

澎湖海域海象模擬

劉正琪 國立成功大學水工試驗所研究員
李兆芳 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
陳明宗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

本研究主要針對澎湖海域建立風浪及水動力模擬作業化系統，模擬澎湖海域與臺灣本島間風浪、水位及流場等海象資訊，提供港灣資訊網建置臺灣本

島與澎湖港間藍色公路海象即時模擬資訊予相關單位參考，保障海上航行安全。

一、前言

由於我國為海島型國家，臺灣本島與離島間各類物資及人員多需仰賴海洋運輸，因此發展藍色公路乃為政府長期推動的政策。基於臺灣周圍海域海象變化莫測，時有船舶或漁船筏等海上事件發生，如航行澎湖與台中港間之海洋拉拉號曾於 2010 年 8 月 8 日離開馬公港後，因海浪拍碎船艙在台中港外海失去動力，造成三百多名旅客海上驚魂七小時事件；以及往來嘉義與澎湖航線百麗客輪於 2011 年 6 月 11 日滿載 178 位遊客自布袋港出海約 20 分鐘，即因莎

莉佳颱風影響海面風浪過大，航行過程中因船身跳動劇烈，導致有旅客受傷及 22 人送醫事件。因此發展臺灣本島與離島間海象模擬系統，提供細緻化海象模擬資訊，確保臺灣本島與離島間藍色公路航行安全，實屬必要之措施。

因此本研究在國立成功大學與交通部運輸研究所港灣技術研究中心(以下簡稱港研中心)合作下，針對澎湖海域發展細網格風浪、水位及流場等海象模擬作業化系統。

二、澎湖海域海象基本資料

2.1 地理位置

澎湖群島位於臺灣海峽，距離臺灣本島約 50 公里，西離中國大陸約 140 公里；範圍介於北緯 23°12'至 23°47'，東經 119°19'至 119°43'之間，如圖 1 所示。澎湖群島共有大小島嶼 90 座，多數為無人居住之小島，極東為查母嶼，極西為花嶼，極北為目斗嶼，極南是七美嶼，以澎湖本島、白沙嶼及西嶼三島為最大。澎湖群島南北長約 60 餘公里，東西寬約 40 餘公里，陸地總面積約為 127.9636 平方公里，海岸線總長約 449 公里(李、曾，2005)。

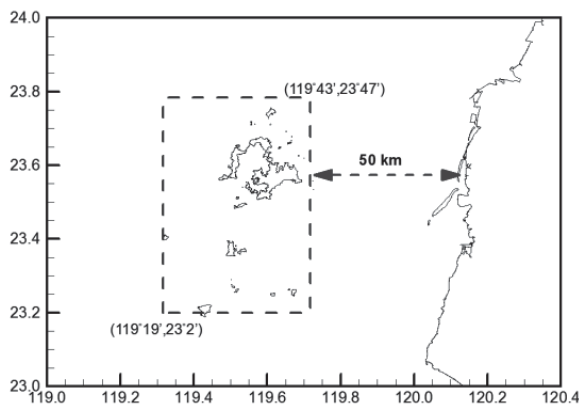


圖 1 澎湖群島地理位置圖

2.2 潮汐

澎湖海域潮汐型態屬於半日潮型，本文分析 2008 至 2014 年馬公潮位站觀測資料得到各代表性潮位逐月變化特性，如圖 2 所示；圖中最高潮位觀測值為 1.509 m，發生於 2012 年 8 月 2 日 11 時，適值中度颱風蘇拉(SAOLA)侵臺期間。本文統計 2008~2014 年馬公潮位平均值為-0.413 m，平均高潮位及平均

低潮位分別為 0.651 及-1.295 m，平均潮差為 1.946 m，最大潮差為 3.206 m。

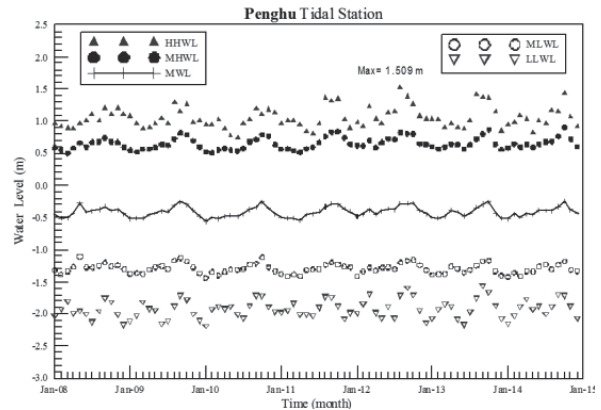


圖 2 2008~2014 年澎湖馬公潮位站觀測記錄之 HHWL、HMWL、MWL、LMWL、LLWL 逐月變化圖

2.3 波浪

針對水利署澎湖資料浮標及中央氣象局東吉島波浪測站，測站位置如圖 3 所示；本文蒐集 2014 年逐時波浪觀測資料進行波候統計分析，如表 1 及表 2 所列。由表 1 示性波高大小分布統計結果得知，澎湖資料浮標及東吉島示性波高小於 1.0 m 者分別約佔 61.09%及 61.24%，兩測站統計結果相近似；1.0 m~2.0 m 間波高比例分別約為 28.28%及 24.91%，東吉島略少於澎湖資料浮標。

在示性波高最大觀測值方面，澎湖資料浮標為 3.96m，週期為 7.1 sec，波向為 0°；東吉島為 5.49m，週期為 13.6 sec，波向為 62.0°。由示性波高大小分布及其週期之平均值變化趨勢得知，兩測站示性波高大小之分布與其波浪週

期平均值間具有正相關性，亦即示性波週期之平均值大小會隨示性波高值增大而增加。

表 2 波向分布統計結果顯示，澎湖資料浮標波浪波向分布以 N 向比例 42.52% 為最高，其次 NNW 向約佔 20.85%，WSW 向及 W 向分別約佔 15.99% 及 10.13%。東吉島波浪波向分布以 ENE 向比例最高約 31.93%，其次為 S 向約佔 13.77%，SSE 向及 E 向分別約佔 11.86% 及 10.79%。

2.4 海流

本文蒐集水利署澎湖資料浮標 2014 年海流觀測資料(計 7,615 筆)進行流速及流向統計分析，如表 3 所列；顯示該測站海流流速小於 0.25 m/s 者約佔全部觀測資料之 70.31%，流速介於 0.25 ~ 0.50 m/s 區間者約佔全部觀測資料之 28.30%；流向分布以西南向(SW)所佔比例最大約為 34.9%，其次為西向(W)約佔 23.9%。2014 年觀測最大流速值為 0.74 m/s，流向為 245.°。

表 1 2014 年澎湖海域波浪觀測示性波高分布統計結果

測站 波高(m)	澎湖資料浮標		東吉島測站	
	資料數/ (百分比)	週期平均 值(sec)	資料數/ (百分比)	週期平 均值(sec)
< 0.5	3104 / (37.35)	4.31	2333 / (28.91)	5.35
0.5 ~ 1.0	1948 / (23.56)	4.54	2609 / (32.33)	5.83
1.0 ~ 1.5	1281 / (15.49)	4.79	1216 / (15.07)	6.12
1.5 ~ 2.0	1058 / (12.79)	5.12	794 / (9.84)	6.58
2.0 ~ 2.5	610 / (7.38)	5.50	530 / (6.57)	6.94
2.5 ~ 3.0	184 / (2.22)	5.97	330 / (4.09)	7.31
3.0 ~ 3.5	72 / (0.87)	6.37	161 / (1.99)	7.74
3.5 ~ 4.0	13 / (0.16)	7.95	66 / (0.82)	8.27
4.0 ~ 5.0	—	—	29 / (0.36)	8.84
5.00 <	—	—	3 / (0.04)	11.03
合計	8270 / (100.00)		8071 / (100.00)	
備註	最大波高值：3.96 m 週期：7.1 sec 波向：0.0° 發生時間：02/10 04		最大波高值：5.49 m 週期：13.6 sec 波向：62.0° 發生時間：11/17 22	

