

基隆海域風浪及港域靜穩模擬系統

劉正琪¹ 傅怡釗² 李兆芳³ 林雅雯⁴

¹國立成功大學水工試驗研究所研究員

²交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

³國立成功大學水工試驗所研究教授

⁴交通部運輸研究所港灣技術研究中心簡任研究員兼科長

摘要

基隆港為北臺灣首要海運樞紐、臺灣重要國際商港之一，亦是臺灣海軍及漁業基地，兼具商港貿易及軍事戰略功能。港域波浪在夏、秋季期間，易受西太平洋颱風之風（湧）浪影響，在冬季期間，又因東北季風盛行而港域不靜穩，進而影響碼頭船舶靠泊及裝卸作業安全，故掌握基隆港域波浪靜穩情形，有其必要性。

本研究於交通部運輸研究所（以下簡稱運研所）發展的「臺灣近岸海象預測系統 2.0」（TaiCOMS 2.0）基礎上，利用第三代波譜風浪模式 WAM、SWAN 及港域波浪模式 FEMHW，先建置基隆海域風浪模擬系統，以作業化方式每日提供基隆海域較細緻之風浪模擬預測資訊，再輸入至基隆港域靜穩模擬系統做為外海波浪條件，以此方式將基隆海域風浪模擬及港域靜穩模擬銜接、串聯成系統，並模擬 2021 年璨樹颱風期間，當颱風沿東部近海北上接近基隆海域時，基隆港港口示性波高最大模擬值出現的時間較觀測值約晚 2 小時，整體港內波浪模擬結果能反應出颱風行進路線及港內遮蔽影響，初步提供基隆港靜穩情形，後續仍須持續進行模式校驗與精進工作。研究目的主要為提供基隆港港區波高模擬預測資訊，俾利臺灣港務股份有限公司能預先研判碼頭區水位靜穩狀況並及早應變。

一、前言

基隆港位於臺灣北部為貨櫃首要吞吐港，其港形類似漏斗狀，北寬南窄，港口外廓分別建有東、西防波堤以阻擋波浪侵襲，其中東防波堤朝向約為北偏西 13°。港內共有 56 座碼頭，分別為現有貨櫃碼頭 14 座，做為東岸、西岸貨櫃儲運場，每年可裝卸 200 萬至 300 萬 TEU 貨櫃；散雜貨碼頭 21 座，供汽車、遊艇、鋼鐵等貨物裝卸並另設有水泥、油品及其他散貨碼頭；客運碼頭 6 座，可同時靠泊國際豪華客輪 2 艘；非營運碼頭 15 座，提供基隆港所有港勤船及工程船、軍、巡、緝私艦等靠泊，基隆港及各碼頭類別分布，如圖 1 所示。

商港船舶進出港管制作業主要視外海風、浪及港內波浪靜穩情形而定，基隆港冬季受東北季風影響，夏秋季節易遭受颱風侵襲，風浪對港口營運影響顯著，為掌握基隆港域波浪情形，本研究建置基隆海域風浪及港域靜穩模擬系統，初步探討基隆港域於璨樹颱風期間之靜穩情況。

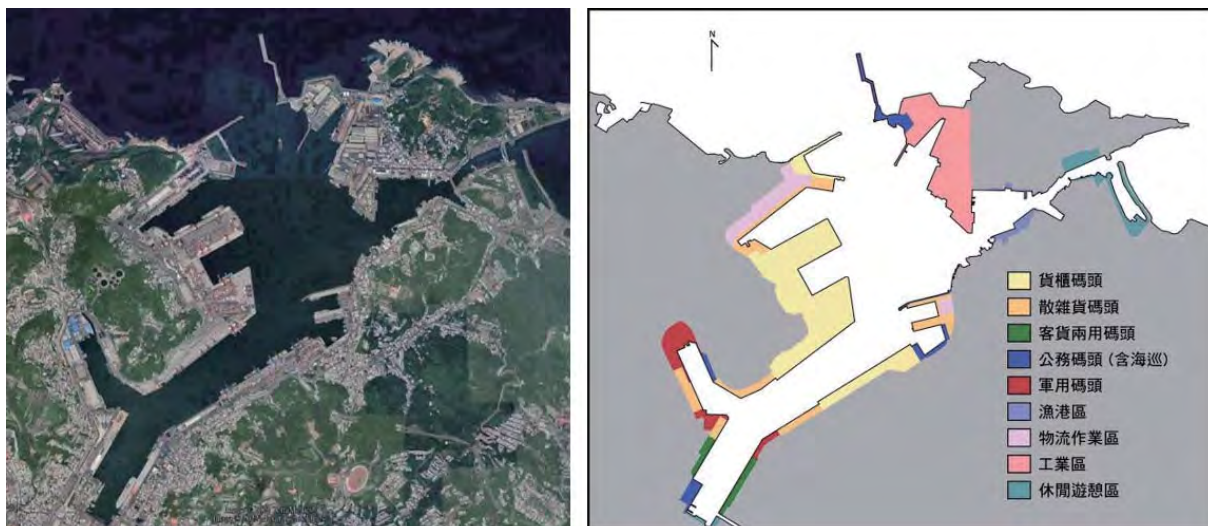


圖 1 基隆港區及各碼頭類別位置分布圖

二、基隆海域風浪模擬系統

本研究在 TaiCOMS 2.0 系統基礎上，利用第三代波譜風浪模式 WAM 及 SWAN 建構混合數值模式之基隆海域風浪模擬系統，整體模擬架構包含遠域風浪模擬、近域風浪模擬及基隆海域風浪模擬（近海風浪模擬）等 3 階段，如圖 2 所示，其中遠域風浪模擬採用 WAM 模式，近域風浪模擬及基隆海域風浪模擬採用 SWAN 模式。

