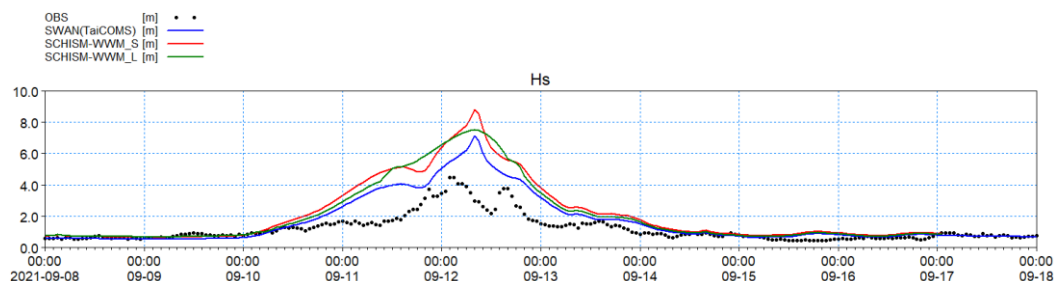


圖 7 璨樹颱風期間花蓮港示性波高歷線圖

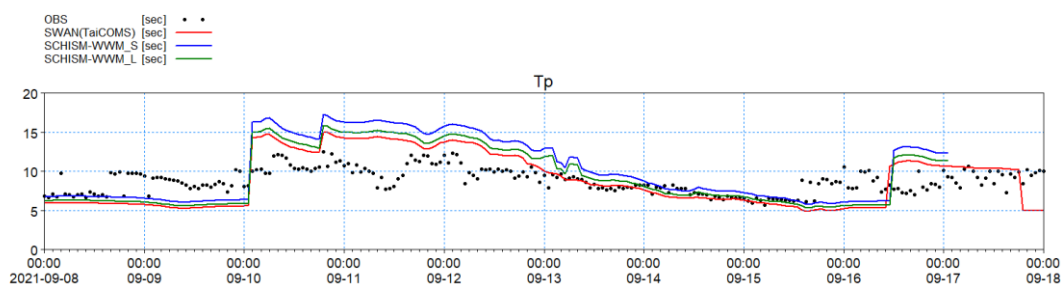


圖 8 璨樹颱風期間花蓮港尖峰週期歷線圖

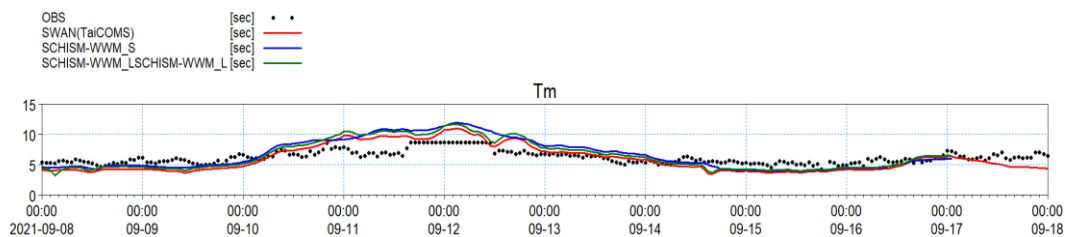


圖 9 璨樹颱風期間花蓮港平均週期歷線圖

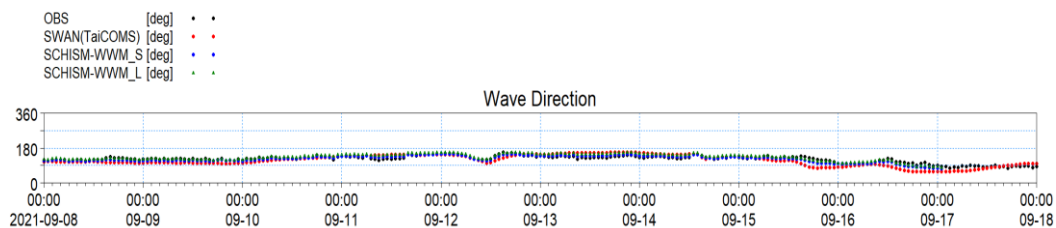


圖 10 璨樹颱風不同範圍網格花蓮港平均波向歷線圖

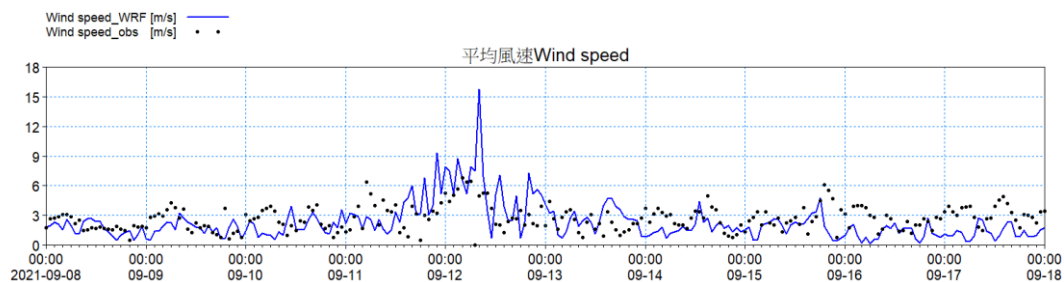


圖 11 璨樹颱風花蓮港平均風速歷線圖

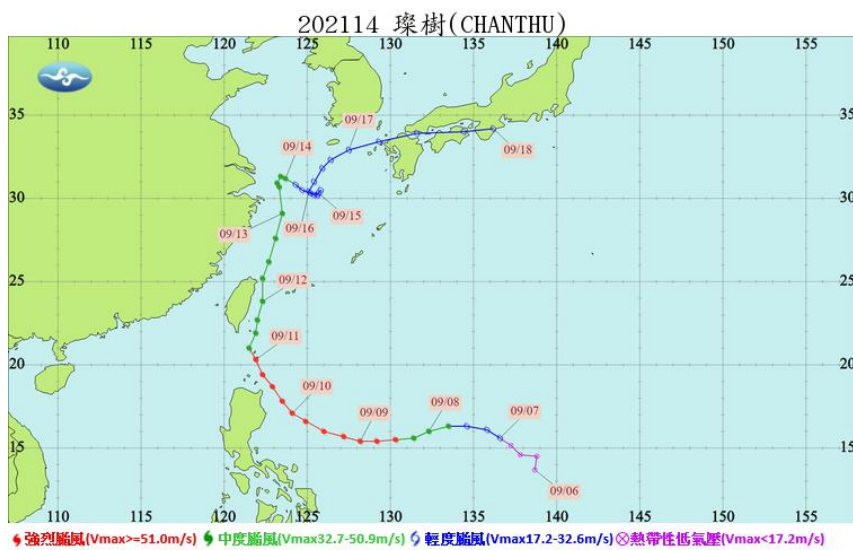


圖 12 璨樹颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象署網站)

