

花蓮海域風浪模組模擬成效評估及精進

陳鈞彥¹ 林雅雯² 羅冠顯³ 蔡立宏⁴

¹ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

² 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長

³ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

⁴ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

摘要

本研究應用交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)作業化之臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS (Taiwan Coastal Operational Modeling System)，用交通部中央氣象局(以下簡稱中央氣象局)風壓場預報資訊，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 等波浪模式，針對花蓮海域近海風浪模組之 SWAN 模式調整白帽消散項參數，與 TaiCOMS 現行運作 SWAN 之模擬值及運研所港灣技術研究中心於花蓮港區之波流觀測站之觀測值比對，比較 110 年燦樹颱風、圓規颱風、東北季風期間不同模擬結果之差異。

一、前言

運研所作業化之臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS 應用中央氣象局風壓場預報資訊，進行風浪模式、潮汐模式、海流模式及海嘯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及發展海岸公路波浪溯上模組，每年進行長期性模式校驗及維運，屬於強化商港及近岸之海象模擬模組。本研究針對花蓮海域風浪模組進行模擬計算之成效評估，並探討花蓮海域風浪模組中各項參數於季風、颱風期間等之影響差異，提出可供 TaiCOMS 花蓮海域風浪模組於花蓮港海域模擬之精進建議，以提升模擬結果之正確性，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。

二、風浪模式

目前風浪數值模式主要以波浪能量平衡為模式主要考量，透過風驅動作用、波與波之間交互作用、及消散作用，來推算波浪在時間及空間的變化過程，常用的風浪數值模式有 WAM(WAVE Model)、WAVEWATCH III、SWAN(Simulating WAVes Nearshore)等。

2.1 WAM 模式介紹

WAM (WAVE Model, WAMDI Group, 1988)為一可完整解析波與波間非線性交互作用機制的模式，運研所作業化之 TaiCOMS 使用 WAM 模式作為西太平洋範圍風浪模組之基礎，其控制方程式可以二維波浪能量平衡方程式表示為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{C}_g F) = S \quad (1)$$

(1)式中 $F = F(f, \theta, \vec{x}, t)$ 為能量密度函數(spectral density function)、 f 為波浪頻率、 θ 為波浪傳播方向(角度)、 $\vec{x}$ 為位置、 t 為時間、 $\vec{C}_g$ 為波群速度(group velocity)、 S 為源函數(source function)。當模式用於大範圍計算域時，受地球曲率影響，可表示為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (C_\phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (C_\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta F) = S \quad (2)$$

(2)式中 ϕ 為緯度、 λ 為經度、 C_ϕ 、 C_λ 、 C_θ 分別為球面座標 ϕ 、 λ 、 θ 方向上的波群速度，在 WAM 模式中，源函數 S 可表示為：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bot} \quad (3)$$

(3)式中， S_{in} 、 S_{nl} 、 S_{dis} 、 S_{bot} 分別代表風浪成長項、波浪間非線性交互作用項、能量消散項、及底床摩擦項，在 WAM 模式中風浪成長項採用 Snyder 等人(1981)提出之無因次摩擦速度經驗公式計算，依據 Janssen(1989、1991)之風浪生成之近似線性理論，風浪成長項表示為：

$$S_{in} = \gamma \cdot F \quad (4)$$

$$\gamma = \varepsilon \omega \beta (u_* / c)^2 \cos^2(\bar{\theta} - \theta_w), \quad |\bar{\theta} - \theta_w| < \pi/2 \quad (5)$$

(4)、(5)式中， γ 為波能成長率、 ε 為空氣與水之密度比(1.225×10^{-3})、 ω 為波浪角頻率、 β 為 Miles 常數 Janssen(1991)建議值為 1.2、 u_* 為風作用於海面之摩擦速度、 c 為波速(波浪位相速度)、 $\bar{\theta}$ 為平均波相、 θ_w 為平均風向，Miles 常數 β 可由下式計算：

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \mu \ln^4(\mu), \quad \mu \leq 1.0 \quad (6)$$

$$\mu = \left(\frac{u_*}{\kappa c} \right) \left(\frac{g z_0}{u_*^2} \right) \exp \left[\left(\frac{\kappa c}{u_*} \right) \frac{1}{\cos(\bar{\theta} - \theta_w)} \right], \quad (7)$$

其中 $\kappa=0.41$ 為 von Karman 常數、 g 為重力加速度、 z_0 為海面粗糙長度(roughness length)，其計算式如下：

$$z_0 = \frac{\alpha \tau}{g} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{\sqrt{1 - (\tau_w / \tau)}} \quad (9)$$

α 為與海面狀況有關的 Charnock 參數， τ 為氣流通過海面波浪引起的運動應力(kinematic stress)， τ_w 為重力波引起的波應力，其中運動應力 τ 等於摩擦速度 u_* 平方，與海面上風速對數剖面及粗糙長度之關係為

$$\tau = u_*^2 = \left[\left(\frac{\kappa U(z_{obs})}{\ln(z_{obs}/z_0)} \right) \right]^2 \quad (10)$$

z_{obs} 為在波浪上方之平均高度，波浪引起的波應力為

$$\tau_w = 2\pi\epsilon^{-1}g \int df d\theta \cdot S_{in} \vec{k} \quad (11)$$

能量消散項根據 Hasselmann(1974)提出之準線性形式，假設海面波浪之消散行為屬於平均衰減，因此波浪能量消散項可表示為

$$S_{dis} = \gamma_{dis} \cdot F \quad (12)$$

$$\gamma_{dis} = -C_{ds} \langle \omega \rangle [\langle k \rangle^2 E]^2 \left[\frac{k}{\langle k \rangle} + \left[\frac{k}{\langle k \rangle} \right]^2 \right] \quad (13)$$

其中係數 $C_{ds} = 4.5$ ， $\omega = 2\pi f$ ，符號 $\langle \rangle$ 代表對整個波浪之平均值，其中

$$E = \iint F(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (14)$$

$$\langle \omega \rangle = E \{ \iint F(f, \theta) (2\pi f)^{-1} df \cdot d\theta \}^{-1} \quad (15)$$

$$\langle k \rangle = E \{ \iint F(f, \theta) k^{-1} df \cdot d\theta \}^{-1} \quad (16)$$

底床摩擦項之計算式如下：

$$S_{bot} = -C_{bot} \frac{k \tanh(kd)}{g \sinh^2(kd)} F \quad (17)$$

其中 k 為波數、 d 為水深、 C_{bot} 為底床摩擦係數，WAM 模式中建議採用 Hasselmann 等人 (1973) 研究中於湧浪條件下以 JONSWAP 實驗求得之底床摩擦係數 $C_{bot} = 0.0038 m^2 s^{-3}$ ；非線性交互作用項 S_{nl} 採用 Hasselmann(1963) 之四個波與波浪間交互作用理論，即波譜的急劇成長是由波譜尖峰頻率從風獲得能量後再經由非線性作用使得波譜尖峰頻率的能量分別向高頻及低頻處傳遞，且隨著風速加大導致尖峰頻率向低頻移動的現象，當紛紜波浪中存在有四組波浪滿足下列共振(resonant)條件(17)、(18)式時，則此四組波浪會產生能量之交換。

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \quad (18)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \quad (19)$$

2.2 SWAN 模式

SWAN(Simulating WAVes Nearshore, Booij et al, 1996)模式是由荷蘭 Delft 大學主導發展之近海風浪波浪模式，此模式亦具有第三代風浪模式的特徵，且在能量成長及消散項的參數選擇上比其他模式更具彈性，可計算波浪在時間及空間領域之傳遞、波與波間非線性交互作用、波浪受風之成長、碎波之能量消散、底床摩擦引起的能量損失以及波浪受到海流及地形變化影響

而產生的頻率位移、淺化與折射等物理過程，利用風、海底底床及海流狀況計算在海岸地區、湖泊或河口附近水域波浪參數的波浪數值模式，主要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)，控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_x N}{\partial x} + \frac{\partial C_y N}{\partial y} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (20)$$

$$c_x = \frac{dx}{dt} = C_g \cos \theta + U_x \quad (21)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = C_g \sin \theta + U_y \quad (22)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} (\sin \theta \frac{\partial d}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial d}{\partial y}) + (\sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial y}) \quad (23)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} (\frac{\partial d}{\partial t} + U_x \frac{\partial d}{\partial x} + U_y \frac{\partial d}{\partial y}) - C_g k (-\cos \theta \frac{\partial U_s}{\partial x} + \sin \theta \frac{\partial U_s}{\partial y}) \quad (24)$$