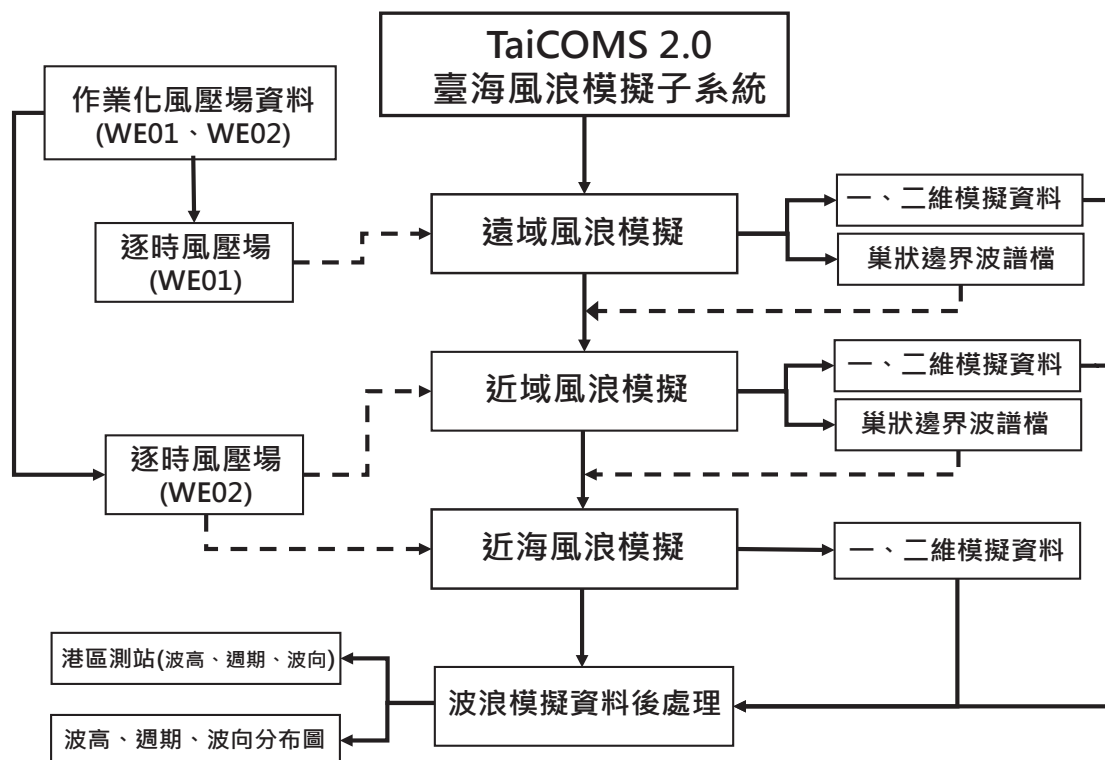


圖 2 基隆海域風浪模擬系統之架構圖

2.1 基隆海域風浪模組建置

本節說明基隆海域風浪模擬所需之數值模組，包括遠域風浪模組（WPsea）、近域風浪模組（TAIsea）及近海風浪模組（基隆海域，KLsea）等模組相關建置資訊。

2.1.1 模組計算網格及數值水深

為提供細緻化的基隆海域風浪模擬結果，採用規則方格網構建遠域、近域及近海等 3 層巢狀計算網格，如圖 3 所示；圖中第 1 層遠域網格之模擬範圍為西太平洋北緯 10°至 35°，東經 110°至 145°之海域；第 2 層近域網格含蓋臺灣周圍海域，其模擬範圍為北緯 20.6°至 28.0°，東經 117.6°至 123.6°之海域；第 3 層近海網格之模擬範圍為臺灣基隆海域北緯 25.00°至 25.80°，東經 121.56°至 122.40°之海域。3 層巢狀網格採用的網格間距（或解析度）及維度大小，如表 1 所列，表中遠域、近域及近海網格解析度分別為 0.2°、0.04°及 0.008°，即採用 1:1/5:1/25 等比方式建構 3 層巢狀網格。

遠域網格水深資料採用 ETOPO1 地形水深數值資料建置，近域網格水深資料則利用 ETOPO1、臺灣海洋科技研究中心（以下簡稱海科中心）500m 及 200m 網格之地形水深數值資料建置，如表 2 所示，基隆海域近海網格水深資料則採用海科中心 200m 網格數值地形水深資料、內政部民國 95 年海域水深測量資料及基隆港民國 109 年港區水深測量資料等建置。

表 1 基隆海域風浪模擬之計算網格資訊表

網格名稱	模擬範圍		解析度 (°)	網格維度
	經度 (°) 最小值/最大值	緯度 (°) 最小值/最大值		
遠域網格	110.00/145.00	10.00/35.00	0.200	176×126
近域網格	117.60/123.60	20.60/28.00	0.040	151×186
近海網格	121.56/122.40	25.00/25.80	0.008	106×101

表 2 海科中心臺灣周圍海域數值水深網格資料表

數值水深格式	範圍		解析度 (m)	格點數
	經度 (°) 最小值/最大值	緯度 (°) 最小值/最大值		
Taidp500m	117.0/125.0	18.0/27.0	500	1601×1801
Taidp200m	119.0/123.0	21.0/26.0	200	2001×2501

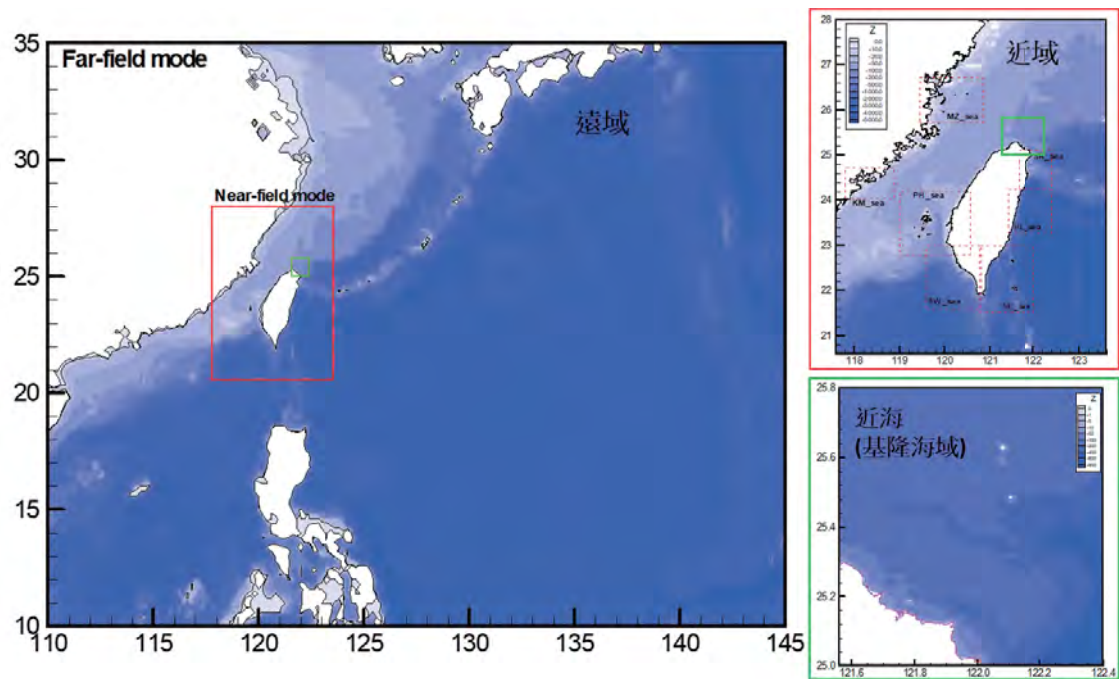


圖 3 基隆海域風浪模擬三層巢狀網格之模擬範圍圖

2.1.2 離散化方向譜

第三代波浪數值模式（如 WAM 及 SWAN）均採用方向譜描述海面風浪，故數值計算上常將波譜以固定的離散化方式表示。常見離散化頻寬（ $\Delta f/f$ ）為對數尺度，即 $f_{\max}/f_{\min} = (\Delta f/f)^{ML-1}$ ，其中 $f_{\max}$ 及 $f_{\min}$ 分別代表頻率軸之上、下限，ML 代表離散化之頻率數；波向離散方式則採用等間距，即 $360/KL$ ，KL 代表離散化之波向數。