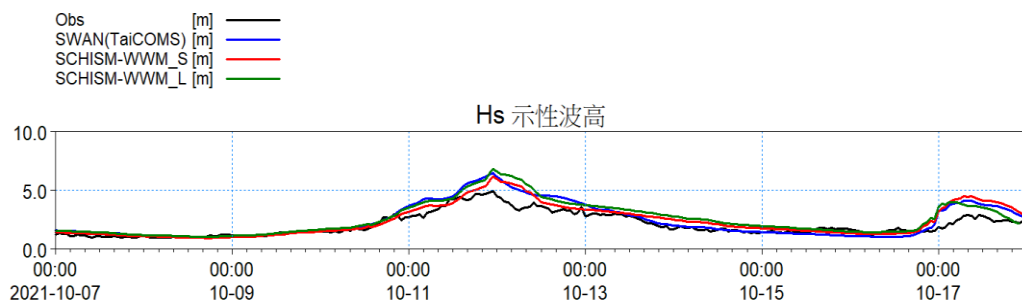


圖 13 圓規颱風不同範圍網格花蓮港示性波高歷線圖

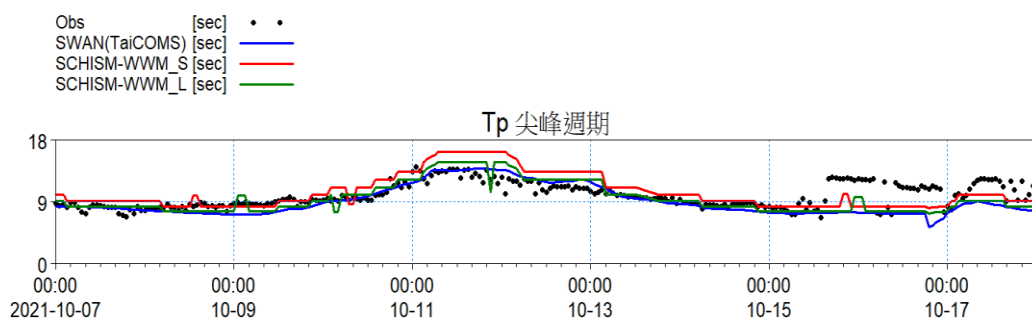


圖 14 圓規颱風不同範圍網格花蓮港尖峰週期歷線圖

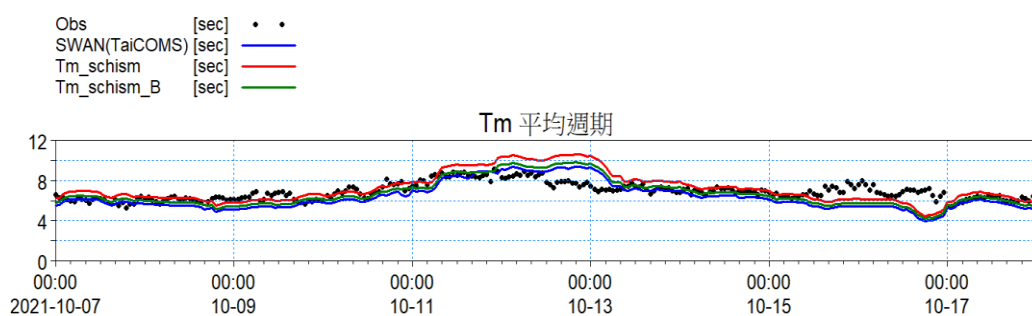


圖 15 圓規颱風不同範圍網格花蓮港平均週期歷線圖

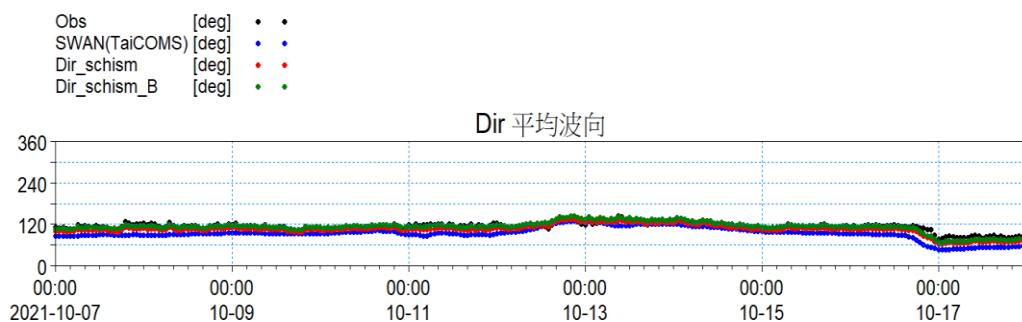


圖 16 圓規颱風不同範圍網格花蓮港平均波向歷線圖

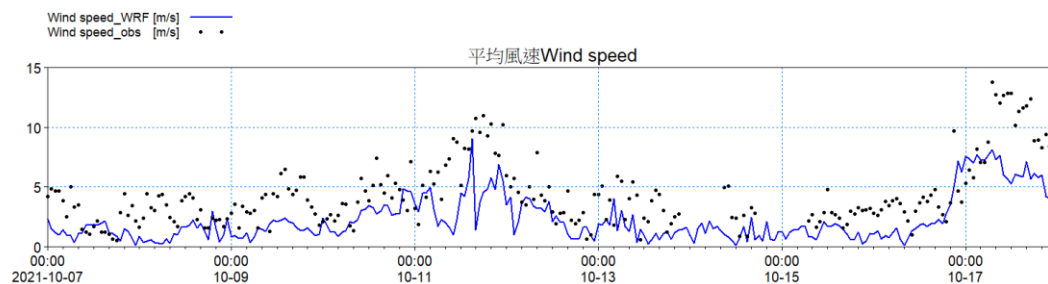


圖 17 圓規颱風花蓮港平均風速歷線圖



圖 18 圓規颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象署網站)

