

98-26-7383
MOTC-IOT-97-H3DB002

花蓮港港池共振機制研究(4/4)



交通部運輸研究所
中華民國 98 年 4 月

98-26-7383
MOTC-IOT-97-H3DB002

花蓮港港池共振機制研究(4/4)

著 者：林炤圭、岳景雲、林玉峰、簡仲璟、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 98 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目資料

花蓮港港池共振機制研究 . (4/4) / 林炤圭等著
. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民
98. 04
面 : 公分
參考書目:面
ISBN 978-986-01-8207-1(平裝)

1. 港埠管理 2. 波動 3. 臺灣

443. 2

98006614

花蓮港港池共振機制研究(4/4)

著 者：林炤圭、岳景雲、林玉峰、簡仲璟、李俊穎

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 98 年 4 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 110 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)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1009800889

ISBN：978-986-01-8207-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：花蓮港港池共振機制研究(4/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-01-8207-1 (平裝)	政府出版品統一編號 1009800889	運輸研究所出版品編號 98-26-7383	計畫編號 97-H3DB002
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：簡仲璟 研究人員：李俊穎 參與人員：錢爾潔、馬維倫 聯絡電話：04-26587132 傳真號碼：04-26564415	合作研究單位：國立臺灣海洋大學 計畫主持人：林炤圭、岳景雲 研究人員：林玉峰 地址：基隆市北寧路二號 聯絡電話：02-24622192-6125		研究期間 自 97 年 3 月 至 97 年 12 月
關鍵詞：花蓮港共振、現場觀測、數值模擬、HHT			
摘要： 本四年期計畫的研究目標在利用相關的現場觀測、數值模擬及水工模型試驗，探討花蓮港的港灣共振機制。計畫執行中除了進行波壓水位轉換函數的探討、花蓮港現場港內港外波浪及沈箱波壓的統計分析、及建構花蓮港之港灣穩靜度規則波及單方向與多方向不規則波數值模式外，也進行花蓮港的長週期波動的觀測。在長週期波浪觀測中發現花蓮港一直存在著極長週期的波動，颱風來襲期間 100 秒至 500 秒間的波動能量則有明顯地增加。在數值模擬方面，除建構規則波、單方向及多方向不規則波之數值模式外，也針對可能的改善方案進行數值模擬與討論，此外也配合 92~96 年「近岸數值模擬系統之建立」研究計畫成果，探討及測試港灣波動數值模式與近海波浪預報模式結合，並建構花蓮港波浪預報模式。綜合相關研究資料研判花蓮港港內的長週期振盪主要應是源自於外海波動，並由於港形的特殊，使得該成分的能量無法發散至外海而長時間累積引發港內振盪。未來有可能透過針對長週期波動的消波設施的研發來解決問題。 本研究成果可提供本所及花蓮港務局，作為後續花蓮港內長週期波動研究的參考資料。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
98 年 4 月	298	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。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
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: Study of Harbor Resonance of Hualien Harbor (4/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-01-8207-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009800889	IOT SERIAL NUMBER 98-26-7383	PROJECT NUMBER 97-H3DB002
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chien Chung-ching PROJECT STAFF: Lee Jung-yin PARTICIPATOR: Chien Er-jier, Ma Wei-lun PHONE: (04) 26587132 FAX: (04) 26564415			PROJECT PERIOD FROM March 2008 TO December 2008
RESEARCH AGENCY: NATIONAL TAIWAN OCEAN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Jaw-guei, Yueh Jiin-yung PROJECT STAFF: Y. F. Lin ADDRESS: 2, PEI-NING RD., KEELUNG 202, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 24622192 ext.6125			
KEY WORDS: HARBOR RESONANCE, FIELD OBSERVATION, NUMERICAL SIMULATION, HHT			
ABSTRACT: In this four-year research, using field measurements, numerical simulations, and hydraulic model tests investigated the harbor resonance problem of Hualien Harbor. The transfer function between water pressure and water elevation from experimental data. The statistical analyses of field wave data inside and outside the harbor have been analyzed and discussed. For the numerical models of Hualien Harbor, tranquility under regular and uni-directional/ directional irregular wave actions have already been setup. Also, the irregular wave model was connected to a near shore wave prediction system, TAICOMS, to establish a prediction model of wave condition around Hualien Harbor. The observations of long period wave oscillations inside Hualien Harbor and along the eastern coast have been deployed, executed and analyzed. Hualien Harbor was found to contain wave components with very long period oscillations all the time, and the wave components with periods between 100 seconds and 500 seconds have a dominant increase of wave energy during the typhoon intrusion duration. Several possible layouts for the improvements of harbor resonance were discussed via numerical simulations. From the information gathered from this four-year project, the source that causes the long period oscillations inside Hualien Harbor should come from overseas, and amplify the special layout and topography of Hualien Harbor. Wave dissipation facilities for long period waves should be studied to solve the problem. Results of this study have provided valuable references for IOT and the Hualien Harbor bureau to do follow-up research.			
DATE OF PUBLICATION April 2009	NUMBER OF PAGES 298	PRICE 300	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

花蓮港港池共振機制研究(4/4)

目 錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 錄	III
圖目錄	V
表目錄	XIII
照片目錄.....	XIV
第一章 計畫背景分析	1-1
1.1 計畫目的	1-1
1.2 計畫重要性	1-2
1.3 相關研究	1-4
1.4 研究範圍與對象	1-7
1.5 研究內容與工作項目	1-7
1.6 重要文獻回顧	1-9
1.7 本年度各項工作項目的內容、研究方法與進度	1-12
第二章 波壓與波高轉換函數的相關研究	2-1
2.1 前人研究	2-1
2.2 波高波壓轉換函數的相關理論	2-2
2.3 頻譜轉換	2-7
2.4 現有試驗水面波動與水下波壓資料的分析	2-9
2.5 矩形港池平面遮蔽試驗	2-16
2.6 綜合討論	2-21
第三章 波浪觀測與資料分析統計	3-1
3.1 取樣頻率對波動資料分析的影響	3-1
3.2 Hilbert-Huang 轉換在波動分析上的應用	3-7
3.3 遮罩型經驗模態分解法	3-19
3.4 花蓮港港內波浪觀測分析	3-24
3.5 東海岸的聯合觀測	3-45

3.6 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較.....	3-66
第四章 花蓮港港灣波動數值模式的建立與數值模擬.....	4-1
4.1 無限元素港灣水面波動數值模式.....	4-1
4.2 花蓮港的水深地形檔的整理.....	4-7
4.3 規則波引致港灣波動數值模擬.....	4-10
4.4 不規則波引致港灣波動數值模擬.....	4-13
第五章 港池共振改善方案可行性評估.....	5-1
5.1 水工模型試驗成果的回顧.....	5-1
5.2 改善構想的研討.....	5-14
5.3 改善方案的數值模擬與檢討.....	5-17
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-2
6.2 建議.....	6-4
參考文獻.....	7-1
附錄 A 期中/期末報告審查意見處理情形表	
附錄 B 期末簡報檔	

圖目錄

圖 1.1 花蓮港位置示意圖	1-3
圖 1.2 花蓮港現況配置圖	1-3
圖 2.1 壓力與水位轉換水工試驗的斷面模型	2-10
圖 2.2 波浪通過凹陷地形時水面波形與水中壓力波形間相關係數的 水深變化圖	2-12
圖 2.3 波浪通過等深地形時水面波形與水下壓力波形間相關係數的 水深變化圖	2-12
圖 2.4 規則波通過等深地形之波高比值沿水深變化圖	2-13
圖 2.5 規則波通過凹陷地形之波高比值沿水深變化圖	2-14
圖 2.6 波峰與波谷之垂直波壓分布	2-15
圖 2.7 部份開口矩形港池之平面遮蔽試驗中壓力計(P)與波高計(W) 之佈置情形	2-18
圖 2.8 部份開口矩形港池之港內波高計量測波高與壓力計轉換波高 比值圖(0° 正向入射).....	2-19
圖 2.8(續) 部份開口矩形港池之港內波高計量測波高與壓力計轉換波 高比值圖(0° 正向入射).....	2-20
圖 3.1 週期 2.7 秒及 3.3 秒波形組合的不同取樣時間間隔測試	3-2
圖 3.2 不同週期波形組合的不同取樣時間間隔測試	3-3
圖 3.3 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試	3-4
圖 3.3(續) 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試	3-5
圖 3.3(續) 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試	3-6
圖 3.4 IMF 的範例(Huang and Shen, 2005).....	3-12
圖 3.5 EMD 解析過程的說明例(Huang 等, 2005).....	3-16
圖 3.6 地球自轉的每日長度變化(Huang 等, 2005).....	3-17
圖 3.7 利用 EMD 處理模態混疊訊號的問題	3-21
圖 3.8 利用遮罩型 EMD 處理模態混疊訊號的問題	3-21
圖 3.9 遮罩型 EMD 解析流程	3-22
圖 3.10 改良遮罩型 EMD 解析流程	3-23
圖 3.11 花蓮港潮位站 ^(a) 安裝位置示意圖	3-26

圖 3.12 潮位計檢測記錄	3-27
圖 3.13 2005/4/5 0:00~2005/4/5 12:00 花蓮港各潮位站之水位變化時間 序列圖	3-28
圖 3.14 2005 年瑪莎颱風侵襲路徑	3-28
圖 3.15 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖 ...	3-29
圖 3.15(續) 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖	3-30
圖 3.15(續) 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖	3-31
圖 3.16 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF	3-32
圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF	3-33
圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF	3-34
圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF	3-35
圖 3.17 凱米颱風時期之波高及週期聯合分佈圖	3-37
圖 3.18 凱米颱風時期之港內波動分解 IMF 圖	3-38
圖 3.19 桑美及寶發颱風時期之波高及週期聯合分佈圖	3-39
圖 3.20 桑美及寶發颱風時期之港內波動分解 IMF 圖	3-40
圖 3.21 冬季季風時期之波高及週期聯合分佈圖(2006 年 1 月)	3-41
圖 3.22 冬季季風時期之港內波動分解 IMF 圖 (2006 年 1 月)	3-42
圖 3.23 夏季季風時期之波高及週期聯合分佈圖(2006 年 6 月)	3-43
圖 3.24 夏季季風時期之港內波動分解 IMF 圖(2006 年 6 月)	3-44
圖 3.25 長週期波動之觀測	3-49
圖 3.26 長週期波動之聯合觀測水位記錄(2006/8)	3-50
圖 3.27 長週期波動之聯合觀測頻譜(2006/8)	3-50
圖 3.28 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜	3-51
圖 3.28(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜.....	3-52
圖 3.28(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜.....	3-53
圖 3.29 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜	3-54
圖 3.29(續) 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜.....	3-55
圖 3.29(續) 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜.....	3-56
圖 3.30 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜	3-57
圖 3.30(續) 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜.....	3-58
圖 3.31 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜	3-59
圖 3.31(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜.....	3-60

圖 3.32	花蓮港外港水位觀測之分析頻譜	3-61
圖 3.32(續)	花蓮港外港水位觀測之分析頻譜	3-62
圖 3.33	鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜	3-62
圖 3.33(續)	鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜	3-63
圖 3.34	石梯漁港水位觀測之分析頻譜	3-64
圖 3.35	金樽漁港水位觀測之分析頻譜	3-65
圖 3.36	龜山島南岸於奇比颱風(2001/06/22~2001/06/24)、尤特颱風 (2001/07/03~2001/07/05)及潭美颱風(2001/07/10~2001/07/11) 過境時之特性波高及週期變	3-68
圖 3.37	龜山島南岸於玉兔颱風(2001/07/23~2001/07/24)及桃芝颱風 (2001/07/28~2001/07/31)過境時之特性波高及週期變化圖	3-68
圖 3.38	龜山島南岸於納利颱風路徑圖(2001/09/11~2001/09/19)及利奇 馬颱風路徑圖(2001/09/23~2001/09/28)過境時之特性波高及 週期變化圖	3-69
圖 3.39	龜山島南岸於海燕颱風路徑圖(2001/10/15~2001/10/16)過境 時之特性波高及週期變化圖	3-69
圖 3.40	花蓮鹽寮漁港於 2000 年 12 月至 2001 年 2 月之特性波高分佈 時序圖	3-70
圖 3.41	花蓮鹽寮漁港於 2001 年 7 月至 2001 年 9 月之特性波高分佈 時序圖	3-70
圖 3.42	花蓮鹽寮漁港於 2001 年 12 月至 2002 年 2 月之特性波高分佈 時序圖	3-71
圖 3.43	花蓮鹽寮漁港於 2000 年 12 月至 2001 年 2 月之波浪特性週期 分佈時序圖	3-71
圖 3.44	花蓮鹽寮漁港於 2001 年 7 月至 2001 年 9 月之波浪特性週期 分佈時序圖	3-72
圖 3.45	花蓮鹽寮漁港於 2001 年 12 月至 2002 年 2 月之波浪特性週期 分佈時序圖	3-72
圖 3.46	2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮 漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖	3-73
圖 3.46(續)	2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖	3-74

圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-75
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-76
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-77
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-78
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-79
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-80
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-81
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-82
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-83
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-84
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-85
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-86
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-87
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-88
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-89
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-90

圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-91
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-92
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-93
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-94
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-95
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-96
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-97
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-98
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-99
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-100
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-101
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-102
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮 鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖.....	3-103
圖 4.1 港池水面波動邊界值問題定義圖	4-2
圖 4.2 無限元素定義圖。(a)單節點無限元素；(b)雙節點無限元素 ..	4-5
圖 4.3 花蓮港水域數值水深資料彙整情形	4-8
圖 4.4 舊花蓮港水域數值水深地形	4-9
圖 4.5 96 年新測之花蓮港水域數值水深地形	4-9
圖 4.6 九個測站之波高增幅曲線圖(舊數值水深地形)	4-11

圖 4.7 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，岸壁完全反射)	4-11
圖 4.8 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，海岸部分反射)	4-12
圖 4.9 波高增幅係數 KD 分佈圖	4-12
圖 4.10 不規則波港灣波動數值模式的計算流程圖	4-18
圖 4.11 長方形港池在不同成分波數目下的港灣波動 分佈情形	4-21
圖 4.12 正方形港池在不同成分波數目下的港灣波動 分佈情形	4-22
圖 4.13 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)	4-23
圖 4.14 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)	4-23
圖 4.15 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)	4-24
圖 4.16 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)	4-24
圖 4.17 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)	4-25
圖 4.18 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)	4-25
圖 4.19 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)	4-26
圖 4.20 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)	4-26
圖 4.21 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{peak}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H1/3=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)	4-27
圖 4.22 規則波作用下 分佈圖($T_s=8\text{s}$)	4-28
圖 4.23 不規則波作用下 分佈圖($T_s=8\text{s}$, $H_s=6\text{m}$)	4-28
圖 4.24 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=8\text{s}$, $H_s=6\text{m}$, B-M 頻譜)	4-28
圖 4.25 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=8\text{s}$, $H_s=6\text{m}$, JONSWAP 頻譜)	4-28
圖 4.26 規則波作用下 分佈圖($T_s=10\text{s}$)	4-29

圖 4.27 不規則波作用下 分佈圖($T_s=10s$, $H_s=6m$)	4-29
圖 4.28 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=10s$, $H_s=6m$)	4-29
圖 4.29 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=10s$, $H_s=10m$, 式 4.40) ...	4-29
圖 4.30 不規則波+84 秒長波作用下 分佈圖	4-30
圖 4.31 不規則波+1134 秒長波作用下 分佈圖	4-31
圖 4.32 不同主波方向之多方向不規則波作用下 分佈圖(JONSWAP 頻譜、 $T_s=10s$, $H_s=6m$).....	4-32
圖 4.33 提姆颱風(1994)行進路徑圖	4-33
圖 4.34 提姆颱風(1994)過境時花蓮港港灣波動之模擬	4-34
圖 4.34(續) 提姆颱風(1994)過境時花蓮港港灣波動之模擬	4-35
圖 4.35 提姆颱風(1994)過境時花蓮港實測頻譜.....	4-36
圖 4.36 2005 年龍王颱風路徑圖(2005/09/29-2005/10/03).....	4-37
圖 4.37 花蓮港區海域波浪儀儀器架安裝位置	4-38
圖 4.38 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜	4-38
圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜	4-39
圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜	4-40
圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜比較	4-41
圖 4.39 港灣波浪預報的概念模式	4-43
圖 4.40 TaiComs 模式系統中各計算領域範圍及水深地形	4-44
圖 4.41 RC/MC/HC 風場的計算範圍	4-45
圖 4.42 相位測試的部分開口矩形港池水深分佈以及施測點位置 ...	4-47
圖 4.43 相位測試的結果	4-48
圖 4.44 RC 風場(2005/10/01 12:00).....	4-50
圖 4.45 MC 風場(2005/10/01 12:00).....	4-50
圖 4.46 WAM 遠域波場(2005/10/01 12:00).....	4-51
圖 4.47 花蓮港附近的波高增幅係數 分佈圖(2005/10/01 12:00)	4-51
圖 5.1 水工模型試驗方案及測點位置圖	5-4
圖 5.2 水工模型試驗方案及測點位置圖	5-7
圖 5.2(續) 水工模型試驗方案及測點位置圖	5-8
圖 5.3 三種改善方案配置示意圖	5-11
圖 5.4 配置構想一	5-15
圖 5.5 配置構想二	5-15

圖 5.6 配置構想三	5-16
圖 5.7 配置構想四	5-16
圖 5.8 5 個碼頭之相對位置	5-20
圖 5.9 配置方案一，九個測站之波高增幅係數 曲線圖	5-21
圖 5.10 配置方案二，九個測站之波高增幅係數 曲線圖	5-21
圖 5.11 配置方案三，九個測站之波高增幅係數 曲線圖	5-22
圖 5.12 配置方案四，九個測站之波高增幅係數 曲線圖	5-22
圖 5.13 配置方案五，九個測站之波高增幅係數 曲線圖	5-23
圖 5.14 配置方案一，不同週期入射波之波高增幅係數 分佈圖	5-24
圖 5.15 配置方案二，不同週期入射波之波高增幅係數 分佈圖	5-25
圖 5.16 配置方案三，不同週期入射波之波高增幅係數 分佈圖	5-26
圖 5.17 配置方案四，不同週期入射波之波高增幅係數 分佈圖	5-27
圖 5.18 配置方案五，不同週期入射波之波高增幅係數 分佈圖	5-28
圖 5.19 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線	5-29
圖 5.19(續) 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線.....	5-30
圖 5.20 九個測站之波高增幅係數曲線(配置方案一)	5-31
圖 5.21 九個測站之波高增幅係數曲線(配置方案五)	5-31
圖 5.22 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線(配置方案一及五)	5-32
圖 5.23 削減長週期波反射能量之設施構想圖(#7 及#12 碼頭)	5-32

表目錄

表 2.1 斷面試驗造波條件	2-10
表 2.2 平面試驗造波條件	2-16
表 3.1 2006 年各觀測站的資料收集範圍	3-49
表 4.1 TaiComs 模式系統中各計算領域的相關資料	4-44
表 4.2 港灣波動預報模式中各計算領域的相關資料	4-49
表 5.1 各配置方案的差異比較	5-3
表 5.2 JONSWAP 頻譜試驗波浪條件	5-3
表 5.3 各配置方案的差異比較	5-6
表 5.4 規則波試驗條件	5-9
表 5.5 不規則波試驗條件	5-9
表 5.6 規則波與不規則波造波條件	5-10

照片目錄

照片 3.1 現場觀測使用的潮位計	3-24
照片 3.2 潮位計安裝情形	3-27

第一章 計畫背景分析

1.1 計畫目的

花蓮港為我國的國際商港之一，就地理位置來說對於臺灣東部地區的貨物運輸，應佔有相當重要的地位。然而，由於有些颱風侵襲期間，港內曾發生長週期蕩漾的現象，不利於船舶的靠泊與人員貨物的裝載，再加上東部的產業逐漸偏向於自然資源的利用與觀光產業的發展，因而導致花蓮港的貨運量偏低。然為了充分發揮花蓮港地利優勢，港灣的功能勢必轉型朝向多元化發展。在轉型的過程中，其服務範圍將由貨物運輸而逐漸偏向於海上遊憩的相關運輸行為，服務對象也將偏向於以人為主，相對地對於港灣的相關設施及功能，尤其是港灣的靜穩度的要求也會更高。

花蓮港由於海底地形與特有港形的緣故，在港內容易激發與港池特性長度相關的長週期振盪，嚴重影響港內船舶的靠泊。不僅影響船舶靠泊安全，也直接影響到人員登船與下船過程間的安全性。目前此一長週期蕩漾現象已經造成在惡劣天候下，尤其是在某些颱風侵襲之前，港內的船舶必須離港避難，明顯地違背港灣建設開發的目的。

為了瞭解花蓮港港池共振機制以及研提改善防治對策，有鑑於此，本所乃依據民國 94-97 年度科技研究計畫「港灣環境資訊系統及數值模式應用研究」之綱要計畫總目標擬定為期四年的研究計畫以進行與花蓮港港池共振機制相關的研究。其中，並配合本所的相關研究，從水工模型試驗、現場觀測、及數值模擬等方面探討花蓮港的港池共振機制。

由於引用的國外文獻甚多，為了避免混淆，本報告對於年代如未標示『民國』字眼者皆為西元年代。

1.2 計畫重要性

花蓮港為我國唯一為處於臺灣東部海岸的國際商港(如圖 1.1 所示)，就其位置性來說花蓮港對於臺灣東部地區的貨物運輸應佔有相當重要的地位，然而自四期擴建完成後由於港內經常發生長週期蕩漾的現象，不利於船舶的靠泊與人員貨物的裝載，再加上東部的產業逐漸偏向於自然資源的利用與觀光產業的發展，使得航商因為船舶安全以及成本業績的考量而裹足不前，因而導致花蓮港的貨運量偏低，與業務的衰退。就目前國內的經濟發展策略而言，由於相關的工業多集中在西部海岸，再加上北宜高速公路以及規劃中東部高速公路的開發，未來東部的工業發展仍會因為其地理位置、地質因素、以及政策的導向而趨於保守，自然資源、觀光產業及傳統農漁業仍可能主導花蓮港海洋運輸發展方向。

然而換另一角度，從地緣關係來看，花蓮縣位處臺灣東部海岸的中段，其海岸線綿延約 110 公里，且面臨太平洋遼闊的豐富漁場。在臺灣東部海岸，花蓮港以北較大的人工港灣(扣除特定用途的和平水泥專用港)就屬大約距離 60 公里外的蘇澳港，往南則也是大約 50 公里外的石梯漁港。以近海船舶的活動性與機動性來看，花蓮港的地理位置對發展東部海岸的各種型式的海洋事業或活動，不論是作為前進基地或是中繼站，都有其不可忽視的重要性。因此，為了充分發揮花蓮港地利優勢，花蓮港的功能勢須配合鐵公路交通的變革與發展，以及花東地區產業的發展結構，重新加以定位，並朝向多元性的港灣利用來進行規劃及轉型。在轉型的過程中，其服務的對象當然也可能由主要的貨物運輸而逐漸偏向於與海上遊憩的相關運輸行為。

由於服務對象將逐漸由以貨物為主移轉為以人為主，相對地對於港灣的相關設施及功能，尤其是港灣穩靜度的要求將會更加提高。然而目前花蓮港由於附近海底地形的陡峭與特有狹長港形的緣故(如圖 1.2 所示)，在港內容易激發與港池特性長度相關的長週期振盪，並嚴重地影響到港內船舶的靠泊，以及人員登船與下船過程間的安全性。目

前此一長週期蕩漾現象已經造成在惡劣天候下，尤其是颱風侵襲之前，花蓮港內的船舶必須離港避難，而明顯地違背港灣建設開發的目的。再加上由於花蓮港外海水深浪大，船舶的出海錨泊仍可能因為流錨而發生船舶擱淺的船難事件，所以基本上不應該是一標準正常的作業程序。

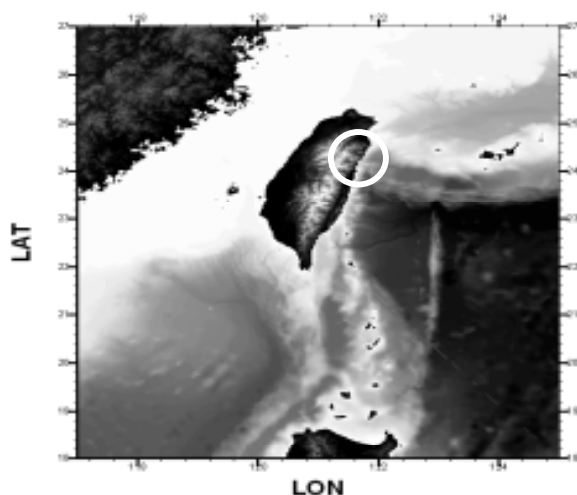


圖 1.1 花蓮港位置示意圖

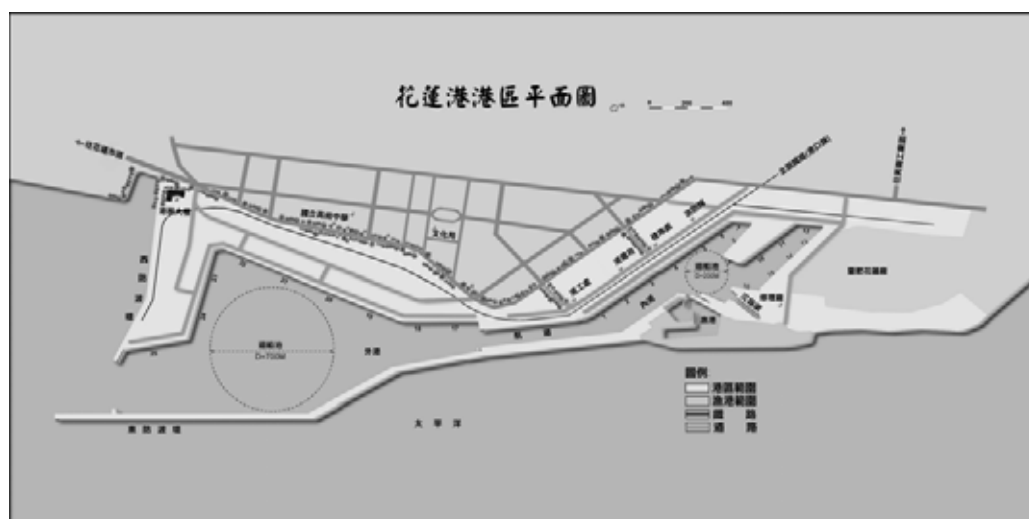


圖 1.2 花蓮港現況配置圖

目前，花蓮港的水域屬於漁業與商業共用，其中漁業包括了傳統漁業及遊憩漁業，這些用途對水域的穩靜度有不同的要求。例如，位於花蓮港內的花蓮漁港原係由商港的小型船渠撥用改建，由於水域空間不足於民國 89 年起進行專用漁港的規劃設計與建設，原先有另外闢

建進出口航道的構想，但基於建設經費與港內穩靜度的考量，最後仍決定使用商港部份的航道作為漁船進出口。如果再加上花蓮港正在推動未來的海上遊樂船舶活動，則將使得對花蓮港港內穩靜度的要求更形提高，而如何解決港內長週期波動的需求也相對提高。

1.3 相關研究

為了找出花蓮港長週期振盪機制，在花蓮港務局的委託下，本所自民國 78 年起即陸續在港內及港外展開一系列的長期海氣象觀測，至民國 89 年更擴充至全港內與東防波堤外側多個測波站的同步觀測，其間也包括了許多自發性的研究計畫。由於收集的資料相當龐大，目前的資料分析僅完成初步港灣規劃、管理及工程設計所需的基本分析外，進一步的相關比對則仍陸續累積與整理當中。除了現場調查之外，本所也進行了相當多的數值模擬及水工模型試驗。為了探討花蓮港共振的問題，花蓮港務局與本所也曾於民國 85 年共同舉辦『花蓮港港池振盪及其改善方案研討會』。相關的研究有張及曾(1993)、張及曾(1995)、蘇及陳(1995)、曾及簡(1996)、蘇等人(1996)、簡及邱(1996)、張(1996)、曾(1998)、簡及曾(1999)、莊(2000)、莊及江(2000)、李等人(2001)、李(2001)、郭等人(2002)、蕭等人(2000)、邱等人(2003)、張及林(2003)、邱等人(2003)、蘇(2003)等、邱等人(2005)。為方便後續研究者的搜尋，相關文獻列於 1.6 節中。

邱等人(2005)的文獻中從改善花蓮港長週期振盪的出發點，整理了過去相關的現場觀測、模型試驗及數值分析的成果。在文章中指出有關現場觀測的資料分析部份，曾(1996)分析民國 79 至 85 年間的 31 個港外颱風波浪，其中民國 83 年的 6 個颱風(提姆、凱特琳、道格、弗雷特、葛拉絲及席斯)，以及民國 84 年的肯特颱風期間港內也進行了同步觀測。分析結果指出外海的颱風波能多集中在 11 至 15 秒之間，但在港口外側則顯示長週期成份波的能量顯著增加；內港區的長週期能量集中在 147 及 158 秒左右，而外港區則在 137、147 及 185 秒左右。由於

東防波堤的遮蔽效應，外港區池的短週期能量可以降低一階，而內港區池則降了兩階，然而 160 秒左右的波能卻增加二階。文中並指出可能引起港內超長重力波的機制有二：碎波點位置振盪所生的自由長波；或者伴隨短波群前進之強制長波。曾及簡(1996)分析民國 78 年至 82 年的現場觀測資料也指出在民國 83 年提姆颱風侵襲期間港內有明顯的能量集中在 47、82、98、114 及 158 秒成份波處。簡及曾(1999)分析民國 79 年至 87 年間的 45 個颱風動態資料與現場波浪資料指出，颱風波浪的波高逐時變化除與颱風行進路徑、強度規模及移動速度有關外，也和背景波浪場、陸地遮蔽效應有密切關連。對花蓮港而言，颱風波浪的總作用時間大約 1 至 2 天；颱風波浪的明顯增大時間大約是颱風中心距花蓮港約 500~900 公里。郭等人(2002)利用民國 83 年至 86 年間的五個颱風時期所觀測的港內及港外波浪資料進行分析，以探討港池振盪的發生機制。其認為港內的振盪機制大致與線性波理論吻合，是由港外波浪低頻域能量所引起。但也指出港外風浪愈大，不一定港內振盪就大，必須視港外的低頻成份波的波向而定，而港外低頻波之波向也不一定與風浪主方向相同。顯示港池振盪的機制有著很複雜的關係。張及林(2003)利用最小二乘法發展出兩種可辨識水位訊號之主成份波週期及振幅的模式，並將其應用在花蓮港民國 83 年提姆(Tim)颱風的港內波動訊號上，辨識出港內主要成份波週期為 87.6 及 152 秒，而港外為 15、52、80 及 130 秒。

在數值模擬方面，蘇等人(1996)利用近岸波場推算數值模式-Model WP21 探討港內的波動，並指出當入射波週期為 42、87、92、118 及 155 秒時，港內會引起明顯的振盪。莊(2000)、莊及江(2000)應用 MIKE21-EMS 以數值模擬方式探討花蓮港於颱風期間的港池不穩靜機制，並認為亞重力波顯著支配花蓮港的共振特性。他同時指出當亞重力波之入射週期為 100、130、160 及 190 秒時，港內會引起程度不同的共振，而且若花蓮港外海存在具有較顯著振幅(能量)的 195 秒波動時，則花蓮港內港域各碼頭區將面對全面性之最嚴重共振波動振盪。蕭等人(2000)應用雙互換邊界元素法解析花蓮港的港池波動問題時，指

出港內增設消能池可改善長週期之波動，但港外設置潛堤則無多大效果。航道拓寬與航道浚深可降低波高增幅係數值，但可能引發新的共振週期。李等人(2001)利用緩坡方程式及邊界元素法進行解析並發現入射波週期為 48、56、96、116、140 及 160 秒時會引起港內的長週期振盪。以上數值模擬所得到的振盪週期略有出入，猜測其原因應是各項研究所用數值模擬技巧不同所致，例如數值方法、元素切割等。但是可以確認的是，從數值模擬上可以曉得花蓮港的共振週期特性。

在水工模型試驗方面，簡(1996)嘗試幾種不同的港內配置方案試圖改善港內的長週期共振，但只能獲得有限的效果。簡等人(1997)藉由探討舊東堤改建、美崙溪導流堤延伸改善港口淤積、及南濱海岸侵蝕的問題，提出多種配置方案探討港內的長浪防制問題。邱等人(2000)從拓寬內航道、以及在港外加設潛堤或突堤的方式來探討長浪可能的防制方法，其中共測試了三種颱風週期(12.6、13.5 及 15.3 秒)及四種長週期(40、100、140 及 160 秒)，並發現 140 及 160 秒的入射波會引起港內的長週期振盪。在水工模擬方面，由於經費、時程與計畫任務導向的限制，往往只能針對少數幾個特定波浪週期進行實驗，因此我們可以將其視為一項驗證的工作，瞭解某些週期的港遲波動情形，或是確認某些週期會引發共振，但是對於沒有進行的波浪週期則無法獲得任何資訊。

綜合過去的相關研究中可以發現花蓮港的港池共振週期特性已經透過現場觀測、模型試驗、以及數值模擬的方式加以探討多年，但是對於如何引發此一現象的機制：亞重力波、波群所附帶的長波、緣岸波、或是其他因素，卻仍是無法定論。蘇(2003)從物理性質的角度分析三種可能的長週期振盪發生機制：亞重力波、波群所附帶的長波、及緣岸波。其認為接近 80 至 90 秒或 130 至 160 秒週期的亞重力波很難在一般颱風區域內產生。而除非是很規則的湧浪，現場不規則波浪很難出現有規則性的群波，因此推論波群所附帶的長波不應該是有效引起港池共振的入射波。然而該文僅只是概念性地認為花蓮港的長週期振盪應是由緣岸波所造成，但未作任何證明。再者，緣波的理論主要說

明了入射波浪可以近似平行於海岸線走向的方向沿岸傳播，並可能攜帶大量能量入侵花蓮港。此一現象或許與花蓮港的共振有關，但就波浪週期而言，緣岸波並未改變外海波浪的週期結構，長週期波的存在並非因緣岸波現象而發生，因此猜測可能尚其他的共振機制。

1.4 研究範圍與對象

本計畫主要是利用水工模型試驗、現場觀測、及數值模擬等方法探討花蓮港港池共振的機制。所有相關的模型試驗及現場觀測主要由本所辦理，而計畫合作單位必須配合本所的內部研究，參與實驗或量測的規劃與資料的分析，必要時得配合進行附屬相關工作。

在為期四年的研究工作中，首先利用水工模型試驗討論波壓與波高的關係，以便確認適合花蓮港海底地形的波壓與波高的轉換關係。其後，利用現場波浪觀測資料進行統計及頻譜分析以了解花蓮港港內及港外的波浪特性。此外，建置花蓮港附近水域的單方向及多方向不規則波及任意地形之波浪折繞射模式，以探討花蓮港附近的波動與水流特性，藉此研擬改善防治對策。

1.5 研究內容與工作項目

本計畫設定執行四年，本年為第四個年度，各年之主要工作項目包括：

第一年(民國 94 年)：

1. 進行波壓與波高轉換函數相關的水工模型斷面試驗，建立港內波壓與波轉換關係
2. 針對花蓮港現場波浪觀測的資料作波浪特性的統計與分析

3. 建置花蓮港港灣波動數值模擬的模式，進行規則波的數值模擬，並與相關研究成果相比對
4. 花蓮港防波堤振動特性與沉箱變位資料分析

第二年(民國 95 年)：

1. 繼續進行波壓與波高轉換函數的相關水工模型平面試驗
2. 繼續進行花蓮港現場波浪觀測的資料分析與波浪特性統計
3. 規劃及設計三維潮流數值模式

第三年(民國 96 年)：

1. 持續進行花蓮港及附近海域現場波浪觀測與資料分析統計
2. 以現場實測頻譜進行不規則波的港灣波動數值模擬，並與港內的實測值進行比較。同時，也進行多方向不規則波的數值模擬，以探討花蓮港港池共振機制
3. 港池共振改善方案可行性評估

第四年(民國 97 年)：

1. 持續進行花蓮港及附近海域現場波浪觀測與資料分析統計
2. 以規則波及不規則波的港灣波動數值模擬結果，對各改善方案之港池靜穩度進行評估
3. 配合貴中心民國 92~96 年「近岸數值模擬系統之建立」研究計畫成果，探討及測試港灣波動數值模式與近海波浪預報模式結合，建構花蓮港波浪預報模式
4. 解析花蓮港波浪特性及其與港池共振關聯性之綜合探討
5. 綜整四年研究成果進行總結報告

1.6 重要文獻回顧

1.6.1 已完成之相關研究計畫

報告編號	報告名稱
S760390	花蓮港舊東防波堤外側潛堤穩定性及效用斷面模型試驗
S790630	花蓮港舊東防波堤身灌漿加固修護方法之可行性研究
S830990	花蓮港與蘇澳港八十三年颱風災害探討
S851260	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第一子計畫現場海氣象調查
S851270	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第二子計畫水工模型試驗
S851280	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第三子計畫數值模擬
S851290	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第四子計畫水深測量與漂沙堆積分析
S851300	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第五子計畫防波堤改善方案
S851310	花蓮港港灣設施改善計畫之研究第六子計畫綜合改善方案
S861510	花蓮港整體規劃及未來發展計劃----長浪及漂砂防制研究第一子計畫：防波堤結構斷面型式試驗研究
S861520	花蓮港整體規劃及未來發展計劃----長浪及漂砂防制研究第二子計畫：防波堤堤線配置平面試驗
S861530	花蓮港整體規劃及未來發展計劃----長浪及漂砂防制研究第三子計畫：港口漂砂淤塞改善檢核試驗研究竟
S861540	花蓮港整體規劃及未來發展計劃----長浪及漂砂防制研究第四子計畫：綜合改善方案研定
B085031	臺灣五個國際港附近海域海氣象調查研究
B085032	臺灣五個國際港海氣象資料庫查詢系統建立研究
B085033	臺灣五個國際港波譜預測模式之研究
B085080	花蓮和蘇澳港附近長波研究 85
B088070	花蓮港波浪預警系統之應用研究
B089180	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
B089190	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
B090020	花蓮港港內和港外長波數值模式研究
B090030	臺灣地區整體國內商港暨漁港客貨碼頭發展規劃
B090090	花蓮港共振強度估算模式研究
B091009	臺灣國際五大港觀測潮汐資料專刊(花蓮港)

1.6.2 相關文獻

1	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。
2	張金機、曾相茂(1995)「花蓮港港池不穩靜初步調查研究」，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。
3	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，第 113~128 頁。
4	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。
5	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，交通處港

	灣技術研究所。
6	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，交通處港灣技術研究所。
7	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。
8	曾相茂(1998)「臺灣海域海岸現象調查與及時回報系統建立之應用研究」，87-研(三)，交通處港灣技術研究所。
9	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。
10	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。
11	莊文傑(2000)「亞重力波與花蓮港之波動共振」，港灣報導，第 54 期，第 26~33 頁，交通處港灣技術研究所。
12	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。
13	邱永芳、蔡金吉、張金機(2000)「花蓮港商漁港分道與港池穩淨水工模型試驗研究-水工模型試驗報告」，MOTC-IOT-IHMT-CE-8801，交通處港灣技術研究所。
14	李兆芳(2001)「港池振盪之數值模擬計算」，2001 海洋數值模式研討會，第 4-1~4-20 頁。
15	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，第一卷第一期，第 1~22 頁，海洋工程學會。
16	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，第二卷第一期，第 55~71 頁，海洋工程學會。
17	邱永芳、蔡瑤堂、張富東、蔡金吉(2003)「花蓮港商漁分道之可行性研究」，第 25 屆海洋工程研討會，第 897~902 頁。
18	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。
19	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 103~110 頁。
20	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，第 917~923 頁。
21	邱永芳、林昭圭、簡仲璟(2004)「花蓮港長浪特性試驗探討」海洋工程學刊

1.6.3 相關研究成果的檢討

就目前本計畫執行前已經完成的研究成果來看，其研究的方法與方向幾乎已經涵蓋了目前所有的海岸工程方面的知識與技術，然而花蓮港的長週期振盪的機制似乎仍無法明確定位。為此，本所乃決定重新審視過去所進行過的研究成果，以其尋找其中可能被忽略掉的資訊。本節將就從水工模型試驗、數值模擬及現場觀測三個方向，分析過去的研究中所可能遭遇到問題。

在水工模型試驗部份，本所已經從改變近海入射波能的結構、削減或消散入侵港灣的波能、及改變港灣自然振動週期的構想，進行過

多次的穩靜度改善試驗，但是發現都僅能夠做到有限程度的改善。邱等人(2004)彙整三個與花蓮港港池波動有關的水工模型試驗結果，包括本所於 1996、1997 及 2000 年專題計畫的試驗結果(其成果分別發表於簡及邱，1996、簡等人，1999 及邱等人，2003b)，進行綜合性的檢討。在這三個年度的計畫中，本所嘗試著由變化各種不同的外廓設施配置方案，以期能削減港內的長週期振盪的發生或其能量。然而，試驗的結果發現改善的成效有限，花蓮港的港內仍然會有共振的現象出現。邱等人(2004)指出一旦港灣的主體佈置定型後，任何局部性改善措施都只能產生有限的效果而已。

由於花費的人力、經費與時間龐大，以及模型縮尺的限制，水工模型試驗一般較屬於是被動性與趨勢性的研究方法。也就是說，先決定要試驗的狀況與條件後，才進行相關的佈置與試驗測試。因此，大多數的港灣遮蔽或是港灣波動折繞射試驗是在驗證或評估指定的波浪條件下的港灣內外波動情形，並藉以驗證理論分析、數值模擬的結果。花蓮港的相關水工模型試驗也有類似的情形：其主要是驗證了某些入射波週期會引起花蓮港的港內共振、港內的波動情形與消波效果，很難找到花蓮港的共振機制。

數值模擬部份則由於各個學者各時期所使用的數值模式的控制方程式、邊界條件與數值解析度不同，雖然其都確認了花蓮港有長週期的共振週期，但是各個數值試驗所得的共振週期都略有出入，而無法作成具體的結論。林(1997)曾指出數值模擬網格的不恰當切割可能導致港內共振週期的偏移。因此，如果要詳細驗證數值模擬的結果，可能先要確認各數值模式的收斂性與穩定性。

至於現場觀測部份則由於港灣附近的波浪量測在考量不影響船舶及其他水上活動的前提下，只能使用壓力式波高計。但由於壓力式波高計所需要的壓力與水位轉換關係仍未有定論，加上港內的波動可能屬於波動窄頻但多方向的狀況，其轉換函數可能與外海的寬頻但有主方向不同。因此，對於港內外的波浪觀測結果的分析仍有其不確定性。

1.7 本年度各項工作項目的內容、研究方法與進度

依照工作計畫書中之預定進度甘梯圖所示，本期中報告應進行的工作項目包含

1. 持續進行花蓮港及附近海域現場波浪觀測與資料分析統計

本項工作主要著重在長周期波的觀測及其頻譜特性與發生機制探討。其項目包含：

- (1) 收集及整理現場波浪觀測資料
- (2) 評估及進行濾波、以及波浪分析統計
- (3) 港內港外波浪統計特性分析

目前進度主要以結合經驗模態分解法(empirical mode decomposition, EMD)與零上切法所構成的新波浪分析方法，並將其應用在實測波動的解析上面。為了瞭解長週期成分波的情形，本研究除了分析在花蓮港內所進行的水位觀測資料外，也對過去所收集的龜山島南岸波浪觀測及鹽寮漁港波浪觀測的資料進行分析及討論。由於資料量龐大，需要耗費大量的電腦設備及計算時間，有關東海岸的聯合觀測預定於下半年繼續進行。

2. 以規則波及不規則波的港灣波動數值模擬結果，對各改善方案之港池靜穩度進行評估

- (1) 改善方案之研擬
- (2) 進行多方向不規則波數值模擬及討論

由於花蓮港水深本年度進行重測，目前已經針對重測的水深資料進行模式的建置，待模式完成後將進行模擬計算與比對。在改善方案的研擬部分，本年度工作預定研擬可能的改善方案，初步構想將考慮改變港內的布置，以及配合南北濱的海岸保護，進行相關數值模

擬與評估。有關港池共振改善方案，如果參考過去的相關數值模擬以及水工模型試驗，如邱等(2004)的相關研究回顧，可發現過去的專家學者已經從破壞入射波結構、削減或發散港內波動能量等方向進行相當多的嘗試，也顯示一般的減少港內共振的方式可能不適合於外部水深坡陡的狹長型花蓮港。因此，基本上能夠思考的方向為改變港池的幾何形狀。除了延續 96 年的方案進行可行性外，也針對港外的部分進行可能的方案配置及比較。

3. 探討及測試港灣波動數值模式與近海波浪預報模式結合，建構花蓮港波浪預報模式

目前進度主要以建置港灣波浪預報系統為主，而且已經完成以 96 年龍王颱風為例的模擬計算。此項模擬結果亦提供給『近岸海象數值模擬與預警系統之建立』計畫參考。

4. 解析花蓮港波浪特性及其與港池共振關聯性之綜合探討

5. 隨時根據量測及分析結果比較探討花蓮港的長週期振盪機制。

第二章 波壓與波高轉換函數的相關研究

有關波壓與波高轉換函數的研究主要在 94 年度及 95 年度，試驗的項目包含針對針對水平底床與凹陷地形的水工模型斷面試驗及矩形港池的港內波壓與波高轉換關係。本研究計畫亦曾規劃在花蓮港進行現場之壓力式波高計與容量式波高計的聯合觀測，但因為現場的干擾太多而未能得到較明顯的關係。本章將就水工模型試驗的研究成果作一彙整報告。

2.1 前人研究

有關波壓與波高間的轉換關係，首先 Folsom 與 Seiwel(1947)利用線性波理論提出相關的轉換關係。然而由過去的模型實驗或現場觀測的結果比對，發現即使在規則波的情況下，亦無法正確地利用線性理論來描述波壓與波高間的關係。因此大多數學者皆認同於在波壓與波高間的轉換公式中加入一個經驗修正係數，以改善線性理論轉換時的不正確性。而此一經驗修正係數可能受到相當多參數的影響，例如相對水深、波浪尖銳度、壓力計設置深度、水流及雜訊等，且各參數間的關係亦相當複雜，導致至今壓力修正係數仍未能有一定論。

關於此一修正係數的研究自西元 1966 年起即陸續有許多學者提出相關研究與建議，相關的研究列於參考文獻，例如 Homma et al.(1966)、Bergan et al.(1968)、Simpson(1969)、Esteva and Harris(1970)、Cavaleri(1980)、Biesel(1982)、Lee and Wang(1984)、Hameed and Baba(1985)、Gabriel and Hedges(1986)、Bishop and Donelan(1987)、郭(1983)、簡仲璟等(1990)、邱永芳等(1993)、黃家祥(1993)、張炯殷(1995)、Huang et al.(1998)、Huang(2001)、陳松輝等(2003)。其中，Bergan et al.(1968)比較量測的壓力及 Stoke's 的理論結果，發現用 Stoke's 五階波差異性遠比線性波理論小。Lee and Wang(1984)用二階攝動法(perturbation technique)解弱非線性不規則波並發現由於線性及非線性

的轉換函數在中間性波至深水波的範圍中差異不大，因此判斷非線性的影響並不顯著。Wang et al.(1986)提出之修正線性濾波法(modified linear filter method)，其方法是將線性濾波法進行修正，以一簡單視窗轉換函數的型式應用於波壓與水位間的轉換。然而，一般研究都了解在淺水波的部分非線性的修正是相當重要的。Kuo and Chiu(1994)比較了量測波壓及線性波與 Stoke's 三階波理論，並發現在他們的實驗中非線性的波形尖銳度影響很小。然而，Baquerizo and Losada(1995)使用微小振幅波理論的推導，認為邱、郭與簡(1993)之經驗轉換函數中之常數項應為水深無因次項 $\omega^2 d/g$ 之函數($\omega=2\pi f$ 為波浪之角週頻率； f 為頻率； d 為水深； g 為重力加速度)，不應為一定值。黃明志也指出此一不一致的結論似乎祇反映了研究中的波浪條件不同而已。

2.2 波高波壓轉換函數的相關理論

依據線性波理論，二維進行波的波壓公式可表示為

$$p(x, y; t) = p_s - \rho g z + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) \cdots \cdots \cdots (2.1)$$

其中， t 為時間； x -軸為水平軸， z -軸為直立軸，以平均水面為零點並取向上為正； p 為總水壓力； p_s 為自由水面大氣壓力； ρ 為水的密度； g 為重力加速度； ϕ 為流體的速度勢(velocity potential)； $u = -\partial \phi / \partial x$ 為水平水分子速度； $v = -\partial \phi / \partial y$ 為垂直水分子速度。而單一波動的波形及相關速度勢函數為

$$\eta(x; t) = a \sin(kx - \omega t) \cdots \cdots \cdots (2.2)$$

$$\phi(x, z; t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t) \cdots \cdots \cdots (2.3)$$

其中，而 a 為波浪的振幅； $\omega=2\pi/T$ 為波動的角週頻率(angular frequency)； T 為波浪週期； h 為水深； $k=2\pi/L$ 為波數(wave number)； L 為波長。 ω 及 k 滿足線性波的分散關係式

$$\omega^2 = gk \tanh kh \cdots \cdots \cdots (2.4)$$

其動壓部分可以表為

$$p_d(x, z; t) = \rho g K_{pL} \eta(x; t) = \rho g \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \eta(x; t) \cdots \cdots \cdots (2.5)$$

其中， K_{pL} 稱為線性波的壓力轉換函數。依循類似的推導過程可得非線性波的波壓公式為

$$p_d(x, z; t) = \rho g K_{pN} \eta(x; t) \cdots \cdots \cdots (2.6)$$

對於量測及線性波理論間的差異性，一般提出一個經驗的修正係數 N

$$p_d(x, z; t) = \rho g K_{pC} \eta(x; t) = \rho g \frac{K_{pL}}{N} \eta(x; t) \cdots \cdots \cdots (2.7)$$

Forristal(1982)曾指出量測及線性波理論間差異性的可能原因為二階的動能項或是非線性波的影響未被考慮，或者是分析的方法不恰當。Bishop and Donelan(1987)：曾根據不同的試驗及現場資料對 N 值做了檢討。並依據他們自己的試驗，他們認為線性波理論在由水下壓力紀錄計算波高時還是正確的。一個設計良好的壓力式波高計系統估算水面波高應可達到 95% 的準確性。他們也指出以前的修正係數可能受到不正確的波高量測、儀器限制(如訊號/雜訊比，率定誤差、動水壓力干擾等)、以及不恰當的分析方法(波別法 wave-by-wave method，頻譜洩漏 spectral leakage)的影響。Kuo and Chiu(1994)提出一動壓力的經驗公式

$$p_d(x, z; t) = \rho g K_{pE} \eta(x; t) \cdots \cdots \cdots (2.8)$$

其中， K_{pE} 為經驗轉換函數，已由因次分析及中間性波與深水波的試驗資料的回歸得到下列的結果

$$K_{pE} = \exp(0.905 \frac{\omega^2 z}{g} - 0.027) ; 0.1 \leq \frac{\omega^2 |z|}{g} \leq 5.0 , \frac{h}{L} \geq 0.07 \cdots \cdots \cdots (2.9)$$

由因次分析可以得到下列的函數關係

$$K_{pE} = f_1\left(\frac{\omega^2 z}{g}, \frac{\omega^2 h}{g}, \frac{\omega^2 H}{g}\right) = f_2\left(\frac{\omega^2 z}{g}, \frac{z}{h}, \frac{H}{L}\right) \dots\dots\dots (2.10)$$

其中， H 為波高； $\omega^2|z|/g$ 為頻率參數； $\omega^2 h/g$ 為水深參數； H/L 為波形尖銳度； $|z|/h$ 為壓力計沒水深度參數。因此，式(2.9)是在中間性波及深水波的範疇內推導的，且僅在波性尖銳度影響較小及壓力計沒水深度參數可被忽略的情形下才適用。

Chen(2000)的沒水深度參數 0.9 的迴歸公式則表為

$$K_{pN} = \exp(0.711 \frac{\omega^2 z}{g} + 0.022) \dots\dots\dots (2.11)$$

在 Kuo and Chiu(1994)中發現由於第三階壓力與第一階壓力的比值小於 1.08，因此非線性的效應很小。他們也認為”由於同一頻率波動及沒水深度的轉換函數在不同的水深處均沒改變”因此壓力計沒水深度參數是可以被忽略的。然而黃(2001)認為依據 Kuo and Chiu(1994)文章的第四圖即顯示此一結論不正確，即使是最簡單的線性波理論轉換函數也強烈地顯示其與沒水深度有關。當壓力計安置在底床時，Kuo and Chiu(1994)的經驗公式有比線性波理論較大的波高預測結果。Baquerizo and Losada(1995)對 Kuo and Chiu(1994)的建議是應該將該項試驗結論歸類在較小的深度參數或沒水深度參數中。公式(2.9)的另一個問題是在高頻區的資料過少可能導致迴歸推算時的誤差。由於在波壓轉換波高的過程中可能會引介額外的高頻能量，因此在使用 Kuo and Chiu 的經驗公式時必須特別小心。

各種不同的壓力轉換函數也可以用對線性壓力轉換函數的修正係數來表示，即

$$K_{pN} = \frac{K_{pL}}{N}, \quad K_{pC} = \frac{K_{pL}}{N}, \quad K_{pE} = \frac{K_{pL}}{N} \dots\dots\dots (2.12)$$

其中， N 一般為相對水深、波形尖銳度及壓力計沒水深度的函數，可由

數值計算或實驗資料獲得。

一般進行因次分析時，主要的目標是將因變數推導轉換成多個由自變數所組成的無因次參數。因此，在推導波壓轉換函數的因次分析時，假設其為水深(h)、波高(H)與壓力計沒水深度(z)的函數並表示成

$$K_p = f_1\left(\frac{\omega^2|z|}{g}, \frac{\omega^2 h}{g}, \frac{\omega^2 H}{g}\right) \dots\dots\dots(2.13)$$

依 Chiu & Kuo 的推導

$$K_{PE} = f_1\left(\frac{\omega^2|z|}{g}, \frac{|z|}{h}, \frac{H}{L}\right) \dots\dots\dots(2.14)$$

式中， $\omega^2|z|/g$ 為頻率參數(frequency parameter)； $|z|/h$ 為壓力計沒水參數(transducer submergence parameter)； H/L 為波型尖銳度(wave steepness)。

黃正欣等(2003)利用斷面水槽進行一系列的模型試驗，包含五種不同水深、六種規則波週期、及六種相對應的不規則波示性波週期，以及多種入射波高，並發現壓力轉換函數仍與底床水深、波高及壓力計的放置水深都有關係。並利用回歸分析方式得到不同的參數如下所示：

$$K_p = \exp\left(-0.539\frac{\omega^2|z|}{g} - 0.067\right) \quad \text{Kuo 及 Chiu 模式} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$K_p = \exp\left(-\left(0.015\frac{\omega^2 d}{g} + 0.532\right)\frac{\omega^2|z|}{g} + \left(0.012\frac{\omega^2 d}{g} - 0.072\right)\right) \\ \text{Baquerizo 及 Losada 模式} \dots\dots\dots(2.16)$$

而黃正欣等也提出自己的壓力轉換函數

$$K_p = \exp \left(- \left(0.151 \frac{\omega^2 d}{g} - 0.460 \frac{\omega^2 H}{g} + 0.498 \right) \frac{\omega^2 |z|}{g} \right. \dots\dots\dots (2.17) \\ \left. + \left(0.189 \frac{\omega^2 d}{g} - 0.838 \frac{\omega^2 H}{g} - 0.059 \right) \right)$$

並以壓力值 p 取代較不容易獲得的波高值 H

$$K_p = \exp \left(- \left(0.106 \frac{\omega^2 d}{g} - 0.114 \frac{\omega^2 P}{g} + 0.517 \right) \frac{\omega^2 |z|}{g} \right. \dots\dots\dots (2.18) \\ \left. + \left(0.157 \frac{\omega^2 d}{g} - 0.797 \frac{\omega^2 P}{g} - 0.057 \right) \right)$$

然而，由於黃正欣等係採用回歸方法求得各項係數，利用壓力值 p 取代波高值 H ，卻也連帶著變動了水深 d 的係數，使得該公式仍存在有不確定性。也顯示出波高與波壓間的關係仍有深入探討的必要性。

有關頻率參數的部份似乎有些混淆，因為如果是頻率參數的話，則該參數中之自變數應是與波浪頻率直接相關的變數。然而，波浪頻率並不會隨壓力計沒水深度(z)而變。而且

$$\frac{\omega^2 |z|}{g} = \frac{\omega^2 h}{g} \times \frac{|z|}{h} \dots\dots\dots (2.19)$$

其實此一參數為 $\omega^2 h/g$ 與 $|z|/h$ (壓力計沒水參數) 的函數。因此，若重新整理 Chiu & Kuo 以及 Chen 的建議公式

$$K_{PE} = \text{Exp} \left(-0.905 \frac{\omega^2 h}{g} \bullet \frac{|z|}{h} - 0.027 \right) \quad \text{for } 0.1 \leq \frac{\omega^2 |z|}{g} \leq 5, \quad \frac{h}{L} \geq 0.07 \dots\dots\dots (2.20)$$

$$K_{PN} = \text{Exp} \left(-711 \frac{\omega^2 h}{g} \bullet \frac{|z|}{h} + 0.022 \right) \quad \text{for } \frac{|z|}{h} = 0.9 \dots\dots\dots (2.21)$$

由公式中可知，蔡等所說 Chiu & Kuo 的經驗公式忽略了壓力計沒水參數，似乎有待商榷。不過值得一提的是，波形尖銳度目前沒有任

何理論可以說明。

至於不規則波之壓力和水位間的轉換關係，可分為兩種不同的轉換方式，一種方式是將量測到的壓力，先求出壓力頻譜，再利用壓力轉換函數將壓力頻譜轉換為水位頻譜，邱、郭與簡(1993)即是以此種方法對不規則波做分析。另一種方式則是將量測到的壓力，利用線性壓力轉換函數或邱、郭與簡(1993)之經驗公式轉換為水位，再由轉換得到的水位，求出水位頻譜，此方式所得之水位頻譜在高頻處會有急遽放大的不合理現象，因此轉換公式的頻率適用上限是一個重要的因子，而且必須適當的決定。另對於不規則波之轉換，Nielson(1986)提出局部波壓波形近似處理法(local approximation method)，係將局部波壓波形以正弦波形來描述，將求出之相對應局部頻率視為該點之頻率，再應用線性波理論加以轉換；張(1995)提出前後週期平均法，對轉換函數的頻率做一上限，再代入線性反應函數或經驗轉換函數加以轉換。

在考慮水流或非線性效應對轉換結果之影響方面，亦有學者提出相關文獻，如 Bergan et al.(1968)由風洞水槽模擬水深 20 公尺外之波浪，比較線性波浪理論與 Stokes 五階波浪理論之轉換結果，以頻譜及波高分析做估算，發現其誤差在 10%以內；Lee and Wang(1984)指出在淺水時需考慮水流及非線性效應之影響。

2.3 頻譜轉換

波浪能量譜可以由壓力譜得到

$$S_{\eta\eta}(f) = \frac{S_{pp}(f)}{[K_p(f)]^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

其中， f 為頻率； $S_{\eta\eta}$ 為波譜； S_{pp} 為壓力譜； K_p 為正確的壓力轉換函數，例如 K_{pL} ， K_{pN} ， K_{pC} ， K_{pE} 中的任何一個。Bergan et al.(1968)根據試驗室的資料發現利用線性壓力轉換函數所得的轉換頻譜與波譜相當接近。Esteva and Harris(1970) 根據現場的資料也指出有同樣的情形。Lee and

Wang(1984)也同樣地指出線性轉換函數在能量守恒的範圍內有很好的表現，但是在低頻部分有低估能量而高頻部分則有高估的情形。

由於沒水式波高計的壓力轉換函數受到水深增幅的影響而有隨著頻率增加而減小的情形，壓力譜的高頻的成分可能太小甚至因壓力計的解析度或精確度的極限，以及儀器本身的電子或數值上的雜訊干擾(noise)而完全漏失，Lee and Wang(1984)建議依據下式從高頻成分中完全移除雜訊部分

$$S_{\eta\eta}(f) = \frac{S_{pp}(f) - NL}{[K_p(f)]^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

式中，NL 為高頻部分的平均雜訊部分(average noise level)。上式與Huang and Chen(1998)所推導利用浮筒式(pitch roll buoy)波浪觀測的訊號中處理低頻雜訊的修正技巧類似。Lee and Wang(1984)也建議可以用如下所示的切除高頻的 windowed 轉換函數(windowed transfer function with high-frequency cut-off)處理

$$S_{pp}(f) = 0; \quad f \geq f_c \dots\dots\dots (2.24)$$

利用式(2.24)從實際的波浪成分裡面移除額外的的雜訊部份(noise level)的一個好處是在轉換後的頻譜的高頻部分總是有一幅度較大的增量然後伴隨著快速地消滅至零振幅的情形(Lee and Wang, 1984)

其他的雜訊修正技巧討論如下：

(1) 根據解析度或精確度的雜訊修正

假設壓力計受限於它的解析度或精確度，則可以這一極限值 a_{ppl} (例如壓力計的解析度為 0.1cm)作為整個雜訊部分的評估值(estimate)及設定振幅的切斷條件

$$a_{ppn}(f) = 0; \quad a_{ppn}(f) \leq a_{ppl} \dots\dots\dots (2.25)$$

式中， $a_{ppn}(f)$ 為第 n 個壓力成分的振幅。同樣地，上式也可以改寫為頻

譜振幅的切斷條件

$$S_{ppn}(f) = 0; \quad S_{ppn}(f) \leq S_{ppl} \cdots \cdots \cdots (2.26)$$

式中， $S_{ppn}(f)$ 及 S_{ppl} 為與 $a_{ppn}(f)$ 及 a_{ppl} 相關的頻譜振幅。

(2) 根據最大頻譜振幅的雜訊修正

在理論上，假如雜訊是個頻率的已知函數，則壓力訊號便可以被修正。然而實際上卻因為全部的雜訊部分(包含水動力雜訊、非線性及流的影響)乃是隨著海象而變。一個解決此一問題的方法是利用一個與最大頻譜振幅 S_{ppm} 有關的固定比例係數 R 作為切斷條件。

$$S_{ppn}(f) = 0; \quad S_{ppn}(f) \leq R \cdot S_{ppm} \cdots \cdots \cdots (2.27)$$

假如 R 值較小則相對的切斷頻率 f_c 將會較高。

(3) 根據最小轉換函數值的雜訊修正

除了式(2.27)以外，我們也可以在高頻部分設定一最小轉換函數

$$K_p(f) = K_p(f_c); \quad S_{ppn}(f) \leq R \cdot S_{ppm} \cdots \cdots \cdots (2.28)$$

式中， K_p 為正確的壓力轉換函數。這種方式等於是對轉換頻譜在切斷頻率 f_c 以上的部分進行平滑化的處理。

2.4 現有試驗水面波動與水下波壓資料的分析

依據合作計畫單位與本所於民國 92 年合作在本所港研中心（以下簡稱本中心）的風洞實驗室中所進行有關壓力與水面波動轉換關係的試驗研究，試驗地形如圖 2.1 所示包含等深地形及凹陷地形兩種，除了在水面上設置容量式波高計(編號為 W0)外，也在同一點的不同深度處(12.6 cm 至 92.6 cm 每間隔 10 cm 一個，原點設在靜水面上， Z 軸以向下為正)設置了 9 個壓力頭(由上而下分別編號為 P1~P9)。相關的造波條件如表 2.1 所示。從線性波理論而言，所試驗的波浪中，週期 1 秒的

波浪在本試驗水深中屬於深水波，而其餘三種波浪週期皆屬於中間性波。

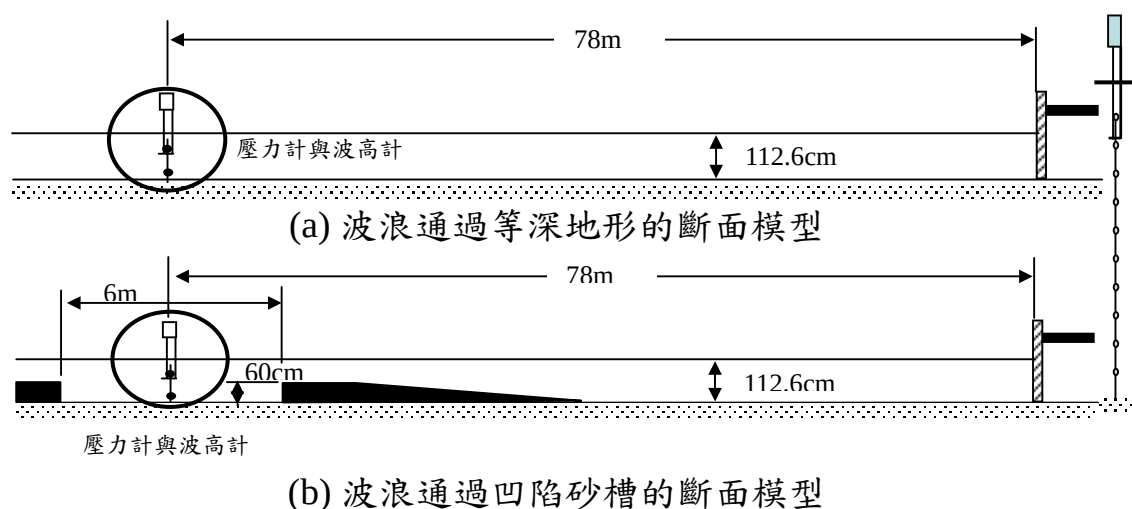


圖 2.1 壓力與水位轉換水工試驗的斷面模型

表 2.1 斷面試驗造波條件

規則波通過凹陷地形		
週期(秒)	波高(cm)	代 號
1.0	5,8	H05T10, H08T10
1.3	13	H13T13
1.6	19	H19T16
2.0	25	H25T20
不規則波通過凹陷地形		
頻率(Hz)	波高(cm)	代 號
0.9	8	F09H08
0.6	13	F06H13
0.5	19	F05H19
0.4	25	F04H25
規則波通過等深地形		
週期(秒)	波高(cm)	代 號
1.0	8, 13, 19, 25	H08T10, H13T10, H19T10, H25T10
1.3	8, 13, 19, 25	H08T13, H13T13, H19T13, H25T13
1.6	8, 13, 19, 25	H08T16, H13T16, H19T16, H25T16
2.0	8, 13, 19, 25	H08T20, H13T20, H19T20, H25T20

為了瞭解波壓在水中的傳遞情形，本研究首先就水面波形與水中壓力波形的相關性進行探討，圖 2.2 及 2.3 分別顯示規則/不規則波浪通

過凹陷地形，以及規則波通過水平底床時，不同水深處之壓力波形與水面波形間最大相關係數值隨水深的變化圖。由於凹陷地形為一有限長度(6 公尺)的矩形凹槽，可能與波長產生交互作用，因此圖 2.2(a)大致上顯示水面波形與水中壓力波形的相關性有隨著波浪週期的加長而加大。圖 2.2(b)中的不規則波作用下亦有相類似的趨勢。但是圖 2.2(a)中週期為 1 秒(深水波長為 156cm)的結果顯示相關係數值在水深大於 78cm 時便急遽減小。如果以線性波理論的二分之一波長的影響水深為準，則在 $Z=78\text{cm}$ 處的最大相關係數約為 0.5。此外，同圖中也顯示波高的增加會提高水面波形與水中壓力的相關性。

當波浪通過水平底床時，圖 2.3 顯示不同造波週期之規則波水面波形與水中壓力波形間相關係數的水深變化圖，各圖中均含有四種不同波高的結果。就大趨勢而言，隨著造波週期的加長，水面波形與水中壓力波形間相關性就越高，在水深方向的相關性相對增大。除了週期為 1 秒的結果可能受到波形非線性的影響使得波高增大時其相關性有減小的趨勢外，其他週期裡的波高影響性不大。由於週期 1 秒的波浪屬於深水波，因此圖 2.3 之右上圖中可以發現水深大於 78cm 時，相關係數值有急遽變化。

圖 2.4 及 2.5 分別顯示在等深地形與凹陷地形中四種不同造波週期的波高比曲線。波高比值係以水面上的容量式波高計量測波高求各壓力頭轉換波高的比值。圖中也比對了線性波理論、郭與邱、以及 Baquerio and Losada 的壓力水位轉換理論。其中可發現，不同的波高的差異性不大，但即使在等水深的情況下，各個理論仍與試驗值有一差距，而且似乎壓力的量測有發生衰減的現象(以 $T=2$ 秒為例)。而當波浪通過凹陷地形時(圖 2.5)，此種衰減現象更是明顯。對於不同造波條件進行試驗所得的時間序列以及波高計與各壓力計所量測的水面波動變化關係，可參考 94 年度的期末報告之附錄 B 之圖 B-1 至圖 B-12。

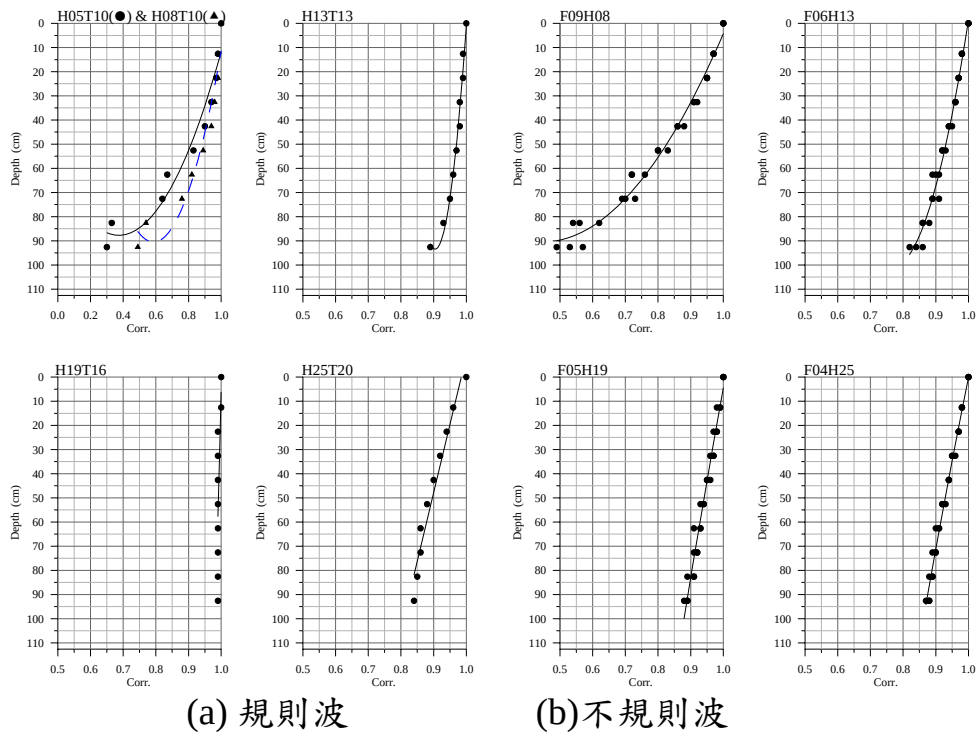


圖 2.2 波浪通過凹陷地形時水面波形與水中壓力波形間相關係數的水深變化圖

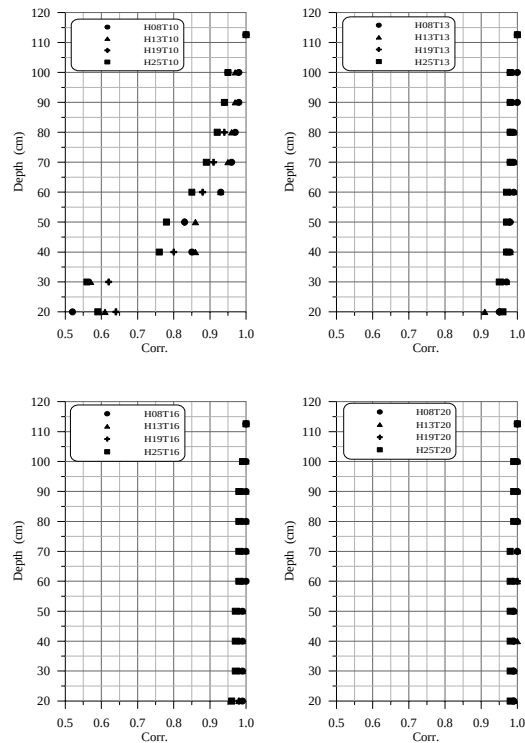


圖 2.3 波浪通過等深地形時水面波形與水下壓力波形間相關係數的水深變化圖

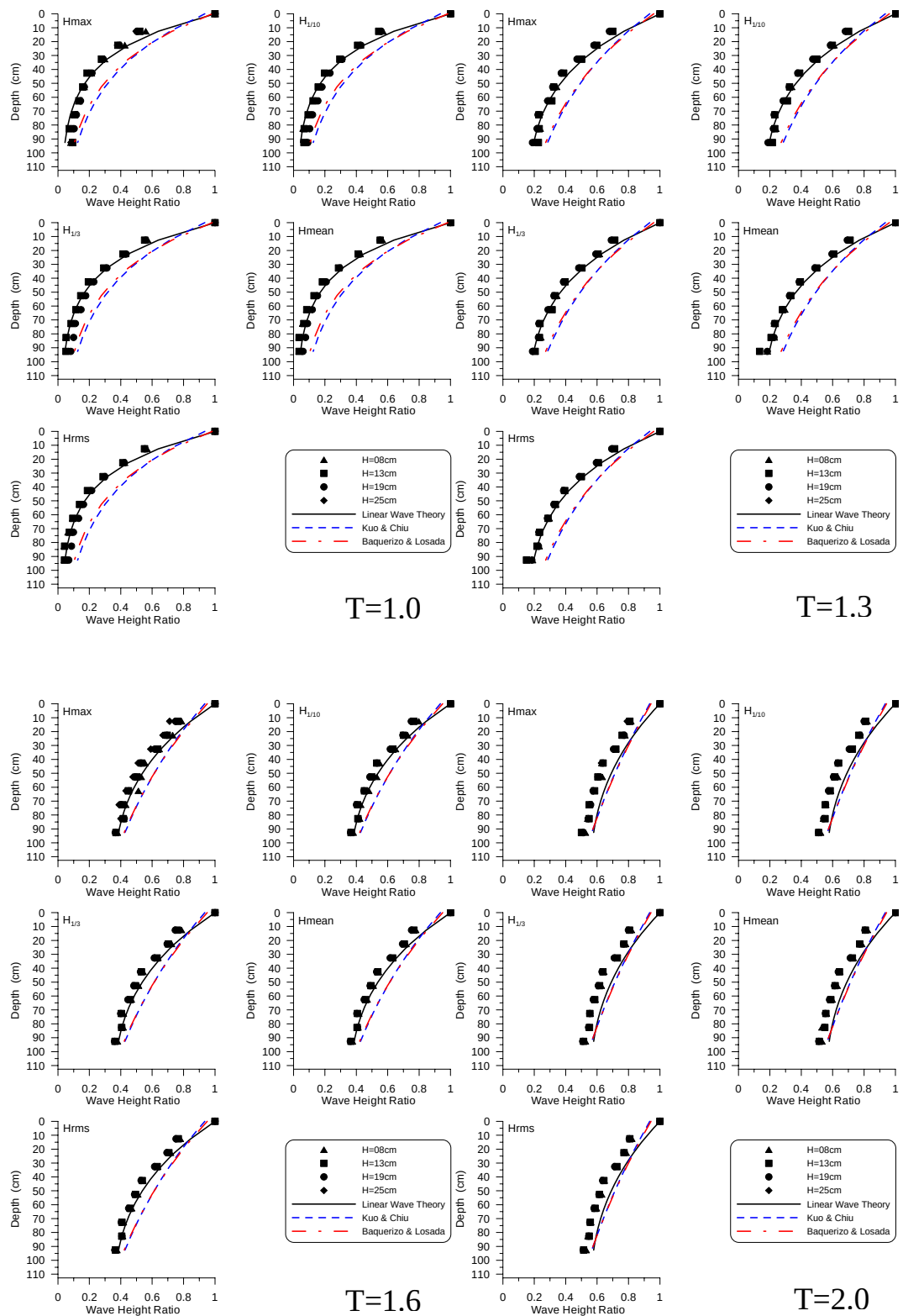


圖 2.4 規則波通過等深地形之波高比值沿水深變化圖

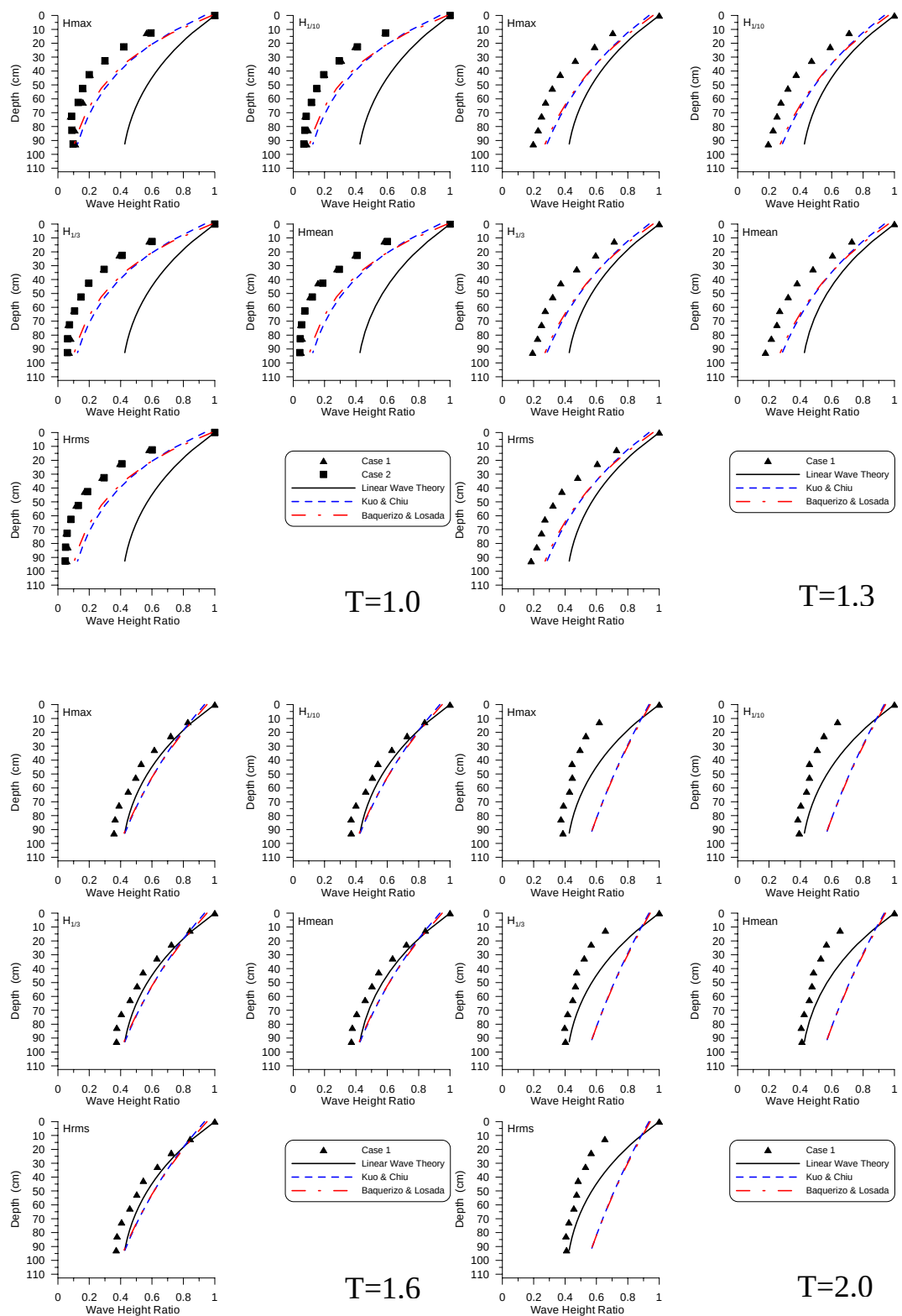


圖 2.5 規則波通過凹陷地形之波高比值沿水深變化圖

從相關研究裡可以得到一整體的印象就是隨著水深的加大，壓力頭所量測到水頭變化就相對減少，此與壓力與波形轉換的關係一致。也就是由於長週期波的水粒子可及於底床，因此水壓力變化也可以傳達到底床；而短週期波則因為水粒子運動不及於底床，因此較深水處的壓力計量到很小的壓力變化。在深水處的波形都有高頻振動的情形應是由於壓力計的體積所造成的擾動。未來將利用濾波的方式將此一干擾濾除再在進行比較。而需要注意的是，即使是非線性波動，其壓力傳遞到某一水深(例如-42.5 cm)以下，所量測到的壓力都幾乎呈規則性變化的情形。即使由於波形尖銳度過大而形成不穩定波形的試驗中，壓力計所量測到的波形也都較為平滑，此與依波壓與水位轉換函數所述的關係應為形狀類似但振幅大小呈餘弦超越函數衰減的特性有不合之處。而由各試驗之水位高程變化比較中也發現，在短週期波(1秒)時深水處的波壓力近似於零，但仍有些微的週期性變化，而且其關係分佈明顯展現在波峰及波谷處的非線性現象。

綜合以上的觀察，顯示波動下的水壓力傳遞可能尚有其他機制，例如水力子的運動所造成的局部性流速，而非一般在流體力學中所認定的 $p=\gamma(h+\eta)$ ， h 及 η 係指某一垂直方向的高度值，純粹以(非水平面)靜水壓的形式來計算，如圖 2.6 所示。壓力有隨水深重新分佈組合的情形。

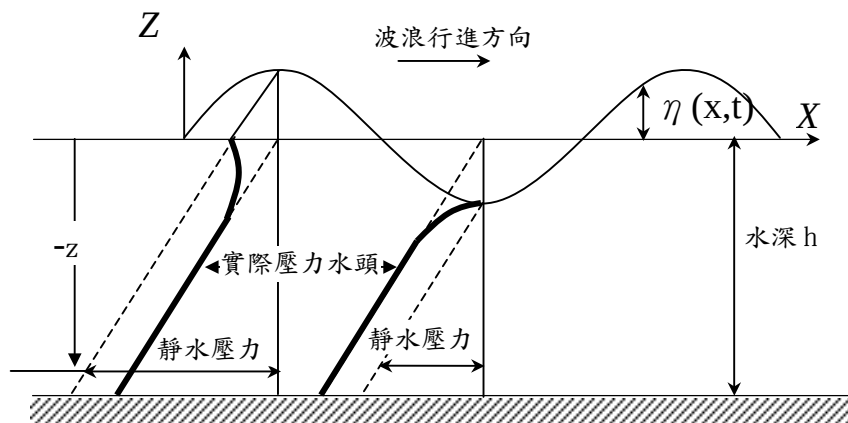


圖 2.6 波峰與波谷之垂直波壓分布

對規則進行波水面波形與水中壓力波形間的關係可能隨著波浪的

特性而不同，深水波的波壓力在二分之一波長之內的水深中，波壓力有隨水深衰減的情形，波高也顯示出有局部性的影響，而二分之一波長以下的水深中由於流體的質量與動量連續，仍然有某一程度的擾動；中間性波由於水粒子的運動幅度隨水深而不同，因此也有不同程度衰減；而淺水波則會有完全相關的性質。因此，線性波理論可能仍適合於解釋等水深地形上規則進行波水面波形與水中壓力波形間的關係，但需要加上一個隨水深、波浪週期及波高變化的比例係數進行修正。

2.5 矩形港池平面遮蔽試驗

為了瞭解波浪進入港灣後，由於港形所造成的多重反射後，港內水面波動與水下波壓間的關係，本中心利用一 6m×6m 的部份開口(2m)等水深矩形港池(水深為 40cm)進行平面遮蔽試驗，港口內外的壓力計(編號為 P01~P15)與容量式波高計(編號為 W16~W30)的佈置如圖 2.7 中所示。其中，P01~P11 壓力計與 W16~W26 波高計依序分別相對應地佈置於同一地點之水面及水底。實驗的波向共進行了正向(0°)及斜向(45°)兩種與規則及不規則造波，造波週期分布於 0.8~2.0 秒，而波高則分布於 2~14 公分之間，如表 2.2 所示。

表 2.2 平面試驗造波條件

造波週期 ($T_{1/3}$, sec)	0° 正向入射		45° 斜向入射	
	規則波波高 ($H_{1/3}$, cm)	不規則波波高 ($H_{1/3}$, cm)	規則波波高 ($H_{1/3}$, cm)	不規則波波高 ($H_{1/3}$, cm)
0.8	2,3,4,6	2,5,8,10	3,5,10,12	3,6,7,8
1.0	2,4,5,6	2,3,5,6,10	3,6,8,10	6,7,8,9,10
1.2	6,8,10,12,14	3,6,7,10	5,8,10,12	4,6,7,8
1.4	4,6,8,10,12	3,6,10,12	4,7,10,12	2,4,6,8,9
1.6	3,6,10,14	4,6,9,12	5,8,12,14	2,4,7,8,9
1.8	4,8,12,14	2,5,8,12	5,7,9,10,12	2,4,5,7,8
2.0	6,8,12,13	3,6,10,13	4,8,10,12,14	2,4,5,6,8

試驗分析除了傳統的特性波高分析(時間域零上切法)與頻譜分析(頻率域)以外，也探討波高計所直接量測的水面波動與由不同水深所得

波壓記錄的換算水面波動的比較。但由於資料量過大，圖 2.8 顯示各測站的壓力計轉換波高與波高計量測波高的比值圖，而不規則波及規則波作用下波高計與壓力計所量測的水面波動變化關係可分別參考 94 年度報告之附錄 B 中圖 B.13 至圖 B.18 及圖 B.19 至圖 B.25。

綜合相關比較發現，壓力計所量測轉換的波高與波高計的量測波高變化趨勢還很類似，但是波高值就有很明顯的差異。在短週期波時此種差異較顯著，而長週期波時則波高值較為接近。而壓力計轉換波高與波高計量測波高比值的比較中則顯示不論是規則波或者是不規則波的作用，波高的比值不僅是不同造波條件就不一樣，同一造波條件中的不同量測位置亦明顯不同。從 94 年度報告之附錄 B 中圖 B.13 至圖 B.25 的波高計與壓力計所量測的水面波動變化關係也發現與前述斷面水槽中的試驗結果有明顯的差異性。即使水面波動變化不大時，卻仍可量測到大幅度的壓力變化。

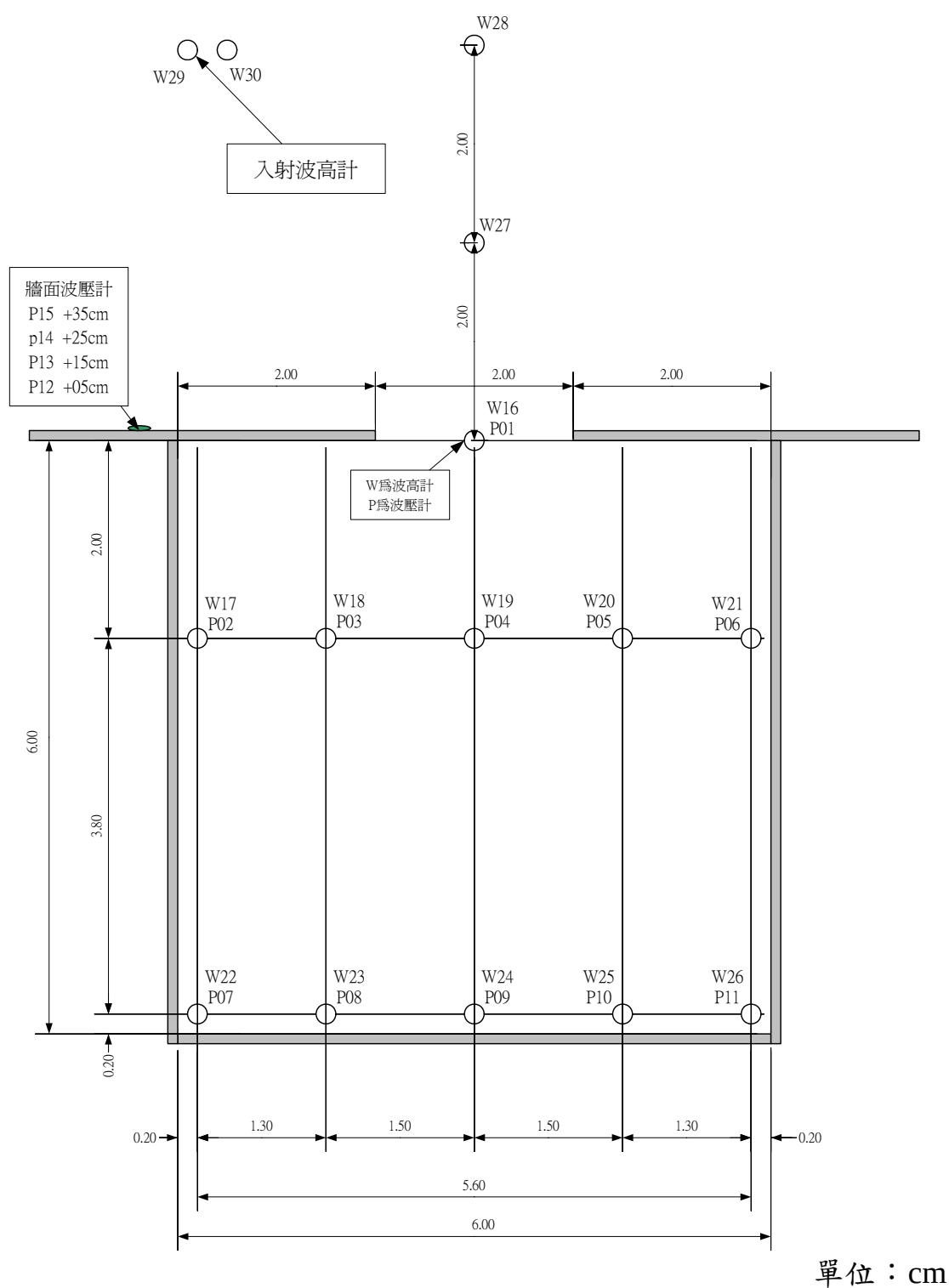
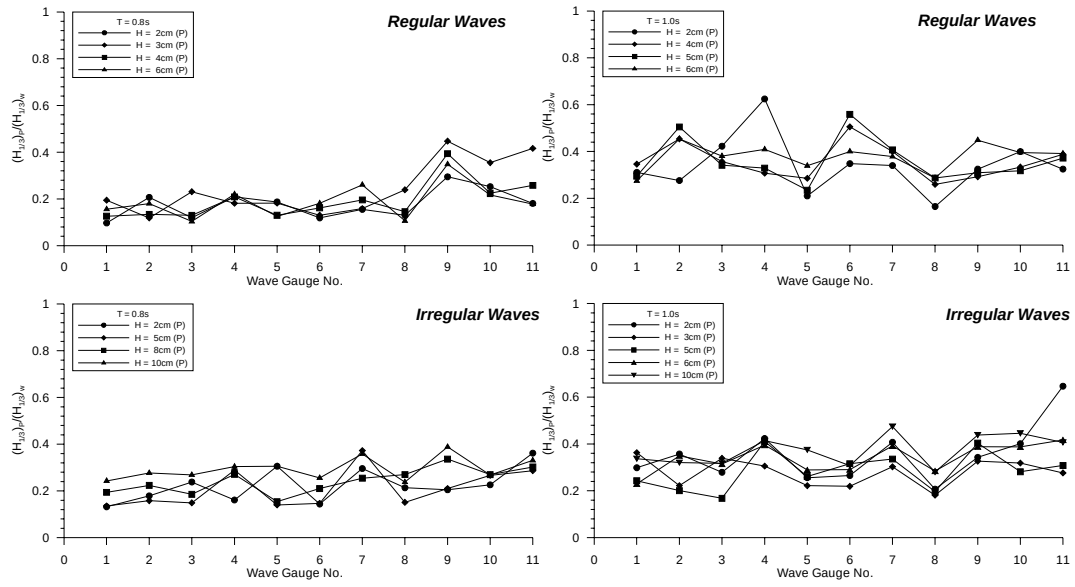
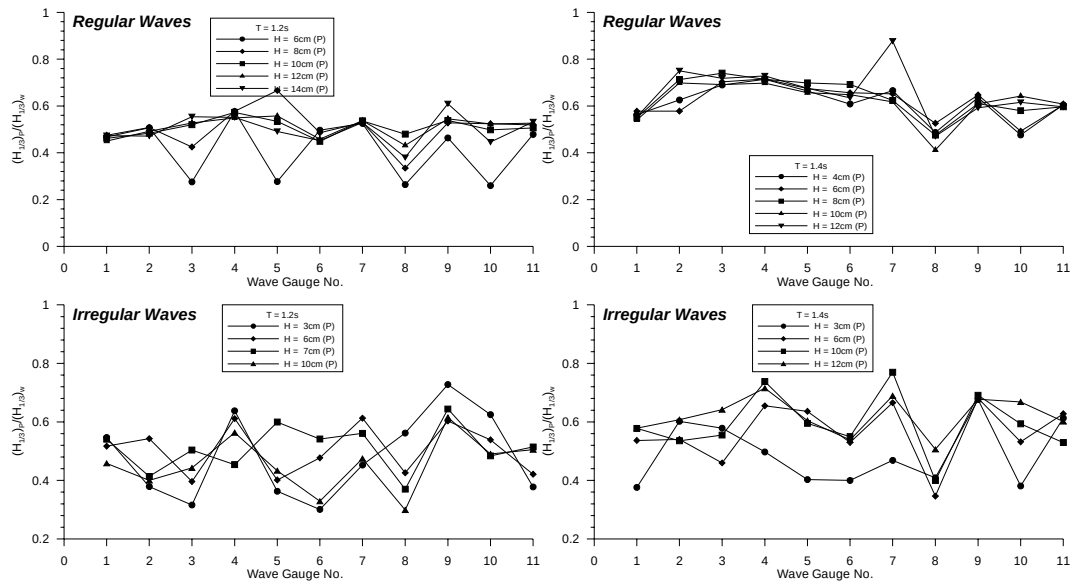


圖 2.7 部份開口矩形港池之平面遮蔽試驗中壓力計(P)與波高計(W)之佈置情形



(a) T=0.8s

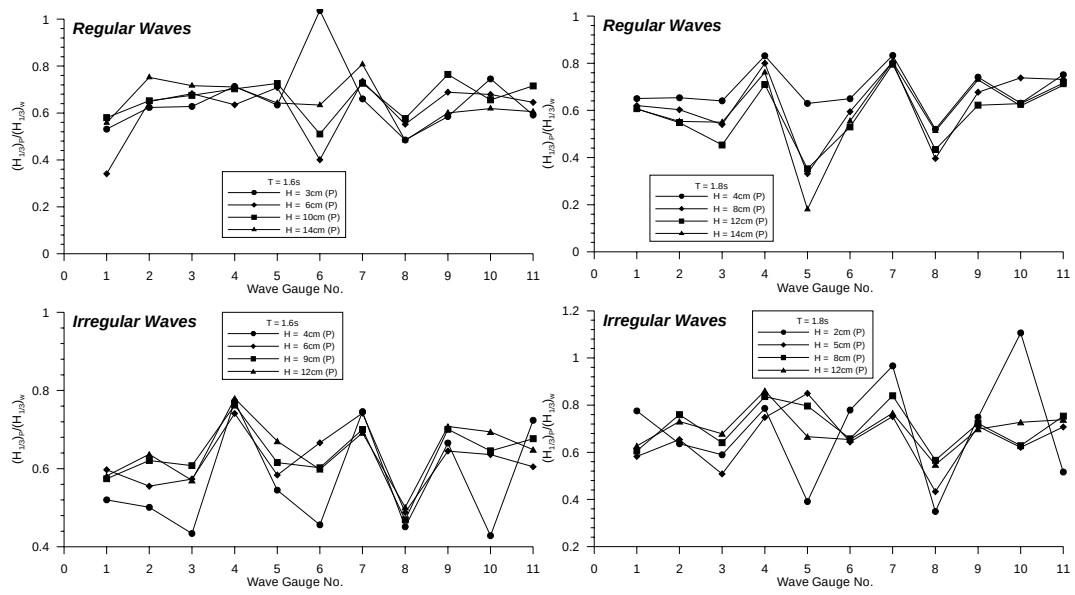
(b) T=1.0s



(c) T=1.2s

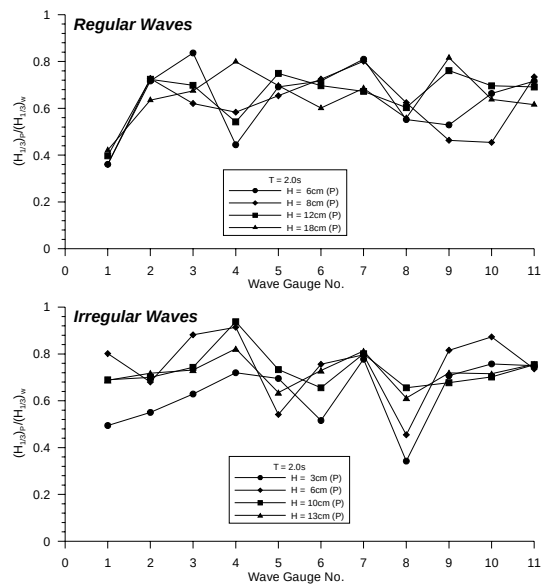
(d) T=1.4s

圖 2.8 部份開口矩形港池之港內波高計量測波高與壓力計轉換波高比值圖(0°正向入射)



(e) $T = 1.6s$

(f) $T = 1.8s$



(g) $T = 2.0s$

圖 2.8(續) 部份開口矩形港池之港內波高計量測波高與壓力計轉換波高
比值圖(0° 正向入射)

2.6 綜合討論

綜合以上的試驗結果，包含斷面水槽試驗中規則進行波通過等深地形及凹陷地形，不規則進行波通過凹陷地形，以及平面水槽試驗中規則波正向入射進入等深地形與部分開口矩形港池內，可以發現並非如線性波浪理論以及一般所預期的簡單關係，在進行波的試驗結果中其水壓力與水面波動的轉換關係較符合線性波理論，但至少需要再進行一與波長、波高及水深相關的衰減修正。在港內的試驗結果，由於波浪係多方向且多重反射，即使是規則波的造波條件，其水壓力與水面波動的轉換關係就明顯與線性波理論不同。推測應是與水粒子的運動有關(區域性的流速)。所以，水壓力與水面波動的轉換關係除了與水位的變化有關外，應與水下個量測點附近的水粒子速度有強烈關係。目前無法得到一肯定的關係式，而且未來有必要再擴大試驗與現場觀測。

第三章 波浪觀測與資料分析統計

3.1 取樣頻率對波動資料分析的影響

為了進行長期的波浪觀測，本計畫考量到自記式波浪儀的記憶體容量，以及人力資源的使用，除了兩次聯合觀測中，配置了兩種不同廠牌的壓力式波高計，其中鎮儀公司的S700波高計係以0.5秒(2 Hz)進行連續取樣，而SeaBird的SBE39水位計則是以6秒(0.16667 Hz)進行取樣。在例行性的觀測工作中則僅以SBE39水位計進行6秒(0.16667 Hz)或15秒(0.06667 Hz)的連續取樣。由於取樣頻率的不同，也引發了訊號失真(aliasing)的疑慮。本章的測試即針對此一主題進行相關的探討。

測試的波形如下式所示，係由兩個餘弦波線性疊加而成。為了能避免原始訊號的失真，我們以0.01秒的時間解析度以及1000秒的時間長度進行訊號的建構。

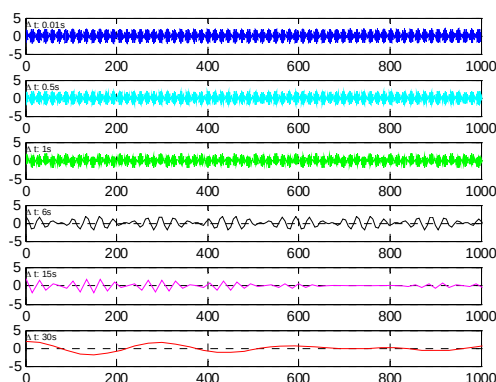
$$\eta(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T(1-\alpha)}t\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{T(1+\alpha)}t\right) \dots\dots\dots (3.1)$$