遠域、近域及近海網格均以相同維度的離散化波譜模擬海面風浪，設定離散化之頻率維度 $ML=31$ 及波向維度 $KL=36$ ；其中波浪頻率下限（ $f_{\min}$ ）為 0.04Hz ，相當於波浪最大週期為 25 秒，離散化頻寬 $\Delta f/f = 1.1$ 。

2.1.3 開放海域邊界條件

本研究巢狀網格數值計算屬於單向嵌套（one-way nesting）概念，除最外層（第 1 層）遠域網格外，各層網格均由上一層網格風浪模擬結果，提供開放海域之邊界條件。因此，本研究遠域網格之開放海域邊界條件採用自然邊界條件（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，且波浪能量向外傳遞時，方向不變及能量無損失（free advection）傳到網格外；近域網格開放海域之邊界條件為遠域風浪模擬輸出之近域巢狀邊界格點風浪方向譜資訊；同理，基隆海域近海網格開放海域之邊界條件為近域風浪模擬輸出之近海巢狀邊界格點風浪方向譜資訊。

2.1.4 預報大氣風場

大氣風場為風浪模擬的驅動力，風場資料來源為交通部中央氣象局提供每日 4 次天氣數值

預報資料（WRF，Weather Research and Forecast）成員 M04，水平網格解析度分別為 15km 及 3km，經 TaiCOMS 2.0 系統處理、擷取每 1 次預報 06 時後之預報風場資料，再進行內插及重組，再分別產製水平網格解析度 $1/6^\circ$ 之西太平洋風壓場（WE01）及解析度 $1/30^\circ$ 之臺灣海域風壓場（WE02）2 類風壓場，如表 3 所示。TaiCOMS 2.0 採用臺灣標準時間重組作業化風場，其重組方式及架構如圖 4 所示，重組後預報風場長度為 56 小時（00~55），其中前 6 小時代表風浪追算時段風場，後 49 小時代表風浪預測時段預測風場。

表 3 港研中心 TaiCOMS 作業化風壓場網格資訊表

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

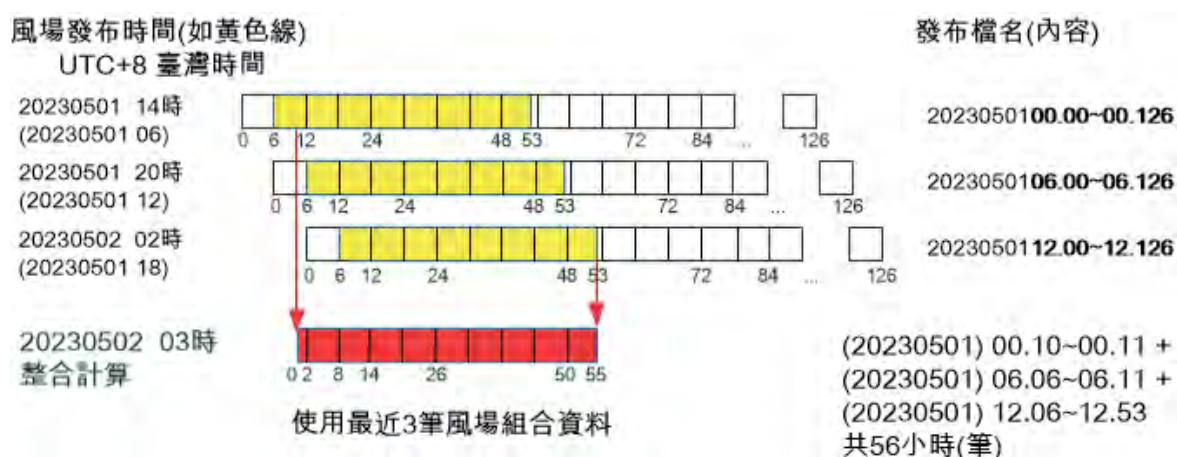


圖 4 TaiCOMS2.0 系統作業化預測風壓場重組方式示意圖

2.2 基隆海域風浪模擬結果檢驗

本研究以模擬 2021 年 14 號強烈颱風璨樹（CHANTHU）颱風期間為例，其發展及行進路徑如圖 5 所示，屬於第 6 類侵臺路徑；圖中顯示 9 月 8 日至 11 日其強度已發展為強烈颱風，但 11 日進入巴士海峽強度減弱為中度颱風，再沿臺灣東部外海往北至日本。

選取 2021 年 9 月 8 日 0 時至 9 月 15 日 0 時，TaiCOMS 每日 4 次作業化風場，擷取追算時段（0~6 時）風場資料以模擬基隆海域風浪場，使用運研所於基隆港外海設置之 AWAC 測站波浪觀測資料進行模擬結果校驗。因璨樹颱風路徑未經過基隆海域近海風浪模組模擬範圍，依據近域風浪模組風浪場模擬結果，繪出 12 日 0 時至 13 日 0 時、每 6 小時臺灣周圍海域風浪模擬之波高及波向（去向）分布圖，如圖 6（左圖）所示，圖 6（右圖）代表同一時間東亞紅外線雲圖。顯示 12 日 18 時颱風中心已來到臺灣北部海域，颱風強度亦明顯減弱。另由颱風中心附近波高分布情形得知，最大波高出現在颱風中心右上第一象限內。