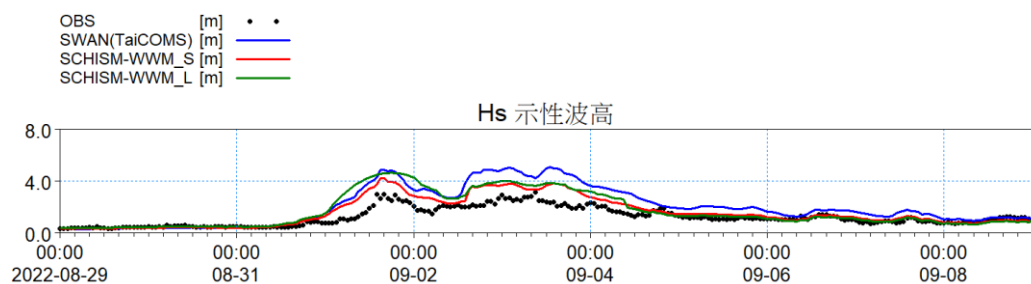


圖 19 軒蘭諾颱風不同範圍網格花蓮港示性波高歷線圖

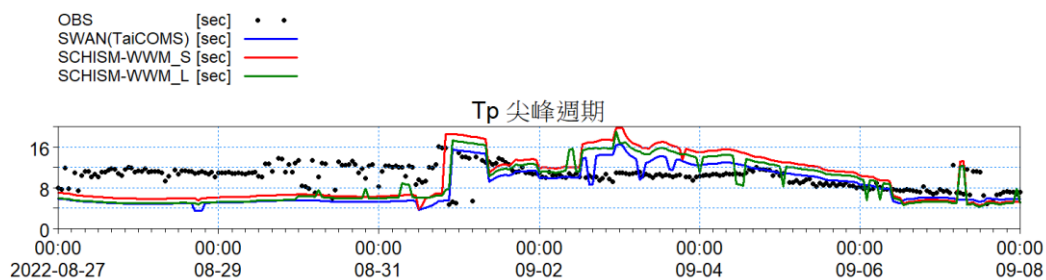


圖 20 軒蘭諾颱風不同範圍網格花蓮港尖峰週期歷線圖

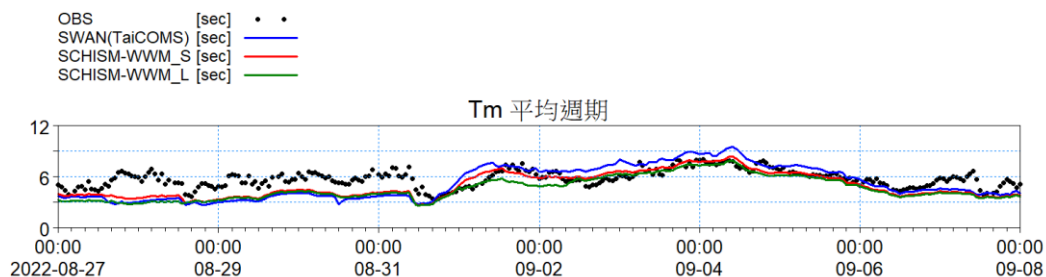


圖 21 軒蘭諾颱風不同範圍網格花蓮港平均週期歷線圖

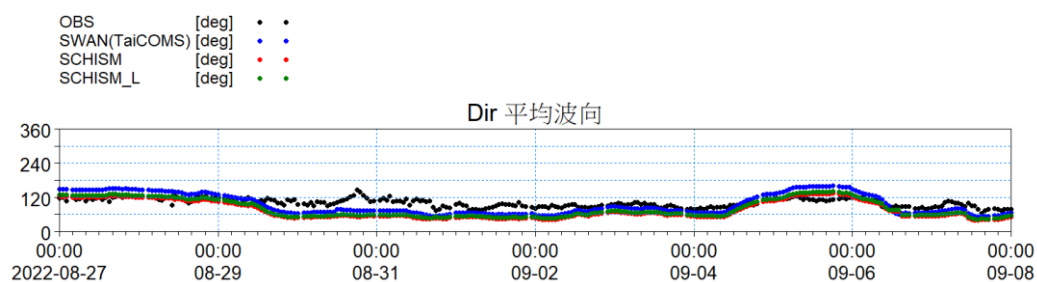


圖 22 軒蘭諾颱風不同範圍網格花蓮港平均波向歷線圖

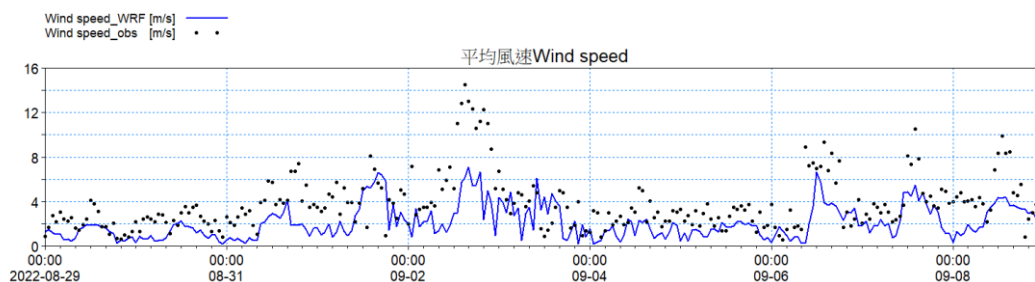


圖 23 軒蘭諾颱風平均風速歷線圖

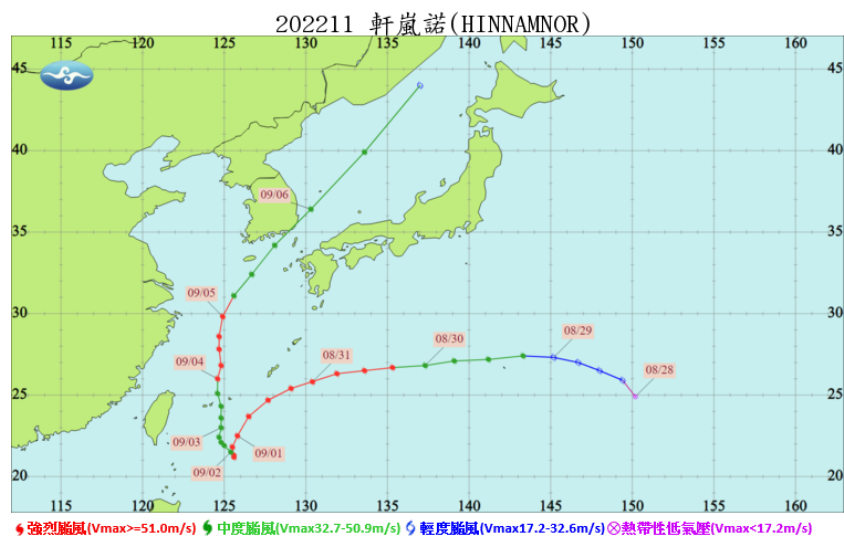


圖 24 軒蘭諾颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象署網站)