其中 N 為波浪作用力密度波譜， 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， S_{tot} 為波浪成長與消散之源函數、 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。此模式以有限差分法來求解(20)式，於邊界條件假設波浪能量到陸地邊界完全消散，即無波浪能量反射，外海開放邊界條件假設無波浪能量進入計算區域，但允許波浪能量由開放邊界內自由離開計算領域，有關波浪成長與消散之源函數項於第三章說明。

2.3 運研所臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS 系統概述

本研究以臺灣近岸海象預測系統 TaiCOMS 架構中之波浪模擬系統為基礎，TaiCOMS 架構如圖 1，首先由風場處理系統採用中央氣象局之 WRF(Weather Research and Forecast) 成員之 M04 及 M05 風、氣壓場預報資料，於 TaiCOMS 中以 WD01 及 WD02 表示，二者風、氣壓場解析度均為 15km 及 3km 之巢狀網格，M04 為固定範圍之預報資料，M05 於 3km 解析度會依颱風路徑、位置有 4 種浮動範圍之預報資料，其網格資料及範圍圖如圖 2、表 1 及表 2，將 M04、M05 風、氣壓場預報資料，擷取海平面高度 10m 之風場及海平面氣壓場資料提供 TaiCOMS 使用，依資料範圍及網格解析度區分為為西太平洋風場及氣壓(以 WE01 表示)及臺灣海域風場及氣壓(WE02)資料，其範圍與網格資料如圖 3、表 3。

TaiCOMS 之波浪模擬系統包含遠域(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，其中遠域及近域風浪模組分別以 WAM 模式模擬西太平洋、SWAN 模式模擬臺灣周圍海域範圍，近海風浪模組則包含澎湖海域、金門海域、馬祖海域及臺灣本島東南海域、西南海域、花蓮海域及蘇澳海域等 7 個模組，以 SWAN 模式進行模擬(本研究取花蓮海域模組進行模擬評估)，由遠域風浪模組應用處理後之 WE01 風壓場資料執行模擬，產出近域風浪模組所

需之開放邊界條件，再由近域風浪模組應用處理後之 WE02 風壓場資料及遠域風浪模組產出之開放邊界條件進行風浪模擬，產出方向波譜資料作為近海風浪模組之開放邊界條件，再由近海風浪模組模擬各海域之主要商港之海象預測模擬資訊(示性波高、週期、波向等)，近域(中尺度)及近海(小尺度)風浪模組輸出模擬值位置如圖 6(黃點)，各尺度風浪模式模擬範圍與使用之風浪模組資訊如圖 4、圖 5 及表 4。

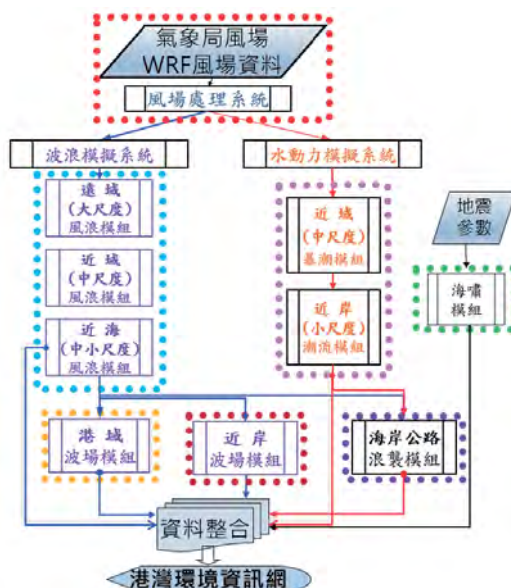


圖 1 TaiCOMS 架構圖

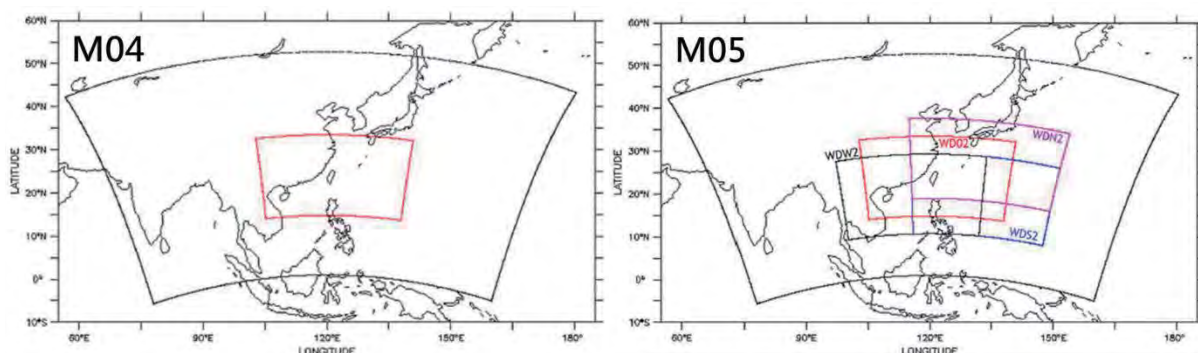


圖 2 中央氣象局 WRF 成員 M04、M05 水平網格模擬範圍圖

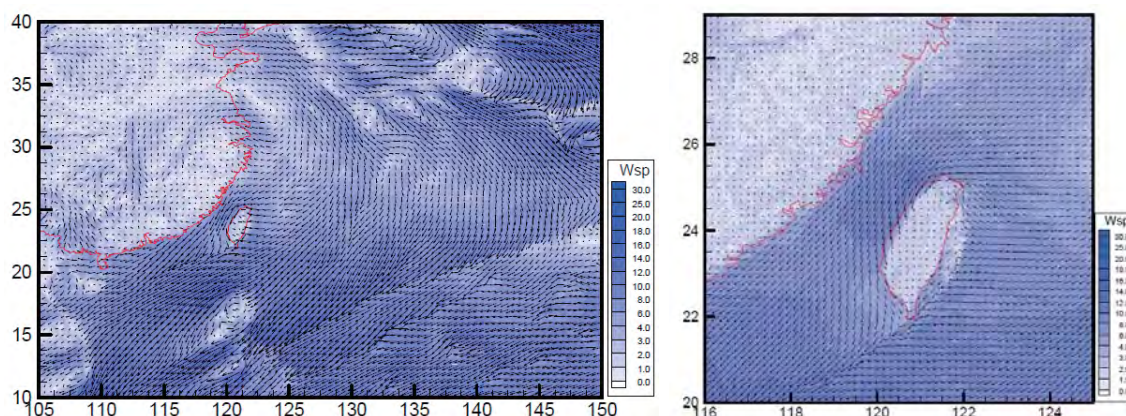


圖 3 TaiCOMS 作業化風壓場 WE01(左)、WE02(右)資料輸出範圍圖

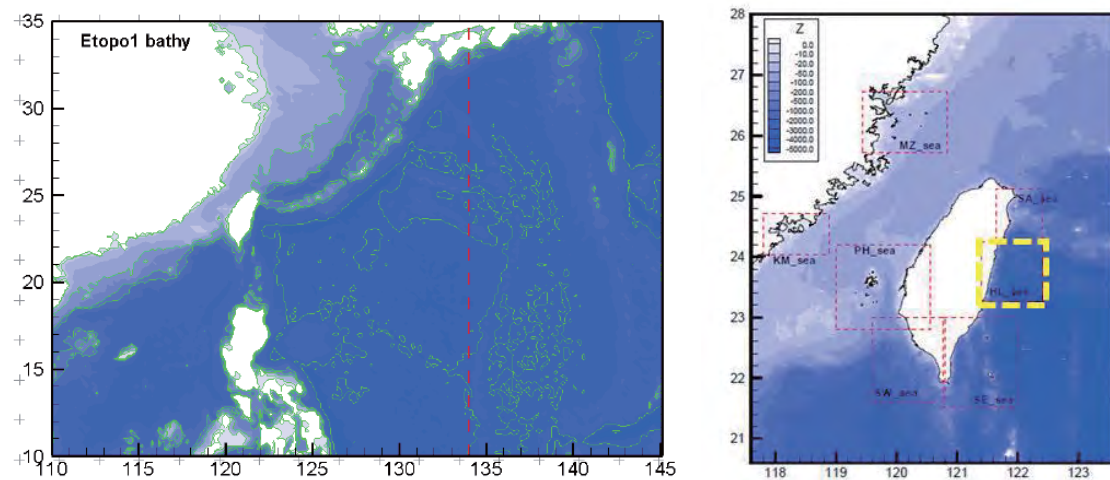


圖 4 遠域風浪模組(左)及近域風浪模組(右)模擬範圍

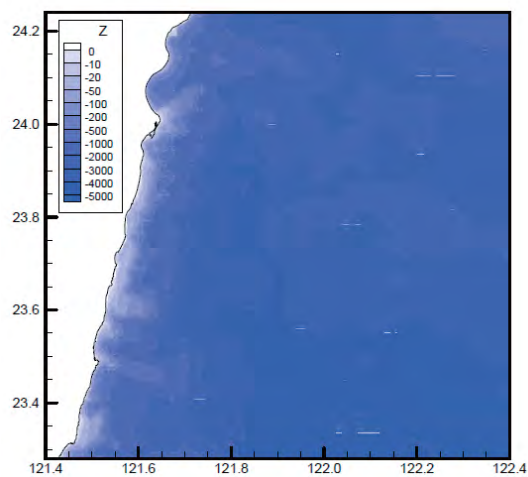


圖 5 近海風浪模組模擬範圍(花蓮海域)