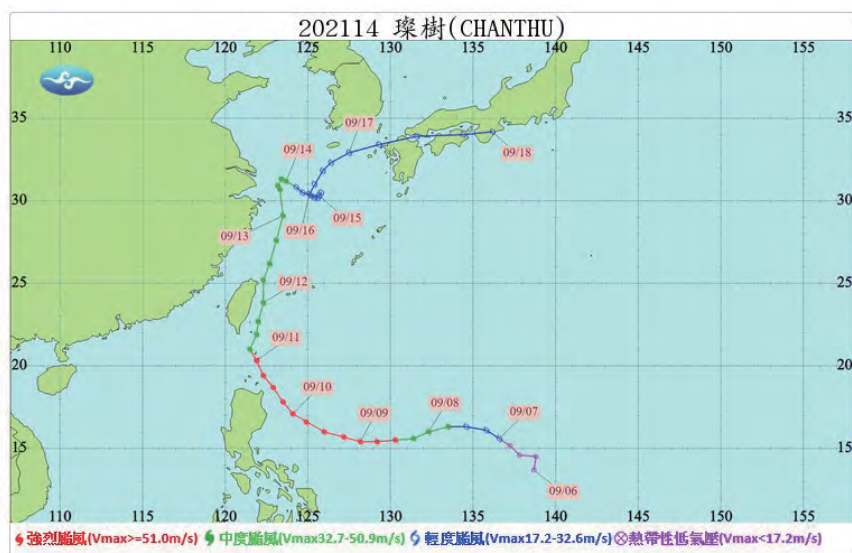
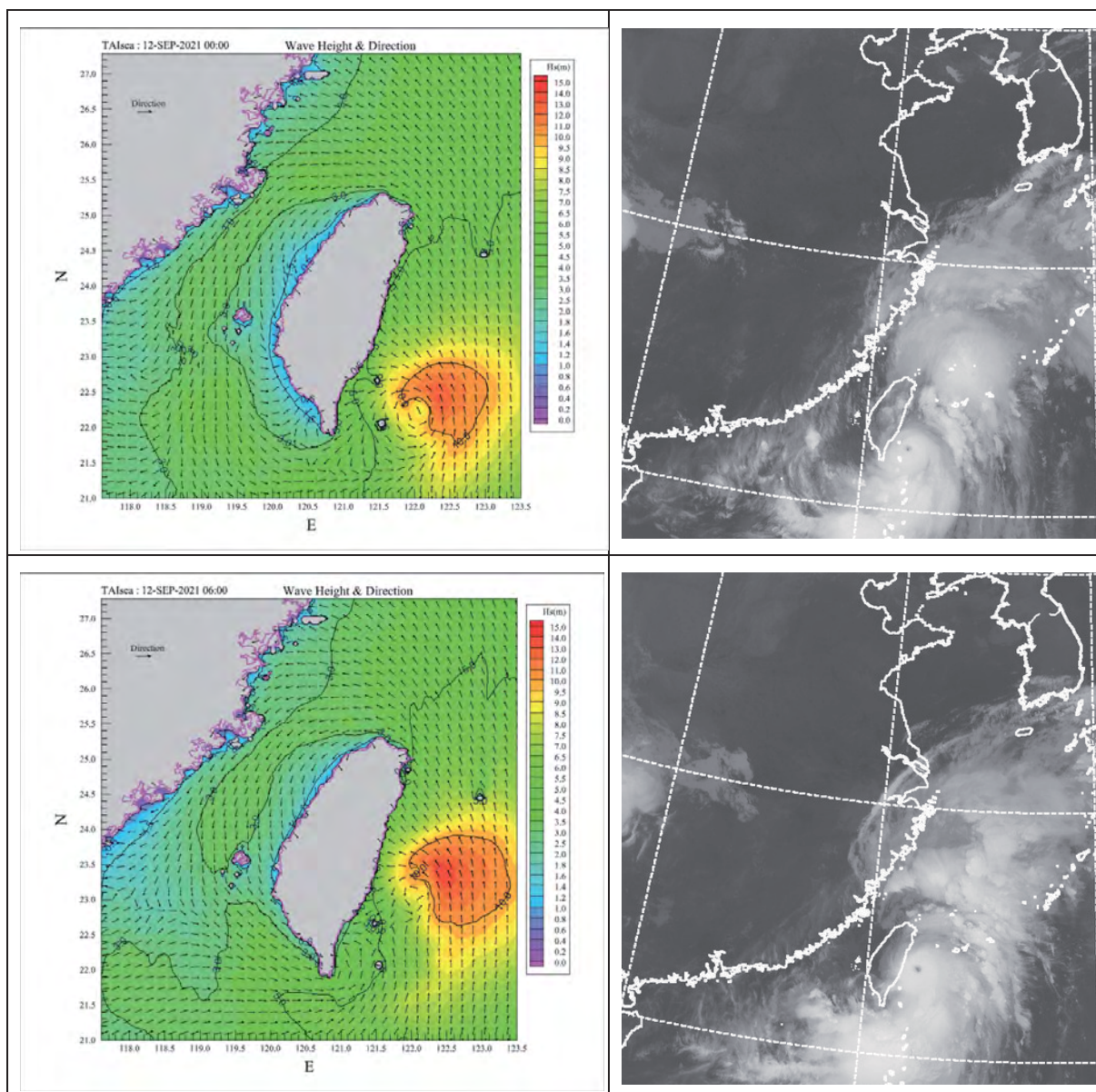