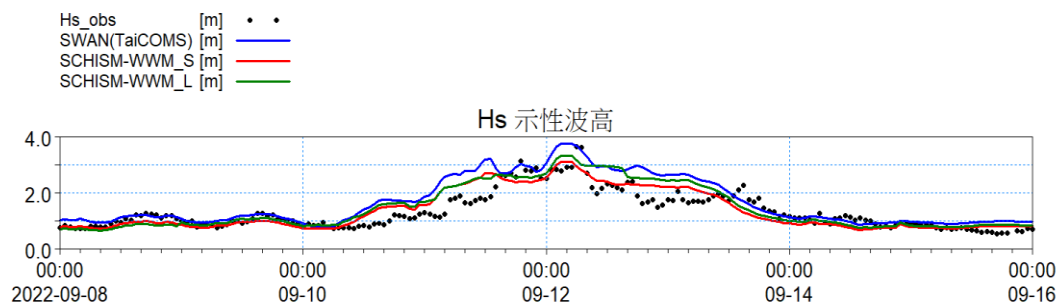


圖 25 梅花颱風不同範圍網格花蓮港示性波高歷線圖

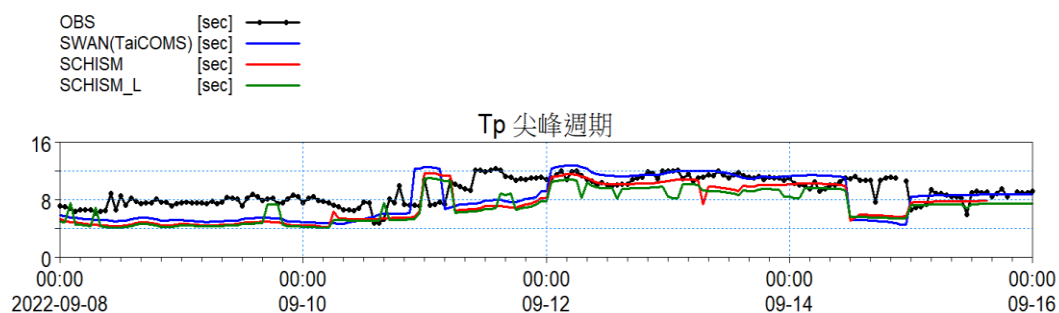


圖 26 梅花颱風不同範圍網格花蓮港尖峰週期歷線圖

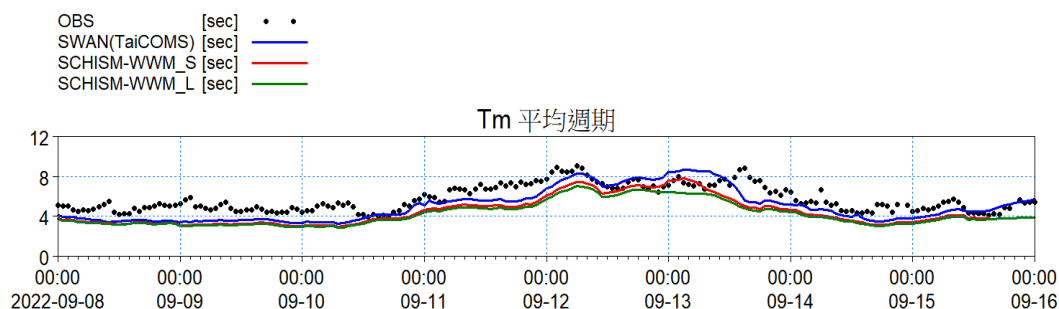


圖 27 梅花颱風不同範圍網格花蓮港平均週期歷線圖

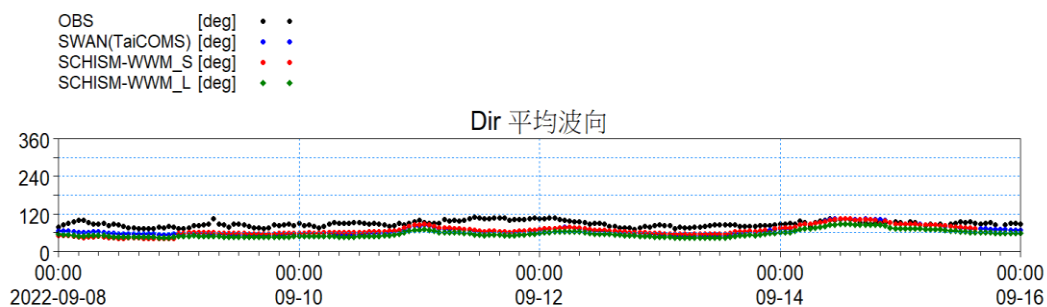


圖 28 梅花颱風不同範圍網格花蓮港平均波向歷線圖

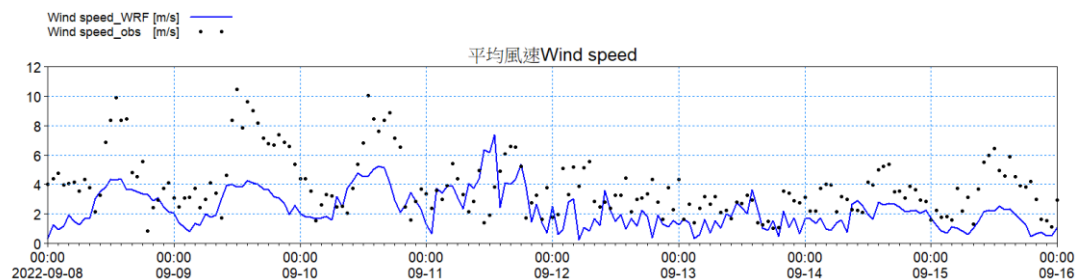


圖 29 梅花颱風花蓮港平均風速歷線圖

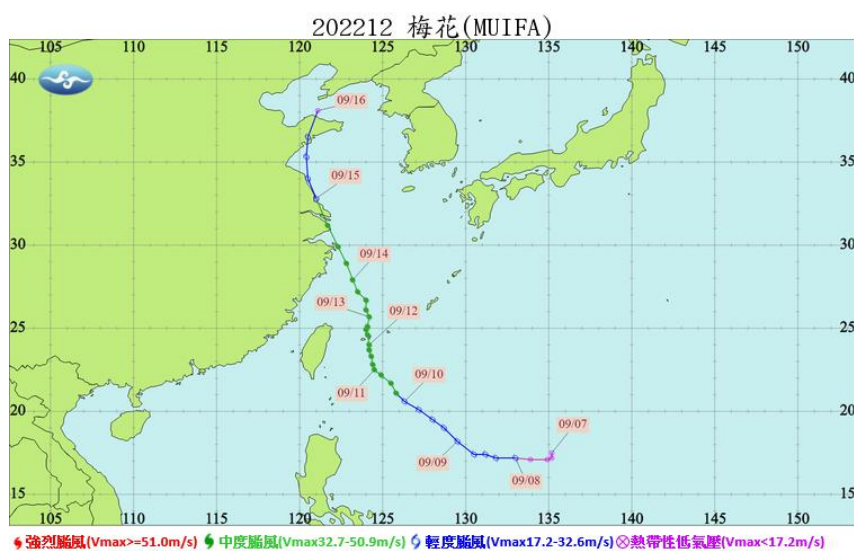


圖 30 梅花颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象署網站)

表 7 璨樹颱風不同範圍網格模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(m)	0.617	0.968	0.892
均方根誤差(m)	1.012	1.558	1.485
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	2.211	2.857	2.446
均方根誤差(sec)	2.707	3.534	2.98
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	1.187	1.457	1.284
均方根誤差(sec)	1.382	1.861	1.556
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(°)	15.56	6.107	8.365
均方根誤差(°)	17.188	10.683	13.25

表 8 圓規颱風不同範圍網格模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(m)	0.473	0.438	0.559
均方根誤差(m)	0.671	0.656	0.785
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	1.289	1.519	1.246
均方根誤差(sec)	1.893	1.928	1.744
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	0.832	0.816	2.628
均方根誤差(sec)	1.083	1.143	3.1
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(°)	19.759	18.124	15.446
均方根誤差(°)	22.000	19.414	15.821

表 9 軒蘭諾颱風不同範圍網格模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(m)	0.742	0.375	0.5008
均方根誤差(m)	1.082	0.588	0.8442
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	3.53	4.137	3.9720
均方根誤差(sec)	4.43	4.724	4.5934
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	2.86	1.072	1.2466
均方根誤差(sec)	4.01	1.31	1.5269
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(°)	24.425	29.684	26.494
均方根誤差(°)	27.404	36.242	31.564

表 10 梅花颱風不同範圍網格模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(m)	0.37	0.264	0.303
均方根誤差(m)	0.515	0.349	0.400
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	2.01	2.488	2.452
均方根誤差(sec)	2.581	3.216	2.878
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(sec)	2.493	1.502	1.557
均方根誤差(sec)	3.262	1.808	1.700
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_L
平均絕對誤差(°)	22.92	25.433	32.452
均方根誤差(°)	26.075	31.438	34.330

3.2 耦合與否模擬結果比較

經測試不同範圍網格模擬結果差異後，選擇較小範圍之地形網格為案例，進行 SCHISM-WWM 是否採用波流耦合為差異，比較模擬結果，無耦合模擬方式為 WWM 模擬過程中關閉即時耦合功能，改以 SCHISM 水動力模式產出之水位資料提供 WWM 模式，此 4 場颱風事件之模擬示性波高、尖峰週期，平均週期、平均波向與觀測值之比較結果如圖 31 至圖 50，其中黑線為觀測值，藍線為 SWAN(TaiCOMS)之模擬值、紅線為耦合模擬結果、橘線(以「_nc 標註」)為未開啟耦合之模擬結果，模擬值與觀測值之誤差分析比較，如表 11 至表 14 所示。

有無開啟耦合功能之示性波高模擬結果，差異均極小，僅有一小段時間有極小差異(如圖 31、圖 36、圖 41、及圖 46)，於尖峰週期，平均週期、及平均波向，亦呈現有無開啟耦合對應之模擬結果差異極小之相同情形(如圖 32~圖 34、圖 37~圖 39、圖 42~圖 44、圖 47~圖 49)，因此，表 11 至表 14 中，有無耦合之平均絕對誤差、均方根誤差之間差異，可視為數值誤差，由圖 35、圖 40、圖 45、及圖 50 之各颱風期間流速歷線圖可看出，流速模擬值均明顯低於觀測值，可推測於花蓮港區海域，流速對波浪模擬造成影響極小。