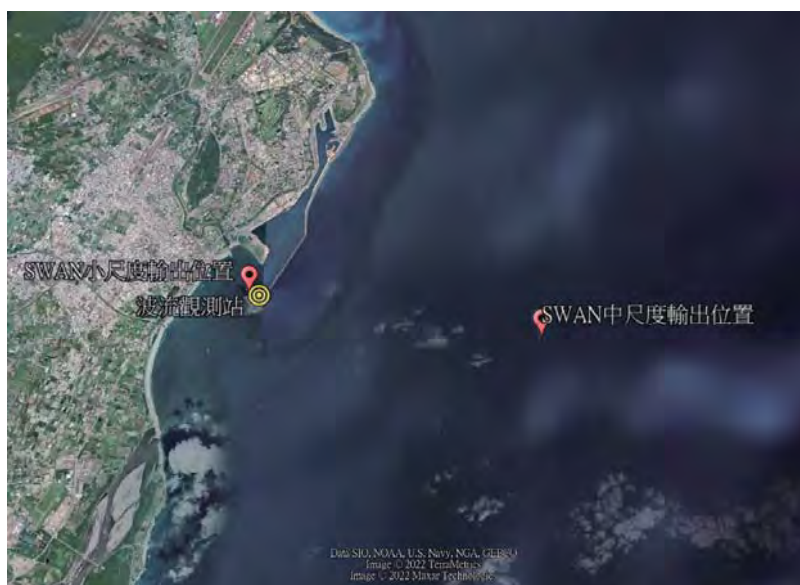


圖 6 近海風浪模組模擬範圍(花蓮海域)

表 1 中央氣象局 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 2 中央氣象局 WRF 成員 M05 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	Lambert conformal mapping	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)
WDW2	Lambert conformal mapping	1,158×673	3km	坐標(522,547)位置位於(25.6859N,113.789E) , 底圖 左下點(9.28319°N, 100.28052°E) 右上點(28.70159°N, 133.88763°E)
WDS2	Lambert conformal mapping	1,158×673	3km	坐標(522,547)位置位於(25.36114N,131.6087E) , 底圖 左下點(10.65799°N, 115.97919°E) 右上點(25.97729°N, 151.71252°E)
WDN2	Lambert conformal mapping	1,158×673	3km	坐標(522,547)位置位於 (33.6782N,132.47064E) , 底圖 左下點 (18.89073°N, 115.71506°E) 右上點(34.07277°N, 154.05664°E)

表 3 TaiCOMS 海象模擬作業化系統之風壓場資料格式

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

表 4 TaiCOMS 海象模擬作業化系統之風壓場資料格式

模組	尺度	模擬範圍	解析度	數值模式	格點數
遠域風浪模組	大	10°N - 35°N 110°E - 145°E	0.2°	WAM	176×126
近域風浪模組	中	20.6°N - 28°N 117.6°E - 123.6°E	0.04°	SWAN	151×186
近海風浪模組 (花蓮海域)	小	23.28°N - 24.24°N 121.4°E - 122.4°E	0.008°	SWAN	126×121

三、風浪模擬及分析

3.1 SWAN 模式參數介紹與模式設定

依據(19)式，SWAN 模式由控制方程式中之波浪成長與消散之源函數項 S_{tot} 驅動，模式各參數設定可於此設定， S_{tot} 包含各物理作用項可表示如下：

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (25)$$

其中 S_{in} 為風浪成長項、 S_{nl3} 、 S_{nl4} 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 S_{in} 有分第 1、2 及 3 代風浪模式，本研究之 TaiCOMS 系統採用第 3 代風浪模式，第 3 代風浪模式之參數設定值與理論依據如表 5 所示，TaiCOMS 系統採用 Komen 等人(1984)之指數成長型理論及使用手冊建議參數值；波與波間非線性交互作用項之三波交互作用項 S_{nl3} 中，各項參數如表 6，其中相稱係數(trfac)，使用手冊建議於 LTA 法採 0.05，SPB 法採 0.9，TaiCOMS 系統採用 0.8 進行模擬，其餘皆採用使用手冊建議值；波與波間非線性交互作用項之四波交互作用項 S_{nl4} 中相關參數如表 7，TaiCOMS 系統皆採用手冊建議值，白帽消散項 $S_{ds,w}$ 之相關參數如表 8，TaiCOMS 系統之 SWAN 模式為 40.85 版，其白帽消散對波數之依賴係數採用 0 進行模擬，底床摩擦項 $S_{ds,b}$ 中相關參數形式如表 9，TaiCOMS 系統採用 JONswap 常數形式，碎波消散項 $S_{ds,br}$ 中相關參數形式如表 10，TaiCOMS 系統採用常數形式。

表 5 SWAN 模式第三代風浪成長項參數

理論形式	參數	參數定義	參數建議值
Janssen(1981)	cds1	白帽消散速率	4.5
	delta	白帽對波數之係數	0.5
Komen(1984)	cds2	白帽消散速率	2.36×10^{-5}
	stpm	波浪尖銳度	3.02×10^{-3}
ST6 Rogers et al. (2012)	a1sds	局部消散係數	根據 Hwang、Fan 等理論有不同建議值
	a2sds	累積消散係數	
	p1sds	局部消散冪次係數	4
	p2sds	累積消散冪次係數	4

表 6 SWAN 深海與淺水的波與波間非線性交互作用項(三波)

作用項	參數	參數定義	參數建議值
TRIad 三波交互作用	trfac	相稱係數	0.05 for LTA method 0.9 for SPB method 本研究 TaiCOMS 採用 0.8
	cutfr	最大頻率/平均頻率之比值	2.5
	urcrit	臨界厄塞爾數(Ursell number)	0.2
	urslim	最低厄塞爾數(Ursell number)	0.01

表 7 SWAN 深海與淺水的波與波間非線性交互作用項(四波)

作用項	參數	參數定義	參數建議值
QUADrupl 四波交互作用	iquad	數值計算指令	依不同計算法有不同建議值，預設值為 2 (fully explicit computation of the nonlinear transfer)
	lambda	四波配置係數	2.5
	Cnl4	四波相稱係數	3×10^7
	Csh1	淺水縮放係數	5.5
	Csh2	淺水縮放係數	0.8333
	Csh3	淺水縮放係數	-1.25

表 8 SWAN 模式白帽消散項參數

理論形式	參數	參數定義	參數建議值	備註
Komen(1984)	cds2(Cds)	白帽消散速率	2.36×10^{-5}	
	Stpm	波浪尖銳度	3.02×10^{-3}	
	powst(p)	波浪尖銳度之幕次	2	
	delta(δ)	白帽消散對波數之依賴係數	TaiCOMS 採用 0	SWAN 40.85 版使用手冊建議為 0，40.91 版後建議值改為 1

表 9 SWAN 模式底床摩擦項參數

理論形式	參數	參數定義	參數建議值
JONswap Constant(1973)	cfjon	JONSWAP 公式之係數	0.038
COLLins(1972)	cfw	Collins 底床摩擦係數	0.015
MADsen(1988)	Kn	底床粗糙長度	0.05(m)
RIPples(Smith et al. 2011)	S	懸浮載比重	2.65
	D	懸浮載粒徑	0.0001(m)

表 10 SWAN 模式碎波消散項參數

理論形式	參數	參數定義	參數建議值
CONSTANT	alpha	消散速率之比率係數	1
	gamma	碎波指標，最大波高與水深比值	0.73
BKD(考慮底床坡度，無因次化水深)	alpha	消散速率之比率係數	1
	gamma0	底床坡度對應參數	0.54
	a1	第一碎波指標	7.59
	a2	第二碎波指標	-8.06
	a3	第三碎波指標	8.09

本研究以白帽消散項進行探討，測試改變參數後對波高、週期、波向及波譜之模擬結果影響，並與現行 TaiCOMS 系統架構下之 SWAN 模式之模擬結果進行比較，因 SWAN 模式使用手冊提及 WAMDI 團隊(1988)修正 Hasselmann(1974)提出之理論，白帽消散項可表示為：

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma}^{\frac{k}{k}} E(\sigma, \theta) \quad (26)$$