式中， T 為主要代表週期，介於 3 至 50 秒之間，間隔 1 秒； α 為週期調整值，以介於 0.02 至 0.2，間隔 0.02 進行相關的測試。在波形方面一共測試 480 種組合。為探討不同取樣頻率所可能造成的訊號失真問題，乃以不同的取樣時間間隔，如 0.5、1、6、15 及 30 秒等在原始波形上取樣，並進行 FFT 的頻譜分析，從頻譜上觀察訊號的失真情形。

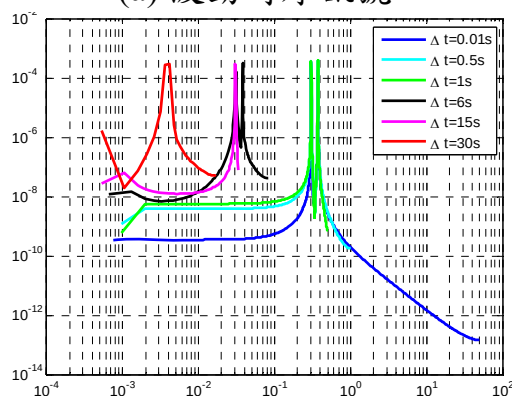
圖3.1為週期2.7秒與3.3秒之規則合成波形所進行的不同取樣頻率之波形記錄及分析頻譜。圖3.2中陳列對不同週期組成之規則合成波形所進行的不同取樣頻率之分析頻譜。從圖中可以看出不同週期的波浪在不同的取樣方式下，可能產生訊號的失真。例如當 $T=3s$ 、 $T=5s$ 、 $T=10s$ 及 $T=20s$ 時，取樣時間間隔大於1秒即發生訊號週期向長週期偏移的失真情形。而當 $T=30s$ 、 $T=40s$ 及 $T=50s$ 時，取樣時間間隔大於

15秒才發生訊號週期向長週期偏移的失真情形。但是當 $T \geq 100s$ 以上的測試中，即使取樣時間間隔等30秒也不發生訊號週期偏移的情形。因此，如同在Fourier頻譜分析中所要求的，只要所使用的取樣時間間隔能在一個波動中取得兩個點，在頻譜分析中的各成分波頻率便不致發生失真問題。

為了進一步瞭解aliasing現象在實測資料中的影響，圖3.3係以花蓮港外港區於2006年8月15日利用S700壓力式波高計(以2Hz取樣頻率連續記錄15000秒)觀測波動紀錄並分別以0.5、1、2、5、6、15秒等取樣週期擷取時間序列後之分析頻譜。從圖中可以發現，在實測頻譜中似乎並沒有因為取樣週期的不同而發生額外而明顯的譜峰頻率。依照以上的心得，本計畫所設定的波動觀測取樣時間間隔為6秒或15秒，應可以正確地抓取到週期12秒或30秒以上的波動成分。

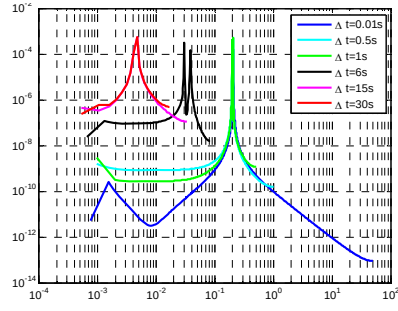


(a) 波動時序訊號

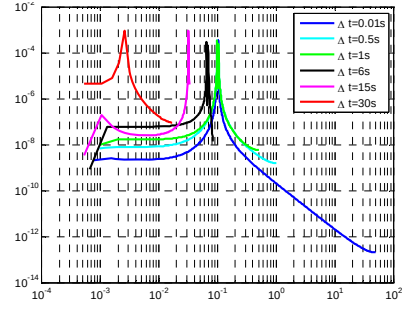


(b) 波動頻譜

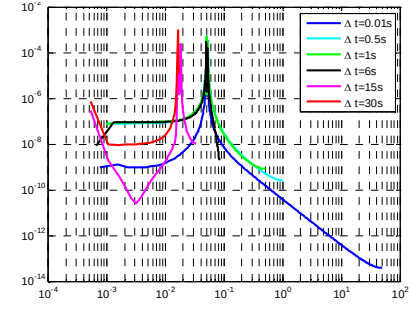
圖 3.1 週期 2.7 秒及 3.3 秒波形組合的不同取樣時間間隔測試



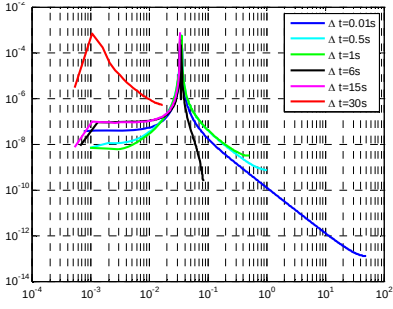
(a) 4.9 秒+5.1 秒



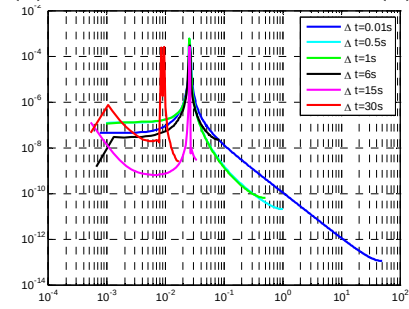
(b) 9.8 秒+10.2 秒



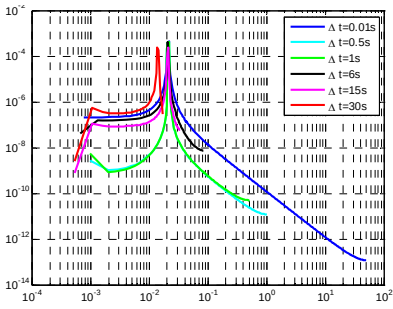
(c) 19.6 秒+20.4 秒



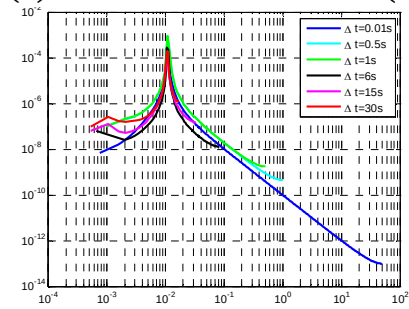
(d) 29.4 秒+30.6 秒



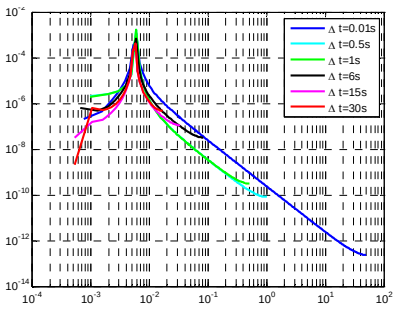
(e) 39.2 秒+40.8 秒



(f) 49 秒+51 秒

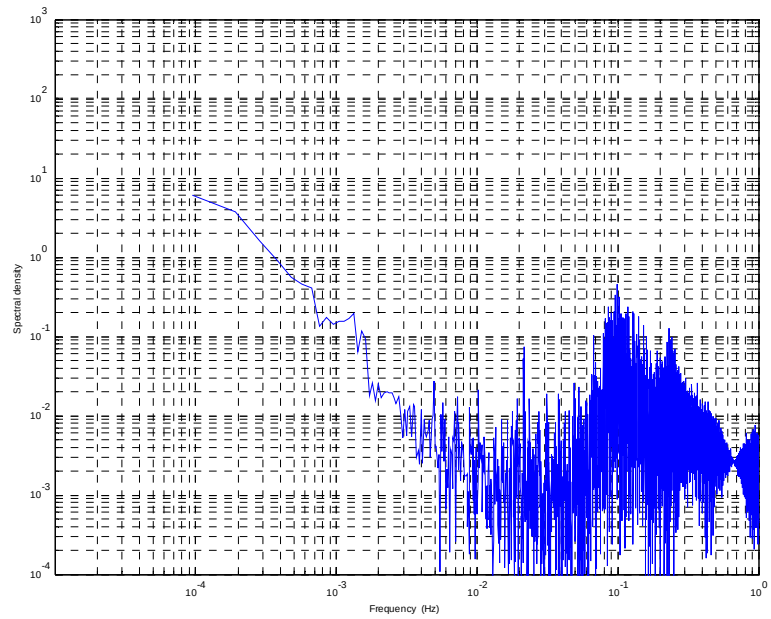


(g) 98 秒+102 秒

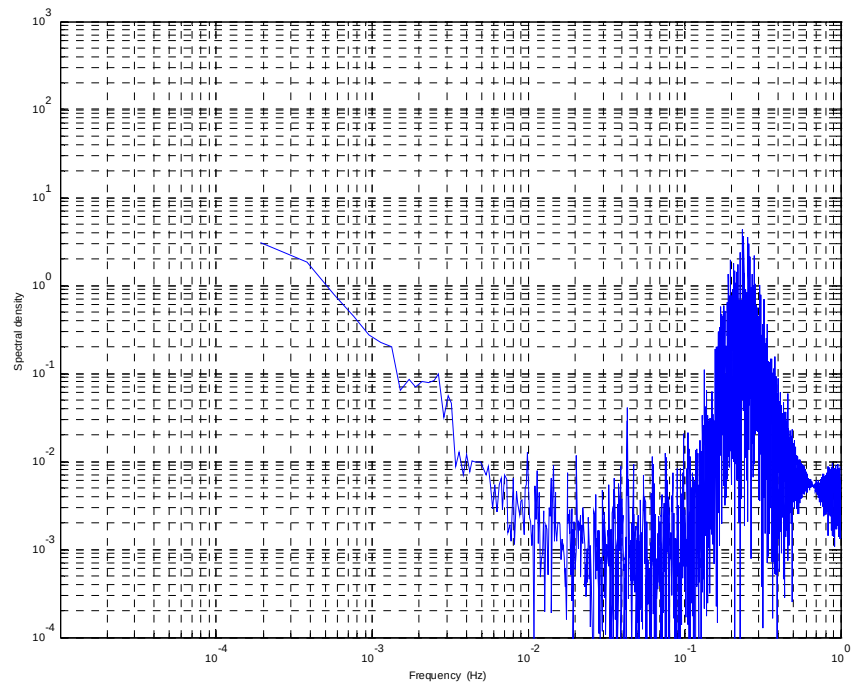


(h) 196 秒+204 秒

圖 3.2 不同週期波形組合的不同取樣時間間隔測試

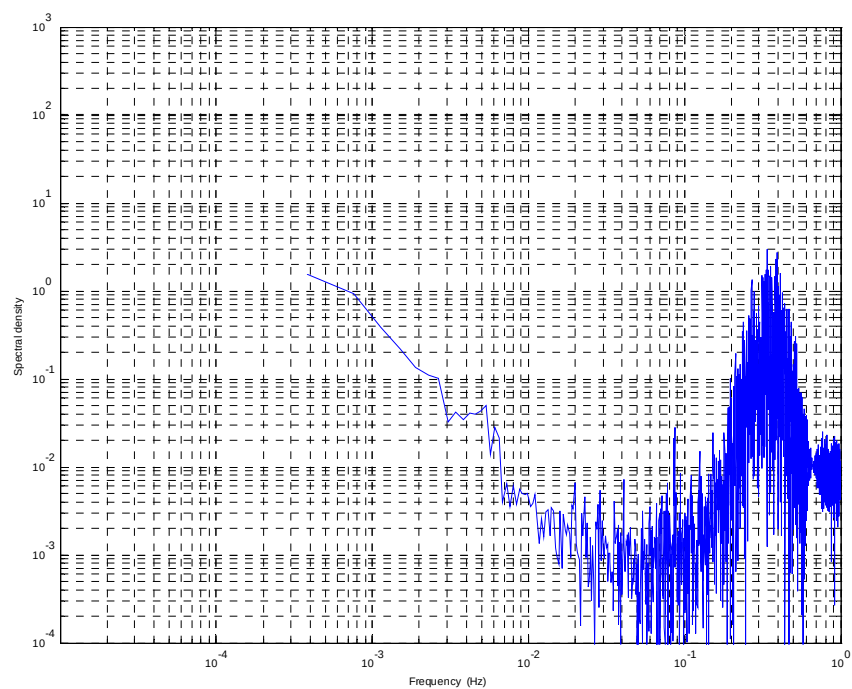


(a) 取樣週期：0.5 秒

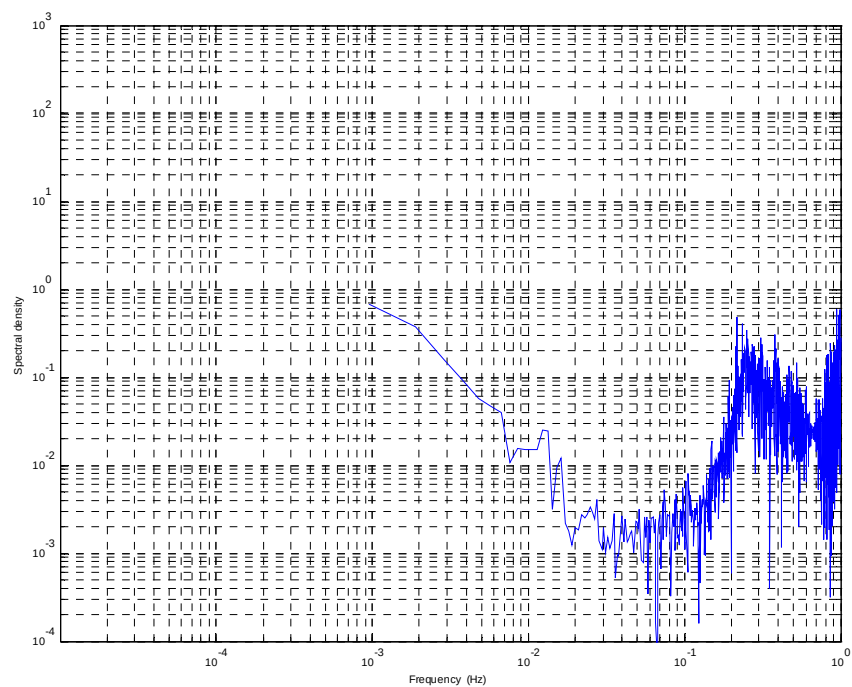


(b) 取樣週期：1 秒

圖 3.3 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試

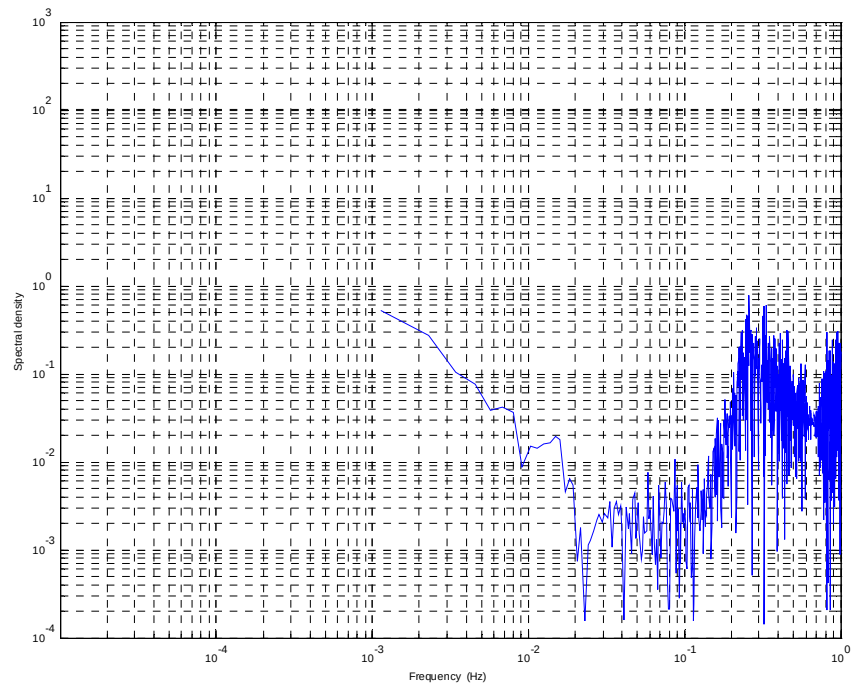


(c) 取樣週期：2 秒

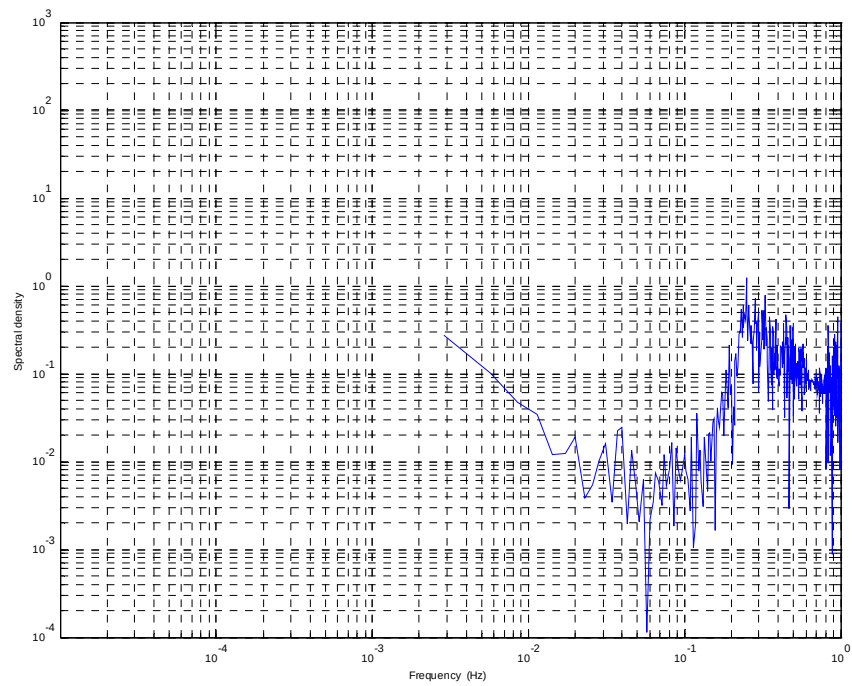


(d) 取樣週期：5 秒

圖 3.3(續) 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試



(e) 取樣週期：6 秒



(f) 取樣週期：15 秒

圖 3.3(續) 以花蓮港外港區實測資料進行不同取樣週期之測試

3.2 Hilbert-Huang 轉換在波動分析上的應用

本文有關 Hilbert-Huang 轉換的簡介主要是參考 Huang 等(1996, 1998, 1999)及 Huang and Shen(2005)的著作。傳統的訊號分析方法多建立於線性及定常的假設之下，直到近幾年來才有新的方法用來分析非定常及非線性的資料。例如，小波分析(wavelet analysis)及 Wagner-Ville 分佈(Flandrin 1999; Gröchenig 2001)是用來分析線性但非定常的資料。而也有多種時間序列分析方法(如 Tong 1990; Kantz and Schreiber 1997; Diks 1999)被用來分析非線性但定常且確定性的系統(nonlinear but stationary and deterministic systems)。不巧的是，在大部分實際的系統中，不管是自然的或人為的，資料多半屬於非線性且非定常的。而要分析這種系統的資料是一件讓人非常氣餒的問題。即使是已經被廣泛接受建立在即時資訊準則上(a priori basis)的有關資料延伸數學演算也必須要避開，因為即時資訊準則的反覆計算可能會引發更多的問題。要表現非線性及非定常性資料的必要條件是必須要有一個適合的準則。一個由瞬間資訊所定義的函數，不論該基礎函數是多麼地精密，都無法被當成是一個基本成分。如 Windrow and Stearns (1985)的整理，只有很少的方法適合用於訊號的分析。然而，這些參考書裡所提供的方法都是針對定常過程的資料。對於非定常及非線性的資料，則尚無合適的方法。這樣的準則應該如何建立？這樣的準則具有什麼樣的數學特性及問題？建立一個資料分析的適當方法的目標應該如何進行？所謂的‘合適的’(adaptive)是指準則的定義必須是隨資料而變的(data-dependent)，是一個後定義(a posteriori-defined)的準則，是一個完全和已經建立有關資料分析的數學演算不同的方法。因此，這樣的定義要求將是數學家的一大挑戰。即使是個挑戰，一個可以檢視實際環境中的資料的新方法仍是需要的。一個最近由 Huang 等(1996, 1998, 1999)新發展的方法，Hilbert-Huang 轉換(Hilbert-Huang Transform，以下簡稱 HHT)，似乎可以符合這項挑戰。

HHT 包含兩個主要步驟：經驗模態訊號分離(Empirical Mode Decomposition，以下簡稱 EMD)和 Hilbert 頻率譜分析(Hilbert Spectral

Analysis，以下簡稱 HSA)。本質上這個方法是可以用來分析非線性及非定常性的資料，尤其是在時間-頻率-能量相互間的表現。它也經過了相當多的測試與驗證(不過都是憑經驗與觀察所進行的!)，在所有研究的案例中，HHT 在時間-頻率-能量相互間的表現上可以得到比其他任何傳統的方法更明顯的結果。更進一步地，在許多實際的資料檢驗中，HHT 可以反映出實際的物理意義。主要是因為這個方法是完全依靠經驗的。不過，為了要讓這個方法更加地健全與精確，還有許多與 HHT 有關的重要數學問題必須要被解決。

EMD 的處理主要是在簡單假設任何資料都包含不同的簡單內隱模式的振動(intrinsic mode of oscillations)。每一個內隱形式，不管是線性的或是非線性的，代表一個具有相同數目的極值與零切點的簡單振動。簡言之，EMD 可以將時序波動訊號中的合成波形分離成許多個簡單且不需具有固定週期及振幅的時序波動訊號。在 HHT 中，時序訊號首先利用 EMD 的方法進行載波/騎乘波的訊號分離，每一個成功分離的時序訊號稱之為內隱模態函數(Intrinsic Mode Function，以下簡稱為 IMF)。而後再針對每一個 IMF 進行 Hilbert 轉換並進行能量加總以求得整個時序訊號的 Hilbert 頻率譜。在討論 EMD 之前，首先就與 HHT 相關的瞬時頻率(Instantaneous Frequency)及內隱模態函數(Intrinsic Mode Function)作一簡單介紹。

3.2.1 Hilbert 轉換與瞬時頻率(Instantaneous Frequency)

假設一任意的時序訊號， $X(t)$ ，我們可以從下列的公式計算得到它的 Hilbert 轉換， $Y(t)$ ，

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(t')}{t-t'} dt' \dots\dots\dots(3.2)$$

式中， P 表示 Cauchy 主值(Cauchy principal value.)。這樣的轉換對所有的 L_p 階函數都存在。根據這個定義， $X(t)$ 及 $Y(t)$ 形成一個共軛複數對，我們可以得到一個解析訊號， $Z(t)$ ，如下所示

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \dots\dots\dots(3.3)$$

其中，

$$a(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{1/2}, \quad \theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \dots\dots\dots(3.4)$$

理論上來說，定義式(3.3)的虛數部的方法有無限多，不過 Hilbert 轉換提供了一個唯一的方法。因此它的結果是個解析函數。本質上，式(3.2)定義了 Hilbert 轉換為 $X(t)$ 以 $1/t$ 的旋轉，因此它強調了 $X(t)$ 的區域性特性。在式(3.3)中，極座標的表示方法更進一步地澄清此一表示式的區域性本質：它是一個對 $X(t)$ 以變動振幅與相位的三角函數進行的最佳區域性擬合。即使是利用 Hilbert 轉換，對瞬時頻率的定義，如式(3.5)所示，還是有相當多的爭議。

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \dots\dots\dots(3.5)$$

Cohen(1995)定義了一個單一成分函數(monocomponent function)。原則上，由於式(3.5)所定義的瞬時頻率在時間的單值函數，資料應該要有所限制。在任何時間上，都只有單一一個頻率值，因此只能代表一個成分，所以是單一成分。但不幸的是，對單一成分訊號並沒有明確的定義，以便作為到底函數是否為單一成分的判斷。基於缺乏正確的定義，窄頻(narrow band)被用來作為資料的限制以使瞬時頻率合理化(Schwartz et al. 1966)。

對於頻帶寬的定義一般有兩種：第一種是用在訊號及波動的機率特性的研究上，機率過程被假設為定常的及高斯分佈的。因此，帶寬可以被定義為如下式所示的頻譜矩的運算。單位時間裡零切點數的期待值被定義為

$$N_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \dots\dots\dots(3.6)$$

單位時間裡極值點數的期待值被定義為

$$N_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \dots\dots\dots(3.7)$$

其中， m_i 表示第 i 階的譜矩。因此，定義參數 ν

$$N_1^2 - N_0^2 = \frac{1}{\pi^2} \frac{m_4 m_0 - m_2^2}{m_2 m_0} = \frac{1}{\pi^2} \nu^2 \dots\dots\dots(3.8)$$

為一標準的頻譜帶寬度量值。對於窄頻頻譜，其 $\nu = 0$ ，表示訊號中的零切點數與極值點數相同。

第二種定義是比較普遍的，它也是根據頻譜矩計算而得的，但計算方法不同。首先考慮一個在極座標上的複數函數

$$z(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \dots\dots\dots(3.9)$$

式中， $a(t)$ 及 $\theta(t)$ 是時間的函數。假如此一函數有頻譜 $\theta(t)$ ，則其平均頻率可以表為

$$\langle \omega \rangle = \int \omega |S(\omega)|^2 d\omega \dots\dots\dots(3.10)$$

也可以表示成其他的形式

$$\begin{aligned} \langle \omega \rangle &= \int z^*(t) \frac{1}{i} \frac{d}{dt} z(t) dt \\ &= \int \left(\dot{\theta}(t) - i \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right) a^2(t) dt \dots\dots\dots(3.11) \\ &= \int \dot{\theta}(t) a^2(t) dt \end{aligned}$$

根據這個表示式，Cohen(1995)建議將 $\dot{\theta}(t)$ 視為瞬時頻率。因此，頻帶寬可以定義為

$$\begin{aligned}
\nu^2 &= \frac{(\omega - \langle \omega \rangle)^2}{\langle \omega \rangle^2} = \frac{1}{\langle \omega \rangle^2} \int (\omega - \langle \omega \rangle)^2 |S(\omega)|^2 d\omega \\
&= \frac{1}{\langle \omega \rangle^2} \int z^*(t) \left(\frac{1}{i} \frac{d}{dt} - \langle \omega \rangle \right)^2 z(t) dt \quad \dots\dots\dots (3.12) \\
&= \frac{1}{\langle \omega \rangle^2} \left[\int \dot{a}^2(t) dt + \int (\dot{\theta}(t) - \langle \omega \rangle)^2 a^2(t) dt \right]
\end{aligned}$$

對於一窄頻的訊號，此一值必須很小，而 $a(t)$ 及 $\theta(t)$ 都必須是緩變函數。不幸的是，式(3.8)及(3.12)所定義的頻寬都是全域性(global)的，它們同時都是過度限制且缺乏精度的。因此，Hilbert 轉換的頻寬限制其實是還沒有適當定義的。例如，Melville(1983)曾經成功地在帶寬中濾出訊號，但是仍然得到許多不具物理意義的負值頻率，在此也必須強調：利用濾波方式得到窄頻訊號是不被接受的，另一原因是濾出的資料已經被由於非線性及非定常性所產生的簡諧假訊號所污染。

為了得到有意義的瞬時頻率，有些限制條件被用在資料上，如 Gabor (1946), Bedrosian (1963) 及 Boashash (1992)：對於任何具有一個有意義瞬時頻率的函數，其 Fourier 轉換的實數部份必須只有正的頻率。這個限制可以從數學上來證明(Titchmarsh, 1948)，可是它仍然是全域性的。在資料分析上，我們必須要將這個要求轉換到物理上的執行步驟以發展一個簡單的方法以便應用。基於此一目的，我們必須要將限制條件從全域性的修改為區域性的，而準則也必須要滿足某些必要條件。

3.2.2 內隱型函數(Intrinsic Mode Function, IMF)

內隱型函數(IMF)是在 EMD 過程中所產生的時序訊號，它必須要滿足下列兩個條件：

1. 在整個資料列中，極值與零切點的數目必須相等或最多差 1；
2. 在任何點上，局部最大與局部最小包絡線的平均值必須為 0。

例如圖 3.4 即為一個 IMF。

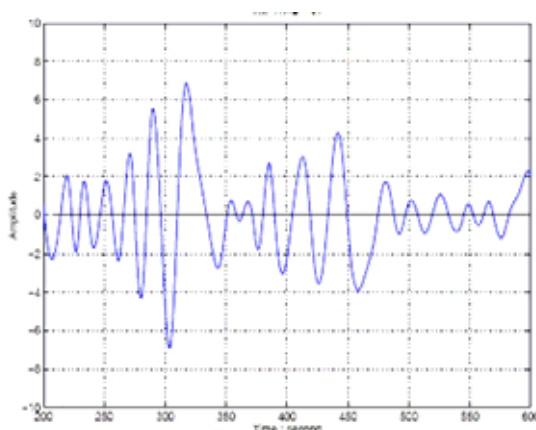


圖 3.4 IMF 的範例(Huang and Shen, 2005)

第一個條件類似於傳統的對一個定常高斯過程的窄頻要求。而第二個條件則是一個新的構想，它將古典的全域性要求修改為局部性要求。這個條件是必要的，因為它可以讓瞬時頻率不致因為不對稱性波形而產生不必要的震盪。理想狀況下，這一個要求應該是：‘局部性的平均值為 0’(the local mean of the data being zero)。但對於非定常的資料而言，局部性平均值(local mean)的計算牽涉到一個無法定義的局部性時間尺度(local time scale)。因此，我們用極大值與極小值的包絡線的平均值以強迫局部性的對稱性來替代，這也是為了避開定義局部性時間尺度的必要近似方法。雖然它將會在非線性變形波動的瞬時頻率引發失真情形，但對於非線性的影響相較於對非定常的影響是較小的。利用以上定義的物理性質與近似方法，顯示這個方法並不保證在任何情況下都會得到一個完美的瞬時頻率。但無論如何，即使是在最差的情況下，計算出來的瞬時頻率仍能夠符合所研究問題的物理性。

IMF 的命名是因為它代表資料中隱藏的振動模態。透過這樣的定義，在每一個用零切點定義的循環中的 IMF 只包含有單一個振動形式，不會出現複雜的騎乘波情形。根據這樣的定義，也顯示 IMF 並沒有限制必須為一個窄頻訊號，而且它允許振幅與頻率是可調整的。事實上。它也可以是非定常的。如上所討論的，單一頻率或振幅調變的函數都可以是 IMF，縱使依據傳統定義它們都是有限帶寬而非窄頻的。

在定義了 IMF 後，以下將說明式(3.5)是最佳的瞬時頻率定義。一個 IMF 經過 Hilbert 轉換後，可以表示為式(3.3)的形式。如果我們對式(3.3)的 $Z(t)$ 進行 Fourier 轉換的話，可以得到

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{i\theta(t)}e^{-i\omega t}dt = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{i(\theta(t)-\omega t)}dt \dots\dots\dots(3.132)$$

透過定常相位方法(stationary phase method)，可參考 Copson (1967)，對 $W(\omega)$ 的最大貢獻可以從滿足下列條件的頻率得到

$$\frac{d}{dt}(\theta(t)-\omega t)=0 \dots\dots\dots(3.14)$$

因此，我們可以得到式(3.5)的表示式。雖然在數學上，定常相位方法對指數函數要求一個大的參數值，假如頻率， ω ，大於振幅變化的局部時間尺度的倒數的話，此處的推導是可以修正的。因此，瞬時頻率的定義符合逐漸變化頻率的最佳值。即使有這種情形，瞬時頻率仍優於零上切頻率，也優於 Cohen(1995)的積分定義，如式(3.11)所示，而且它也符合古典波浪理論的頻率定義，例如 Whitham(1975)。

如式(3.14)及式(3.3)至(3.5)所示，透過定常相位近似法所定義的頻率也與局部性的最佳三角函數近似符合，因此我們不需要整個振動週期就可以定義一個頻率值。我們可以在每一點上定義，並允許在各點之間變化。根據這樣的方法，即使是一個單調函數(monotonic function)也可以視為是一個振動函數的一部份，而且可以從式(3.5)計算出其瞬時頻率。任何頻率的變化稱之為調頻(frequency modulation)。實際上調頻有兩種：波與波之間的(interwave)及波內(intrawave)的調頻。第一種形式是在一個發散系統中振動的頻率在波動之間逐漸變化。在技術上，發散波群中頻率在一個波動中也會變化，但為了方便或因為缺乏一個較正確的頻率定義而沒有被提及。第二種形式也是個很普遍的現象，假如當一個波動的頻率隨時在改變，則它的波形將不再是簡單的三角函數。因此，任何從三角函數形式變形的波形就是波內調頻(intrawave frequency modulation)。在過去，這樣的現象被當成諧波變形

(harmonic distortions)，但視為波內調頻較具有物理意義。

3.2.3 經驗型分解法(EMD)

如 Huang 等(1996, 1998, 1999)文中的討論，EMD 是處理非定常及非線性過程的資料的必要方法。這個新的方法，和幾乎過去所有的方法不同，是根據資料的變化情形及一個後定義的準則，而建立的一種直覺性、直接的、及可調整的方法。訊號分離的方法是根據一個簡單的假設：任何資料是由不同的簡單內隱型振動所組成。每一個代表一種簡單的振動的內隱型函數，不論是線性的或非線性的，的極值點數與零切點數最多差 1。而且其振動對稱於區域性零點(local mean)，也就是符合前節所述的 IMF 的定義。在任何時間點上，分析資料都同時擁有許多不同振動型態(IMF)，而且一個疊加另一個之上，最後形成複雜的波動。

根據 IMF 的定義，我們可以進行波動時序訊號的分解(篩選處理，Sifting process)：

1. 取得待分析時序訊號資料 η_0 ，如圖 2.2(a)所示。
2. 令 $h_0 = \eta_0$
3. 搜尋 h_0 的所有極值(即波峰與波谷)和零切點。
4. 利用三次仿樣曲線求得極大值(極小值)的上(下)包絡線方程式，此二條曲線應該包圍了所有的資料點，如圖 3.5(b)所示。
5. 計算兩條包絡線的平均值曲線 m_1 ，如圖 3.5(b)所示。
6. 計算 h_0 與 m_1 間的差值 h_1 ，即 $h_1 = h_0 - m_1$ ，如圖 3.5(c)所示。
7. 判斷 h_1 是否符合 IMF 的規定，如果不符合的話，令 $c_0 = h_1$ ，重複步驟 3 至 7。

8. 如果 h_1 符合 IMF 的規定，則令 $\eta_0 = \eta_0 - h_1$ ，繼續篩選其他的 IMF($h_i, i = 2, \dots$)。
9. 最後， η_0 可以分解成 $\sum_{i=1}^n c_i + r_n$ ，其中 r_n 為最後的殘差，可能是一個趨勢或是雜訊，但也可能是由於近似曲線計算而產生的誤差。

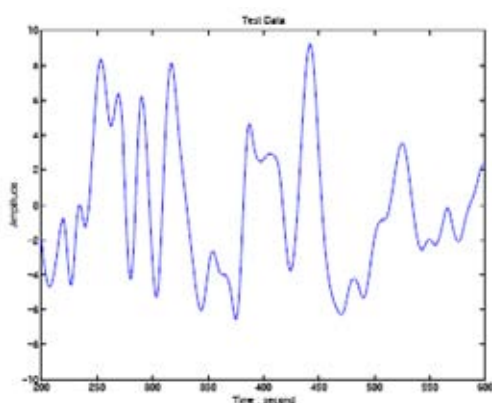
圖 3.5(d) 為 h_1 、包絡線及 m_2 曲線圖；圖 3.5(e) 為 h_2 、包絡線及 m_3 曲線圖；而圖 3.5(f) 為經過 12 次迭代後所得到的第一個 IMF c_1 。

訊號篩選的處理必須要有停止準則，目前大致有兩個準則被提出來：第一個是 Huang 等(1998)根據 Cauchy 型的收斂測試(Cauchy type of convergence test)所提出。該測試要求在相鄰兩次篩選過程的訊號 h_{k-1} 及 h_k 的正規平方差和必須要小。

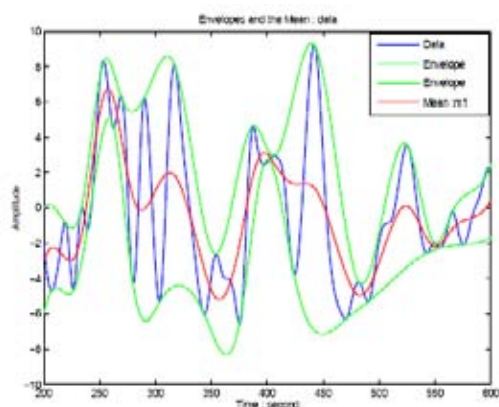
$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2(t)} \dots\dots\dots (3.15)$$

如果 SD_k 小於一個指定的容許值，則可以停止一個 IMF 的篩選過程。但此一看似簡單的準則在實用上並不容易達到。主要的問題在於到底容許值要多小才算合理？還有這個容許值是否應該隨著不同的 IMF 而變？第二種停止準則是 Huang 等(1999, 2003)所建議的：對篩選過程的迭代次數設定上限。當極值點數與零切點數持續保持相等或差 1 時，在迭代次數到達上限值時，停止篩選處理。同樣地，迭代次數的上限值應該為何？仍不能確認。Huang 等(2003)在經過無數次的測試後，建議以 4 至 8 次迭代為上限。

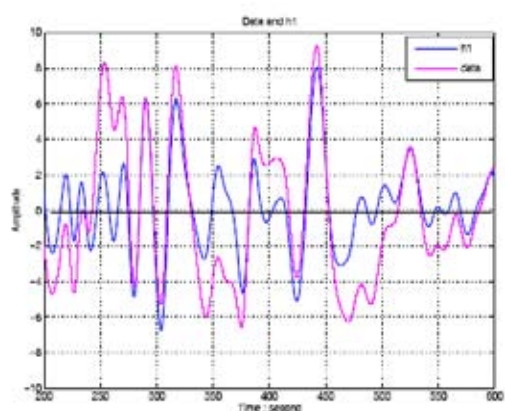
圖 3.6(a)是量測地球每天自轉一週所花時間與 24 小時的差異變化量，圖 3.6(b)及 3.6(c)採用多種不同的迭代停止次數進行測試後的九個不同平均 IMF 值以及其標準差。從圖中可以發現，不同的迭代停止次數準則會在訊號中不同的位置發生不等量的誤差。



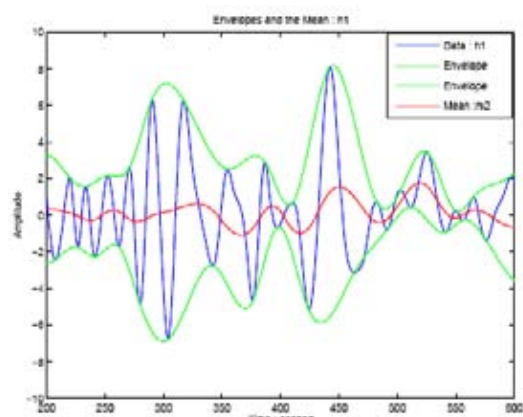
(a) 待分析時序訊號資料



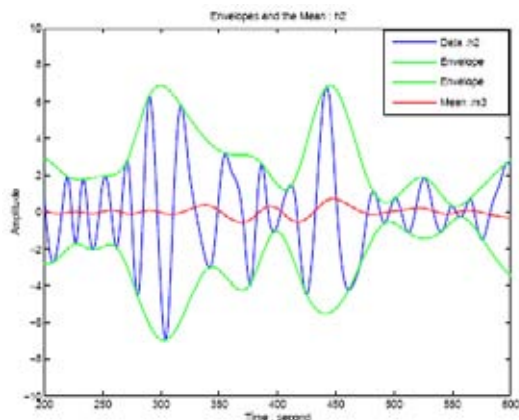
(b) 兩條包絡線與平均值曲線 m_1



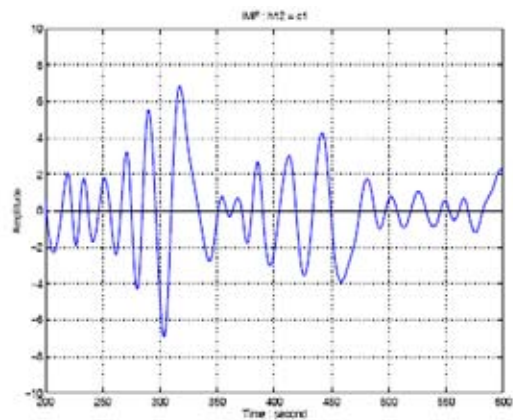
(c) 時序訊號及 h_1



(d) h_1 、包絡線及 m_2

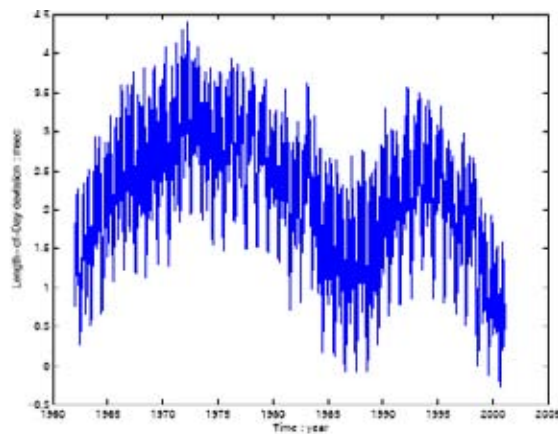


(e) h_2 、包絡線及 m_3

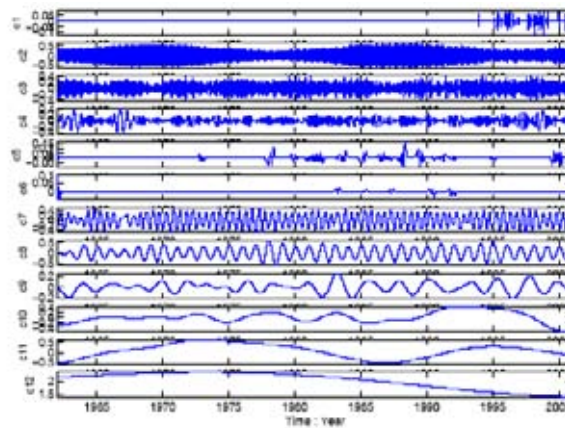


(f) 第一個 IMF c_1 (12 次迭代後)

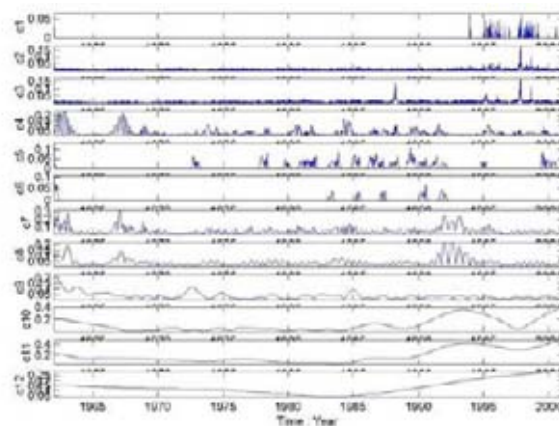
圖 3.5 EMD 解析過程的說明例(Huang 等，2005)



(a) 每日的長度差異值



(b) 用不同停止迭代次數所得之平均 IMF



(c) IMF 的標準差

圖 3.6 地球自轉的每日長度變化(Huang 等，2005)

3.2.4 HHT 的應用與發展

綜合而言，HHT 是由 EMD 及 HST 所組合而成，一個時序訊號首先利用 EMD 與適當的停止準則進行 IMF 的篩選處理，而後再利用 HST 計算各 IMF 的 Hilbert 頻率譜，並進行線性疊加。由於停止準則目前尚無確切且適當的選定建議，導致 HHT 仍必須以個案方式進行時序訊號的分解，但是由於它直接在時間域(time domain)中分解波動訊號，因此不致在處理非線性或非定常性的時序訊號時像 FFT 的處理中可能產生訊號的扭曲(例如，由許多個線性波組合成一個非線性波)。未來仍有相當大的發展與應用空間。Huang and Shen(2005)即提出一些最近的發展以及未來應繼續探討的相關課題。最近的發展包括：

1. Hilbert 轉換的正規化(normalized Hilbert transform)
2. 信賴限度(confidence limit)
3. IMF 的統計特性(statistical significance of the IMFs)

未來應繼續探討的問題主要與 HHT 在分解訊號時所使用的數學方法有關，如

1. 可調整資料分析方法的一般化(adaptive data analysis methodology in general)
2. 非線性系統的辨識方法(nonlinear system identification methods)
3. 非定常過程的預測問題--端點效應(prediction problem for nonstationary processes - end effect)
4. 仿樣曲線的問題，包括適合 HHT 的最佳仿樣曲線、收斂性與二維仿樣曲線(spline problem, including best spline implementation for the HHT, convergence and 2-D)

5. 最佳化問題，包括最佳 IMF 的選擇方式及唯一性(optimization problem, including the best IMF selection and uniqueness)
6. 近似問題，即 Hilbert 轉換及頻譜面積(approximation problems, including Hilbert transform and quadrature)
7. 其他相關的統計議題(miscellaneous statistical questions concerning the HHT)

3.3 遮罩型經驗模態分解法

由於利用三次仿樣曲線求極值包絡線時，常會因為仿樣曲線理論的特性而發生頻率太過接近導致無法分解的問題，如圖 3.7 即為一模態混疊(mode mixing)訊號所產生的問題。Deering 與 Kaiser(2005)提出在 EMD 過程使用遮罩訊號的觀念，其觀念是利用一個頻率相近的正弦波訊號作為遮罩訊號來凸顯原始訊號中的差異量，再進行 EMD 的分析以達到分離兩個頻率相近的成分波。圖 3.8 為 Deering 與 Kaiser(2005)的示範例，混疊訊號幾乎是完全分離。其原理大致說明如下：

由式(3.4)微分可得

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t) = 2\pi f(t) \quad (3.16)$$

式(3.3)與(3.4)合併可得

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \left(\arctan \frac{Y(t)}{X(t)} \right) = \frac{X(t)\dot{Y}(t) - Y(t)\dot{X}(t)}{X(t)^2 + Y(t)^2} \quad (3.17)$$

合併上兩式後經離散希爾伯特轉換(discrete Hilbert transform, DHT)

$$\tilde{f}(i) = \frac{X(i)(Y(i+1) - Y(i-1)) - Y(i)(X(i+1) - X(i-1))}{2\pi t_s (X(i)^2 + Y(i)^2)} \quad (3.18)$$

其中， t_s 為取樣時間。由中心差分法(centered difference)得

$$f(i) = f_s \arcsin(\tilde{f}/f_s) \quad (3.19)$$

其中， f_s 為取樣頻率。

將 $f(i)$ 與原始訊號得到的 IMF 經過 DHT 轉換後求得 $a(i)$ 帶入計算能量加權平均(energy weighted mean) $\bar{f}$ ：

$$\bar{f} = \frac{\sum_{k=1}^k a(i) f^2(i)}{\sum_{k=1}^k a(i) f(i)} \quad (3.20)$$

其中， k 為原始訊號個數。完成計算後將 $f(i)$ 大於 $\bar{f}$ 的訊號挑出並再次套入(3.20)式計算能量加權平均，得到的 $\bar{f}$ 即為遮罩的頻率，而遮罩訊號則設為 $s(n) = a_0 \sin(2n\pi\bar{f}/f_s)$ ，其中振幅 a_0 的選擇會影響到遮罩的效果。套入 EMD 的分析程序中形成

1. 利用原始訊號 $X(t)$ 求出第一個 IMF
2. 將第一個 IMF 經過 DHT 轉換求得振幅 $a(i)$ 及頻率 $f(i)$ 時間序列後，代入式(3.20)以求得能量加權平均頻率 $\bar{f}$ 。
3. 將 Hilbert 頻譜中 $f > \bar{f}$ 的部分再進行能量加權平均頻率 $\tilde{f}$ ，並以此為遮罩頻率，求出遮罩訊號 $s(n) = a_0 \sin(2n\pi\tilde{f}/f_s)$ ，其中 Deering 與 Kaiser(2005)建議振幅 a_0 設為 1.6。
4. 把 $X(t)$ 與 $s(n)$ 相加和相減得到 $r_+ = X(t) + s(n)$ 與 $r_- = X(t) - s(n)$ 。
5. 將 r_+ 與 r_- 分別進行 EMD 分析以得到所有的 IMF 分量 c_+ 與 c_- 。
6. 將得到的對應分量 c_+ 與 c_- 平均而得到 IMF 為 $C = (c_+ + c_-)/2$ 。

解析流程如圖 3.9 所示，然而在本研究的測試中發現 Deering 與 Kaiser(2005)的方法無法確實保所求得的成分訊號能符合 IMF 的定義，尤其當波動訊號充滿非線性特性時。本研究乃針對其特性在處理方法上做了些修改。修改的作業流程如圖 3.10 所示。

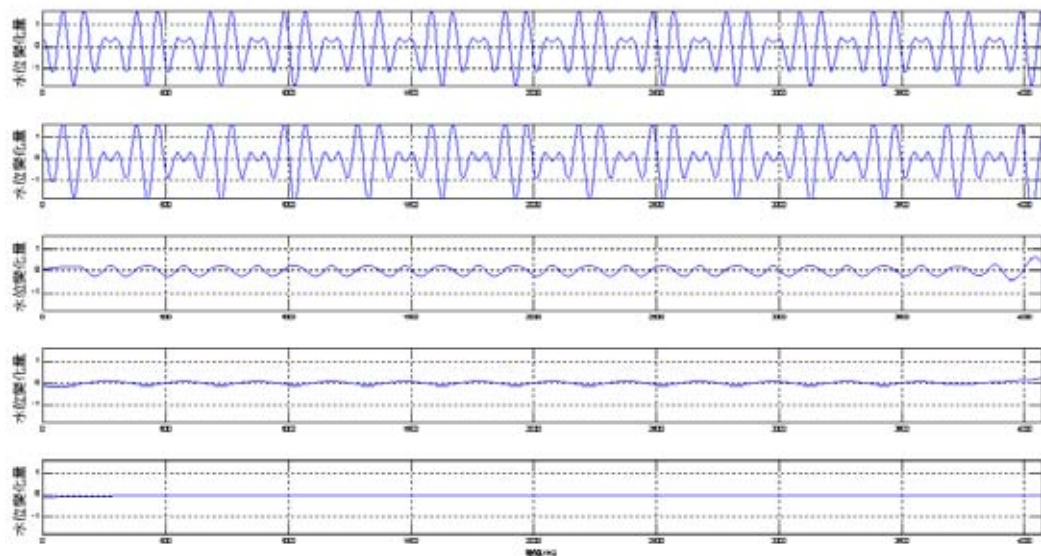


圖 3.7 利用 EMD 處理模態混疊訊號的問題

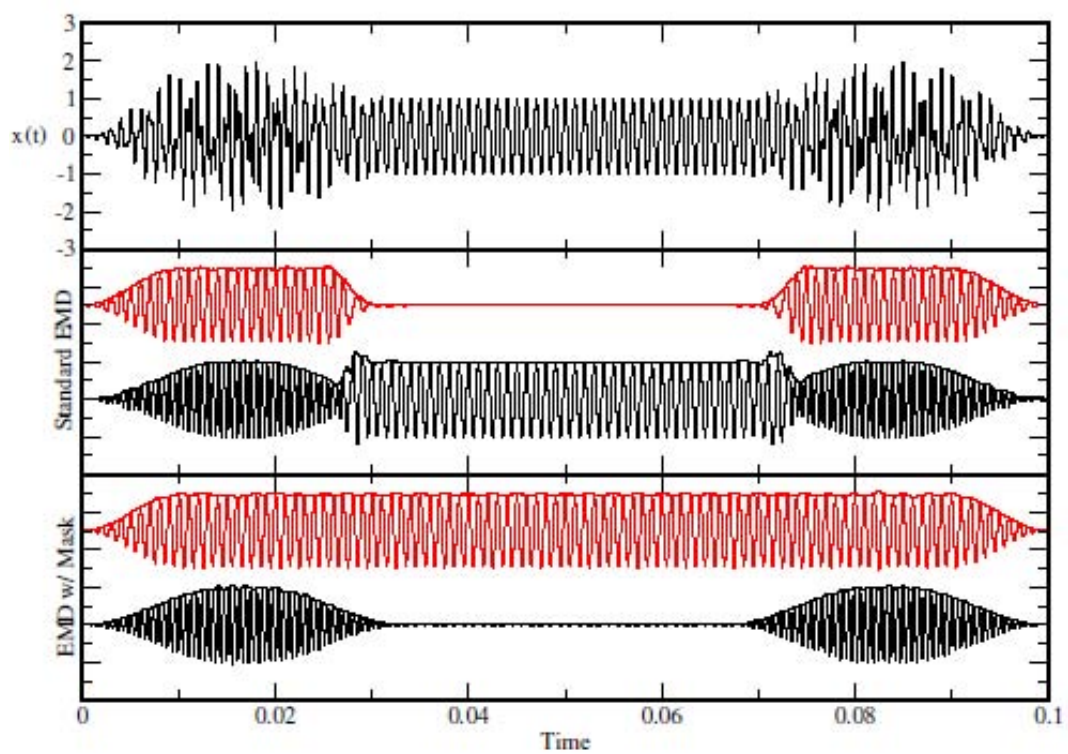


圖 3.8 利用遮罩型 EMD 處理模態混疊訊號的問題

(Deering and Kaiser , 2005)

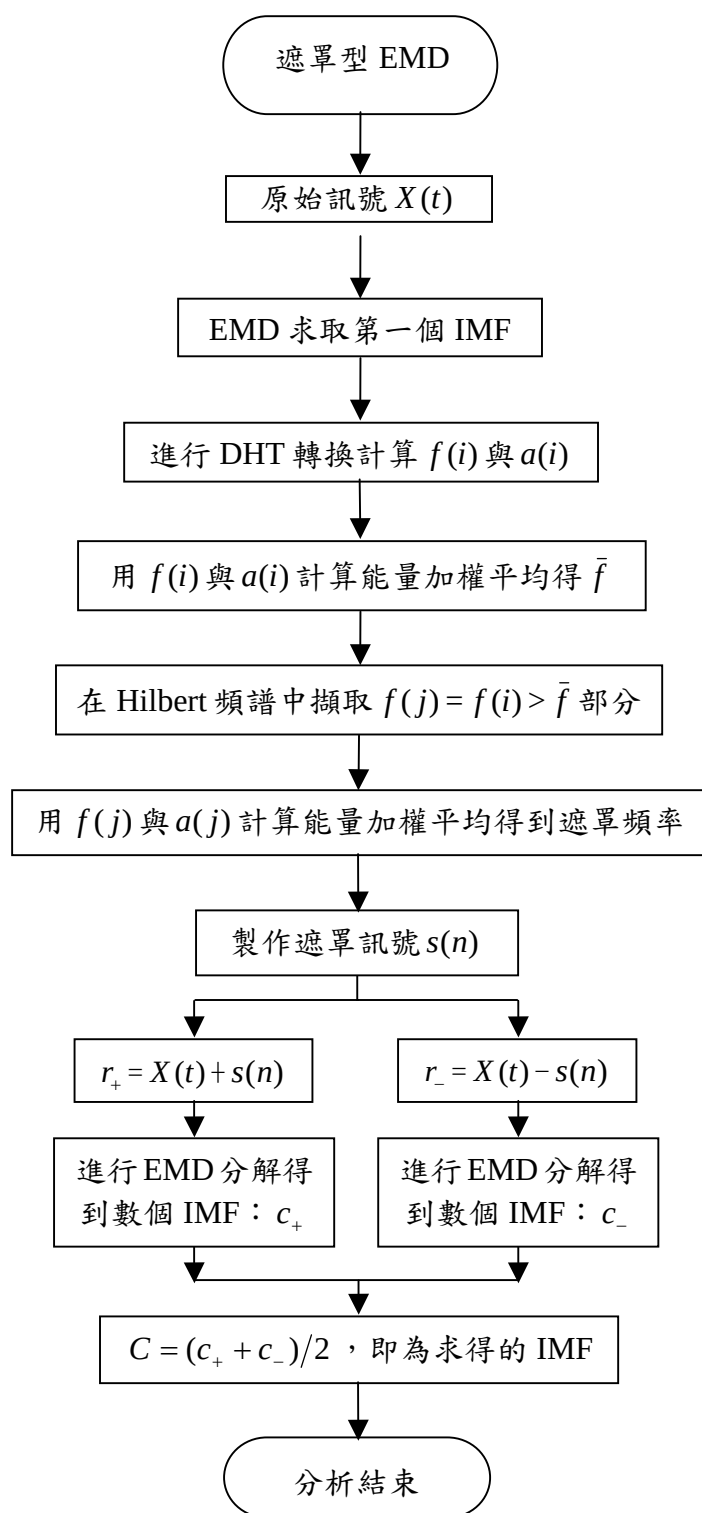


圖 3.9 遮罩型 EMD 解析流程

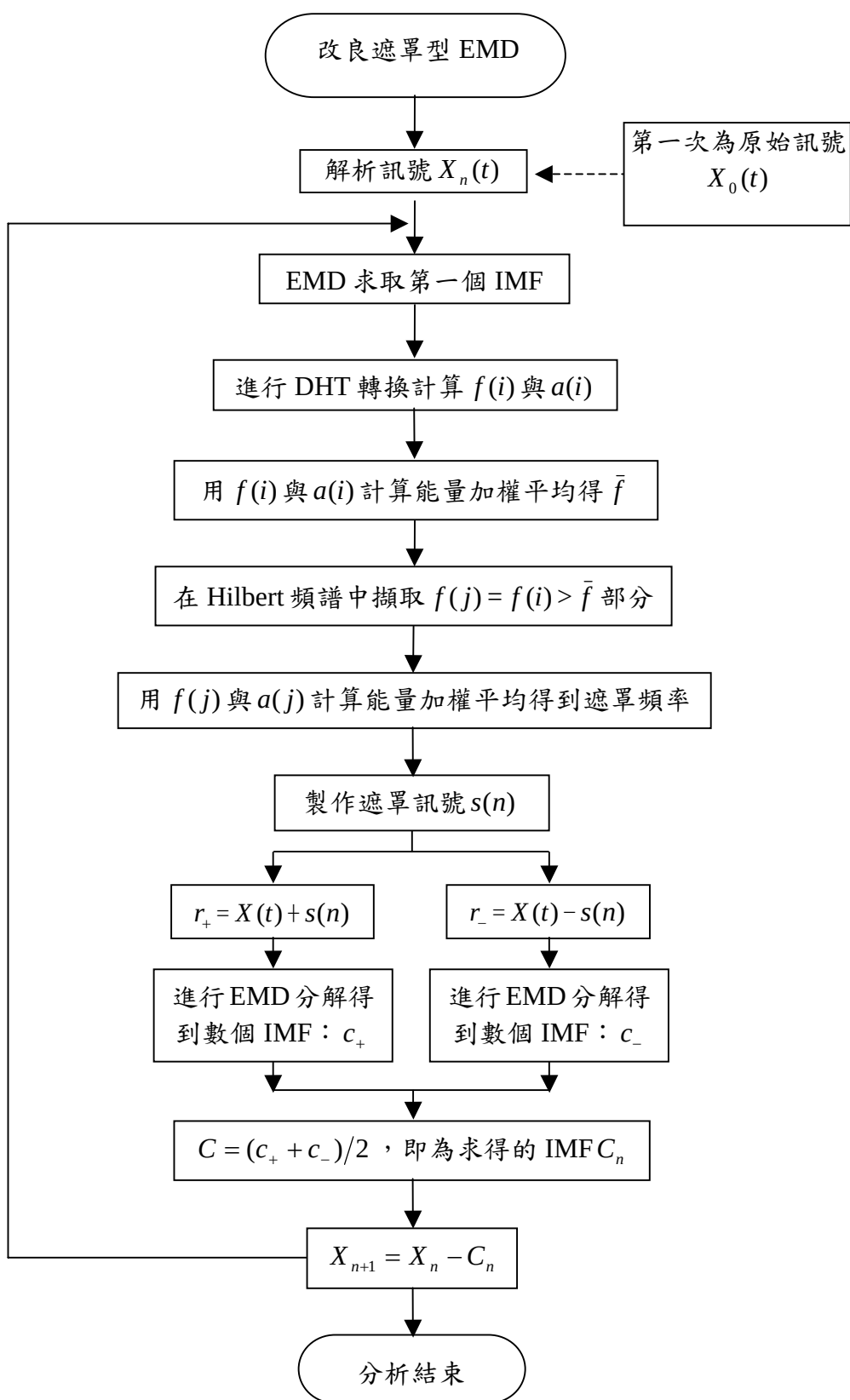
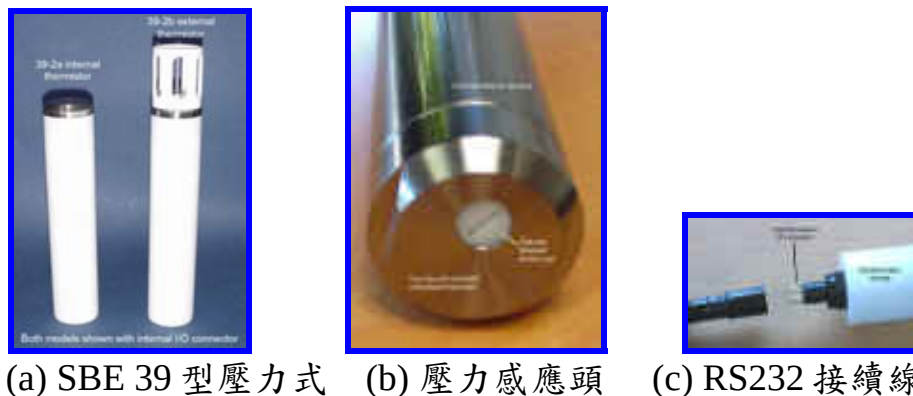


圖 3.10 改良遮罩型 EMD 解析流程

3.4 花蓮港港內波浪觀測分析

為了瞭解花蓮港內長週期波動成分，本計畫規劃了現場港內水位觀測計畫。所使用的潮位計係 Sea-Bird Electronics, Inc. 出品的 SBE 39 型無電纜線的壓力式潮位計(如照片 3.1 所示)，配合自行設計訂製的觀測架，組裝成簡易的潮位站進行潮位觀測。此式無電纜線潮位儀使用長方型 9V 乾電池為供電來源，當電池裝置後，先使用 RS232 外接式電腦接續線，連接桌上型電腦或筆記型電腦進行潮位儀正確的日期、時間及觀測時間的間隔等調整，完成後放入自製的塑膠保護管內再以繩索連結、投入已架設在碼頭岸壁上的潮位觀測架之不鏽鋼保護外管內即可進行潮位觀測。



照片 3.1 現場觀測使用的潮位計

圖 3.11 所示是目前在花蓮港的港內水域配合實際環境所安裝的潮位站位置(以下討論分別以外港測站、中間水道測站及內港測站稱之)，照片 3.2 為潮位計的安裝情形。由於是採用乾電池自記式的潮位計，為了資料的安全性設計每隔約 15 天便取出潮位記下載資料、並重新設定後放回潮位站中繼續觀測。在進行現場水位觀測前，首先在波高計率定筒中進行水位的校定，並確認儀器本身是否有電子振盪訊號。圖 3.12 顯示 5 支潮位計在率定筒中以 6 秒的取樣週期對 0 m 至 5 m 每隔 1 m 水位進行約 40 分鐘的連續取樣的結果，由圖形曲線可以確認本研究所使用的潮位計相當穩定，而且沒有自身的振盪訊號。

由於花蓮港的碼頭設消波效果不佳，使得港內的波動無法儘速消除，其中尤其是船行波的部分在某些水域可以達到約 1 公尺的水位變化。圖 3.13 係 2005/4/5 0 時至 12 時的水位變化時間序列圖，從圖中可以看到與基隆港水位變化相類似的 20 分鐘長週期振盪，另外可能還有其他稍短的長週期振盪。但由於資料夾雜了太多雜訊，無法清楚辨別，必須透過濾波後再進行相關分析與討論。

圖 3.14 至圖 3.16 為西元 2005/8/1 至 2005/8/10 的水位觀測分析資料，在該期間紀錄了瑪莎颱風的侵襲過程。圖 3.14 為瑪莎颱風的紀錄與行進路徑。瑪莎颱風係於 8/3 至 8/7 之間。由鵝鑾鼻的外海以由東南向西北的方向通過臺灣北部的外海。就整個侵襲過程來看，從圖中可明顯看到在 2005/8/2 上午花蓮港便開始感受到颱風波浪與水位的變化，而開始有長週期的水位變化。其中，又以中間水道測站反應最強、外港測站次之、而內港測站最小。當瑪莎颱風在花蓮的東方外海時(2005/8/3 中午至 2005/8/4 中午)，港內的水位變動最大。而颱風中心通過花蓮的緯度向上行進後，水面的波動便開始減小，內港在 2005/8/5 上午後便回復常時水位變化，但外港則一直到 2005/8/9 才恢復正常。圖 3.15 是 10 天的水位訊號經過低頻濾波分離潮汐波後的分析頻譜，各圖中左欄是外港測站、中欄是中間水道測站、而右欄是內港測站。從各圖中我們發現花蓮港的長週期振盪大約可以 0.0005Hz 及 0.002Hz 分成三個部分。外港水域介於 0.0005Hz 至 0.002Hz 間的波動明顯小於內港；但 0.002Hz 以上的能量則又以外港多於內。頻率在 0.0005Hz 以上的不論常時或颱風時期都始終存在於港內，其能量並未因颱風侵襲而增加太多。反而是 0.0005Hz 以下的低頻振盪則在颱風侵襲期間有很明顯地成長。如果就目前所觀測到的資料，則港內在颱風時期大量增加能量的部分是週期大約在 2000 秒以上的振盪，此一現象明顯與港灣共振的研究不同。至於這些成分是屬於港內特有，或是外海在颱風侵襲期間也有此一能量分佈，則因為無法在港外設置水位觀測儀器，而無法認定。

圖 3.16 係 10 天的水面波動時序訊號經過 EMD 解析後的所有 IMF 時序圖，每一個圖中各有 8 個小圖，由上而下依次為原始時間序列，以及 7 個 IMF(以 IMF_1 至 IMF_7 表示)，由各圖中可以發現 IMF_6 及 IMF_7 以及部分的 IMF_5 可能係 EMD 的數學解析過程所產生，因此此處僅討論至 IMF_5。由於 EMD 可以分離載波與騎乘波，因此我們可以在 IMF_4 及 IMF_5 兩組時間序列中觀察到波列中含有極長週期的成分，包含數百秒至一千多秒的成分波動，不過它們的波高都在 10 公分以下。綜合來看，花蓮港的港內波動可能存在有三種成分：一般重力波、與港灣自然共振週期有關的振盪(週期介於 30 秒至 1250 秒之間)、以及屬於太平洋尺度的長週期波動(週期高於 1250 秒)。在常時波浪中，東部海岸的港灣都可能存在著 100 秒以上，甚至可高達 1000 秒以上的長週期波動，而花蓮港內港則因為對短週期波的遮蔽良好，主要波動應屬於後兩種成分。但颱風來襲期間，花蓮港內週期介於 100 秒至 500 秒的波動成分則有明顯能量增加的情形，顯示引發花蓮港共振問題的波動成分可能是該區段的成分波。

由於水位觀測是在 94 年度 4 月份才安裝，由於儀器的設定與操作不夠純熟(因經費不足，以人工方式下載資料及更換電池)，資料的收集一直斷斷續續，以致未能完整收集該年多次颱風侵襲期間的水位資料，相當可惜。

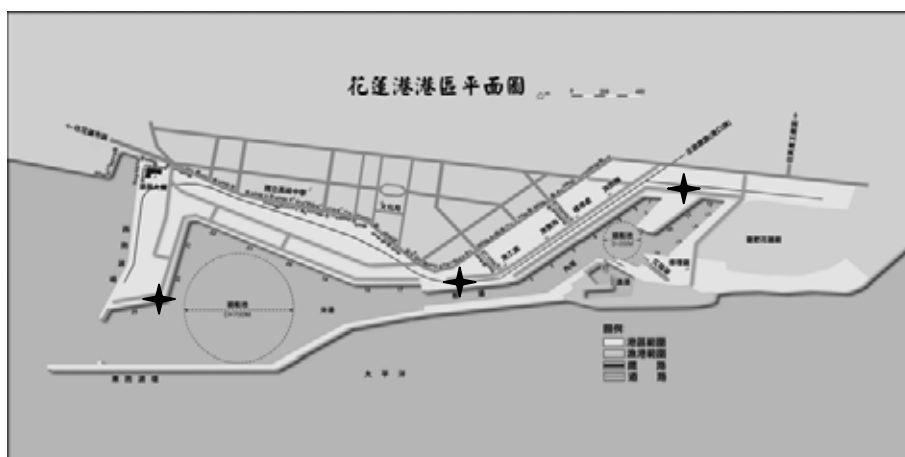


圖 3.11 花蓮港潮位站(✕)安裝位置示意圖

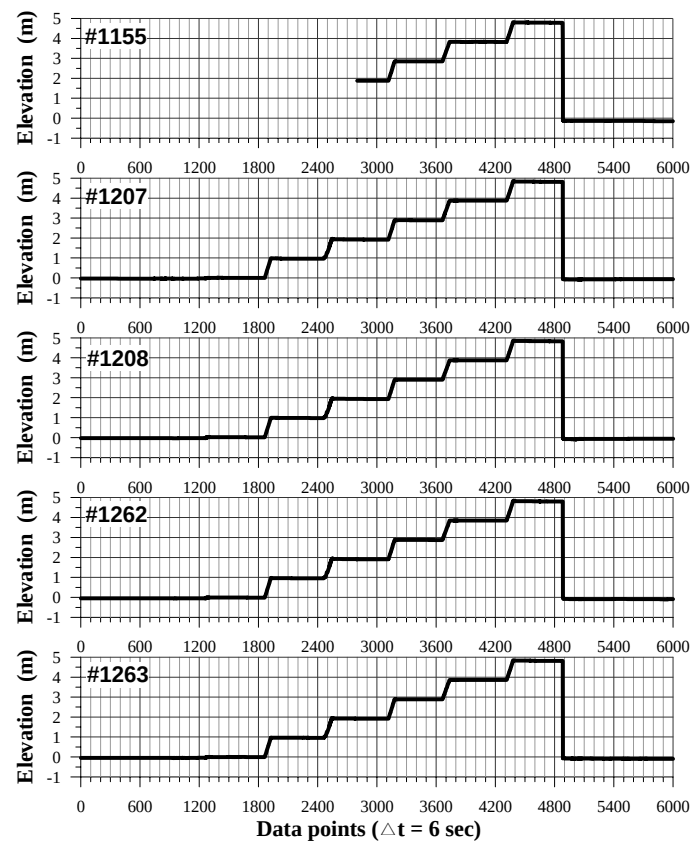


圖 3.12 潮位計檢測記錄



照片 3.2 潮位計安裝情形

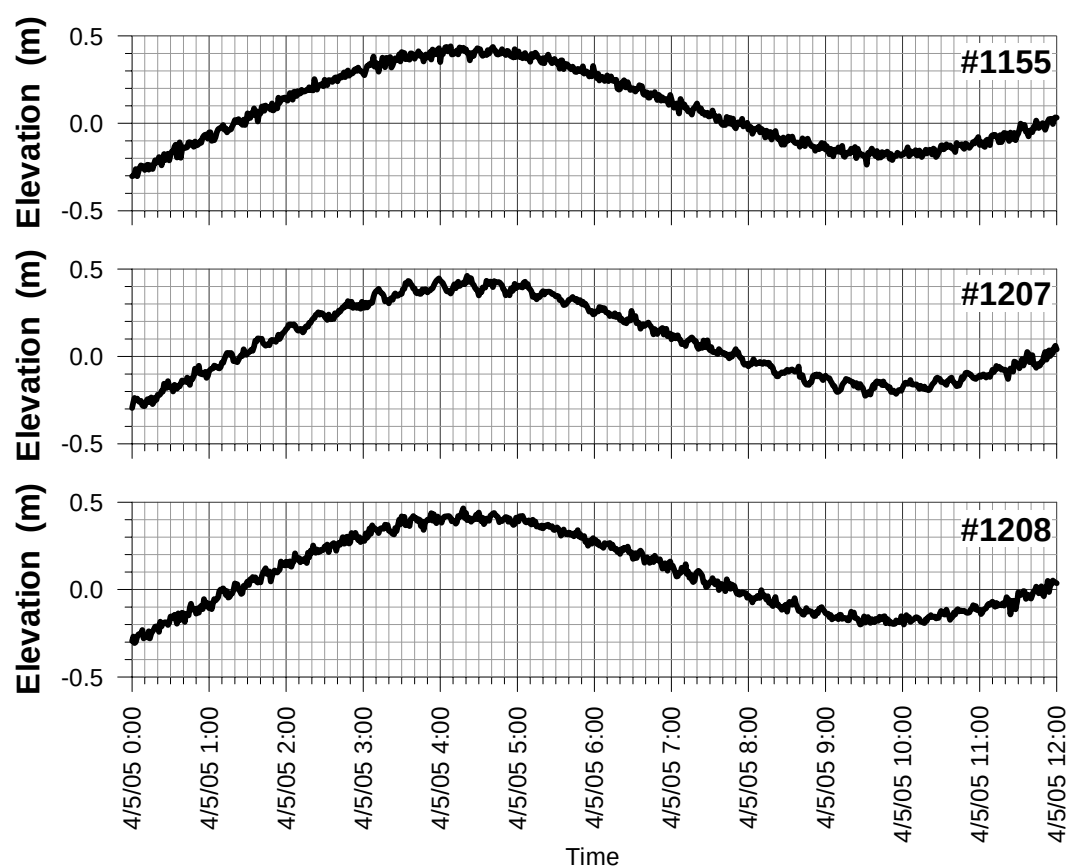


圖 3.13 2005/4/5 0:00~2005/4/5 12:00 花蓮港各潮位站之水位變化時間序列圖



圖 3.14 2005 年瑪莎颱風侵襲路徑

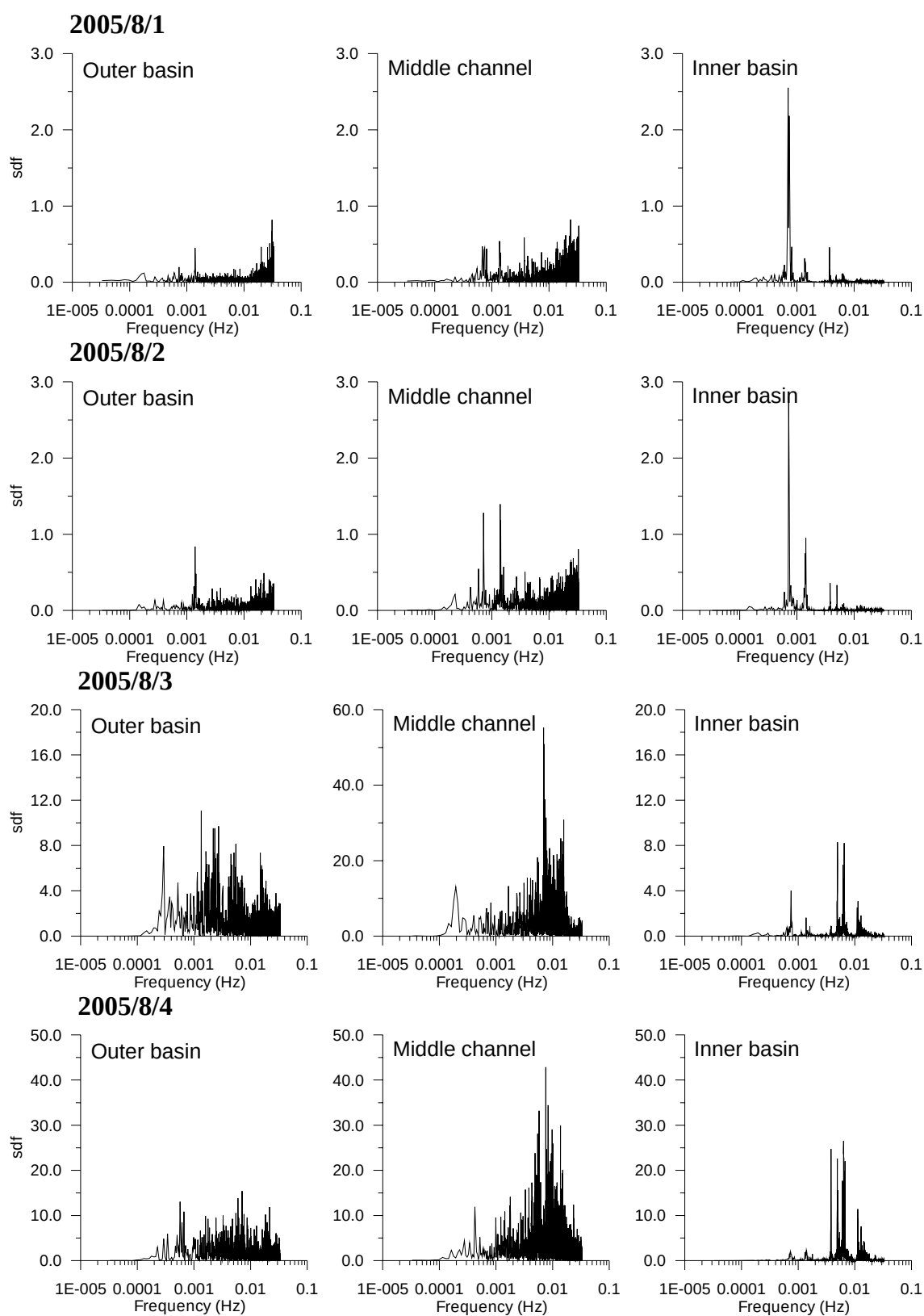


圖 3.15 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖

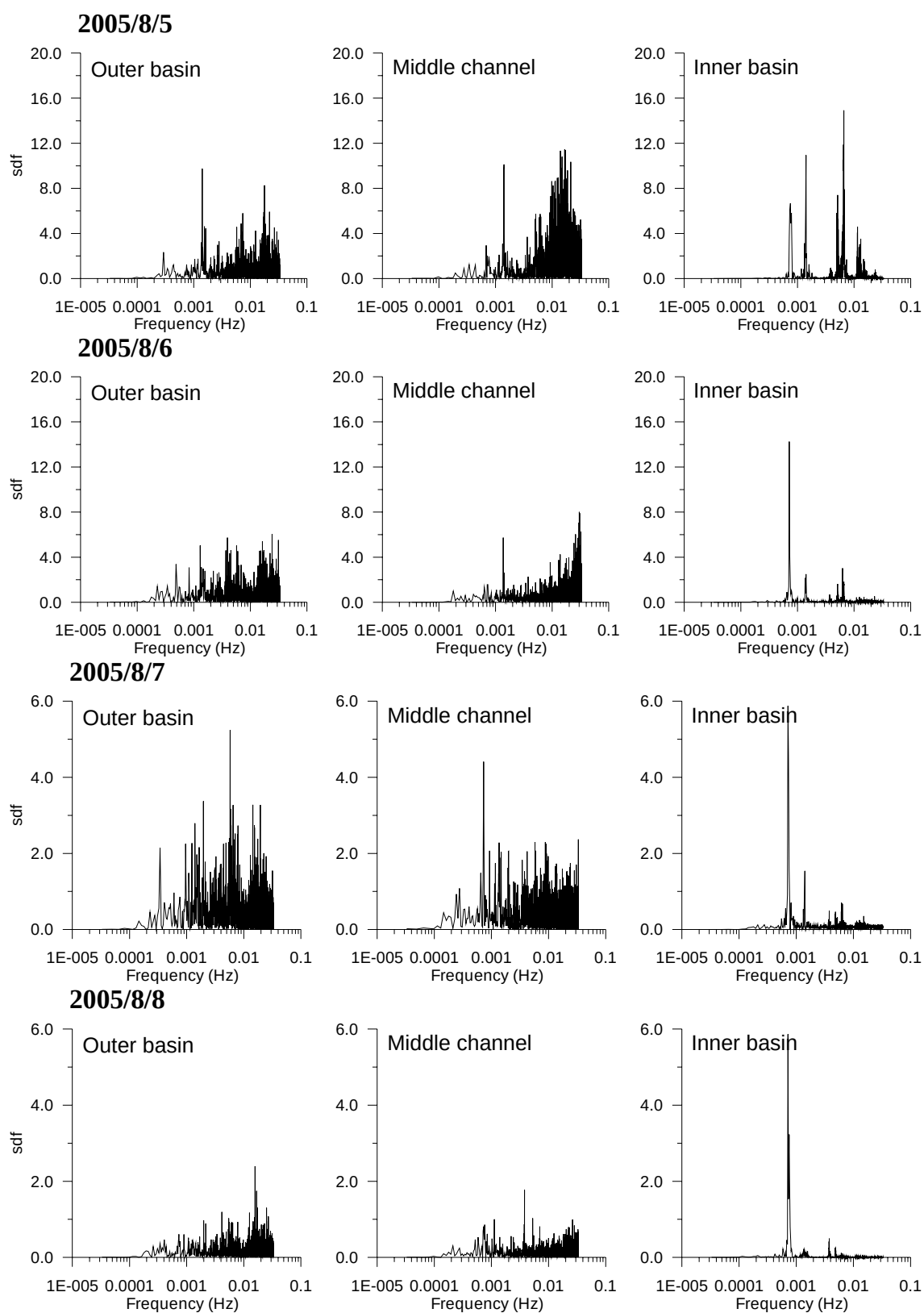


圖 3.15(續) 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖

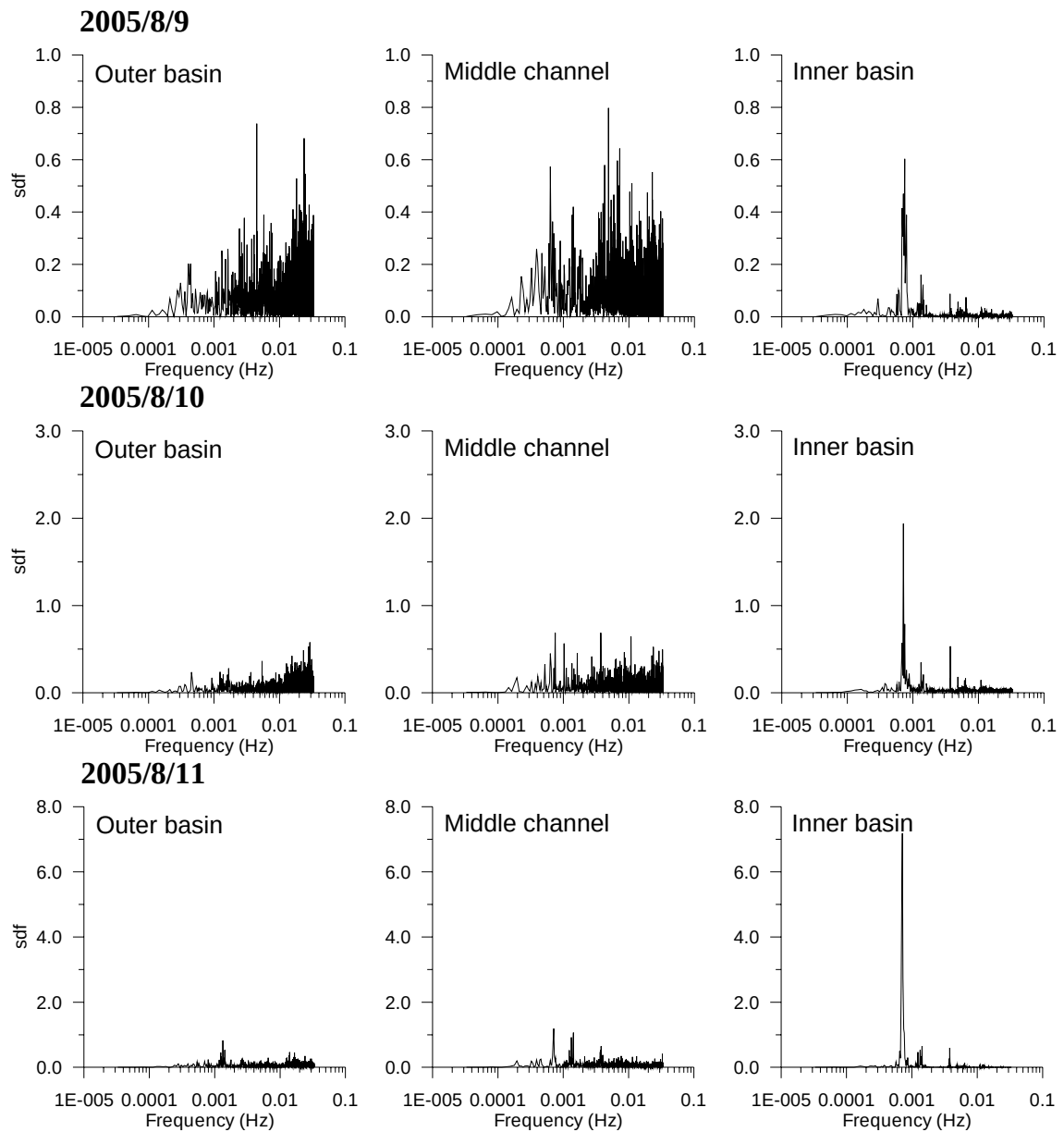
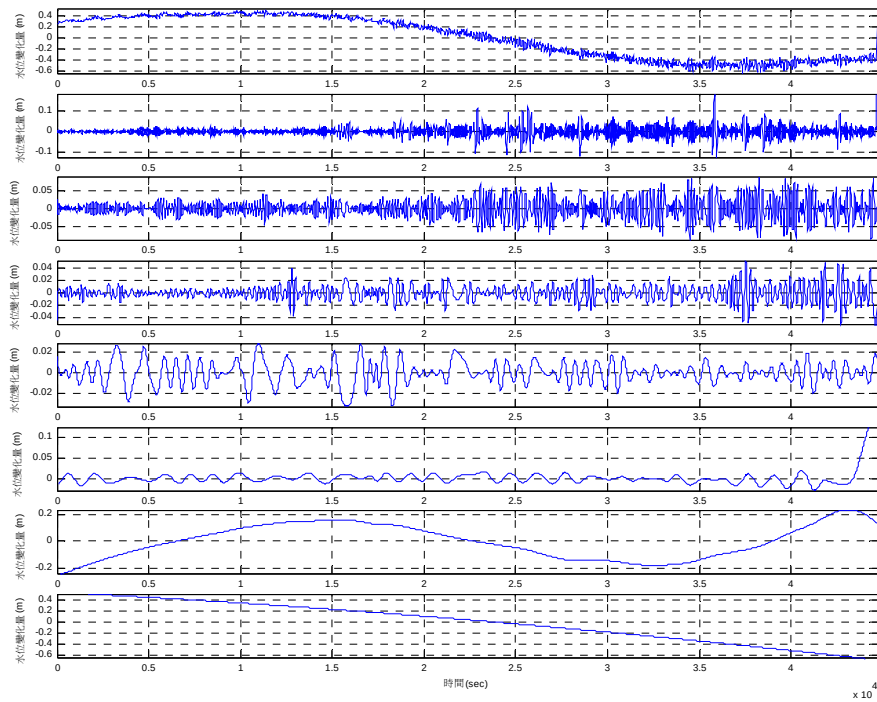
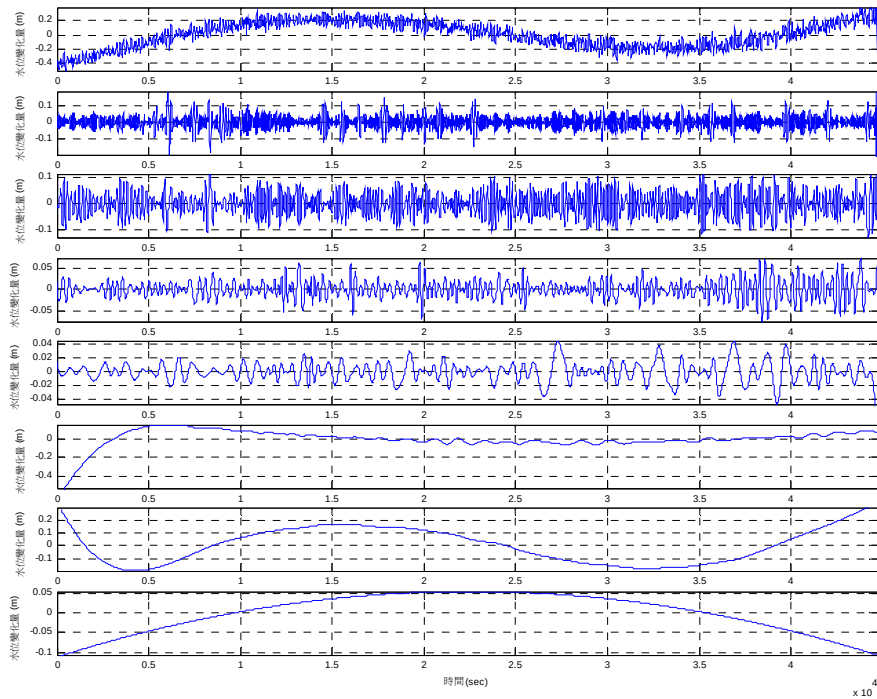


圖 3.15(續) 花蓮港瑪莎颱風侵襲期間的港內水位變化的頻譜分析圖

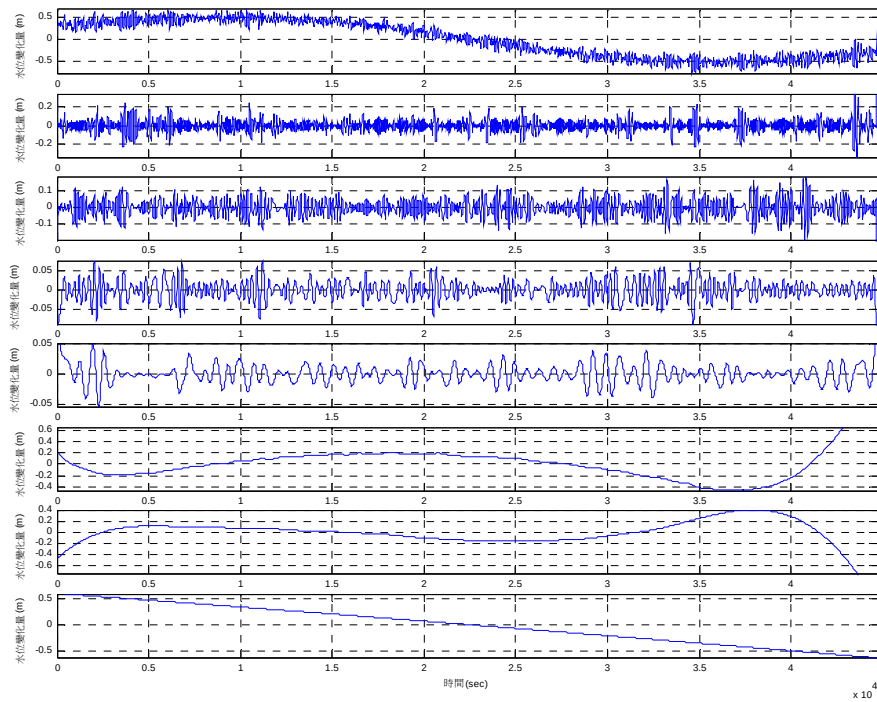


(a) 2005/8/3 01:40~2005/8/3 14:05

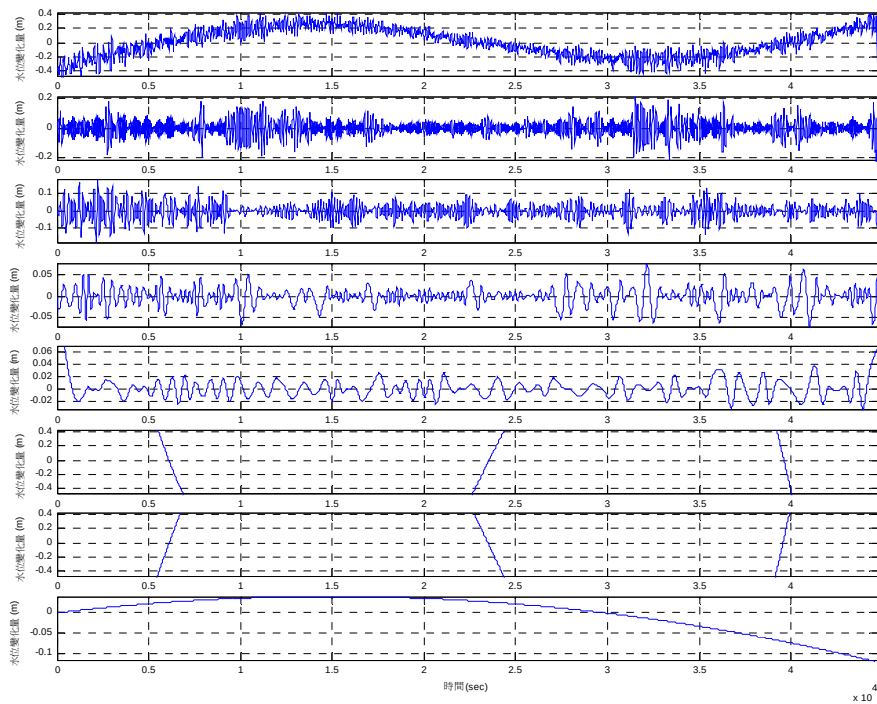


(b) 2005/8/3 14:05~2005/8/4 02:30

圖 3.16 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF

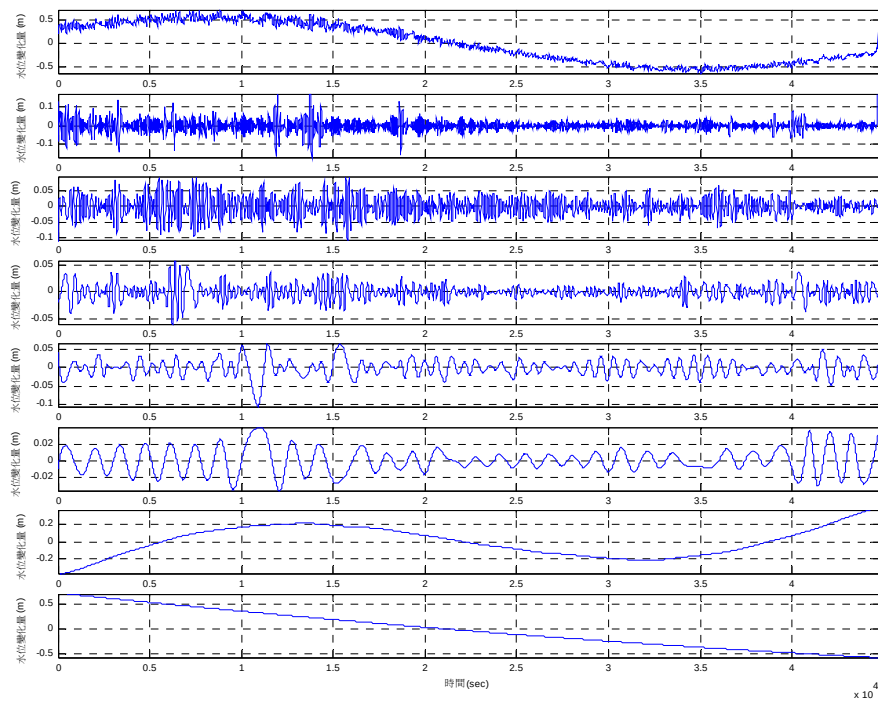


(c) 2005/8/4 02:30~2005/8/4 14:55

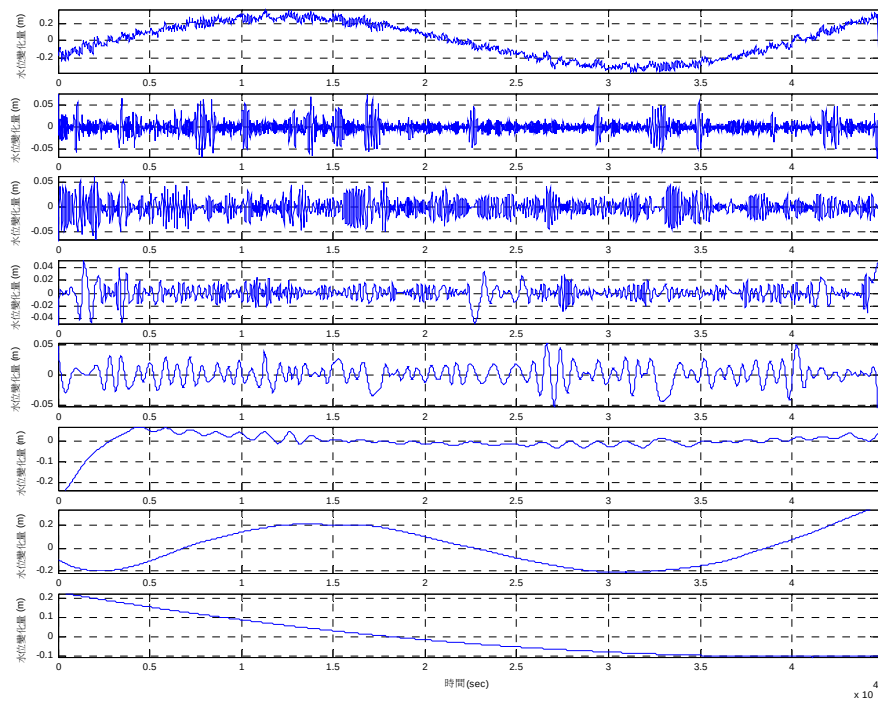


(d) 2005/8/4 14:55~2005/8/5 03:20

圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF

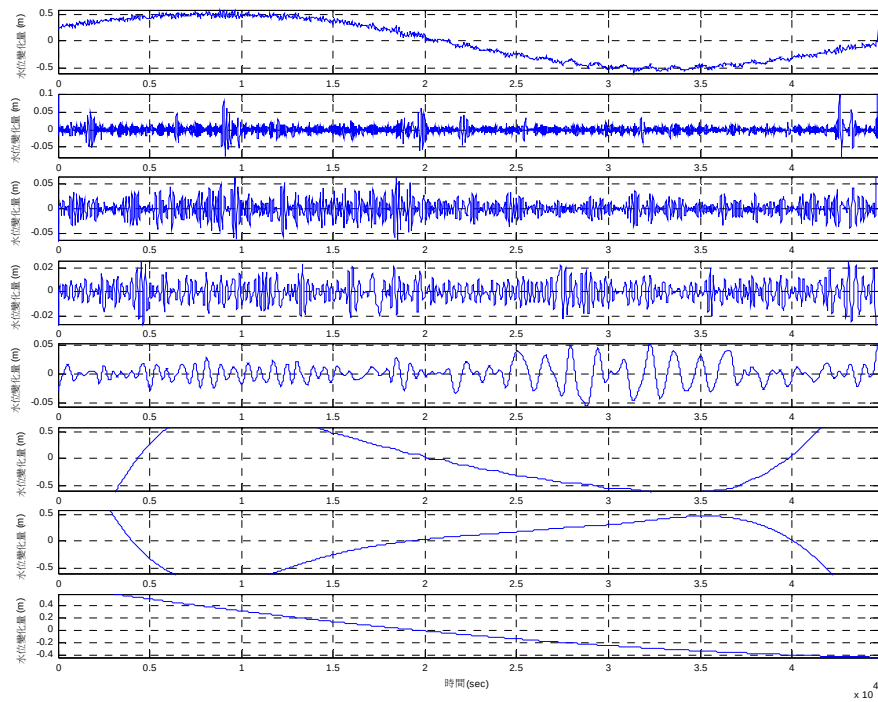


(e) 2005/8/5 03:20~2005/8/5 15:45

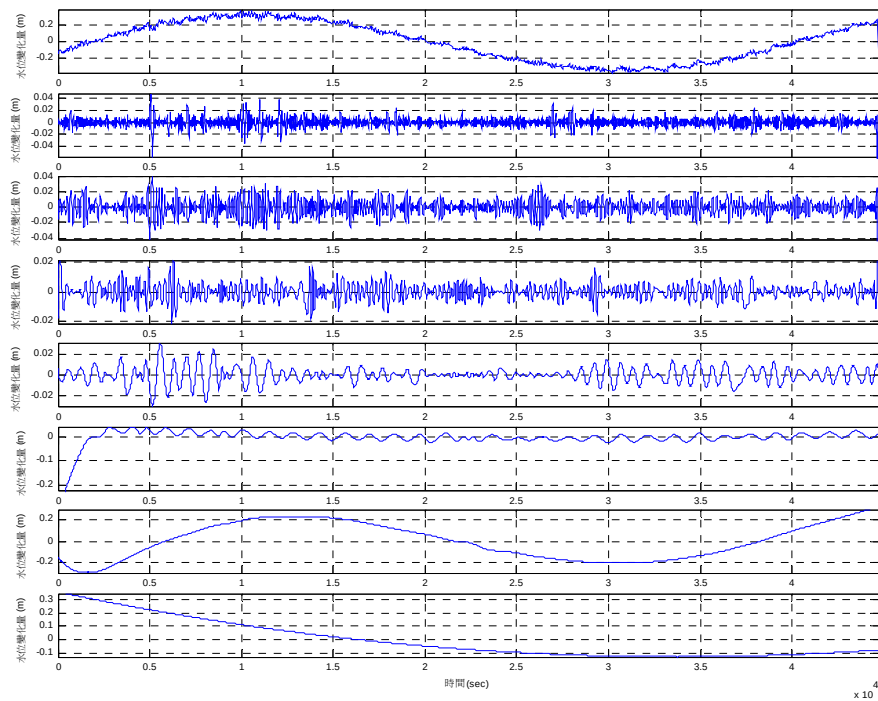


(f) 2005/8/5 15:45~2005/8/6 04:10

圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF



(g) 2005/8/6 04:10~2005/8/5 16:35



(h) 2005/8/5 16:35~2005/8/7 05:00

圖 3.16(續) 2005 年 8 月瑪莎颱風期間花蓮港外港波動分析 IMF

為了進一步瞭解花蓮港內的長週期波動變化情形，本計畫從 2005 年至今一直在進行花蓮港內的水位觀測，在觀測期間共歷經 20 個颱風侵襲，包括海棠颱風(2005/7/16~2005/7/20)、瑪莎颱風(2005/8/3~2005/8/6)、珊瑚颱風(2005/8/11~2005/8/13)、泰利颱風(2005/8/30~2005/9/1)、卡努颱風(2005/9/9~ 2005/9/11)、丹瑞颱風(2005/9/21~2005/9/23)、龍王颱風(2005/9/30~2005/10/ 3)、珍珠颱風(2006/5/16~2006/5/18)、艾維尼颱風(2006/7/7~ 2006/7/9)、碧利斯颱風(2006/7/12~2006/7/15)、凱米颱風(2006/7/23~ 2006/7/ 26)、桑美颱風(2006/8/9~2006/8/10)、寶發颱風(2006/8/7~2006/8/9)、珊珊颱風(2006/9/14~2006/9/16)、帕布颱風(2007/8/6~2007/8/8)、梧提颱風(2007/8/8~2007/8/9)、聖帕颱風(2007/8/16~2007/8/19)、韋帕颱風(2007/9/17~2007/9/19)、柯羅莎颱風(2007/10/4~2007/10/7)、米塔颱風(2007/11/26~2007/11/27)等。其中，海棠、瑪莎、卡努、凱米、桑美、寶發、珊珊、梧提、聖帕、柯羅莎等 10 個颱風有較完整的觀測。以下僅討論部分成果。

