

花蓮港港域觀測波浪遮蔽分析

蕭安佑¹ 李俊穎² 羅冠顯¹ 林達遠¹ 蔡立宏³

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

³交通部運輸研究所運輸技術研究中心主任

摘要

花蓮港為臺灣東部重要國際商港，因特殊地理位置常受颱風波浪影響，尤其長週期波浪傳遞至港內，對港池穩定性和船舶靠泊及裝卸貨構成重大挑戰。本研究針對颱風期間港內外波浪特性，透過原始資料處理及波譜分析，統計示性波高、湧浪及風浪數據，並計算港內各碼頭遮蔽係數，分析不同波浪條件下港池穩定性。

本研究以 2023 年瑪娃、小犬與 2024 年凱米颱風為分析案例，結果顯示，短週期風浪由港外傳遞至港內可有效降低波高，但長週期湧浪可能因能量傳遞過程中不易消散，以及港型特徵因素，港池碼頭遮蔽效果不佳，尤其波向集中於東南東且週期大於 10 秒時，易導致湧浪能量傳遞至港內並造成波高放大現象。9 號碼頭對短週期波浪的遮蔽效果最佳，而 17 號及 25 號碼頭湧浪遮蔽效果較弱，易受波向及週期影響，導致港池有明顯不靜穩現象，本研究結果可做為後續花蓮港遮蔽試驗波浪條件規劃參考。

一、前言

港灣湧浪問題對於船舶靠泊及裝卸貨與港池穩定性影響深遠，特別是花蓮港做為臺灣東部的重要國際商港，其特殊地理位置和港區結構使其面臨長期的湧浪課題，花蓮港區現況如圖 1。湧浪在颱風或強風等特殊氣象條件下，易導致港池內水位震盪加劇，進而影響船舶的靠泊安全及裝卸效率。尤其，隨著全球氣候變遷和颱風強度增強，港灣湧浪問題日益嚴峻，有效解析風波與湧浪，進一步改善港池靜穩度為港灣管理與工程規劃的核心議題。

為瞭解湧浪對花蓮港靜穩度的影響，本研究運用花蓮港長期觀測數據，採用波譜分析方法分離風浪與湧浪，解析港外底碇式波流觀測儀器（Acoustic Wave and Current profiler, AWAC）與港內靜穩度測站風浪及湧浪波高特性。透過比較港內外波高數據，探討風浪、湧浪與靜穩度間關係，並分析不同波浪條件下港池碼頭的遮蔽效果。本研究利用波譜分析方法，處理港外 AWAC 與港內測站的波浪觀測數據，提取短週期風浪及長週期湧浪參數，並分析颱風期間波高特性。此外，為避免數據處理中的不確定性，針對觀測儀器量測數據完整性與異常處理方法進行優化，確保所提取的湧浪特性數據準確可靠。期望透過本研究有效解析湧浪波高與港池靜穩度相互關係，為後續港灣遮蔽試驗與改善方案提供參考價值。



摘錄自：國際商港未來發展及建設計畫(111~115 年)

圖 1 花蓮港區現況圖

二、測站介紹

2.1 港外底碇式波流觀測儀器(AWAC)

交通部運輸研究所運輸技術研究中心(以下簡稱本中心)於 2001 年 8 月在花蓮港東防波堤南方安裝挪威 NORTEK 公司所製造 AWAC 波流儀，專門用於長期波浪觀測。該儀器的設置位置距防波堤南邊約 200m，水深 33m，儀器高度約 1.8m，波浪測站位置示意圖如圖 2。波浪觀測 AWAC 系統統計資料為每小時擷取整點 10 及 40 分鐘後之約 17.07 分鐘儀器觀測資料，後經儀器進行波譜分析轉換後，推算示性波高、譜峰週期、波向。波浪觀測 AWAC 系統如表 1 所示。

表 1 花蓮港波浪測站一覽表

測站	緯度(N)	經度(E)	水深	觀測期間	儀器	位置概述
HLAW01H01	23°58'02"	121°37'34"	-33 m	2001/08- 2024/11 (觀測中)	AWAC	東防波堤南邊約 200 m 處



圖 2 花蓮港波浪測站位置

AWAC 波高量測模式有兩種，分別為傳統式壓力感應器量測及聲波式的高度感應器量測，平時以聲波式的高度感應器量測為主，颱風期間因海面紊亂導致訊號無法分析時，則改採用傳統式壓力感應器量測分析轉換。AWAC 波向的量測從海面下 3m 以上的流向資料與波高資料計算轉換而得，每次收集 1Hz 頻率的 2048 筆數據（AST Distance），觀測時長約為 17.07 分鐘，之後即時回傳原始二進制資料，並生成包含每日每小時波流統計數據的文字檔。AWAC 測站供電方式可採市電或太陽能，在花蓮港測站電力是採用太陽能進行，觀測資料則透過 4G 無線網路訊號回傳，回傳後則將波流浪統計資料自動化匯入資料庫內，測站架構如圖 3 所示。

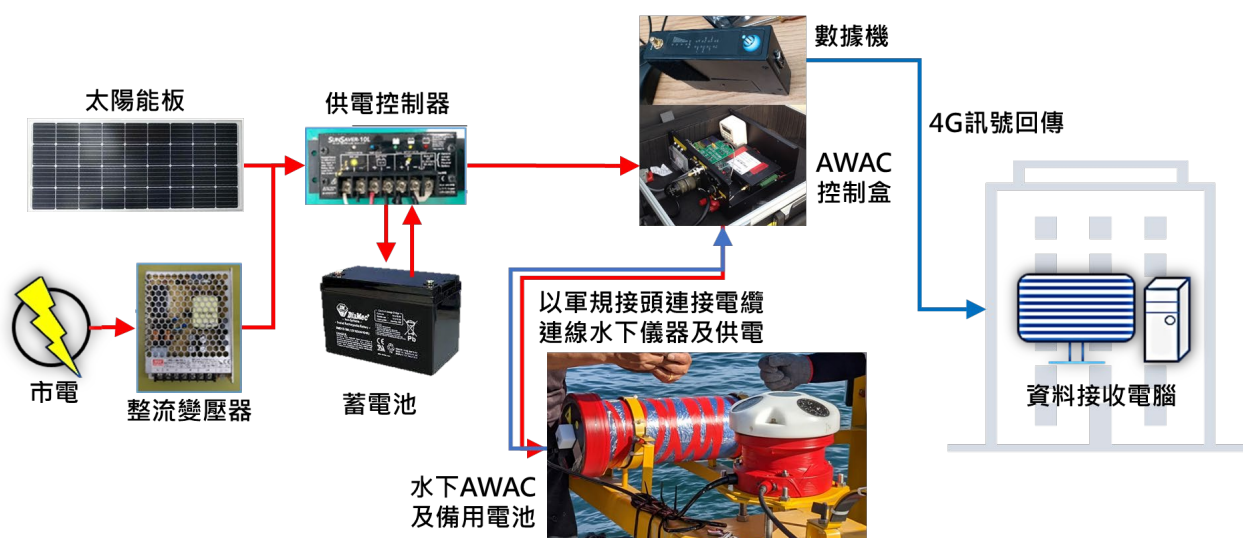


圖 3 底碇式波流觀測站架構

2.2 港區靜穩觀測站

本中心於花蓮港 9 號、17 號及 25 號碼頭旁架設港內全時靜穩觀測站，其位置圖如圖 4 所示，各測站位置及座標如表 2。針對港內靜穩度觀測系統，基本組成架構區分為現場波潮觀測系統及遠端監控系統。針對現場監測資料規劃透過 4G 無線網路將現場波潮觀測系統收錄之監測資訊即時傳回雲端伺服器，於雲端伺服器進行解碼及波浪分析後，再上傳至本中心資料庫並透過網頁即時展示雲端波浪分析結果及現場系統監測資訊，港區靜穩度觀測系統架構，如圖 5 所示。

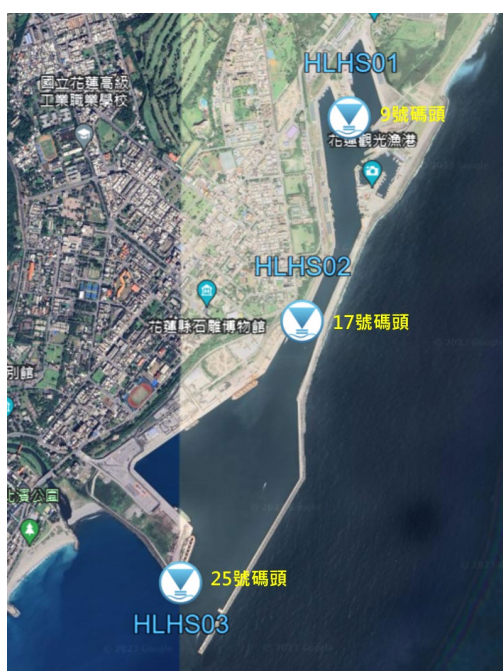


圖 4 花蓮港港內靜穩度測站位置

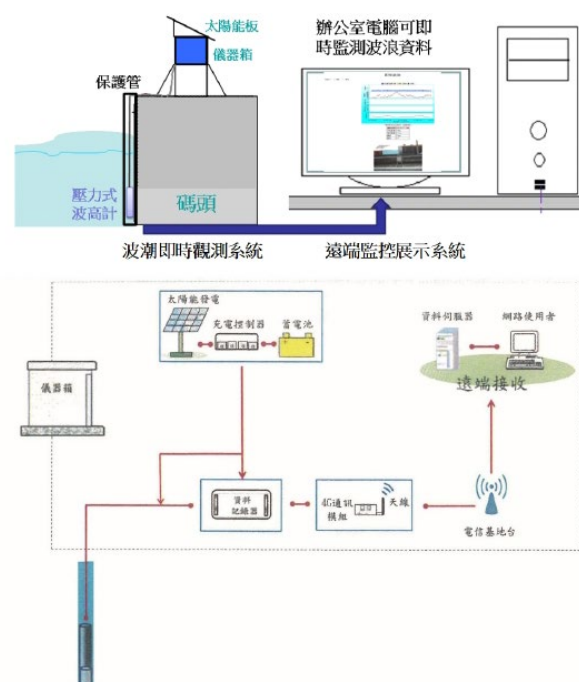


圖 5 觀測系統架構示意

表 2 主要商港港內靜穩測站位置及座標

港區	測站編號	測站位置	測站座標	
			緯度	經度
花蓮港	HLHS01	9 號碼頭	24°0'02.5'	121°38'14.6"
花蓮港	HLHS02	17 號碼頭	23°59'19.8"	121°38'03.8"
花蓮港	HLHS03	25 號碼頭	23°58'26.0"	121°37'36.4"

本研究採用觀測水深之壓力計觀測水面波動引起的壓力變化(含靜水壓及動壓)。儀器取樣頻率為 2Hz，採連續觀測方式，每 20 分鐘輸出一組波浪特性參數觀測值，包括示性波高(H_s)、平均週期(T_m)、譜峰週期(T_p)、最大波高(H_{max})、最大波週期(T_{max})等。其中示性波高 H_s 、平均週期 T_m 、譜峰週期 T_p 等採用波譜分析法計算得之。

三、研究方法

3.1 資料短缺或異常處理

原始資料常有資料數不合及異常值存在情形，當資料短缺與資料內有異常訊號，處理方式參考李等(2019、2020)報告內水位訊號轉換波浪處理流程，資料處理流程如圖 6 所示。獲得資料後進行調整及波譜轉換作業，取得相關波浪統計資訊，處理方式如下。

當資料少許短缺或異常(應蒐集筆數 5%內)則回補平均值至資料內，過多短缺或異常(大於應蒐集筆數 5%)則剔除，確保避免有儀器或外部干擾導致產生異常極端值。

異常訊號檢測參考李等(2019、2020)報告，原始資料逐秒之水位資料進行異常訊號檢測分析來決定一水位變化的合理範圍，由於統計學之四分位距是考慮資料中間百分之 50 的距離，故較不受極端值的影響，資料處理採用四分位距(interquartile range, IQR)的方法，將資料由小而大排序後，將一組資料分為四等分，其分割點就稱為四分位數，所以會有第一四分位數、第二四分位數(即中位數)、第三四分位數。

其排序為第 25%的資料值為第一四分位數(Q1)，排序為第 75%的資料值為第三四分位數(Q3)時，可用以描述資料之離散程度；排序第 50%處的資料值為第二四分位數(Q2)(即中位數)，且為描述資料的中位數。其 $Q3-Q1$ 的值，稱為分位數間隔。當判定大於 75%與小於 25%的極值水位，以 1.5 倍與 3 倍的 IQR 分別定義為雜訊(outlier)與極端雜訊(extreme outlier)之界線，本研究將樣本極端雜訊為 3 倍的 IQR 外資料剔除。處理過程如下：