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left[(1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right] \left(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^p \quad (27)$$

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、 $\tilde{s}$ 為平均波浪尖銳度、 $\tilde{s}_{PM}$ 為 Pierson-Moskowitz 頻譜的平均波浪尖銳度，白帽消散速率 C_{ds} 、波浪尖銳度之幕次 P 、白帽消散對波數之依賴係數 δ 為可調教之參數，依 SWAN 模式使用手冊提及 SWAN 在週期方面有結構性地低估情形，幅度約在 10%至 20%。李等人(2020)^[2]曾以白帽消散項之 $\delta = 1$ 與 $\delta = 0.5$ ，搭配不同底床摩擦項係數(JONSWAP 係數=0.028 與 0.038)模擬花蓮海域波浪，發現底床摩擦項係數對波高模擬結果差異影響不大，白帽消散項之係數 δ 對波高模擬結果影響較大。本研究以 C_{ds} 及 δ 調教為模擬測試方向，其中 TaiCOMS 為現行作業化模擬之參數設定，根據 Komen(1984)提出之理論，以 $C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$ 、 $\delta = 0$ 進行模擬；case 1 為參照 SWAN 模式使用手冊，根據 Rogers 等人(2003)提出之理論，為改善低頻波浪能量之預測結果，將 δ 由 0 改為 1 進行模擬；依使用手冊建議， δ 由 0 改為 1 後，白帽消散速率 C_{ds} 需重新調校，本研究將 case 2 以 $\delta = 1$ ， C_{ds} 由 2.36×10^{-5} 增加為 2.36×10^{-4} ，即增加一個量級(order)進行測試，模擬案例之參數設定如表 11。

表 11 SWAN 模擬案例參數表

模擬案例	白帽消散項參數	參數值	備註
TaiCOMS	cds2(Cds)	2.36×10^{-5}	預設值
	delta(δ)	0	
case 1	cds2(Cds)	2.36×10^{-5}	預設值
	delta(δ)	1	
case 2	cds2(Cds)	2.36×10^{-4}	
	delta(δ)	1	

3.2 模擬結果

本研究以 110 年 9 月之燦樹颱風、10 月圓規颱風及 11 月至 12 月東北季風期間為模擬區間，依表 11 進行 SWAN 之風浪模擬，各模擬案例之示性波高、尖峰週期，平均週期、波浪能譜、平均波向與觀測值之比較結果如圖 7 至圖 26，其中觀測值以黑色表示、紅色、藍色、綠色分別代表 TaiCOMS、case 1、case 2 之模擬結果，模擬值與觀測值之誤差分析如表 12 至表 14。

以燦樹颱風而言(颱風路徑如圖 13)，由圖 7 可看出，3 個模擬案例之示性波高與觀測值相比均有偏高情形，其中 TaiCOMS 之模擬結果與 case 1 模擬結果幾無差異，case 2 模擬結果與觀測值較為接近，均方根誤差也最低(0.486m)，以尖峰週期而言(圖 8)，3 個模擬案例之模擬結果幾無差異，其平均誤差、均方根誤差等均差異很小，以颱風影響期間(9/10 至 9/14)來看，尖峰週期模擬值與觀測值相比均高估，反之則低估，以平均週期(圖 9)來看亦有類似情形，唯颱風影響期間，TaiCOMS 之模擬結果與 case1、case2 相比，相對接近觀測值，均方根誤差以 TaiCOMS 之 1.946m 為最低，case 1 之 2.918 最高(表 12)，取 9/12 06:00 及 9/12 14:00 等颱風期間內波高較高

時間點之波浪能譜模擬結果與觀測值轉換波浪能譜之比較如圖 10 及圖 11，由圖可看出模擬值與觀測值之分布趨勢大致相符，三種模擬案例中，頻率約在 0.125 以下(週期 8 秒以上)無差異，頻率大於 0.125(週期 8 秒以下)有較明顯差異，平均波向於各模擬案例之結果則無差異(圖 12)，各結果誤差分析相差不大(表 12)。

以圓規颱風而言(颱風路徑如圖 20)，由圖 14 可看出，不同模擬案例之示性波高模擬結果(圖 14)與觀測值變化趨勢大致相符，其中 case 2 相對其他模擬案例較偏低，於此颱風期間較接近觀測值，均方根誤差以 TaiCOMS 之 0.598m 為最低，尖峰週期(圖 15)於三種模擬案例模擬結果幾無差異，與觀測值大致相符，唯 10/15 後與觀測值相比有偏低情形，均方根誤差以 case 1 之 2.558 秒最低(表 13)，以平均週期而言(圖 16)，三種模擬案例於 10/10 至 10/14 與觀測值相比均偏高，其中 case1 與 case 2 幾無差異，TaiCOMS 之模擬結果與觀測值間差異較小，均方根誤差以 TaiCOMS 之 1.523m 為最低(表 13)，但於 10/17 後以 case 1 模擬結果較接近觀測值，取 10/11 18:00 及 10/12 00:00 等颱風期間內波高較高時間點，比較模擬與觀測值轉換之波浪能譜圖(圖 17 及圖 18)，模擬值於低頻區無差異，與 TaiCOMS 模擬案例相比，case 1 於頻率 0.15 以上(週期 6.67 秒以下)區域有明顯差異，case 2 則於頻率 0.1 以上(週期 10 秒以下)區域有明顯差異，平均波向於各模擬案例之結果則無差異(圖 19)，各結果誤差分析相差不大(表 13)。

以東北季風期間而言，三種模擬案例之示性波高模擬結果均偏低(圖 21)，均方根誤差以 TaiCOMS 模擬案例之 0.81m 最低(表 14)，尖峰週期之整體變化趨勢皆與觀測值變化大致相符(圖 22)，但模擬值偶有短時間偏大或偏小跳動情形，而 case 1 與 case 2 間較無差異，其均方根誤差以 case 1 之 2.246 秒為最低(表 14)，以平均週期而言(圖 23)，三種模擬案例之模擬結果與觀測值均偏低，其中以 case 1 較為接近觀測值，均方根誤差 1.149m 為最低，取 11/30 00:00 及 12/04 00:00，比較模擬與觀測值轉換之波浪能譜圖(圖 25 及圖 26)，11/30 00:00 之波浪能譜圖中，case 1 與 case 2 間無明顯差異，與 TaiCOMS 模擬案例相比則於頻率大於 0.17(週期 5.88 秒以下)區域有明顯差異，平均週期模擬值較有差異之 12/04 00:00 對應之波浪能譜圖模擬結果中，與 TaiCOMS 模擬案例相比，case 1 於頻率 0.15 以上(週期 6.67 秒以下)區域有明顯差異，case 2 則於頻率 0.1 以上(週期 10 秒以下)區域有明顯差異，平均波向於各模擬案例之結果幾無差異(圖 24)，各結果之誤差分析相差不大(表 14)。

綜觀以上模擬結果，示性波高於 case 1 與 case 2 之模擬結果，於燦樹、圓規颱風及東北季風期間，與 TaiCOMS 之模擬結果相比無明顯差異，尖峰週期於三種模擬案例之模擬結果皆相近，平均週期於 case 1 與 case 2 之模擬結果，於燦樹及圓規颱風期間略高於 TaiCOMS 之模擬結果，東北季風期間則以 case 1 模擬結果略高於 TaiCOMS 模擬結果，平均波向模擬結果於三種模擬案例皆無明顯差異。

