

交通部運輸研究所

中華民國 110 年 2 月

交通部運輸研究所

GPN:1011000125 定價 300 元

著 者:莊文傑

交通部運輸研究所

中華民國 110 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣東部海岸颱風長浪群波引致之港灣振盪 / 莊文傑著 初版 臺北市 : 交通部運研所, 民 110.02 面 ; 公分 ISBN 978-986-531-220-6(平裝)	
1. 波動 2. 數值分析	
351.941 110000515	

臺灣東部海岸颱風長浪群波引致之港灣振盪
者 - 石・壯乂傑
出版機關:交通部運輸研究所
地 址: 105004 臺北市松山區敦化北路 240 號
網 址:www.iot.gov.tw(中文版>數位典藏>本所出版品)
電 話:(04)2658-7200
出版年月:中華民國 110年2月
印刷者:
版(刷)次冊數:初版一刷 60 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所網站
定 價:300 元
展售處:
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話:(02)2349-6789
國家書店松江門市: 104472 臺北市中山區松江路 209 號•電話: (02) 2518-0207
五南文化廣場:400002臺中市中區中山路6號•電話:(04)2226-0330

GPN:1011000125 ISBN:978-986-531-220-6(平裝) 著作財產權人:中華民國(代表機關:交通部運輸研究所) 本著作保留所有權利,欲利用本著作全部或部分內容者,須徵求交通部 運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱:臺灣東部海岸颱風	長浪群波引致之港灣打	汞盪	
國際標準書號(或叢刊號)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號	計畫編號
ISBN 978-986-531-220-6(平衮)	1011000125	110-00/-/029	109-H3CA001c
主辦單位:港灣技術研究中心			研究期間
主管:蔡立宏			自 109 年 01 月
計劃主持人:莊文傑			至109年11月
研究人員:莊文傑			
參與人員:傅怡釧、蔡世璿			
聯絡電話: (04)2658-7185			
傳真號碼:(04)2656-4415			
關鍵詞:亞重力波、群波、包絡	波、波揚與波降、港灣	彎共振、時頻分析、自由	長波、約束長波

報告內容重點摘要:

本研究應用亞重力波的生成理論與波動特性,結合交通部運輸研究所港灣技術研究中心 長年在臺灣5個國際商港海域執行海氣象監測之長期性紀錄,針對颱風期間,透過花蓮港及 蘇澳港外亞重力波源的頻譜分析與辨識,再藉低頻激振波動之協振盪作用,將港內、外之波 動振盪特性與型態作聯結,並經相互之對照比較後,對於花蓮港及蘇澳港在颱風侵襲影響期 間發生港灣振盪之相關課題,可得結論與建議如后。

- 颱風波浪,振幅大,非線性高,本質具有高、低頻成分,其中,高頻波動之尖峰週期,主要集中在10~20秒之長浪區間,因而由颱風長浪成分所構成之群波,週期一般也會大於100秒,這意謂颱風波浪近最大波高期間,低頻的亞重力波(0.2~2 cpm)會較彰顯,並容易造成港灣振盪!。
- 2. 國內港灣之規劃設計,大多針對屏蔽高頻波動為主,而造成港灣振盪及不靜穩之主因, 往往是低頻波動,特別是由伴隨高頻群波之波揚與波降所陳示之約束長波或亞重力波。
- 3. 颱風長浪影響期間,花蓮港及蘇澳港內、外,經協振盪作用而引致港灣振盪之低頻波動 源,實際皆係港外閉鎖於高頻群波下之波揚與波降效應所衍生。
- 4. 花蓮港與蘇澳港,港外颱風波浪之群波,自然會伴生波揚與波降效應,以致港灣振盪, 無論在颱風期或季風期,皆必須經常面對,有所不同的,只是振盪程度之強弱與振盪振 幅之大小,會隨港外颱風長浪高頻群波之波高大小變化而已。
- 5. 花蓮港之港灣振盪現象,應用 MIKE21-EMS 緩坡方程式數值模式,可藉模擬計算方式, 確認花蓮港與其港外的灣澳海域,具港灣振盪之整體性,因而會顯著受港外亞重力波之 協振盪作用支配。
- 6. 花蓮港之港灣振盪,從港域內不同碼頭區及港域外波浪測站之振幅增幅反應曲線綜合研 判,當港外亞重力波之激振週期約為100、130、160及190秒時,花蓮港內各碼頭區皆 將面對振盪程度不等之港灣振盪。其中,當港外亞重力波之激振週期約為195秒,且具

有大於 25 公分之較顯著波動振幅時,則花蓮港內各碼頭區將面對振盪程度最大的港灣共振。

- 7. 花蓮港外,亞重力波次要之自然振盪週期約是 160 秒,在該激振頻率上,若其波動振幅 大於 10 公分,則因港內部分碼頭區之振幅增幅反應率約可達 10 左右,因此,該頻率成 分之亞重力波所可激發之港灣振盪,反而最顯著且嚴重。
- 蘇澳港外,激發公務船渠產生港灣振盪之颱風長浪波源,主要之激振頻率對應之週期分別是 273~429 秒(4.5~7.2 分鐘)、143~171 秒、92~103 秒、60~75 秒,皆係為港外閉鎖於 群波下伴隨波揚與波降效應所衍生之約束長波。
- 蘇澳港外,在強季風期間,閉鎖於港外高頻群波下的約束長波,主頻略高,趨近於 0.3cpm, 週期約 200 秒,由於其略偏離蘇澳港激發港灣共振之自然振動頻率,以致公務船渠之港 池振盪強度普遍偏弱。
- 10.花蓮港與蘇澳港之外港,可激發港灣共振之自然頻率約0.12~0.15 cpm,週期分別約為8.5 分鐘與7分鐘,只是具有該激振頻率之港外亞重力波源,因其振幅不大,故而不易促成 激烈之港灣振盪。
- 11.閉鎖於港外高頻群波下之波揚與波降低頻波動,其頻率(0.1~2 cpm)偏屬亞重力波頻段, 振盪型態具有緣波特性,這在防制港灣振盪及釐訂改善對策時,值得特別注意。
- 12.在花蓮港與蘇澳港外,由於閉鎖於高頻群波下之約束長波,其振幅會隨群波波高之高低 而改變大小,因此,對於防制港灣振盪之對策與改善建議,基於港灣配置之硬體層面調 整不易,而僅就韌體層面,可藉臺灣東部海域颱風長浪演化特性的充分瞭解,在颱風長 浪之侵襲影響期間,無論是否為發佈警報的颱風,當花蓮港或蘇澳港的逐時監測波浪, 若其尖峰週期大於10秒、示性波高大於1.5公尺,即可依據莊、曾(2019)研提的瘋狗浪 預警準則,對駐港船舶,警示加強繫纜或採取現況之避湧措施。

研究成果之效益:

- (1) 學術成就(科技基礎研究)方面:發表國內研討會論文3篇,出版研究報告1冊。掌握科研課題之廣度與深度,擴展分析觀點,結合海岸專業知識,發揮波浪專業學能, 辦識造成蘇澳港與花蓮港港灣振盪之長浪波源,並確認亞重力波主要係源自於高頻 波群伴隨非線性效應所衍生之波揚與波降;
- (2) 技術創新(科技整合創新)方面:以國內、外關於近岸海域長浪衍生之往昔研究成果為基礎,溫故知新,學以致用,並針對颱風長浪影響期間,應用時頻分析,詳實探討颱風長浪之群波特性,掌握關聯港灣振盪之主要波動源;
- (3) 在經濟效益(經濟產業促進)方面:配合「災害防救法」,針對導致港灣振盪之關鍵 影響因素,研提降減颱風長浪所造成港域不靜穩及港灣振盪影響之防制措施或改善

對策,強化港灣功能,縮減颱風長浪影響期間之駐港船舶疏泊規模,具體落實總體 性之港灣防災策略,樽節颱風長浪之防災與減災成本;

- (4) 在社會影響(社會福祉提升、環保安全)方面:促成國家海氣象觀測資源之永續利用, 詳實探討並瞭解颱風長浪在近岸海域之演化特性,精進海岸管理策略,有效施行港 灣防災應變措施,強化港灣效能,提昇國際商港之港灣形象;
- (5) 在其它效益(政策管理及其它)方面:因應氣候變遷與海岸災害風險,維護港灣運輸 環境,落實「整體海岸管理計畫」,推動「海岸防護」與「海岸保護」目標,綜整 海岸管理之課題與對策,導引海岸防災措施,健全海岸管理,提昇港灣災防技術。

可供本所或其他政府機關後續應用情形:

本研究配合本所推展「海洋及交通運輸防災技術研究」目標,落實「運輸環境災防 技術發展研究」項目,面對颱風長浪經常侵襲而造成港灣振盪之蘇澳港與花蓮港,有效 應用國家海氣象觀測資源,結合海岸專業知識,發揮波浪專業學能,詳實探討颱風長浪 之群波特性,掌握關聯港灣振盪之主要波動源,針對導致港灣振盪之關鍵影響因素,發 揮海岸專業學能,學以致用,研提降減颱風長浪所造成港域不靜穩及港灣振盪影響之防 制措施或改善對策,強化港灣功能,縮減颱風長浪影響期間之駐港船舶疏泊規模,具體 落實總體性之港灣防災策略,樽節颱風長浪之防災與減災成本,降低港灣營運風險。相 關具體成果可做為交通部、各港務分公司及各工程顧問公司等相關產、官單位從事港灣 規劃、設計、擴建、維護及港灣防災的應用參據。

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式		
110年2月	263	300	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品,公營、公益機 關團體及學校可函洽本所免費贈閱;私人及私營機關團體可按定 價價購。		
備註:本研究之結論與建議不代表交通部之意見。					

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS INSTITUTE OF TRANSPORTATION MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: The harbor oscillation induced by the wave groups of swell on the eastern coast of Taiwan.							
ISBN (OR ISSN) 978-986-531-220-6 (pbk)	PROJECT NUMBER 109-H3CA001c						
DIVISION HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTERPROJECT PERIOLDIVISION DIRECTOR: Li-Hung TsaiPROJECT ADVISOR: Wen-Jye JuangPRINCIPAL INVESTIGATOR: Wen-Jye JuangFROM January 2020PROJECT STAFFS: Yi-Chuan Fu, Shih-Hsuan TsaiTO November 2020PHONE: 04-2658-7185FAX: 04-2656-4415							

KEY WORDS: Infragravity Waves, Wave Groups; Wave Envelope, Waves Set-Up and Set-Down, Harbor Resonance, Time-Frequency Analysis, The Free and Locked Long Waves.

By applying the MIKE21-EMS module developed by Danish Hydraulic Institute, Resonance induced by infra-gravity waves at Hua-Lian harbor is reviewed and re-investigated in this study. The computational domain including the harbor and the nearby beach bay is considered. Based on the computed amplification response curves, resonance observed in the inner harbor is identified. The maximum amplification factor reaches 28.86 at wharf number 12 when the incident wave periods approximate to 195 seconds. From the wave records measured during the action period of typhoon Tim, it is verified that the serious seiching in the inner harbour basin is result from resonance due to the frequencies of infra-gravity waves fall into the band of the harbor natural frequencies. The serious oscillation in the outer basin is mainly caused from poor shielding as well as significant reflection generated from the east outer breakwater. Instead of "hard-engineering" to change the present harbor configuration, the "soft-engineering" prevention strategies are proposed. For the former one, we propose that the cabling manner with associated the cabling facilities have to be improved in advance to overcome the large seiching displacements, which is totally not more than 4 m in vertical direction, and the seiching period, which approximates to 195 s. For the later one, enhance the facilities at the east outer breakwater to reduced the energy of reflected wave are proposed.

To support the national program of tsunami monitoring, the Central Weather Bureau has been conducting uninterrupted continuous measurements of sea level on the east coast of Taiwan since the beginning of 2008. Basing on the measurements, time-frequency analysis: HHT and the Fourier spectrum: FFT are applied to investigate the characteristics of infragravity waves during typhoon season. From the results, it is find that typhoons moving forward Taiwan can always generate infragravity waves with frequencies of 0.1~0.3cpm inside the harbor on the east coast. The infragravity waves with frequencies higher than 0.3cpm are very rare and weak. However, the infragravity waves are significantly predominant with frequencies about 0.375, 0.46, 0.75, 0.9, and 1.15cpm inside the Hualien Harbor regardless of the routes of typhoon. Therefore, harbor resonance is confirmed in the Hualien Harbor, and it can always occur during a typhoon approaching to the east coast. The routes of typhoon can only relate to and affect the degree of serious of harbor resonance.

Basing on the wave records of pressure gauge that mounted on an AWCP and setup at a station out of the entrance of Hualien Harbor, the existence of infragravity waves on the near shore is investigated through applying the Morlet timefrequency analysis. It is find that infragravity waves will present when the wave height is growing higher than 2m, or when there are swells with frequency about 0.07Hz appearing during a typhoon approaching to or passing by the east coast of Taiwan. Furthermore, applying the EMD (Huang et al., 1998) to decompose measurement waves into high frequency (f > 0.07Hz) and infragravity (f < 0.03Hz), then following by comparing and verifying the power spectrum of the infragravity waves with the one of the wave groups of high frequency waves, the infragravity waves therefore is successfully identified that it is generated from set-down effects beneath high frequency wave groups. Besides, the infragravity waves with primary frequency more than 0.01Hz are confirmed to be the essential sources to induce the harbor resonance that might occur in the Hualien Harbor during a typhoon approaching.

Analyzing the tidal data with sampling rates of 1cpm measured at the small official boats berthing basin (~300m \times 250m) inside the Suao Port, it is confirmed that the infragravity waves of frequencies distributing on 0.1~0.3cpm usually cause serious harbor oscillation during the impacts of typhoon waves. To identify the generating sources of infragravity waves for fulfilling the basin calm program, additional wave investigations that measured by bed-mounted AWCPs are synchronously implemented outside and inside the port. Applying the central moving average method with window widths of 20 minutes and 30 seconds respectively to detide and to filter out the high frequency waves in hourly records, the spectra of low frequency oscillations presented inside the port and the ones of water level variations associated with the envelopes of wave groups appeared outside the port are evaluated and compared. The serious harbor oscillation frequency of 0.15cpm closes to the natural frequency of water exhibited between entrances of both the port and the official boats basin, harbor resonance occurred during typhoon wave impacts is also confirmed. Besides, for set-down beneath wave groups presented not only on typhoon waves but also on monsoon waves, so there are low frequency oscillations always appeared in the port. The main difference is just the intensity of oscillations.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE
February 2021	263	300

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

中文摘要I
英文摘要IV
目 錄VI
圖 目 錄IX
表目錄XXV
第一章 緒論1-1
1.1 研究緣起1-1
1.2 文獻回顧1-3
1.3 工作項目1-7
1.4 研究成果之效益與應用1-7
1.4.1 研究成果效益 1-7
1.4.2 在業務施政上的應用 1-8
第二章 臺灣東部近海之波浪與風速監測2-1
2.1 蘇澳港及花蓮港之海氣象監測
2.2 風與波浪監測紀錄匯整2-3
2.2.1 風 2-3
2.2.2 波浪 2-8
2.3 波壓紀錄之轉換處理2-16

目 錄

2.4 風浪監測與分析資料之檢選	2-27
2.5 颱風波浪特性分析	2-29
2.5.1 臺灣近海之颱風長浪監測	2-29
2.5.2 臺灣東部海域颱風波浪之關聯特	性2-40
2.5.3 颱風長浪之傳播速度	
2.5.4 近岸颱風長浪之演化歷程	2-47
2.5.5 颱風長浪之判識	2-64
2.6 季風波浪特性分析	2-67
2.6.1 臺灣近海之季風波浪監測	2-67
2.6.2 東北季風與區域風浪之關聯特性	2-75
2.6.3 西南季風與區域風浪之關聯特性	2-90
2.6.4 東北季風波浪之演化歷程	2-100
第三章 花蓮港颱風長浪群波引致之港灣振盪	3-1
3.1 花蓮港域之配置	
3.2 颱風影響期間之港外與港內波動紀錄	录分析3-4
3.3 颱風影響期間之港灣振盪型態與特性	生分析3-9
3.4 地震引起之港灣振盪特性分析	
3.5 花蓮港內外颱風長浪之波動特性分析	ŕ3-22
3.6 花蓮港外激發港灣振盪之亞重力波源	原辨識3-33
3.7 花蓮港外之颱風波浪與港灣振盪模揚	€3-39
3.8 研提防制措施及改善對策	3-46
第四章 蘇澳港颱風長浪群波引致之港灣振盪	4-1

附錄3	期末報告審查會議紀錄及委員意見處理表	附 3-1
附錄 2	期末報告審查簡報資料	附 2-1
附錄1	花蓮港與蘇澳港港灣振盪歷年相關之專題研究文獻	附 1-1
參考文	獻	參-1
:	5.3 可供本所或其他政府機關後續應用情形	5-5
÷	5.2 研究成果之效益	5-4
	5.1 結論與建議	5-2
第五章	結論與建議	5-1
2	4.6 研提防制措施及改善對策	4-20
2	4.5 港灣振盪與港外波動源之關聯性	4-12
2	4.4 颱風影響期間港外之亞重力波辨識	4-8
2	4.3 蘇澳港公務船渠在颱風影響期間之港灣振盪特性分析	4-6
2	4.2 颱風影響期間之港外與港內波動監測紀錄整理	4-2
2	4.1 蘇澳港域之配置	4-1

圖目錄

圖	1-1	以週期差異為基準之波動分類1-1
圖	1-2	伴隨高頻波群之非線性效應所衍生之水面波揚與波降1-5
圖	2-1	挪威 NORTEK 公司出品同時掛載有壓力計(Press.)及聲波計 (AST)之超音波式波向波高與剖面海流儀(AWAC)2-2
圖	2-2	臺灣海域冬季 2017/10/30 02:00 之東北季風天氣系統(左)與地面 風場(右)
圖	2-2((續) 臺灣海域夏季 2017/06/20 08:00 之西南季風天氣系統(左)與 地面風場(右)2-3
圖	2-2((續) 臺灣海域秋季 2017/10/20 08:00 蘭恩颱風之颱風天氣系統 (左)與地面風場(右)2-4
圖	2-3	臺中港北外堤風速測站在 2015 年 12 月至 2016 年 1 月冬季季 風期實測之 10 分鐘平均風速(上)與風向(下)逐時序紀錄2-6
圖	2-3((續)臺中港北外堤風速測站在2016年2月至2016年3月冬季 季風期實測之10分鐘平均風速(上)與風向(下)逐時序紀錄2-6
圖	2-4	基隆(左)及臺中(右)港域風力測站歷年冬(上)、夏(中)季及全年 (下)風玫瑰圖之對照比較(資料來源:2016年港灣海氣象觀測資料統 計年報_12港域觀測風力資料,交通部運輸研究所)
圖	2-5	蘇澳港在 2015 年 8 月蘇迪勒颱風影響期間以 AWAC 壓力計 (Press上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀 錄(上)
圖	2-6	蘇澳港在 2015 年 8 至 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓 力計(Press上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分時時 序紀錄
圖	2-7	花蓮港在 2015 年 8 月含括蘇迪勒颱風及天鵝颱風影響期間以 AWAC 壓力計(Press上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀錄2-11
圖	2-8	以示性波高 (H_s) 及尖峰週期 (T_p) 陳現 5 個國際港波浪監測特性 之 IHMT 既有海氣象展示系統

- 圖 2-12 蘇澳港 2015 年 8 月 6 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波

- 圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 00 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.937).......2-20
- 圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 20 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.884)........2-21
- 圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 23 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.688)........2-21
- 圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 6 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.868)........2-22
- 圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 00 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.923)........2-22
- 圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.941).......2-23
- 圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 16 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始 聲波水位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.928)........2-23
- 圖 2-13 將 2015 年 8 月 7 日 AWAC 聲波計原始分時實測紀錄與蘇澳 港(上)及花蓮港(下)經應用不同界定頻率與逆傅立葉轉換壓力計 紀錄為海面水位時序之相關係數檢核比對.......2-24
- 圖 2-14(續) 蘇澳港於 2015 年 8 至 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉換(中) 與經去除潮汐影響(下)之海面水位時序統整.......2-25

- 圖 2-14(續) 花蓮港於 2015 年 8 月含括蘇迪勒颱風與天鵝颱風期間以 AWAC 壓力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉 換(中)與經去除潮汐影響(下)之海面水位時序統整......2-26

- 圖 2-15(續) 蘇澳港外於 2015 年 9 月杜鵑颱風影響期間以壓力計(上) 及聲波計(下)監測波浪之原始 1Hz 逐時波動紀錄與聲波紀錄在 大波高期間發生之截底情形.......2-28

- 圖 2-20 梅沙颱風(2015/03)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測

風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風 速)......2-34 圖 2-21 紅霞颱風(2015/05)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測 風浪之逐時紀錄分析(下:上示性波高;中尖峰週期;下風 圖 2-22 白海豚颱風(2015/05)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監 測風浪之逐時紀錄分析(下:上 示性波高;中 尖峰週期;下 圖 2-23 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 7 月夏季颱風 影響期間示性波高(上)與尖峰週期(中)及十分鐘平均風速(下)所 陳示近似相同之逐時演化歷程......2-38 圖 2-24 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 4 月梅沙颱風 影響期間颱風波浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下) 所陳示近似相同之逐時演化歷程......2-39 圖 2-24(續) 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 5 月紅霞 颱風影響期間颱風波浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速 圖 2-25 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2013 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時 變歷程......2-42 圖 2-26 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2014 年 7 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時 變歷程......2-42 圖 2-27 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2014 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時 變歷程......2-43 圖 2-28 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2015 年 7 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時 變歷程......2-43 圖 2-29 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2015 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時

- 圖 2-31 蘇澳港與花蓮港自 2013 年至 2015 年 7 月與 8 月夏季颱風期 監測波浪示性波高(上)與尖峰週期(下左)及二階譜週期(下右)之 關聯性......2-45

- 圖 2-37 在蘇澳港近海於蘇迪勒颱風侵襲期間(2015/08)颱風長浪在不同時間階段之分時波譜變化.......2-60

- 圖 2-40 在蘇澳港近海於杜鵑颱風侵襲期間(2015/09)颱風長浪在不同 時間階段之分時波譜變化......2-63
- 圖 2-41 山竹颱風影響期間(2018/09)蘇澳港資料浮標之波高與週期及

風速之逐時演化特性......2-66

圖 2-42 可在臺灣海域衍生強勁東北季風之大陸冷高壓天氣系統 2015/01/28 0000UTC.......2-67

- 圖 2-47 基隆港與臺中港 2014 年 12 月監測波浪示性波高(上)與尖峰週 期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性.......2-76
- 圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2015 年 1 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性......2-76
- 圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2016 年 1 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性......2-77

圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2016 年 3 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性......2-78

- 圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2016 年 1 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性......2-80
- 圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2016 年 3 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性.......2-81

- 圖 2-51 冬季季風期間臺灣西部海岸臺中港(紅)及北部海岸基隆港(藍) 之風浪尖峰週期與臺中港風速之關聯圖.......2-86
- 圖 2-53 冬季季風期間臺灣東部海岸蘇澳港(紅)及花蓮港(藍)之風浪尖 峰週期與臺中港風速之關聯圖......2-89

- 圖 2-59 東沙島(黑實線)與七美(紅虛線)資料浮標平均風速(上)與示性 波高逐時紀錄經以中央移動平均處理後彼此間之相似性與關聯 性......2-96

- 圖 2-63 以七美資料浮標之平均風速作為風域之代表風速分別推估其 與東沙島(藍點、線)及七美(紅點、線)示性波高之關聯性....2-99

- 圖 2-66 蘇澳港近海在 2015 年 10 月 13 日至 19 日東北季風期監測波

- 圖 2-73 於 2016 年 2 月 11 日至 2 月 27 日東北季風期間在臺中港北外 堤頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄 後之原始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時 序訊號(中下)與其對應之波浪演化時頻分析圖(下).............2-110
- 圖 2-75 於 2016 年 3 月 4 日至 3 月 20 日東北季風期間在臺中港北外 堤頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄 後之原始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時

序訊號(中下)與其對應之波浪演化時頻分析圖(下)......2-112

- 圖 3-1 花蓮港之港域配置(資料來源: GoogleEarth 20201111)3-2

- 圖 3-5 提姆(T1M)颱風於 1994 年 7 月侵襲臺灣海域之移動路徑3-5
- 圖 3-6 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外 ST5 及 港內#22、#10、#08 碼頭佈設波浪測站所監測之波浪紀錄3-6
- 圖 3-6(續) 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外及 港內碼頭實測波浪紀錄以 30 秒移動平均分析之長浪波動3-6

圖	3-12	花蓮港颳	起期间外港	き#17、#2	0、#22	` #23	碼頭區>	巷灣振盪=	こ
	1	振幅增幅	反應曲線					3-	-14

- 圖 3-24 花蓮港外 HA 波浪測站於 2008 年 9 月辛樂克、哈格比及薔密

- 圖 3-28 伴隨高頻波群(黑)存在並與波群包絡波(藍)具有相同週期之水 面波降或約束長波(紅)......3-33

- 圖 3-35 應用 MIKE21 HD 二維非線性水動力模式進行花蓮港外灣澳

水位波動高(上)、低(下)變化及港灣振盪模擬之計算結果....3-41

- 圖 3-36 應用 MIKE21_BW 二維非線性淺水波動模式進行花蓮港外灣 澳波動高(上)、低(下)變化及港灣振盪模擬之計算結果.......3-42

- 圖 4-6 在蘇澳港公務船渠驗潮站上就蘇迪勒(上)、天鵝(中)、杜鵑(下) 颱風影響期間檢選每分鐘平均之連續潮位監測紀錄.......4-6
- 圖 4-7 蘇澳港公務船渠在蘇迪勒(黑)、天鵝(藍)、杜鵑(紅)等不同路徑 與不同強度颱風侵襲影響下由每分鐘平均之連續潮位紀錄分析 所得之港灣振盪特性對照比對......4-7

- 圖 4-8 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外(上)及外港碎波堤前(中上)、公務船渠內(中下)與內港域(下) 監測之單時波動紀錄(黑)以及港外閉鎖於高頻群波之約束長波 與在港內陳現港池振盪之自由長波(紅).......4-9
- 圖 4-9 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外之約束長波(黑)與外港碎波堤前(紅)、公務船渠內(藍)及內港 域(綠)自由長波之波動特性對照比較.......4-10
- 圖 4-10 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外閉鎖於高頻群波之約束長波(黑)與造成公務船渠陳現港池振 盪之自由長波(紅)對照比較(上)以及對應之波譜比較(下)4-11
- 圖 4-11 在 2015 年 8 月至 10 月期間侵襲及影響蘇澳港海域的蘇迪勒 (左)、天鵝(中)及杜鵑(右)颱風生成後之移動路徑.......4-12

- 圖 4-14 蘇澳港外颱風波浪逐時紀錄經以中央移動平均分析萃取高頻 波群中之亞重力波(黑)與包絡波(粉紅)以及港內碎波堤前(紅)、 公務船渠內(藍)與內港域(綠)亞重力波之頻譜對照比較.......4-13
- 圖 4-16 蘇澳港外在 2015/08/07 23:00 颱風波浪紀錄內之亞重力波 (上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波 動(中下)與對應頻譜之對照比較(下)......4-16
- 圖 4-18 蘇澳港外在 2015/10/18 14:00 強盛季風波浪紀錄內之亞重力波

(上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振	盪波
動(中下)與對應頻譜之對照比較(下)	.4-18

- 圖 4-20 面對蘇澳港碎波堤對入射自由長波之全反射作用所導致完全 重複波港灣振盪型態之建議改善措施.......4-21

表目錄

表 2-1	蘇澳港與花蓮港 2013 至 2015 年颱風影響期間分月監測波浪示性波高(H _s)、尖峰週期(T _p)及二階譜週期(T _{m02})之相關係數2-41
表 2-2	颱風強度分級表2-46
表 2-3	基隆港與臺中港 2013 至 2016 年冬季季風期分月監測波浪示性 波高 (H_s) 、尖峰週期 (T_p) 及二階譜週期 (T_{m02}) 之相關係數2-84
表 2-4	臺灣海峽南段海域東沙島、七美、小琉球資料浮標於2017年5月8日至7月28日夏季季風期間實測波高、週期、風速之統計分析
表 2-5	東沙島、七美、小琉球資料浮標實測海氣象紀錄經以中央移動 平均處理後彼此間示性波高(Hs)、二階譜週期(Tm02)、平均風速 (Wnd)及氣壓(Pres)之相關係數2-95
表 2-6	以東沙島及七美資料浮標經移動平均處理後之平均風速(紅虛線)為基準再分別計算其與東沙島及七美示性波高逐時變化之關聯性與相關係數2-96
表 3-1	花蓮港防颱作業船舶出港避湧及恢復進港時間
表 3-2	花蓮港低頻入射波造成港灣共振之不同波結點數與對應之理論 與數值模擬計算週期3-13
表 3-3	中央氣象局 2008 年 7 至 9 月及 2009 年 8 月發布警報之颱風與 其警報期間、強度及路徑資訊3-24
表 4-1	蘇澳港自 2015 年 8 月至 10 月之颱風與季風季節於港外及港內 各波浪測站同步進行觀測之期間(資料來源: CHMT, 蘇澳港務 船靜穩度改善暨避風碼頭研究計畫)

第一章 緒論

1.1 研究緣起

海洋中之波浪,通常係因風力作用而衍生,故有「風生水起」、「無 風不起浪」之俗諺。學理上,因風(移動風暴、颱風、或強烈季風)而起 之波浪,統稱為風浪(wind waves)。風浪之大小或所挾帶能量之高低, 主要取決於具有特定強度風速之風域(風力作用場域)範圍及其持續吹 襲之時間,主要特性之表達,常以波高(H)、週期(T)或頻率(f)作陳現。

Munk(1951)將具有不同產生動力之各類型波動型態及其所對應之 波浪名稱,依其對應之顯要週期區間,整理如圖 1-1 所示。由圖觀察可 見,因風而起之風浪,其主要週期大多小於 30 秒,而且,週期約在 8~10 秒間之風浪,相對性地具有最大之波動能量。紀錄中,風浪之最大波高, 可達 34 公尺(Horikawa, 1978)。

湧浪(swells),學理上係專指離開風域或失去原生風力影響之風浪, 其為近岸波浪之主要構成成分,故與颱風或強烈季風之存在息息相關。 一般而言,由於其比風浪具有較規則之波動或較長之週期,因此,通俗 上亦稱為"長浪"。



Classification of ocean waves according to wave period (after Munk, 1951) 資料來源:Munk, 1951.