- (1) 計算四分位距(IQR)，即 $IQR = Q3 - Q1$ 。(Q1、Q3 分別為資料前 25%及 75%的數值)。
- (2) 以 Q1 為起點，計算下圍籬值(lower fence)，即 $Q1 - 3 \times IQR$ ；再以 Q3 為起點，計算上圍籬值(upper fence)，即 $Q3 + 3 \times IQR$ 。
- (3) 觀測值若落在上、下圍籬值之外，即稱為偏離值，若觀測值小於下圍籬值或大於上圍籬值時剔除。

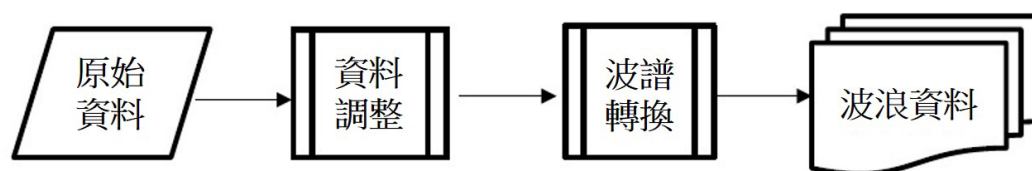


圖 6 資料處理流程圖

AWAC 及靜穩觀測站每小時原始資料分別為 2048 筆及 7200 筆資料，讀取後透過上述資料處理流程，並應用傅立葉轉換求取波浪能譜，換算得示性波高 H_s 、譜峰週期 T_p 、平均週期 T_m 、長浪波高 Swell H_s 及風波波高 Wind H_s 等波浪參數，其中換算公式如(1)~(5)式所示。

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^\infty S(f) df} = 4 \sqrt{m_0} \quad (1)$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (2)$$

$$T_m = \sqrt{m_0/m_2} \quad (3)$$

$$Swell H_s = 4 \sqrt{\int_0^{f_{swell}} S(f) df} \quad (4)$$

$$Wind H_s = 4 \sqrt{\int_{f_{swell}}^\infty S(f) df} \quad (5)$$

H_s 為推算之示性波高，其中 f 為頻率， $S(f)$ 為一維波浪波譜， f_{swell} 為設定長浪頻率上限，擷取週期 8 秒以上波浪，其中 $f_{swell}=0.125$ 。

3.2 資料處理案例

處理情形以圖 7 為例，圖 7 左上為 2023 年 8 月 28 日 08 時水位資料，原始 2048 筆資料進行波譜轉換，受限於有多筆異常跳動雜訊資訊，導致平均值計算失真，整體波譜分布出現異常如圖 7 左下，經剔除異常值處理如圖 7 之右上圖，可獲得較合理之數據資訊，並比對 wap 檔內同時間資訊如表 3，可知調整後資訊應該較符合實際現場資料。比對 2023 年 8、9 月有無調整資訊，未經調整資訊進行轉換示性波高及長浪波高後，如圖 8 之上圖所示，處理前其波高歷線有異常值，經比對圖 7 水位歷線明顯受異常值干擾，難呈現現場波浪資訊，經上述方式進行資料處理後，再轉換波高如圖 8 之下圖所示，此時歷線資料才能適當呈現波高資訊。

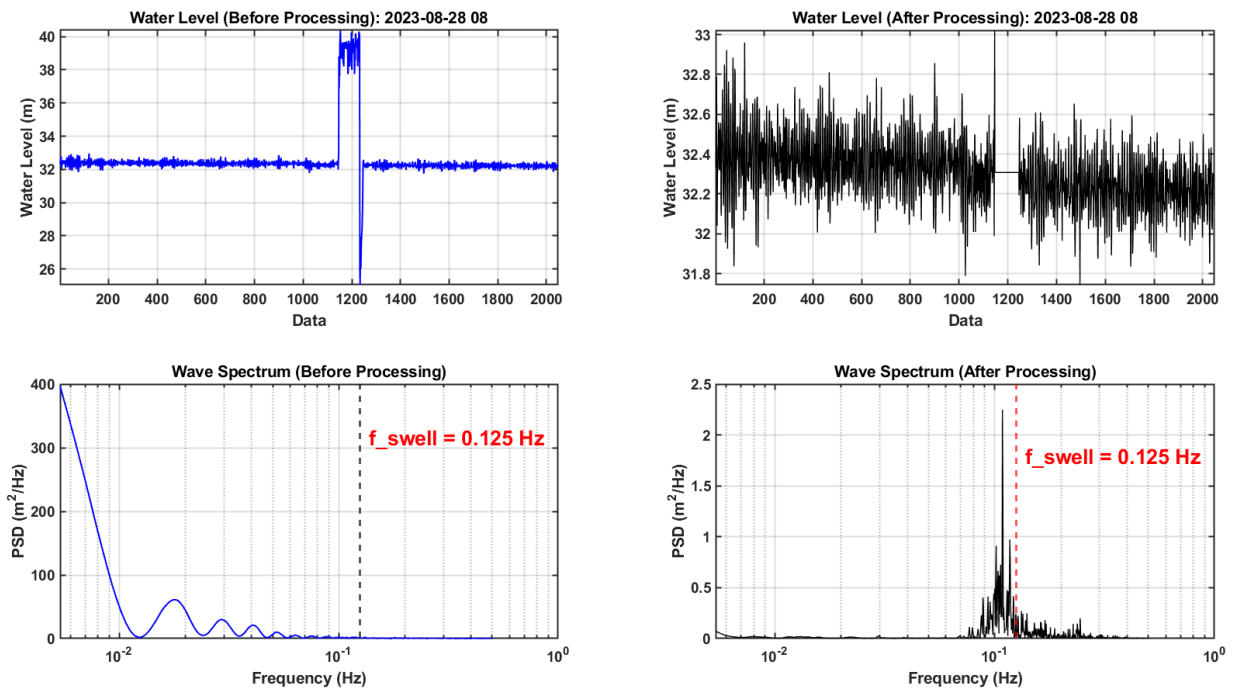


圖 7 2023 年 8 月 28 日 08 時水位資料處理前後與波譜圖

表 3 2023 年 8 月 28 日 08 時觀測資料比較表

測站	$H_s(\text{ast})$	$T_m(\text{ast})$	Swell $H_s(\text{ast})$
調整前	5.38	12.14	5.17
調整後	0.56	6.26	0.44
WAP 檔案資訊	0.73	6.18	-

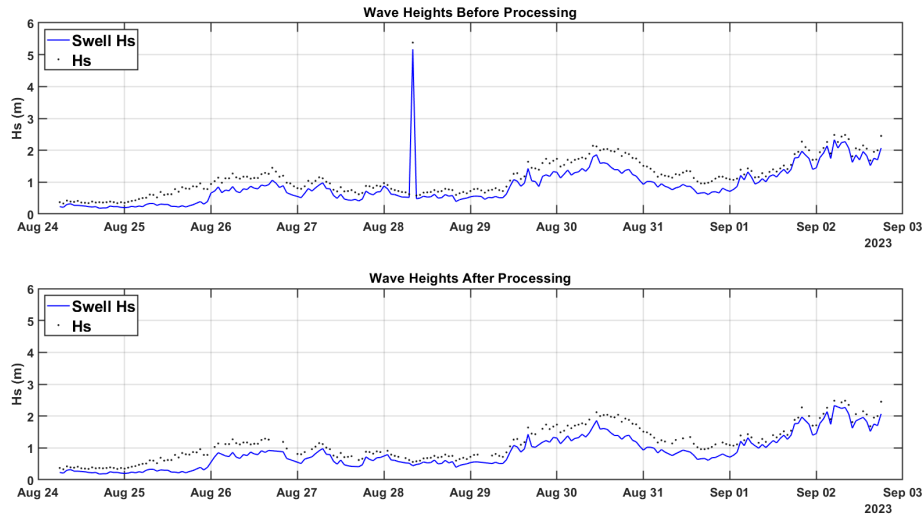


圖 8 2023 年 8、9 月示性波高及長浪波高歷線圖

3.3 轉換波高及週期與原廠處理後資料檔(wap 檔)驗證

經讀取 wad 檔案內 AST Distance 原始資料，依本研究資料處理方式轉換波譜後再計算示性波高，與 AWAC 所轉出與副檔名 wap 檔內示性波高進行比對，其 2023 年 8、9 月示性波高、譜峰週期及平均週期歷線比對資料，如圖 9 所示，其示性波高比對，如圖 10 所示，其決定係數(R^2)為 0.98。波浪譜峰週期如圖 11 所示，其決定係數(R^2)為 0.67，經查波高資料因 wap 檔有出現極端異常波高值而造成決定係數偏低，波浪平均週期如圖 12 所示，其決定係數(R^2)為 0.93。顯示本研究所計算波高及週期，應可代表實際觀測資訊。

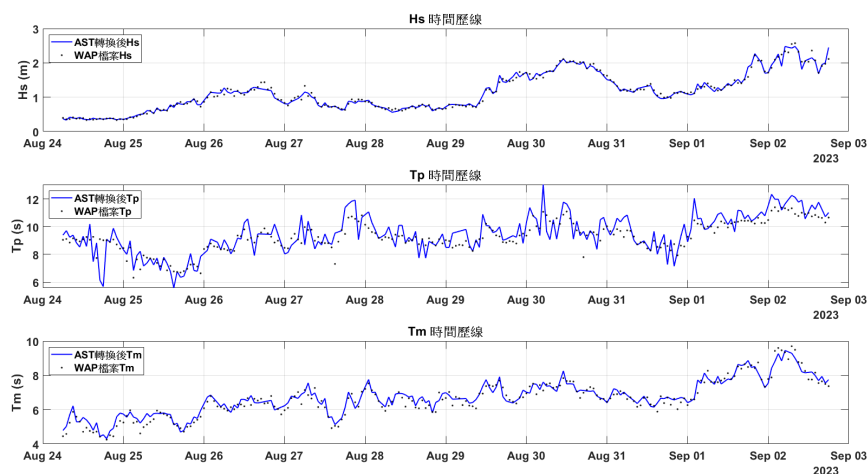


圖 9 2023 年 8、9 月示性波高、譜峰及平均週期歷線圖

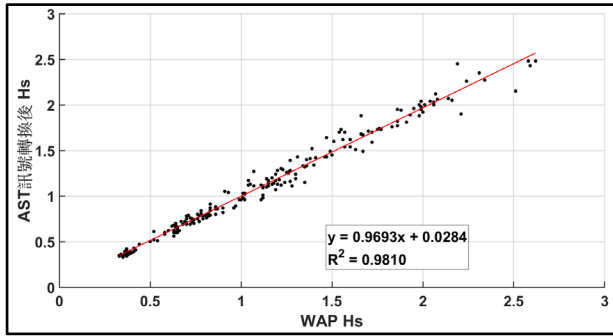


圖 10 wap Hs vs AST 訊號轉換後 Hs 分布圖

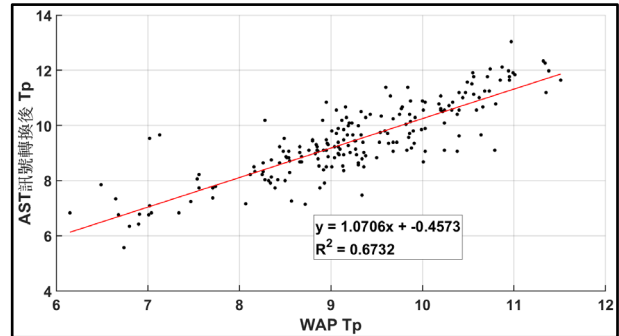


圖 11 wap Tp vs AST 訊號轉換後 Tp 分布圖

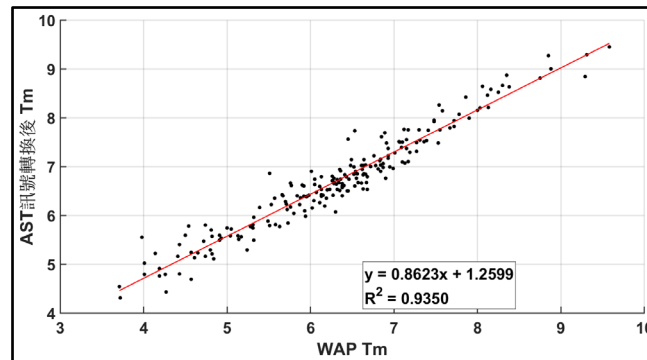


圖 12 wap Tm vs AST 訊號轉換後 Tm 分布圖

3.4 資料選定

本研究取得 2023 年 1 月至 2024 年 10 月花蓮港內靜穩觀測站資料及港外波浪觀測主站 AWAC 資料進行分析討論，而 2024 年 10 月下旬康芮颱風因造成現場觀測儀器損壞，故無納入本次研究範圍。

港外 AWAC 主站示性波高 H_s 、譜峰週期 T_p 、平均波向 M_{dir} ，如圖 13 所示。主站示性波高 H_s 平均值為 1.12m，譜峰週期 T_p 平均值為 7.26 秒。示性波高 H_s 最大值發生時間 2023 年 7 月 26 日 23 時 40 分，其最大值為 14.8m，對應譜峰週期為 8.41 秒，對應平均波向為 316.6 度。