圖 5 編號 202114 璨樹 (CHANTHU) 颱風路徑圖



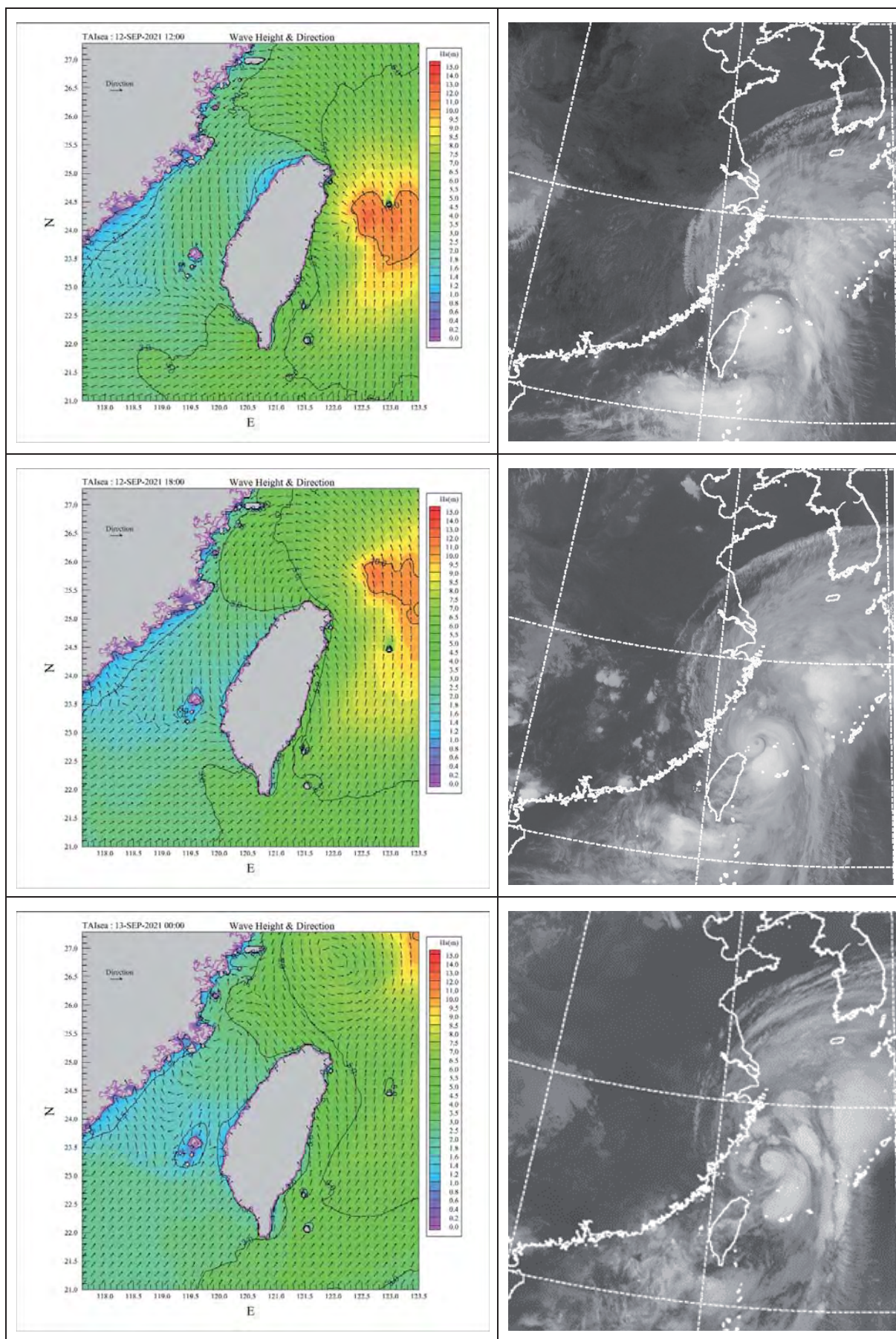


圖 6 璨樹颱風侵臺期間臺灣周圍海域風浪場模擬波高、波向分布及紅外線截圖

針對基隆海域近海風浪模組（KLsea）模擬結果，本研究選取鄰近 AWAC 測站之計算格點為檢核點，如圖 7 所示，輸出逐時風浪模擬資訊進行校驗。圖 8a 代表檢核點示性波高與 AWAC 觀測值之歷線比較，圖中檢核點示性波高歷線變化情形顯示，當颱風尚未進入巴士海峽向臺灣接近時，檢核點已受到颱風外圍環流影響，示性波高開始出現緩慢增大趨勢。直到 12 日 12 時之後檢核點示性波高才出現顯著增大現象，時間約落後觀測值 2 小時；18 時示性波高達到最大值 3.01m 後，檢核點示性波高變化轉逐漸變小，此與颱風逐漸遠離有關。圖 8b 及圖 8c 分別為檢核點平均週期與譜峰週期與 AWAC 測站觀測值之比較，結果顯示僅颱風接近基隆海域期間，檢核點平均週期模擬值與觀測值較為接近外，其餘時段模擬值均呈現偏低。此外，譜峰週期在 13 日 12 時呈現陡降現象，此時基隆港口鄰近海域波場轉為由風浪主導，此與觀測資料明顯不一致。圖 8d 為檢核點平均波向與 AWAC 測站觀測值之比較。

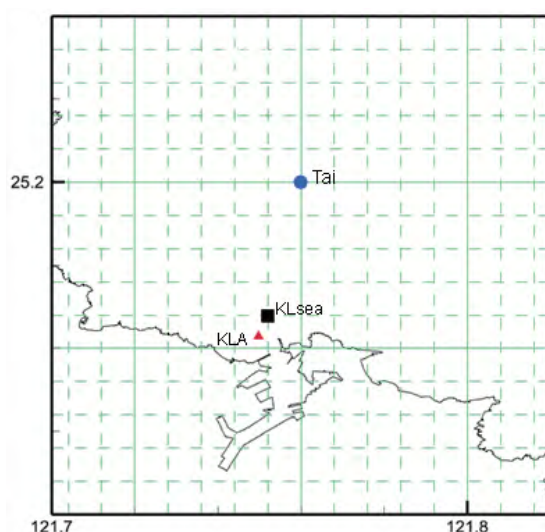


圖 7 基隆海域近海風浪模組檢核點及 AWAC 觀測站位置圖

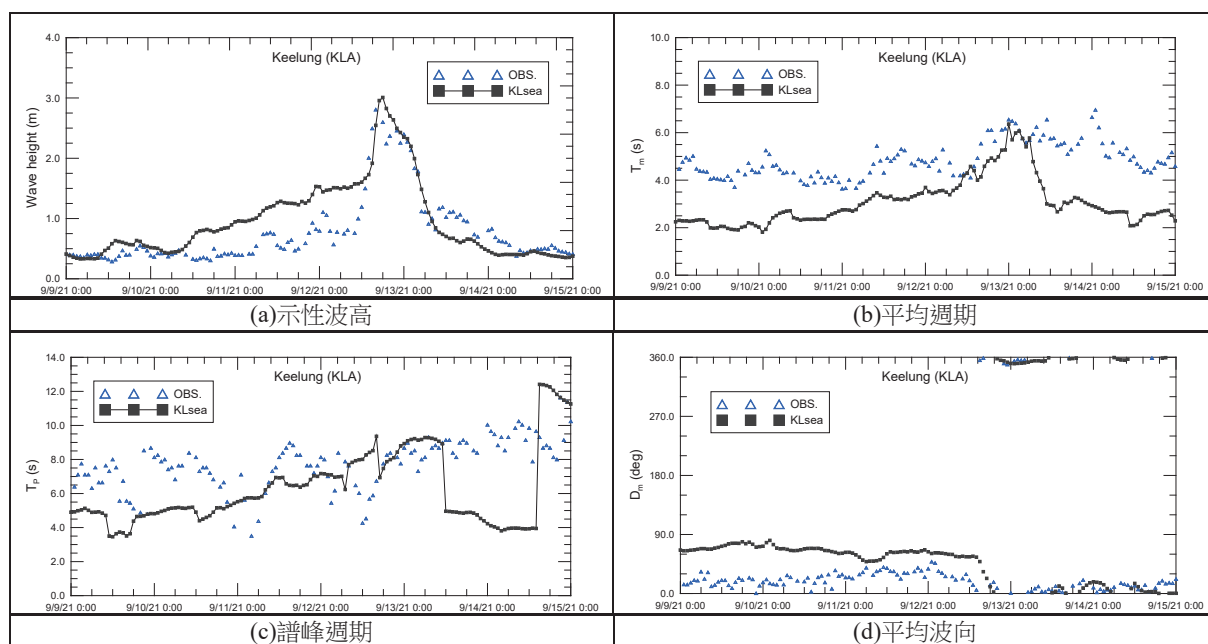


圖 8 璨樹颱風侵臺期間近海風浪模組模擬值與觀測值歷線比較圖

由圖 8 可知，示性波高最大模擬值出現的時間較觀測值約晚 2 小時，推測其原因，應為作業化預測風場與颱風實際移動的速度有時間落差；此外，風（湧）浪模擬週期表現較差之原因，可能涉及模式相關參數之適用性，表示模式仍需持續進行改善研究；至於波向出現較大偏差的原因，判斷應與近海風浪模組計算網格解析度不足有關。

三、基隆港靜穩模擬系統

在探討港池靜穩問題型態常分為 2 類，第 1 類因港池幾何形狀引起的港域水面盪漾，第 2 類則與港區構造物產生遮蔽效應所引起的水面蕩漾；前者水面盪漾多屬於長週期水位波動，其不易消除且影響船舶作業時間較長；後者的水面波動週期通常較小且與外海波浪相關性高，影響船舶作業時間相對較短。

本研究利用平面二維有限元素港域波浪模式 FEMHW^[3]，建構基隆港靜穩分析模組，並與前述基隆海域風浪模擬系統銜接，以作業化方式模擬港內波高分布情形。因 WAM 及 SWAN 所模擬的海面波浪，僅限於由海面風力引起的風（湧）浪，因此，本研究港內靜穩模擬屬於第 2 類。