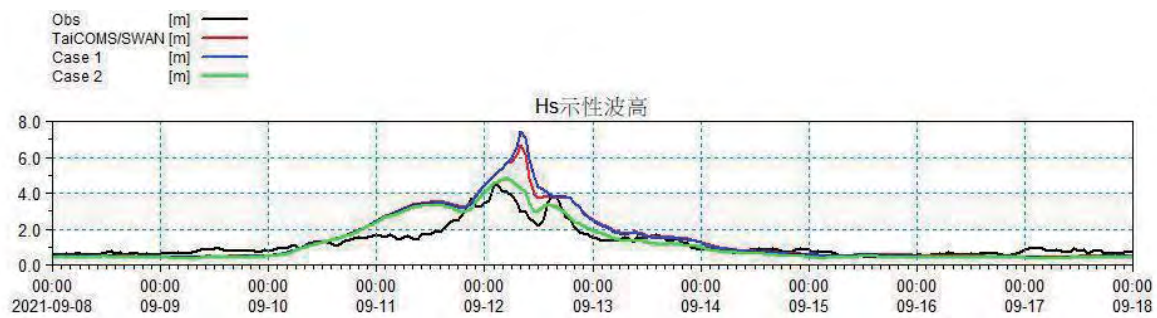


圖 7 燦樹颱風期間花蓮港示性波高模擬結果圖

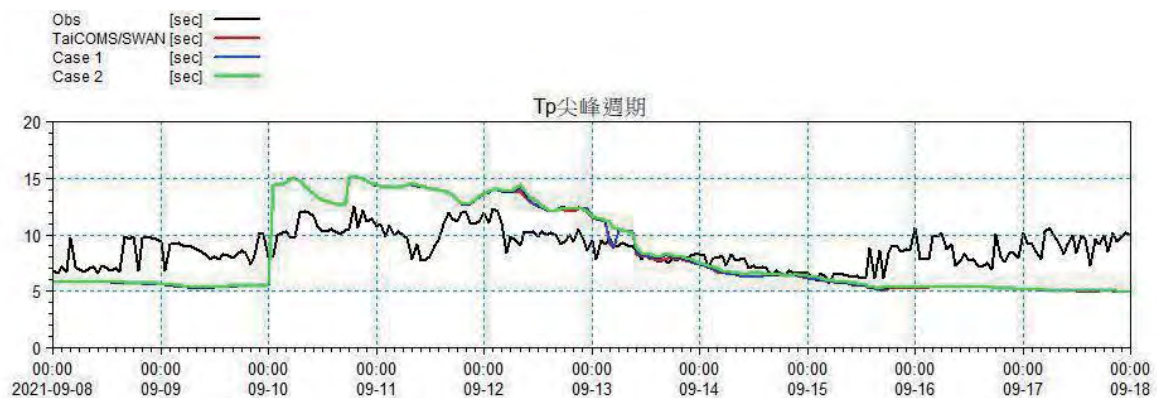


圖 8 燦樹颱風期間花蓮港尖峰週期模擬結果圖

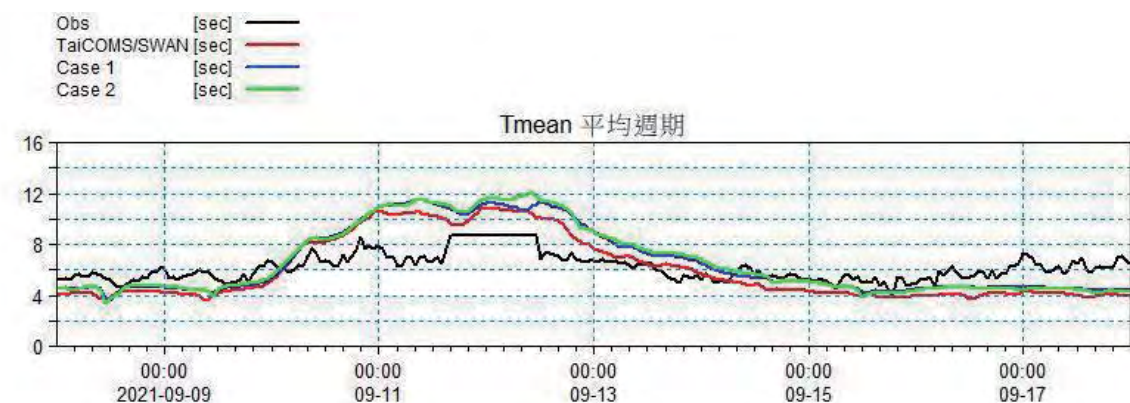


圖 9 燦樹颱風期間花蓮港平均週期模擬結果圖

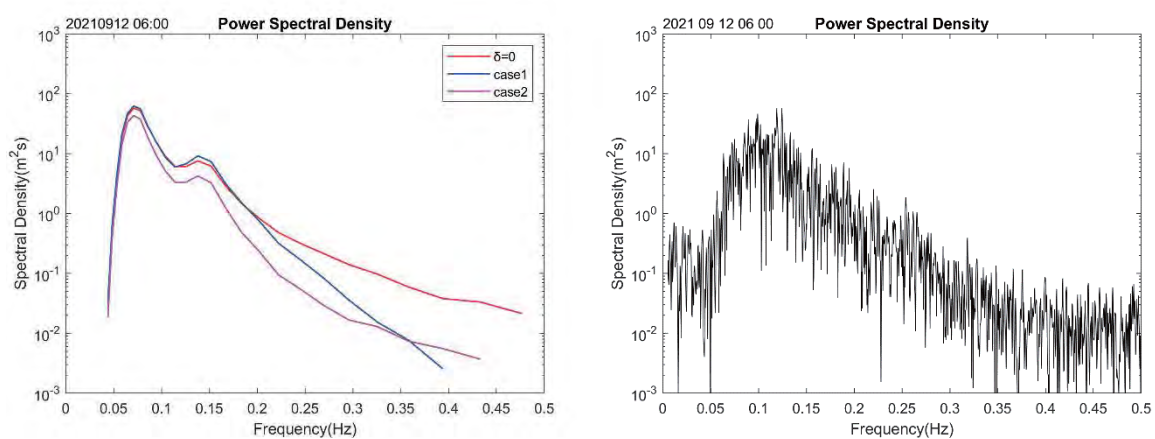


圖 10 燦樹颱風期間波浪能譜圖(9/12 06:00 左為模擬值，右為觀測值)

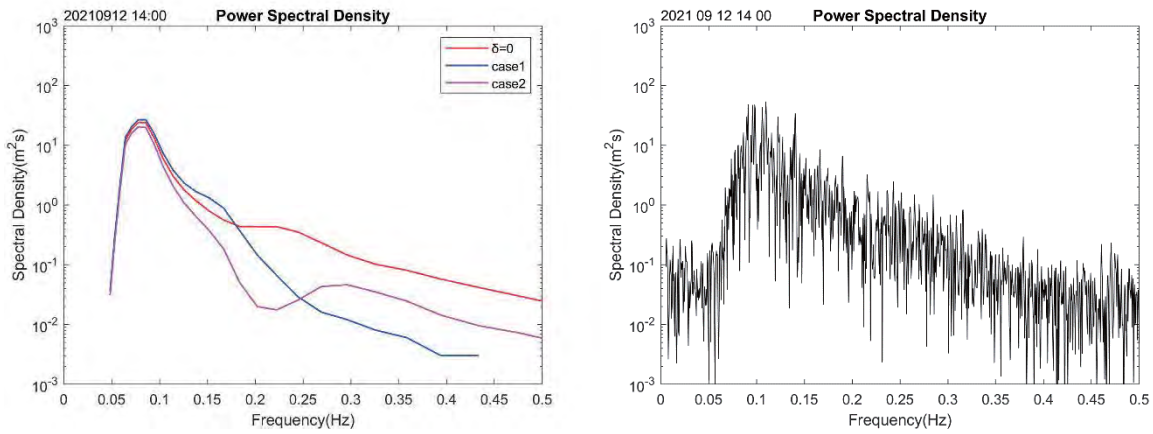


圖 11 璨樹颱風期間波浪能譜圖(9/12 14:00 左為模擬值，右為觀測值)

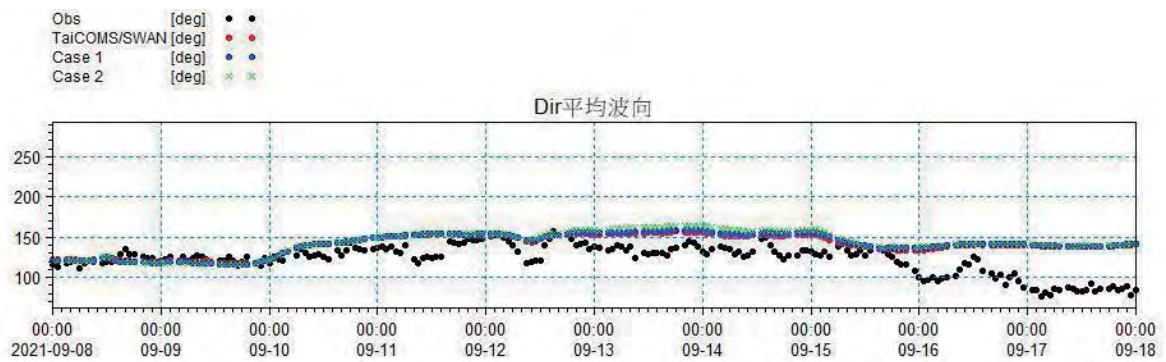


圖 12 璨樹颱風期間花蓮港平均波向模擬結果圖

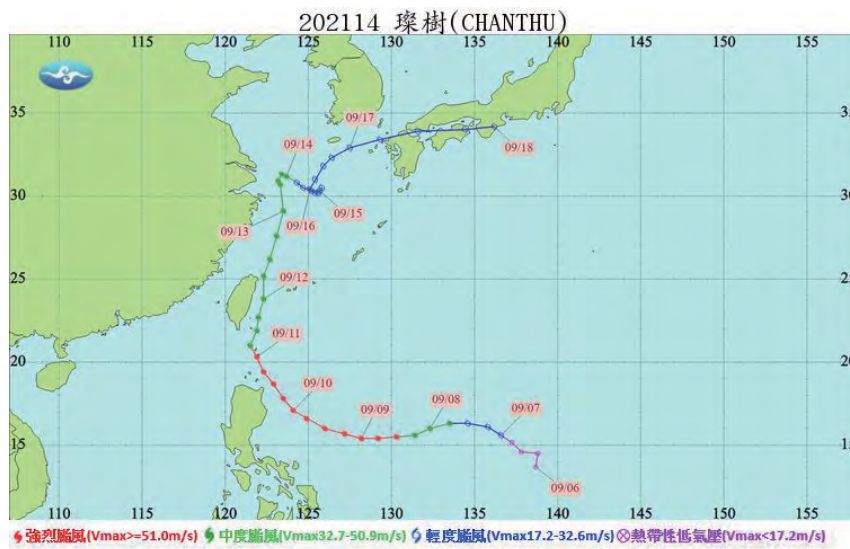


圖 13 璨樹颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象局網站)