圖 1-1 以週期差異為基準之波動分類

另外,基於波動之分散(dispersion)特性,週期長短不一之波浪,將 具有不同之傳播速度。而長浪,因其能離開移動中之原生風域,故波動 傳播速度,實際皆比風域之移動速度快。所以,近岸之長浪,通常會與 遠域移動之風暴或颱風具有密切關聯性。

颱風,為臺灣首要的災變天氣。依據氣象局(2019)的統計資料顯示: 全球每年約有 80 個颱風生成,以西北太平洋及南海地區生成的颱風最 多也最強。自西元 1958 年至 2018 年間,共有 1,606 個颱風在此一海域 生成,平均每年約有 26.33 個。其中,在每年夏、秋季節(6~11 月),約 有 3 至 4 個會侵襲臺灣。

儘管每年直接對臺灣陸岸或近海侵襲之颱風並不頻繁,但只要有 颱風形成,不論是否直接侵襲臺灣,其所衍生之長浪,必定可挾帶、聚 積甚大之能量,作長距離傳播,衝擊海岸,並在港灣內造成港域不靜穩 及港灣振盪,致使大小型船隻無法安全繫靠、停泊。因此,座落在臺灣 東部之大型商港,依據「災害防救法」,為防制颱風之直接侵襲及面對 颱風長浪所造成港域不靜穩及港灣振盪之影響,皆訂定有「防颱作業規 定」及「天然災害防救及善後處理要點」。其中,為強化颱風災害預防 及緊急應變效能,維護港區碼頭設施及船舶進港航行安全,減少港域不 静穩及港灣振盪災害,臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司蘇澳港 營運處在其災害防救計畫即規定:當宜蘭地區發佈陸上颱風警報時,在 港泊靠船舶應一律出港避風,各公民營工作勤務船須離港避風,港勤船 亦應駛往南方澳漁港避風。另外,花蓮港務分公司亦規定:當花蓮地區 發佈陸上颱風警報時,港務單位應掌握在港船舶動態,並至少應於7級 暴風圈預定抵達 6 小時前,決定港區相關船舶出港時間,另儘早規劃 船席調配事宜,必要時得移泊至安全船席或出港,以免發生斷纜、擱淺 等事故。

往昔港灣配置構建,偏重港灣蔽浪與港域靜穩,並未充分考量長浪 衍生之港灣振盪以及毗鄰海岸之沖蝕課題,因此,颱風長浪引致之港域 不靜穩及港灣振盪,早已是港灣天然災害防救的關鍵課題。只是國內現 行較完善且最常施行的各項防減災策略與作為,大多係以發布警報之

1-2

颱風為對象,對於未發布警報之颱風及因其影響而引發長浪之危害,卻 常因其神出鬼沒之演化特性無法明確掌握而屢屢被輕忽。此外,儘管產 官學研單位長年來曾投注諸多人力、物力進行相關研究,惟對引致港灣 振盪之波源判定,迄今尚多爭議,且莫衷一是,相關可行的應對策略與 有效改善措施的研擬,到目前依舊一籌莫展。

為因應氣候變遷,維護港灣運輸環境,強化港灣效能,防治港灣災害,提昇港灣災防技術,配合本所推展「海洋及交通運輸防災技術研究」 目標,落實「運輸環境災防技術發展研究」運用,本研究爰以單一年度 (109)之執行期程,針對座落在臺灣東部且經常面對颱風長浪侵襲之蘇 澳港與花蓮港,綜整港內、外之颱風波浪紀錄,分析颱風長浪的演化特 性,建立港外颱風長浪波動源與港灣振盪型態之因——果關聯性,面對颱 風長浪引致之港域不靜穩及港灣振盪課題,研提改善措施與對策。

1.2 文獻回顧

自1986年起,國內海岸工程領域相關之產官學研單位,即持續關 注蘇澳港與花蓮港之港域靜穩及港灣振盪課題。歷年之研究文獻,經依 年序編排,可統整如附件一所示,主要之研究類別,含括港灣內外之現 場波浪監測、港池穩靜度調查、港灣振盪特性分析、港灣振盪模型試驗 與數值模擬、港灣振盪與颱風長浪及其群波特性之關聯,引動港灣振盪 之波源研判與辨識、港灣共振機制研究、港灣設施改善與減振對策研擬 等專題。統計近30年來國內投注的總研究人力,超過百人;總研究經 費,達數千萬元。

對於花蓮港港域經常於颱風期間發生之不靜穩情況,前臺灣省政 府交通處所屬港灣技術研究所,自 1994 年起,即已規劃並執行為期三 年之港域內、外波浪實測(曾,1996;曾、簡,1996),並進行相關之模 型實驗(張,1996;簡、邱,1996)與數值模擬研究(蘇 等,1996、1999), 依據以往之研究結論顯示,花蓮港於颱風期間產生之港域不靜穩現象, 主要係導因於週期接近 160 秒之低頻波動所引起,惟對於該低頻波動,

1-3

係直接源自於港外或因波動之非線性本質所衍生(徐,1995、2000;蘇 等,1996;張、郭,1999;郭,2000;陳,2000),尚多爭議,對於港 外天然沙灘灣澳之地形水深影響因素,亦未加以探討。

莊、江(2000)為完整地將花蓮港配置及港域外天然沙灘灣澳之地形 水深影響因素綜合納入考量,因此直接以原先即存在於港外之亞重力 波(infragravity waves)為對象,並應用丹麥水力研究所(DHI,Danish Hydraulic Institute)研發之 M1KE21-EMS 緩坡方程式(Mild-Slope Equation)數值模式(DHI,1994),配合1994年提姆(T1M)颱風期間之實 測波浪記錄資料,重新檢視並探討花蓮港港域之不靜穩機制,進而研判, 造成花蓮港港池振盪現象的長週期波動,應是在颱風期間,早已伴隨近 海高頻波動而存在於港外的亞重力波所導致。另外,依據莊(2000)在港 內不同碼頭區建置之振盪振幅增幅反應曲線研判,當亞重力波入射週 期為100、130、160、195及235秒時,各碼頭皆將發生嚴重程度不等 的港灣振盪現象。

針對花蓮港之港灣振盪波源探討,簡、曾(2002)曾探討颱風波浪之 群波特性。陳 等(2002)提出邊緣波(edge waves)是引致港池共振的機制。 郭 等(2002)及張、林(2003)再對造成港池振盪之波源進行辨識與論證。 蘇(2003)曾提出引致港灣振盪之波源,應包括:(一)在近岸淺灘區,沿 岸行進的緣波;(二)經由波動非線性交互作用(wave nonlinear interaction) 所衍生自由行進的亞重力波(free infragravity waves);(三)伴隨波浪群波 行進的閉鎖長波(bound or trapped waves under wave groups)。鄭、蔡(2004) 以週期 20~1000 秒、能量密度相等的白噪頻譜模擬入射波,並藉非線 性之 Boussinesq 模式(MIKE21_BW),探討花蓮港港池振盪現象。Chen et al.(2004)及陳 等(2006)曾就花蓮港之海岸與港口配置特性,論證緣波 之存在性,並據以探討因緣波所引致花蓮港之港灣振盪。Maa and Tsai (2006)使用 RIDE 與布斯尼斯克模式(Boussinesq Module)進行花蓮港內、 外港域波動之數值模擬,並論證即使波浪以沿岸方向入射,仍無法產生 緣波;徐(2006)開展花蓮港引致港灣振盪之長浪波源辨識,並進行臺灣 東岸港口共振現象改善方案之系列研究。孫、劉(2007)亦曾進行花蓮港

1-4
港池共振改善與整體規劃。蔡(2008)再以群波為亞重力波來源,進行花 蓮港港灣振盪之系列研究(楊 等,2010、2011)。

莊、曾(2009)曾針對不同颱風長浪影響期間,應用花蓮港外 AWCP 之長期波動監測紀錄,結合 EMD (Empirical Mode Decomposition)經驗 模態分解(Huang et al., 1998),再透過高頻群波所組構包絡波之頻譜比 對,辨識造成花蓮港港灣振盪之長浪波源,並確認亞重力波主要係源自 於高頻波群(wave groups)伴隨非線性效應所衍生之波揚(wave set-up)與 波降(wave set-down),如圖 1-2 所示,且其存在性,與侵台颱風路徑無 關,但與港外高頻波群之波動振幅大小關係密切。



圖 1-2 伴隨高頻波群之非線性效應所衍生之水面波揚與波降

亞重力波(infragravity waves),通常是指不規則波之波群(wave groups)中,週期介在30秒至5分鐘的低頻波動(Munk, 1949、1951)。 其主要的形成機制,來自於波動的非線性效應(鄒,2005)。在有限水深 海域,高頻波群的重要非線性伴隨效應之一,即是產生水面波降,而且 此種水面波降通常與高頻波群之包絡波(wave envelope)具有相同的傳 播速度,故具有與高頻波群同樣的週期和波長,所以,通常也稱為約束 長波(bound wave)或鎖相波(phase-locked waves)(鄒,2005)。當高頻波群 向岸行進發生碎波後,波群對水面波降的約束作用將發生急劇變化,因 此,會使水面波降從波群中被「釋放」出來,進而形成自由長波(free long waves)。自由長波在近岸受海岸地形水深影響後,即會產生反射波,反 射波若向離岸方向傳播,則稱為洩漏波(leaky modes)(Masselink, 1995); 若由於折射作用而僅在海岸附近傳播,則成為拘限(locked modes)之緣 波(edge wave)。至於,在近岸之自由長波及其反射波,一般即統稱為波 拍(surf beat)。以上在近岸海域因波群存在所演化的水面波降、約束長 波、自由長波、緣波、或波拍等亞重力波頻段之波動,由於其波動週期 (頻率)常與一般規模的港灣自然振盪週期相符合,故常是引致港灣共振 的重要原因。

在近岸淺水海域,Bowers(1977)曾探討高頻波群下的水面波降所導致的港灣共振課題,並引介Longuet-Higgins & Stewart (1964)在高頻波群下所推導之水面波降(前)計算公式如下:

$$\bar{\eta} = -\frac{S_{xx}/\rho}{gd - c_g^2}$$
$$= -3ga^2/2\omega^2 d^2$$
(1-1)

式中,S_{xx}為波動沿岸方向之輻射應力;ρ為海水密度;a為高頻波 群之波動振幅;ω=2π/T為具週期T之波動角頻率;d 為水深;g為重 力加速度。可見,在特定水深處,水面波降之大小將與波高的平方成正 比,而與頻率及水深的平方成反比。亦即波降會隨高頻波群中波高的時、 空變化而作週期性之波動,且與高頻波群具有相同波動週期、波長及傳 播速度。另外,鄒(2005)依據 Stokes 波之二階非線性理論,推導之水面 波降(河)計算公式如下:

$$\bar{\eta} = -\frac{ka^2}{2\,\sinh(2kd)}\tag{1-2}$$

式中,k = 2π/L為具波長L之波動週波數。式(2)之意義,闡釋波群的 每一個波峰,皆可以看作是一個具有同樣波峰和週期之 Stokes 波,且 其平均水面的波降大小,與波高平方成正比,亦即在波高較大處,波降 較大,而在波高較小處,波降較小,因此,隨著波群波高大小之週期性 變化,波降因而會自然衍生為具有相同週期性之長波。在近岸海域,隨 著波浪碎波之發生,原附隨波群行進之波降長波,會從波群中被「釋 放」,並形成在近岸傳播及反射的自由長波,進而可促成港灣振盪,以 及構成近岸淺灘區之波拍。所以,在探討及面對港灣振盪課題時,港外

1.3 工作項目

本研究:「臺灣東部海岸颱風長浪群波引致之港灣振盪」,為本所 109 年運輸科技應用研究「海洋及交通運輸防災技術研究(3/4)」綱要計 畫內,兼具基礎與前瞻之自辦研究計畫,研究期程為一年,研究重點在 因應氣候變遷,維護港灣運輸環境,防治港灣災害,提昇港灣災防技術, 並針對座落在臺灣東部之蘇澳港與花蓮港,綜整港內、外之颱風波浪紀 錄,分析颱風長浪的演化特性,建立港灣振盪型態與港外波動源之關聯 性,面對颱風長浪引致之港域不靜穩及港灣振盪課題,研提改善措施與 對策。主要之年度研究重點工作項目如下:

- (1) 分析臺灣東部近岸海域之颱風及季風波浪特性
- (2) 分析港外颱風長浪群波衍生之波動特性
- (3) 分析颱風影響期間之港灣振盪型態與特性
- (4)建立港灣振盪型態與港外波動源之因-果關聯性,辨識引動港灣 振盪之波源
- (5)研提防制措施及改善對策
- (6)年度研究報告綜合整理、撰寫及提交

1.4 研究成果之效益與應用

1.4.1 研究成果效益

本研究成果,主要在落實「運輸環境災防技術發展研究」政策之後 續運用;掌握蘇澳港及花蓮港颱風及季風波浪的演化特性;探索及判識 關聯港灣振盪之主要波動源;針對造成港灣振盪之關鍵影響因素,研提 防制措施或改善對策;降減颱風長浪造成港域不靜穩之影響,強化港灣 功能。主要研究效益,綜整條列如下:

- (1)學術成就(科技基礎研究)方面:發表國內研討會論文3篇,出版研究報告1冊。掌握科研課題之廣度與深度,擴展分析觀點,結合海岸專業知識,發揮波浪專業學能,辦識造成蘇澳港與花蓮港港灣振盪之長浪波源,並確認亞重力波主要係源自於高頻波群伴隨非線性效應所衍生之波揚與波降。
- (2) 技術創新(科技整合創新)方面:以國內、外關於近岸海域長浪 衍生之往昔研究成果為基礎,溫故知新,學以致用,並針對颱 風長浪影響期間,應用時頻分析,詳實探討颱風長浪之群波特 性,掌握關聯港灣振盪之主要波動源。
- (3) 在經濟效益(經濟產業促進)方面:配合「災害防救法」,針對導 致港灣振盪之關鍵影響因素,研提降減颱風長浪所造成港域不 靜穩及港灣振盪影響之防制措施或改善對策,強化港灣功能, 縮減颱風長浪影響期間之駐港船舶疏泊規模,具體落實總體性 之港灣防災策略,樽節颱風長浪之防災與減災成本。
- (4) 在社會影響(社會福祉提升、環保安全)方面:促成國家海氣象 觀測資源之永續利用,詳實探討並瞭解颱風長浪在近岸海域之 演化特性,精進海岸管理策略,有效施行港灣防災應變措施, 強化港灣效能,提昇國際商港之港灣形象。
- (5) 在其它效益(政策管理及其它)方面:因應氣候變遷與海岸災害風險,維護港灣運輸環境,落實「整體海岸管理計畫」,推動「海岸防護」與「海岸保護」目標,綜整海岸管理之課題與對策,導引海岸防災措施,健全海岸管理,提昇港灣災防技術。

1.4.2 在業務施政上的應用

本研究配合本所推展「海洋及交通運輸防災技術研究」目標,落實 「運輸環境災防技術發展研究」項目,面對颱風長浪經常侵襲而造成港 灣振盪之蘇澳港與花蓮港,有效應用國家海氣象觀測資源,結合海岸專 業知識,發揮波浪專業學能,詳實探討颱風長浪之群波特性,掌握關聯 港灣振盪之主要波動源,針對導致港灣振盪之關鍵影響因素,發揮海岸 專業學能,學以致用,研提降減颱風長浪所造成港域不靜穩及港灣振盪 影響之防制措施或改善對策,強化港灣功能,縮減颱風長浪影響期間之 駐港船舶疏泊規模,具體落實總體性之港灣防災策略,樽節颱風長浪之 防災與減災成本,降低港灣營運風險。相關具體成果可做為交通部、各 港務分公司及各工程顧問公司等相關產、官單位從事港灣規劃、設計、 擴建、維護及港灣防災的應用參據。

第二章 臺灣東部近海之波浪與風速監測

2.1 蘇澳港及花蓮港之海氣象監測

為科學研究與工程應用之需要,我國內政部國土測繪中心、經濟部 水利署、交通部中央氣象局、觀光局及運輸研究所港灣技術研究中心等 政府機構,以及國立成功大學近海水文中心、臺南水工試驗所、海軍氣 象中心、國立臺灣大學海洋研究所、國研院台灣海洋科技研究中心等學 術研究單位,在臺灣環島近海均建置有風、浪、流、潮等海氣象監測站, 並經管監測紀錄與資訊分析。其中,交通部運輸研究所港灣技術研究中 心(IHMT),早自1986年開始,即著手進行基隆港、蘇澳港、花蓮港、 高雄港及臺中港等5大國際商港海域長期性海氣象資料之蒐集、觀測、 整理及分析歸納,近30年來並已獲致頗豐碩之研究調查成果(曾等, 2015)。

目前,國內既有 5 大國際商港海域海氣象觀測站之主要監測項目 包括:波浪、海流、潮位及風力。其中,蘇澳港及花蓮港測站之位置及 儀器配置概況,分述如后。

(1) 蘇澳港

蘇澳港海氣象觀測站,初始於 2002 年 7 月 19 日安裝在蘇澳港 港口外 700 公尺附近,水深 25 尺處,觀測儀器採用一部挪威 NORTEK 公司產製之超音波式波向波高與剖面海流儀(AWAC),如 圖 2-1 所示,並建置監測紀錄資料之即時傳輸系統;但在 2004 年 9 月 22 日,因船隻收錨時被拉扯,以致海底電纜遭受損,隨後,於 12 月 2 日重新鋪換一段長 200 公尺之海底電纜後,即恢復整套系統之 即時監測功能;惟到 2007 年 10 月,因儀器與電纜漸老化,且故障 頻繁,因此,辦理第 2 次更新,同樣亦使用挪威 NORTEK 公司之 AWAC,並安裝在原水深 25 公尺處;直至 2012 年 8 月,在同地點 採用相同儀器辦理第 3 次更新,全觀測系統目前亦正常運轉中。至

於潮位站與風速站,原於 2003 年 6 在基隆港務局蘇澳港分局勘測 隊測站安裝一具壓力式潮位儀及 Young 公司之風速計,隨後在 2008 年 8 月中旬進行測站儀器更新,採用日本 KAIJO 公司之三維超音 波式風速計與壓力式潮位儀;直到 2012 年 10 月,進行第三次儀器 更新,並改採 Gill 之二維超音波式風速計與壓力式潮位儀,全觀測 系統至今亦都正常運轉中,且資料完整。



圖 2-1 挪威 NORTEK 公司出品同時掛載有壓力計(Press.)及聲波計 (AST)之超音波式波向波高與剖面海流儀(AWAC)

(2) 花蓮港

花蓮港海氣象觀測站,於1989年12月至2000年8月,初始在 花蓮港口附近海域,水深33公尺,使用荷蘭DATAWELL之浮球式 波浪儀(wave rider);2001年8月中旬,改採挪威NORTEK公司之 AWAC,參見圖2-1所示,並建置監測紀錄資料之即時傳輸系統;惟 在2003年9月1日,受杜鵑颱風波浪影響,以致海底電纜受損,歷 經兩個月之復建維修後,在2003年10月22日即恢復測站功能;隨 後,於2008年8月中旬及2013年8月中旬,分別辦理第二及第三 次儀器更新,仍皆使用挪威NORTEK公司之AWAC,現況,全觀測 系統皆正常運轉中。至於潮位站與風速站,在2001年6月,初始在 花蓮港白燈塔附近安裝一具壓力式潮位儀,但在2007年8月17日, 不幸受到大雷雨之閃電擊中,導致潮位儀嚴重受損;隨後,壓力式 潮位儀即於2007年11月30日辦理第二次更新,同時,並在花蓮港 務局大樓樓頂,安装一組三維超音波式風速計,且在 2013 年 10 月 辦理第三次儀器更新,觀測系統至今亦皆正常運轉中。

2.2 風與波浪監測紀錄匯整

2.2.1 風

風,是空氣自氣壓較高處向氣壓較低處流動的氣動力現象。而季風, 主要係因海洋與陸地間季節性溫差所導致之大尺度空氣環流,並以亞 洲的南部和東部最為顯著(氣象局,2017)。在臺灣環島海域,典型冬、 夏季之季風及颱風天氣圖與風場,如圖 2-2 所示。



資料來源:中央氣象局 http://www.cwb.gov.tw/

圖 2-2 臺灣海域冬季 2017/10/30 02:00 之東北季風天氣系統(左)與地 面風場(右)



資料來源:中央氣象局 <u>http://www.cwb.gov.tw/</u>

圖 2-2(續) 臺灣海域夏季 2017/06/20 08:00 之西南季風天氣系統(左)與 地面風場(右) 資料來源:中央氣象局 http://www.cwb.gov.tw/



圖 2-2(續) 臺灣海域秋季 2017/10/20 08:00 蘭恩颱風之颱風天氣系統 (左)與地面風場(右)

基於地理位置及海域環境因素,臺灣四季的風,明顯會受大陸及海 洋氣候型態所影響。在冬季,有來自西伯利亞的大陸冷高壓,以東北季 風為主;在夏季,則有來自太平洋的海洋性高氣壓,以西南季風為主, 部分期間,尚由於熱帶海洋上會發生低氣壓的漩渦或熱帶氣旋,當其近 海面最大風速到達或超過每小時 62 公里(17.2 m/s)時,即為「颱風」(氣 象局,2017)。

臺灣位處東亞大陸與西太平洋間,概略自每年12月至次年1、2月 之冬季期間,由於陸上通常較海洋寒冷,以致陸上空氣的密度較大,氣 壓較高,大量寒冷而乾燥的空氣,於是因氣壓差而起風,並自陸上吹向 海洋,外加科氏力(Coriolis force)之影響,因此,在東亞北緯30度以南 地區,經常必需面對盛行的東北季風。相關冷高壓天氣系統圖,如圖2-2所示,由圖觀察可發現,受大陸冷高壓天氣系統之總體影響,當1020 百帕等高壓線逐漸伸展至臺灣海峽北側,則臺灣海域之東北季風將逐 漸盛行,風速(實測10分鐘平均)同時也將由弱轉趨強盛,一般風速可 大於5級或8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,在臺中港約可達24.5~28.4 m/s,相當於10級之狂風(storm),風力可謂十分強勁。

在夏季,概略自每年5月至8月期間,由於亞洲南部陸地溫度通 常較印度洋高,風因而會從氣壓較高之海洋吹向氣壓較低之陸地,外加 科氏力之偏轉效應,所以,在臺灣海峽南段海域之海氣象狀況,總體上

經常會受梅雨鋒面、西南季風天氣系統,甚至颱風所影響。相關具體的 天氣系統與對應之地面風場,參見圖 2-3 所示。至於西南季風之風速大 小,因其主要源生於海陸間之溫差,故明確具有海陸風特性,以致平均 風速普遍偏弱,通常不及 8.0 m/s,季風盛行期間,風速約可達 5 級或 8.0~10.7 m/s,但較強勁風速,鮮少會超越 10.8~13.8 m/s 或 6 級。

依據曾 等(2015)之研究報告指出:為充實海氣象資料之收集, IHMT 在臺灣5個國際港,皆建置有風力觀測站。對於風速、風向之觀 測,早期大多採用 Young Brand 之風速計,直至2007年12月,從花蓮 港開始,陸續皆更改為 Gill 三維超音波式風速計。對於風速之量測, 其係以1Hz 取樣率,自每小時整點前10分鐘開始至整點止,取10分 鐘紀錄之總平均為平均風速,而取10分鐘紀錄之最大值為最大風速。

針對臺中港北外堤風速測站,在2015年12月至2016年3月之冬 季季風期間,實測之10分鐘平均風速與風向時序紀錄,如圖2-3所示。 另外,引用並摘錄交通部運輸研究所2016年港灣海氣象觀測資料統計 年報之12港域觀測風力統計資料,可得基隆與臺中港域風力測站歷年 冬、夏季及全年之風玫瑰圖,如圖2-4所示。由圖觀察可見,臺中港冬、 夏的季風,主要風向分別為東北及西南向,不僅風向具有指標性;風速 之大小,受臺灣海峽之「狹道」或「煙囪」地形效應影響,在國內沿海 各風力測站間,通常最為強勁,冬季風速,一般可大於5級或8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,則可高達10級或24.5~28.4 m/s,以致在臺灣環島 海域,臺中港測站之風力,可據以作為季風強盛性之研判指標(莊、曾, 2016~2019)。



圖 2-3 臺中港北外堤風速測站在 2015 年 12 月至 2016 年 1 月冬季季 風期實測之 10 分鐘平均風速(上)與風向(下)逐時序紀錄



圖 2-3(續) 臺中港北外堤風速測站在 2016 年 2 月至 2016 年 3 月冬季 季風期實測之 10 分鐘平均風速(上)與風向(下)逐時序紀錄



圖 2-4 基隆(左)及臺中(右)港域風力測站歷年冬(上)、夏(中)季及全年 (下)風玫瑰圖之對照比較(資料來源:2016 年港灣海氣象觀測資料統計 年報_12 港域觀測風力資料,交通部運輸研究所)

2.2.2 波浪

颱風與季風波浪,是衝擊臺灣東部近海之主要波浪來源。在颱風波 浪影響期間,為研判引起港灣振盪之相關波源,必須針對座落在臺灣東 部海岸之蘇澳港與花蓮港,檢索並綜整港內、外同時監測之海氣象紀錄 資料,並分析颱風及季風波浪傳播到臺灣東部近岸海域之波動特性,尤 其是進行颱風及季風長浪群波(group waves)衍生波降(wave set-down)與 波揚(wave set-up)之波動特性分析及判識。

依據曾 等(2015)之研究報告指出:國內 5 個國際港既有波浪資料 之蒐集,其起始時間分別為:臺中港自 1971、基隆港自 1983、蘇澳港 自 1984、花蓮港亦自 1984、高雄港自 2000。而為建置各港之海氣象 (風、浪、潮、流)即時監測與傳輸顯示系統,高雄港自 2000 年 12 月起、 基隆港自 2001 年 6 月起、花蓮港自 2001 年 8 月起、蘇澳港自 2002 年 7 月起、臺中港自 2003 年 6 月起,分別即廣泛使用挪威 NORTEK 公司 出品同時掛載有聲波計(AST)與壓力計(Press.)之超音波式波向波高與 剖面海流儀(AWAC),如圖 2-1 所示,進行長時間連續之海面波浪及海 流監測(曾 等,2015)。目前,波浪監測係以 1 Hz 之取樣率,從每小時 第 10 分鐘開始,逐時施測 2048 筆紀錄。

由於 AWAC 同時掛載有聲波計(AST)與壓力計(Press.),故波動紀 錄因而有波壓(dBar)及海面水位高度(m)等二種類型。以蘇澳港為例,於 2015 年 8 月蘇迪勒颱風影響期間,以 AWAC 壓力計及聲波計實測波浪 之原始 1 Hz 分時時序紀錄,經整理可得如圖 2-5 所示;而在 8 月至 10 月含括颱風與季風期間,以 AWAC 壓力計及聲波計實測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀錄,經統整可得如圖 2-6 所示。至於在花蓮港,於 2015 年 8 月蘇迪勒颱風及天鵝颱風影響期間,以 AWAC 壓力計及聲波計實 測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀錄,經統整可得如圖 2-7 所示。

在 IHMT 既有建置之海氣象長期觀測與展示系統上,波浪逐時之 監測紀錄,經儀器自身之分析及後處理功能,可直接陳現示性波高(H_s)、 最大波高(H_{max})、前 1/3 大波高(H_{1/3})、前 1/10 大波高(H_{1/10})、主波向、

次波向、以及尖峰週期 (T_p) 、二階譜週期 (T_{m02}) 、平均週期 (\overline{T}) 等波浪代 表特性。其中,波浪之尖峰週期 (T_p) 或尖峰頻率 (f_p) ,因其係指波浪頻 譜中,對應具有最大波能成分之週期或頻率,故可較準確地應用於辨識 長浪之顯著性,所以,在 IHMT 既有之波浪監測與傳輸展示系統中, 波浪係以示性波高 (H_s) 及及尖峰週期 (T_p) 陳現監測特性,如圖 2-8 所示。 至於,國內 5 個國際港域同時間之風、浪監測特性陳現,則可統整陳 現,如圖 2-9 所示。

引用並摘錄交通部運輸研究所2016年港灣海氣象觀測資料統計年 報之12港域觀測波浪之統計資料,可得蘇澳港與花蓮港域波浪測站歷 年冬、夏季及全年觀測波浪玫瑰圖,如圖2-10所示。由圖綜合觀察可 見,臺灣東部海域,直接面對深邃的西太平洋,海域地形水深環境甚相 類似,加以近岸海灘坡度陡峭,故而近海波浪,受海岸及陸地岬頭地形 遮蔽影響所衍生之淺海效應甚為有限,以致同處在東部海域之蘇澳港 及花蓮港,不論是波高的大小或波向之散佈,彼此皆甚相近似。

針對蘇澳港,詳細觀察圖 2-10 可見,蘇澳港冬季之波浪,主要波 向集中於東北東(ENE)~東南東(ESE)間,較大之波高,普遍可大於1公 尺;而夏季波浪,波向較分散,並以東(E)~南南西(SSW)向為主要,波 高通常會低於1公尺,但因其中含括有颱風波浪之影響,故較大之波 高,仍可高達2~5公尺;至於全年波浪之波向與波高分佈特性,則概 略均與冬季季風波浪相近似,即主要波向集中於東向,而經常之較大波 高,一般可大於1公尺。另外,針對花蓮港,再由圖2-10詳細觀察可 見,花蓮港冬季之波浪,主要波向集中於東(E)~東南(SE)間,較大之波 高,普遍均可大於1公尺;而夏季波浪,波向亦集中於東南東(ESE)~東 南(SE)向間,波高通常會低於1公尺,但因有颱風波浪之影響,故較大 之波高,仍可高達2~5公尺;至於全年波浪之波向與波高分佈特性, 主波向為南南東(SSE),較大波高可達2~5公尺,總體波浪特性,不僅 概略與冬季季風波浪相近似,甚特別的,亦與蘇澳港之波浪可相類比, 有所不同的,只是花蓮港的波向,比蘇澳港波向,略微偏南向而已。



圖 2-5 蘇澳港在 2015 年 8 月蘇迪勒颱風影響期間以 AWAC 壓力計 (Press._上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀錄(上)



圖 2-6 蘇澳港在 2015 年 8 至 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓力計(Press._上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分時時序紀錄



圖 2-7 花蓮港在 2015 年 8 月含括蘇迪勒颱風及天鵝颱風影響期間以 AWAC 壓力計(Press._上)及聲波計(AST_下)實測波浪之原始 1 Hz 分 時時序紀錄



圖 2-8 以示性波高(H_s)及尖峰週期(T_p)陳現 5 個國際港波浪監測特性 之 IHMT 既有海氣象展示系統



圖 2-9 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時陳現5 個國際港冬季(2015 年 1 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示系統



圖 2-9(續) 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時 陳現 5 個國際港冬季(2016 年 3 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示系統



圖 2-9(續) 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時 陳現 5 個國際港夏季(2012 年 5 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示系統



圖 2-9(續) 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時 陳現 5 個國際港夏季(2016 年 6 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示系統



圖 2-9(續) 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時 陳現 5 個國際港夏季颱風(2014 年 7 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示 系統



圖 2-9(續) 以示性波高(上)與尖峰週期(中)及 10 分鐘平均風速(下)同時 陳現 5 個國際港夏季颱風(2016 年 8 月)風浪特性之 IHMT 海氣象展示 系統



圖 2-10 臺灣東部蘇澳(左)與花蓮(右)港域波浪測站歷年冬(上)、夏(中) 季及全年(下)觀測波浪玫瑰圖(資料來源:2016 年港灣海氣象觀測資料 統計年報 12 港域觀測波浪資料,交通部運輸研究所)

2.3 波壓紀錄之轉換處理

AWAC 掛載有聲波計(AST)與壓力計(Press.),波動紀錄因而具有波 壓(dBar)及水面高度(m)型式,而依據微小振幅波理論,對於安置在海床 上,水深為h之壓力計而言,其由海面週期為T、波長為L之海面微小 振幅波動 η 所造成之動壓 P_D ,當 $h/L \leq \frac{1}{2}$,或其水深_波長比值不满足深 水波條件下,兩者間將具有線性關係(郭,2001),並可藉轉換函數 (transfer function) K_D 表示為:

式中, $\gamma = \rho \cdot g$ 為海水比重, ρ 為海水密度,g為重力加速度; $K_D = \frac{1}{\cosh kh}; k = \frac{2\pi}{L}$ 為表面波動之週波數;且kh满足下列之波動分散關 係式:

$$\frac{\sigma^2 h}{g} = kh \cdot tanh kh \dots (2-2)$$

而若水深_波長比值滿足深水波條件下,即當 $h/L \ge \frac{1}{2}$,則理論上, 海面波動 η 將不會在底床上衍生波動壓 P_D ,換言之,無論海面波動 η 之 大小,波動壓皆應甚微小,甚且 $P_D = 0$,亦即兩者間不復存在線性轉換 關係,或可直接將式(2-1)中之波壓轉換函數 K_D ,直接令其值為1。

綜合上述,當 AWAC 佈置於水深為h之海床上,則週期為T、波長為L之海面微小振幅波動η,其與衍生動壓P_D之線性轉換關係,可統整 並以式(2-1)表示,且兩者間之轉換函數K_D,可依下式換算:

$$K_{D} = \begin{cases} \frac{1}{\cosh kh} & \frac{h}{L} \le \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{h}{L} > \frac{1}{2} \end{cases}$$
(2-3)

又為波浪頻譜之有效頻段界定,也為波譜逆轉換之需要,令對應於

或

且式(2-4)可改寫為

$$K_{D} = \begin{cases} \frac{1}{\cosh kh} & f \leq f_{c} \ (=\sqrt{\frac{0.78}{h}}) \\ 1 & else \end{cases}$$
(2-6)

從式(2-5)及式(2-6)觀察可見,波動壓力與海面水位頻譜(amplitude spectrum)間之轉換函數 K_D 及其界定頻率 f_c ,明顯均與式(2-2)或底床水 深h及波動頻率f(週期或波長)相關。因此,依據式(2-1)及式(2-6),當 h=25 m(~蘇澳港海象測站水深),可計算 f_c =0.1766;而當 h=33 m (~花 蓮港海象測站水深),則 f_c =0.1537。

為進一步校驗式(2-5)所示界定頻率(f_c)之有效性,分別檢選蘇澳港 2015年8月7日00時及花蓮港2015年8月7日12時AWAC之原始 1Hz 分時壓力實測紀錄,並應用20分鐘窗寬(window width)之中央移 動平均法(CMA),先行去除潮汐效應,接著應用傅立葉轉換(Fourier Transform)計算壓力波譜,再使用式(2-6)之波動轉換函數,將其轉換為 海面波動水位頻譜,然後,再與同樣經去潮處理後之AWAC 原始1Hz 分時聲波實測紀錄的海面波動水位頻譜作比對,因而可得壓力計及聲 波計波動水位頻譜之相關係數(r),在蘇澳港可達0.936;而在花蓮港可 達0.941,如圖2-11所示。 進一步以圖 2-11 所示之壓力及聲波水位頻譜為基礎,配合界定頻 率(f_c),再透過逆傳立葉轉換(Inverse Fourier Transform),因而可將水位 頻譜再逆轉換為分時海面波動水位之時序紀錄,然後,即可再與聲波計 原始 1 Hz 之分時海面實測波動水位紀錄作分時比對,並作相關係數(r) 之檢核(張 等,2018),結果分別如圖 2-12 及圖 2-13 所示。

觀察圖 2-12 所示之分時波動水位時序紀錄比對及圖 2-13 所示之 相關係數檢核結果可發現,只要聲波計原始分時海面實測波動水位紀 錄不具有太大變異,則其相關係數普遍甚高,故分時比對結果亦甚佳。 此外,若用理論之非深水波限界條件 $(h/L \le 1/2)$,則因 $f_c = 0.1537$,其轉 換後之訊號吻合度,明顯不如應用 $f_c = 0.18$ 。為此,經檢討非深水波限 界條件,並較寬鬆地將其設定為 $h/L \le 1/1.5$,則彷照式(2-4)或式(2-5)之估 算,可得 $f_c = \sqrt{1/h} \sim 0.1741$,這與測試花蓮之較佳 $f_c \le 0.18$ 甚相近似。因 此,式(2-6)所示之線性轉換係數,在實務上,似乎可直接採用 $f_c = \sqrt{1/h}$ 作為非深水波限界條件之界定頻率,且週期為T、波長為L之海面微小 振幅波動 η 與動壓 P_p 間之線性轉換函數,可更簡潔地修訂為

$$K_{D} = \begin{cases} \frac{1}{\cosh kh} & f \leq f_{c} \left(= \sqrt{\frac{1}{h}} \right) \\ 1 & else \end{cases}$$
(2-7)

應用式(2-7)之界定頻率及波壓與海面波動水位間之轉換函數,則 蘇澳港及花蓮港於 2015 年 8 至 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓 力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上),可經壓力轉換與經去除潮汐 影響而統整其海面波動水位時序,如圖 2-14 所示。



圖 2-11 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 00 時以 AWAC 壓力計原始 1 Hz 分 時實測紀錄作傅立葉轉換後之壓力頻譜(上)及其應用界定頻率並經波 動轉換函數後之轉換水位頻譜(中)與聲波計水位頻譜(下)之對照比較



圖 2-11(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 12 時以 AWAC 壓力計原始 1 Hz 分時實測紀錄作傅立葉轉換後之壓力頻譜(上)及其應用界定頻率並經 波動轉換函數後之轉換水位頻譜(中)與聲波計水位頻譜(下)之對照比較



圖 2-12 蘇澳港 2015 年 8 月 6 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水位時 序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.934)



圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 00 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.937)



圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 20 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.884)



圖 2-12(續) 蘇澳港 2015 年 8 月 7 日 23 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.688)



圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 6 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.868)



圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 00 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.923)



圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 12 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.941)



圖 2-12(續) 花蓮港 2015 年 8 月 7 日 16 時以 AWAC 監測波浪之原始 1Hz 壓力時序紀錄(上)及其經轉換後之水位時序紀錄(中)與原始聲波水 位時序紀錄(下)之對照比較(相關係數達 0.928)



圖 2-13 將 2015 年 8 月 7 日 AWAC 聲波計原始分時實測紀錄與蘇澳 港(上)及花蓮港(下)經應用不同界定頻率與逆傅立葉轉換壓力計紀錄為 海面水位時序之相關係數檢核比對



圖 2-14 蘇澳港於 2015 年 8 月蘇迪勒颱風期間以 AWAC 壓力計實測 波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉換(中)與經去除潮汐影響 (下)之海面水位時序統整



圖 2-14(續) 蘇澳港於 2015 年 8 至 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉換(中) 與經去除潮汐影響(下)之海面水位時序統整



圖 2-14(續) 花蓮港於 2015 年 8 月含括蘇迪勒颱風與天鵝颱風期間以 AWAC 壓力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉換(中) 與經去除潮汐影響(下)之海面水位時序統整



圖 2-14(續) 花蓮港於 2015 年 10 月含括颱風與季風期間以 AWAC 壓 力計實測波動之原始 1Hz 分時紀錄(上)及其經壓力轉換(中)與經去除 潮汐影響(下)之海面水位時序統整

2.4 風浪監測與分析資料之檢選

以AWAC之聲波計及壓力計監測波浪,由於聲波紀錄不僅常會有 不可預期之訊號突衝(spike)發生,參見圖 2-6,且在較惡劣海氣象條件 下,尚會受強風及大波高衍生之紊亂氣泡與儀器分層深度(cell size)參 數設定之影響而產生紀錄截底情形,如圖 2-15 所示。因此,基於原始 壓力經轉換後之水位時序紀錄與原始聲波水位紀錄具相似性,參見圖 2-12 及圖 2-13,又考量壓力紀錄對陳現長波之先天優越性與訊號之穩 定性後,關於風浪之各項監測與分析資料之應用,實際皆可檢選壓力計 經轉換後之水位時序紀錄或其分時之波譜與個別波統計分析結果為依 據。



圖 2-15 蘇澳港外於 2015 年 8 月蘇迪勒颱風影響期間以壓力計(上)及 聲波計(下)監測波浪之原始 1Hz 逐時波動紀錄與聲波紀錄在大波高期 間發生之截底情形



圖 2-15(續) 蘇澳港外於 2015 年 9 月杜鵑颱風影響期間以壓力計(上) 及聲波計(下)監測波浪之原始 1Hz 逐時波動紀錄與聲波紀錄在大波高 期間發生之截底情形



圖 2-15(續) 花蓮港外於 2015 年 8 月蘇迪勒颱風影響期間以壓力計 (上)及聲波計(下)監測波浪之原始 1Hz 逐時波動紀錄與聲波紀錄在大 波高期間發生之截底情形

2.5 颱風波浪特性分析

2.5.1 臺灣近海之颱風長浪監測

臺灣近海之波浪監測, 在交通部運輸研究所港灣技術研究中心 (IHMT)統合建置之國內五大商港海氣象即時監測與傳輸顯示系統中, 近年皆採用挪威 NORTEK 公司出品之之超音波式波向波高與剖面海流 儀(AWAC), 同時掛載壓力計,長期連續地進行監測(曾 等,2015)。