3.1 基隆港靜穩分析模組

3.1.1 數值計算網格

依據基隆港外廓形狀、海岸線規劃及港域實測水深資料，建置基隆港靜穩分析模組（以下簡稱靜穩模組），模擬範圍及水深分布情形，如圖 9 所示，圖中港口外海假想半圓模擬範圍之半徑為 1,000m，外海最大水深超過 55m。基於港域波浪模式對計算網格要求需滿足最小模擬波長內至少有 8 個節點，因此，本研究設定外海模擬波浪最小週期為 8 秒，據此產生三角元素數值網格共計 128,240 個三角形元素及 65,243 個節點。

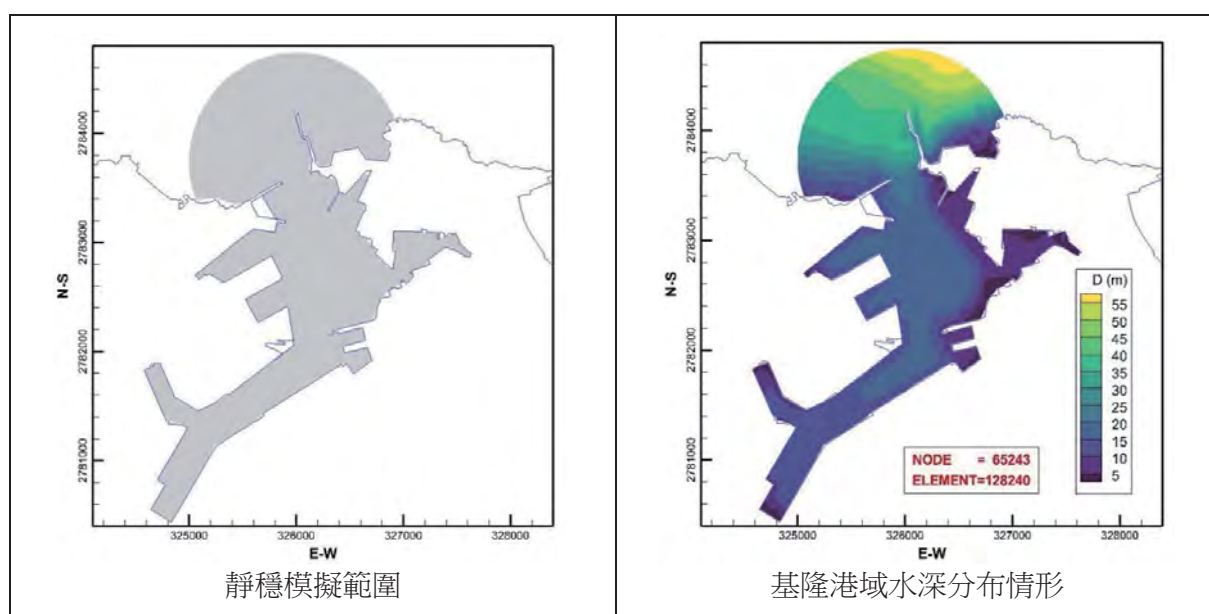


圖 9 基隆港靜穩分析模組模擬範圍及水深分布情形圖

3.1.2 消波區段及模擬輸出點位設定

基隆港目前港區既有消波設施以布置消波塊為主，其位置分布如圖 10（左圖）所示，爰針對消波塊分布區位之計算網格邊界，以試誤法方式設定適當的反射係數，讓靜穩模組在實際有佈置消波塊區段能反應出消波能力。另因基隆港共計 56 座碼頭，碼頭數量偏高，經洽詢臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司，模擬輸出點位需求為東 6 碼頭至東 12 碼頭、西 16 碼頭至西 18 碼頭以及西 27 碼頭等較為關注之碼頭，如圖 10（右圖）所示。東 6、東 7 碼頭長度均小於 200m，東 8～東 11 碼頭共線，總長 860m；東 12 碼頭位於第一船渠，供港勤船舶停靠；西 16～18 號碼頭共線，總長 620m，水深為-12～-13m；西 27 號碼頭長 150m，水深-7m，目前為砂石碼頭，為供東砂北運之專用碼頭。靜穩模組輸出前述點位波高模擬值，以統計方式分析區位內最大波高、平均波高、最小波高模擬值及標準偏差。

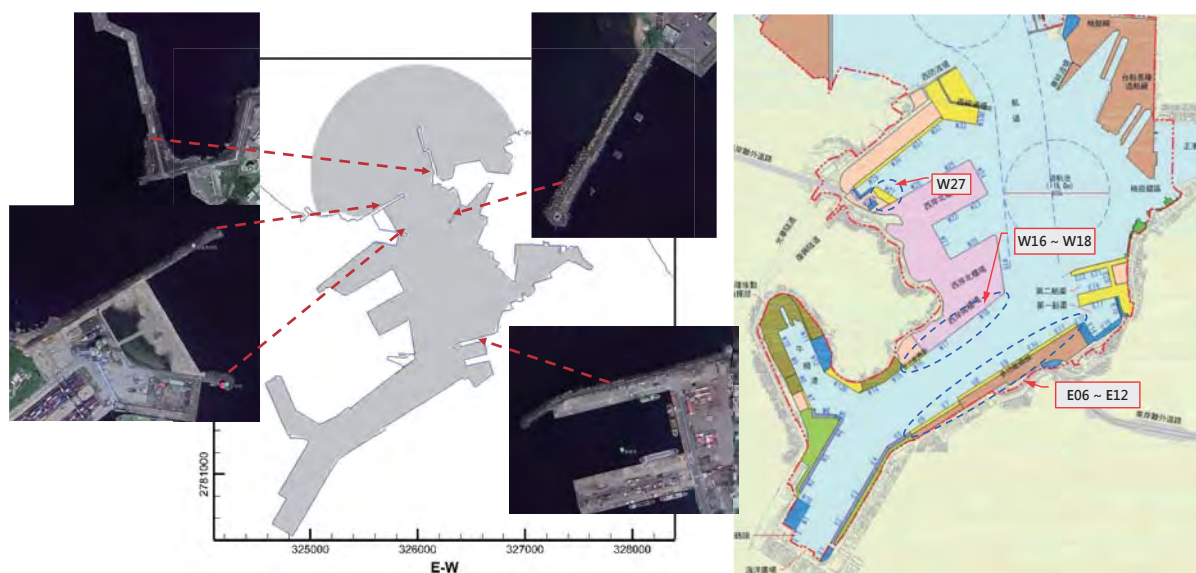


圖 10 基隆港消波及碼頭輸出點位分布圖

3.2 基隆港靜穩模擬系統及模擬結果

本研究規劃港區靜穩模擬子系統之作業流程及架構，如圖 11（左圖）所示，由圖可知，基隆海域近海風浪模組之模擬結果，將提供基隆港靜穩分析模組做為其外海波浪模擬條件（ H_{m0} 、 T_p 、 D_m ）使用。將基隆海域近海風浪模組鄰近基隆港靜穩分析模組外圍半圓假想邊界處，選取 A 點位置做為基隆港靜穩分析模組輸入外海波浪條件之位置，如圖 11（右圖）所示。