表 2 2014 年澎湖海域波浪觀測之波向分布統計結果

波向	澎湖 資料浮標	東吉島 測站	波向	澎湖 資料浮標	東吉島 測站
	資料數 (百分率)	資料數 (百分率)		資料數 (百分率)	資料數 (百分率)
N	3516 (42.52)	419 (5.19)	S	2 (0.02)	1111 (0.05)
NNE	297 (3.59)	7 (0.09)	SSW	10 (0.12)	456 (5.65)
NE	9 (0.11)	569 (7.05)	SW	198 (2.39)	87 (1.08)
ENE	4 (0.05)	2577 (31.93)	WSW	1322 (15.99)	12 (0.15)
E	2 (0.02)	871 (10.79)	W	838 (10.13)	0 (0.00)
ESE	1 (0.01)	406 (5.03)	WNW	166 (2.01)	1 (0.01)
SE	1 (0.01)	597 (7.40)	NW	177 (2.14)	1 (0.01)
SSE	3 (0.04)	957 (11.86)	NNW	1724 (20.85)	0 (0.00)

1. 波向判斷採用 $\pm 11.25^\circ$
2. 澎湖及東吉島資料浮標波浪觀測資料數分別為 8270 及 8071

表 3 澎湖資料浮標 2014 年逐時海流之流速大小及流向分布統計

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	資料 數	百分 比
< 0.25	508	424	241	265	614	1495	1278	529	5354	70.31
0.25 ~ 0.50	124	203	17	4	176	1079	525	27	2155	28.30
0.50 ~ 0.75	0	2	0	0	2	84	17	1	106	1.39
0.75 ~ 1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計百分比	632	629	258	269	792	2685	1820	577	7615	100.00
備註	最大流速值(0.74m/s) 流向(245.0°) 時間(10/07 11:00:00)									

針對 2014 年 1 月至 3 月逐時海流觀測資料，本文選取 2,048 筆資料進行流速能譜分析，如圖 4 所示；海流能譜

分析結果顯示東西向及南北向流速分量於半日潮及 1/4 日潮範圍均有顯著的能量分布。此外，針對 2014 年 1 月份逐時海流觀測資料，本文亦選取 O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2 及 M_4 等 5 個分潮進行天文潮流調和分析，如表 4 所列；分析結果顯示當地冬季潮流主要受到半日潮 M_2 分潮主宰，全日潮 O_1 及 K_1 影響甚小， S_2 及 M_4 分潮所佔比例相近。

表 4 澎湖資料浮標 2014 年 1 月海流觀測資料調和分析成果表

分潮 名稱	角頻率 (度/小時)	E-W方向分量		N-S方向分量	
		振幅 (m/s)	位相角 (度)	振幅 (m/s)	位相角 (度)
O ₁	13.94303513	0.0140	211.942	0.0078	253.379
K ₁	15.04106903	0.0109	206.073	0.0120	109.735
M ₂	28.98410416	0.1427	197.622	0.1488	179.818
S ₂	30.00000000	0.0378	225.781	0.0464	189.383
M ₄	57.96820831	0.0448	314.676	0.0311	224.100
平均流速		-0.1397 m/s		-0.0946 m/s	
觀測資料時間		2014/01/01 00:00 ~ 2014/01/31 23:00			
原點時間		2014/01/16 11:00			



圖 3 澎湖資料浮標及東吉島波浪測站位置示意圖

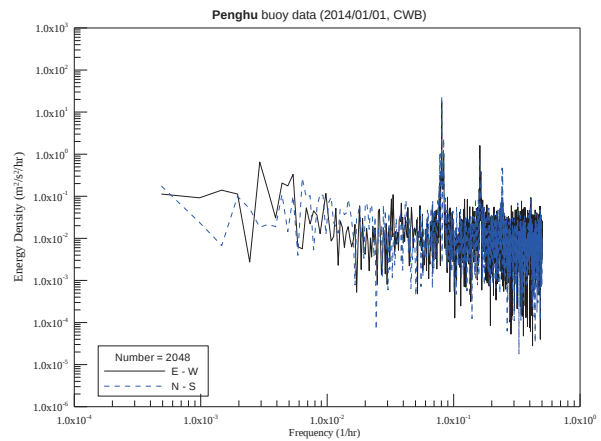


圖 4 澎湖資料浮標 2014 年 1~3 月東西向及南北向海流之能譜圖

2.5 地形水深

本文除了蒐集美國國家地球物理資料中心(NGDC)公布的全球 1 弧分格網數值地形資料(ETOPO1)及我國國家海洋科學研究中心發布的台灣附近海域海底地形水深資料(200m 網格外，同時蒐集海軍大氣海洋局刊行的海圖，如 04525 澎湖群島北部、04528 澎湖群島西南部、04529 澎湖群島東南部及 0334 馬公港及附近等，建置海域地形水深資料，提供本文相關數值模式使用。

三、澎湖海域風浪模擬系統

為提供澎湖海域細緻化風浪模擬資訊，本文結合港研中心 TaiCOMS 大尺度遠域風浪模組及中尺度近域風浪模組，建構出三層巢狀網格之澎湖海域風浪模擬系統，如圖 5 所示。圖 5 所示為本文澎湖海域風浪模擬系統之整體模擬流程架構依據巢狀網格尺度大小依序分別為大尺度遠域風浪模擬、中尺度近域風浪模擬及小尺度澎湖海域近岸風浪模擬等三階段。在風浪數值模式選擇上，考量未來作業化模擬之時效性，本文參考港研中心臺灣近岸海象模擬系統之作法，以海洋波浪預測模式 WAM (WAVE Modeling) 模擬大尺度遠域風浪，另以荷蘭 Delft 大學發展的近海風浪模式 SWAN (Simulating WAVes Nearshore) 模擬中尺度臺灣周圍海域近域風浪及小尺度澎湖海域近岸風浪。

3.1 風浪數值模式介紹

1. WAM

本文使用的 WAM 係經由 WAMDI (The Wave Model Development and Implementation) Group (1988) 改良的版本，其基本方程式為二維波浪能量平衡方程式，此方程式能夠描述方向波譜在時間及空間上的變化過程。這些變化過程包括風浪的生成、波能的消散、底床摩擦效應，以及波與波之間非線性交互作用。其球面座標系統之控制方程式表示如下：

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

式中 $F = F(f, \theta, \bar{x}, t)$ 為波浪能量密度譜 (energy density spectrum)， f 為波浪之頻率， θ 定義為波浪傳播方向， $\bar{x}$ 為位置， t 為時間， $\vec{C}_g$ 為波浪群速度 (group velocity)， S 為源函數 (source function)， ϕ 為緯度， λ 為經度， C_ϕ 、 C_λ 與 C_θ 分別為波浪群速度 $\vec{C}_g$ 在球面座標 ϕ 、 λ 軸及波浪傳播方向 θ 之空間傳遞速率。

2. SWAN

SWAN 為荷蘭 Delft 大學所發展之近海風浪模式，本文採用的版本為 40.85。SWAN 之控制方式為波浪作用力平衡方程式 (wave action balance equation)，表示如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{\bar{S}}{\sigma} \quad (2)$$

式中 $N(\sigma, \theta)$ 為波浪作用力密度波譜 (action density spectrum)，其中 σ 為相對的波浪頻率， θ 為波浪方向角； x 、 y 為直角座標系統之座標軸， c_x 及 c_y 分別為波浪作用力在 x 及 y 空間之傳遞速度， c_θ 代表波浪作用力在波向 θ 空間之傳遞速度， c_σ 代表波浪作用力在波浪頻率 σ 空間之傳遞速度， S 代表波浪成長與消散之源函數項。

SWAN 在能量成長與消散項的參數選擇上比其它模式更具彈性，相關功

能包括可以計算波浪在時間及空間領域之傳遞、波與波之間非線性的交互作用、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。