目前,波浪監測係從每小時第十分鐘開始,以1Hz之取樣率,逐 序施測 2048 筆紀錄。監測所得之原始1Hz 分時紀錄,經儀器自身之 分析及後處理功能,可直接測得示性波高(H_s)、最大波高(H_{max})、有義 波高或1/3 最大波高(H_{1/3})、1/10 最大波高(H_{1/10})、主波向、次波向、以 及尖峰週期(T_p)、二階譜週期(T_{m02})、平均週期(T̄)等波浪代表特性。其 中,波浪之尖峰週期(T_p)或尖峰頻率(f_p),因其係指波浪頻譜中,具有 最大波能成分所對應之週期或頻率,故可較準確地應用於辨識長浪之 顯著性,所以,在 IHMT 既有之波浪監測與傳輸顯示系統中(曾 等, 2015),係以示性波高(H_s)及及尖峰週期(T_p),陳現監測波浪之特性。颱 風盛行期間,相關分月逐時之風、浪監測特性,如圖 2-16 所示。

配合中央氣象局颱風資料庫(http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/ pageControl/typhoon)之歷史颱風資訊,並自 IHMT 國內五大商港海氣 象即時監測與傳輸顯示系統中,檢選 2013 年 7 月發布海陸颱風警報之 第 7 號強烈颱風_蘇力(SOULIK)、2013 年 11 月無颱風警報之第 30 號 颱風_海燕(HAIYAN)、2014 年 7 月無颱風警報之第 8 號颱風_浣熊 (NEOGURI)、2015 年 3 月無颱風警報之第 4 號颱風_梅沙(MAYSAK)、 2015 年 5 月發布海上颱風警報之第 6 號強烈颱風_紅霞(NOUL)及未發 布海上颱風警報之第 7 號輕度颱風_白海豚(DOLPHIN),進而可彙整各 颱風期間監測波浪之示性波高與尖峰週期及十分鐘平均風速之逐時變 化或演化歷程,分別如圖 2-17 至圖 2-22 所示。



圖 2-16 國內 5 個國際港在 2014 年 7 月夏季颱風期監測波浪之示性波 高(上)與尖峰週期(中)及十分鐘平均風速(下)之逐時演化歷程比對



圖 2-16(續) 國內 5 個國際港在 2015 年 7 月夏季颱風期監測波浪之示 性波高(上)與尖峰週期(中)及十分鐘平均風速(下)逐時演化歷程比對




圖 2-17 蘇力颱風(2013/07)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測 風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)



圖 2-18 海燕颱風(2013/11)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測 風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)



圖 2-19 浣熊颱風(2014/07)之移動路徑(上) 與國內五個國際港近海監 測風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)



圖 2-20 梅沙颱風(2015/03)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測 風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)



圖 2-21 紅霞颱風(2015/05)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監測 風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)



圖 2-22 白海豚颱風(2015/05)之移動路徑(上)與國內五個國際港近海監 測風浪之逐時紀錄分析(下:上_示性波高;中_尖峰週期;下_風速)

針對基隆、臺中、高雄、蘇澳、花蓮等國內五大商港近岸海域,先 就風力,綜合觀察圖 2-17 至圖 2-22 可見,在颱風形成前,除了季風期 之外,各港之風力,大多皆以具有日週期變動性之海陸風為主要,且隨 天氣晴朗程度之變化,每日較小風速,約在 2 m/s 以下;較大風速,則 約介在 6~10 m/s 間,並且約發生於每日正午(12 時)之前後約 2 小時。 這意調,在颱風影響前,天氣大多是風和日麗,晴空萬里。

再就波浪而論,在颱風初生時期,由於長浪之影響尚未能及於臺灣 近岸海域,故各港域之經常波浪,僅單純由海陸風支配,風浪較微弱, 以致示性波高偏小,普遍不及1公尺,尖峰週期亦偏短,大多小於10 秒,海況可謂風平浪靜。

在颱風形成後,配合颱風移動路徑,對照颱風之位置、強度變化及 距東部海岸之距離,再綜合檢視圖 2-17 至圖 2-22 可見,不論是否為發 佈警報之颱風或僅是過境之颱風,更無論天氣之陰晴與風力之強弱,因 颱風所衍生之長浪,隨著颱風逐漸向臺灣海岸靠進,將促使各港近海波 浪之示性波高及尖峰週期,同時開始演化。其中,位處臺灣東部海域之 蘇澳港及花蓮港,由於未受臺灣海岸及陸地岬頭地形遮蔽之影響,颱風 波浪一般皆會大於位處西部海域之基隆港、臺中港及高雄港,又因臺灣 東部海域直接面對深邃的西太平洋,加以海灘坡度陡峭,以致同處在東 部海域之蘇澳港及花蓮港,無論颱風路徑之影響,颱風波浪之波高與週 期,均約略具有近似相同之逐時演化特性,如圖 2-23 及圖 2-24 所示, 而且隨著颱風波浪波高達到相對較大之時間前約10小時,尖峰週期均 會明確發生突昇,且約略同時會自低於10秒超越至12秒以上,隨後, 示性波高即會漸漸增大,並超越1.5公尺,終至波濤洶湧。僅存之微小 差別是,蘇澳港之颱風波浪波高,通常會比花蓮港大,這意謂,在臺灣 環島海域進行颱風波浪監測,波高與週期之演化歷程,均可以蘇澳港作 指標,並且可以其為代表(莊、曾,2015,莊 等,2016)。

綜合而論,檢視 2013~2015 年部分颱風期間國內五大商港近岸之 逐時波浪監測紀錄可發現(參見圖 2-16 至圖 2-22),當西太平洋海域有

颱風形成並向臺灣鄰近海域行進時,則無論中央氣象局是否對其可能 之侵襲威脅發布海上或陸上颱風警報,颱風所衍生之長浪(湧浪),均會 優先傳達臺灣東部近海,且甚特別地皆可於蘇澳港及花蓮港近岸之逐 時波浪監測紀錄中,透過示性波高(H_s)與尖峰週期(T_p),清晰陳示其時 變性。因此,針對颱風波浪之共同影響,只要颱風之行進路徑係由太平 洋海域接近臺灣東部海域,則颱風波浪週期與波高之逐時演化特性,將 可以蘇澳港或花蓮港作為代表與指標。惟兩者相較,蘇澳港更優於花蓮 港。至於,近岸波浪之共通特性,於無颱風生成之平常期間,示性波高 一般不及1公尺、且尖峰週期約介在 4~10 秒間;而在有颱風生成期間, 颱風長浪之成長,將促使示性波高漸次增大、尖峰週期更會提昇至 10 秒以上。



圖 2-23 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 7 月夏季颱風 影響期間示性波高(上)與尖峰週期(中)及十分鐘平均風速(下)所陳示近 似相同之逐時演化歷程



圖 2-24 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 4 月梅沙颱風 影響期間颱風波浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示 近似相同之逐時演化歷程



圖 2-24(續) 位處臺灣東部海域之蘇澳港及花蓮港於 2015 年 5 月紅霞 颱風影響期間颱風波浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所 陳示近似相同之逐時演化歷程

2.5.2 臺灣東部海域颱風波浪之關聯特性

臺灣東部海域,直接面對深邃的西太平洋,海域地形水深環境甚相 類似,加以近岸海灘坡度陡峭,故而自原生海域傳達近海之颱風波浪, 受海岸及陸地岬頭地形遮蔽影響所衍生之淺海效應甚為有限,以致同 處在東部海域之蘇澳港及花蓮港,無論颱風行進路徑、強度變化之影響, 颱風波浪之波高與週期,均約略具有近似相同之逐時演化特性(莊、曾, 2015;2017)。因此,為更詳實地揭示臺灣東部海域夏季(6月~8月)颱 風期近似相同之波浪監測特性,再次應用 IHMT 之海氣象即時監測與 傳輸顯示系統,並廣泛綜整蘇澳港與花蓮港在 2013 年 8月、2014 年與 2015 年 7月、8月之波浪與風速分月逐時變化歷程,分別如圖 2-25 至 圖 2-30 所示。圖中,蘇澳港與花蓮港,分別以藍色及紅色實線表示; 波浪之波高與週期,係指示性波高與尖峰週期;而風速,係為 10 分鐘 平均風速。

觀察 2-25 至圖 2-30,首先,對照比較波高與週期時變歷程可見, 在夏季颱風期中,僅管蘇澳港與花蓮港之地理區位不同,近海地形水深 具差異,但在相同之天氣系統與風域影響下,波浪彼此確實仍具有極為 一致之時變特性。其中,特別值得注意的是,夏季波浪之週期,普遍均 低於 10 秒,而波高大多小於 1.5 公尺;但有颱風侵襲或僅有颱風長浪 影響期間,例如:2013 年 8 月 9 日至 15 日無警報颱風尤特(UTOR)與 8月18日至22日發佈警報颱風潭美(TRAMI)、2014年7月4日至11 日無警報颱風浣熊(NEOGURI)及7月17日至25日發佈警報颱風麥德 姆(MATMO)、2014 年 7 月 29 日至 8 月 3 日無警報颱風娜克莉(NAKRI) 與 8 月 7 日至 12 日無警報颱風金娜薇(GENEVIEVE)、2015 年 6 月 30 日至7月13日發佈警報颱風昌鴻(CHAN-HOM)及蓮花(LINFA)與7月 3 日至 26 日無警報颱風南卡(NANGKA)及哈洛拉(HALOLA)、2015 年 7月30日至8月9日發佈警報颱風蘇迪勒(SOUDELOR)及2015年8月 14 日至 8 月 26 日發佈警報颱風天鵝(GONI)等等,颱風長浪之週期一 般均有突昇變動現象,且會自低於 10 秒躍昇至高於 12 秒,波高亦可 能會超過1.5公尺。因此,莊、曾(2014;2015)曾依據此一颱風波浪波

高與週期所特殊具有之週期突昇變動特性,將其應用以辨識颱風長浪 的侵襲影響期間,同時,並將颱風波浪之演化歷程,依據波高與週期之 逐時變動特性,詳細區分為(1)啟始到達;(2)群聚成長;(3)堆疊擁積; (4)發達成熟;及(5)減衰消退等五個重要階段,進而研提瘋狗浪之預警 基準(莊、曾,2019)。

其次,就風速時變性而論,蘇澳港與花蓮港風速,雖然彼此存在有 強弱之差異,但在夏季,由於天氣經常晴朗、陽光普照,故陳現日週期 變動性之海陸風會特別明顯,其風速之大小,一般均會低於 5 級或 8.0~10.7 m/s;因此,在夏季期間,若風速大小超過 5 級或 11 m/s 時, 通常意謂臺灣東部海岸在該期間正面對異常風暴或在颱風侵襲之警報 期間。

接著,為檢視夏季颱風影響期間蘇澳港與花蓮港波浪之關聯性,進 一步可將蘇澳港與花蓮港各分月逐時之示性波高、尖峰週期與二階譜 週期分別綜整,可得如圖 2-31,而對應之相關係數,統整如表 2-1 所 示。

表 2-1	蘇澳港與花蓮港 2013 至 2015 年颱風影響期間分月監測波浪示
	性波高(Hs)、尖峰週期(Tp)及二階譜週期(Tm02)之相關係數

項目	H_s	Tp	T _{m02}
年/月	相關係數	相關係數	相關係數
2013/07	0.872	0.802	0.759
2013/08	0.926	0.483	0.647
2014/07	0.962	0.758	0.901
2014/08	0.928	0.838	0.881
2015/07	0.891	0.618	0.670
2015/08	0.963	0.681	0.768



圖 2-25 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2013 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-26 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2014 年 7 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-27 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2014 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-28 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2015 年 7 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-29 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2015 年 8 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-30 蘇澳港(藍)與花蓮港(紅)在 2015 年 10 月夏季颱風期間監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)所陳示之近似時變歷程



圖 2-31 蘇澳港與花蓮港自 2013 年至 2015 年 7 月與 8 月夏季颱風期 監測波浪示性波高(上)與尖峰週期(下左)及二階譜週期(下右)之關聯性

綜合觀察圖 2-25 至圖 2-31 及表 2-1 可見, 在夏季颱風影響期間, 蘇澳港與花蓮港之波浪, 示性波高的相關係數普遍均甚高, 約介在 0.872~0.963 間;尖峰週期與二階譜週期的相關係數亦甚良好, 最高分 別可達 0.838 與 0.901, 最低仍有 0.483 與 0.647。因此可據以確認, 蘇 澳港與花蓮港之波浪, 彼此確實皆具有極高之關聯性, 且可進一步應用 以作為不同海象測站間颱風波浪監測紀錄之品管, 特別是作為交互檢 校及補遺之參考依據(莊、曾, 2019)。有所差別的, 僅是蘇澳港觀測的 示性波高, 一般略大於花蓮港而已。 颱風是夏季和秋季影響臺灣氣候的最重要因素。我國對颱風強度 所作之分級,是依據颱風近中心附近 10 分鐘平均最大風速,劃分為輕 度颱風、中度颱風及強烈颱風等 3 級,詳細的風速值範圍,如表 2-2 所 示(氣象局,2014)。由表觀察可見,颱風形成時,皆屬輕度颱風等級, 近中心附近之 10 分鐘平均最大風速,應達 17.2~32.6 m/s。至於初始移 動行進速度,通常每小時約 10 至 15 公里,爾後逐漸加速到每小時 15 至 25 公里(氣象局,2014)。

表 2-2 颱風強度分級表

	颱風近中心附近最大風速				
颱風强度	時公里(km/hr)	秒公尺(m/s)	時海里(kts)	相當蒲福風級	
輕度颱風	62 ~ 117	17.2 ~ 32.6	34 ~ 63	8 ~ 11	
中度颱風	118 ~ 183	32.7 ~ 50.9	$64 \sim 99$	12 ~ 15	
強烈颱風	184 以上	51.0以上	100 以上	16以上	

資料來源:https://www.cwb.gov.tw/V7/climate/climate_info/taiwan_climate/taiwan_5/taiwan_5_2.html

因風而起之風浪,其主要週期大多小於 30 秒(Munk, 1951),參見 圖 1-1。而為瞭解颱風長浪在傳達臺灣東部近岸海域之完整演化歷程, 因此,有必要先行對其傳播速度進行估算。

假設颱風在遼闊海洋中具無限吹送距離,則依據 Tucker (1991)之研究,可得發展成熟之颱風波浪,其尖峰週期及示性波高與海面上 19.5 公尺處風速U₁₉₅之關係,分別可表示為

 $T_p = 0.729 U_{19.5} \dots (2-8)$

 $H_s = 0.0213U_{195}^2$ (2-9)

取輕度颱風U_{19.5}之風速為 17 m/s,則可得颱風波浪在原生海域之尖 峰週期最小約是 12 秒、示性波高約為 6.2 公尺。因此,在太平洋中, 若颱風波浪在原生海域之尖峰週期平均可以 12 秒代表,則颱風波浪特 性將判屬深水波,且其波動傳播速度,將可以深海之群波速度(C_g)表示 為:

式中, $C = \frac{L}{T}$ 為週期T、波長 $L(\approx 1.56 \cdot T^2)$ 之波速。所以, C_g 可進一步簡 化為

$$C_{g} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{T}$$

= 0.78 T.....(2-11)

因而,深海中,尖峰週期平均12秒之颱風長浪,依據上式計算, 可得其波動傳播速度如下:

 $C_{a} = 0.78 \times 12 \text{ m/s}$

=9.36m/s.....(2-12)

將其換算時速,約相當於每小時 33.7 公里;而若換算為每日之傳 播行進距離,則估計日行最少約可達 809 公里。可見,深海中之颱風波 浪傳播速度,明顯會大於一般颱風之移動行進速度,因而颱風波浪可順 利脫離原生之移動行進風域而成為颱風長浪。

掌握上列每小時約35公里或每日約800公里之波動傳播速,再配 合實際颱風之行進路徑、位置與距岸距離,進而即可估計颱風長浪自原 生海域形成後,其前導波群可對特定近海波浪測站產生衝擊影響之啟 始到達時間(莊、曾,2019)。

2.5.4 近岸颱風長浪之演化歷程

波高與週期,兩者共同是描述波浪特性之重要參數,故而欲清礎陳

現及檢視近岸颱風長浪之演化歷程,應將兩者綜合聯結。此外,在太平 洋海域,自颱風形成後,由於其所衍生之長浪或前導波群,約可以每日 800公里之傳播速度(莊、曾,2019),優先傳播抵達臺灣東部海域,因 此,對於臺灣近海颱風長浪之逐時變化特性或演化歷程,參見圖 2-25 至圖 2-30,將可以位處在臺灣東部海域蘇澳港或花蓮港之監測波浪作 為最主要的觀察代表及指標。

掌握颱風長浪之波動傳播速度,針對生成於2015年3月無颱風警 報之梅沙颱風、同樣生成於2015年5月曾發佈海上颱風警報之紅霞颱 風及無颱風警報之白海豚颱風,再檢選蘇澳港近海波浪監測之逐時分 析結果作代表,進而可彙整各颱風影響期間監測波浪之示性波高與尖 峰週期及十分鐘平均風速之逐時變化或演化歷程,分別如圖2-32至2-34 所示。

在圖 2-32 至圖 2-34 中,首先,觀察近海平均風速之逐時變化特性 可見,蘇澳港近海風速之強弱,大多具有日週期之變動性,每日較小風 速,約在 2 m/s 以下;較大風速,則約介在 6~10 m/s 間,並且約發生於 每日正午(12 時)之前後約 2 小時。因此,可判定該風力,並非源自於遠 域之颱風,而明確係因當地海—陸溫差效應所衍生之「海陸風」。海陸 風速越強,代表天氣愈晴朗。也因此,從「海陸風」之明顯性,進而可 判定,在紅霞及白海豚颱風影響期間,蘇澳港天氣,很明顯是非常晴朗 而炎熱地。

至於風浪,配合圖 2-20 所示之颱風移動路徑圖,再觀察圖 2-32 可 見,梅沙颱風衍生之風浪,其在 2015/03/28 形成後,由於當時距臺灣 東海岸之距離約 3500 公里,若以每日約 800 公里之颱風長浪傳播速度 估算,則長浪應約於4 日後,或在 04/01 前後,前導波群方會傳達蘇澳 港近海,在此之前,日間海陸風明顯,最大風速可達 10 m/s,天氣應是 艷陽高照,但近海波浪仍屬於經常性風浪,故示性波高較小,低於1 公 尺、尖峰週期較短,介在4 至 8 秒間;自 04/01 00:00 以後至 04/02 12:00 間,雖然當時之颱風位置距離東部海岸仍約有 2000 公里,但隨著颱風

接近與強度之變化,長浪開始群聚成長,只是示性波高仍維持小於1公尺,但尖峰週期已逐漸增長至 8~10 秒;04/02 12:00 以後,颱風距離東部海岸約 1500 公里,此時由於先行後進長浪之堆疊擁積,尖峰週期因而自 10 秒突然躍昇至約 16 秒,示性波高亦隨即逐漸增大,並於 04/02 15:00 超越 1.5 公尺;自此後約 10 小時,即約於 04/03 01:00 後,由於長浪之持續堆疊擁積,終致使長浪發達成熟,尖峰週期穩定維持在約 14 秒,而示性波高,大幅增長至 2.5 公尺以上,且最大可達 3.5 公尺,在此期間內,海面應是波濤洶湧;持續維持至 04/05 12:00 之後,示性波高逐漸降低、尖峰週期亦自 12 秒持續減小,長浪已明顯在減衰消退;終至 04/07 12:00 後,海面再次回復至波高小於1 公尺、週期小於 9 秒之經常性風浪。

同樣地,配合圖 2-21 所示之颱風移動路徑圖,再觀察圖 2-33 可見, 生成於 2015 年 5 月曾發布海上颱風警報之強烈颱風 紅霞,其在 05/04 形成後,距臺灣東海岸之距離約2000公里,若以每日約800公里之颱 風長浪傳播速度估算,則長浪應約於3日後,或在05/07前後,前導波 群即會傳達蘇澳港近海,在此之前,海陸風最大風速約僅達6m/s,天 氣尚算晴朗,故近海波浪係屬經常性風浪,示性波高低於1公尺、尖峰 週期介在4至8秒間;自05/0720:00以後至05/0904:00間,雖然當時 之颱風位置距離東部海岸仍約有 1000~1500 公里,但隨著颱風接近, 長浪已開始群聚成長,只是示性波高仍維持小於 1 公尺,但尖峰週期 已逐漸增長至 8~10 秒;05/09 08:00 以後,颱風距離東部海岸約 700 公 里,此時由於先行後進長浪之堆疊擁積,尖峰週期因而自 9 秒突然躍 昇至約 15 秒,示性波高亦隨即逐漸增大,並於 05/10 09:00 超越 1.5 公 尺; 自此後約10小時, 即約於05/1018:00後, 由於長浪之持續堆疊擁 積,終致使長浪發達成熟,尖峰週期穩定維持在約 12 秒,而示性波高, 大幅增長至 2.5 公尺以上,且最大可達 3.5 公尺,在此期間內,海面應 是波濤洶湧,惟其日間海陸風明顯,最大風速可達 10 m/s,天氣仍應是 艷陽高照;持續維持至 05/11 20:00 之後,颱風過境東部海域並逐漸遠 離,示性波高隨即逐漸降低、尖峰週期亦自 12 秒持續減小,長浪已明

顯在減衰消退;終至05/1312:00後,海面再次回復至波高小於1公尺、 週期小於8秒之經常性風浪。

再配合圖 2-22 所示之颱風移動路徑圖,觀察圖 2-34 可見,生成於 2015 年 5 月無颱風警報之白海豚颱風,其在 05/10 形成後,距臺灣東 海岸之距離約 4000 公里, 若以每日約 800 公里之颱風長浪傳播速度估 算,則長浪應約於5日後,或在05/15前後,前導波群即會傳達蘇澳港 近海。在此之前,蘇澳港近海波高甚小,不及1.0公尺,而週期亦多在 6秒上下,波浪係屬於日常天氣下之高頻風浪,總體海象,可稱風平浪 静,具有日週期性強弱變動之海陸風速,亦不會對風浪之波高與週期, 陳現對應之日週期性增減;及至5月16日晚上約6時,僅管波高仍偏 小,但週期已自6秒突然增長至約10秒,可見,長浪波群已陸續抵達; 再至5月17日下午約5時許,雖然波高仍保持在1.0公尺以下,但波 浪週期之變化,再次從 10 秒大幅躍升至 14 秒以上,且最長週期約可 達16秒左右,這顯示海域之波動特性,明確已由風浪轉變為長浪;而 後,由於長浪波能之不易消散性,再外加先來後到長浪波群之陸續堆疊 擁積,故長浪之波高,自此時期開始,即將緩緩成長而增高,並約於5 月18日早上約9時許,波高超過1.5公尺;及至5月18日下午2時至 5 月 19 日清晨,長浪演化臻於成熟,波高均超過 2.0 公尺,且最大可 達約 2.5 公尺;接著,在5月 20 日清晨以前,演化成熟之波高,再次 由於颱風行進速度及強度之轉變,促使發展已臻成熟之長浪,波高會在 2.0 公尺上下陳現振盪;最後,隨著颱風自臺灣東部外海開始北轉離開, 促使原來保持在成熟飽滿狀態之長浪,陸續會因堆疊擁積效應減弱而 衰退,波高因而逐漸降低,週期亦會從 12 秒以上逐漸減縮;及至5月 20 日中午約 12 時,僅管週期仍維持在 12 秒左右,但波高已快速降低 至小於 1.5 公尺; 而至 5 月 21 日早上約 7 時許, 波高已回降至約 1.0 公尺、週期趨近於8秒,這再次顯示出颱風衍生之長浪已完全消散,近 海波浪又回復為日常天氣下之風浪。

此外,在2015年8至10月期間,蘇迪勒(SOUDELOR)颱風是當 年期對臺灣影響最大的颱風,中央氣象局曾對其發布海陸上颱風警報。

其自7月30日在關島東方海面形成後,即穩定向西北西移動,強度逐漸增強,8月1日距離臺灣約3,200公里,颱風全程強度發展與移動路徑變化,如圖2-35所示。以群波傳播速度概約是800km/day計算,颱 風長浪大約會於8月5日初始傳達臺灣東部近海。自IHMT之港灣環 境資訊網截取對應期間之逐時風浪監測資訊,可得示性波高與尖峰週 期之逐時變動歷程,統整於圖2-35所示。

觀察圖 2-35 可見,蘇迪勒颱風波浪,在 8 月 5 日 00 時估計長浪初 始傳達臺灣東部近海之前,波浪特性屬於一般之風浪,示性波高小於 1 公尺,尖峰週期在 10 秒左右,但不及 12 秒;而至 5 日 12 時,長浪抵 達並群聚成長後,尖峰週期即明顯超越 12 秒且突昇至 14 秒;接著, 因長浪之持續堆疊擁積,以致在 6 日 10 時,示性波高超越 1.5 公尺, 尖峰週期持續保持在 14 秒左右;到 6 日 16 時許,宜蘭縣南方澳之颱 風長浪即高達 2.5 公尺,當時,新北市兩對母女共六人,恰在南方澳內 埤海灘踏浪戲水,不料 4 人被長浪捲入海裡,造成 2 死 1 失蹤不幸; 直到 8 日 3 時颱風登陸前後,風浪發達成熟,示性波高最大達 16 公尺; 此後,風浪即減衰消退,並於 10 日 12 時後回歸為平時之一般風浪。

配合上述 2015 年 8 月 5 至 10 日蘇迪勒颱風之侵襲期間,截取蘇 澳港外佈設 AWAC 監測波浪所得經轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時 序訊號,再應用中央移動平均法,取 1,200 秒窗寬,移除潮汐水位後, 進一步應用 Enhanced Morlet Transform (AnCAD, 2014)小波轉換進行時 頻分析,因而可得颱風波動全程演化時頻分析圖,如圖 2-36 所示;對 應特定時間之分時波譜變化,則統整如圖 2-37 所示。由圖觀察可見, 颱風波浪之尖峰週期,集中在 10~20 秒之長浪區間,因而由颱風長浪 成分所構成之群波,振幅較大、週期一般也會大於 100 秒,這意謂颱風 波浪近最大波高期間,頻率介在 0.2~2 cpm (cycles per minute)間之亞重 力波會較彰顯!

配合圖 2-35 所示之颱風移動路徑,綜合觀察圖 2-36 與圖 2-37 可 見,蘇迪勒颱風波浪,自 8 月 5 日 0 時估計長浪初始到達臺灣東部近

海開始,風浪波動能量(波高)小,頻率主要分佈於 3~10 cpm (cycles per minute)間,這意謂在颱風長浪影響初期,頻率介在 3~6 cpm 的長浪波高,普遍尚未比既存於近岸且頻率介在 6~10 cpm 的一般風浪優越;隨後,受颱風行進強度變化及其趨近造成長浪群聚成長與堆疊擁積之影響,以致頻率介在 3~6 cpm 的長浪波動能量,不僅會漸次由小變大,外加長浪不易消散,頻率更會由高轉低,並在 8 月 5 日 12 時後,頻率遂於 6 cpm 處陳現突降至 5 cpm 以下之週期突昇性,最特別是,在 8 月 7 日 12 時後,在長浪堆疊擁積之極盛期與發達成熟期中,尚會伴生有頻率介在 0.2~2 cpm 之亞重力波。後續,隨颱風之遠離,致使長浪進入減衰消退期,長浪波高因而快速減小,主要頻率隨之也回復為介在 6~10 cpm 的一般風浪。

再以2015年8至10月期間之杜鵑(DUJUAN)颱風為例,其自9月 22日在菲律賓東方海面形成後,即穩定以西北轉西北西方向移動,強 度逐漸增強,09月27日08:30及17:30,中央氣象局曾分別對其發布 海陸上颱風警報,並在9月28日17時40分由宜蘭南澳鄉登陸。強風 及豪雨曾造成鐵公路及航空交通多班停駛,並曾造成3人死亡,農損 逾新臺幣1.7億元。杜鵑颱風全程強度發展與移動路徑變化,如圖2-38 所示。由於該颱風於9月23日由熱帶低氣壓發展為輕度颱風,當時距 離臺灣約1,600公里,故若以群波傳播速度概約是800 km/day 計算, 估計颱風長浪大約會於9月25日初始傳達臺灣東部近海。自IHMT之 港灣環境資訊網截取對應期間之逐時波浪監測資訊,可得示性波高與 尖峰週期之逐時變動歷程,統整於圖2-38所示。

觀察圖 2-38 可見,杜鵑颱風波浪,在9月 25 日 0 時估計長浪初始 傳達臺灣東部近海之前,波浪特性仍屬於一般之風浪,示性波高小於 1 公尺,尖峰週期在 10 秒左右,但不及 12 秒;而至 27 日 6 時,長浪抵 達並群聚成長後,尖峰週期即明顯突昇超越 12 秒且漸增至 14 秒;接 著,因長浪之持續堆疊擁積,以致在 27 日 12 時,示性波高超越 2.5 公 尺,尖峰週期持續保持在 14 秒左右;直到 28 日 18 時颱風登陸前後, 風浪發達成熟,示性波高最大達 9.6 公尺;此後,風浪即減衰消退,並

於30日4時後回歸為平時之一般風浪。

配合上述 2015 年 9 月 24 至 30 日杜鵑颱風之侵襲期間,截取蘇澳 港外佈設 AWAC 監測波浪所得經轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序 訊號,再應用中央移動平均法,取 1,200 秒窗寬,移除潮汐水位後,進 一步應用 Enhanced Morlet Transform (AnCAD, 2014)小波轉換進行時頻 分析,因而可得颱風波動全程演化時頻分析圖,如圖 2-39 所示;對應 特定時間之分時波譜變化,則統整如圖 2-40 所示。由圖觀察可見,颱 風波浪之尖峰週期,集中在 10~20 秒之長浪區間,而且由颱風長浪成 分所構成之群波,振幅較大、週期一般也會大於 100 秒,這意謂颱風波 浪近最大波高期間,亞重力波(0.2~2 cpm)會較彰顯!

配合圖 2-38 所示之颱風移動路徑,綜合觀察圖 2-39 與圖 2-40 可 見,杜鵑颱風波浪,自9月25日0時估計長浪初始到達臺灣東部近海 開始,風浪之波動能量(波高)普遍偏小,頻率主要均仍分佈於 3~10 cpm 間,這同樣說明在颱風長浪影響初期,頻率介在 3~6 cpm 的長浪波高, 普遍尚未比既存於近岸且頻率介在 6~10 cpm 的一般風浪優越;隨後, 受颱風行進強度變化及其趨近造成長浪群聚成長與堆疊擁積之影響, 以致頻率介在 3~6 cpm 的長浪波動能量,不僅會漸次由小變大,外加 長浪不易消散,頻率更會由高轉低,並在9月27日6時後,頻率遂於 6 cpm 處陳現突降至5 cpm 以下之週期突昇性,最特別是,在9月28 日 12 時後,在長浪堆疊擁積之極盛期與發達成熟期中,尚會伴生有頻 率介在 0.2~2 cpm 之亞重力波(infragravity waves)。後續,隨颱風之遠 離,致使長浪進入減衰消退期,長浪波高因而快速減小,主要頻率隨之 也回復為介在 6~10 cpm 的一般風浪。

綜合上列各颱風長浪在近岸監測之全程演化歷程可具體瞭解到, 臺灣東部近海之颱風波浪,通常與當地之天氣及風力或「海陸風」無關, 但明顯會受颱風行進強度變化及其趨近與遠離效應之影響,故波高與 週期之逐時變化,明顯皆會與颱風衍生長浪之興衰相關,致使主要波動 之尖峰頻率,集中在 3~6 cpm,或尖峰週期介在 10 秒~20 秒間,所以,

在颱風長浪堆疊擁積之極盛期與發達成熟期,由颱風長浪成分所構成 之群波,群波特性較明顯,振幅較大、非線性高、群波週期一般也會大 於100秒,最特別的是尚會伴生有頻率介在0.2~2 cpm之亞重力波。因 此,依據臺灣東部近岸監測颱風長浪所陳示波高與週期之時變共通特 性,可將主要之演化歷程,區分為(1)啟始到達;(2)群聚成長;(3)堆疊 擁積;(4)發達成熟;及(5)減衰消退等五個重要階段(莊、曾,2015;2016; 2019),各階段對應之波高與週期時變共通特性,詳述如下:

- 1、啟始到達:自颱風最初形成之位置及與蘇澳港之距離,應用尖峰週 期約 12 秒之深水群波傳播速度(~809 km/day),可估算前導波群之 啟始影響時間。在本階段前,海況一般較平靜,示性波高較小,普 遍低於1公尺、尖峰週期較短,大多介在4至8秒間。
- 2、群聚成長:自啟始到達時間起,近岸長浪會開始群聚成長,惟海況仍舊平靜,示性波高仍維持小於1公尺,但尖峰週期已逐漸增長至 8~10秒間。
- 3、堆疊擁積:隨著颱風趨近之影響,先行後進之長浪會逐漸積疊,並 促使尖峰週期,自小於10秒突然躍昇至大於12秒,示性波高更會 逐漸增大,並於隨後超越1.5公尺。
- 4、發達成熟:自堆疊擁積階段尖峰週期突然躍昇後約 10 小時,長浪 尖峰週期會持續穩定維持在約 12 秒以上,而示性波高,將大幅增 長至 2.0 公尺以上,甚至輕易會超越 3.5 公尺。在此期間內,不論 是否為發布警報或僅是過境之颱風,颱風位置通常將最靠近臺灣東 部海域,以致即使在風和日麗天氣下,海面仍應是波濤洶湧。
- 5、減衰消退:示性波高自相對較大值逐漸降低,且尖峰週期會自 12 秒以上持續減小。當尖峰週期回降至 10 秒以下,或示性波高低於 1.5 公尺時,則海況將漸次回復為經常性風浪,並趨向於風平浪靜。



圖 2-32 在蘇澳港監測梅沙颱風(2015/03)之長浪示性波高(上)、尖峰週 期(中)與平均風速(下)之逐時演化歷程



圖 2-33 在蘇澳港監測紅霞颱風(2015/05)之長浪示性波高(上)、尖峰週 期(中)與平均風速(下)之逐時演化歷程



圖 2-34 在蘇澳港監測白海豚颱風(2015/05)之長浪示性波高(上)、尖峰 週期(中)與平均風速(下)之逐時演化歷程



圖 2-35 蘇迪勒颱風(2015/08)之移動路徑(上)及在蘇澳港監測颱風長浪 (下)之示性波高(上)、尖峰週期(中)與平均風速(下)之逐時演化歷程



圖 2-36 於蘇迪勒颱風侵襲期間(2015/08)在蘇澳港近海監測波浪所得 轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序訊號(上)及去除潮汐後之原始水 位時序訊號(中)與其時頻分析圖(下)



圖 2-37 在蘇澳港近海於蘇迪勒颱風侵襲期間(2015/08)颱風長浪在不同時間階段之分時波譜變化



圖 2-38 杜鵑颱風(2015/09)之移動路徑(上)及在蘇澳港監測颱風長浪(下)之示性波高(上)、尖峰週期(中)與平均風速(下)之逐時演化歷程



圖 2-39 於杜鵑颱風侵襲期間(2015/09)在蘇澳港近海監測波浪所得轉 換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序訊號(上)及去除潮汐後之原始水位 時序訊號(中)與其時頻分析圖(下)



圖 2-40 在蘇澳港近海於杜鵑颱風侵襲期間(2015/09)颱風長浪在不同 時間階段之分時波譜變化

2.5.5 颱風長浪之判識

對於西太平洋中生成的任何颱風,無論行進路徑、移動速度及強度 變化,更無論其後來是否發展為發布警報颱風,只要氣象上預測它的行 徑係由東往西趨近於臺灣東部海岸,則自該颱風由熱帶低氣壓發展、生 成為輕度颱風開始,長浪群波之傳播速度,平均皆可以每日 800 公里 行進。因此,對於颱風長浪之判識,從颱風氣象預報資訊中,掌握颱風 生成時,其與臺灣東部海岸間之距離,即可簡易估計颱風長浪之初始影 響時間(莊、曾,2019)。隨後,配合蘇澳港或花蓮港近海之海象即時監 測資訊(颱風與季風浪演化歷程特性甚相似,擇一即可!),當監測波浪之 尖峰週期T_a,自低於經常性風浪之 10 秒而突昇至 12 秒以上,即可判 定颱風長浪之能量,已超越既有一般風浪或季風浪之能量。在此情況下, 僅管當時海況一般,示性波高尚小,通常不及1.5公尺,但仍意謂傳達 臺灣近海之長浪,已在持續群聚成長。此後,若颱風長浪之尖峰週期始 終維持在 12 秒以上,但示性波高始終無法超越 1.5 公尺,則意謂該颱 風所生成長浪之影響及衝擊性有限,對臺灣近海尚不致造成危害;惟若 示性波高超越 1.5 公尺,這即表示該颱風前、後期衍生之長浪,在近岸 海域將因消散不易而致堆疊擁積,並將促使長浪示性波高快速疊加增 高且變大(通常,在此階段後10小時內,示性波高將可達最大值!),進 而在近海導致較悪劣之海況,同時也促使波浪在近岸灘區之溯升,更不 穩定且難以預測,因而,常會引發"瘋狗浪"事件(莊、曾,2019)。

此外,就近期對臺灣近海颱風長浪演化歷程之研究觀察(莊、曾, 2019),概略可判別:一般經常性風浪之尖峰週期,不及10秒;受熱帶 性低氣壓影響下,尖峰週期約可達10秒;而當颱風長浪之能量較一般 經常性風浪優勢時,則輕度颱風所衍生之尖峰週期可達約12秒;中度 颱風約14秒;強烈颱風則約可高達16秒以上!