表 12 燦樹颱風期間模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(m)	0.423	0.595	-0.004
平均絕對誤差(m)	0.522	0.688	0.346
均方根誤差(m)	0.674	0.905	0.486
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	0.649	0.626	0.555
平均絕對誤差(sec)	2.632	2.634	2.629
均方根誤差(sec)	3.096	3.099	3.097
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	1.193	1.139	-0.387
平均絕對誤差(sec)	1.601	1.952	1.631
均方根誤差(sec)	1.946	2.918	1.995
Dir 平均波向	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(°)	19.27	13.10	21.37
平均絕對誤差(°)	20.82	20.44	22.95
均方根誤差(°)	26.33	28.48	28.93

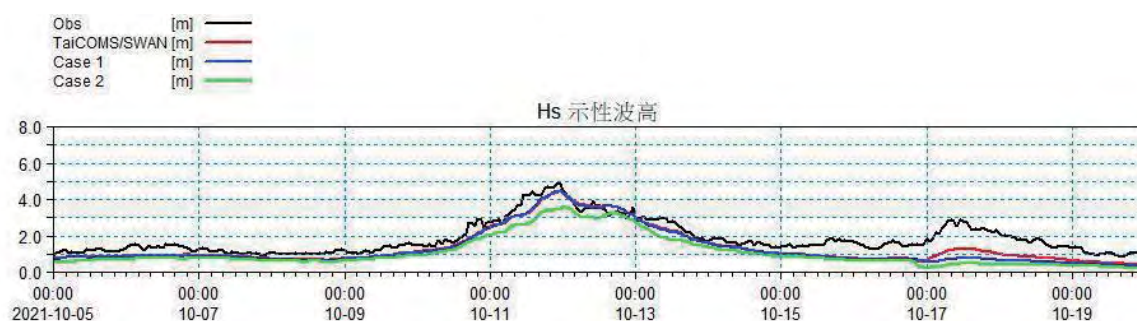


圖 14 圓規颱風期間花蓮港示性波高模擬結果圖

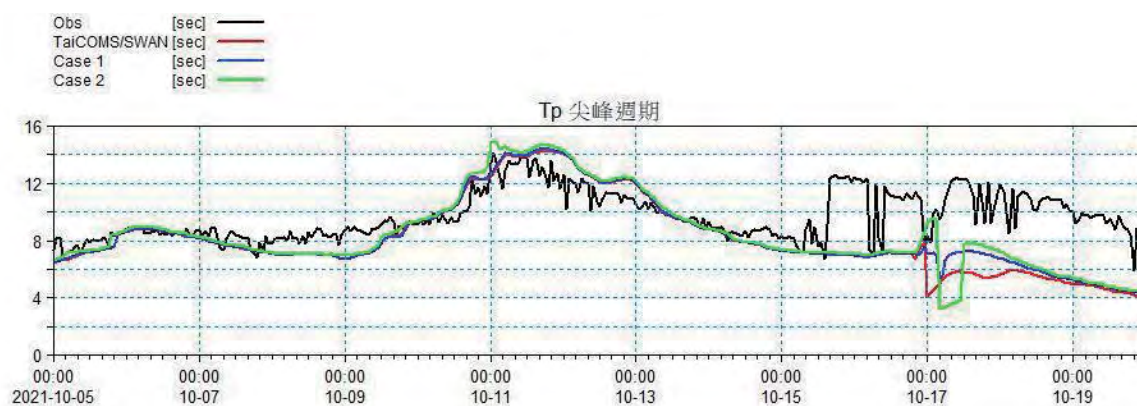


圖 15 圓規颱風期間花蓮港尖峰週期模擬結果圖

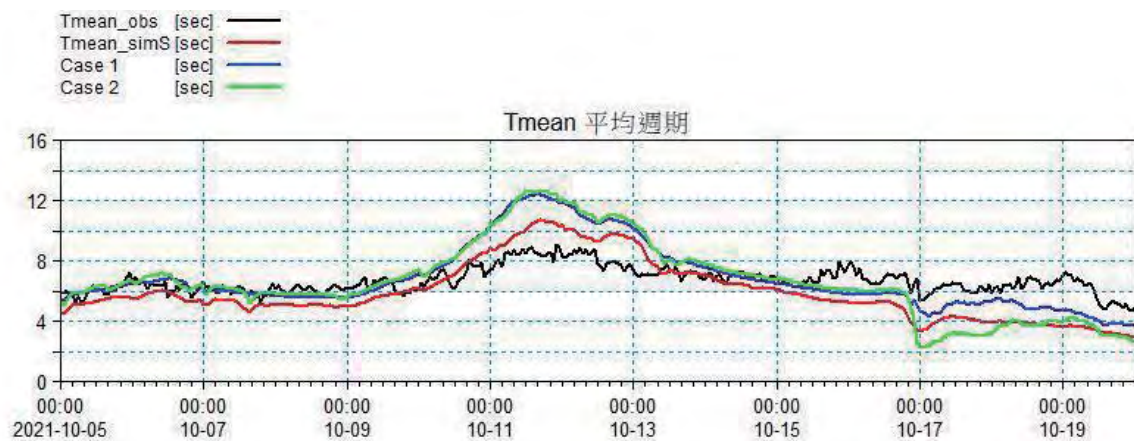


圖 16 圓規颱風期間花蓮港平均週期模擬結果圖

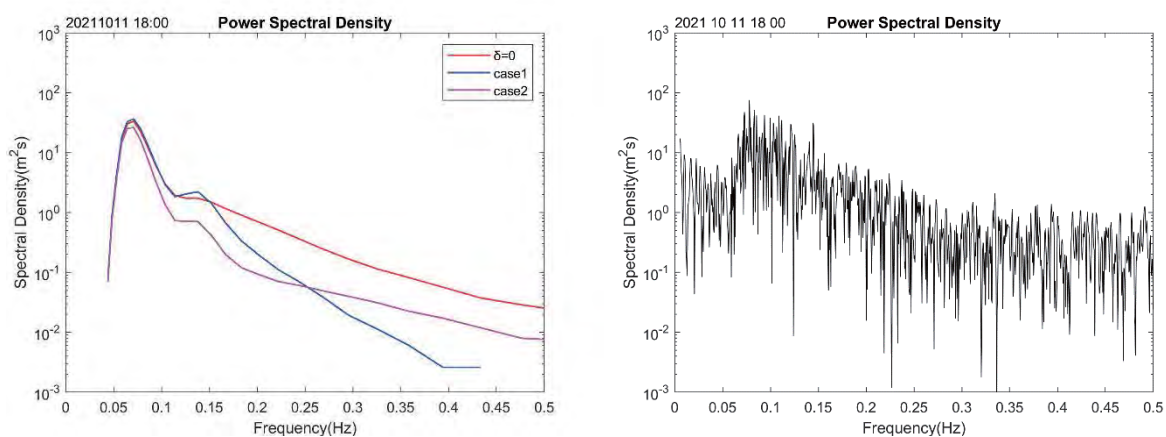


圖 17 圓規颱風期間波浪能譜圖(10/11 18:00 左為模擬值，右為觀測值)