圖 3.17 與 3.18 為凱米颱風(2006/7/23~2006/7/26)時期的波高及週期聯合分佈圖與部分分解之 IMF 圖。圖 3.19 與 3.20 為桑美颱風(2006/8/9~2006/8/10)及寶發颱風(2006/8/7~2006/8/9)時期的波高及週期聯合分佈圖與部分分解之 IMF 圖。圖 3.21 與 3.22 為 2006 年 1 月冬季季風時期的波高及週期聯合分佈圖與部分分解之 IMF 圖。圖 3.23 與 3.24 為 2006 年 6 月夏季季風時期的波高及週期聯合分佈圖與部分分解之 IMF 圖。由於取樣頻率為 15 秒，因此本資料無法顯現一般重力波的出現比例。從圖中都發現不論是颱風波浪或是常時波浪，花蓮港內的長週期波動雖然能量不大，但卻佔有相當大的成分，尤其是週期介於 30 秒至 300 秒之間。而內港的波動也明顯地較外港為大。此一資料似乎說明花蓮港的長週期波動並非是颱風時期所特有，但是颱風期間其能量也有明顯增加。

週期 (秒)	>500	0.031570	0.000100										0.000334
	400 - 500	0.009832											0.000100
	300 - 400	0.018728	0.000033										0.000100
	200 - 300	0.035449	0.000702	0.000033									0.000268
	100 - 200	0.198348	0.011638	0.000100									0.001471
	50 - 100	0.376530	0.033075	0.000334									0.003612
	30 - 50	0.233663	0.015584										0.001605
	15 - 30	0.025550	0.000535										0.000702
總波數 20316		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(a) 外港

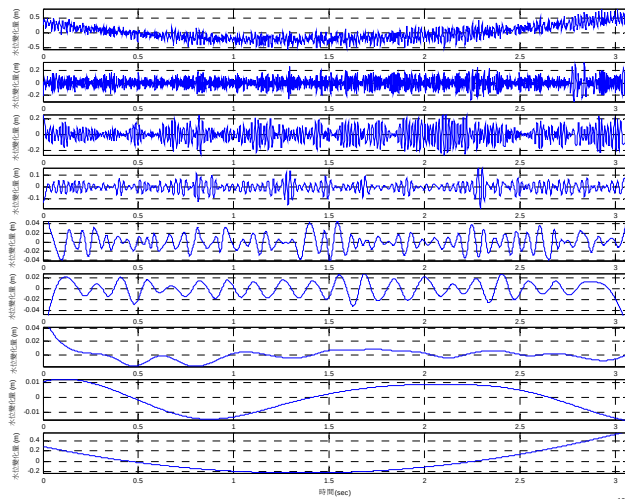
週期 (秒)	>500	0.024104	0.001118	0.000057		0.000029							0.000287
	400 - 500	0.008742	0.001032	0.000115									0.000057
	300 - 400	0.020378	0.002608	0.000287	0.000029					0.000029			0.000029
	200 - 300	0.041788	0.008799	0.001318	0.000143	0.000057	0.000029						0.000201
	100 - 200	0.159817	0.041015	0.004529	0.000545	0.000143							0.000487
	50 - 100	0.321210	0.069132	0.005818	0.000602	0.000057							0.000344
	30 - 50	0.200831	0.042218	0.002006	0.000115	0.000057							0.000258
	15 - 30	0.033706	0.005532	0.000258									0.000086
總波數 34890		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(b) 東縮航道

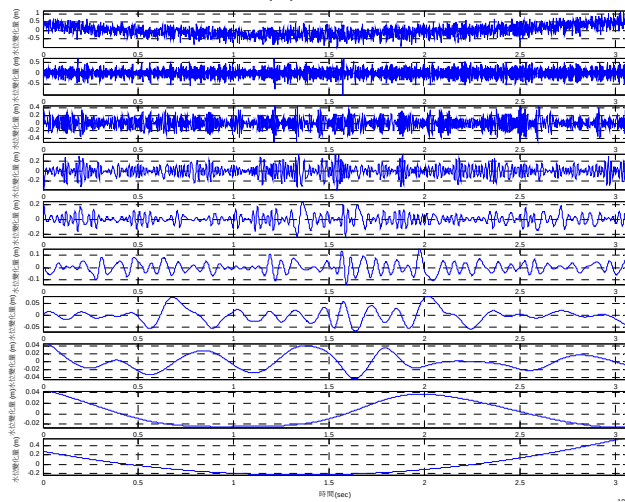
週期 (秒)	>500	0.028178	0.001360	0.000058	0.000058								0.000203
	400 - 500	0.008824	0.001244	0.000029									0.000116
	300 - 400	0.018602	0.003038	0.000347	0.000174								0.000116
	200 - 300	0.038622	0.011109	0.000984	0.000579	0.000203	0.000029	0.000029					0.000087
	100 - 200	0.149743	0.046173	0.006220	0.001475	0.000781	0.000203	0.000029					0.000203
	50 - 100	0.307441	0.078719	0.016461	0.003443	0.001186	0.000203	0.000116					0.000492
	30 - 50	0.184169	0.041717	0.010328	0.001649	0.000116							0.000260
	15 - 30	0.027686	0.005757	0.001273	0.000029								0.000145
總波數 34566		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(c) 內港

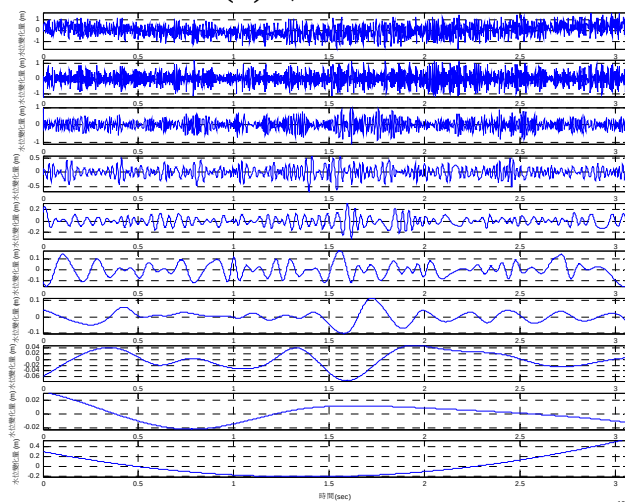
圖 3.17 凱米颱風時期之波高及週期聯合分佈圖



(a) 外港



(b) 東縮航道



(c) 內港

圖 3.18 凱米颱風時期之港內波動分解 IMF 圖

週期 (秒)	>500	0.029066	0.000082										0.000300
	400 - 500	0.011708											0.000218
	300 - 400	0.021588											0.000109
	200 - 300	0.035152	0.000136										0.000082
	100 - 200	0.214104	0.001310										0.000628
	50 - 100	0.408886	0.005568										0.002484
	30 - 50	0.239622	0.000437										0.001556
	15 - 30	0.026173											0.000791
總波數 33641		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
		波高 (公尺)											

(a) 外港

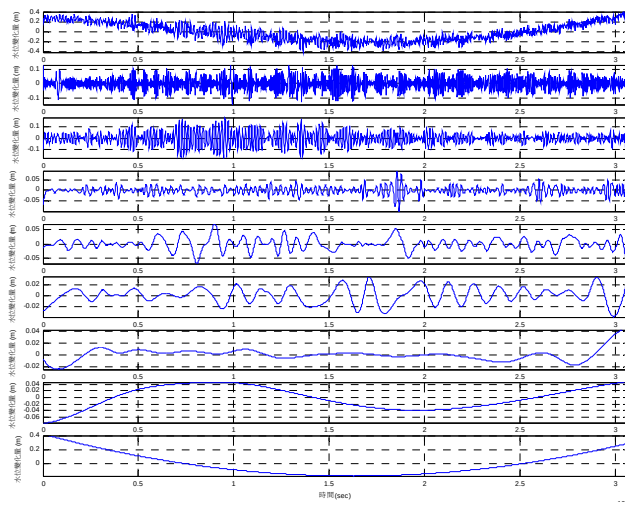
週期 (秒)	>500	0.023362	0.000690										0.000138
	400 - 500	0.009198	0.001702	0.000023									0.000000
	300 - 400	0.018143	0.004346	0.000046									0.000115
	200 - 300	0.039458	0.015107	0.000023									0.000115
	100 - 200	0.159627	0.046954	0.000253									0.000437
	50 - 100	0.344524	0.051645	0.000092									0.000414
	30 - 50	0.222010	0.018855	0.000023									0.000322
	15 - 30	0.040378	0.001817										0.000184
總波數 43489		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
		波高 (公尺)											

(b) 東縮航道

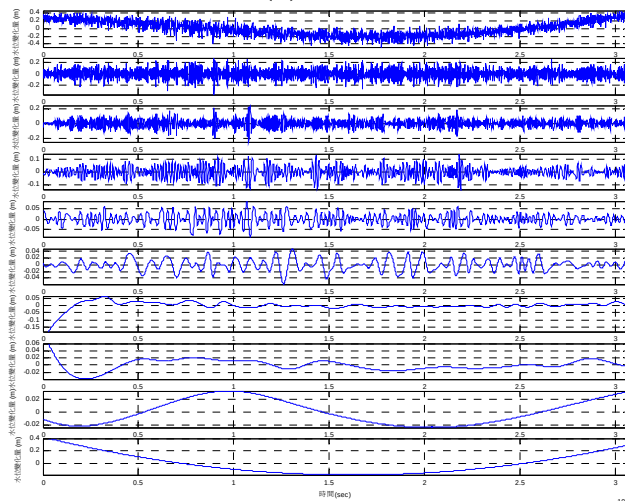
週期 (秒)	>500	0.026019	0.000503	0.000046									0.000206
	400 - 500	0.007356	0.001531	0.000023									0.000069
	300 - 400	0.017864	0.004089	0.000251									0.000091
	200 - 300	0.038172	0.014940	0.000571	0.000023								0.000137
	100 - 200	0.144600	0.058046	0.001439									0.000434
	50 - 100	0.326480	0.083265	0.000731	0.000023								0.000228
	30 - 50	0.197688	0.037601	0.000228									0.000114
	15 - 30	0.033603	0.003495										0.000137
總波數 43776		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
		波高 (公尺)											

(c) 內港

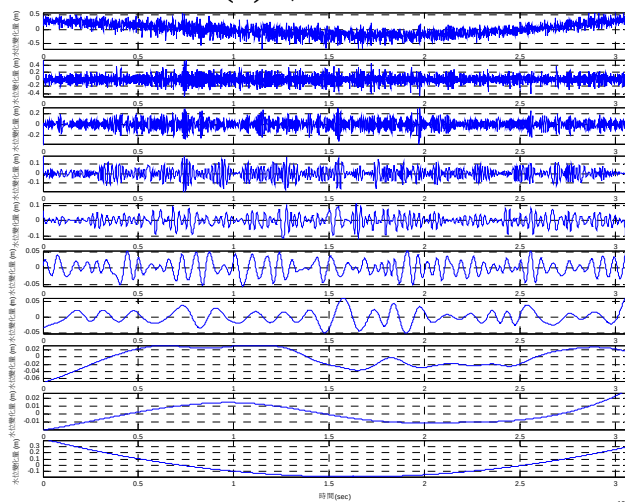
圖 3.19 桑美及寶發颱風時期之波高及週期聯合分佈圖



(a) 外港



(b) 束縮航道



(c) 內港

圖 3.20 桑美及寶發颱風時期之港內波動分解 IMF 圖

週期 (秒)	>500	0.028383	0.000194	0.000305	0.000028	0.000083	0.000028	0.000083					0.000361
	400 - 500	0.009720											0.000028
	300 - 400	0.018969	0.000111										0.000083
	200 - 300	0.037798	0.000083										0.000111
	100 - 200	0.203821	0.000278										0.000278
	50 - 100	0.419502	0.000611										0.001111
	30 - 50	0.250618	0.000028										0.000778
	15 - 30	0.026356											0.000250
總波數 36007		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(a) 外港

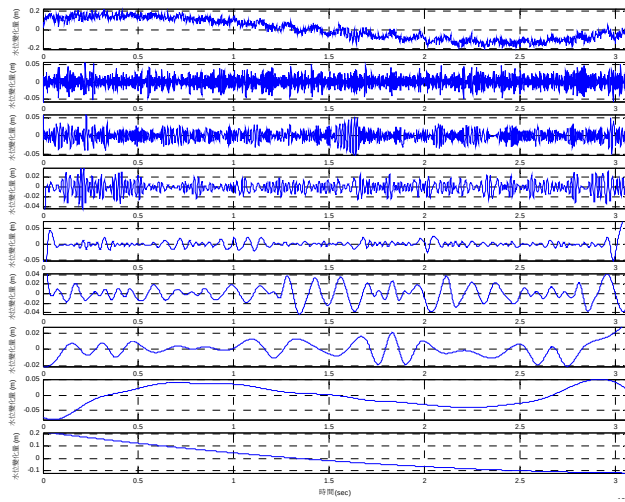
週期 (秒)	>500	0.019466	0.000517	0.000197	0.000098	0.000025						0.000025	0.000492
	400 - 500	0.009327	0.001477										0.000049
	300 - 400	0.020648	0.003962	0.000025									0.000025
	200 - 300	0.039745	0.012576	0.000148									0.000000
	100 - 200	0.162696	0.042034	0.000345									0.000221
	50 - 100	0.354801	0.043929	0.000025									0.000172
	30 - 50	0.230054	0.015381										0.000246
	15 - 30	0.040016	0.001255										0.000025
總波數 40634		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(b) 東縮航道

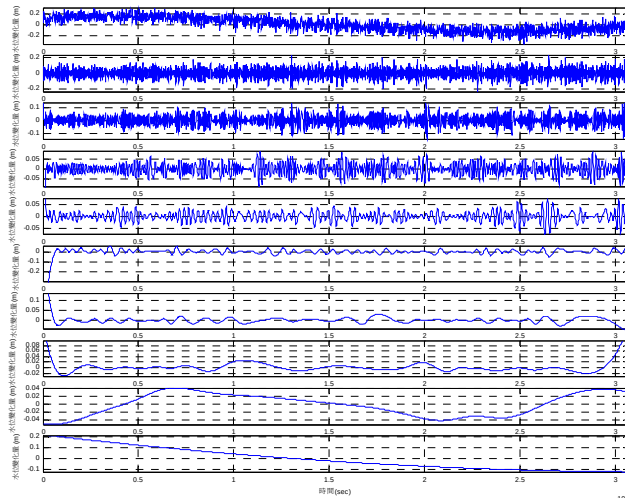
週期 (秒)	>500	0.022484	0.000644	0.000077	0.000026	0.000052	0.000052	0.000026	0.000077				0.000361
	400 - 500	0.009040	0.001082	0.000052									0.000052
	300 - 400	0.019445	0.003709	0.000155									0.000000
	200 - 300	0.038684	0.013290	0.000180									0.000052
	100 - 200	0.154480	0.048909	0.000695									0.000180
	50 - 100	0.343550	0.063950	0.000232									0.000155
	30 - 50	0.216550	0.026502										0.000129
	15 - 30	0.032065	0.002988										0.000077
總波數 38827		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(c) 內港

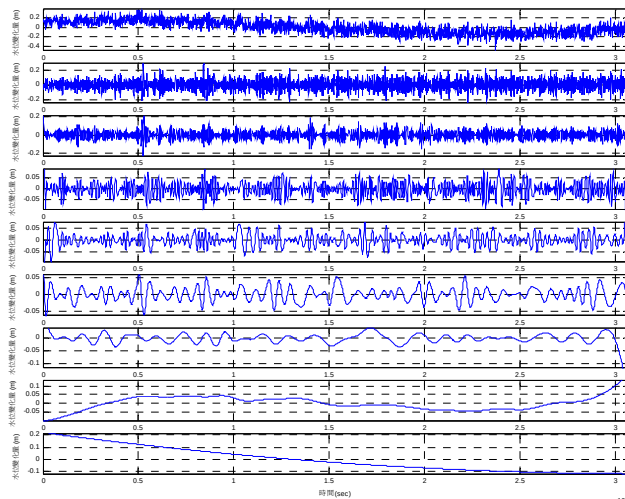
圖 3.21 冬季季風時期之波高及週期聯合分佈圖(2006 年 1 月)



(a) 外港



(b) 束縮航道



(c) 內港

圖 3.22 冬季季風時期之港內波動分解 IMF 圖 (2006 年 1 月)

週期 (秒)	>500	0.024555	0.000130	0.000078	0.000078	0.000078	0.000026	0.000104		0.000104		0.000026	0.000570
	400 - 500	0.010864			0.000026								
	300 - 400	0.021806											0.000130
	200 - 300	0.032982	0.000026										0.000182
	100 - 200	0.189903											0.000959
	50 - 100	0.417689											0.002385
	30 - 50	0.265642											0.002048
	15 - 30	0.028755											0.000856
總波數 38567		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(a) 外港

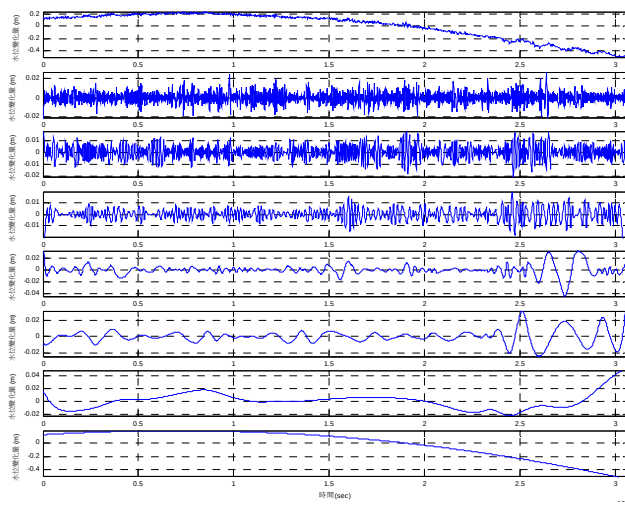
週期 (秒)	>500	0.015373	0.000457	0.000065	0.000087	0.000044	0.000087			0.000044	0.000044		0.000327
	400 - 500	0.009864	0.000370										0.000065
	300 - 400	0.024060	0.001089										0.000065
	200 - 300	0.048970	0.003854										0.000109
	100 - 200	0.200823	0.011540										0.000283
	50 - 100	0.391325	0.010626										0.000610
	30 - 50	0.242477	0.001350										0.000457
	15 - 30	0.035231	0.000044										0.000261
總波數 45926		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(b) 東縮航道

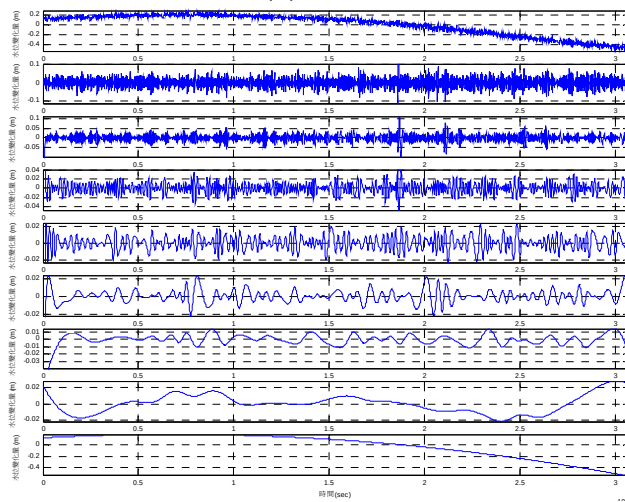
週期 (秒)	>500	0.020058	0.000247	0.000112	0.000045	0.000045	0.000045	0.000022	0.000045	0.000022			0.000583
	400 - 500	0.009917	0.000583				0.000022						
	300 - 400	0.022862	0.002221		0.000022								0.000112
	200 - 300	0.041911	0.006462										0.000067
	100 - 200	0.184739	0.024455										0.000224
	50 - 100	0.381234	0.026699										0.000314
	30 - 50	0.238698	0.005272										0.000224
	15 - 30	0.032330	0.000269										0.000135
總波數 44571		0 - 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	> 5
波高 (公尺)													

(c) 內港

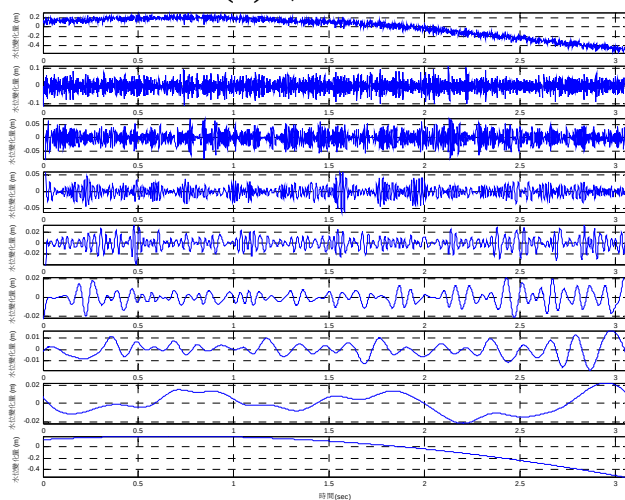
圖 3.23 夏季季風時期之波高及週期聯合分佈圖(2006 年 6 月)



(a) 外港



(b) 束縮航道



(c) 內港

圖 3.24 夏季季風時期之港內波動分解 IMF 圖(2006 年 6 月)

3.5 東海岸的聯合觀測

為瞭解花蓮港內的波動的特性，本計畫團隊檢討波浪觀測的傳統方法發現以 2 Hz 連續取樣 20 分鐘，或是以 4 Hz 取樣 10 分鐘，雖然均能夠提供 2048 個資料點進行頻譜分析，但是對於可以解析的最長成分波週期(即最頻率)則會受到限制。例如以 2 Hz 取樣的 2048 個資料點可得到的最成週期為 512 秒；而以 4 Hz 取樣的 2048 個資料點可得到的最成週期為 256 秒。此一範圍如果是針對一般重力波範圍內的觀測應已可滿足。但是如果是要探討類似花蓮港內的長週期振盪，則仍嫌不足。由於花蓮港內可能有的最長週期為何尚不可知，本計畫乃嘗試以儀器可以記錄的最大能量進行長時間且連續的觀測，因此，採用 2 Hz 連續取樣 250 分鐘(即 15000 秒)，如表 3.1 所示在三個不同時期分別進行不同測站的同步觀測。再者，為了能釐清長週期振盪的成分是否起因於取樣頻率或儀器本身的問題，本計畫團隊於 2006 年 4 月在花蓮港的外港及內港水位觀測站附近，以現場容量式波高計、壓力式波高計(鎮儀公司，S700)及壓力式水位計(Sea Bird，SBR90)，以不同的取樣頻率同步進行約兩天的水位觀測。接著於 2006 年 6 月擴展至較南邊海岸的鹽寮漁港以壓力式波高計(鎮儀公司，S700)及壓力式水位計(Sea Bird，SBR90)設置觀測站進行短期性的觀測，花蓮港與鹽寮漁港的儀器佈放位置如圖 3.25 所示。此一同步觀測更於 2006 年 8 月擴大範圍至涵蓋東部海岸線以瞭解各地的波動特性的共通性，觀測地點包含了蘇澳港、花蓮港、鹽寮漁港、石梯漁港及金樽漁港。這三個時期的資料收集期間如表 3.1 所示。本節將主要針對以 2 Hz 取樣頻率進行連續觀測的 S700 壓力式波高計的觀測結果進行討論。其中為瞭解不同週期範圍的成分波變化情形，除了進行頻譜分析以外，也以數值濾波的方法分離各週期(頻率)範圍的成分波。圖 3.28 至圖 3.35 為三個時期觀測資料的分析頻譜。頻譜分析圖中(各圖之右圖，由上而下)顯示成分波頻率與頻譜密度，以及成分波週期與頻譜密度間的關係，以方便對各特性週期的分析。

3.5.1 2006 年 4 月的花蓮港港內水面波動聯合觀測

本觀測期間僅有氣象局預報低壓鋒面的可能到達外，並無其他異常氣象。圖 3.28 為內港的部分分析結果，圖 3.29 則為外港的部分分析結果。

從圖 3.28 及圖 3.29 中均可以看到在本段觀測期間花蓮港的內外水域都有明顯的譜峰出現在 165 秒、714 秒、1250 秒、4998 秒及 7498 秒附近，外港則有明顯譜峰出現在 714 秒、1250 秒、4998 秒及 7498 秒附近(因取樣頻率及頻譜解析度而會略微不同)，但這些譜峰並非在每一筆記錄中都有。另一個現象是：外港的 30 秒以下一般重力波波動的成分很多，但是內港則非常不明顯，反而是長週期波動主導內港的水面波動。顯示受限水道的規劃對阻擋一般重力波的入侵相當有成效，但是極長週期成分的波動則反而發生增幅現象。

3.5.2 2006 年 6 月鹽寮漁港的水位觀測

由於花蓮港的縱深約為 3000 公尺，如果以 10 至 18 公尺水深，以及四倍縱深的波長代入分散關係式可以概算出等深矩形港池的自然共振週期約 903 至 1212 秒之間，因此上節所發現的長週期成分中 1250 秒以下的成分可能與花蓮港的港池特性有關；但是 4998 秒及 7498 秒的週期成分的激發機制則仍不清楚。為了進一步瞭解各週期成分是屬於港池的尺度(在港內激發與增幅)還是屬於大洋的尺度(直接來至外海)，本計畫考量花蓮港外海設置水下觀測儀器的困難度，乃於 2006 年 6 月 10 日至 11 日期間在南方的鹽寮漁港中以相同的儀器進行資料觀測收集，共收集到 8 筆 15000 秒的資料，圖 3.30 為部分分析結果。

從圖 3.30 中可以明顯地看到在本觀測時段中鹽寮漁港附近水域的波動也含有週期大於 30 s 以上的長週期波動，有明顯的譜峰出現在 3749 秒、4998 秒及 7498 秒附近。在圖 3.40 也看到在 400 秒至 600 秒之間也有略小的譜峰，但察看其他記錄中並未出現，研判應該是屬於異常氣象所致。在一般頻譜分析中，一般認為分頻大約是一至二個解

析頻率($\Delta f=1/15000$ Hz)的成分波，由於頻率過於接近頻率的解析度，屬於數學解析誤差的可能性極高而不予討論。

由於鹽寮漁港僅係為一簡易漁港，其防波堤及碼頭呈向南的 F 型佈置，屬於開放性空間，在更南側有拋放防止漂砂的消波塊群，而北側則已經因為淤積的緣故形成一新生海灘。潮位計是佈放於外防波堤的內側，由於該港的遮蔽效果並不好，反之可將其視為與外海聯繫良好的水域，因此在該處所量測到的水位變化除了區域性因為水深太淺所發生的短週期擾動外，對於潮汐或其他長週期波動的干擾應該較小。因此，該地區的長週期水位變化對外海的波動應該有相當地代表性。

綜合比較上節與本節的觀測分析結果，可以發現花蓮港內及鹽寮漁港都發現有數千秒的波動成分，依此研判花蓮港內之 4998 秒及 7498 秒的波動成分來自外海的可能性較高。但由於鹽寮漁港與花蓮港仍有一段距離，並非直接地在花蓮港外海，且兩處的觀測時間並未同步，因此無法做進一步的結論。

3.5.3 2006 年 8 月的聯合觀測

為了瞭解長週期成分波動的區域特性，在本次觀測中規劃了由花蓮港以北的蘇澳港，至以南的鹽寮漁港、石梯漁港及金樽漁港進行同步觀測。所選的漁港都屬於較為偏僻且單純的漁港，主要是為避開沿海遊憩的人潮，減少訊號受到船舶或人為的干擾，以及可能的遺失問題。但由所收集的資料中仍發現儀器曾經有被中途提出水面的紀錄情形，顯示要進行沿海的海象觀測，必須要顧慮到相當多的可能發生狀況。為了持續進行水位的觀測，本計畫也於 2006 年 9 月在鹽寮漁港安裝固定觀測架，但因為近岸波浪的強大而反覆作用下，不到一個星期儀器架就被波浪力從固定的螺栓處及銲接處撕裂而沉落海底底床。

由於儀器佈放的距離過長(宜蘭蘇澳港到台東金樽漁港)，波高計設定為提前一天啟動(2006/08/17 18 時)，因此各波高計所取得的資料筆數

不相一致。記錄的方式是以 2Hz 連續取樣 15000 秒(30000 個資料點)，以及連續觀測。各測站的觀測資料範圍如表 3.1 所示。圖 3.31 至圖 3.35 依序分別為本觀測時段在花蓮港內港及外港、鹽寮漁港、石梯漁港及金樽漁港的部分分析結果。從圖中均可以看到在本段觀測期間從花蓮港以南至金樽漁港的水域都含有週期大於 30 秒的水面振盪，但是由於觀測站散佈在各漁港中，觀測環境幾乎無法控制，因此所獲得的資料中常有一些干擾，使得可分析的資料長度可能不相同而造成比較上的困難(資料長度不同引出頻率解析度不同的問題)，本節將主要先針對各觀測站的資料分析結果進行討論。

如果檢視各圖之週期與頻譜密度的關係，可發現內港水域有明顯的譜峰出現在 197 秒、263 秒、656 秒、999 秒、1250 秒、1272 秒、1363 秒、1500 秒、2798 秒、3749 秒、4998 秒、6998 秒及 7498 秒附近，外港則有明顯譜峰出現在 577 秒、656 秒、666 秒、714 秒、750 秒、1166 秒、1222 秒、1250 秒、3498 秒、3832 秒、4998 秒、5248 秒、5498 秒、5748 秒及 7498 秒附近而鹽寮漁港可發現明顯的譜峰出現在 1153 秒、2333 秒、2499 秒、3749 秒、4998 秒、6998 秒及 7498 秒等。石梯漁港的譜峰出現在 319 秒、384 秒、395 秒、405 秒、417 秒、428 秒、3749 秒、4998 秒及 7498 秒等。金樽漁港的譜峰出現在 349 秒、428 秒、484 秒、500 秒、600 秒、625 秒、789 秒、882、3749 秒、4998 秒及 7498 秒等。同樣的，由於有效解析資料的長度不同，譜峰會因為取樣頻率及頻譜解析度不同而變動，並非在每一筆記錄中都有上述的譜峰。

如果以同一觀測時段的五個觀測站的結果來比較，可以發現各個地點皆含有 3749 秒、4998 秒及 7498 秒等極長週期的波動成分。

3.5.4 綜合比較

綜合以上的分析，我們可以發現不論是花蓮港、鹽寮漁港、石梯漁港及金樽漁港，都含有長週期的成分，尤其是 3749 秒以上的成分波。就花蓮港而言，週期大於 30 秒至 1250 秒之間的波動可能與花蓮港的

自然共振特性有關，但是 1250 秒以上的波動則由與其他觀測站的結果比較，可發現其屬於大洋尺度特性的可能性極高。但是由於經費、時程及人力有限，目前無法進行更大規模的觀測與檢驗。



圖 3.25 長週期波動之觀測

表 3.1 2006 年各觀測站的資料收集範圍

觀測位置	資料收集期間	使用儀器
蘇澳港	儀器故障	鎮儀公司 S700 壓力式波高計 Seabird 公司 SBR90 潮位儀
花蓮港內港	20060405 15:00 ~ 20060407 17:00(12 筆) 20060818 10:40 ~ 20060819 20:00(8 筆)	
花蓮港外港	20060405 15:00 ~ 20060407 17:00(12 筆) 20060818 10:40 ~ 20060819 15:50(7 筆)	
鹽寮漁港	20060610 06:00 ~ 20060412 15:20(8 筆) 20060818 10:40 ~ 20060819 07:30(5 筆)	
石梯漁港	20060818 14:50 ~ 20060819 11:40(5 筆)	
金樽漁港	20060818 19:00 ~ 20060819 11:40(4 筆)	

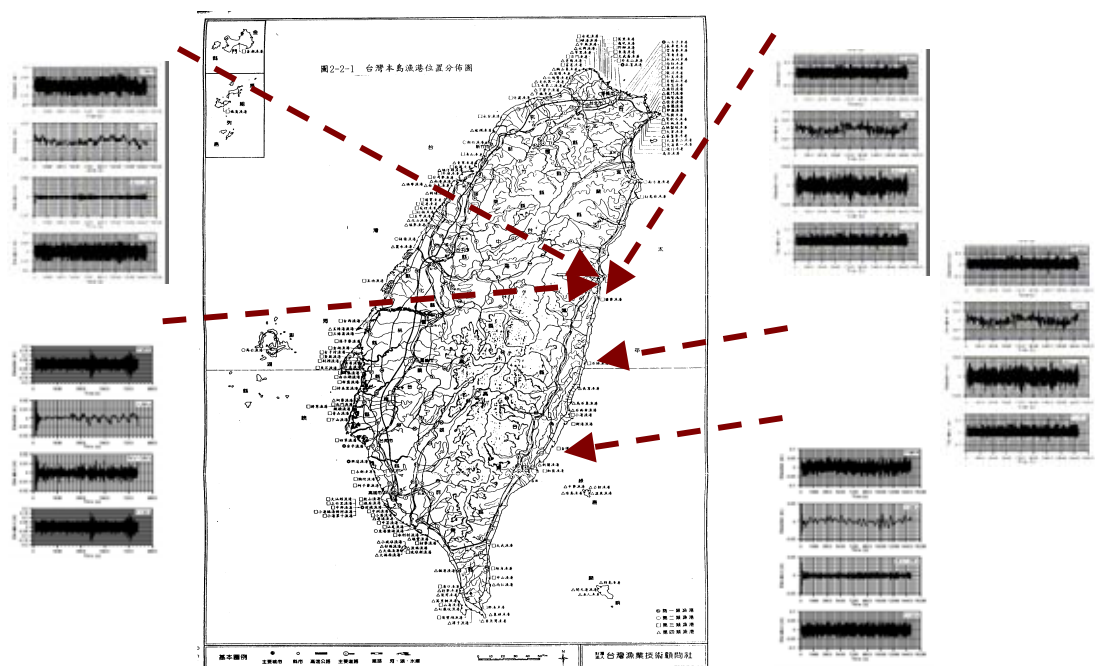


圖 3.26 長週期波動之聯合觀測水位記錄(2006/8)

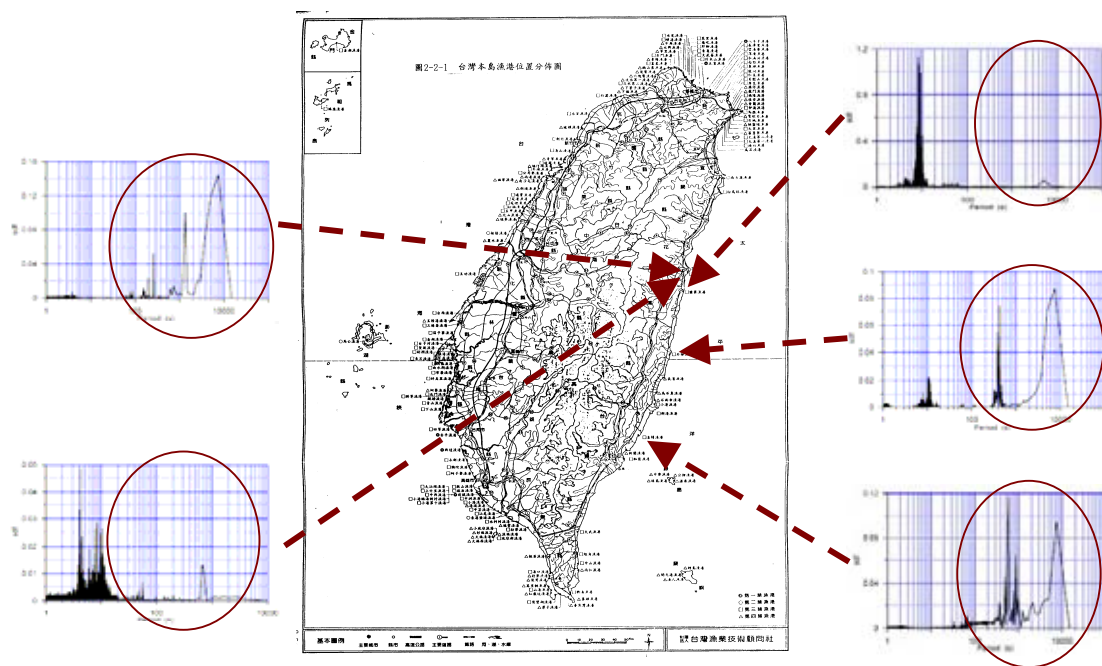


圖 3.27 長週期波動之聯合觀測頻譜(2006/8)

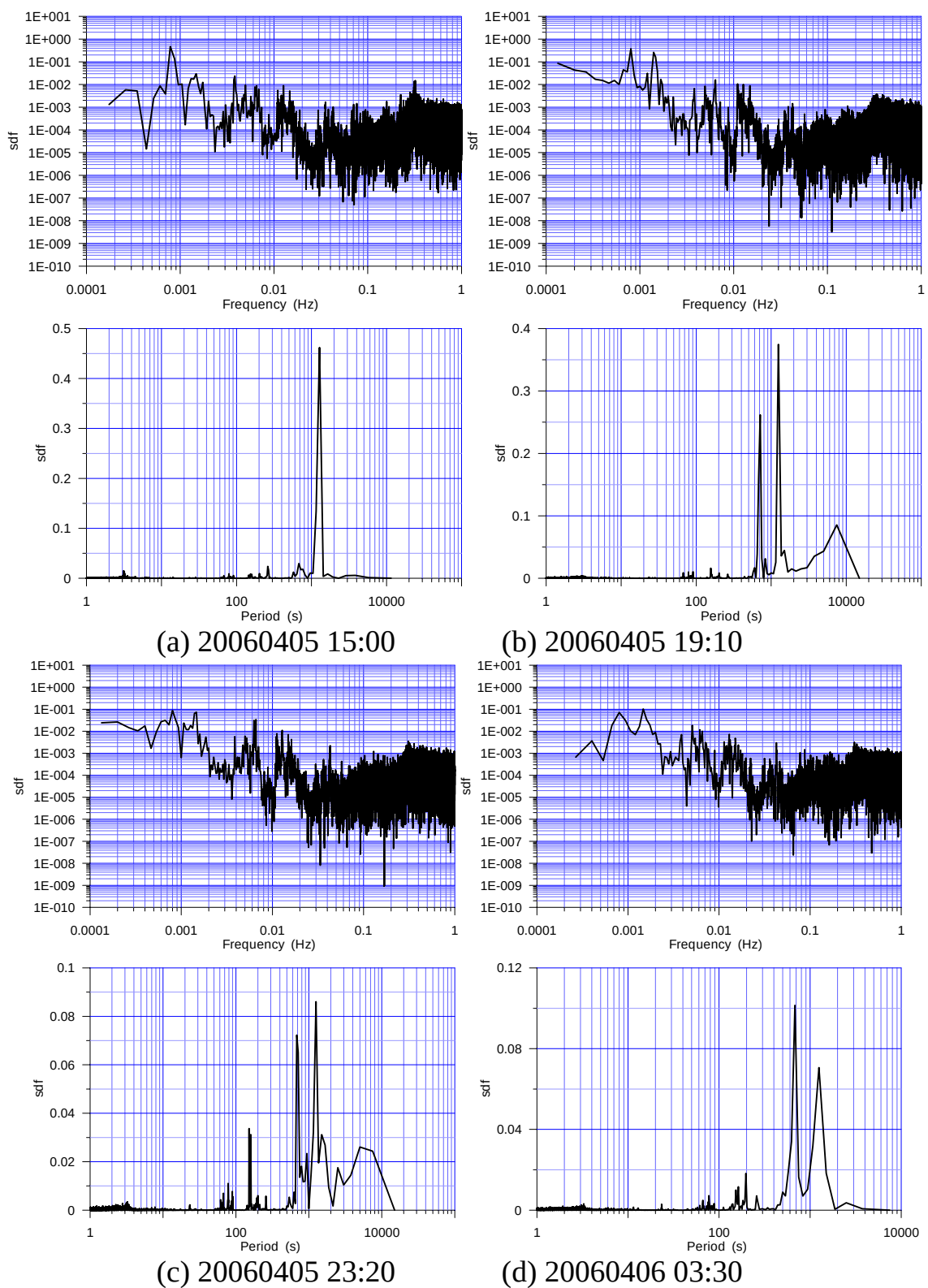


圖 3.28 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜

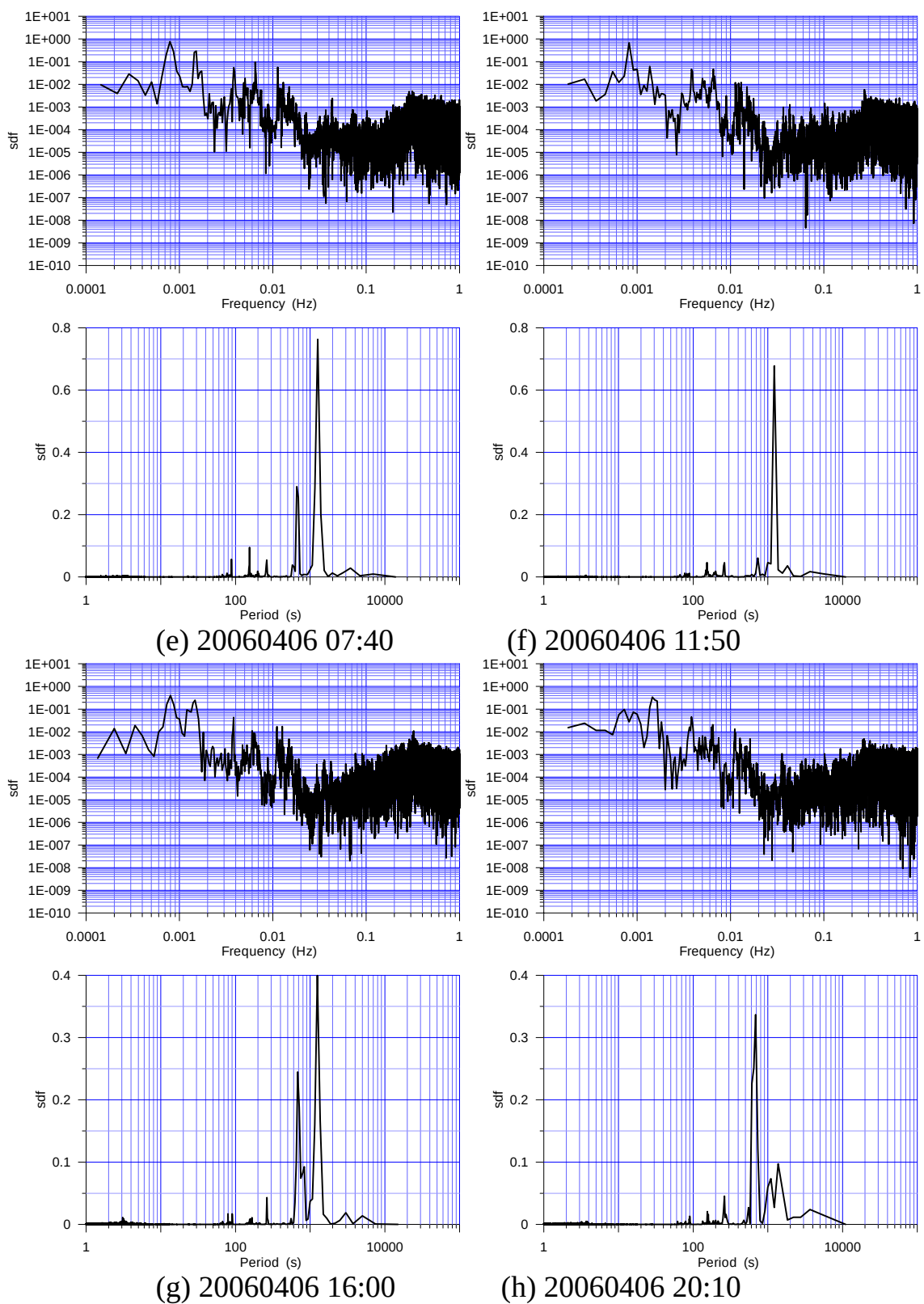
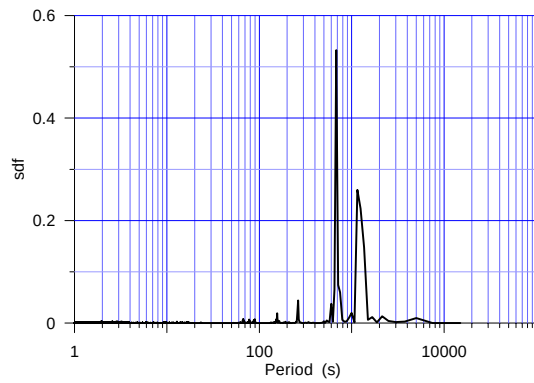
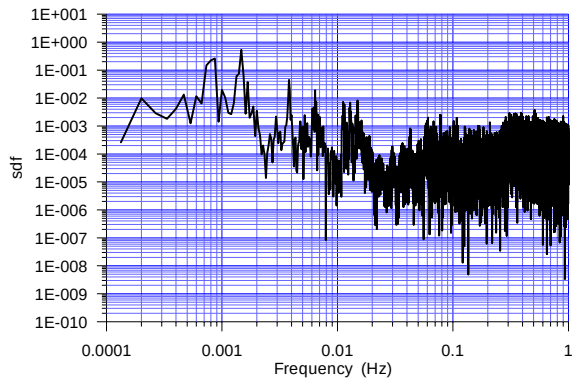
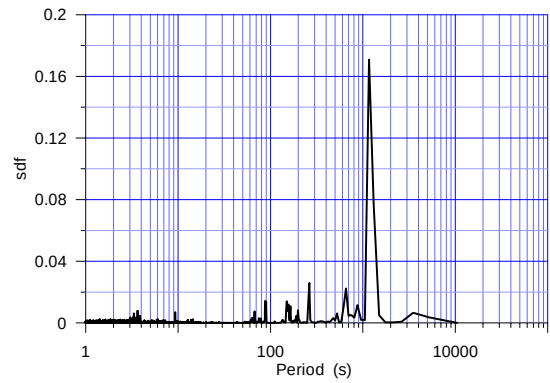
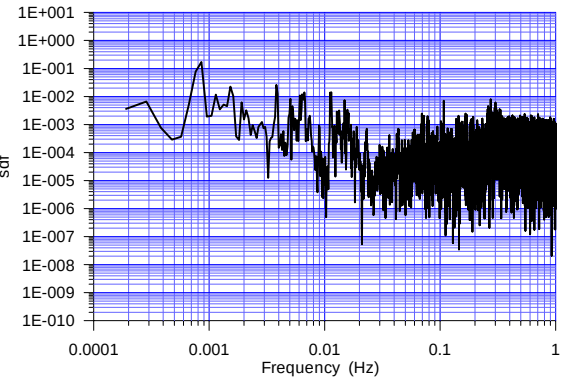


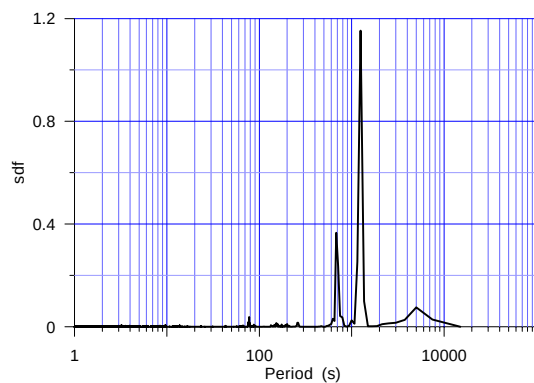
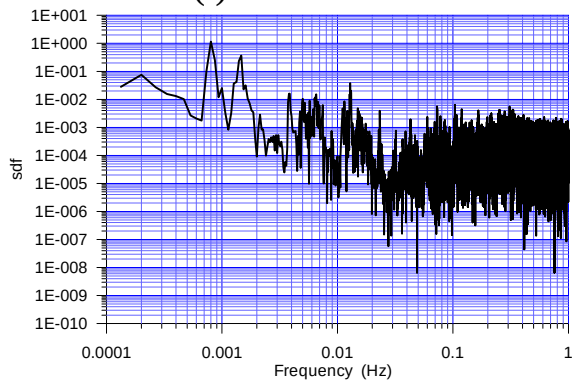
圖 3.28(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜



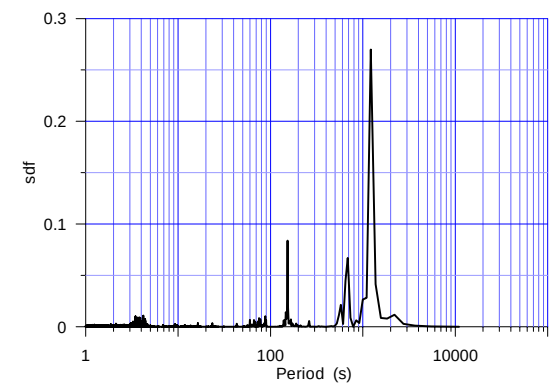
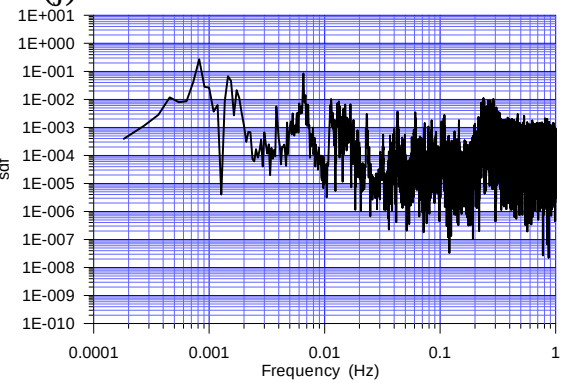
(i) 20060407 00:20



(j) 20060407 04:30



(k) 20060407 08:40



(l) 20060407 12:50

圖 3.28(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜

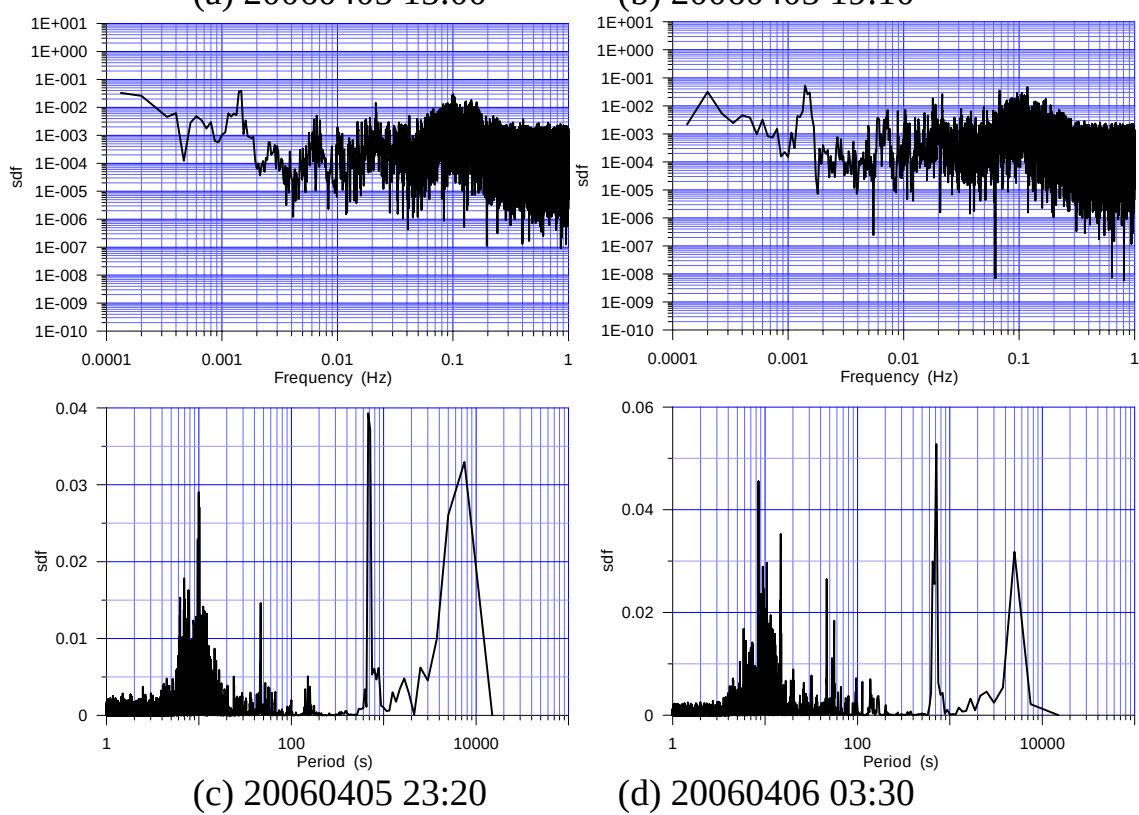
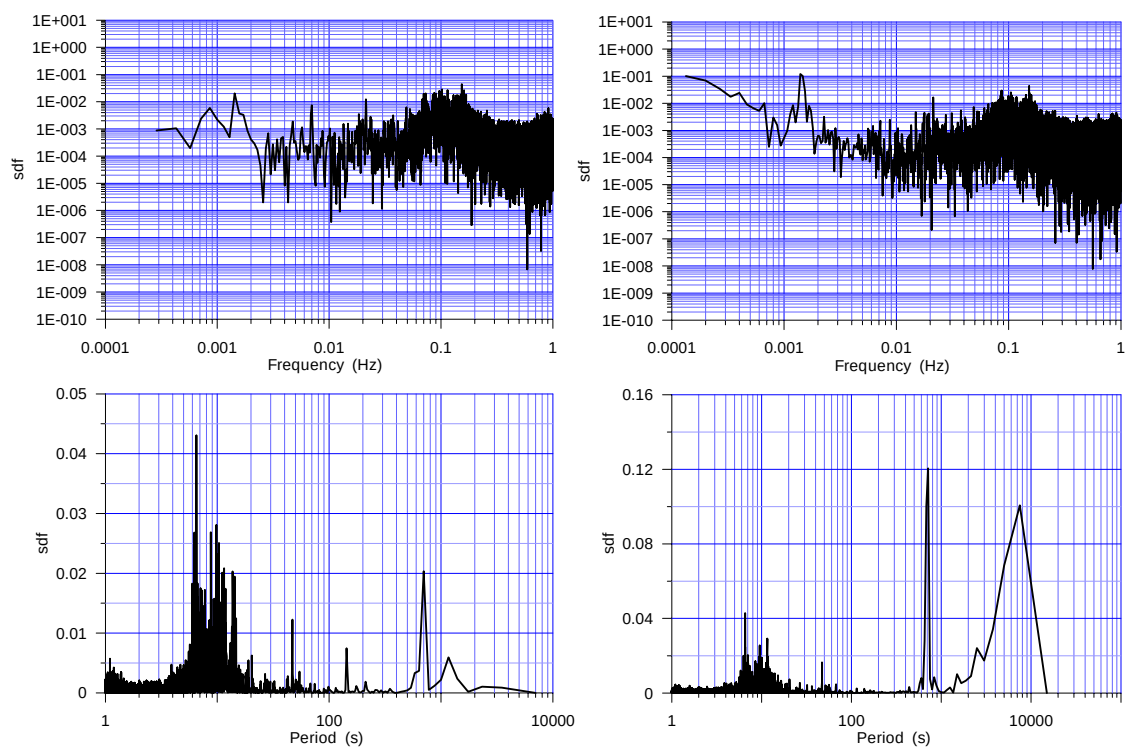


圖 3.29 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜

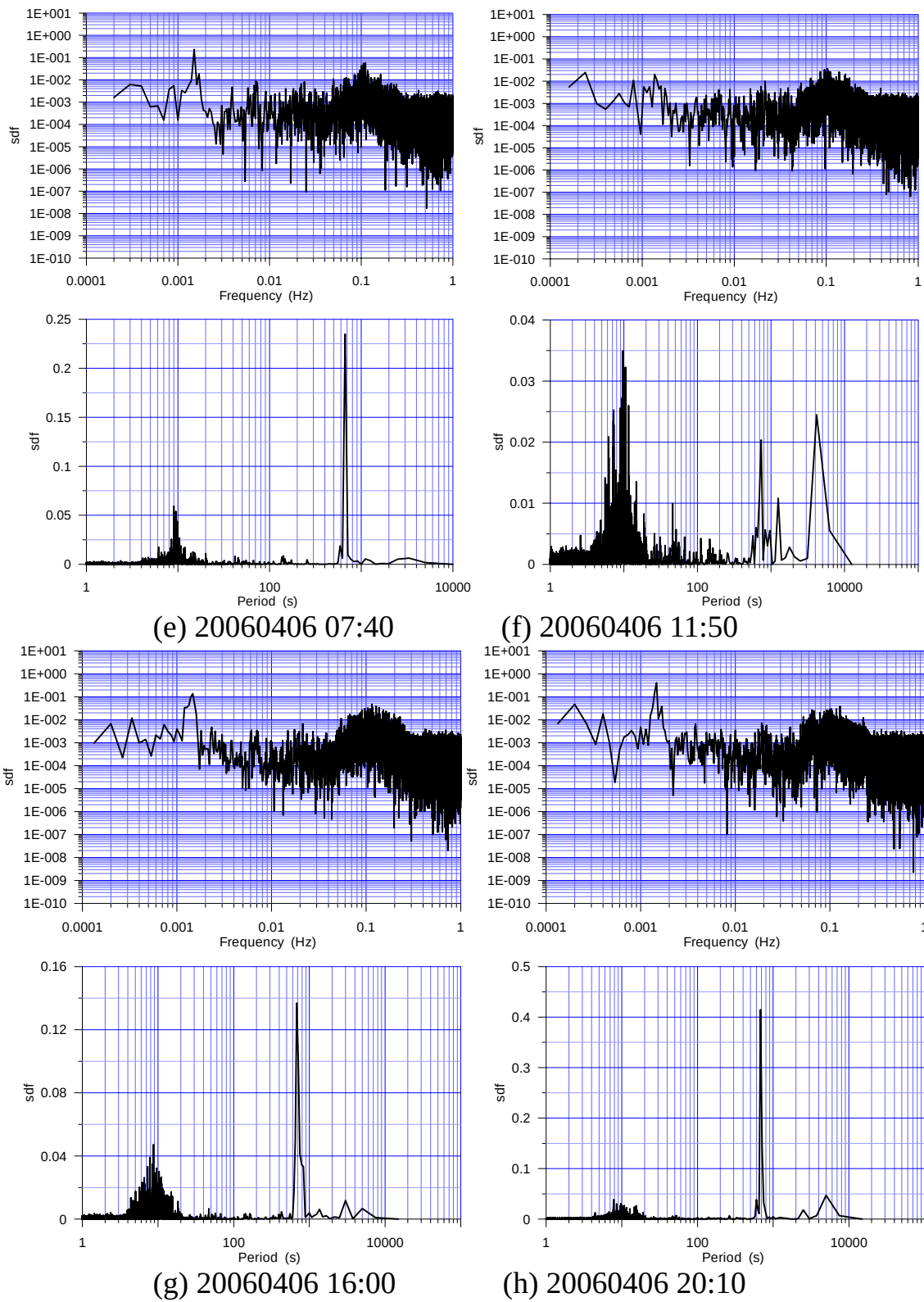


圖 3.29(續) 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜

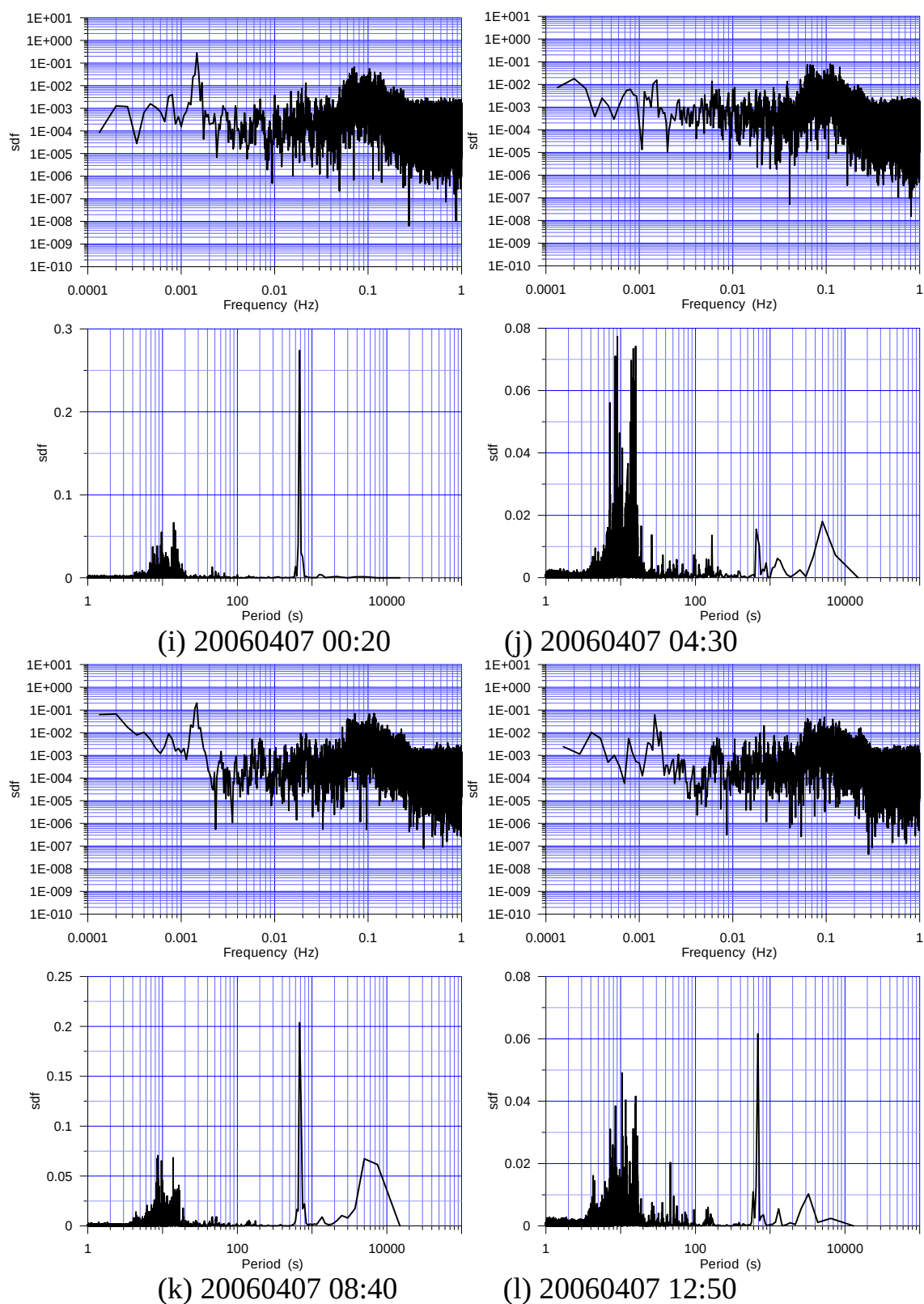


圖 3.29(續) 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜

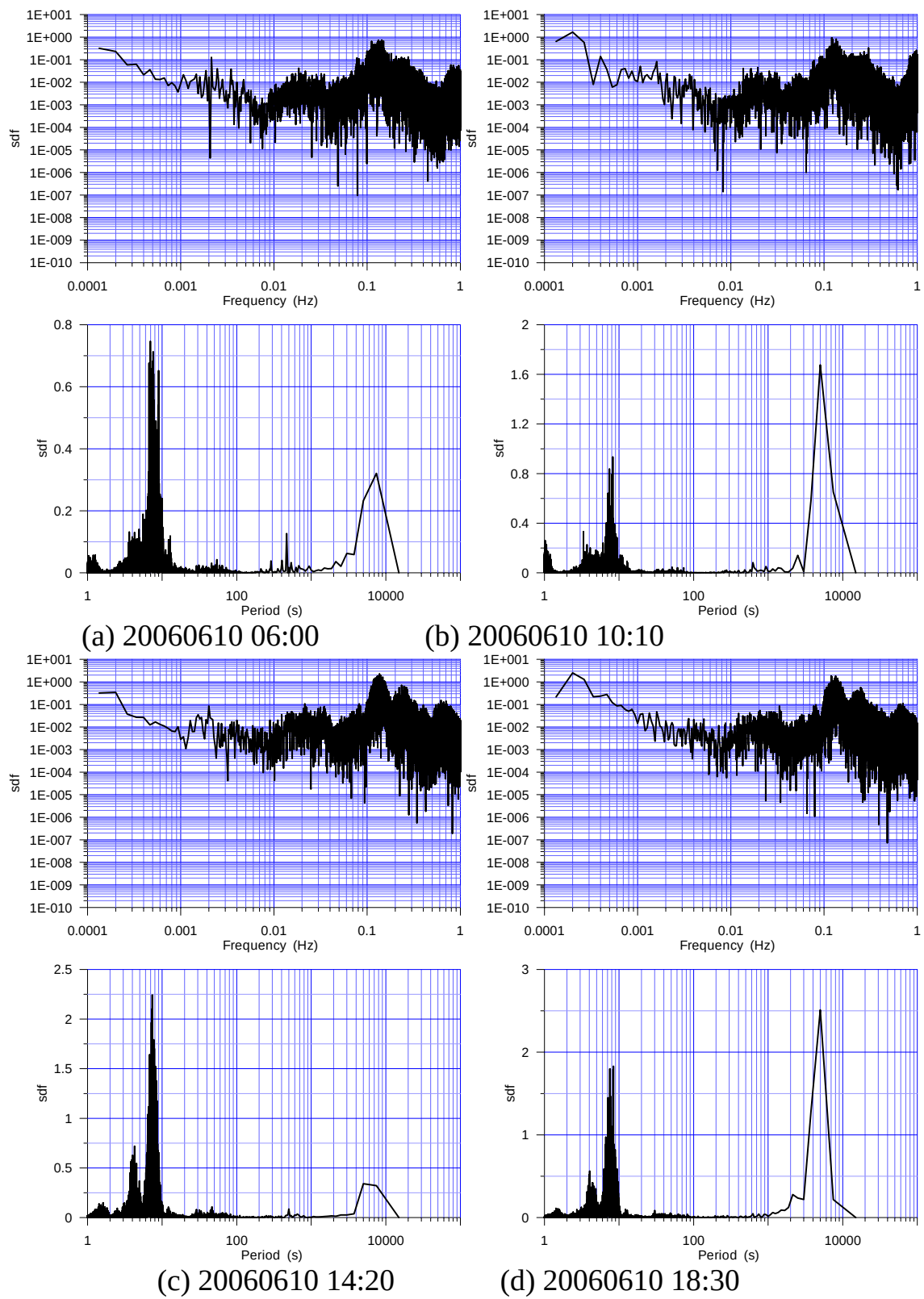


圖 3.30 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜

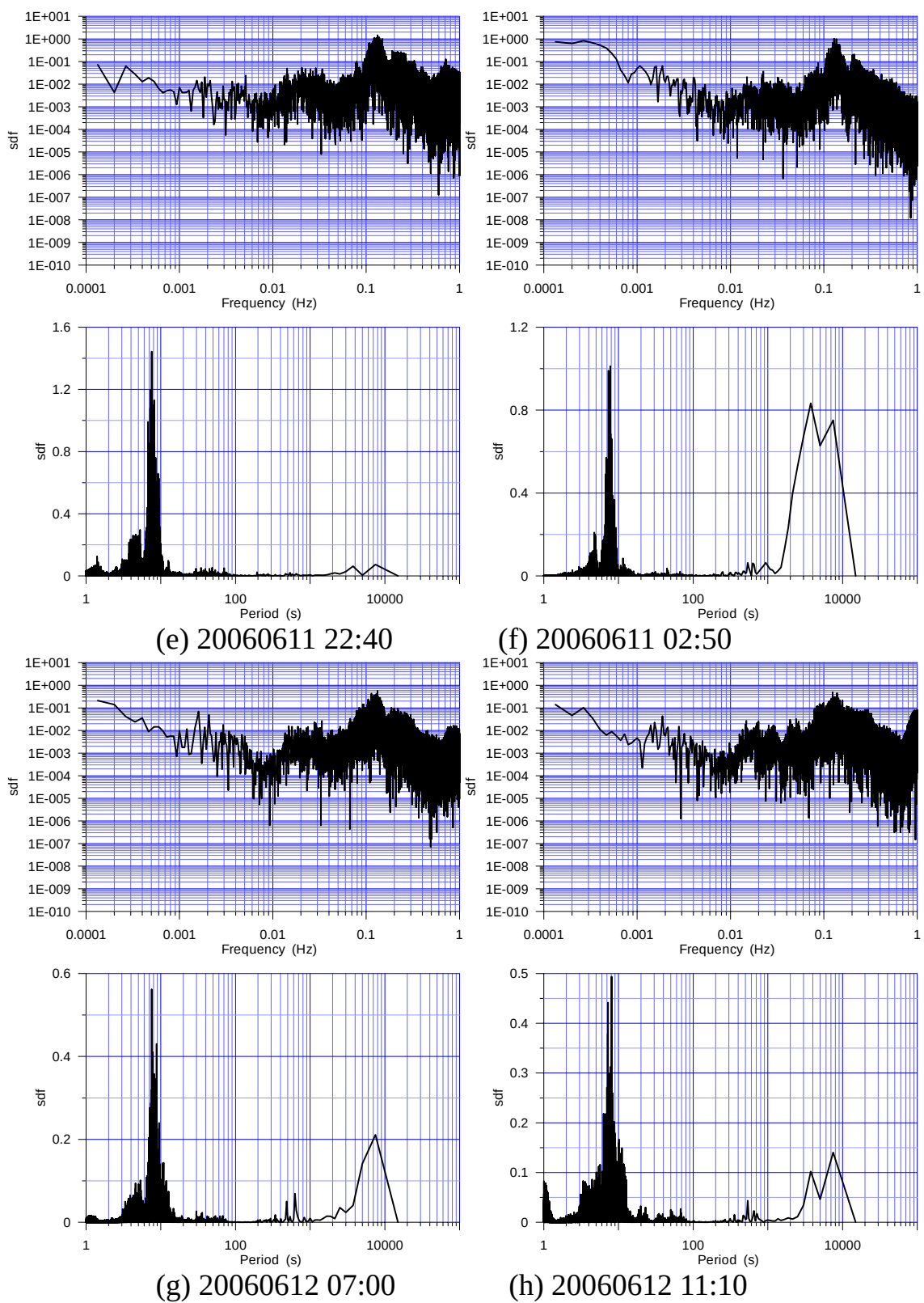


圖 3.30(續) 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜

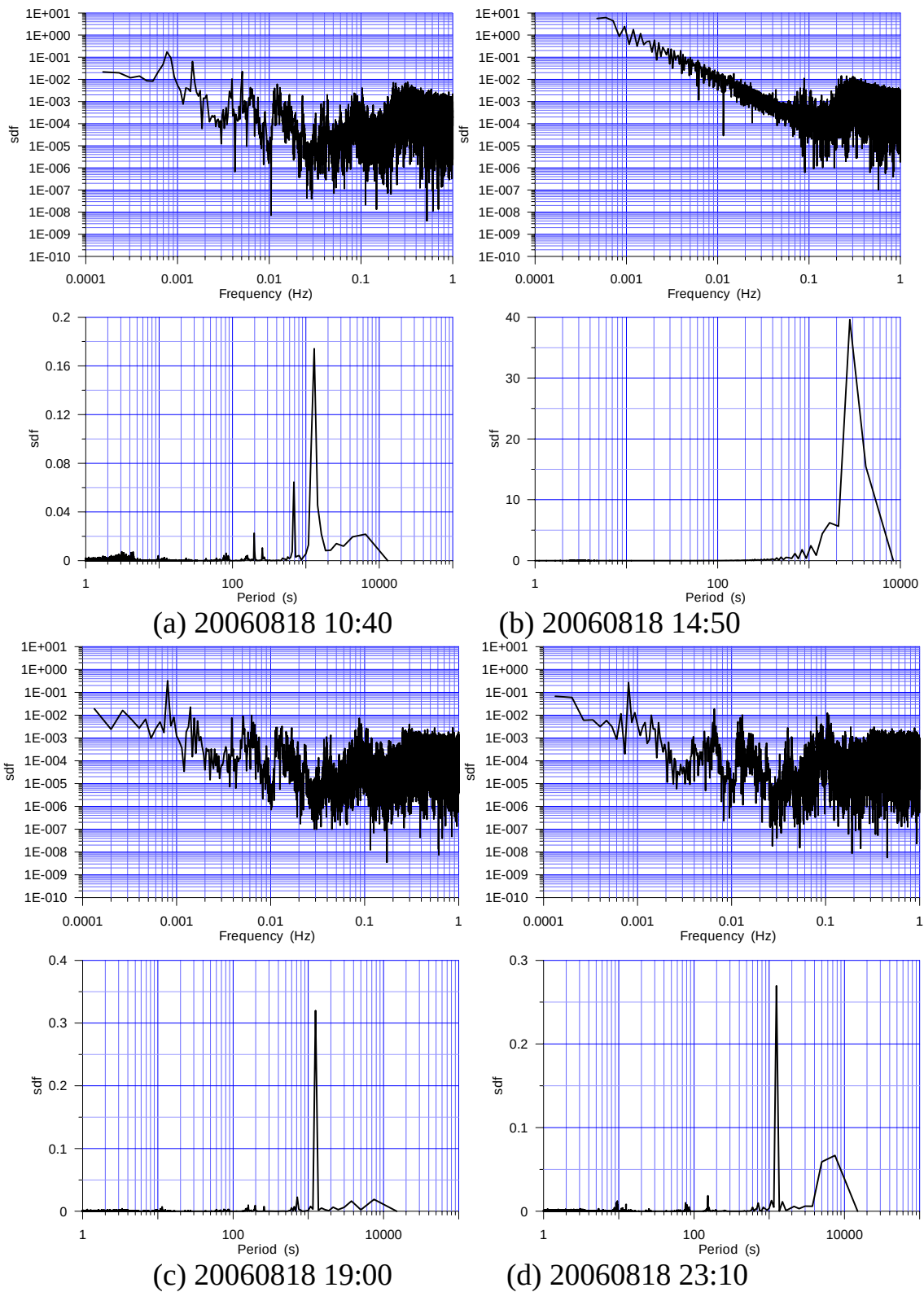


圖 3.31 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜

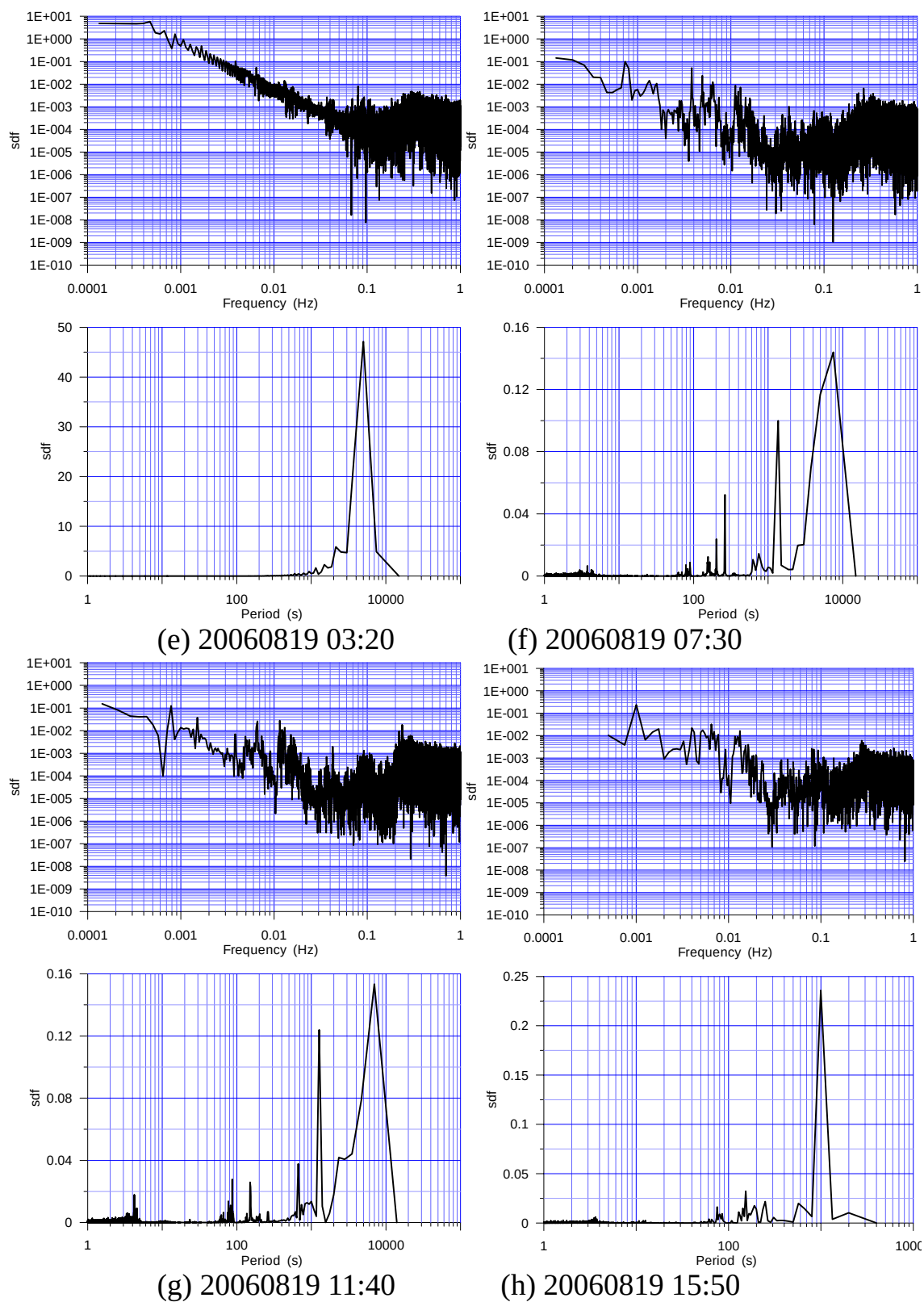


圖 3.31(續) 花蓮港內港水位觀測之分析頻譜

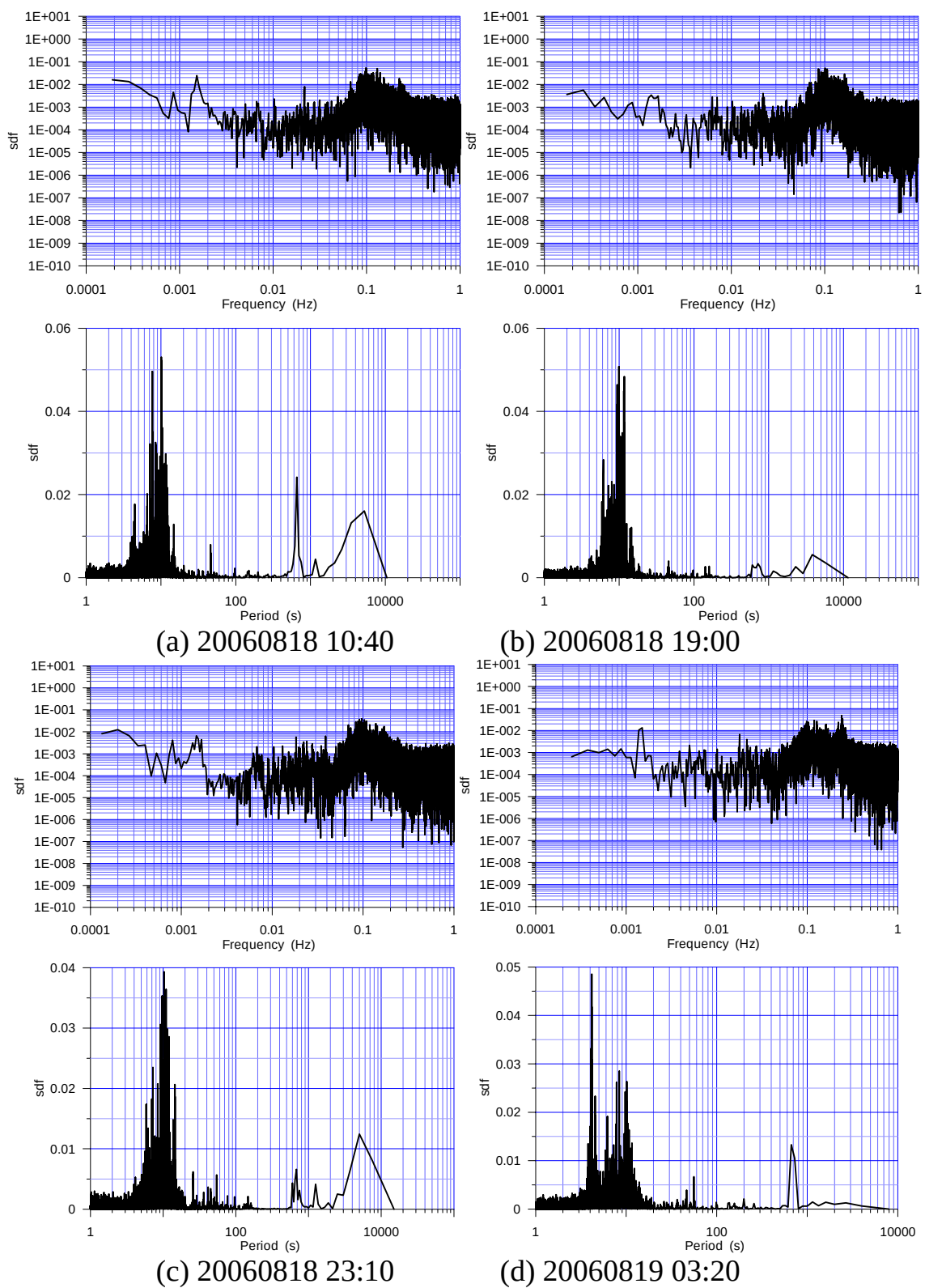
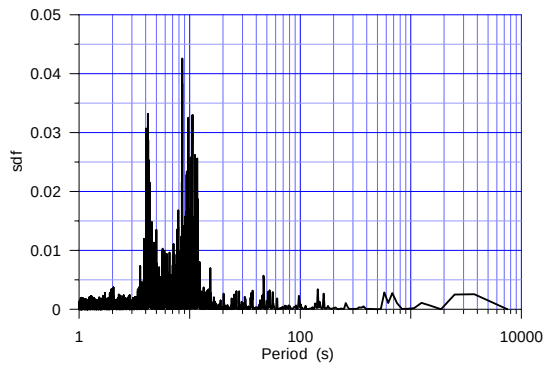
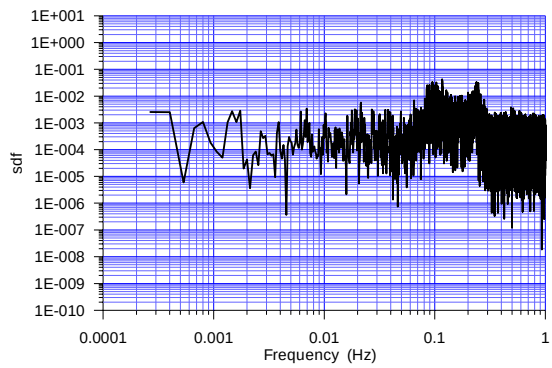
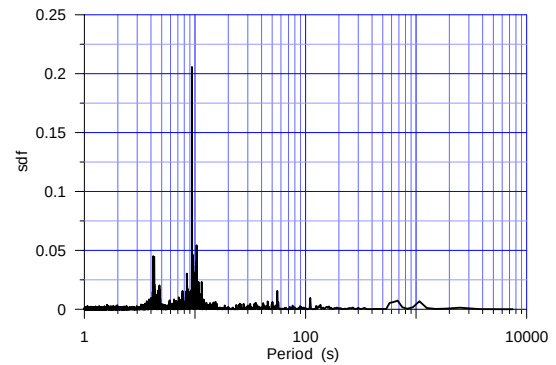
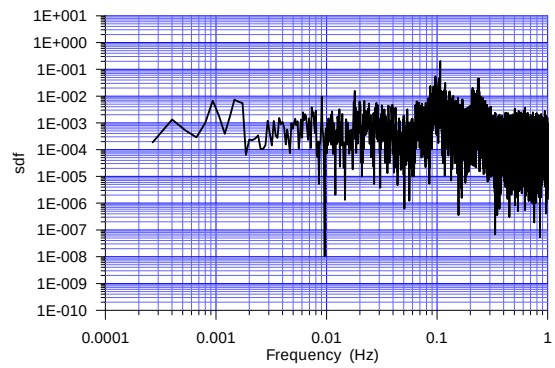


圖 3.32 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜

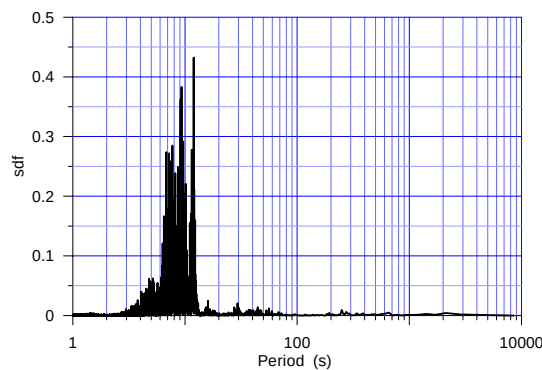
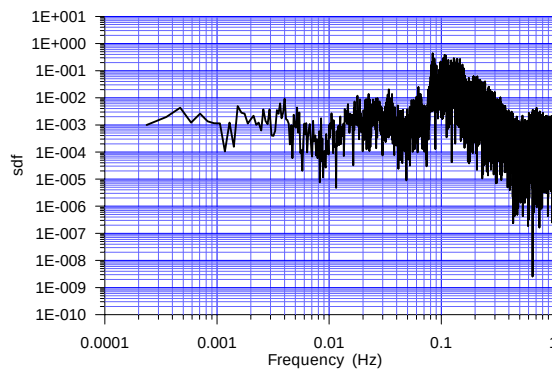


(e) 20060819 07:30

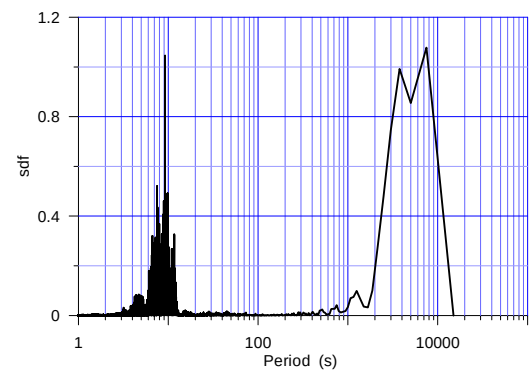
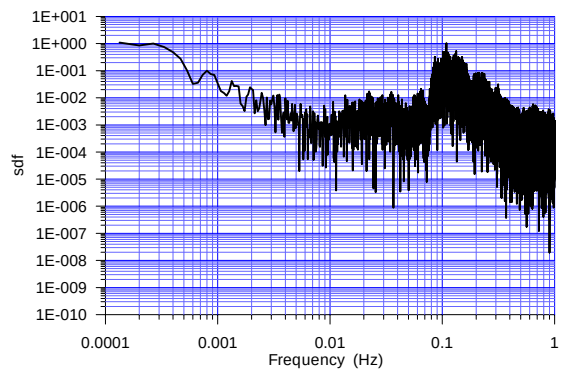


(f) 20060819 11:40

圖 3.32(續) 花蓮港外港水位觀測之分析頻譜



(a) 20060818 10:40



(b) 20060818 14:50

圖 3.33 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜

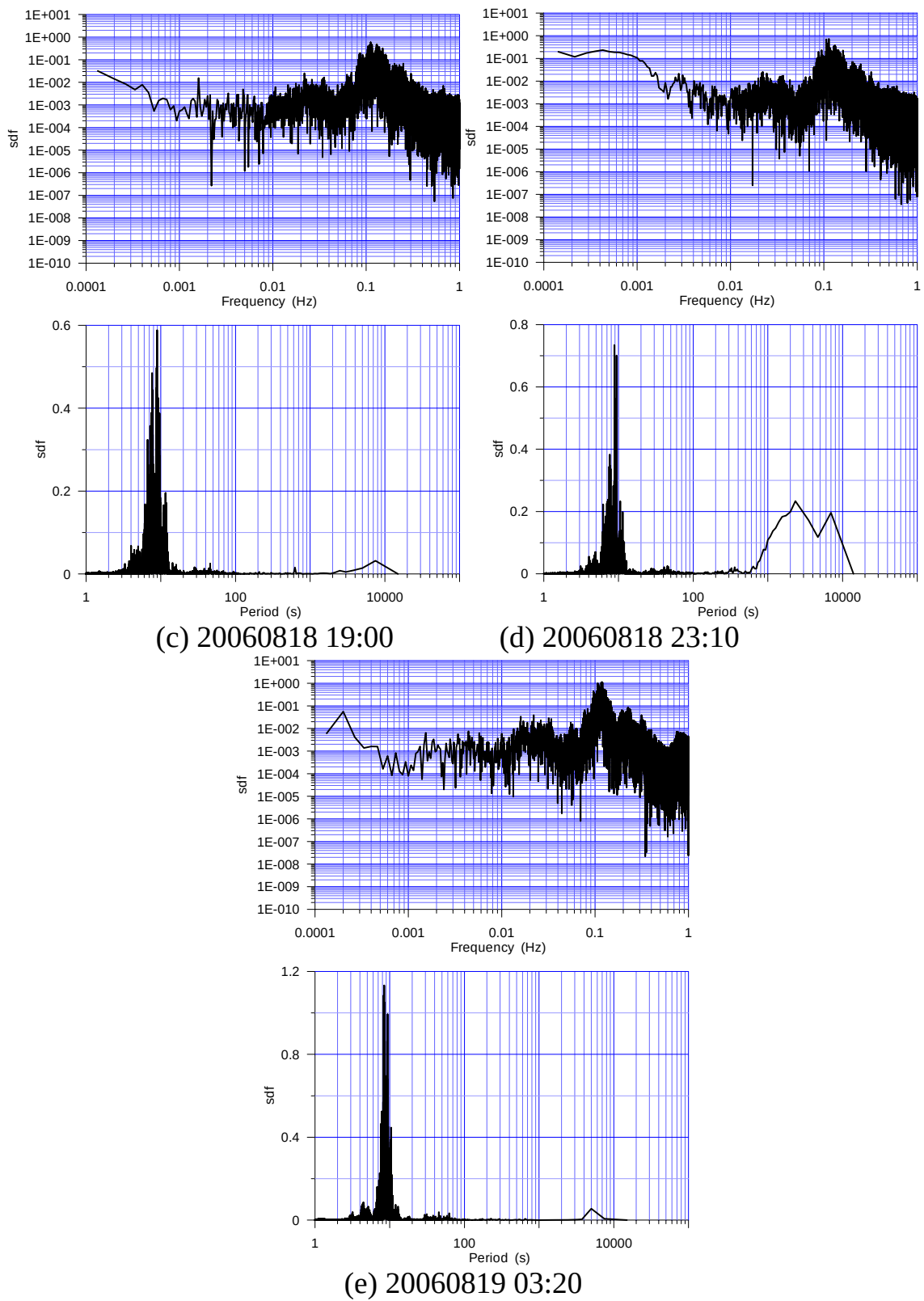


圖 3.33(續) 鹽寮漁港水位觀測之分析頻譜

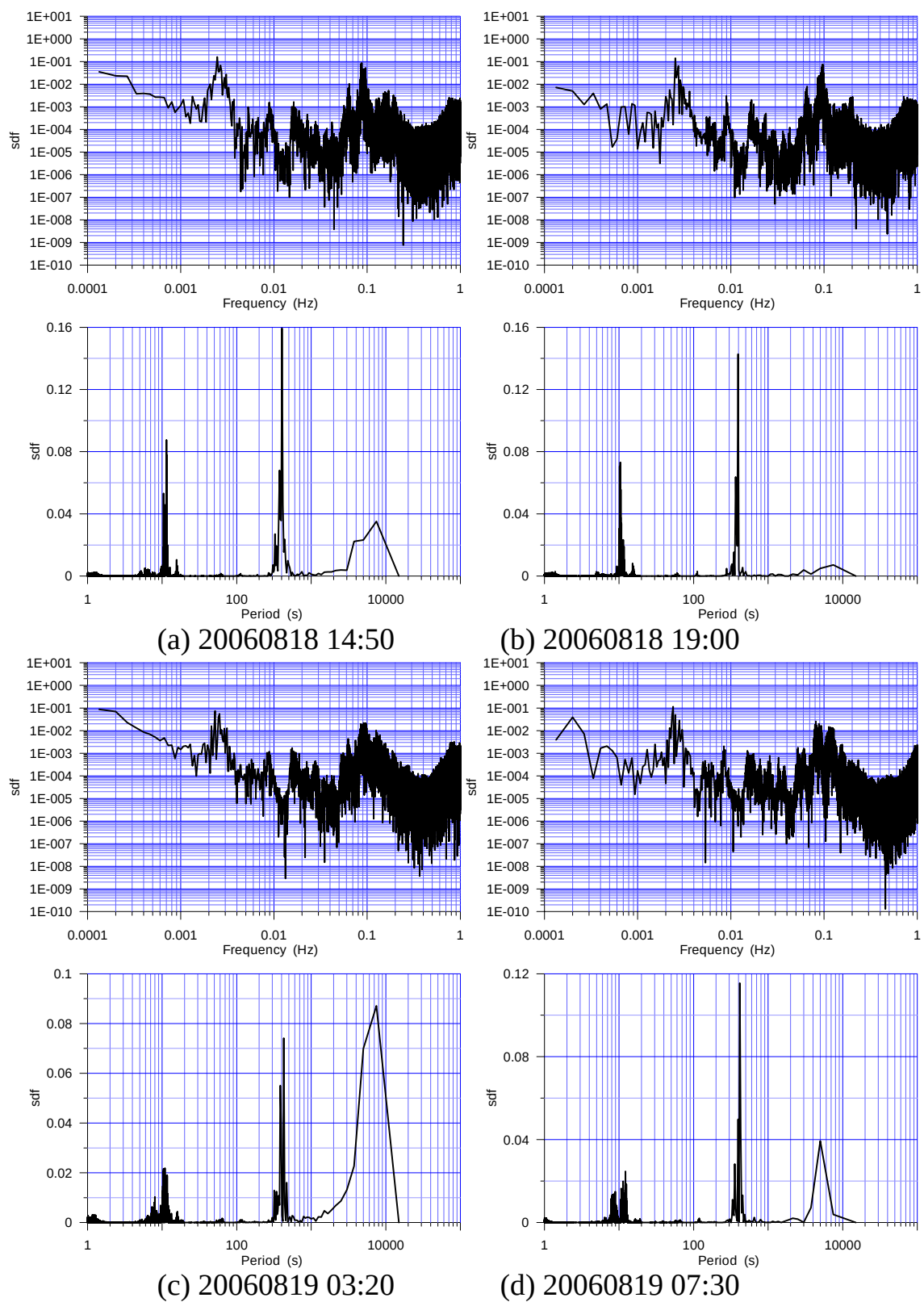


圖 3.34 石梯漁港水位觀測之分析頻譜

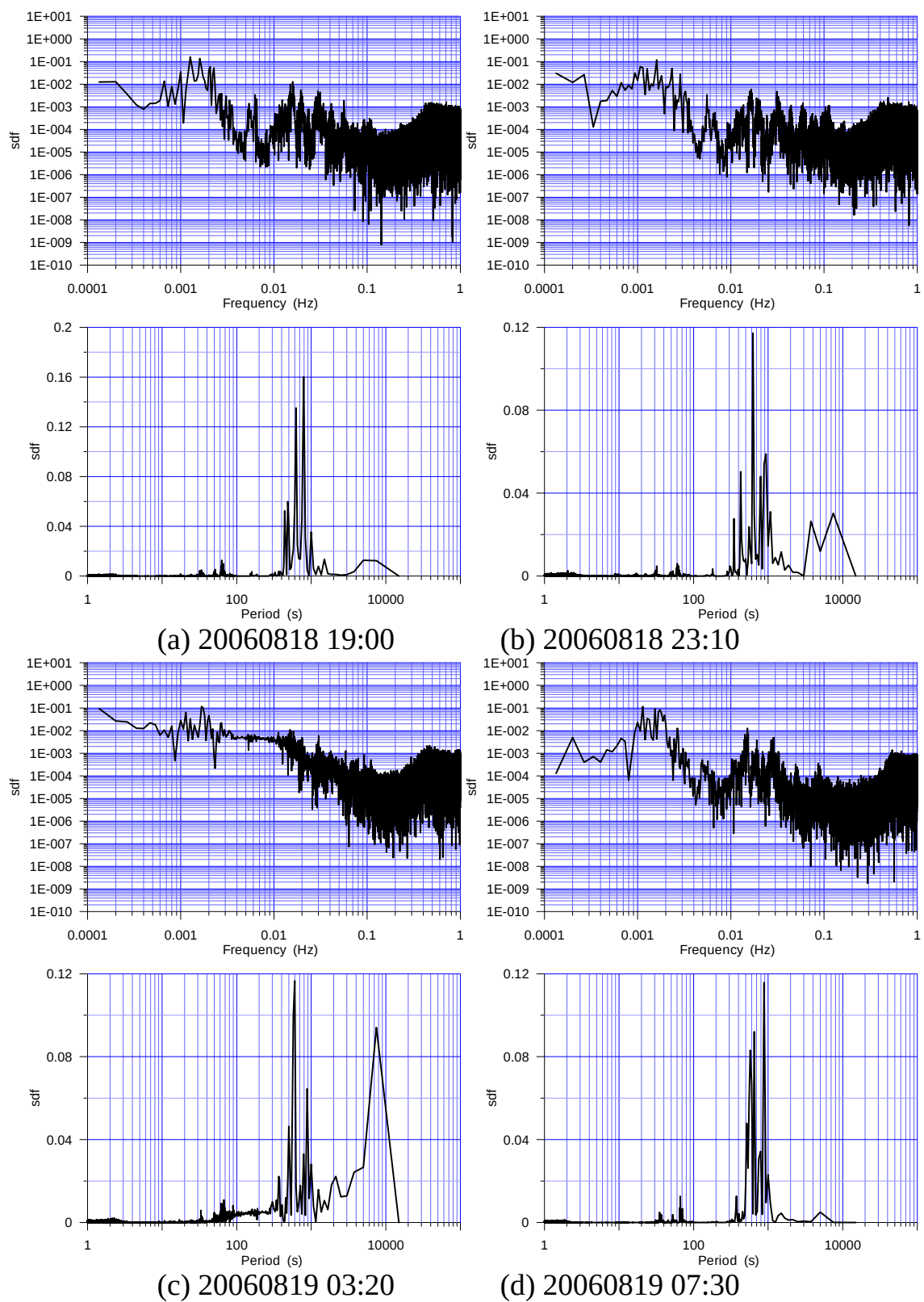


圖 3.35 金樽漁港水位觀測之分析頻譜

3.6 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較

為了進一步瞭解不同地點於同時期之海洋波浪成分的共通性，以期能釐清長週期波動存在的情形。本節收集了龜山島南側海域以及花蓮鹽寮漁港的波浪觀測資料，並進行相關的統計分析及比較。