港內靜穩站 9 號、17 號及 25 號碼頭示性波高歷線圖如圖 14 所示。9 號碼頭靜穩站示性波高平均值為 0.08m，湧(長)浪波高(Swell H_s)平均值為 0.05m，示性波高最大值發生時間 2023 年 4 月 25 日 14 時，其最大值為 3.04m。17 號碼頭靜穩站示性波高平均值為 0.23m，湧(長)浪波高(Swell H_s)平均值為 0.19m，示性波高最大值發生時間 2023 年 4 月 26 日 11 時，其最大值為 3.84m。25 號碼頭靜穩站示性波高平均值為 0.28m，湧(長)浪波高(Swell H_s)平均值為 0.21m，示性波高最大值發生時間 9 月 3 日 13 時，其最大值為 3.48m。

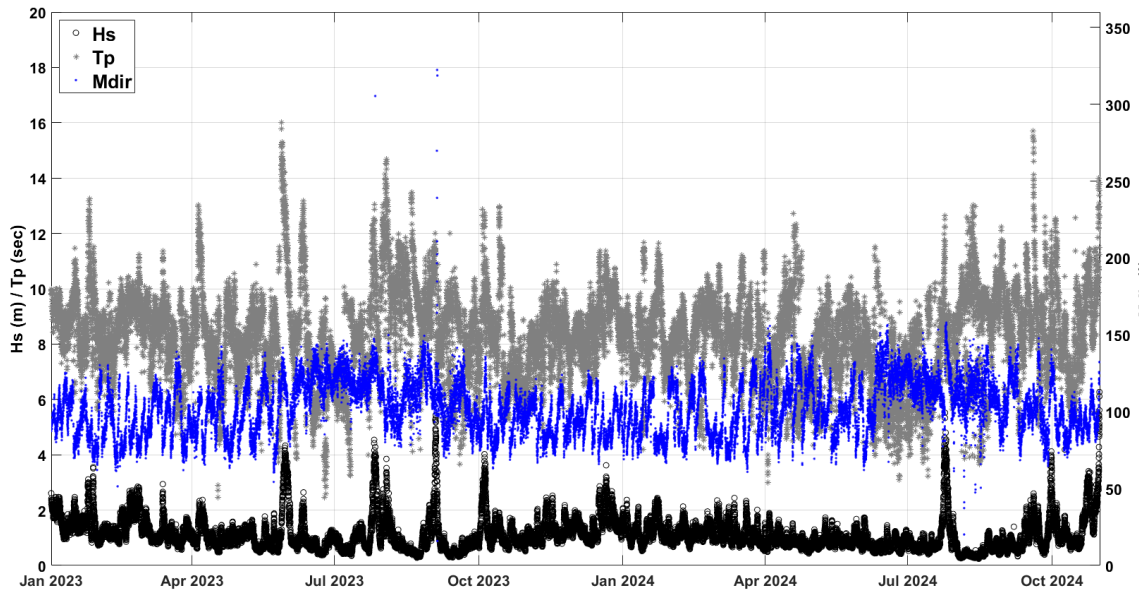


圖 13 港外 AWAC 之 Hs、Tp、Mdir 歷線圖

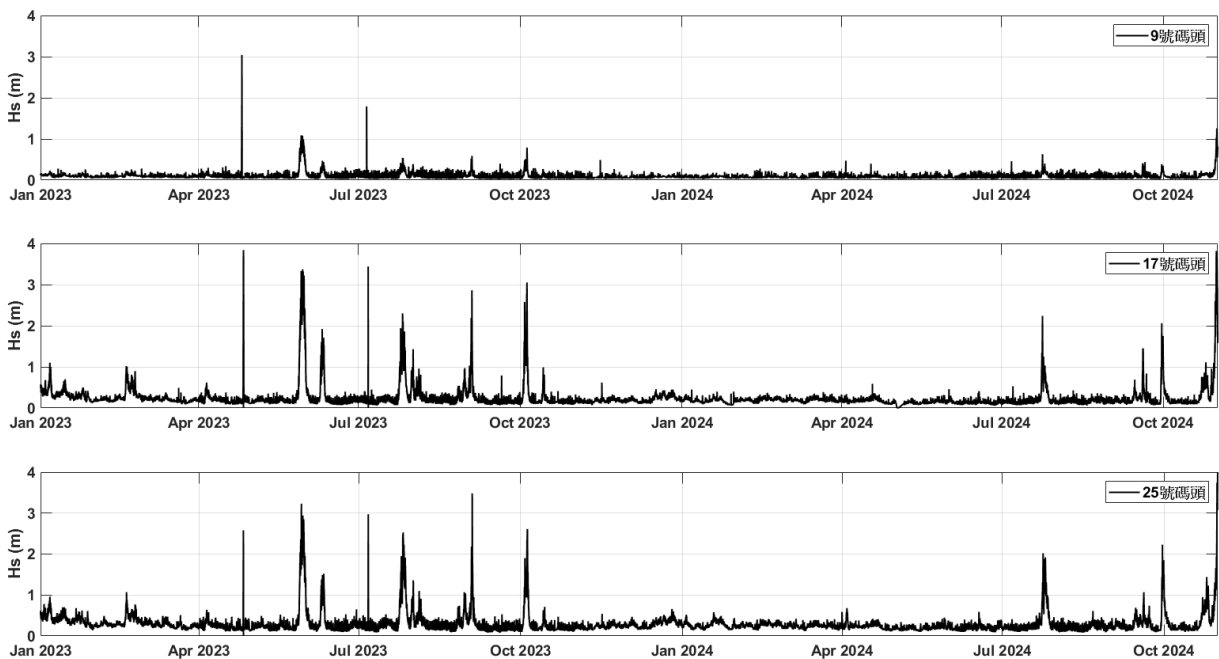


圖 14 港內 9、17、25 號碼頭靜穩觀測站波高歷線圖

花蓮港由於長期受到颱風波浪影響，臺灣港務股份有限公司已有相關運作機制，應變作業以監控中心人力，透過花蓮港外的即時觀測資料與監看港區即時影像，做為平時進行船舶調度作業，颱風期間參考 2023 年「臺灣港務股份有限公司颱風期間船舶靠泊作業原則要點」，受颱風外圍影響時，船舶應加強繫纜並加掛防颱纜，如觀察 25 號碼頭浪湧起伏達 1m 以上，致使船舶靠泊碼頭有損害港埠設施或船舶安全顧慮時，得指示代理行辦理船舶出港避風(湧)。本研究參考陳等(2024)報告並彙整 2023 年 1 月至 2024 年 10 月港內 25 號碼頭靜穩觀測站示性波高大於 1 m 事件，共計有 12 次，時間區間相關事件如表 4。

表 4 25 號碼頭靜穩觀測站示性波高大於 1m 事件

項次	時間區間	事件
1	2023/2/18 21:20～2023/2/18 22:00	冬季季風
2	2023/5/20 06:00～2023/6/3 06:00	202302 瑪娃颱風
3	2023/6/6 12:00～2023/6/12 18:00	202303 谷超颱風
4	2023/7/21 00:00～2023/7/29 00:00	202305 杜蘇芮颱風
5	2023/7/27 18:00～2023/8/10 18:00	202306 卡努颱風
6	2023/8/24 06:00～2023/9/2 18:00	202309 蘇拉颱風
7	2023/8/28 00:00～2023/9/5 00:00	202311 海葵颱風
8	2023/9/29 18:00～2023/10/9 12:00	202314 小犬颱風
9	2024/7/20 06:00～2024/7/27 00:00	202403 凱米颱風
10	2024/9/19 00:00～2024/9/19 18:00	202415 蘇力颱風
11	2024/9/28 00:00～2024/10/3 21:00	202418 山陀兒颱風
12	2024/10/25 00:00～2024/11/01 12:00	202421 康芮颱風

分析期間共受到 11 場颱風影響，其中杜蘇芮、卡努、蘇拉、海葵、小犬、凱米、山陀兒及康芮為中央氣象署有發布警報之颱風。中央氣象署在颱風資料庫(<https://rdc28.cwa.gov.tw/TDB/>)可查詢颱風路徑圖；本研究採花蓮港 25 號碼頭示性波高大於 1.5m，且不同路徑之颱風事件，如 2023 年瑪娃颱風從臺灣東南方靠近並逐漸轉東北向；小犬颱風移動路徑經由南海北上，主要影響臺灣東南沿岸，其路徑雖未直接經過花蓮港，但接近臺灣時路徑較為平直，皆屬常見颱風路徑，可探討外海波浪方向和港口防波設施遮蔽效果，2024 年凱米颱風經過臺灣東南海域並轉向臺灣海峽，屬於侵臺路徑，其示性波高也相較其他颱風大，期間路徑有突然轉向情況，可瞭解波浪條件及風場，對於花蓮港之湧浪及風浪遮蔽效果，如圖 15～圖 17 所示。

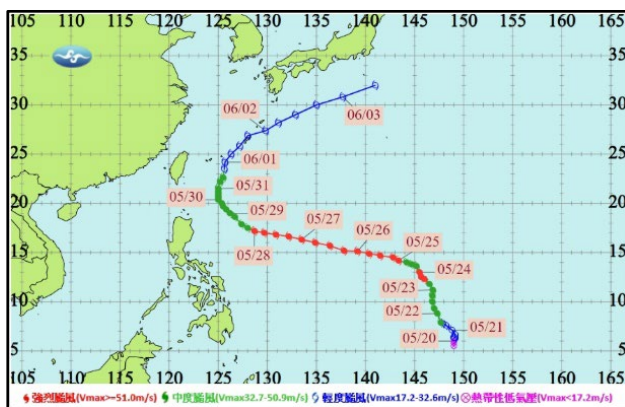


圖 15 2023 年瑪娃颱風路徑圖



圖 16 2023 年小犬颱風路徑圖

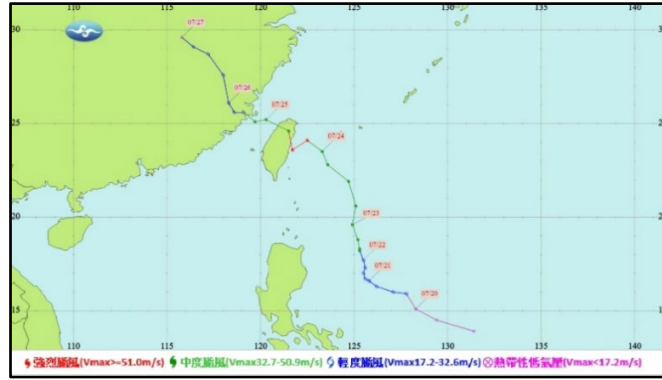


圖 17 2024 年凱米颱風路徑圖

四、颱風波浪特性於花蓮港遮蔽分析

瑪娃颱風所影響主要期間為 2023 年 5 月 20 日至 6 月 3 日，25 號碼頭靜穩觀測站示性波高最大值為 5 月 29 日 3.23m 與長浪波高最大值為同日 2.76m；小犬颱風期間為 2023 年 9 月 29 日至 10 月 9 日，25 號碼頭靜穩觀測站示性波高最大值為 10 月 4 日 2.61m 與長浪波高最大值為同日 2.52m；凱米颱風期間為 2024 年 7 月 20 日至 7 月 27 日，25 號碼頭靜穩觀測站示性波高最大值為 7 月 24 日 2.02m 與長浪波高最大值為同日 1.95m。

4.1 瑪娃颱風波浪分析

4.1.1 瑪娃颱風觀測資料轉換後波高統計

透過讀取 AWAC 及 9、17、25 號碼頭靜穩觀測站原始資料，依本研究資料處理後轉換波譜後再計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高，繪製港內外示性波高歷線如圖 18、港內外湧(長)浪波高歷線如圖 19，港內外風浪波高歷線如圖 20。

港外 AWAC 示性波高平均值 1.71m，最大值 4.36m 發生時間為 2023 年 5 月 30 日，湧(長)浪波高平均值 1.37m，最大值為同日 4.08m，風浪波高平均值 0.95m，最大值為同日 1.95m。

港內 9 號碼頭示性波高平均值 0.22m，最大值 0.99m 發生時間為 2023 年 5 月 30 日，湧(長)浪波高平均值 0.21m，最大值為同日 0.98m，風浪波高平均值 0.05m，最大值為同日 0.18m。港內 17 號碼頭示性波高平均值 0.67m，最大值 2.74m 發生時間為 2023 年 5 月 30 日，湧(長)浪波高平均值 0.67m，最大值為同日 2.72m，風浪波高平均值 0.09m，最大值為同日 0.40m。港內 25 號碼頭示性波高平均值 0.62m，最大值 2.43m 發生時間為 2023 年 5 月 30 日，湧(長)浪波高平均值 0.6m，最大值為同日 2.33m，風浪波高平均值 0.15m，最大值為同日 0.72m。