3.2 數值計算網格

本文遠域、近域及澎湖海域近岸三層巢狀網格之模擬範圍，如圖 6 所示，其中遠域風浪模擬範圍含蓋西太平洋北緯 10° 至 35° ，東經 110° 至 134° 之海域，數值計算網格之解析度為 0.2° (或 $12'$)，網格數目為 121×126 ；近域風浪模擬以臺灣周圍海域為對象，數值計算網格之模擬範圍為北緯 21° 至 28° ，東經 117.6° 至 123° 之海域，網格之解析度為 0.04° (或 $2.4'$)，網格數目為 161×176 ；小尺度澎湖海域近岸風浪模擬之範圍為北緯 22.8° 至 24.2° ，東經 119° 至 120.48° 之海域，計算網格之解析度為 0.008° (或 $0.48'$)，網格數目為 187×177 。

有關數值計算網格之地形水深，本文以 ETOPO1 水深數值資料建置遠域及近域數值計算網格之地形水深，另以國家海洋科學研究中心發布的台灣附近海域 200m 解析度之數值網格水深資料建置小尺度澎湖海域近岸數值計算網格之地形水深。

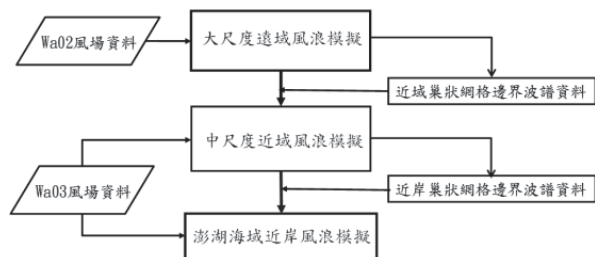


圖 5 澎湖海域風浪模擬系統架構及流程圖

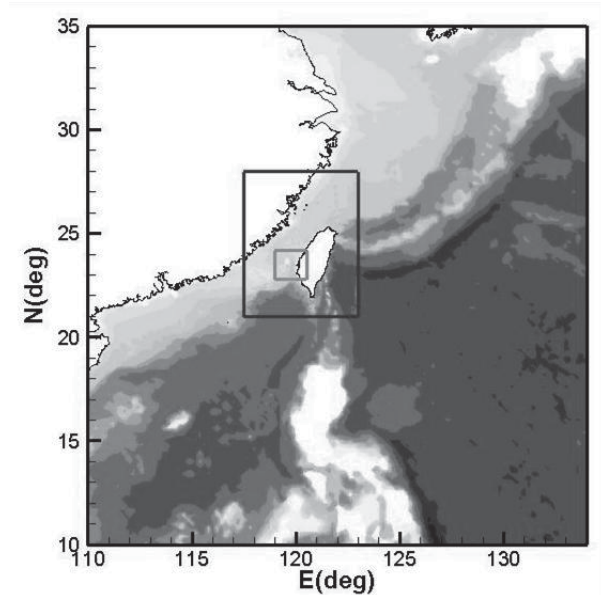


圖 6 遠域、近域(紅色實線)及澎湖海域近岸(綠色實線)風浪模擬之巢狀網格範圍圖

3.3 數值風場

本文風浪模擬採用的風場資料來自於中央氣象局第四代數值天氣預報系統(Weather Research and Forecasting model, WRF)每日作業化預報之數值風場資料(M00 模組)。此數值風場依水平方向網格解析度可分為 45km、15km 及 5km 等三層，各層網格模擬範圍，如圖 7 所示。本文取其海面高度 10m 處風場資料作為相關數值模式風場輸入資料。

目前中央氣象局每日提供四次作業化天氣預報(臺灣時區 02、08、14 及 20 時)之數值逐時(00~84 時)風、壓場資料，供港研中心自動下載。針對下載的資料 TaiCOMS 每日凌晨 3 時自動進行資料解碼及重新組合產生系統每日海象作業化模擬使用的 72 小時組合風場，並依風場資料網格解析度大小區分為 WA01、WA02 及 WA03 三種資料。圖

8 所示為 TaiCOMS 每日作業化組合風場之組合方式，顯示每日產生的海象模擬作業化風場資料係由六組最近的天氣預報數值風場資料組合而成，其中前 24 小時代表海象追算模擬階段之風場，後 48 小時代表海象預測模擬階段之風場。本文遠域風浪模擬輸入之風場為 WA02，近域及澎湖海域近岸風浪模擬輸入風場為 WA03。

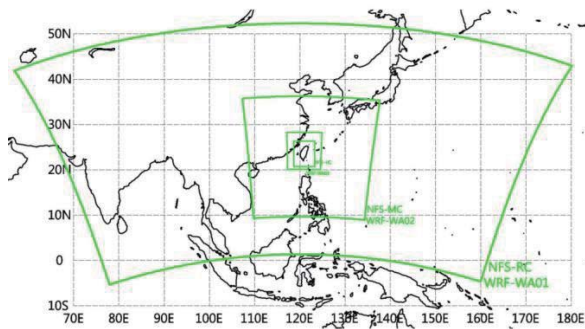


圖 7 中央氣象局 WRF 風場水平網格各層數值模擬範圍圖

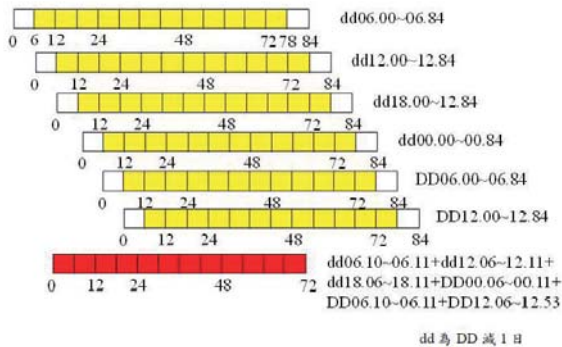


圖 8 TaiCOMS 每日產生組合風場之資料擷取時段與組合示意圖

3.4 數值模式設定

有關本文風浪模擬使用的數值模式設定，說明如下：

1. 離散化波譜

本文巢狀網格各層風浪模擬均採

用相同維度的離散化波譜，其中數值離散化方向波譜之頻率數(ML)及波向數目(KL)分別設定為 25 及 24。為獲得一均勻相對的頻率解析度，本文離散化頻寬($\Delta f/f$)採用對數尺度，即模式模擬頻率範圍為 $f_{\max}/f_{\min} = (\Delta f/f)^{ML-1}$ ，其中 $\Delta f/f$ 設定值為 1.1。本文假設頻率領域之最小頻率為 0.05Hz，則風浪模擬之頻率範圍為 0.05Hz ~ 0.4925Hz，風浪週期約介於 2.0sec 至 20.0sec 之間。波譜之波向解析度為 15° ，此解析度適用於一般風浪模擬情況。

2. 開放海域邊界條件

依據巢狀網格數值計算概念，除最外層大尺度網格外，本文中尺度及小尺度網格之開放邊界條件將分別由大尺度遠域風浪及中尺度近域風浪模擬結果提供。

針對大尺度遠域風浪模擬，本文假設其開放邊界為自然邊界條件(natural boundary condition)，即假設開放海域之網格點無任何波浪能量通率(energy flux)進入計算領域且波量以 free advection 方式傳到網格外。中尺度及小尺度網格開放海域之邊界條件則給定二維方向波譜模擬資料，分別由本文大尺度遠域風浪模擬及中尺度近域風浪模擬過程輸出巢狀網格邊界波譜資料提供。

3. 數值模擬方式

本文遠域、近域及澎湖海域近岸風浪模擬之數值模擬方式均為非穩態模擬方式，其中遠域風浪模擬採用的時間間距為 120 sec，近域及澎湖海域近岸風浪模擬採用的時間間距為 300 sec。

4. 初始條件

遠域風浪模擬：初次風浪模擬輸入之初始條件為假設之均勻波譜場，每日作業化風浪模擬輸入之初始條件(或熱啟動條件)為前日作業化模擬過程產生的第 24 小時模擬結果之方向波譜場資料。

