101-57-7628
MOTC-IOT-100-H3DB005

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 101 年 4 月

101-57-7628
MOTC-IOT-100-H3DB005

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)

著 者: 邱永芳、蘇青和、李俊穎、李兆芳、劉正琪
陳冠宇、李忠潘、曾以帆

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 101 年 4 月

101

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)

交通部運輸研究所

GPN: 1010100664
定價 450 元

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)
/邱永芳等著. --初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，
民 101.04　　面 ；　　公分

ISBN 978-986-03-2182-1 (平裝)

1. 海洋氣象 2.港埠資訊查詢系統

444.94029　　101005469

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)

著　　者：邱永芳、蘇青和、李俊穎、李兆芳、劉正琪、陳冠宇、李忠潘、曾以帆
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 101 年 4 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定　　價： 450 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：1010100664　　ISBN：978-986-03-2182-1 (平裝)
著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)</td></tr>
<tr><td>國際標準書號（或叢刊號）
ISBN978-986-03-2182-1（平裝）</td><td>政府出版品統一編號
1010100664</td><td>運輸研究所出版品編號
101-57-7628</td><td>計畫編號
100-H3DB005</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港灣技術研究中心
主管：邱永芳
計畫主持人：邱永芳
共同主持人：蘇青和、李俊穎
研究人員：陳明宗、單誠基、鄭博今、劉清松、林珂如
參與人員：錢爾潔、陳正義、馬維倫
聯絡電話：04-26587175
傳真號碼：04-26564415</td><td colspan="2">合作研究/共同研究單位：成功大學、中山大學
計畫主持人：李兆芳、劉正琪、陳冠宇、李忠潘
研究人員：陳陽益、曾以帆、高政弘、胡凱程連政佳
地址：臺南市大學路一號;高雄市蓮海路 70 號
聯絡電話：06-2757575; 07-5255000</td><td>研究期間
自 100 年 01 月
至 100 年 12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：預警系統、風浪預報、暴潮預報、流場預報、海嘯、防波堤堤頭、沖蝕</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

臺灣四周環海，開發海洋資源、發展航運、從事港灣建設及規劃等均需長期可靠之海氣地象資料作為依據。而為了躋身國際先進的海洋國家，兼顧海洋/海岸空間利用以及海洋/海岸環境生態復育的政策與措施亦是絕對必須的。我國除了戮力推動海岸生活圈的開發以外，也由於全球環境變遷所致，水災、風災、地震及海嘯等似乎都進入發生頻率高的時期，使得海岸災害的預警、防災與避災成為近年來必須列為政府首要施政方針之一。

本所為考量臺灣周遭水域的船舶與人員航行安全，以及水環境維護等，乃率先推動近岸/近海防救災相關海象預報系統，並配合已推動多年的海氣象觀測，協助建置港灣環境資訊室，提供相關海象觀測推算與預測的資料，讓港灣管理單位、國內外船舶業者及有關人員即時獲得港灣海氣象資訊與港灣水理資訊進而維護臺灣水域出港操航安全、提昇船席機動調配及港埠運作效率。但由於臺灣附近水域的地形與環境複雜，現階段仍有諸多影響因子值得並需要持續進行研究與改善。

本計畫目的為整合提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究，提昇海岸及港灣海域水位與海流模擬技術之研究，提昇海岸及港灣海嘯模擬技術海岸及港灣地區海嘯影響範圍與預警系統。並探討港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究。提供國內航運及國內各主要港口海域安全之風浪、暴潮、流場及海嘯等預警資訊。並進行海岸及港灣堤頭附近海底地形侵蝕現況的分析，並提供港灣堤頭侵蝕防制工法，改善建議方案。俾提供施政及工程單位之參酌，以達到港灣正常營運與海岸永續發展利用的目標。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>101 年 4 月</td><td>500</td><td>450</td><td>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。</td></tr>
<tr><td colspan="4">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</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

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

TITLE: Integration of Taiwan coastal and harbor's oceanographic modeling systems (1/4)

ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
ISBN978-986-03-2182-1 (pbk)	1010100664	101-57-7628	100-H3DB005

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-Fang, Su Chin-Ho
PROJECT STAFF: Lee Chun-Ying, Chen Ming-Tzong, Shan Chen-Chi, Cheng Po-Chin, Liu Ching-Sung, Jenny Lin, Chien Er-Jier, Chen Cheng-Yi, Ma Wei-Lun
PHONE: (04) 26587175
FAX: (04) 26564415

PROJECT PERIOD
FROM January 2011
TO December 201

RESEARCH AGENCY: NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY; NATIONAL CHUNG SHAN UNIVERSITY
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Jaw-Fang, Liu Cheng-Chi, Chen Guan-Yu, Lee Chung-Pan
PROJECT STAFF: Chen Yang-Yih, Tseng I-Fan, Kao Jeng-Hong, Hu Ki-Cheng, Lien Cheng-Chia
ADDRESS: No.1, University Rd., Tainan 701, Taiwan, R.O.C; No. 70, Lienhai Rd., Kaohsiung 80424, Taiwan, R.O.C.
PHONE: (06) 2757575; (07) 5255000

KEY WORDS: wave simulations, harmonic analysis, tidal modeling, tsunami early warning system, breakwater head, scouring

ABSTRACT:

Seas surround Taiwan. In order to explore marine resources, to develop shipping business, and to do marine construction and planning, these all need a long-term reliable oceanographic database to depend on. Because of global climate change, natural disasters such as floods, storms, earthquakes and tsunamis seem to happen frequently. The policy of an early warning system including prevention of coastal disasters has become one of governmental primary executive targets in recent years. Considering the safety of ships and individuals in nearby seawater around Taiwan and the protection of water environments, the first priority for HMTC is to promote the study of the "Taiwan Coastal Operational Modeling System". TaiCOMS is an abbreviation for the title. The long-term sea-monitoring data is combined with the oceanographic observation data through the "Harbor Environment Information Website System" to provide forecast data for harbor authorities and shipping company officials and some related engineers. However, the air atmosphere is very complicated in Taiwan's marine areas due to the topographical layout; there are many factors are supposed to be done further research and be modified at present stage. The objective of this project is to integrate waves, tides and currents into a numerical modeling operation system and maintain the computer program "TaiCOMS". The major tasks include operation system program maintenance, data analysis, hardware and software update testing, in comparison with forecast data and observation data and the improvement of the operation system performance.

The objective of this project is to integrate the "Enhancement of Wave Simulation Technology on the Coastal and Harbor Areas (1/4)"," Enhancement of water and current simulation technology on coastal and harbor areas (1/4)","Advance Tsunami Simulation Technology in the Coastal and Harbor Areas with Risk Analysis (1/4)" and "Scouring Mechanism and Prevention Method for Breakwater Head (1/4)". Supplying waves, tides, currents and tsunamis' information to major harbors in Taiwan, analyzing breakwater head morphology change, and making effective prevention strategies and giving suggestions is what we want to do. Last, we provide references for port authorities and engineering units to maintain normal operation of harbors and to maintain sustainable development of the coastal areas.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
April 2012	500	450	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

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

整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究(1/4)

目　錄

中文摘要.....I

英文摘要.....II

目錄.....III

表目錄.....VI

圖目錄.....X

第一章 緒論.....1-1

1.1 計畫緣起.....1-1

1.2 主要工作項目.....1-3

1.3 研究計畫內容.....1-11

1.4 本年度研究成果.....1-15

第二章風場及氣壓場模式建置及分析.....2-1

2.1 中央氣象局預報 NFS 風場及氣壓場.....2-1

2.2 臺灣環島風場及氣壓模式.....2-4

2.3 年度侵臺颱風.....2-6

2.4 風場預報成果評估.....2-12

第三章 波浪模式建置及分析.....3-1

3.1 波浪模式理論簡述.....3-1

3.2 風浪模式之精進與評估 3-17
3.3 港區風浪模擬預警子系統 3-54
3.4 小結 3-90
第四章 水動力模式及設計水位分析 4-1
4.1 前期發展及水動力模式發展主要內容 4-1
4.2 資料蒐集與分析 4-3
4.3 基隆港水動力模式 4-24
4.4 臺北港水動力模式 4-45
4.5 模式預測結果評估 4-65
4.6 港區設計水位探討 4-101
4.7 小結 4-116
第五章 海嘯模式建置及分析 5-1
5.1 海嘯資料蒐集與地震規模表示法 5-1
5.2 精進預報子系統之格林函數與實例驗證 5-17
5.3 海嘯災害風險評估 5-39
5.5 小結 5-79
第六章 臺中港及麥寮港港灣防波堤堤頭沖蝕特性分析 6-1
6.1 背景資料蒐集與潮波流現場調查 6-1
6.2 防波堤堤頭地形量測與沖蝕特性分析 6-32
6.3 防波堤堤頭沖蝕數值模型建立與初步模擬測試 6-55
6.4 小結 6-60

第七章　海象模擬作業化系統.....7-1
7.1 海象模擬作業化系統說明.....7-1
7.2 臺灣主要港口海氣象現場觀測及蒐集.....7-43
7.3 港灣環境資訊系統.....7-54
7.4 系統備援機制建立.....7-69
7.5 小結.....7-73
第八章 結論與建議.....8-1
8.1 結論.....8-1
8.2 建議.....8-3
參考文獻.....參-1

表　目　錄

表 2-1　NFS 預報風場模式(RC/MC/HC)基本資料.....2-3
表 2-2　2011 年侵臺颱風記錄表.....2-6
表 2-3　各港觀測風場與中尺度預報風場之平均比值彙整表.....2-13
表 2-4　各港觀測風場與中尺度預報風場之相關係數彙整表.....2-13
表 3-1　不同堤體之透過係數參數表.....3-9
表 4-1　龍洞驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表.....4-6
表 4-2　麟山鼻驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表.....4-7
表 4-3　淡水第二漁港驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表.....4-8
表 4-4　竹圍驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表.....4-9
表 4-5　基隆港驗潮站 2010 年潮汐資料調和分析成果表.....4-10
表 4-6　基隆港 2011 年天文潮流調和分析成果表.....4-12
表 4-7　臺北港 2011 年天文潮流調和分析成果表.....4-13
表 4-8　2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表.....4-68
表 4-9　2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位資料平均水位統計表 4-68
表 4-10 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位最高水位統計表.....4-69
表 4-11 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位最低水位統計表 4-69
表 4-12 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報海流資料蒐集率統計表.....4-73

表 4-13 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報流場最大流速統計表 4-73
表 4-14 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表 4-77
表 4-15 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位資料平均水位統計表 4-77
表 4-16 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位最高水位統計表 4-78
表 4-17 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位最低水位統計表 4-78
表 4-18 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報海流資料蒐集率統計表 .4-82
表 4-19 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報流場最大流速統計表 4-82
表 4-20 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表 4-90
表 4-21 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位資料平均水位統計表 4-90
表 4-22 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位最高水位統計表 ..4-90
表 4-23 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位最低水位統計表 ..4-91
表 4-24 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報海流資料蒐集率統計表 4-91
表 4-25 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報海流平均流速統計表 ..4-92
表 4-26 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報流場最大流速統計表 ..4-92
表 4-27 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表 4-98
表 4-28 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位資料平均水位統計表 .

.....4-98
表 4-29 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位最高水位統計表 ..4-98
表 4-30 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位最低水位統計表 ..4-99
表 4-31 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報海流資料蒐集率統計表 .....
.....4-99
表 4-32 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報海流平均流速統計表 4-100
表 4-33 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報流場最大流速統計表 4-100
表 4-34 基隆港及臺北港海域侵台颱風暴潮數值模擬結果 4-106
表 4-34(續) 基隆港及臺北港海域侵台颱風暴潮數值模擬結果 4-107
表 4-35 基隆港及臺北港海域最大暴潮位年頻率分析樣本 4-114
表 4-36 基隆港最大暴潮位之卡方檢定及 K-S 檢定結果.....4-115
表 4-37 臺北港最大暴潮位之卡方檢定及 K-S 檢定結果.....4-115
表 4-38 基隆港最大暴潮位頻率分析結果.....4-115
表 4-39 臺北港最大暴潮位頻率分析結果.....4-115
表 5-1 臺灣地區西元 1500~2011 年之海嘯事件 5-3
表 5-2 西元 1500~2011 年傷亡人數超過千人之海嘯事件 5-7
表 5-3 各畫分區塊及資訊.....5-42
表 5-4 圖上藍點及其回歸線.....5-46
表 5-5 取各線上地震規模區間累計值.....5-46
表 5-6 相減為各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值 5-46
表 5-7 海嘯地震發生次數期望值.....5-47
表 5-8 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，地震參數 5-57
表 6-1 臺中港 2003 至 2009 年示性波高、週期及波向資料統計表 .6-7
表 6-2 臺中港外海各重現期之颱風波浪推算 6-8

表 6-3　臺中港 2003 至 2009 年海流之流速及流向統計表 6-9
表 6-4　麥寮港外海各重現期之颱風波浪推算 6-13
表 6-5　雲林海域各潮位站之潮位統計值.....6-16
表 6-6　臺中港北堤堤頭-25m 沖刷洞變化量化表 (85~95 年).....6-45
表 6-7　麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量化表 (90~99 年).....6-50
表 7-1a 中央氣象局風場 NFS 風場資料格式 7-4
表 7-1b 作業系統內大尺度及中尺度風、波及流場資料格式 7-4
表 7-2　系統內主要應用軟體說明.....7-11
表 7-3　限區域模式氣象資料彙整表.....7-12
表 7-4　每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例說明表 7-17
表 7-5　近岸區域波浪模式數值計算網格資料 7-21
表 7-8　觀測風力資料蒐集概況表.....7-50
表 7-9　觀測波浪資料蒐集概況表.....7-51
表 7-10 觀測潮汐資料蒐集概況表.....7-52
表 7-11 觀測流場資料蒐集概況表.....7-53
表 7-12 海象模擬資訊展示內容彙整表.....7-62
表 7-13 本中心海象模擬伺服器主要功能說明 7-72

圖　目　錄

圖 1.1　臺灣近海海象預報系統架構圖.....1-11
圖 1.2　海象模擬作業化系統整體架構圖.....1-12
圖 1.3　海象模擬作業化系統流程圖.....1-13
圖 1.4　海象模擬作業化系統下相關模式架構圖 1-14
圖 2.1　央氣象局提供原始風場範圍圖.....2-1
圖 2.2　系統內風場輸出範圍圖.....2-2
圖 2.3　中央氣象局南瑪都颱風衛星雲圖(08/28 20:00).....2-4
圖 2.4　南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 RC 風場向量圖 2-5
圖 2.5　南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 MC 風場向量圖 2-5
圖 2.6a 艾利颱風路徑圖.....2-7
圖 2.6b 桑達颱風路徑圖.....2-8
圖 2.6c 米雷颱風路徑圖.....2-9
圖 2.6d 梅花颱風路徑圖.....2-10
圖 2.6e 南瑪都颱風路徑圖.....2-11
圖 2.7　每日作業化 72 小時風場結構組成示意圖 2-14
圖 2.8　南瑪都颱風 MC 預報風場圖(a) 07H，(b) 08H 2-15
圖 2.9　南瑪都颱風 MC 預報風場圖(a)19H，(b)20H 2-16
圖 2.10 蘇澳港及花蓮港風場及波浪歷線圖(8 月 27 至 31 日).....2-17
圖 3.1　風浪模式之計算範圍(方框為巢狀網格範圍).....3-2
圖 3.2　波浪能量由高頻向低頻傳遞之示意圖 3-4
圖 3.3　REF/DIF 數值計算網格座標系統.....3-13

圖 3.4　港域波浪模式計算領域示意圖.....3-16
圖 3.5　WAM 風浪模式操作流程.....3-19
圖 3.6　TaiCOMS 風浪模式波浪譜峰週期輸出結果.....3-22
圖 3.7　大尺度西太平洋風浪模式(WAM)基隆港與臺北港模擬結果輸出點位示意圖.....3-23
圖 3.8　利用四個網格點計算內插點位代表波浪值之示意圖 3-23
圖 3.9　西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖.....3-26
圖 3.9(續 1) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖 3-26
圖 3.9(續 2) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖 3-27
圖 3.9(續 3) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖 3-27
圖 3.9(續 4) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖 3-28
圖 3.9(續 5) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖 3-28
圖 3.10 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-29
圖 3.10(續 1) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-29
圖 3.10(續 2) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-30
圖 3.10(續 3) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-30
圖 3.10(續 4) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-31
圖 3.10(續 5) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖.....3-31
圖 3.11 中央氣象局發布之梅花(MUIFA)颱風路徑圖 3-32
圖 3.12a模式模擬時間 1 小時之波高分布及 RC 風場向量圖 3-37
圖 3.12b模式模擬時間 1 小時之波高分布及波向之向量圖 3-37