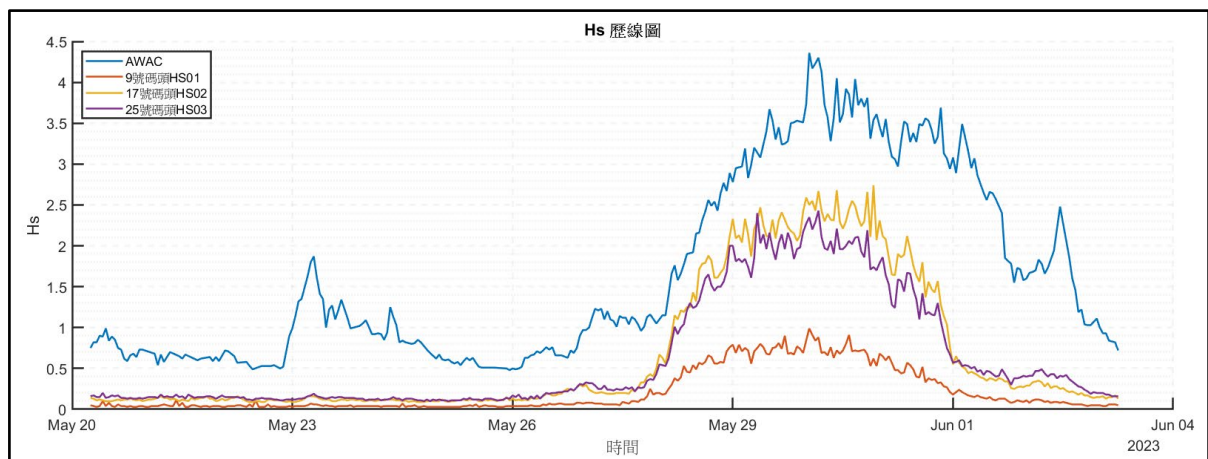


圖 18 瑪娃颱風各測站示性波高歷線圖

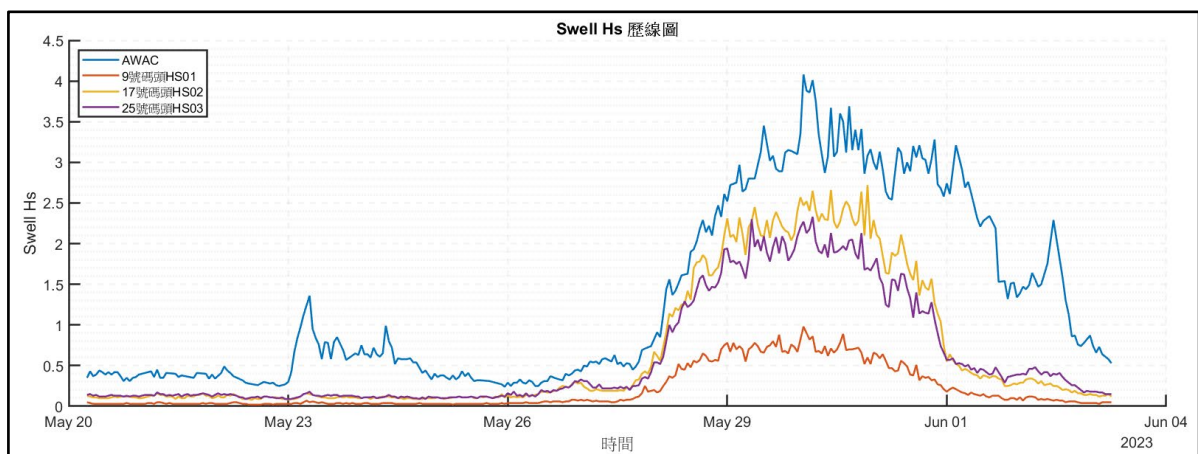


圖 19 瑪娃颱風各測站湧(長)浪示性波高歷線圖

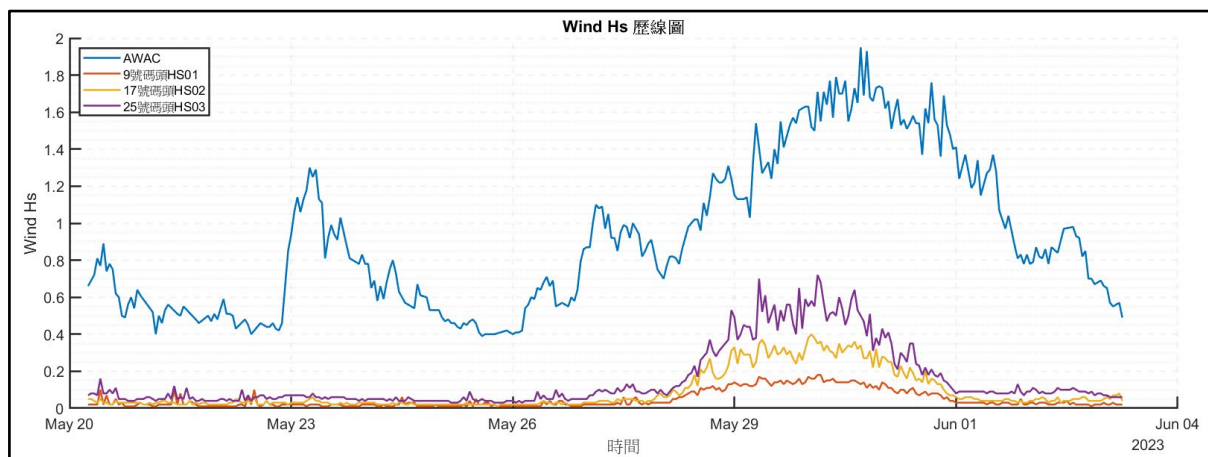


圖 20 瑪娃颱風各測站風浪示性波高歷線圖

繪製港內外各觀測站外湧(長)浪波高分布圖，如圖 21～圖 23，港外與 9 號碼頭決定係數(R^2)為 0.78，港外與 17 號碼頭決定係數(R^2)為 0.81，港外與 25 號碼頭決定係數(R^2)為 0.83，顯示利用湧(長)浪波高指標可呈現港內外相關性。

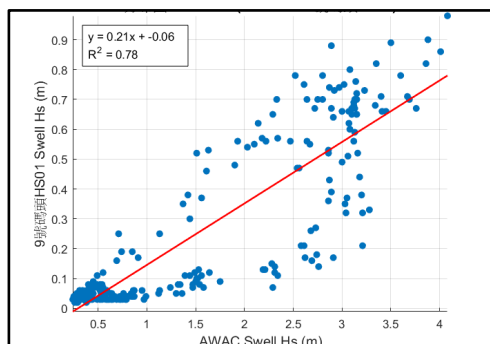


圖 21 瑪娃颱風港內 9 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

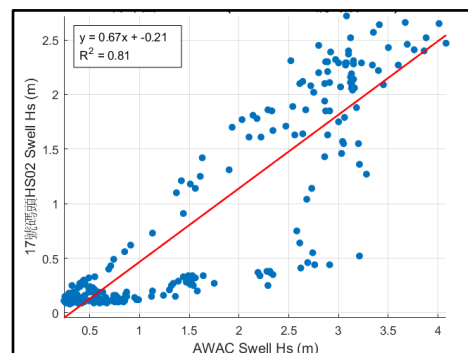


圖 22 瑪娃颱風港內 17 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

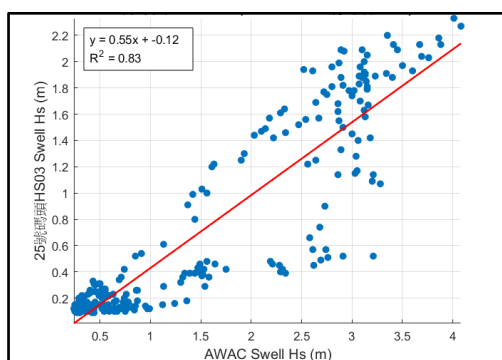


圖 23 瑪娃颱風港內 25 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

瑪娃颱風位於臺灣東側海面，其颱風半徑約為 300 公里，暴風圈邊緣掠過東側海域，路徑屬近距離轉向北移動。於圖 18 中 AWAC 波高歷線於 5 月 23 日明顯增加，進一步查詢中央氣象署資料，5 月 23 日至 25 日因鋒面及東北季風通過臺灣，該期間平均波向為 76 度(東北東)，僅港外 AWAC 波高有明顯增加，而港內靜穩觀測站因遮蔽作用，其港內波高並無明顯增加；另 6 月 3 日 AWAC 波高歷線波高明顯增加，經查資料係因瑪娃颱風外圍環流及午後雷陣雨造成。

港外波浪特性未受地形或防波堤遮蔽，易受天氣變化所產生波浪能量傳遞影響，而港內波浪特性由於港口結構的遮蔽效應，東北東波向的波浪能量在進入港內時大部分被防波堤遮蔽，靜穩觀測站顯示港內波高變化不明顯，尤其在 5 月 23 日至 25 日港內波高未受影響，顯示港型對一定波向具良好屏蔽作用。

4.1.2 瑪娃颱風港內各觀測站遮蔽分析

為瞭解花蓮港各測站所在碼頭位置之靜穩度，本研究利用觀測資料轉換後計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高進行遮蔽係數 K_d 計算，計算式如(6)式所示，結果如表 5～表 7。

$$K_d = \text{港內靜穩度測站波高} / \text{港外 AWAC 波高} \quad (6)$$

表 5 瑪娃颱風港內靜穩度觀測站示性波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.03	0.30	0.10
HLHS02	17 號碼頭	0.08	0.84	0.31
HLHS03	25 號碼頭	0.09	0.72	0.31

表 6 瑪娃颱風港內靜穩度觀測站湧(長)浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	湧(長)浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.03	0.35	0.13
HLHS02	17 號碼頭	0.11	0.92	0.42
HLHS03	25 號碼頭	0.12	0.77	0.41

表 7 瑪娃颱風港內靜穩度觀測站風浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	風浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.01	0.16	0.05
HLHS02	17 號碼頭	0.02	0.29	0.08
HLHS03	25 號碼頭	0.05	0.44	0.14

進一步繪製港內各站港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高遮蔽係數 K_d 歷線圖，以瞭解所在碼頭位置之靜穩度變化，如圖 24～圖 26 所示。資料顯示 5 月 28 日湧浪已至花蓮港並造成影響，觀察到 5 月 27 日 17 時至 5 月 31 日 23 時期間，17 號碼頭之示性波高及湧(長)浪波高之遮蔽係數明顯大於 25 號碼頭，統計該期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 11.8 秒，平均波向為 119 度；另統計 5 月 20 日 06 時至 5 月 27 日 16 時期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 9.75 秒，平均波向為 92.7 度；統計 6 月 1 日 00 時至 6 月 3 日 06 時期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 9.83 秒，平均波向為 91.8 度，而進一步觀察 5 月 27 日 17 時與 5 月 31 日 23 時之港外 AWAC 湧(長)浪週期約為 10.5 秒。