當颱風長浪影響優於一般經常性風浪時,關於颱風長浪尖峰週期 T,會清楚陳現突昇(jump)之跳動現象,就多次應用蘇澳港及花蓮港波浪

監測之分析結果做校驗,並與季風波浪及經常風浪做比較、對照,可發 現其係颱風長浪週期所獨特具有的特性。主要之成因,分析、判識如下:

針對近岸海域量測之波動,若就波高或波動能量之變動特性而論, 波高的增減或波浪能量之高低變化,必然要連續且不應有突變之現象, 而且針對週期之變動特性,若就T_½、T_½、T_z或是T₀₁、T₀₂、T_s而論,由 於其在個別波統計及波譜分析上皆具平均特性,因此,這些週期長短之 增減變化,仍必然會連續且不會發生突變,也因而並不是判斷關鍵波動 特性的良好指標,詳見中央氣象局在2018年9月山竹颱風影響期間, 蘇澳港資料浮標之波高與週期逐時演化歷程,如圖2-41所示。

尖峰週期*T_p*,因其在波譜分析上,特別用以指示波動監測紀錄期間, 具有最優勢或最高能量之波動成分。而很巧妙的是,由於平常期間及強 季風期間,在近岸海域量測風浪之尖峰週期,一般大多僅會在小於 4~10 秒之高頻波段,且會陳現"連續"變動現象;但颱風長浪或湧浪,因其係 皆由強度在輕度颱風以上之強風速(>17 m/s)所造成之波浪,故其本質 之尖峰週期,經過長距離之波動傳遞演化,通常即會達 10 秒以上,且 主要分布在 12~20 秒間,參見圖 2-37 及圖 2-40 所示,也因此,在近岸 海域量測波浪,若其成分綜合含括風浪與湧浪成分,則其尖峰週期之陳 現,必然應隨風浪與湧浪中,具有較高或具優勢能量之波動成分而變動。 換言之,當尖峰週期低於 10 秒,這意謂經常性風浪成分之主要能量仍 優於湧浪;而當尖峰週期躍昇至 12 秒以上,則意謂湧浪成分之主要能 量,已明確優於風浪(莊、曾,2019)。

綜合而對於颱風長浪之判識或對其波高與週期之全程演化歷程, 若有調校妥適的颱風波浪數值推算模式,則配合預測準確的颱風移動 路徑、移動速度、颱風強度等颱風參數,將可有效、全面、充分且精準 的加以掌握(Liang, 2014)!僅管如此,在西太平洋海域,每年颱風發生 頻繁,平均有高達 26.32 個(氣象局, 2017),且並非每個颱風均可受到 政府權責單位或社會媒體重視(一般僅重視及關注發布海陸警報之颱 風)。因此,針對必定會衍生長浪並衝擊臺灣東部近海之颱風而言,無

論颱風移動路徑、移動速度、強度等之變化,更不論是否發佈颱風警報, 在目前尚缺乏經常性颱風長浪成長演化資訊之情況下,替代性地依據 漸趨準確之氣象預報資訊,配合可靠地海象即時監測資訊,則結合颱風 長浪在臺灣東部近海所陳示(1)啟始到達;(2)群聚成長;(3)堆疊擁積; (4)發達成熟;及(5)減衰消退等5個主要之波高與週期時變共通特性(莊、 曾,2015;2016;2019),將可簡易、有效、全面、充分且準確的完成 判識!



資料來源:即時海況,中央氣象局。

圖 2-41 山竹颱風影響期間(2018/09)蘇澳港資料浮標之波高與週期及 風速之逐時演化特性
2.6 季風波浪特性分析

2.6.1 臺灣近海之季風波浪監測

季風,主要係因海洋與陸地間季節性溫差所導致之大尺度空氣環流,並以亞洲的南部和東部最為顯著(氣象局,2014)。基於地理位置及 海域環境因素,臺灣四季的風,明顯會受大陸及海洋氣候型態所影響。

在每年12月至次年2月間之冬季,由於東亞大陸通常較海洋寒冷, 以致陸上空氣的密度較大,氣壓較高,大量寒冷而乾燥的空氣,於是因 氣壓差而起風,並自陸上吹向海洋,外加科氏力(Coriolis force)之影響, 因此,在東亞北緯 30 度以南地區,經常必需面對盛行的東北季風(氣象 局,2014)。相關來自西伯利亞的大陸冷高壓天氣系統圖,如圖 2-42 與 圖 2-43 所示,而相關之天氣圖與對應之風場,參見圖 2-44 所示。



圖 2-42 可在臺灣海域衍生強勁東北季風之大陸冷高壓天氣系統 2015/01/28 0000UTC



圖 2-43 可在臺灣海域衍生強勁東北季風之大陸冷高壓天氣系統與其 風場預報圖(2016/01/24 0800LST 帝王寒潮期間)

在夏季,概略自每年5月至8月期間,由於亞洲南部陸地溫度通 常較印度洋高,風因而會從氣壓較高之海洋吹向氣壓較低之陸地,外加 科氏力之偏轉效應,所以,在海洋性高氣壓影響下,臺灣海域,特別是 臺灣海峽南段海域,海氣象狀況,總體上經常皆會受梅雨鋒面與西南季 風天氣系統所影響。部分夏季期間,尚由於熱帶海洋上會發生低氣壓的 漩渦或熱帶氣旋,當該熱帶氣旋之近海面最大風速到達或超過每小時 62公里(17.2 m/s)時,即為「颱風」(氣象局,2017)。相關夏季季風及颱 風之天氣圖與對應之風場,參見圖 2-2,或可自中央氣象局網站 (http://www.cwb.gov.tw/V7/forecast/)擷取預報資訊,如圖 2-44 所示。



圖 2-44 臺灣海域夏季 2017/06/20 08:00 之西南季風天氣系統(上)與對 應之地面風場(下)

為科學研究與工程應用之需要,早自 1986 年開始,交通部運輸研 究所港灣技術研究中心(IHMT)即著手進行基隆、臺中、高雄、花蓮、 蘇澳等臺灣 5 個國際港近海長期性海氣象資料之蒐集、觀測、整理及 分析歸納。而自 2005 年後,對於風力之觀測,即陸續採用美國 Gill 廠 牌 WindObserver[™]型式之二維超音波風速風向計。該儀器之觀測能量範 圍,最大風速可達 75 m/sec。現今,風速及風向之取樣頻率為 1 Hz,並 以每小時整點前連續 10 分鐘之量測作為逐時紀錄,而後,經算術平均 及最大值分析後,即可測得 10 分鐘平均與最大陣風之風速與風向。

至於 5 個國際港近海長期性波浪資料之監測,在其起始時間分別為:臺中港自 1971、基隆港自 1983、蘇澳港自 1984、花蓮港亦自 1984、高雄港自 2000。而為建置各港之海氣象(風、浪、潮、流)即時監測與傳輸顯示系統,高雄港自 2000 年 12 月起、基隆港自 2001 年 6 月起、花蓮港自 2001 年 8 月起、蘇澳港自 2002 年 7 月起、臺中港自 2003 年 6 月起,分別即廣泛使用挪威 NORTEK 公司出品同時掛載有聲波計(AST) 與壓力計(Press.)之超音波式波向波高與剖面海流儀(AWAC),如圖 2-1 所示,進行長時間連續之海面波浪及海流監測(曾 等,2015)。目前,波浪監測係以 1 Hz 之取樣率,從每小時第 10 分鐘開始,逐時施測 2048 筆紀錄。

為總體性地檢視臺灣環島海域季風強盛期之風速與其所衍生風浪 特性之變化,應用 IHMT 之海氣象即時監測與傳輸顯示系統,針對 2014 年 12 月~2015 年 2 月冬季之東北季風盛行期間,分月依序以藍、紅、 綠、黑、紫色彙整基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、臺中港等國內五 大商港海域既有波浪與風速之逐時監測紀錄,結果分別可得如圖 2-45 所示。圖中,波浪之波高與週期,分別係為示性波高(H_s)與尖峰週期(T_p); 而風速,係為 10 分鐘平均風速。由圖觀察,首先,就風速時變性綜合 而論,受大陸冷高壓天氣系統(參見圖 2-43)發展之總體影響,臺灣環島 五大商港之季風,由於地理區位不同,外加區域地形遮蔽效應,風速強 弱彼此存在差異,惟起伏變動趨勢卻約略相近似,風速並以臺中港最強 勁,一般可大於 5 級或 8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,約可達 10 級或

2 - 70

24.5~28.4 m/s。因此,大陸冷高壓天氣系統影響臺灣海域之程度,似乎 可以用臺中港冬季風速之強弱,作為簡易地判別指標(莊、曾,2019)。



圖 2-45 臺灣 5 個國際港在 2014 年 12 月實測波浪示性波高(上)與尖峰 週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化



圖 2-45(續) 臺灣 5 個國際港在 2015 年 1 月實測波浪示性波高(上)與 尖峰週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化



圖 2-45(續) 臺灣 5 個國際港在 2015 年 2 月實測波浪示性波高(上)與 尖峰週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化

再由圖綜合觀察相關對應之風浪時變特性可見,分別位處臺灣北 部與中西部之基隆港與臺中港,其較大之風浪波高,可超過4.5 公尺, 且全冬季之波高大小,彼此皆甚相近似,並皆會隨臺中港風速之強弱而 陳現相似地高低變動趨勢;而分別位處在臺灣東北部與東部之蘇澳港 與花蓮港,全冬季之風浪波高,彼此亦具有相近似之大小,只不過隨臺 中港風速強弱而變動高低之趨勢並不明顯;而位處在臺灣西南部之高 雄港,因地理位置洽對東北季風具有屏障與遮蔽優勢,故不僅風速微弱, 波高亦最小。

至於,風浪週期之時變性,由圖綜合觀察可見,受冬季季風天氣系統發展之總體影響,臺灣環島五大商港之風浪,除了在2014年12月 6~7日期間受哈格比(HAGUPIT)颱風、2015年1月17~19日受米克拉 (MEKKHALA)颱風、2015年2月13~15日受無花果(HIGOS)颱風之颱 風湧浪影響外,尖峰週期(Tp)之長短,一般約介在5~10秒間,最長不 及12秒,隨風速強弱之變動幅度不大,惟仍與臺中港風速超過6級或 10.8~13.8 m/s 約略具有關聯(莊、曾, 2019)。

繼2015年之強聖嬰(El Niño)年之後,於2016年1至6月期間,因 西太平洋海域完全無颱風形成,故臺灣環島海域之風浪,無需經風-湧 浪之劃分(許等,2012),即可確認其單純皆為受季風影響所衍生之風 浪,故皆可充分應用以檢視臺灣環島海域季風強盛期之風速與衍生風 浪之變動特性。再應用 IHMT 之海氣象即時監測與傳輸顯示系統,針 對2016年1~3月冬、春季之東北季風盛行期間,分月彙整國內五大商 港海域既有波浪與風速之逐時監測紀錄,結果分別可綜整如圖2-46所 示。圖中,波浪之波高與週期,分別係為示性波高與尖峰週期;而風速, 係為10分鐘平均風速。

首先,就圖 2-46 綜合觀察風速時變性可見,受大陸冷高壓天氣系統(參見圖 2-43)發展之總體影響,臺灣環島五大商港之季風,由於地理區位不同,外加區域地形遮蔽效應,僅管風速強弱彼此存在明顯差異, 惟起伏變動趨勢卻相近似,風速並以臺中港最強勁,一般可大於 5 級或 8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,諸如在 1 月 23~24 日(帝王寒潮)、2 月 1~7 日、2 月 23~25 日、3 月 10~11 日、3 月 24~25 日等期間,強烈季風皆約可達 10 級或 24.5~28.4 m/s。可見,臺中港冬季風速之強弱,確實可應用以作為大陸冷高壓天氣系統影響臺灣海域程度之簡易示性與判別指標(莊 等, 2015)。

接著,就季風風浪之波高時變特性而論,再由圖 2-46 綜合觀察可 見,分別位處臺灣北部與中西部之基隆港與臺中港,全冬季之波高大小, 彼此皆甚相近似,且一致會隨臺中港風速之強弱而陳現相同之高低變 動趨勢。兩港較大之風浪波高,可超過 4.5 公尺,在1月 23 日帝王寒 潮發生期間,基隆港最大之波高,甚至可超過 6.0 公尺。另外,分別位 處在臺灣東北部與東部之蘇澳港與花蓮港,全冬季之風浪波高,彼此大 小亦甚相近似,只不過隨臺中港風速強弱而變動高低之趨勢較不明顯; 至於位處在臺灣西南部之高雄港,因對東北季風恰具有地理地形之屏 蔽優勢,故不僅風速微弱,波高亦最小。



圖 2-46 臺灣 5 個國際港在 2016 年 1 月實測波浪示性波高(上)與尖峰 週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化



圖 2-46(續) 臺灣 5 個國際港在 2016 年 2 月實測波浪示性波高(上)與 尖峰週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化



圖 2-46(續) 臺灣 5 個國際港在 2016 年 3 月實測波浪示性波高(上)與 尖峰週期(中)及對應平均風速(下)之逐時變化

最後,就圖 2-46 中之季風風浪週期時變特性綜合觀察可見,在冬季季風天氣系統發展之總體影響下,臺灣環島五大商港之風浪週期,除 了高雄港外,其長短之變動趨勢,約略與臺中港風速超過6級(10.8~13.8 m/s)之程度具關聯性,只是變動幅度不大。尖峰週期之長短,一般約介 在 5~10 秒間。特別值得一提的是,在強烈季風期,當臺中港風速高達 24.5~28.4 m/s 或 10 級,季風風浪週期最長亦不會超過 12 秒。因此, 相對於發達成熟期之颱風長浪,此一明確之週期門檻特徵,恰可以作為 彼此區隔與判別之基準(莊、曾,2015)。

2.6.2 東北季風與區域風浪之關聯特性

考量大陸冷高壓天氣系統(參見圖 2-42 與圖 2-43)發展對區域總體 之影響,在冬季季風盛行期間,為更詳細地檢視圖 2-45 所示因臺灣環 島地理區位不同所造成風速與長浪特性之異同性及關聯性,因此,針對 位處臺灣北部與中西部之基隆與臺中港海域,以及位處在臺灣東北部 與東部之蘇澳與花蓮港海域,再分月分別以藍色與紅色彙整 2014 年 12 月至 2015 年 2 月及 2016 年 1 月至 3 冬季期間之波浪與風速逐時監測 紀錄,結果分別可得如圖 2-47 及圖 2-48 所示。



圖 2-47 基隆港與臺中港 2014 年 12 月監測波浪示性波高(上)與尖峰週 期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2015 年 1 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2015 年 2 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2016 年1月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2016 年 2 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-47(續) 基隆港與臺中港 2016 年 3 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48 蘇澳港與花蓮港 2014 年 12 月監測波浪示性波高(上)與尖峰週 期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2015 年 1 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2015 年 2 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2016 年1月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2016 年 2 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性



圖 2-48(續) 蘇澳港與花蓮港 2016 年 3 月監測波浪示性波高(上)與尖 峰週期(中)及平均風速(下)之相似逐時變化關聯性

首先,就圖 2-47 中位處臺灣北部與中西部之基隆港與臺中港海域 而論,經由風速時變性之比較對照可見,僅管兩港之地理區位不同,但 季風風速之強弱起伏,彼此間之變動趨勢卻甚相似,惟風速之大小,皆 以臺中港較強勁,一般可大於 5 級或 8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,約 可達 10 級或 24.5~28.4 m/s,且約為基隆港之三倍。這事實說明,區域 性之地形,對風速影響極大。故若欲藉風速以充分反映東北季風對臺灣 海域之影響程度,則臺中港實際上優於基隆港。

其次,再由圖 2-47 所示長浪時變特性之比較對照可見,基隆港與 臺中港,僅管兩港之地理區位不同,沿海距離遙遠,相隔約 200 公里, 但示性波高之大小與尖峰週期之長短,彼此卻皆甚相當,且明顯皆會隨 臺中港風速之強弱而起伏變化,其中,較大之示性波高,約皆可達 4.5 公尺;而較長之尖峰週期,多在 12 秒以下,普遍約介在 5~10 秒間。 因此,藉由以上風、浪之時變特性可確認,臺灣環島海域冬季之季風波 浪,確實具有區域之總體性,且季風與其衍生風浪之特性,實際應皆可 以臺中港作代表,或臺中港實際具有臺灣環島整體海域冬季季風波浪 之指標性與代表性(莊、曾, 2019)。

接著,就圖 2-48 中分別位處臺灣東北部與東部之蘇澳港與花蓮港 海域而論,經由風速時變性之比較對照可見,僅管兩港之地理區位不同, 但季風風速之強弱起伏,彼此間仍具有近似一致之變動趨勢。部分時期, 如 2015 年 2 月 20~28 日,更明顯可見具有日週期特性之海陸風。而風 速之大小,兩港甚為相當,一般皆小於 5 級或在 10.7 m/s 以下。這事實 說明,臺灣東部海域總體受東北季風之影響程度,實質上具有區域之一 致性。

最後,再由圖 2-48 中風浪時變特性之比較對照可見,蘇澳港與花 蓮港,僅管兩港之地理區位不同,但示性波高大小與尖峰週期長短,除 了受颱風湧浪影響而會略具些微差異外,較大之示性波高,一般小於 3.0 公尺;而較長之尖峰週期,亦多在 12 秒以下。至於,長浪波高與週 期之逐時變動特性,雖然其與兩港所在區域風速之關聯性不如基隆港

2-82

與臺中港明確(參見圖 2-47),但彼此亦仍極相近似。因此,可進一步確認,在東北季風天氣系統之總體影響下,位處臺灣東部海域之蘇澳港與花蓮港,其冬季季風與衍生風浪之特性,兩港實際上可彼此互補替代。

為具體分析並評估臺中港與基隆港海域冬季季風波浪之密切關聯 性,首先,以臺中港風速大於5級或11 m/s 界定季風強盛期,再分別 定義相關係數(correlation coefficient) r 及推定係數 R² (determination coefficient)如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N} (y_i - \bar{y})^2\right]^{1/2}} \dots (2-13)$$

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - Y_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \overline{y})^{2}} \dots (2-14)$$

式中, x_i 、 y_i 分別為臺中港或基隆港冬季季風強盛期之實測風速或 長浪波高與週期; \bar{x} 、 \bar{y} 及 Y_i 分別為對應之平均值及經迴歸分析之推算 值;N為資料總數。接著,在2015年12月~2016年5月之冬、春季, 針對季風強盛期,分別檢選臺中港(TC)與基隆港(KL)之長浪波高 H_{TC} 、 H_{KL} ,各可得1235筆紀錄資料,隨後,整理該兩港波高之關聯圖,因 而可得如圖2-49所示,且依據式(2-13)計算,可得其相關係數高達0.839, 而進行迴歸分析,並依據式(2-14)計算,可得

 $H_{KL} = -0.3 + 1.11 \ H_{TC} \dots (2-15)$

推定係數亦高達 0.703。另外,在 2013 至 2016 年冬季季風期間, 基隆港與臺中港分月監測波浪示性波高(H_s)、尖峰週期(T_p)及二階譜週 期(T_{m02})之相關係數,經計算可詳列如表 2-3 所示。由表觀察可見,臺 中港與基隆港,僅管地理區位不同,近岸地形具差異,風速強弱有別(基 隆小於臺中),但風浪波高,彼此仍極為相關,只是,基隆港之波高, 略大於臺中港而已(莊、曾,2019)。



圖 2-49 冬季季風強盛期基隆港與臺中港波高之關聯性

表 2-3 基隆港與臺中港 2013 至 2016 年冬季季風期分月監測波浪示性 波高 (H_s) 、尖峰週期 (T_p) 及二階譜週期 (T_{m02}) 之相關係數

項目	Hs	Τ _p	T _{m02}
年/月	相關係數	相關係數	相關係數
2013/12	0.734	0.135	0.241
2014/01	0.836	0.362	0.288
2014/02	0.766	-0.015	0.162
2014/12	0.813	0.007	-0.066
2015/01	0.801	0.101	-0.337
2015/02	0.728	-0.198	-0.455
2015/12	0.826	0.476	0.648
2016/01	0.843	0.399	0.735
2016/02	0.900	0.482	0.573

此外,彷照颱風在遼闊海洋中,且具無限吹送距離條件下,發展成 熟之颱風波浪,其尖峰週期(T_p)及示性波高(H_s)分別與海面上 19.5 m 處 風速U₁₉₅之一次與二次方關係(Tucker, 1991):

 $T_p = 0.729 U_{19.5} \dots (2-15)$

$$H_{\rm s} = 0.0213 U_{195}^2$$
(2-16)

針對臺中港與基隆港之風浪波高H_{TC}與H_{KL},整理其與臺中港季風 風速V_{TC}二次方之關聯圖,因而可得如圖 2-50 所示,計算其對應之相關 係數分別可達 0.869 及 0.770,而進行迴歸分析,並依據式(2-14)計算, 可得

 $H_{TC} = 1.18 + 0.004 V_{TC}^2 \dots (2-17)$

$$H_{KL} = 0.95 + 0.005 V_{TC}^2 \dots (2-18)$$

而其推定係數(R²),分別亦可達 0.755 及 0.593。值得一提的是, 式(2-16)及式(2-17)中,波高與風速平方間之換算係數 0.004 或 0.005, 實際與一般水動力模擬風剪力之風摩擦係數(friction coefficient) 0.0026 甚近似。這意謂冬季季風對臺灣北部及中西部海域之風浪波高具有總 體影響性,且風速可以臺中港作為示性代表。

又針對臺中港與基隆港之風浪週期*T_{TC}與T_{KL}*,整理其與臺中港季風 風速一次方之關聯圖,因而可得如圖 2-51 所示。依據式(2-13)及式(2-14)計算其對應之相關係數分別為 0.543 及 0.614;而進行迴歸分析,可 得

 $T_{TC} = 5.28 + 0.134 V_{TC} \qquad (2-19)$

 $T_{KL} = 5.91 + 0.167 V_{TC} \dots (2-20)$

其推定係數分別僅約為 0.295 及 0.377。這意謂臺灣北部及中西部 海域之季風風浪,其週期長短僅約略與風速之強弱相關,但不會隨風速 而陳現明顯變化。



Monsoon Wave Height of SA and HL wrt Wind of TC 2016.emf

圖 2-50 冬季季風期間臺灣西部海岸臺中港(紅)及北部海岸基隆港(藍) 之風浪波高與臺中港風速二次方之關聯圖



Monsoon Wave Periods and Wind Speed of TC 2016.emf

圖 2-51 冬季季風期間臺灣西部海岸臺中港(紅)及北部海岸基隆港(藍) 之風浪尖峰週期與臺中港風速之關聯圖

其次,針對蘇澳港與花蓮港之風浪波高H_{sa}與H_{HL},整理其與臺中

港季風風速V_{rc}二次方之關聯圖,因而可得如圖 2-52 所示,計算其對應 之相關係數分別可達 0.598 及 0.617,而進行迴歸分析,並依據式(2-14) 計算,可得

 $H_{SA} = 1.24 + 0.0014 V_{TC}^2 \dots (2-21)$

 $H_{HL} = 1.13 + 0.0019 V_{TC}^2 \dots (2-22)$

其推定係數分別可達 0.358 及 0.381, 且式(2-21)及(2-22)中, 波高與風 速平方間之換算係數 0.0014 或 0.0019, 實際與一般水動力模擬風剪力 之風摩擦係數(friction coefficient) 0.0026 亦甚近似。

接著,針對蘇澳港與花蓮港之風浪週期T_{sa}與T_{HL},整理其與臺中港 季風風速一次方之關聯圖,因而可得如圖 2-53 所示,計算其對應之相 關係數,分別為 0.434 及 0.378,而進行迴歸分析,並依據式(2-14)計算, 可得

 $T_{SA} = 7.33 + 0.115 V_{TC} \dots (2-23)$

 $T_{HL} = 7.73 + 0.090 V_{TC} \dots (2-24)$

計算其推定係數,分別僅約為 0.188 及 0.143。這說明冬季季風對臺灣 東部及中西部海域之風浪波高,總體上同樣具有影響性,如圖 2-54 所 示,且風速可以臺中港作為示性代表;惟臺灣東部海域季風風浪之週期 長短,僅概約與季風風速強弱相關,且不會隨風速而陳現明顯變化。

針對 2015~2016 年之冬、春季,結合東亞地面天氣圖,檢視國內五 大商港海域分月風速與波浪逐時變化特性,綜合可發現:(1)在東北季 風天氣系統之整體影響下,國內五大商港之季風,僅管因地理區位與地 形遮蔽效應差異而致風速強弱彼此不同,但各港仍具有近似相同之起 伏變動趨勢,風速並以臺中港最強勁,逐時歷程變化亦最明顯。(2)基 隆港與臺中港冬季之季風長浪,不僅彼此逐時之示性波高大小與尖峰 週期長短相近似,其隨臺中港風速強弱而逐時變化之歷程亦極為一致。 針對波高與風速平方進行迴歸分析,可得相關係數分別可高達 0.77 與 0.87,這意謂臺中港之風速,直接與兩港之季風長浪具密切關聯性,且 臺灣海域之東北季風,可以臺中港作示性之代表;而其強盛程度,亦可 藉臺中港風速之強弱,作為簡易地判別指標。(3)蘇澳港與花蓮港冬季 彼此之風速強弱甚相當,而長浪波高大小與週期長短及其逐時變化歷 程亦皆甚近似。(4)臺灣環島海域冬季之季風長浪,其尖峰週期,普遍 約介在 5~10 秒間,最長不及 12 秒;而較大之示性波高,大多發生在 基隆港,且可高達 6.0 公尺以上。



圖 2-52 冬季季風期間臺灣東部海岸蘇澳港(紅)及花蓮港(藍)之風浪波 高與臺中港風速二次方之關聯圖



Monsoon Wave Periods of SA and HL wrt Wind of TC 2016.emf

圖 2-53 冬季季風期間臺灣東部海岸蘇澳港(紅)及花蓮港(藍)之風浪尖 峰週期與臺中港風速之關聯圖



資料來源:中央氣象局,2017_1030_0000UTC_FI12_波浪分析圖.jpg

圖 2-54 冬季季風(色階及箭尺)對臺灣東部及中西部海域風浪波高(等 值線)所具有總體之影響性

2.6.3 西南季風與區域風浪之關聯特性

季風,主要係因海洋與陸地間季節性溫差所導致之大尺度空氣環 流,並以亞洲的南部和東部最為顯著(氣象局,2014)。在臺灣海域,概 略自每年5月至8月之夏季期間,由於亞洲南部陸地溫度通常較印度 洋高,風因而會從氣壓較高之海洋吹向氣壓較低之陸地,外加科氏力之 偏轉效應,所以,在臺灣海峽南段海域,海氣象狀況,總體上經常皆會 受梅雨鋒面、西南季風天氣系統,甚至颱風所影響。相關具體的天氣系 統與對應之地面風場,在2017/06/2008:00 可自中央氣象局網站擷取預 報資訊(<u>http://www.cwb.gov.tw/V7/forecast/</u>),如圖2-55 所示。另外,摘 錄 2017/08/08 08:00 夏季西南季風強盛期之分析風場及預報風浪分析 場,可得如圖2-56 所示。



資料來源:中央氣象局 http://www.cwb.gov.tw/

圖 2-55 臺灣海域在 2017/06/20 08:00 之夏季西南季風天氣系統(上)與 地面分析風場(下)



圖 2-56 臺灣海峽南段海域 2017/08/08 08:00 夏季西南季風之分析風場 (箭矢及色階)及預報波浪場(等值線)

綜合觀察圖 2-55 與圖 2-56 可見,在夏季季風期中,無論是天氣系統或是對應之風場與波浪場,在臺灣海峽南段海域,總體上皆有其區域之一致性。

再應用交通部運輸研究所港灣技術研究中心(IHMT)統合建置之國 內五大商港海氣象即時監測與傳輸顯示系統,可得國內 5 個國際港在 2012 年 5 月及 2016 年 6 月夏季季風期監測波浪之示性波高(H_s)及及尖 峰週期(T_p)及十分鐘平均風速逐時變化歷程,如圖 2-57 所示,而 2014 年 7 月及 2016 年 8 月之風浪分月逐時比對,可參見圖 2-9。



圖 2-57 國內 5 個國際港在 2012 年 5 月夏季季風期監測波浪之示性波 高(上)與尖峰週期(中)及十分鐘平均風速(下)逐時變化歷程之比對



圖 2-57(續) 國內 5 個國際港在 2016 年 6 月夏季季風期監測波浪之示 性波高(上)與尖峰週期(中)及平均風速(下)逐時變化歷程之比對

為探討西南季風與區域風浪之關聯特性,應用中央氣象局之即時 海況資訊,針對2017年5月8日11時至7月28日0時共計約80日 幾乎無颱風影響期間,檢選東沙島、七美、小琉球等三處資料浮標之海 氣象逐時監測紀錄,可綜整臺灣海峽南段海域夏季西南季風波浪之示 性波高(H_s)與二階譜週期(T_{m02})或稱平均週期及平均風速(Wnd)與氣壓 (Pres)等逐時變化歷程,如圖2-58所示。圖中,東沙島、七美、小琉球 等三處資料浮標之逐時監測紀錄,分別以黑實線、紅虛線、藍點線表示; 相關紀錄之缺漏率,則標註於其後之括號中。



圖 2-58 東沙島(黑實線)、七美(紅虛線)、小琉球(藍點線)資料浮標於 2017 年 5/8 至 7/28 期間實測示性波高(上)、二階譜週期(中上)、平均 風速(中下)與氣壓(下)之逐時歷程紀錄(圖註後數字為缺漏率)

綜合觀察圖 2-58 可見, 在夏季季風天氣系統之總體影響下,臺灣 海峽南段海域,無論天氣是否受鋒面影響,季風是否強盛,波浪與風速 一般皆甚和緩,示性波高普遍低於 2 公尺,較大者亦不過 3 公尺;二 階譜週期大多在 8 秒以下,且通常小於 6 秒;至於風速,因其主要源 生於海陸間之溫差,故明確具有海陸風特性,以致平均風速普遍偏弱, 通常不及 8.0 m/s;季風盛行期間,風速約可達 8.0~10.7 m/s (5 級),但 較強勁之風速,鮮少會超越 10.8~13.8 m/s 或 6 級;而平均氣壓,受限 於天氣低壓系統之影響,普遍約介在 1005~1010 百帕(hPa)之間。另外, 三處資料浮標間,東沙島與七美之波高及風速,彼此逐時變化歷程似乎 較相近似,波高大小亦概略會隨同風速強弱逐時變化而消長。至於各資 料浮標相對應波高、週期與風速大小之詳細區間分布,經統計可綜整如 表 2-4 所示。

表 2-4 臺灣海峽南段海域東沙島、七美、小琉球資料浮標於 2017 年 5月8日至7月28日夏季季風期間實測波高、週期、風速之統 計分析

測站	示性波高 (m)			
	< 1.0 (%)	< 2.0 (%)	< 3.0 (%)	
東沙島	48.32	91.59	99.84	
七美	45.48	95.33	99.69	
小琉球	74.35	98.69	100.00	
測站	二階譜週期 (s)			
	< 6.0 (%)	< 8.0 (%)	< 10.0 (%)	
東沙島	90.95	100.00	100.00	
七美	97.77	100.00	100.00	
小琉球	90.33	99.95	100.00	
測站	平均風速 (m/s)			
	<7.9 (4 級) (%)	<10.7 (5 級) (%)	<13.8 (6 級) (%)	
東沙島	89.41	99.41	100.00	
七美	90.98	99.13	99.89	
小琉球	90.55	99.19	99.95	

以圖 2-58 所示之資料浮標逐時監測紀錄為基礎,為探討東沙島、 七美、小琉球等三處資料浮標彼此間波浪及風速之相似性,藉以進一步 比較其區域之代表性,並定量評估其關聯性,在不同缺漏期間與缺漏率 考量下,因此,可應用 24 小時之中央移動平均法(莊 等,2006),先將 三處資料浮標之逐時監測紀錄平滑化,然後,進行缺漏補遺,接著,再 應用式(2-13),分別針對三處資料浮標彼此間經中央移動平均處理後之 實測示性波高、二階譜週期、平均風速及氣壓,進行相關係數計算,結 果可綜整如表 2-5 所示。

表 2-5 東沙島、七美、小琉球資料浮標實測海氣象紀錄經以中央移動 平均處理後彼此間示性波高(Hs)、二階譜週期(Tm02)、平均風速 (Wnd)及氣壓(Pres)之相關係數

項目	相關係數			
	東沙島_七美	東沙島_小琉球	七美_小琉球	
Hs	0.782	0.426	0.687	
T _{m02}	0.695	0.528	0.861	
Wnd.	0.614	0.323	0.557	
Pres.	0.961	0.971	0.986	

觀察表 2-5 可見,在代表臺灣海峽南段海域三處經檢選之資料浮標 間,其波高、週期、風速及氣壓的相關係數,皆尚有中高以上的水準。 特別是其中東沙島與七美二資料浮標,其彼此間風速及波高之相關係 數,分別可達 0.614 與 0.782;而週期與氣壓,則以七美與小琉球之相 關係數相對較高,分別為 0.861 與 0.986。因此,就可直接陳現季風期 區域特性之波高及風速而論,東沙島與七美二資料浮標,彼此間應可互 為代表,至於,其詳細具體之近似性與關聯性,則可對照比較如圖 2-59 所示。

參照圖 2-59,針對具有區域代表性與關聯性之東沙島(DSD)與七美 (CMI)二資料浮標,再分別以各自經中央移動平均處理後之平均風速時 序為對照基準,進一步整理其與自身及另一資料浮標示性波高之相關 性,因而可得對照關聯圖,分別如圖 2-60 及圖 2-61 所示,而對應之相 關係數,經依據式(2-13)計算,可綜整結果如表 2-6 所示。