近域及澎湖海域近岸風浪模擬：初次風浪模擬輸入之初始條件為模式穩態模擬結果之方向波譜場，每日作業化風浪模擬輸入之初始條件為前日作業化模擬過程產生的第 24 小時模擬結果之方向波譜場資料。

5. 模擬結果輸出

本文遠域、近域及近岸風浪模擬結果輸出之主要波浪參數包括示性波高(H_s)、平均週期(T_{m-1} 、 T_{m02})、平均波向及譜峰週期(T_p)等，各波浪參數之波譜計算定義如下：

(1) 波浪能譜 $E(f, \theta)$ 之 n 階動差(M_n)：

$$M_n = \int f^n E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (3)$$

(2) 示性波高(H_s)：

$$H_s = 4\sqrt{E_0} = 4\sqrt{M_0} \quad (4)$$

(3) 平均週期(T_m 或 T_{m-1})，採用-1 階動差(M_{-1})定義風浪平均週期，即

$$T_m = M_{-1}/M_0 \quad (5)$$

(4) 平均週期(T_{m02})：採用零階動差與 2 階動差比值平方根定義風浪平均週期，即

$$T_{m02} = \sqrt{M_0/M_2} \quad (6)$$

(5) 平均波向：定義為

$$\langle \theta \rangle = \tan^{-1}(SF/CF) \quad (7)$$

其中

$$SF = \int \sin \theta \cdot E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (8)$$

$$CF = \int \cos \theta \cdot E(f, \theta) df \cdot d\theta \quad (9)$$

(6) 譜峰週期(T_p)：以不連續波浪能譜 $E(f_i)$ 之最大能量頻寬(bin)之不連續頻率 f_p 定義波浪之譜峰週期，即

$$T_p = 1/f_p \quad (10)$$

3.5 風浪模擬結果與驗證

本文以 2015 年 8 月侵臺中度颱風蘇迪勒為例，利用港研中心 TaiCOMS 每日作業化組合風場 WA02 及 WA03 資料執行澎湖海域風浪模擬。圖 9 所示為侵臺中度颱風蘇迪勒之行進路徑，顯示蘇迪勒颱風影響臺灣最劇烈時間為 8 月 7 日 18 時至 8 日 18 時。本文選取港研中心安平港及澎湖港龍門尖山港區、水利署澎湖資料浮標以及中央氣象局東吉島波浪測站等四組颱風期間波浪觀測資料，驗證中尺度近域風浪及小尺度澎湖海域風浪模擬結果，圖 10 所示為本文中尺度及小尺度網格風浪模擬

結果輸出點位置圖，顯示小尺度網格因具有較高的解析度，故輸出點位較接近波浪測站位置。

本文中尺度近域風浪及小尺度澎湖海域風浪示性波高模擬結果與觀測資料比較結果，如圖 11 至圖 14 所示；整體而言，蘇迪勒颱風期間，示性波高模擬值與變化趨勢以澎湖資料浮標測站比較結果吻合度最佳，龍門尖山港區小尺度風浪模擬結果明顯優於中尺度風浪模擬結果。此外，龍門尖山港區、東吉島及安平港三測站 8 月 7 日模擬結果均與觀測值間呈現出較大的偏差及變化趨勢，推測可能為海面預報風場強度有明顯高估現象所致之結果。本文小尺度澎湖海域近岸風浪模擬因計算網格解析度較高，網格地形水深資料亦較 ETOPO1 精確，因此可獲得解析度及精確性較高的模擬風浪場，如圖 15 所示；圖中鄰近澎湖群島及臺灣本島近岸海域，本文小尺度網格模擬之波浪場明顯較能呈現陸地的影響。因此本文建構的三層巢狀網格風浪模擬系統可以提昇港研中心 TaiCOMS 風浪模擬結果之精確性。