模擬燦樹颱風時期基隆港域波浪情況，使用 TaiCOMS 2.0 系統產製之 2021 年 9 月 12 日 0 時作業風場及基隆海域潮位及風浪模擬結果，輸出 A 點位之潮位及波浪模擬預測資料，如圖 12 所示，做為基隆港靜穩分析模組外海波浪輸入資料，其中圖上 11 日 18~23 時代表追算階段，12 日 0 時至 14 日 0 時代表預測階段，依據此預測條件模擬預測基隆港內波高分布情形，如圖 13 所示，分別代表 12 日 0 時至 13 日 18 時港內波高分布預測結果（間距 6 小時），當外海波向偏

東北東時，受到東防波堤遮蔽港內可以維持相當程度的靜穩；配合參閱圖 5 璨樹颱風行進路徑圖，當外海波浪轉為北向時，東防波堤遮蔽效應明顯降低，外海波浪明顯經由港口及航道進入迴船區，影響外港池碼頭區靜穩。當颱風遠離時，外海波向雖為正北，但因波浪逐漸變小，港內水域亦逐漸趨向靜穩。

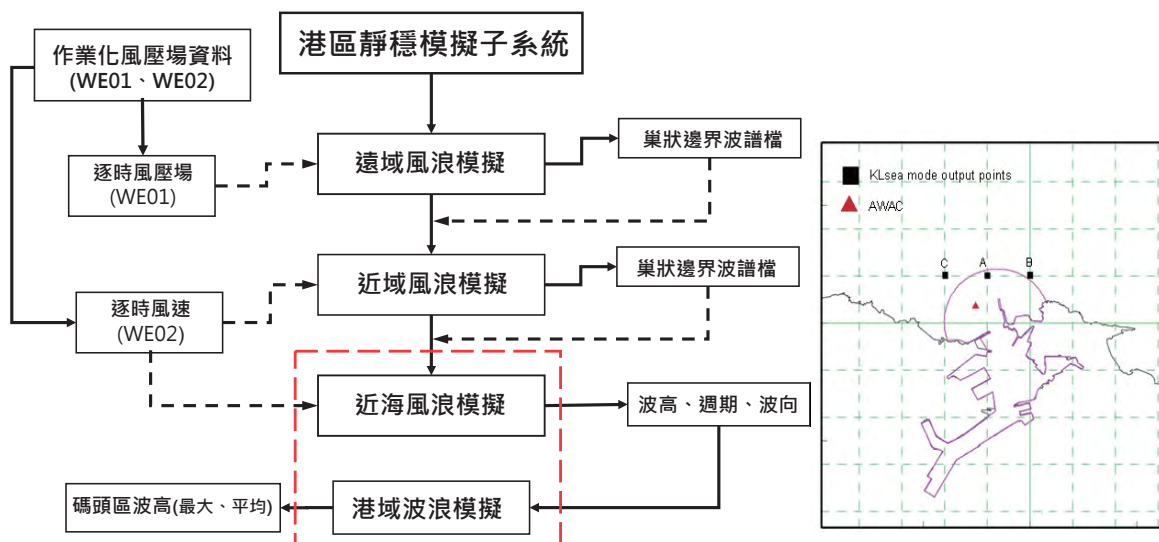


圖 11 基隆港靜穩模擬作業系統架構及外海波浪條件輸入點位示意圖

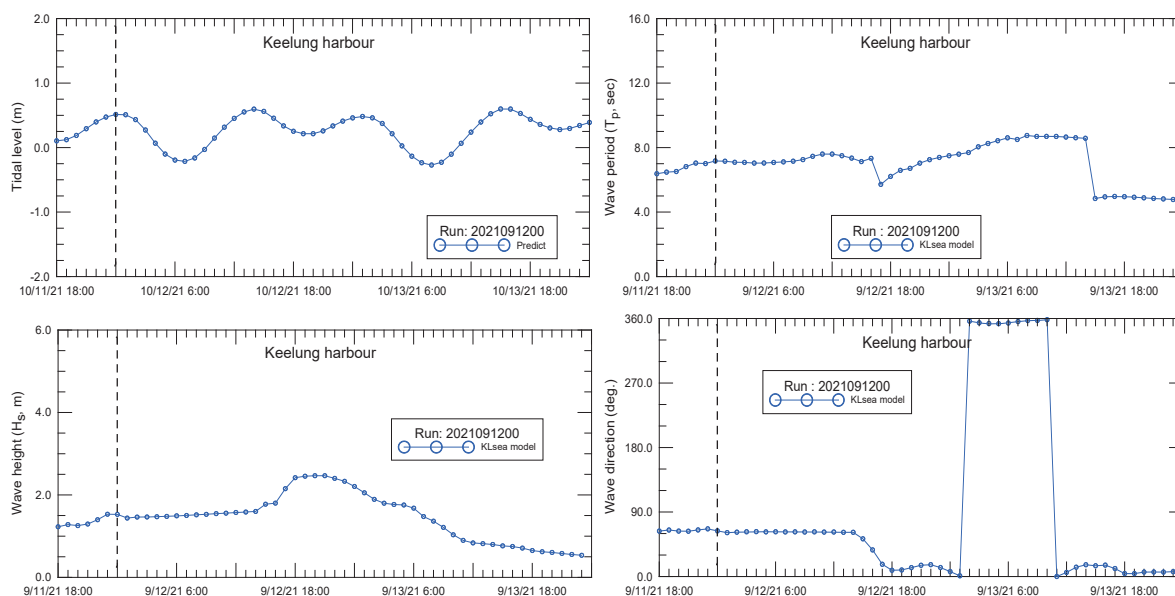
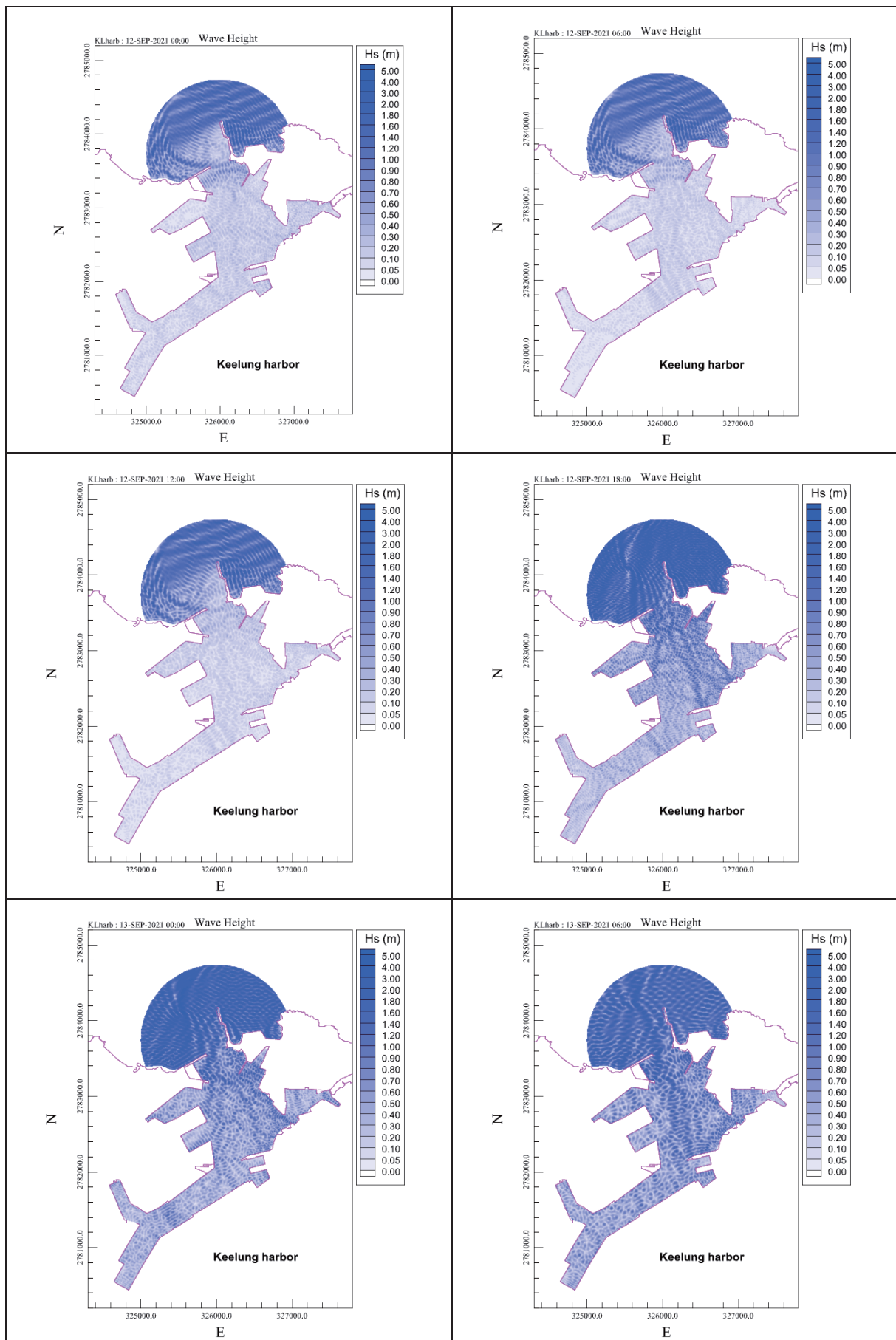