配合表 2-6 並綜合觀察圖 2-60 與圖 2-61 可見,東沙島與七美二資 料浮標,各自波高大小皆明顯會隨自身風速強弱而變動,所以,風速與 波高之關聯性皆甚佳,相關係數彼此相當,均可達0.756以上。惟若以 東沙島風速為代表,藉以關聯七美之波高,則相關係數為0.679,略優 於以七美風速關聯東沙島波高之0.520。這說明:在夏季季風期中,雖 然東沙島與七美二資料浮標,皆可直接陳現臺灣海峽南段海域之海氣 象特性,但東沙島因位處在相對較開敞、寬闊之南海中,故其風速與波 高,實際較七美具有區域代表性。

表 2-6 以東沙島及七美資料浮標經移動平均處理後之平均風速(紅虛 線)為基準再分別計算其與東沙島及七美示性波高逐時變化之 關聯性與相關係數

十四月月	公吏	示性波高 (Hs)	
1日 鍋 1 	杀蚁	東沙島	七美
平均風速	東沙島	0.798	0.679
(Wnd)	七美	0.520	0.756



圖 2-59 東沙島(黑實線)與七美(紅虛線)資料浮標平均風速(上)與示性 波高逐時紀錄經以中央移動平均處理後彼此間之相似性與關聯性



圖 2-60 以東沙島資料浮標經移動平均處理後之平均風速(紅虛線)為基 準分別對照其與東沙島(上)及七美(下)示性波高(黑實線)逐時變化之趨 勢與關聯性



圖 2-61 以七美資料浮標經移動平均處理後之平均風速(紅虛線)為基準 分別對照其與東沙島(上)及七美(下)示性波高(黑實線)逐時變化之趨勢 與關聯性

在夏季季風期中,假設臺灣海峽南段海域可符合遼闊海洋且具無限吹送距離之風域條件,則依循 Tucker(1991)研提發展成熟颱風波浪波高與風速二次方之動能_位能轉換關係,則若檢選東沙島資料浮標的實測風速V_{DSD}作為風域之代表風速,因此,可透過最小二次方誤差之迴歸分析法,將東沙島之波高H_{DSD}與七美之波高H_{CMI},分別推估如下:

$$H_{DSD} = 0.70 + 0.0154 * V_{DSD}^2 \dots (2-25)$$

$$H_{CMI} = 0.85 + 0.0107 * V_{DSD}^2 \dots (2-26)$$

同時,可得推定係數 R²,分別為 0.481 及 0.265,或以波高相對於 風速平方之相關係數表示,分別為 0.693 及 0.515,相關實測與推估波 高及其與風速之對應關聯,如圖 2-62 所示。至於若檢選以七美資料浮 標的實測風速 V_{CMI} 作為風域之代表風速,則東沙島與七美實測與推估波 高及其與風速之對應關聯,將可整理如圖 2-63 所示。



圖 2-62 以東沙島資料浮標之平均風速作為風域之代表風速分別推估 其與東沙島(紅點、線)及七美(藍點、線)示性波高之關聯性



圖 2-63 以七美資料浮標之平均風速作為風域之代表風速分別推估其 與東沙島(藍點、線)及七美(紅點、線)示性波高之關聯性

參照圖 2-62 與圖 2-6,並依據式(2-25)與式(2-26)之推估可知,當夏 季季風風速較強勁,即約達 10.7 m/s 時,東沙島與七美之波高,分別皆 可達 2.0 公尺以上;惟當風速極為微弱時,波高卻仍約有 0.8 公尺,這 說明:在臺灣海峽南端海域,夏季期間之波浪,並非僅由單純之西南季 風或單一風域所衍生,其尚應複合其他天氣系統或風域之影響。

另外,特別值得一提的是,式(2-25)與式(2-26)中,風浪波高與風速 平方間之換算係數,分別高達 0.0154 及 0.0107,僅管其值之大小彼此 甚相近似,但其實際明顯大於一般水動力用以模擬風剪力之風摩擦係 數(friction coefficient) 0.0026,且大幅超越冬季季風期以台中港風速平 方作代表而據以分別推估台中港及基隆港風浪波高之換算係數 0.004 或 0.005(莊、曾,2016b)。造成上列差異之主因,經深入檢討,推論夏 季季風,可能因其主要風域,係在具有順風向收縮且近似呈封閉型之南 海所致。 綜合而論,在無颱風影響期間,臺灣海峽南段海域夏季西南季風波 浪之觀測特性,經檢選、彙整及分析東沙島、七美、小琉球等三處資料 浮標之海氣象逐時監測紀錄可具體瞭解到,夏季單純之季風與波浪特 性皆甚和緩,風速通常不及 8.0 m/s,較強盛之風速,亦僅約 10.7 m/s 左 右;示性波高普遍低於 2 公尺,較大者亦不過 3 公尺;二階譜週期或 平均週期,大多在 8 秒以下,且通常小於 6 秒。進一步再透過相關性 分析可發現,東沙島與七美二資料浮標,實際風速強弱與波高大小之逐 時變化歷程均甚相近似,彼此間風速及波高之相關係數分別可達 0.614 與 0.782,因此,可互為代表並據以直接陳現區域性之海氣象特性,惟 總體代表性,仍以東沙島較佳。

2.6.4 東北季風波浪之演化歷程

季風的產生及其風速之強弱,除了與風域直接相關外,尚與受風之 地理區位有關。而基於臺中港海域冬季期間之風速,可充分反映及陳現 大陸冷高壓天氣系統對臺灣環島海域之總體影響性,因此,為掌握季風 強盛期之天氣系統特性。參考圖 2-42,並分別針對 2014/12/01 及 2015/02/09 等臺中港具有超過9級或大於 20.8 m/s 之較強勁風速期間, 向中央氣象局申購,可得對應地面天氣系統圖,如圖 2-64 所示。

綜合觀察圖 2-42 及圖 2-64 可見,當有強烈冷高壓天氣系統盤據東 亞大陸,且其 1020 百帕等高壓線逐漸伸展至觸及臺灣海峽或跨越臺灣 環島海域,再在東海以東或日本東側海域,伴隨有西北太平洋低壓及鋒 面系統存在,則在臺灣環島海域,總體將進入強盛東北季風期,季風風 速,會由弱轉趨強勁(莊、曾,2019)。在臺灣環島海域,僅管東、西部 近海之地理區位不同,海岸區域地形遮蔽效應各異,但在東北季風盛行 期間,臺中港北外堤頭之風速,通常比國內各處海岸強勁,一般可大於 5 級或 8.0~10.7 m/s,較強勁之風速,甚至可達 10 級或 24.5~28.4 m/s。 因此,臺中港北外堤頭之風速,實際可應用以作為東北季風強盛性之簡 易判別指標(莊、曾,2016、2019)。

2-100



圖 2-64 可在臺中港海域衍生風速大於 20.8 m/s 之大陸冷高壓、鋒 面、與低壓天氣系統 2014/12/01 0600UTC



圖 2-64(續) 可在臺中港海域衍生風速大於 20.8 m/s 之大陸冷高壓、鋒 面、與低壓天氣系統 2015/02/09 0000UTC

在 2015 年 10 月之季風初起期間,自 IHMT 之港灣環境資訊網截 取臺中港北外堤頭(台中二站)之風力監測資訊,可得 10 分鐘平均之逐 時風速與風向變動歷程,如圖 2-65 所示。



圖 2-65 臺中港北外堤頭風力測站在 2015 年 10 月季風初起期間風力 監測之十分鐘平均風速(上)與風向(下)

基於臺中港北外堤頭風速可用以判別臺灣環島海域東北季風之強 盛性(莊、曾,2016a、b),所以,在圖 2-65 中,觀察 10 月 12 日至 28 日期間,台中港所陳現之強勁風力可確認,位處臺灣東部之蘇澳港近海, 明顯應處於東北季風期,且較弱的平均風速,應可大於 5 級或 10.7 m/s, 在 10 月 16 日 17 時,最強可達 9 級或 22.30 m/s。因此,再自 IHMT 之 港灣環境資訊網截取蘇澳港對應季風期間之逐時波浪監測資訊,可得 示性波高與尖峰週期之逐時變動歷程,如圖 2-66 所示。

觀察圖 2-66 可見,在10月12日至15日之較弱風速期間,季風波 浪之示性波高普遍不及 1.5 公尺,尖峰週期大多在 8 秒上下;自16日 開始之較強風期間,波高即隨風速增強而持續增大至約 2.5 公尺,惟其 週期始終維持在 10 秒左右,至於,在10月18日12時前後,可見週 期有由 10 秒突昇至13 秒且波高大於 3 公尺之現象,經查其係當期巨
爵(KOPPU)颱風(10/13~10/21)及薔琵(CHAMPI)颱風(10/13~10/25)長浪 影響所致。

配合上述 2015 年 10 月 12 日至 28 日之季風期間,截取蘇澳港外 佈設 AWAC 監測波浪所得經轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序訊 號,再應用中央移動平均法,取 20 分鐘(1200 秒)窗寬,移除潮汐水位 後,進一步應用 Enhanced Morlet Transform (AnCAD, 2014),因而可得 季風波動全程演化時頻分析圖,如圖 2-67 所示;對應特定時間之波浪 頻譜分時變化,則如圖 2-68 所示。

在冬季之其他季風強盛期間: 2015 年 12 月 9 日至 25 日、2016 年 1 月 21 日至 2 月 5 日、2016 年 2 月 11 日至 2 月 27 日、2016 年 3 月 4 日至 3 月 20 日,相關季風波動全程演化時頻分析圖與對應特定時 間之波浪頻譜分時變化,分別如圖 2-69 至圖 2-76 所示。



圖 2-66 蘇澳港近海在 2015 年 10 月 13 日至 19 日東北季風期監測波 浪示性波高(上)與尖峰週期(下)之逐時變動歷程



圖 2-67 於 2015 年 10 月 12 日至 28 日東北季風期間在臺中港北外堤 頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時序訊號(中下)與其 對應之波浪演化時頻分析圖(下)



圖 2-68 蘇澳港近海 2015 年 10 月 12 日至 28 日東北季風期間一般風速期(上);風速漸增期(中);及強風期(下)之分時波浪頻譜變化



圖 2-69 於 2015 年 12 月 9 日至 26 日東北季風期間在臺中港北外堤頭 監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄後之原始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時序訊號(中下)與其 對應之波浪演化時頻分析圖(下)



圖 2-70 蘇澳港近海 2015 年 12 月 9 日至 26 日東北季風期間一般風速 期(上);風速漸增期(中);及強風期(下)之分時波浪頻譜變化



圖 2-71 於 2016 年 1 月 21 日至 2 月 5 日東北季風期間在臺中港北外 堤頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄後之原 始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時序訊號(中下) 與其對應之波浪演化時頻分析圖(下)



圖 2-72 蘇澳港近海 2016 年 1 月 21 日至 2 月 5 日東北季風期間一般 風速期(上);風速漸增期(中);及強風期(下)之分時波浪頻譜變化



圖 2-73 於 2016 年 2 月 11 日至 2 月 27 日東北季風期間在臺中港北外 堤頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄後之原 始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時序訊號(中下) 與其對應之波浪演化時頻分析圖(下)



圖 2-74 蘇澳港近海 2016 年 2 月 11 日至 2 月 27 日東北季風期間一般 風速期(上);風速漸增期(中);及強風期(下)之分時波浪頻譜變化



圖 2-75 於 2016 年 3 月 4 日至 3 月 20 日東北季風期間在臺中港北外 堤頭監測之風速(上)與蘇澳港近海監測風浪所得轉換壓力紀錄後之原 始 1Hz 水位時序訊號(中上)及去除潮汐後之原始水位時序訊號(中下) 與其對應之波浪演化時頻分析圖(下)



圖 2-76 蘇澳港近海 2016 年 3 月 4 日至 3 月 20 日東北季風期間一般 風速期(上);風速漸增期(中);及強風期(下)之分時波浪頻譜變化

綜合觀察圖 2-67 至圖 2-76,對照季風期風速、原始 1Hz 水位時序 訊號、波浪時頻演化及分時波浪頻譜變化可見,冬季之東北季風波浪, 在一般風速小於6級強風(10.8~13.8 m/s)之較弱風速期間,風浪之波動 能量(波高)普遍偏小,頻率主要均分佈於 6~10cpm 間;在風速超越 8 級 大風(17.2~20.7 m/s)之較強風速期間,例如:在2015年12月16日、 2016年1月23日、2月1日、2月15至24日、3月10日及14日前 後,季風波浪之示性波高,將會隨風速增強而普遍增大,而其尖峰頻率, 僅管亦會隨風速增強而往 6cpm 之低頻段趨近,惟主要仍分佈於 6~10cpm 間;在部分期間,例如在10月18日12時前後,尚可見尖峰 頻率由近 6cpm 突昇至 5cpm 之現象,經查其係巨爵颱風(10/13~10/21) 及 蒂 琵 颱風(10/13~10/25)衍生之 颱風長 浪影響所致。此外,特別值得注 意的是,季風波浪,僅管風速會高達8級(17.2~20.7 m/s)以上,可比擬 輕度颱風(17.2~32.6 m/s),但風浪之尖峰週期,仍普遍均低於 12 秒, 且不會像颱風波浪週期所特殊陳現之突昇變動現象,更不會在 0.2~2 cpm 頻率間,伴生明顯的亞重力波 (參見圖 2-36 與圖 2-37 所示之蘇迪 勒颱風及圖 2-39 與圖 2-40 所示之杜鵑颱風)。

第三章 花蓮港颱風長浪群波引致之港灣振盪

3.1 花蓮港域之配置

花蓮港, 位於臺灣東部海岸, 港域配置如圖 3-1 所示, 港池約為狹 長之漏斗形狀,並呈東北一西南座向,港域縱深約長達3,800公尺,港 口位於漏斗帽頂端,且朝西南方向開口。自1930年初始建港迄今,前 後歷經四期擴建,至1991年完成。現況之港域,可區分為內港及外港 雨部份,港口寬約275公尺,內航道較窄,寬約100公尺,內港水深約 為 6.5~10.5 公尺,外港水深約 12~16.5 公尺,碼頭共計有 25 座,配置 編號如圖 3-2 所示。港口至漏斗頸端之長度,近似 1,900 公尺, 恰約為 港域縱深全長之一半。花蓮港港口外側,北自美崙溪、南至花蓮溪間, 存在有一天然之沙灘灣澳,灣澳之海側開口,可順延花蓮港港口東外防 波堤堤線向南延伸,直至與花蓮溪口相聯結。另外,經濟部水利署第九 河川局於 2004 年曾委託國內專業研究機構辦理「南北濱及化仁海岸環 境及景觀改善規劃,依據該規劃報告,將在美崙溪口南側之北濱海灘, 建置導流堤及海錨型突堤等人工養灘設施以進行岬灣海灘營造,其中, 導流堤長度約為135m,以弧形配置,並於堤頭設置一直徑約為30m之 親海休憩平台;而海錨型突堤長度及其堤頭之離岸距,分別皆為150m, 預期可增加之海灘寬度約 90m。

花蓮港外的地形水深,海灘坡度陡峭,自美崙溪口至花蓮溪口間之 海灘,離岸約500公尺,水深即大幅變深,部份之海灘區段,在離岸不 到一公里處,水深即可達70公尺,如圖3-3所示。依據2004年1~2 月之水深量測結果,北濱海堤外之海灘,至水深-5m處,底床坡度平均 約為1/25~1/55;水深-5m至-10m處,坡度平均約1/50;而往南至南 濱海堤外之海灘,底床坡度更為陡峻,至水深-5m處,海灘坡度平均可 達1/15~1/25;而水深-5m至-10m處,坡度平均約1/15~1/50。再往南 至化仁海堤外之海灘,於南潛堤鄰近海域,至水深-5m處,海灘坡度平 均約為1/10~1/15;水深-5m至-10m處,坡度則為1/15。



圖 3-1 花蓮港之港域配置(資料來源:GoogleEarth_20201111)



圖 3-2 花蓮港之內、外港區及碼頭配置



圖 3-3 花蓮港港域 1994 年海圖陳示之港外地形水深

3.2 颱風影響期間之港外與港內波動紀錄分析

花蓮港,舊東防波堤長度約1,330公尺,自1989年將東防波堤再 延長1,837公尺,並完成外港區擴建後,東防波堤之總長度共計約達 3,167公尺,平常時期,港域靜穩度良好,但在颱風波浪影響期間,港 內水域,常會發生劇烈的低頻港灣振盪現象,致使大小型船隻,無法安 全繫泊,必須出港避湧。依據花蓮港防颱作業通報統計,在2016~2019 年期間,船舶出港避湧及恢復進港之影響時間,可得如表3-1所示,由 表觀察可見,隨颱風侵襲路徑之不同,影響時間亦有所差異,最短僅約 8小時;但最長可達4日。且必須出港避湧的碼頭區,以#10、#19及 #20碼頭最迫切(蔡,2010)。

花蓮港防颱作業通報							
颱風名稱	出港避湧時間	恢復進港時間	影響時間				
尼伯特	2016年07月06日20時	2016年07月09日07時	2日11時				
莫蘭蒂、馬勒卡	2016年09月13日16時	2016年09月17日17時	4日01時				
梅姬	2016年09月26日16時	2016年09月29日07時	2日15時				
海馬	2016年10月19日13時	2016年10月21日07時	1日18時				
尼莎、海棠	2017年07月28日18時	2017年07月31日07時	2日13時				
天鴿	2017年08月22日10時	2017年08月22日18時	0日08時				
泰利	2017年09月12日18時	2017年09月14日09時	1日15時				
瑪莉亞	2018年07月10日00時	2018年07月11日08時	1日08時				
山竹	2018年09月14日14時	2018年09月16日20時	2日06時				
丹娜絲	2019年07月17日17時	2019年07月19日14時	1日21時				
利奇馬	2019年08月07日17時	2019年08月10日07時	2日14時				
白鹿	2019年08月23日17時	2019年08月25日12時	1日19時				
玲玲	2019年09月03日21時	2019年09月05日07時	1日10時				
米塔	2019年09月29日20時	2019年10月01日11時	1日15時				

表 3-1 花蓮港防颱作業船舶出港避湧及恢復進港時間

資料來源:臺灣港務股份有限公司花蓮分公司,港務處監控中心

花蓮港於颱風期間之港域不靜穩現象,最早之研究,係前臺灣省政府交通處所屬港灣技術研究所(IHMT),自 1994 年起從事為期 3 年之港域內、外波浪同步監測與進行相關之數值模擬(張,1996;曾,1996;蘇等,1996)。當年在港內、外所佈設之測站位置,如圖 3-4 所示。

提姆(T1M)颱風,是 1994 年 7 月侵襲花蓮港港域之第一個強烈颱風,侵襲路徑如圖 3-5 所示,由圖觀察可見,該颱風在菲律賓東方海面 形成後,以保持東南向西北之行徑,於 7 月 10 日 20 時 10 分左右在花 蓮南方秀姑巒溪口登陸。在該颱風登陸前約四小時(1994/07/1016:00), IHMT 於圖 3-4 所示之花蓮港外 ST5 及港內#22、#10、#08 碼頭波浪測 站上所實測之部分波浪逐時記錄以及應用 30 秒移動平均分析所得之低 頻波動,如圖 3-6 所示,而相對應之低頻波動及其波譜分析結果之對照 比較,則分別如圖 3-7 與圖 3-8 所示。



圖 3-4 自 1994 年起在花蓮港內、外進行同步波浪監測調查所佈設之 測站位置分布



圖 3-5 提姆(T1M)颱風於 1994 年 7 月侵襲臺灣海域之移動路徑



圖 3-6 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外 ST5 及 港內#22、#10、#08 碼頭佈設波浪測站所監測之波浪紀錄



圖 3-6(續) 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外及 港內碼頭實測波浪紀錄以 30 秒移動平均分析之長浪波動



圖 3-7 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外 ST5 與 港內#22、#10、#08 碼頭(上)及 ST5 分別與#22、#10、#08 碼頭(中 上、中下、下)以 30 秒移動平均分析波浪紀錄之長浪波動對照比較



圖 3-8 提姆颱風登陸四小時前(1994/07/10 16:00),在花蓮港外 ST5 與 港內#22、#10、#08 碼頭(上)及 ST5 分別與#22、#10、#08 碼頭(中 上、中下、下)以 30 秒移動平均分析波浪紀錄之頻譜對照比較

在提姆颱風侵襲期間,依據 IHMT 全程波浪實測紀錄分析結果可 知,花蓮港外海測站之最大記錄波高與示性波高,分別曾高達 16m 及 10m,相對應地,港域內#22及#8與#10碼頭之示性波高,分別可達3.6 m及1.6m(張, 1996)。而在提姆颱風登陸四小時前(1994/07/1016:00), 由圖 3-6 之實測紀錄觀察可見, 在花蓮港外與外港區#22 碼頭測站上, 週期實際皆以小於 30 秒之高頻波動為主,而至內港區之#10 及#08 碼 頭測站上,高頻波動均已大幅消散,且主要波動替代地已轉變為以週期 長達 80 秒以上,頻段偏屬於亞重力波之低頻振盪。僅管如此,針對港 外測站與港內各碼頭區之波浪紀錄,應用 30 秒之中央移動平均法,進 行低頻波動分析,參見圖 3-6,進而由圖 3-7 與圖 3-8 中之低頻波動對 照比較可見,在提姆颱風登陸前,在港外及外港碼頭區,實際即已存在 有亞重力波頻段之低頻波動,且其頻率(週期)與振幅,尚皆與內港碼頭 區之低頻振盪特性甚相當。這意謂在颱風侵襲前,造成花蓮港港域不靜 穩之港內低頻振盪波動源,實際與港外附屬於高頻波動下之亞重力波 密切相關(莊、江,2000),且主導著港內的波動振盪特性,有所變異的, 只是不同頻率成分之波動振幅大小不同而已。

3.3 颱風影響期間之港灣振盪型態與特性分析

依據圖 3-6、圖 3-7 與圖 3-8 所示花蓮港港外及內、外港碼頭區的 實測波動分析結果可研判,在颱風侵襲間,主控港內波動振盪特性,並 造成花蓮港內、外港域不靜穩之港內低頻振盪波動源,實際應是附屬於 港外高頻波動下之亞重力波(莊、江,2000)。

花蓮港外存在有一開口寬度約略與港域縱深相當之自然沙灘灣澳 (參見圖 3-1 與圖 3-3),為總體考量該灣澳與港域配置對高、低頻波動 之影響,藉以探討亞重力波對花蓮港域造成港灣振盪,甚或是港灣共振 之效應,因而可建置含括花蓮港域及港口南側天然灣澳地形影響之數 值模擬計算範圍,如圖 3-9 所示,圖中,計算網格間距在 x 及 y 方向皆 為 50 公尺,且網格 y 軸與正北方向之順時鐘夾角為 60 度。

3-9



圖 3-9 含括花蓮港域及港口南側天然灣澳地形之數值模擬計算範圍

為有效計算花蓮港外之波浪淺化、折射變形現象,且充分陳現港口 之遮蔽與繞射效應,因而可針對圖 3-9 所示之數值模擬計算範圍,應用 MIKE21-EMS 橢圓緩坡方程式模式(DHI, 1994),進行港灣靜穩度與港 灣振盪之探討。在啟動計算模擬前,對於港內碼頭岸壁皆假設具完全反 射性、天然灣澳沙灘上考量碎波,但忽略摩擦效應、所有開放海域設定 為無反射性之海棉吸收邊界、並令亞重力波之深海入射波高甚小,僅為 0.1 公尺,且由與正北方向順時鐘夾角為 150 度之方向入射花蓮港港域。 據此,可針對亞重力波頻段各成分之低頻波動,模擬計算花蓮港港域。 平面波動振盪型態與波動振幅分布,其中,入射週期為 100、160、195 及 235 秒之港域平面波動振盪型態與波動振幅分布,分別如圖 3-10 所 示。



圖 3-10 模擬計算花蓮港域受入射週期分別為 100 秒(上左)、160 秒(上 右)、195 秒(下左)及 235 秒(下右)之亞重力波入射所導致之港域平面 波動振盪型態與波動振幅分布,

綜合觀察圖 3-10 可見,花蓮港港域之平面波動振盪,大多皆屬縱 深方向之部分重複駐波型態。在花蓮港內港域之#8、#10 與#12 碼頭區 及漁港內,由於該碼頭區大多位於部分重複駐波之波腹點附近,故其波 動振盪之振幅值一般皆甚大,且其值有隨入射波週期之增長而遞增之 趨勢。在外港域,尤其是在#19 與#20 碼頭區,當週期接近 160 秒之亞 重力波入射時,因該碼頭區恰位在部分重複駐波之波腹點,所以,波動 振盪之振幅值亦甚大,港域特別不靜穩。此外,在花蓮港內、外港域間 之狹窄航道兩端,明顯地,亦有部分重複駐波之波腹點存在。

至於部分重複駐波之波結點位置,再綜合觀察圖 3-10 可見,當入 射波週期為 100 秒時,波結點數 n=8,且最外側之結點,恰位於港口入 口處;而當入射波週期分別為 160 秒、195 秒、235 秒時,波結點數 n 分別是 6、5 及 4,且最外側之結點,其位置會隨入射波週期增長而往 港域南側之天然灣澳區移動,因此,花蓮港內、外港域的港灣振盪,其 振幅大小實際會隨港外低頻波之入射週期而變異。另外,從港灣振盪的 觀點出發,可看出花蓮港之實際港域,不僅應包括花蓮港之內、外港區, 更應充分涵括港外之天然灣澳區,換言之,可將花蓮港之實際港域,視 為係由花蓮港之內、外港區與港外天然灣澳區所共同構成,以致內、外 港區之低頻港灣振盪特性與型態,實際係由港外天然灣澳區之亞重力 波所主控與支配。

關於港灣共振,依循結構動力學之共振理論可知,當港灣受到港外 低頻波動激振(excitation),若「激振頻率」(excitation frequency)等於或 相近於港灣的「自然頻率」(natural frequency),則港灣振盪就會產生「共 振」(resonance)的現象,在此一狀態下,港灣振盪會有和「自然頻率」 相同的「共振頻率」(resonant frequency)。所以,「自然頻率」是港灣振 盪系統內涵的模態(mode)參數之一,而「共振頻率」則是系統輸出響應 (response)所顯現的頻率。至於「共振」的響應,主要係指振盪的振幅, 會隨時間延長而逐漸強化,並越振越大。

為評估港灣共振現象,依據 Dean & Dalrymple (1984)對單一開口矩 形等深港灣之協振盪(co-oscillating)共振研究結果指出,理論上,當港 域之特徵長度l與港外低頻入射波之波長L比值,滿足下列關係,則會發生港灣共振:

$$\frac{l}{L} = \frac{2n-1}{4}$$
(3-1)

式中,n=1,2,3,...為對應於共振模態之波結點數,且最外側之波結點位 置,應概約位在港口處。據此,假設花蓮港含括內、外港與港外天然灣 澳區之整體港域,可比擬為單一開口之矩形等深港灣,且平均水深 h 為 10 m,特徵長度l 為 4300 m,則依據式(3-1)估算,當港灣受港外低頻 入射波激振而使振盪具有港灣共振狀態,則港域內不同波結點數所對 應之理論與數值模擬計算共振週期,可對照整理如表 3-2 所示,由表觀 察可見,激起港灣共振之低頻波動週期,理論或數值模擬計算結果,彼 此甚相近似,且皆會隨共振模態之不同而變化。再配合圖 3-10,藉由 波結點數所陳示之港灣共振模態可進一步確認,花蓮港之實際港域,確 實應完整涵括花蓮港之內、外港區以及港外之天然灣澳區。

h = 10m; $l = 4300m$.					(莊文傑,2000)				
n (節點數)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
理論週期	347	248	<mark>193</mark>	<mark>158</mark>	<mark>133</mark>	116	<mark>102</mark>	<mark>91</mark>	83
計算週期	5~6分鐘	~4分鐘	194s	156s	134s		104s	90s	

表 3-2 花蓮港低頻入射波造成港灣共振之不同波結點數與對應之理 論與數值模擬計算週期

為更詳細探討亞重力波頻段各成分低頻波動對花蓮港域共振特性 之顯著支配性,再應用 MIKE21-EMS 模式,針對亞重力波之不同週期 成分,計算港域內不同碼頭區及港域外波浪測站之振幅增幅反應曲線 (Amplification Response Curve),結果分別如圖 3-11、圖 3-12 及圖 3-13 所示,圖中,為方便內、外港振盪波動之對照比較與關聯性說明,因而 皆將相當港口外 ST5 波浪測站之計算結果列出。



圖 3-11 花蓮港颱風期間港外 ST5 測站及內港#8、#10、#12 碼頭區港 灣振盪之振幅增幅反應曲線



圖 3-12 花蓮港颱風期間外港#17、#20、#22、#23 碼頭區港灣振盪之 振幅增幅反應曲線



圖 3-13 花蓮港颱風期間港外 ST2、ST5 與港口及窄航道口港灣振盪 之振幅增幅反應曲線

對於不同週期成分之亞重力波,由圖 3-11 及圖 3-12 觀察內、外港 不同碼頭區之振幅增幅反應曲線可見,當亞重力波之入射週期約接近 100、130、155 及 195 秒時,在花蓮港內港#8、#10 及#12 碼頭區以及 在外港#17、#20 及#22 碼頭區,皆能陳現較大之振幅增幅率,其中,當 亞重力波之入射週期約為 195 秒時,則在#8、#10 及#12 碼頭區之振幅 增幅率最大,增幅率分別為 16.11、20.57 及 28.86,相對地,港外 ST5 測站之振幅增幅率反而最小,其值僅約 1.78。另外,當亞重力波之入射 週期約為 155 秒時,#8、#10 及#12 碼頭區之振幅增幅率分別為 9.64、 4.06 及 7.65,只是港外 ST5 測站之振幅增幅率,亦會同樣增大,其值 約為 4.22。值得特別注意的是,不同週期成分之亞重力波,當其傳播至 港外 ST5 測站時,將會有程度大小不等的振幅增幅,且在週期分別約 為 97 秒、140 秒、175 秒時,振幅增幅率分別約可達 4.0、6.0 及 8.0。 純從港灣共振之觀點,明顯地,依據理論推估及數值模擬計算皆顯示,花蓮港最主要之共振週期,應近似 195 秒。這意謂港外若存在有振幅較大,週期約 195 秒之激振波源,則花蓮港內港各碼頭區,皆將面對嚴重的共振振盪。只是在實際的港灣振盪現象中,當亞重力波之入射週期約為 155 秒時,雖然它在內港碼頭區之振幅增幅率,普遍較 195 秒 者小,但若它在港外 ST5 測站之入射波動振幅夠大,則以其並非最大, 卻又不算小之振幅增幅率,仍然會於花蓮港之內港碼頭區,激發次要共 振週期之激烈共振現象。

以港外激振週期約為 155 秒之亞重力波為例,當它在港外 ST5 測 站之入射波高約達 20 公分,則因內港#8、#10 及#12 碼頭區之振幅增 幅率,由圖 3-11 分別可查出為 9.64、4.06 及 7.65,所以,在港灣共振 情況下,可推估#8、#10 及#12 碼頭區之振盪波高,將分別達 1.92 公 尺、0.81 公尺及 1.53 公尺,以致可造成內港碼區的激烈振盪與嚴重的 不靜穩。而若港外激振之亞重力波週期變動為 120 秒,且入射波高同 樣維持為 20 公分,則因內港#8、#10 及#12 碼頭區之振幅增幅率,均 與港外 ST5 測站相似,所以,可推估內港碼頭區之振盪波高,將與港 外近似相同,將此推估結果,與圖 3-7 所示之低頻波動振幅及圖 3-8 所 示之頻譜相互對照,可確認其正確性。

對於花蓮港之外港碼頭區,由圖 3-12 所示之振幅增幅反應曲線可 見,當港外亞重力波之入射週期近似於 150 秒時,外港#22 及#23 碼頭 區將具有較大之振幅增幅率,其值分別可達 17.33 與 11.34;而當港外 亞重力波之入射週期約為 155 秒時,其值分別降為 7.45 與 7.63,並與 內港#12 碼頭區之振幅增幅率相當。可見,單就港外入射週期為 155 秒 之亞重力波而言,外港#22 及#23 碼頭區將與內港#12 碼頭區面對振盪 程度相近似之波動共振結果,又當港外亞重力波之入射週期增長至約 160 秒時,因#22 及#23 碼頭區之振幅增幅率已明顯降低,所以外港區 之振盪振幅與波能,相對地並不顯著。

對於花蓮港外之 ST2 及 ST5 測站,由圖 3-13 所示之振幅增幅反應 曲線可見,當亞重力波之入射週期約介於 150 至 190 秒間時, ST5 測 站之振幅增幅率, 普偏皆大於 ST2 測站,這意謂在港口灣澳區內之亞 重力波振盪幅度, 一般會較花蓮港外海大且明顯。鑑此, 在颱風影響期 間, 探討花蓮港之港灣振盪, 最關鍵的課題是辨識港口外激振之亞重力 波波源, 以及確認其各頻率所具有之激振波動振幅。

3.4 地震引起之港灣振盪特性分析

規模大、震度強的地震,會趨使港灣之碼頭岸壁,類似造波板,產 生快速大幅度地返復推移作用,進而促使只有單一港口之近似封閉港 域,伴隨產生長週期之港灣振盪現象。

在2018年2月6日23時50分41.6秒,花蓮地區發生規模6.2之 大地震(0206大地震),震源位於花蓮縣近海,深度6.3公里,屬淺源地 震,並觸動了米崙斷層及嶺頂斷層錯動,以致地震前震及餘震不斷(截 至2/712:50,有感餘震數量約147個),在花蓮市之震度達7級(劇震), 僅管主震之強震延時僅10秒左右,但在離震央32公里的範圍內,多 處地面發生了土壤液化(soil liquefaction)現象,並有明顯之地盤下陷及 建物震損的情況發生(黃、王,2018)。

在花蓮港鄰近之 HWA062 地震測站上,檢視圖 3-14 所示之最大地 表加速度紀錄及推算之地表位移量(許 等,2018)可見,0206 大地震之 垂直最大地表加速度 213.8gal,實際上大於水平最大地表加速度(209.18, 202.58)gal,且最大地表位移,東西向達 64.58 公分、南北向達 82.65 公 分、上下達 30.07 公分;以致在花蓮火車站附近,由於該區域居處在具 宏觀液化震害(噴水冒砂、土體流動、建築物地基失效震陷)範圍內,部 分建物地基有噴砂及開裂現象,下陷量約 10~20 公分、傾斜 1~2°;而 在花蓮港域,由震後之勘災結果可見,位在#19~#25 碼頭之後線及西防 波堤堤旁道路,均有較大範圍之地裂、砂礫噴出及地表沉陷等現象發生, 特別是在緊鄰港口之#25 碼頭後線,最大礫石粒徑約 10cm,最大沉陷 量約 50~60 公分;至於碼頭沉箱之震損則較為輕微,並無明顯之沉陷、 傾斜或結構體損壞情形(黃、王,2018)。 為掌握臺灣東部之海象資訊,中央氣象局在花蓮港外港#22~#23 碼 頭區,於地理座標為(121.623611E,23.980556N)站位上,建置有量測精 確度具有公厘等級且取樣率為 1Hz 之音波式驗潮站。針對 0206 大地震 之前後期間,經向中央氣象局檢索並整理該驗潮站每 15 秒一筆之潮位 監測紀錄,可得如圖 3-15 所示。圖中,黑色線為潮位紀錄,紅色線則 為應用 15 分鐘窗寬之中央移動平均法分析之擬潮線(莊 等,2019)。



圖 3-14 鄰近花蓮港之 HWA026 地震測站於 2018 年 0206 大地震監測 之地表加速度紀錄(左)與推算之地表位移紀錄(右)(資料來源:許 等,2018)