圖 3.12c模式模擬時間 1 小時之平均週期分布及波向之向量圖 3-38
圖 3.13a模式模擬時間 48 小時之波高分布及 RC 風場向量圖 3-38
圖 3.13b模式模擬時間 48 小時之波高分布及波向之向量圖 3-39
圖 3.13c模式模擬時間 48 小時之平均週期分布及波向之向量圖 3-39
圖 3.14a本文模式以 RC 風場模擬波浪之波高分布及風速向量圖 3-40
圖 3.14bTaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之波高分布圖.....3-40
圖 3.15a本文模式以 RC 風場模擬波浪之平均週期分布及波向向量圖 3-41
圖 3.15bTaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之平均週期分布圖.....3-41
圖 3.16a本文模式以 RC 風場模擬波浪場之平均波向(來向)分布及波向(去向)之向量圖 3-42
圖 3.16bTaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之平均波向(來向)分布圖 3-42
圖 3.17aRC 風場模擬結果之波高分布及波向向量圖 3-43
圖 3.17bRC 風場模擬結果之平均周期分布及波向向量圖 3-43
圖 3.18aMC 風場模擬結果之波高分布及波向向量圖 3-44
圖 3.18bMC 風場模擬結果之平均周期分布及波向向量圖 3-44
圖 3.19 基隆港與臺北港波浪觀測資料之示性波高(Hs)與模式 RC 風場及 MC 風場波高模擬結果之比較 3-45
圖 3.20 基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均週期與模式 RC 風場及 MC 風場波浪平均週期模擬結果之比較 3-45
圖 3.21 基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均波向與模式 RC 風場及 MC 風場波向模擬結果之比較 3-46
圖 3.22 基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均週期與模式模擬之波浪平均週期 T2 及 T-1 之比較.....3-46
圖 3.23 TaiCOMS 風浪模式模擬範圍與風場範圍示意圖 3-48

圖 3.24 目前 TaiCOMS 中尺度臺灣周圍海域風浪模式之地形水深圖(Etopo2).....3-48

圖 3.25 本計畫擴大之中尺度臺灣周圍海域風浪模式(new)之地形 水深圍(Etopo1) 3-49

圖 3.26 臺灣周圍海域數值地形 Etopo1 及 Etopo2 水深資料之 差異比較 3-49

圖 3.27a 本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之波高分佈圖 3-51

圖 3.27bTaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之波高分佈圖 3-51

圖 3.28a 本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之平均週期分佈圖 ..3-52

圖 3.28bTaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之平均週期分佈圖 ..3-52

圖 3.29a 本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之平均波向分佈圖 ..3-53

圖 3.29bTaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之平均波向分佈圖 ..3-53

圖 3.30 基隆港東防波堤延伸工程施工現況 3-56

圖 3.31 基隆港西 18、19 貨櫃碼頭延建工程完工後現況 3-57

圖 3.32 基隆港港區近岸波浪模式數值計算網格及地形水深分布圖 (點位 A~D 為模式模擬結果之輸出點位) 3-58

圖 3.33 基隆港東防波堤延伸工程及西 18、19 號貨櫃碼頭延建工程施工後之港池形狀及其粗網格分布圖.....3-58

圖 3.34 基隆港港域波浪場數值模擬之細網格分布圖(共 38,554 個節點及 74,850 元素) 3-59

圖 3.35 基隆港近岸波浪場模擬結果之波高分布與波向向量平面圖(波浪條件：H1/3 = 4.07m，T1/3=10.7sec，D = 35.4°).....3-60

圖 3.36 基隆港港域波浪模式之港池邊界反射係數假設值示意圖 ...3-61

圖 3.37 基隆港港域波浪模擬結果之波高分布情形(波向 NNE、波浪週期 8 秒) 3-62

圖 3.38 TaiCOMS 系統下小尺度臺北港港區近岸波浪模式模擬範圍及

地形水深分布圖.....3-63
圖 3.39 TaiCOMS 系統下細尺度臺北港港域非結構三角元素粗網格及水深分布圖.....3-63
圖 3.40 臺北港港池外廓(拍攝日期 2009/07/05).....3-64
圖 3.41 臺北港港區近岸波浪模式模擬範圍圖 3-65
圖 3.42 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖 3-65
圖 3.43 本年度臺北港近岸港區波浪模式修正之數值計算網格及 地形水深分布圖.....3-66
圖 3.44 臺北港觀測點位波高觀測值(橫座標)與模式波高模擬結果(縱座標)之比較 3-69
圖 3.45 臺北港觀測點位波向觀測值(橫座標)與模式波向模擬結果 (縱座標)之比較 3-70
圖 3.46 臺北港觀測點位波高觀測值(橫座標)與模式校正後波高模擬結果(縱座標)之比較.....3-70
圖 3.47 臺北 2011 年強烈颱風桑達侵臺期間臺北港近岸波浪場波高模擬值與觀測值之比較.....3-71
圖 3.48 臺北港近岸波浪場模擬結果(波浪觀測資料：Hs=3.52m、Tm=3.9sec、Dm=3°) 3-71
圖 3.49 2011/8/28 12H 南瑪都颱風 MC 風場分佈及向量圖 3-73
圖 3.50 2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算示性波高分佈圖 3-73
圖 3.51 2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算平均波向分佈圖 3-74
圖 3.52 2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算譜峰週期分佈圖 3-74
圖 3.53 2011 年南瑪都颱風基隆港之波浪模擬結果.....3-75
圖 3.54 2011 年南瑪都颱風臺北港之波浪模擬結果.....3-76
圖 3.55 冬季季風之 RC 風場氣壓分佈及風場向量圖 3-79
圖 3.56 冬季季風之 MC 風場氣壓分佈及風場向量圖 3-79

圖 3.57 冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖 .3-80
圖 3.58 冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖 3-80
圖 3.59 冬季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖 3-81
圖 3.60 冬季季風 MC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖 3-81
圖 3.61 冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖 3-82
圖 3.62 冬季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖 3-82
圖 3.63 冬季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波高比較 3-83
圖 3.64 冬季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波向比較 3-83
圖 3.65 夏季季風之 RC 風場氣壓分佈及風場向量圖 3-84
圖 3.66 夏季季風之 MC 風場氣壓分佈及風場向量圖 3-85
圖 3.67 夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖 .3-85
圖 3.68 夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖 3-86
圖 3.69 夏季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖 3-86
圖 3.70 夏季季風 MC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖 3-87
圖 3.71 夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖 3-87
圖 3.72 夏季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖 3-88
圖 3.73 夏季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波高比較 3-88
圖 3.74 夏季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波向比較 3-89
圖 4.1 基隆港模擬範圍及水深分佈圖.....4-4
圖 4.2 臺北港模擬範圍與水深分佈圖.....4-5
圖 4.3 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖 4-14
圖 4.3(續 1) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖.....4-14
圖 4.3(續 2) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖.....4-15
圖 4.3(續 3) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖.....4-15

圖 4.4　基隆港水位觀測資料頻譜分析結果(2011/02/18~05/31) 4-16
圖 4.5　基隆港海流觀測資料 E-W 方向分量頻譜分析結果(2011/02/18~05/31).....4-16
圖 4.6　基隆港海流觀測資料 N-S 方向分量頻譜分析結果(2011/02/18~05/31).....4-17
圖 4.7　基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較 .4-17
圖 4.7(續 1) 基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較. 4-18
圖 4.7(續 2) 基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較. 4-18
圖 4.8　臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖 4-19
圖 4.8(續 1) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖 4-19
圖 4.8(續 2) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖 4-20
圖 4.8(續 3) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖 4-20
圖 4.9　臺北港海流觀測資料 E-W 方向分量頻譜分析結果(2011/02/24~05/03).....4-21
圖 4.10 臺北港海流觀測資料 N-S 方向分量頻譜分析結果(2011/02/24~05/03).....4-21
圖 4.11 臺北港 2011 年海流觀測資料與調和分析結果之比較 4-22
圖 4.11(續) 臺北港 2011 年海流觀測資料與調和分析結果之比較...4-22
圖 4.17 基隆港水動力模式之有限元素細格網分佈圖 4-25
圖 4.18 基隆港港域及港口附近三角形元素分布圖 4-26
圖 4.19 基隆港水動力模式之地形水深分布圖 4-26
圖 4.20 基隆港水動力模式東、西開放邊界之水位邊界條件時序圖4-27
圖 4.21 基隆港水動力模式離岸開放邊界節點之水位邊界條件空間 變化圖 4-28

圖 4.22 基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-30
圖 4.22(續)基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-31
圖 4.23 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 0 時).....4-33
圖 4.23(續 1) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 3 時).....4-33
圖 4.23(續 2) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 6 時).....4-34
圖 4.23(續 3) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 9 時).....4-34
圖 4.23(續 4) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 12 時).....4-35
圖 4.23(續 5) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 15 時).....4-35
圖 4.23(續 6) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 18 時).....4-36
圖 4.23(續 7) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 21 時).....4-36
圖 4.23(續 8) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 6 日 0 時).....4-37
圖 4.24 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 0 時).....4-37
圖 4.24(續 1) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 3 時).....4-38
圖 4.24(續 2) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 6 時).....4-38
圖 4.24(續 3) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 9 時).....4-39
圖 4.24(續 4) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 12 時)....4-39
圖 4.24(續 5) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 15 時)....4-40
圖 4.24(續 6) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 18 時)....4-40
圖 4.24(續 7) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 21 時)....4-41
圖 4.24(續 8) 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 13 日 0 時).....4-41
圖 4.25 無風場及有風場作用下，基隆港外海大潮期間漲潮流況與流速差分布情形(風速為 10 m/s，風向為東北).....4-42
圖 4.26 無風場及有風場作用下，基隆港外海大潮期間退潮流況與流速

差分布情形(風速為 10 m/s，風向為東北).....4-42
圖 4.27 基隆港港 2011 年 3 月份風速風向觀測資料.....4-43
圖 4.28 有、無風作用下基隆港海流觀測點附近節點水位及流速模擬結果比較.....4-44
圖 4.29 臺北港水動力模式模擬範圍及其水深分佈圖 4-48
圖 4.30 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖 4-49
圖 4.31 臺北港水動力模式之有限元素細格網分佈圖 4-49
圖 4.32 臺北港港域及港口附近三角形元素分布圖 4-50
圖 4.33 臺北港水動力模式左、右開放邊界之水位邊界條件時序圖4-50
圖 4.34 臺北港水動力模式離岸開放邊界節點之水位邊界條件空間變化圖.....4-51
圖 4.35 臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-52
圖 4.35(續 1) 臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較 4-53
圖 4.35(續 2) 臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較 4-54
圖 4.36 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 0 時).....4-55
圖 4.36(續 1) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 3 時).....4-55
圖 4.36(續 2) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 6 時).....4-56
圖 4.36(續 3) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 9 時).....4-56
圖 4.36(續 4) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 12 時)....4-57
圖 4.36(續 5) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 15 時)....4-57
圖 4.36(續 6) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 18 時)....4-58
圖 4.36(續 7) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 21 時)....4-58

圖 4.37 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 0 時).....4-59
圖 4.37(續 1) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 3 時).....4-59
圖 4.37(續 2) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 6 時).....4-60
圖 4.37(續 3) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 9 時).....4-60
圖 4.37(續 4) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 12 時)....4-61
圖 4.37(續 5) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 15 時)....4-61
圖 4.37(續 6) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 18 時)....4-62
圖 4.37(續 7) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 21 時)....4-62
圖 4.38 臺北港 2011 年 3 月份風速風向觀測資料.....4-63
圖 4.39 有、無風作用下臺北港觀測樁附近節點水位及流速模擬結果 比較.....4-64
圖 4.40 基隆港水位觀測資料與模擬結果之比較 4-66
圖 4.40(續 1) 基隆港水位觀測資料與模擬結果之比較.....4-67
圖 4.41 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較 4-70
圖 4.41(續 1) 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-71
圖 4.41(續 2) 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 (O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-72
圖 4.42 臺北港水位觀測資料與模擬結果之比較 4-75
圖 4.42(續 1) 臺北港水位觀測資料與模擬結果之比較.....4-76
圖 4.43 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較 4-79
圖 4.43(續 1) 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、M2、S2)結果之比較.....4-80
圖 4.43(續 2) 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O1、K1、

M2、S2)結果之比較.....4-81
圖 4.44 艾利颱風期間(5/9~5/10)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-85
圖 4.45 桑達颱風期間(5/27~5/28)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-86
圖 4.46 米雷颱風期間(6/24~6/25)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-87
圖 4.47 梅花颱風期間(8/4~8/6)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-88
圖 4.48 南瑪都颱風期間(8/27~8/31)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-89
圖 4.49 艾利颱風期間(5/9~5/10)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-93
圖 4.50 桑達颱風期間(5/27~5/28)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-94
圖 4.51 米雷颱風期間(6/24~6/25)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-95
圖 4.52 梅花颱風期間(8/4~8/6)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-96
圖 4.53 南瑪都颱風期間(8/27~8/31)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較.....4-97
圖 4.54 臺灣四周海域水深地形.....4-107
圖 4.55 臺灣四周海域暴潮數值模式之計算網格圖 4-108
圖 4.56 1996 年中度颱風賀伯侵台路徑圖 4-108
圖 4.57 1996 年中度颱風賀伯侵台期間，基隆海域暴潮偏差變化 4-109
圖 4.58 1996 年中度颱風賀伯侵台期間，梗枋海域暴潮偏差變化 4-109
圖 5.1 對基隆港影響較大之海嘯波源區.....5-1

圖 5.2　對台北港影響較大之海嘯波源區.....5-1
圖 5.3　臺灣海嘯事件之震源分佈.....5-4
圖 5.4　環太平洋地震帶主要海溝.....5-6
圖 5.5　海嘯事件中之地震規模分佈圖.....5-7
圖 5.6　海嘯事件中之震源深度分佈圖.....5-7
圖 5.7　MS 規模轉換之 MW 規模之對應圖 (Scordilis 2006) 5-15
圖 5.8　mB 規模轉換至 MW 規模之對應圖 (Scordilis 2006) 5-16
圖 5.9　傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖 5-18
圖 5.10 台北港之預報點位圖.....5-19
圖 5.11 海嘯預警系統之規劃圖.....5-20
圖 5.12 GUI 程式設計環境.....5-21
圖 5.13 視窗化操作系統之建立與排版.....5-22
圖 5.14 視窗化介面之編譯完成圖.....5-22
圖 5.15 視窗化介面之計算成果圖.....5-23
圖 5.16 視窗化系統之計算範圍圖.....5-24
圖 5.17 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態 5-24
圖 5.18 單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域) 5-25
圖 5.19 高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證 5-26
圖 5.20 美國 USGS 資料庫 5-27
圖 5.21 中央氣象局網站之即時地震資料.....5-28
圖 5.22 日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料.....5-28
圖 5.23 建構完成之即時地震資料擷取系統 5-29
圖 5.24 海嘯預警系統.....5-31

圖 5.25 USGS 日本 311 宮城海嘯參數 5-32
圖 5.26 台北港系統模擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較 5-32
圖 5.27 以速算系統及新公佈之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈.....5-33
圖 5.28 以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數計算(a)基隆港、(b)花蓮港、(c)高雄港、(d)安平港、(e)布袋港、(f)台中港及(g)台北港水位時序分佈與實測資料比較...5-36
圖 5.29 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模 Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模 Mw9.0)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較.....5-37
圖 5.30 規劃流程圖.....5-40
圖 5.31 環太平洋地震數量分佈圖.....5-41
圖 5.32 太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議(Gusiakov, 2005)....5-41
圖 5.33 本研究主要海溝分佈圖及名稱.....5-42
圖 5.34 研究區域與點位劃分.....5-43
圖 5.35 USGS-NEIC 地震資料庫.....5-44
圖 5.36 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，G-R 關係式 5-45
圖 5.37 挑選海源且震源深度小於 30 公里地震資料 5-47
圖 5.38 斷層幾何形狀及座標系統.....5-49
圖 5.39 斷層及映像斷層座標系統.....5-49
圖 5.40 傳統海嘯模式所計算出之水位時序列資料即為格林函數 ...5-51
圖 5.41 互逆格林函數與傳統海嘯模式之水位變化驗證 5-53
圖 5.42 台北港格林函數點位位置.....5-54
圖 5.43 基隆港格林函數點位位置.....5-54
圖 5.44 太平洋區對台北港之格林函數.....5-55