龜山島南側海域的波浪觀測資料涵蓋了 2001 年 6 月 16 日至 2001 年 8 月 16 日以及 2001 年 8 月 15 日至 2001 年 10 月 27 日兩個時期。波浪觀測站係設於水深約 13.5 公尺處。波浪之觀測固定每隔兩小時以 2Hz 的取樣頻率連續記錄 20 分鐘的水面變動值。在觀測期間計有奇比颱風(2001/06/22~2001/06/24)、尤特颱風(2001/07/03~2001/07/05)、潭美颱風(2001/07/10~2001/07/11)、玉兔颱風(2001/07/23~2001/07/24)、桃芝颱風(2001/07/28~2001/07/31)、納利颱風(2001/09/11~2001/09/19)、利奇馬颱風(2001/09/23~2001/09/28)及海燕颱風(2001/10/15~ 2001/10/16)等八個颱風通過臺灣附近水域。

花蓮鹽寮漁港的波浪觀測資料涵蓋了 2000 年 12 月至 91 年 2 月期間。波浪觀測架放置的水深約為 14.5 公尺左右。波浪之觀測固定每隔兩小時以 2Hz 的取樣頻率連續記錄 20 分鐘的水面變動值。在觀測期間計有西馬隆颱風(2001/05/11~2001/05/16)奇比颱風(2001/06/22~2001/06/24)、尤特颱風(2001/07/03~2001/07/05)、潭美颱風(2001/07/10~2001/07/11)、玉兔颱風(2001/07/23~2001/07/24)、桃芝颱風(2001/07/28~ 2001/07/31)、納利颱風(2001/09/11~2001/09/19)、利奇馬颱風(2001/09/23~2001/09/28)及海燕颱風(2001/10/15~ 2001/10/16)等九個颱風通過臺灣附近水域。其中，2001 年夏季的波浪觀測期間計有發生玉兔颱風、桃芝颱風、納利颱風及利奇馬颱風等四個颱風。

圖 3.36 至圖 3.39 為龜山島南岸海域波浪觀測在各個颱風時期的特性波高及週期變化時序圖，圖 3.40 至圖 3.45 為花蓮鹽寮漁港於觀測期間內的特性波高及週期的時序變化圖。由圖中可以看出在颱風侵襲期間特性波高和週期都會明顯地加大，此處不再討論。

為瞭解海洋波動的共通性，本節同步擷取兩個觀測點在 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時間的波動頻譜圖，如圖 3.46 所示(圖中左欄為龜山島南岸的分析頻譜；右欄為花蓮鹽寮漁港的分析頻譜)，進行比較。在此期間，2001/9/23 20 時至 2001/9/28 9 時臺灣附近海域曾受到利奇馬颱風侵襲，本段資料正好用來觀察颱風來襲前後的波動變化情形。

就龜山島南岸而言，由於距離利奇馬颱風的行進路徑較遠，受到颱風波浪(包含湧浪)的影響應該較晚。但從圖中可以發現，大約在 2001/9/23 2 時(距離發佈海上颱風警報前 18 小時)週期大於 100 秒的波動能量即開始增加，研判應該是颱風行進過程中的湧浪已先行到達。而值得注意的是，在此之前，也就是 2001/9/21 20 時至 2001/9/23 2 時之間 30 秒以上的長週期波動成分一直存在，只是能量大約是一般重力波的十分之一。之後隨著颱風行徑的漂移，長週期成分時而增大時而減弱，2001/9/24 12 時以後減弱，而在 2001/9/26 0 時至 2001/9/27 16 時再度加大隨後減弱。此種變化應與颱風行進方向與龜山島的夾角有關。

就花蓮鹽寮漁港而言，騎距離利奇馬颱風的行進路徑較近，理應較早受到颱風波浪的影響，但從圖中可看出，其至 2001/9/23 14 時才開始有明顯的能量增加，而且增加的部分是 50 秒至 100 秒間的成分，在 2001/9/23 20 時以後 100 秒以上的成分波能量才明顯增加，但在 2001/9/24 4 時以後就減弱了。其後一直至 2001/9/26 2 時之前所增加的能量都在 50 秒至 100 秒間的成分，以後才又看到 100 秒以上成分波的能量明顯增加。但是在 2001/9/26 18 時以後能量就減到一般重力波的十分之一以下不再增加。

比較兩個觀測站的頻譜圖，我們可以發現：30 秒以上的長週期波動成分從來沒有缺席過。其波動能量在平時不大，振幅可能在 10 公分以下，但在颱風來襲期間，則明顯增加。此一訊息顯示在面對太平洋的臺灣東海岸沿海長週期波動的成分始終存在。花蓮鹽寮漁港可能由於直接面對開闊的太平洋，其波譜呈現較寬頻的情形，反之龜山島南岸則較為窄頻。但兩地皆顯示 30 秒以上的成分波動無法被忽略。

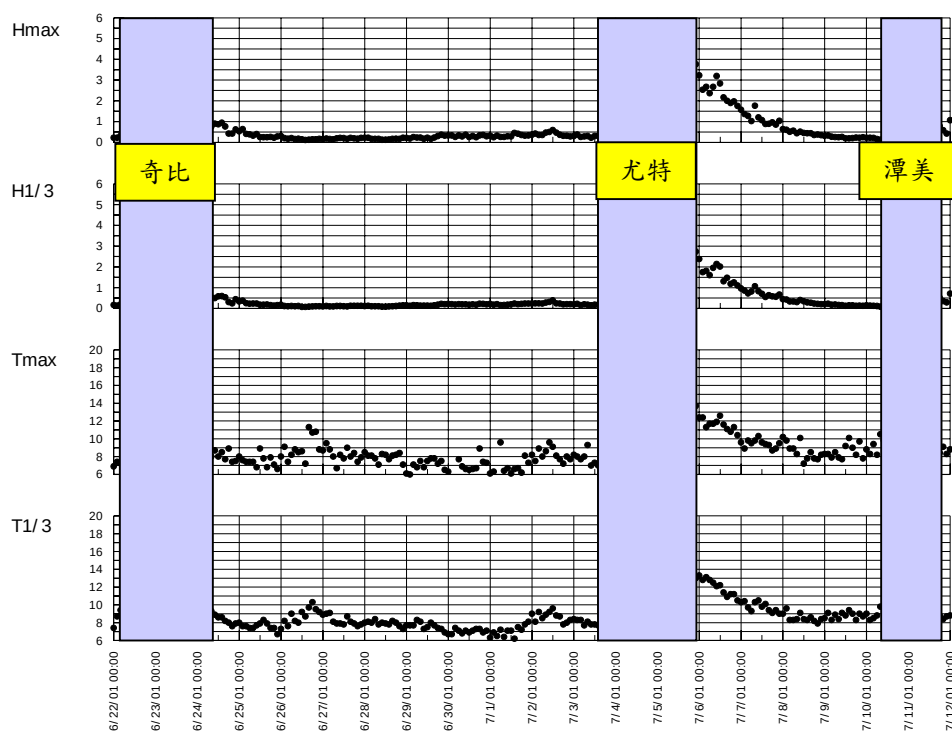


圖 3.36 龜山島南岸於奇比颱風(2001/06/22~2001/06/24)、尤特颱風(2001/07/03~2001/07/05)及潭美颱風(2001/07/10~2001/07/11)過境時之特性波高及週期變化圖

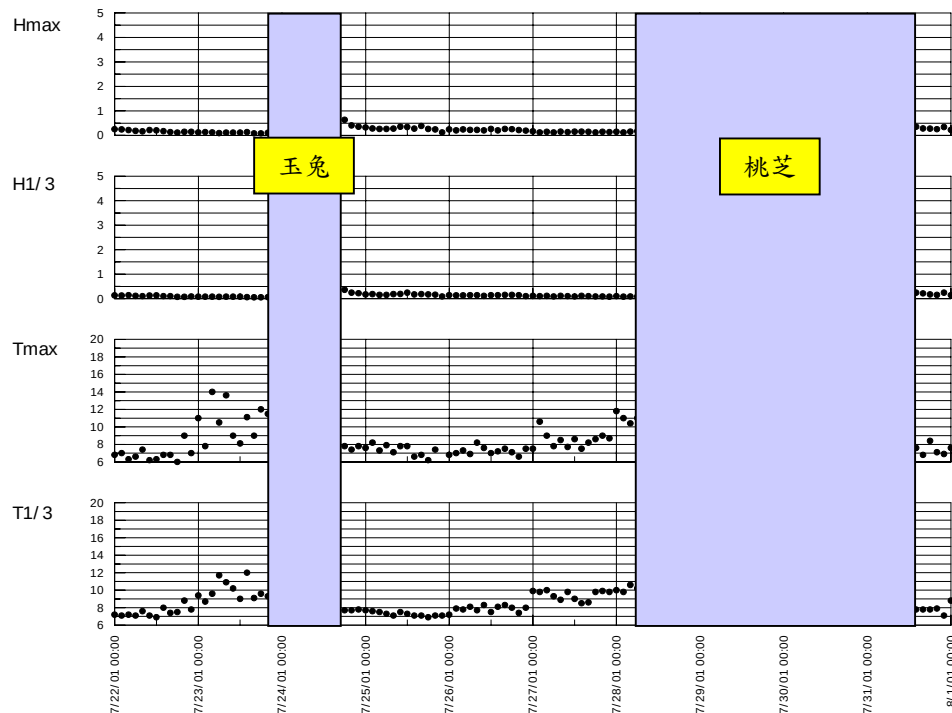


圖 3.37 龜山島南岸於玉兔颱風(2001/07/23~2001/07/24)及桃芝颱風(2001/07/28~2001/07/31)過境時之特性波高及週期變化圖

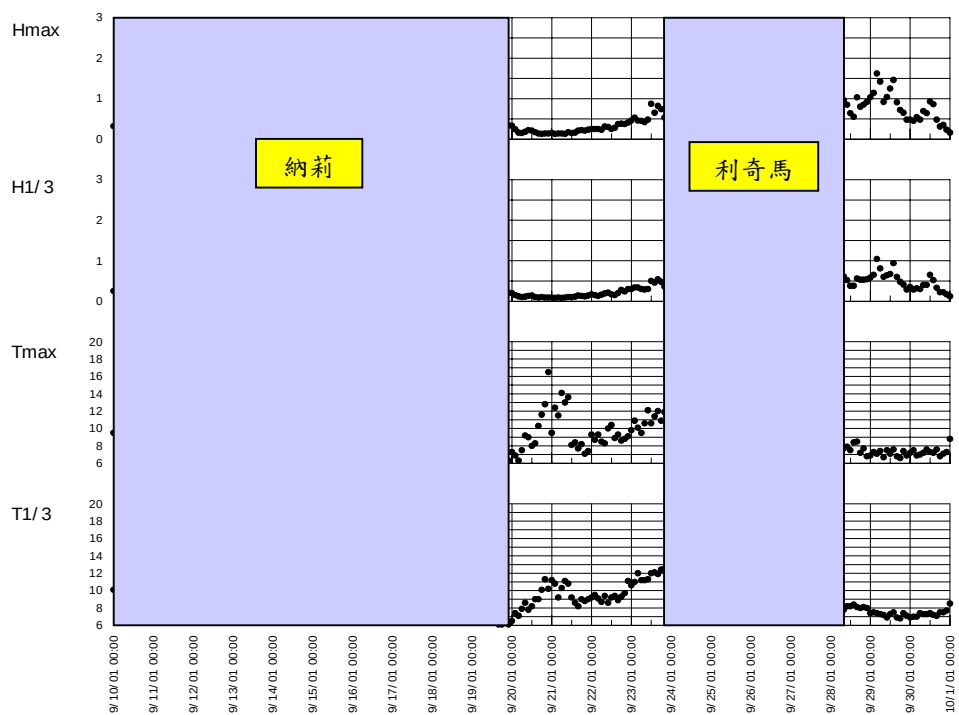


圖 3.38 龜山島南岸於納利颱風路徑圖(2001/09/11~2001/09/19)及利奇馬颱風路徑圖(2001/09/23~2001/09/28)過境時之特性波高及週期變化圖

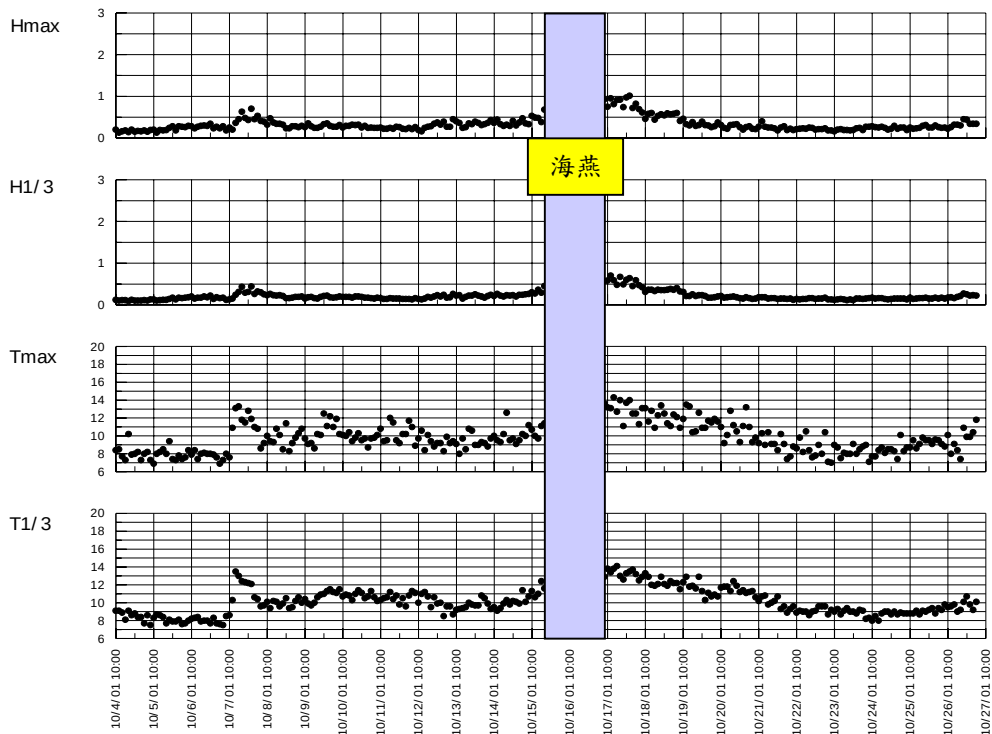


圖 3.39 龜山島南岸於海燕颱風路徑圖(2001/10/15~2001/10/16)過境時之特性波高及週期變化圖

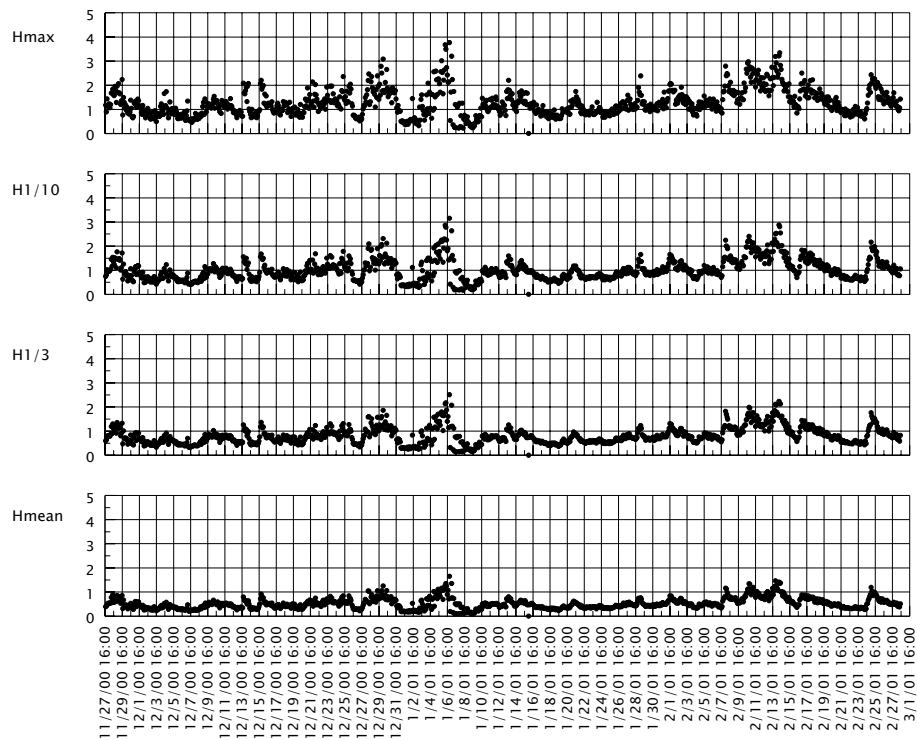


圖 3.40 花蓮鹽寮漁港於 2000 年 12 月至 2001 年 2 月之特性波高分佈時序圖

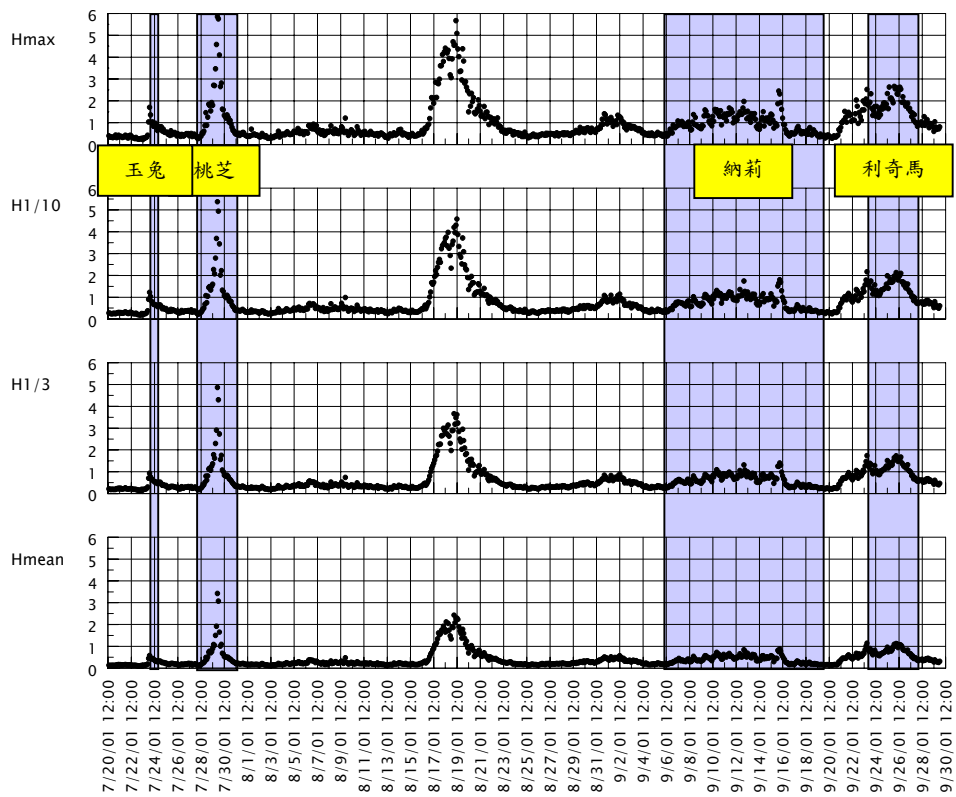


圖 3.41 花蓮鹽寮漁港於 2001 年 7 月至 2001 年 9 月之特性波高分佈時序圖

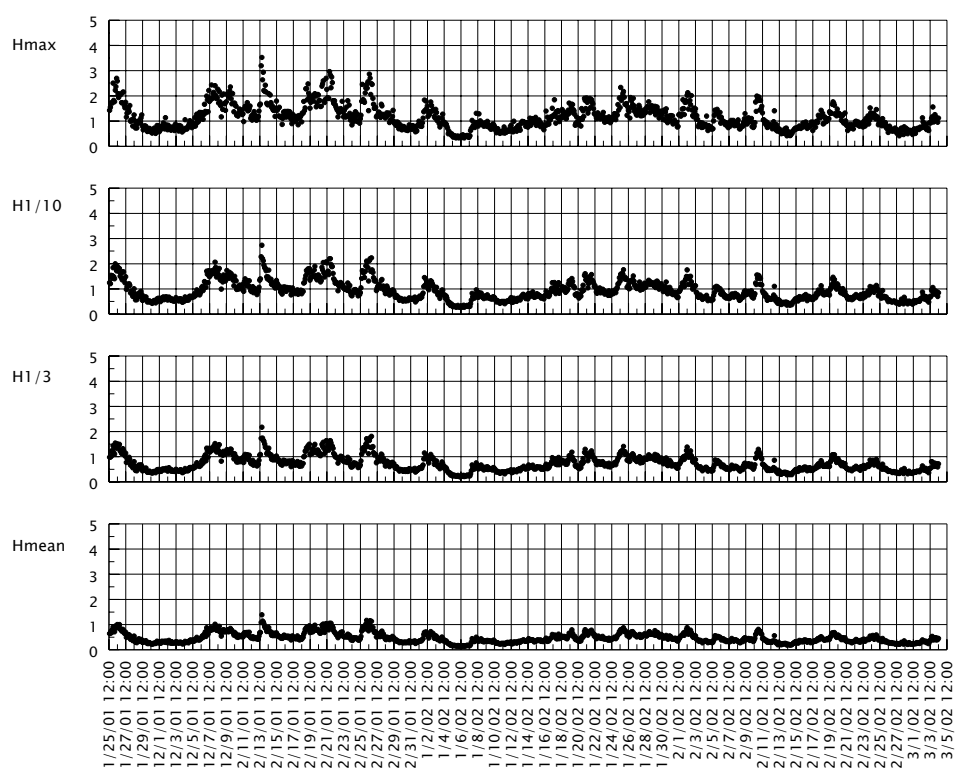


圖 3.42 花蓮鹽寮漁港於 2001 年 12 月至 2002 年 2 月之特性波高分佈時序圖

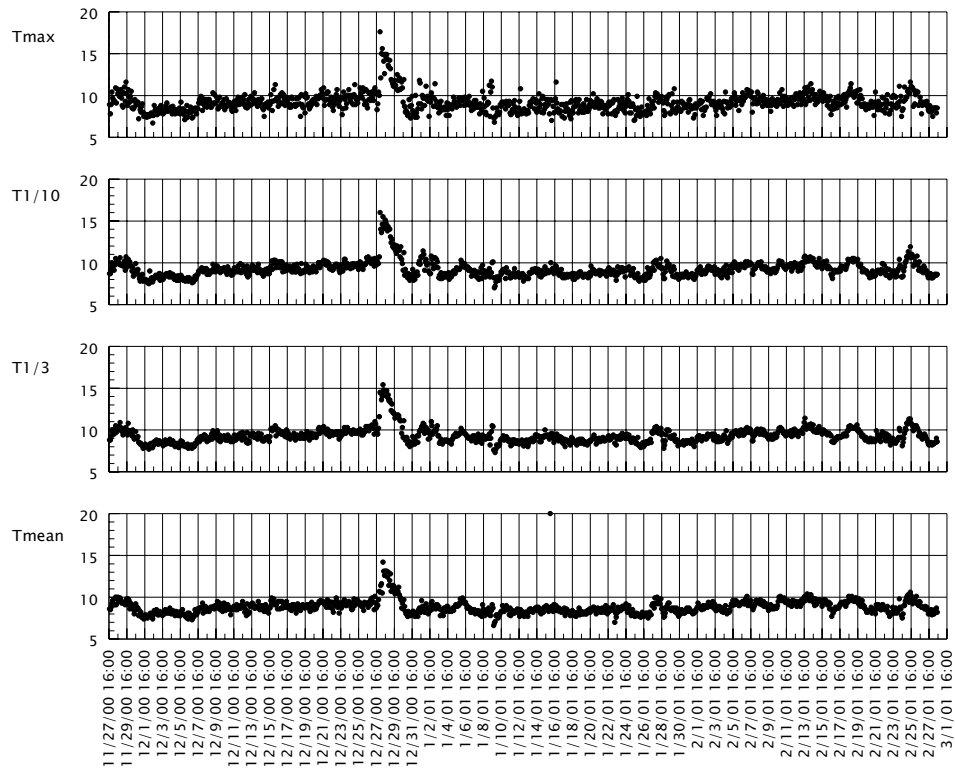


圖 3.43 花蓮鹽寮漁港於 2000 年 12 月至 2001 年 2 月之波浪特性週期分佈時序圖

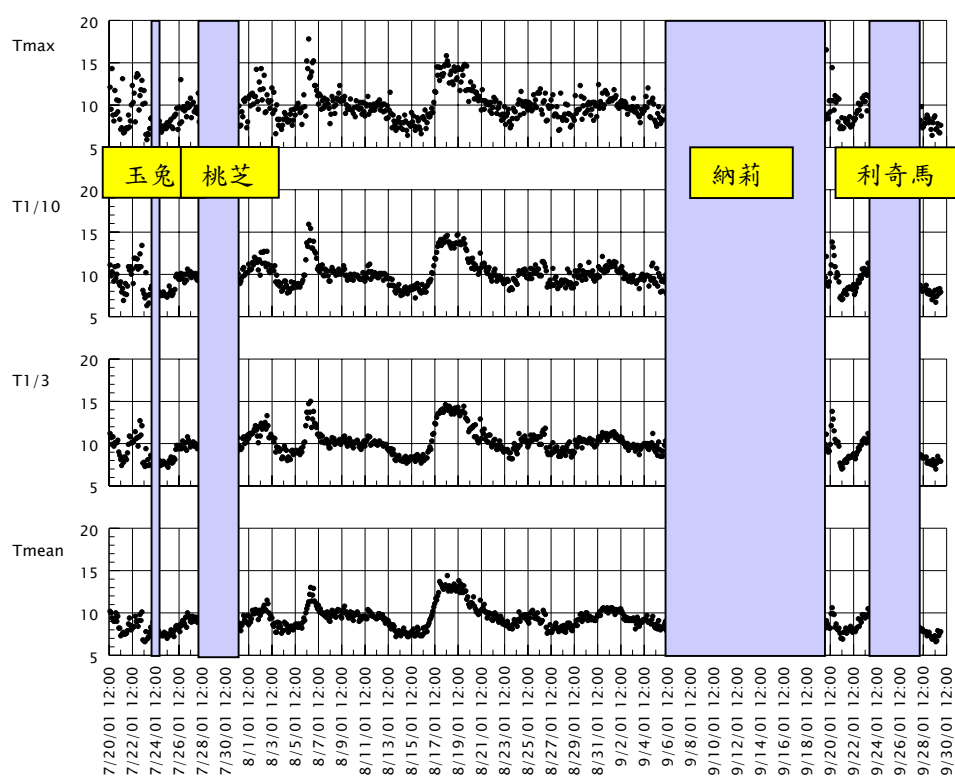


圖 3.44 花蓮鹽寮漁港於 2001 年 7 月至 2001 年 9 月之波浪特性週期分佈時序圖

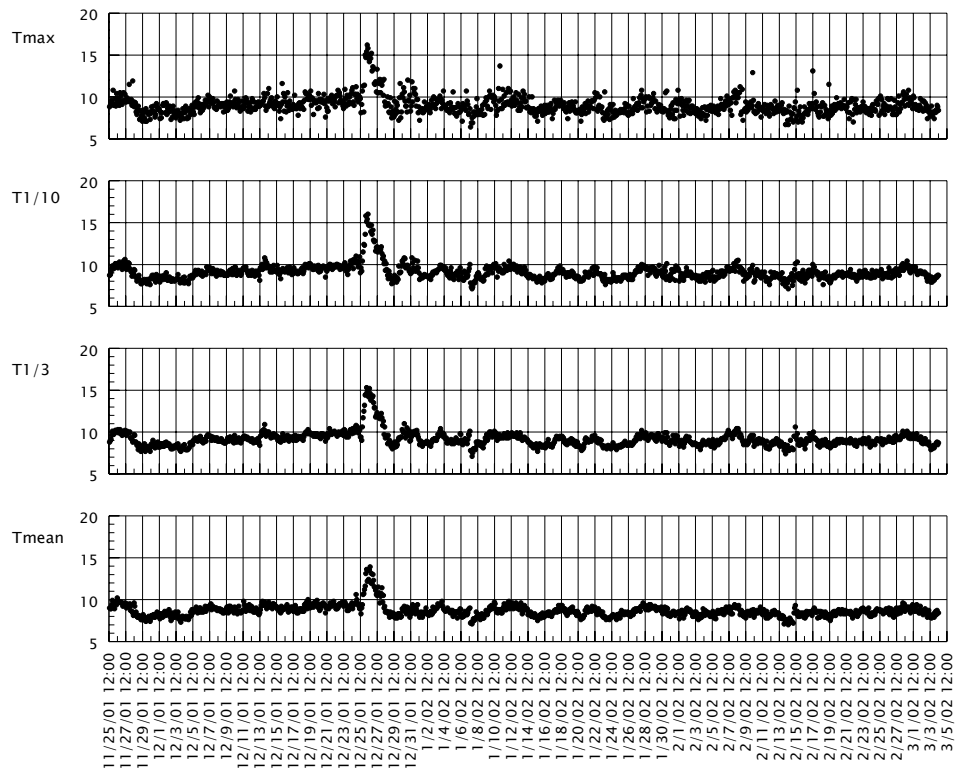
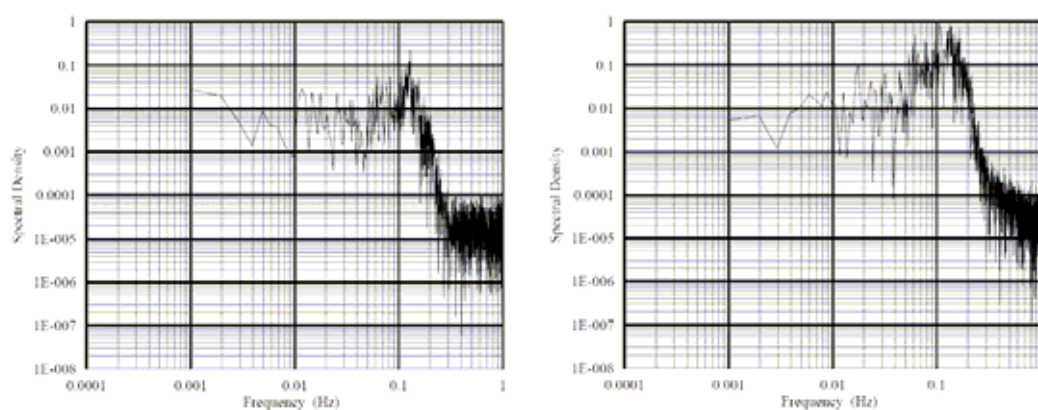
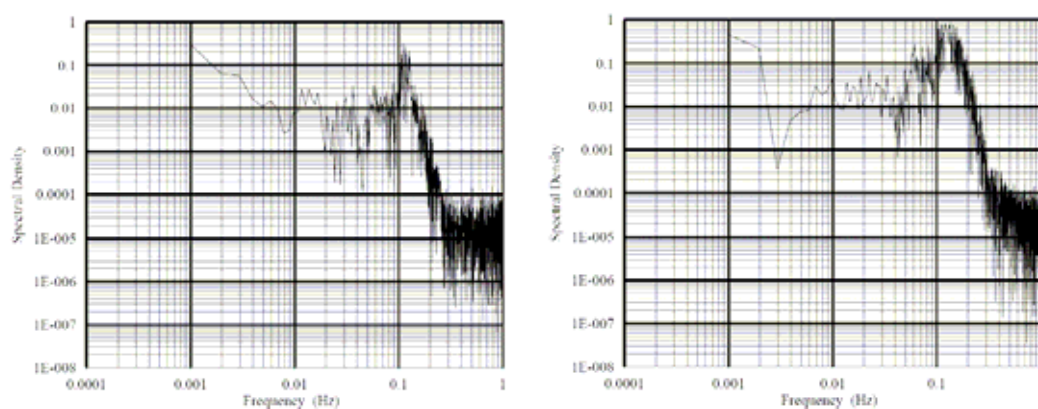


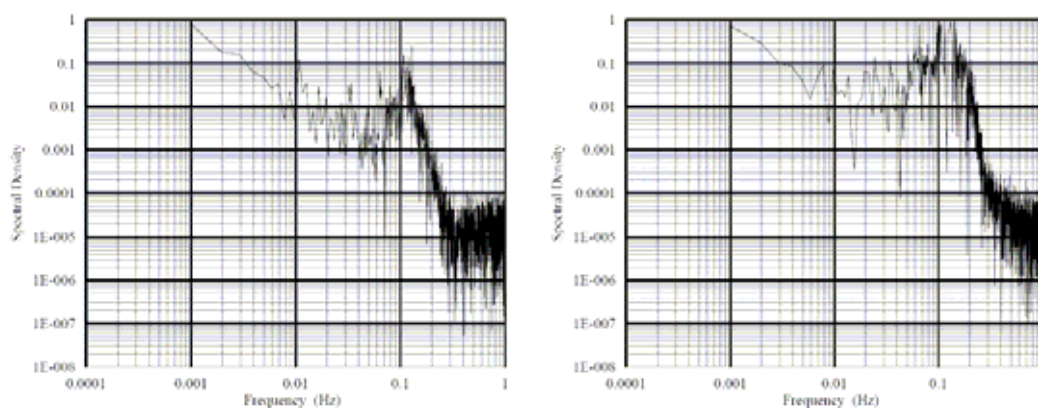
圖 3.45 花蓮鹽寮漁港於 2001 年 12 月至 2002 年 2 月之波浪特性週期分佈時序圖



2001/9/21 20 時

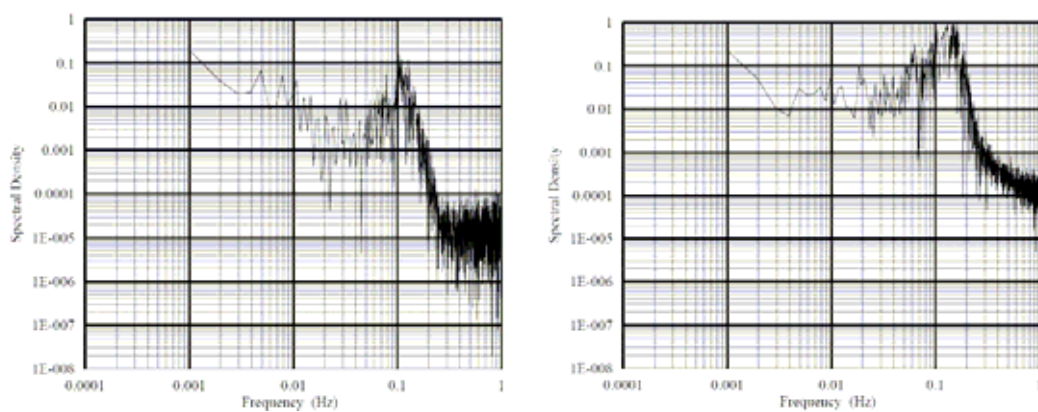


2001/9/21 22 時

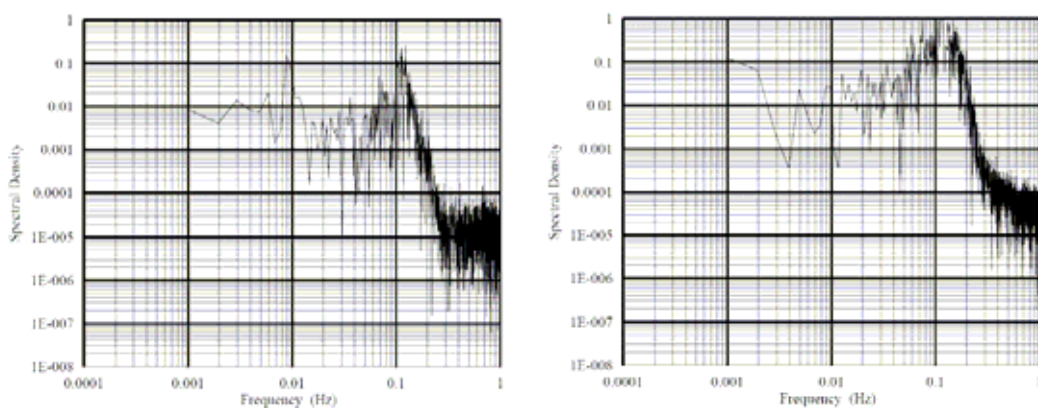


2001/9/22 0 時

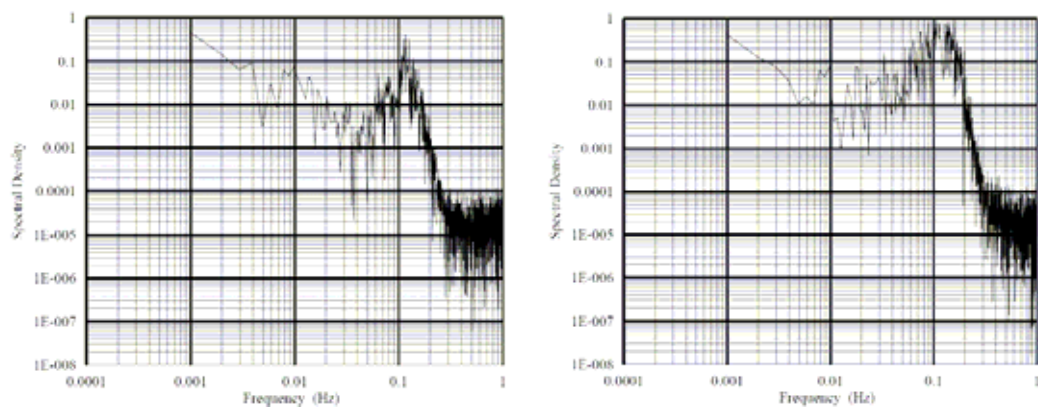
圖 3.46 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/22 2 時

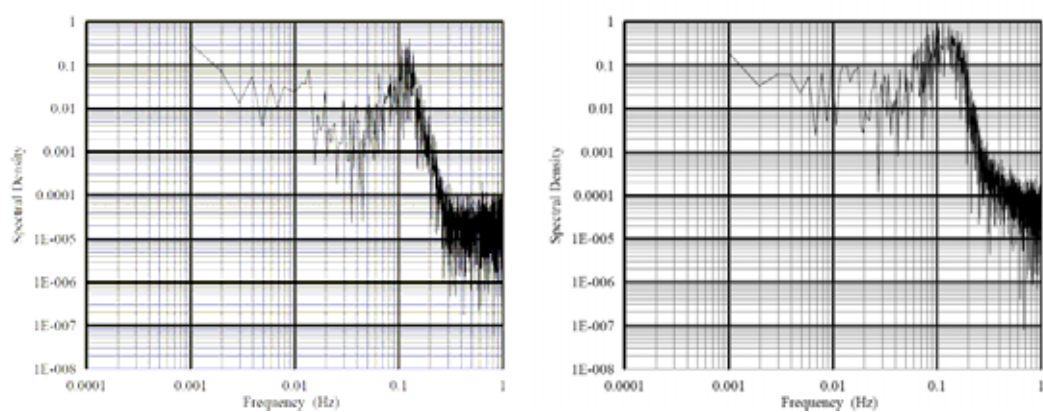


2001/9/22 4 時

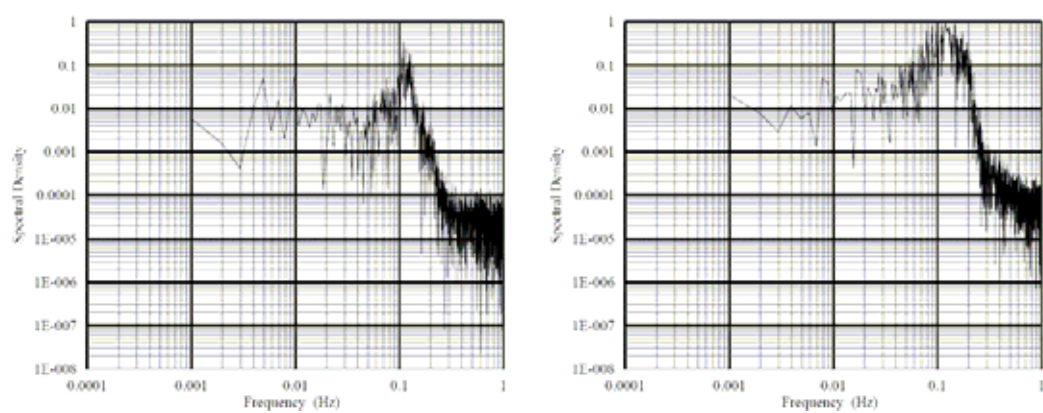


2001/9/22 6 時

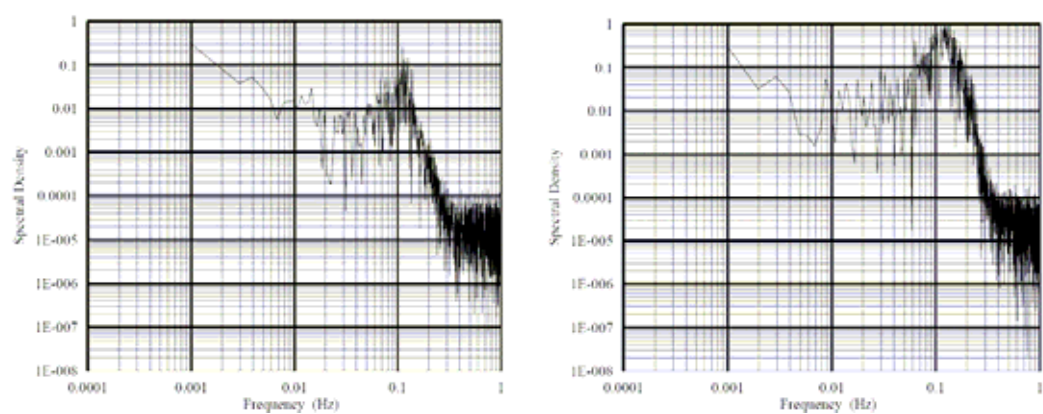
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/22 8 時

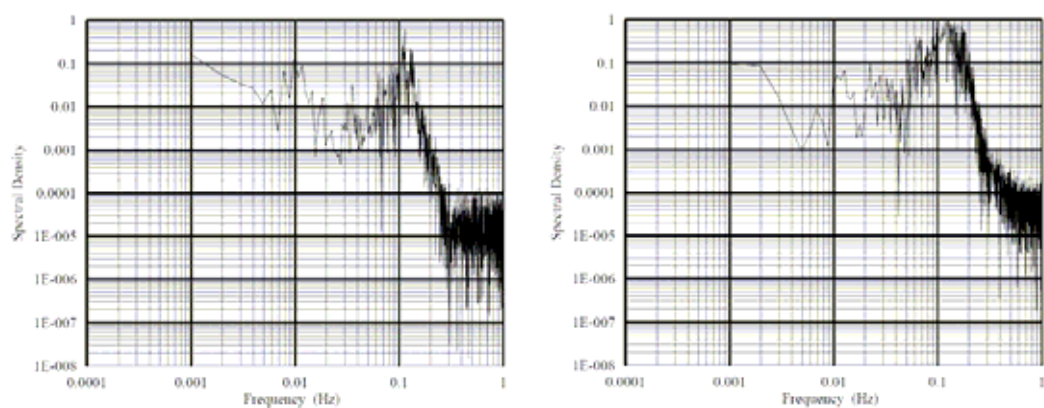


2001/9/22 10 時

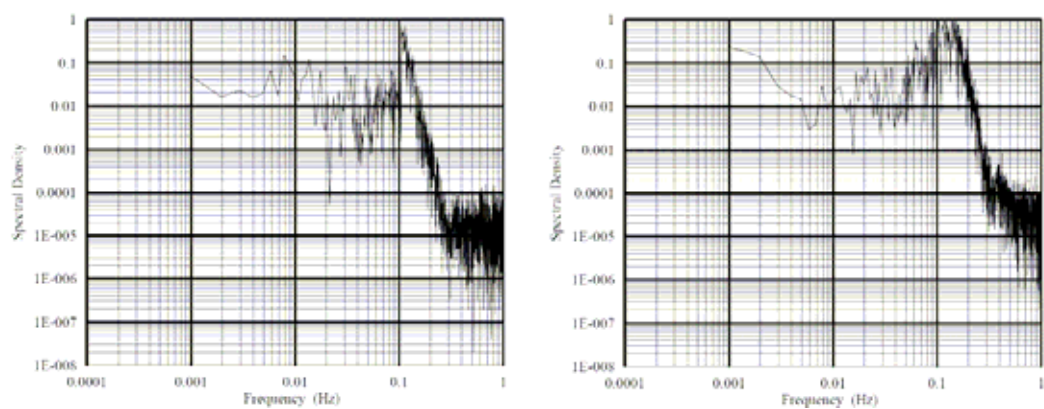


2001/9/22 12 時

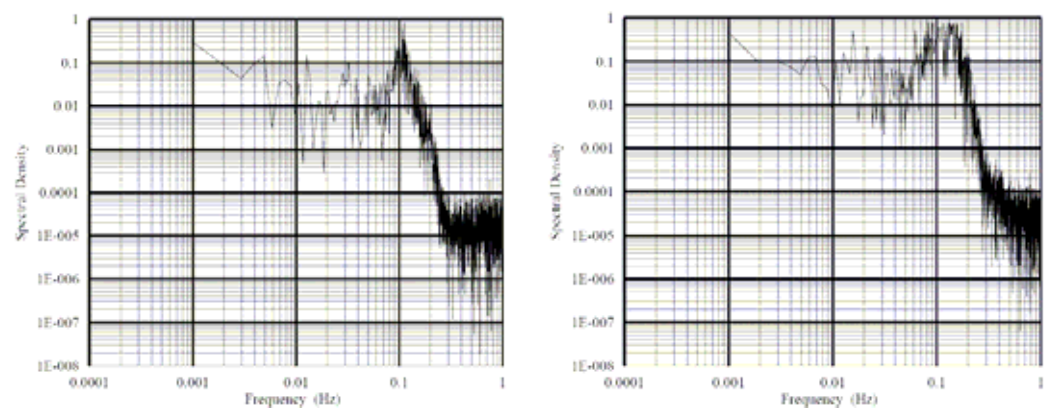
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/22 14 時

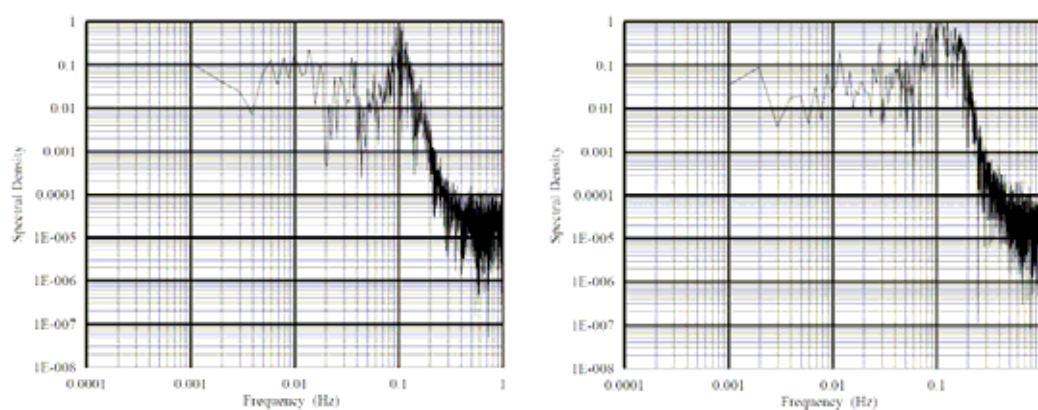


2001/9/22 16 時

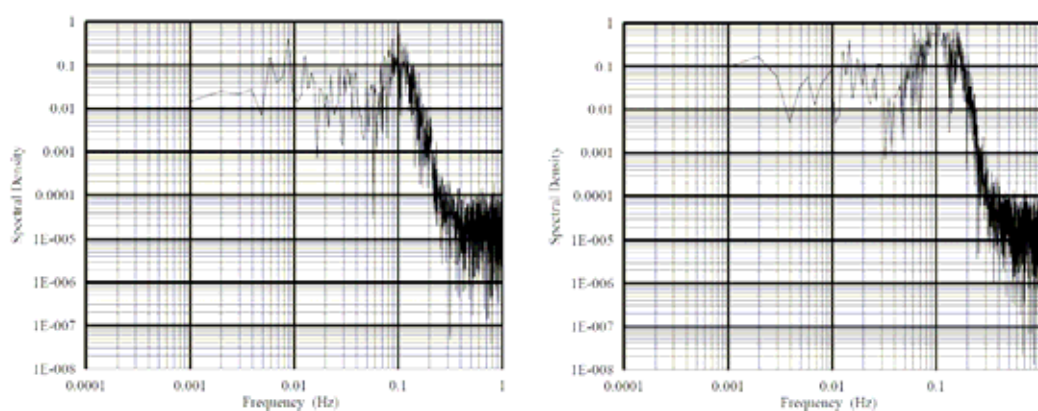


2001/9/22 18 時

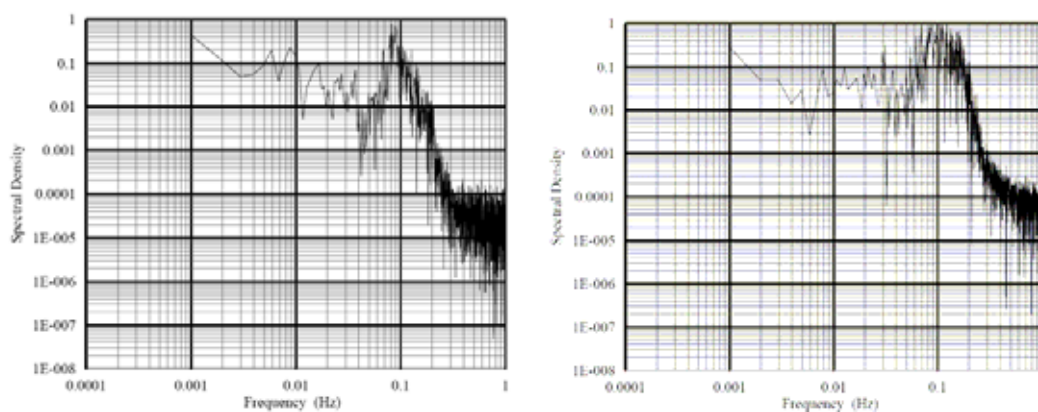
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/22 20 時

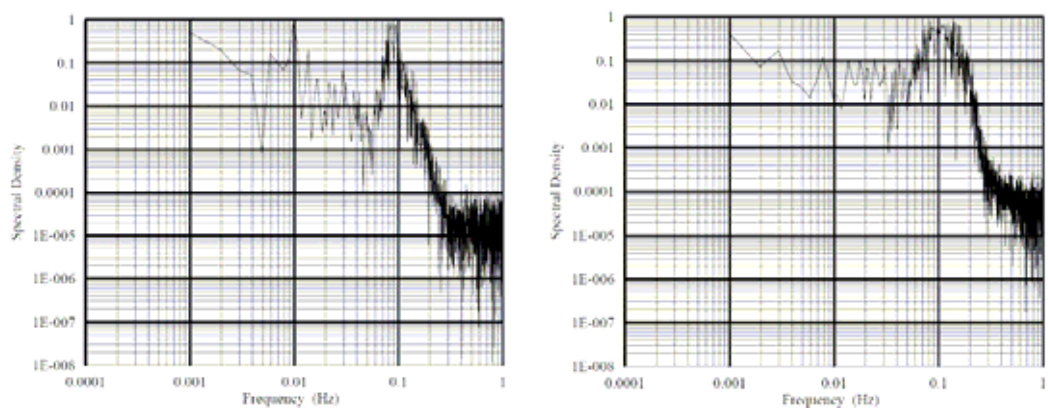


2001/9/22 22 時

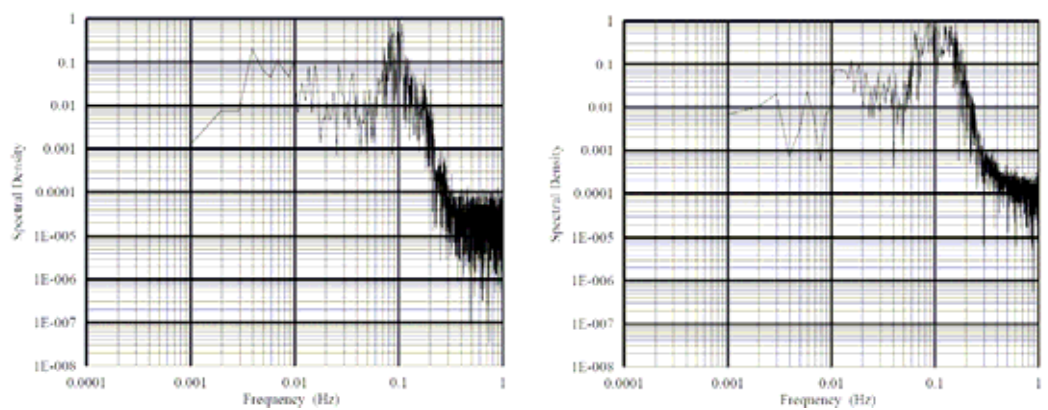


2001/9/23 0 時

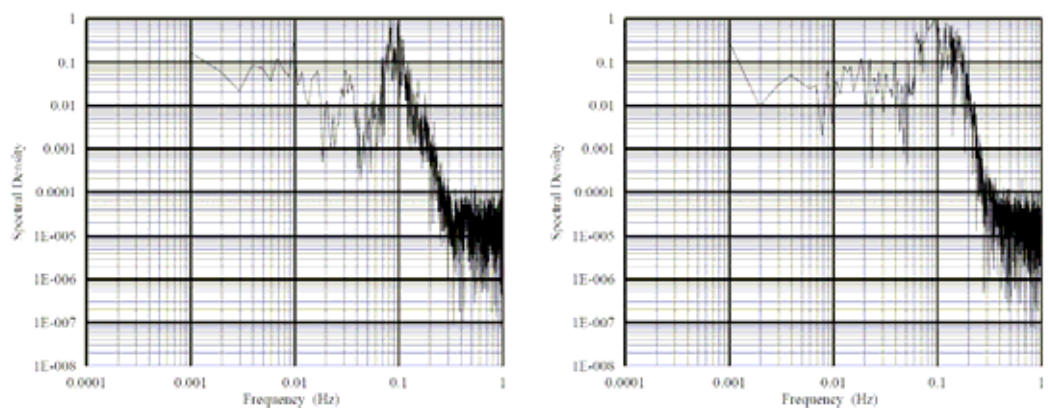
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/23 2 時

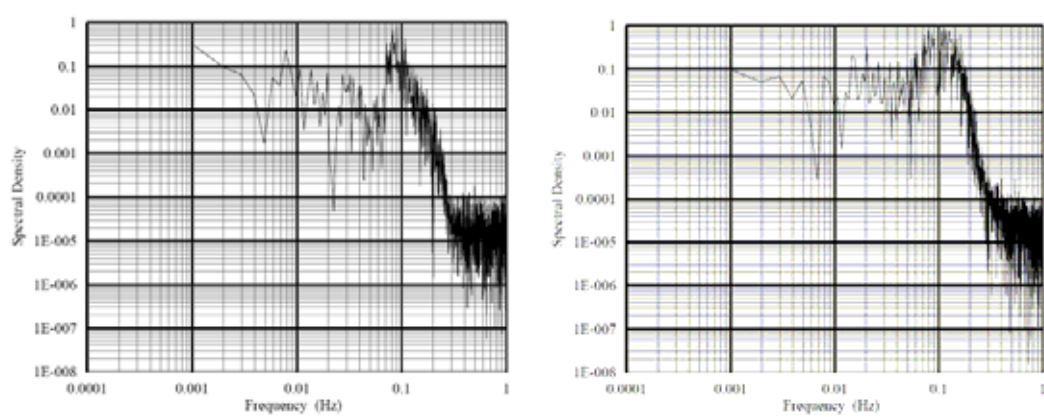


2001/9/23 4 時

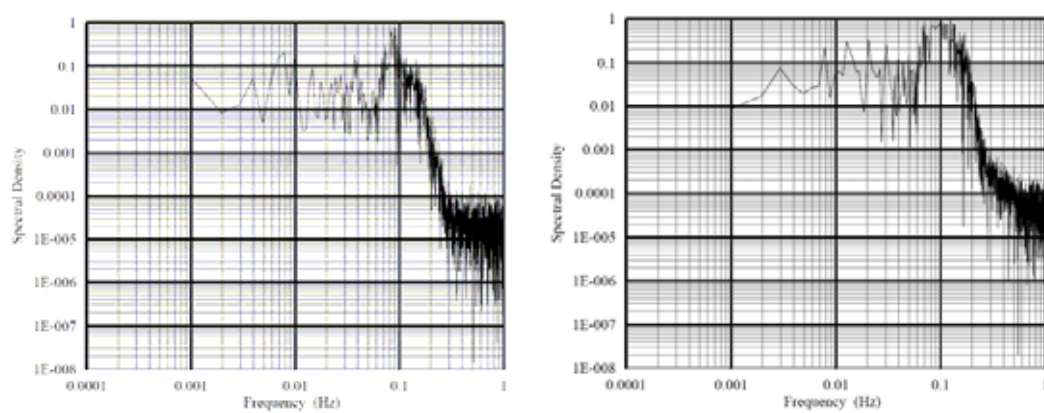


2001/9/23 6 時

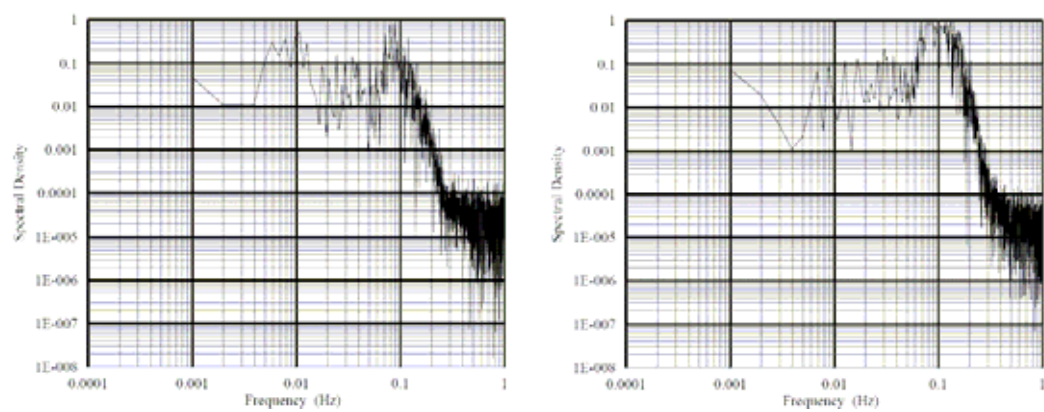
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/23 8 時

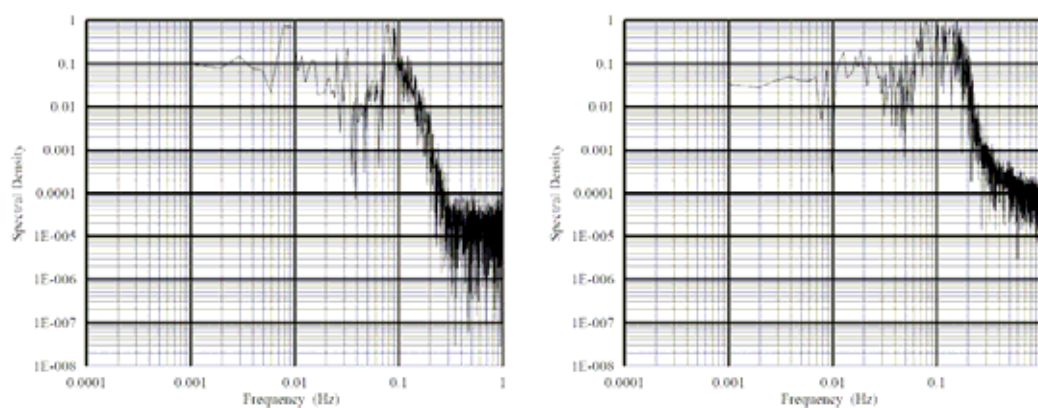


2001/9/23 10 時

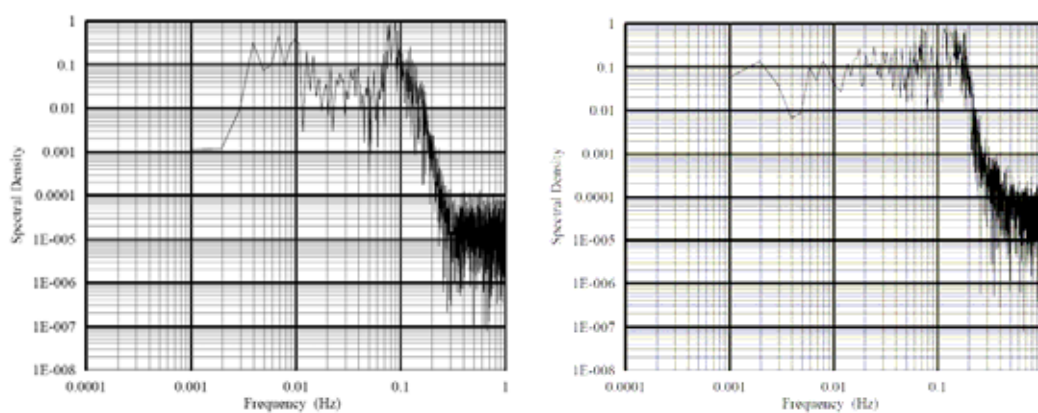


2001/9/23 12 時

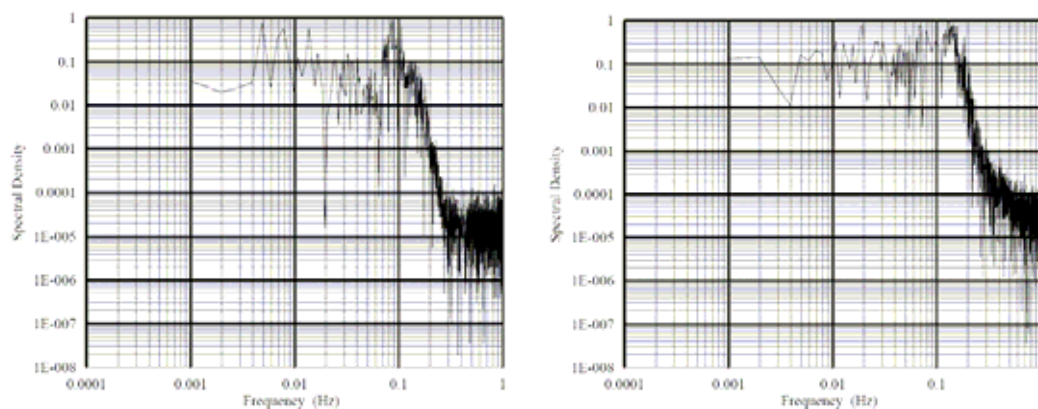
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/23 14 時

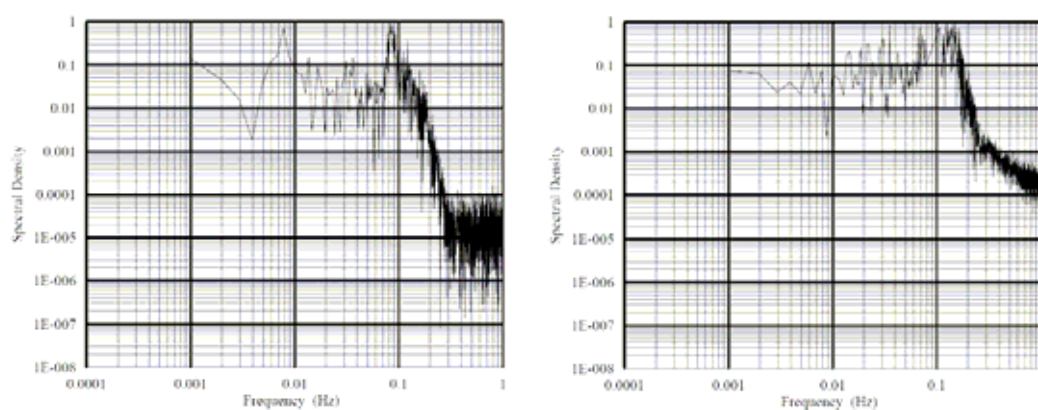


2001/9/23 16 時

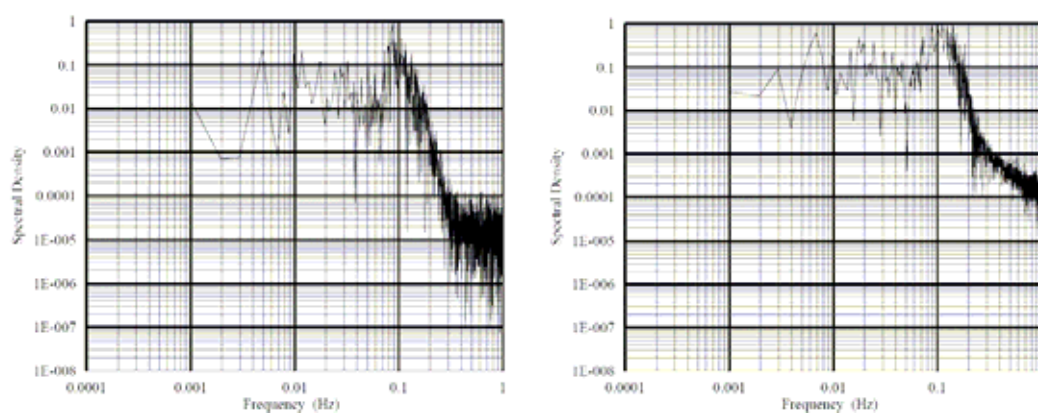


2001/9/23 18 時

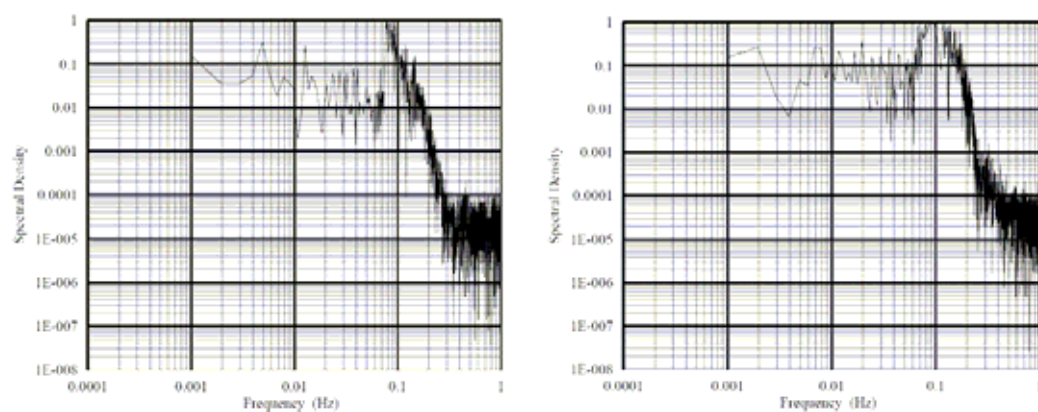
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/23 20 時

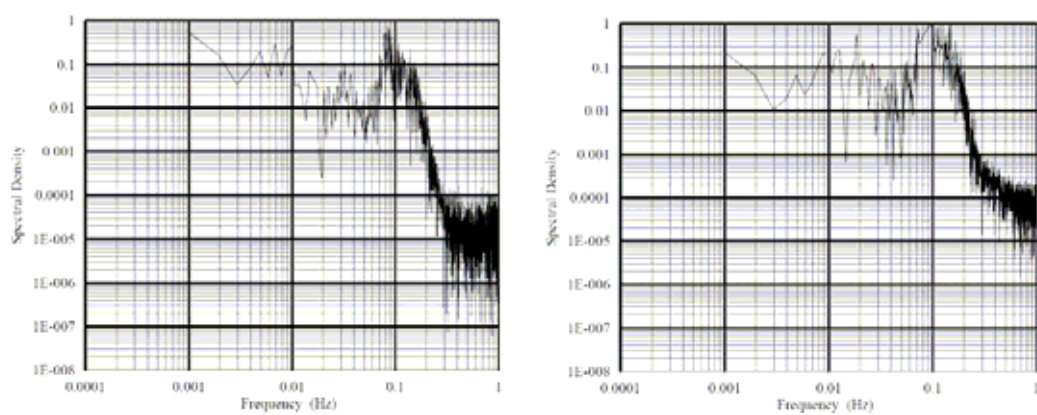


2001/9/23 22 時

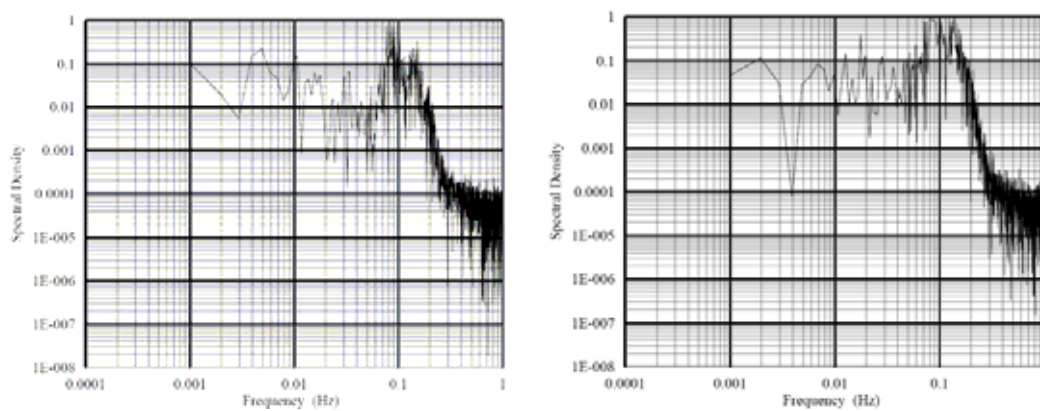


2001/9/24 0 時

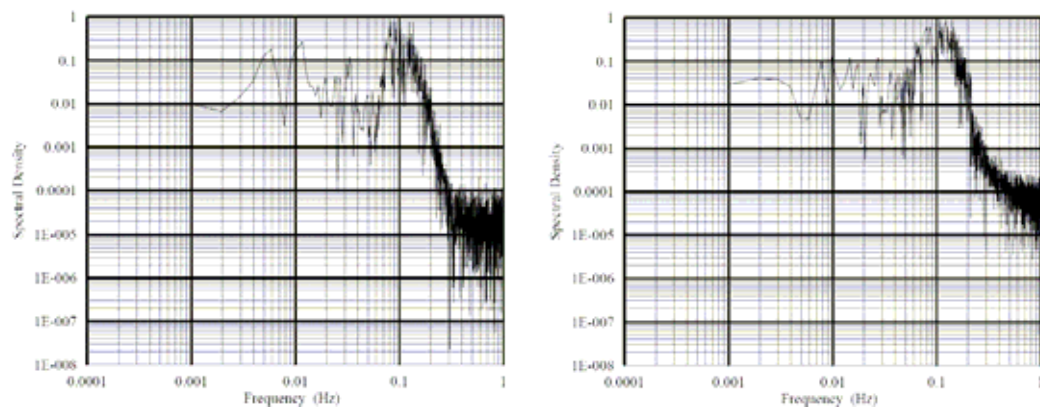
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/24 2 時

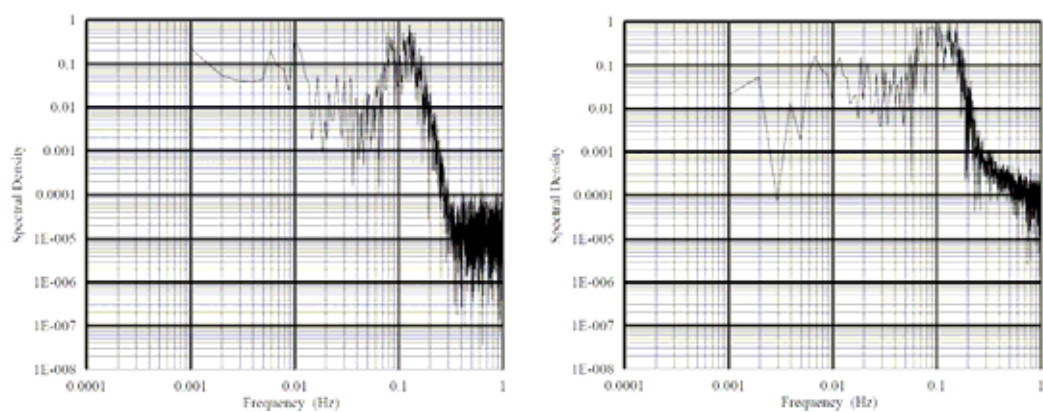


2001/9/24 4 時

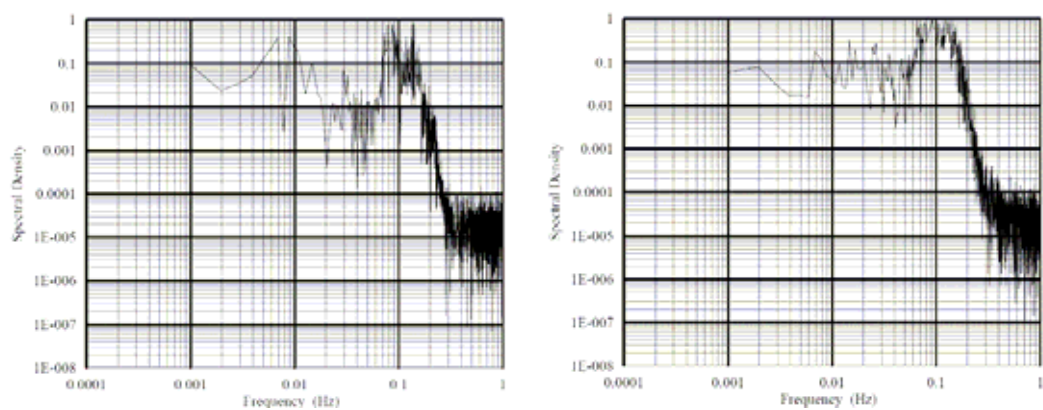


2001/9/24 6 時

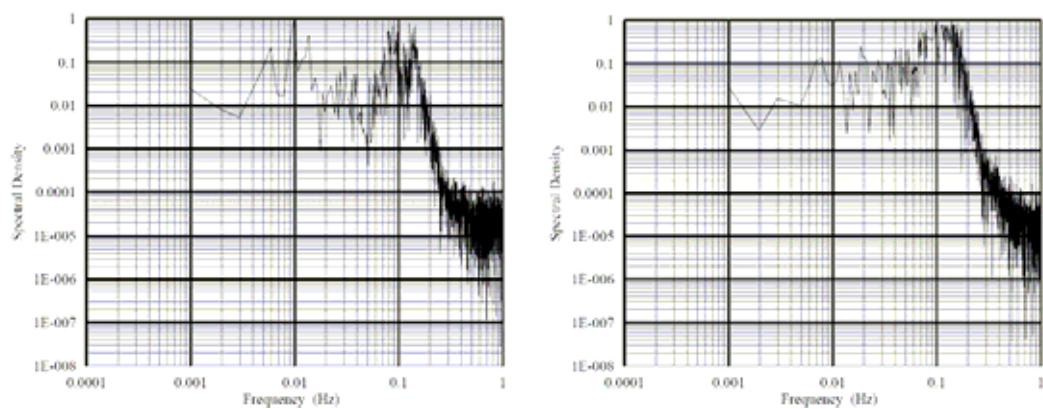
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/24 8 時

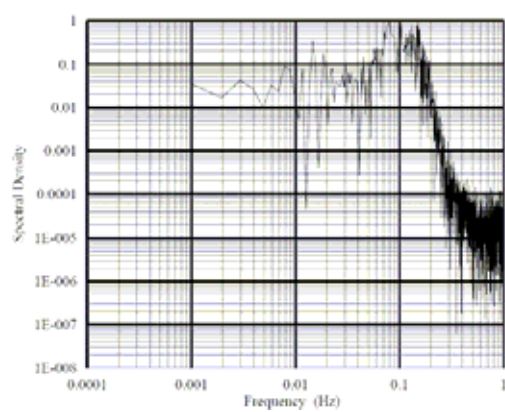
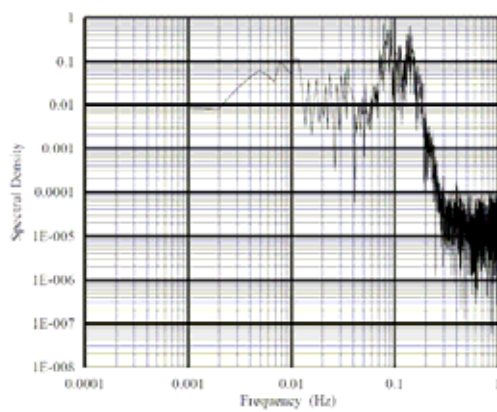


2001/9/24 10 時

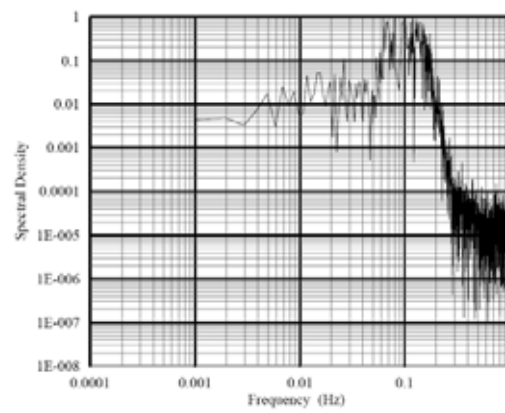
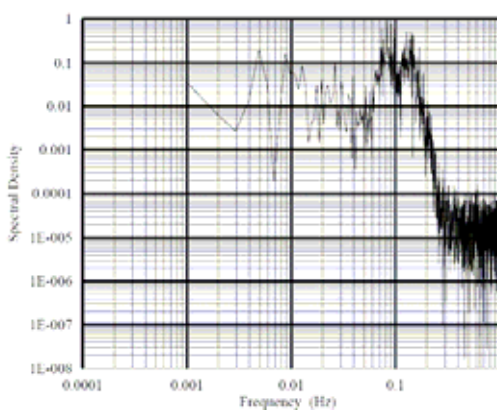


2001/9/24 12 時

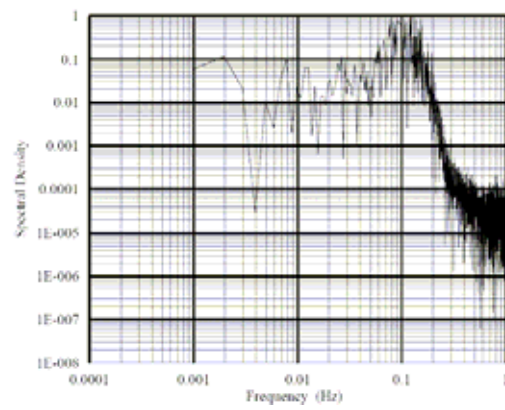
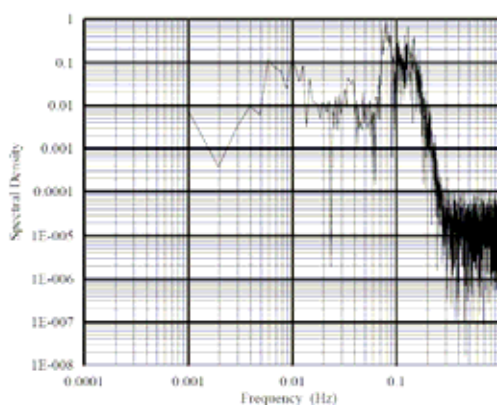
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/24 14 時

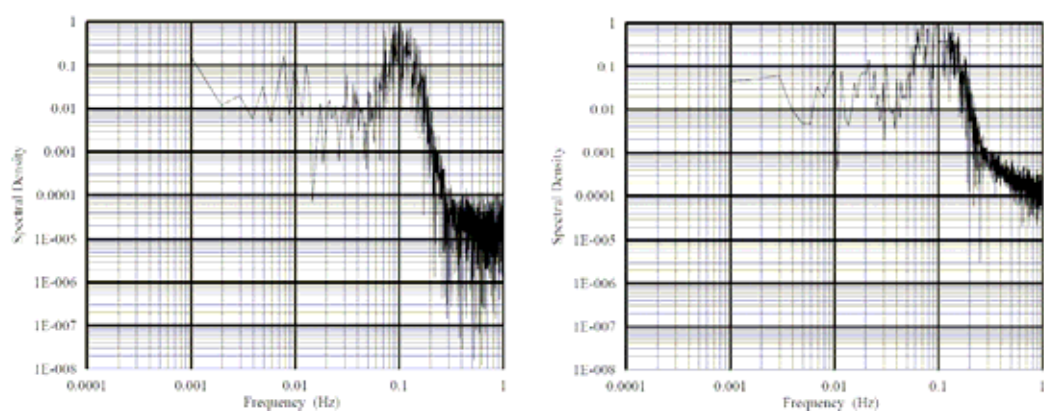


2001/9/24 16 時

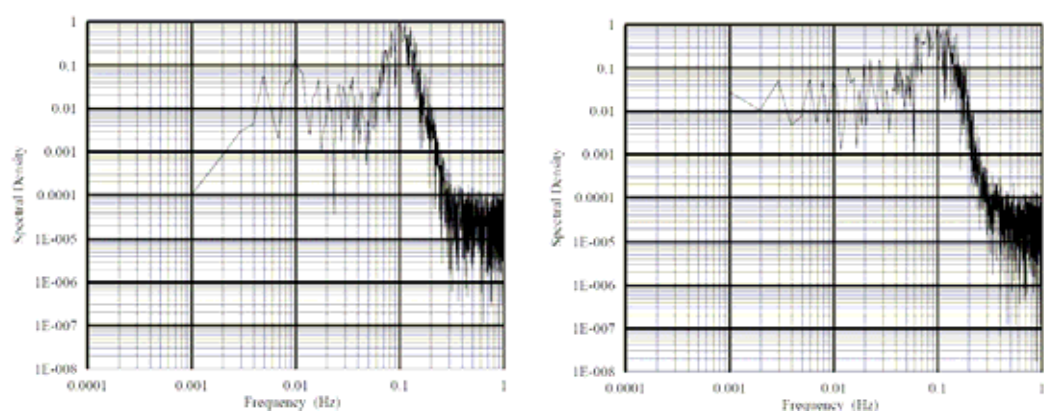


2001/9/24 18 時

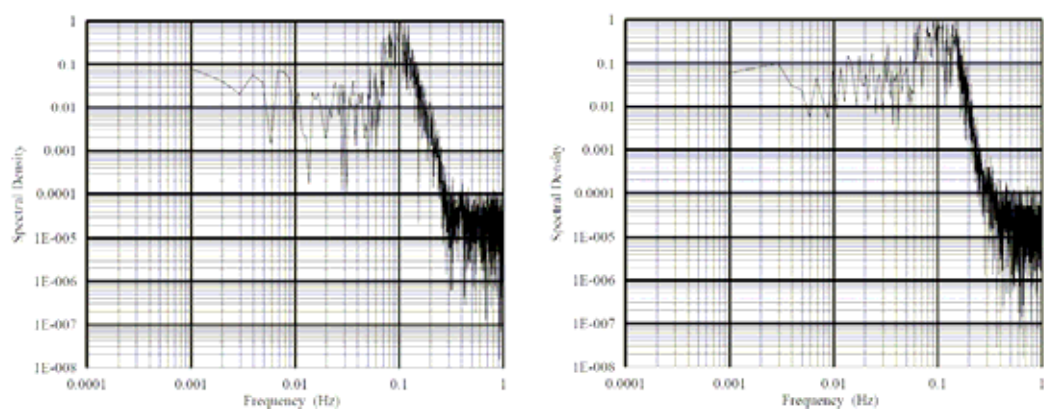
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/24 20 時

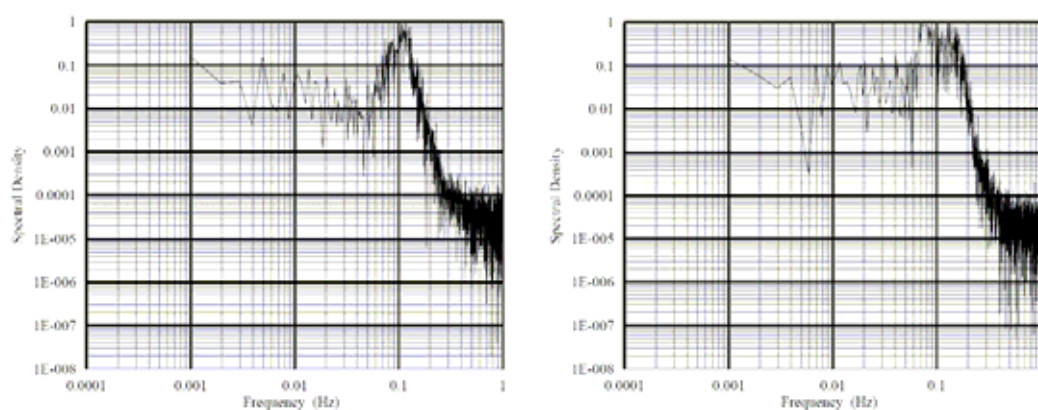


2001/9/24 22 時

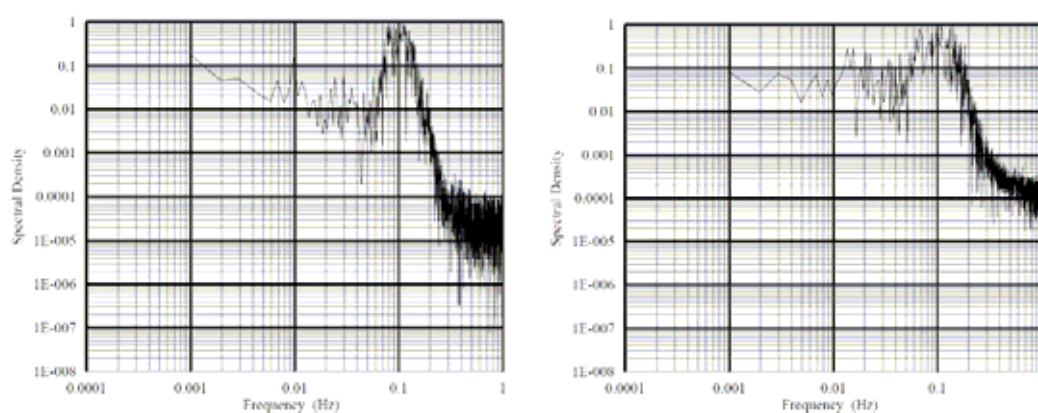


2001/9/25 0 時

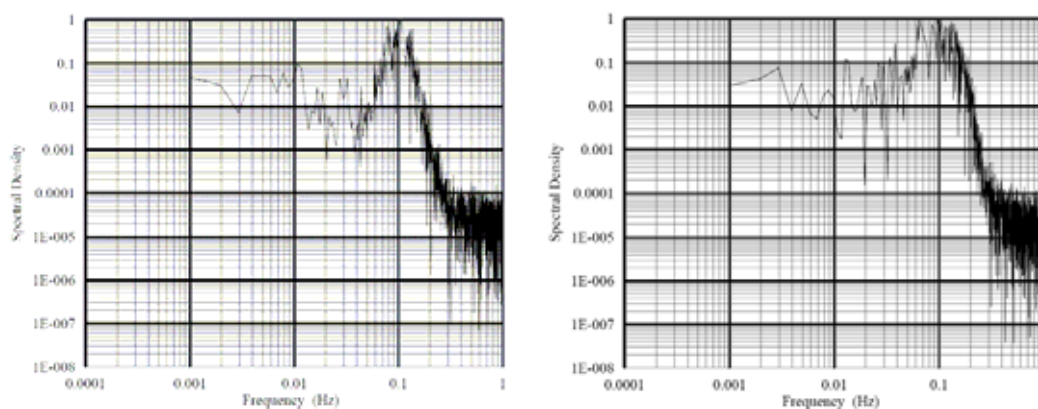
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/25 2 時

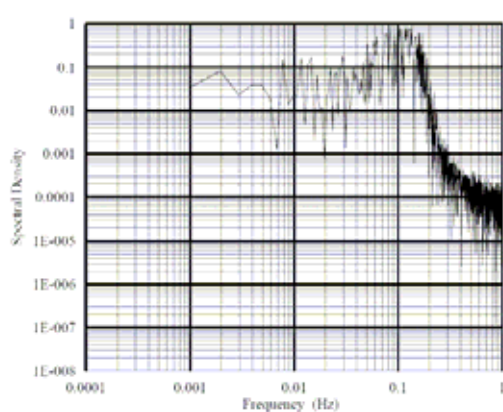
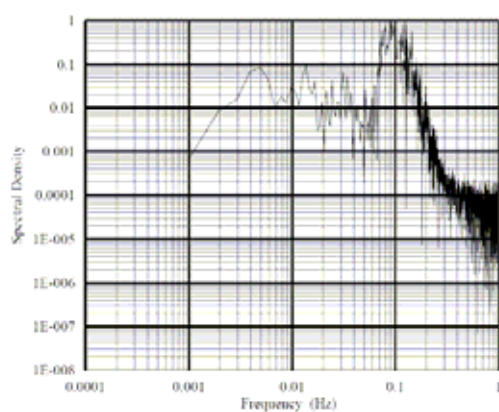


2001/9/25 4 時

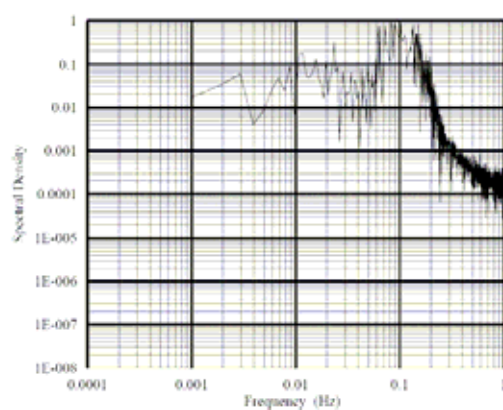
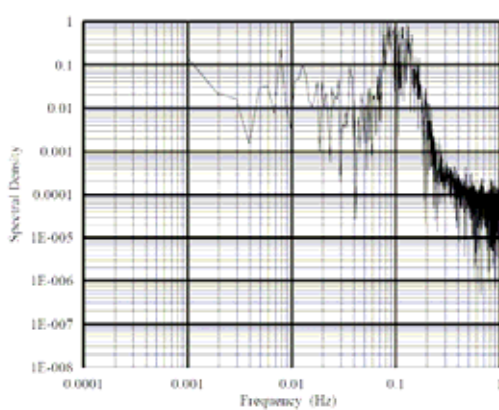


2001/9/25 6 時

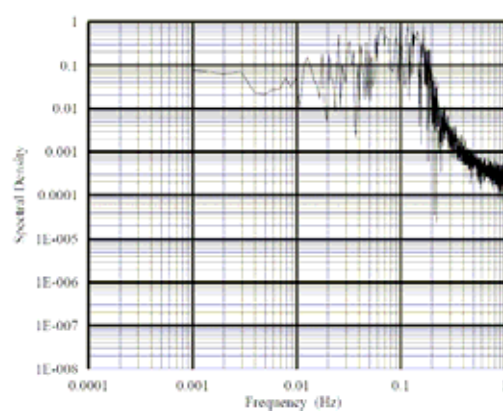
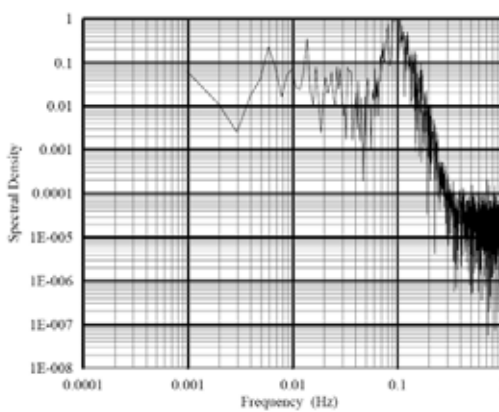
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/25 8 時

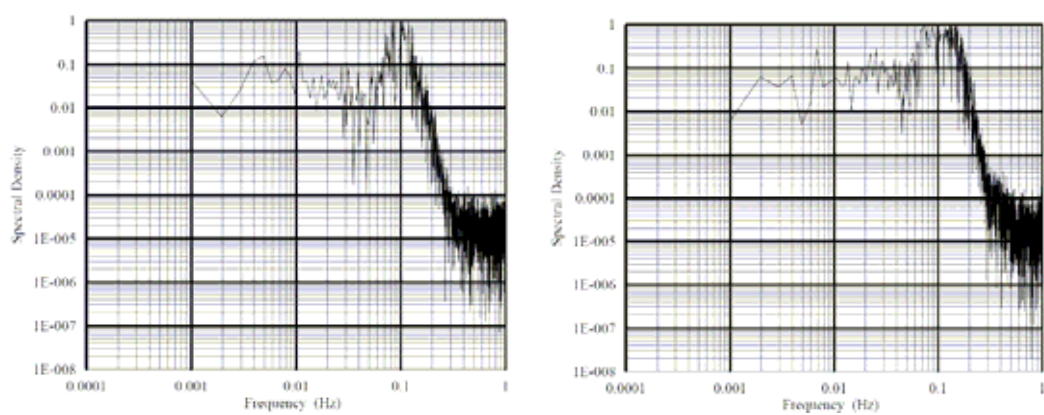


2001/9/25 10 時

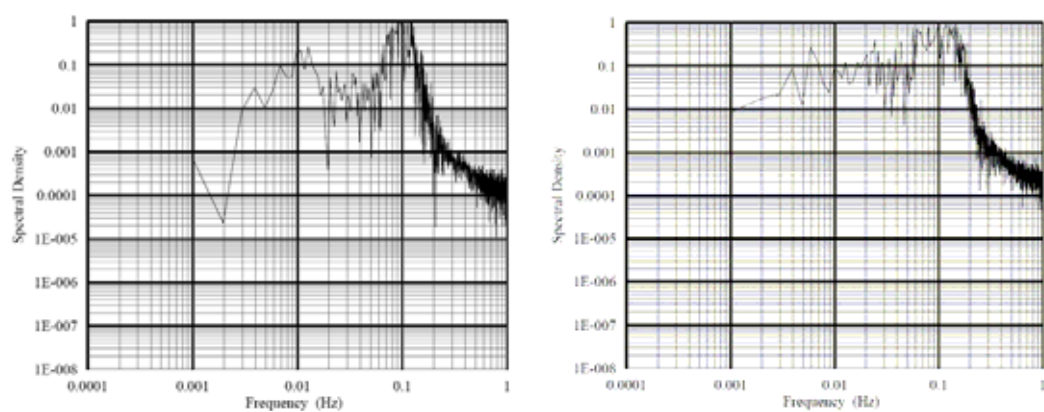


2001/9/25 12 時

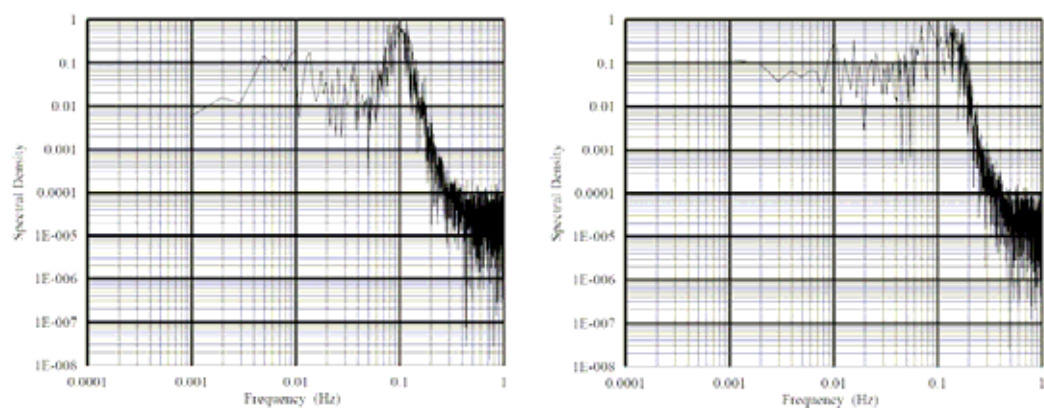
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/25 14 時

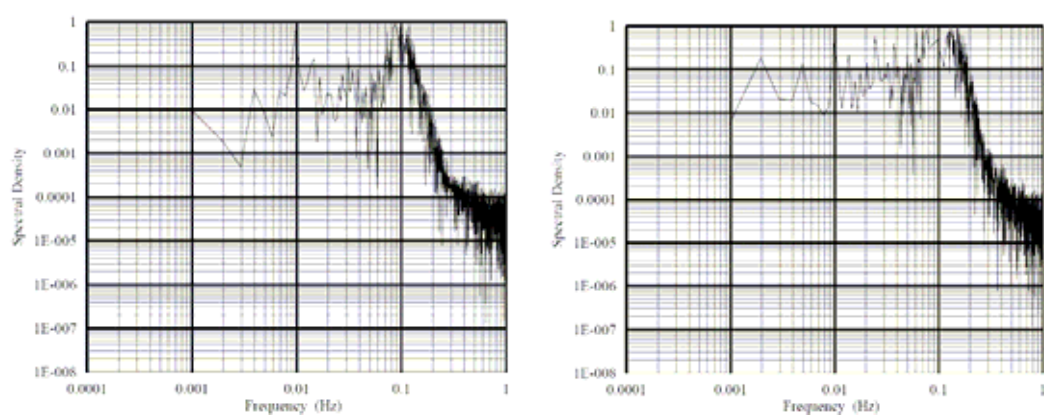


2001/9/25 16 時

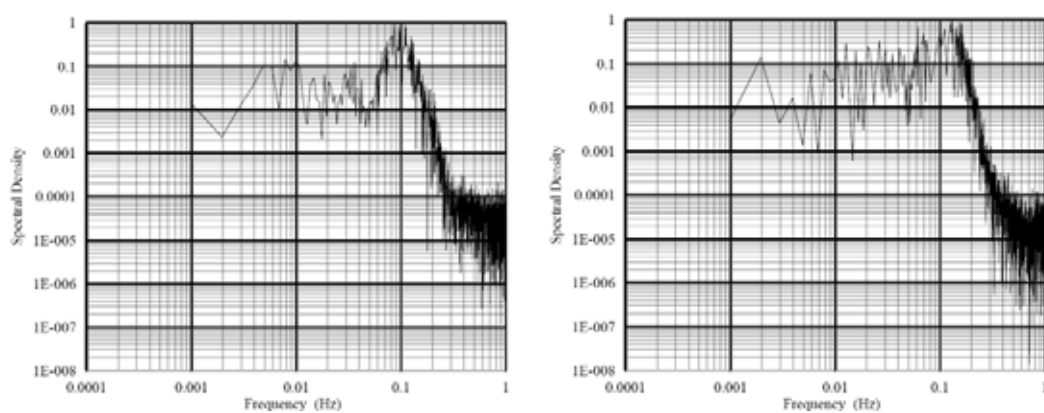


2001/9/25 18 時

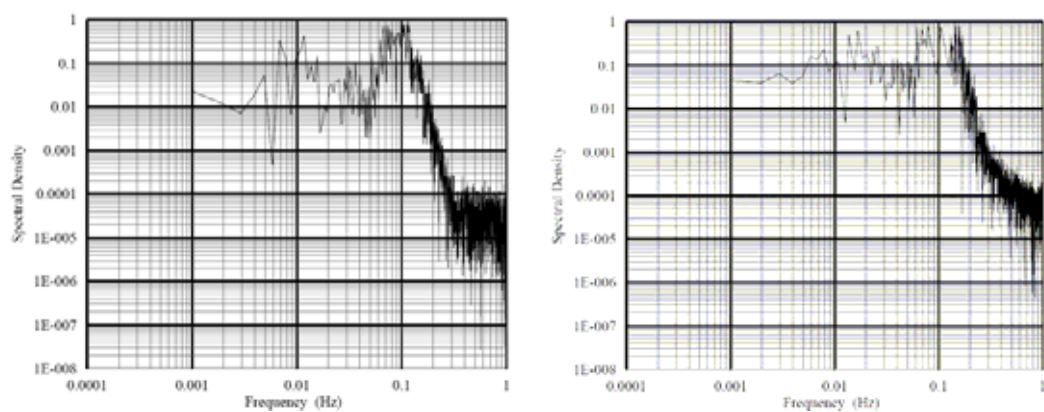
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/25 20 時