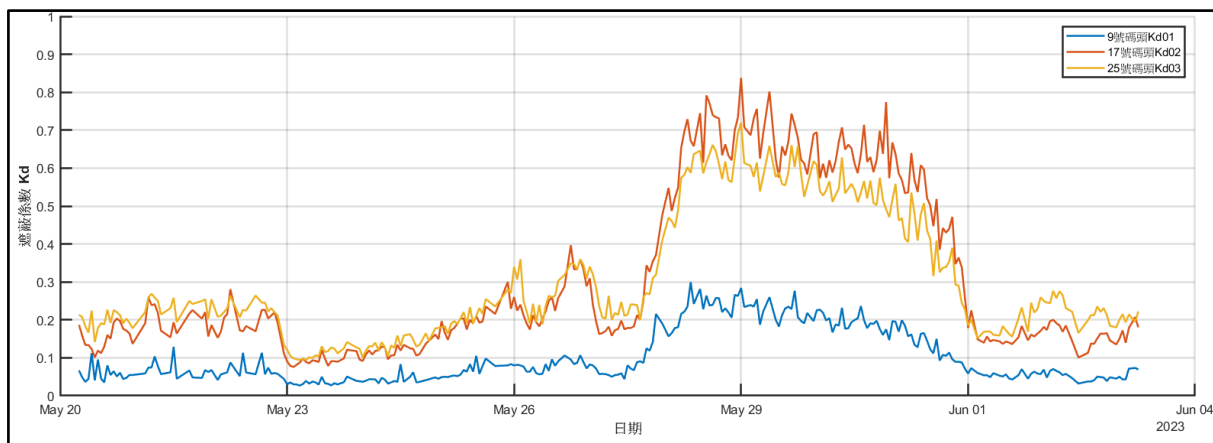


圖 24 瑪娃颱風各測站波浪 Kd 歷線圖

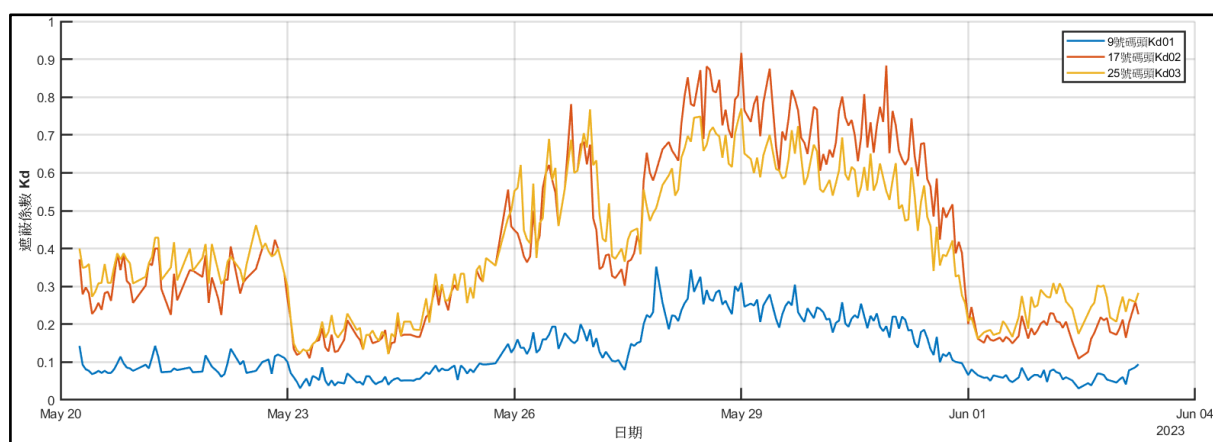


圖 25 瑪娃颱風各測站湧(長)浪 Kd 歷線圖

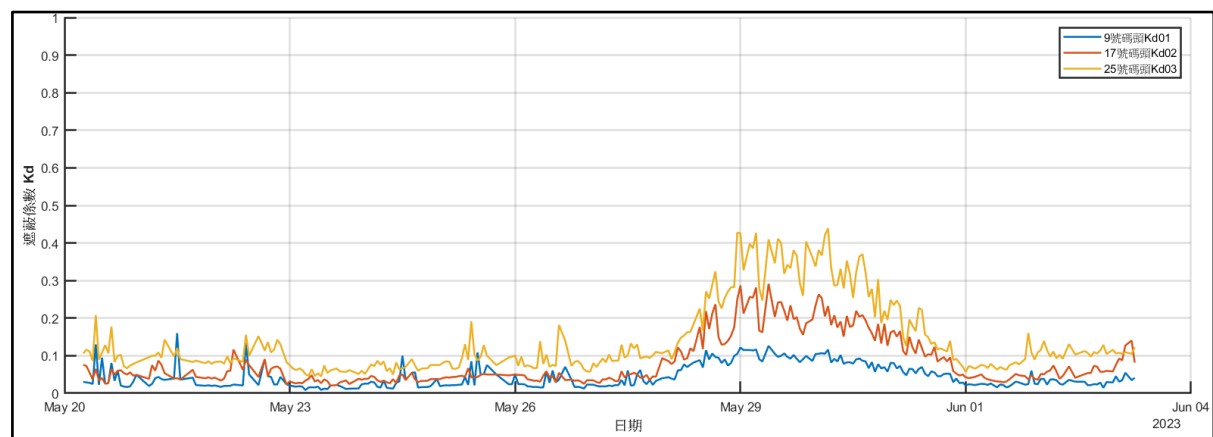


圖 26 瑪娃颱風各測站風浪 Kd 歷線圖

4.2 小犬颱風波浪分析

4.2.1 小犬颱風觀測資料轉換後波高統計

依本研究資料處理後轉換波譜後再計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高，繪製示性波高歷線圖如圖 27、湧(長)浪波高歷線圖如圖 28 及風浪波高歷線圖如圖 29。

港外 AWAC 示性波高平均值 1.58m，最大值 3.96m 發生時間為 2023 年 10 月 4 日，湧(長)浪波高平均值 1.11m，最大值為同日 3.63m，風浪波高平均值 1.08m，最大值為 10 月 5 日 2.30m。港內 9 號碼頭示性波高平均值 0.12m，最大值 0.76m 發生時間為 2023 年 10 月 4 日，湧(長)浪波高平均值 0.12m，最大值為同日 0.75m，風浪波高平均值 0.04m，最大值為同日 0.13m。港內 17 號碼頭示性波高平均值 0.44m，最大值 2.63m 發生時間為 2023 年 10 月 4 日，湧(長)浪波高平均值 0.44m，最大值為同日 2.62m，風浪波高平均值 0.06m，最大值為同日 0.28m。港內 25 號碼頭示性波高平均值 0.45m，最大值 2.24m 發生時間為 2023 年 10 月 4 日，湧(長)浪波高平均值 0.42m，最大值為同日 2.19m，風浪波高平均值 0.12m，最大值為同日 0.46m。

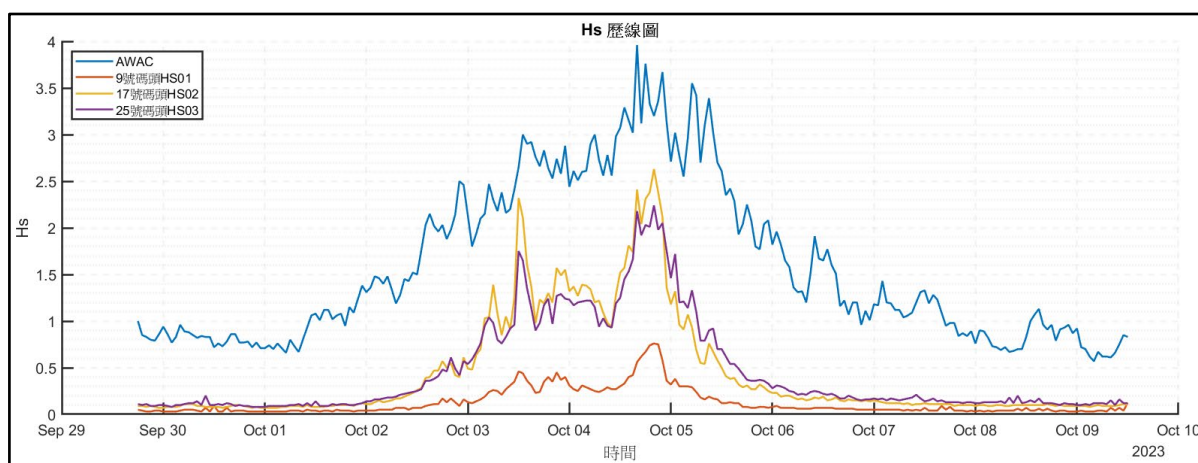


圖 27 小犬颱風各測站示性波高歷線圖

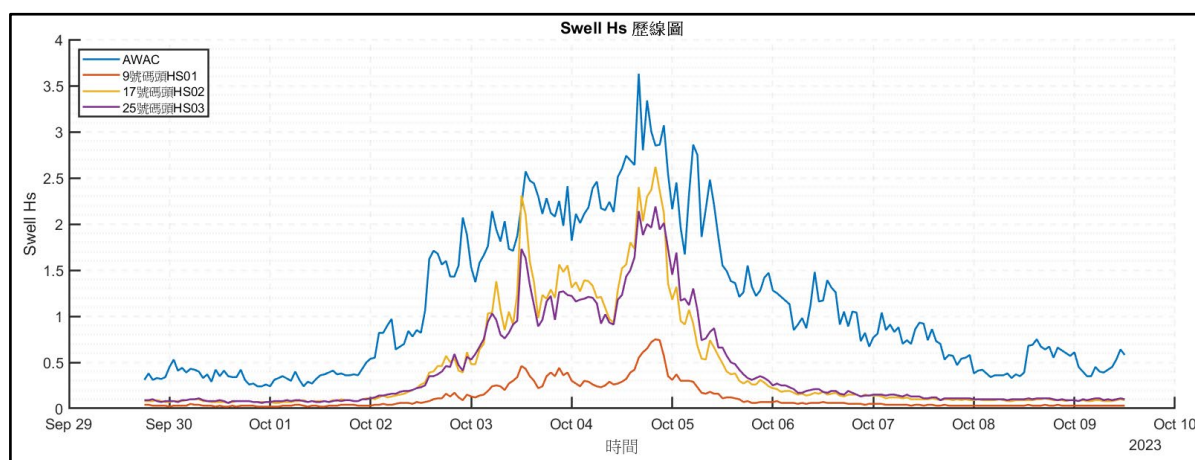


圖 28 小犬颱風各測站湧(長)浪示性波高歷線圖

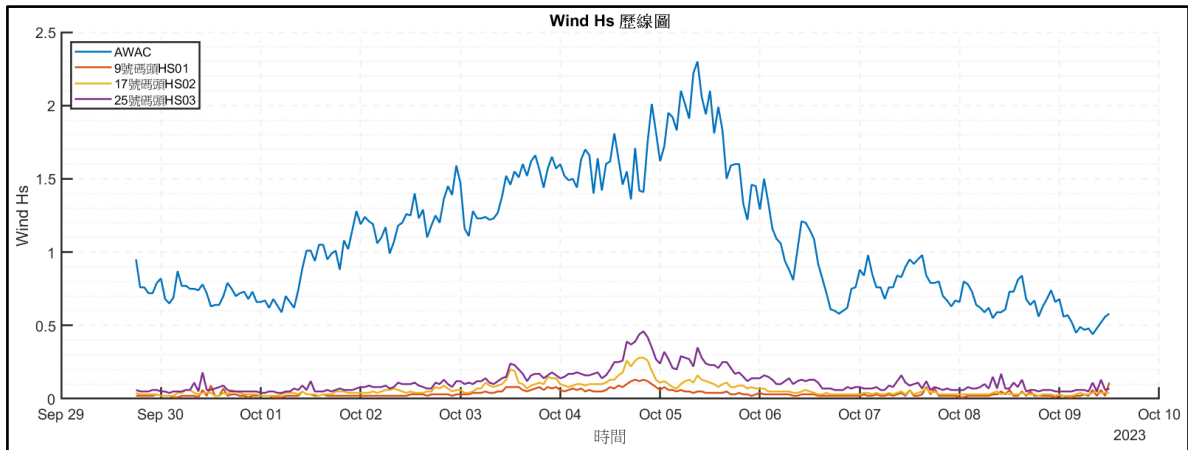


圖 29 小犬颱風各測站風浪示性波高歷線圖

繪製港內外各觀測站外湧(長)浪波高分布圖，如圖 30～圖 32，港外與 9 號碼頭決定係數(R^2)為 0.77，港外與 17 號碼頭決定係數(R^2)為 0.80，港外與 25 號碼頭決定係數(R^2)為 0.86，顯示利用湧(長)浪波高指標可呈現港內外相關性。

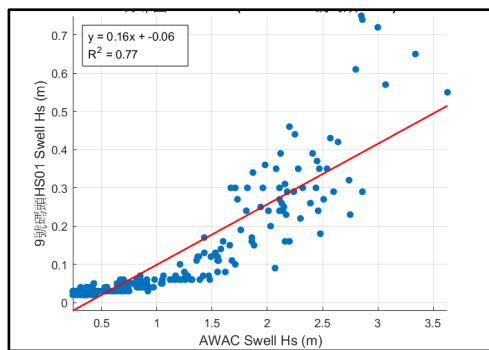


圖 30 小犬颱風港內 9 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

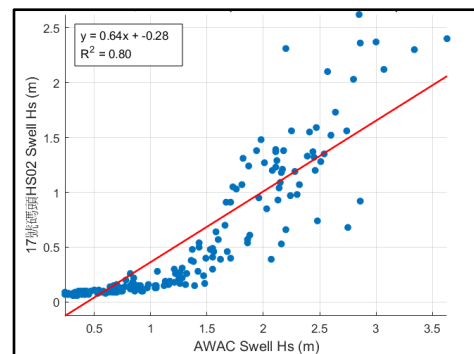


圖 31 小犬颱風港內 17 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

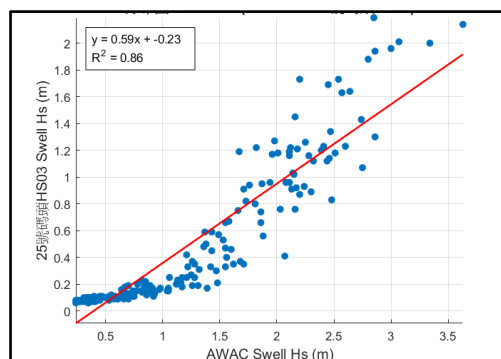


圖 32 小犬颱風港內 25 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

小犬颱風位於臺灣南側海面，路徑較為平順向西移動。於圖 27 中 17 號碼頭波高於 10 月 3 日明顯增加且大於 25 號碼頭，顯示湧浪已由港外先傳遞港內，港內遮蔽作用減少且波高已有放