圖 5.45 上圖 5.44 所模擬之可能震源之點位 5-55
圖 5.46 可能震源對台北港在第 24 小時之水位值空間分佈 5-56
圖 5.47 Global CMT 地震資料庫 5-57
圖 5.48 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，初始水位 5-58
圖 5.49 126 個震源區發生地震矩規模 7、8、9 之海嘯時，台北港最大波高 5-59
圖 5.50 台灣 500m 解析度水深地形資料 5-60
圖 5.51 台北港 5m 解析度數值地形檔 5-61
圖 5.52 內插修正溢淹模擬所需數值地形檔 5-61
圖 5.53 週期 20 分鐘波高 4m 孤立波 5-62
圖 5.54 台北港受 4m 海嘯波溢淹結果 5-62
圖 5.55 台北港離岸 50m 岸線.....5-63
圖 5.56 溢淹機率簡示圖.....5-64
圖 5.57 台北港不同波高溢淹機率.....5-64
圖 5.58 台北港規模 9 地震海嘯產生最大波高對應溢淹機率 5-65
圖 5.59 台北港各點位未來 50 年發生規模 9 海嘯地震次數期望值 .5-66
圖 5.60 台北港各點位未來 50 年發生規模 9 海嘯地震且溢淹機率 .5-66
圖 5.61 NOAA-海嘯災害分佈圖.....5-67
圖 5.62 環太平洋地震帶依海溝分佈 126 個點位 5-68
圖 5.63 機率式海嘯災害風險評估流程圖.....5-68
圖 5.64 研究區域 126 點位發生地震矩規模 Mw8 與 Mw9 之海嘯地震次數期望值.....5-69
圖 5.65 介面化海嘯模擬預警系統.....5-70
圖 5.66 台北港 126 點位地震矩規模 Mw8 與 Mw9 所求得最大波高 5-70

圖 5.67 基隆港 126 點位地震矩規模 Mw8 與 Mw9 所求得最大波高 5-71
圖 5.69 基隆港內政部網格解析度 5 公尺之數值地形檔 5-72
圖 5.70 台北港解析度 50 公尺水深地形圖 5-72
圖 5.71 基隆港解析度 50 公尺水深地形圖 5-73
圖 5.72 台北港數值地形圖.....5-73
圖 5.73 基隆港數值地形圖.....5-74
圖 5.74 台北港離岸 50 公尺點位.....5-74
圖 5.75 基隆港離岸 50 公尺點位.....5-75
圖 5.76 台北港不同程度波高溢淹範圍圖.....5-76
圖 5.77 基隆港不同程度波高溢淹範圍圖.....5-77
圖 5.78 台北港與基隆港不同波高溢淹機率 5-78
圖 6.1 直立堤堤頭附近水流流況示意圖 (Sumer and Fredsøe, 1997)6-3
圖 6.2 直立堤堤頭附近波流共生之掏深關係 (Sumer and Fredsøe, 1997) 6-3
圖 6.3 具護基保護工之直立堤堤頭附近 KC 值與掏深關係 (Gokce et al., 1994、Sumer and Fredsøe, 1997) 6-4
圖 6.4 直立堤與斜坡拋石堤之堤前掏刷關係 (Sumer et al., 2001) ...6-4
圖 6.5a 臺中港北防波堤延伸歷程圖.....6-5
圖 6.5b 臺中港海氣象觀測站位置圖 (交通部運輸研究所，2010).....6-6
圖 6.6 臺中港 2003~2009 年平均示性波高、週期之月統計 6-7
圖 6.7 臺中港 1999 至 2009 年之潮位統計分佈圖 6-9
圖 6.8 麥寮工業區各區段海堤位置圖.....6-10
圖 6.9 雲林縣離島工業區海氣象觀測站位置圖 (成大水工所，1999)..6-11

圖 6.10 THL1、THL2B 測站之月平均與月最大示性波高分佈 6-13
圖 6.11 雲林海域 YLCW 測站歷年之流速流向玫瑰圖.....6-14
圖 6.12 雲林海域 YLCW 測站歷年之平均流速與流向變化圖.....6-15
圖 6.13 臺中海域電磁式海流儀施放點位示意圖 6-17
圖 6.14 臺中 DK 測站，2011 年 4/29~6/19 實測水位變化圖 6-18
圖 6.15 臺中 WU 測站，2011 年 4/29~8/2 實測水位變化圖 6-19
圖 6.16 臺中港 WU、DK 測站之海流玫瑰圖 6-22
圖 6.17 臺中港 TC 測站上、下層之海流玫瑰圖 6-22
圖 6.18 臺中 WU 測站 U、V 分量海流無因次化能譜圖 6-23
圖 6.19 臺中 WU 測站 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖 6-23
圖 6.20 臺中 DK 測站 U、V 分量海流無因次化能譜圖 6-24
圖 6.21 臺中 DK 測站 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖.....6-24
圖 6.22 臺中 TC 測站上層 U、V 分量海流無因次化能譜圖 6-25
圖 6.23 臺中 TC 測站上層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖 6-25
圖 6.24 臺中 TC 測站下層 U、V 分量海流無因次化能譜圖 6-26
圖 6.25 臺中 TC 測站下層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖 6-26
圖 6.26 雲林海域自計式潮波流儀施放點位示意圖 6-27
圖 6.27 雲林 ML 測站，2011 年 6/9~7/4 實測水位變化圖 6-28
圖 6.28 雲林測站底層、表層之實測海流玫瑰圖 6-29
圖 6.29 雲林測站底層 U、V 分量海流無因次化能譜圖.....6-30
圖 6.30 雲林 ML 測站底層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖....6-30
圖 6.31 雲林測站表層 U、V 分量海流無因次化能譜圖.....6-31
圖 6.32 雲林 ML 測站表層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖....6-31
圖 6.33 臺中港海域 85~95 年實測地形水深圖 6-33

圖 6.34 臺中港海域 85~95 年間斷面 (Sec.05) 地形變化.....6-33
圖 6.35 雲嘉海域歷年海岸線變遷.....6-34
圖 6.36 雲林離島工業區海域 80~89 年實測地形水深圖 6-35
圖 6.37 雲林離島工業區海域 82~99 年間斷面 (Sec.05) 地形變化..6-36
圖 6.38 臺中港北防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖 6-37
圖 6.39 臺中港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖 6-38
圖 6.40 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖 6-38
圖 6.41 麥寮工業區專用港西防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖6-39
圖 6.42 麥寮工業港西防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖 6-40
圖 6.43 麥寮工業港西防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖 6-40
圖 6.44 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年) ...6-42
圖 6.44(續) 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)....
.....6-43
圖 6.45 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖 (85~95 年).
.....6-43
圖 6.45(續) 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖(85~95 年)
.....6-44
圖 6.46 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年) ...6-46
圖 6.46(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖(80~99 年)6-47
圖 6.46(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖(80~99 年)6-48
圖 6.47 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖(90~99 年)...
.....6-49
圖 6.47(續) 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖(90~99 年)
.....6-50
圖 6.48 臺中港北堤堤頭-25m 與麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變動圖....
.....6-51

圖 6.49 臺灣六大港海域歷年流速大於 50cm/sec 發生機率圖 6-52
圖 6.50 臺中港 2003~2009 年流速分佈發生機率圖 6-52
圖 6.51 麥寮港 2000~2010 年流速分佈發生機率圖 6-53
圖 6.52 麥寮港 YLCW 測站逐月淨流能量累積分佈圖 (2000~2010 年). 6-54
圖 6.53 麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化與流能量累積分佈之對應關係圖 6-55
圖 6.54 臺中港與麥寮港數值模擬海域範圍示意圖 6-56
圖 6.56 FLOW-3D 防波堤模型 6-58
圖 6.57 開放水域之時序列流速邊界條件.....6-58
圖 7.1 主要模式涵蓋範圍.....7-5
圖 7.2 海象模擬系統作業時間流程.....7-6
圖 7.3 海象數值模擬系統兩日作業流程範例圖 7-7
圖 7.4 海象數值系統線上作業成果評估流程 7-8
圖 7.5 風場模組作業流程圖.....7-13
圖 7.6 中央氣象局提供原始風場範圍圖.....7-14
圖 7.7 系統內風場輸出範圍圖.....7-14
圖 7.8 中央氣象局南瑪都颱風衛星雲圖(08/28 20:00).....7-15
圖 7.9 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 RC 風場向量圖 7-15
圖 7.10 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 MC 風場向量圖 7-16
圖 7.11 每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例圖 7-17
圖 7.12 波浪模擬作業流程圖.....7-18
圖 7.13 大尺度及中尺度波場模擬範圍圖.....7-19
圖 7.14 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度波高分布圖 7-20
圖 7.15 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度波高分布圖 7-20

圖 7.16 近岸區域波浪模擬範圍圖.....7-22
圖 7.17 本年度基隆港近岸港區波浪模式地形水深分布圖 7-23
圖 7.18a 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖 7-23
圖 7.18b 本年度臺北港近岸港區波浪模式修正之數值計算網格及 地形水深分布圖.....7-24
圖 7.19a 臺北港作業化波高分布圖.....7-24
圖 7.19b 基隆港作業化波高分布圖.....7-25
圖 7.19c 蘇澳港作業化波高分布圖.....7-25
圖 7.19d 花蓮港作業化波高分布圖.....7-26
圖 7.19e 高雄港作業化波高分布圖.....7-26
圖 7.19f 安平港作業化波高分布圖.....7-27
圖 7.19g 臺中港作業化波高分布圖.....7-27
圖 7.20 細尺度基隆港波浪模式模擬範圍及粗網格圖 7-29
圖 7.21 細尺度基隆港波浪模式之細網格分布圖 7-29
圖 7.22 細尺度基隆港波浪模式之港池邊界反射係數假設值示意圖7-30
圖 7.23 細尺度基隆港波浪模擬視窗畫面圖 7-30
圖 7.24 水動力模擬作業流程圖.....7-31
圖 7.25 大尺度及中尺度流場模擬範圍圖.....7-32
圖 7.26 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度水位分布圖 7-33
圖 7.27 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度水位分布圖 7-33
圖 7.28 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度流速流向分布圖 7-34
圖 7.29 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度流速流向分布圖 7-34
圖 7.30 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時基隆港小尺度流速流向分布圖7-35
圖 7.31 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時台北港小尺度流速流向分布圖7-36

圖 7.32 台灣國際商港海嘯速算系統流程圖 7-37
圖 7.33 視窗化系統之計算範圍圖.....7-38
圖 7.34 視窗化介面之計算成果圖.....7-39
圖 7.35 美國 USGS 資料庫 7-41
圖 7.36 中央氣象局網站之即時地震資料.....7-41
圖 7.37 日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料.....7-42
圖 7.38 商港位置圖.....7-45
圖 7.39 臺北港海氣象觀測位置圖.....7-45
圖 7.40 基隆港海氣象觀測位置圖.....7-46
圖 7.41 蘇澳港海氣象觀測位置圖.....7-46
圖 7.42 花蓮港海氣象觀測位置圖.....7-47
圖 7.43 高雄港海氣象觀測位置圖.....7-47
圖 7.44 布袋港海氣象觀測位置圖.....7-48
圖 7.45 安平港海氣象觀測位置圖.....7-48
圖 7.46 臺中港海氣象觀測位置圖.....7-49
圖 7.47 港灣環境資訊網系統架構圖.....7-55
圖 7.48 港灣環境資訊網頁.....7-55
圖 7.49 港灣環境資訊網之功能架構圖.....7-56
圖 7.50 海氣象觀測資料庫介接架構圖(網路).....7-57
圖 7.51 年報資料庫介接架構圖.....7-58
圖 7.52 海氣象測站位置圖查詢畫面.....7-59
圖 7.53 海氣象歷線圖/資料表(以基隆港 風速歷線圖為例).....7-59
圖 7.54 近岸數值模擬資料介接系統架構圖 7-60
圖 7.55 海象模擬資訊網頁展示圖.....7-61

圖 7.56 展示基隆港波浪模擬 (大尺度、中尺度、小尺度) 歷線圖.7-63
圖 7.57 展示臺北港相對潮位歷線圖.....7-64
圖 7.58 展示臺北港流速及流向歷線圖.....7-64
圖 7.59 展示基隆港近岸波高分佈圖.....7-65
圖 7.60 展示臺北港流速向量場分佈圖.....7-65
圖 7.61 海嘯模擬子系統網路架構圖.....7-66
圖 7.62 海嘯查詢網頁.....7-67
圖 7.63 展示海嘯震央位置圖.....7-67
圖 7.64 展示海嘯水位歷線表.....7-68
圖 7.65 展示基隆港海嘯水位變化歷線圖.....7-68
圖 7.66 系統原硬體及資料流程說明圖.....7-70
圖 7.67 系統新硬體及資料流程說明圖.....7-71
圖 7.68 小尺度流場及海嘯系統硬體及資料備援流程說明圖 7-72

第一章 緒論

1.1 計畫緣起

災害管理是一個跨領域、跨單位的整合性工作，涉及許多政府相關權責單位，其內容包含規劃、計畫實施、預警、緊急應變、救助...等措施。災害管理可分成災前的減災、整備，災時的應變(或緊急應變)，以及災後的復原等四階段。同時由於各種災害特性的不同，所以災害管理的需求亦有差異。因此災害管理的目的，在於根據所蒐集的資料，利用各種災害模式進行不同之管理、分析及研判，包括災前的規劃、整備及監測方法、災害潛勢分析、危險度分析、風險評估、早期預警、損失評估、救災管理及災後復原重建規劃等等，以減少其不確定性及降低災害發生之可能；同時促使管理者或決策者，在充分掌握災情資訊的情況下，可制訂適當的災害防救規劃與相關措施，做出最佳的決策。

基於我國環境特性、當前災害防救工作進展尚未臻完備之情形，並為解決前述亟待加強改善之問題，行政院災害防救委員會國家災害防救科技中心 與相關部會署及學者專家在經過數次討論後，乃進一步初擬「建構全國災害管理平台」構想，期能延續過去既有成果，強化災害防救能量，提升整體作業效能。

總目標：建立全國性之災害管理平台，有效整合災害防救相關研發能量與資源，提升整體運作效能。針對環境與社會變遷下，依據平時減災、災前整備、災時應變及災後復建等階段之災害防救工作流程，整合部會署之研發能量與資源，強化各級政府縱(橫)向之資訊、資料流通交換，建構全國性之災害管理平台，內容包括災害境況設定、潛勢分析、災損分析、社經發展推估、風險分析、脆弱度地圖製作、體系法規研修訂、資料流通交換機制...等項目，以提升整體運作效能。分項目標說明如下：

1.提升災害應變作業效能

考慮未來災害類別包括颱洪、坡地/土石流、乾旱及地震...等應變所需之環境監測及模擬分析能力，運用先進科技，研發監測與傳輸技術，以及相關模擬分析方法...等。

2.健全災害風險評估與災害管理體制

研擬包括全球氣候變遷、都市化及高齡少子化趨勢等環境與社會變遷下之災害防救因應對策，參考國外作法及考量國內情況，探討重要觀念與措施，研發所需方法技術與運作體制；強化災害風險管理效能，檢討國內外大規模天然與人為災害處理經驗，以及我國未來可能面臨境況，考量減災整備與應變復建工作之決策評估需求及法規體制改善，研發改善管理體制所需方法與技術。

3.強化災害防救資訊共通平台，落實資源共享

銜接部會署既有平台，強化資料庫及決策支援系統；持續蒐集建置基礎資料、落實轉化災害防救成果、擴充知識庫；引進應用先進設施，針對國內相關單位所產製災害防救資料之維護管理與使用分享，建置共通性之交流平台。

4.加強防災知識傳播與溝通認知

強化災害防救專業人員的培育機制與教材編撰，促進決策者、媒體及社會大眾的溝通認知，提升災害防救素養。

緣此，為因應前述科技發展政策與防災施政需要，交通部運輸研究(以下簡稱本所)所乃依行政院災害防救委員會通過「第二期『強化災害防救科技研發與落實運作方案』－建構全國災害管理平台」(正依程序報行政院核定)，整體方案之總目標、重點工作、研發課題、執行期程與規劃經費等項目，於 100-103 年規劃執行「海岸及道路災害防救科技發展」計畫，並進行之「海岸及港灣災害防救研究」及「道路及橋樑災害防救研究」之計畫目標，為強化颱風(道路坡地崩塌及斷橋等)、地震(交通重要設施損毀)及各種人為災害(如阿瑪斯油輪污染事件、華