本研究以不同範圍之地形網格模擬，可呈現花蓮港區近岸受颱風影響之波浪變化過程，但經示性波高、尖峰週期及平均週期之誤差分析比較後，於示性波高方面，SWAN(TaiCOMS)在璨樹颱風期間誤差值最低，SCHISM-WWM_S 在梅花颱風期間誤差最低，無耦合之 SCHISM-WWM_S_nc 在圓規及軒蘭諾颱風誤差值最低，於尖峰週期方面，SWAN(TaiCOMS)在璨樹、圓

規、軒蘭諾、梅花等 4 場颱風期間之誤差值皆最低，平均週期之誤差比較與尖峰週期不同，SWAN(TaiCOMS)在璨樹颱風期間模擬誤差最低，無耦合之 SCHISM-WWM_S_nc 在圓規、軒蘭諾及梅花颱風誤差值最低，綜觀以上，以無耦合之 SCHISM-WWM_S_nc 及本所現行 SWAN(TaiCOMS)有相對較佳之模擬結果，SCHISM-WWM_L 模擬結果未如其他兩者的原因可能為，數值地形、網格、邊界條件或是模擬設定(如時間步長等)，等需再進一步調整。

當進行以有無開啟 SCHISM-WWM 耦合功能模擬之測試，於選定 4 場颱風事件均得出差異不大的模擬結果，此結果與蕭等人(2020)文獻之部分結論相似，該文獻指出在潮差較大的區域，潮位對波浪模擬的影響較為顯著，該文獻根據交通部中央氣象署潮汐觀測資料統計，臺灣東部海域平均潮差為 1.0m。