大現象，10月4日至5日出現最大波高，隨後波高逐漸降低，港內17號碼頭波高相較25號碼頭降低幅度大，表示颱風已逐漸遠離花蓮港，其路徑與港內外波高歷線時間點一致，此外，圖29風浪波高歷線於10月1日至3日開始逐漸增加，並在10月5日達到峰值後才逐漸降低，顯見風浪影響相較湧浪影響時間點較早，且影響整體海象時間較久。

4.2.2 小犬颱風港內各觀測站遮蔽分析

利用觀測資料轉換後計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高進行遮蔽係數 K_d 計算結果，如表8～表10所示。

表 8 小犬颱風港內靜穩度觀測站示性波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.03	0.24	0.07
HLHS02	17 號碼頭	0.07	0.88	0.21
HLHS03	25 號碼頭	0.08	0.70	0.22

表 9 小犬颱風港內靜穩度觀測站湧(長)浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	湧(長)浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.03	0.26	0.09
HLHS02	17 號碼頭	0.11	1.05	0.29
HLHS03	25 號碼頭	0.12	0.79	0.30

表 10 小犬颱風港內靜穩度觀測站風浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	風浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.01	0.19	0.03
HLHS02	17 號碼頭	0.02	0.20	0.06
HLHS03	25 號碼頭	0.05	0.33	0.11

繪製港內各站港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高遮蔽係數 K_d 歷線圖，以瞭解所在碼頭位置之靜穩度變化，如圖33～圖35所示。觀察到10月3日4時至10月4日22時期間，17號碼頭之示性波高及湧(長)浪波高之遮蔽係數明顯大於25號碼頭，且圖28中10月3日12時港內17號碼頭波高大於港外AWAC波高，表示港內波高有放大現象。

統計該期間港外AWAC湧(長)浪平均週期為10.3秒，平均波向為100度；另統計9月29日18時至10月3日3時期間港外AWAC湧(長)浪平均週期為9.75秒，平均波向為92.7度；統計10月4日23時至10月9日12時期間港外AWAC湧(長)浪平均週期為9.49秒，平均波向為99

度，而進一步觀察 10 月 3 日 4 時與 10 月 4 日 22 時之港外 AWAC 湧(長)浪週期約為 9.9 秒。

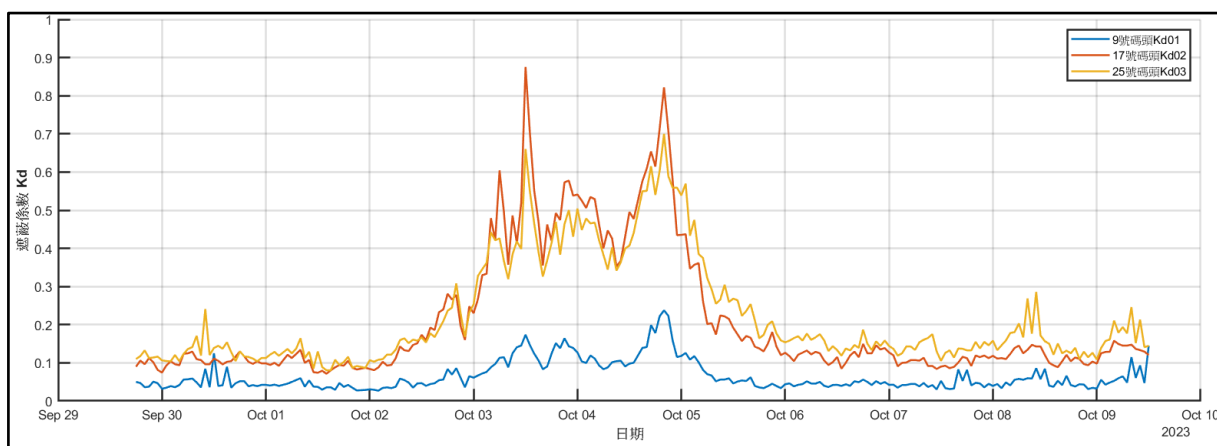


圖 33 小犬颱風各測站波浪 Kd 歷線圖

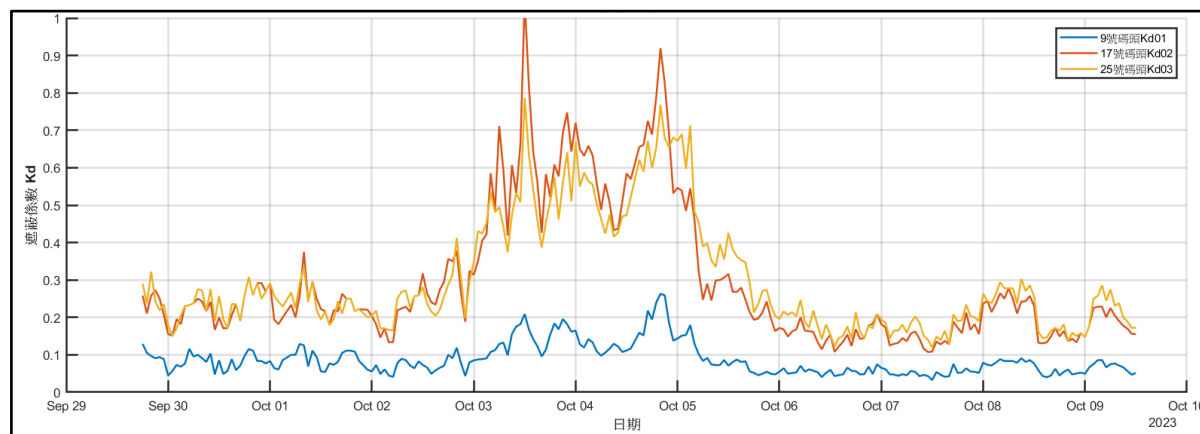


圖 34 小犬颱風各測站湧(長)浪 Kd 歷線圖

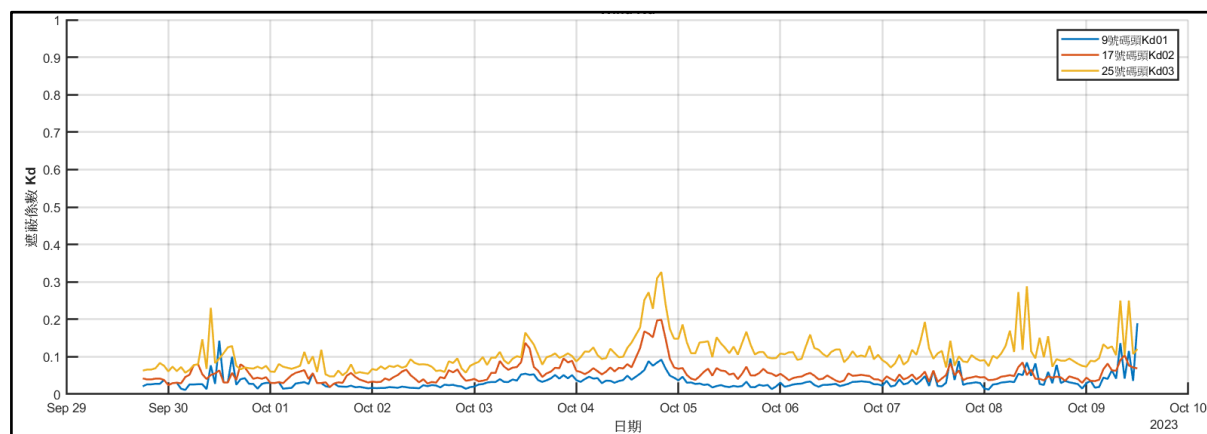


圖 35 小犬颱風各測站風浪 Kd 歷線圖

4.3 凱米颱風波浪分析

4.3.1 凱米颱風觀測資料轉換後波高統計

依本研究資料處理後轉換波譜後再計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高，繪製示性波高歷線圖如圖 38、湧(長)浪波高歷線圖如圖 39，風浪波高歷線圖如圖 40。港外 AWAC 示性波高平均值 2.18m，最大值 6.3m 發生時間為 2024 年 7 月 24 日，湧(長)浪波高平均值 1.57m，最大值為同日 5.49m，風浪波高平均值 1.44m，最大值為同日 3.23m。

港內 9 號碼頭示性波高平均值 0.13m，最大值 0.57m 發生時間為 2024 年 7 月 24 日，湧(長)浪波高平均值 0.12m，最大值為同日 0.56m，風浪波高平均值 0.05m，最大值為 7 月 25 日 0.16 m。港內 17 號碼頭示性波高平均值 0.43m，最大值 2.03m 發生時間為 2024 年 7 月 24 日，湧(長)浪波高平均值 0.42m，最大值為同日 2.01m，風浪波高平均值 0.09m，最大值為 7 月 25 日 0.27 m。港內 25 號碼頭示性波高平均值 0.59m，最大值 1.65m 發生時間為 2024 年 7 月 24 日，湧(長)浪波高平均值 0.53m，最大值為同日 1.62m，風浪波高平均值 0.24m，最大值為同日 0.82m。

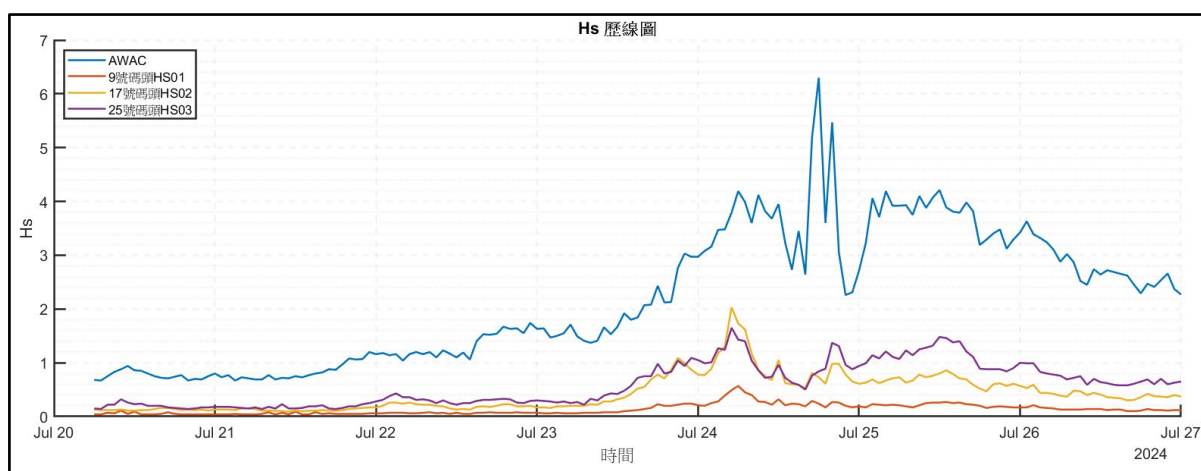


圖 36 凱米颱風各測站示性波高歷線圖

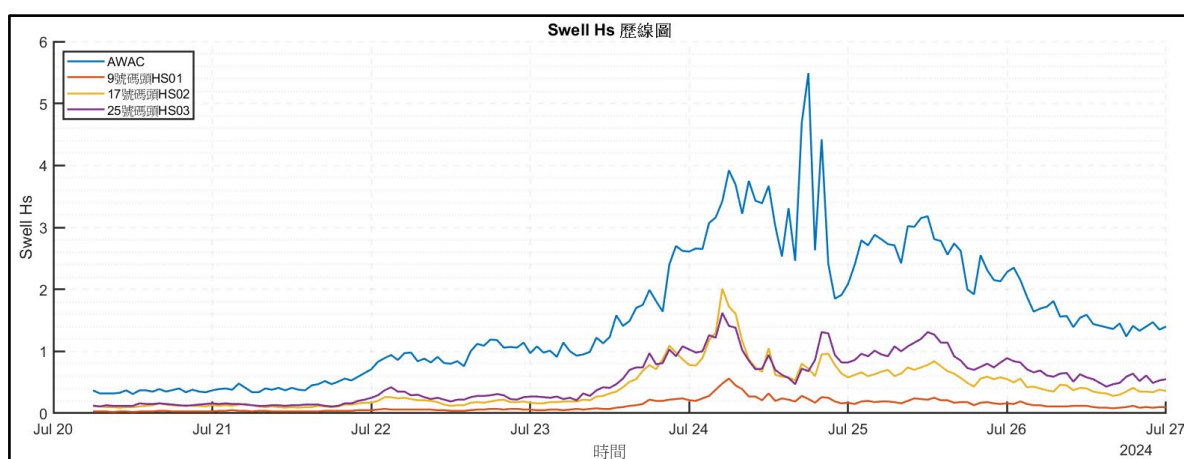


圖 37 凱米颱風各測站湧(長)浪示性波高歷線圖

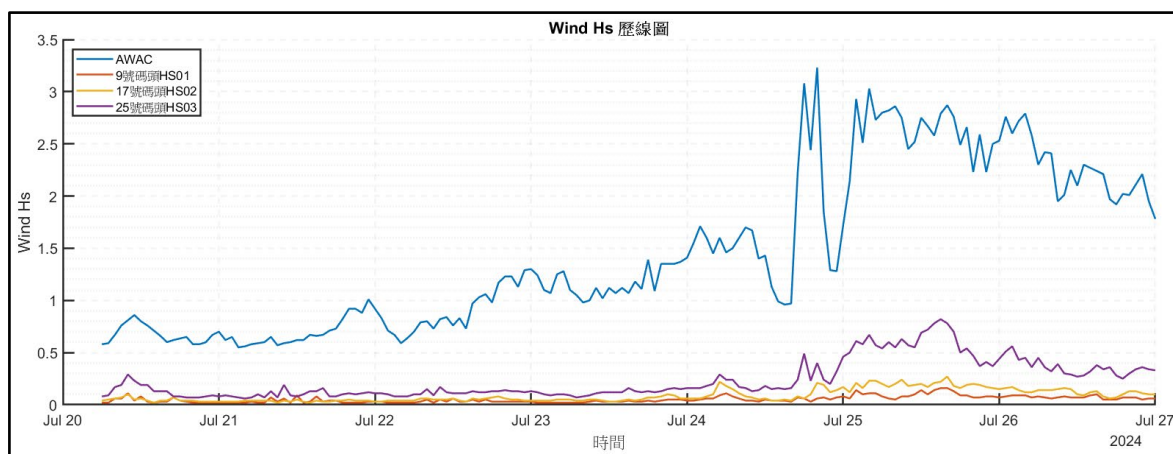


圖 38 凱米颱風各測站風浪示性波高歷線圖

繪製港內外各觀測站外湧(長)浪波高分布圖，如圖 41～圖 43，港外與 9 號碼頭決定係數(R^2)為 0.80，港外與 17 號碼頭決定係數(R^2)為 0.73，港外與 25 號碼頭決定係數(R^2)為 0.77，顯示利用湧(長)浪波高指標可呈現港內外相關性。