航澎湖空難)應變期間，各種道路及海岸災害，指揮調度人員、設備，有效降低人員傷亡，以達迅速搶救之目標。

1.2 主要工作項目

本計畫為海岸及港灣災害防救研究分項計畫之一「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」研究計畫，分項計畫內主要工作目的包含如下：

1.提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究:

精進海岸及港灣地區之颱風波浪預警系統,提供環島藍色公路及港務局各港口航運安全之風浪預警資訊。

2.提昇海岸及港灣海域水位與海流模擬技術之研究:

考慮氣候變遷效應，精進海岸及港灣地區之颱風暴潮預警系統，提供海岸溢淹預警資訊。流場預警系統，迅速提供緊急海難、油污擴散、港口航運安全之資訊。

3.提昇海岸及港灣海嘯模擬技術與淹水潛勢分析:

海岸及港灣地區海嘯影響範圍、淹水潛勢分析與預警系統，提供溢淹模型與風險評估，據以作民眾防災自救知識及緊急逃生用。

4.港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究:

探討主要港口防波堤堤頭附近海底地形侵蝕特性及防制機制,進行海岸及港灣堤頭附近海底地形侵蝕現況的量測與分析、數值模擬及工模型試，並提供港灣堤頭侵蝕防制工法，改善建議方案，俾提供施政及工程單位之參酌，以達到港灣正常營運與海岸永續發展利用的目標。

本研究擬以計畫執行期間，結合相關合作計畫研究，藉由國外的發展經驗，持續擴充建置一套適用於臺灣海域之近岸海象預報系統。因此本計畫為以作業化方式整合海岸及港灣海域風浪、潮汐及海流模

式、海嘯模式等，分年預計執行之工作內容說明如後：

1、 提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究

(1) 100 年：

i. 精進基隆港及臺北港波浪自動化預報模擬精度：風場(氣壓)及波浪等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風波浪為研究重點。

ii. 基隆港及臺北港風場(氣壓)、波浪預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作。

iii. 基隆港及臺北港長期風場及波場模擬結果特性分析及兩港設計波高檢核。

iv. 建立基隆港及臺北港風浪模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 作業系統維護與資料分析，軟硬體的更新測試，預報成果與實測的差異性進行可能的檢討與改進，模式作業化環境的改善及維護。

vi. 利用過去所模擬的水位場進行分析檢討，以瞭解臺灣附近海域的水位特性，以作為下一年度計畫的準備。

(2) 101 年：

i. 精進蘇澳港及花蓮港波浪自動化預報模擬精度：風場(氣壓)及波浪等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風波浪為研究重點。

ii. 蘇澳港及花蓮港風場(氣壓)、波浪預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作。

iii. 蘇澳港及花蓮港長期風場及波場模擬結果特性分析及兩港設計波高檢核。

iv. 建立蘇澳港及花蓮港風浪模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 作業系統維護與資料分析，軟硬體的更新測試，預報成果與實測的差異性進行可能的檢討與改進，模式作業化環境的改善及維護。

vi. 考慮引進水位場至波浪預報中，並評估其可能引起的差異性，討論將分常時的天文潮位及颱風時期的天文潮位與暴潮。

vii. 利用過去所模擬的水流場進行分析檢討，以瞭解臺灣附近海域的水流特性，以作為下一年度計畫的準備。

(3) 102 年：

i. 精進台中港及布袋港波浪自動化預報模擬精度：風場(氣壓)及波浪等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風波浪為研究重點。

ii. 台中港及布袋港港風場(氣壓)、波浪預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作。

iii. 台中港及布袋港長期風場及波場模擬結果特性分析及兩港設計波高檢核。

iv. 建立台中港及布袋港風浪模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 作業系統維護與資料分析，軟硬體的更新測試，預報成果與實測的差異性進行可能的檢討與改進，模式作業化環境的改善及維護。

vi. 引進水流場至波浪預報中，並評估其可能引起的差異性，討論將分常時的天文潮位及颱風時期的天文潮位與暴潮。

(4) 103 年：

i. 精進高雄港及安平港波浪自動化預報模擬精度：風場(氣壓)及波浪等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風波浪為研究重點。

ii. 高雄港及安平港風場(氣壓)、波浪預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作。

iii. 高雄港及安平港長期風場及波場模擬結果特性分析及兩港設計波高檢核。

iv. 建立高雄港及安平港風浪模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 作業系統維護與資料分析，軟硬體的更新測試，預報成果與實測的差異性進行可能的檢討與改進，模式作業化環境的改善及維護。

vi. 針對近岸波浪預報部分(包含港區的波浪預報)進行檢討，並尋求其他可能的替代方案，或資料庫的建置。

2、 提昇海岸及港灣海域水位與海流模擬技術之研究

(1) 100 年：

i. 精進基隆港及臺北港水位及流場自動化預報模擬精度：水位及流場等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風暴潮為研究重點。

ii. 基隆港及臺北港水位及流場預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作，含潮位站觀測資料分析。。

iii. 基隆港及臺北港長期水位及流場模擬結果特性分析及兩港設計水位檢核。

iv. 建立基隆港及臺北港水位及流場模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 評估模擬範圍減小的可行性。

(2) 101 年：

i. 精進蘇澳港及花蓮港水位及流場自動化預報模擬精度：水位及流場等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風暴潮為研究重點。

ii. 蘇澳港及花蓮港水位及流場預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作，含潮位站觀測資料分析。。

iii. 蘇澳港及花蓮港長期水位及流場模擬結果特性分析及兩港設計水位檢核。

iv. 建立蘇澳港及花蓮港水位及流場模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 評估模擬範圍減小的可行性。

(3) 102 年：

i. 精進台中港及布袋港水位及流場自動化預報模擬精度：水位及流場等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風暴潮為研究重點。

ii. 台中港及布袋港水位及流場預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作，含潮位站觀測資料分析。。

iii. 台中港及布袋港長期水位及流場模擬結果特性分析及兩港設計水位檢核。

iv. 建立台中港及布袋港水位及流場模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 評估模擬範圍減小的可行性。

(4) 103 年：

i. 精進高雄港及安平港水位及流場自動化預報模擬精度：水位及流場等數值模式，每日 72 小時模擬及即時模擬資訊，颱風侵臺時期颱風暴潮為研究重點。

ii. 高雄港及安平港水位及流場預報模式作業化成果評估，以港灣技術研究中心及氣象局現場觀測資料進行校驗及精度評估等工作，含潮位站觀測資料分析。。

iii. 高雄港及安平港長期水位及流場模擬結果特性分析及兩港設計水位檢核。

iv. 建立高雄港及安平港水位及流場模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

v. 評估模擬範圍減小的可行性。

3、 提昇海岸及港灣海嘯模擬技術與淹水潛勢分析

(1) 100 年：

i. 臺灣鄰近海域或遠區海域(如太平洋)之可能發生海嘯隱沒帶、斷層等資料蒐集及分析。

ii. 精進基隆港及台北港海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。

iii. 建立基隆港及台北港海嘯之溢淹模型，模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時之溢淹區域範圍。

iv. 建立基隆港及台北港海嘯模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

(2) 101 年：

i. 自動擷取太平洋海嘯預警中心(Pacific Tsunami Warning Center)或是 USGS 網站地震資料。建立自動化資料擷取系統之視窗化操作介面，整合成海嘯查詢系統。

ii. 精進蘇澳港及花蓮港海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。

iii. 建立蘇澳港及花蓮港海嘯之溢淹模型，模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時之溢淹區域範圍。

iv. 建立蘇澳港及花蓮港海酵模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

(3) 102 年：

i. 精進台中港及布袋港海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。

ii. 建立台中港及布袋港海嘯之溢淹模型，模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時之溢淹區域範圍。

iii. 建立台中港及布袋港海嘯模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

(4) 103 年：

i. 精進高雄港及安平港海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。

ii. 建立高雄港及安平港海嘯之溢淹模型，模擬計算受不同高度的海嘯侵襲時之溢淹區域範圍。

iii. 建立高雄港及安平港海嘯模擬預警子系統，系統轉移港務局，並進行教育訓練。

4、 港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究

(1) 100 年：

i. 防波堤堤頭附近海底地形侵蝕的文獻收集與分析。

ii. 台中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析。

iii. 台中港及麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場的現場觀測與分析。

iv. 數值模式 Flow-3D 的測試,地形與結構物等邊界構件的建立。

(2) 101 年：

i. 台中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析。

ii. 台中港及麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場的現場觀測與分析。

iii. 波場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。

iv. 流場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。

v. 水工模型試驗的規畫。

(3) 102 年：

i. 波場作用下防波堤堤頭附近地形變化的數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證

ii. 流場作用下防波堤堤頭附近地形變化的數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證

iii. 波場或流場作用下防波堤堤頭附近地形變化的水工模型試驗

iv. 防波堤堤頭侵蝕防制工法研擬

(4) 103 年：

i. 堤頭侵蝕防制工法的數值模擬：Flow-3D

ii. 堤頭侵蝕防制工法的水工模型試驗

iii. 堤頭侵蝕防制工法的數值模擬與水工模型試驗比對驗證

iv. 堤頭侵蝕防制工法的數值模擬：Flow-3D 參數率定

1.3 研究計畫內容

在先期研究中參考各國近海海象預報系統的發展狀況，本計畫在以往研究期程已規劃完整的臺灣環島海象預報系統-TaiCOMS (Taiwan Coastal Operational Modeling System)，包括觀測網的架設、觀測資料即時監測、數值預報模式的建立、模式驗證及海氣象資料庫的整合等，原規劃系統架構如圖 1.1 所示。

目前 Taicoms 系統已經完全移轉在本中心執行，並逐步配合本所『港灣環境資訊網』展示相關數值成果，並建置及維護一個關聯式資料庫管理系統所構成的海情資料庫，以彙整主要商港現場觀測及數值模擬計算所得之港區附近海域海象預報資訊。故目前海象模擬作業化系統架構已調整成如圖 1.2 所示。

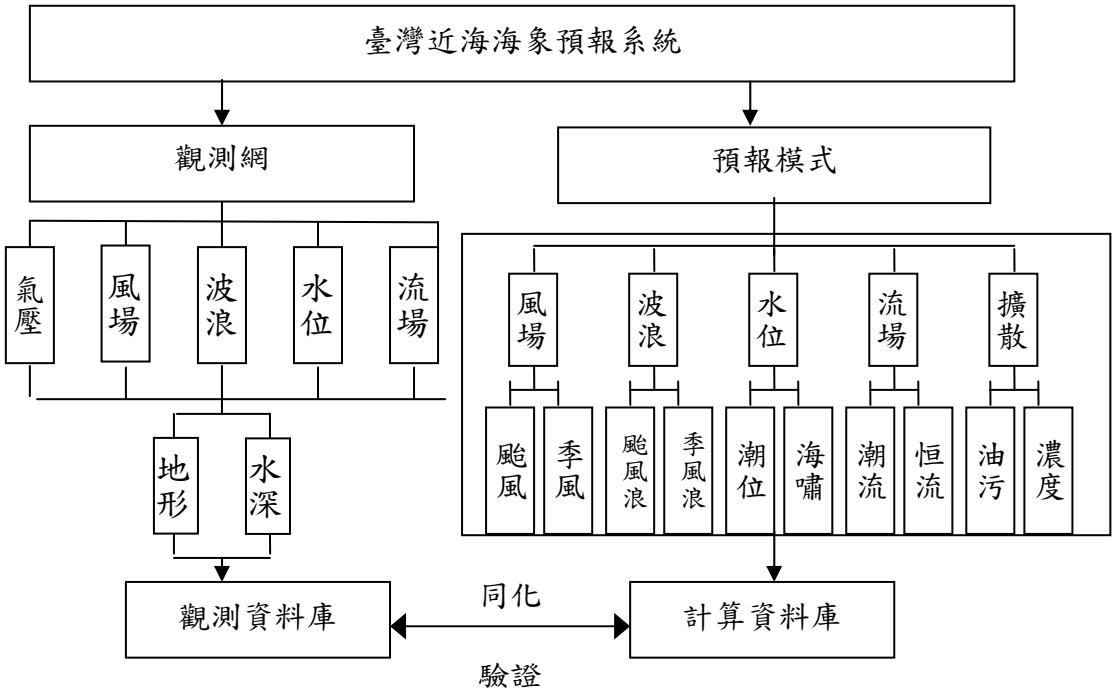


圖 1.1 臺灣近海海象預報系統架構圖

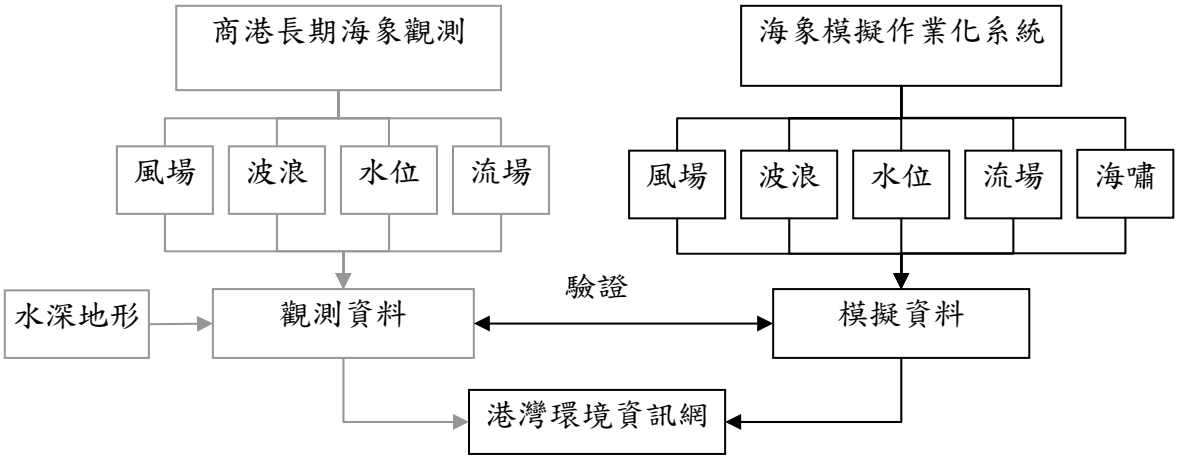


圖 1.2 海象模擬作業化系統整體架構圖

預報為觀測最重要的目標，而觀測為預報系統建立之基礎。過去幾年本中心在國內主要商港之即時海氣象觀測網已建置完成，歷年建置之海氣象資料庫內容豐富，海氣象資料及分析結果，除提供各港務局與其他公民營機構參考應用，並提供本計畫預報模式比對，以提昇預警精度。觀測網路部分預計可以得到的觀測資料為地形、水深、氣壓、颱風、風場(風速、風向)、波場(波高、週期及波向)、水位(天文潮位、暴潮位)及流場(流速、流向)等現場資料，多數已經同步連線回傳整理後統一輸入資料庫中以便未來提供查詢及模式的應用。

本所預報模式發展方面，為適用各種海象條件，前期整合規劃建置多種預報模式，包含了風場、波浪、水位、流場、擴散等模擬，其中風場的模擬包含了季風及颱風，同樣波浪的模擬包含了季風波浪及颱風波浪，水位的模擬則包含天文潮位、暴潮位潮位及地震產生之海嘯，海流的模擬則包含天文潮流、風驅流(暴潮流)等，擴散包含油汙擴散等。本計畫內為延續以往研究計畫並完成現階段實際可行作業方式，以計畫執行期間，結合相關合作計畫研究，持續擴充建置一套適用於臺灣海域之近岸海域防救災預報系統，包含風浪、潮汐、海流、海嘯模式，海象模擬作業化流程為圖 1.3 所示，相關模式架構圖如圖 1.4 所示。