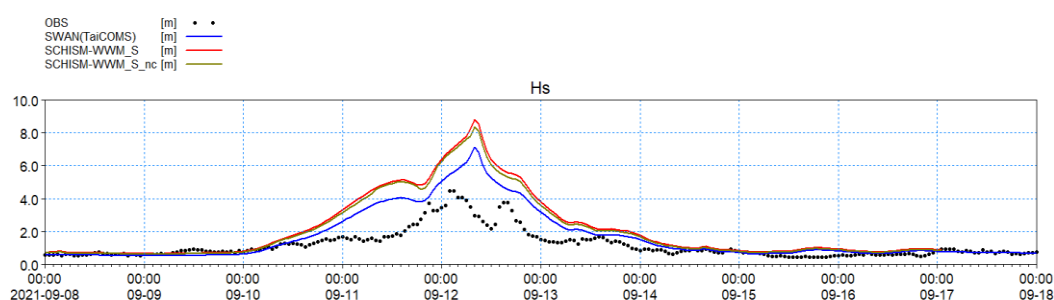


圖 31 璨樹颱風有無耦合花蓮港示性波高歷線圖

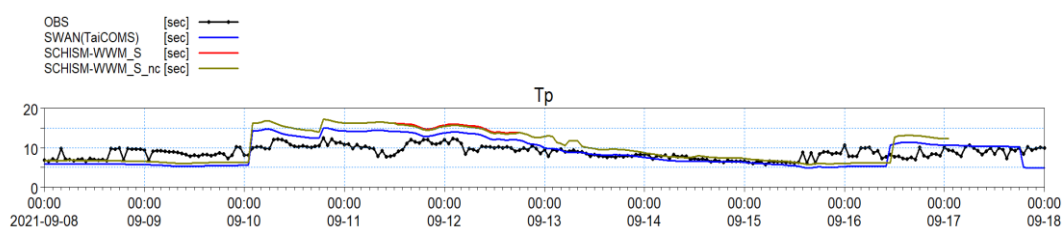


圖 32 璨樹颱風有無耦合花蓮港尖峰週期歷線圖

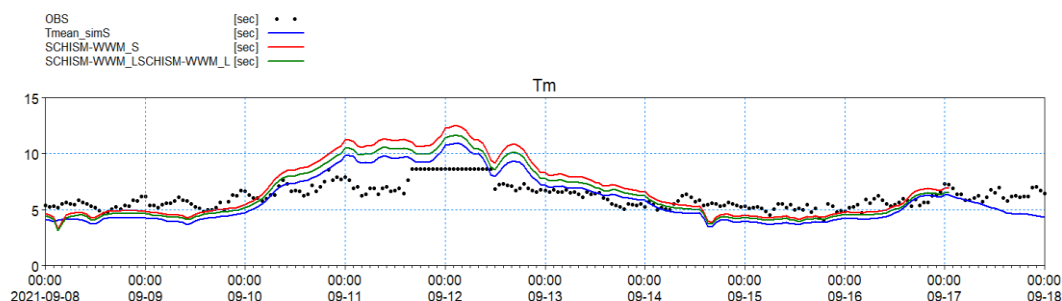


圖 33 璨樹颱風有無耦合花蓮港平均週期歷線圖

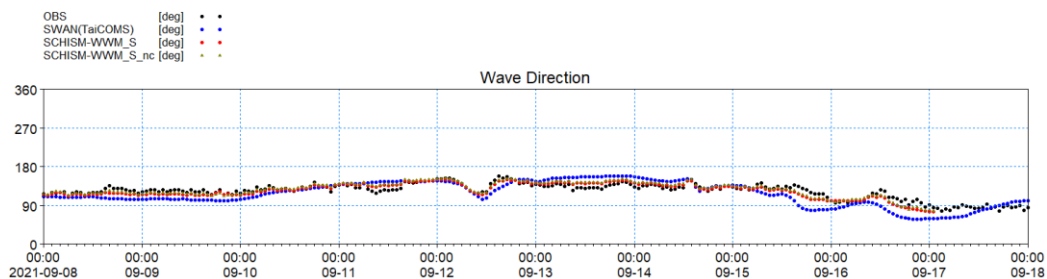


圖 34 璨樹颱風有無耦合花蓮港平均波向歷線圖

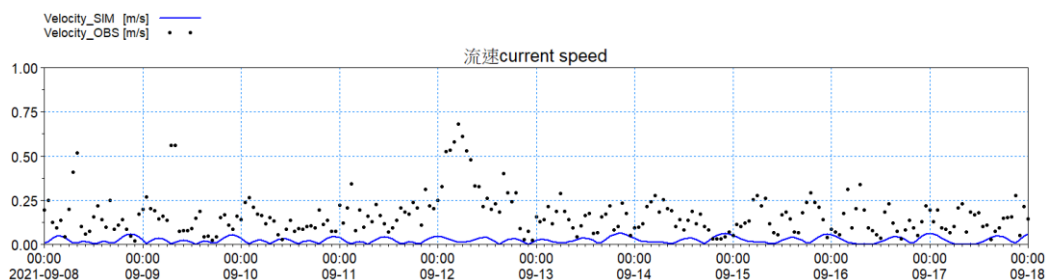


圖 35 璨樹颱風花蓮港平均流速歷線圖

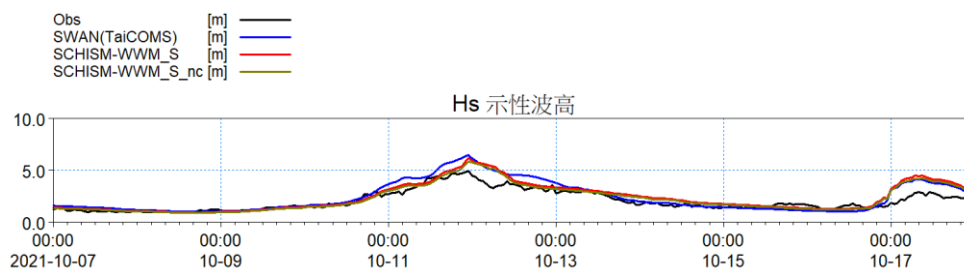


圖 36 圓規颱風有無耦合花蓮港示性波高歷線圖

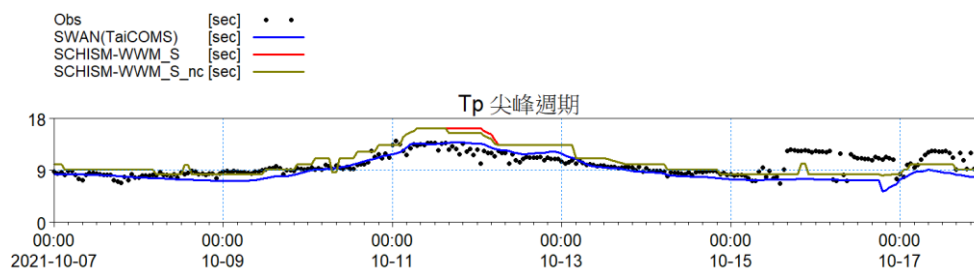


圖 37 圓規颱風有無耦合花蓮港尖峰週期歷線圖

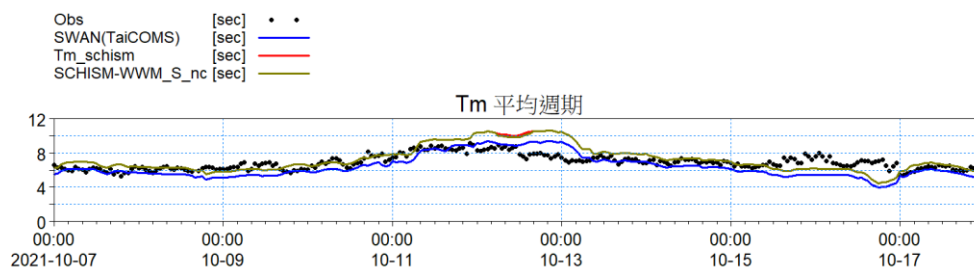


圖 38 圓規颱風有無耦合花蓮港平均週期歷線圖

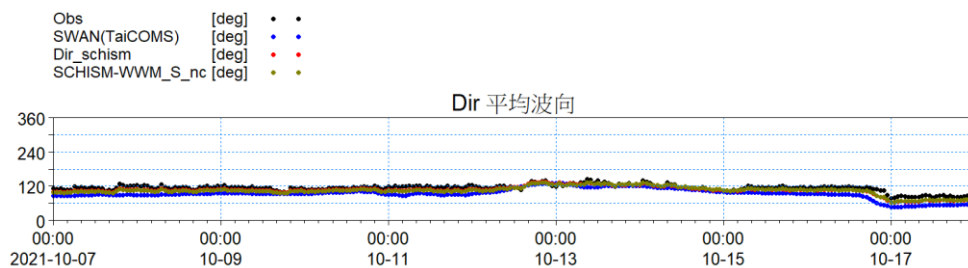


圖 39 圓規颱風有無耦合花蓮港平均波向歷線圖

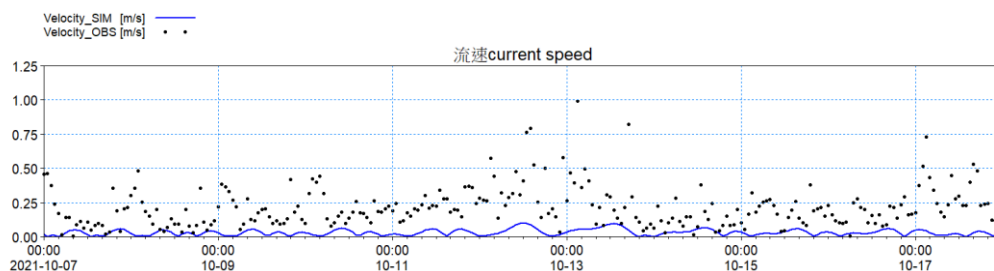


圖 40 圓規颱風花蓮港平均流速歷線圖

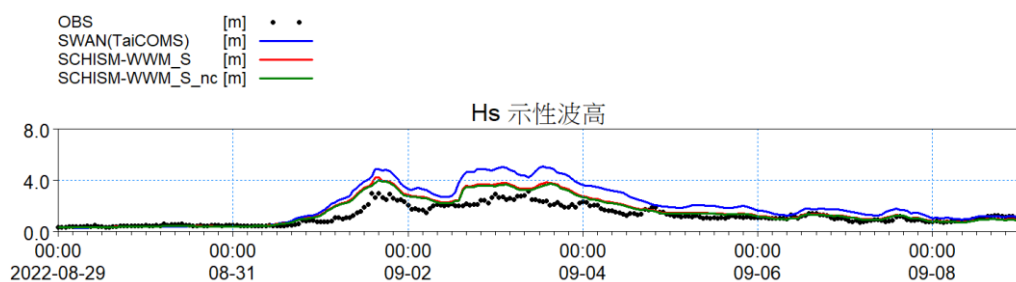


圖 41 軒蘭諾颱風有無耦合花蓮港示性波高歷線圖

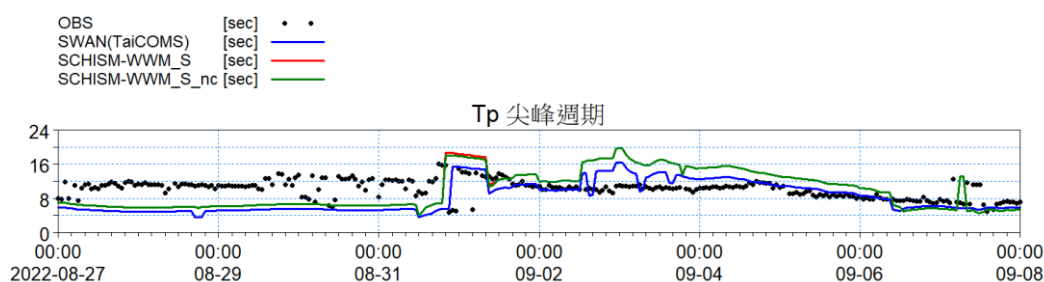


圖 42 軒蘭諾颱風有無耦合花蓮港尖峰週期歷線圖

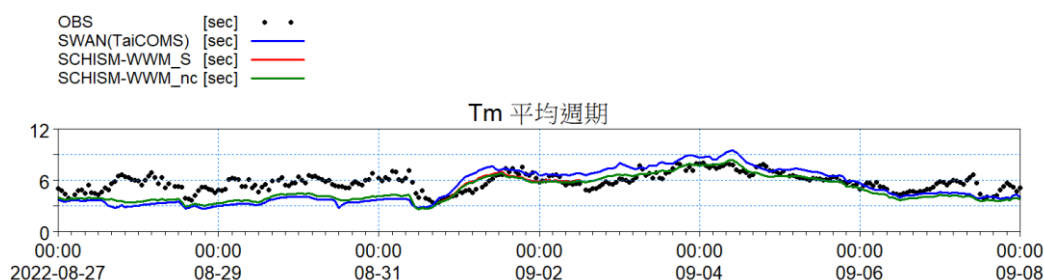


圖 43 軒蘭諾颱風有無耦合花蓮港平均週期歷線圖