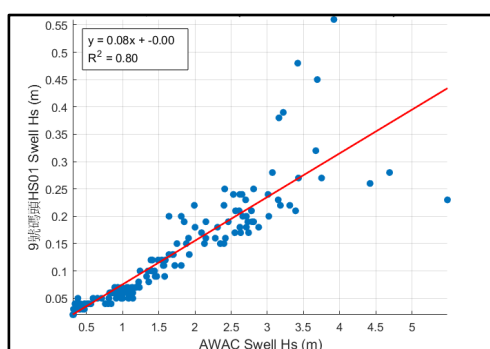


圖 39 凱米颱風港內 9 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

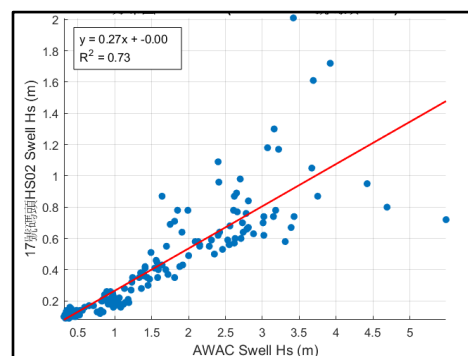


圖 40 凱米颱風港內 17 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

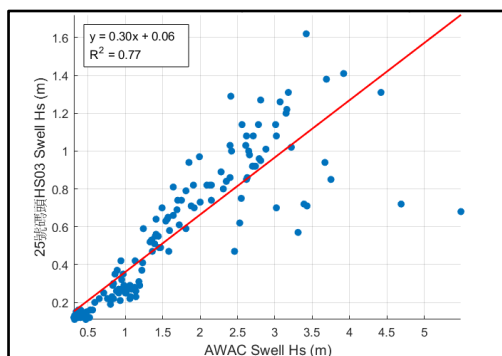


圖 41 凱米颱風港內 25 號碼頭與港外湧(長)浪波高分布圖

凱米颱風路徑由臺灣東南側海面往西北方移動並穿越東北部地區，行徑有擺盪現象且移動快速。於圖 36 中 17 號碼頭波高於 7 月 23 日晚間明顯增加且大於 25 號碼頭，顯示湧浪已由港外先行傳遞港內，港內遮蔽作用減少且波高已有放大現象，然而 7 月 24 日上午波高開始降低直

至晚間才急遽增加，顯見係颱風路徑往南移動後又突向西北前進，造成波高降低後驟增，同時港外 AWAC 測站也觀測到波高最大值，隨後颱風登陸後即受地形影響降為中度颱風並遠離臺灣，隨後港內外波高逐漸降低，但港外風浪仍主導外海波浪，持續影響時間較長。

4.3.2 凱米颱風港內各觀測站遮蔽分析

利用觀測資料轉換後計算港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高進行遮蔽係數 K_d 計算結果，如表 11～表 13 所示。

表 11 凱米颱風港內靜穩度觀測站示性波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.04	0.14	0.06
HLHS02	17 號碼頭	0.10	0.54	0.19
HLHS03	25 號碼頭	0.13	0.44	0.26

表 12 凱米颱風港內靜穩度觀測站湧(長)浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	湧(長)浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.04	0.14	0.08
HLHS02	17 號碼頭	0.13	0.59	0.27
HLHS03	25 號碼頭	0.12	0.54	0.34

表 13 凱米颱風港內靜穩度觀測站風浪波高遮蔽係數表

測站編號	測站位置	風浪遮蔽係數 K_d		
		最小值	最大值	平均值
HLHS01	9 號碼頭	0.01	0.15	0.04
HLHS02	17 號碼頭	0.02	0.14	0.06
HLHS03	25 號碼頭	0.07	0.36	0.15

繪製港內各站港內外示性波高、湧(長)浪波高及風浪波高遮蔽係數 K_d 歷線圖，以瞭解所在碼頭位置之靜穩度變化，如圖 44～圖 46 所示。透過圖 44 及圖 45 觀察到 7 月 24 日 4 時至同日 10 時期間，17 號碼頭之示性波高及湧(長)浪波高之遮蔽係數明顯大於 25 號碼頭。

統計該期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 10.9 秒，平均波向為 103 度；另統計 7 月 20 日 6 時至 7 月 24 日 3 時期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 9.52 秒，平均波向為 112 度；統計 7 月 24 日 11 時至 7 月 27 日 0 時期間港外 AWAC 湧(長)浪平均週期為 9.78 秒，平均波向為 136 度，而進一步觀察 7 月 24 日 4 時與同日 10 時之港外 AWAC 湧(長)浪週期約為 10.7 秒。

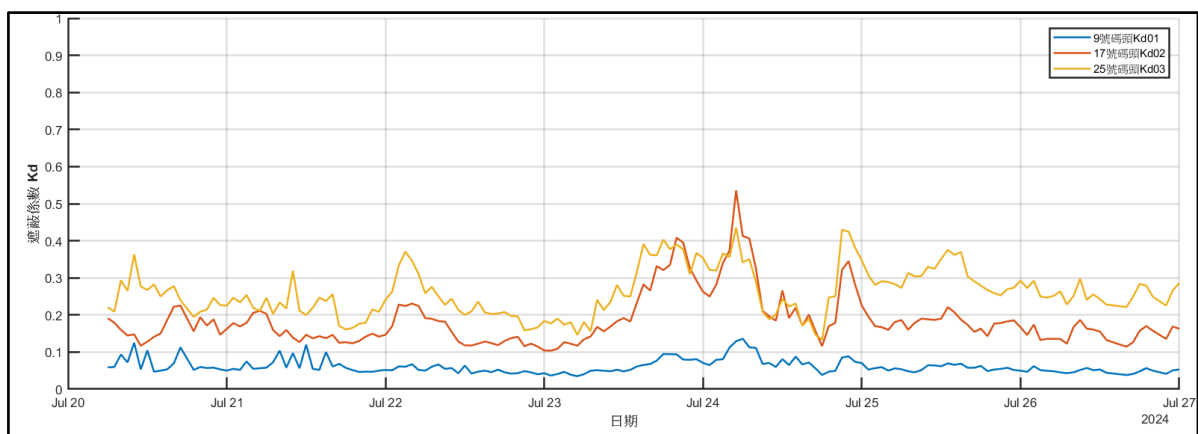


圖 42 凱米颱風各測站波浪 Kd 歷線圖

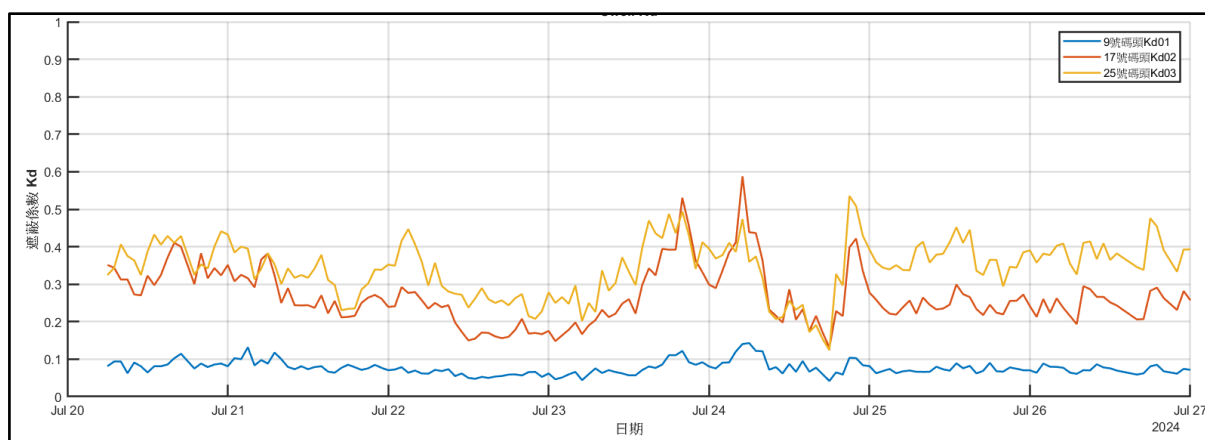


圖 43 凱米颱風各測站湧(長)浪 Kd 歷線圖

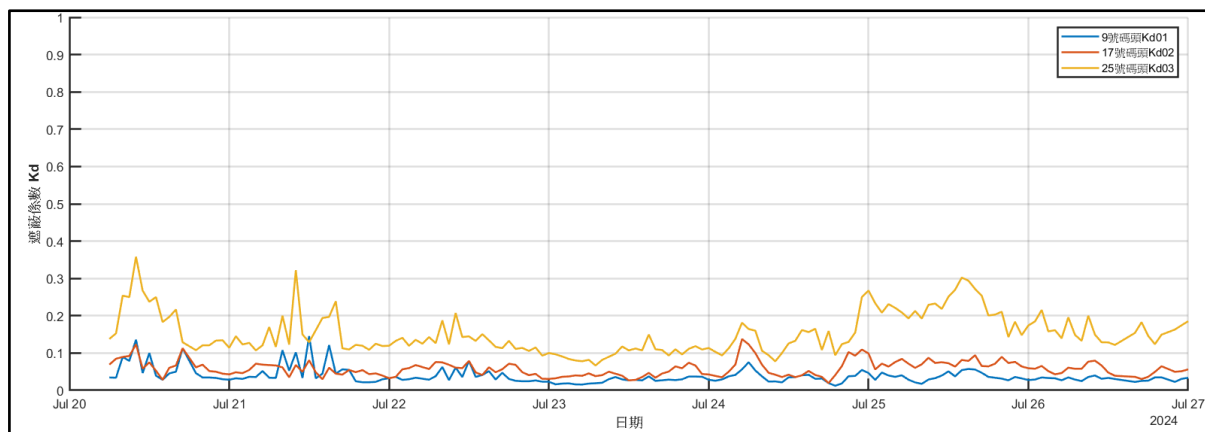


圖 44 凱米颱風各測站風浪 Kd 歷線圖

4.4 各颱風觀測資料波譜分析

為探討花蓮港各測站波浪能量於同時間不同測站之波譜形狀變化，藉此瞭解防波堤設施對於各頻率成份波浪能量之削減情形，本研究將觀測資料處理後進行波譜分析，依同一時間港內各測站與港外測站之波譜分別重疊繪製，各颱風發生最大波高時段波譜分析如圖 45～圖 46，特

別是凱米颱風發生最大波高時(2024 年 7 月 24 日 18 時)，其港內各測站波浪能量均有明顯削減，進一步比對圖 43，並以湧浪遮蔽係數較大之時間(2024 年 7 月 24 日 5 時)繪製波譜如圖 47，此時長週期波浪則發生特定週期能量放大現象，顯示颱風期間發生最大波高時，港內不一定會發生長週期共振現象，參考郭等人(2002)利用觀測數據分析探討港池震盪機制，指出港外風浪越大，不一定港內震盪就大，必須視港外長週期成份波的波向而定，而港外長週期波浪之波向也不一定與風浪主方向相同，本研究凱米颱風案例與郭等人(2002)研究結果相互印證。