圖 3-15 花蓮驗潮站在 2018 年 0206 大地震前後期間每 15 秒一筆之詳 細潮位監測紀錄

觀察圖 3-15 可見,以1 Hz 高取樣率監測潮位所得每 15 秒一筆之 詳細潮位紀錄,明顯會因數位訊號之傳輸品質,致使整點時刻之紀錄波 形圖,普遍存在有突波干擾的情形。僅管如此,在地震發生前、後,仍 可清楚監測到伴隨潮位變動之港灣振盪現象,如圖 3-16 所示。再仔細 觀察圖 3-16 可見,在花蓮 0206 大地震前,值得特別注意的是,花蓮港 內之外港水域,實際上原來即存在有振幅約 5 公分、週期近似於 12 分 鐘的港池自然振盪現象;而在地震後,自然振盪之振幅,隨即會明顯增 大,最大可達約 70 公分,但週期仍概約維持在 12 分鐘左右。



圖 3-16 在花蓮 0206 大地震前後期間於外港#22~#23 碼頭區驗潮站監 測之潮位紀錄與伴隨之港灣振盪現象

進一步應用 15 分鐘窗寬之中央移動平均法分析擬潮線(莊、曾, 2011;莊 等,2011、2019),然後將其自原始潮位紀錄中扣除,因此, 可得去除潮汐變動效應之單純港灣振盪訊號及其相對應期間之頻譜分 析結果,如圖 3-17 所示,而針對 0206 大地震發生前、後期間,相關詳 細之外港港灣振盪紀錄及對應之頻譜分析結果,分別可得如圖 3-18 及 圖 3-19 所示。

綜合觀察圖 3-17 與圖 3-18 可見,去除潮汐效應後之港灣振盪訊號,明顯存在有因訊號傳輸而產生週期性之突波干擾,外加部分期間之紀錄缺漏影響,以致頻譜分析結果,在週期近似於 5cph(cycles per hour) 或 12 分鐘之主頻外,仍具有甚強之側頻效應。僅管如此,在花蓮 0206

大地震後,於僅具單一港口之花蓮港近似封閉港域內,受碼頭岸壁的反 復快速推拉作用所衍生較大振幅之港灣振盪訊號,仍可清楚判別與確 認。

另外,綜合觀察圖 3-18 與圖 3-19 可見,在地震發生前,花蓮港內 之外港水域,原來即存在有波高約 10 公分、週期近似於 12 分鐘的港 灣自然振盪現象;而在地震後,受碼頭岸壁的反復快速推拉作用影響, 自然振盪之振幅,隨即會明顯增大,且概約在 2 月 7 日零時左右,最 大振盪可達約 70 公分;至於週期,參見圖 3-19,除了地震前約 12 分 鐘之自然振盪週期或相當 5 cph (cycles/hour)之自然振盪頻率外,尚會 激發約 7、8 及 10 cph 之自然振盪頻率,這意謂震度強大之地震,實際 會造成多個激振頻率,其中,約 8.6 分鐘週期或 7 cph 之激振頻率,會 與花蓮港之自然振動頻率相當,並激發振幅增幅率達 3 倍之港灣共振。 此外,在地震前、後,對照圖 3-18 所示之振盪振幅差異,尚可觀察到, 因地震及餘震所造成較大振幅之港灣振盪,其延續期間,自 2 月 7 日 零時起至當日 10 時止,概約可長達 10 小時,然後,港池會再度回復 到原來即具有之自然振盪型態。



圖 3-17 花蓮港在 0206 大地震前後應用 15 分鐘窗寬之中央移動平均 法去除潮汐效應後之港池振盪訊號(上)與對應期間之頻譜分析結果(下)



圖 3-18 花蓮港在 0206 大地震前後共約 16 小時之港灣振盪訊號(上)與 詳細的港灣振盪現象(下)



圖 3-19 花蓮港在 0206 大地震發生前(黑)、後(紅)共約 16 小時期間外 港港池振盪對應之頻譜分析

3.5 花蓮港內外颱風長浪之波動特性分析

花蓮港,自1991年完成第四期擴建工程後,在特定颱風侵襲下,常發生港灣振盪問題。而依據以往針對港內、外的颱風波動監測與紀錄分析,參見圖3-7及圖3-8,以及圖3-11至圖3-12所示之港灣振盪數值模擬研究結果顯示,花蓮港的港灣振盪,港外的灣澳及港內的水域具整體性, 且造成港外灣澳及港內水域協振盪(co-oscillation)的激振波源,應是週 期介在80~160秒或頻率介在0.0125Hz~0.00625Hz間的亞重力波。鑑此, 在颱風侵襲或影響期間,探討花蓮港之港灣振盪,必須先瞭解花蓮港外 颱風波浪之波動特性。

針對提姆颱風侵襲期間,應用花蓮港港外水深約15米處ST5測站 (參見圖3-4)在1994年7月10日12時至7月11日6時每2小時一筆之波動量 測紀錄資料,考量波動所具有之非線性與非穩態特性,應用逸奇科技研 發的Visual Siganl 可視化訊號分析軟體(AnCAD, 2014),進行Enhance Morlet之小波(Wavelet)時頻分析(TFA_Time Frequency Analysis),可得 花蓮港外颱風波浪之時頻演化特性,如圖3-20所示,圖中,橫軸為時間, 縱軸為頻率,色階深淺表示波動能量大小。觀察圖3-20可知,提姆颱風 波浪,主要波動成分,頻率約介在0.12~0.002 Hz間,亦即包括週期8秒 至約8.5分鐘的高頻颱風波浪以及低頻的亞重力波,其中,值得注意的 是,隨著颱風之接近與離開,高、低頻之波動,不僅各自的頻域區間會 有所伸縮,波動能量(振幅)大小,亦會同時隨著逐漸增強與減弱。特別 是低頻的波動能量,在颱風登陸前,皆會明顯大於登陸後,這意謂在颱 風侵襲前、後,花蓮港內發生之港灣振盪大小,明顯與港外低頻激振波 源 亞重力波之強度密切相關。

再針對2008年7至9月之颱風期間,如表3-3,整理中央氣象局應用 美國製之Aquatrak_4100型音波式水面測定儀,以1Hz取樣率,15秒平均 一筆之紀錄方式,在花蓮港內毗鄰#22碼頭之CWB測站(23°58'49.72"N; 121°37'25.12"E)進行長期連續的海面變動水位(潮位)之觀測資料,其中, 相關2008年7月颱風影響期間之水位量測紀錄,以及應用1小時中央移 動平均法去除潮汐趨勢與經應用極值檢驗法去除突衝雜訊後之波動紀 錄(莊 等,2007;莊、林,2009),如圖3-21所示。

由於颱風侵襲期間之波動,充分具有非線性與非穩態特性。因而針 對圖3-21所示去除潮汐趨勢及突衝雜訊後之波動訊號,為比較花蓮港內 平時及不同路徑颱風侵襲前後之亞重力波時頻演化特性,再應用逸奇 科技研發的Visual Siganl 可視化訊號分析軟體,進行EMD (Empirical Mode Decomposition)之經驗模態分解(Huang et al., 1998),並進行HHT (Hilbert-Huang Transform)之時頻分析及FFT (Fast Fourier Transform)波 譜分析,如圖3-20所示,



圖 3-20 花蓮港外 ST5 波浪測站於提姆颱風登陸前、後期間(1994 年 7 月 10 日 12 時至 7 月 11 日 6 時)每 2 小時一筆之波浪監測紀錄與其應 用 Morlet Wavelet 之小波時頻分析

表 3-3 中央氣象局 2008 年 7 至 9 月及 2009 年 8 月發布警報之颱風與 其警報期間、強度及路徑資訊

编號	中文名稱 英文名稱	警報 期間	強度	侵台颱風 路徑(九 類)	最強時中心 最低氣壓 (hPa)
200908	莫拉克 MORAKOT	08/05 08/10	中度		
200815	薔蜜 JANGMI	09/26 09/29	強烈	2	930
200814	哈格比 HAGUPIT	09/21 09/23	中度		940
200813	辛樂克 SINLAKU	09/11 09/16	強烈	2	930
200812	如 麗 NURI	08/19 08/21	中度		955
200808	鳳凰 FUNG-WONG	07/26 07/29	中度	3	950
200807	卡玫基 KALMAEGI	07/16 07/18	中度	2	970



圖 3-21 花蓮港內 CWB 潮位測站於 2008 年 7 月卡玫基及鳳凰颱風侵 襲期間之實測水位紀錄(上)與去除潮汐趨勢及突衝雜訊後之波動訊號
由於颱風侵襲期間之波動,充分具有非線性與非穩態特性。因此, 為先行比較平時及不同路徑颱風侵襲前後,花蓮港內亞重力波之時頻 演化特性,針對圖 3-21 所示去除潮汐趨勢及突衝雜訊後之波動訊號, 再採用逸奇科技研發的 Visual Siganl 可視化訊號分析軟體(AnCAD, 2014),應用 EMD (Empirical Mode Decomposition)之經驗模態分解 (Huang et al., 1998),並進行 HHT (Hilbert-Huang Transform)之時頻分析 及 FFT (Fast Fourier Transform)波譜分析,結果如圖 3-22 所示。圖中, 橫軸表示日期時間;縱軸表示頻率(cpm: cycles per minute);波動振盪能 量或振幅的強弱大小,則以參考色階變化表示。



圖 3-22 花蓮港內 CWB 潮位測站於 2008 年 7 月卡玫基及鳳凰颱風侵 襲期間之低頻波動時頻分析(上)與波譜分析(下)

綜合觀察圖 3-22 可見,在不同路徑的颱風侵襲下,花蓮港內之港 灣振盪強弱,明顯會隨颱風路徑不同而變異,且港灣振盪之自然頻率, 除了近似 0.3~0.5 cpm 之港灣共振頻率、週期約 120~200 秒之亞重力波 外(莊、江,2000),頻率約介在 0.7~1.2 cpm (週期約 50~100 秒)之亞重 力波,亦具有相對較大之港灣振盪振幅。

為更清楚地瞭解花蓮港內波動隨颱風路徑不同而變化之影響,重 新將#22 碼頭區於 2008 年 7 月至 9 月卡玫基颱風、鳳凰颱風、如麗颱 風、辛樂克颱風,甚至包括 2009 年 8 月莫拉克颱風侵襲期間之波譜分 析結果作一對照比較,結果可得如圖 3-23 所示。

由圖 3-23 觀察可見,各不同路徑颱風之侵襲期間,於花蓮港內#22 碼頭區所引致之主要港灣振盪特性,除振盪能量或振幅會隨颱風路徑 變化外,主要的顯著振盪頻率,大多包括有 0.46、0.75、0.9、及 1.15cpm, 或對應之週期分別為 130 秒、80 秒、67 秒、及 52 秒,且並不會隨颱 風路徑而改變。這意謂花蓮港內#22 碼頭區,在各不同路徑颱風之侵襲 期間,皆會衍生程度不等的港灣振盪現象,且其主要的自然振盪頻率, 由低至高依序分別為 0.46、0.75、0.9、及 1.15cpm,對應之週期分別為 130 秒、80 秒、67 秒、及 52 秒,其中,以 80 秒或 52 秒週期之港灣振 盪振幅最顯著。

進一步將#22 碼頭區之主要自然振盪頻率與以往國內學研界所普 遍認為之主要共振頻率 0.375cpm 或週期 160 秒相對照比較,由圖 3-23 中尚可發現,該所謂共振頻率上之振盪能量或振幅,實際上是較不顯著 的。不過,若從圖 3-22 之時頻分析結果上觀察,則在波動頻率 0.375cpm(160 秒)與 0.46cpm(130 秒)上,可發現其振盪能量或振幅相對 上皆甚大,故其亦應是花蓮港之主要共振頻率(週期)。可見,資料分析 方法,亦會影響共振頻率(週期)之研判。



圖 3-23 花蓮港內#22 碼頭區 2008 年 7 月至 9 月卡玫基颱風、鳳凰颱 風、如麗颱風、辛樂克颱風及 2009 年 8 月莫拉克颱風侵襲期間港灣 振盪波譜分析結果(由上而下)之對照比較

另外,針對 2008 年 9 月之颱風影響期間,於花蓮港沿東防波堤向 南方向,距堤頭約 380 公尺之港外 HA 測站,檢索並整理 IHMT 應用 挪威 NORTEK 公司出品的超音波式波浪海流剖面儀(AWCP),以 1Hz 取樣率,每小時 2048 筆紀錄之逐時量測資料,並經以 10 分鐘中央移 動平均法去除潮汐趨勢及採用極值檢驗法去除突衝雜訊後(莊、曾, 2009),可得全月期間之波動逐時量測紀錄,如圖 3-24 所示。其中,將 辛樂克颱風(09/11~09/16;09/14 01:50 登陸東北部海岸宜蘭蘭陽溪)、哈 格比颱風(09/21~09/23;09/22 通過菲律賓東北部行經巴士海峽而未登 陸臺灣東海岸)、及薔密颱風(09/26~09/ 29;09/28 15:40 登陸東北部海 岸宜蘭南澳)侵襲期間之波動量測紀錄,分別進行改良型 Morlet 小波時 頻分析後,可得時頻分析結果,分別如圖 3-25 至 3-27 所示。



圖 3-24 花蓮港外 HA 波浪測站於 2008 年 9 月辛樂克、哈格比及薔密 颱風侵襲期間之侵襲路徑(上)、實測水位紀錄(中)與去除潮汐趨勢及突 衝雜訊後之波動訊號(下)



圖 3-25 花蓮港外 HA 波浪測站於 2008 年 9 月 11 至 16 日辛樂克颱風 侵襲期間之侵襲路徑(上)、實測波動紀錄(中)與小波時頻分析結果(下)



圖 3-26 花蓮港外 HA 波浪測站於 2008 年 9 月 21 至 23 日哈格比颱風 侵襲期間之侵襲路徑(上)、實測波動紀錄(中)與小波時頻分析結果(下)



圖 3-27 花蓮港外 HA 波浪測站於 2008 年 9 月 26 至 29 日薔密颱風侵 襲期間之侵襲路徑(上)、實測波動紀錄(中)與小波時頻分析結果(下)

首先,綜合觀察圖 3-24 及圖 3-25 至圖 3-27,由不同路徑與強度颱 風侵襲影響期間之逐時波動變化型態可見,登陸花蓮港以北海岸之辛 樂克及薔密颱風與行經花蓮港以南海岸而未登陸之哈格比颱風比較, 兩者明顯具有差異,主要的差異是,辛樂克及薔密颱風,其隨時序變化 之高頻(頻率高於 0.05Hz)波動大小,會隨登陸颱風之接近而由小逐漸增 大,且颱風登陸前波動即達到最高,而後波動將逐漸減小;而哈格比颱 風,自颱風通過菲律賓東北部海岸之期間開始,頻率高於 0.05Hz 之高 頻波動大小,才會隨時序急遽增大,且大波動持續維持一段期間後,波 動將隨颱風離開臺灣東部海域而逐漸減小。

其次,再由圖 3-25 至圖 3-27 綜合觀察可見,不論颱風路徑之差異, 即在辛樂克、哈格比、及薔密颱風接近花蓮港期間,在花蓮港港外,當 頻率高於 0.05Hz 之高頻波動變化逐漸由小增大至特定振幅期間,實測 波動,明顯皆會包含有頻率約 0.07Hz(週期約 15 秒)之颱風長浪(湧浪), 而且同時尚會伴隨存在頻率低於 0.03Hz 以下、週期長於 30 秒之亞重 力波; 而當颱風對花蓮港之影響減弱, 即當高頻波動逐漸由大減小時, 頻率約 0.07Hz(週期約 15 秒)之颱風長浪及頻率低於 0.03Hz(週期約 30 秒)之亞重力波,將會徹底減弱,直至消失而不復存在,此後,取而代 之的是頻率約介在 0.08~0.14Hz(週期約 7~12 秒)之經常性高頻風浪或 回復平靜的海面。

最後,在圖 3-25 至圖 3-27 中,特別值得一提的是,不管颱風路徑 與強度之差異,在颱風侵襲影響花蓮港期間,只要港外頻率高於 0.05Hz 之高頻波動增大至約 1 公尺之振幅,或有頻率約 0.07Hz(週期約 15 秒) 之湧浪存在期間,則花蓮港外之灣澳內,即會伴隨生成週期長於 30 秒、 頻率低於 0.03Hz 之亞重力波。而此一與颱風路徑無關,卻與颱風長浪 大小密切關聯的亞重力波,其不僅會在花蓮港外之灣澳內生成,並會透 過協振盪效應,激發內、外港之港灣振盪,參見圖 3-20 與圖 3-23,甚 至促成港灣共振(莊、江, 2000; 莊、曾, 2009; 莊、林, 2009)。

3-32

3.6 花蓮港外激發港灣振盪之亞重力波源辨識

基於波動傳播之頻散效應(dispersion effects)及非線性效應,近岸海 域之波浪,自然會因複合高、低頻波動成分而具有群波(group wave)特 性。其中,高頻波通常係指尖峯週期小於 30 秒之颱風與季風波浪;而 低頻波則為頻率介在 0.2~2 cpm (cycles per minute)或週期介在 30 秒至 300 秒(5 分鐘)間的亞重力波(infragravity waves)。在一般海域中,各種 不同動力所造成之波動,可依週期或頻率作分類(Munk, 1949、1951), 如圖 1-1 所示。

亞重力波(infragravity waves),通常附屬在不規則波之波群(wave groups)中,主要的形成機制,來自於波動的非線性效應(鄒,2005)。在 有限水深海域,高頻波群的重要非線性伴隨效應之一,即是產生水面波 降(set-down),而此波降之大小,不僅與構成波群之高頻湧浪波動振幅 (波高)平方成正比,並與頻率及水深之平方成反比,甚至與入射波向有 關,最特別的是,它與高頻波群之包絡波(wave envelope)具有同樣的週 期和波長及相同的傳播速度,所以,通常也稱為約束長波(bound wave) 或鎖相波(phase-locked waves)(Longuet -Higgins & Stewart, 1964; Bowers, 1977; 鄒,2005),參見圖 1-2 或如圖 3-28 所示。



圖 3-28 伴隨高頻波群(黑)存在並與波群包絡波(藍)具有相同週期之水 面波降或約束長波(紅)

當高頻波群向岸行進發生碎波後,波群對水面波降的約束作用將發生急劇變化,因此,會使水面波降從波群中被「釋放」出來,進而形成自由長波(free long waves)。自由長波在近岸受海岸地形水深影響後,

即會產生反射波,反射波若向離岸方向傳播,則稱為洩漏波(leaky modes) (Masselink, 1995);若由於折射作用而僅在海岸附近傳播,則成為拘限 (locked modes)之緣波(edge wave)。至於,在近岸之自由長波及其反射 波,一般即統稱為波拍(surf beat)。以上在近岸海域因群波存在所演化 的水面波降、約束長波、自由長波、緣波、或波拍等亞重力波頻段之波 動,由於其波動週期(頻率)常與一般規模的港灣自然振盪週期相符合, 故常是引致港灣共振的重要原因。

颱風期間的亞重力波之波源辨識,始終是探討花蓮港港灣振盪的 核心課題,亦是擬定改善對策、解決港灣共振現象之關鍵。而依據颱風 波浪波群中由水面波降所衍生低頻波或亞重力波之特性,在花蓮港外 之灣澳海域,不論其是否保有原鎖相波特性或因地形水深影響而轉變 為自由波,其波動應皆與原高頻波群具有相同的頻率或週期,如圖 3-28 所示。鑑此,可就颱風期間 IHMT 在花蓮港外 HA 波浪測站所實測 的非線性、非穩態波動紀錄,參見圖 3-24,應用 Visual Siganl 訊號分析 軟體(AnCAD, 2014),結合 EMD 經驗模態分解法(Huang et al., 1998), 首先,將波動紀錄進行高、低頻波的固有模態函數(IMF_Intrinsic mode functions)分解,接著,分別應用各頻段之 IMF,重新組構高頻(風浪或 湧浪)及低頻(微小水面波降所衍生之亞重力波)域之波動,再藉 Hilbert 轉換,透過瞬時振幅,即可完全陳現並建構原始高頻波群之包絡波,隨 後,針對包絡波及低頻域波動,分別再進行 FFT 波譜分析,並比較其 頻域之分佈特性,最後,藉高頻波群與亞重力波應具有相同的頻率或週 期之本質特性,即可詳實地完成花蓮港外激發港灣共振之波源辨識。

針對 2008 年辛樂克颱風(09/11~09/16;09/14 01:50 登陸東北部海岸宜蘭蘭陽溪)、哈格比颱風(09/21~09/23;09/22 通過菲律賓東北部行經巴士海峽而未登陸臺灣東海岸)、及薔密颱風(09/26~09/29;09/28 15:40 登陸東北部海岸宜蘭南澳)侵襲期間之波動紀錄與對應之時頻分析結果,由圖 3-24 及圖 3-25 至圖 3-27 綜合觀察可見,由於花蓮港外颱風期間頻率低於 0.03Hz 之亞重力波,會伴隨週期 15 秒左右之湧浪存在,因此,依據式(1-1),假定週期約 15 秒之湧浪波群的振幅分別為

3-34

0.5~1 公尺,則其在花蓮港外水深 20 米處所引致的水面波降大小或低 頻波動之振幅,僅約為 5.2~20 公分。所以,在進行實際高、低頻混雜 之港外波動量測後,欲辨識振幅如此微弱的低頻波動,方法上應特別講 究。

以圖 3-29 所示之 2008 年辛樂克颱風 09/14 01:50 登陸宜蘭蘭陽溪 前 6 小時之實測波動紀錄為例,應用 EMD 經驗模態分解法,首先可將 時序波動紀錄進行高、低頻波的固有模態函數(IMF)分解,如圖 3-30 所 示。圖中,IMF 之序數,係由上而下漸增排列,所對應的主頻率,則由 高頻遞減為低頻。由圖 3-30 觀察可見,隨 IMF 序數的增加或主頻率的 降減,波動振幅明顯亦有遞減之趨勢。另外,在颱風登陸前之逐時實測 波動中,以高頻波的能量最大,而越低頻的波動,其波動能量越小。



圖 3-29 花蓮港外辛樂克颱風 2008 年 09/14 01:50 登陸前 6 小時之逐 時實測波動紀錄

接著,再依據各 IMF 所對應之主頻率及波動能量特性,重新組構 IMF_1~2,即可得代表風浪或湧浪之高頻波群;組構 IMF_3~6,即可得 代表因波降等效應所衍生之低頻波動(亞重力波)。隨後,針對組構之高 頻波群,再應用 Hilbert 轉換,透過瞬時振幅,即可完全陳現並建構實 測紀錄中原始高頻波群之包絡波,如圖 3-31 所示。由圖觀察可見,組 構之高頻波群(黑及藍線)與低頻波動(紅線),在近岸實際入、反射亞重 力波之複雜組成下,似乎並未如圖 3-28 所示明確具有與高頻波群相同 之波降效應與週期特性。故而需進一步應用 FFT 波譜分析進行兩者基 本構成頻率(週期)之辨識,結果如圖 3-29 所示。



圖 3-30 花蓮港外辛樂克颱風登陸前 6 小時實測波動紀錄之 EMD 分 解與其固有模態函數(IMF)



圖 3-31 花蓮港外辛樂克颱風登陸前 4 小時(上,09/14 22:00)及前 2 小時(下,09/14 00:00)由 IMF 組構之高頻波動(黑)與其包絡波(藍)及因波 降衍生的低頻波動(紅)





由圖 3-32 觀察可見,颱風登陸前,颱風長浪的高頻波動,主要頻 率大多高於 0.03Hz(週期約低於 30 秒),並以 0.06Hz(週期約 16 秒)最顯 著,但由高頻波動之包絡波與因波降衍生的低頻波動,其主要頻率相同 地皆會介在 0.005Hz~0.02Hz(週期約 50~200 秒)之亞重力波頻段間,且 相近似地皆具有相當之波動能量,並皆概約以 0.01Hz(週期約 100 秒) 為卓越頻率。

依據圖 3-32 所示高頻波動與其包絡波及因波降衍生的低頻波動之 波譜對照比較結果,配合高頻波群之包絡波應與波降效應所衍生亞重 力波具有相同頻率(週期)之特質,因而可初步研判,花蓮港外在颱風侵 襲期間可激發港灣振盪之低頻波源,實際係伴隨颱風波浪高頻波群之 包絡波而存在,並由波群之波降效應所造成之亞重力波。

進一步再針對 2008 年哈格比颱風 09/22 18:00 最接近東海岸時以 及薔密颱風 09/28 15:40 登陸宜蘭南澳前 6 小時之逐時波動紀錄,並依 循上列亞重力波之波源辦識分析程序,因而可得花蓮港外,在不同路徑 及不同強度之颱風侵襲影響下,其高頻波動與其包絡波及因波降衍生 的低頻波動與對應之頻譜對照比較,分別如圖 3-33 及圖 3-34 所示。



圖 3-33 花蓮港外哈格比颱風靠近前 6 小時(09/22 18:00)由 IMF 組構 之高頻波動(黑)與其包絡波(藍)及因波降衍生的低頻波動(紅)(上)與對 應波譜之對照比較(下)



圖 3-34 花蓮港外薔密颱風登陸前 6 小時(09/28 15:40)由 IMF 組構之 高頻波動(黑)與其包絡波(藍)及因波降衍生的低頻波動(紅)(上)與對應 波譜之對照比較(下)

綜合觀察圖 3-33 及圖 3-44 並比較由主頻率 0.04~0.08Hz 波動(黑線)所構成高頻波群之包絡波(藍線)與因波降衍生的低頻波動(紅線)之 波譜可見,兩者不論波動能量與頻譜之區間,再次確實地皆具有極佳的 符合度。所以可充分明確的辨識並確認:不論颱風路徑,花蓮港外近岸 實測之亞重力波源,應係由高頻波群之包絡波,因水面曵降效應所衍生; 而且亞重力波之主頻,約在 0.01Hz 以下(週期 100 秒以上),因而,其 應為引致花蓮港港灣共振之顯著波源。

綜合觀察圖 3-33 及圖 3-44 可清礎看出,在颱風登陸前,颱風長浪 的高頻波動,主要頻率大多高於 0.03Hz(週期約低於 30 秒),並以 0.05~0.06Hz(週期約 16~20 秒)最顯著,但由高頻波動之包絡波與因波 降衍生的低頻波動,其主要頻率相同地皆會介在 0.005Hz~0.02Hz(週期 約 50~200 秒)之亞重力波頻段間,且相近似地皆具有相當之波動能量, 並皆概約以 0.01Hz(週期約 100 秒)為卓越頻率。因此,不論颱風路徑不 同與強度差異,只要港外颱風波浪明顯具有頻率低於 0.08Hz 之高頻波 動,或尖峯週期大於 12 秒之長浪,則依據高頻波動與其包絡波及因波 降衍生的低頻波動之波譜對照比較,配合高頻波群之包絡波應與波降 效應所衍生亞重力波具有相同頻率(週期)之特質,即可充分辨識並確認, 花蓮港外在颱風侵襲期間可激發港灣振盪之低頻波源,實際係伴隨颱 風波浪高頻波群之包絡波而存在,並由波群之波降效應所造成之亞重 力波。特別值得注意的是,港外亞重力波之顯著性,僅管與颱風路徑及 強度無關,但卻與港外高頻波群之波降效應(參見式 1-1)或波動振幅大 小關係密切。

3.7 花蓮港外之颱風波浪與港灣振盪模擬

依據圖 3-33 及圖 3-44 所示高頻波動與其包絡波及因波降衍生的 低頻波動之波譜對照比較,配合高頻波群之包絡波應與波降效應所衍 生亞重力波具有相同頻率(週期)之特質,可明確辨識花蓮港外在颱風侵 襲期間可激發港灣振盪之低頻波源,實際係伴隨颱風波浪高頻波群之 包絡波而存在,並由波群之波降效應所造成之亞重力波。

為更具體地陳現花蓮港外之亞重力波動及因其造成之港灣振盪型 態,在綜合考量花蓮港之港灣配置及港外灣澳地形之影響下,首先建置 花蓮港域之數值模擬計算範圍與地形水深,如圖 3-9 所示,接著,針對 颱風波浪本質所複合具有的高、低頻波動成分與群波特性,參考圖 3-33 及圖 3-44 所示之主要波動組成成分,藉選取週期分別為 12 s、97 s 及 170 s,振幅分別為 1.0m、0.08 m及 0.06 m 之三個成分,建構人造 波浪,並用以模擬花蓮港外海颱風期間東南向(與正北順時夾角 150 度) 之入射波動,然後,應用 MIKE21_HD 二維非線性水動力模式(DHI, 1994),進行花蓮港外灣澳及港灣振盪之模擬計算,最後,可得結果, 如圖 3-35 所示,圖中,波動大小係以水位高低之色階深淺表示。由圖 觀察可見,入射波動,由於受灣澳地形之折、繞射與反射之影響,在港 口南側之灣澳內,明顯有短峰波系統存在,而且在港口處,水位亦會陳 現高、低變化之波動性,這意謂花蓮港的港灣振盪,確實會受港外灣澳

再沿用週期分別由 12 s、97 s 及 170 s,振幅分別為 1.0m、0.08 m 及 0.06 m 之三個成分所建構之人造波浪,且設定其在花蓮港外海以東 南向(與正北順時夾角 150 度)入射,則應用 MIKE21_BW 之二維非線 性淺水波動模式(DHI, 1994),進行花蓮港外灣澳及港灣振盪之模擬計 算,結果可得如圖 3-36 所示,圖中,波動大小係以色階深淺表示。由 圖觀察可清礎看出,入射波動,由於受灣澳地形之折、繞射與反射之影 響,在港口與美崙溪口之灣澳內,明顯有波動聚集且振幅高低變化之群 波振盪現象,這意謂花蓮港港外灣澳內的波動,會由波群之波揚與波降 效應,衍生亞重力波,進而藉港外及港內波動之協振盪作用而造成港灣

針對圖 3-36 所示花蓮港外灣澳及港灣振盪之模擬計算結果,為清礎陳現港外及港內波動之協振盪現象,因此,自#12 碼頭起,通過內、 外港航道,直至花蓮溪口,建置一波動萃取剖面,如圖 3-37 所示,進 而可萃取剖面上之港外群波波動與港內之港灣振盪,如圖 3-38 所示。



圖 3-35 應用 MIKE21_HD 二維非線性水動力模式進行花蓮港外 灣澳水位波動高(上)、低(下)變化及港灣振盪模擬之計算結果



圖 3-36 應用 MIKE21_BW 二維非線性淺水波動模式進行花蓮港外灣 澳波動高(上)、低(下)變化及港灣振盪模擬之計算結果





圖 3-37 花蓮港外灣澳波動高低變化及港灣振盪模擬計算結果之萃取 剖面位置(上)與對應之水深(下)



圖 3-38 花蓮港聯結#12 碼頭至花蓮溪口剖面上由港外高頻群波之高 (上)、中(中上)、低(中下)波降經協振盪作用而在港內所激發出之低頻 港灣振盪與對應之剖面地形水深(下)

依據圖 3-38,從港內_外剖面上之低頻港灣振盪與高頻群波之波動 特性觀察可見,在花蓮港外之高頻群波,於其通過港口航道之窄縮水域 時,原來因波揚與波降而伴隨在高頻群波內的約束長波,將會擺脫群波 之束縛,並被釋放而成為自由長波,進而藉港外、港內之波動協振盪作 用下,造成港內各碼頭區之低頻港灣振盪。

另外,伴隨在高頻群波內的約束長波,或經港口航道窄縮影響而成 的自由長波,由於其頻域皆歸屬於亞重力波,因此,若該亞重力波的激 振頻率與港灣的自然振動頻率相符合,則會造成理論上的港灣共振,只 是港灣共振幅度之大小,將明顯會由伴隨在高頻群波內之約束長波振 幅所決定。相關港灣共振幅度之反應,可參見圖 3-11 至圖 3-13 所示花 蓮港颱風期間港外及港灣振盪之振幅增幅反應曲線。

至於花蓮港外之灣澳區,綜合圖 3-36 及圖 3-38 所陳現之波動聚集 與振幅高低變化之群波振盪現象,應可研判其波動應具有第一模態之 緣波(edge waves)振盪型態,如圖 3-39 所示。



圖 3-39 花蓮港外灣澳內之波動研判應具有第一模態之緣波振盪型態

3.8 研提防制措施及改善對策

檢視花蓮港的外廓配置,港口之外防波堤,為消減波浪之衝擊,增 進港域靜穩度,歷經多次擴建後,已具有半無限長之離岸堤型式,因此, 在莊(2000)所提之「離岸堤效應」影響下,港外灣澳的之南、北濱及化 仁海灘,受淺灘沖刷帶上之強勁波浪沖刷流作用,已明顯陳現岬灣型態, 且依據 Hsu & Evans (1989)之靜態岬灣海灘理論,再配合應用 Klein et al. (2003)所研發之 MepBay 岬灣灘線陳繪軟體,進行實際灣澳之灘線擬 合(fitting)後,依循莊(2000)之經驗可清礎研判出,關聯波浪及海灘安定 性之上游波浪繞射控制點、下游安定海灘控制點、通過繞射點之卓越波 向等三個岬灣控制參數及伴隨「離岸堤效應」之波浪沖刷流示意,如圖 3-40 所示。



圖 3-40 花蓮港外之岬灣海灘(粉紅)與關聯波浪繞射之上游控制點 (紅)、安定海灘之下游控制點(綠)、通過繞射點之卓越波向(白)及伴隨 「離岸堤效應」之波浪沖刷流(黃)(圖像來源: Google Earth, 20180114) 由圖 3-40 觀察可見,花蓮港的卓越波向,概約是與東防波堤垂直 之東南向,且主導波浪繞射之上游控制點有二個,一個位在毗鄰港口之 南外防波堤外側、另一個則位在花蓮溪口之潛沒河口三角洲上,至於, 安定海灘之下游控制點,則概約位在南濱海岸上,而與岬灣營造密切關 的沖刷流,在岬頭控制之影響下,位在美崙溪口至北濱海岸灣澳內之流 向,主要為由南而北,並為順時針旋轉之近岸環流;而位在化仁海岸至 花蓮溪口之岬灣內,主要流向為由北而南,且為逆時針旋轉之近岸環流。

配合上述有關花蓮港外營造岬灣海灘地形之近岸卓越波浪與沖刷 流特性,再加上先前各節有關花蓮港外激發港灣振盪波源之辨識與確 認,因此,對颱風侵襲影響期間花蓮港之港灣振盪,可從硬體及韌體兩 層面,研提防制措施及改善對策如下:

(1)硬體之防制與改善

面對花蓮港外岬灣海灘內之高頻群波及因其伴隨波揚與波降現象 所衍生之約束長波,由於其屬亞重力波之頻段範圍,波長極長,能量消 減不易,但因約束長波之振幅,明確與群波之振幅相關,因此,硬體之 防制措施與改善對策,僅管不能有效改變港灣振盪之自然頻率,但可將 現有具 I型突堤型態之西外防波堤,改變為r或Γ之漁尾型,如圖 3-41 所示,藉以造成高頻群波在現有灣澳內,因多重外防波堤構成之波浪繞 射效應,而抑制高頻群波以及伴隨約束長波之振幅(波高),並可減小通 過港口航道窄縮水域之自由長波振幅,進而可促成港灣振盪強度之減 弱,達成防制及改善港灣振盪之目標。另外,I型突堤型態之南外防波 堤,若改變為r或Γ之漁尾型,則其不僅可藉新岬頭之營造而防護既有 海灘之沖蝕,尚可防制港口航道之漂沙淤積。