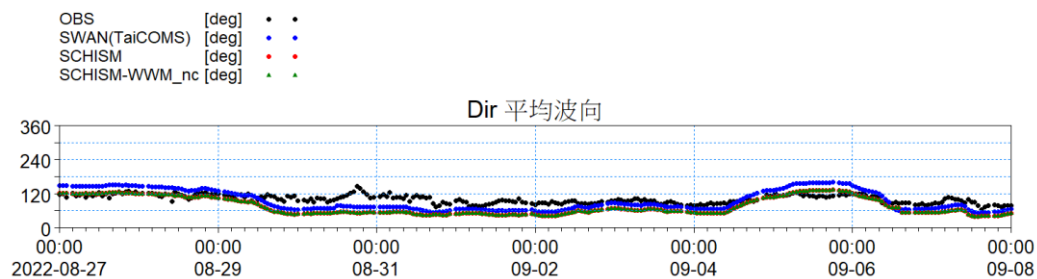


圖 44 軒蘭諾颱風有無耦合花蓮港平均波向歷線圖

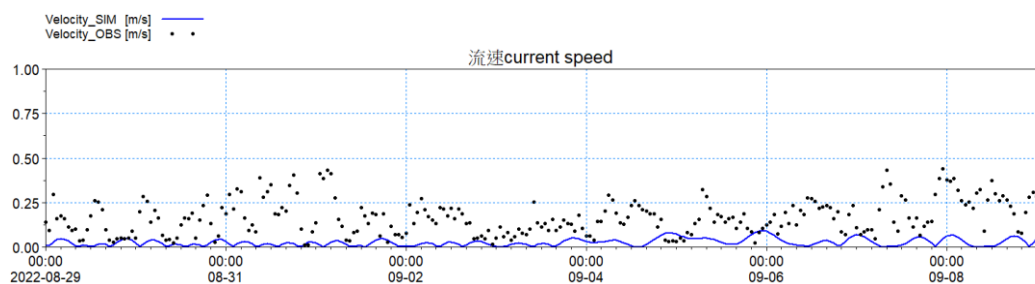


圖 45 軒蘭諾颱風平均流速歷線圖

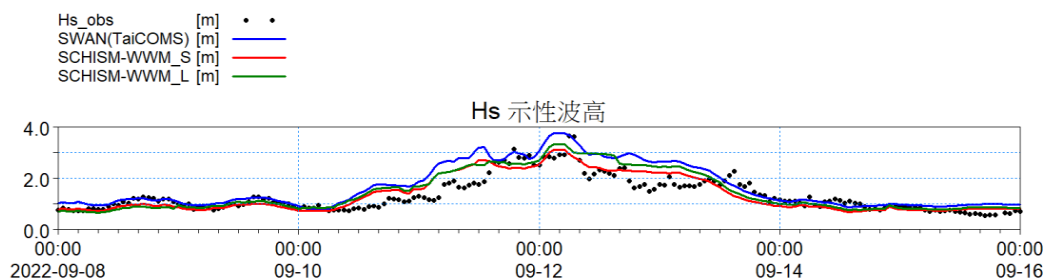


圖 46 梅花颱風有無耦合花蓮港示性波高歷線圖

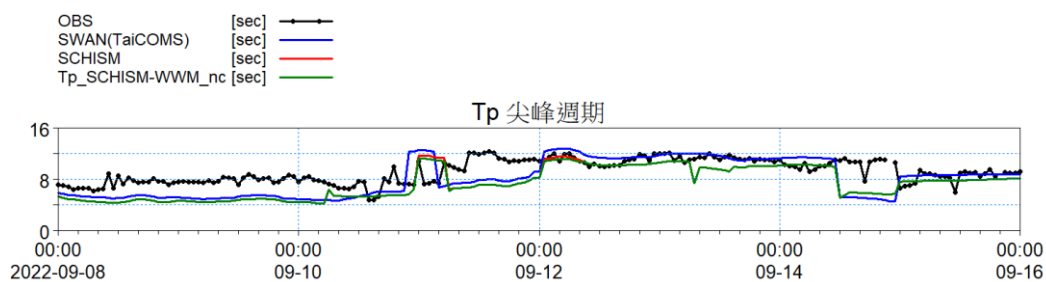


圖 47 梅花颱風有無耦合花蓮港尖峰週期歷線圖

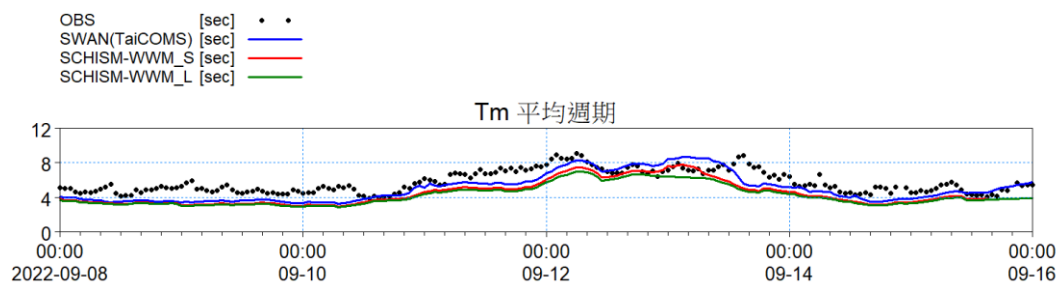


圖 48 梅花颱風有無耦合花蓮港平均週期歷線圖

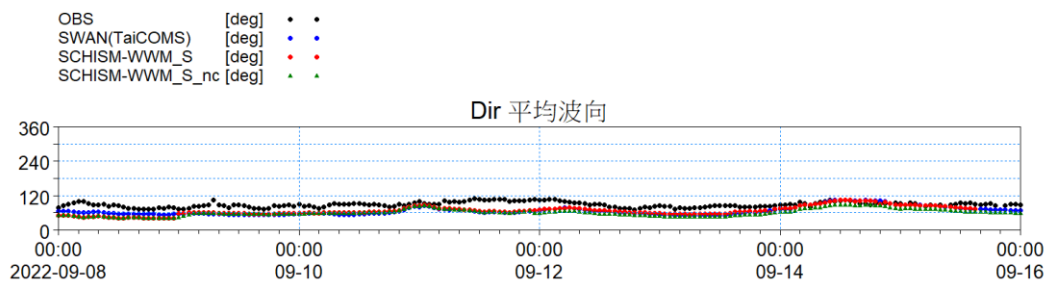


圖 49 梅花颱風有無耦合花蓮港平均波向歷線圖

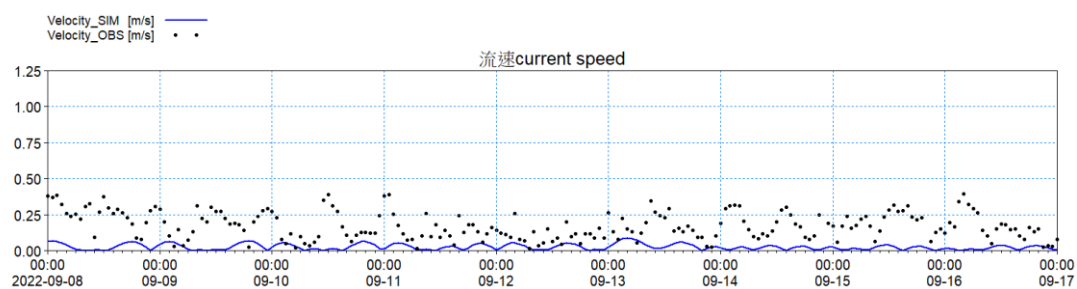


圖 50 梅花颱風花蓮港平均流速歷線圖

表 11 璨樹颱風有無耦合模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(m)	0.617	0.968	0.885
均方根誤差(m)	1.012	1.558	1.446
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	2.211	2.857	2.817
均方根誤差(sec)	2.707	3.534	3.483
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	1.187	1.457	1.439
均方根誤差(sec)	1.382	1.861	1.883
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(°)	15.56	6.107	6.113
均方根誤差(°)	17.188	10.683	11.465