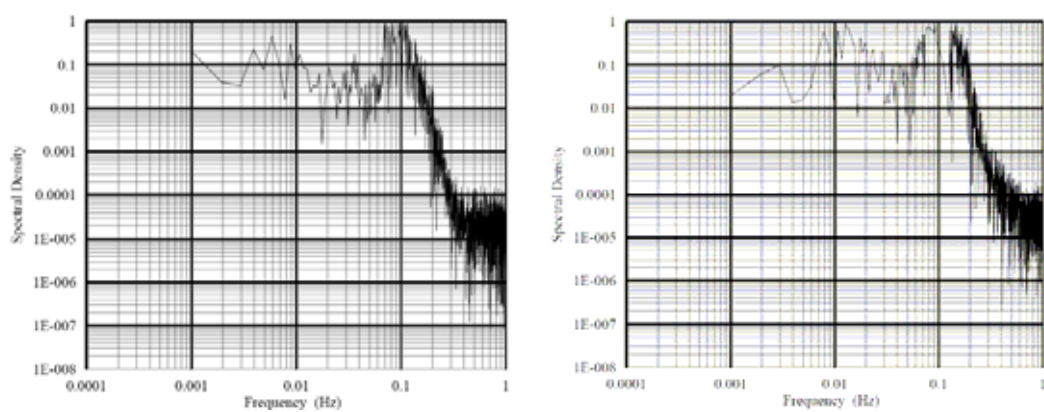


2001/9/25 22 時

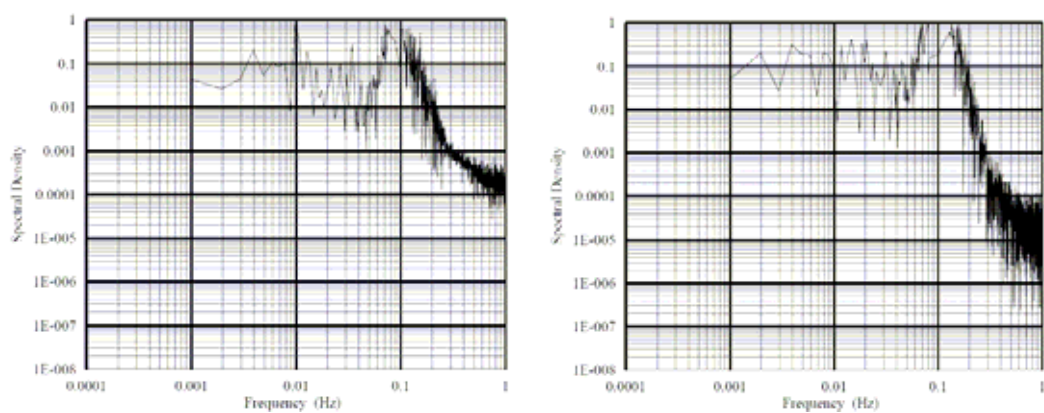


2001/9/26 0 時

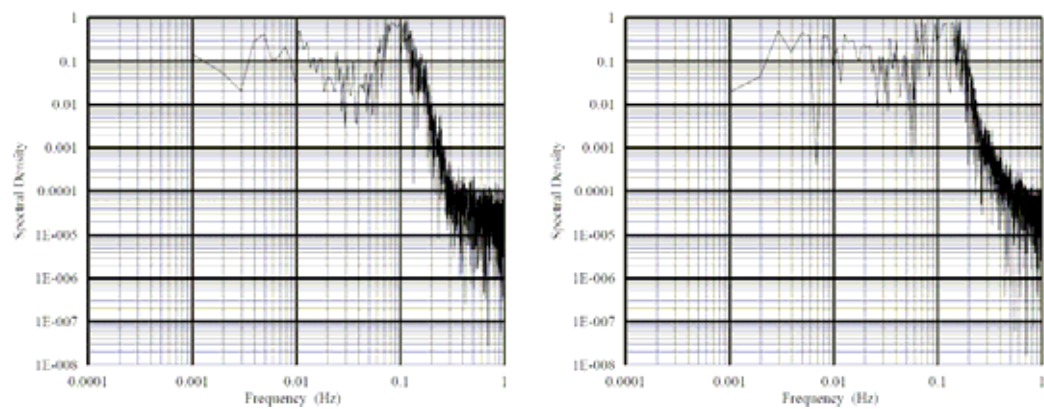
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/26 2 時

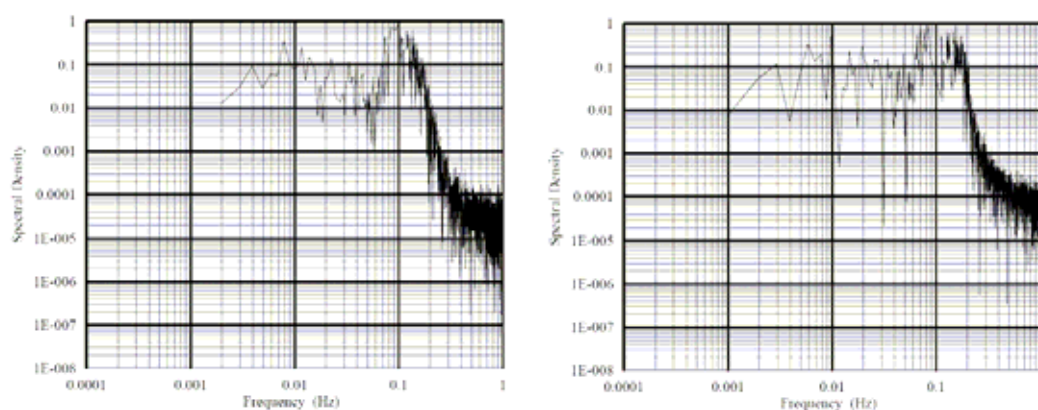


2001/9/26 4 時

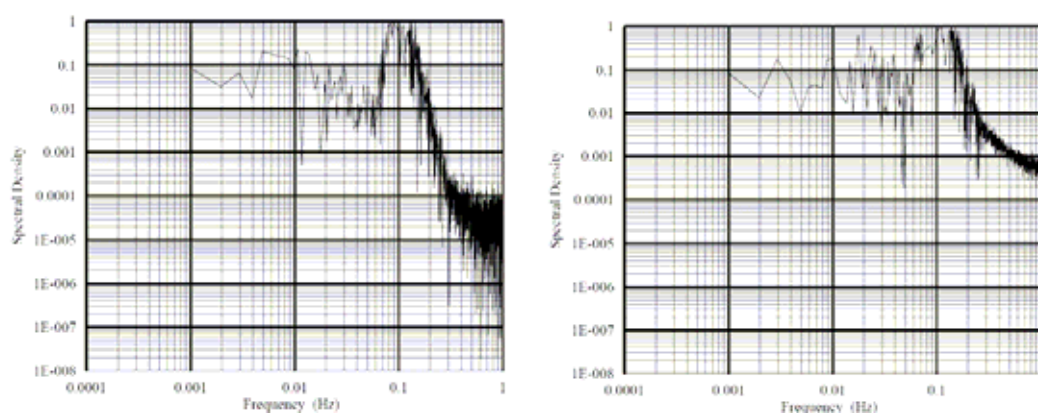


2001/9/26 6 時

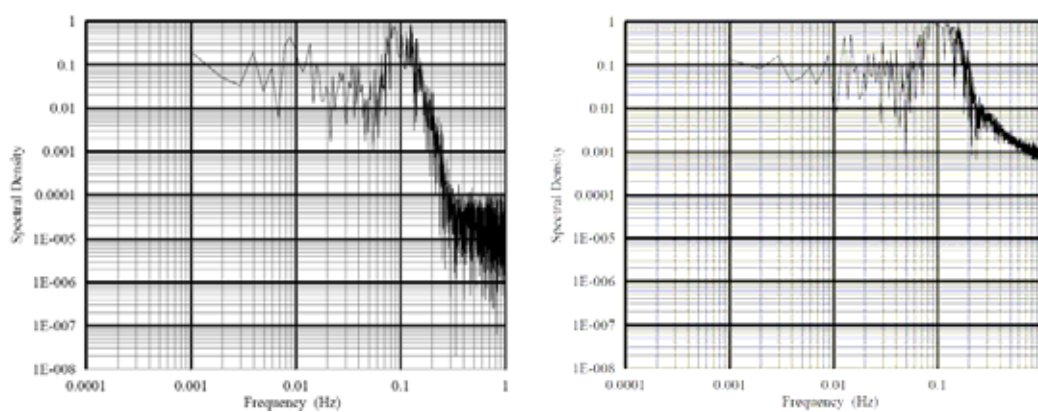
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/26 8 時

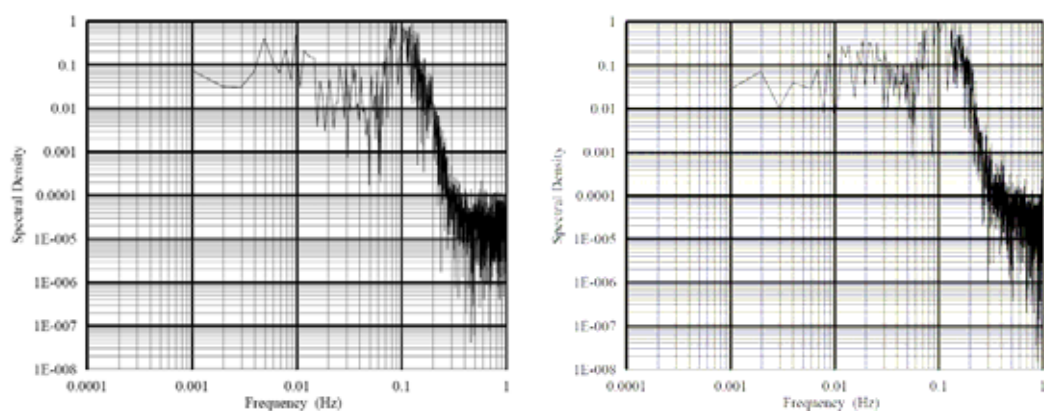


2001/9/26 10 時

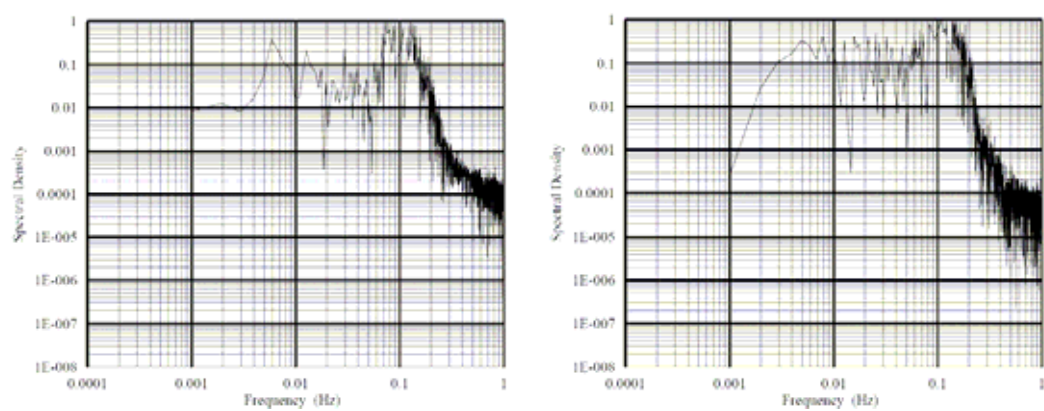


2001/9/26 12 時

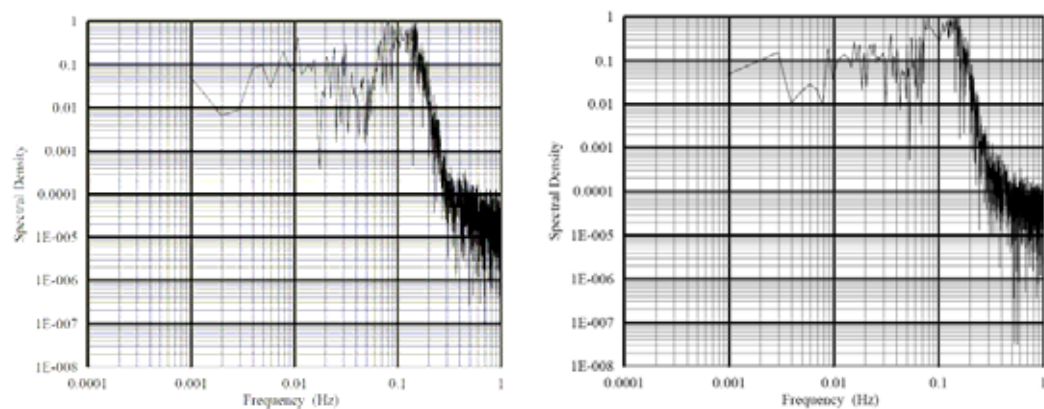
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/26 14 時

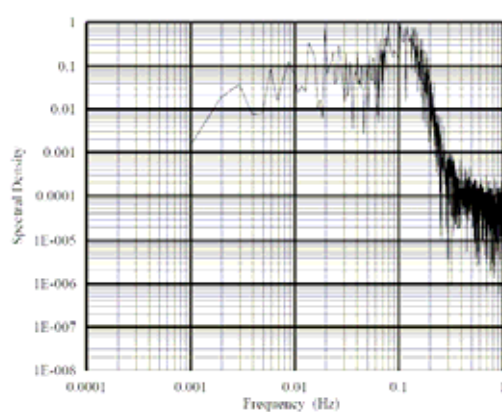
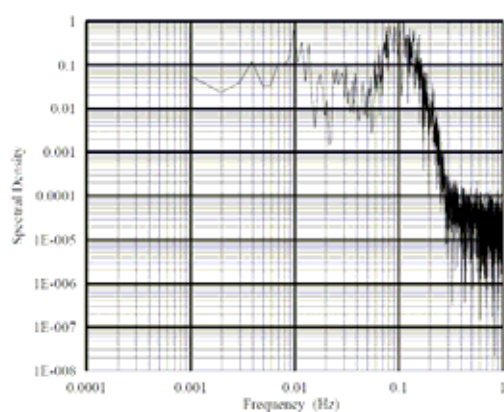


2001/9/26 16 時

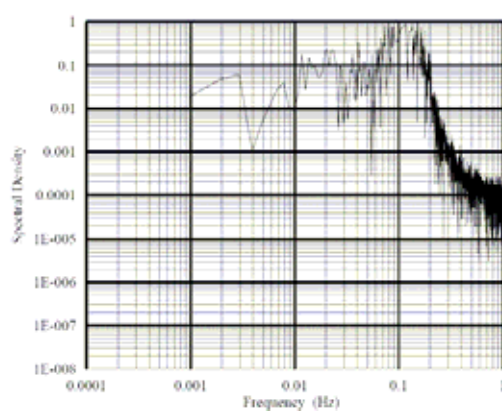
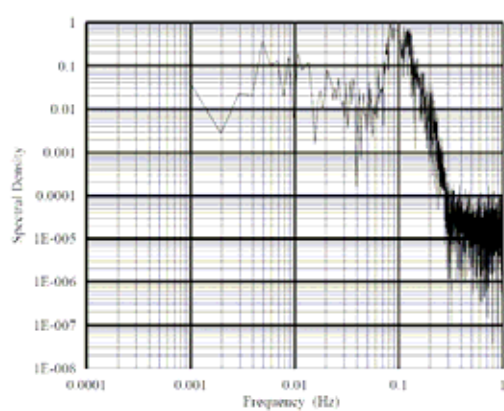


2001/9/26 18 時

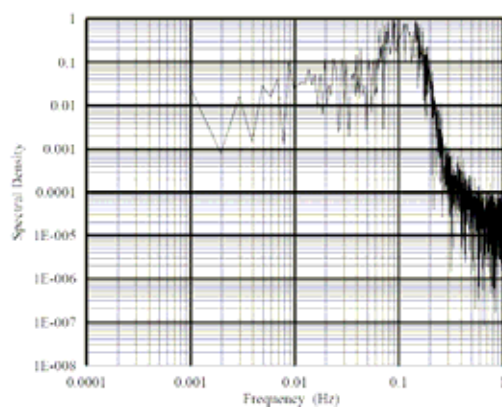
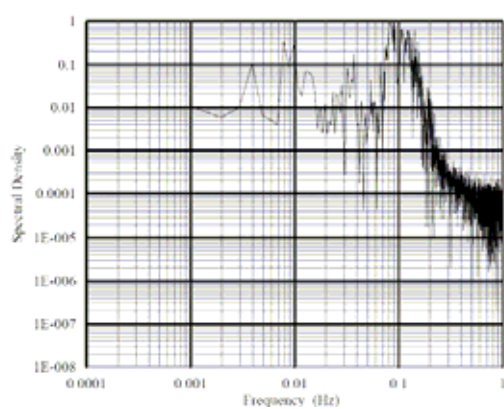
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/26 20 時

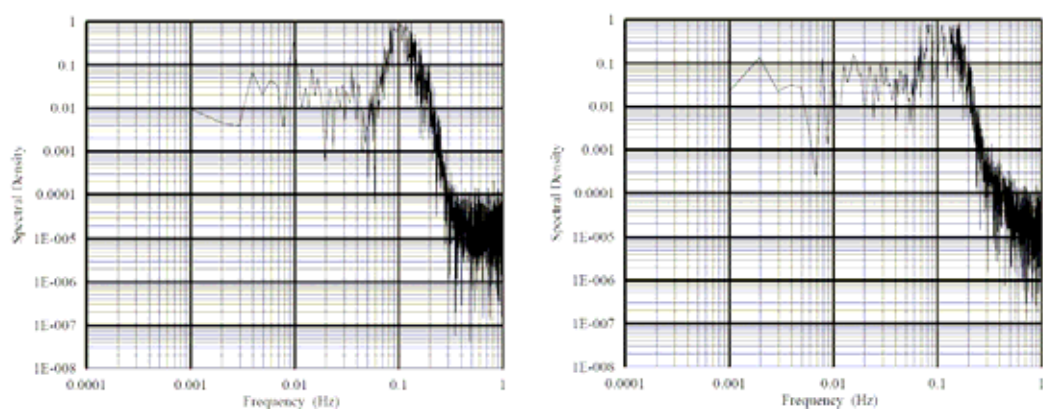


2001/9/26 22 時

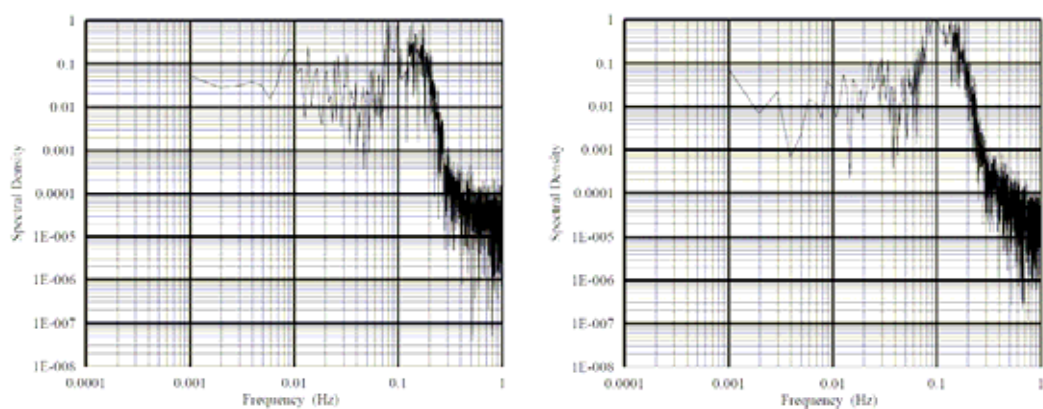


2001/9/27 0 時

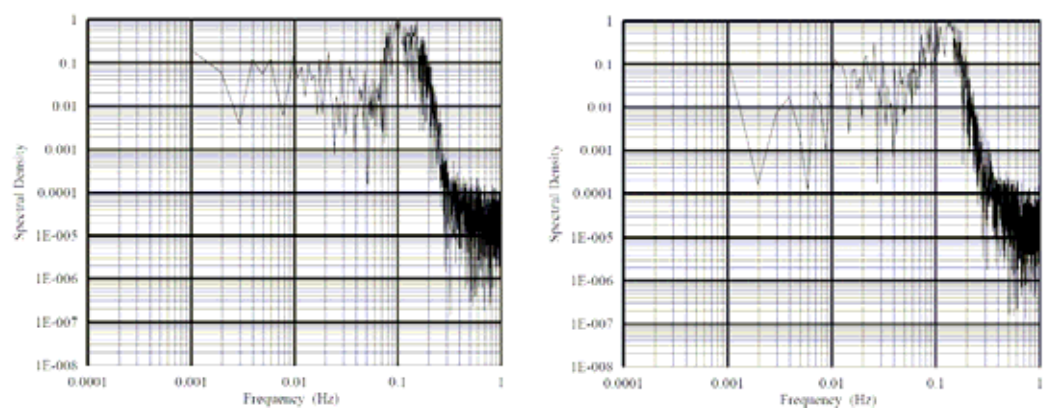
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/27 2 時

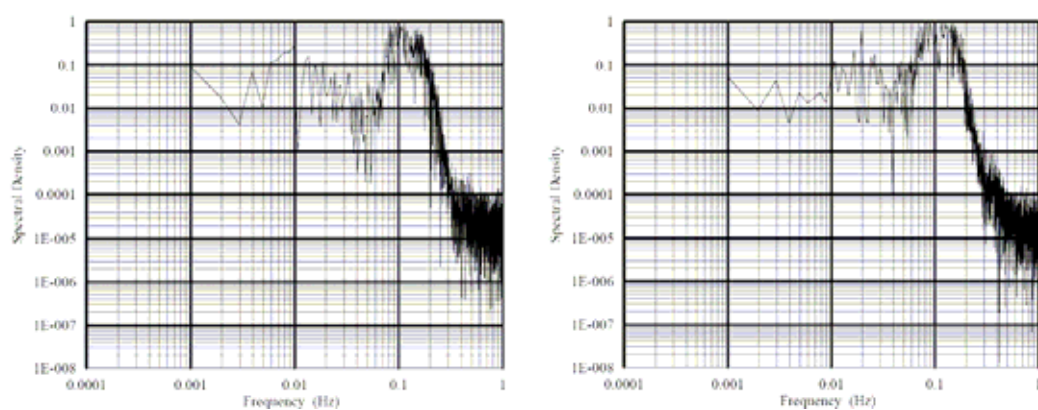


2001/9/27 4 時

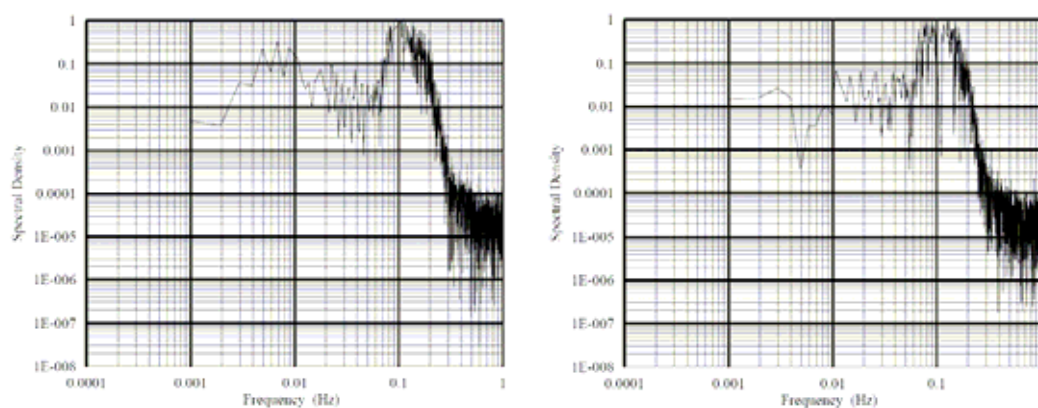


2001/9/27 6 時

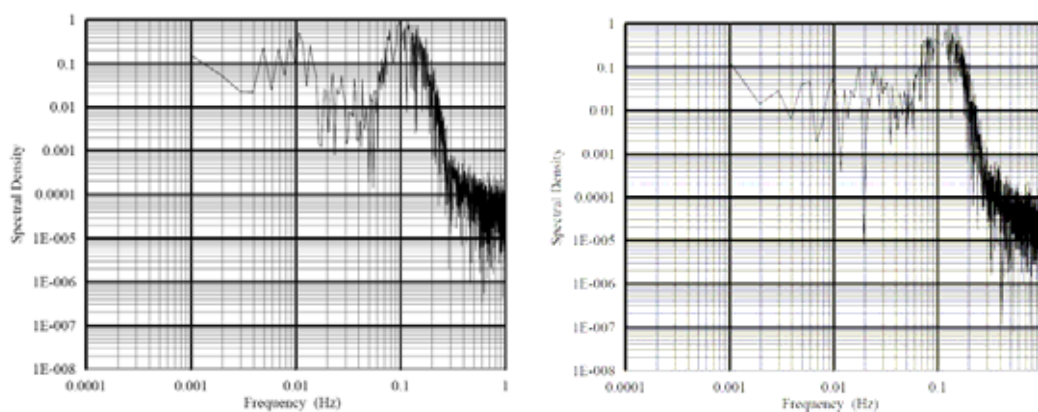
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/27 8 時

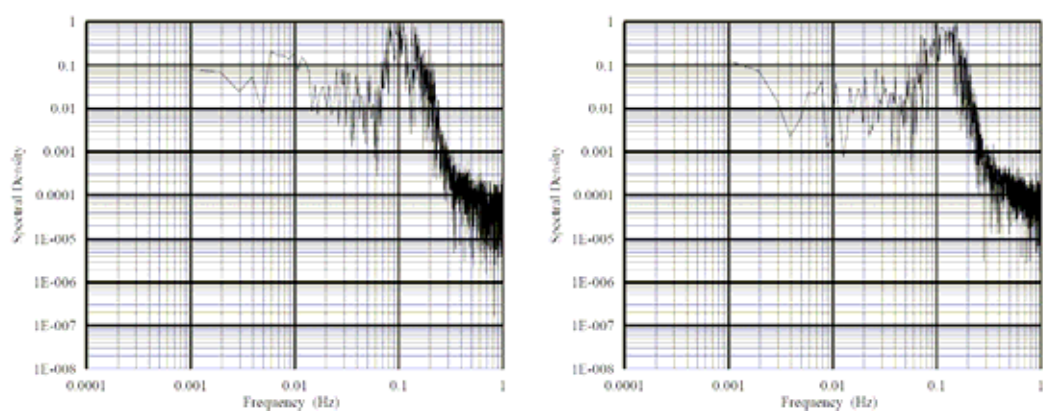


2001/9/27 10 時

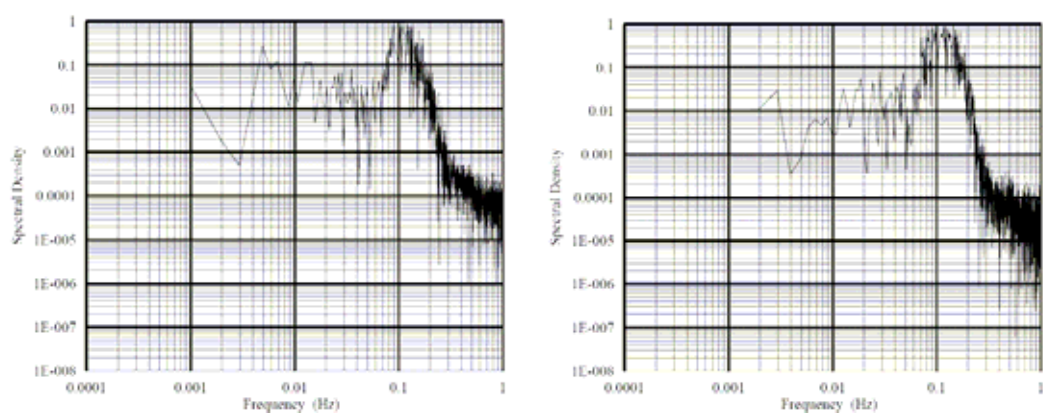


2001/9/27 12 時

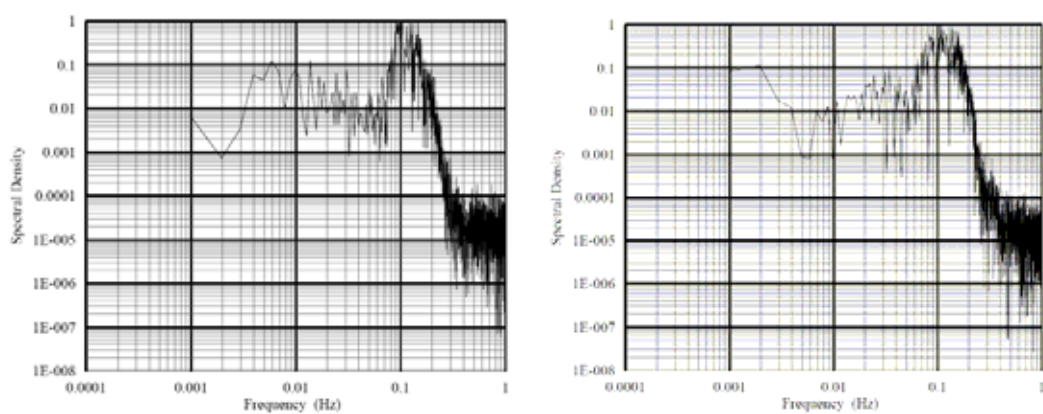
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/27 14 時

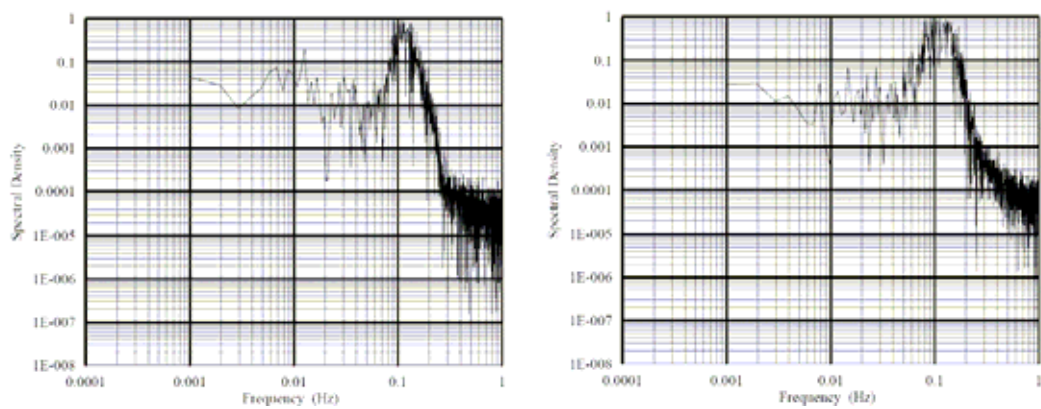


2001/9/27 16 時

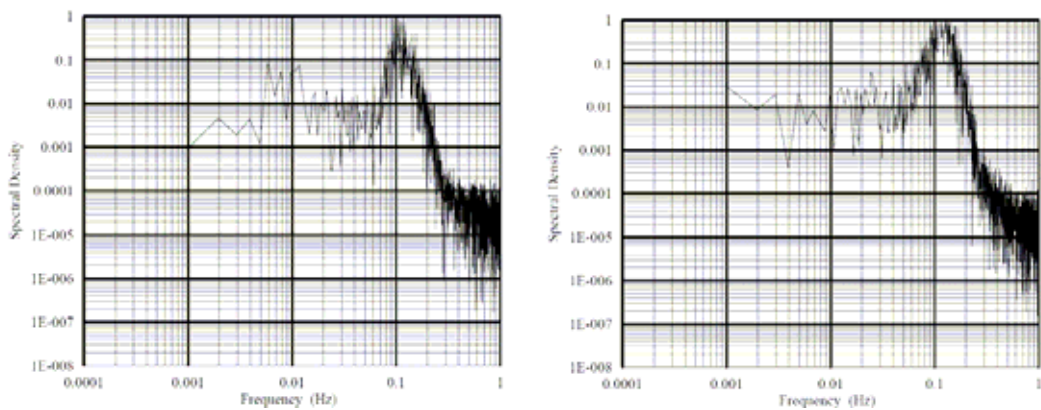


2001/9/27 18 時

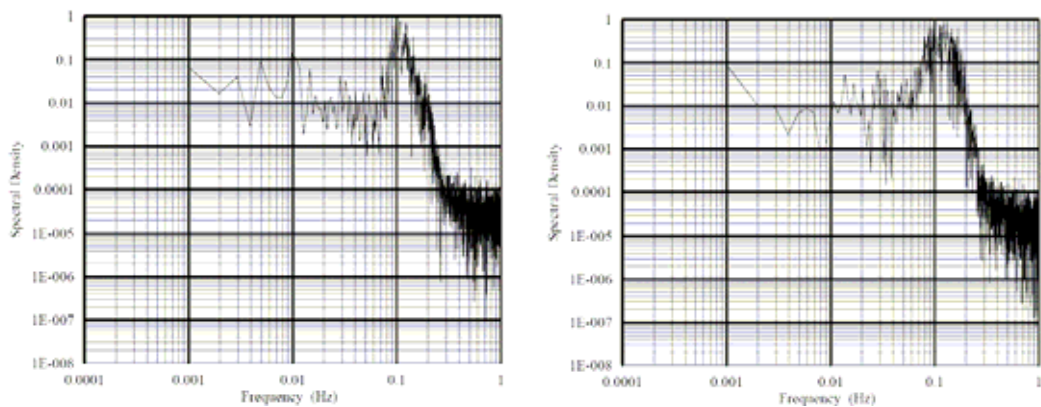
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/27 20 時

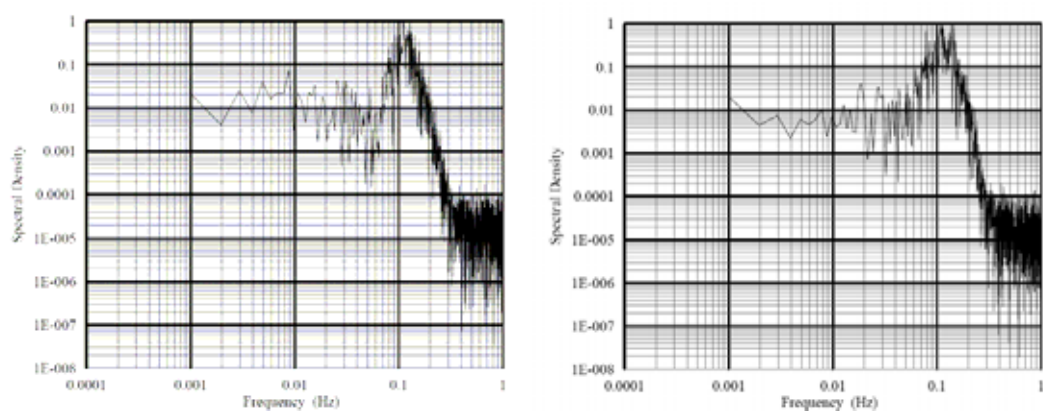


2001/9/27 22 時

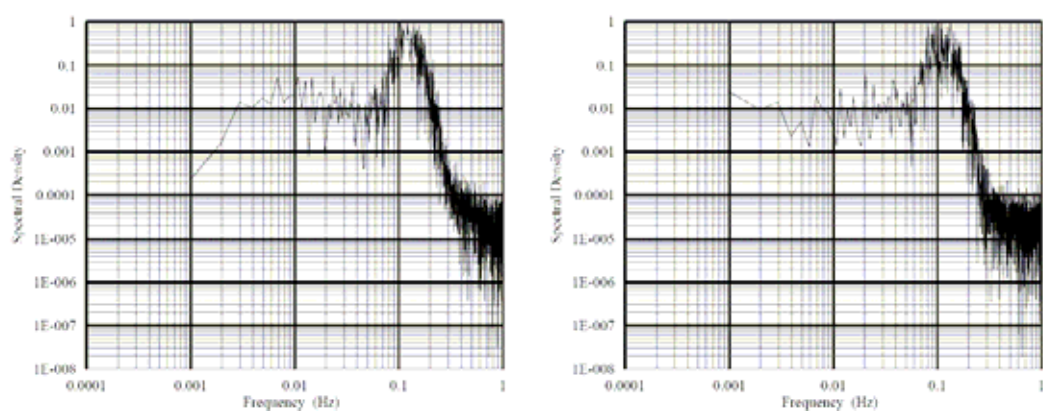


2001/9/28 0 時

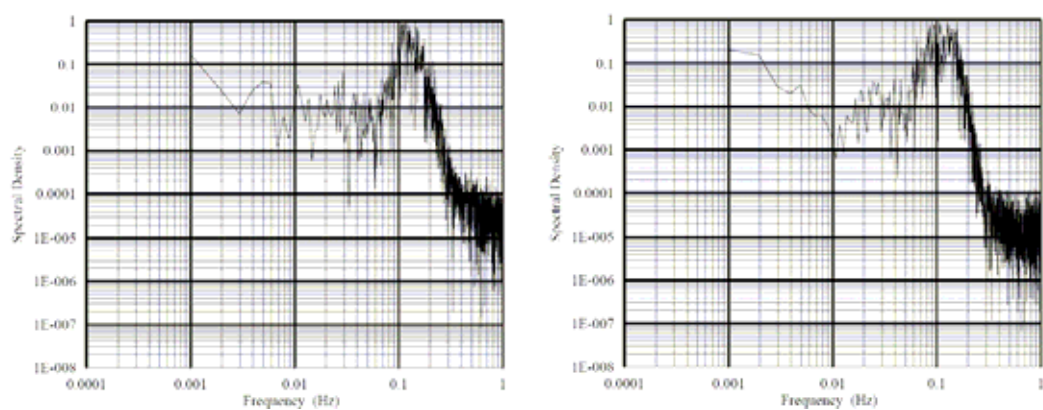
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/28 2 時

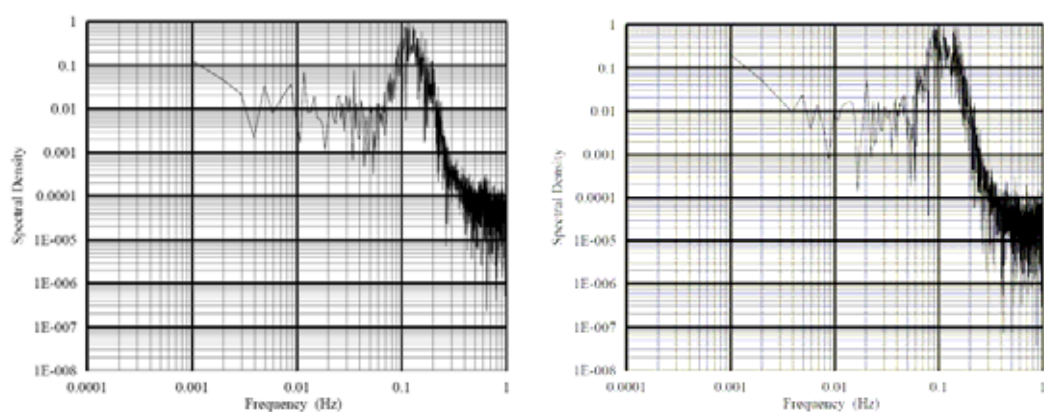


2001/9/28 4 時

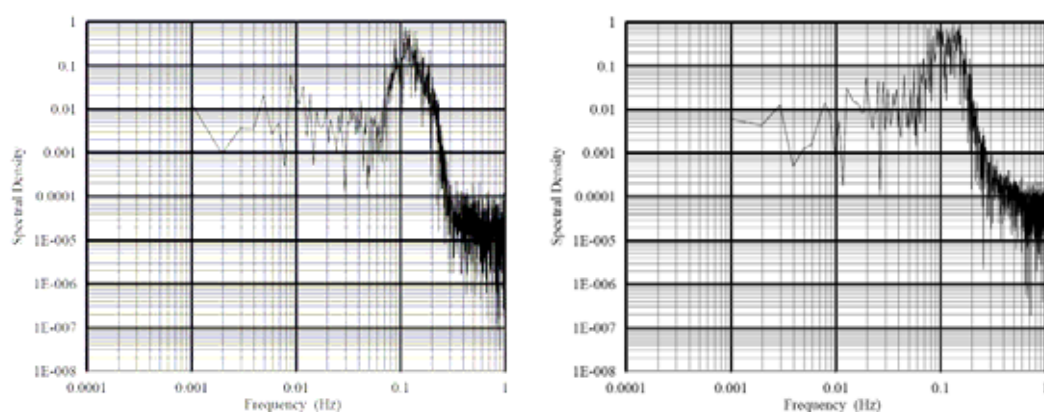


2001/9/28 6 時

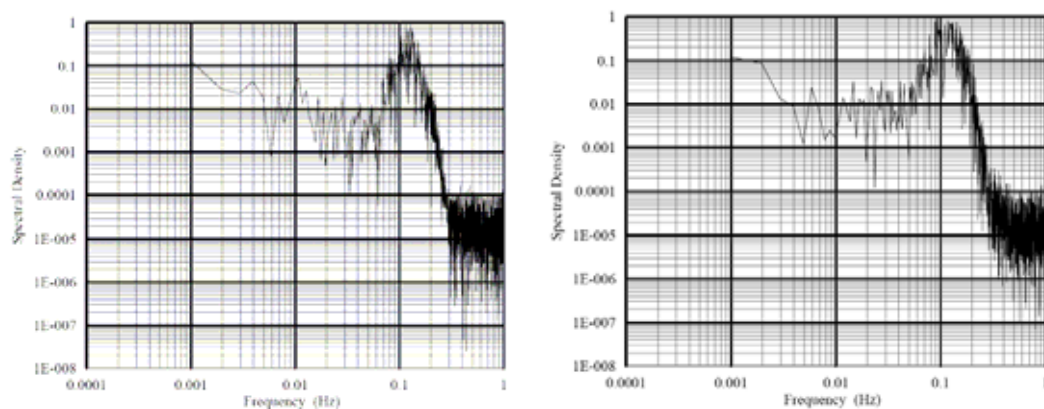
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/28 8 時

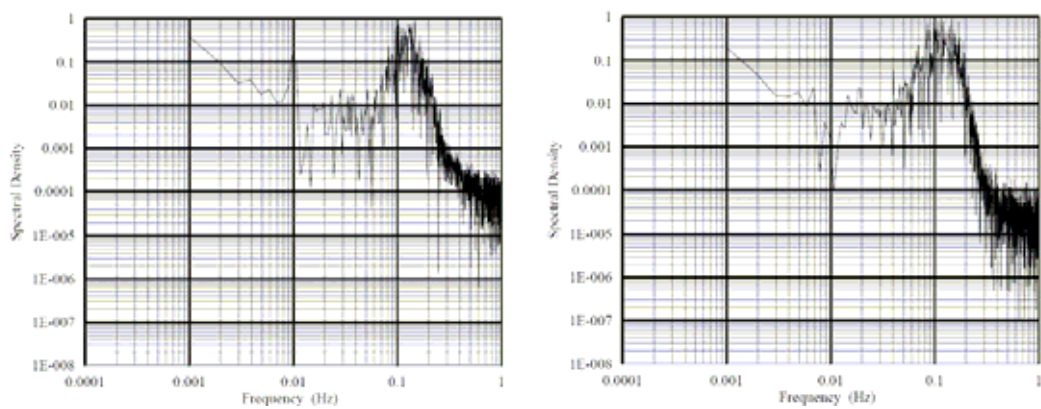


2001/9/28 10 時

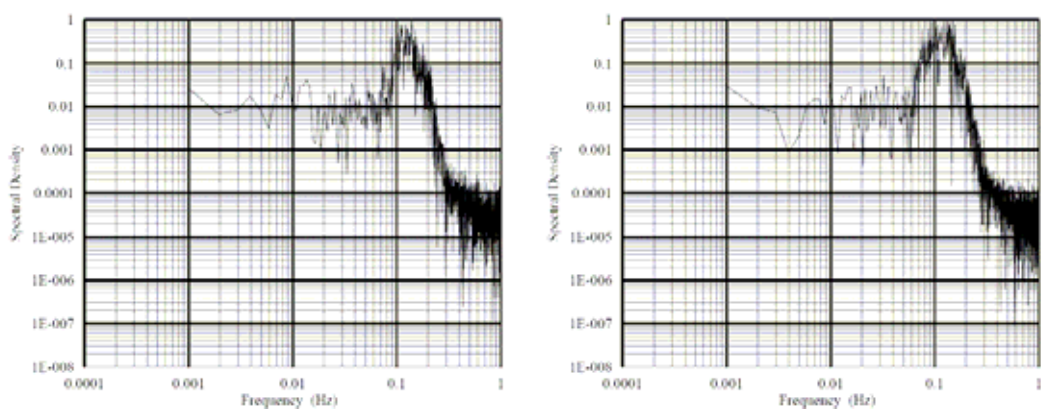


2001/9/28 12 時

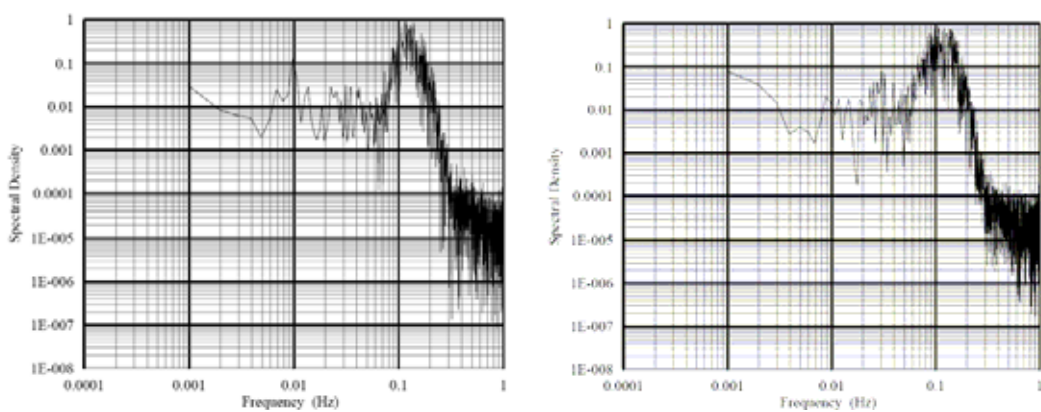
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/28 14 時

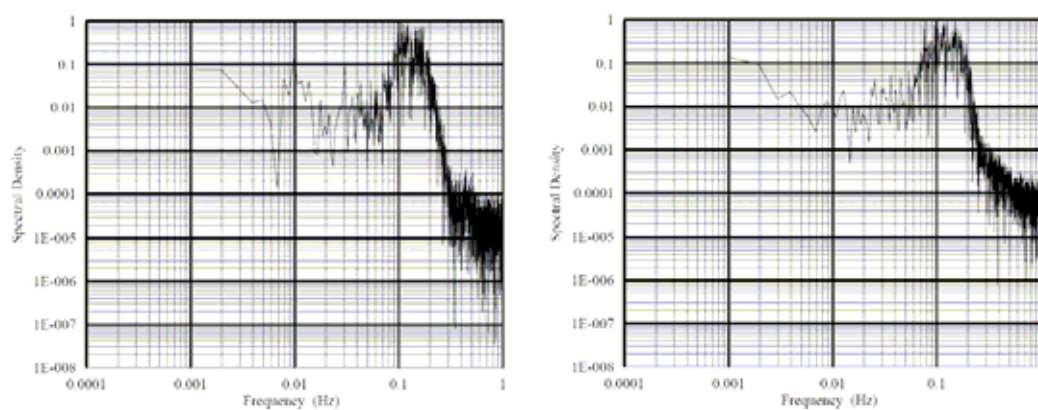


2001/9/28 16 時

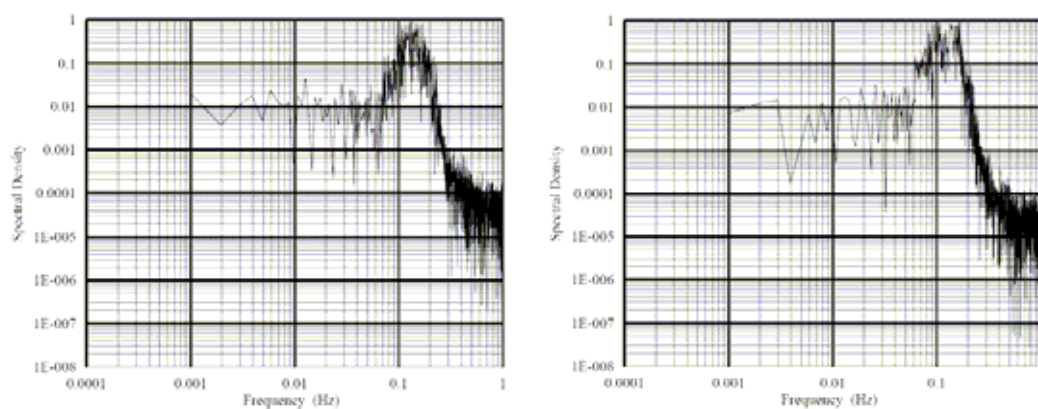


2001/9/28 18 時

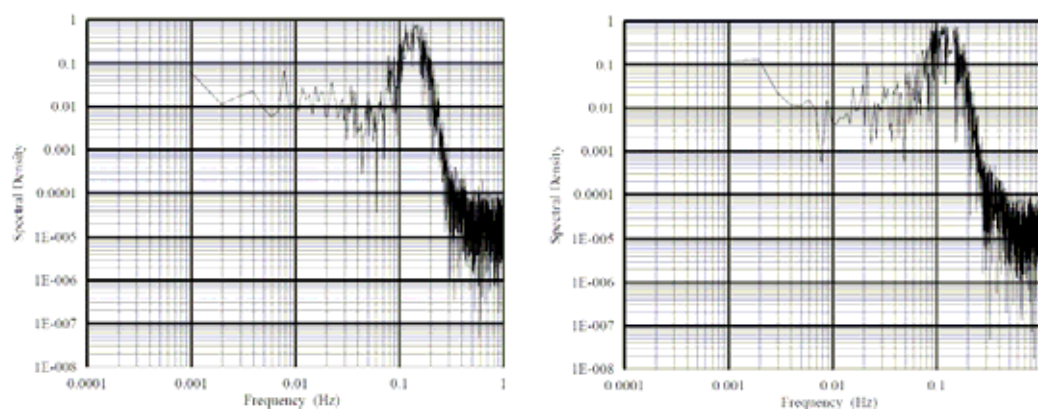
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/28 20 時

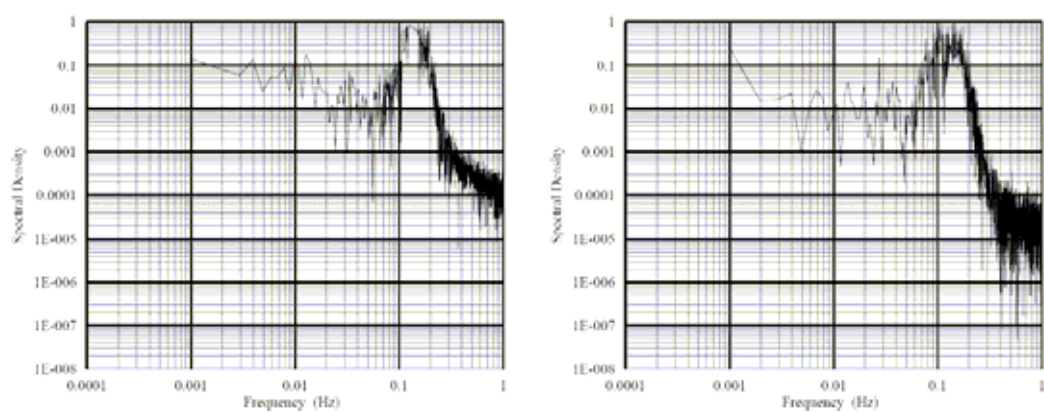


2001/9/28 22 時

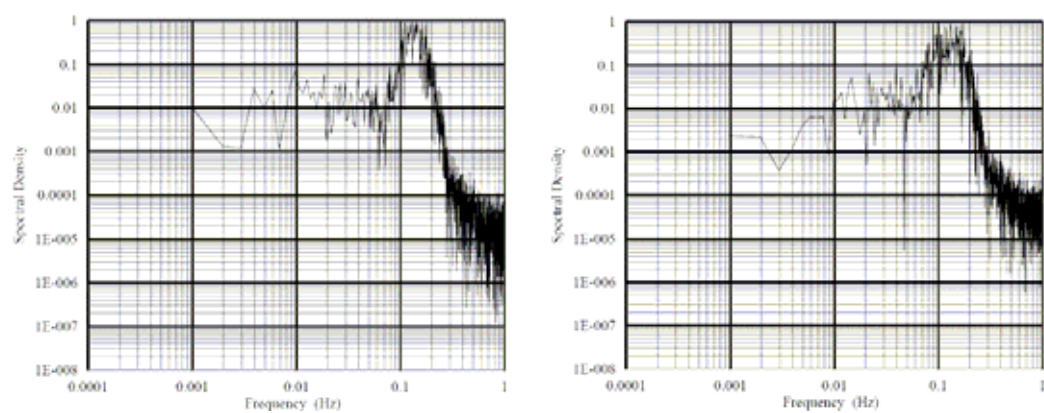


2001/9/29 0 時

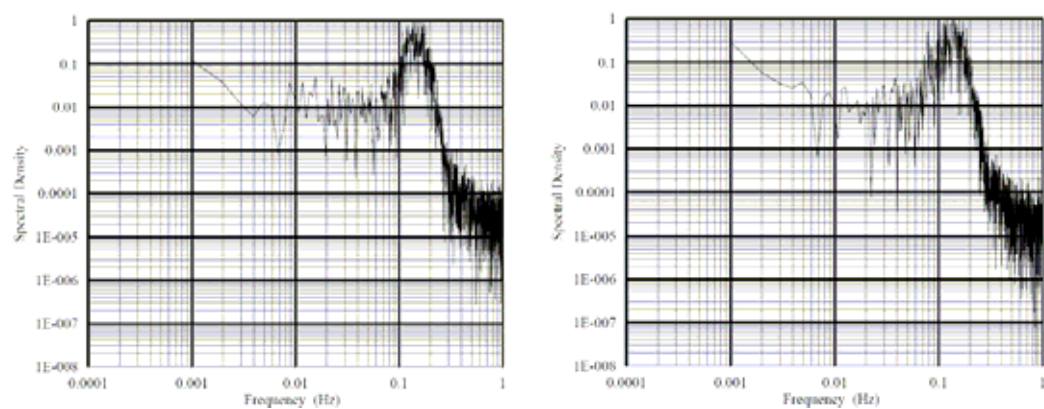
圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/29 2 時

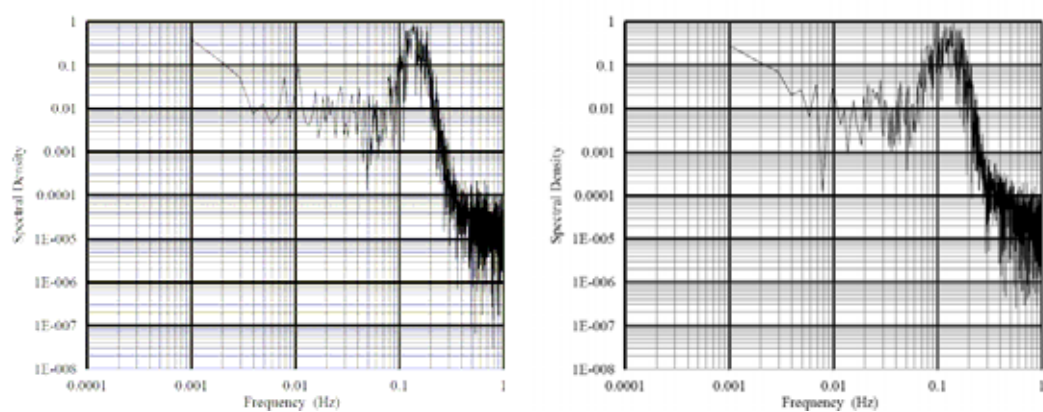


2001/9/29 4 時



2001/9/29 6 時

圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖



2001/9/29 8 時

圖 3.46(續) 2001/9/21 20 時至 2001/9/29 8 時龜山島南岸(左欄)及花蓮鹽寮漁港(右欄)波浪觀測頻譜比較圖

第四章 花蓮港港灣波動數值模式的建立與數值模擬

本項工作的目的是建置花蓮港港灣波動數值模式，包含規則波及不規則波模式。除了利用建置不規則波數值模擬之各成分波數值結果資料庫時，進行規則波的數值模擬，及以成分波能量線性疊加的方式整合為不規則波數值模擬結果外，也分別進行利用現場實測波浪進行之數值模擬，以及建置與 TAICOMS 波浪預報模式結合之花蓮港波浪預報模式。各相關的工作說明如以下各節。

4.1 無限元素港灣水面波動數值模式

本計畫所採用的港灣附近水面波動的數值計算模式是發展自陳炫杉博士(1990)的模式(林，1995)。該模式採用一般性的有限元素法解析假想邊界面以內水域的波動問題，並使用無限元素處理外海的散射波問題。與以前其他的數值模式不同的地方是：該模式假設外海為等坡度，而非等水深的海域。為了能考慮外海入射波的折射與淺化現象，該模式在給定假想邊界面上的入射波資料之前，先利用 Snell's 法則及能量守恒法則追蹤入射波自深海處(或波高測站處)向岸傳播的過程中，因為底床變化所產生的波向與波高的變化情形，一直到假想邊界面上為止。在計算出邊界面上各節點的入射波高、波向與相對相位差後，再進行港灣水面波動的模擬計算。

4.1.1 基本控制方程式

如圖4.1所示，考慮一任意形狀及水深的港池，其外海為一緩坡度變化的地形。將直角座標系統的 $x-y$ 平面置於靜水面上，原點 O 置於港池開口的正中央， x 軸與海岸線的平均位置平行，正 y 軸則面向外海方向，而 z 軸為鉛直向上。入射波的角度 θ_i 係自正 x 軸以逆時針方向量測。假設水面的波動是一無迴旋性的理想流體的微小振幅波動，海底底床為不透水且緩變的地形，而固體邊界如海岸線、防波堤、港內的

垂直岸壁及海底底床的波浪反射率， K_R ，也分別假設為常數值。

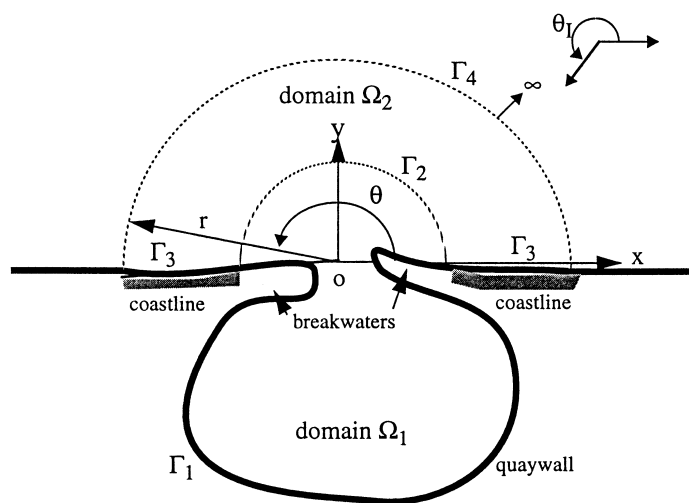


圖 4.1 港池水面波動邊界值問題定義圖

根據以上的假設，二維水面的波動現象可以滿足如下所示的緩坡度方程式

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0 \dots\dots\dots(4.1)$$

其中， $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ； $C = L/T$ 為波速； L 為波長； T 為波浪週期； $C_g = nC$ 為群波速度； $n(x, y) = (1 + 2kh/\sinh 2kh)/2$ ； $k(x, y) = 2\pi/L$ 為波數； $h(x, y)$ 為水深； $\phi(x, y)$ 為複數型式的速度勢；而 $\omega = 2\pi/T$ 為角頻率。其中，波數 k 與角頻率 ω 間應滿足分散關係式， $\omega^2 = gk \tanh kh$ ， g 為重力加速度。

為了考慮底床摩擦的影響，陳(1986)對上式引介了一個與底床摩擦有關的修正係數 λ 。修正後的公式如下

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi) + CC_g k^2 \phi = 0 \dots\dots\dots(4.2)$$

其中， $\lambda = (1 + (i\beta a_I / h \sinh kh) e^{i\gamma})^{-1}$ ； $i = \sqrt{-1}$ ； β 為無因次量的摩擦係數； a_I 為入射波振幅； γ 為相位角。由於本文主要是建立數值波動模式，而且 β 值必須經過實驗或現場實測決定，所以此處暫不考慮底床的摩擦，即

假設 $\beta = 0$ 。

4.1.2 數值模式的建立

在建立數值模式時，使用了兩個半圓形的假想邊界面。如圖4.1中所示， Γ_4 位於外海無窮遠處，而 Γ_2 則位於港外適當的延伸距離處。整個水域被區隔為兩個水域：有限範圍的港池區 Ω_1 及無限範圍的外海區 Ω_2 。港池區 Ω_1 係一由港池岸壁、港外的海岸線、防波堤、假想邊界面 Γ_2 、自由水面及海底底床所包圍的水體；外海區 Ω_2 則為一由海岸線、假想邊界面 Γ_2 及 Γ_4 、自由水面及海底底床所包圍的水體。港口外面的海底地形假設為坡度緩慢變化的直線海岸地形。港池區 Ω_1 及外海區 Ω_2 的水面波動均應分別滿足式(4.2)的控制方程式。兩個領域的控制方程式與相關的邊界條件分述如下：

1. 港池區 Ω_1 的波動控制方程式為

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi_{\Omega_1}) + C C_g k^2 \phi_{\Omega_1} = 0 \dots\dots\dots(4.3)$$

其中， ϕ_{Ω_1} 為港池區 Ω_1 內的速度勢。

2. 在邊界 Γ_1 上的邊界條件分別為

$$\frac{\partial \phi_{\Omega_1}}{\partial n_{\Omega_1}} - \alpha \phi_{\Omega_1} = 0 \dots\dots\dots(4.4)$$

其中， $\alpha = ik[(1 - K_R)/(1 + K_R)]$ ， K_R 為岸壁的反射係數，其值介於0至1之間； n_{Ω_1} 為單位法線向量並以向外為正。

3. 外海區 Ω_2 的波動場可以分為兩個部份，其一為屬於已知條件的外海入射波與由海岸線引起的反射波波場，其二為因港口的存在所引起的散射波波場，整個波動場的速度勢 ϕ_{Ω_2} 可表示為

$$\phi_{\Omega_2} = \phi_0 + \phi_S = (\phi_I + \phi_R) + \phi_S \dots\dots\dots(4.5)$$

其中， ϕ_{Ω_2} 為外海區 Ω_2 內的速度勢； ϕ_i 為入射波的速度勢； ϕ_r 為反射波的速度勢；而 ϕ_s 為散射波的速度勢。 ϕ_{Ω_2} ， ϕ_0 及 ϕ_s 應分別滿足式(4.2)的控制方程式，即

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi_{\Omega_2}) + CC_g k^2 \phi_{\Omega_2} = 0 \dots\dots\dots(4.6)$$

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi_0) + CC_g k^2 \phi_0 = 0 \dots\dots\dots(4.7)$$

及

$$\nabla \cdot (\lambda CC_g \nabla \phi_s) + CC_g k^2 \phi_s = 0 \dots\dots\dots(4.8)$$

4. 在邊界面 Γ_3 上的邊界條件分別為

$$\frac{\partial \phi_{\Omega_2}}{\partial n_{\Omega_2}} - \alpha \phi_{\Omega_2} = 0 \dots\dots\dots(4.9)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n_{\Omega_2}} - \alpha \phi_0 = 0 \dots\dots\dots(4.10)$$

及

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n_{\Omega_2}} - \alpha \phi_s = 0 \dots\dots\dots(4.11)$$

5. 在邊界面 Γ_4 上，散射波的速度勢 ϕ_s 應該滿足 Sommerfeld 的輻射條件，因此其邊界條件為

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - \frac{ik}{\sqrt{\lambda}} \right) \phi_s = 0 \dots\dots\dots(4.12)$$

其中， r 是極座標系統裡自原點 O 至指定點的距離（參考圖 4.1）。

6. 假想邊界面 Γ_2 為港池區 Ω_1 與外海區 Ω_2 的相接邊界面，由邊界面的兩側其能量與動量必須連續的法則，其連續邊界條件可表為

$$\frac{\partial \phi_{\Omega_2}}{\partial n_{\Omega_2}} = -\frac{\partial \phi_{\Omega_1}}{\partial n_{\Omega_1}} \dots\dots\dots(4.13)$$

及

$$\phi_{\Omega_2} = \phi_{\Omega_1} \dots\dots\dots(4.14)$$

由上述兩個區域的控制方程式與邊界條件根據變分法的極小值原理，可以推導得到全水域的穩態泛函如下所示

$$\begin{aligned} F(\phi) = & \frac{1}{2} \iint_{\Omega_1} (\lambda CC_g \nabla^2 \phi_{\Omega_1} - CC_g k^2 \phi_{\Omega_1}^2) dA + \frac{1}{2} \iint_{\Omega_2} (\lambda CC_g \nabla^2 \phi_s - CC_g k^2 \phi_s^2) dA \\ & - \frac{1}{2} \int_{\Gamma_1} \alpha \lambda CC_g \phi_{\Omega_1}^2 dL + \int_{\Gamma_2} \lambda CC_g \frac{\partial \phi_0}{\partial n_{\Omega_2}} \phi_{\Omega_1} dL - \frac{1}{2} \int_{\Gamma_3} \alpha \lambda CC_g \phi_s^2 dL - \frac{1}{2} \int_{\Gamma_4} ik \frac{CC_g}{\sqrt{\lambda}} \phi_s^2 dL \\ & \dots\dots\dots(4.15) \end{aligned}$$

透過離散化的處理，式(4.15)可以改寫成矩陣型式。式(4.15)中與港池區 Ω_1 有關的第一項積分可利用一般的有限元素法來近似求得。常用的線性三角元素被用來分割該水域。線性的線段元素則用在邊界面 Γ_1 及 Γ_2 上。外海區 Ω_2 是一個半無限大的水域，此處仍沿用Chen(1990)所建議的無限元素來處理與散射波有關的積分。雙節點的線性無限元素被用在式(4.15)的第二項積分，而單節點的無限元素則被用在邊界面 Γ_3 上的近似積分上。邊界面 Γ_4 上的積分由於散射波的速度勢 ϕ_s 會消失在無窮遠處，因此該項積分予以忽略。

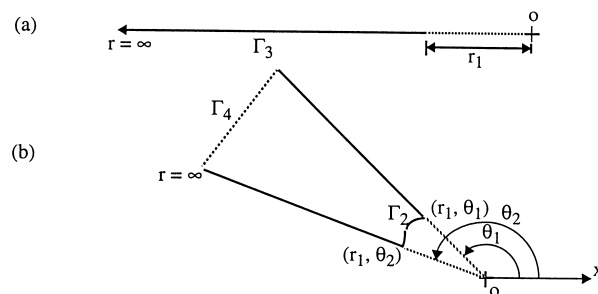


圖 4.2 無限元素定義圖。(a)單節點無限元素；(b)雙節點無限元素

如圖4.2所示，圖4.2(a)為單節點的無限元素，元素由距原點 r_1 處向無窮遠處延伸，它的形狀函數為

$$N_r = \sqrt{\frac{r_1}{r}} \exp\left(i \frac{k}{\sqrt{\lambda}}(r - r_1)\right), \quad 0 \leq r_1 \leq r \leq \infty \dots\dots\dots(4.16)$$

式中， r_1 為無限元素與邊界 Γ_2 的交點至原點 O 的距離； r 為無限元素與邊界 Γ_4 的交點至原點 O 的距離。此一元素上的散射波速度勢可以近似地表為

$$\phi_S(r) = N_r \phi_S(r_1) \dots\dots\dots(4.17)$$

圖4.2(b)為一雙節點的扇形無限元素，其相關的形狀函數為

$$N_{r\theta_1} = \frac{\theta_2 - \theta}{\Delta\theta} N_r, \quad N_{r\theta_2} = \frac{\theta - \theta_1}{\Delta\theta} N_r \dots\dots\dots(4.18)$$

其中， $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ； $\Delta = \theta_2 - \theta_1$ 。則元素上散射波的速度勢可表示為

$$\phi_S(r, \theta) = N_{r\theta_1} \phi_S(r_1, \theta_1) + N_{r\theta_2} \phi_S(r_2, \theta_2) \dots\dots\dots(4.19)$$

經過有限元素法與無限元素的離散化處理後，式(4.15)可改寫為矩陣形式，並作泛函數的極小化處理，即

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 0, \quad i = 1 \dots N \dots\dots\dots(4.20)$$

式中， N 為總節點數。之後可用相關的矩陣運算求解各個節點的速度勢值，則各節點的繞射係數 K_D 值可由下式求得

$$(K_D)_i = \left| \frac{\phi_i}{2\phi_I} \right|, \quad i = 1 \dots N \dots\dots\dots(4.21)$$

此一部份較為詳細的相關推導可參考Chen(1990)或Lin(1995)。由式(4.21)顯示，在本模擬中， $K_D > 1.0$ 即表示有共振現象的發生。

4.1.1 入射波的傳播與變形

為了考慮外海底床坡度對港池水面波動數值模擬的影響，本研究對於上節所建立的數值模式中屬於已知資料的入射波條件，增加了波浪自外海向岸傳播時的追蹤與計算。Snell法則被用來計算波浪的行進方向，而能量守恒法則則被用來計算在不同水深處的波高變化。此外，本模式也追蹤了波浪沿波向線上的相位變化。相似的方法也用在追蹤反射波的波高、波向與相位的變化。所有有關入射波與反射波的計算均追蹤到邊界面 Γ_2 上的各個節點處。通常，對於海岸的消波能力常以一反射係數 K_R 來表示，因此各節點處的速度勢 ϕ_0 可表示為 $\phi_0 = \phi_I + K_R \phi_R$ 。

4.2 花蓮港的水深地形檔的整理

在花蓮港港灣波動模擬中除了必要的花蓮港的地形外，需考慮外海長週期入射波的折射與淺化，以及海岸及碼頭岸壁的非定值反射特性，以建構港灣波動數值模式。目前整個花蓮港內外的水深地形數值資料的取得，以及資料的一致性檢核。目前所知，如要建立花蓮港內外水域數值地形檔，將會需要花蓮港務局所測的港內水深地形、河川局的花蓮水深地形、以及國科會海科中心的外海水深方能竣工，然而其中的座標系統可能大不相同，而必須設法整合。在整合過程中發現，雖然各個測量系統可能使用不同的參考基準面，但其差值應僅在一至二公尺範圍，對供波浪折繞射計算的數值地形的建立尚不構成嚴重問題。比較顯著的問題是在各個水深測量系統的量測精度與解析度不同，再經過內插至較小網格時其誤差便以存在而且無法作有效地修正。

圖 4.3 是花蓮港水域數值水深資料彙整情形，由於上述的理由，我們可以發現外海的水深與灣內及港內的水深有一明顯的介面，而且外海水深過於規則應是在資料不足的情況下，利用較大網格的水深測量資料進行內插的結果。經過節點水深比較及部分平均化的處理後，得到圖 4.4 的數值水深地形，其差異性仍然存在，但已經較為緩和。在前三個年度本計畫係以此一數值地形進行花蓮港的波動模擬。該數值地

形的有限元素網格計有 5579 個節點，10799 個三角元素，比原始資料檔案的 10568 節點，20572 個三角元素精簡很多。在沒有其他任何分享之下，平均利用個人電腦的計算每個波浪條件約需 65 秒。民國 86 年，花蓮港進行水深地形測量，圖 4.5 為新的數值水深地形，該數值地形的有限元素網格計有 14642 個節點，28324 個三角元素，以雙 CPU 之工作站在 UNIX 系統及 Intel Fortran 作業環境裡每一個入射波條件大約執行 27 秒；以雙 CPU 之工作站在 Window 系統及 Visual Fortran 作業環境裡每一個入射波條件大約執行 39 秒。

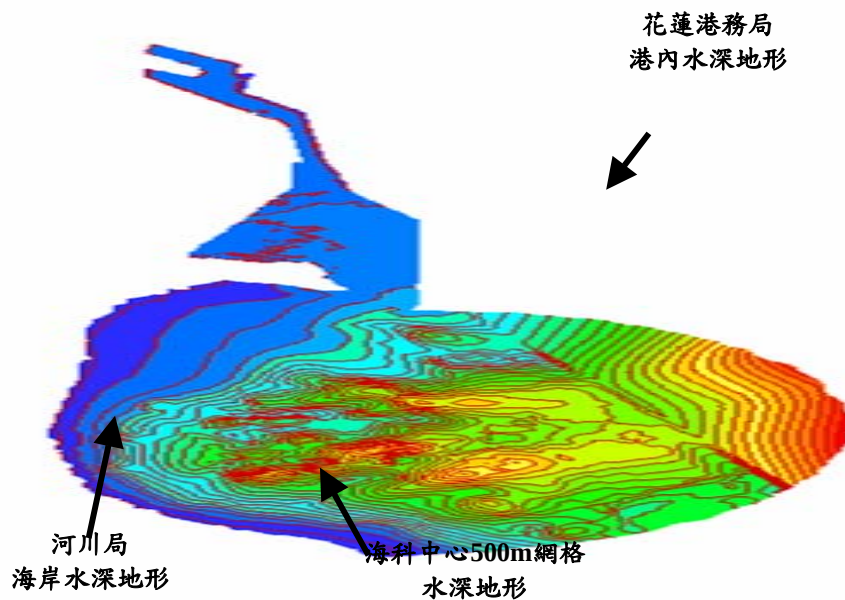


圖 4.3 花蓮港水域數值水深資料彙整情形

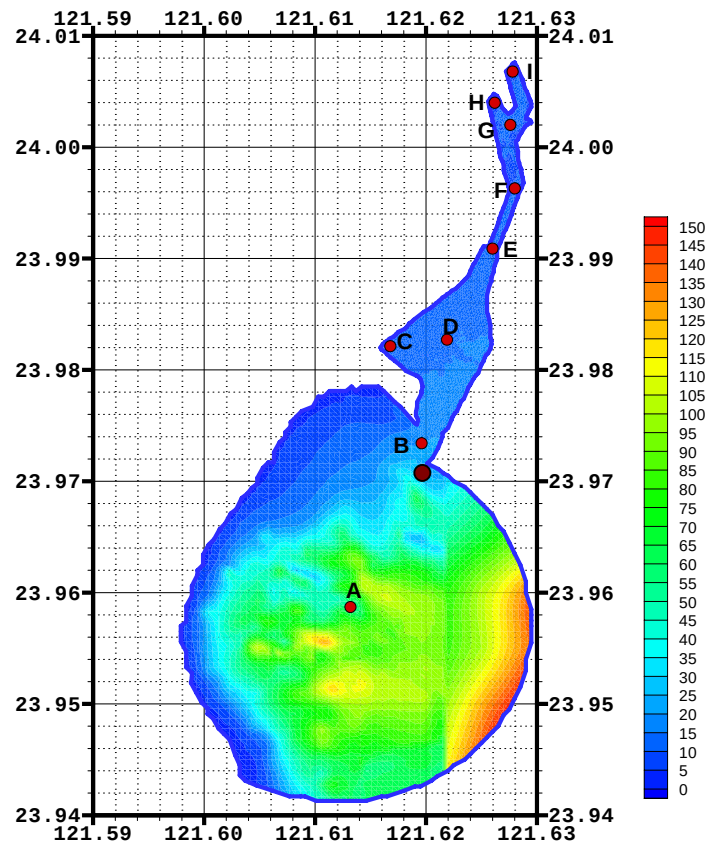


圖 4.4 舊花蓮港水域數值水深地形

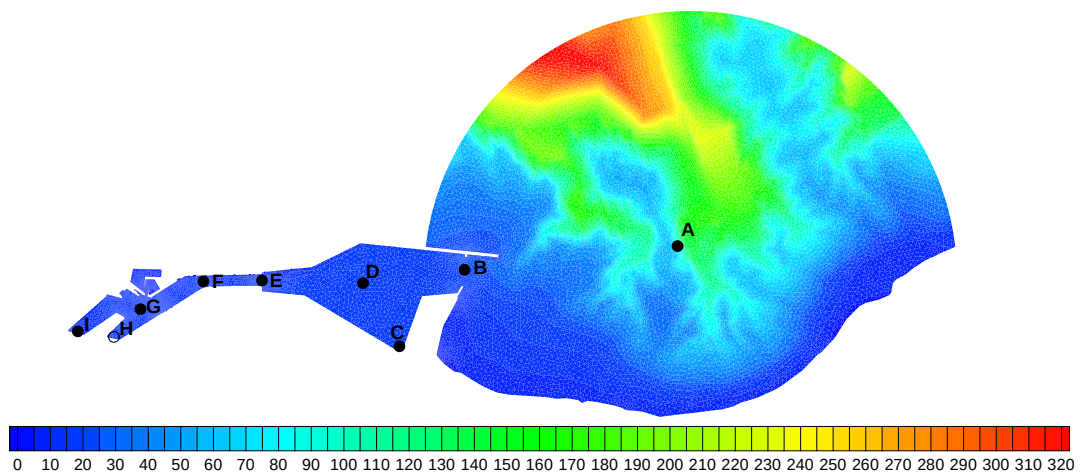


圖 4.5 96 年新測之花蓮港水域數值水深地形

4.3 規則波引致港灣波動數值模擬

為進行最惡劣情況的數值模擬，所有計算領域內的海岸均假設為完全反射($K_R=1.0$)。而為瞭解極長週期波作用下港內可能的波動情形，本計劃模擬的造波週期介於 3 至 200 秒。實際上，花蓮港港外的南北濱海岸為沙灘或人工堆石海岸，應該具備有相當程度的消波效果，未來可隨時配合實際情形修改邊界的反射條件。圖 4.6 為以舊水深地形模擬之九個測站(位置如圖 4.4 中所示)全部的波高增幅曲線圖，其中波浪反射率除了花蓮南北濱海岸的設為 0.5 以外，其餘均設為 1.0。圖 4.7 為以新測水深地形模擬之九個測站(位置如圖 4.5 中所示)全部的波高增幅曲線圖，所有岸壁的波浪反射率均設為 1.0。圖 4.8 為以新測水深地形模擬之九個測站(位置如圖 4.5 中所示)全部的波高增幅曲線圖，其中波浪反射率除了花蓮南北濱海岸的設為 0.5 以外，其餘均設為 1.0。從圖中可以發現水深、地形以及反射率的正確與否直接反映在波浪的增幅係數曲線上，也就是說直接影響到對港內水面波動的幅度及評估，尤其是共振週期的檢討。圖 4.7 與圖 4.8 均為新測水深地形，但南北濱海岸邊界的反射率不同，雖然主要的共振週期仍然相同，但是完全反射的岸壁可能引發更多的共振週期，共振幅度也較大。圖 4.6 與圖 4.8 的比較可以看出水深地形資料的不同可能引發不同的共振週期。此種情形除了可能導因於水深地形的不同外，計算領域(即假想邊界圓)的大小是否能涵蓋所有會影響港內波動的地形也是一種可能。

如果以新測水深地形，並假設花蓮南北濱海岸的波浪反射率為 0.5，其餘均設為 1.0 的狀況進行入射波週期介於 3 至 200 秒間的模擬及討論，從圖 4.8 可以看到，港外僅在 7 秒左右波浪作用有共振現；外港區在 21、25、28、44、51、55、65、75、109 秒等附近、以及 128 至 150 秒之間可能發生較大的波動；受限航道與外港區大致相同；內港區則在 33、40、49、53、58、66、74、79、85、129、149、193 秒等附近可能發生較大的波動。整個港區在 130 至 150 秒之間以及 193 秒處會整體性地引發共振現象($K_D>1.0$)，此一結論與以前的研究成果相當接近。圖 4.7 顯示入射波週期分別為 55、128、149 及 193 秒時之港區水

域波高增幅係數分佈圖。本節節錄部分成果進行說明。

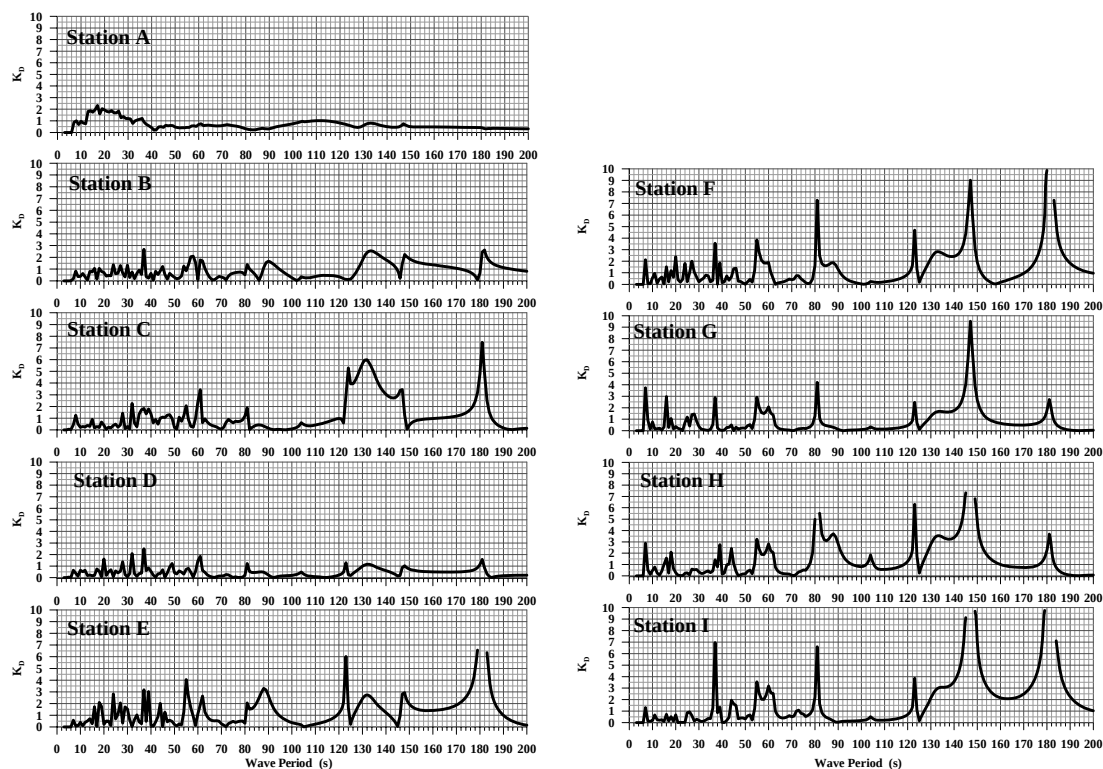


圖 4.6 九個測站之波高增幅曲線圖(舊數值水深地形)

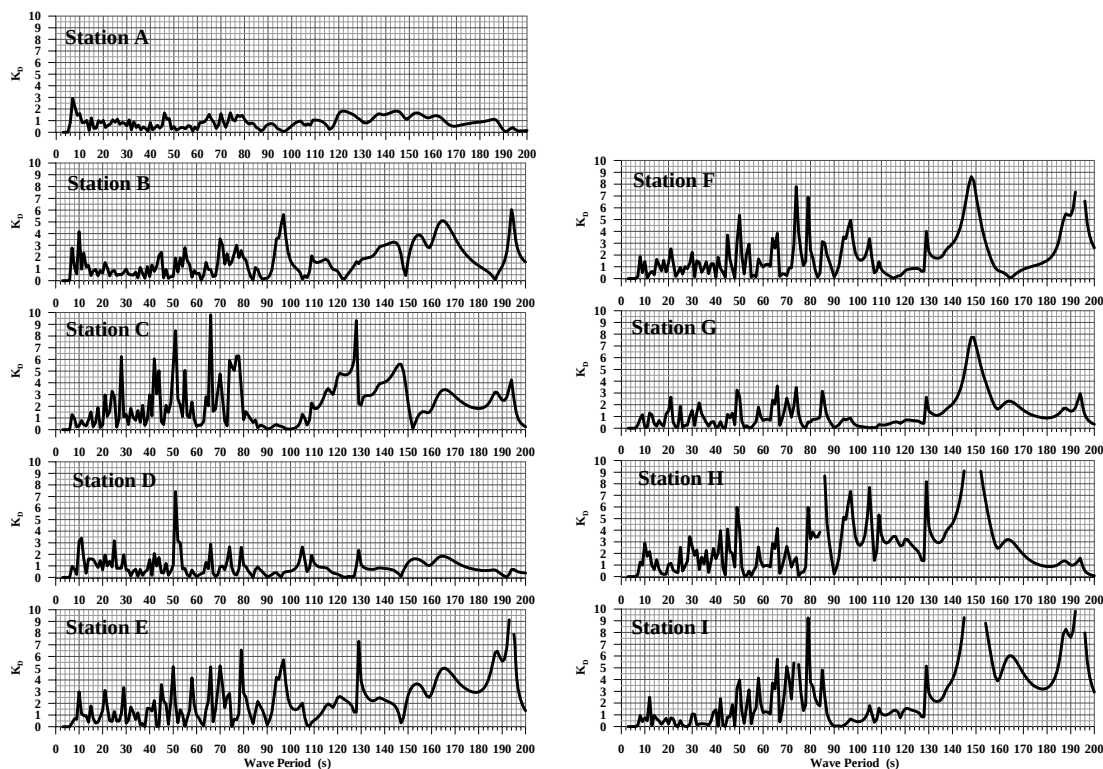


圖 4.7 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，岸壁完全反射)

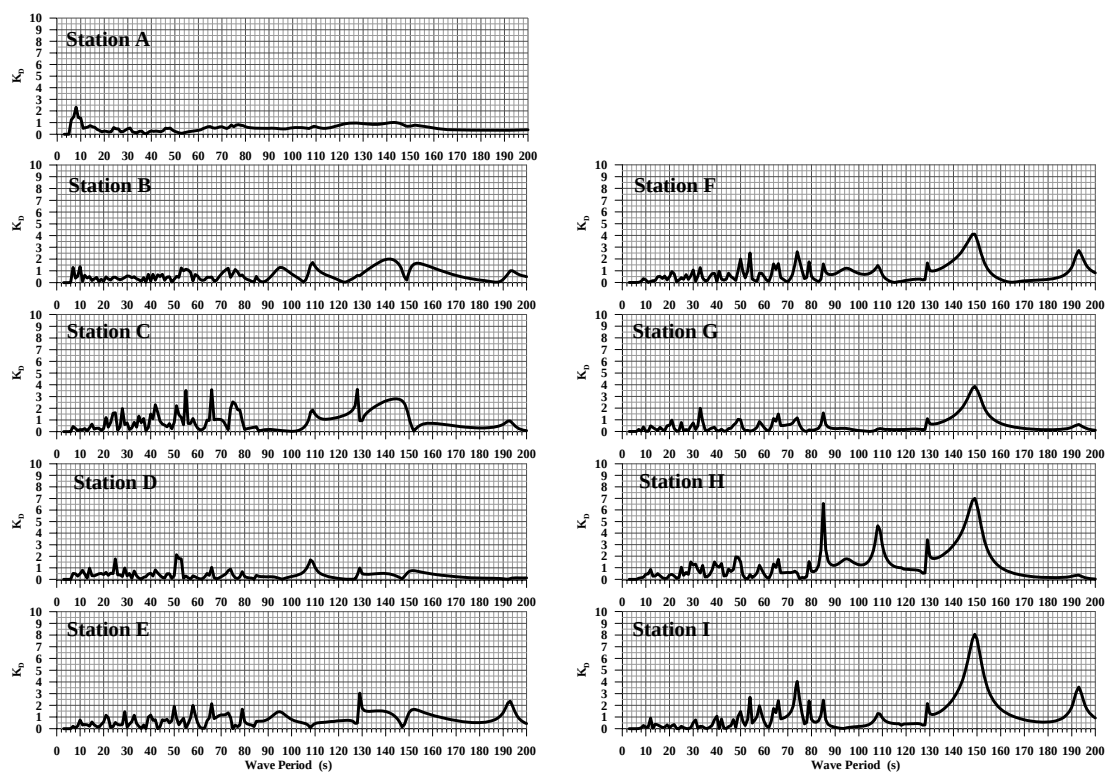


圖 4.8 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，海岸部分反射)

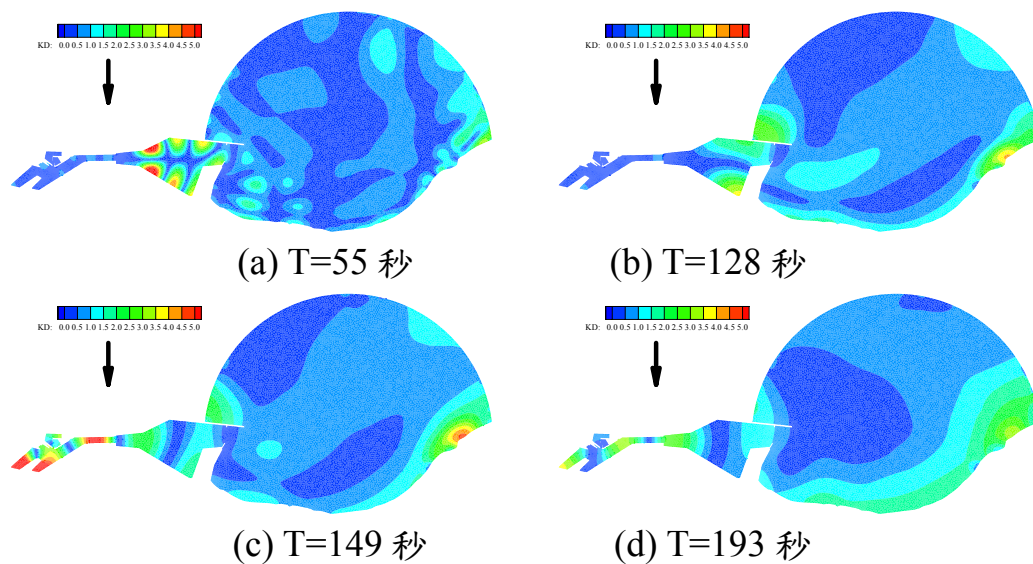


圖 4.9 波高增幅係數 K_D 分佈圖

4.4 不規則波引致港灣波動數值模擬

4.4.1 理論波譜

(1) Bretschneider 頻譜

Bretschneider(1959)由無因次波高與無因次波長的聯合分佈函數所推導出之頻譜如下：

$$S(f) = 3.437 \frac{F_1^2}{F_2^4} \frac{g^2}{f^5} \exp \left[-0.675 \frac{g^4}{(UF_2 f)^4} \right] \dots\dots\dots (4.22)$$

其中， $F_1 = g\bar{H}/U^2$ ， $F_2 = g\bar{T}/(2\pi U)$ ， U 為風速； $\bar{H}$ 為平均波高； $\bar{T}$ 為平均週期。

上式經過修正後，可以用示性波波高 H_s 及譜峰頻率 f_p 來表示：

$$S(f) = \frac{1.25}{4} \frac{f_p^4}{f^5} H_s^2 \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \dots\dots\dots (4.23)$$

修改後的頻譜不同的地方在於頻譜所使用的特徵參數不再是風速 U ，而是使用示性波波高 H_s 及譜峰頻率 f_p 作為波譜的特徵參數，由於示性波波高 H_s 與譜峰頻率 f_p 可經由風速、吹風距離及吹風延時三者間的關係求得，因此此頻譜適用於成長階段或充分成長的風浪。

其後 Mitsuyasu(1970) 利用其觀測資料推得，譜峰週期 T_p 或者其倒數譜峰頻率 f_p 與示性波週期 T_s 之間的關係為： $T_p = 1.05T_s$ 。再針對式(4.23)中的係數作修改，修改後的公式如下：

$$S(f) = 0.257 H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.03 (T_s f)^4 \right] \dots\dots\dots (4.24)$$

式(4.24)也被稱為 Bretschneider-Mitsuyasu 頻譜(B-M 譜)。

(2) Pierson-Moskowitz 頻譜

Pierson-Moskowitz 頻譜(P-M 譜)，這是最常被使用到的風浪頻譜之一，是 Pierson 與 Moskowitz 在 1964 年時，根據在北大西洋的現場觀測資料，經過篩選分析所得出的風浪波譜，公式如下：

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} \exp[-0.74(g/2\pi f U)^4] \dots\dots\dots (4.25)$$

其中， g 為重力加速度，單位為 m/s^2 ， U 為在平均海面上 19.5 公尺高度所觀測到的風速，單位為 m/s 。

由於所觀測資料是在北大西洋收集到的，因此此風浪頻譜適用的範圍僅僅在外海遼闊且充分發展成熟的風浪。由於 P-M 頻譜公式需要風速作為輸入條件，若利用窄頻譜假設，可以得到譜峰頻率與風速間的轉換公式為： $f_p = 1.253 / \sqrt{4.0 \sqrt{2.84 \times 10^{-5} U^4}}$ 。將其代入原頻譜公式可以得到以下的公式：

$$S(f) = \frac{0.0081 g^2}{(2\pi)^4} \frac{1}{f^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \dots\dots\dots (4.26)$$

(3) JONSWAP 頻譜

在 1968 至 1969 年間，由 Hasselmann 等人所進行的聯合北海波浪計畫(Joint Northsea Wave Project，簡稱 JONSWAP)，從丹麥、德國交界處西南岸的 Sylt 島沿西北方向布置一個測波段面，測站最大水深為 50 公尺。由所觀測到的資料得到有限風距下的風浪頻譜如下：

$$S(f) = \frac{\alpha_J g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \gamma_J^{\varepsilon_f} \dots\dots\dots (4.27)$$

$$\alpha_J = \begin{cases} 0.07 & \text{for } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{for } f > f_p \end{cases} : \text{為能量尺度因子} \dots\dots\dots (4.28)$$

$$\varepsilon_f = \exp\left[-\frac{(f - f_p)^2}{2\alpha^2 f_p^2}\right] \dots\dots\dots (4.29)$$

$\gamma_J = \frac{S(f)_{\max}}{S(f)_{\max}^{PM}}$ ：稱為譜峰升高因子，為頻譜最大值與 P-M 頻譜最大值 $S(f)_{\max}^{PM}$ 之比

$$\dots\dots\dots(4.30)$$

為了工程上的方便應用，Goda(1999)將原頻譜改寫成以示性波波高及尖峰週期表示的型式，改寫後的 JONSWAP 頻譜如下：

$$S(f) = \beta_J H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma_J^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\alpha_J^2]} \dots\dots\dots(4.31)$$

$$\beta_J = \frac{0.06238}{0.23 + 0.0336\gamma_J - 0.185(1.9 + \gamma_J)^{-1}} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma_J) \dots\dots\dots(4.32)$$

$$T_s = [1 - 0.132(\gamma_J + 0.2)^{-0.559}] T_p \dots\dots\dots(4.33)$$

$$\bar{T} = [1 - 0.532(\gamma_J + 2.5)^{-0.569}] T_p \dots\dots\dots(4.34)$$

$$\alpha_J = \begin{cases} 0.07 & \text{for } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{for } f > f_p \end{cases} \dots\dots\dots(4.35)$$

其中， $\bar{T}$ 表示為由零上切法所得到的平均週期；Hasselmann et al.(1973) 建議 γ_J 值的範圍為 1 到 7 之間，平均值為 3.3。

4.4.2 不規則波的波高增幅係數

一般在描述港灣附近的波動情況時，常利用繞射係數 K_D (diffraction coefficient) 來表示，繞射係數定義為港內之波高與港外入射波波高的比值，由繞射係數可以知道入射波浪對港灣內部所造成波高分佈之影響程度。由於港內波高並非為單一方向，與繞射係數的定義略有不同，因此後來對此一波高比改稱為波高增幅係數 (wave amplification factor)，但是仍用 K_D 表示。

有關港內水面波動的評估，以往都是用波高增幅係數分佈圖以及增幅曲線圖(共振曲線)。波高增幅係數分佈圖是在特定的入射波條件下描述計算水域的等增幅係數值分佈，藉以評估港內的波動情形；增幅

曲線圖是在指定的位置記錄不同外海入射波週期所引起的 K_D 變化情形，藉以瞭解港內特定點的波動自然頻率。然而這些計算多是在假設入射波週期以及入射波方向為一定的規則波條件下所求得的，與實際上的紛紜現象並不相同。

為了求不規則波作用下的水面波動情形，Goda 將方向波譜導入，以求得實際之繞射波高，其多方向不規則波之增幅係數公式如下：

$$(K_D)_{eff} = \left[\frac{1}{m_0} \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) K_D^2(f, \theta) d\theta df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4.36)$$

其中， $(K_D)_{eff}$ 表示不規則波之增幅係數； $K_D(f, \theta)$ 為在波浪頻率 f 且入射波向 θ 條件下之成分波(規則波)所求得的增幅係數； m_0 表示方向頻譜的零階面積矩，即

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) d\theta df \dots\dots\dots (4.37)$$

而單方向不規則波之增幅係數則採用與 Goda 公式相同的方式來計算港內的增幅係數，即：

$$(K_D)_{eff} = \left[\frac{1}{m_0} \int_0^\infty S(f) K_D^2(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4.38)$$

由於波高與頻譜能量的關係一般在假設頻譜為單峰窄頻，且波高為 Raleigh 分佈時，可表示為

$$H_s = 4.004 \sqrt{m_0} \dots\dots\dots (4.39)$$

而波高亦可以由傳統的增幅係數的定義求得

$$H = K_D H_I \dots\dots\dots (4.40)$$

為了瞭解這兩種波高的求取方法的差異性，本研究也進行比較。

4.4.3 單方向不規則波的模擬

如圖 4.10 所示為單方向不規則波作用下港灣波動數值模式的計算

流程，首先讀入港池的水深地形、計算領域的邊界及相關邊界條件，其此選擇欲計算的理論頻譜形狀，並輸入相關的參數值，如代表頻率、週期、及波高等。利用適當的成分波分割方法將指定的頻譜分割成 n 個成分波，並計算其代表頻率或週期，以及能量或波高等參數值。將各個成分波視為規則波，分別規則波的港灣波動數值模擬，並儲存各個造波條件的計算結果。利用計算領域內各點的增幅係數 K_D 值與外海入射波的成分波能量值計算該點的成分波能量值，將各個成分波的能量組合後得到港內任一點反應頻譜。最後利用各點的反應頻譜能量與外海入射波能量的比值開根號求得不規則波作用下的有效增幅係數 $(K_D)_{eff}$ 值，以及利用頻譜距計算代表之平均週期 $T_{0.1}$ ，並繪製其分佈圖。藉由港池相關資料的輸入與入射波頻譜的輸入，數值模式可以自動進行所有的相關計算，簡化了需要複雜處理程序的不規則波港灣波動數值模擬作業。

由於計畫時程有限，數值模擬所需時間較長，無法將過去三年的數值模擬全部重新執行，在本節討論中所用的部分數值結果仍為舊水深地形，新舊地形的區分可以從該圖的左上角是否顯示花蓮漁港的波動來區別。