(2) 韌體之防制與改善

在颱風長浪影響期間(莊、曾,2019),依據 IHMT 在港外即時監測 之高頻群波逐時紀錄(參見第 2-5 節內文),應用中央移動平均法或 EMD 之 IMF 重組,分析伴隨群波之波揚與波降大小(參見第 3-6 節內文),掌 握約束長波之顯著週期(頻率)與振幅,進而透過港內各碼碩區的振幅增 幅反應曲線(參見第 3-3 節及圖 3-11 至圖 3-13),推算並預估港灣振盪 之振幅,進而可依據駐港船舶特性,加強繫纜或採取現況之避湧措施。

另外,在充分瞭解及考量臺灣東部海域颱風長浪的演化特性(莊、 曾,2014、2015、2016)後,對於颱風長浪,無論是否為發佈警報的颱 風,當花蓮港或蘇澳港的逐時監測波浪,若其尖峰週期大於10秒、示 性波高大於1.5 公尺,即可依據莊、曾(2019)研提的瘋狗浪預警準則, 對駐港船舶,警示加強繫纜或採取現況之避湧措施。



圖 3-41 抑制花蓮港外岬灣內高頻群波及伴隨約束長波所造成港灣振 盪之建議改善措施

第四章 蘇澳港颱風長浪群波引致之港灣振盪

4.1 蘇澳港域之配置

蘇澳港位於台灣東北部,是基隆港的輔助港,港域主要由北方澳、 南方澳及蘇澳構成。建港工程肇始於 1975 年,其後,歷經 1978 及 1983 年的第一及第二期工程建設,現況既有港域配置與港區之地形水深,如 圖 4-1 所示。港口朝東偏南向 22.5 度開口;主航道寬度約 240m,水深 -16~-25m; 商港水域面積約 279 公頃,擁有港勤船碼頭 1 座和營運碼 頭 12 座,水深自-7.5 至-15 公尺;現況港域,自港口至各重要港渠的主 要距離,如圖 4-2 所示。



圖 4-1 蘇澳港現況既有港域配置與港區之地形水深

蘇澳港,在全年冬、夏季之季風期間,全港域之靜穩度尚稱良好, 但在夏季颱風期間,受颱風長浪侵襲之影響,位在第三港渠入口北側且 在航道碎波堤後,距港口約1.5公里,專供港勤、海巡、海關等小型公 務船隻停泊之公務船渠(長寛約 300m×250m;水深-2~-6m),則常會發 生頻域介在 0.1~0.3 cpm,週期偏屬亞重力波的劇烈低頻港灣振盪現象, 致使公務船無法安全靠泊。相關引發港灣振盪之主要長浪波源,僅管蘇 澳港務分公司曾委託國內學研單位實施港內波動監測,並應用平面模 型試驗及數值模擬進行港域靜穩度改善研究(洪 等,2017),但迄今仍 未能明確掌握。



圖 4-2 蘇澳港現況港域自港口至各主要港渠之距離

4.2 颱風影響期間之港外與港內波動監測紀錄整理

為改善蘇澳港公務船渠受颱風波浪侵襲影響所衍生嚴重港灣振盪 而致無法安全靠泊之問題,港務當局曾在2015年委託交通部運輸研究 所港灣技術研究中心(CHMT)專案在港內安裝三部挪威 NORTEK 公司 出品之 AWAC-600kHz 潮波流儀(Acoustic Wave And Current Profiler), 俾配合港外長期海象測站,同步實施波浪之壓力(press.)及聲波(AST)監 測,相關測站配置,如圖 4-3 所示。其中,港外測站(Sta._0)之水深約 25m;港內航道碎波堤前測站(Sta._1)之水深約 12m、公務船渠內測站 (Sta._2)水深約 4m、第一與第二港渠間測站(Sta._3)水深約 14m。主要觀 測期間,含括 2015 年 08~10 月之颱風期及 2015 年 12 月~2016 年 3 月之季風期,詳如表 4-1 所示。每筆逐時紀錄自整點後第 10 分鐘開始, 測量長度為 2048 秒,取樣頻率 1Hz。



圖 4-3 蘇澳港外長期海象測站及港內監測港灣振盪之短期波浪測站

對於蘇澳港內、外 AWAC 監測紀錄之整理,於 2015 年 8 至 10 月 之颱風與部分強季風影響期間,匯總整理蘇澳港外壓力計(press.)與聲 波計(AST)之原始 1Hz 逐時波動監測紀錄,可得如圖 4-4 所示。自其中 檢選蘇迪勒颱風影響期間(2015/8/5~10)之紀錄,則可得如圖 4-5 所示。

觀察圖 4-4 及圖 4-5 可見,由於聲波紀錄有不確定之突衝及大波高時期之截底情形,因而在考量壓力紀錄對陳現長波之先天優越性與訊號之穩定性後,相關波動之各項分析,皆以壓力紀錄為依據。僅管如此,由於壓力紀錄含有潮汐訊息,且係以 dBar 為單位,因此,在應用上必

需先以20分鐘窗寬之中央移動平均法(CMA)去除潮汐波動,接著以傳 立葉轉換(Fourier transform)計算壓力波譜,再使用波壓轉換函數 (transfer function)及逆傳立葉轉換,藉以獲得波動水位之時序資料,相 關單時紀錄之轉換與校驗過程,詳參第2-3節內文,並如圖2-12所示。 由圖觀察可見,在小波高期間,經壓力轉換後之波動水位時序,實際與 聲波紀錄甚一致,相關係數可達0.943。

表 4-1 蘇澳港自 2015 年 8 月至 10 月之颱風與季風季節於港外及港內 各波浪測站同步進行觀測之期間(資料來源: CHMT, 蘇澳港務 船靜穩度改善暨避風碼頭研究計畫)

蘇澳港 2015 年 8 月至 10 月颱風季節現場海氣象觀測資料			
SA_0_1 蘇澳港港外 -1SA-AWCP 觀測站 北緯 24 度 35 分 36.33 秒;東經 121 度 52 分 11.24 秒	san201506081500- 201508171300 -awcp64471281. wad -awcp64471677. wad	2015/08/01 00:10:01 00:44:48	2015/08/17 13:10:01 13:44:08
SA_0_2 蘇澳港港外 -2SA-AWCP 觀測站	san-201508171600- 201510281400 -awcp6446000. wad -awcp64461726. wad	2015/08/17 16:10:01 16:44:48	2015/10/28 14:10:01 14:23:57
SA_I_1 蘇澳港港內 -SA-AWCP-1 觀測站 北緯 24 度 35 分 36.33 秒;東經 121 度 52 分 11.24 秒	sa1-20150731100- 201510290900 -awcp5065000. wad -awcp50652158. wad	2015/07/31 11:10:01 11:44:08	2015/10/29 09:10:01 09:24:44
SA_I_2 蘇澳港港內 -SA-AWCP-2 觀測站 北緯 24 度 35 分 29.57 秒;東經 121 度 52 分 01.33 秒	sa2-201507311100- 201510290900 -awcp5052000. wad -awcp50522157. wad	2015/07/31 12:10:01 12:44:08	2015/10/29 09:10:01 09:44:08
SA_I_3 蘇澳港港內 -SA-AWCP-3 觀測站 北緯 24 度 35 分 49.1 秒;東經 121 度 51 分 42.9 秒	sa3-201507311100- 201510281400 -awcp5011000.wad -awcp5011896.wad	2015/07/31 11:10:01 11:44:08	2015/09/07 02:10:01 02:35:37
SA-TIDE 港內潮位站 北緯 24 度 36 分 07.38 秒;東經 121 度 51 分 50.50 秒	1 record/minute	2015/08/01 00:00 ~ 2015/10/31 23:00	



圖 4-4 在蘇澳港外於 2015 年 8~10 月颱風與部分季風影響期間以 AWAC 監測波浪所得之壓力(上)與聲波(下)原始 1Hz 逐時紀錄



圖 4-5 在蘇澳港外於蘇迪勒颱風影響期間監測波浪所得之壓力(上)與 聲波(下)原始 1Hz 逐時紀錄

4.3 蘇澳港公務船渠在颱風影響期間之港灣振盪特性分析

在進行颱風期間引致港池振盪之波源辨識前,為具體瞭解並掌握 公務船渠之港灣振盪特性,因此,參考表4-1,首先可自設置在公務船 渠內之驗潮站,就蘇迪勒、天鵝、杜鵑颱風之影響期間,檢選每分鐘平 均之連續潮位監測紀錄,如圖4-6所示,其次,以20分鐘窗寬之CMA先 行分析擬潮線並去除潮汐波動後,接著,分別再進行頻譜分析,進而可 對照比對不同路徑與不同強度颱風所造成公務船渠之港灣振盪特性, 如圖4-7所示。



圖 4-6 在蘇澳港公務船渠驗潮站上就蘇迪勒(上)、天鵝(中)、杜鵑(下) 颱風影響期間檢選每分鐘平均之連續潮位監測紀錄



圖 4-7 蘇澳港公務船渠在蘇迪勒(黑)、天鵝(藍)、杜鵑(紅)等不同路徑 與不同強度颱風侵襲影響下由每分鐘平均之連續潮位紀錄分析所得之 港灣振盪特性對照比對

由圖4-7觀察可見,在不同颱風波浪影響期間,不論颱風路徑之變 異與強弱之差別,引致公務船渠陳現較大港池振盪之波動頻率,在排除 CMA 20分鐘(~0.05cpm)之窗寛效應後,可清礎研判,各不同路徑與強 度之颱風,皆含括有0.118~0.159、0.183~0.224及0.256~0.273 cpm等三個 顯著之波動振盪頻段,且各頻段分別以0.14、0.2及0.27 cpm,或週期分 別約是7.14分鐘(~429秒)、5分鐘(~300秒)及3.70分鐘(~222秒)為最高, 三者並以並以0.14 cpm (~429秒)之最低頻段最主要。

此外,再從圖4-7觀察可見,若蘇澳港外波浪具有頻率分別為0.118、 0.144、0.159及0.265 cpm,週期各相當於508、416、377及230秒或8.5、 6.9、6.3及3.8分鐘的亞重力波成分,則公務船渠將會陳現極大之港池振 盪反應,這意謂,公務船渠之自然振動週期,應約是3.8~8.5分鐘 (230~508秒),惟因公務船渠的規模甚小,長、寬尺寸甚有限,應無法 單獨具有大於230秒之自然振盪週期,所以可研判,公務船渠的港池振 盪,實際係由毗鄰之第三港渠的協振盪所造成。

為進一步確認,參考圖4-1及圖4-3所示蘇澳港外港域之水深,並設

定港口主航道水域之水深可以20米代表,則當港口有頻率約0.144cpm 或週期約6.9分鐘的波動入射時,由於該低頻波動之波長可達5.83公里, 而公務船渠至港口的距離,參見圖4-2,約為1.5km,洽可近似滿足協振 盪之1/4波長條件,故可準確辨識,颱風長浪侵襲影響期間,公務船渠 的港池振盪,實際係與毗鄰之第三港渠與外港共同構成矩形港池之港 灣振盪聯動,並由港外頻率約0.144cpm或週期約7分鐘的颱風波浪之亞 重力波成分,透過協振盪而激振。

4.4 颱風影響期間港外之亞重力波辨識

為進行蘇澳港外激發港灣振盪之波源辨識,彷照花蓮港,並以港外 伴隨高頻群波之波揚與波降所生成之約束長波入射港口後,必然會在 港內造成同頻段自由長波之港灣振盪為基礎,檢選2015年8月8日3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間,可整理港內、外同步監測並經去潮及壓 力轉換處理後之原始1Hz單時波浪紀錄,如圖4-8所示,圖中,針對亞 重力波之頻段,經應用30秒窗寬之CMA,分別進行港外伴隨高頻群波 之波揚與波降所衍生的約束長波及在港內陳現港池振盪之自由長波的 分析與萃取,進而可得港外約束長波與外港碎波堤前、公務船渠內與內 港域之自由長波振盪特性之對照比對,如圖4-9所示。

綜合觀察圖 4-8 與圖 4-9 可見,在蘇迪勒颱風達最大波高期間,由 於港外波濤洶湧,以致在波高近似約 20 公尺之巨大高頻波動下,閉鎖 於高頻群波內的波揚與波降波動或約束長波,相對上較微小,僅管如此, 對於閉鎖於高頻群波內的波揚與波降,其實際振幅之大小,由圖 4-9 觀 察可見,約略介在 25~50 公分;而依據式(1-2)之理論值估算,設定港外 測站之水深 h 為 25 米,並取群波高頻波動之週期T為 14 秒(對應波長L 約 219 公尺),則振幅 a 介在 5~8 公尺之高頻群波所衍生之波降大小, 估計亦約可達 18.1~46.3 公分,將其與實際波揚與波降之振幅值比對, 可見兩者彼此甚近似。這意謂閉鎖於高頻群波內的約束長波,應係由波 揚與波降產生。鑑此,當高頻群波入射港口後,由於外廓防波堤之遮蔽,

4-8

致使高頻群波之振幅,大幅減衰,同時,受港口航道之窄縮影響,原閉 鎖於高頻群波之約束長波,將被釋放並轉變為自由長波,進而可在港內 促成振幅相對較顯著之港灣振盪。



圖 4-8 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外(上)及外港碎波堤前(中上)、公務船渠內(中下)與內港域(下)監測之 單時波動紀錄(黑)以及港外閉鎖於高頻群波之約束長波與在港內陳現 港池振盪之自由長波(紅)



圖 4-9 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外之約束長波(黑)與外港碎波堤前(紅)、公務船渠內(藍)及內港域(綠) 自由長波之波動特性對照比較

此外,再詳細觀察圖 4-9 可見,由於波動同步監測之位置不同,以 致通過港口航道之自由長波進入外港及各港渠水域後,波動彼此會存 在相位之差異,僅管如此,將外港碎波堤前、公務船渠內及內港域自由 長波之波動振幅與週期,與港外之約束長波相互對照比較,仍可見彼此 具有相似性。因此,可更具體地判定,激發蘇澳港外港與各港渠發生港 池振盪之自由長波,明確應與港外閉鎖於高頻群波之約束長波,直接具 有密切的關聯性(莊、江,2000;莊、曾,2009;楊 等,2009)。

為進一步確認港外約束長波與港內各港渠內自由長波之關聯性, 再透過波譜分析,因而可將港外之約束長波與公務船渠內之自由長波, 就其各頻率成分之能譜(相當於振幅),相互比對,如圖 4-10 所示。由圖 4-10 觀察可見,港外之約束長波,主要頻率分散在 0.1~0.8 cpm 間;而 港內公務船渠之自由長波,主要頻率則約集中在 0.15 cpm 或週期近似 於7分鐘;至於振盪能量的大小,港內主頻約 0.15 cpm 之自由長波能 量,約可達港外約束長波之4倍,若換算為振幅,則恰約為 2.0 倍,這 意謂自由長波在公務船渠內之振幅,並無明顯增大,主要的振幅增幅效 應,應係蘇澳港外港之港形配置,對入射之自由長波,具有近似於全反 射之影響。因此,可更具體地判定,颱風侵襲期間,港外閉鎖於高頻群 波之約束長波,其各成分之協振盪激振頻率,應不至於激發蘇澳港域之 港灣共振,但現況公務船渠之較嚴重港池振盪現象,確實係因港外閉鎖 於高頻群波之約束長波所直接導致;而且,受通過港口後自由長波的全 反射效應影響,因此,公務船渠之港池振盪幅度,概約是約束長波週期 近似於7分鐘成分波之振幅的二倍。



圖 4-10 於 2015 年 8 月 8 日 3 時蘇迪勒颱風達最大波高期間在蘇澳港 外閉鎖於高頻群波之約束長波(黑)與造成公務船渠陳現港池振盪之自 由長波(紅)對照比較(上)以及對應之波譜比較(下)

4.5 港灣振盪與港外波動源之關聯性

為改善蘇澳港公務船渠受颱風波浪侵襲影響所衍生嚴重港灣振盪 而致無法安全靠泊之問題,港務當局曾在2015年專案委託CHMT,配 合港外長期海象測站,再於港內選定三處港渠與碼頭測站,安裝潮波流 儀,並於2015年08~10月之颱風期及2015年12月~2016年3月之 季風期,同步實施波浪監測,各測站之紀錄期間,參見表4-1,測站配 置,參見圖4-3所示,港外以取樣頻率1Hz、每次觀測2048秒的逐時 波動紀錄,如圖4-4及圖4-5所示,其中,在港內、外同步施行波浪監 測期間,曾將蘇迪勒、天鵝及杜鵑颱風的颱風波浪演化歷程作完整紀錄, 至於,蘇迪勒、天鵝及杜鵑颱風生成後之各別移動路徑及侵襲影響期間,



圖 4-11 在 2015 年 8 月至 10 月期間侵襲及影響蘇澳港海域的蘇迪勒 (左)、天鵝(中)及杜鵑(右)颱風生成後之移動路徑

颱風期間,激發港灣振盪的港外波源辨識,始終是探討港灣振盪的 核心課題,亦是擬定改善對策、解決港灣共振現象之關鍵。針對港外以 取樣頻率 1Hz、每次觀測 2048 秒的逐時波動紀錄,再依據非線性、非 穩態颱風波浪波群中應具有之波揚與波降特性,經以 30 秒窗寬之中央 移動平均(CMA)分析萃取後,可得伴隨在高頻波群中之低頻波或亞重 力波,如圖 4-12 所示,又應用 Visual Siganl 訊號分析軟體(AnCAD, 2014),藉 Hilbert 轉換,透過瞬時振幅,即可建構原始高頻波群之包絡 波,並可將高頻波群中之包絡波與波群因波揚與波降衍生的低頻波或 亞重力波相互比對,如圖 4-13 所示,由圖觀察可見,颱風波群中伴隨
波揚與波降所衍生的亞重力波與包絡波,彼此確實具有近似相同的頻 率或週期。至於兩者彼此的關聯性,可再透過頻譜分析,如圖 4-14 所 示,進一步作港外波源之辨識與確認。



圖 4-12 蘇澳港外颱風波浪逐時紀錄(黑)經以 30 秒窗寬之中央移動平 均分析萃取高頻波群中因波揚與波降衍生之低頻波動或亞重力波(紅)



圖 4-13 蘇澳港外颱風波浪逐時紀錄(黑)經以 30 秒窗寬之中央移動平 均分析萃取高頻波群中因波揚與波降衍生之低頻波動或亞重力波(藍) 與波群之包絡波(紅)



圖 4-14 蘇澳港外颱風波浪逐時紀錄經以中央移動平均分析萃取高頻 波群中之亞重力波(黑)與包絡波(粉紅)以及港內碎波堤前(紅)、公務船 渠內(藍)與內港域(綠)亞重力波之頻譜對照比較

為進行蘇澳港外激發港灣振盪波源之辨識,且為驗證港外約束長

波應與群波具相同週期之特性,彷照花蓮港,並以港外伴隨高頻群波之 波揚與波降所生成之約束長波入射港口後,必然會在港內造成同頻段 自由長波之港灣振盪為基礎,針對蘇迪勒颱風侵襲影響期間,參見圖 4-4,檢選 2015/08/06 12:00、2015/08/07 23:00、2015/08/08 03:00 颱風 期間,及 2015/10/18 14:00、2015/10/20 14:00 強季風期間之港外波浪 逐時紀錄,經以 30 秒窗寬之中央移動平均(CMA)分析萃取港外由波揚 與波降所陳現之亞重力波、透過 Hilbert 轉換,並藉瞬時振幅所陳示高 頻波群之包絡波、以及再用 30 秒窗寬 CMA 分析港內各船渠碼頭之港 灣振盪波動、再將各不同來源之低頻波動與對應之頻譜綜合對照比較, 分別如圖 4-15 至圖 4-19 所示。

由圖 4-15 至圖 4-19 所示港內、外低頻波動與港外群波包絡波頻譜 之對照比較,可明確判識,蘇澳港引致公務船渠產生港灣振盪之颱風長 浪波源,主要的激振頻率由低而高分別為 0.14~0.22cpm、0.35~0.42cpm、 0.58~0.65cpm、0.8~1.0cpm,對應之週期分別是 273~429 秒(4.5~7.2 分 鐘)、143~171 秒、92~103 秒、60~75 秒,實際皆係港外閉鎖於群波下 伴隨波揚與波降效應所衍生之約束長波,其中,週期約 7 分鐘或週期 約 420 秒之約束長波,甚接近第三港渠至港口間之港灣自然振盪週期, 因而會因港灣內的協振盪而激發公務船渠之港灣振盪,甚且造成港灣 共振。此外,由於港外伴隨群波之波揚與波降,無論在颱風期或季風期, 皆會經常存在,所以亦皆會導致公務船渠之港灣振盪發生,有所不同的, 只是振盪強度之差異而已。

至於在強季風期間之港外約束長波波源辨識,由圖 4-18 及圖 4-19 所示波動頻譜之對照比較觀察可見,強季風期間,與颱風期間有所不同 的是,閉鎖於港外群波下的約束長波,主頻略高,趨近於 0.3cpm,或 週期約 200 秒,因而略偏離蘇澳港激發港灣共振之自然振動頻率,以 致公務船渠之港池振盪強度普遍偏弱。



圖 4-15 蘇澳港外在 2015/08/06 12:00 颱風波浪紀錄內之亞重力波 (上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波動(中 下)與對應頻譜之對照比較(下)



圖 4-16 蘇澳港外在 2015/08/07 23:00 颱風波浪紀錄內之亞重力波 (上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波動(中 下)與對應頻譜之對照比較(下)



圖 4-17 蘇澳港外在 2015/08/08 03:00 颱風波浪紀錄內之亞重力波 (上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波動(中 下)與對應頻譜之對照比較(下)



圖 4-18 蘇澳港外在 2015/10/18 14:00 強盛季風波浪紀錄內之亞重 力波(上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波動 (中下)與對應頻譜之對照比較(下)



圖 4-19 蘇澳港外在 2015/10/18 14:00 強盛季風波浪紀錄內之亞重力波 (上)、包絡波(中上)、港外亞重力波及各船渠碼頭之港灣振盪波動(中 下)與對應頻譜之對照比較(下)

4.6 研提防制措施及改善對策

配合蘇澳港外激發公務船渠產生港灣振盪之波源辨識以及確認外 港因自由長波之全反射所構成完全重複波之港灣振盪型態,因此,對颱 風侵襲影響期間蘇澳港之港灣振盪,可從硬體及韌體兩層面,研提防制 措施及改善對策如下:

(1)硬體之防制與改善

面對蘇澳港外颱風侵襲影響期間之高頻群波及因伴隨波揚與波降 現象所衍生之約束長波,由於各主要激振頻率皆歸屬亞重力波之頻段 範圍,當其通過港口而以自由長波進入外港後,由於其波長極長,能量 消減不易,外加外港面對港口之碎波堤對該自由長波之全反射作用,至 使外港及含括公務船渠之第三港渠,具有完全重複波之港灣振盪型態, 並導致港灣振盪之振幅,約可達港外約束長波或亞重力波之二倍,因此, 面對港外約束長波振幅會隨颱風高頻群波波高之高低而改變大小之情 況,現況可採行的硬體性防制與改善對策,在不影響各內港航道及迴船 池之功能下,應以降低外港碎波堤對入射自由長波之反射作用為主,建 議的配置方案,如圖 4-20 所示。

(2) 韌體之防制與改善

在颱風長浪影響期間(莊、曾,2019),依據 CHMT 在港外即時監 測之高頻群波逐時紀錄(參見第 2-5 節內文),應用中央移動平均法或 EMD 之 IMF 重組,分析港外伴隨群波之波揚與波降大小(參見第 3-6 節 內文),掌握約束長波之顯著週期(頻率)與振幅,進而應用碎波堤對入射 自由長波之全反射作用所導致完全重複波型態之港灣振盪(參見第 4-4 節及圖 4-10 與圖 4-15 至圖 4-17),以二倍振幅增幅率,推算並預估港 灣振盪之振幅,進而可依據駐港船舶特性,加強繫纜或採取現況之避湧 措施。

另外,由於蘇澳港外約束長波之振幅,會隨颱風高頻群波波高高低 而改變大小,因此,在充分瞭解及考量臺灣東部海域颱風長浪的演化特

4-20

性(莊、曾,2014、2015、2016)後,對於颱風長浪,無論是否為發佈警 報的颱風,當花蓮港或蘇澳港的逐時監測波浪,若其尖峰週期大於 10 秒、示性波高大於 1.5 公尺,即可依據莊、曾(2019)研提的瘋狗浪預警 準則,對駐港船舶,警示加強繫纜或採取現況之避湧措施。



圖 4-20 面對蘇澳港碎波堤對入射自由長波之全反射作用所導致完全 重複波港灣振盪型態之建議改善措施

第五章 結論與建議

亞重力波,通常是指不規則波之波群中,週期介在 30 秒至 5 分鐘 的低頻波動。其主要的形成機制,來自於波動的非線性效應。在有限水 深海域,高頻波群的重要非線性伴隨效應之一,即是產生波揚與波降, 而且波揚與波降,通常與高頻波群之包絡波具有相同的傳播速度,故具 有與高頻波群同樣的週期和波長,如圖 5-1 所示。所以,通常也稱為約 束長波或鎖相波。當高頻波群向岸行進發生碎波或通過港口後,波群對 波揚與波降的約束作用,將發生急劇變化,因此,會使波揚與波降脫離 波群而被「釋放」出來,進而形成自由長波。而不論是約束長波或自由 長波,由於其頻率皆歸屬於亞重力波,且其波動週期(頻率)常與一般規 模港灣的自然振盪週期相符合,故常是激發港灣振盪,甚至是造成港灣



圖 5-1 颱風波浪的高頻波群(黑)與其包絡波(藍)及伴隨波群之波揚與 波降(紅)效應所衍生的約束長波,

颱風,為臺灣首要的災變天氣,當其在西太平洋海域生成後,即會 伴隨颱風的移動而生成長浪,而就颱風長浪之演化特性而言,不論是否 為國內發布警報之颱風,當花蓮港或蘇澳港的逐時監測波浪,若經即時 紀錄之波動分析,當其尖峰週期大於10秒、示性波高大於1.5公尺, 颱風波浪即會因頻散與非線性效應,而陳現明顯的群波特性,進而伴隨 波揚與波降,衍生大振幅之亞重力波,並在港口及灣澳海域,藉港灣內 外海域的協振盪作用,而激發港灣振盪。

5.1 結論與建議

本研究應用亞重力波的生成理論與波動特性,結合交通部運輸研 究所港灣技術研究中心長年在臺灣 5 個國際商港海域執行海氣象監測 之長期性紀錄,針對颱風期間,透過花蓮港及蘇澳港外亞重力波源的頻 譜分析與辨識,再藉低頻激振波動之協振盪作用,將港內、外之波動振 盪特性與型態作聯結,並經相互之對照比較後,對於花蓮港及蘇澳港在 颱風侵襲影響期間發生港灣振盪之相關課題,可得結論與建議如后。

- 颱風波浪,振幅大,非線性高,本質具有高、低頻成分,其中,高 頻波動之尖峰週期,主要集中在 10~20 秒之長浪區間,因而由颱風 長浪成分所構成之群波,週期一般也會大於 100 秒,這意謂颱風波 浪近最大波高期間,低頻的亞重力波(0.2~2 cpm)會較彰顯,並容易 造成港灣振盪!
- 國內港灣之規劃設計,大多針對屏蔽高頻波動為主,而造成港灣振 盪及不靜穩之主因,往往是低頻波動,特別是由伴隨高頻群波之波 揚與波降所陳示之約束長波或亞重力波。
- 颱風長浪影響期間,花蓮港及蘇澳港內、外,經協振盪作用而引致 港灣振盪之低頻波動源,實際皆係港外閉鎖於高頻群波下之波揚與 波降效應所衍生。
- 4. 花蓮港與蘇澳港,港外颱風與季風波浪之群波,自然皆會伴生波揚 與波降效應,以致港灣振盪,無論在颱風期或季風期,皆必須經常 面對,有所不同的,只是振盪程度之強弱與振盪振幅之大小,會隨 港外颱風長浪高頻群波之波高大小變化而已。
- 5. 花蓮港之港灣振盪現象,應用 MIKE21-EMS 緩坡方程式數值模式,

可藉模擬計算方式,確認花蓮港與其港外的灣澳海域,具港灣振盪 之整體性,因而會顯著受港外亞重力波之協振盪作用支配。

- 6. 花蓮港之港灣振盪,從港域內不同碼頭區及港域外波浪測站之振幅 增幅反應曲線綜合研判,當港外亞重力波之激振週期約為100、130、 160及190秒時,花蓮港內各碼頭區皆將面對振盪程度不等之港灣 振盪。其中,當港外亞重力波之激振週期約為195秒,且具有大於 25公分之較顯著波動振幅時,則花蓮港內各碼頭區將面對振盪程度 最大的港灣共振。
- 7. 花蓮港外,亞重力波次要之自然振盪週期約是160秒,在該激振頻率上,若其波動振幅大於10公分,則因港內部分碼頭區之振幅增幅反應率約可達10左右,因此,該頻率成分之亞重力波所可激發之港灣振盪,反而最顯著且嚴重。
- 蘇澳港外,激發公務船渠產生港灣振盪之颱風長浪波源,主要之激 振頻率對應之週期分別是 273~429 秒(4.5~7.2 分鐘)、143~171 秒、 92~103 秒、60~75 秒,皆係為港外閉鎖於群波下伴隨波揚與波降效 應所衍生之約束長波。
- 9. 蘇澳港外,在強季風期間,閉鎖於港外高頻群波下的約束長波,主 頻略高,趨近於 0.3cpm,週期約 200 秒,由於其略偏離蘇澳港激發 港灣共振之自然振動頻率,以致公務船渠之港池振盪強度普遍偏弱。
- 10.花蓮港與蘇澳港之外港,可激發港灣共振之自然頻率約 0.12~0.15 cpm,週期分別約為 8.5 分鐘與 7 分鐘,只是具有該激振頻率之港外 亞重力波源,因其振幅不大,故而不易促成激烈之港灣振盪。
- 11.閉鎖於港外高頻群波下之波揚與波降低頻波動,其頻率(0.1~2 cpm) 偏屬亞重力波頻段,振盪型態具有緣波特性,這在防制港灣振盪及 釐訂改善對策時,值得特別注意。
- 12.在花蓮港與蘇澳港外,由於閉鎖於高頻群波下之約束長波,其振幅 會隨群波波高之高低而改變大小,因此,對於防制港灣振盪之對策

與改善建議,基於港灣配置之硬體層面調整不易,而僅就韌體層面, 可藉臺灣東部海域颱風長浪演化特性的充分瞭解,在颱風長浪之侵 襲影響期間,無論是否為發佈警報的颱風,當花蓮港或蘇澳港的逐 時監測波浪,若其尖峰週期大於10秒、示性波高大於1.5公尺,即 可依據莊、曾(2019)研提的瘋狗浪預警準則,對駐港船舶,警示加強 繫纜或採取現況之避湧措施。

5.2 研究成果之效益

本研究成果,主要在落實「運輸環境災防技術發展研究」政策之後 續運用;掌握蘇澳港及花蓮港颱風及季風波浪的演化特性;探索及判識 關聯港灣振盪之主要波動源;針對造成港灣振盪之關鍵影響因素,研提 防制措施或改善對策;降減颱風長浪造成港域不靜穩之影響,強化港灣 功能。主要研究效益,綜整條列如下:

- (1)學術成就(科技基礎研究)方面:發表國內研討會論文3篇,出版研究報告1冊。掌握科研課題之廣度與深度,擴展分析觀點,結合海岸專業知識,發揮波浪專業學能,辨識造成蘇澳港與花蓮港港灣振盪之長浪波源,並確認亞重力波主要係源自於高頻波群伴隨非線性效應所衍生之波揚與波降。
- (2) 技術創新(科技整合創新)方面:以國內、外關於近岸海域長浪 衍生之往昔研究成果為基礎,溫故知新,學以致用,並針對颱 風長浪影響期間,應用時頻分析,詳實探討颱風長浪之群波特 性,掌握關聯港灣振盪之主要波動源。
- (3) 在經濟效益(經濟產業促進)方面:配合「災害防救法」,針對導 致港灣振盪之關鍵影響因素,研提降減颱風長浪所造成港域不 靜穩及港灣振盪影響之防制措施或改善對策,強化港灣功能, 縮減颱風長浪影響期間之駐港船舶疏泊規模,具體落實總體性 之港灣防災策略,樽節颱風長浪之防災與減災成本。

- (4) 在社會影響(社會福祉提升、環保安全)方面:促成國家海氣象 觀測資源之永續利用,詳實探討並瞭解颱風長浪在近岸海域之 演化特性,精進海岸管理策略,有效施行港灣防災應變措施, 強化港灣效能,提昇國際商港之港灣形象。
- (5) 在其它效益(政策管理及其它)方面:因應氣候變遷與海岸災害 風險,維護港灣運輸環境,落實「整體海岸管理計畫」,推動「海 岸防護」與「海岸保護」目標,綜整海岸管理之課題與對策, 導引海岸防災措施,健全海岸管理,提昇港灣災防技術。

5.3 可供本所或其他政府機關後續應用情形

本研究配合本所推展「海洋及交通運輸防災技術研究」目標,落實 「運輸環境災防技術發展研究」項目,面對颱風長浪經常侵襲而造成港 灣振盪之蘇澳港與花蓮港,有效應用國家海氣象觀測資源,結合海岸專 業知識,發揮波浪專業學能,詳實探討颱風長浪之群波特性,掌握關聯 港灣振盪之主要波動源,針對導致港灣振盪之關鍵影響因素,發揮海岸 專業學能,學以致用,研提降減颱風長浪所造成港域不靜穩及港灣振盪 影響之防制措施或改善對策,強化港灣功能,縮減颱風長浪影響期間之 駐港船舶疏泊規模,具體落實總體性之港灣防災策略,樽節颱風長浪之 防災與減災成本,降低港灣營運風險。相關具體成果可做為交通部、各 港務分公司及各工程顧問公司等相關產、官單位從事港灣規劃、設計、 擴建、維護及港灣防災的應用參據。

參考文獻

- 1. AnCAD (2014) Visual Signal Reference Guide, Visual Signal 1.5 Professional, AnCAD, Inc. (逸奇科技公司)
- 2. Anouk de Bakker, (2017) "Infragravity waves," Available from http://www.coastalwiki.org/wiki/Infragravity_waves
- 3. Bowers, E.C. (1977) "Harbour Resonance due to Set-Down beneath Wave Groups," J. Fluid Mech., Vol. 79, Part 1, pp.71-92.
- 4. Bascom, W., 1980, Waves and beaches: the dynamics of the ocean surface, Anchor/Doubleday Press, Garden City, New York, pp. 366.
- 5. Bendat J. S. and Piersol A.G., 1991, Random data: Analysis and measurement procedures, 2nd edition, John Wiley & Sons, pp. 566.
- 6. Bowers, E. C., 1977, Harbour resonance due to set-down beneath wave groups, J. Fluid Mechanics, Vol. 79, 71-92.
- Dean R.G. and Da1rymple R.A. (1984) , Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists , Prentice-Hall , Englewood Cliffs , New Jersey , USA.
- 8. DHI , 1994 , User Guide and Reference Manual-MIKE 21 Elliptic Mild-Slope Wave Module , Release 2.4 , Danish Hydraulic Jnstitute.
- Environment Agency (2010) Modelling the Effect of Nearshore Detached Breakwaters on Sandy Macro-Tidal Coasts, Environment Agency, SC0600026/R2, Bristol, UK. Author(s): Hakeem Johnson, Jort Wilkens, Andy Parsons and Tim Chesher. pp.161.
- 10. Funke, E. R. and Mansard, E. P. D., 1980, On the synthesis of realistic sea states, Proc. 17th Costal Engineering Conference, 2974-2991.
- 11. Goda, Y., 1970, On wave groups, Proc. Conference on behaviour of offshore structures, Vol. 1, 115-128.
- 12. Herbers, T.H.C., Elgar, S., Guza, R.T. and O'Reilly, W.C. (1995) "Infragravity-Frequency (0.005-0.05Hz) Motions on the Shelf. Part

II: Free Waves," J. Physical Oceanography, Vol. 25, pp.1063–1079.