表 12 圓規颱風有無耦合模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(m)	0.473	0.438	0.386
均方根誤差(m)	0.672	0.656	0.594
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	1.289	1.519	1.477
均方根誤差(sec)	1.893	1.928	1.854
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	0.832	0.816	0.809
均方根誤差(sec)	1.082	1.143	1.08
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(°)	19.750	18.124	18.955
均方根誤差(°)	22.007	19.414	20.21

表 13 軒蘭諾颱風有無耦合模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(m)	0.742	0.375	0.340
均方根誤差(m)	1.082	0.588	0.536
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	3.53	4.137	4.116
均方根誤差(sec)	4.43	4.724	4.691
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	2.86	1.072	1.062
均方根誤差(sec)	4.01	1.31	1.311
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(°)	24.425	29.684	28.539
均方根誤差(°)	27.404	36.242	34.211

表 14 梅花颱風有無耦合模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(m)	0.37	0.264	0.267
均方根誤差(m)	0.515	0.349	0.348
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	2.01	2.488	2.192
均方根誤差(sec)	2.581	3.216	2.710
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(sec)	2.493	1.502	1.346
均方根誤差(sec)	3.262	1.808	1.535
Dir 平均波向	TaiCOMS	SCHISM-WWM_S	SCHISM-WWM_S_nc
平均絕對誤差(°)	22.92	25.433	28.533
均方根誤差(°)	26.075	31.438	30.596

四、結論

本研究以花蓮海域為研究範圍，應用 SCHISM-WWM 跨尺度波流耦合數值模式，建立不同計算範圍之數值地形網格，並針對 2021 年至 2022 年間共 4 場颱風事件，進行港區風浪模擬分析，比較不同網格範圍及有無啟用波流耦合條件下之模擬成果，並與運研所 TaiCOMS 作業化系統所採用之 SWAN 模式模擬結果進行比較，結果顯示，SCHISM-WWM 模式於花蓮港區之示性波高、尖峰週期及平均週期等模擬結果，整體變化趨勢與觀測資料大致相符，在不同網格涵蓋範圍條件下，2 種 SCHISM-WWM 模擬結果於波浪歷線趨勢上表現相近，但在不同颱風案例中，SCHISM-WWM 模式或是現行 TaiCOMS 中之 SWAN 模式，並無明顯優劣之分，且在示性波高、尖峰週期及平均週期等模擬結果，亦無法明顯歸納出由特定模式有較佳之模擬表現，測試之模擬誤差改善幅度有限，顯示模式設定、地形網格或是邊界條件等仍需精進調整。比較有無啟用波流耦合之模擬結果發現，花蓮港區於颱風期間之波浪模擬，啟用波流耦合後，對示性波高及週期之差異幅度不明顯，顯示在本研究案例中，潮流對港區波浪模擬結果之影響屬次要因素。

考量 SCHISM-WWM 模式於港區波浪模擬之可行性與運算需求，建議先以特定港區為目標，逐步導入作業化流程，並與既有的 SWAN 模式並行比對，降低系統轉換的風險，為進一步提升模擬精度並兼顧運算效率，後續可針對 WWM 模式中與波浪成長及消散相關的源函數(例如白帽消散、底床摩擦與碎波參數等)進行敏感度測試，同時依據各港區之特性來調整網格解析度的配

置。此外，為強化模式的穩定與準確度，建議納入更多歷史颱風事件及東北季風期間與觀測資料校驗，以評估該模式在各種不同海象條件下的適用性，提升研究成果於港區經營及防災管理之應用價值。

參考文獻

1. 交通部中央氣象署網站，<https://www.cwb.gov.tw>。
2. 邱啟敏、黃清哲、范揚洺、莊士賢、簡仲璟、李俊穎(2016)，港區海域油污擴散數值模式評估，港灣季刊第 103 期，交通部運輸研究所。
3. 邱啟敏、黃清哲、范揚洺、張應龍(2019)，應用 SCHISM 探討台南海域三維海流之演變，第 41 屆海洋工程研討會論文集。
4. 王紱民、邱啟敏、梁立翰、董東璟(2020)，應用 SCHISM 模式模擬裂流時空分布，第 42 屆海洋工程研討會論文集。
5. 李兆芳、江朕榮、傅怡鈞、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。
6. 吳昀達、陳鈞彥、林雅雯、蕭士俊、吳漢倫、陳彥龍(2024)，應用影像智慧化技術判釋海岸公路及防波堤越波研究(2/4)-夜間越波判釋，交通部運輸研究所。
7. Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
8. Hasselmann, K., 1974: On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping, Bound.-layer Meteor., 6, 1-2, 107-127.
9. Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen, 1978: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 569-587.
10. Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann, 1984. "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum," J. Phys. Oceanogr., 14, 1271-1285.
11. Battjes, J.A. and M.J.F. Stive, 1985: Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, J. Geophys. Res., 90, No. C5, 9159-9167.
12. Hsu, T.-W., S.-H. Ou and J.-M. Liao, 2005: Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN, Coastal Engineering, 52, 177-195.
13. Roland, A., Zhang, Y. J., Wang, H. V., Meng, Y., Teng, Y. C., Maderich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, and Zanke, U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. Journal of Geophysical Research: Oceans, 117(C11).
14. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S., 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102, 64-81.
15. SCHISM development teams, SCHISM v5.3.1 Manual(2018).
16. Shih-Chun Hsiao, Hongey Chen, Wei-Bo Chen, Chih-Hsin Chang, Lee-Yaw Lin, Quantifying the

- contribution of nonlinear interactions to storm tide simulations during a super typhoon event, *Ocean Engineering*, Volume 194, 2019, 106661, ISSN 0029-8018.
- 17.Hsiao, S.-C., Wu, H.-L., Chen, W.-B., Chang, C.-H., & Lin, L.-Y. (2020). On the Sensitivity of Typhoon Wave Simulations to Tidal Elevation and Current. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 731.
- 18.SWAN User Manual, SWAN Cycle III version 41.31AB(2021).
- 19.SWAN Scientific and Technical Documentation, SWAN Cycle III version 41.41(2022).
- 20.Fu, G.; Li, J.; Yuan, K.; Song, Y.; Fu, M.; Wang, H.; Wan, X. Wind-Wave-Current Coupled Modeling of the Effect of Artificial Island on the Coastal Environment. *Appl. Sci.* 2023, 13, 7171.
- 21.Tran HQ, Ayala Cruz F, McCarroll J and Babanin A (2024) Non-linear surges and extreme wind-waves in Port Phillip Bay under existing and future mean sea levels. *Front. Mar. Sci.* 11:1480054. doi: 10.3389/fmars.2024.1480054.