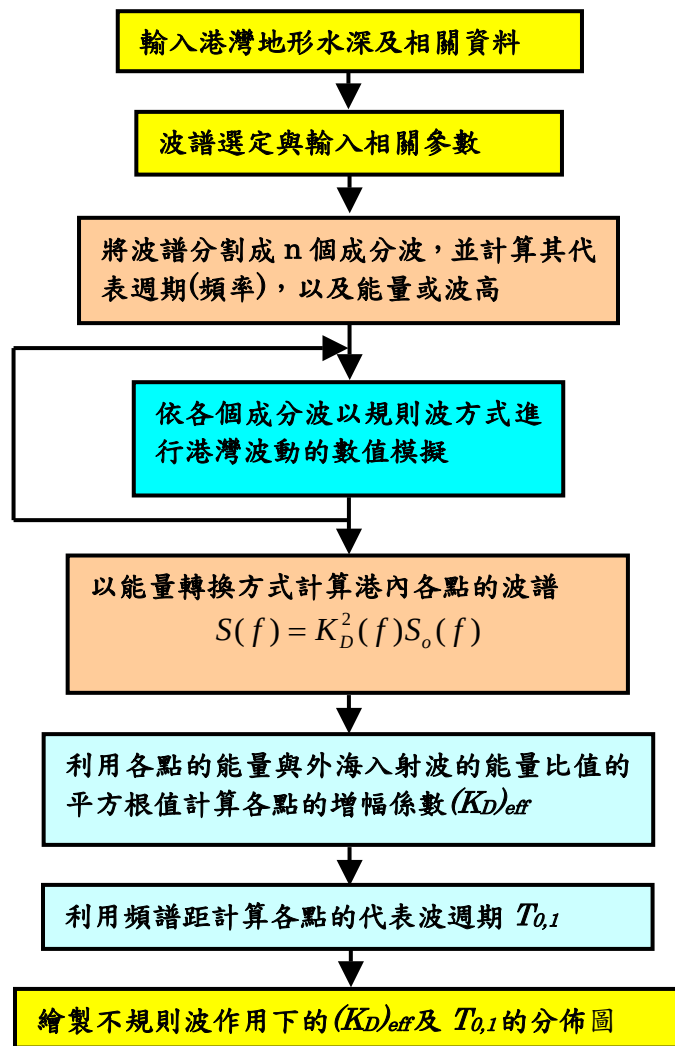


圖 4.10 不規則波港灣波動數值模式的計算流程圖

(1) 不同頻譜分割方法的比較

在不規則波模式中可引入的理論頻譜有 Pierson-Moskowitz 頻譜、Bretschneider-mitsuyasu 頻譜、以及 JONSWAP 頻譜。頻譜的分割方式則測試了等能量分割、等頻率分割、等週期分割、以及混合分割等方法。圖 4.11 及圖 4.12 是長方形港池及部分開口矩形港池用不同分割數的模擬結果，圖 4.13 至圖 4.21 是以 JONSWAP 理論頻譜為入射波頻譜的部分數值模擬結果。由於港灣波動對入射波的週期(頻率)相當敏感，目前的模擬與測試結果顯示以上所述的成分波分割方法在頻率介於 0.02 Hz 至五倍的譜峰頻率之間即使分割到 30 個成分波都還不能得到

趨於數值穩定的解，而且不同的分割方法或分割數可能會因為是否包含有會引發共振的成分波以及所含的能量而造成不同的數值結果，顯示成分波的分割方法與成分波的分割數對港灣波動的數值模擬相當重要。經過相關測試的結果，如要穩定地數值模擬不規則波港灣波動折繞射現象則不論是採用哪種成分波分割的方式，在重力波的範圍內都至少需要有 50 個成分波。

然而，就目前的模擬仍可以發現，港內的水面波動由於各點的增幅係數不同，而有不同的反應頻譜，以及不同的代表平均週期。港內各點的週期大多數情形是等於或短於入射波週期，但有些入射波條件作用下，港內則會發生大於入射波週期的波動。此一結果顯示過去採用規則波進行港灣波動模擬的方式，並不能說明港內波動週期的變化，也不應將波動週期視為不變。

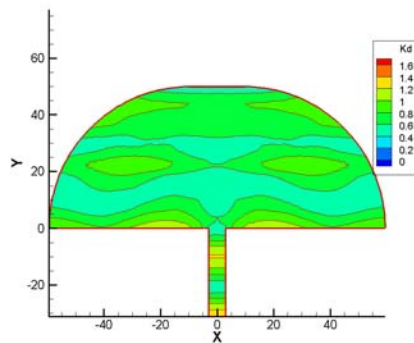
(2) 單方向不規則波的數值模擬

圖 4.22 及圖 4.23 係入射波代表週期 $T_s=8s$ 時，利用規則波模式及不規則波模式(B-M 波譜及 JONSWAP 波譜，入射波代表波高為 $H_s=6m$ ，週期範圍 5s 至 30s)所計算之波高增幅係數分佈圖。從圖中可以發現，利用規則波進行的數值模擬結果較不規則波的數值來得小，但其他的入射波條件則可能增大。其原因應是港灣波動模擬對入射波週期的敏感度相當高，利用規則波進行模擬時，很容易反映出入射波週期與港灣的自然頻率的關係；反之，不規則波對入射波頻譜的能量是依理論頻譜規定的權重，將波能分配到所有的成分波裡，因此不同週期波動的線性疊加中，波浪能量便很容易地被分散掉。圖 4.23 中兩種不同理論頻譜的模擬結果則相當接近，應該與重力波範圍內(週期介於 5s 至 30s)的能量分配相近。但 JONSWAP 頻譜的模擬結果比 B-M 頻譜略大，應是與能量的集中情形有關。

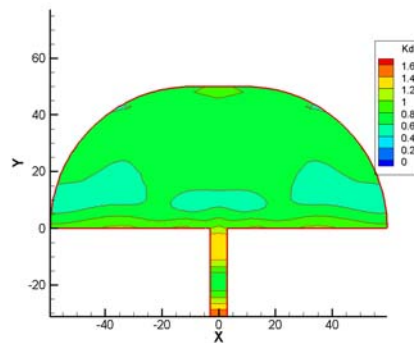
不規則波所引致的港灣水面波動在一般的認知裡面，常以波高增幅係數的分佈來闡釋無因次波高的變化情形，但是如果我們注意到不規則波的模擬是需要輸入有因次的特定頻譜，在該頻譜內包含了特定

的波能、波高及週期等參數資訊，而且不同的參數值就可能引發不同的反應。因此，用無因次的增幅係數來表示不規則波的波動在基本定義上是不像在模擬規則波波動上那麼肯定。目前有關不規則波的波高增幅係數可以有兩種不同的解讀：代表波高的比值，以及能量的比值開根號。其間的差異主要出在頻譜能量與波高間的關係，也就是說，一般在深海波時，如果波高滿足 Rayleigh 分佈，則示性波高等於頻譜能量開根值的 4.004 倍，但是港內的代表波高與頻譜能量間的關係則因為頻譜不屬於單峰的窄頻頻譜，波高分佈也不再是 Rayleigh 分佈，其間的關係是否能再適用，值得進一步思考。本研究在此先針對不規則波水面波動的表示方法進行探討於比較。圖 4.24 至圖 4.25 依序分別為以 B-M 頻譜及 JONSWAP 頻譜進行模擬，並分別以式(4.39)及式(4.40)的分別計算水面的波高分佈的數值結果。從圖中可以看出圖 4.24(a)及圖 4.25(a)間，以及圖 4.24(b)及圖 4.25(b)間的分佈極為相似，顯示在本模擬條件下，B-M 頻譜及 JONSWAP 頻譜的能量分佈差異性不大。但是比較圖 4.24 各圖，以及圖 4.25 各圖之間就發現其波高分佈有些差異。其可能的原因應是式(4.39)進行波高計算時係假設示性波高與頻譜能量開根值有 4.004 的比例，但目前在現場的波浪觀測中皆顯示大約在 3.8 左右，而且外海與港內可能有不同的係數。未來應針對此一部份進行探討。

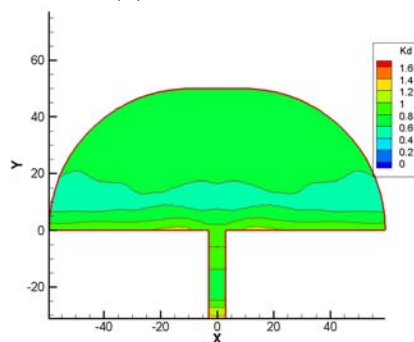
圖 4.26 及圖 4.27 為代表入射波週期為 $T_s=10s$ 時，利用規則波模式及不規則波模式(JONSWAP 波譜，代表入射波波高分別為 $H_s=6m$ 及 $10m$ ，週期範圍 $5s$ 至 $30s$)所計算之波高增幅係數分佈圖。從各圖的比較也可以發現規則波的波動分佈較大，而入射波波高較大的頻譜所得到的水面 $(K_D)_{eff}$ 分佈也相對提高，顯示不規則波的水面波動分佈受到入射波波高及週期的影響，這點與規則波模擬中的想法不同。圖 4.28 及圖 4.29 是由圖 4.27 之 $(K_D)_{eff}$ 分佈以式(4.39)及式(4.40)的分別計算水面的波高分佈。圖中也充分顯示入射波波高的影響。



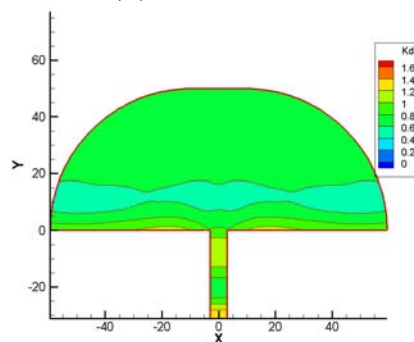
(a)分割數 $n=10$



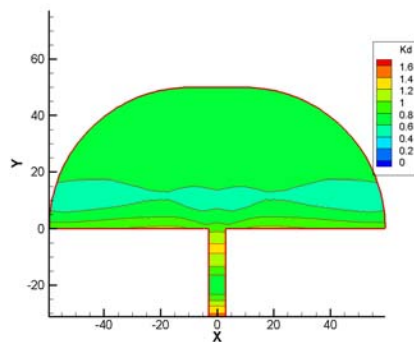
(b)分割數 $n=20$



(c)分割數 $n=30$



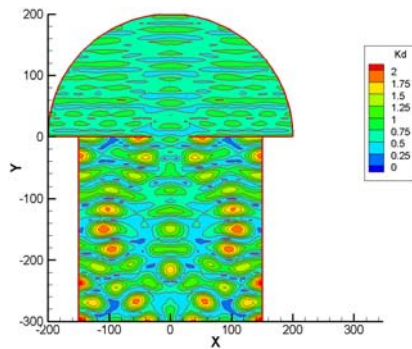
(d)分割數 $n=40$



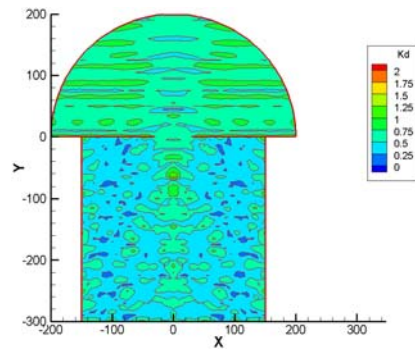
(e)分割數 $n=50$

造波條件：
JONSWAP 頻譜
入射方向：正向 270°
頻譜分割方式：等頻率分割
波浪條件： $H_{1/3}=3\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6\text{s}$

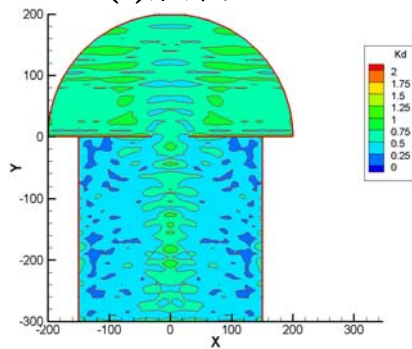
圖 4.11 長方形港池在不同成分波數目下的港灣波動 K_D 分佈情形



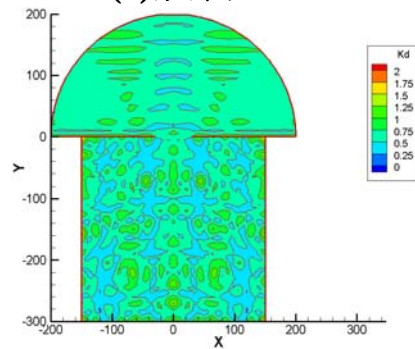
(a) 分割數 $n=10$



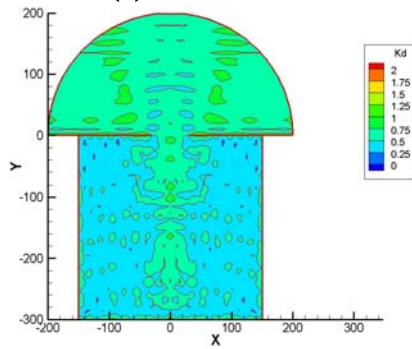
(b) 分割數 $n=20$



(c) 分割數 $n=30$



(d) 分割數 $n=40$



(e) 分割數 $n=50$

造波條件：
JONSWAP 頻譜
入射方向：正向 270°
頻譜分割方式：等頻率分割
波浪條件： $H1/3=3\text{m}$ 、 $T1/3=6\text{s}$

圖 4.12 正方形港池在不同成分波數目下的港灣波動 K_d 分佈情形

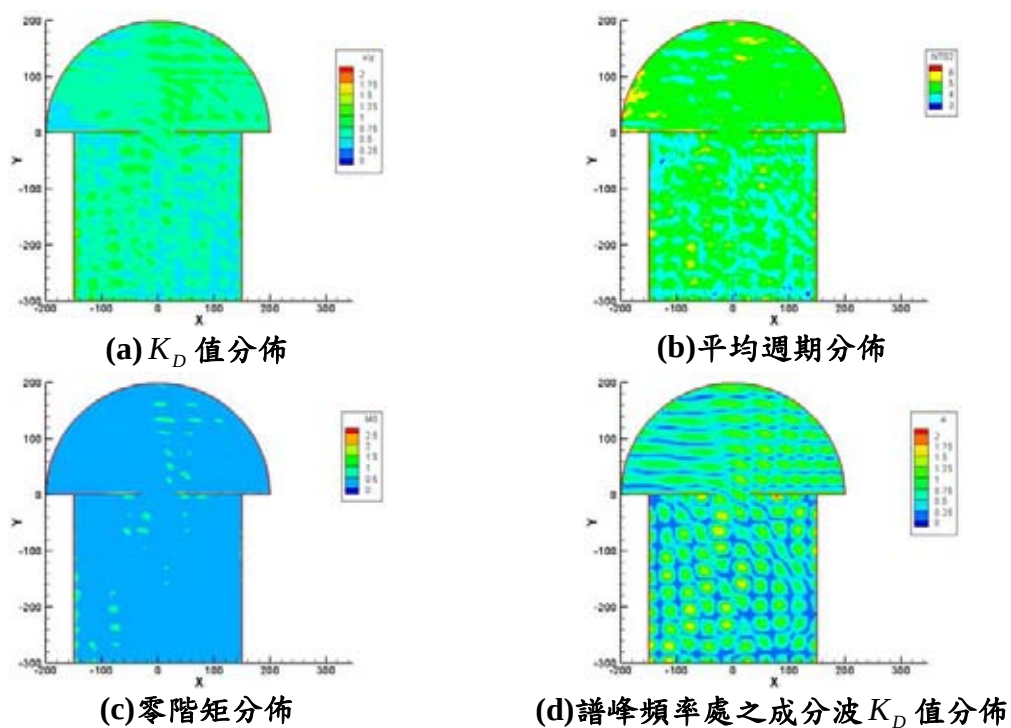


圖 4.13 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)

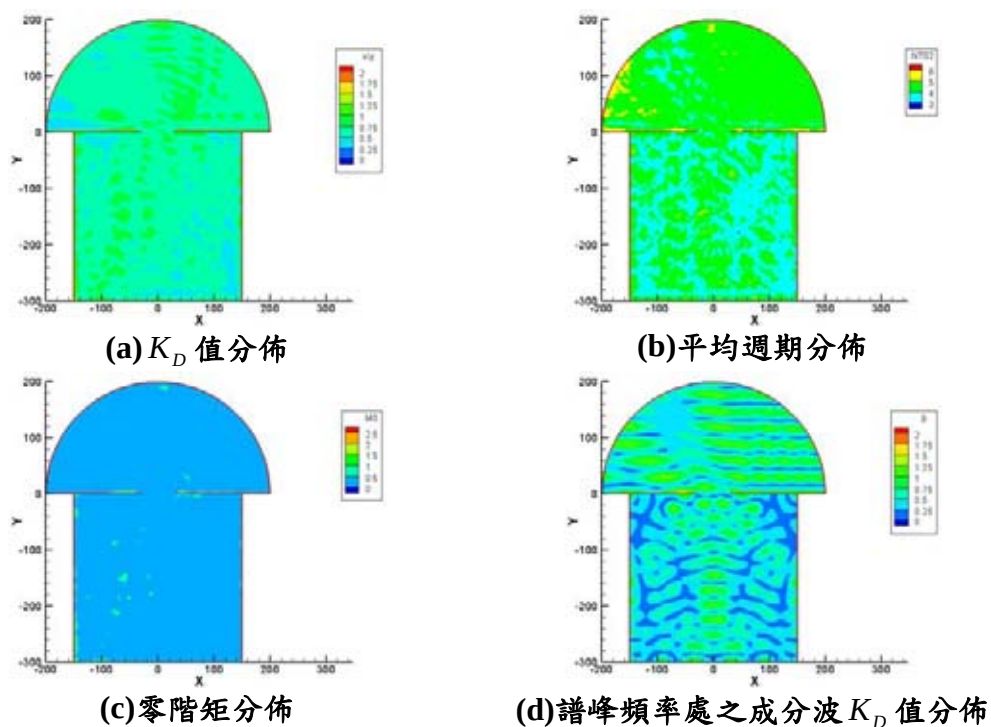


圖 4.14 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)

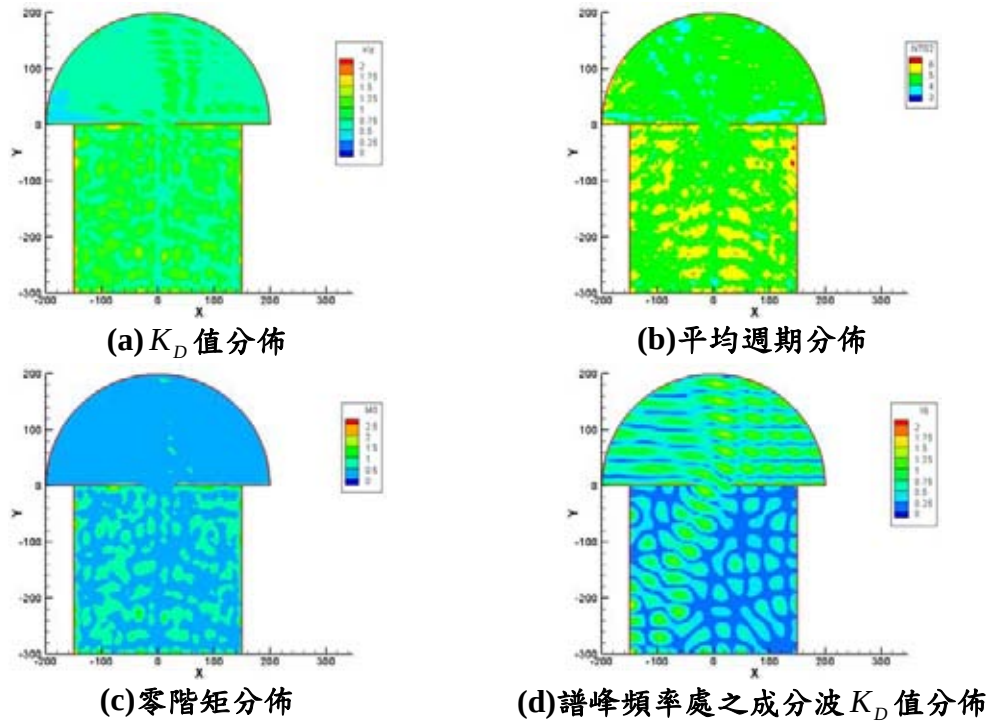


圖 4.15 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 240° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)

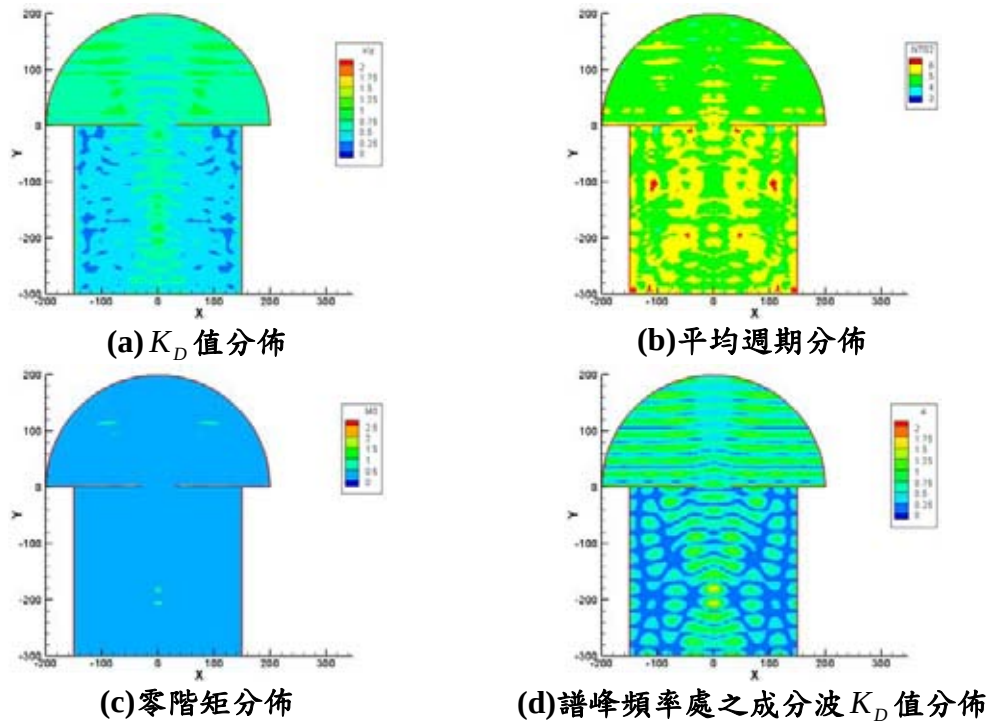


圖 4.16 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)

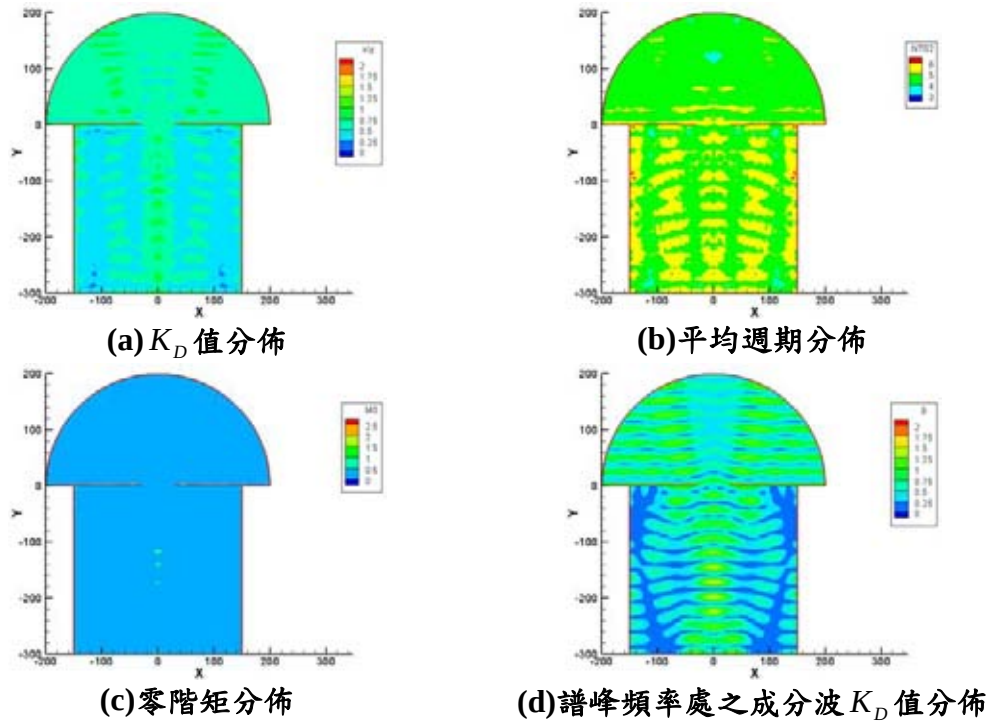


圖 4.17 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)

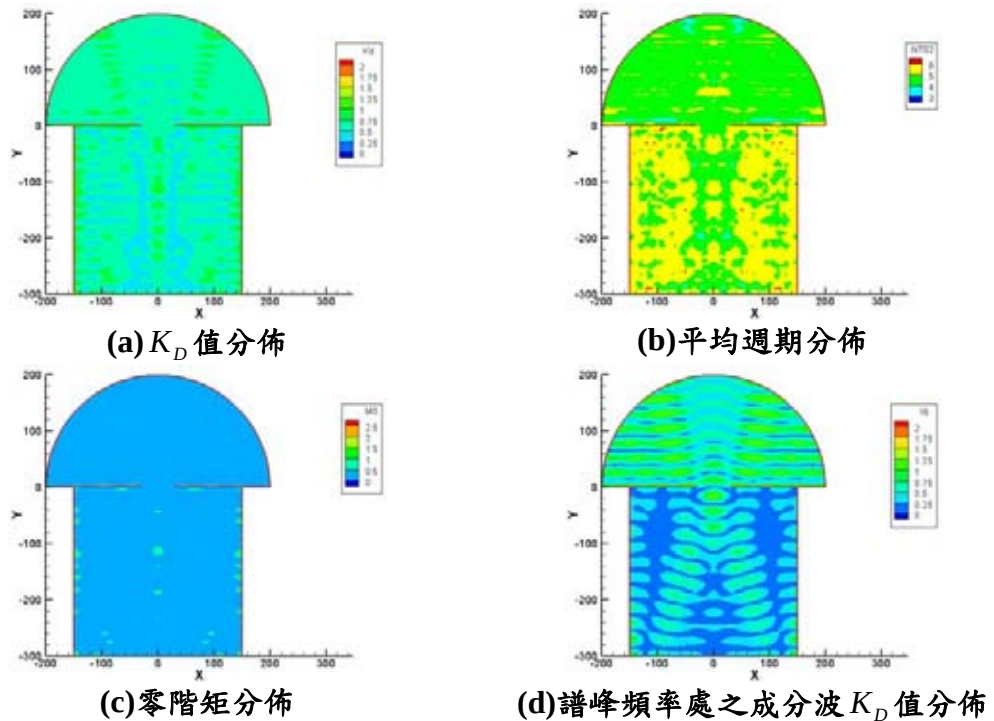


圖 4.18 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.1667\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)

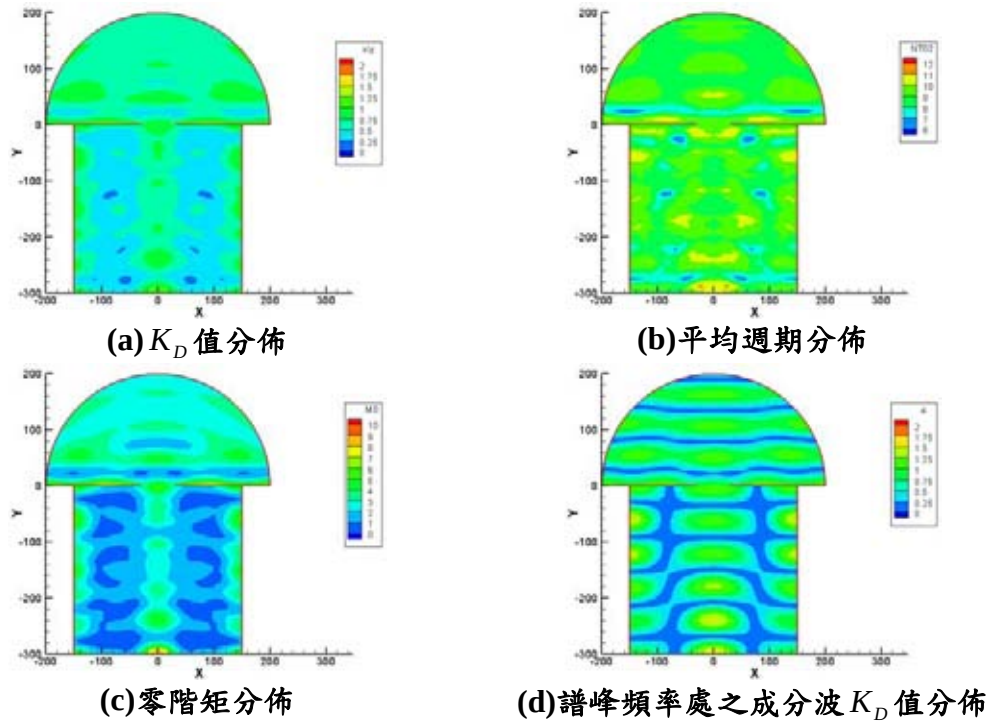


圖 4.19 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等頻率分割、 $n=30$)

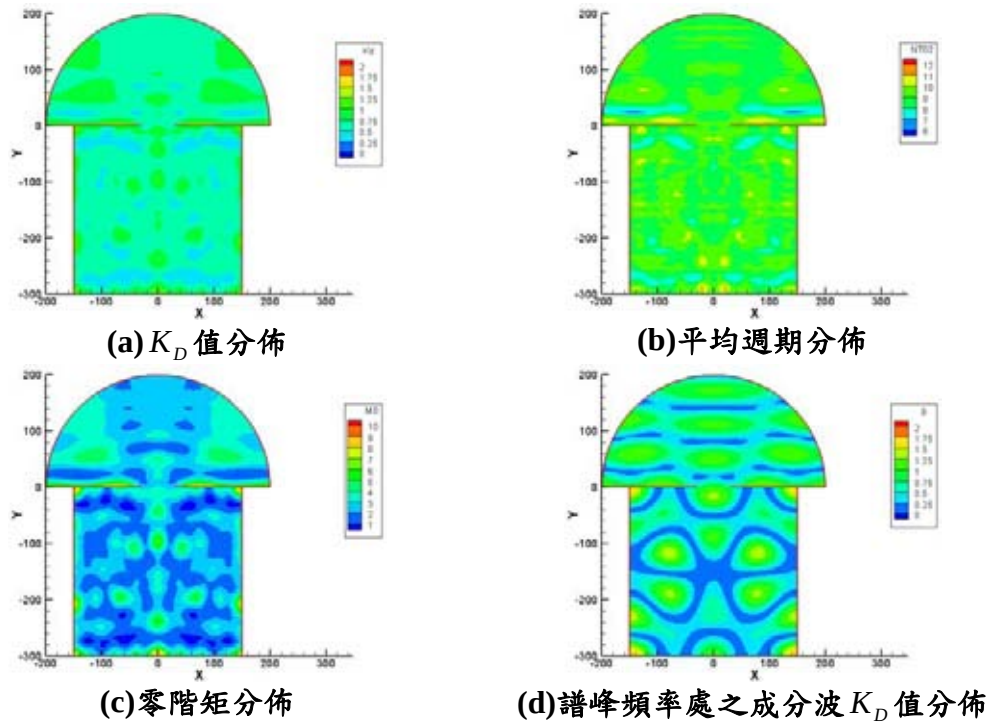
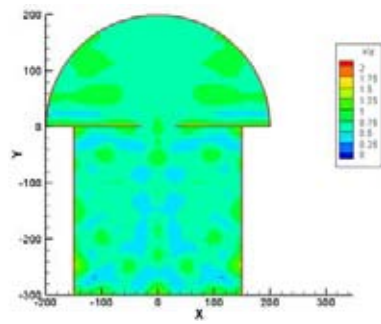
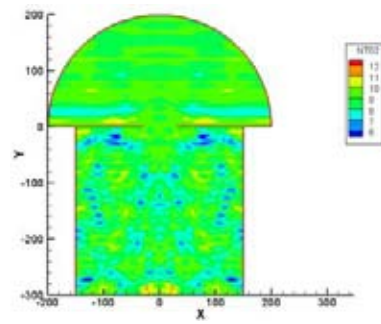


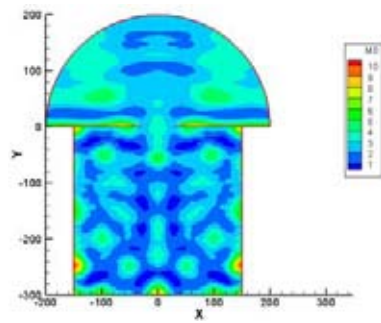
圖 4.20 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、混合分割、 $n=30$)



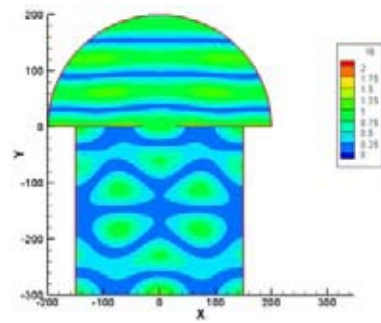
(a) K_D 值分佈



(b) 平均週期分佈



(c) 零階矩分佈



(d) 譜峰頻率處之成分波 K_D 值分佈

圖 4.21 數值模擬結果(JONSWAP 頻譜、 270° 入射、 $F_{\text{peak}}=0.0833\text{Hz}$ 、 $H_{1/3}=3\text{m}$ 、等週期分割、 $n=30$)

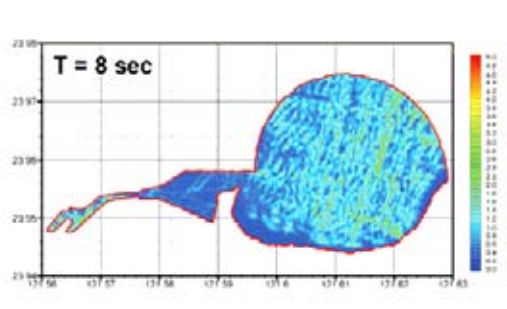
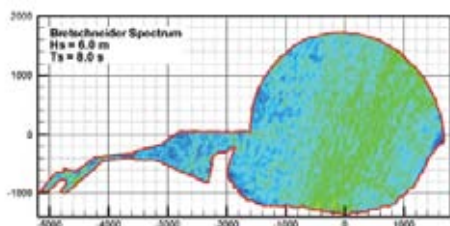
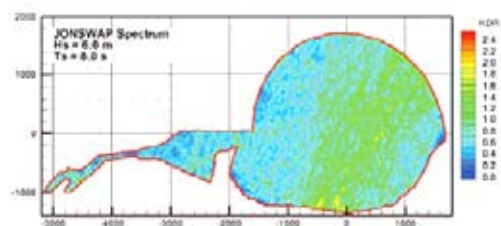


圖 4.22 規則波作用下 K_D 分佈圖($T_s=8s$)

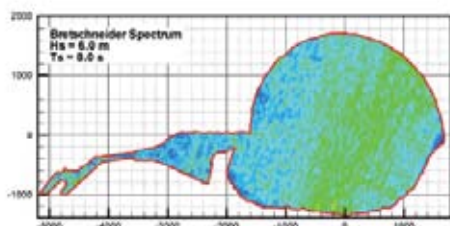


(a) B-M 頻譜

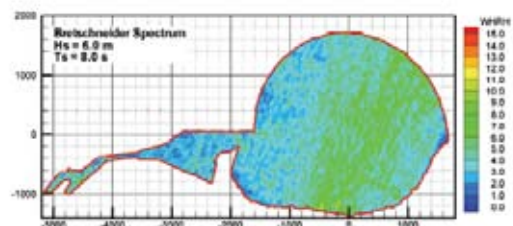


(b) JONSWAP 頻譜

圖 4.23 不規則波作用下 $(K_D)_{eff}$ 分佈圖($T_s=8s$, $H_s=6m$)

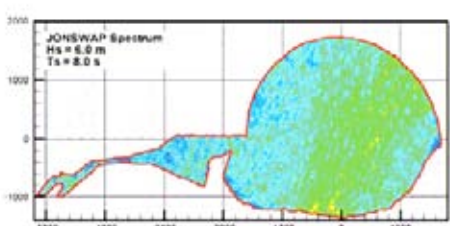


(a) 式 4.39

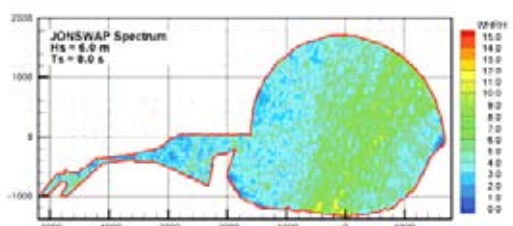


(b) 式 4.40

圖 4.24 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=8s$, $H_s=6m$, B-M 頻譜)



(a) 式 4.39



(b) 式 4.40

圖 4.25 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=8s$, $H_s=6m$, JONSWAP 頻譜)

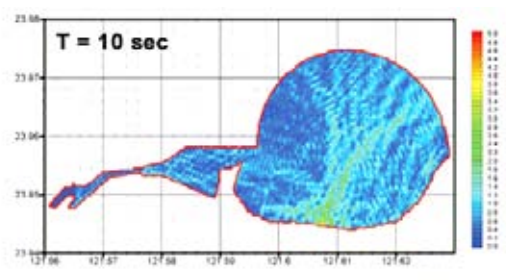


圖 4.26 規則波作用下 K_D 分佈圖($T_s=10s$)

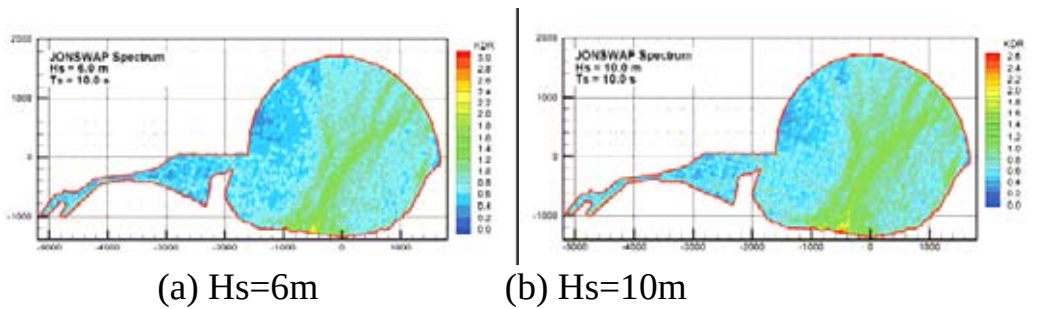


圖 4.27 不規則波作用下 (K_D)_{eff} 分佈圖($T_s=10s$, $H_s=6m$)

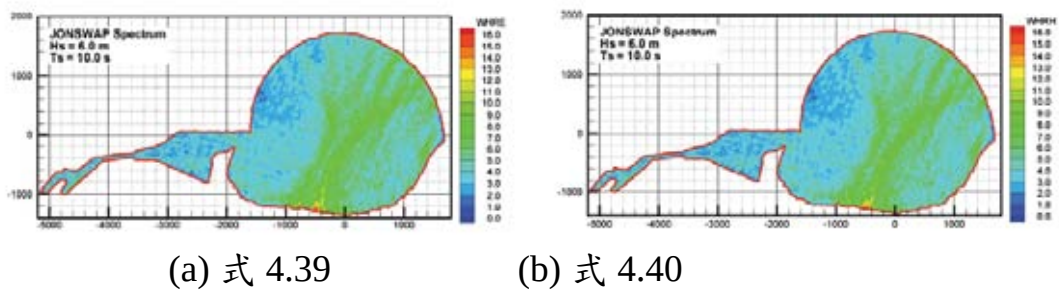


圖 4.28 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=10s$, $H_s=6m$)

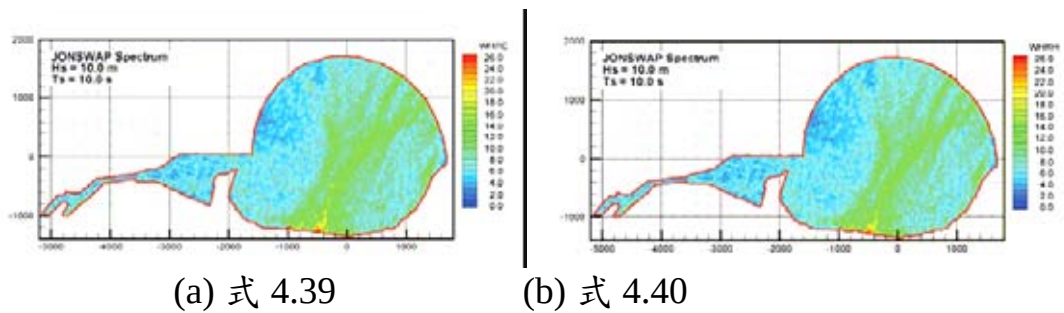


圖 4.29 不規則波作用下波高分佈圖($T_s=10s$, $H_s=10m$, 式 4.40)

4.4.4 長週期波動的模擬

在一般理論頻譜中，波浪的能量主要包含在重力波的範圍內，週期大於 30 秒的成分波往往不具備太大的能量，然而，依花蓮港的波浪觀測資料來看，除了重力波外，還存在有極長週期的波動。就連在 94 年度計畫中回顧的文獻中所提到的約 80 秒到 160 秒之內的共振週期也無法在理論頻譜中找到它們的能量。為了能在數值模擬中反映重力波以外的成分波所可能影響的水面波動情形，本計畫以能量線性疊加方式，進行相關模擬。

圖 4.30 及圖 4.31 係將單一長週期波(週期為 84 秒，波高分別為 1m、2m 及 3m；以及週期為 1134s，波高分別為 0.1m、0.5m 及 1m)加入示性波高為 6m，而示性週期為 10s 的 JONSWAP 理論頻譜後模擬所得的 K_D 分佈圖(原有模擬結果如圖 4.28 所示)。從圖中可以看到在 84 秒的模擬中，雖然相對規則波的 K_D 分佈可能都大於 1，但若其能量不大的話，對水面波動影響並不大。然而，對極長週期波動中，即使波高僅有 0.1m，也會引起港內很大的振盪。

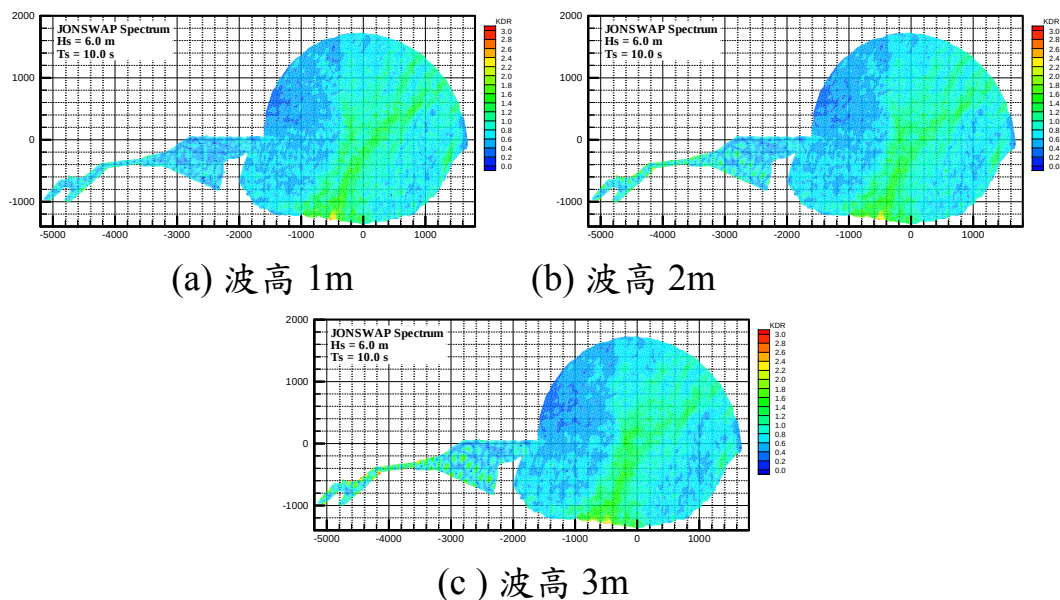


圖 4.30 不規則波+84 秒長波作用下 $(K_D)_{eff}$ 分佈圖

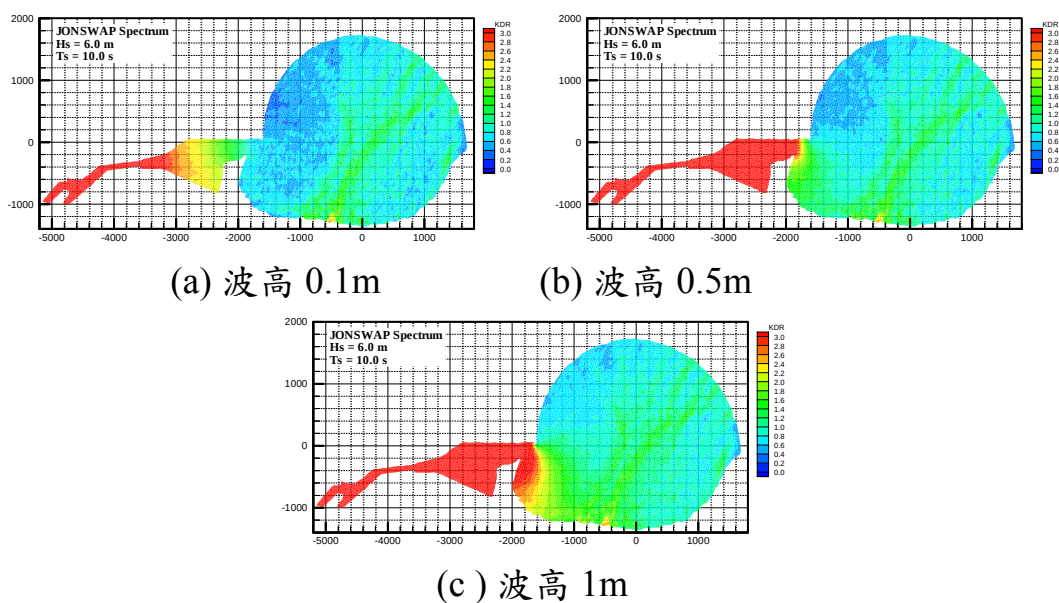


圖 4.31 不規則波+1134 秒長波作用下 $(K_D)_{eff}$ 分佈圖

4.4.5 多方向不規則波的模擬

多方向不規則波的模擬主要是假設多方向波譜 $S(f, \theta)$ 可以用一維頻譜或能譜 $S(f)$ 與方向分佈函數 $G(f, \theta)$ 的乘積加以表示如下

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \dots\dots\dots (4.41)$$

為滿足

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \dots\dots\dots (4.42)$$

的關係，首先 $G(f, \theta)$ 必需為正值，而且必須滿足下式

$$\int_0^{2\pi} G(f, \theta) d\theta = 1 \dots\dots\dots (4.43)$$

因此方向分佈函數 $G(f, \theta)$ 是表示各頻率成份波所含能量在方向上的分佈比例。

方向分佈函數的形式有多種不同的建議，本研究採用最常用的方向分佈函數

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_M}{2} \right) \dots\dots\dots (4.44)$$

其中

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \dots\dots\dots (4.45)$$

s 是決定方向分佈集中度的參數， θ_M 為各頻率成分波之平均波向。 s 與 θ_M 應都是頻率的函數。Mitsuyasu(1975)建議方向分佈參數與頻率之間的關係為：

$$\begin{cases} s = s_{\max} (f/f_p)^5 & (f \leq f_p) \\ s = s_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & (f \geq f_p) \end{cases} \dots\dots\dots (4.46)$$

合田(1990)建議在深海時之風浪 $s_{\max} = 10$ ，湧浪 $s_{\max} = 25 \sim 75$ ，且隨著淺化 $s_{\max}$ 會變大。

為建構多方向不規則波的數值模擬，本研究採用JONSWAP理論波譜、Mitsuyasu及Goda對波譜能量在方向分佈的建議，建構模擬程式。圖4.32為示性波高8m、示性波週期10sec，兩個不同主波方向角的多方向不規則波港灣增幅係數分佈圖。從圖中可以看出，多方向不規則波作用下的波高分佈，較單方向不規則波作用下的波高分佈為靜穩，而規則波作用下的波高分佈最高。

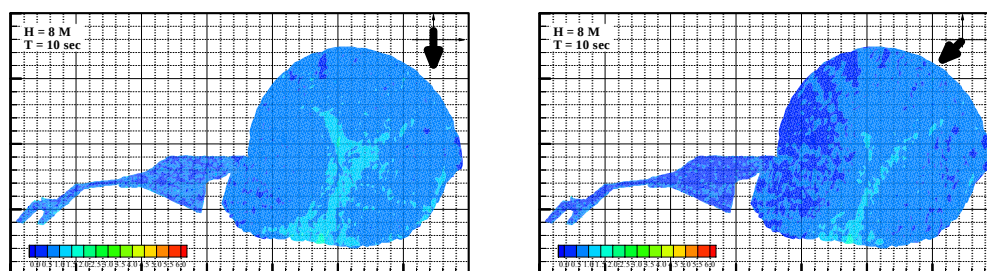


圖 4.32 不同主波方向之多方向不規則波作用下 K_D 分佈圖(JONSWAP 頻譜、 $T_s=10s$ ， $H_s=6m$)

4.5 實測波譜的模擬

4.5.1 1994 年提姆(Tim)颱風

本節以1994年提姆(Tim)颱風期間，在花蓮港東堤外側靠近花蓮漁港處的觀測波浪資料進行實測波譜的模擬，圖4.33為提姆颱風的行進路徑圖，圖4.34為以花蓮港外海之觀測波浪記錄首先進行頻譜分析，再利用各成分波之頻率進行港灣波動之規則波模擬，進而計算得港內各點的反應頻譜，圖中測站ST2、#8碼頭、#10碼頭、#22碼頭分別為圖4.4中之測點O、C、H及I。從圖中各個不同時間的頻譜變化可以發現在7月10日上午12時颱風登陸以前港內的長週期波動有逐漸增強的趨勢，而颱風過境以後，短週期波首先消散，港內以長週期的蕩漾為主。圖4.35的港口內外實測頻譜亦有類似情形。

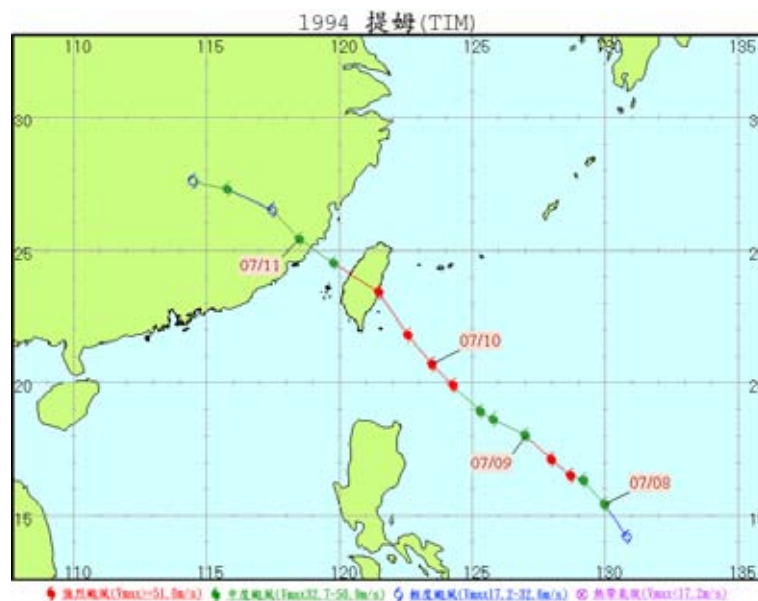
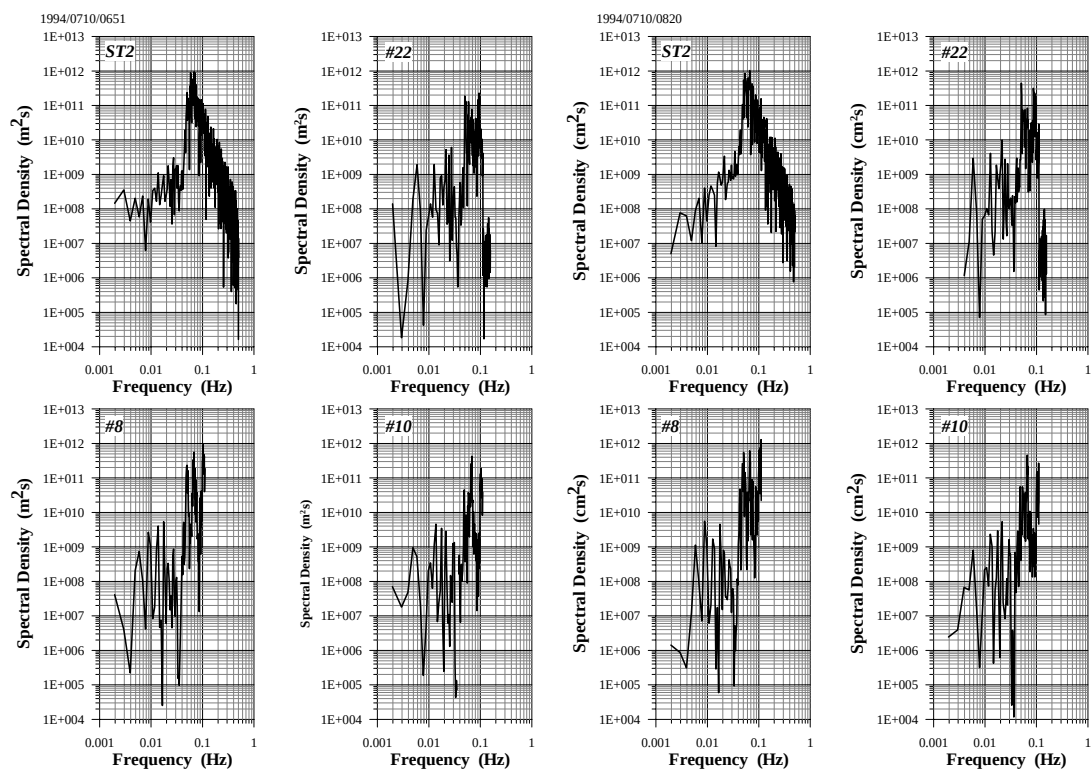
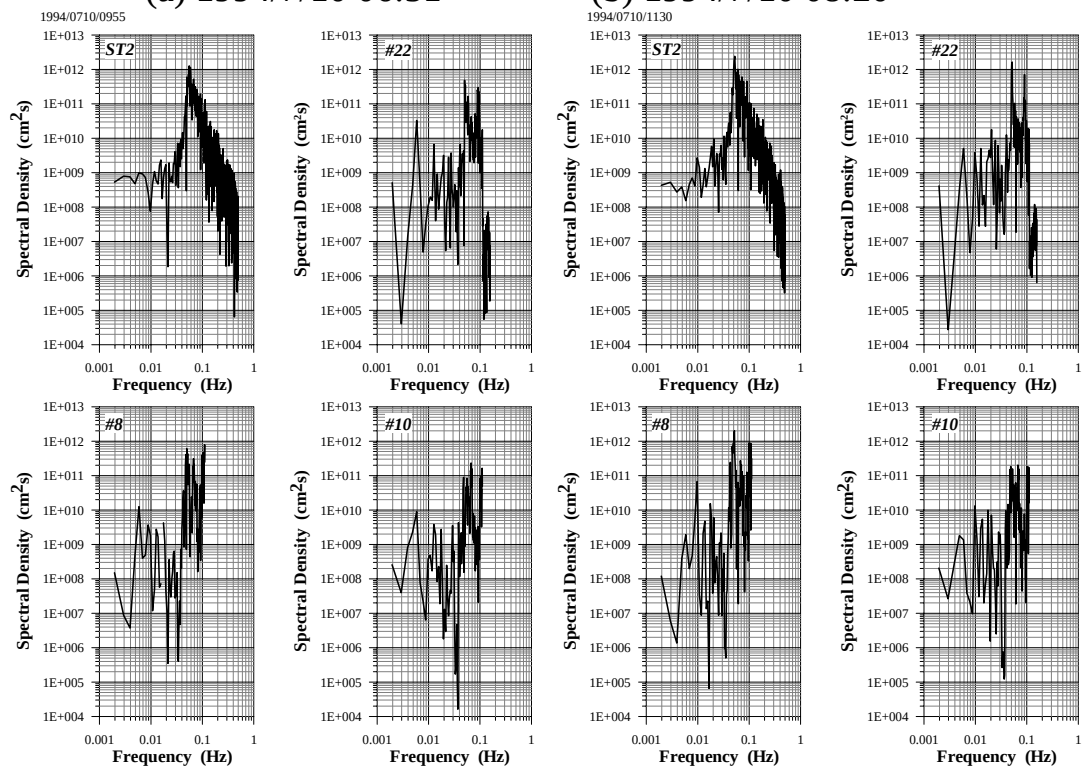


圖 4.33 提姆颱風(1994)行進路徑圖



(a) 1994/7/10 06:51

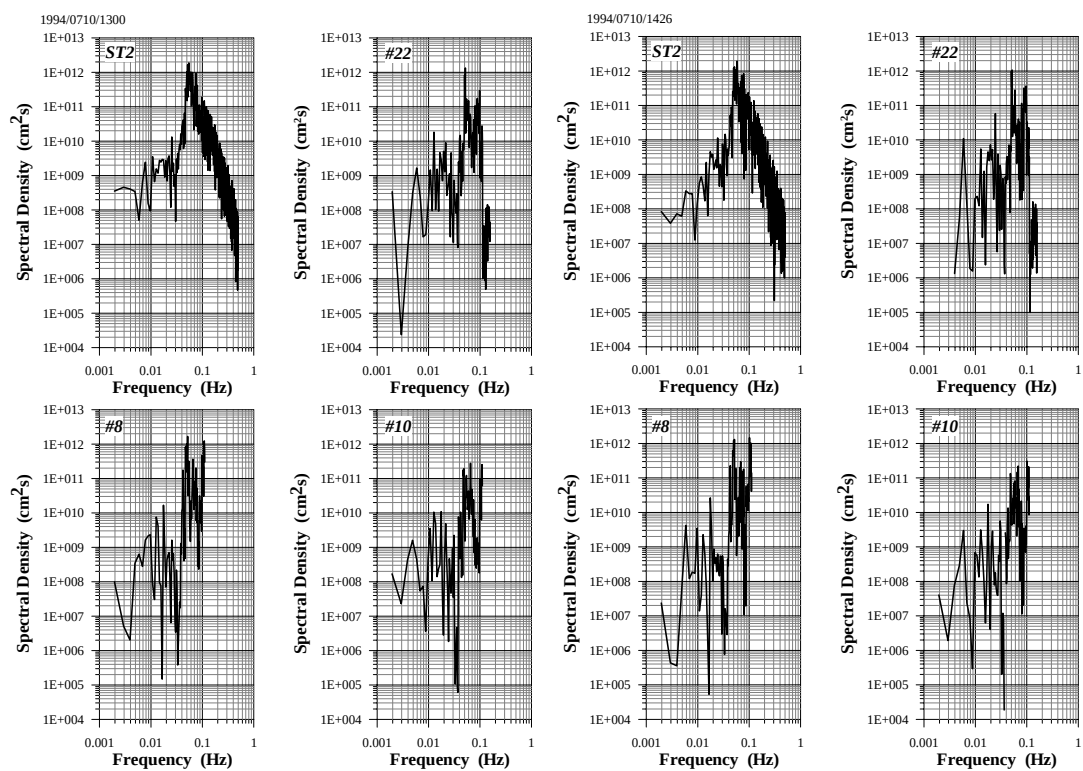
(b) 1994/7/10 08:20



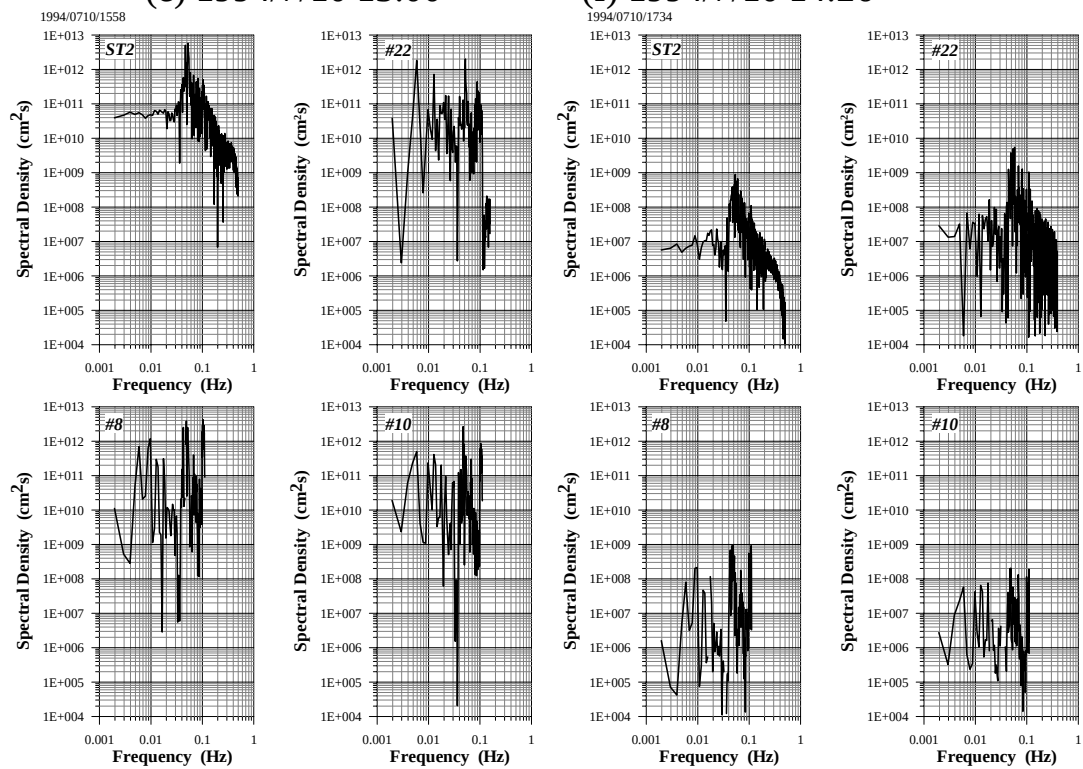
(c) 1994/7/10 09:55

(d) 1994/7/10 11:30

圖 4.34 提姆颱風(1994)過境時花蓮港港灣波動之模擬



(f) 1994/7/10 14:26



(h) 1994/7/10 17:34

圖 4.34(續) 提姆颱風(1994)過境時花蓮港港灣波動之模擬

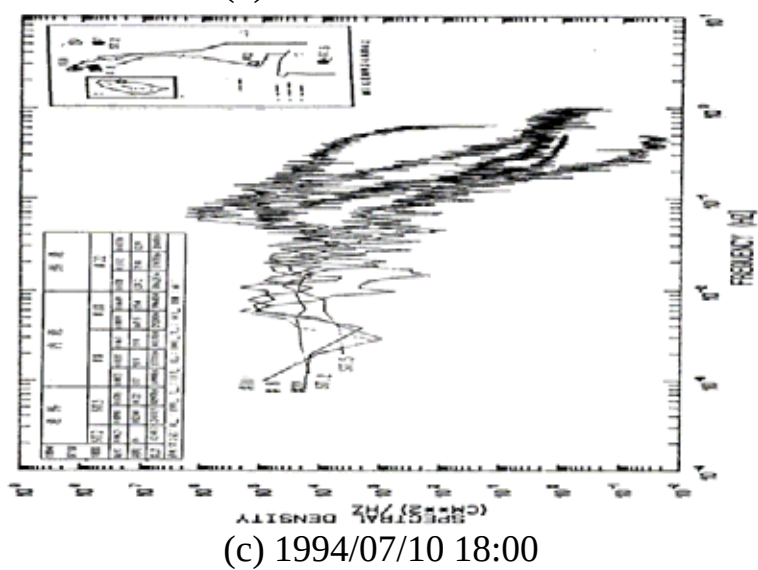
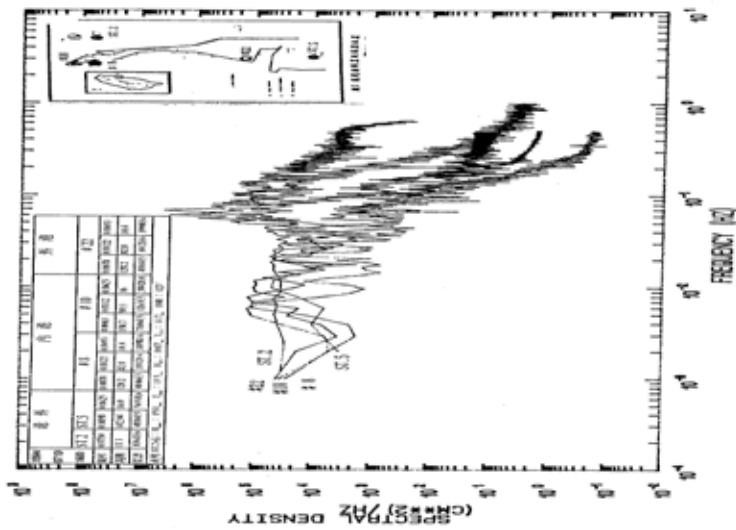
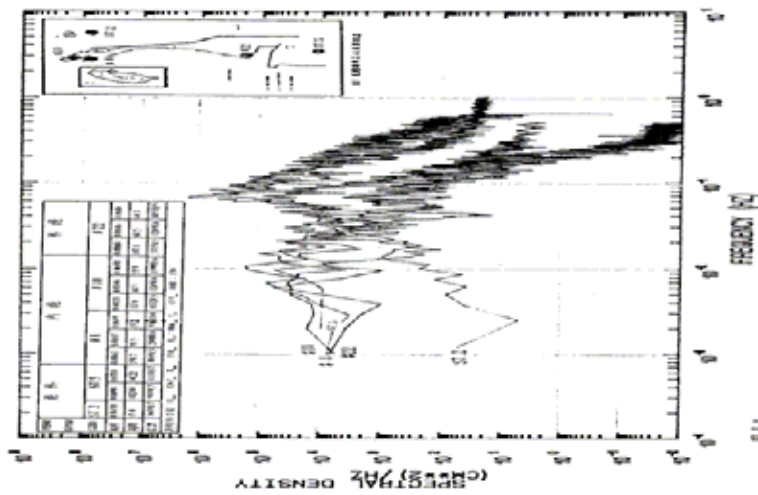


圖 4.35 提姆颱風(1994)過境時花蓮港實測頻譜

4.5.2 2005 年龍王(Longwang)颱風

本節以2005年龍王颱風期間，在花蓮港港口附近的觀測波浪資料進行實測波譜的模擬，圖4.36為龍王颱風的行進路徑圖，圖4.37為花蓮港的波浪觀測站位置示意圖。圖4.38中依序分別為外海測站(#6)、測站1(#10)、測站3(#12)、測站4(#14)、測站6(#16)、測站7(#17)及、測站8(#18)，括號內之數字為波高計之編號。從圖中的頻譜變化可以發現在主頻附近的數值模擬頻譜與實測頻譜趨勢相近，但是低頻部分有偏低的情形，反之高頻部分有偏高的情形，究其原因應是在數值模擬中無法完全反應港灣構造物的反射率係隨著波動週期而變的事實，目前多以定值方式考慮岸壁的反射率(本研究假設港內反射率均為1，而外海防波堤處為0.8，南北濱海灘為0.5)。但由於非定值反射率的特性目前無法得知，未來需再進行進一步之研究。

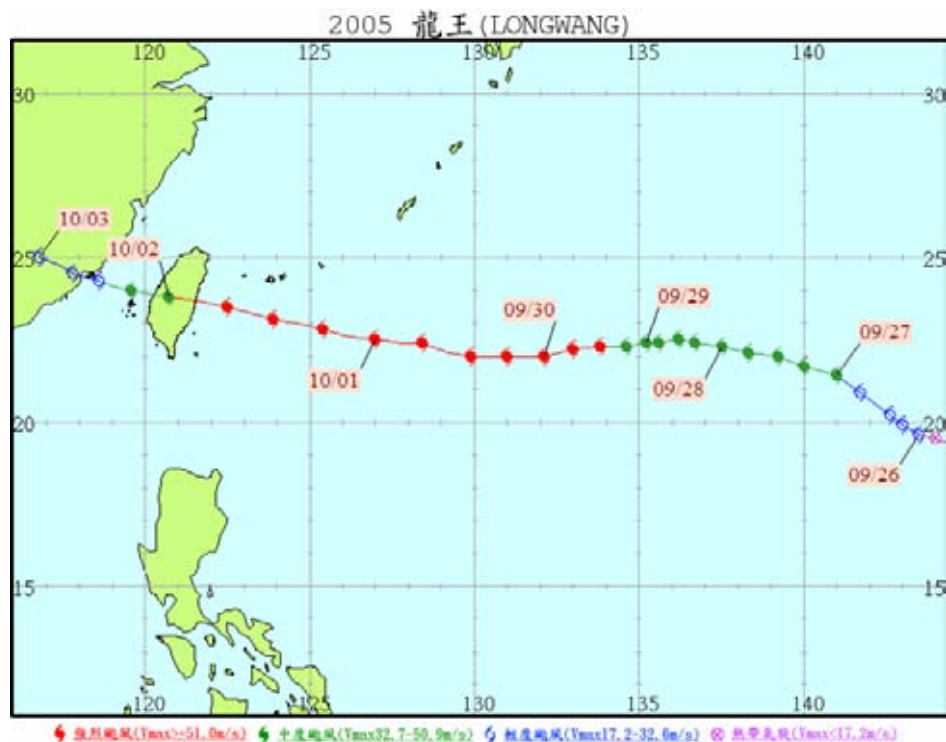
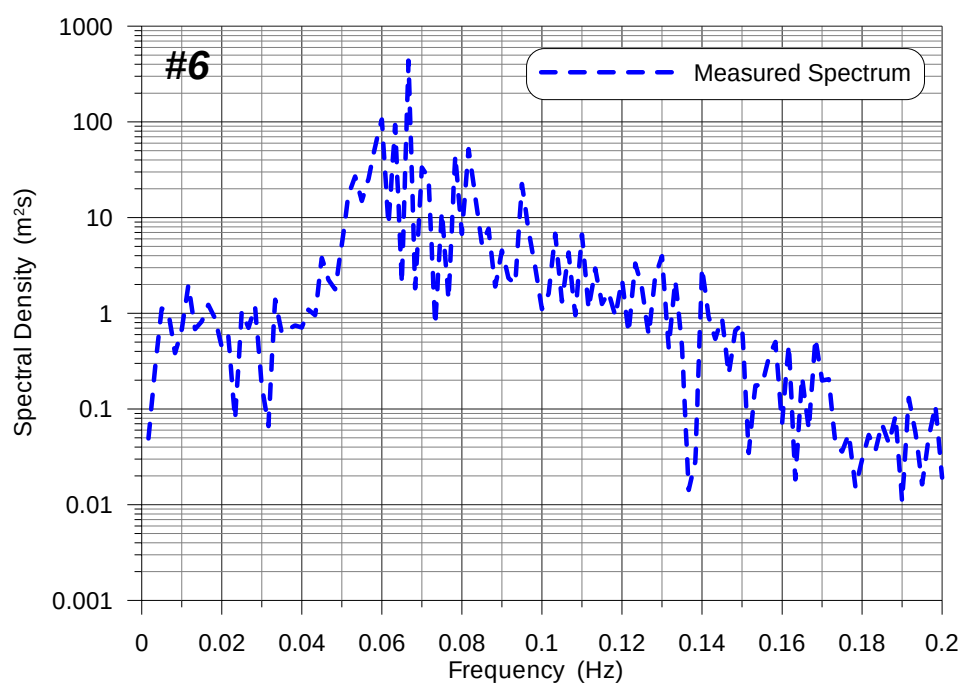


圖 4.36 2005 年龍王颱風路徑圖(2005/09/29-2005/10/03)

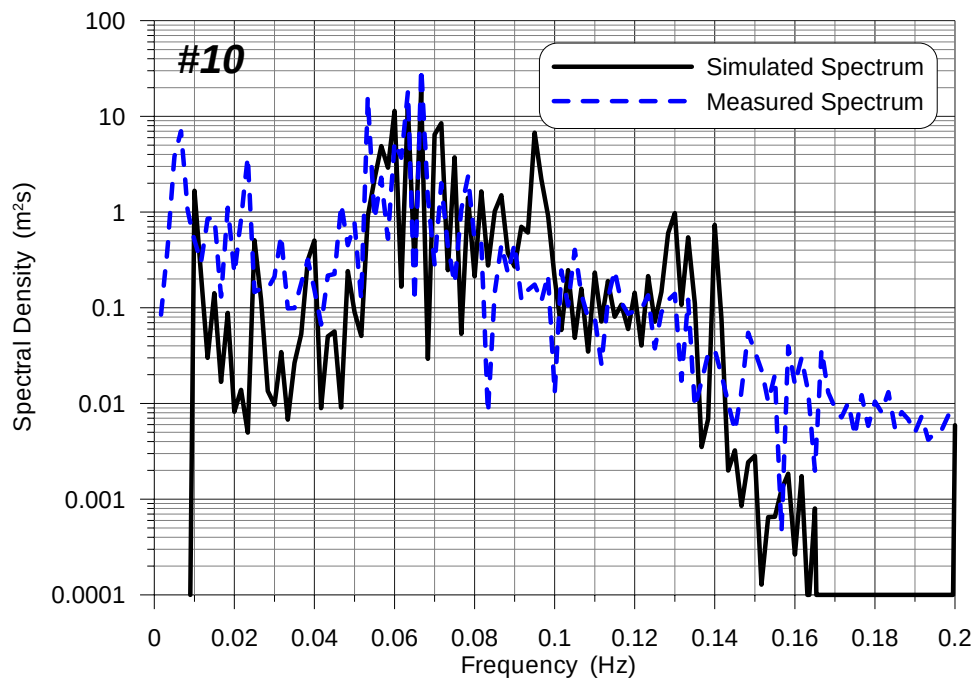


圖 4.37 花蓮港區海域波浪儀儀器架安裝位置

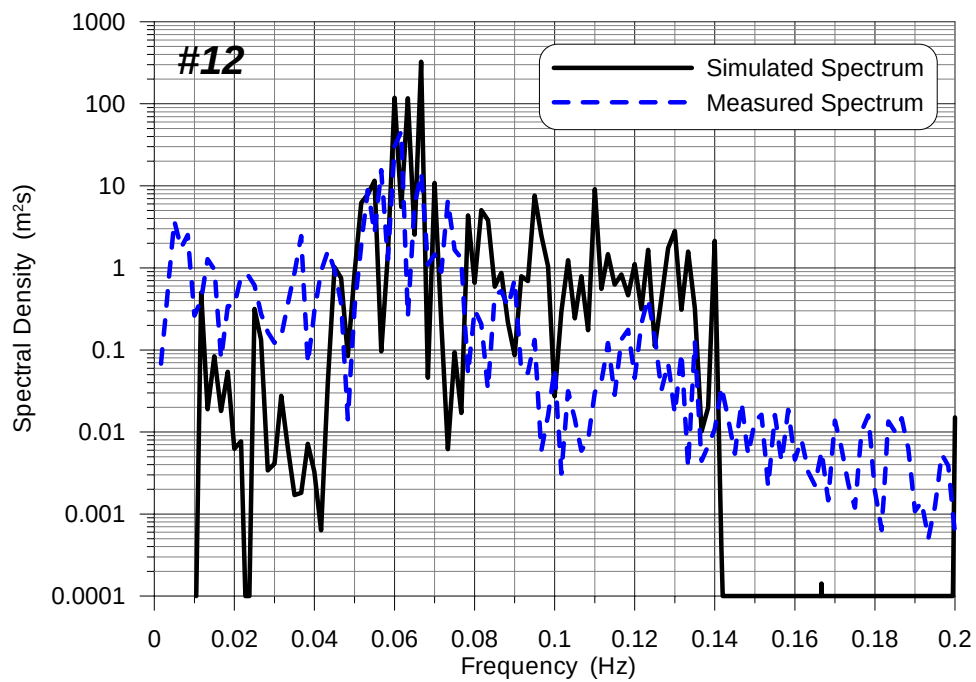


(a)港口入口處測站入射波頻譜圖

圖 4.38 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜

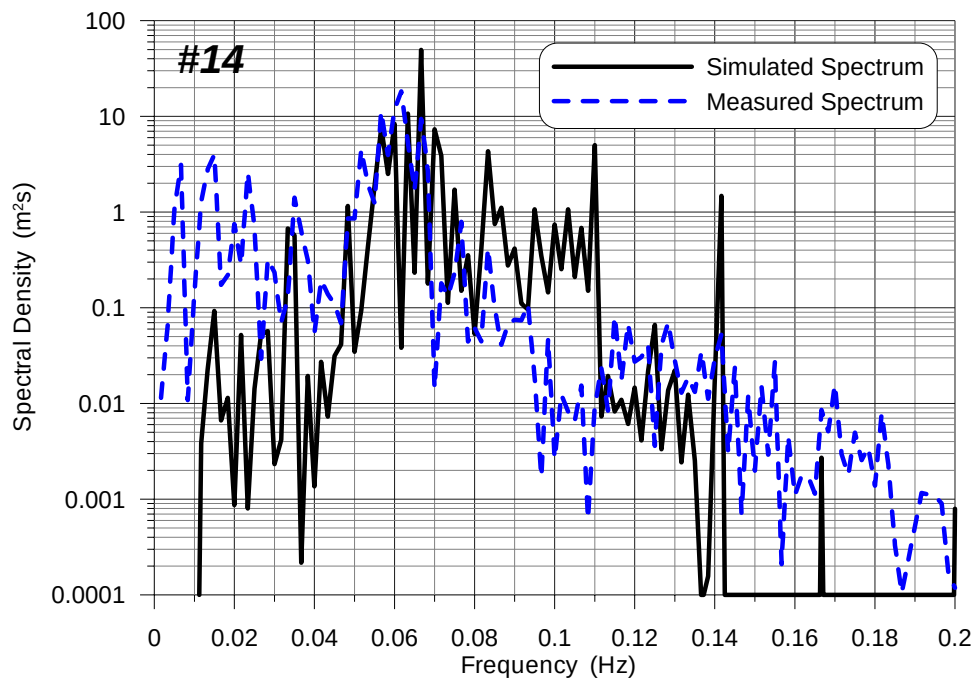


(b) 港內測站 1

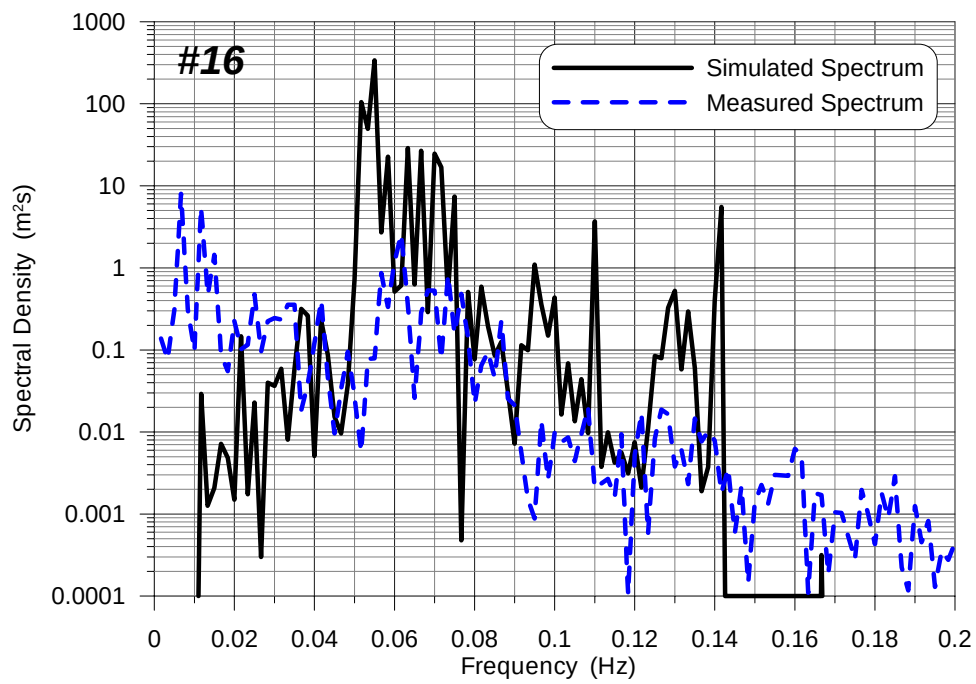


(c) 港內測站 3

圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜

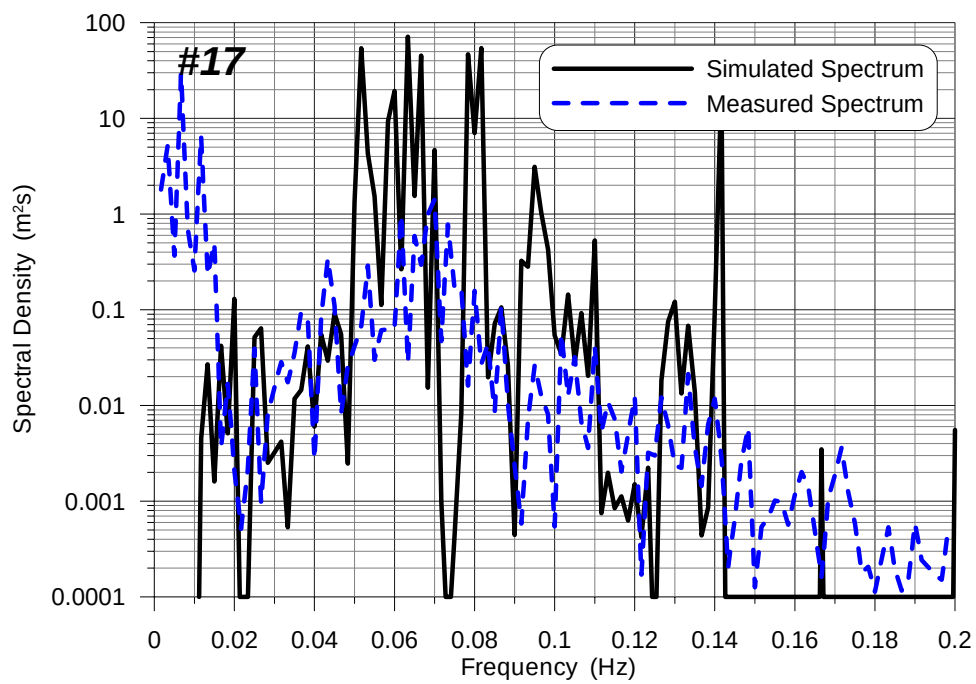


(d) 港內測站 4

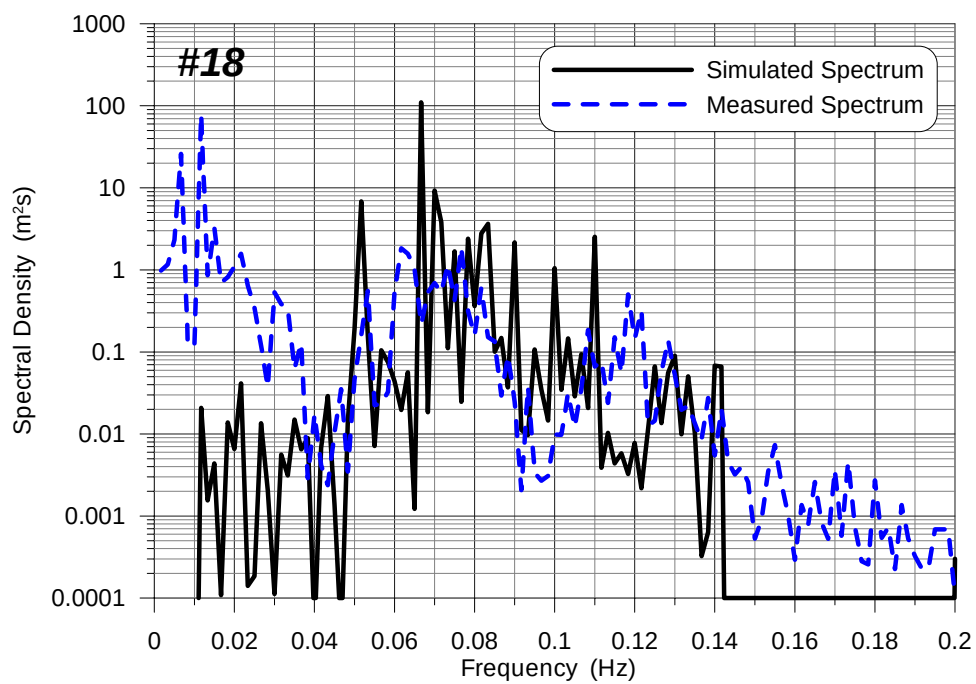


(e) 港內測站 6

圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜



(f) 港內測站 7



(g) 港內測站 8

圖 4.38(續) 龍王颱風 2005/10/01 18:00 之數值模擬與實測頻譜比較

4.6 花蓮港港灣波動預報模式的建置研究

港灣附近的波動情形，尤其是港內水面的穩靜度，通常是港灣規劃設計中，以及港灣營運管理中主要考量及評估的因子之一。在規劃設計時評估港灣附近波動情形的方法通常有數值模擬及水工模型試驗。但需要注意的是，用來試驗的波浪通常是從過去的歷史波動資料經過統計分析得來，其中可能有部分是從現場觀測而得，大部分則來自於推算結果。而在營運管理上。波浪的預報則只能從海氣象的觀測或預報資料來進行經驗的判斷。

在臺灣附近，由於地理環境特殊，往往在冬季東北季風盛行與夏季的颱風時期都可能在附近海域引起較大波浪並進而影響港內的穩靜度。因此，不論是在規劃設計或是營運管理上，都有必要充分瞭解及掌控港灣附近的海氣象變化。

為了加強港灣附近波浪預報的能力，以支援港灣的規劃設計或是營運管理，本研究結合了由交通部運輸研究所發展的TaiCOMS模式及Lin (1995)的有限/無限元素法港灣波動數值模式，建構一港灣波動預報模式。該模式係由一層WAM(WAvemodel)、兩層SWAN(Simulating Wave Nearshore)及港灣波動模式所結合而成。透過此一模式，我們可以藉由預報的西北太平洋預報風場代入WAM模式進行大域風波推算，及臺灣附近水域的預報風場代入兩層的SWAN模式進行近域的風波推算，然後藉由內層SWAN所計算而得的不規則入射波進行港灣的波動模擬。藉由此一模式的建立使得港灣附近的波動情形成為是可預報的，有助於前述的港灣規劃設計或是營運管理上的參考。在本研究中，我們首先敘述模式建立的過程，其後並以花蓮港在2005年龍王颱風時的波動模擬作為範例。

4.6.1 港灣波動預報模式的整合

港灣的波動預報模式的建立，其主要目標是將港灣波動的數值模

擬計算納入大範圍的海象波浪預報系統中。依據林(2004)的研究，其概念模式如圖4.39所示，整個系統是由近海波浪推算系統(如中央氣象局海象中心的近海波浪預報系統)再加上一個港灣波浪折繞射數值模擬程式所組成。在近海波浪預報系統可以由遠域的NWW3波浪推算，逐漸推進到近海的SWAN波浪推算，再透過邊界面的銜接，將SWAN所計算在相接邊界面上對應到折繞射模式所建立的節點的波動值引入折繞射模式中作為入射波條件，如此便可進行港內的波動折繞射。因此，一旦外海的波浪推算有了結果，引入港灣的波浪折繞射系統，進行港內的穩靜度計算，而構成一完整的港灣波動預報系統。如果外海的波浪推算是與中央氣象局的近海波浪預報相連接，則此一預報系統可以配合中央氣象局的海象預報，進行港口附近的波浪在受到折繞射效應後的波動情形的模擬，並建立評估與預報的機制。另外也可以加強港灣技術研究中心的「臺灣環島海象預報系統」中各商港的穩靜度推算。

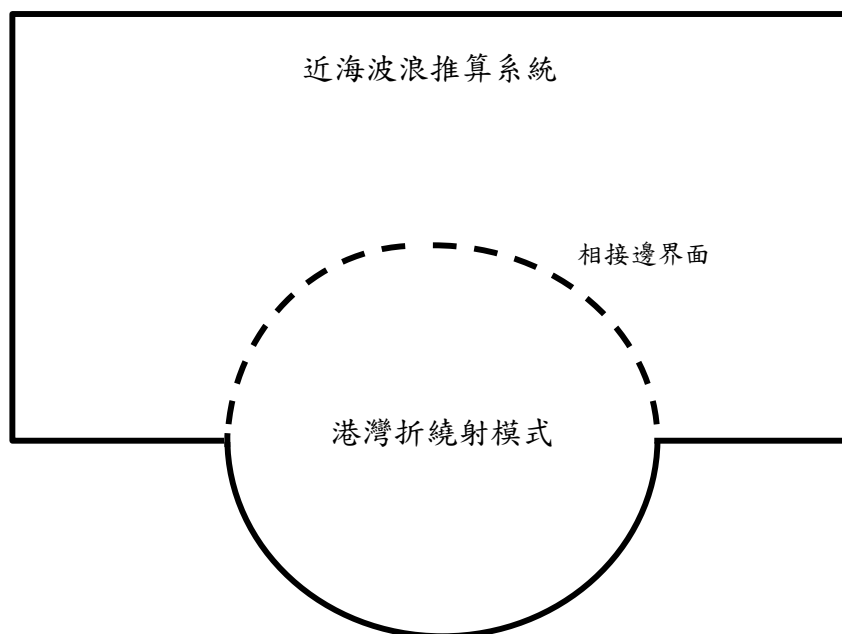


圖 4.39 港灣波浪預報的概念模式

4.6.2 TaiComs 波浪預報模式

臺灣海岸作業模式系統(TaiComs，Taiwan Coastal Operational modeling system)是目前我國已經在作業的風波預報系統之一，由交

通運輸研究所港灣技術研究中心為提高臺灣水域船舶航行安全而發展的模式。如圖4.40所示，該系統結合了一層WAM遠域風波推算及一層SWAN近域風波推算，表4.1中也顯示了它們的作業範圍及空間解析度。

使用的風場係來自中央氣象局，如圖4.41所示，中央氣象局共可以提供三種數值風場 RC、MC及HC，此三個風場分別涵蓋不同大小的區域，網格解析度也不同，依序為 $0.45^{\circ} \times 0.45^{\circ}$ 、 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 及 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。水深地形資料係分別取自於美國海洋大氣總署國家地理資料中心所建立的ETOPO5(網格解析度為 $5' \times 5'$)及國家海洋科學研究中心所建立的TaiDBMv5(網格解析度為 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$)。

表 4.1 TaiComs 模式系統中各計算領域的相關資料

範圍	使用模式	計算範圍	網格大小	使用風場
遠域	WAM	Lat.: $10^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ Lon.: $110^{\circ}\text{E} \sim 134^{\circ}\text{E}$	$0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$	RC
近域	SWAN	Lat.: $21^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$ Lon.: $119^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$	$0.04^{\circ} \times 0.04^{\circ}$	MC

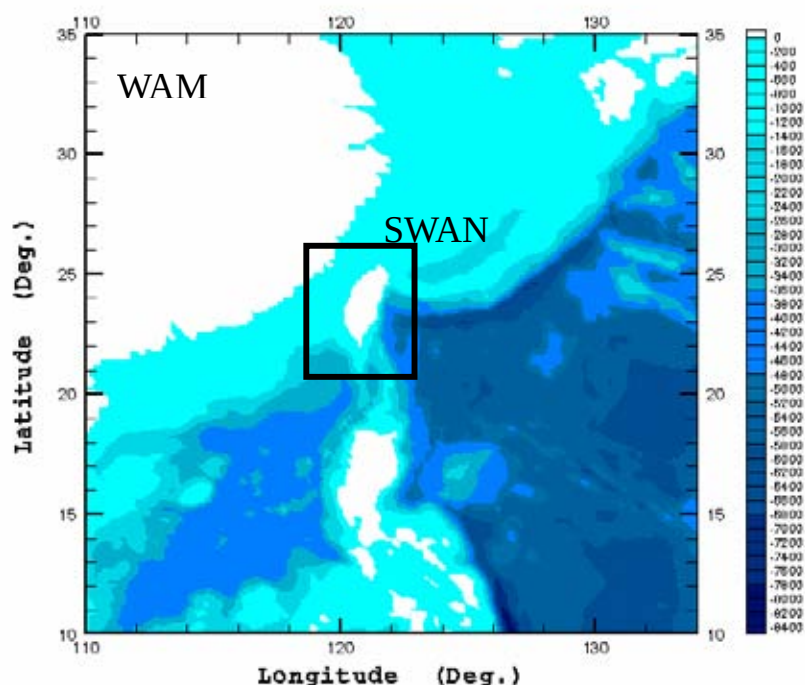


圖 4.40 TaiComs 模式系統中各計算領域範圍及水深地形

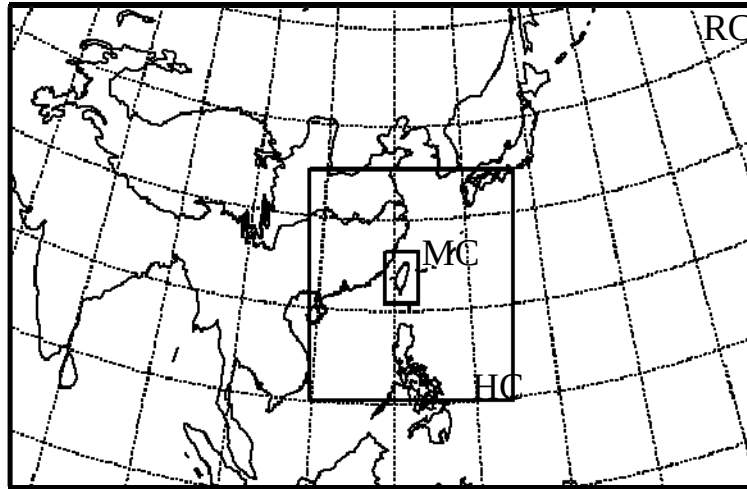


圖 4.41 RC/MC/HC 風場的計算範圍

4.6.3 入射波的傳播與變形

為了考慮外海底床坡度對港池水面波動數值模擬的影響，林(1995)對於上節所建立的數值模式中屬於已知資料的入射波條件，增加了波浪自外海向岸傳播時的追蹤與計算。Snell法則被用來計算波浪的行進方向，而能量守恒法則則被用來計算在不同水深處的波高變化。此外，該模式也追蹤了波浪延波向線上的相位變化。相似的方法也用在追蹤反射波的波高、波向與相位的變化。所有有關入射波與反射波的計算均追蹤到邊界面 Γ_2 上的各個節點處。通常，對於海岸的消波能力常以一反射係數 K_R 來表示，因此各節點處的速度勢 ϕ_0 可表示為 $\phi_0 = \phi_i + K_R \phi_r$ 。本研究中，入射波部分則直接引入第二層SWAN在假想邊界面 Γ_2 上的各個節點處的計算頻譜。

4.6.4 風波推算模式與港灣波動模式的結合

整個港灣波動預報模式的建置最重要的關鍵點是在於如何連接近海波浪預報模式以及港灣波動數值模式，也就是說如何在相接邊界面上取得資料的連續。由於近海波浪預報模式(SWAN)是採用波浪作用力

平衡方程式 (wave action balance equation) 或是沒有流作用下的能量平衡方程式，以及源流與沉流(source and sink)，基本上它是一個以能量平衡為控制方程式的數值模式，而因此導致計算的結果中失去了波動的相位資訊，相關的資料輸出可以是

1. 指定點的示性波高、平均週期、主波方向或平均方向
2. 一維頻譜與主要方向
3. 方向波譜

本研究所使用的港灣波動數值模式是屬於緩坡度方程式，主要以水位變化(速度勢 ϕ)為控制方程式，在計算時必須知道入射波動的波高、週期、方向及相位，還有其週期是單一週期。再者，雖然近海波浪預報模式可以輸出各指定點的示性波高、平均週期與主要波向，但波高及週期都是由頻譜透過頻譜距換算而得的，此種計算方式導致各點的波浪平均週期皆不一樣，因此無法將代表波高、週期與波向直接代入波動模式內進行規則波的模擬。

為了能引入近海波浪預報模式的入射波浪資料，本研究採取了兩個步驟：

1. 進行參考相位的假設，在港灣的入口處設置座標原點並假設各個入射波到達該點的相位為零，而以相接邊界面上各節點到原點的距離計算各節點上入射波動的相對相位。
2. 發展一維(單方向)不規則波的港灣波動數值模式，引入近海波浪預報模式的一維頻譜，將各分頻視為規則成份波，而各分頻的能量可換算成波高，而各節點的主波方向則視為因為地形產生折射後的入射波浪方向。

有關入射波相位的測試本研究以部分開口矩形港池模型進行了

1. 假設假想邊界面上各節點之入射波到達原點之相位為定值，其間共測試了不同的到達相位($0:2\pi$ ，以 $\pi/16$ 為間距)，共 32 組。
2. 假設假想邊界面上各節點之入射波到達原點之相位為隨機定值，其間共測試了 100 組隨機相位。

圖 4.42 為部分開口矩形港池模型的水深分佈(港內為等水深；港外底床有坡度)及施測點的位置，圖 4.43(a)為定值相位的測試結果，縱軸為 K_D 值，橫軸為以 $\pi/16$ 為間距之相位差值，圖 4.43(b)為隨機相位的測試結果，縱軸為 K_D 值，橫軸為測試組別。僅有部分隨機相位的測試可能造成數值計算上的誤差外，其他測試組合都顯示可以得到同樣的數值結果，由此推論入射波的相位差不影響定常的港灣波動模擬