- 13. Horikawa, K. (1978) Coastal Engineering _An Introduction to Ocean Engineering, Chapter 2, University of Tokyo, Japan.
- Hsu, J.R.C. and Evans, C. (1989) Parabolic Bay Shapes and Applications, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Part 2, London: Thomas Telford, Vol. 87, pp. 557-570.
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C. and Liu, H.H. (1998) "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis," Proc. R. Soc., A 454, pp.903–995.
- Karambas, Th.V. (2012) Design of Detached Breakwaters for Coastal Protection: Development and Application of an Advanced Numerical Model, Coastal Engineering, pp. 1249-1257.
- Klein, A.H.F., Vargas, A., Raabe, A.L.A. and Hsu, J.R.C. (2003) Visual Assessment of Bayed Beach Stability with Computer Software, Computers and Geosciences, Vol. 29, pp. 1249-1257.
- List, J.H., 1991, Wave groupiness variations in the nearshore, Coastal Engineering, Vol. 15, no. 5-6, 475-496.
- Longuet-Higgins, M. S., and Stewart, R. W., 1964, Radiation stress in water waves: A physical discussion with applications, Deep Sea Research, Vol. 11, 529-562.
- Maa, Jerome P. Y., and Tsai, C. H., 2006, Can edge waves be generated using mild slope or Boussinesq equation, Proc. 28th Ocean Engineering Conference in Taiwan, 159-164.
- Madsen, P. A., Sorensen, O. R. and Schäffer, H. A., 1997, Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: Surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves, Coastal Engineering, Vol. 32, 289-319.
- 22. Mallat, S. G., 1999, A wavelet tour of signal processing, Academic Press, pp. 566.

- 23. Masselink, G., 1995, Group bound long waves as a source of infragravity energy in the surf zone, Continental Shelf Research, Vol. 15, No. 13, 1525-1547.
- 24. Munk, W. H., 1949, Surf beats, Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 30, 849-854.
- 25. Munk, W.H. (1951) Origin and generation of waves, Proc. 1st Conf. on Coastal Eng.,1-4.
- Nolte, K.G. and Hsu, F.H., 1972, Statistics of ocean wave groups, Proc. the Offshore Technology Conference, 637-643.
- 27. Rye, H., 1982, Ocean wave groups, Report UR-82-18, Department of Marine Technology, Unitersity of Norwegian Trondheim.
- Tucker, M.J. (1991) Waves in Ocean engineering : Measurement, Analysis, Interpretation, Ellis Horwood Series in Marine Science, E. Horwood, New York, , 431p.
- 29. 加藤一正(1999),親水海岸之開創與管理,中日工程技術研討會, 公共工程組論丈集,中國工程師學會。
- 30. 林琿、閭國年、宋志堯(2000), "東中國海潮波系統與海岸演變模擬研究",科學出版社,中國,共266頁。
- 31. 郭一羽 (2001), "海岸工程學", 文山書局。
- 32. 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卷,1期,1-22。
- 33. 簡仲璟、曾相茂,2002,颱風波浪之群波特性,第24 屆海洋工程 研討會論文集,411-420。
- 34. 簡宏任,2003,民國 85 至 92 年颱風紀錄-花蓮港務局,私人通訊。
- 35. 鄭欽鐘,2004,以布斯尼斯克模式探討花蓮港港池共振現象,國 立台灣海洋大學海洋科學研究所碩士論文。

- 36. 鄒志利(2005)「水波理論及其應用」,科學出版社,北京,中國, 共 565 頁。
- 37. 莊文傑、江中權(2005), "臺灣海峽的水深地形對潮波振盪之影響 研究", MOTC-IOT-93-H3DA004 基本研究報告,交通部運輸研 究所港灣技術研究中心,共438頁。
- 38. 莊文傑、江中權(2006),「臺灣四周海域旋轉潮波系統之同潮圖」, 第 28 屆海洋工程研討會論文集,國立中山大學,臺灣海洋工程學 會,pp.325-330。
- 39. 莊文傑、曾相茂、江中權(2006),「潮汐資料之補遺及其在暴潮位 萃取之應用」,第28 屆海洋工程研討會論文集,國立中山大學, 臺灣海洋工程學會,第277-282頁。
- 40. 莊文傑、林立青、張永欣(2007),「氣象潮位的萃取及其在暴潮預報的應用」,第29屆海洋工程研討會論文集,國立成功大學,臺灣海洋工程學會,第207-212頁。
- 41. 林立青、莊文傑、張憲國,2008,應用 EEMD 法於花蓮港颱風期 間水位振盪,第30 屆海洋工程研討會論文集,319-324。
- 42. 莊文傑、林立青,2009,台灣東部海岸颱風期間亞重力波特性之時頻分析,第31 屆海洋工程研討會論文集。梁乃匡、林文宗(1978)「薇拉颱風波浪寶測與推算之比較」,第2 屆海洋工程研討會論文集,第23-27 頁。
- 43. 莊文傑、曾相茂(2011), "日本 311 大海嘯對臺灣環島海岸及港
 灣之衝擊",第20 屆水利工程研討會論文集,第 J001 頁。
- 44. 莊文傑、林立青、滕春慈(2011), "臺灣環島海岸實測日本東北大 地震所引發海嘯之波動特性分析",第 33 屆海洋工程研討會論 文集,第 553-558 頁。
- 45. 氣象局(2014a)氣象百科_海象問答_波浪,中央氣象局編印。 (http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/marine/wave001.htm)

- 46. 氣象局(2014b)氣象百科_颱風百問,中央氣象局編印。 (http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/ encyclopedia/typhoon.pdf)
- 47. 莊文傑、曾相茂(2014),「淺談瘋狗浪之預警」,第36屆海洋工程研討會論文集,第95-100頁。
- 48. 莊文傑、曾相茂、張憲國、林珂如(2014),"瘋狗浪之預警_概念可 行性評估報告",民眾自主防減災創意徵集,國家實驗研究院台灣 颱風洪水研究中心主辦。
- 49. 莊文傑、張憲國、曾相茂(2014),「臺灣七大商港海域之潮流橢圓 特性」,海洋工程學刊,第十四卷,第三期,第177-200頁。
- 50. 氣象局(2014a), "氣象百科_海象問答_波浪",中央氣象局編印。 (http://www.cwb.gov.tw/V7/ knowledge/marine/wave001.htm)
- 51. 氣象局(2014b), "氣象百科_颱風百問", 中央氣象局編印。 (http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/ encyclopedia/typhoon.pdf)
- 52. 陳盈智、董東璟、蔡政翰、蔡仁智、滕春慈、朱啟豪(2015),「以 實測資料探討颱風湧浪對異常波浪發生之影響」,第 37 屆海洋工 程研討會論文集,第 89-94 頁。
- 53. 曾相茂、何良勝、曾俊傑(2015), "103 年臺灣地區國際港附近海 域海氣象現場調查分析研究(2/4)",交通部運輸研究所, MOTC-IOT-103- H2DA001a 基本研究報告,共 373 頁。
- 54. 曾相茂、何良勝、曾俊傑(2015),"103 年臺灣地區國際港附近海域 海氣象現場調查分析研究(2/4)",交通部運輸研究所, MOTC-IOT-103- H2DA001a 基本研究報告,共 373 頁。
- 55. 莊文傑、曾相茂(2015),「臺灣東海岸颱風長浪演化歷程之共通特 性」,第37 屆海洋工程研討會論文集,第83-88 頁。
- 56. 莊文傑、曾相茂(2015),「臺灣五大商港海域之波浪觀測與長浪之 辨識」,2015 天氣分析與預報研討會論文集,中央氣象局,第5-11-L 1-6頁。

- 57. 莊文傑、曾相茂、張憲國 (2015),「AWCP 之波浪監測紀錄分析 與其統計特性」,第37 屆海洋工程研討會論文集,第77-82 頁。
- 58. 莊文傑、曾相茂(2016),「東北季風期基隆港與臺中港長浪之關聯 性」,第38 屆海洋工程研討會,第5-10頁。
- 59. 莊文傑、曾相茂(2016),「臺灣海域之東北季風與國內五大商港海域之長浪特性」,2016 天氣分析與預報研討會論文集,中央氣象局,第A5-11_1-6頁。
- 60. 蔡政翰、董東璟、蔡仁智(2016),「台灣附近的瘋狗浪和異常波浪」, 海洋及水下科技季刊,第二十六卷,第四期,第3-8頁。
- 61. 滕春慈、朱啟豪、林芳如、陳琬婷(2016),「氣象局瘋狗浪與異常 波浪之預測與預警」,海洋及水下科技季刊,第二十六卷,第四期, 第9-14頁。
- 62. 莊文傑、曾相茂、張憲國(2016),「颱風長浪演化與瘋狗浪之預警」, 海洋及水下科技季刊,第二十六卷,第四期,第 22-31 頁。
- 63. 莊文傑、曾相茂(2017),「臺灣海域夏季颱風與冬季季風波浪之近 岸觀測特性」,2017 天氣分析與預報研討會論文集,中央氣象局, 第 5.7_1-5 頁。
- 64. 莊文傑、曾相茂(2017),「臺灣海峽南段西南季風波浪之觀測特性」,第 39 屆海洋工程研討會,第 89-94 頁。
- 65. 氣象局(2017),「氣象百科」,交通部中央氣象局,<u>http://www.</u> <u>cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/me000.htm</u>
- 66. 莊文傑、曾相茂(2018),「臺灣東部近海颱風與東北季風波浪之時 頻演化特性」,2018 天氣分析與預報研討會論文集,中央氣象局, 第7-4-L_1-6頁。
- 67. 黃富國、王淑娟(2018), "0206 花蓮地震土壤液化害相關問題探討",國家災害防救科技中心災害防救電子報,第158 期,第1-20頁。

- 68. 許尚逸、盧志杰、楊炫智. 黃郁惟、劉佳泓、黃俊鴻(2018), "2018 年花蓮地震調查與探討:花蓮港港區震災調查與初步分析", NCREE 大地組簡報,國家實驗研究院, https://conf.ncree.org.tw/ download/0-A1070529-花蓮港港區震災調查與初步分析.pdf。
- 69. 吳立中、高家俊、滕春慈、林燕璋 (2018), "2018 年 2 月花蓮地 震所引發港池盪漾之研究", 107 年天氣分析與預報研討會論文 集,海象測報與應用,中央氣象局,7-14-L。
- 70. 莊文傑、陳進益、曾相茂(2019), "花蓮 0206 大地震引致之港池 振盪特性探討",108 年天氣分析與預報研討會論文集,A7 海象 測報與應用,中央氣象局,A7-13。
- 71. 莊文傑、曾相茂(2019),"颱風與季風波浪特性分析及其在瘋狗浪 預警之應用",MOTC-IOT-107-H3DA001c基本研究報告,交通部 運輸研究所港灣技術研究中心,共187頁。
- 72. 莊文傑、陳進益、曾相茂(2019),「花蓮 0206 大地震引致之港池 振盪特性探討」,108 年天氣分析與預報研討會論文集,海象測報 與應用,中央氣象局,A7 13 L。
- 73. 莊文傑、陳進益、曾相茂(2019),「潮位密集紀錄在地震後之港區 勘災應用」,第41 屆海洋工程研討會,第315-320頁。
- 74. 莊文傑(2020),「岬灣海灘在研判海岸地形侵淤變遷之應用」,第
 42 屆海洋工程研討會論文集,第165-171頁。
- 75. 莊文傑(2020),「離岸堤效應導致臺東近岸港口航道之淤塞」,第
 42 屆海洋工程研討會論文集,第171-176頁。

附錄1 花蓮港與蘇澳港港灣振盪歷年相關之 專題研究文獻

花蓮港與蘇澳港港灣振盪相關之國內研究文獻

- 梁乃匡(1986、1987),台灣四周海象氣象調查研究(一)、(二),港灣技 術研究所。
- 歐陽餘慶、梁乃匡(1988、1989),台灣四周海象氣象調查研究(三)、
 (四),港灣技術研究所。
- 張金機、曾相茂(1990),台灣四周海象氣象調查研究,港灣技術研究 所。
- 曾相茂(1990),花蓮港附近海域波浪與海流之特性,第12 屆海洋工程研 討會,第828-848頁。
- 蘇青和、蔡丁貴、歐善惠(1991),數值方法及幅射邊界在港池共振應用 之探討,第13屆海洋工程研討會,第23-37頁。
- 張金機、曾相茂(1993),花蓮港港池不穩靜初步調查研究,第15屆海洋 工程研討會,第489-502頁。
- 王慶福、黃清和、蘇青和、曾相茂、簡仲璟、張金機、蔡立宏、莊文傑、 吳基、林柏青、邱永芳、江金德(1994),花蓮港港灣設施改善計畫之研 究,交通處港灣技術研究所。
- 張金機(1994),蘇澳港與花蓮港八十三年颱風災害探討,專刊第99號, 港灣技術研究所。
- 張金機、曾相茂(1995),花蓮港港池不穩靜調查研究,第17屆海洋工程 研討會暨兩岸港口及海洋工程研討會,第131-143頁。
- 10. 蘇青和、陳明宗(1995),花蓮港港池之共振特性探討,第17屆海洋工程 研討會暨1995兩岸港口及海岸開發研討會論,第113-129頁。
- 徐進華(1995),長波非線性效應研究,84年度基本研究計畫成果論文集,港灣技術研究所,第423-454頁。
- 徐進華(1996),花蓮和蘇澳港附近長波研究,台灣省交通處港灣技術研究所。
- 張金機(1996),花蓮港港灣設施改善計畫之研究-綜合改善方案,專刊 131 號,台灣省政府交通處港灣投術研究所。
- 曾相茂(1996),花蓮港港灣設施改善計畫之研究-現場海象調查,專利 126號,交通處港灣技術研究所。
- 5. 簡仲璟、邱永芳 (1996),花蓮港港灣設施改善計畫之研究-模型試驗,專

刊127號,交通處港灣技術研究所。

- 蘇青和、蔡丁貴、張金機(1996),花蓮港港灣設施改善計畫之研究-數值 模擬,專刊128號,交通處港灣技術研究所。
- 張金機(1996),花蓮港港灣設施改善計畫之研究-綜合改善方案,專利 131號,交通處港灣技術研究所。
- 張金機(1996),花蓮港長波與碇泊船隻動態關係,花蓮港港池振盪及其 改善方案研討會,。
- 蘇青和(1996),花蓮港港池振盪數值模擬,花蓮港港池振盪及其改善方案研討會,第83-110頁。
- 曾相茂、簡仲璟(1996),花蓮港海域海象現場調查與分析,花蓮港港池 振盪及其改善方案研討會,第31-59頁。
- 李兆芳、莊文傑(1997),蘇澳港防波堤改善工程規劃_港池振盪數值之模 擬,交通處港灣技術研究所。
- 12. 黃清和、王慶福、蔡立宏、張金機、簡仲璟、何良勝(1997),花蓮港整 體規劃及未來發展計劃_長浪及漂砂防制研究-綜合改善方案研定,交通處 港灣技術研究所。
- 13. 張憲國(1999),花蓮港波浪預警系統之應用研究-港外波浪動態之特性 (I),水工 88-3,交通大學土木工程研究所。
- 張憲國、郭一羽(1999),花蓮港共振機制研究,水工 88-3,交通大學土 木工程研究所,共 39頁。
- 15. 黃煌煇、蘇仕峰、黃國書(1999),不規則波之淺化變形與長波振盪之實 驗研究,第21 屆海洋工程研討會,第9-16頁
- 16. 簡仲璟、曾相茂(1999),花蓮港颱風波浪特性研究,第21 屆海洋工程研 討會,第55-62頁。
- 17. 張金機、邱永芳、曾相茂、何良勝(1999),花蓮港商漁港分道與港池穩 靜水工模型試驗研究,交通處港灣技術研究所。
- 蘇青和、劉立方、蔡丁貴、陳冠宇(1999),非線性港池振盪數值模式研究,交通處港灣技術研究所。
- 劉立方、蔡丁貴、蘇青和(2000),非線性波浪引起港池振盪之研究
 (二),交通部運輸研究所港灣技術研究中心。
- 20. 蕭松山、王昭文、方惠民、陳建興(2000),雙互換邊界元素法解析花蓮 港港池波動問題,第22 屆海洋工程研討會,第327-334頁。

- 郭一羽(2000),颱風低頻成份波與港池振盪相關性之研究,行政院國家 科學委員會。
- 22. 張憲國(2000),花蓮港波浪預警系統之應用研究-港外波浪動態之特性 (II),交通部運輸研究所港灣技術研究中心。
- 23. 徐進華(2000),花蓮港港內和港外長波數值模式研究,交通處港灣技術研究所。
- 24. 陳冠宇(2000),港池共振機制探討,港灣報導第52期,交通部運輸研究 所港灣技術研究中心,第30-38頁。
- 25. 莊文傑(2000),亞重力波與花蓮港之波動共振,港灣報導第54期,交通 處港灣技術研究所,第26-42頁。
- 26. 莊文傑、江中權(2000),亞重力波引起花蓮港之共振機制與對策,第22 屆海洋工程研討會,第578-585頁。
- 27. 邱永芳、蔡金吉、張金機(2000),花蓮港商漁港分道與港池穩靜水工模型試驗研究-水工模型試驗報告,交通部運輸研究所港灣技術研究中心。
- 28. 邱永芳、蔡瑤堂、張金機、張炯殷、洪憲忠(2000),花蓮港商漁港分道 與港池穩靜水工模型試驗研究-可行性分析,交通部運輸研究所港灣技術 研究中心。
- 29. 徐進華(2001),花蓮港港內和港外長波數值模式研究,交通部運輸研究 所港灣技術研究中心。
- 30. 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,第1卷,第1期,第1-22頁。
- 徐進華(2002),花蓮港共振強度估算模式研究,交通部運輸研究所灣技 術研究中心。
- 32. 張玉龍(2002),花蓮港港池共振特性改變之研究,臺灣大學海洋研究所。
- 33. 簡仲璟、曾相茂(2002),颱風波浪之群波特性,第24 屆海洋工程研討會,第411-420頁。
- 34. 陳冠宇、簡仲璟、蘇青和、曾相茂(2002),邊緣波引致港池共振的機制-以花蓮港為例,交通部運輸研究所港灣技術研究中心。
- 35. 郭一羽、林明儀、曾相茂(2002),花蓮港池振盪現象的探討,海洋工程 學刊,第2卷,第1期,第55-71頁。
- 36. 張憲國、林立青(2003),花蓮港港池振盪之頻率與振幅辨識模式,第25 屆海洋工程研討會,第103-109頁。

- 37. 張憲國、林立青(2003),花蓮港內港水位共振訊號之模擬,第25屆海洋 工程研討會論文集,第214-219頁。
- 38. 蘇明陽,2003,花蓮港港池振盪入射波種類之探討及建議,第25屆海洋 工程研討會論文集,917 - 923。
- 39. 蕭丁訓、方禎祥、蕭俊賢(2003),花蓮港港池共振問題相關研究之回顧 與展望,第25屆海洋工程研討會,第889-896頁。
- 40. 邱永芳、蔡金吉、張富東(2003),花蓮港長浪防治之試驗研究,第25屆 海洋工程研討會,第655-660頁。
- 林立青、莊文傑、張憲國(2004),花蓮港內港水位共振訊號之模擬,第 26 屆海洋工程研討會,第214-219頁。
- 42. 鄭欽鐘、蔡政翰(2004),以布斯尼斯克模式探討花蓮港池共振現象,第
 26 屆海洋工程研討會,第167-174頁。
- 43. 邱永芳、林炤圭、簡仲璟(2004),花蓮港長浪特性試驗研究,海洋工程
 學刊,第4卷,第1期,第89-121頁。
- 44. Chen, G. Y., Chien C. C., Su, C. H. and Yseng, H. M. (2004), Resonance Induced by Edge Wave in Hua-Lien Harbor, Journal of Oceanography, Vol. 60, pp.1035-1043.
- 45. 林炤圭、岳景雲(2005),花蓮港港池共振機制研究(I),交通部運輸研究 所。
- 46. 徐進華(2006),臺灣東岸港口共振現象改善方案研究(1/4),交通部運輸 研究所港灣技術研究中心。
- 47. 林炤圭、岳景雲、林玉峰、凃宗男(2006),花蓮港港池共振機制研究
 (1/4),交通部運輸研究所。
- 48. 林炤圭、林玉峰、蕭俊賢、鄭璟生、邱永芳(2006),花蓮港長週期振盪 之觀測研究,第28屆海洋工程研討會,第811-816頁。
- 49. 黃煌煇、林宇銜(2006),亞重力波生成之實驗分析,海洋工程學刊,第
 6卷,第1期,第45-60頁。
- 50. 吳佳珊、陳頎忞、陳冠宇(2006),以 Matlab PDE 模組探討邊緣波導致之 花蓮港港池共振,第28 屆海洋工程研討會,第807-810頁。
- 51. 陳冠宇、簡仲璟、蘇青和、曾相茂(2006),邊緣波引致花蓮港共振問題 之研究,港灣報導第74期,交通處港灣技術研究所,第27-40頁。
- 52. Maa, Jerome P. Y., and Tsai, C. H. (2006) Can edge waves be generated using mild slope or Boussinesq equation, Proc. 28th

Ocean Engineering Conference in Taiwan, pp. 159-164.

- 53. 徐進華(2007),臺灣東岸港口共振現象改善方案研究(2/4),交通部運輸 研究所港灣技術研究中心。
- 54. 孫君偉、劉宏道(2007),花蓮港港池共振改善與整體規劃,交通部運輸 研究所。
- 55. 林炤圭、岳景雲、林玉峰、涂宗男、簡仲璟(2007),花蓮港港池共振機 制研究(2/4),交通部運輸研究所。
- 56. 林玉峰、林炤圭(2007),台灣東部海岸的長週期波動觀測研究,行政院 國家科學委員會。
- 57. 徐進華(2008),臺灣東岸港口共振現象改善方案研究(3/4),交通部運輸 研究所港灣技術研究中心。
- 58. 林炤圭、岳景雲、林玉峰、涂宗男、簡仲璟、李俊穎(2008),花蓮港港 池共振機制研究(3/4),交通部運輸研究所。
- 59. 林立青、莊文傑、張憲國(2008),應用 EEMD 法於花蓮港颱風期間水位振 盪型態之辨識,第30 屆海洋工程研討會,第319-324頁。
- 60. 蔡政翰(2008),群波為亞重力波來源之研究(I),行政院國家科學委員會。
- 61. 馬平亞、蔡正翰、莊文傑 (2008),花蓮海域的長波變形與解決花蓮港共振之初步研究,港灣報導第79期,第26-44頁。
- 62. 蔡立宏、李錦珍、邢秀英(2008),花蓮港港池共振問題對策探討,港灣 報導第81期,第20-42頁。
- 63. 徐進華(2009),臺灣東岸港口共振現象改善方案研究(4/4),交通部運輸 研究所港灣技術研究中心。
- 64. 林炤圭、岳景雲、林玉峰、簡仲璟、李俊穎(2009),花蓮港港池共振機 制研究(4/4),交通部運輸研究所。
- 65. 邱永芳、簡仲璟、何良勝、蘇青和、張富東、李俊穎(2009),花蓮港港 池共振改善計畫,交通部運輸研究所。
- 66. 楊一中、陳佑廷、蔡政翰(2009),群波與花蓮港內亞重力波,第31 屆海 洋工程研討會,第55-60頁。
- 67. 莊文傑、林立青(2009),臺灣東部海岸颱風期間亞重力波特性之時頻分析,第31 屆海洋工程研討會,第417-422頁。
- 68. 莊文傑、曾相茂 (2009),花蓮港近岸引致港灣共振之亞重力波波源辨

識,第31 屆海洋工程研討會,第435-440頁。

- 69. 簡仲璟、張富東、單誠基(2009),花蓮港颱風波浪之長週期波動研究,
 第31 屆海洋工程研討會,第441-446頁。
- 70. 蔡政翰(2009),群波為亞重力波來源之研究(II),行政院國家科學委員會。
- 71. 蔡政翰(2010),群波為亞重力波來源之研究(III),行政院國家科學委員會。
- 72. Maa, J. P. Y., Tsai, C.H., Juang, W.J., and Tseng H.M. (2010), A preliminary study on Typhoon Tim induced resonance at Hualien Harbor, Taiwan, Ocean Dynamics, Vol. 61(4), pp. 411-423.
- 73. 楊自立、楊一中、陳佑廷、蔡政翰(2010),使用 Boussinesq 模式探討群 波與花蓮港亞重力波的關係,第32 屆海洋工程研討會,第109-113 頁。
- 74. 楊一中(2010),群波與花蓮港內亞重力波,國立臺灣海洋大學海洋環境 資訊系,碩士論文,共79頁。
- 75. 蔡立宏 (2010),花蓮港港池共振機制及改善對策之研究,交通部運輸研究所。
- 76. 楊自立、楊一中、陳佑廷、蔡政翰(2011),颱風時期花蓮港亞重力波之 探討,第33 屆海洋工程研討會,第13-18頁。
- 77. 林立青(2013),花蓮港共振源譜之探討,港灣報導,第95期,第29-38 頁。
- 78. 劉正琪、李兆芳、李俊穎、陳明宗、蘇青和(2014),蘇澳港防波堤遮蔽 與港域共振之模擬,第36 屆海洋工程研討會論文集,第83-88 頁。
- 79. 洪維屏、邱永芳、蔡立宏(2017),蘇澳港公務船渠港池靜穩度探討,第 39 屆海洋工程研討會,第48-53頁。
- 80. 莊文傑、曾相茂(2018),引致蘇澳港內港池振盪之長浪波源辨識,第40 屆海洋工程研討會,第297-302頁。
- 81. 夏武成、謝杰恩、周立翔、蘇仕峯(2020),蘇澳港長週期波動之數值模擬,第42 屆海洋工程研討會,第622-627頁。

附錄 2 期末報告審查簡報資料












附 2-5





$\overline{L} \approx \overline{L}$	4	,	n = 1, 2		n	為港渠	國大振盪	波之日	沪點數
h = 10 m; l = 4300 m. (莊文傑·2000)									
n (節點數)	3	4	5	6	7	8	9	10	11
理論週期	347	248	<mark>193</mark>	<mark>158</mark>	<mark>133</mark>	116	102	<mark>91</mark>	83
計算週期	5~6分鐘	~4分鐘	194s	156s	134s		104s	90s	

12













花蓮港抑制港灣振盪之 硬性與軟性改善措施與對策



將現有具I型突堤型態之南外防波堤,改變為I或 Γ之漁尾型,藉以造成高頻群波在現有灣澳內, 因多重外防波堤構成之波浪繞射效應,而抑制高 頻群波以及伴隨約束長波之振幅(波高),並可減 小通過港口航道窄縮水域之自由長波振幅,進而 可促成港灣振盪強度之減弱,達成防制及改善港 灣振盪之目標。

- 在颱風長浪影響期間,依據IHMT在港外即時監測之 高頻群波逐時紀錄,應用中央移動平均法或EMD之 IMF重組,分析伴随群波之波揚與波降大小,掌握約 束長波之顯著週期(頻率)與振幅,進而透過港內各碼 何區的振幅增幅反應曲線,推算並預估港灣振盪之振 幅,進而可依據駐港船舶特性,加強繁鑽或採取現況 之避湧措施。
- 另外,在充分瞭解及考量臺灣東部海域颱風長浪的演 化特性後,對於颱風長浪,無論是否為發佈警報的颱 風,當花蓮港或蘇澳港的逐時監測波浪,若其尖峰週 期大於10秒、示性波高大於1.5公尺,即可依據莊、曾 (2019)研提的瘋狗浪預警準則,對駐港船舶,警示加 強繁鑽或採取現況之避湧措施。

 $\overline{\eta} = ka^2/2\sinh 2kh$









附錄3期末報告審查會議紀錄及委員意見處理表

會議簽到表

會議名稱:「MOTC-IOT-109-H3CA001c 臺灣東部海岸颱風長浪群波引致之港 灣振盪」自行研究計畫期末報告審查會議

時間: 109年12月9日(星期三)上午10時30分

地點:本所港研中心2樓簡報室

主持人:李俊穎科長

委員/出席單位	簽名
王錦榮委員	王辉荣
鄭益興委員	戴盖姆
鄭智中委員	電影中
賴瑞應委員	鹤 帝勇
蘇青和委員	請假(那有會議)
李俊穎委員	香雪.額
計畫主持人 莊文傑研究員	報文傑
港研中心	傳版創、蒙世富

六、主席致詞:略。

七、計畫主持人簡報:參見附錄2。

- 八、審查委員意見:參見後附委員意見處理表。
- 九、會議結論:

1. 經出席委員同意,本計畫期末報告內容審查通過。

2. 報告書內容請依審查委員意見修正,並依規定期程提出報告書印製申請。
 十、散會(上午12時10分)

審查委員評審意見與建議	處理情形
一、 王錦榮 委員 (評分:91.5)	感謝王委員的出席審查。所賜教指正之 意見處理如后:
 簡報 p.10,港內港外波動週期一致, 而振幅大小也差不多(100sec 長週 期),p.11 協振盪之港灣共振狀態,最 外側之波節點位置應概約位在港口 處,故可綜合評估為花蓮港內、外港 區及港外灣澳為整體港域,實屬合 理。 	1. 感謝詳細檢閱報告內文及指教。
 花蓮港颱風期間之長浪,引致港灣共 振研究的亞重力波,影響港池震盪。 	2. 感謝詳細檢閱報告內文及指教。
 花蓮港外尖峰週期大於 10sec,示性 波高大於 1.5m,對花蓮港有港池振盪 情形影響船舶靠泊靜穩應示警,建議 有一更完整的建議。 	 花蓮港外之颱風波浪監測,當尖峰 週期大於 10sec,示性波高大於 1.5m,即意謂颱風長浪波高漸增,群 波漸趨明顯,以致伴隨之波揚與波 降(亞重力波)振幅亦逐漸增大,詳參 第2.5.4 節及第3.5 節內文,因此, 應啟動強港灣振盪之防災應變或採 取避湧之減災措施。至於更具體防 災應變之相關作為與減災措施,仍 建請由港務管理當局配合實務,自 行再作詳細研議。
 為改善亞重力波對花蓮港影響,研究 建議在堤口兩岸增建(沿岸邊)防波 堤,建議可再進一步評估其可行性。 	 為減小花蓮港外灣澳區之亞重力波 振幅,本研究建議將既有 I 型之西防 波堤,改變為 r 或 Γ 型,具體配置 方案與可行性評估,建請港務管理 當局與本所共同研議,再將可行性 評估列入後續研究辦理。
 為改善亞重力波(波降、波揚)對蘇澳 港影響,在公務船渠碎波堤造成振 盪,研究建議改善碎波堤改善方案。 	 建請港務管理當局與本所共同研 議,再將具體配置方案與可行性評 估列入後續研究辦理。

-		
6.	建議加強花蓮港與蘇澳港港外之波 浪觀測,以利取得即時資訊,俾做為 預先示警的依據。。	6. 基於港外、港內港灣協振盪特性,為 改善花蓮港與蘇澳港之港灣振盪現 象,強化軟性防災應變措施,執行硬 體防制策略與評估配置方案之可行 性,對於既有之颱風波浪監測設施 與配置,除了在港外應持續長期施 行外,尚應加強港口外灣澳區及內、 外港之同步監測,特別是以1Hz取 樣率逐時連續監測。
二 (評	、鄭益興 委員 分:88)	感謝鄭委員的出席審查。所賜教指正之 意見處理如后:
1.	本研究具體指出花蓮港、蘇澳港所處 之地理、海象環境類似,因湧浪造成 之港域共振之原因雷同。	1. 感謝詳細檢閱報告內文及指教。
2.	本研究針對花蓮港共振之研究,將範 圍從港內延伸至南北濱天然灣澳之 海域,也明確指出引致港池共振係因 港外岬灣海灘內之高頻群波及其伴 隨之波揚及波降現象所衍生之約束 長波,此係亞重力波,且因其波長極 長,能量消滅不易,至港外、港內之 波動協振盪,而使港內碼頭有明顯之 低頻震盪。	2. 感謝詳細檢閱報告內文及指教。
3.	本研究提出具體硬體、韌體改善防制 對策,實是珍貴,確可提供進一步之 應用。	 感謝詳細檢閱報告內文及肯定。相 關硬體、韌體之改善防制對策,建請 貴管理當局與本所共同研議,再將 具體配置方案與可行性評估,列入 後續研究辦理。
三 (評	、 鄭智中 委員 分:89)	感謝鄭委員的出席審查。所賜教指正之 意見處理如后:
1.	感謝提出蘇澳港硬體設施與韌體的 建議。	1. 感謝詳細檢閱報告內文及肯定。
2.	目前公務船渠有龍德造船廠造船,提 出設置閘門,不知這種作法可否改善 該港渠的共振,是否間接造成其他港 渠的靜穩度不佳。	 在颱風波浪影響期間,蘇澳港公務 船渠港灣振盪之激振波源,實際上 是由通過港口主航道,入射外港之 自由長波,經碎波堤之全反射作用,

 受限於港型下,貴單位研究希望增加 如何改善共振的影響,因為在蘇澳港 業者希望能於颱風期也能靠泊,不需 避浪。 	而激發第三港渠之協振盪所引起。 單純在公務船渠設置閘門,雖可防 制第三港線設置閘門,雖可防 制第三港約配合,仍難竟其功。根本 的改善對能配合,仍難竟其功。根本 的改善對作用,降低第三港渠之港灣 振盪強度為主。 3. 感謝詳細檢閱報告內文及肯定。本 研究為自行表本所及本單位之立場與 意見。因此,僅就第4.5節之建議防 制措施與間。在就第4.5節之建議防 制措施與間。方和完結論與 意見。因此,僅就第4.5節之建議防 制提於颱風長浪伴隨群 波的波下,入射外港之自由長波,原即 已具有較作用,因此,外港域及第三 港渠,皆會受到較大之港灣振盪影 響,則根本的改善對策,仍應以 減小碎波堤之全反射作用,降低第 三港渠之港灣振盪強度為主。
	半期初年日八山前南本 公田村下不下
四、賴瑞應 安貝 (評分:89)	感謝賴 安貝的出席 番 鱼。 所 賜 教 指 止 之 意見處理如后:
 本研究針對過去東部港灣震盪相關 研究做很完整的回顧與檢討,也針對 颱風事件找出花蓮與蘇澳港的共振 頻率並研提軟硬體的改善措施,研究 成果豐碩,值得肯定。 	1. 感謝詳細檢閱報告內文及肯定。
 針對花蓮港及蘇澳港之硬體改善建 議,建議後續能以數值模擬及水工模 型試驗來驗證具體布置尺寸規模,以 供各港後續施政之參考。 	 相關硬體、韌體之改善防制對策,建 請花蓮港及蘇澳港管理當局能與本 所共同合作研議,參照第3.8節及第 4.5節所研提之建議防制措施與改 善對策,辦理後續具體配置方案與 可行性評估。

五、李俊穎 委員 (評分:88)	感謝李委員的出席審查。所賜教指正之 意見處理如后:
 文內所提及「協震盪」建議補述説 明。 	 感謝詳細檢閱報告內文。關於「協振 盪」,顧名思義,其係指相連結之港 灣,當其中一個港灣受具特定週期 或頻率之入射波源激振,而使其他 相連結之港灣,亦具有相同之振盪 週期或頻率之意。簡此補述說明。
 所提及尖峰週期大於 10sec 作為預導 指標之一,但颱風波浪來時其 Tp 常 會跳動現象,那實際操作時是否有進 一步建議。 	 波浪的尖峰週期(Tp),係指逐時波浪 紀錄之波譜分析結果中,具有最大 波動能量或近輪之波動成分所結麼的一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個一個