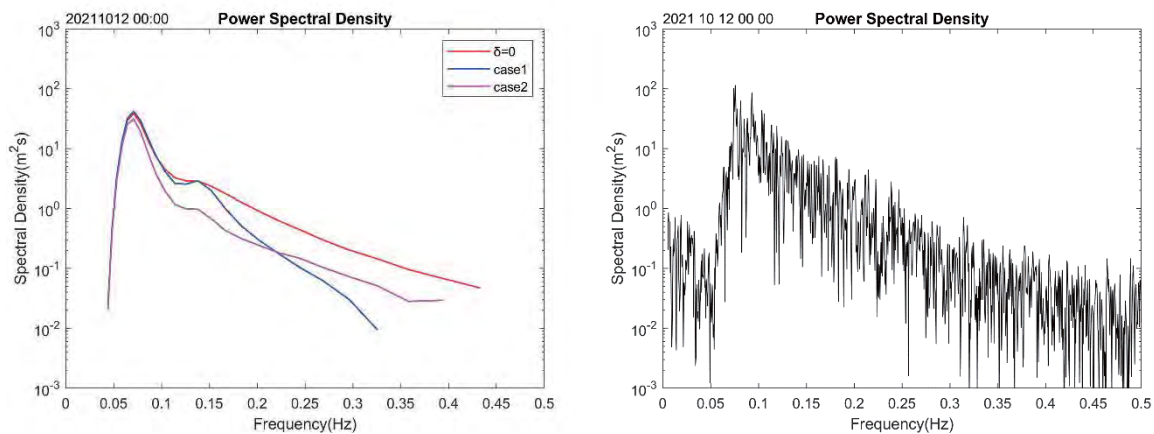


圖 18 圓規颱風期間波浪能譜圖(10/12 00:00 左為模擬值，右為觀測值)

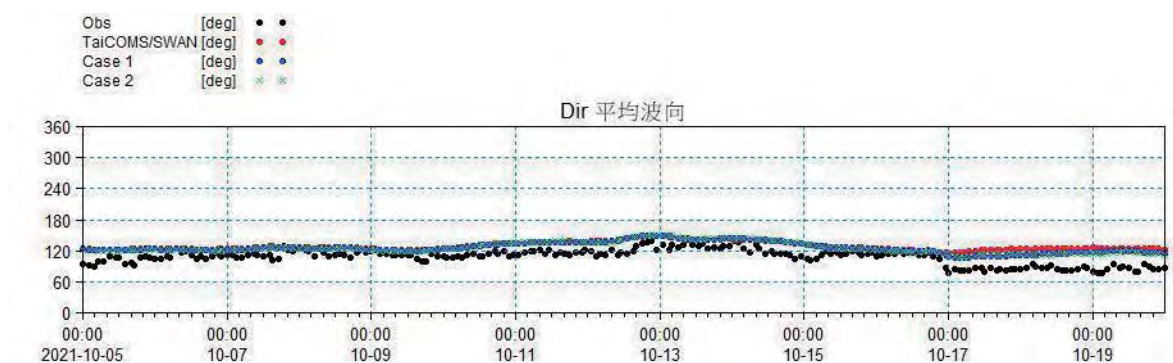


圖 19 圓規颱風期間花蓮港平均波向模擬結果圖



圖 20 圓規颱風路徑圖(資料來源：交通部中央氣象局網站)

表 13 圓規颱風期間模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(m)	0.482	0.555	0.762
平均絕對誤差(m)	0.507	0.577	0.763
均方根誤差(m)	0.598	0.706	0.887
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	1.545	1.386	1.252
平均絕對誤差(sec)	1.984	1.848	1.863
均方根誤差(sec)	2.800	2.558	2.644
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	0.771	0.121	0.063
平均絕對誤差(sec)	1.333	1.182	1.492
均方根誤差(sec)	1.523	1.557	1.952
Dir 平均波向	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(°)	20.47	17.95	17.72
平均絕對誤差(°)	20.50	18.00	17.77
均方根誤差(°)	23.56	20.27	20.07