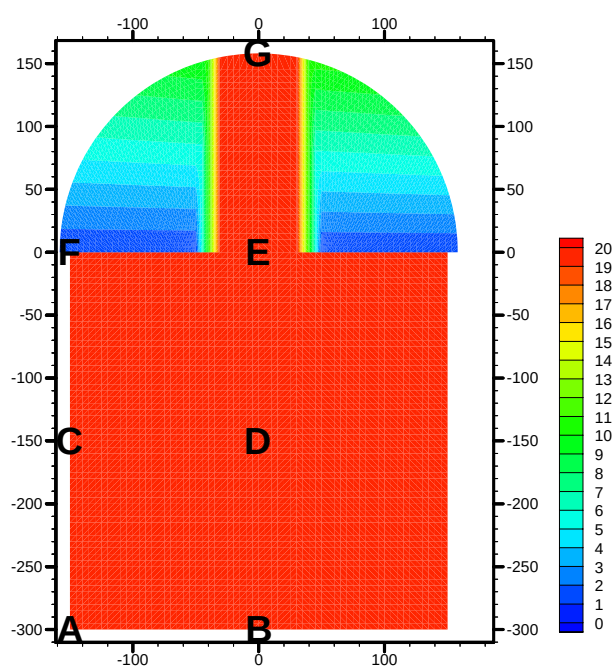
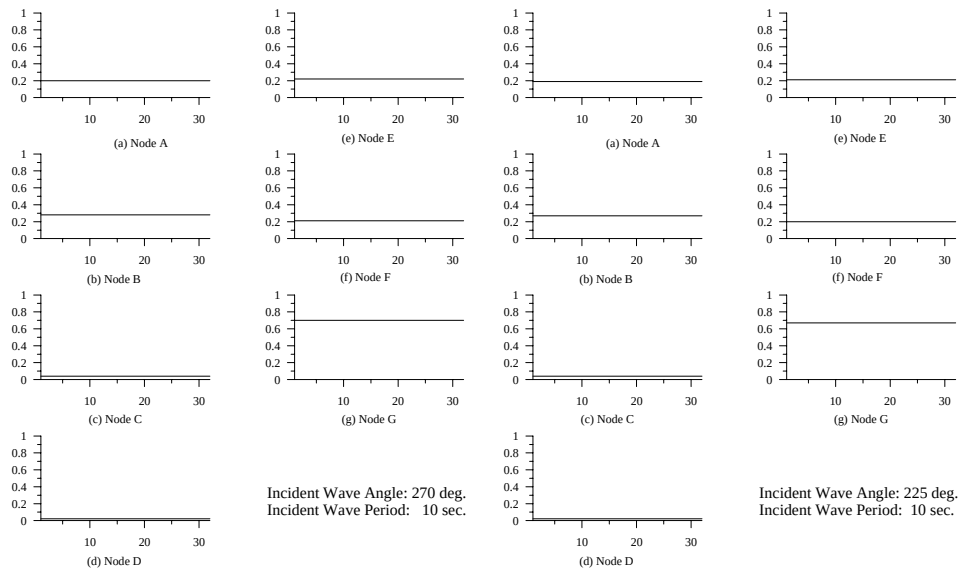
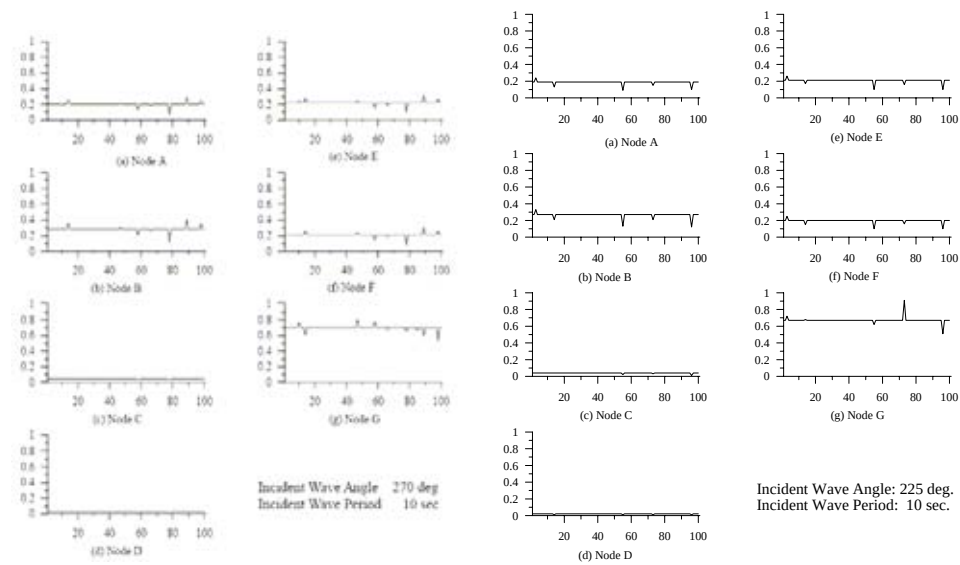


圖 4.42 相位測試的部分開口矩形港池水深分佈以及施測點位置



(a) 定值相位



(b) 隨機相位

圖 4.43 相位測試的結果

註：圖(a)之縱軸為 K_D 值，橫軸相位差值，單位相位為 $\pi/16$ 。圖(b)之縱軸為 K_D 值，橫軸隨機相位測試組數

而由於一般港灣波動計算模式所採用的網格尺寸多在20公尺以下，此與風波推算模式所使用的 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ (遠域)或 $0.04^{\circ} \times 0.04^{\circ}$ (近域)的網格有太大的差異，而且假想邊界面 Γ_2 的半徑也大致在1.5至2公里之間，網格大小的差異已經導致假想邊界面 Γ_2 上的各節點可能因為距離陸界節點較近而無法取得波浪資料以致造成計算上的誤差。為了能改善此一問題，本研究在TaiComs模式及港灣波動模式之間增加了一層SWAN的近岸風波推算，相關資料如表4.2所示。

表 4.2 港灣波動預報模式中各計算領域的相關資料

範圍	使用模式	計算範圍	網格大小	使用風場
遠域(W1)	WAM	Lat.: $10^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ Lon.: $110^{\circ}\text{E} \sim 134^{\circ}\text{E}$	$0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$	RC
近域(S2)	SWAN	Lat.: $21^{\circ}\text{N} \sim 26^{\circ}\text{N}$ Lon.: $119^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$	$0.04^{\circ} \times 0.04^{\circ}$	MC
近域(S3)	SWAN	Lat.: $23.9^{\circ}\text{N} \sim 24^{\circ}\text{N}$ Lon.: $121.6^{\circ}\text{E} \sim 121.65^{\circ}\text{E}$	$0.001^{\circ} \times 0.001^{\circ}$	MC

4.6.5 港灣波動的模擬計算

藉由對近海波浪預報模式的資料的選擇各點的一維波譜與主波方向，以及相對相位的假設，我們可以用規則波的方式進行各成份波所引起港灣波動，最後再以能量比例的方式進行能量線性疊加而得到港內各點的不規則波有效增幅係數值 $(K_D)_{eff}$ ，Goda(1985)建議的計算公式如下所示

$$(K_D)_{eff} = \left[\frac{1}{m_0} \int_0^{\infty} S(f) K_D^2(f) df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4.38)$$

其中， $S_0(f)$ 是入射波的頻率譜； $K_D(f)$ 是各分頻成份波所引致計算水域某一點的增幅係數值(該點波高與入射波高的比值)； $(K_D)_{eff}$ 是不規則波作用下的有效增幅係數值。

為了瞭解此種組合的可行性，本研究以2005/9/29至2005/10/3的龍王颱風風場進行花蓮港港灣波動的推算模擬(路徑圖如圖4.36所示)。圖

4.44及圖4.45為2005/10/1 12:00的RC及MC風場分佈；圖4.46為WAM遠域風浪的等值線圖；圖4.47為花蓮港附近水域的 $(K_D)_{eff}$ 分佈圖。

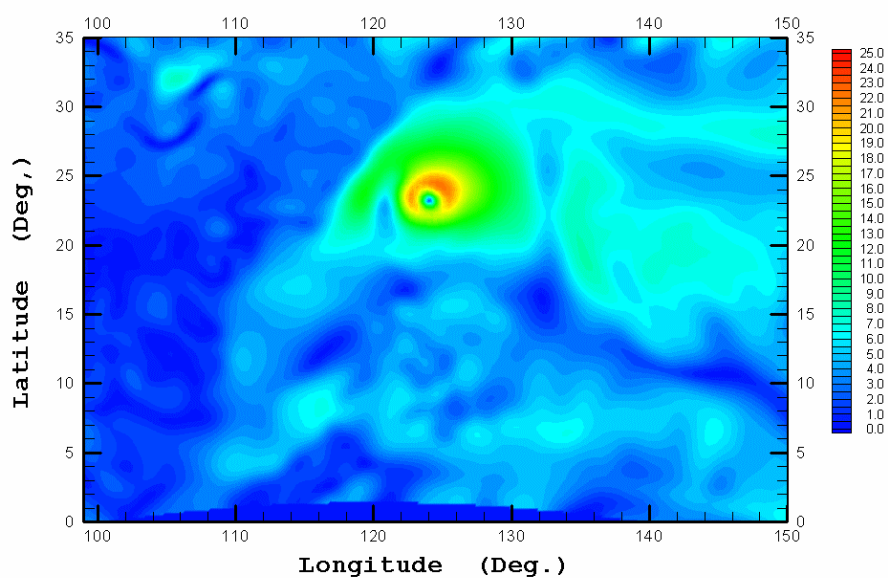


圖 4.44 RC 風場(2005/10/01 12:00)

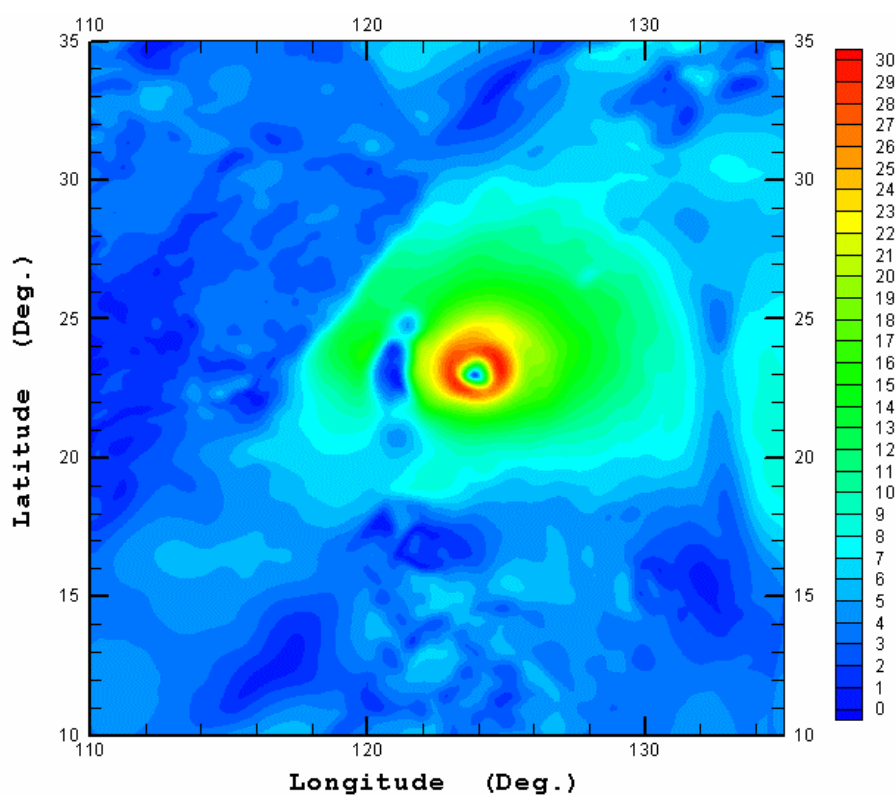


圖 4.45 MC 風場(2005/10/01 12:00)

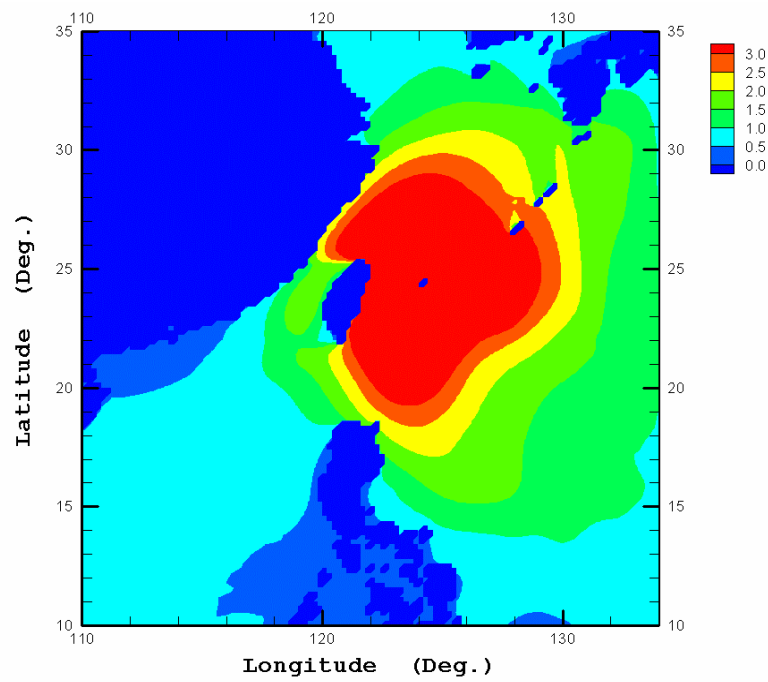


圖 4.46 WAM 遠域波場(2005/10/01 12:00)

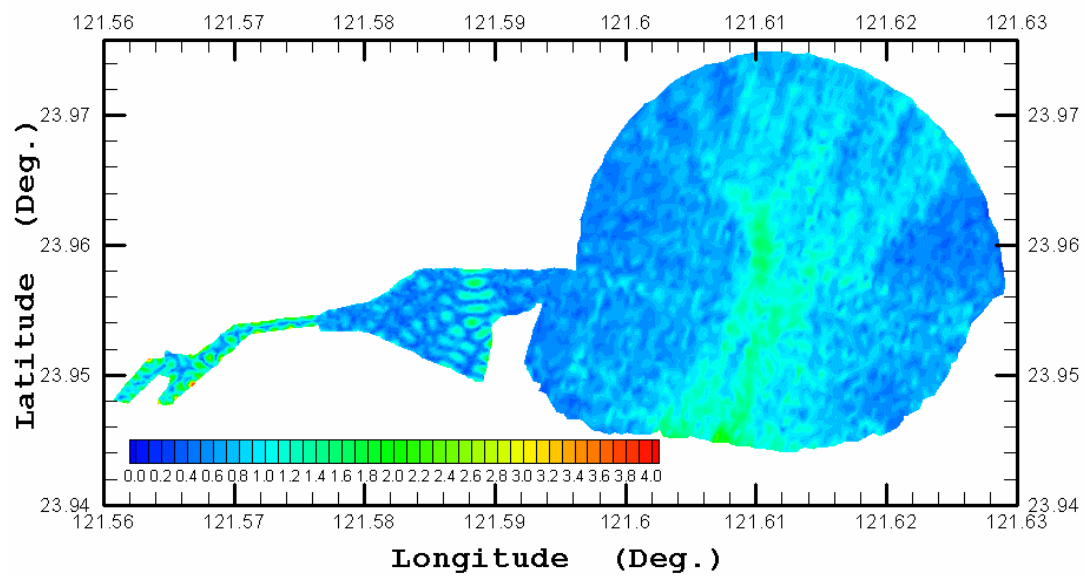


圖 4.47 花蓮港附近的波高增幅係數 $(K_D)_{eff}$ 分佈圖(2005/10/01 12:00)

4.6.7 波浪預報模式建置的檢討

綜合以上的試驗，可以得到以下幾點結論：

1. 港灣波動數值模式可以透過不規則波的波動模擬方式，與近海波浪預報模式相結合，並構成一港灣波浪預報系統。只要相關單位提供近海波浪預報及風場資料，便可啟動本預報系統。
2. 近海波浪預報的資料可以透過相接邊界面上各節點的一維或二維頻譜提供港灣波動數值模式入射波的條件。本研究目前採用一維頻譜進行模擬。
3. 港灣波動模式將輸入頻譜之各成份波之波高、週期及方向視為規則波分別進行數值模擬。最後以能量加總的方式得到不規則波的增幅係數 $(K_D)_{eff}$ 分布。
4. 由於港灣波動模式也可以模擬海岸結構物後方的波浪繞射情形，因此不論是島嶼附近或人工構造物附近的波動都可以模擬。
5. 本研究所使用的電腦是個人電腦(Intel Core 2 Duo CPU E6550 @ 2.33GHz with 2.33GHz 3 GB RAM)及 Microsoft XP 作業系統而每一個時間步驟均是以 23 個規則成分波組成的不規則波模擬，因此其計算時間相當冗長。平均每一個預報時間點的港灣波動計算約需要 1 個小時的計算時間。未來應考慮採用更高速的平行電腦來運算。由於相當耗時，目前本模式用來做預報工作的話，可能還不恰當，但是如果用在波浪的追算方面則相當適合。不過，本研究亦嘗試以雙 CPU 之 Linux 系統與 Intel Fortran 進行港灣波動的模擬，平均一個波浪條件約僅需要 55 秒，如以 23 個成分波計算則一個預報時間點的港灣波動計算時間大約可以減少一半，顯示未來有機會從硬體的提升上來改善計算的時間。

第五章 港池共振改善方案可行性評估

5.1 水工模型試驗成果的回顧

為了改善花蓮港港池共振的情形，本計畫回顧本所過去進行的三個大規模的水工模型試驗：

1. 『花蓮港港灣設施改善計畫之研究—2. 模型試驗』(簡及邱，1996)
2. 『花蓮港整體規劃及未來發展計畫—長浪及漂砂防制研究 2. 防波堤堤線配置平面試驗』(簡等人，1997)
3. 『花蓮港商漁分道與港池穩靜水工模型試驗研究—水工模型試驗報告』(邱等人，2000)

這三個試驗都是在本中心的第二試驗場進行的，該試驗場的平面水槽長62公尺、寬57公尺、深1公尺，1996的試驗是使用丹麥水工所(DHI)製作的可移動不規則推移式造波機。而1997及2000的試驗則是使用由加拿大Davis工程有限公司負責設計與製作之可移動不規則推移式造波機，並安裝由加拿大國家研究委員會(NRC)的加拿大水力中心(CHC)所研發之造波控制及分析軟體。以下分別摘要各個計畫的模型配置與研究成果。

5.1.1 『花蓮港港灣設施改善計畫之研究—2. 模型試驗』

本試驗的範圍北起花蓮港七號碼頭，南至南濱海岸吉安溪出口南側500公尺，水深則至50公尺。模型縮尺採不等比，水平縮尺為1/150，垂直縮尺為1/100，並採用福祿數(Froude number)控制各項縮尺比例。試驗的配置一共有5種，其配置的差異性說明如表5.1所示，圖5.1所示為五種配置方案以及波高測點的位置圖(為便於與其他兩個試驗區分及反應原有編號，各方案以1A、1B、1C、1D及1E表示)，試驗造波條件

如表5.2，主要以S、SSE及SE等三個入射波方向及1990年6月歐菲莉颱風的三組實測波浪，並採用JONSWAP理論頻譜模擬不規則之試驗波浪。圖5.1(f)顯示港內及港外共佈放20支容量式波高計，並在#8碼頭及內航道處佈放2支電磁式流速計。

就整體性波浪遮蔽效果而言，各佈置從優到劣依序為方案1C→方案1D及1E→方案1B→方案1A。入射波向則以SE較佳、S最差，但差異性不大。就長週期波的抑制效果而言，外港區以方案1C較差，其他方案則相近。但對於內港區而言，則方案1C、1D及1E都有顯著效果。就長週期水位變動的分析來說，除了內港區的測點9在方案1C、1D及1E中有降低長週期波之波高及週期的效果，其他測點(27、28及29)的效果均不彰，甚至有負面的效果。而且此一現象不因入射波向的不同而異。從波譜分析的結果，方案1A的內外港區波浪頻譜形態顯示該佈置可以確切重現花蓮港的目前波動特性。長週期成份波進入港池後的能量放大現象內港區較外港區為大，反應出花蓮港現有的港池以內港區較易發生長週期的不穩靜現象。內港區長週期的能量降低情形以方案1C、1D及1E較佳，其中方案1E在SE波向時效果最顯著。外港區長週期的能量降低情形在S及SSE波向時，各方案的效果均不明顯；在SE波向時，以方案1D及1E有正面的效果，其中又以方案1E為佳，也就是拆除舊東堤及部份新東堤，並在外海側水深10~18公尺處配置新防波堤，並於南濱海岸，吉安溪出口以北，設置一垂直海岸長度600公尺的拋石潛堤，堤頭水深約18公尺。該方案不僅可以有效地改善內港區的不穩靜情形，也可以解決舊東堤的年久失修的問題。從各圖中都可發現由於新的開口通道分散了部份由外港區進入內港區的能量，內港區水域的波動有明顯改善的情形，但是對於外港區的不穩靜情形則無多大改善。

表 5.1 各配置方案的差異比較

方案	說 明
1A	目前花蓮港的現況，作為預備試驗及比對之用
1B	於南濱海岸，吉安溪出口以北，設置一垂直海岸長度 600 公尺的拋石潛堤，堤頭水深約 18 公尺
1C	延續方案 1B 拆除新東堤南—北向段約 500 公尺， 向東北延長東北—西南向堤約 750 公尺
1D	延續方案 1C 東堤再往南延伸 800 公尺
1E	延續方案 1B 拆除舊東堤及部份新東堤 在外海側水深 10~18 公尺處配置新防波堤

表 5.2 JONSWAP 頻譜試驗波浪條件

造波條件	編號	模型		原型	
		H1/3 (cm)	T1/3 (sec)	H1/3 (m)	T1/3 (sec)
實測波浪	A	3.44	1.10	5.16	13.47
	B	6.10	1.11	9.15	13.59
	C	6.82	1.25	10.23	15.31
JONSWAP 理論波浪	1	6.90	1.27	10.35	15.55
	2	5.36	1.27	8.03	15.55
	3	3.49	1.24	5.24	15.19
	4	5.20	1.07	7.80	13.10
	5	3.76	1.06	5.64	12.98
	6	2.67	1.07	4.01	13.10
	7	3.92	0.86	5.88	10.53
	8	2.78	0.85	4.17	10.41
	9	1.57	0.84	2.36	10.29

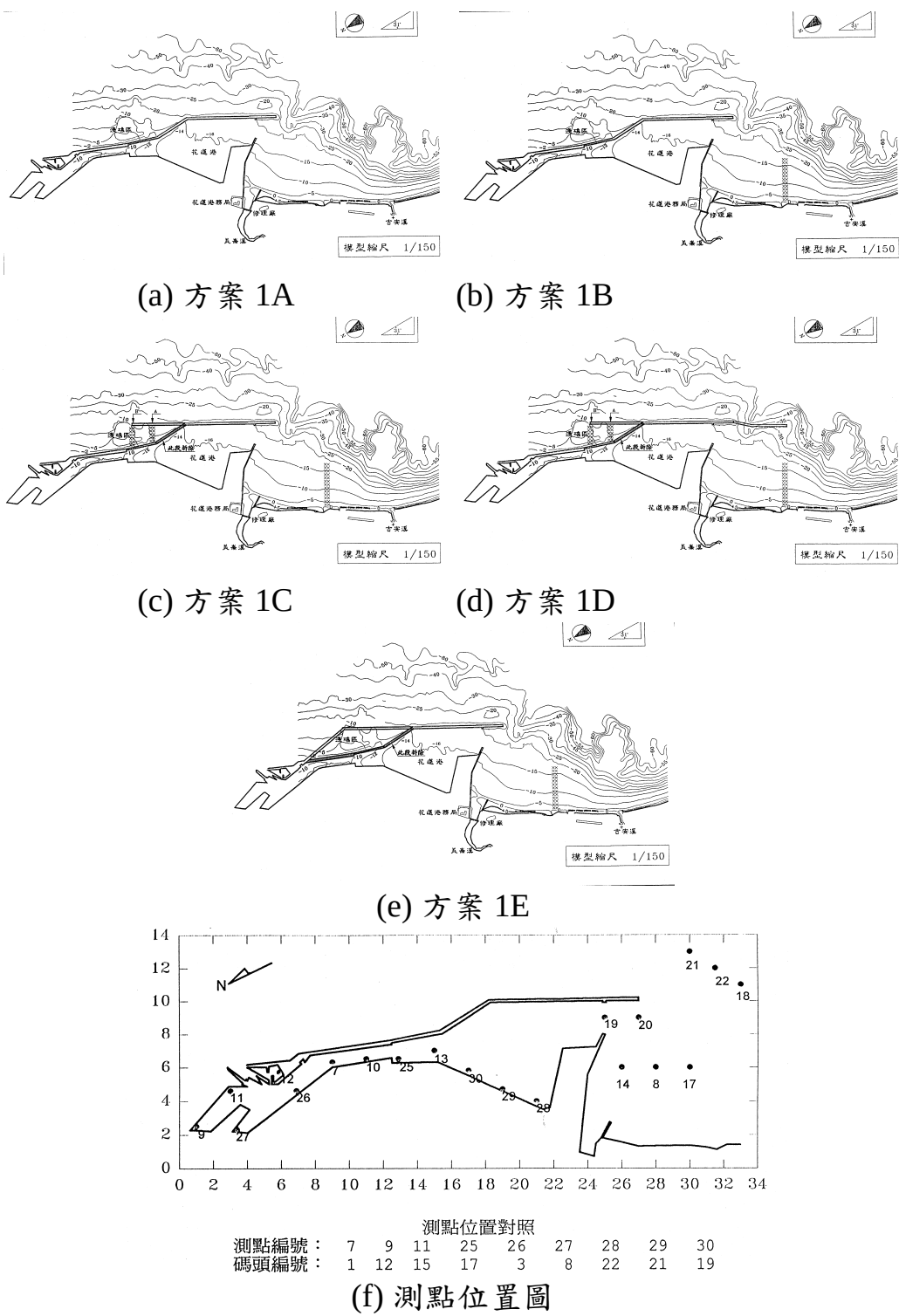


圖 5.1 水工模型試驗方案及測點位置圖

5.1.2 『花蓮港整體規劃及未來發展計畫—長浪及漂砂防制研究 2. 防波堤堤線配置平面試驗』

本試驗範圍及水深與1996年試驗相同但模型縮尺採等比縮尺，水平及垂直皆為1/150，並採用福祿數(Froude number)控制各項縮尺比例。本計畫共測試11種配置方案，各配置方案的差異比較如表5.3所示，圖5.2所示為11種新的配置方案以及波高測點的位置圖。

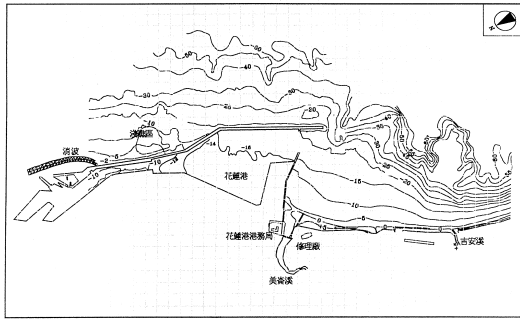
試驗造波條件計採四個入射波方向(S、SSE、ENE與NE方向)、19個規則造波條件(如表5.4所示)，以及2個JONSWAP頻譜與2個1994年7月的提姆颱風實測波浪(7月9日21時及7月10日11時)的不規則造波條件(如表5.5所示)。圖8(m)顯示港內及港外共佈放23~27支容量式波高計，並在#8碼頭及內航道處佈放2支電磁式流速計。造波時間仍設為500秒，並以取樣頻率20Hz擷取後410秒的水面波動及流速值。

綜合該計畫的比較結果，可得下列結論：

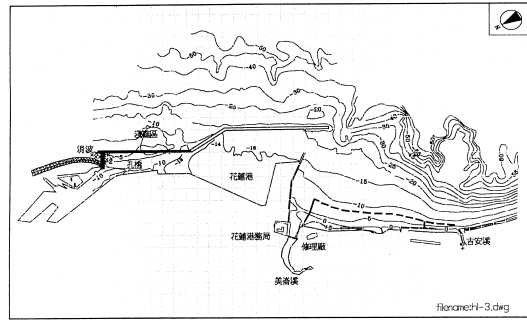
1. 由規則長週期波的試驗中目視發現南濱海岸的波場中有類似緣波的水理機制，而此緣波進入港內後，在外港區產生東西向的明顯振盪，其中尤以相對於原型週期 140 秒時最明顯。
2. 各改善方案相較於現況佈置，對長浪防制皆有不同程度的改善效果，其降低的波高大約在 20~50%之間，其中又以方案 2Q 的改善程度最顯著。但港內長週期的振動仍無法明顯消除。

表 5.3 各配置方案的差異比較

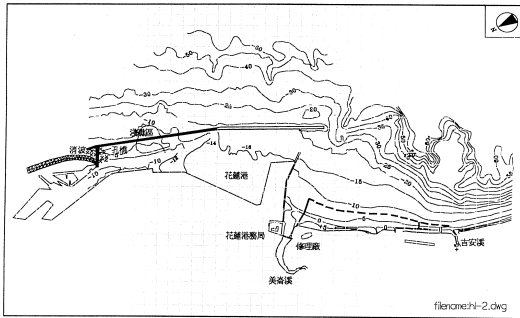
方案	說 明
2A	● 目前花蓮港的現況，作為預備試驗及比對之用
2B	● 拆除舊東堤及部份新東堤，並於外海興建東北—西南向防波堤，並與新東堤連接 ● 以孔橋聯繫方式於專用漁港海堤與新建防波堤間保留出口。 ● 美崙溪南岸興建導流堤至水深約-7公尺處 ● 美崙溪南側至吉安溪北側於水深約-7公尺處興建離岸堤
2C	● 拆除舊東堤、部份新東堤及北—南向新東堤約500公尺，並於外海興建北北東—南南西向的防波堤，並與新東堤連接 ● 以孔橋聯繫方式於專用漁港海堤與新建防波堤間保留出口。 ● 美崙溪南岸興建導流堤至水深約-7公尺處 ● 美崙溪南側至吉安溪北側於水深約-7公尺處興建離岸堤
2D	● 拆除舊東堤、部份新東堤及北—南向新東堤，並將向東北延伸東北—西南向東堤約750公尺 ● 以孔橋聯繫方式於專用漁港海堤與新建防波堤間保留出口，但外拋消波塊。 ● 美崙溪南岸興建導流堤至水深約-7公尺處 ● 美崙溪南側至吉安溪北側於水深約-7公尺處興建離岸堤
2E	● 延續方案2C ● 延伸美崙溪南導流堤(拋石堤)至水深-10公尺處，再向南南東轉折至-15公尺水深處 ● 南防波堤外側加設兩道導流堤
2F	● 延續方案2C ● 延伸美崙溪南導流堤(拋石堤)至水深-17公尺處 ● 南防波堤外側加設兩道導流堤
2H	● 延續方案2C ● 延伸美崙溪南導流堤(合成堤)至水深-17公尺處 ● 南防波堤外側加設兩道導流堤
2I	● 延續方案2H ● 於南防波堤內側#24及#25碼頭之間向東加設105公尺內堤
2J	● 延續方案2D ● 於南防波堤內側#24及#25碼頭之間向東加設105公尺內堤
2K	● 延續方案2H ● 於南防波堤內側#24及#25碼頭之間向北北東加設105公尺內堤
2P	● 延續方案2D ● 於南防波堤內側#24及#25碼頭之間向北北東加設105公尺內堤
2Q	● 延續方案2C ● 延伸美崙溪南導流堤(合成堤)至水深-19公尺處



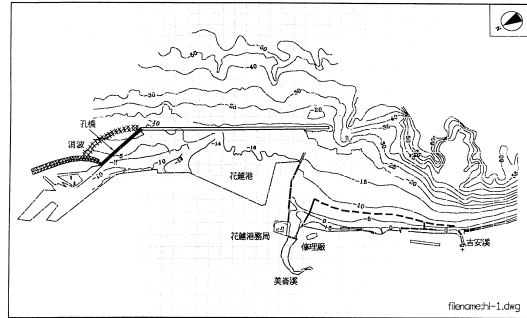
(a) 方案 2A



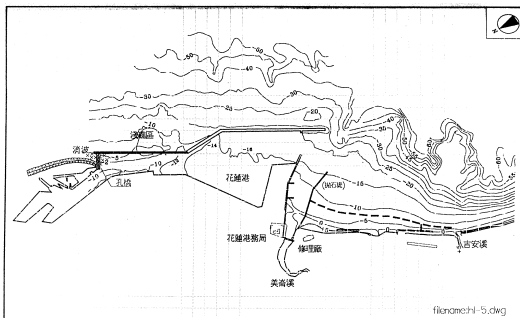
(b) 方案 2B



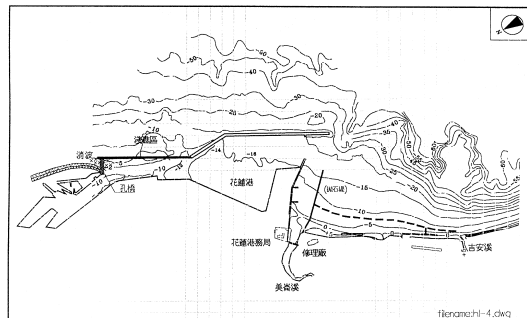
(c) 方案 2C



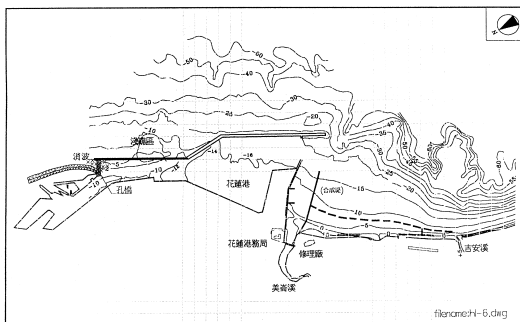
(d) 方案 2D



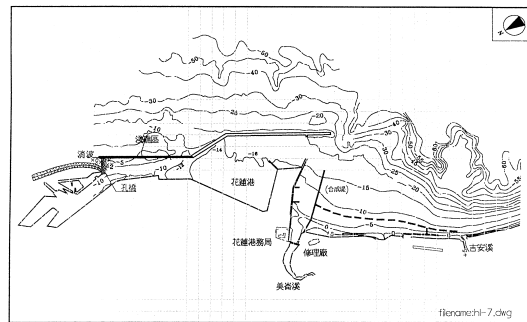
(e) 方案 2E



(f) 方案 2F

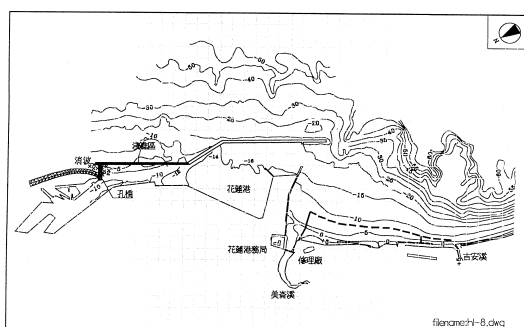


(g) 方案 2H

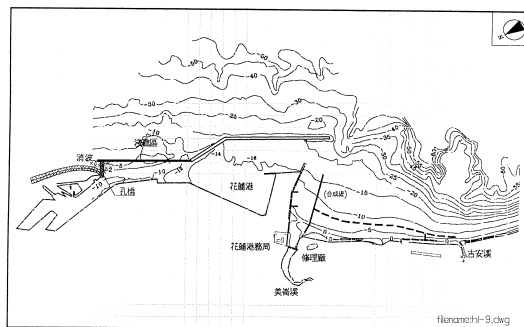


(h) 方案 2I

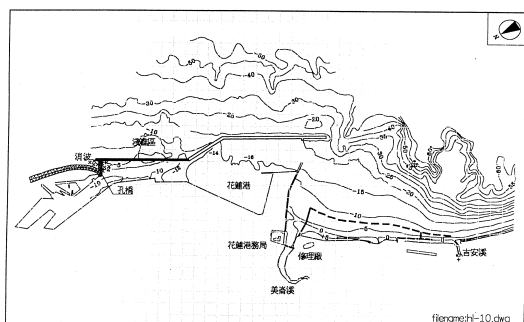
圖 5.2 水工模型試驗方案及測點位置圖



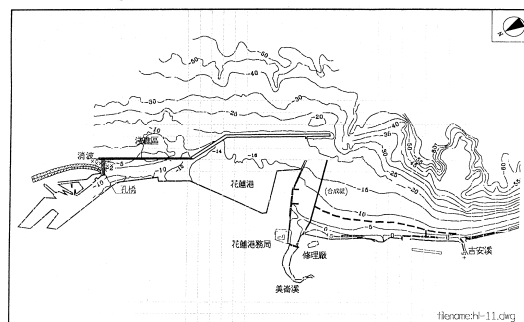
(i) 方案 2J



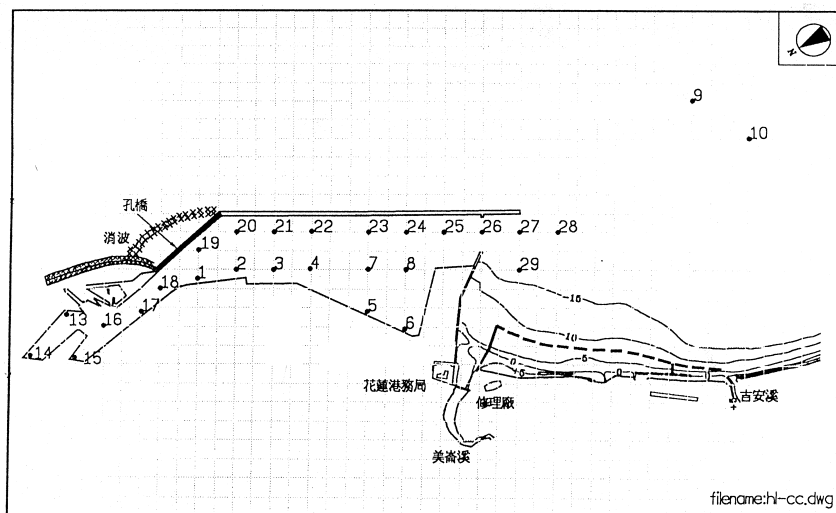
(j) 方案 2K



(k) 方案 2P



(l) 方案 2Q



波高計	位置	外海	#2碼頭	#8碼頭	#12碼頭	#20碼頭	#22碼頭
	編號	9	17	15	14	5	6

(m) 測點位置圖

圖 5.2(續) 水工模型試驗方案及測點位置圖

表 5.4 規則波試驗條件

原型	週期 (s)	8	10	15	40	80	100	125	135	140	145	150	160	180
	波高 (m)	2.00	4.00	4.00 8.00	0.75	0.75 1.50	0.75	0.40 0.75 1.25	0.75	0.75	0.40 0.75	0.75	0.40 0.75	0.75
模型	週期 (s)	0.65	0.82	1.22	3.30	6.50	8.20	10.2	11.0	11.4	11.9	12.3	13.1	14.7
	波高 (cm)	1.33	2.67	2.67 5.33	0.50	0.50 1.00	0.50	0.27 0.50 0.83	0.50	0.50	0.27 0.50	0.50	0.27 0.50	0.50
造波代碼		RN	RM	RX RY	R9	R8 RE	R7	RC R6 RD	R5	R4	RB R3	R2	RA R1	R0

表 5.5 不規則波試驗條件

		JONSWAP		提姆颱風	
原型	週期 (s)	8.00	10.0	13.5	11.0
	波高 (m)	2.00	4.00	6.50	2.50
模型	週期 (s)	0.65	0.82	1.10	0.90
	波高 (cm)	1.33	2.67	4.33	1.67
造波代碼		M1	M2	T1	T2

5.1.3 『花蓮港商漁分道與港池穩靜水工模型試驗研究—水工模型試驗報告』

本試驗研究主要針對以往未探討過的改善方案以水工模型試驗方式來探討花蓮港內的長浪效應。基本試驗構想是以改變波浪進行方向及消減入射波能之概念為主。由於目前花蓮南濱海岸已建構多道離岸潛堤來消減波能保護南濱海岸，但建構後對花蓮港內之長浪並無改善效果，因此本研究摒除離岸堤之構想，而以突堤、潛礁區、並在專用漁港區開闢一連外海通道來消能。計畫中共提出了三種改善方案和原配置進行比較，如圖5.3所示。方案3A於南濱海岸建構潛礁區；方案3B於南濱海岸建構突堤；方案3C於專用漁港區開闢一連外海通道；原配置方案以3D表示。各方案比較係將港池以分區討論與研析之方式來比較對長浪防制成效，同時在長浪作用下水域振盪特性亦作深入探討，並針對各水域之能譜能量傳遞和頻譜能量分佈做比較分析，且使用平

均遮蔽率加上積分法提出最佳改善方案。

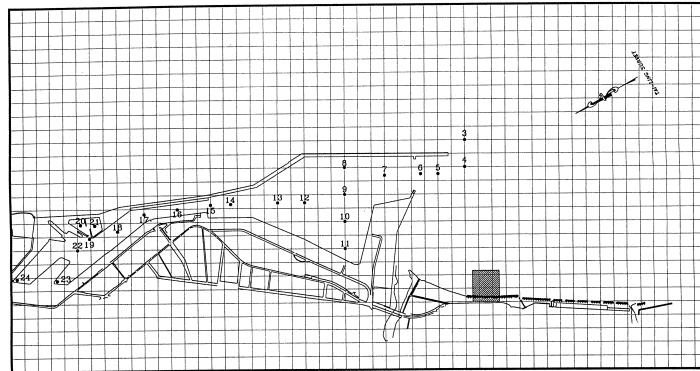
試驗模型製作採用等比縮尺1/121，試驗條件主要考量兩個颱風方向S及SE向，造波條件如表5.6所示，包含3個颱風條件及4個長浪條件，並進行規則波和不規則波試驗。

表 5.6 規則波與不規則波造波條件

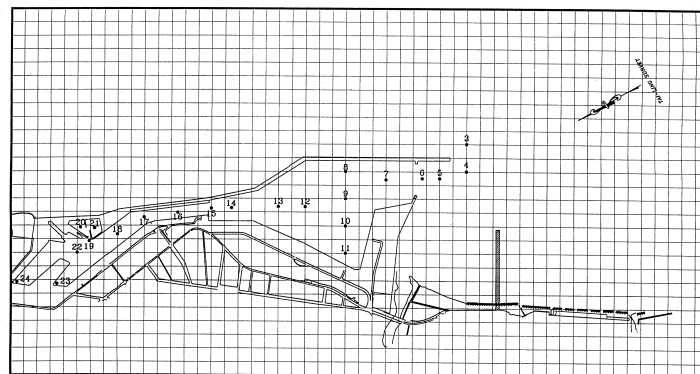
名稱	原型		模型		造波方向
	波高(m)	週期(sec)	波高(cm)	週期(sec)	
提姆	6.5	13.5	5.37	1.23	S、SE
安珀	8.06	12.6	6.66	1.15	S、SE
歐菲莉	10.23	15.3	8.45	1.39	S、SE
L1	0.75	40	0.62	3.64	S、SE
L2	0.75	100	0.62	9.09	S、SE
L3	0.75	140	0.62	12.73	S、SE
L4	0.75	160	0.62	14.54	S、SE

由各試驗方案之各分區遮蔽效果之比較，可發現以下之現象

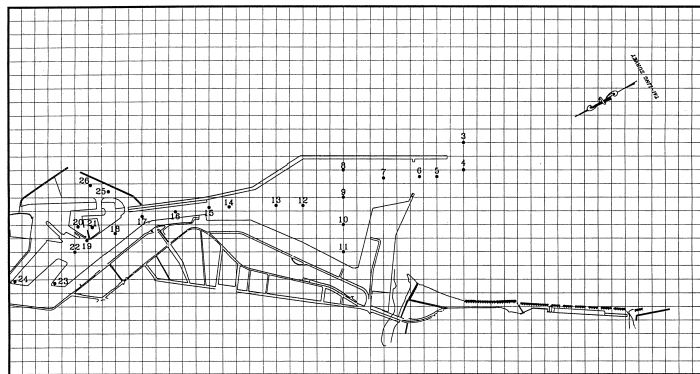
1. 從外港區口到窄段前，由S方向入射的情況會以方案3B建構突堤的方案較能阻擋波浪進入港區，SE方向入射的情況又以潛礁區消能構造即方案3A為最佳，此顯示SE方向入射時，突堤有反射入港之現象，潛礁區則可消能並減少入射波的能量。
2. 波浪如由S方向直衝進入港內時，在各種波浪條件下皆顯示潛礁區對各頻率之波能有較好的消能現象，而突堤雖有阻擋波浪前進的功能，但無法針對各種頻率皆有效能，因此通常S方向方案3A對內港區有較正面的貢獻。
3. 在波浪進入窄段航道後，各水域的波高比，受波浪入射方向影響就很小，亦即波浪受窄段航道之引導減低了其方向性的影響。
4. 在各水域分別討論，可發現各個改善方案，皆無法達到全面降低波能之功能，亦即各種方案皆對不同波浪條件有消波功能。



(a) 方案 3A



(b) 方案 3B



(c) 方案 3C

圖 5.3 三種改善方案配置示意圖

5.1.4 綜合討論與結論

從以上的整理中，大致有關花蓮港長週期振盪的改善構想為：

1. 在1996年的試驗中利用在南濱海岸興建的突堤以破壞入射波浪的結構使其入射波週期變短；以及利用舊東堤改建的機會，建構潛堤保留一新的通道企圖使港內的長週期波動能量能自該通道向外海消散，也局部性變化港池形狀，以降低或改變港內的長週期振盪。此一構想由於疏通了部份由外港區進入內港區的波浪能量，對於改善內港區的長週期振盪有明顯幫助；突堤由於受限於水深地形似乎發揮不了作用，因此外港區的波動沒有什麼改善；然而需要注意的是：入侵的波浪能量仍引起長週期的振盪，振盪週期仍是類似，只是振盪幅度改變而已。
2. 在1997年的試驗中配合舊東堤的改建、美崙溪導流堤的興建與專用漁港的海堤的興建，同時探討改善內航道過於狹窄與水深太淺、以及改善港池不穩靜與長週期振盪問題的可能性。其構想是利用美崙溪導流堤的興建，或是在南防波堤新建內堤以阻擋或削減外海入侵的波能；拆除舊東堤及部份新東堤以擴寬內水道，改變港池形狀；並在新建東防波堤及專用漁港海堤間保留一出口，疏散部份由外港區進入內港區的波能。其基本構想是來自1996年試驗的最佳方案。試驗結果顯示各方案對長週期振盪雖然無法消滅但都有改善的效果，新建內堤可以阻擋部份入侵波浪，但受限於船舶航行安全而無法考慮。試驗中也發現，花蓮港的地形可能引發緣波效應，而緣波會在外港區引發東西向的振盪，此一發現顯示港內的長週期振盪可能會有許多種週期，也呼應了數值模擬的趨勢。
3. 2000年的試驗係針對過去未討論的改善方式，即以改善波浪進行方向及消去入射波能之概念提出試驗構想進行討論，例如以突堤、潛礁區、在專用漁港區開闢連接外海通道來消能。建置突堤或潛礁區基本上是認定花蓮港的長週期振盪係有緣波所引起，而試圖改變波

浪的傳播方向，以及消減部份能量。專用漁港開闢出口則是延續上兩個計畫的構想設法藉由外廓設施的新建同時考量疏散部份的波浪能量。

綜合這三個研究計畫成果，有關花蓮港的長浪防制部份的水工模型試驗探討，大致可分為下列幾個方向：

1. 在花蓮港南側的南濱海岸興建複合式突堤或拋石潛堤(如1996年計畫之方案1B、1C、1D及1E，與2000年之方案3A及3B)或延伸美崙溪的導流堤(如1997年的所有方案)以破壞外海入射波的波場結構，阻絕長週期的緣波進入港內，並可有效地減少南濱海岸的侵蝕與港口的淤積的問題。試驗結果顯示此一構想可以有限度地降低港內的長週期振盪能量，其中又以興建沒水潛堤為佳。然而這些海岸結構物由於需要抵抗東部的大波浪，其結構安全性必須審慎考慮。例如南濱海岸目前的離岸堤群即逐漸破壞中，其現象包含塊體破裂、流失與沈陷。如果有其他新的嘗試也需要考慮花蓮港外側的大水深地形。
2. 拆除舊東堤以及部份的新東堤，改變東防波堤的堤線，使其兼具更新老舊的舊東堤、擴寬窄段航道(如1996年計畫之方案1C、1D及1E，與1997年的所有改善方案)，雖然可以削減部份長週期振盪能量，但也可能改變振盪的週期，而產生負面的效果。
3. 在漁港海堤與新建東堤之間保留適當的缺口，以宣洩部份的長週期波能(如1996年計畫之方案1C及1D，與1997年的所有改善方案)。對改善內港區的長週期振盪雖然略具成效，但在東北向波浪作用下，可能造成港內不穩靜，需要審慎規劃。

然而，這三個計畫所考慮之配置方案的試驗接果顯示：無論是利用突堤或淺礁區來減少入侵波能或破壞入射波結構，或是增加聯外通道以疏散港內長週期波能量，似乎都無法明顯地改善花蓮港內的長週期振盪問題。

5.2 改善構想的研討

在評估過去的研究成果後，本計畫研擬幾個可能的配置方案，並進行現場的可行性評估，而後選定較為可行的方案進行數值模擬的討論。96年度計畫中檢討如圖5.4至圖5.7的幾種可能的配置構想。分別說明如下：

1. 配置構想一(圖5.4)主要係考量如果引致花蓮港長週期振盪的原因是由南面傳來的緣波所致。由於水深及地形的緣故，如果颱風在花蓮的南邊移動，大部分的颱風波浪多是從南或南南東方向北傳播，受到花蓮溪口南側海岸山脈的阻擋與導引，波浪方向可能會以小角度沿著岸邊傳播，而形成所謂緣岸波效應，使得有較大的波浪能量可能被地形引入花蓮港。因此，構想一是考量兼顧花蓮溪排洪，以及保護緣岸波侵襲南北濱及化仁海岸，在花蓮溪口的南側適當水深處建構一條突堤，以將緣岸波再度導引出海。如果考慮在花蓮溪的南岸地形轉折處設置防波堤，以便將緣波傳播方向導向海側，雖然仍然會有部分能量會藉由繞射效應進入港內，但其能量應可減少。此一構想在經過現場的勘查後，發現可能設置的地點仍然位在花蓮溪的沖積三角扇上面，除了目前波浪會在預定地點碎波以外，也可能因為防波堤的重量及颱風波浪的作用而引發大規模的沈陷或海底崩坍。如果是在颱風以較偏東方向直撲花蓮的話，將會完全失去作用。再者，由於此一佈置可能改變近海的波流場，對於河川的排洪及輸沙，以及海岸變遷必須再加評估。在多方檢討後，此一構想暫時保留。



圖 5.4 配置構想一

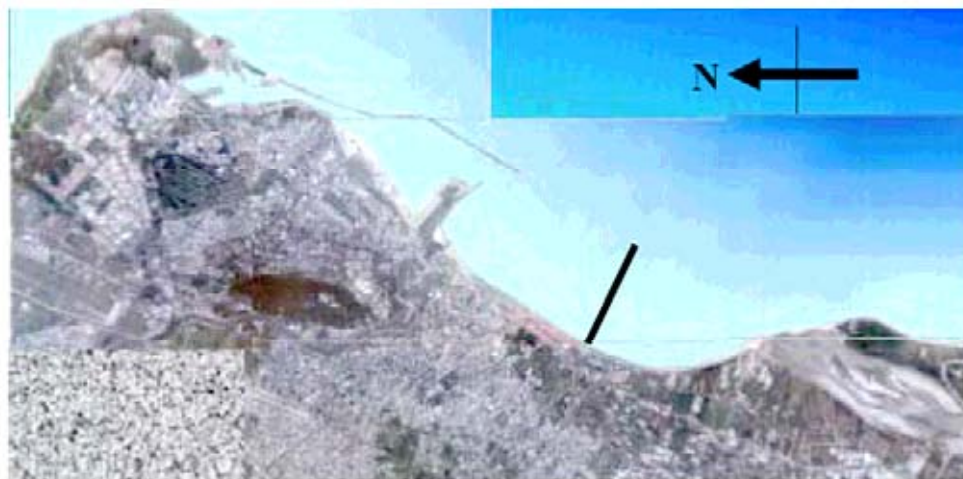


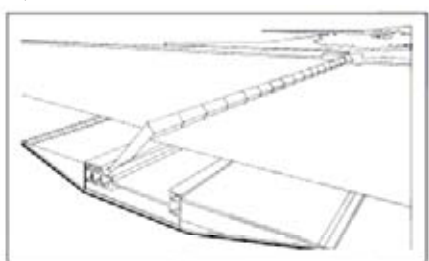
圖 5.5 配置構想二

2. 配置構想二(圖5.5)主要也是考量由南面傳來的緣波，為有效發揮突堤導波的功能，乃利用地形的變化，在海脊處建置突堤，以阻擋緣岸波作用到花蓮港。此一構想亦可以兼顧花蓮溪排洪，以及保護緣岸波侵襲南北濱。此一構想有些類似於以往水工模型的試驗配置，但是防波堤作大幅度地延伸。除了有在約80公尺的大水深建構防波堤的工程技術及經費問題外，由於此一佈置可能改變近海的波流場，對於河川的排洪及輸沙，以及海岸變遷。如果考量臺灣沿岸的漂沙以由北向南為主，而且颱風波浪多由東南至南的方向入侵，此一防波堤的建構可能會加速南濱及化仁海岸的侵蝕，以及防波堤堤址的淘刷。有鑑於此，雖然目前尚未收集到花蓮海岸漂沙的長期觀

測與分析，無法確定花蓮溪河川輸沙對花蓮市海岸的影響。再者，在圖5.5預定設置突堤位置南北兩側的水深地形都可發現有垂直於海岸的海溝，這些海溝在較長週期波動作用時，具有集波的作用，可能是造成目前南濱及化仁海堤破壞的原因之一，而突堤的設置是否會引發導波作用必須詳加評估。此一構想也暫時保留。



束縮航道處設置兩道防潮閘門



圖片來源：美國海岸工程手冊

(b) 防潮閘門

圖 5.6 配置構想三



圖 5.7 配置構想四

3. 配置構想三，如圖5.6(a)所示，是考量如果外海波浪中即具有長週期波動的成分，而在颱風侵襲期間，該部分能量增加且無法避免該能量傳入港內的狀況下，研擬以在束縮水道處建構兩道臨時性防潮閘門或浮式結構物，如圖5.6(b)所示，以阻擋波浪進入內港，同時也改變花蓮港的港型，變化其港內波動機制。第一道結構物容許越波以減少反射，第二道結構物則採垂直設置以便在兩道結構物間構成一消能池，並阻絕波浪入侵內港。在束縮水道上建構防潮閘門，不論從工程技術上或者是工程經費上都有極高的可行性，只有在船舶動態管理上可能因為臨時性結構物的設置影響到船舶，尤其是漁船，的進出，導致在颱風時期應該在哪一個時間點關閉內港，可以阻擋大能量長週期波浪的入侵，以及確保漁船安全返航，成為一個必須要討論評估的要點。
4. 配置構想四，如圖5.7所示，是延伸配置構想三的思考方向，並增加考慮漁船在颱風期間可能返航避難，需要進入內港的狀況。利用在束縮水道部分以臨時性的結構物在水道的兩側設置直立式短突堤。藉由突堤群對波浪的導波、反涉及繞射效應來改變港內的波動機制。此種設置方式可以在束縮航道上保留相當的寬度讓漁船即使在颱風期間也可以安全進入內港，但大型船舶則否。惟突堤長度的選擇必須考量到可能引起的橫向水面振盪。
5. 配置構想五，回顧花蓮港二、三期擴建之前的情形，#7及#12號碼頭原本為自然沙灘，依據港灣工程前者描述，在擴建之前並無長週期振盪的問題。因此，研判如果能夠增加#7及#12號碼的消波能力，以消減岸壁的波浪反射能量，則可能可以大量削減羈留在港內的波動能量。

5.3 改善方案的數值模擬與檢討

依據上節的構想討論，本計畫擬定三種方案，並以數值模擬方式進行檢討與比較，同時也與現況進行比較。各方案說明如下：

方案一：現況配置，港外岸壁反射率設定為0.5，但港內均假設為1.0。

方案二：參考方案一，但增加束縮水道兩側岸壁的消波能力，並假設反射率為0.5。

方案三：參考方案一，但將束縮水道封閉，並假設封閉部分的反射率為0.5。

方案四：參考方案一，但在束縮水道的兩側岸壁分別設置兩道約30公尺的短突堤。

方案五：同方案一，但假設#7及#12碼頭為完全消波，反射率為0.0。

在比較中，本研究首先就九個測站的波高增幅係數曲線進行比較，其後再比較五個碼頭附近的波動變化情形(位置如圖5.8所示)。圖5.9至圖5.13分別為九個測站(點為如圖4.5所示)之波高增幅係數 K_D 曲線圖，圖5.14至圖5.18則分別為四種配置方案受到週期為20、37、55、88及123秒的入射波浪作用下的港內水面 K_D 分佈圖。以圖5.9及圖5.14之現況配置為參考，比較各配置方案的波動情形可以發現：

1. 配置方案二：從九個測站的 K_D 曲線變化上，增加束縮水道的消波能力明顯地改變了整個港域的水面波動情形。就外港而言，入射波週期70秒以上的變化情形較大主要剩下130秒的共振週期，但70秒以下的波動似乎沒有太大改善。然而束縮水道區及內港的波動情形則有明顯地改善。究其原因應是內港的水面振盪等於室外港的造波源之一，如果透過束縮水道的消能設施將進入內港的波能加以削減的話，對內港的波動及由內港向外港傳播的波動能量都可明顯減小，連帶地也改變了外港的特性波動頻率。檢視圖5.15中港內水面 K_D 分佈圖的話，亦可以發現束縮水道消波能力的增加不僅使得內港的水面波動變得穩靜外，似乎也改變了外港及港口附近的波動。不過必須要強調的是：目前的消能設施對不同的波動週期有不一致的消波效果，因此如何能在束縮航道對各種不同週期的波動發生一定的消波能力，未來尚需要進一步研究。

2. 配置方案三：束縮水道及內港的封閉當然保持了該區水域的穩靜，但從五個測站的 K_D 曲線變化(圖5.11)，以及圖5.16中港內水面 K_D 分佈圖，可以發現水域形狀及面積的改變也使得外港水域發生優劣不等的變化。外港水域在長波作用下似乎橫向振盪為主(如圖5.16中E圖)。
3. 配置方案四：短突堤的設置，由於假設岸壁的反射率皆為1.0，從圖5.12中九個測站的 K_D 曲線變化及圖5.17中五個入射波週期的水面波動可以看出對港內短週期波動是負面的影響，而對長週期波動則無明顯的變化。
4. 配置方案五：將#7及#12碼頭設為完全消波，反射率為0.0時，從圖5.13中九個測站的 K_D 曲線變化及圖5.18中五個入射波週期的水面波動可以看出對港內短週期波動有明顯的降幅效應，而對長週期波動亦然，惟 K_D 值仍有接近2的值。顯示提高內港末端的消波功能可以降低花蓮港港內的波動。

圖5.19至圖5.23為5種不同港灣佈置的#4、#7、#12、#21及#25等5個碼頭附近的波高增幅曲線比較圖，各佈置方案的消能效果情形如前討論。

綜合以上的測試，可以發現內港的散射波對束縮水道、外港及港口處的水面波動有相當大的影響，其行為類似於在束縮水道入口的造波行為。增加束縮水道兩側岸壁的消波能力，或是在束縮水道設置消能池並容許越波，應有助於改善花蓮港的長週期振盪問題。

在經過相關的討論，並結合現場觀測的心得，花蓮港長週期振盪的能量源自於外海的可能性極高，如果此一現象是肯定的，則要應用一般防制港灣自然共振的方法可能發揮不了功效。由於港灣水面波動振盪幅度的加大除了入射波之作用以外，尚需要加入多重反射波的作用。因此，如果能夠將港內的長週期反射波能量降低的話，則應有可能削減港內的長週期振盪。有鑑於花蓮港的水深地形已經重測，本(97)

年度的計畫裡乃針對配置方案一(原始配置)及方案五(#7及#12碼頭為完全消波)重新檢討。圖5.20及圖5.21為兩個方案在9個測站處的波高增幅曲線比較圖，圖5.22為其在5個碼頭附近的波高增幅曲線比較圖。由圖中可以發現，如果#7及#12碼頭可以完全消波，則雖然外港區仍有共振的情形(主要是因為假設所有港內岸壁無法消波)，但波動幅度均明顯降低，內港區亦除了33秒波動在#4碼頭附近水域仍有較大波動外，幾乎所有的週期都未發生共振情形。顯示#7及#12碼頭岸壁的消波能力可能主導了花蓮港港內的波動幅度。由此，未來可能需要朝向能夠消減長週期波動能量的設施進行相關研究。

圖5.23為一配合花蓮港#7及#12碼頭特性的消波設施構想圖。目前該二碼頭主要是作為內港區的聯絡通道，而非碇泊碼頭之用，其碼頭面目前尚無任何裝卸設施，因此如果能夠在其下方構築多孔隙斜坡後方並設置消波室。藉由導引波浪的溯上越波使水體落於後方的消波室，而後藉由內外的水位差強迫水體以水流型式(不再是波動!)從斜坡的孔隙排入港區、或是底床附近設排水管路、或是導引至其他水域。如此應有機會可將反射波減至最小。實際上的型式及消波效果必須利用水工模型試驗進行驗證與改良。



圖 5.8 5 個碼頭的相對位置

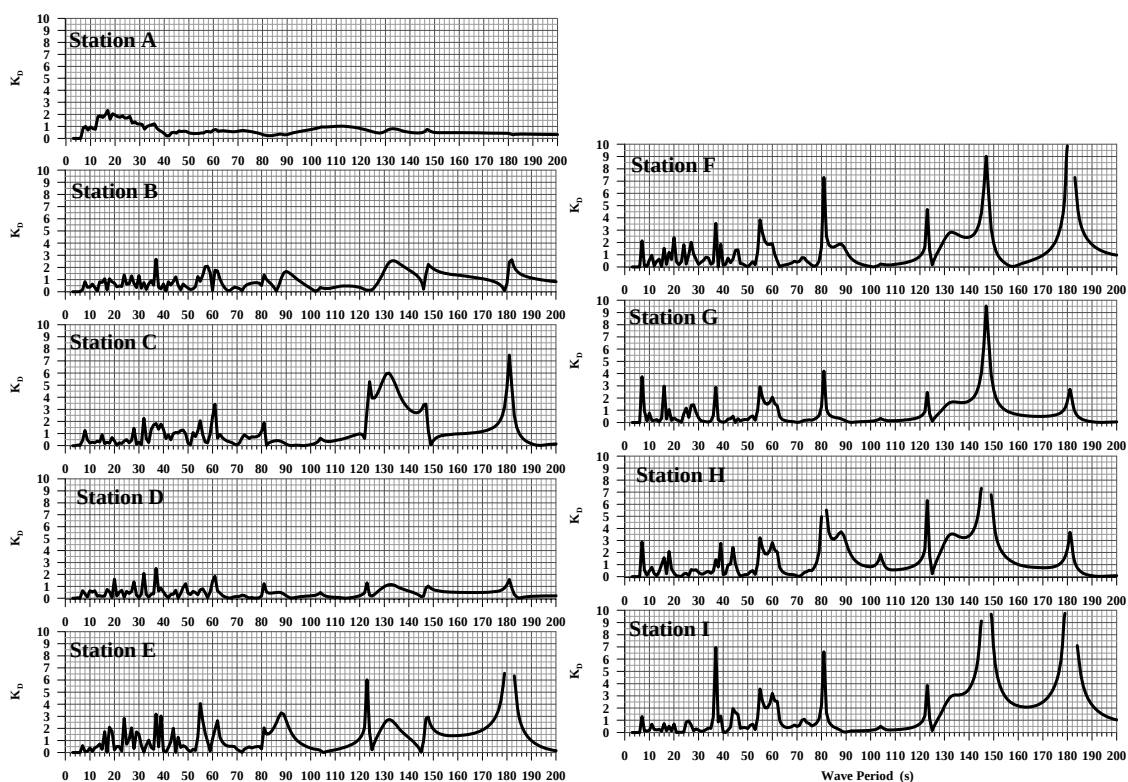


圖 5.9 配置方案一，九個測站之波高增幅係數 K_D 曲線圖

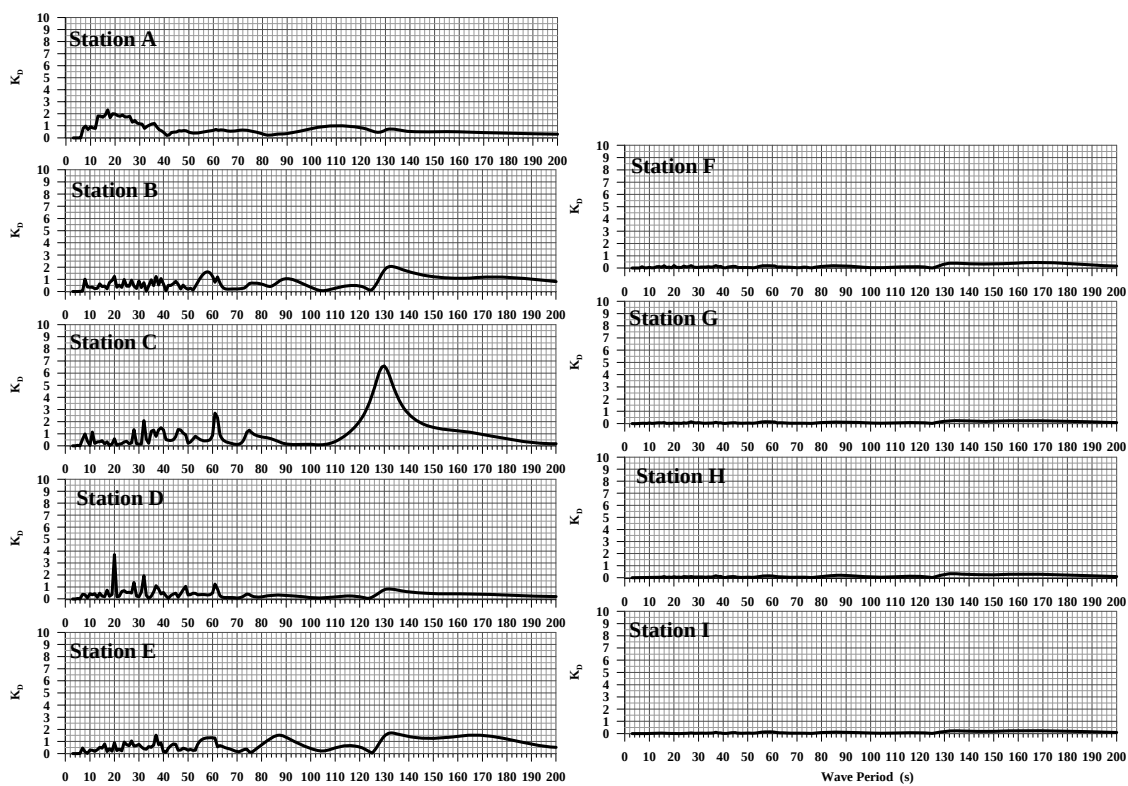


圖 5.10 配置方案二，九個測站之波高增幅係數 K_D 曲線圖

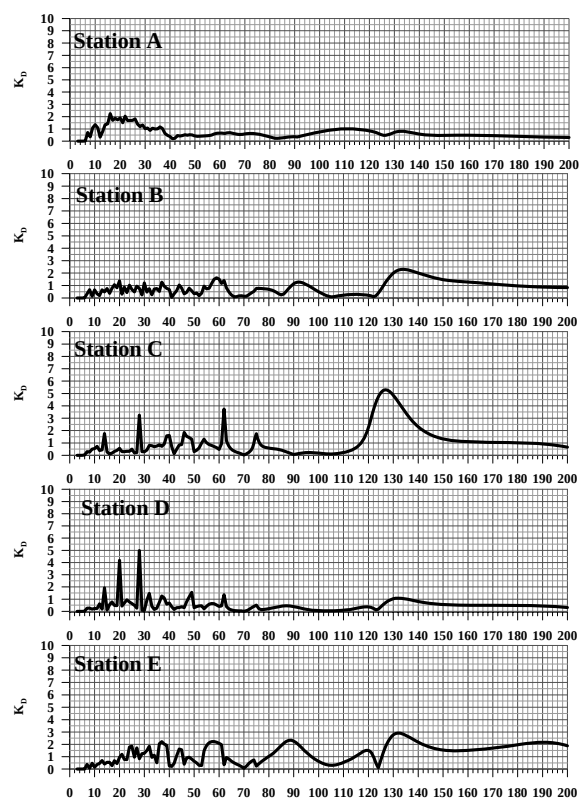


圖 5.11 配置方案三，九個測站之波高增幅係數 K_D 曲線圖

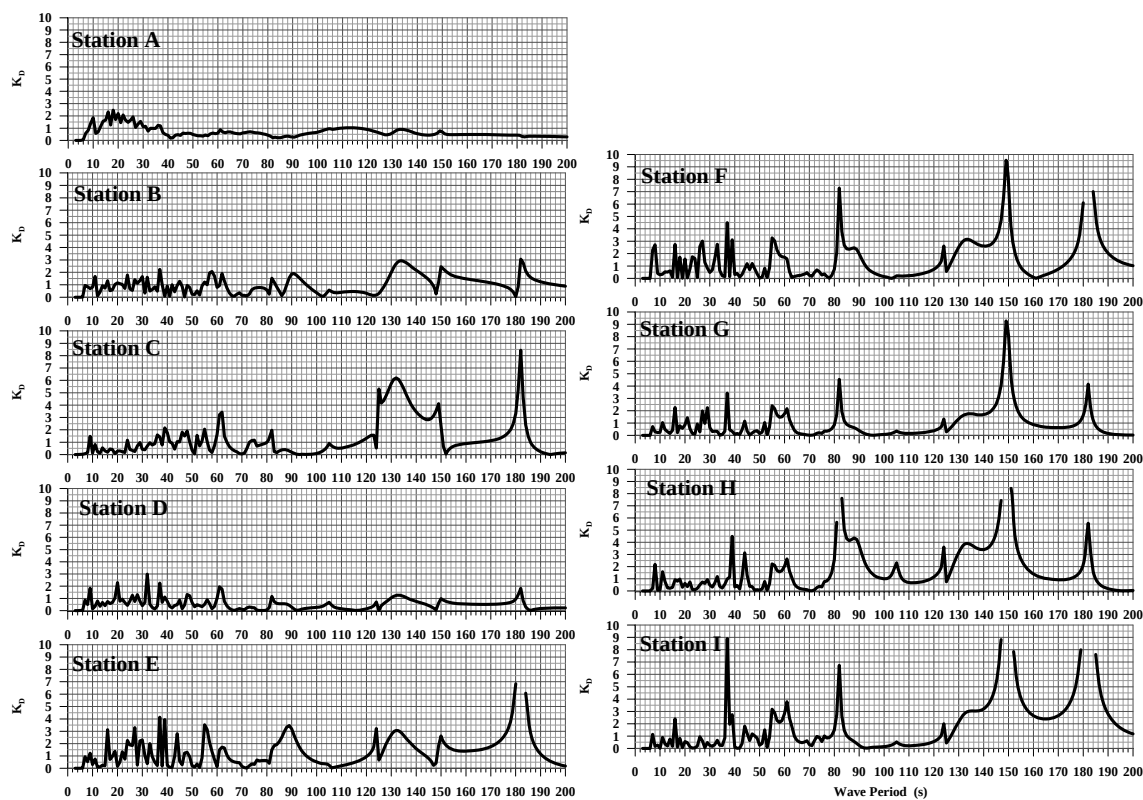


圖 5.12 配置方案四，九個測站之波高增幅係數 K_D 曲線圖

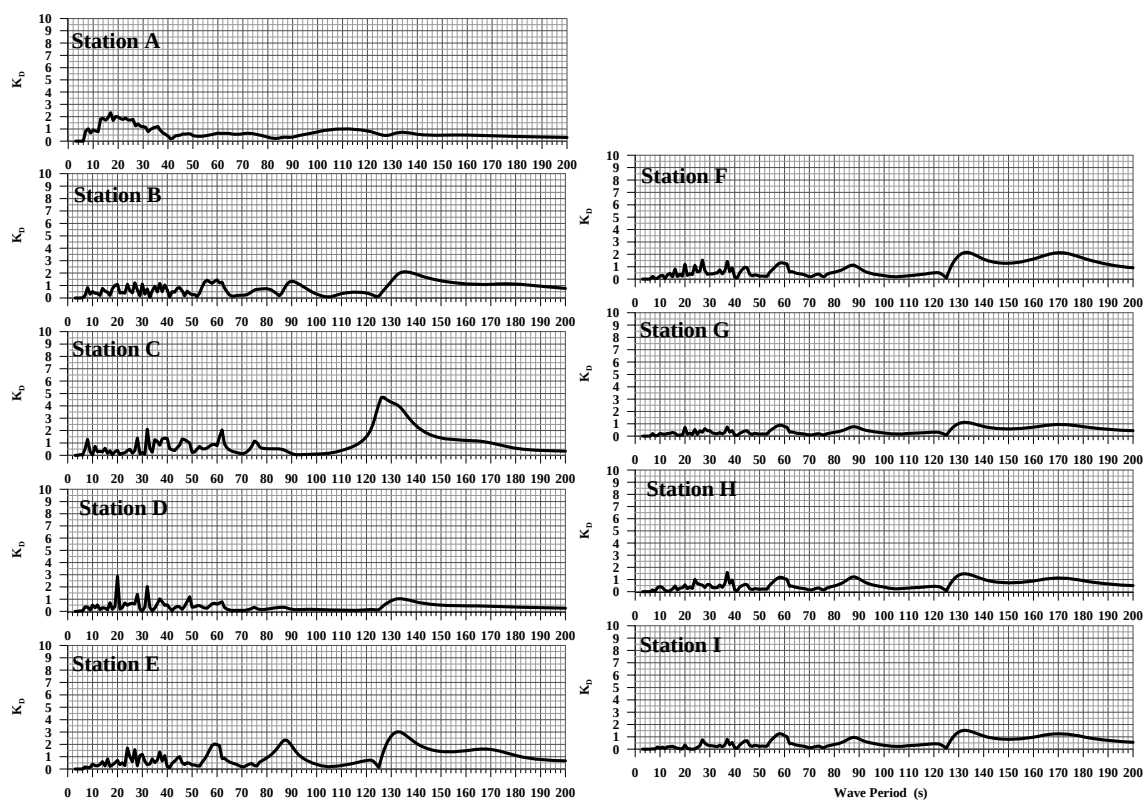
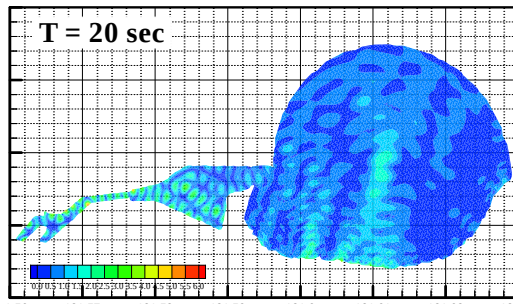
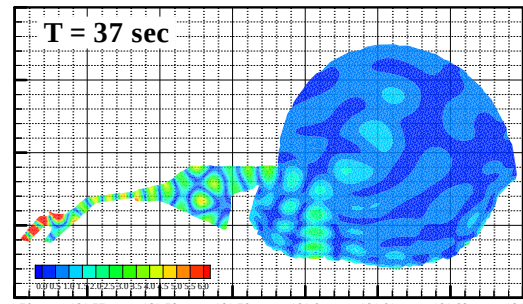


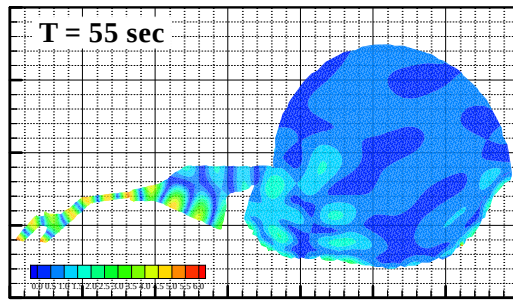
圖 5.13 配置方案五，九個測站之波高增幅係數 K_D 曲線圖



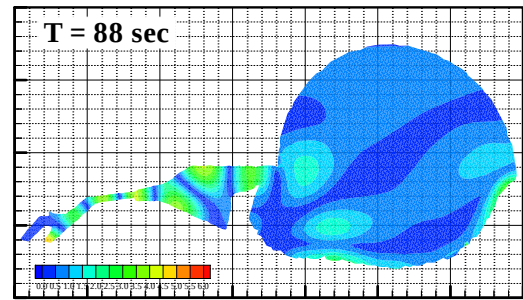
(a) 入射波週期：20 秒



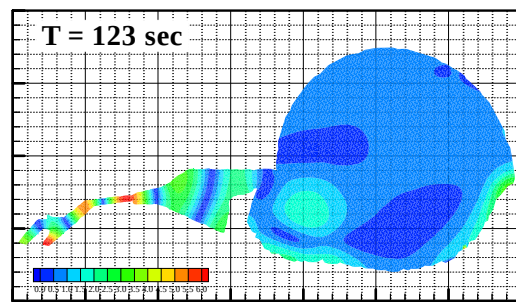
(b) 入射波週期：37 秒



(c) 入射波週期：55 秒



(d) 入射波週期：88 秒



(e) 入射波週期：123 秒

圖 5.14 配置方案一，不同週期入射波之波高增幅係數 K_D 分佈圖

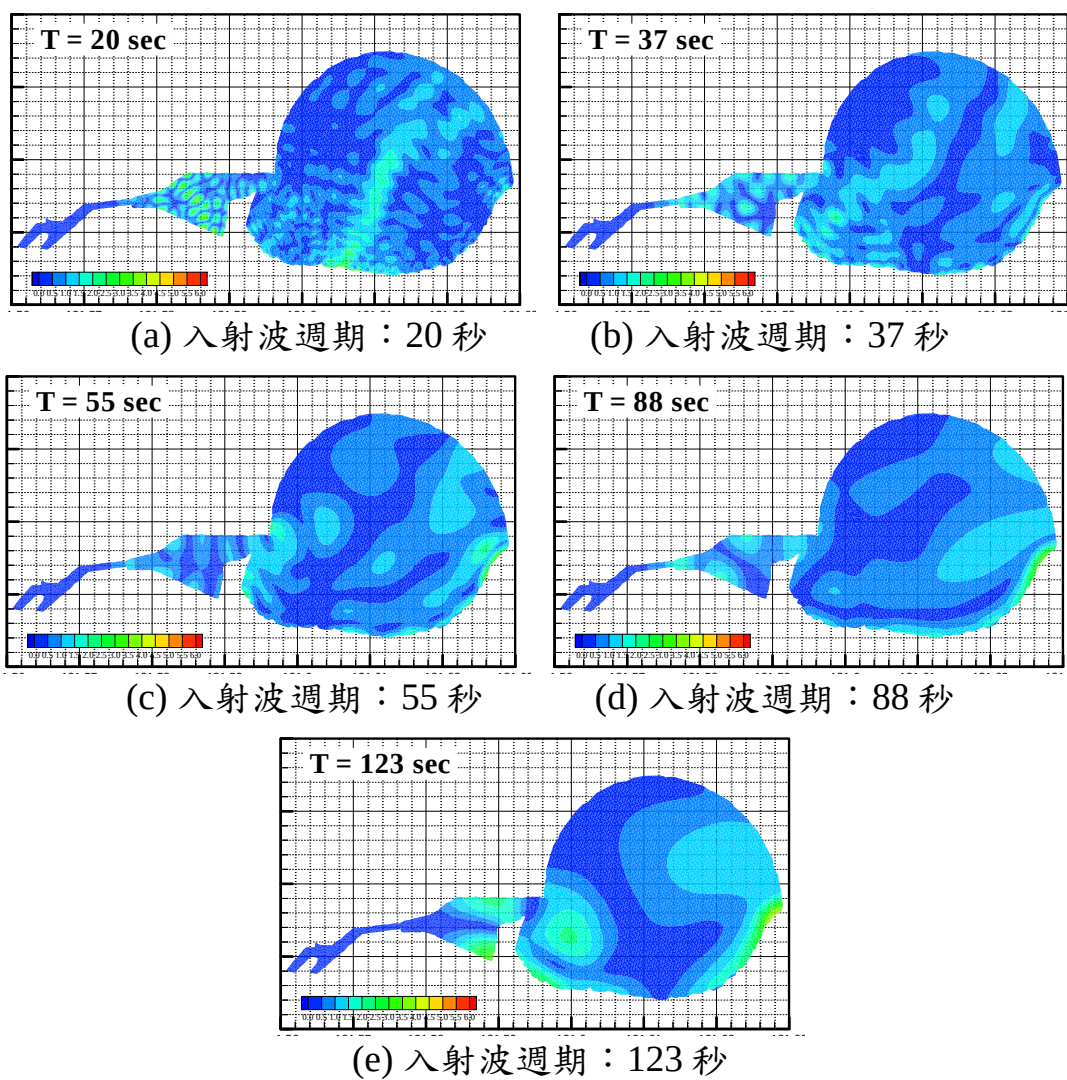


圖 5.15 配置方案二，不同週期入射波之波高增幅係數 K_D 分佈圖

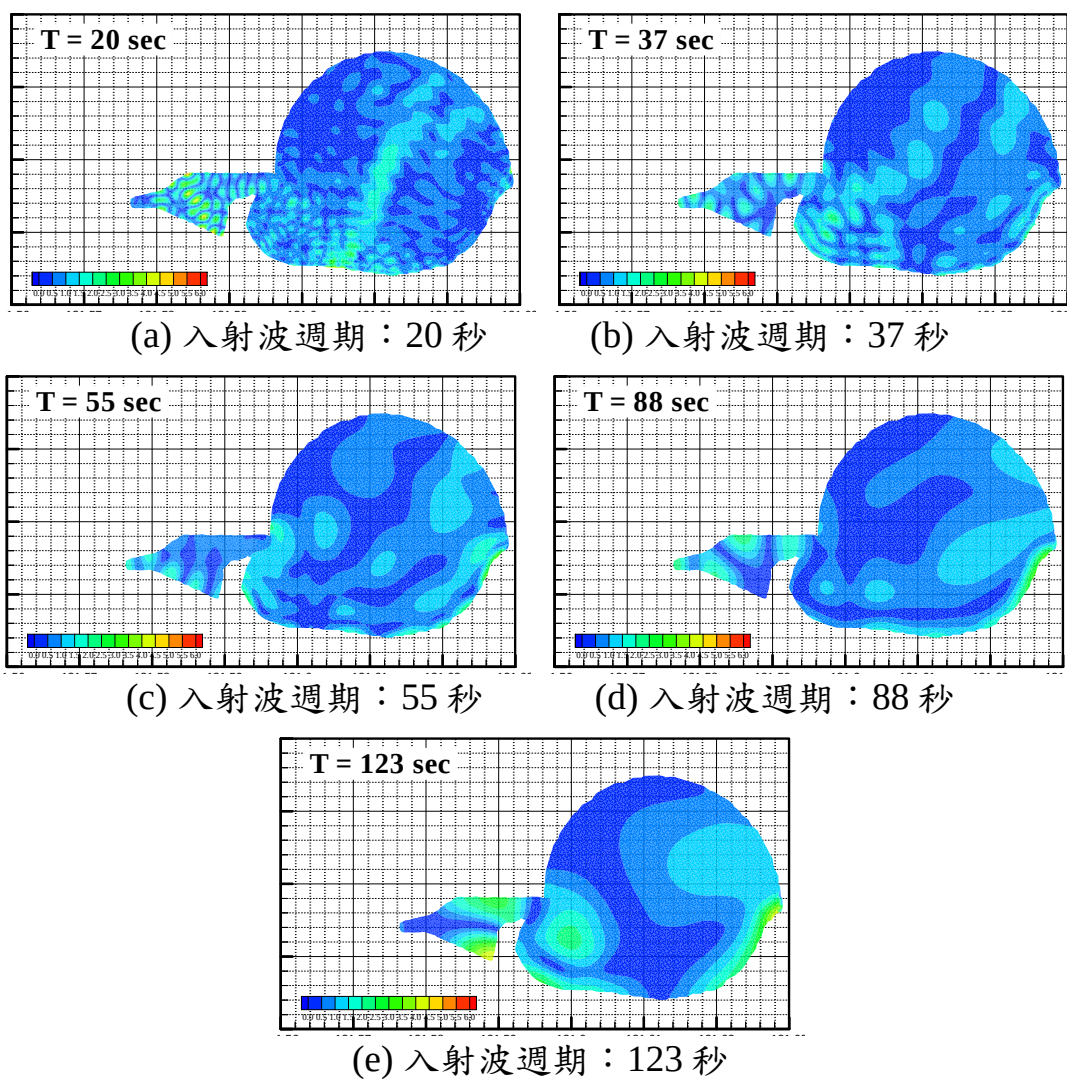


圖 5.16 配置方案三，不同週期入射波之波高增幅係數 K_D 分佈圖

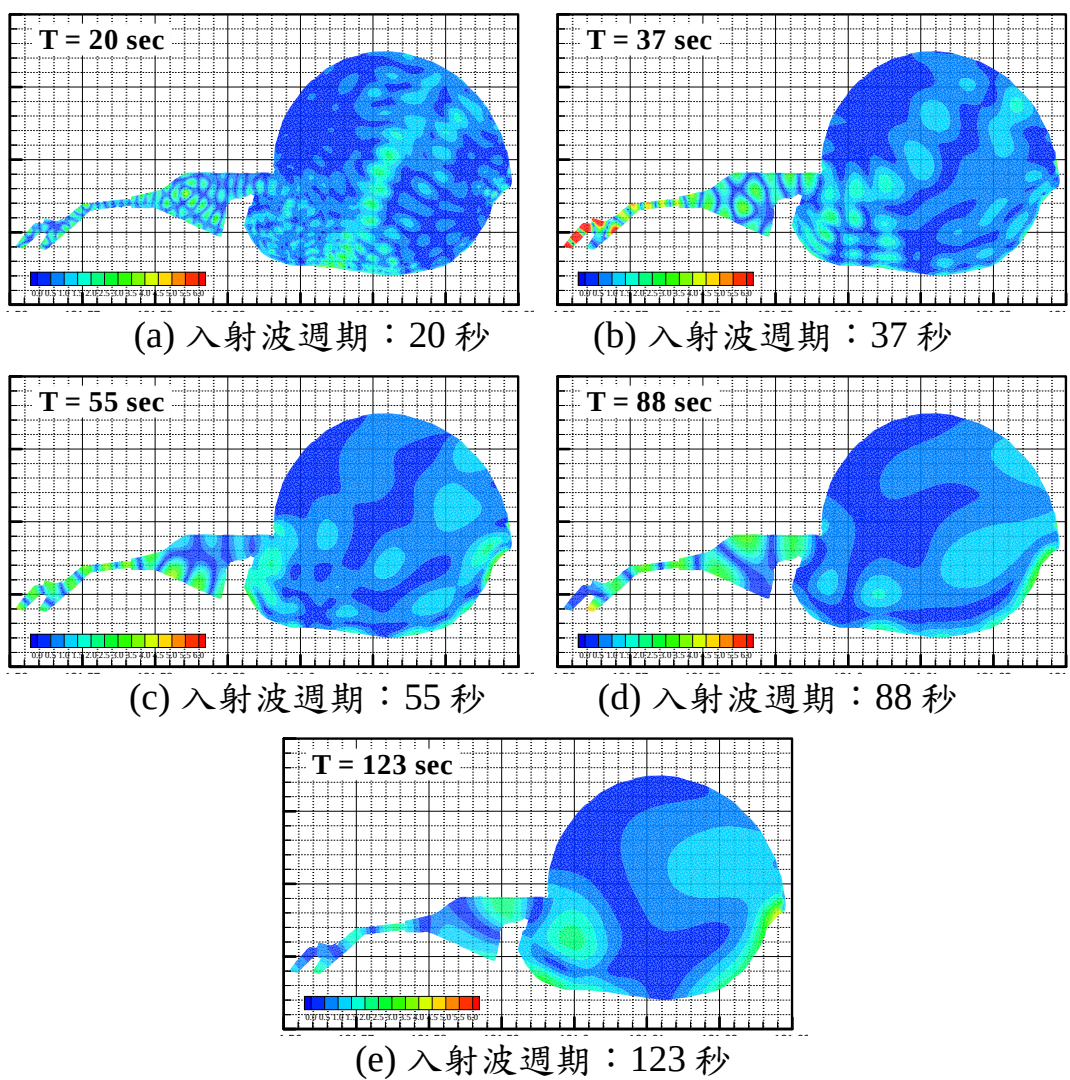
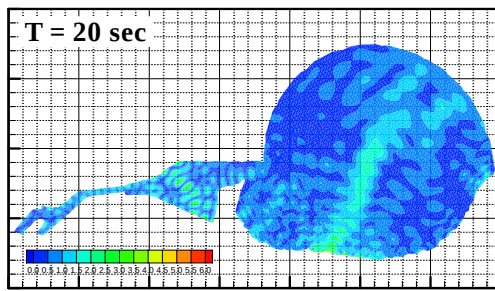
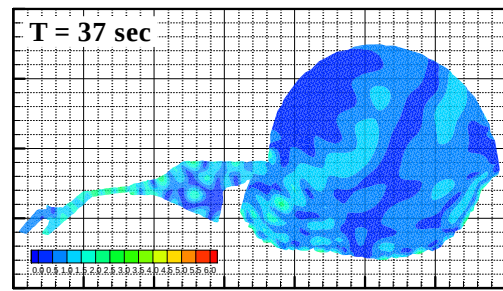


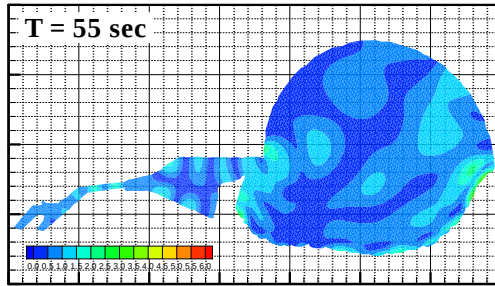
圖 5.17 配置方案四，不同週期入射波之波高增幅係數 K_D 分佈圖



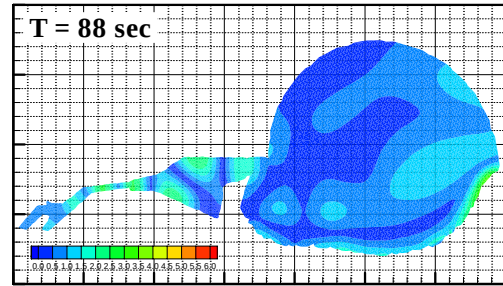
(a) 入射波週期：20 秒



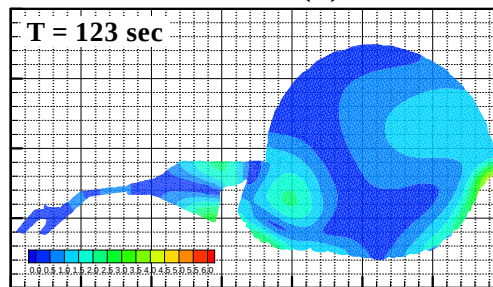
(b) 入射波週期：37 秒



(c) 入射波週期：55 秒

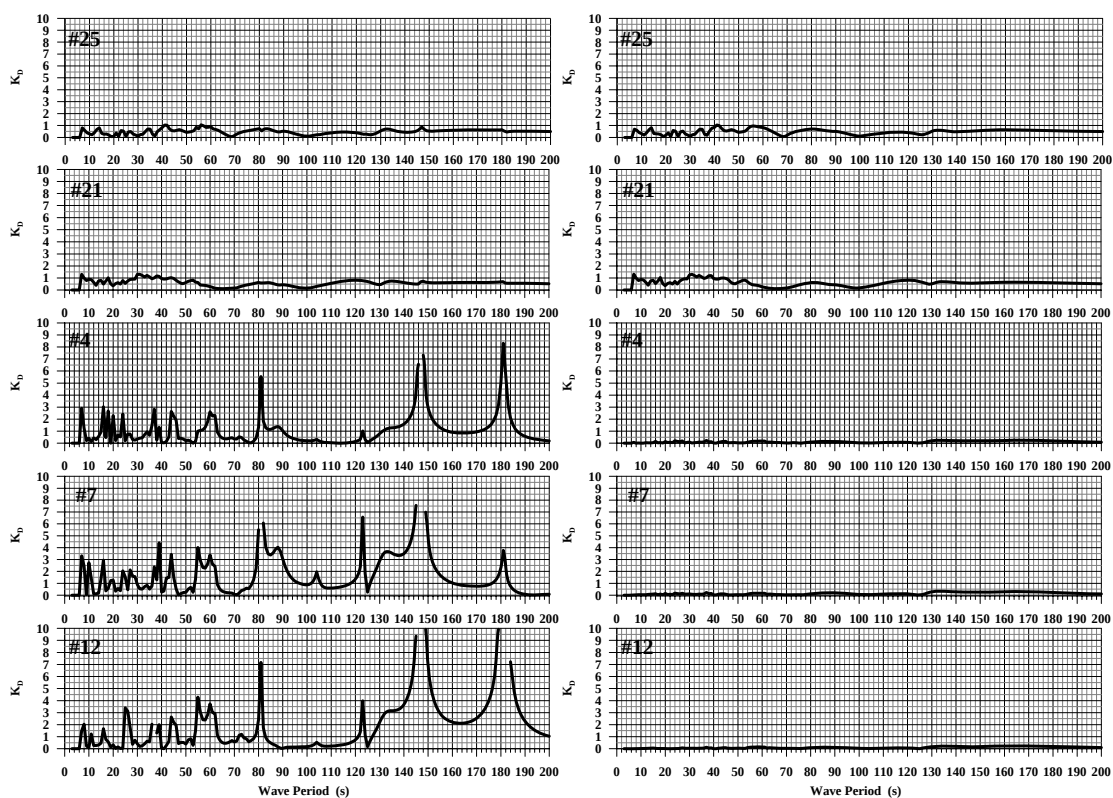


(d) 入射波週期：88 秒



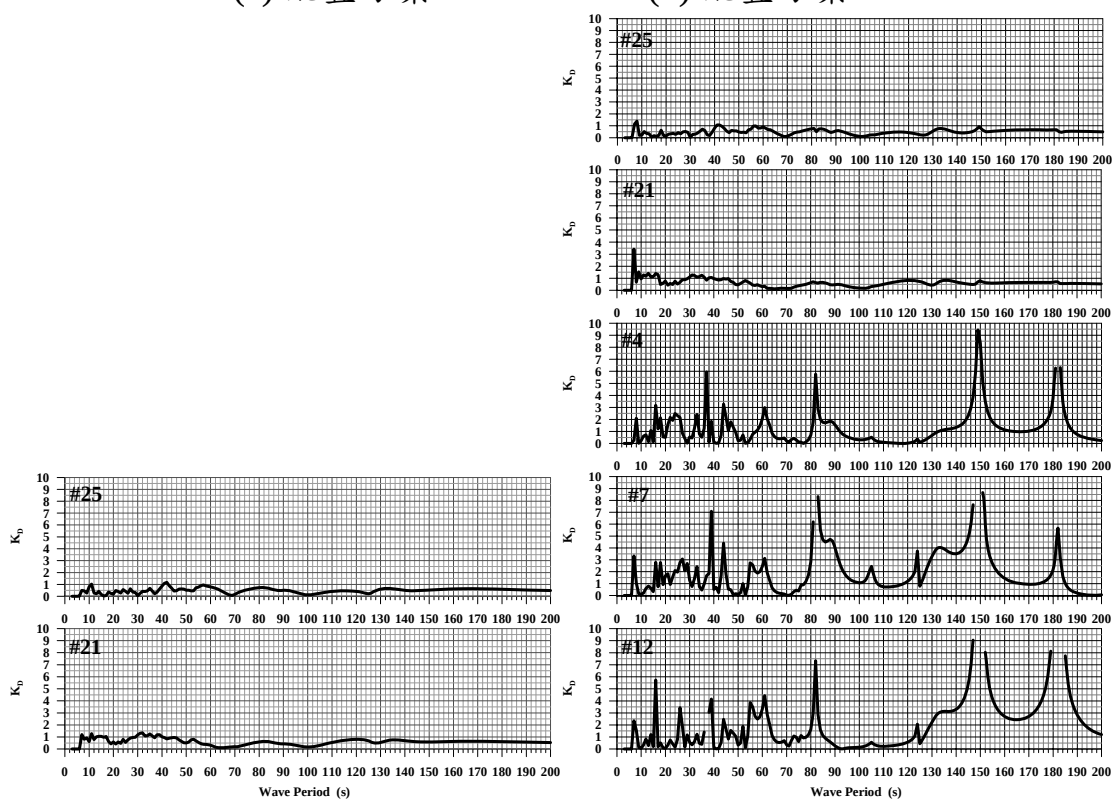
(e) 入射波週期：123 秒

圖 5.18 配置方案五，不同週期入射波之波高增幅係數 K_D 分佈圖



(a) 配置方案一

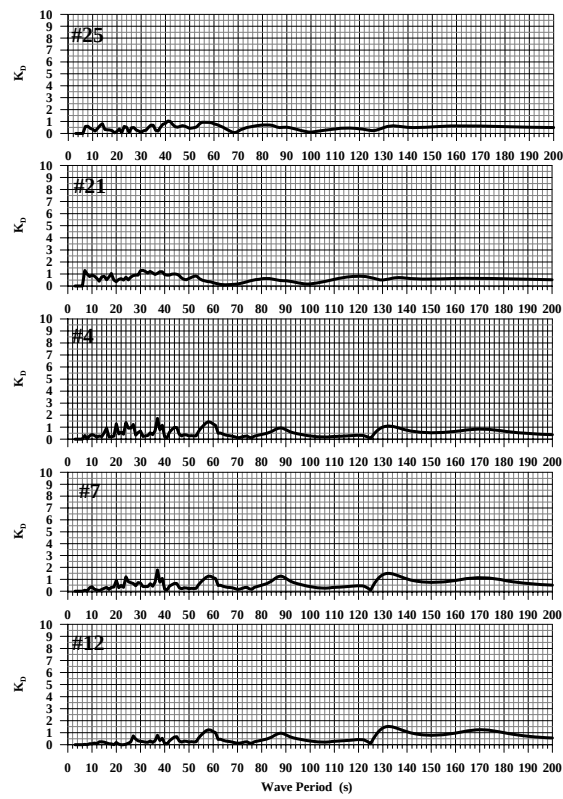
(b) 配置方案二



(c) 配置方案三

(d) 配置方案四

圖 5.19 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線



(e) 配置方案五

圖 5.19(續) 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線

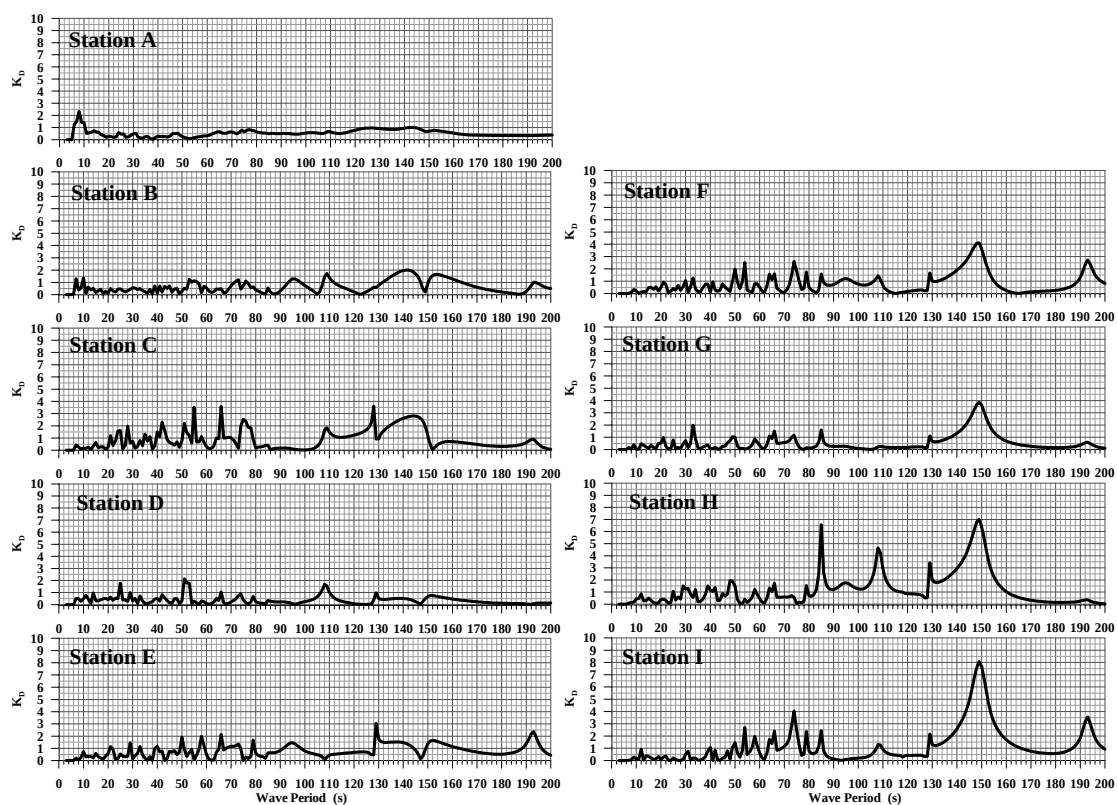


圖 5.20 九個測站之波高增幅係數曲線(配置方案一)