圖 12 A 點位潮位及波浪歷線圖



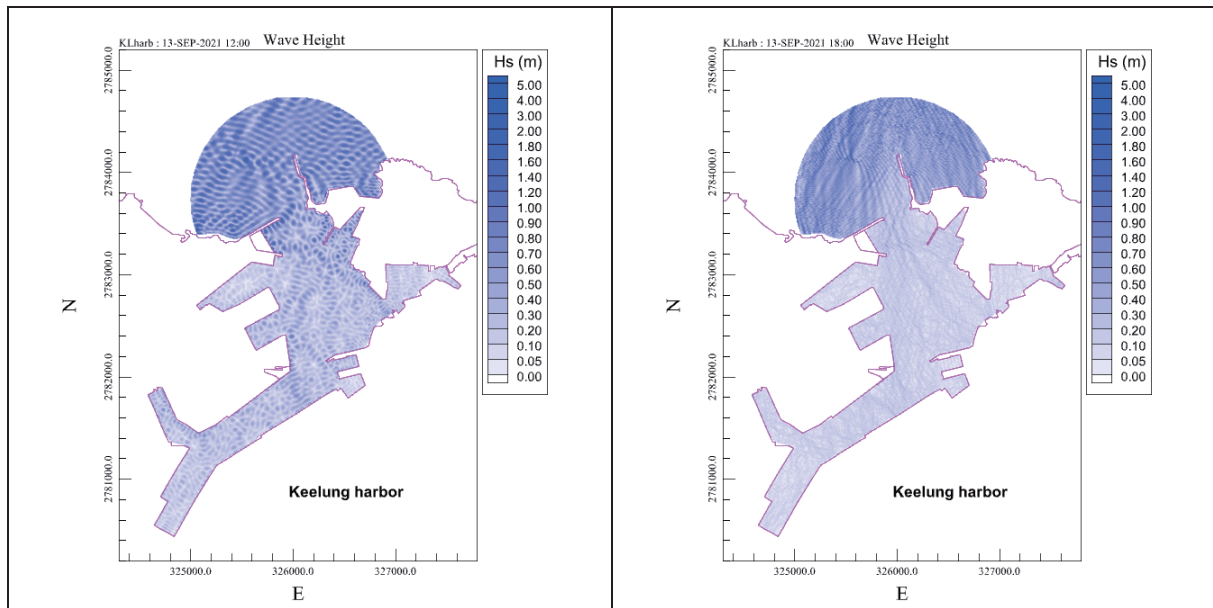


圖 13 模擬 9 月 12 日~13 日基隆港內波高分布情形圖

四、結論

本研究建構基隆海域風浪及港域靜穩模擬系統，經模擬 2021 年璨樹颱風期間，颱風沿東部沿海北上接近基隆海域時，基隆港 AWAC 觀測站附近之示性波高最大模擬值出現的時間較觀測值約晚 2 小時，風（湧）浪模擬週期表現較差及波向出現較大偏差等情形，可能因使用作業化預測風場與實際颱風移動的速度有時間落差、模式參數設定及近域模組網格解析度不足等因素所致，外海模擬資料經輸入至基隆港域靜穩模擬系統模擬，模擬結果反應出港域波浪因颱風行進路線及港內遮蔽物影響情形，顯示整體系統可初步提供基隆港靜穩情形，後續仍須持續進行系統模式校驗與精進工作，提供港區波高模擬預測資訊，提升港區船舶裝卸作業安全。

參考文獻

1. 劉正琪、傅怡鈞、林雅雯、李兆芳、謝佳紘、江朕榮(2023)，「海氣象預測模擬系統之維運與精進(1/4)-精進基隆海域模組」，交通部運輸研究所。
2. 劉正琪、林雅雯、傅怡鈞、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。
3. 李兆芳、劉正琪、張憲國(2001)，「港池振盪之數值模擬計算」，海洋工程學刊，1(1)，1-22 頁。
4. Booij, N., J.G. Haagsma, L.H. Holthuijsen, A.T.M.M. Kieftenburg, R.C. Ris, A.J. van der Westhuysen, M. Zijlema (2004), SWAN Cycle III version 40.41 USER MANUAL, Delft University of Technology.
5. WAMDI group (1988), The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol.18, pp.1775–1810.