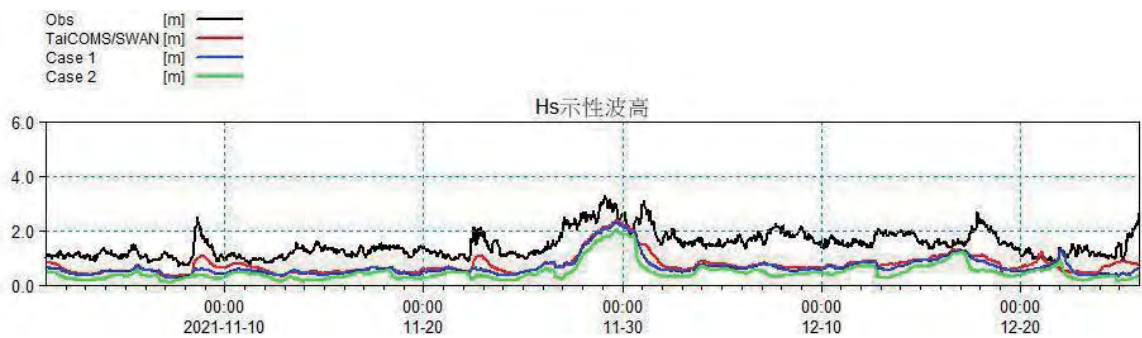


圖 21 東北季風期間花蓮港示性波高模擬結果圖

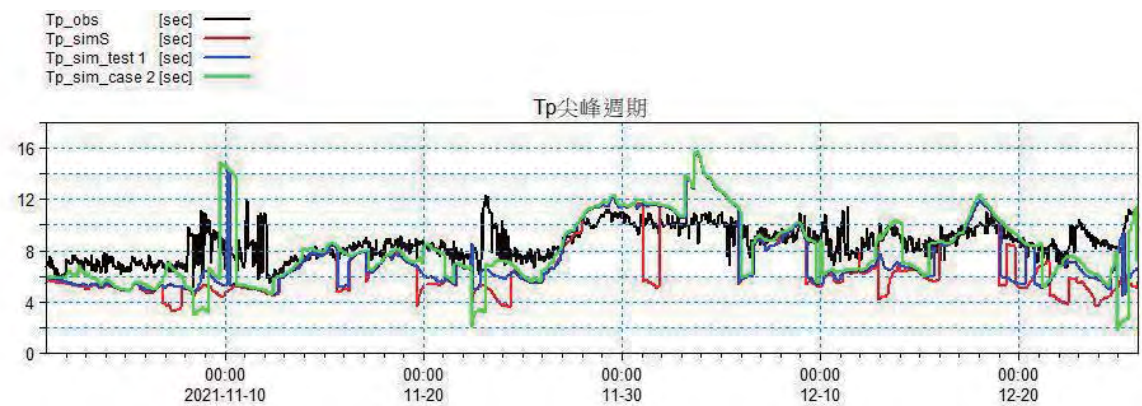


圖 22 東北季風期間花蓮港尖峰週期模擬結果圖

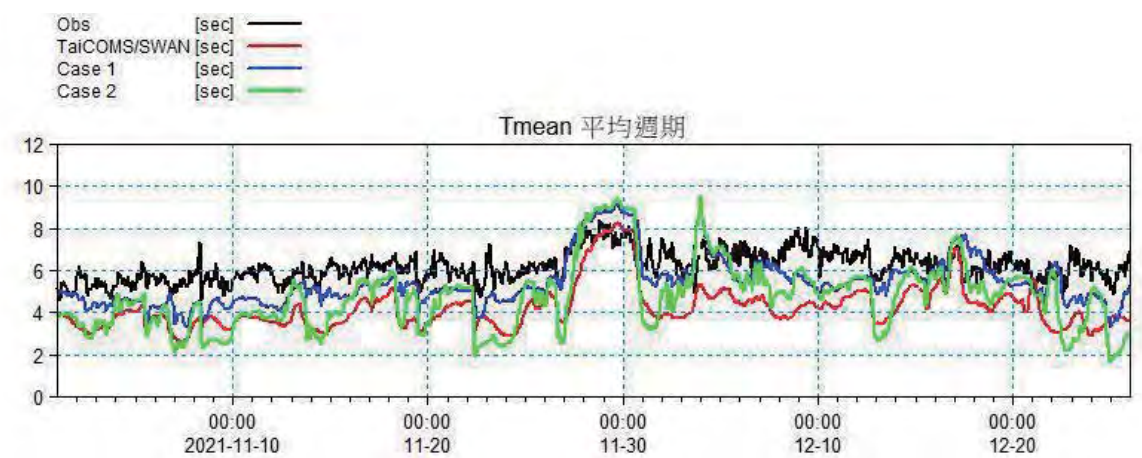


圖 23 東北季風期間花蓮港平均週期模擬結果圖

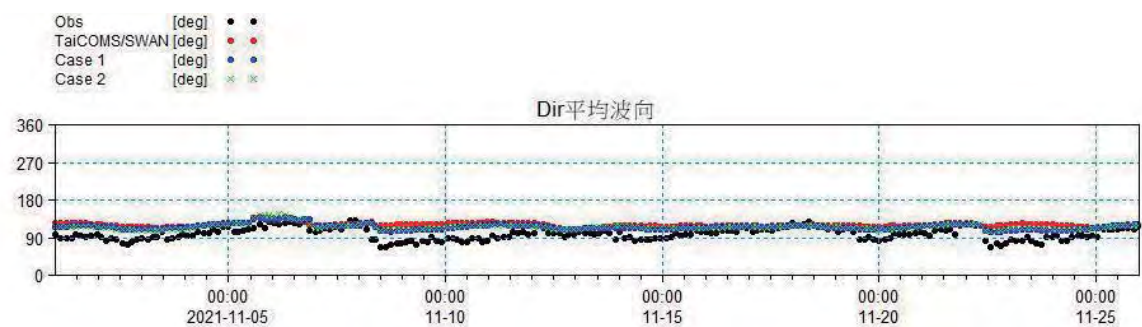


圖 24 東北季風期間花蓮港平均波向模擬結果圖

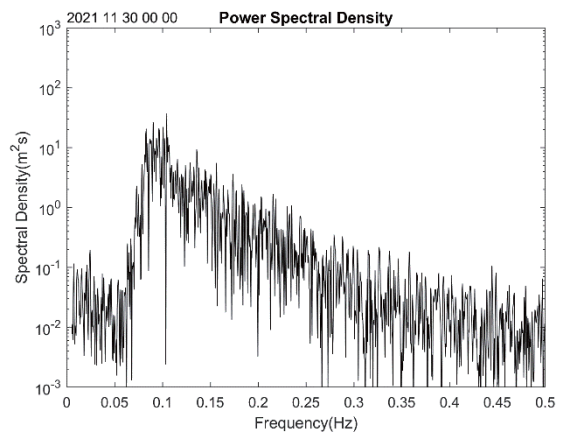
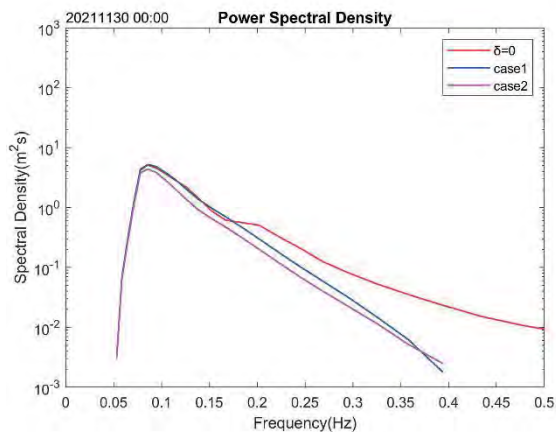


圖 25 東北季風期間波浪能譜圖(11/30 00:00 左為模擬值，右為觀測值)

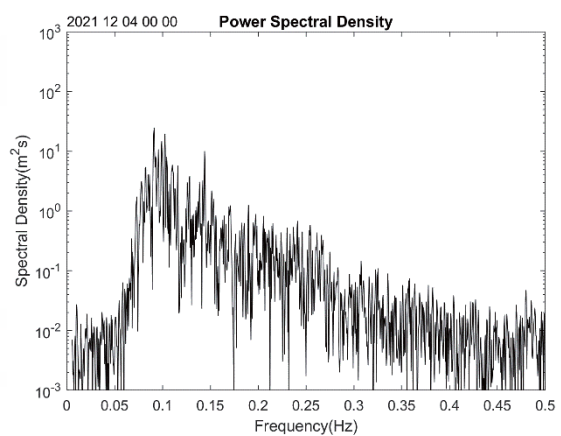
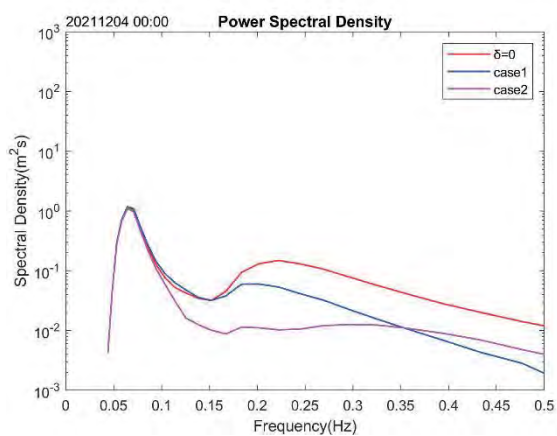


圖 26 東北季風期間波浪能譜圖(12/04 00:00 左為模擬值，右為觀測值)

表 14 東北季風期間模擬誤差分析表

Hs(示性波高)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(m)	0.734	0.828	1.145
平均絕對誤差(m)	0.740	0.828	1.018
均方根誤差(m)	0.810	0.902	1.094
Tp(尖峰週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	1.596	1.813	0.597
平均絕對誤差(sec)	2.232	1.845	1.642
均方根誤差(sec)	2.756	2.246	2.310
Tmean(平均週期)	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(sec)	1.952	0.768	1.436
平均絕對誤差(sec)	1.981	1.020	1.677
均方根誤差(sec)	2.117	1.149	1.937
Dir 平均波向	TaiCOMS	Case1	Case2
平均誤差(°)	21.27	17.52	18.63
平均絕對誤差(°)	21.54	17.76	19.91
均方根誤差(°)	24.56	20.39	22.50

四、結論

本研究使用 TaiCOMS 系統架構中之遠域(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,分別對應以 WAM、SWAN、SWAN 模式,針對花蓮海域近海風浪模組之 SWAN 模式,波浪成長與消散之源函數項中之白帽消散項,調整白帽消散速率 C_{ds} 與白帽消散對波數之依賴係數 δ ,設定兩種不同參數為模擬測試案例(含 TaiCOMS 原參數共 3 種模擬案例),模擬花蓮海域之波浪資料,並以運研所港灣技術研究中心於花蓮港之波流觀測站於 110 年燦樹颱風、圓規颱風、東北季風期間觀測資料比對。比對結果顯示,示性波高以 case 2 於燦樹颱風期間模擬結果較佳,但圓規颱風及東北季風期間則以 TaiCOMS 模擬結果較佳,3 種示性週期之模擬結果無明顯差異,平均週期模擬結果於颱風期間大於觀測值、無颱風影響之常時期間低於觀測值之情形,觀察燦樹颱風、圓規颱風、東北季風期間模擬結果,並無單一模擬案例模擬結果明顯優於其他案例,case 1 之平均週期模擬值較 TaiCOMS 提升約 10%至 20%,case 1 之平均週期模擬值較 TaiCOMS 提升約 10%,平均波向模擬結果於三種模擬案例皆無明顯差異。

本研究以 SWAN 模式模擬不同白帽消散項參數案例,比較於花蓮港區小尺度之波浪模擬結果,由模擬結果可知,依現行版本使用手冊 (41.41 版)建議,將白帽消散對波數之依賴係數 δ 由 0 改為 1 後,示性波高無明顯差異,將白帽消散速率 C_{ds} 由 2.36×10^{-5} 改為 2.36×10^{-4} 後,示性波高與 TaiCOMS 模擬值相比降低約 20%,東北季風期間與 TaiCOMS 模擬值相比降低約 40%,平均週期於 case 1、case 2 間差異不大,皆比 TaiCOMS 模擬值高約 10%。建議於後續相關研究可納入更多颱風事件,從不同颱風之位置遠近、路徑等差異,或 SWAN 模式中各參數之不同理論依據探討與模擬測試,及文獻探討 SWAN 模式各參數之敏感性,以精進 TaiCOMS 中近海(小尺度)風浪模組於花蓮海域之波浪模擬成效。

參考文獻

1. 交通部中央氣象局網站, <https://www.cwb.gov.tw>。
2. 許泰文、廖建明、陳亞嵐、李怡婷(2005),數值海浪預報之精進及應用,行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。
3. 李俊穎、傅怡釧、劉清松、陳鈞彥、謝佳紘(2020),台灣風波潮流模擬及長浪預警之研究(2/4)-模擬評估及長浪預報研究,交通部運輸研究所。
4. 張恆文、顏厥正、劉進金、馬名軍、林宛瑩、胡哲魁、李科豎(2021),波浪資料同化系統與菲律賓預報建置研究計畫(1/3),交通部中央氣象局委託研究計劃(期末)成果報告修正版。
5. 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。
6. 傅怡釧、林雅雯、劉清松、陳鈞彥、謝佳紘、鄭采誼(2022),台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。

7. 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.
8. SWAN User Manual SWAN Cycle III version 41.31AB(2021).
9. SWAN Scientific and Technical Documentation, SWAN Cycle III version 41.41(2022).
10. Tolman, H.L., The Numerical Model WAVEWATCH : A Third Generation Mode for the Hindcasting of Wind Waves on Tides in Shelf Seas, Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Report No. 89-2 (1989).