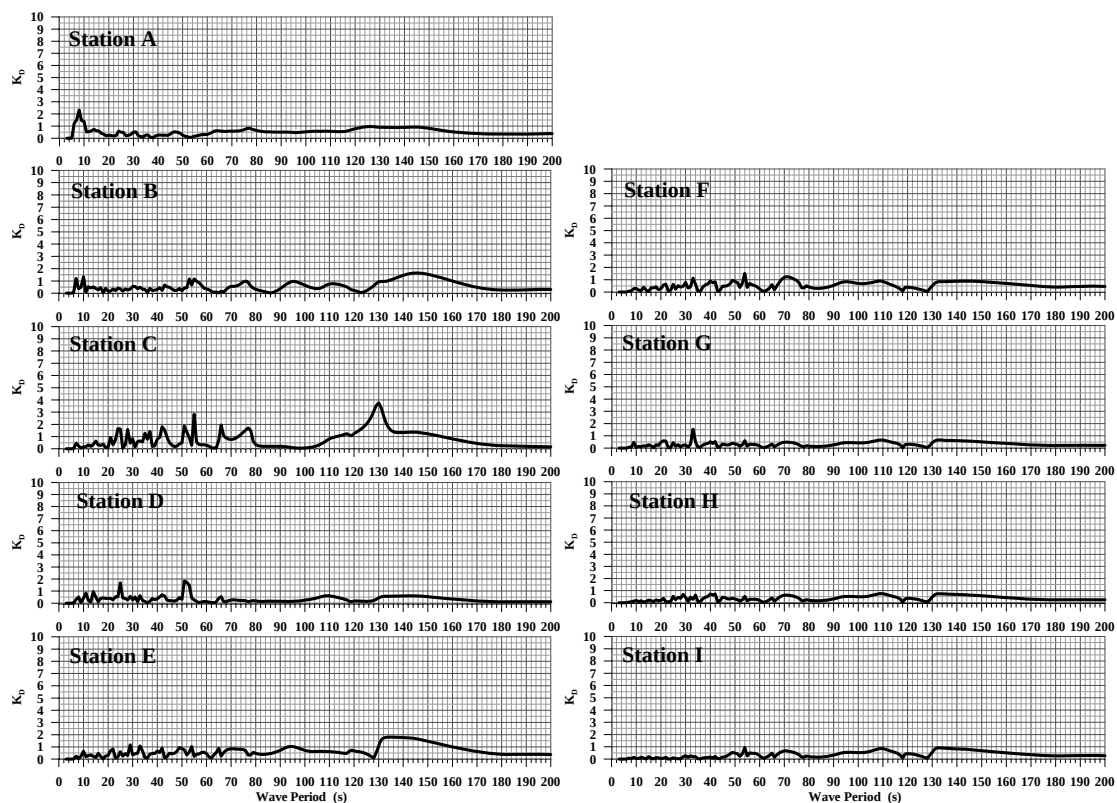


圖 5.21 九個測站之波高增幅係數曲線(配置方案五)

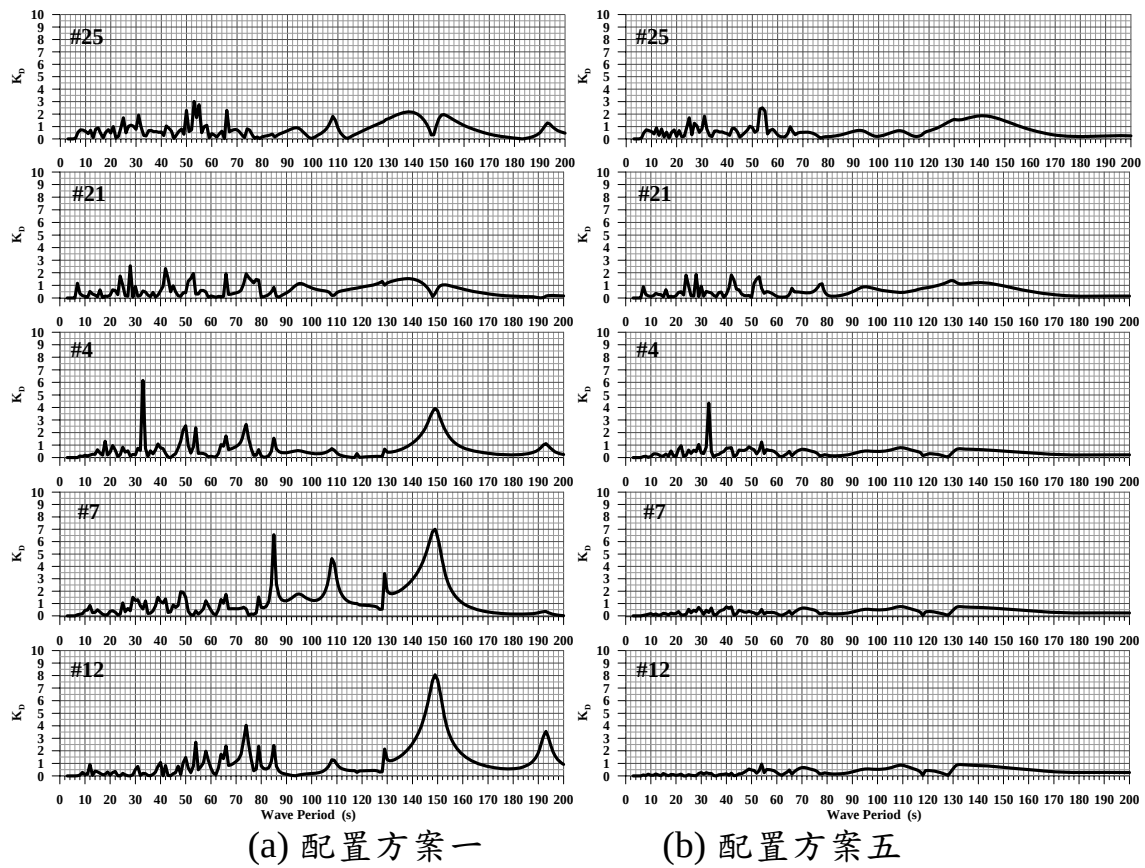


圖 5.22 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線(配置方案一及五)

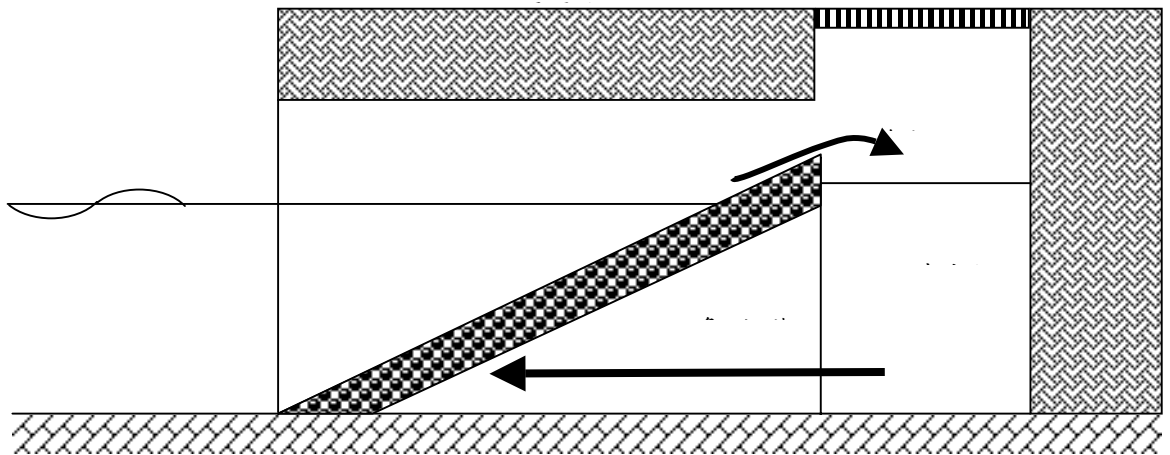


圖 5.23 削減長週期波反射能量之設施構想圖(#7 及#12 碼頭)

第六章 結論與建議

本研究計畫以四年的時間進行花蓮港的共振機制研究，為了瞭解與港灣共振相關的各個影響因子，透過水工模型試驗、現場觀測及數值分析等工作項目，本計畫分別針對現場收集的波浪資料、水位變化進行整理分析外，也針對與壓力式波高計相關的壓力及波形轉換關係的探討、以及建構花蓮港港灣波動數值模擬程式與進行港灣波動的模擬。相關具體成果整理如下：

1. 除了長期在花蓮港內進行長期水位觀測外，也在東部海岸多個港口進行了多次的同步聯合觀測。由於資料龐大，目前尚有大量的分析結果正在整理中。
2. 為了分析可能具有騎乘波/載波，以及非線性與非定常性波動成分的東部波浪，本計畫除了利用傳統的FFT及數值濾波技巧進行分析外也引進HHT中的EMD經驗型分解法，進行水位訊號的分析。就瑪莎颱風的水位觀測資料分析可以發現長週期的成分有隨著颱風的接近於增幅的現象。
3. 在港灣波動數值模擬方面，本計畫也先後建構了規則波、單方向不規則波，以及多方向不規則波的港灣波動模式，並進行相關的模擬及比較。此外也輸入現場的實測波譜進行測試，以及配合TAICOMS近岸波浪預報系統建構了花蓮港的港內波動預報模式。
4. 從現場的觀測以及數值模擬都發現花蓮港目前的港型佈置很容易羈留長週期的波動能量，因而導致長週期的振盪。
5. 在利用數值模擬探討可能的改善方案中，則發現如果能夠增加束縮航道兩側岸壁的消波能力削減進入內港水域的波浪能量，或是以臨時性防潮閘門阻絕波浪能量進入內港，或是提升#7及#12碼頭的消波能力都有助於改善花蓮港內的振盪問題。

6.1 結論

1. 從水工模型試驗的觀點來看，花蓮港港內的長週期波動現象，本中心於 1996、1997 及 2000 年的三個大型專題研究計畫中已經針對各種可能的改善方案進行水工模型試驗(其成果分別發表於簡及邱，1996、簡等人，1999 及邱等人，2003b)，其中包括從改變近海入射波能的結構、削減或消散入侵港灣的波能、及改變港灣自然振動週期的構想，例如在港外布置離岸堤、導流堤、潛堤、突堤等設施，或在港內增加消波設施削減波能、突堤改變水域結構、甚至藉由內水域花蓮漁港的擴建或是東堤的改建時加開出口以消散港內波能。然而，試驗的結果都發現改善的成效有限，花蓮港的港內仍然會有共振的現象出現。邱等人(2005)指出一旦港灣的主體佈置定型後，任何局部性改善措施都只能產生有限的效果而已，除非大規模地重新塑造整個水域結構。然而。我們也必須注意到：在水工模型試驗中，整個港灣的波動試驗是在指定的造波條件下進行的。如果給定造波條件是屬於共振週期，則港內必然引起共振。因此，若將如此進行的水工模型試驗視為數值模擬的延伸性驗證，其與實際水域波動的關連性應該再加以釐清。
2. 從數值模擬的觀點來看，花蓮港的港灣共振特性在過去豐碩的研究成果中，雖然由於各個模式的背景不同而略有出入，但是其可能發生共振的週期幾乎都已確認。唯需要提醒注意的是數值模擬僅是依照特定的入射波週期進行規則波的模擬試驗，與實際海洋波動的隨機特性並不相同。而依照相關的不規則波模擬試驗以及水工模型試驗中顯示，由於港灣的入口、地形、消波設施都具有消波或濾波的功能，導致波浪進入各個水域的成分波種類與能量分佈均有不同，因此可以大膽推斷港內的特性波週期應該會有所變化，而且可能與外海的特性波週期不同。目前所建構的不規則波港灣波動折繞射模式僅是以能量線性疊加的方式重新組合港內各點的頻譜與總能量，各成分波之間的交互作用並未考慮，而其影響究係如何？未來在數值模擬上的相關參數如邊界條件、各項能量損失的推算、以及

建構適切的不規則波模擬程式等都是需要努力的目標。

3. 從現場觀測的觀點來看，包括港內外的波浪觀測以及港內水位觀測，花蓮港裡可發現有極長週期的水面變動，而且其波動振幅隨著港外的海象變動。然而目前通用的波浪觀測取樣方式不論是以 2 Hz 連續取樣 20 分鐘或者是以 4 Hz 連續取樣 10 分鐘，其分析都似乎僅能涵蓋到重力波至亞重力波的範圍(如果取 2048 各資料點進行頻譜分析，最長解析週期分別為 512 及 256 秒)。延長取樣的時間可以提升對當地波動特性的瞭解。從本計畫所收集之花蓮港外港區實測波浪所進形的不同取樣頻率測試，發現長週期波並未因為 aliasing 現象而增加能量或新增譜峰，反而因為取樣頻率的變小而重新分配能量且略微降低。
4. 目前的水位觀測結果顯示，颱風侵襲期間長週期(100 秒至約 2000 秒)的能量有相當明顯地增加，雖然沒有同步地量測外海的水位變化，但就東海岸多個港口的波浪聯合觀測，均發現有數百秒的長週期波動成分，外海波浪原就具有此成分波應無疑問。花蓮港比其他漁港更容易在颱風侵襲期間發生長週期蕩漾應是與其港型及岸壁消能特性有關。
5. 從壓力與水面波動相關性研究來看，我們可發現壓力計所感應到的壓力並不完全是來自於水面波形的改變，可能還包括了附近流場變化所引致的壓力變化。線性波理論的轉換關係大致上適用於開闊水域的進行波，但仍需要有一與水深、波長及波高相關的修正係數。該關係函數應用到屬於多方向重疊的港內波動時就有很大的差異性。此外，重複波的情況下，本計畫的研究人員曾經在水工模型試驗中量測到在波形節點處有最大的波壓。因此，研判壓力式的波高計對水面波動的解讀能力顯著地受到當地流況的影響。未來可能需要先在試驗室中除了探討不同波高、不同水深與不同地形對波壓轉換的影響外，也應評估水流對它的影響程度。必要時，需要利用壓力式波高計量測水面波動時，應同步量測附近水流變化，並進行水流壓力的修正。

6. 綜合本四年度的研究成果以及相關的研究心得，與專家學者的討論，花蓮港的共振機制主要來源仍應屬於外海的長週期入射波成分受到花蓮港特有地形及港形的影響而增幅所致。
7. 依據本計畫對所規劃的改善方案所進行的數值模擬可發現：
 - (1) 港灣附近的水深地形正確與否不僅影響到水面波動的模擬，更甚的是可能會獲致不同共振頻率。
 - (2) #7 及#12 碼頭的消波功能如果可以達到完全消波，將有助於改善內港區的波動幅度。

6.2 建議

根據本年度計畫的執行心得，為了能更進一步瞭解及探討花蓮港的共振機制，建議後續研究中應進行

1. 由於可能影響壓力式波高計量測的因素除了已經考慮的水位靜壓與波浪動壓外，還有因為地形變化所產生的水流變化。壓力與水面波形轉換函數的研究在水工模型試驗部分，應利用斷面水槽與平面水槽探討不同地形、水深、波高、甚至水流對其相關性的影響。在波動方面考慮進行波/重複波/多方向波浪，規則波/不規則波、深水波/中間性波/淺水波、波浪的線性/非線性特性等都可能造成影響。此外，波與流的交會對轉換函數應有明顯影響，因此在進行壓力計與容量式波高計的量測時，也應在其附近進行流速的量測。動態型轉換係數可能是未來工作的目標。此外，也應該進行現場的不同波浪觀測儀器的同步觀測研究，以便能確認各種不同觀測方法(壓力式、超音波、容量式、浮標式等)的功能與轉換特性。
2. 在港灣波動的水工模型試驗方面，目前已經有相當多的研究成果顯示港內的水位在惡劣海象作用下可能會抬升，而且港域越深處變化越大；再者，波浪在近海區域的運動可能會發生能量的轉移(例如倍頻波)。然而，這些觀念似乎並未反映在港灣波動的遮蔽試驗中，

未來建議摒除過去假設波浪週期不變的觀念，精密量測港外與港內各水域的週期變化，並對平均水位的變化也加以收集分析。

3. 在港灣波動數值模擬方面，可探討港內港外的波浪週期的變化，邊界條件與各項能量損失的推定對週期的影響，以及如何建構適切的不規則波模擬程式以反應波波交互作用的特性。
4. 在現場觀測方面，為了能充分掌握臺灣海域的波動特性，應該研究推動在全臺的海岸及海域進行有系統的波浪及水位同步觀測，如此才較有機會瞭解各種可能的波動來源，包括瞭解花蓮港的長週期振盪來源。因此，建立臺灣附近海域的聯合海氣象觀測網的工作應該儘快推動。至於港灣的波動觀測則應在不同的水域進行波浪與水位的觀測，以瞭解及釐清港內的波動特性，以及港內各區的水位在不同的潮時與海氣象作用下可能產生的變化。港內的流場分佈對於船舶航行與碇靠、海水交換以及壓力式波浪儀的量測均有影響，有必要評估港內 3 維流場的建置。
5. 為了削減港灣受長週期波動的威脅，而一般港灣的外廓設施或海岸構造物並無法阻擋長週期波動入侵港灣。由於長浪往往伴隨著惡劣海象，導致進入港內的能量因外海波浪的持續擠壓阻擋無法散射至港外，而在港內發生蕩漾造成威脅。因此有必要進行能夠削減長週期波浪能量的碼頭或岸壁設施，以期能減少其在港內累積的能量。

參考文獻

1. Baquerizo, A. and Losada, M. A.(1995), "Transfer function between wave height and wave pressure for progressive waves, by Y-Y Kuo and J-F Chiu: comments," coastal Engineering, Vol. 24, pp.351-353.
2. Bergan, A. O., Torum, A. and Traetteberg, A.(1968), "Wave measurements by pressure type wave gauge," Proceedings of the Eleventh Coastal Engineering conference, ASCE, London, Vol. 1, pp. 19-29.
3. Biesel F.(1982) "Second order theory of manometer wave measurement". Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering, pp.129-135.
4. Bishop, C. T. and Donelan, M. A.(1987), "Measuring waves with pressure transducers," Coastal Engineering, Vol. 11, pp.309-328.
5. Cavaleri, L., Ewing, J. A. and Smith, N. D.(1978), "Measurement of the pressure and velocity field below surface waves," in Turbulent Fluxes through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction, Plenum Press, New York, pp.257-272.
6. Cavaleri, L.(1980), "Wave measurement using pressure transducer". Oceanal. Acta, 3(3), pp.339-945.
7. Chen, H. S.,(1990), "Infinite Elements for Water Wave Radiation and Scattering," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 11, pp.555-569.
8. Esteva, D. and Harris, D. L.(1970) "Comparison of pressure and staff wave gage records," Proceedings of the twelfth Coastal Engineering Conference, ASCE, Vol. 1, pp.101-116.
9. Forristal, G. Z.(1982), "Subsurface wave-measuring systems," in: Measuring Ocean Waves, National Academy Press, Washington, D.C., pp.194-209.

10. Forristall, G.Z.(1987) "On the statistical distribution of wave heights in a storm". Journal of Geophysical Research, Vol.83, No.C5, pp.2253-2358.
11. Gabriel D. W. and T. S. Hedges(1986) "Effects of currents on interpretation of sub-surface pressure spectra", Journal of Coastal Engineering, Vol. 10. No.3, pp.309-323.
12. Grace, R.A.(1970) "How to measure waves". Ocean Ind., 5(2).pp.65-69.
13. Grace R. A.(1978) "Surface wave heights from pressure records". Journal of Coastal Engineering, Vol. 2. No. 1. pp.55-67.
14. Hameed T. S. S.(1985) and M. Baba, "Wave height distribution in shallow water". Journal of Ocean Engineering, Vol. 12, No. 4, pp.309-319.
15. Hom-ma, M. Horikawa, K. and Komori, S.(1966), "Response characteristics of underwater wave gauge," Proceedings of the Tenth Coastal Engineering Conference, ASCE, New York, Vol. 1, pp.99-114.
16. Huang, M.-C. and J.Y. Chen(1998), "Wave direction analysis from data buoys," Ocean Engineering, Vol. 25(8), pp.621-637.
17. Huang, M.-C.,(2001), "Comparison of pressure transfer functions," 海洋工程學刊，第 1 卷，第 1 期，第 23-34 頁
18. Huang, Norden, E. and Samuel S. P. Shen(2005), "Hilbert-Huang Transform and Its Application," 311 pages, World Scientific.
19. Lee, D.-Y. and Wang, H.(1984), "measurement of surface waves from subsurface gage," Proceedings of the Nineteenth Coastal Engineering Conference, ASCE, Tokyo, Vol. 1, pp.271-286.
20. Lin, J. G.,(1995), "Statistical Properties of Wave Conditions in Harbors," Department of Civil Engineering, North Carolina State University, USA.

21. Nielsen P.(1986), "Local approximations: A new way of dealing with irregular waves". Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering, pp.633-646.
22. Seiwel, H.R.(1947), "Investigation of underwater pressure records and simultaneous sea surface patterns", Trans. Am. Geophys. Union, Vol.28, pp.722-724.
23. Wang H., D.-Y. Lee and Allen Garcia(1986), "Time series surface-wave recovery from pressure gage". Journal of Coastal Engineering, Vol. 10, No.4, pp.379-393.
24. 郭一羽(1983), "不規則波浪水中波壓特性的研究", 中國工程學刊第六卷第一期, pp.1-8。
25. 簡仲璟、郭一羽、黃啟天(1990), "水中波壓與水位變化之相關係研究", 第十二屆海洋工研討會論文集, pp.336-351。
26. 邱永芳、郭一羽、簡仲璟(1993), "海洋波浪之波高與波壓間的轉換函數", 港灣技術第八期, pp.69-85。
27. 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。
28. 黃家祥(1993), "水中波壓之實驗研究", 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
29. 張金機、曾相茂(1995), 「花蓮港港池不穩靜初步調查研究」, 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。
30. 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, 第113~128頁。
31. 張炯殷(1995), "現場觀測的水中波壓轉換為水面波浪之研究", 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。

32. 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。
33. 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,交通處港灣技術研究所。
34. 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,交通處港灣技術研究所。
35. 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。
36. 林炤圭、陳炫杉(1996),「外海底床坡度在港灣波動模擬上的影響」,第 18 屆海洋工程研討會,pp.55~62。
37. 曾相茂(1998),「臺灣海域海岸現象調查與及時回報系統建立之應用研究」,87-研(三),交通處港灣技術研究所。
38. 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。
39. 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。
40. 莊文傑(2000),「亞重力波與花蓮港之波動共振」,港灣報導,第 54 期,第 26~33 頁,交通處港灣技術研究所。
41. 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。
42. 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」, MOTC-IOT-IHMT-CE-8801,交通處港灣技術研究所。

43. 李兆芳(2001), 「港池振盪之數值模擬計算」, 2001 海洋數值模式研討會, 第 4-1~4-20 頁。
44. 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, 第一卷第一期, 第 1~22 頁, 海洋工程學會。
45. 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, 第二卷第一期, 第 55~71 頁, 海洋工程學會。
46. 邱永芳、蔡瑤堂、張富東、蔡金吉(2003), 「花蓮港商漁分道之可行性研究」, 第 25 屆海洋工程研討會, 第 897~902 頁。
47. 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。
48. 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 103~110 頁。
49. 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, 第 917~923 頁。
50. 陳松輝(2003), “水中波壓與水面波浪間轉換函數之研究”, 成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。
51. 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 頁~第 121 頁。
52. 涂宗男(2005), “不規則波作用下港灣波動之數值分析研究”, 海洋大學河海工程學系碩士論文。

附錄 A 期中/期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：花蓮港港池共振機制研究(4/4)

執行單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(一)李委員兆芳 1. 計畫中對於國內花蓮港相關文獻的收集和回顧相當完善。 2. 圖形 1.20~1.21 張數相當多，建議可以挑選代表性結果作詳細說明。 3.p.1-41 測站標示在圖 4.4 中的內容有出入。 4.p.2-46 倒數第二段，“其距離利奇”，有筆誤，請更正。 5.結論中可更明確說出目前的成果。	1. 謝謝委員鼓勵。 2. 圖幅過多的問題將在期末報告前與港研中心討論。 3. 筆誤部份將再改善。 4. 筆誤部份將再改善。 5. 結論部份將再加強。	符合 符合 符合 符合 符合
(二)陳委員冠宇 1.p.1-57~1-58，1.8 節 2.與 3 小節：書寫格式應改正。 2.chap2 平時與颱風季節都有亞重力波的結論似乎對本共振機制之研究幫助不大。若能釐清是 bound 或 free 的長波，或是比較其能量與短波能量的關係，會更有價值。 3.p.3-4，RC、MC、HC 未說明。	1. 格式部份將再改善。 2. 有關外海亞重力波的存在問題，就目前由多個測站的觀測資料顯示應無爭議。至於其發生的機制是否與群波效應有關，目前尚在辨識中。但由於海洋波動的複雜性，似乎無法歸因到單一來源。 3. RC、MC 及 HC 風場係中央氣象局所提供預報風場的代名，未來文字將再加強說明。	符合 符合 符合

4.p.3-11 因各頻率分是以能量之方式疊加求 K_d，相位就可以不必管它，所以參考相位似無必要。 5.p.3-13，3.6 檢討與結論，由於本研究採用線性的模式，可以不必待颱風來襲就先算好，即以 swan 之波譜分量乘上單一頻率的單一方向入射波引治港池反應即可求得，不用考慮平行運算。	4. 由過去的港灣波動研究心得確定，各節點波動相對於原點的相位影響到波動疊加的合理性，也顯示出不同入射方向在港內可能引起不同的波動。因此，由波動方向引發的相位差應該考慮。 5. 如同報告中所述，由於各個節點的波浪方向不同且無法預測，對整個波場設定單一入射方向將會引起不同的港內波動，例如波浪可能會集中或發散(Lin, 1995)。	符合 符合
(三)蕭委員俊賢 1. 增加束縮水道兩側岸壁的消波能力，相關設施如何佈設？是否影響船隻航行安全？ 2. 花蓮港內之水流觀測構想很好，但是如何實施觀測及觀測位置選點為何？ 3.報告內容有些許錯字，如蕩漾宜改為盪漾等，請再作檢視修正。 4.颱風波浪行進方向與觀測之港口各個不同，拿來作比較，是否合理？	1. 增加束縮水道兩側岸壁的消波能力的方式可藉由增加岸壁的摩擦係數(粗糙度)來提升，但這可能不是個合理的方法，因為它會造成碼頭面無法使用。臨時性機械式的操作方式在 96 年的計畫報告中已經說明，請委員參考。 2. 水流觀測擬先評估現有港內的觀測點的適切性，或者配合另一個船舶運動量測工作進行同步量測，以提升參考價值。由於設備有限，主要考量位置將在內港選定。 3. 錯字或用詞部份將再檢討。 4. 由於現場觀測不易，尤其是花蓮港的外海部份。目前數值模擬與現場觀測的比較建議莫衷一是，計畫執行單位仍在思索如何合理地進行比較。	符合 符合 符合 符合

(四)簡委員仲璟 1.花蓮港港內波高增幅係數除了隨週期(或頻率)改變而有不同數值外,另與基準點、碼頭區位置及時間也有關聯。然報告中第 1-38 頁圖 1.24 所顯示各站之波高增幅係數卻很相似,請查核後說明。 2.第四章結論部分僅強調後半欲進行之工作事項,請補充前半年之工作成果說明,以符期中報告之目的。 3.本計畫為研究期程最後一年,故期末報告請綜合歷年重要成果,以總結方式撰寫。	1. 圖 1.24 的波高增幅係數圖有錯置情形,將再進行更正,感謝委員指正。 2. 期中報告之研究成果將補充說明。 3. 期末報告將以四年總結的方式進行編寫。	符合 符合 符合
(五)蘇委員青和		
1. 第一章 1.7 節,有關前三年主要研究成果部份,皆僅以基本資料圖展示,略顯繁雜而不易展示重點成果,建議以統計表或統計圖重點彙整各項成果。在有關港池共振改善方案探討方面,也建議以製表說明各方案之差異或優劣處。 2. 第二章現場波浪觀測與資料分析部份,蒐集之觀測資料甚多,繪製基本圖也甚多(特性相似),但重點展示不甚清晰,以下幾點建議 (1) 物理性重複之基本圖(資料圖或波譜圖)代表性說明即可,其餘可後移放置於附錄。	1. 有關前三年的研究成果為讓本年度的計畫審查委員能清楚瞭解,因此敘述略過繁雜,未來期末報告將會改善。港池共振改善方案的探討部份本計畫僅是提出可能的構想,並作初步的數值模擬或可行性分析,至於詳評的部份依本計畫的規模勢必無法達成,請委員見諒。 2. 第二章所列觀測資料分析圖主要是讓委員們能清楚觀察在颱風來襲前至通過後的整個波譜變化過程,以便能提供計畫執行上的參考。 (1) 為了減少報告的頁數,節省紙張,未來期末報告將會大量地以光碟片方式呈現分析結果。	符合 符合 符合

(2) 建議增加港內外颱風波浪資料分析，並針對同時間於港內外港觀測之資料比對分析，作不同週期成份之增高係數分析。	(2) 有關港內外颱風波浪資料的分析比較，在報告中已經說明由於觀測時間僅有 20 分鐘，觀測站點位又過度地靠近港區，若要拿來當作外海入射波將會引發更大的質疑。目前本計畫正研擬如何作相對性的波高增幅係數比較。但由於外海波動所引發的港內波動會隨著不同海氣象而改變，任一特定週期成分的波高增幅係數預測將不會是一個定值。	符合
(3) 觀測之長週期成份是否存在?其數量級甚小，應增加更強有力之資料佐證。	(3) 觀測之長週期波成分依本計畫的量測原始資料已經顯示其存在性，本計畫也已經說明在常時波動中期能量甚低大約是一般重力波的十分之一，而在颱風時期能量則有大量增加情形。	符合
3. 第三章花蓮港港灣波動預報模式建置方面，以下幾點建議:	3.	
(1) 模式建置甚完整，本年度也作精進，成果豐富，但與颱風期間實測資料比對驗證部份稍嫌薄弱。例如第 1-38 頁圖 1.24 之現況港內 9 點波高增幅係數圖，9 站之曲線幾乎完全相同,甚不合理，應與實測資料比對作一驗證。	(1) 圖 1.24 的波高增幅係數圖有錯置情形，將再進行更正，感謝委員指正。與實測波浪的比較說明如 2(2)項。	符合
(2) 可加強模式應用於港池共振改善方案評估部份探討，此部份應為本計畫之研究重點之一。	(2) 港池共振改善方案評估如同第一章中所述，幾乎能考慮的一般性改善方式在貴中心的多項研究報告中已經提出且評估，而其評估結果不會因為使用的數值模式不同而有明顯差異。本計畫將在下半年繼續研擬其它的改善構想，並針對其中可以進行數值模擬的方案進行計算。	符合

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：花蓮港港池共振機制研究(4/4)

執行單位：國立臺灣海洋大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
(一)李委員兆芳 1. 改變取樣時距，可以找到長週期波浪，建議未來可繼續研究。 2. 聯合觀測構想很好，可以再加詳細說明。 3. 重要的結果圖形，可以放大來看，以便讀者研讀。 4. 佈置方案五效果不錯，可進一步思考加強的配合措施。	1. 感謝委員的支持。 2. 現場波浪觀測如能延長取樣的時間，對長週期波動成分的觀察確有幫助。聯合觀測尤其能據此推算長週期成分的可能來源。未來之現場波浪觀測將予以考慮。 3. 圖幅過小問題將改進。 4. 配置方案五除進行現場評估外，亦建議港研中心考慮進行水工模行試驗的可能性。	符合 符合 符合 符合
(二)林委員銘崇 1. 工作包含現場調查，水工試驗之資料分析及數值模式計算，內容相當完備，結論具體羅列各種思考方向結果，具有參考價值。 2. 波動觀測取樣時間間隔設定為 15 秒(或 6 秒)，顯然係已經考量港內長週期波之存在，宜適度說明選定理由及可能之其他短間隔的比較。 3. 提升 7 號及 12 號碼頭消波能力之構想，可進一步具體規劃探討評估。	1. 感謝委員的支持。 2. 取樣間隔的選定主要仍歸因於現有觀測儀器之電池容量與記憶體的大小。文中將補充說明。 3. 配置方案五除進行現場評估外，亦建議港研中心考慮進行水工模行試驗的可能性。	符合 符合 符合
(二)陳委員冠宇		

1. 3.2.4 格式有誤。	1. 已經修正，謝謝委員指教。	符合
2. Fig4.39 位置偏北，有誤。	2. 已經修正，謝謝委員指教。	符合
3. 4.6 之預報模式意義不大，因風浪模式波譜並未計算亞重力部分的波高。	3. 波浪預報模式係先探討預報的可行性，長波部分如能得到其與風場間的關係的話，利用線性能量疊加方式應可討論。	符合
4. Fig5.4、Fig5.5 配置構想一、二皆無驗證，不適合放在最後一年的期末報告中。	4. 配置構想一與二未作數值驗證，但已就實務上討論，因此仍建議放置報告中，提供未來後續研究者參考。	符合
5. 6.1 結論 4，岸壁反射固然有影響，但未證實有辦法減小長波的反射之前，不宜說期反射特性造成盪漾。	5. 6.1 結論 4 主要說明如果能夠削減港內的波浪反射效應，則即使港內有入射長波也不致造成重大影響。依照港灣振動的理論，港內的振盪仍主要歸因於反射波的無法消除。	符合
6. 6.1 結論 5，壓力與波高之研究並未針對長波進行實驗，列在結論可能誤導爾後之研究方向。	6. 6.1 結論 5 在說明本計畫執行團對所進行過之相關模型試驗中顯示壓力與水面波形的關係並非只有水位高度變化的影響，即使依微小振幅波理論定義為深水波的部分亦可量測到些微的壓力週期性變化，因此研判可能尚有水粒子運動造成之水壓力變化。	符合
7. 長週期成分與短波之關係建議進一步歸納分析是否與 $H_{1/3}^2$ 成正比或與 $H_{1/3}$ 成正比之類的關係。	7. 由於經費、時程、設備與人力有限，長週期成分與短波之關係仍須再於後續檢討。	符合
8. 已有之颱風觀測資料十分寶貴，但請註明該颱風是否造成振盪，波高以 $H_{1/3}$ 週期聯合分佈圖看不太出來。	8. 相關的頻譜分析當中可以看到長週期成分的消長情形，其餘相關分析將納入後續研究探討。	符合
9. 現有之觀測與模擬之結果	9. 現有觀測與模擬結果之比較	符合

是否打算進一步的比對。	將盡可能進行。	
(四)蕭委員俊賢 1. p1-13 本報告係期末報告，第9行請改正。 2. p4-41 本研究採取兩個步驟，步驟為何？ 3. p5-1 三個大規模水工模型試驗，(12)請刪除，以符題意。 4. 預報模式是否已建置完成？或納入後續計畫內？ 5. 建請如有後續計畫，應將改善各方案試驗之配置。納入九河局規劃之錨型突堤養灘模型。	1. 已經修正，謝謝委員指教。 2. 已經修正，謝謝委員指教。 3. 已經修正，謝謝委員指教。 4. 花蓮港波浪預報模式已經建置，未來需要進行的是外海波浪推算模式的改善，以及相關驗證。 5. 基本上九河局規劃之錨型突堤養灘之相對尺度不大，應不影響花蓮港的波動。	符合 符合 符合 符合 符合
(四)簡委員仲璟 1. 根據本所 2004~2007 年於花蓮港進行之港內外波浪同步觀測資料分析顯示，花蓮港港內的長週期波動並非是颱風時期所特有。換言之，平常時期港內已有長週期波動成分存在，只是其能量不明顯，但颱風期間其能量隨颱風動態(路徑、強度及移動速度等)可能明顯增加。此初步研究結果與本報告結論相同，因此後續可針對尚待進一步釐清事項，再構思合作研究之主題與方法。	1. 謝謝委員的指教，花蓮港的長週期振盪問題，以及現場波浪觀測的標準作業程序檢討都有必要作進一步的討論。	符合

2. 第 3-25 頁倒數第 8 行，「週期在 0.0005Hz 以下的.....而增加太多。反而是 0.0005Hz 以下.....明顯地成長。」此段文意似有矛盾，請查對後修正。 3. 第四章有關港灣波動預報模式的驗證工作如何進行？請補充說明。另外第 4-41 頁兩個步驟說明編排有誤也請修正。 4. 第 5-18 頁有關 9 個測站位置沒有圖示，請補充。事實上此 9 個測站應是模擬計算之檢查點，為避免混淆請考慮改用較合適之名稱。 5. 第六章結論 1.提及尚有大量的分析結果正在處理中，其是否能於正式報告提送前完成？請說明。	2. 第 3-25 頁倒數第 8 行文字有誤植情形(週期與頻率)將進行修正。 3. 港灣波動預報模式的驗證主要仍和近岸波浪預報模式的推算結果有關，後續擬再配合港研中心的相關研究進行模式的驗證與改善，以期提高其應用性。文字編排有誤部分將再改進。 4. 9 個測站之位置與編號如圖 4.5 所示，將補充說明。 5. 由於資料量太大，且分析的項目甚多，本計畫將儘力完成，並隨時與港研中心討論。正式報告提送前可能僅能作一般分析，而且目前尚在觀測中。	符合 符合 符合
(五)蘇委員青和 1. 第二章建議補充說明有關波壓與波高關係，在線性理論與試驗結果之整體相對誤差數量級。 2. 第三章現場波浪觀測與資料分析部份，四年蒐集之觀測資料甚多，繪製基本圖也甚多(特性相似)，	1. 由於試驗的組數尚有不足之處，與線性波理論之差異性將儘量就現有資料討論。 2. 波浪觀測部分已經儘量提供代表性的資料進行討論，由於本觀測的目的在探討長週期成分的存在性，不宜以一	符合 符合

但重點展示不甚清晰，建議物理性重複之基本圖(資料圖或波譜圖)代表性說明即可，其餘可後移放置於附錄，討論部份以製表彙整說明四年之具體重要成果。	般常態性波浪觀測方式編寫報告。	
3. 第四章花蓮港港灣波動預報模式建置方面，模式建置甚完整，本年度也作精進，但與颱風期間實測資料比對驗證部份稍嫌薄弱。	3. 如同本計畫報告中所述，花蓮港港灣波動預報模式建置的先期目標在探討其可行性與技術方面的處理，颱風期間實測資料比對驗證部份並非本研究計畫的目標，仍待後續研究探討。	符合
4. 第五章有關港池共振改善方案可行性評估方面，除表 5.3 針對不同配置間之差異比較外，也建議以製表說明各方案之改善程度差異或優劣處。	4. 本研究所探討之改善方案的差異性甚大，似不需要進行太細節性的比較，建議港研中心未來能進行更周密的水工模型試驗以利比較。	符合
5. 第六章結論稍嫌鬆散，建議增加各章節之重要具體成果。	5. 本研究之各章均具有其任務及成果，已於結論中檢討，但為避免結論失焦，不宜擴大檢討。	符合

附錄2 期末報告簡報資料

交通部運輸研究所合作研究計畫

花蓮港港池共振機制研究(4/4)
(MOTC-IOT-97-H3DB002)

合作單位：國立台灣海洋大學河海工程系



花蓮港港池共振機制研究(4/4)

報告內容

第一章 計畫背景分析

第三章 波浪觀測與資料分析統計

第四章 花蓮港港灣波動數值模式的建立與數值模擬

第五章 港池共振改善方案可行性評估

第六章 結論與建議



國立台灣海洋大學河海工程系

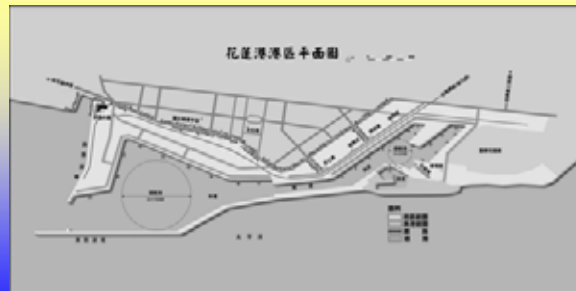
2



第一章 計畫背景分析

計畫緣起：

- ◆ 為了瞭解花蓮港港池共振機制以及研提改善防治對策
- ◆ 交通部運輸研究所乃依據94-97年度科技研究計畫「港灣環境資訊系統及數值模式應用研究」之綱要計畫總目標擬定為期四年的研究計畫以進行與花蓮港港池共振機制相關的研究
- ◆ 配合港研中心的相關研究，從水工模型試驗、現場觀測、及數值模擬等方面探討花蓮港的港池共振機制。



主要工作項目

第一年(94年)主要工作項目

1. 進行波壓與波高轉換函數相關的水工模型斷面試驗，建立港內波壓與波轉換關係；
2. 針對花蓮港現場波浪觀測的資料作波浪特性的統計與分析；
3. 建置花蓮港港灣波動數值模擬的模式，進行規則波數值模擬，並與相關研究成果相比對；
4. 花蓮港防波堤振動特性與沉箱變位資料分析。

第二年(95年)主要工作項目

1. 繼續進行波壓與波高轉換函數的相關水工模型平面試驗(配合中心辦理)；
2. 繼續進行花蓮港現場波浪觀測的資料分析與波浪特性統計(配合中心辦理)；
3. 以理論頻譜進行不規則波的港灣波動數值模擬；
4. 規劃及設計三維潮流數值模式。

第三年(96年)主要工作項目

1. 持續進行花蓮港及附近海域現場波浪觀測與資料分析統計(合辦)；
2. 以現場實測頻譜進行不規則波的港灣波動數值模擬，並與港內的實測值進行比較。同時，也進行多方向不規則波的數值模擬，以探討花蓮港港池共振機制；
3. 港池共振改善方案可行性評估(合辦)。



花蓮港池共振機制研究(4/4) 第一章 計畫背景分析

主要工作項目

第四年(97年)主要工作項目

1. 持續進行花蓮港及附近海域現場波浪觀測與資料分析統計(合辦)；
2. 以規則波及不規則波的港灣波動數值模擬結果，對各改善方案之港池靜穩度進行評估；
3. 配合本所92~96年「近岸數值模擬系統之建立」研究計畫成果，探討及測試港灣波動數值模式與近海波浪預報模式結合，建構花蓮港波浪預報模式(合辦)；
4. 解析花蓮港波浪特性及其與港池共振關聯性之綜合探討；
5. 綜整四年研究成果進行總結報告。

 國立台灣海洋大學河海工程系 5

花蓮港池共振機制研究(4/4) 第三章 波浪觀測與資料分析統計

1. 取樣頻率對波動資料分析的影響

為了進行長期的波浪觀測，本計畫考量到自記式波浪儀的記憶體容量，以及人力資源的使用，除了兩次聯合觀測中，配置了兩種不同廠牌的壓力式波高計，其中鎮儀公司的S700波高計係以0.5秒(2 Hz)進行連續取樣，而SeaBird的SBE39水位計則是以6秒(0.16667 Hz)進行取樣。在例行性的觀測工作中則僅以SBE39水位計進行6秒(0.16667 Hz)或15秒(0.06667 Hz)的連續取樣。由於取樣頻率的不同，也引發了**訊號失真(aliasing)的疑慮**。本章的測試即針對此一主題進行相關的探討。

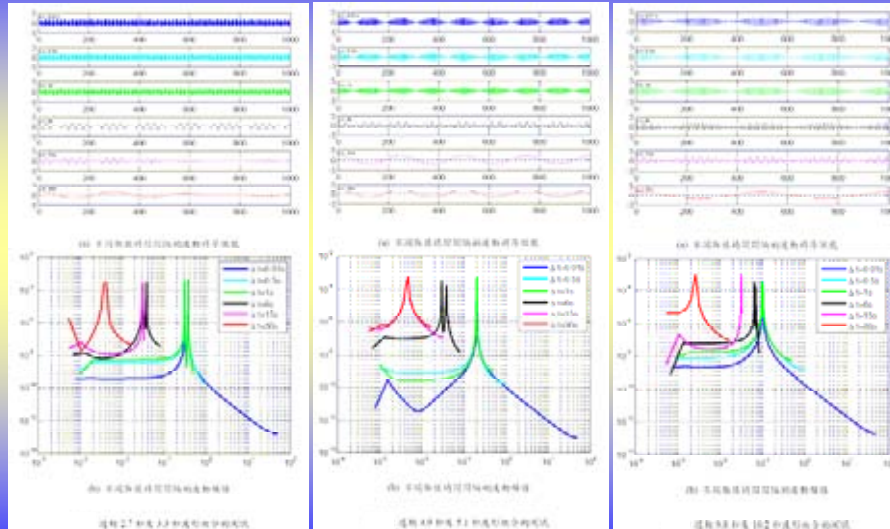
- 測試的波形：由兩個餘弦波線性疊加而成。
- 為避免原始訊號的失真，我們以0.01秒的時間解析度及1000秒時間長度進行訊號的建構

$$\eta(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T(1-\alpha)}t\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{T(1+\alpha)}t\right)$$

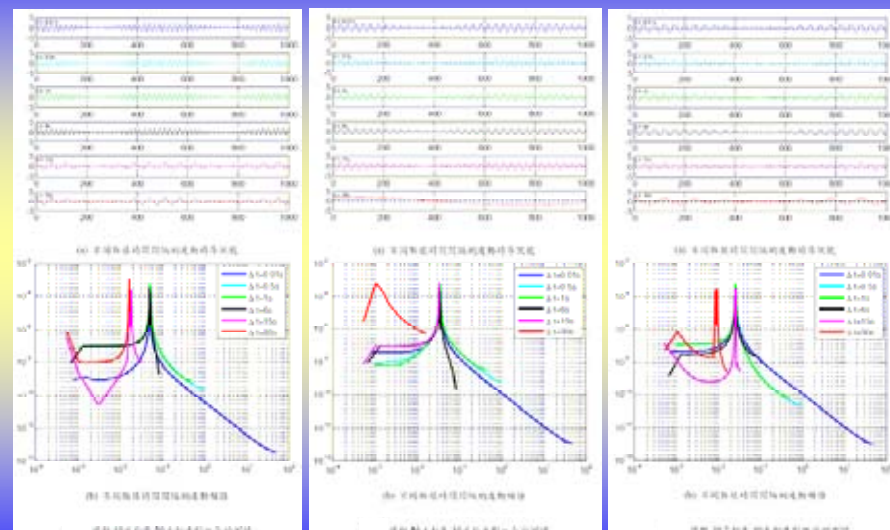
- T為主要代表週期，介於3至50秒之間，間隔1秒；α為週期調整值，以介於0.02至0.2，間隔0.02進行相關的測試。在波形方面一共測試480種組合。
- 為探討不同取樣頻率所可能造成的訊號失真問題，乃以不同的取樣時間間隔，如0.5、1、6、15及30秒等在原始波形上取樣，並進行FFT的頻譜分析，從頻譜上觀察訊號的失真情形。

 國立台灣海洋大學河海工程系 6

1. 取樣頻率對波動資料分析的影響

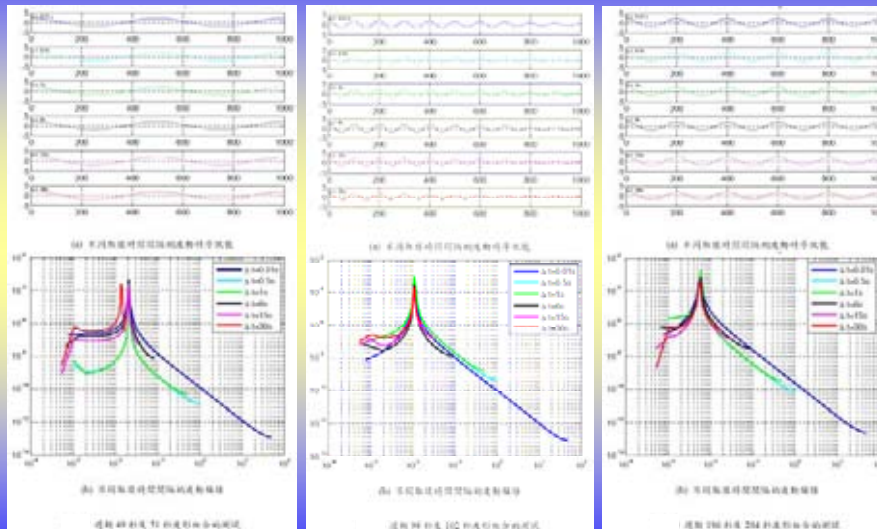


1. 取樣頻率對波動資料分析的影響

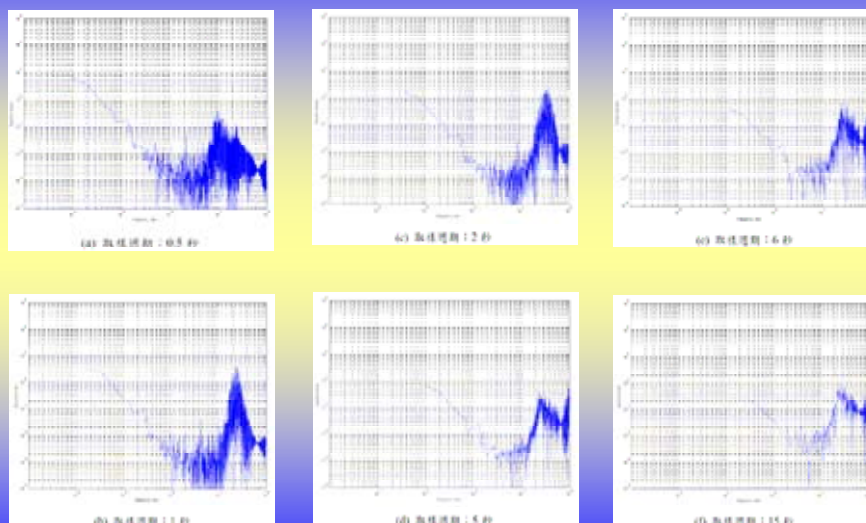




1. 取樣頻率對波動資料分析的影響



1. 取樣頻率對波動資料分析的影響(以花蓮港外港區實測資料進行測試)

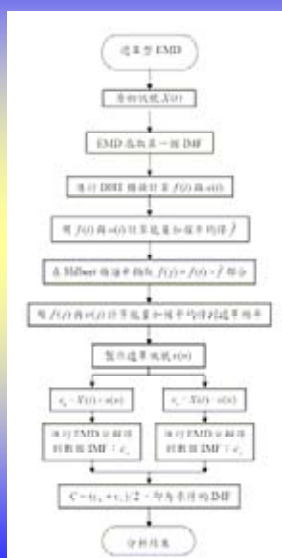


1. 取樣頻率對波動資料分析的影響(以花蓮港外港區實測資料進行測試)

- 不同週期的單一規則波浪在不同取樣頻率下，可能產生訊號的失真。
- 如同在Fourier頻譜分析中所要求的，只要所使用的取樣時間間隔能在一個波動中取得兩個點，在頻譜分析中的各成分波頻率便不致發生失真問題。
- 以實測波浪進行不同取樣頻率測試中，發現較低之取樣頻率可能導致能量的減損，但目前並未發現有新的低頻成分出現。
- 依照比較的心得，本計畫所設定的波動觀測取樣時間間隔為6秒或15秒，應可以正確地抓取到週期12秒或30秒以上的波動成分。



2. & 3. HHT在波動分析上的應用(EMD的應用)





4. 花蓮港港內波浪觀測分析

花蓮港附近水位聯合觀測

觀測位置	資料收集期間	使用儀器
花蓮港內港	2005/05迄今	Seabird公司SBR90潮位儀
花蓮港外港	2005/05迄今	
鹽寮漁港	2005/05迄今	

東部海岸水位聯合觀測

觀測儀器：鎮儀公司S700壓力式波高計及Seabird公司SBR90潮位儀

觀測位置：花蓮港之內港區及外港區；鹽寮漁港；石梯漁港；金樽漁港；大武漁港

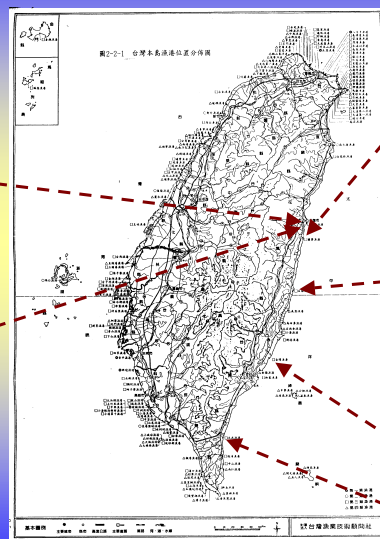


4. 花蓮港港內波浪觀測分析

鎮儀S700壓力式波高計
Seabird公司SBR90潮位儀
1 Hz, 15000 s/record

花蓮港內港

花蓮港外港



鹽寮漁港

石梯漁港

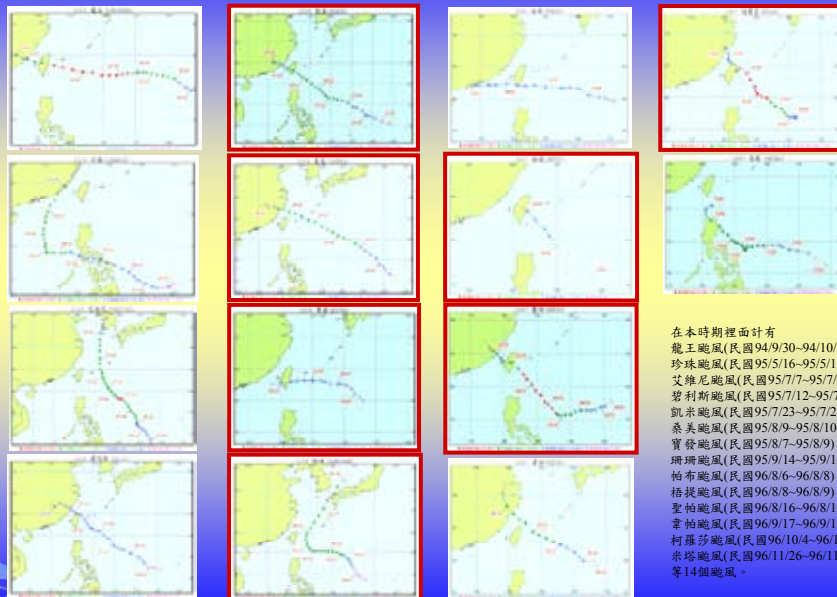
金樽漁港

大武漁港





4. 花蓮港港內波浪觀測分析



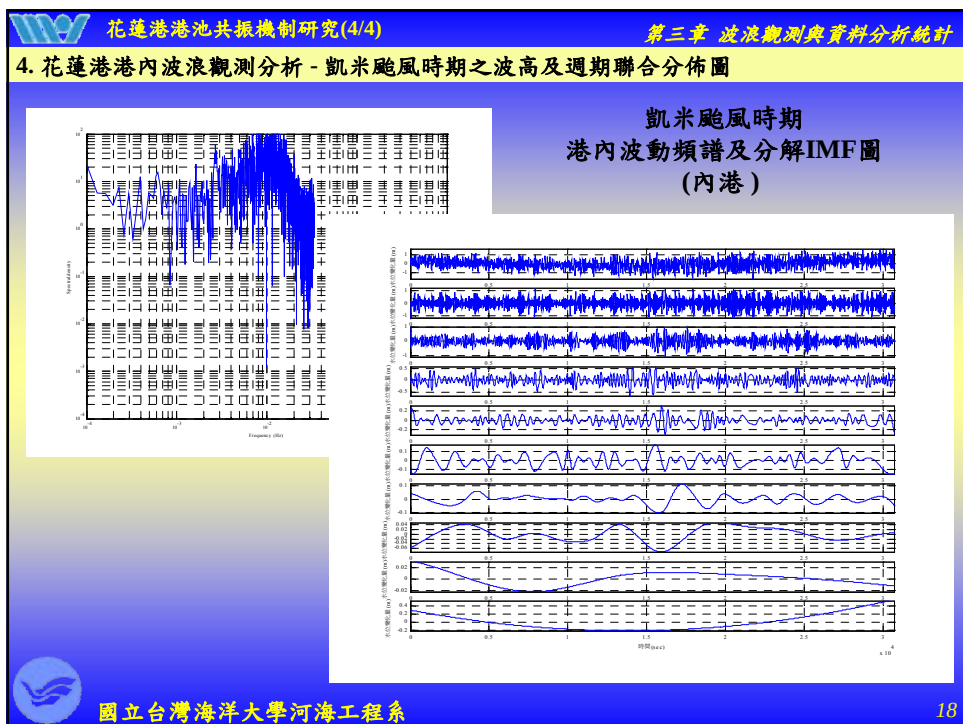
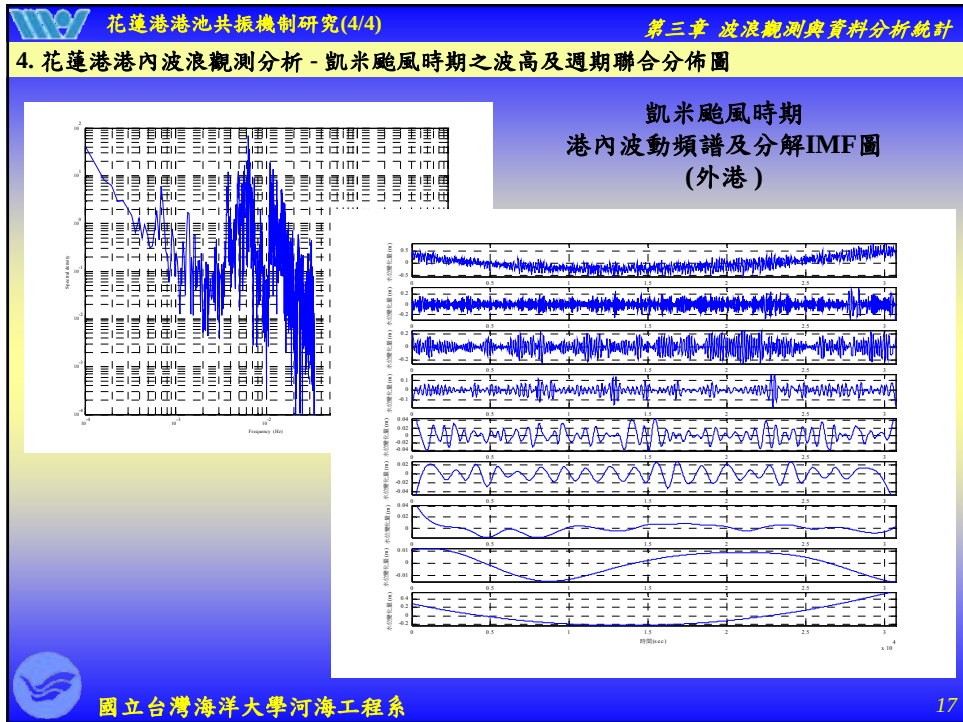
4. 花蓮港港內波浪觀測分析 - 凱米颱風時期之波高及週期聯合分佈圖

週期 (秒)	波高 (公尺)											總次數 20336
	0-0.1	0.1-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	>5
>500	0.031570	0.000100										0.000334
400-500	0.009832											0.000100
300-400	0.018728	0.000033										0.000100
200-300	0.035449	0.000702	0.000033									0.000268
100-200	0.198348	0.011678	0.000100									0.001471
50-100	0.376530	0.033073	0.000334									0.005412
30-50	0.233663	0.015584										0.001609
15-30	0.025550	0.000535										0.000702

(a) 外港

週期 (秒)	波高 (公尺)											總次數 34566
	0-0.1	0.1-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	>5
>500	0.028178	0.001360	0.000033	0.000033								0.000203
400-500	0.008824	0.001244	0.000029									0.000110
300-400	0.018602	0.003058	0.000347	0.000174								0.000110
200-300	0.038622	0.011109	0.000984	0.000579	0.000205	0.000029	0.000029					0.000087
100-200	0.149743	0.046173	0.006220	0.001475	0.000781	0.000205	0.000029					0.000203
50-100	0.307443	0.078719	0.016461	0.003443	0.001185	0.000203	0.000110					0.000492
30-50	0.184169	0.041717	0.010325	0.001649	0.000110							0.000250
15-30	0.027686	0.005757	0.001273	0.000029								0.000145

(c) 內港





4. 花蓮港港內波浪觀測分析－桑美及實發颱風時期之波高及週期聯合分佈圖

波高 H (公尺)	週期 T (秒)										總次數 35631
	0-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000	
>500	0.029066	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000348
400-500	0.011708	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000218
300-400	0.021588	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000109
200-300	0.035152	0.000136	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000082
100-200	0.218104	0.001310	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000429
50-100	0.408886	0.005568	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.002484
10-50	0.219622	0.000437	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.001556
1.5-10	0.026173	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000791

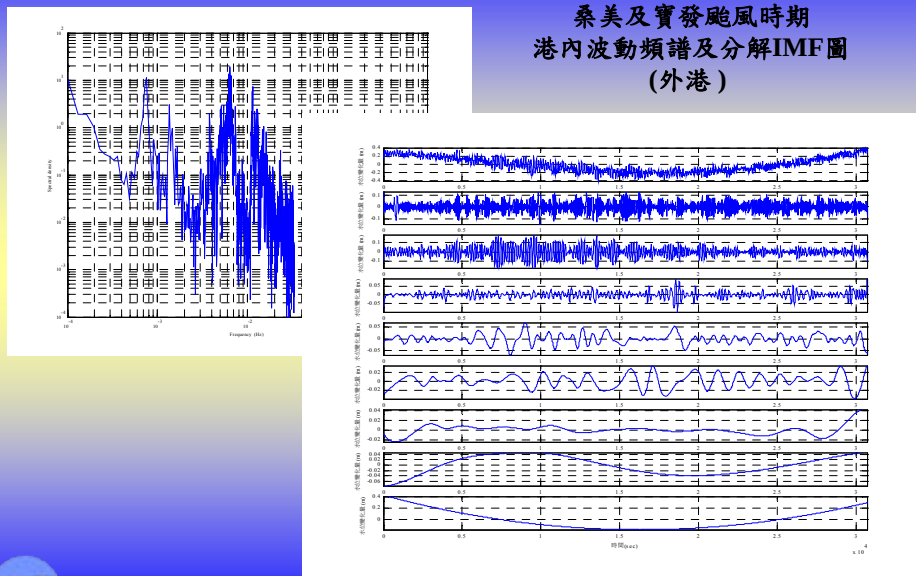
(a) 外港

波高 H (公尺)	週期 T (秒)										總次數 43776
	0-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000	
>500	0.026019	0.000503	0.000046	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000206
400-500	0.007258	0.000551	0.000023	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000069
300-400	0.017864	0.004089	0.000291	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000091
200-300	0.038172	0.014940	0.000571	0.000023	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000137
100-200	0.184400	0.050684	0.001479	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000414
50-100	0.326480	0.083265	0.000731	0.000023	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000278
10-50	0.197689	0.037601	0.000228	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000114
1.5-10	0.033603	0.003495	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000137

(c) 內港

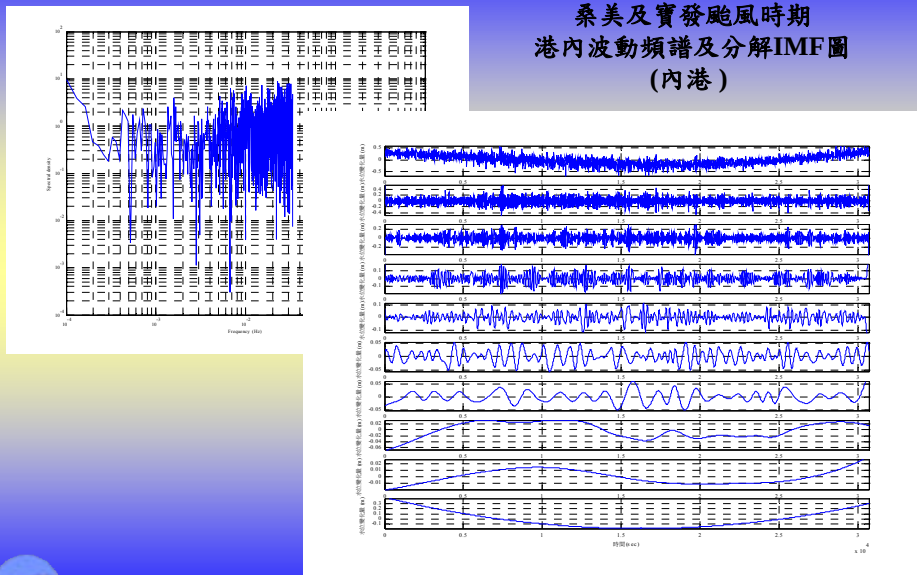


4. 花蓮港港內波浪觀測分析－桑美及實發颱風時期之波高及週期聯合分佈圖

桑美及實發颱風時期
港內波動頻譜及分解IMF圖
(外港)



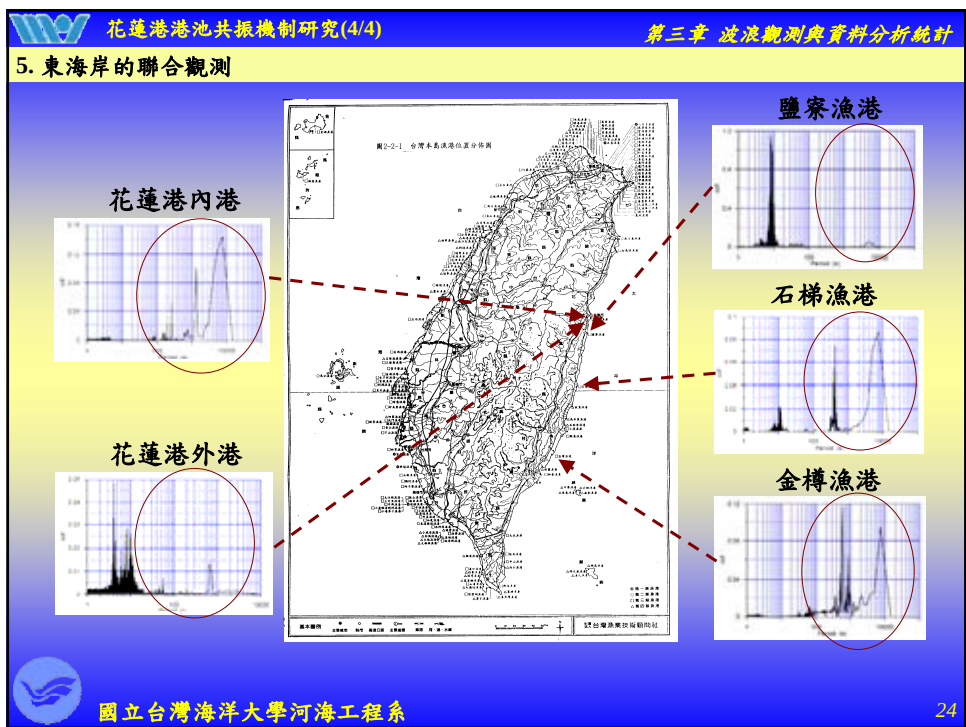
4. 花蓮港港內波浪觀測分析－桑美及寶發颱風時期之波高及週期聯合分佈圖

桑美及寶發颱風時期
港內波動頻譜及分解IMF圖
(內港)

4. 花蓮港港內波浪觀測分析－冬季季風時期之波高及週期聯合分佈圖(民國95年1月)

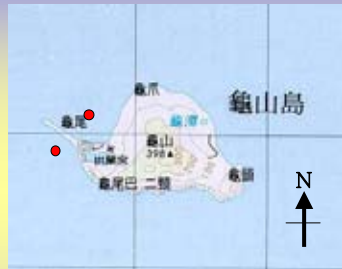
波 高 (公 尺)	>500	0.028333	0.000194	0.000305	0.000020	0.000003	0.000020	0.000003								0.000361
	400 ~ 500	0.009720														0.000020
	300 ~ 400	0.018969	0.000111													0.000005
	200 ~ 300	0.037798	0.000083													0.000111
	100 ~ 200	0.203921	0.000279													0.000279
	50 ~ 100	0.419502	0.000611													0.001111
	30 ~ 50	0.250618	0.000028													0.000776
	15 ~ 30	0.026356														0.000250
總波數 26007		0 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	2 ~ 2.5	2.5 ~ 3	3 ~ 3.5	3.5 ~ 4	4 ~ 4.5	4.5 ~ 5	> 5			
(a) 外港																
波 高 (公 尺)	>500	0.022484	0.000044	0.000077	0.000026	0.000012	0.000052	0.000026	0.000077							0.000361
	400 ~ 500	0.009040	0.001082	0.000062												0.000002
	300 ~ 400	0.019445	0.000709	0.000155												0.000000
	200 ~ 300	0.038684	0.013290	0.000180												0.000062
	100 ~ 200	0.154400	0.040909	0.000695												0.000180
	50 ~ 100	0.343550	0.063950	0.000232												0.000155
	30 ~ 50	0.218950	0.026502													0.000120
	15 ~ 30	0.032065	0.002988													0.000077
總波數 38827		0 ~ 0.1	0.1 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	2 ~ 2.5	2.5 ~ 3	3 ~ 3.5	3.5 ~ 4	4 ~ 4.5	4.5 ~ 5	> 5			
(c) 內港																







6. 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較



龜山島波浪觀測儀器放置(●)位置圖



鹽寮漁港波浪觀測儀器放置(●)位置圖

觀測時期：90/6/16~90/8/16及90/8/15~90/10/27
 測站水深：約13.5公尺處
 觀測方式：每隔兩小時以2Hz連續取樣20分鐘

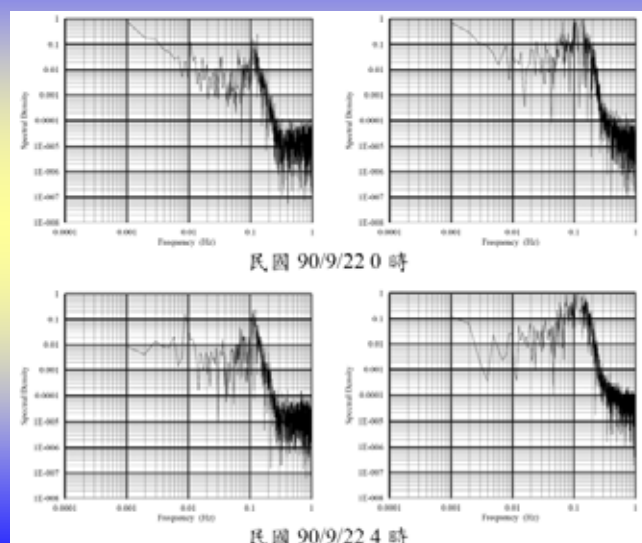
觀測時期：89/12~91/2
 測站水深：約14.5公尺處
 觀測方式：每隔兩小時以2Hz連續取樣20分鐘



6. 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較

龜山島南側海域

花蓮鹽寮漁港

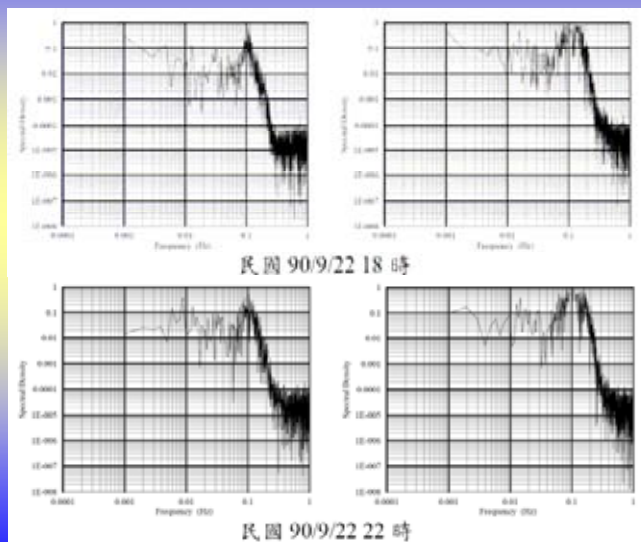




6. 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較

龜山島南側海域

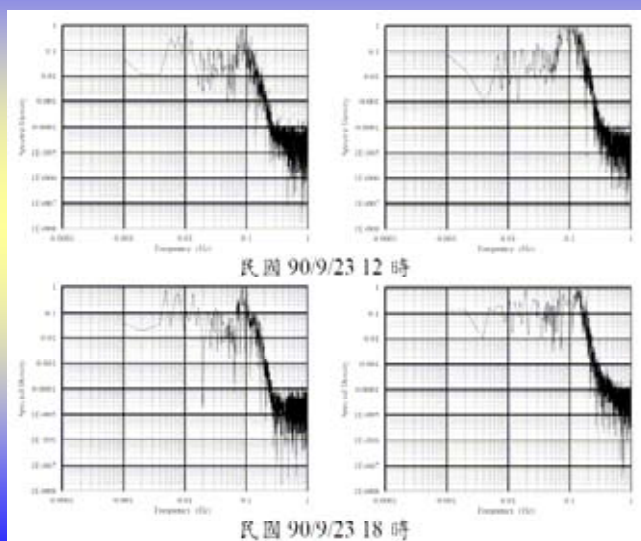
花蓮鹽寮漁港



6. 龜山島南側海域及花蓮鹽寮漁港之波浪觀測比較

龜山島南側海域

花蓮鹽寮漁港





第四章 花蓮港港灣波動數值模式的建立與模擬

1. 數值模式：

- 無限元素港灣水面波動數值模式 (H.S. Chen, 1990; Lin, 1995)
- 內水域的波動解析用有限元素法；外海的散射波解析用無限元素。
- 考慮非等深外海入射波的折射與淺化現象

2. 數值模擬：

- 規則波
- 單方向不規則波
- 多方向不規則波
- 以實測波譜進行模擬
- 花蓮港港灣波動預報模式的建置



5. 實測波譜的港灣波動數值模擬

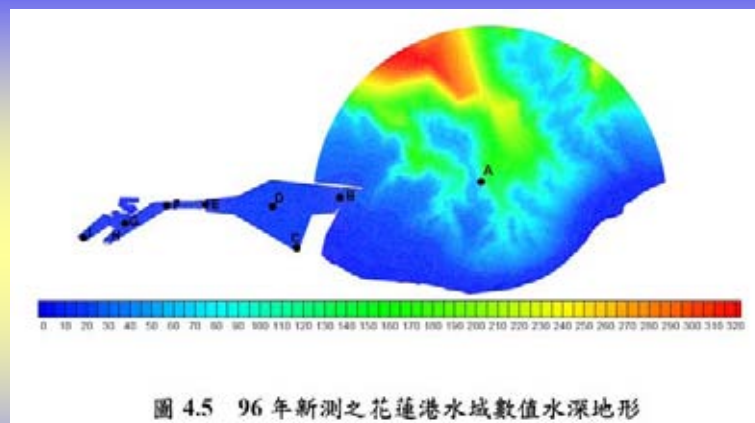


圖 4.5 96 年新測之花蓮港水域數值水深地形





5. 規則波動數值模擬

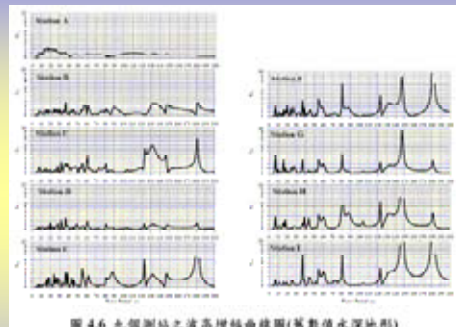


圖 4.6 九個測站之波高增幅曲線圖(舊數值水深地形)

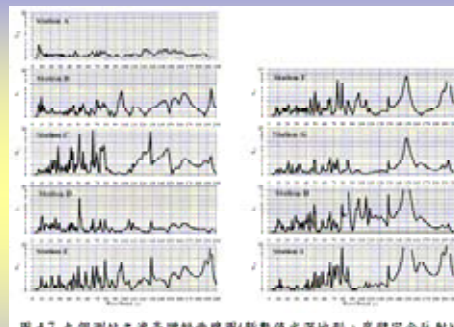


圖 4.7 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，岸壁完全反射)



5. 規則波動數值模擬

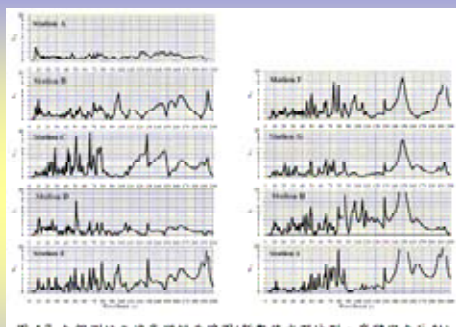


圖 4.7 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，岸壁完全反射)

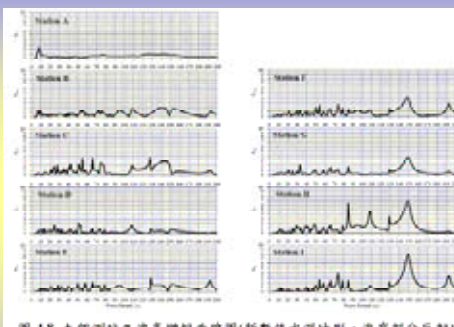


圖 4.8 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，海岸部分反射)





5. 規則波動數值模擬

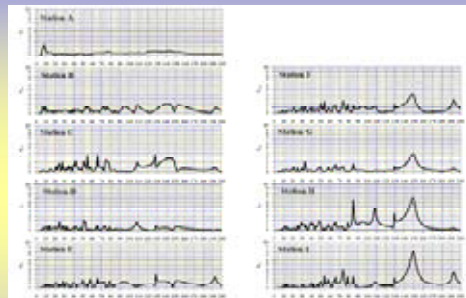
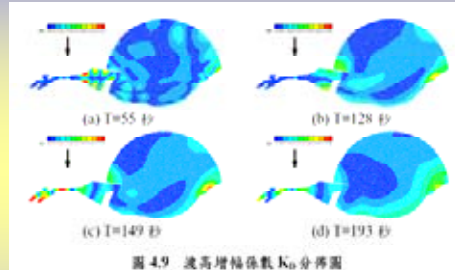


圖 4.8 九個測站之波高增幅曲線圖(新數值水深地形，海岸部分反射)

圖 4.9 波高增幅係數 K_0 分佈圖

5. 實測波譜的港灣波動數值模擬





5. 實測波譜的港灣波動數值模擬

數值模擬中短週期波動因網格分割緣故無法正確模擬

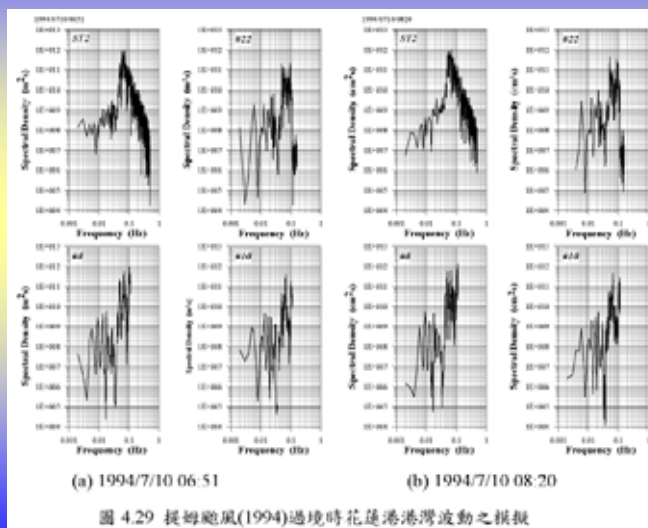
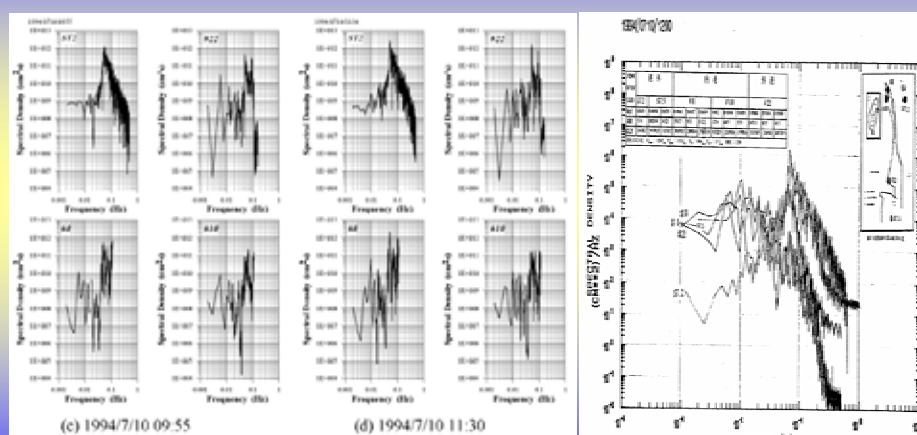


圖 4.29 提姆颱風(1994)過境時花蓮港港灣波動之模擬

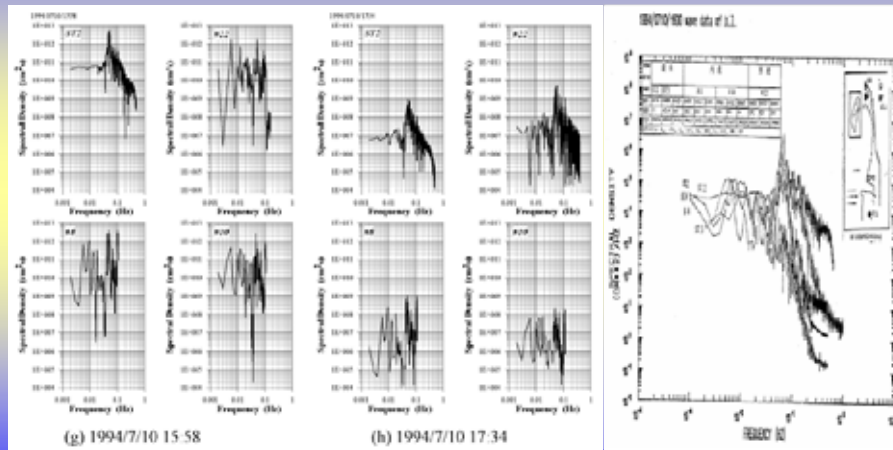


5. 實測波譜的港灣波動數值模擬

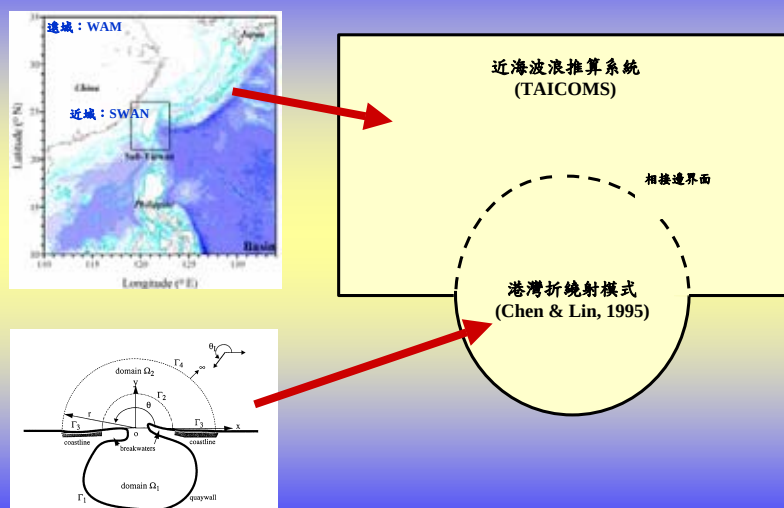




5. 實測波譜的港灣波動數值模擬



6. 花蓮港港灣波動預報模式的建置



6. 花蓮港港灣波動預報模式的建置

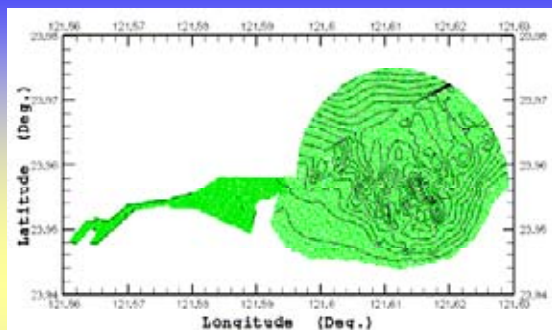


圖 3.8 數值模擬之網格及等深線

表 3.2 港灣波動預報模式中各計算領域的相關資料

範圍	使用模式	計算範圍	網格大小	使用風場
遠域(W1)	WAM	LAT: 10°N ~ 35°N LON: 110°E ~ 134°E	0.2°×0.2°	RC
近域(S2)	SWAN	LAT: 21°N ~ 26°N LON: 119°E ~ 123°E	0.04°×0.04°	MC
近域(S3)	SWAN	LAT: 23.9°N ~ 24°N LON: 121.6°E ~ 121.65°E	0.001°×0.001°	MC



6. 花蓮港港灣波動預報模式的建置

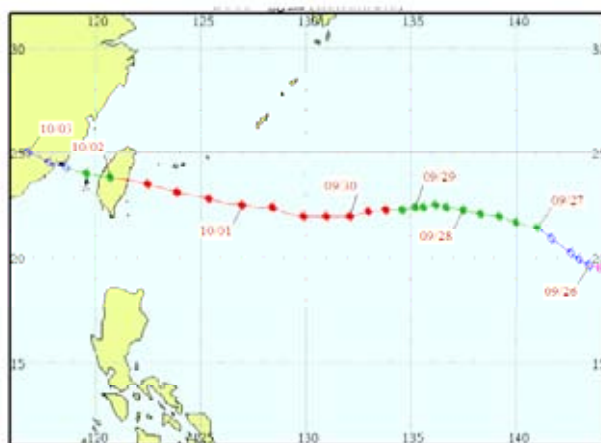


圖 3.9 龍王颱風路徑圖(2005/09/29-2005/10/03)





6. 花蓮港港灣波動預報模式的建置

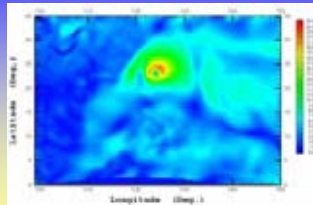


圖 3.10 MC 風場(2005/10/01 12:00)

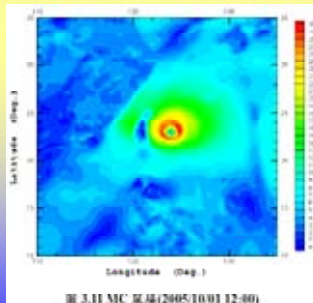


圖 3.11 MC 風場(2005/10/01 12:00)

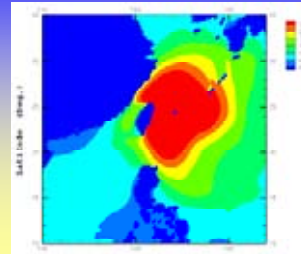
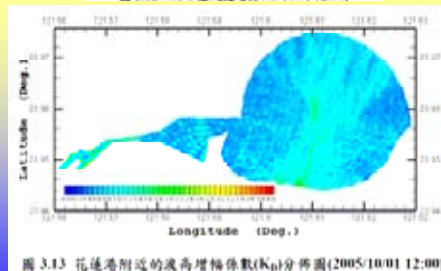


圖 3.12 WAVE 潮流場(2005/10/01 12:00)

圖 3.13 花蓮港附近的波高增幅係數(K_d)分佈圖(2005/10/01 12:00)

6. 花蓮港港灣波動預報模式的建置

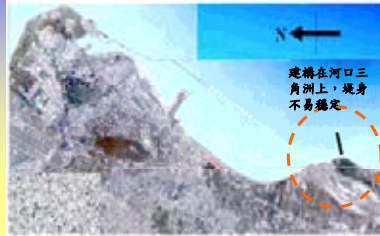
1. 港灣波動數值模式可以透過不規則波的波動模擬方式，與近海波浪預報模式相結合，並構成一港灣波浪預報系統。只要相關單位提供近海波浪預報及風場資料，便可啟動本預報系統。
2. 近海波浪預報的資料可以透過相接邊界面上各節點的一維或二維頻譜提供港灣波動數值模式入射波的條件。本研究目前採用一維頻譜進行模擬。
3. 港灣波動模式將輸入頻譜之各成份波之波高、週期及方向視為規則波分別進行數值模擬。最後以能量加總的方式得到不規則波的增幅係數(KD)eff分布。
4. 由於港灣波動模式也可以模擬海岸結構物後方的波浪繞射情形，因此不論是島嶼附近或人工構造物附近的波動都可以模擬。
5. 本研究所使用的電腦是個人電腦(Intel Core 2 Duo CPU E6550 @ 2.33GHz with 2.33GHz 3 GB RAM)及Microsoft XP作業系統 而每一個時間步驟均是以23個規則成分波組成的不規則波模擬，因此其計算時間相當冗長。平均每一個預報時間點的港灣波動計算約需要1個小時的計算時間。未來應考慮採用更高速的平行電腦來運算。由於相當耗時，目前本模式用來做預報工作的話，可能還不恰當，但是如果用在波浪的追算方面則相當適合。





第五章 港池共振改善方案可行性評估

佈置構想一



佈置構想三



佈置構想二



佈置構想四



測試方案

佈置方案一：原始方案，港內反射率為1.0，港外海岸為0.5

佈置方案二：同佈置方案一，但束縮航道的兩側反射率設為0.5

佈置方案三：佈置構想三，自束縮航道入口處阻斷，模擬防潮閘門

佈置方案四：佈置構想四，在束縮航道兩側增設短突堤

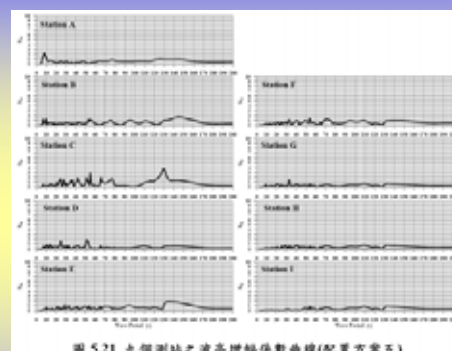
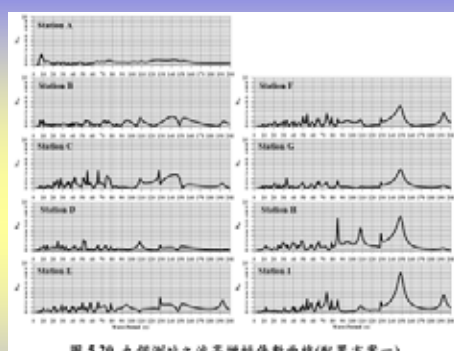
佈置方案五：同佈置方案一，但假設#7及#12碼頭處為沙灘，反射率設為0.0



測試方案



測試方案



測試方案

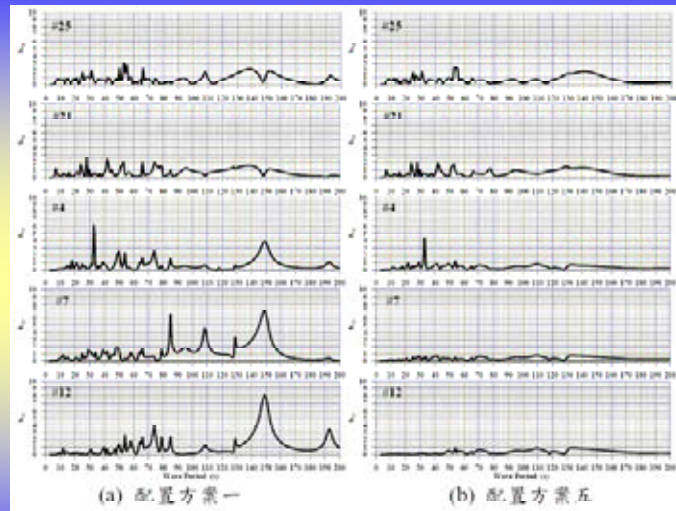


圖 5.22 五個碼頭附近之波高增幅係數曲線(配置方案一及五)



測試方案

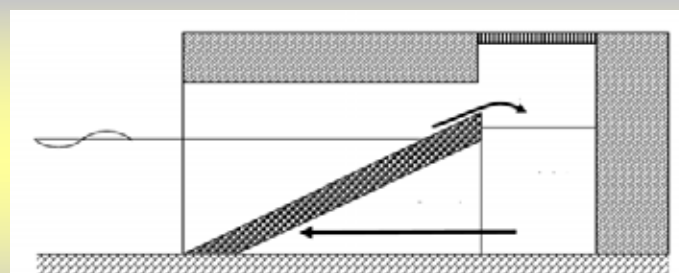


圖 5.23 削減長週期波反射能量之設施構想圖(#7 及 #12 碼頭)





第六章 結論與建議

相關具體成果

1. 除了長期在花蓮港內進行長期水位觀測外，也在東部海岸多個港口進行了多次的同步聯合觀測。由於資料龐大，目前尚有大量的分析結果正在整理中。
2. 為了分析可能具有騎乘波/載波，以及非線性與非定常性波動成分的東部波浪，本計畫除了利用傳統的FFT及數值濾波技巧進行分析外也引進HHT中的EMD經驗型分解法，進行水位訊號的分析。就瑪莎颱風的水位觀測資料分析可以發現長週期的成分有隨著颱風的接近於增幅的現象。
3. 在港灣波動數值模擬方面，本計畫也先後建構了規則波、單方向不規則波，以及多方向不規則波的港灣波動模式，並進行相關的模擬及比較。此外也輸入現場的實測波譜進行測試，以及配合TAICOMS近岸波浪預報系統建構了花蓮港的港內波動預報模式。
4. 從現場的觀測以及數值模擬都發現花蓮港目前的港型佈置很容易羈留長週期的波動能量，因而導致長週期的振盪。
5. 在利用數值模擬探討可能的改善方案中，則發現如果能夠增加束縮航道兩側岸壁的消波能力削減進入內港水域的波浪能量，或是以臨時性防潮閘門阻絕波浪能量進入內港，或是提升#7及#12碼頭的消波能力都有助於改善花蓮港內的振盪問題。



1. 結論

1. 從水工模型試驗的觀點來看：

- 花蓮港港內的長週期波動現象，港研中心於1996、1997及2000年的三個大型專題研究計畫中已經針對各種可能的改善方案進行水工模型試驗(其成果分別發表於簡及邱，1996、簡等人，1999及邱等人，2003b)，其中包括從改變近海入射波能的結構、削減或消散入侵港灣的波能、及改變港灣自然振動週期的構想，例如在港外布置離岸堤、導流堤、潛堤、突堤等設施，或在港內增加消波設施削減波能、突堤改變水域結構、甚至藉由內水域花蓮漁港的擴建或是東堤的改建時加開出口以消散港內波能。然而，試驗的結果都發現改善的成效有限，花蓮港的港內仍然會有共振的現象出現。
- 邱等人(2005)指出一旦港灣的主體佈置定型後，任何局部性改善措施都只能產生有限的效果而已，除非大規模地重新塑造整個水域結構。
- 然而我們也必須注意到：在水工模型試驗中，整個港灣的波動試驗是在指定的造波條件下進行的。如果給定造波條件是屬於共振週期，則港內必然引起共振。因此，若將如此進行的水工模型試驗視為數值模擬的延伸性驗證，其與實際水域波動的關連性應該再加以釐清。





1. 結論

2. 從數值模擬的觀點來看：

- 花蓮港的港灣共振特性在過去豐碩的研究成果中，雖然由於各個模式的背景不同而略有出入，但是其可能發生共振的週期幾乎都已確認。唯需要提醒注意的是數值模擬僅是依照特定的入射波週期進行規則波的模擬試驗，與實際海洋波動的隨機特性並不相同。
- 而依照相關的不規則波模擬試驗以及水工模型試驗中顯示，由於港灣的入口、地形、消波設施都具有消波或濾波的功能，導致波浪進入各個水域的成分波種類與能量分佈均有不同，因此可以大膽推斷**港內的特性波週期應該會有所變化，而且可能與外海的特性波週期不同**。
- 目前所建構的不規則波港灣波動折繞射模式僅是以能量線性疊加的方式重新組合港內各點的頻譜與總能量，各成分波之間的交互作用並未考慮，而其影響究係如何？未來在數值模擬上的相關參數如邊界條件、各項能量損失的推算、以及建構適切的不規則波模擬程式等都是需要努力的目標。



1. 結論

3. 從現場觀測的觀點來看：

- 包括港內外的波浪觀測以及港內水位觀測，花蓮港裡可發現有極長週期的水面變動，而且其波動振幅隨著港外的海象變動，研判長週期波動的能量來源應源自於外海波動。
- 然而目前通用的波浪觀測取樣方式不論是以2 Hz連續取樣20分鐘或者是以4 Hz連續取樣10分鐘，其分析都似乎僅能涵蓋到重力波至亞重力波的範圍(如果取2048各資料點進行頻譜分析，最長解析週期分別為512及256秒)。**延長取樣的時間**可以提升對當地波動特性的瞭解。
- 從本計畫所收集之花蓮港外港區實測波浪所進形的不同取樣頻率測試，發現長週期波並未因為aliasing現象而增加能量或新增譜峰，反而因為取樣頻率的變小而重新分配能量且略微降低。





1. 結論

4.目前的水位觀測結果顯示：

- 颱風侵襲期間長週期(100秒至約2000秒)的能量有相當明顯地增加，雖然沒有同步地量測外海的水位變化，但就東海岸多個港口的波浪聯合觀測，均發現有數百秒的長週期波動成分，研判外海波浪原就具有此成分波應無疑問。花蓮港比其他漁港更容易在颱風侵襲期間發生長週期蕩漾應是與其港型及岸壁消能特性有關。
- 從壓力與水面波動相關性研究來看，我們可發現壓力計所感應到的壓力並不完全是來自於水面波形的改變，可能還包括了附近流場變化所引致的壓力變化。線性波理論的轉換關係大致上適用於開闊水域的進行波，但仍需要有一與水深、波長及波高相關的修正係數。該關係函數應用到屬於多方向重疊的港內波動時就有很大的差異性。
- 在重複波的情況下，本計畫的研究人員曾經在水工模型試驗中量測到在波形節點處有最大的波壓。因此，研判壓力式的波高計對水面波動的解讀能力顯著地受到當地流況的影響。未來可能需要先在試驗室中除了探討不同波高、不同水深與不同地形對波壓轉換的影響外，也應評估水流對它的影響程度。必要時，需要利用壓力式波高計量測水面波動時，應同步量測附近水流變化，並進行水流壓力的修正。



1. 結論

5.依據本計畫對所規劃的改善方案所進行的數值模擬可發現：

- 港灣附近的水深地形正確與否不僅影響到水面波動的模擬，更甚的是可能會獲致不同共振頻率。
- #7及#12碼頭的消波功能如果可以達到完全消波，將有助於改善內港區的波動幅度。





2. 建議

1. 由於可能影響壓力式波高計量測的因素除了已經考慮的水位靜壓與波浪動壓外，還有因為地形變化所產生的水流變化。壓力與水面波形轉換函數的研究在水工模型試驗部分，應利用斷面水槽與平面水槽探討不同地形、水深、波高、甚至水流對其相關性的影響。在波動方面考慮進行波/重複波/多方向波浪，規則波/不規則波、深水波/中間性波/淺水波、波浪的線性/非線性特性等都可能造成影響。此外，波與流的交會對轉換函數應有明顯影響，因此在進行壓力計與容量式波高計的量測時，也應在其附近進行流速的量測。動態轉換係數可能是未來工作的目標。此外，也應該進行現場的不同波浪觀測儀器的同步觀測研究，以便能確認各種不同觀測方法(壓力式、超音波、容量式、浮標式等)的功能與轉換特性。
2. 在港灣波動的水工模型試驗方面，目前已經有相當多的研究成果顯示港內的水位在惡劣海象作用下可能會抬升，而且港域越深處變化越大；再者，波浪在近海區域的運動可能會發生能量的轉移(例如倍頻波)。然而，這些觀念似乎並未反映在港灣波動的遮蔽試驗中，未來建議摒除過去假設波浪週期不變的觀念，精密量測港外與港內各水域的週期變化，並對平均水位的變化也加以收集分析。



2. 建議

3. 在港灣波動數值模擬方面，可探討港內港外的波浪週期的變化，邊界條件與各項能量損失的推定對週期的影響，以及如何建構適切的不規則波模擬程式以反應波波交互作用的特性。
4. 在現場觀測方面，為了能充分掌握臺灣海域的波動特性，應該研究推動在全臺的海岸及海域進行有系統的波浪及水位同步觀測，如此才較有機會瞭解各種可能的波動來源，包括瞭解花蓮港的長週期振盪來源。因此，建立臺灣附近海域的聯合海氣象觀測網的工作應該儘快推動。至於港灣的波動觀測則應在不同的水域進行波浪與水位的觀測，以瞭解及釐清港內的波動特性，以及港內各區的水位在不同的潮時與海氣象作用下可能產生的變化。港內的流場分佈對於船舶航行與碇靠、海水交換以及壓力式波浪儀的量測均有影響，有必要評估港內3維流場的建置。
5. 為了削減港灣受長週期波動的威脅，而一般港灣的外廓設施或海岸構造物並無法阻擋長週期波動入侵港灣。由於長浪往往伴隨著惡劣海象，導致進入港內的能量因外海波浪的持續擠壓阻擋無法散射至港外，而在港內發生蕩漾造成威脅。因此有必要進行能夠削減長週期波浪能量的碼頭或岸壁設施，以期能減少其在港內累積的能量。





報告完畢 敬請指教