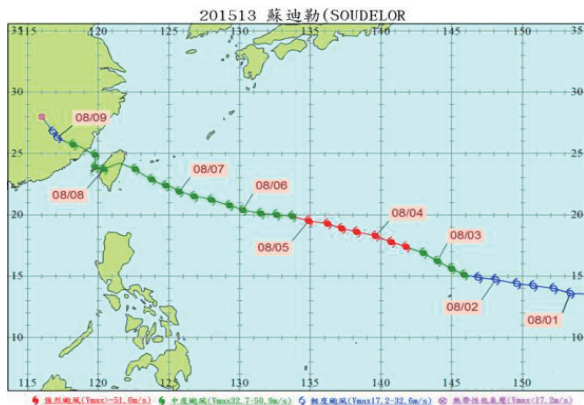


圖 9 2015 年侵臺中度颱風蘇迪勒行進路徑圖

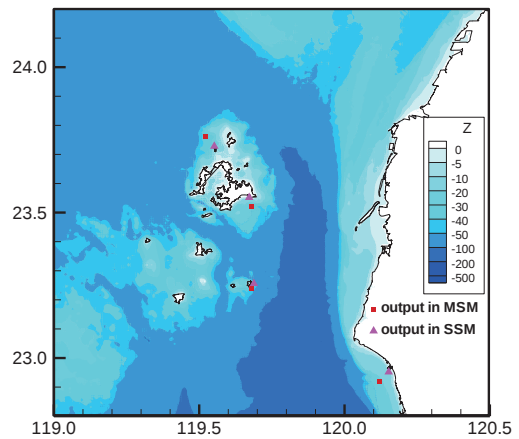


圖 10 中尺度及小尺度網格風浪模擬結果輸出點位置圖

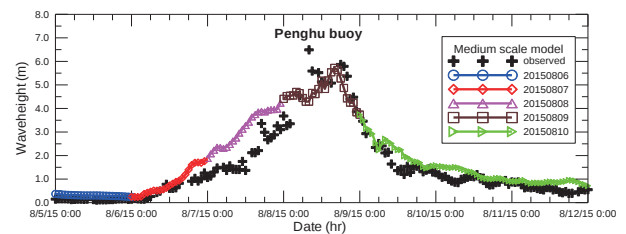


圖 11a 中尺度近域風浪示性波高模擬值與澎湖資料浮標觀測值之比較圖

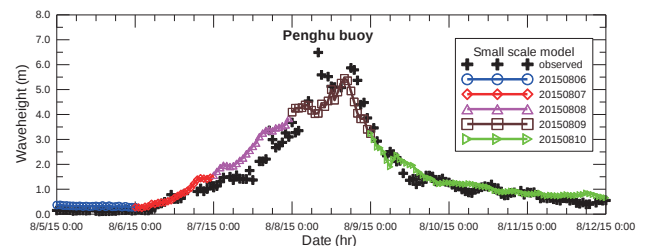


圖 11b 小尺度澎湖海域風浪示性波高模擬值與澎湖資料浮標觀測值之比較圖

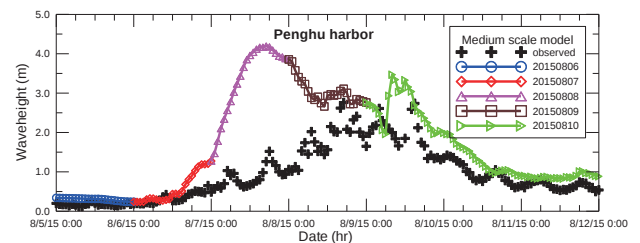


圖 12a 中尺度近域風浪示性波高模擬值與澎湖港龍門尖山港區觀測值之比較圖

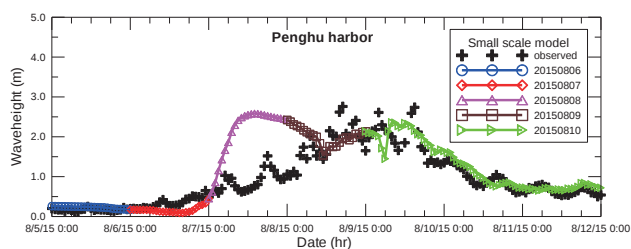


圖 12b 小尺度澎湖海域風浪示性波高模擬值與澎湖港龍門尖山港區觀測值之比較圖

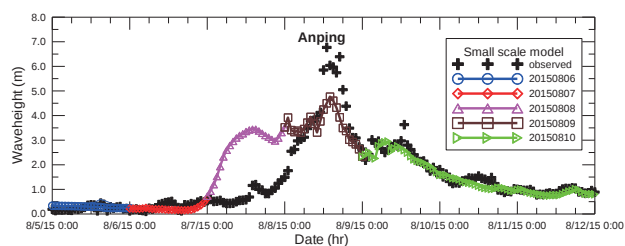


圖 14b 小尺度澎湖海域風浪示性波高模擬結果與安平港觀測值之比較圖

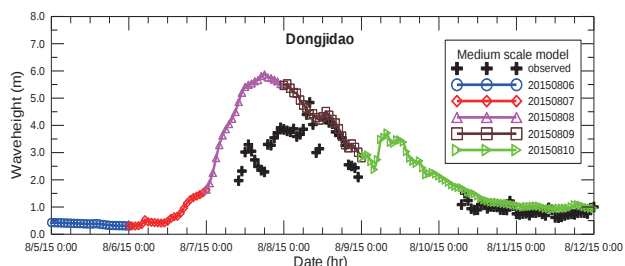


圖 13a 中尺度近域風浪示性波高模擬結果與東吉島觀測值之比較圖

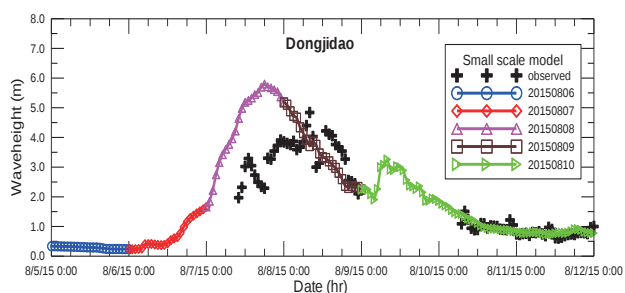


圖 13b 小尺度澎湖海域風浪示性波高模擬結果與東吉島觀測值之比較圖

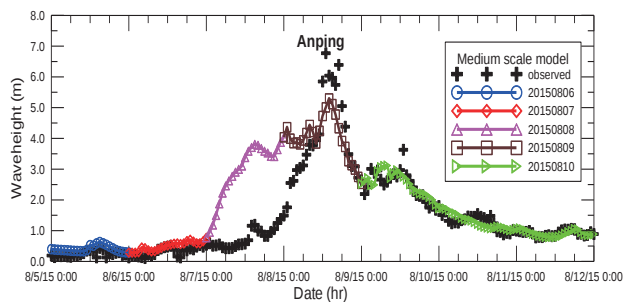


圖 14a 中尺度近域風浪示性波高模擬結果與安平港觀測值之比較圖

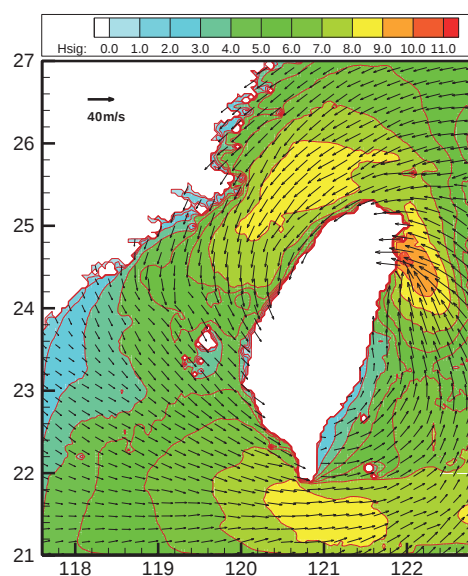


圖 15a 中尺度近域風浪模擬之預報風速向量場及模擬波場之示性波高分布圖

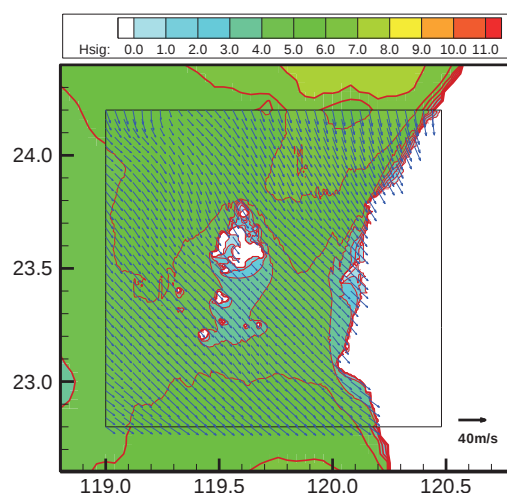


圖 15b 小尺度澎湖海域風浪模擬之預報風速向量場及模擬波場之示性波高分布圖

四、澎湖海域水動力模擬系統

為提供澎湖海域細緻化水位及流場作業化模擬資訊，本文以有限元素二維水動力數值模式建構澎湖海域水動力模擬系統，如圖 16 所示；整體模擬架構包含中尺度臺灣周圍海域(簡稱中尺度)水動力模組及小尺度澎湖海域(簡稱小尺度)水動力模組，其中澎湖海域水動力模組之開放邊界水位條件將由臺灣周圍海域水動力模組模擬結果產生。

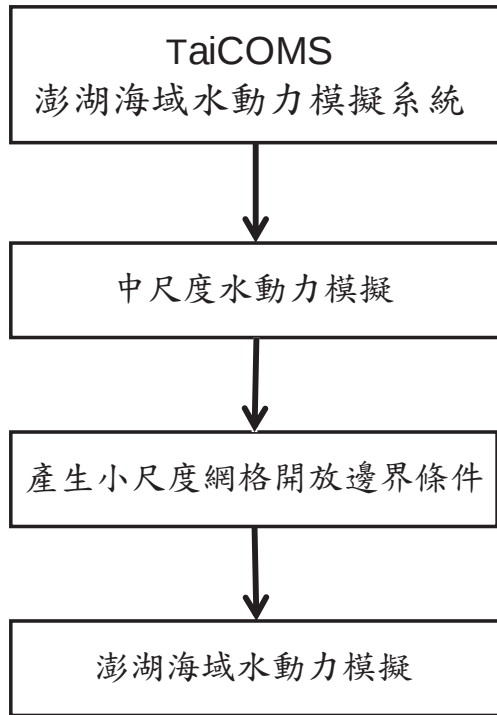


圖 16 澎湖海域水動力模擬系統整體模擬架構圖

4.1 有限元素二維水動力模式介紹

假設水體為具有黏滯性之不可壓縮流體，將描述流體運動之三維連續方程式及運動方程式，沿水深方向垂直積

分，同時加入底部和表面的邊界條件，則可得到下列的平面二維流場連續方程式及運動方程式：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = Q_0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}q_x)}{\partial y} - f q_y \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^s - \tau_x^b) \\ + \left(\frac{\partial F_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}q_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}q_y)}{\partial y} - f q_x \\ = -\frac{H}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} (p^s + \rho g \eta) + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^s - \tau_y^b) \\ + \left(\frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$H = \int_{-h}^{\eta} dz = h + \eta \quad (14)$$

$$q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}H \quad (15)$$

$$q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}H \quad (16)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} u dz \quad (17)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{(h + \eta)} \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (18)$$

$$F_{ij} = E_{ij}(q_{j,i} + q_{i,j}) \quad i, j = x, y \quad (19)$$

$$\tau_i^b = C_f (q_x^2 + q_y^2)^{1/2} \frac{q_i}{H^2} \quad i = x, y \quad (20)$$

$$\tau_i^s = \rho_a C_d |U_{10}| U_i \quad i = x, y \quad (21)$$

式中 H 為總水深， h 為靜水深， η 為水位變化， q_x 、 q_y 分別為水體在 x 及 y 方向之流量， $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分別為 x 及 y 方向之平均流速， Q_0 為單位面積水體質量增加率， g 為重力常數， p^s 為水面大氣壓力， ρ_0 為流體平均密度， τ_x^b 、 τ_y^b 分別為 x 及 y 方向之底床剪應力， τ_x^s 、 τ_y^s 分別為 x 及 y 方向之表面風剪應力， C_f 為底床擦係數，引用 Manning 公式可得 $C_f = ng/H^{1/3}$ ， n 為曼寧係數， C_d 為風力係數，其值為 $(1.1+0.0536U_{10})10^{-3}$ ， U_{10} 為海面上 10 公尺處之風速， E_{ij} 為渦動黏滯係數(Eddy coefficient)， f 為柯氏力參數(Coriolis parameter)，等於 $2\omega\sin\phi$ ， ω 為地球自轉之位相速度， ϕ 為計算領域所在位置之緯度。