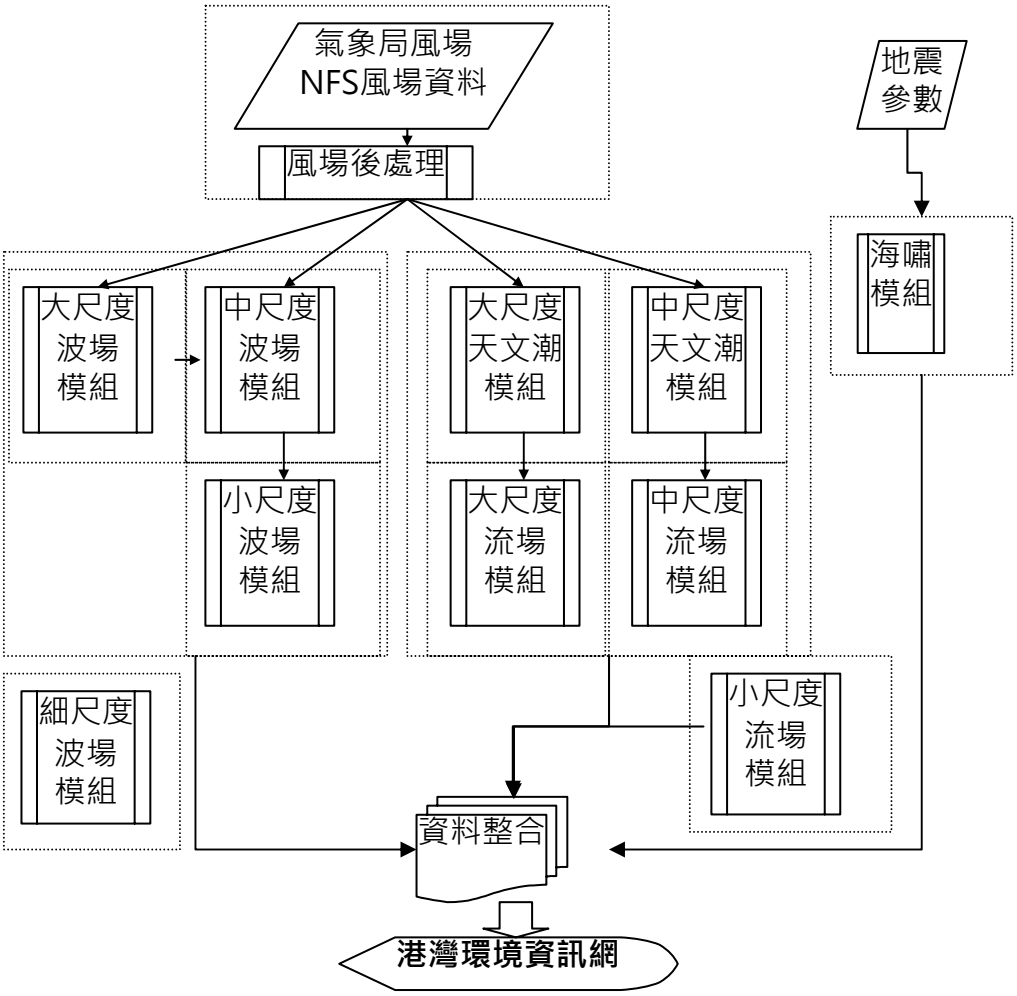


圖 1.3 海象模擬作業化系統流程圖

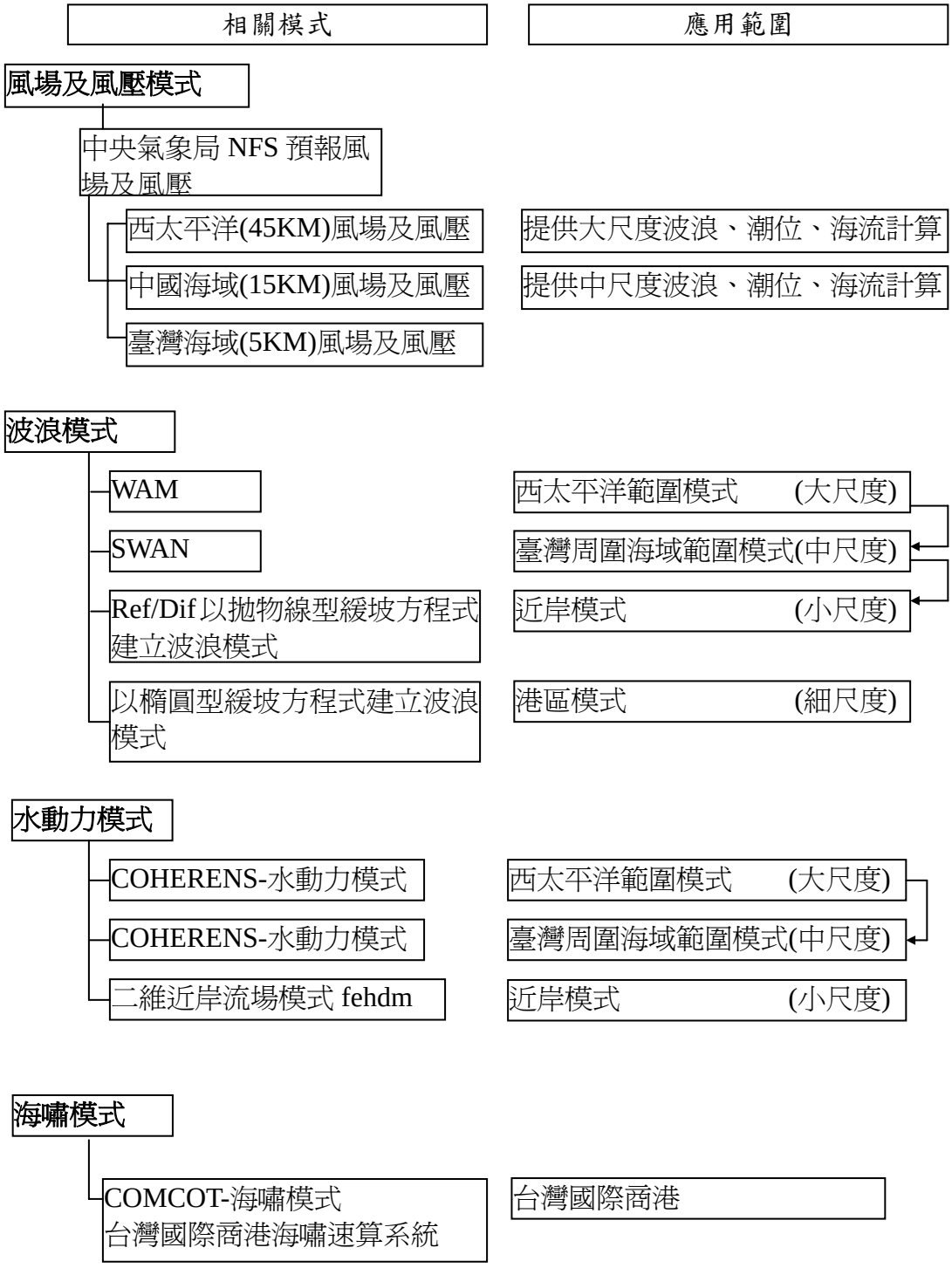


圖 1.4 海象模擬作業化系統下相關模式架構圖

1.4 本年度研究成果

本計作業化系統已實際運作於本所內部執行並配合本中心港灣環境資訊網站對外展示數值成果。本年度計畫主要研究成果

1. 本計畫在近海海象預報模擬系統的預報時間已能夠在完整取得中央氣象局提供風場及氣壓場預報後 5 小時之內完成大尺度及中尺度預報及已建置基隆港及臺北港小尺度模式。包括風場(氣壓)、波浪、水位及流場等數值模式建置及自動化預報系統作業。

2. 風場方面：計畫內不執行風場的預報模擬，平時及颱風期間主要引用中央氣象局 NFS 海上風場模式配合風浪及水動力模式需求內插後所產生的全域預報風場及氣壓場，並長期進行各港區風場(氣壓)預報模式作業化成果評估。

3. 波浪模式方面：維護評估已建置大尺度風浪模式(WAM)、中尺度風浪模式(SWAN)等，完成建置基隆港及臺北港小尺度波浪模式(REFDIF)作業化，並長期進行各港區波浪預報模式作業化成果評估。

4. 水位及海流模式方面：維護評估已建置大尺度及中尺度的全域環島作業化水動力模式，完成建置基隆港及臺北港小尺度波浪模式作業化並長期進行各港區水位及海流預報模式作業化成果評估。

5. 海嘯模式方面：本所以前期發展海嘯速算系統在日本 311 海嘯期間提供災防中心(NCDR)海嘯在臺灣各大港口的水位變化，得到相當好的即時預報成果。完成建置海嘯預警作業系統，提供地震發生後各主要港區受海嘯波影響時間及可能之水位變化

6. 配合本中心港灣環境資訊系統需求，協助建立海象模擬預報網頁，平時提供各港區(基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、布袋港、澎湖)，包含風場、波浪、水位及流場

等本系統可提供海象資訊,以供各港務局港口船舶交通航運安全及各相關單位參考使用。

7.臺中港與麥寮港防波堤鄰近海域的地形侵於狀態,隨著防波堤長度延伸、海潮流作用與上游河川砂源補注而有明顯的變化。臺中港與麥寮港海域流況明顯大於台灣其他港域 (波浪並無此現象),反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象,可能是潮流所致。

第二章風場及氣壓場模式建置及分析

由於波浪及水位的預報皆會受到氣象條件的影響，特別是風速及氣壓的影響最大，因此本章節主要是探討這兩個因子的取得方法以及模擬的結果。全域風場方面主要以引用中央氣象局 NFS 預報風場為主。氣壓場的部分也取得中央氣象局預報 NFS 氣壓場。

2.1 中央氣象局預報 NFS 風場及氣壓場

本中心透過合作關係取得中央氣象局目前所使用的風場共有三種，分別為 RC、MC 及 HC 風場(自 2004 年 4 月開始啟用)。各風場的解析度 RC 為 45km，MC 為 15km，而 HC 為 5km，計算領域也各有不同，如圖 2.1 所示，依據中央氣象局所提供的風場基本資料整理如表 2-1。

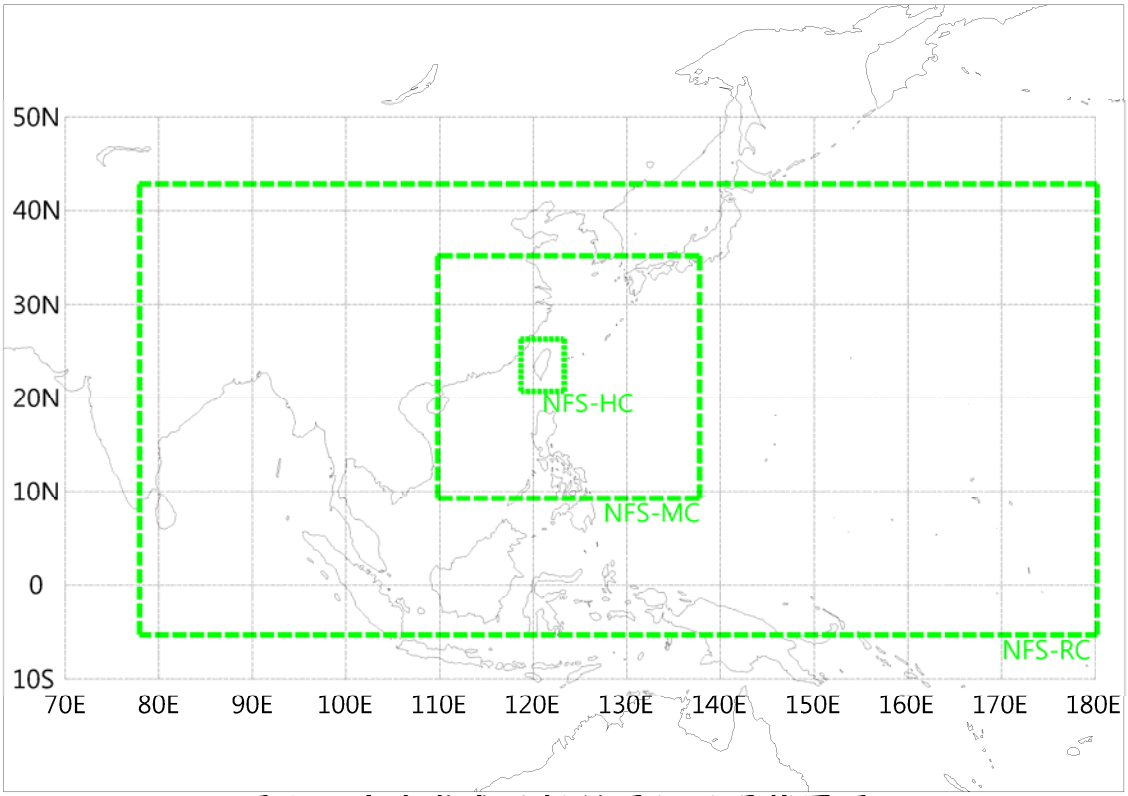


圖 2.1 中央氣象局提供原始風場範圍圖

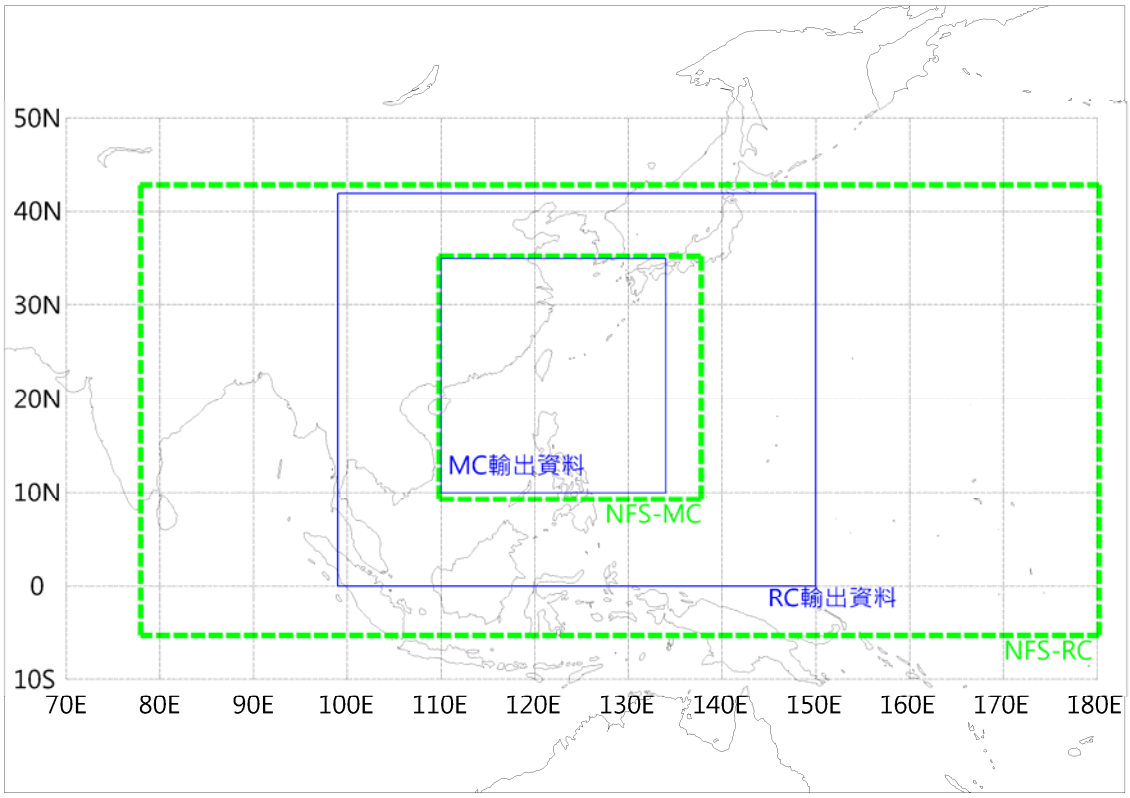


圖 2.2 系統內風場輸出範圍圖

表 2-1 NFS 預報風場模式(RC/MC/HC)基本資料

資料整理：中央氣象局柳再明(2004/2/25)

Version	
Operational Status	•Semi operaton in 2000 •Operation from 2001/01/08
Operational/Research Group	NWP Group of Central Weather Bureau (CWB) in Taiwan
Model	Nonhydrostatic Forecast System (NFS)
Basic equations	Primitive equations
Grid type	Arakawa C-grid staggering with leap-frog time integration scheme
Integration domain	Regional, over the western North Pacific and Southern Chinese Sea 221*127(45km) , 181*193(15km) ,91*121(5km)
Projection	Lambert conformal mapping
Mapping information	Center (120E), true (10N, 40N) •45KM MESH 座標(114,71)位置位於(30°N，120°E) 底圖 下點(-5.34068°N，77.91867°E) 右上點(42.92812°N，180.2034°E) •15KM MESH 座標(76,148)位置位於(30°N，120°E) 底圖 左下點(9.28194°N，109.7727°E) 右上點(35.26665°N，137.7342°E) 座標(1,1)位置對應至 45KM MESH 之(89,22)座標位置 •5KM MESH 座標(28,199)位置位於(30°N，120°E) 底圖 左下點(20.78609°N，118.6597°E) 右上點(26.33824°N，123.2724°E) 座標(1,1)位置對應至 15KM MESH 之(67,82)座標位置
Horizontal resolution	45/15/5 km
Vertical levels	30 vertical levels on sigma coordinates
Nested grids	level of nesting is 3 , one-way interactive
Forecast time	72 hour
Run time	00Z / 12Z (72h), 06Z/18Z(6h)
Initial fields	Last run of 6h forecast, keep 6h update cycle
First-guess analysis	Optimal Interpolation(OI)
Boundary conditions	GFS forecast to NFS 45km domain
Horizontal diffusion	4^{th} order diffusion
Moisture physics	Kuo's cumulus parameterization, Cloud ice&water microphysics
Planetary boundary layer	TKE-εPBL scheme
Radiation parameterization	Longwave : Sasamori Shortwave : Katayama
Land surface	Force restore method
Ocean surface	Optimal Interpolation with GFS reanalysis
Reference	Conference on Weather Analysis and Forecasting, 2000, p303-308
Remarks	This model configuration is used to simulate the weather pattern