參考邱等人(2009)指出週期 25 秒為一區分界線，大於週期 25 秒之波浪於港內有明顯共振現象，經比對圖 45～圖 47 右上圖顯示 9 號碼頭確實存在此現象，17 號及 25 號碼頭則是週期大於 10 秒之波浪能量削減幅度甚小，而蘇等人(2021)及莊(2021)數值模擬研究指出，當共振週期接近 43 秒、66 秒、83 秒、96 秒、130 秒、155 秒及 195 秒時會有明顯的共振現象，本研究將上述研究所提週期繪製重疊於各颱風波譜圖，觀察到不同週期波浪於港內 9 號、17 號及 25 號碼頭，其共振週期並非完全相同；另 17 號及 25 號碼頭波譜能量放大較 9 號碼頭顯著，共振週期亦較為相近，且週期 130 秒至 195 秒時更為明顯，內港區及迴船池區共振週期明顯不同，應是受束縮水道遮蔽影響。

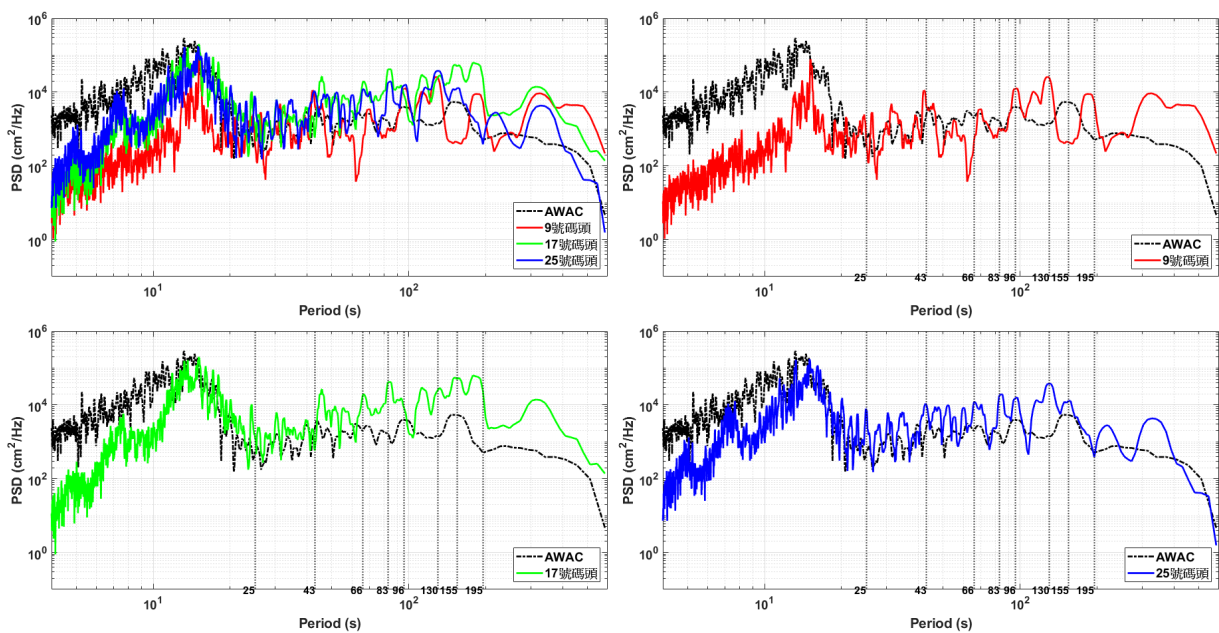


圖 45 瑪娃颱風各測站波譜比較圖

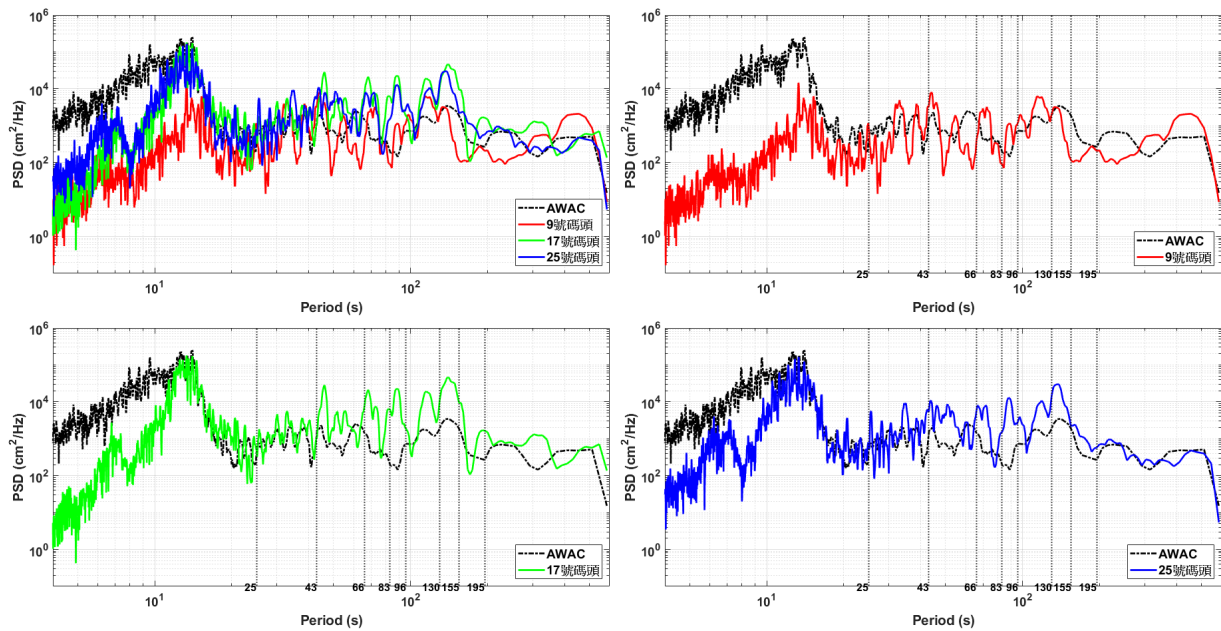


圖 46 小犬颱風各測站波譜比較圖

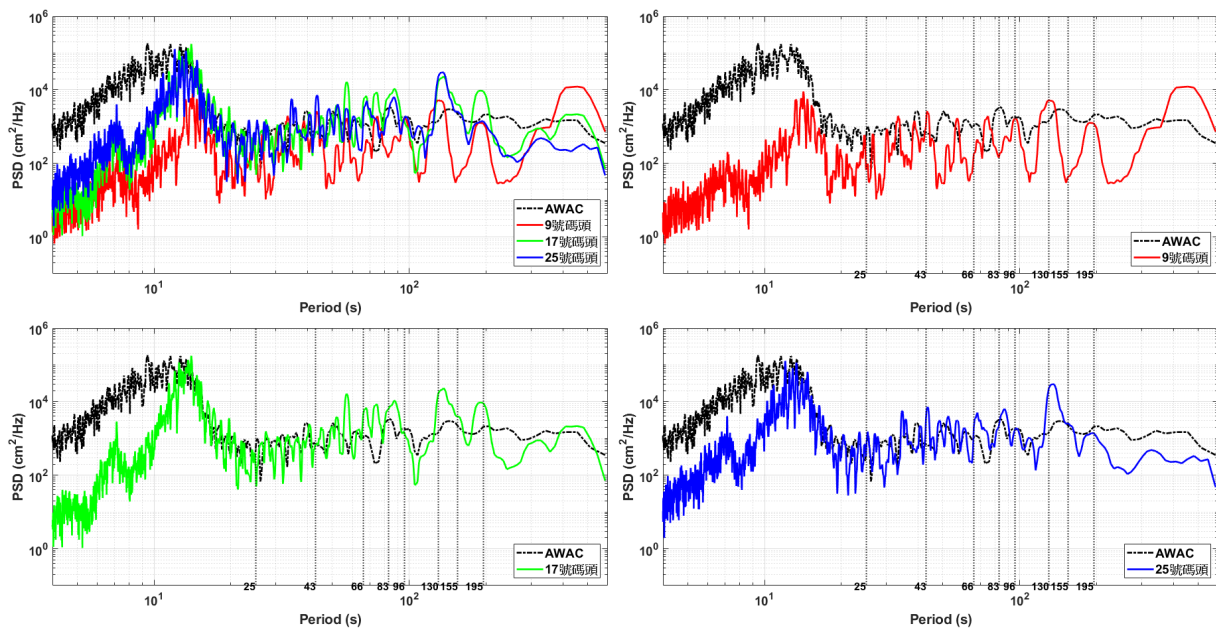


圖 47 凱米颱風各測站波譜比較圖

五、結論

花蓮港於颱風期間面臨顯著港池不靜穩情況，尤其長週期湧浪對港池穩定性造成威脅。本研究統計港內外波高參數並進一步計算港內各觀測站遮蔽係數，短週期風浪於花蓮港防波設施遮蔽下波高顯著減弱，但長週期湧浪可能波浪能量不易消散或因港型特徵長度影響，導致能量不易透過消波設施削弱。遮蔽係數統計結果顯示，不同碼頭位置對於長短週期波浪屏蔽能力差異明顯，尤其 17 及 25 號碼頭遮蔽效果明顯低於 9 號碼頭，表明港池需調整消能設施或有效管理船舶，以有效因應不同波浪特性，避免颱風期間發生災害。

颱風期間港外波浪觀測顯示示性波高大幅升高，最大值超過 6m，平均值維持在 1.5 至 2m 之間，湧浪波高遠高於風浪波高。港內波浪特性受到遮蔽效應影響，9 號碼頭具有較佳短週期風浪遮蔽能力，而湧浪波高在 17 號及 25 號碼頭顯著，顯示湧浪仍保持較高能量傳遞至港內。透過瑪娃、小犬與凱米颱風案例，顯見港外長週期湧浪佔主要成份，17 號及 25 號碼頭波高顯著提升時，其平均波向集中於東南東，與港口方向有關，導致遮蔽效果不佳。

本研究統計風浪遮蔽係數部分，9 號碼頭平均值介於 0.03~0.05，17 號碼頭平均值介於 0.06~0.08，25 號碼頭平均值介於 0.11~0.15；湧浪遮蔽係數部分，9 號碼頭平均值介於 0.08~0.13；17 號碼頭平均值介於 0.27~0.42；25 號碼頭平均值介於 0.30~0.41，顯見各觀測站風浪遮蔽係數變化不大，而 9 號碼頭湧浪遮蔽係數相較於 17 及 25 號碼頭小，遮蔽效果較佳，17 及 25 號碼頭湧浪遮蔽係數變化大，易受波向及波浪週期影響使港池不靜穩，造成此現象可能原因係該期間外海主要波向為東南東，且湧浪週期大於 10 秒時，東防波堤無法有效遮蔽，造成港池內波高偏大，導致發生不靜穩現象。另外，藉由波譜分析得知 17 號及 25 號碼頭之 10 秒週期以上波譜能量與港外相當，尤其特定週期發生能量明顯放大現象；9 號碼頭則是波浪週期小於 25 秒時，波譜能量大部分皆小於港外 AWAC 觀測站，顯示花蓮港防波堤僅對波浪週期小於 25 秒且位於 9 號碼頭可發揮遮蔽作用，但波浪週期大於 10 秒且位於迴船池區(17 號及 25 號碼頭)之遮蔽效果有限。透過港內外波高遮蔽分析及波譜分析結果一致，各測站對於不同條件波浪遮蔽效果有限，後續可做為花蓮港湧浪遮蔽試驗參考。

參考文獻

1. 陳智恆、李俊穎、林受勳、李江澤、陳天時(2024)，花蓮港湧浪遮蔽試驗(1/3)-試驗規劃及建置，交通部運輸研究所。
2. 臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司(2023)，花蓮港颱風湧浪期間船舶靠泊作業注意事項。
3. 莊文傑(2021)，臺灣東部海岸颱風長浪群波引致之港灣振盪，交通部運輸研究所。
4. 蘇仕峯、夏武成、周立翔、謝杰恩、吳瑋軒(2021)，長週期亞重力波於港灣及河口海岸之數值模擬，淡江大學學校財團法人淡江大學水資源及環境工程學系。
5. 李俊穎、傅怡鈞、劉清松、陳鈞彥、謝佳紘(2020)，港灣風波潮流模擬及長浪預警之研究-模擬評估及長浪預報研究，交通部運輸研究所。
6. 李俊穎、謝佳紘、陳鈞彥、傅怡鈞、羅冠顯(2019)，花蓮港 2016、2017 年度觀測長浪特性分析，第 41 屆海洋工程研討會論文集。
7. 邱永芳、簡仲璟、何良勝、蘇青和、張富東、李俊穎、錢爾潔、馬維倫、陳正義(2009)，花蓮港港池共振改善計畫，交通部運輸研究所。
8. 郭一羽、林明儀、曾相茂(2002)，花蓮港池震盪現象的探討，海洋工程學刊，第二卷第一期。