針對上述控制方程式採用有限元素法求解，即配合邊界條件利用加權殘差方法將上述方程式轉化成積分方程式，再將所要計算之領域任意分割成許多副領域(稱之為元素)，利用線性三角形元素之形狀函數來描述計算領域中之函數變化，進而將積分方程式離散化，並簡化為聯立的數值方程組，藉以求解計算領域中所取元素節點上之函數值。在時間項的處理上，則以二階段顯式法對連續方程式及動量方程式作積分計算。

4.2 數值計算網格

本文中尺度臺灣周圍海域水動力模組及小尺度澎湖海域水動力模組之模擬範圍，如圖 17 所示。圖中臺灣周圍海域水動力模組模擬範圍為含蓋東經 $116.5^\circ \sim 125^\circ$ 及北緯 $21^\circ \sim 26.5^\circ$ 之海域，模式採用的有限元素計算網格係由 8237 個節點及 15800 個三角形元素組

成，如圖 18 所示。澎湖海域水動力模組採用的數值計算網格係由 4,159 個節點及 7,807 個三角形元素組成，如圖 19 所示，其中澎湖群島陸地部份除了以澎湖本島、白沙嶼及西嶼為主要對象外，尚包含了吉貝嶼、桶盤嶼、虎井嶼、望安島及鄰近的將軍嶼等小島。

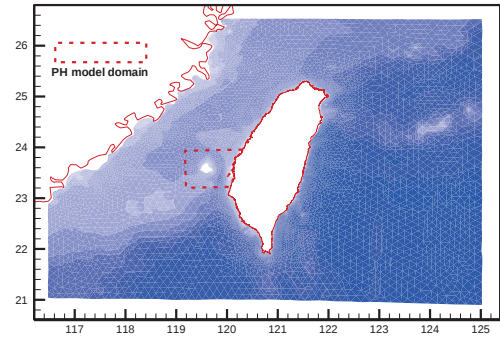


圖 17 本研究近域臺灣周圍海域及近岸澎湖海域(粗虛線)水動力模組之模擬範圍圖

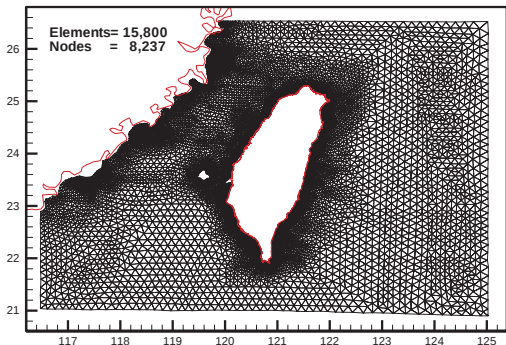


圖 18 近域臺灣周圍海域水動力模組之三角形元素網格分布圖

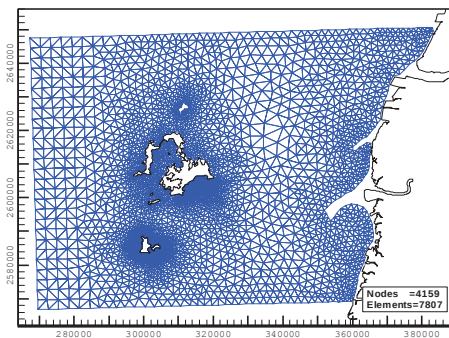


圖 19 近岸澎湖海域水動力模式之三角形元素網格分布圖

4.3 邊界條件及初始條件

本文水動力數值模式之邊界可分為海域開放邊界及陸地邊界兩種型態，其中陸地邊界之邊界條件又可區分為(1)滑動邊界條件及(2)不滑動邊界條件。前者假設陸地邊界節點垂直方向之流速或流量($q_n=0$)等於零，後者假設陸地邊界節點流速等於零，即 $u=0$ 且 $v=0$ 。海域開放邊界則採用水位條件為模式邊界條件。有關中、小尺度水動力模組之模式邊界條件使用說明如下：

1. 中尺度水動力模組

假設其陸地邊界為不滑動邊界，海域開放邊界假設其水位等於

$$\eta = \eta_a(t) + \frac{\Delta P(t)}{\rho g} \quad (22)$$

式中 $\eta_a(t)$ 代表天文潮引起的水位變化，第二項代表氣壓變化引起的水位變化。其中天文潮引起的水位變化，本文利用 Matsumoto et al.(2000)發展的 NAO.99Jb 模式，預測數值計算網格開放邊界各節點天文潮水位時序列資料，如圖 20 所示。圖中水位時序列變化分別代表數值計算網格(參考圖 18)開放邊界上四個角落節點之天文潮時序列資料，顯示數值計算網格左上角臨近陸地(中國大陸)之開放邊界節點天文潮位呈現半日潮型，臺灣東部太平洋海上開放邊界節點之天文潮位屬於混合潮型態，西南角落開放邊界節點之天文潮位則呈現全日潮型態。