2.2 臺灣環島風場及氣壓模式

現在歐洲（ECMWF）與美國（NOAA）皆有大型的氣象預報模式來預報全球的氣象資料，中央氣象局也在 2002 年完成臺灣海域動態氣象預報模式預報即時全域海上風場，目前本中心已透過合作取得中央氣象局 NFS 預報風場即時資料。

中央氣象局 NFS 預報風場模式提供三種不同尺度範圍之風場(如圖 2.1.2)。為符合中心作業化需求，後處理所提供 NFS 二進位數值資料，並內插相關風場及氣壓場提供後續風浪計算及潮位計算使用，圖 2.2.1 至圖 2.2.2 為中央氣象局 NFS 預報風場模式提供 RC(大尺度)及 MC(中尺度)範圍資料，後續作業化後之預報風場向量及氣壓分佈圖，時間為 2011 年 8 月 28 日(南瑪都颱風侵臺期間)。

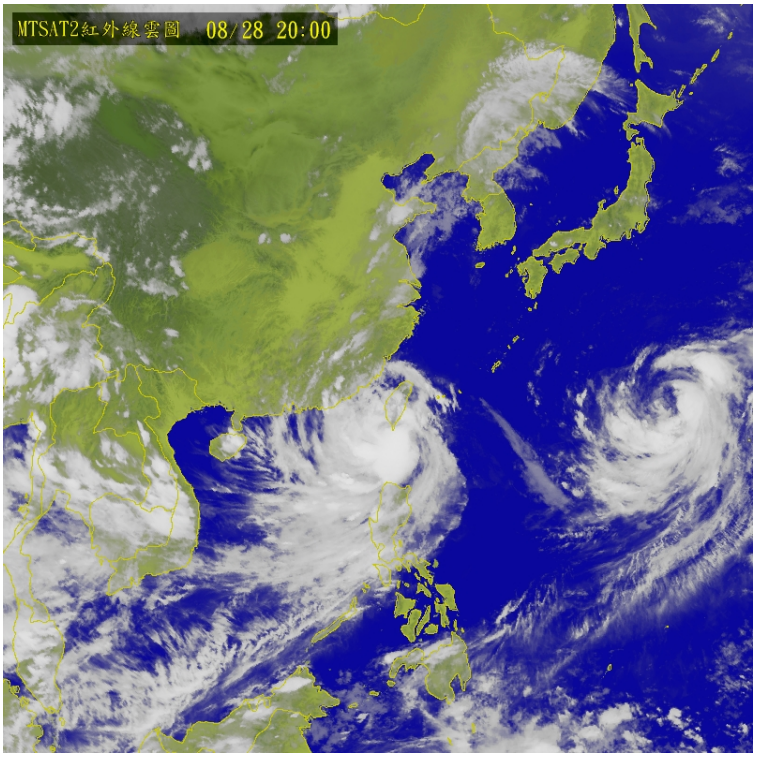


圖 2.3 中央氣象局南瑪都颱風衛星雲圖(08/28 20:00)

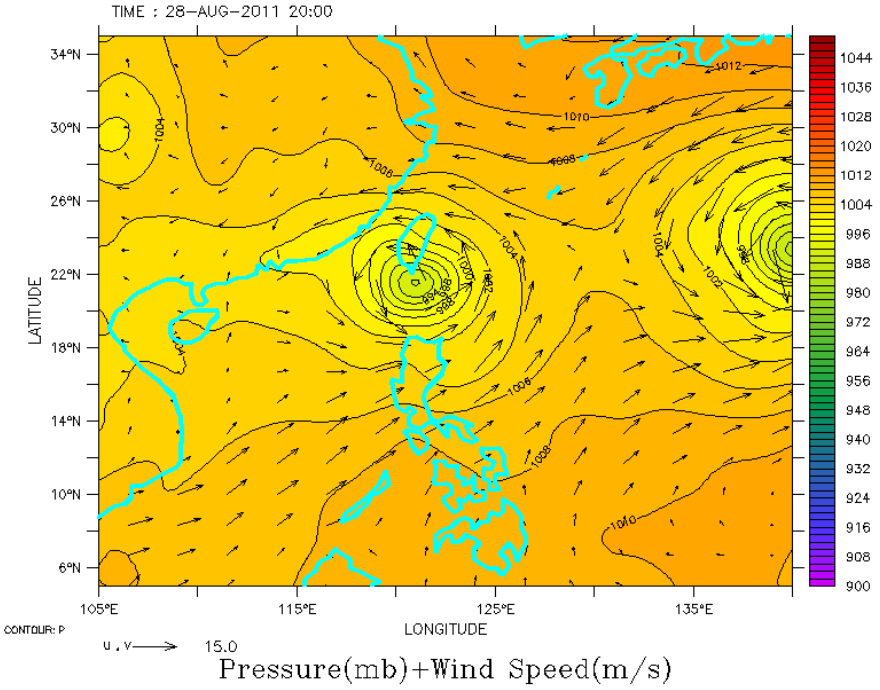


圖 2.4 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 RC 風場向量圖

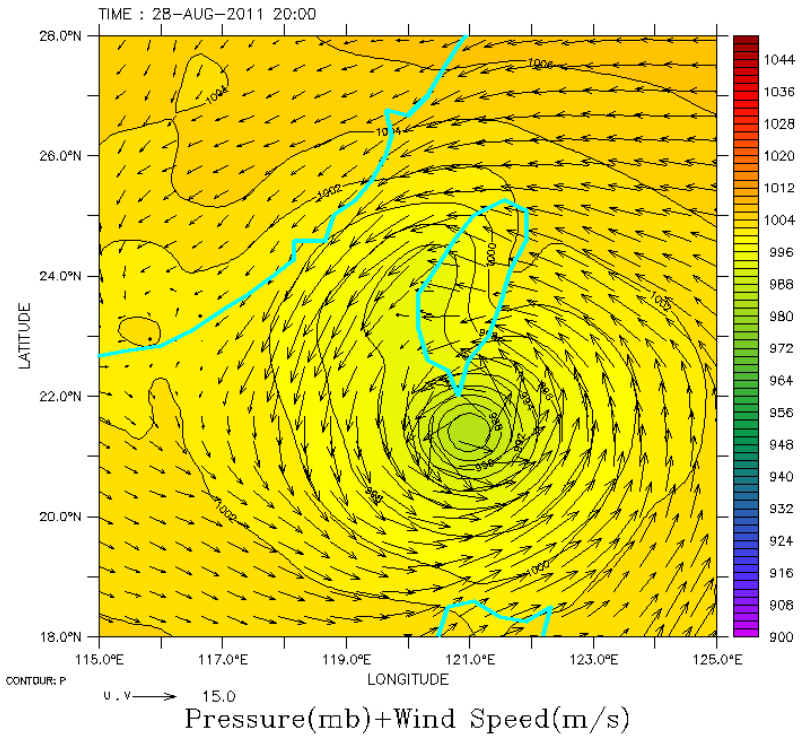


圖 2.5 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 MC 風場向量圖

2.3 年度侵臺颱風

2011 年中央氣象局發布颱風警報計有 5 個，如表 2.3.1，中央氣象局發佈之颱風路徑圖(包括概況表)如圖 2.3.1~圖 2.3.5。

表 2-2 2011 年侵臺颱風記錄表

(摘自中央氣象局網站 http://www.cwb.gov.tw**)**

編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	近台強度	侵台路徑分類	近台近中心最低氣壓 (hPa)	近台近中心最大風速 (m/s)	七級風暴風半徑 (km)	十級風暴風半徑 (km)	警報發布報數
1111	南瑪都	NANMADOL	08/27～08/31	強烈	4	920.0	53.0	180	50	34
1109	梅花	MUIFA	08/04～08/06	中度	--	945.0	43.0	280	--	15
1105	米雷	MEARI	06/23～06/25	輕度	--	982.0	28.0	200	--	14
1102	桑達	SONGDA	05/27～05/28	強烈	--	920.0	55.0	220	100	13
1101	艾利	AERE	05/09～05/10	輕度	--	990.0	23.0	150	--	13

中央氣象局颱風警報發布概況表	
名稱	艾利(AERE)
編號	1101
生成地點	菲律賓東方海面
侵(近)台日期	2011 年 5 月 10 日
發布時間	海上:2011 年 5 月 9 日 5 時 30 分
解除時間	海上:2011 年 5 月 10 日 17 時 30 分
發布報數	13
最大強度	輕度
近中心最大風速	23.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	--
登陸地段	--
動態	5 月 7 日 14 時於菲律賓東方海面生成，初期移動方向偏西，8 日接近菲律賓群島時，轉為向西北至北北西方向移動。9 日上午 5 時 30 分發布海上颱風警報，颱風中心於 11 時左右進入呂宋島，移動方向由北北西轉為偏北，23 時左右，颱風中心離開呂宋島。10 日 11 時之後，轉為偏東北方向移動， 17 時 30 分解除海上颱風警報，隨後於 12 日 2 時，在日本南方海面減弱為熱帶性低氣壓。
災情	--

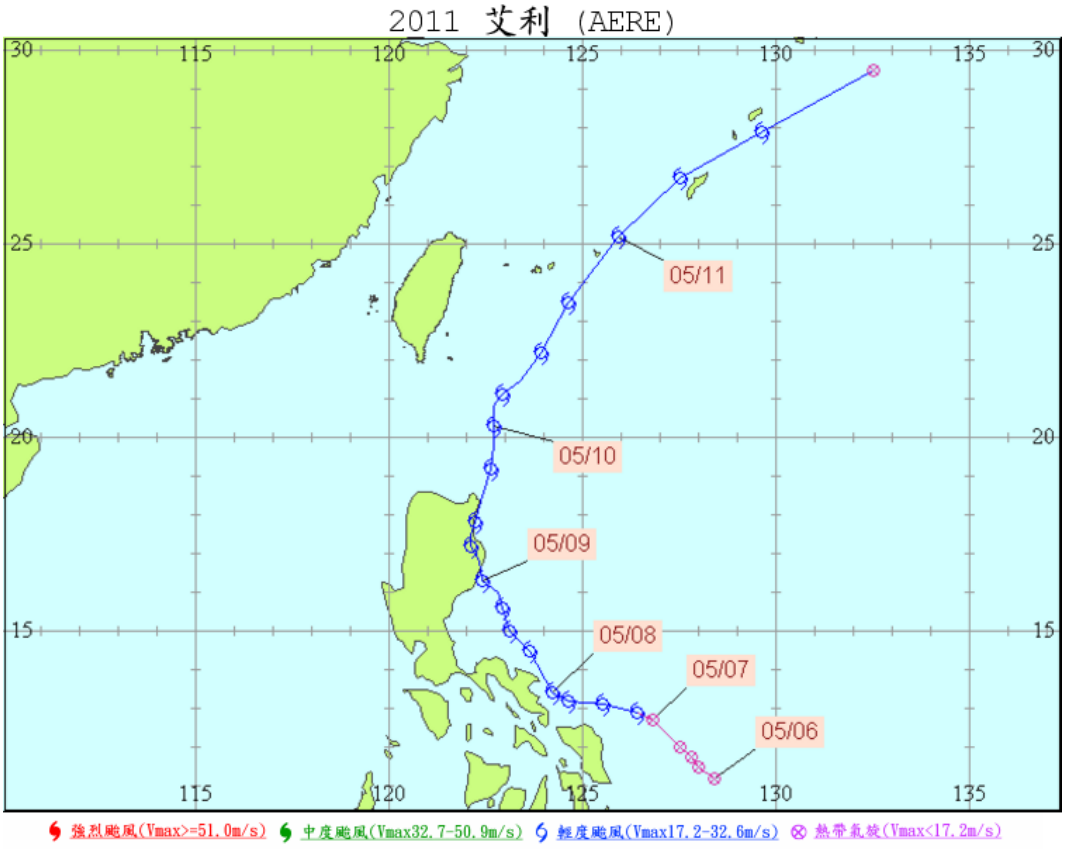


圖 2.6a 艾利颱風路徑圖

中央氣象局颱風警報發布概況表	
名稱	桑達(SONGDA)
編號	1102
生成地點	菲律賓東方海面
侵(近)台日期	2011 年 5 月 28 日
發布時間	海上:2011 年 5 月 27 日 2 時 30 分
解除時間	海上:2011 年 5 月 28 日 14 時 30 分
發布報數	13
最大強度	強烈
近中心最大風速	55.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	--
登陸地段	--
動態	5 月 22 日 2 時於菲律賓東方海面生成，初期移動方向偏西北西，25 日以後逐漸轉向偏北北西轉偏北方向移動，通過臺灣東部近海後，逐漸轉為向東北方向加速移動，29 日 14 時於日本南方海面轉變為溫帶氣旋。
災情	--

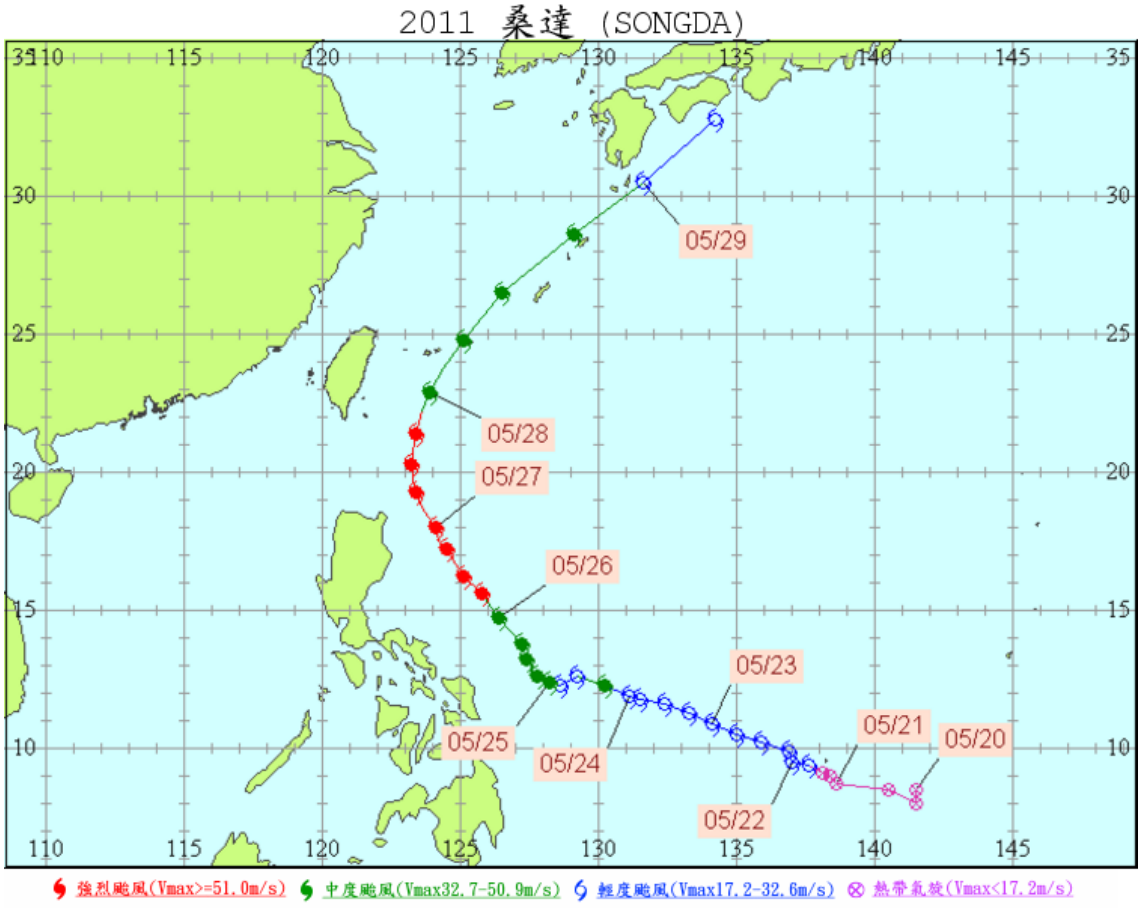


圖 2.6b 桑達颱風路徑圖

中央氣象局颱風警報發布概況表	
名稱	米雷(MEARI)
編號	1105
生成地點	菲律賓東方海面
侵(近)台日期	2011 年 6 月 25 日
發布時間	海上:2011 年 6 月 23 日 23 時 30 分
解除時間	海上:2011 年 6 月 25 日 14 時 30 分
發布報數	14
最大強度	輕度
近中心最大風速	28.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	--
登陸地段	--
動態	6 月 22 日 14 時於菲律賓東方海面生成，往北北西方向移動並經過臺灣東方海面，其暴風圈於 25 日通過臺灣東北部海面與北部海面，27 日 8 時於黃海減弱為熱帶性低氣壓。
災情	--

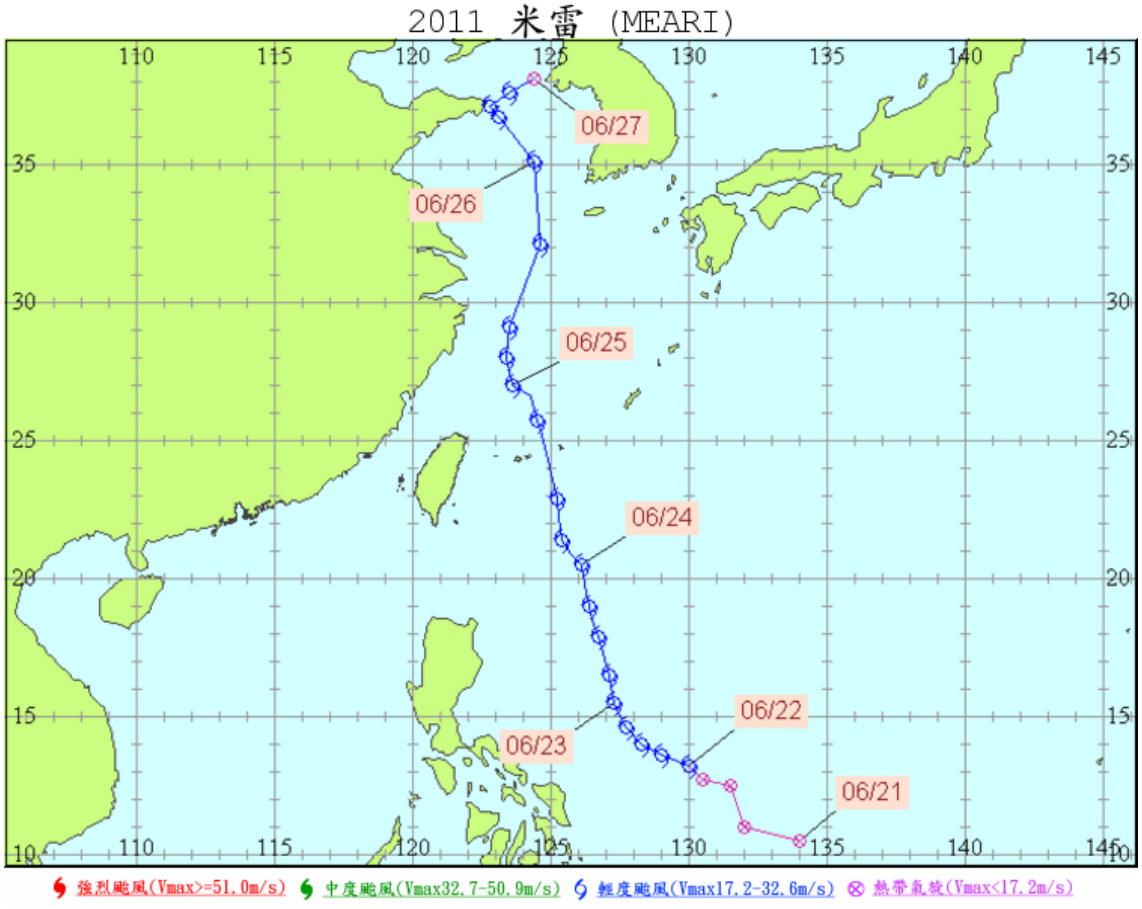


圖 2.6c 米雷颱風路徑圖

中央氣象局颱風警報發布概況表	
名稱	梅花(MUIFA)
編號	1109
生成地點	菲律賓東方海面
侵(近)台日期	2011 年 8 月 6 日
發布時間	海上:2011 年 8 月 4 日 17 時 30 分
解除時間	海上:2011 年 8 月 6 日 11 時 30 分
發布報數	15
最大強度	中度
近中心最大風速	43.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	--
登陸地段	--
動態	7 月 28 日 14 時於菲律賓東方海面生成，初期往西移動，隨後轉為偏北移動，8 月 2 日起逐漸轉為偏西北方向移動，通過日本那霸南方海面後，逐漸轉為偏北移動，其中心於 8 日晚上進入北韓，9 日 8 時於中國東北減弱為熱帶性低氣壓。
災情	--

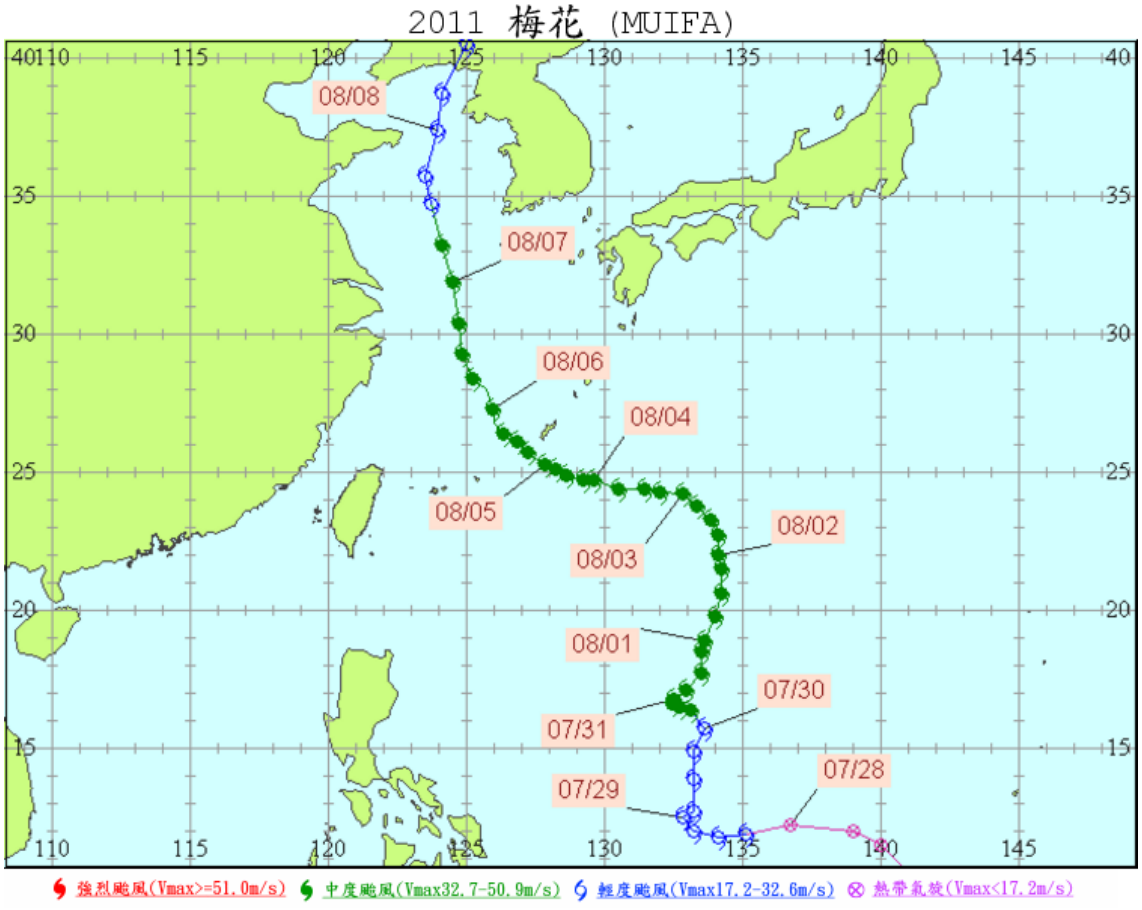


圖 2.6d 梅花颱風路徑圖

中央氣象局颱風警報發布概況表	
名稱	南瑪都(NANMADOL)
編號	1111
生成地點	菲律賓東方海面
侵(近)台日期	2011 年 8 月 29 日
發布時間	海上:2011 年 8 月 27 日 5 時 30 分　　陸上:2011 年 8 月 27 日 20 時 30 分
解除時間	海上:2011 年 8 月 31 日 8 時 30 分　　陸上:2011 年 8 月 31 日 8 時 30 分
發布報數	34
最大強度	強烈
近中心最大風速	53.0 (公尺/秒)
侵台路徑分類	4
登陸地段	臺東縣大武附近
動態	8 月 23 日 20 時於菲律賓東方海面生成，初期往西移動，隨後轉為偏西北移動，27 日其中心通過菲律賓呂宋島東北角邊緣，轉為偏北北西移動。颱風中心於 29 日 4 時 20 分左右由臺東縣大武附近登陸，13 時左右在臺南附近出海，進入臺灣海峽，緩慢向西北移動，31 日 8 時於臺灣海峽減弱為熱帶性低氣壓。
災情	--

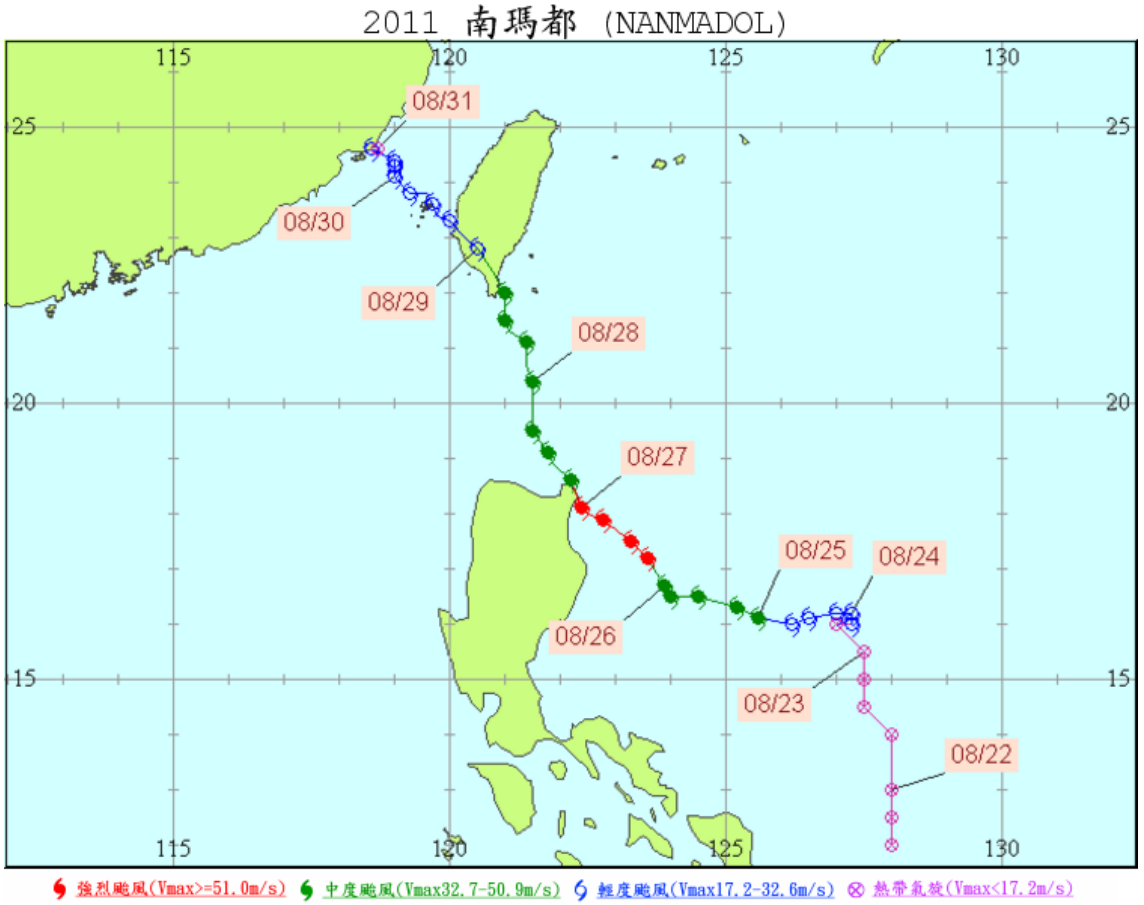


圖 2.6e 南瑪都颱風路徑圖

2.4 風場預報成果評估

對海岸及港灣海域海象模擬系統模式而言，影響模式計算結果主要因素之一為輸入模式之風場資訊。本計畫並無建立風場模式，有關風浪及水動力作業化模擬則依據中央氣象局提供之大氣模式預報風場為模式之輸入條件，因此在評估預報作業化成果之同時，仍須就風浪及水動力預報作業化輸入之風場特性進行瞭解與評估。

2.4.1 本年度每月風場模擬結果評估

分析本年度觀測風場與中尺度 MC 預報風場 2012 年 12 月至 2011 年 11 月其比較相關性，彙整其統計表內觀測與模擬平均比值如表 4-1，及線性迴歸後相關係數於表 4-2 中。

由平均比值可知基隆港、花蓮港及高雄港模擬值大於觀測值範圍介於 1.1 至 2.4 倍；蘇澳港及台北港則模擬值與觀測值約略相等範圍介於 0.8 至 1.2 之間；安平港及臺中港則模擬值約小於觀測值多介於 0.5 至 0.9 之間。

各港相關係數除高雄港外，相關係數大多大於 0.6 以上，表示整體而言風場提供模擬值與觀測風速相關性佳。臺中港全年度相關性最佳，高雄港較不理想，主要原因是比對觀測風速及中尺度 MC 預報風場時，受限於本所觀測站位置影響，其中所採用臺中港觀測站位置是在北防波堤上，而高雄港為在 10 號碼頭附近，較接近內陸區域易受周圍環境影響，因此臺中港預報風速趨勢較為接近觀測風速，而高雄港在夏季(6 月至 8 月)相關性有 0.6 以上比平時較佳點。目前本所已於高雄港二港口堤頭裝設風速計，未來將於延續計畫內調整比對觀測資料。

表 2-3 各港觀測風場與中尺度預報風場之平均比值彙整表

月份	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	臺中港	臺北港
十二	1.5	1.0	1.8	1.7	0.7	0.7	1.0
一	1.4	1.1	2.4	1.3	0.9	0.5	0.8
二	1.6	0.9	1.9	1.5	0.7	0.5	1.4
三	1.6	1.1	1.8	1.6	0.6	0.6	1.0
四	1.7	1.0	1.3	1.6	0.7	0.8	1.2
五	1.6	1.0	1.7	1.8	0.8	0.8	1.1
六	1.4	1.1	1.9	1.9	0.9	0.8	1.0
七	1.3	1.1	1.1	1.4	1.1	0.9	0.8
八	1.4	1.2	1.2	1.4	0.8	0.9	0.9
九	1.8	1.2	1.2	1.7	-	0.8	1.1
十	1.9	1.2	1.5	1.8	-	0.6	1.0
十一	2.1	1.1	1.7	1.5	-	0.7	1.0

(2010/12~2011/11)

註：比值=預報值÷觀測值

表 2-4 各港觀測風場與中尺度預報風場之相關係數彙整表

月份	基隆港	蘇澳港	花蓮港	高雄港	安平港	臺中港	臺北港
十二	0.79	0.71	0.56	0.38	0.75	0.87	0.81
一	0.67	0.71	0.69	0.38	0.65	0.86	0.60
二	0.71	0.63	0.40	0.30	0.53	0.82	0.71
三	0.64	0.58	0.65	0.16	0.59	0.89	0.76
四	0.48	0.42	0.42	0.28	0.57	0.90	0.69
五	0.57	0.70	0.45	0.39	0.63	0.82	0.73
六	0.61	0.64	0.49	0.61	0.70	0.66	0.73
七	0.67	0.70	0.45	0.66	0.53	0.74	0.67
八	0.72	0.52	0.38	0.64	0.69	0.70	0.75
九	0.64	0.64	0.29	0.26	-	0.83	0.75
十	0.71	0.60	0.58	0.09	-	0.91	0.81
十一	0.51	0.60	0.39	0.34	-	0.83	0.66