有關氣壓項引起的水位變化，本文採用港研中心 TaiCOMS 之作業化風壓

場資料 WA02(網格解析度為 $1/12^\circ$ 或 $5'$)，計算開放邊界節點因氣壓變化引起的水位抬昇或下降量。

2. 小尺度水動力模組

針對小尺度水動力模組之陸地邊界，本文採用滑動邊界條件，即 $q_n=0$ ；開放邊界之水位邊界條件則利用中尺度水動力模組之水位模擬結果產生，如圖 21 所示。

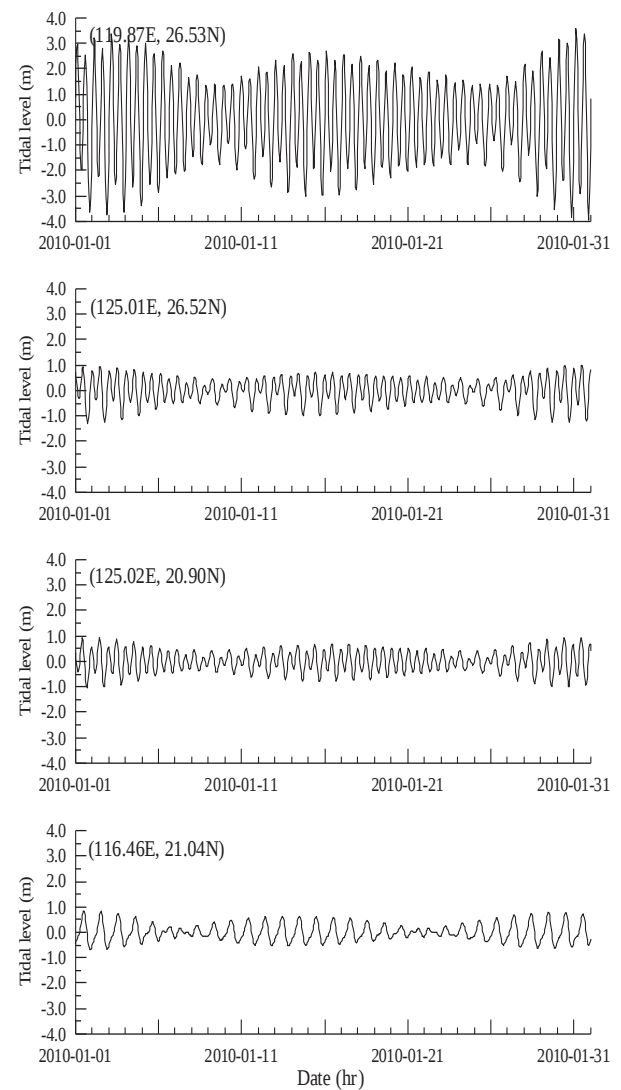


圖 20 近域臺灣周圍海域水動力模組開放邊界節點之天文潮水位資料時序列圖

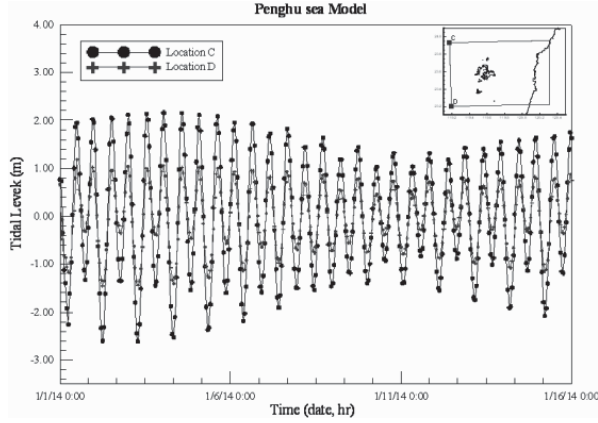


圖 21 近岸澎湖海域水動力模組開放邊界之水位資料時序列圖

4.4 模式物理參數設定

本文水動力模式之模擬時間間距(Δt)與網格三角形元素最小尺度有關，且需滿足下列條件式(23)

$$\Delta t < 1.5 \Delta t_{cr} = 1.5 \Delta s^* / U^* \quad (23)$$

式中 Δs^* 為代表性網格大小， $U^* = \sqrt{2gH}$ ， H 為水深(m)， g 為重力加速度。經測試後，本研究中尺度及小尺度水動力模組採用的時間間距 Δt 分別為 4sec 及 3sec。

模式渦動粘滯性係數建議採用 Connor and Wang (1975) 提出之經驗公式(24)推估，

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \quad (24)$$

式中 E_{xx} 為渦動粘滯性係數，其單位為 m^2/s ， a 為無因次係數，其合理的範圍介於 0.01~0.1 之間； $\tilde{\eta}$ 為潮汐代表性潮差， $\tilde{u}$ 為潮流代表性流速， $\tilde{x}$ 為三角元素代表性邊長。

1. 中尺度水動力模組

本文選取無因次係數 $a = 0.025$ ，代表性潮差 $\tilde{\eta} = 1.20$ m，潮流代表性流速 $\tilde{u}$ 為 0.5 m/s，先估算中尺度計算網格各元素之渦動粘滯係數值；之後，再經由模式模擬結果驗證程序率定渦動粘滯係數值。

2. 小尺度水動力模組

假設 $a = 0.02$ 、 $\tilde{\eta} = 1.50$ m 及 $\tilde{u} = 0.5$ m/s 先估算小尺度計算網格各元素之代表性渦動粘滯係數值。同樣地，經由模式模擬結果驗證程序率定渦動粘滯係數值。

4.5 模擬結果與驗證

1. 中尺度水動力模組

本文中尺度臺灣周圍海域水動力模擬主要目的為提供小尺度澎湖海域水動力模擬輸入之開放邊界水位條件，因此模式之模擬結果驗證分為天文潮水位模擬驗證及颱風期間水位模擬驗證，其中前者係指在不考慮風場及氣壓等氣象因素之水位模擬結果，後者採用 TaiCOMS 每日作業化組合風壓場資料 WA02 作為模式輸入之風場及氣壓場。

針對中尺度水動力模組臺灣周圍海域天文潮水位擬結果，本文選取花蓮港、蘇澳港、基隆港、臺北港、臺中港及高雄港等主要商港水位觀測資料(港研中心測站，IHMT)進行比較，如圖 22 所示；圖中天文潮位模擬時間為 2015 年 1 月 1 日零時至 16 日零時，顯示本文模式水位模擬值不僅與各港口觀測值相近似，且水位模擬變化趨勢亦與各港口觀測值之變化趨勢相當一致。天文潮水位模擬值與觀測值間之均方根誤差(root mean square error, RMSE)逐月

近似固定的流向誤差，研判此應與數值計算網格解析度與地形水深變化無法反映出實際現況有關。

針對小尺度澎湖海域流場模擬結果，本文分別繪出退潮及漲潮時段平面流場向量圖，如圖 25 及圖 26 所示。圖 25 平面流場顯示退潮階段潮流流向主要呈現出由北往南特性，且潮流流經澎湖本島東西側之潮流會在澎湖本島南側海域匯合後再往南流。圖 26 平面流場呈現漲潮階段潮流由南往北之特性，潮流流經澎湖本島南側海域，受到地形阻礙影響而呈現出分流狀，分別往東、往西沿著海岸地形往北流動再匯流。

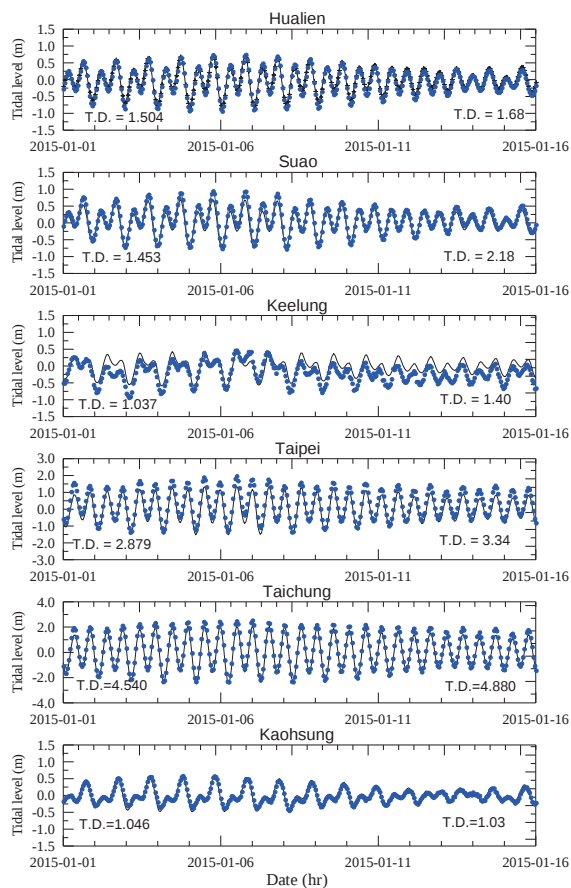


圖 22 中尺度臺灣周圍海域水動力模組天文潮水位模擬結果(實線)與主要商港潮位觀測值(圓點)比較圖

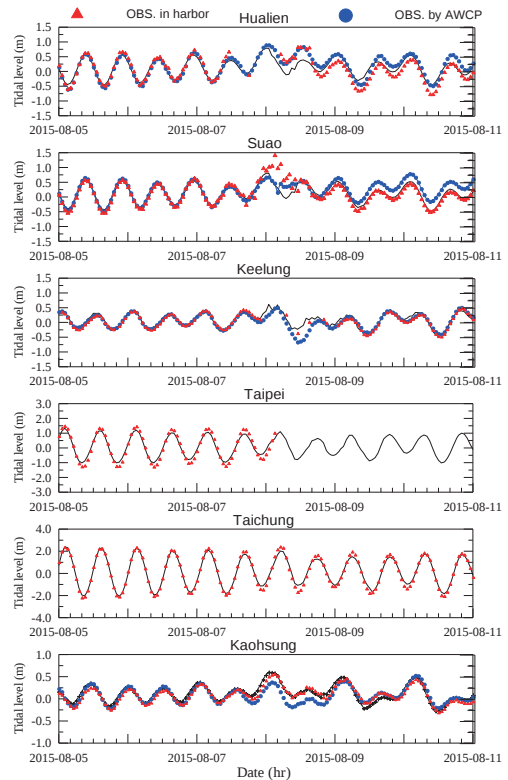


圖 23 2015 年中度颱風蘇迪勒侵臺期間中尺度水動力模組水位模擬結果與觀測資料之比較圖

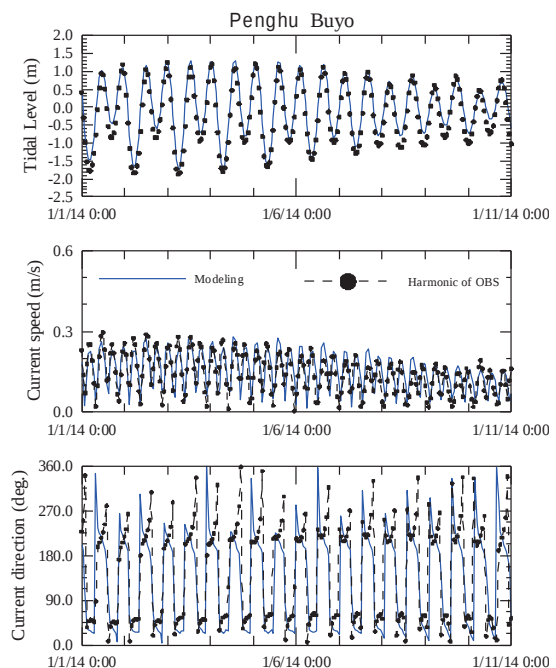


圖 24 小尺度澎湖海域水動力模組水位及潮流流速、流向之模擬驗證圖

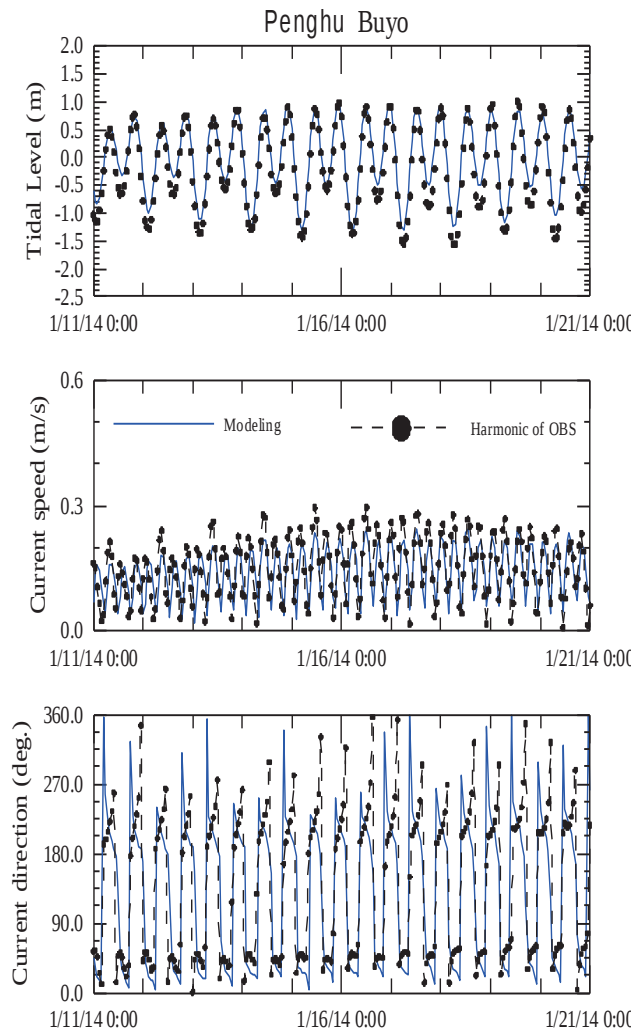


圖 24 (續)小尺度澎湖海域水動力模擬水位及潮流流速、流向之模擬驗證圖

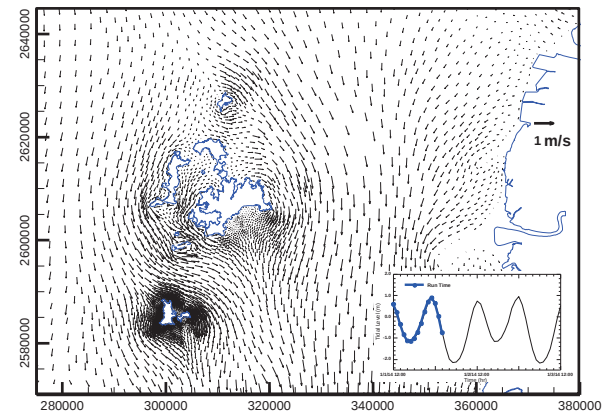


圖 25 小尺度澎湖海域水動力模擬水位及潮流流速、流向之模擬驗證圖

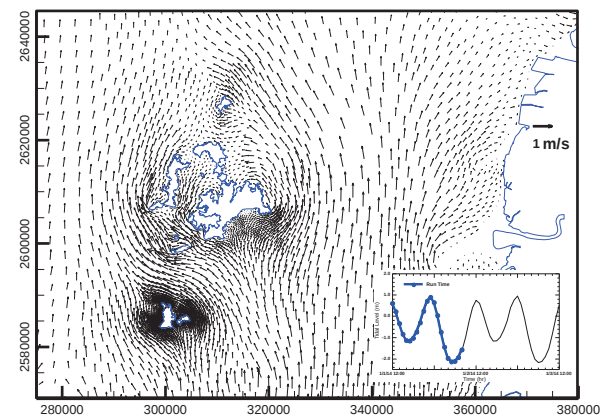


圖 26 小尺度澎湖海域水動力模擬水位及潮流流速、流向之模擬驗證圖

五、結論

針對澎湖海域波浪、水位及流等海象模擬，本文分別提出三層巢狀網格風浪模擬系統及結合中尺度臺灣周圍海域水動力模擬及小尺度澎湖海域水動力模擬之水動力模擬系統。本文風浪模擬系統整體模擬架構分為大尺度遠域風浪模擬、中尺度臺灣周圍海域風浪模擬及小尺度澎湖海域近岸風浪模擬等

三部份，其中小尺度網格模擬結果可提供澎湖群島與臺灣本島間海域細緻化及較精確性之高風浪模擬資訊。

水動力模擬系統整體模擬架構分為大尺度水動力模擬及小尺度水動力模擬兩部份，其中中尺度水動力模擬之水位模擬結果將提供小尺度水動力模擬之開放海域邊界條件。同樣地，本文

小尺度澎湖海域水動力模擬結果可提供澎湖群島與臺灣本島間海域細緻化及較精確之水位及流場模擬資訊。

整體而言，本文建構的澎湖海域風

浪、水位及流場等海象細緻化模擬資料，將可應用於本島與澎湖離島藍色公路，以提供船舶即時海象資訊，保障船舶交通航行安全。

六、參考文獻

1. 李忠潘、邱永芳、陳陽益、于嘉順、蘇青和、劉正琪、林炤圭、張憲國、王兆璋，近岸數值模擬系統之建立(III)，交通部運輸研究所，中華民國 95 年 11 月。
2. 李良輝、曾清涼(2005) 澎湖群島島嶼數量與委託清查計畫報告書，澎湖縣政府，51 – 53 頁。
3. 李兆芳、邱永芳、劉正琪、蘇青和、陳明宗、李俊穎、唐宏結、江朕榮、謝佳紘，「海氣象自動化預報模擬系統作業化校修與維運」，交通部運輸研究所研究報告，2016 年 3 月。
4. Connor, J.J., and Wang, J.D. (1975) Mathematical Modelling of Near Coastal Circulation, Pentech Press.。
5. Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M., (2000) “Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan,” J. Oceanogr., Vol. 56, pp. 567-581.
6. WAMDI Group (1988) “The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model,” Journal of Physical Oceanography, Vol. 18, pp. 1775-1810.