(2010/12~2011/11)

2.4.2 風場模擬資料探討

目前風場係集合中央氣象局每日發布兩組 72 小時風場及氣壓場預報資料組合成，如圖 4.1 所示，其中前 24 小時為系統進行風浪模式追算之風場，後 48 小時為系統進行風浪模式預報之風場。由於中央氣象局發布之風場及氣壓場預報資料，除每組 72 小時之第一筆資料屬於追算資料外，其餘均為氣象預報資料。故每日所使用之風場亦僅前一日 8 時及 20 時之資料屬追算資料(如圖中垂直箭頭標示之處)，其餘均屬於預報資料。換言之每日作業化之風場結構，在前一日 7、8 時及 19、20 時兩時段之風場均屬不連續之風場，此一風場不連續性在風場變化較大期間如颱風期間或東北季風較強期間尤其顯著，如圖 4.2 及圖 4.3 所示。

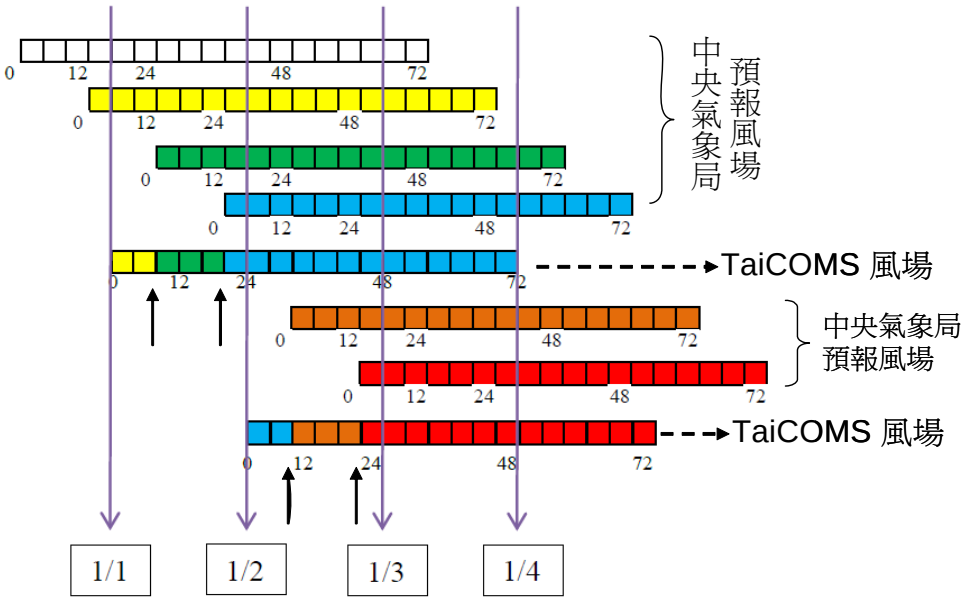
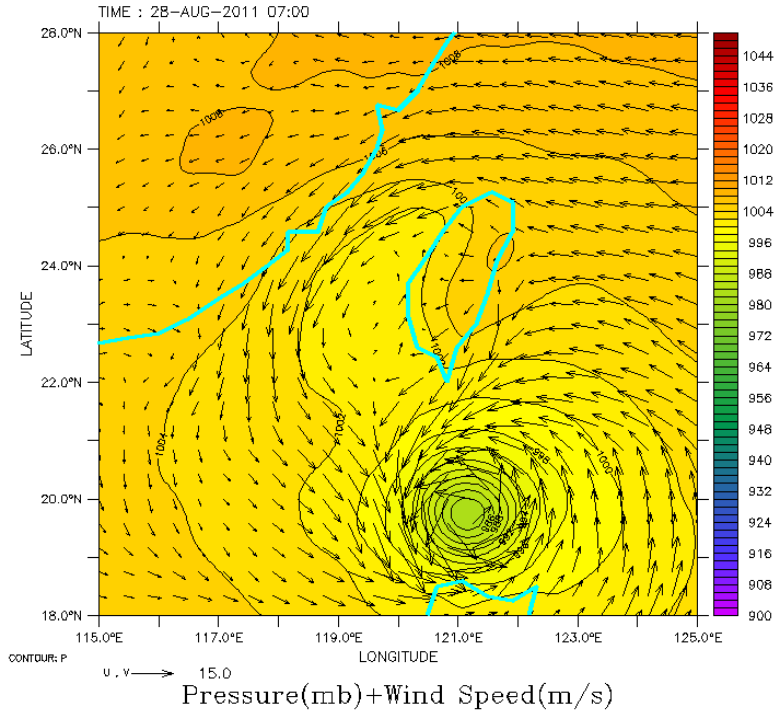
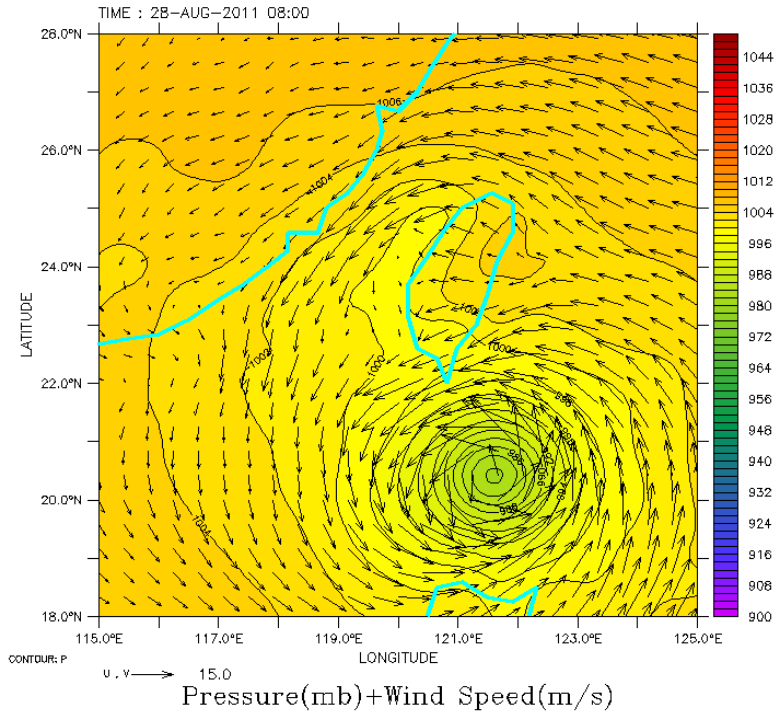


圖 2.7 每日作業化 72 小時風場結構組成示意圖

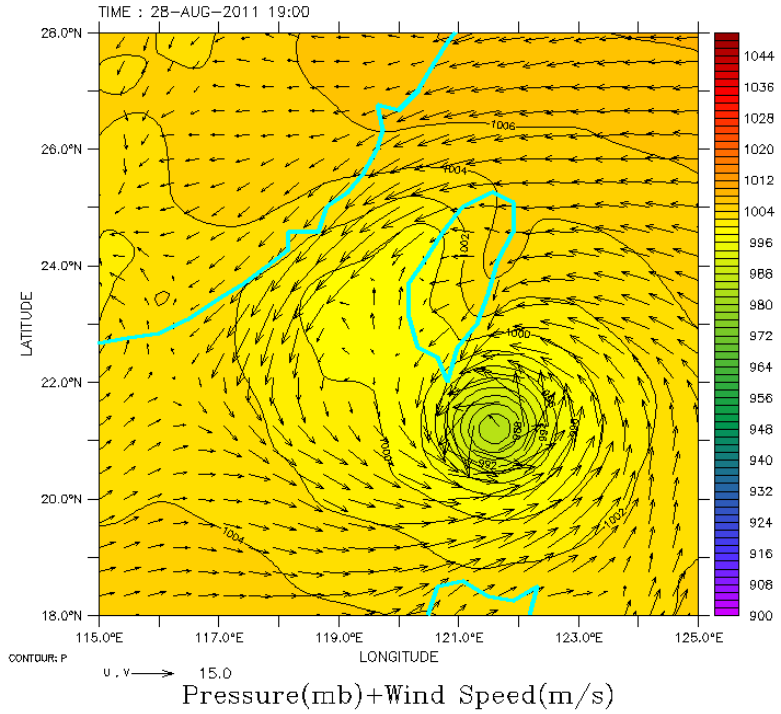


(a)

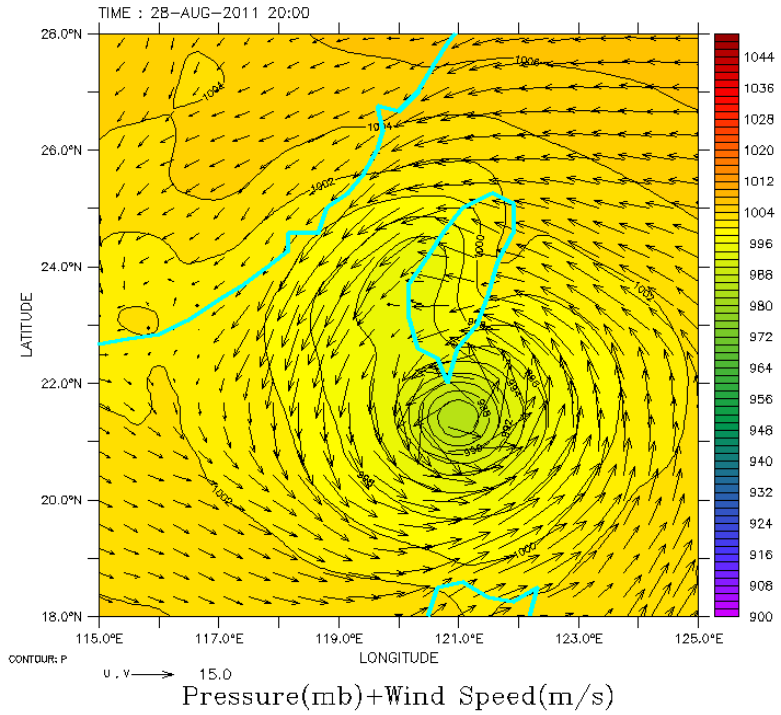


(b)

圖 2.8 南瑪都颱風 MC 預報風場圖(a) 07H，(b) 08H



(a)

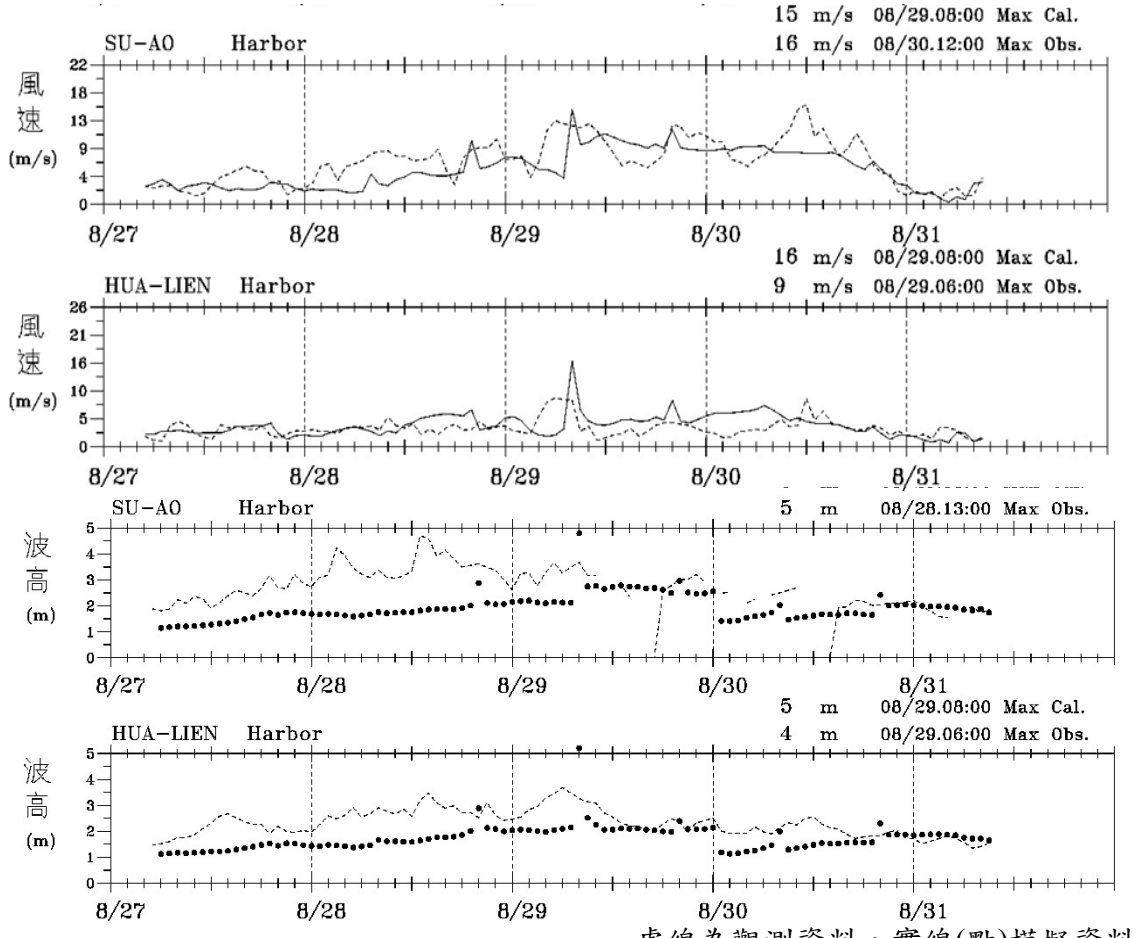


(b)

圖 2.9 南瑪都颱風 MC 預報風場圖(a)19H，(b)20H

依據目前風場資料來源及風場組成結構研判，由於風場組成結構缺乏足夠之追算風場，即每日僅兩組間隔 12 小時之校正風場資料外均屬預測風場，對於後續提升風浪追算結果精度之要求將造成相當困擾。

此外，每日 8 時及 20 時整之風浪追算模擬結果可能受到風場不連續之影響而產生波浪模擬結果不連續現象。其中在如 8 月 27 日至 31 日蘇澳港及花蓮港風場歷線資料內如圖 2.10 所示，在每日 8 時及 20 時就會出現風速歷線上有明顯不連續差異，對應至 12 月蘇澳港及花蓮港中尺度波場模擬結果亦有該不連續差異情形。因此對於風場資料部份仍待與後續與中央氣象局協商是否提供 14 時及 2 時發布另兩組預報風場資料增加預報時間密度，或提供前 12 小時之校正風場資料作為未來作業化之追算風場。



虛線為觀測資料，實線(點)模擬資料

圖 2.10 蘇澳港及花蓮港風場及波浪歷線圖(8 月 27 至 31 日)

第三章 波浪模式建置及分析

在TaiCOMS架構下波浪作業化預報系統建構出三種不同尺度的波浪模式，分別為大尺度之西太平洋風浪模式(West Pacific wind-wave model)；中尺度之臺灣周圍海域風浪模式(Taiwan Nearshore wind-wave model)，其模擬範圍以臺灣周圍海域為主；以及針對國內七大港口分別建置小尺度的港區近岸波浪場模式(Harbor Nearshore wave model)。

西太平洋風浪模式採用海洋波浪預測模式 WAM (Wave Modeling)為核心模式，目的在於產生中尺度臺灣周圍海域風浪模式所需之邊界條件。中尺度之臺灣周圍海域風浪模式則採用荷蘭 Delft 大學所發展之近海風浪模式 SWAN (Simulating WAves Nearshore)為基礎，使其發展成適合於模擬臺灣周圍海域波浪特性之模式。至於基隆港等七大港區小尺度港區近岸波浪場模式則以 Kirby 及 Dalrymple (1983)所發展的波浪折繞射(REF/DIF)模式為基礎，分別建構適合模擬七大港區近岸波浪場特性之波浪模式，各模式之地形網格解析度為 10 公尺。此外，因應颱風波浪侵襲下為能夠瞭解港內波浪狀況，針對七大港區另規畫細尺度三角網格有限元素港域波浪模式(Finite Element Harbor wave model)。

3.1 波浪模式理論簡述

本計畫規劃四種尺度的網格點，包括大尺度：西太平洋範圍(遠域)、中尺度：臺灣周圍海域範圍(近域)、小尺度：近岸海域範圍及細尺度：港域範圍，以期將臺灣海域所有可能預報的的波浪海象狀況包含在其中。圖 3.1 為風浪模式計算範圍圖，圖中黑色虛線方框為巢狀格網範圍，由圖中所示，風浪模式計算時先由遠域範圍計算，由遠域模式所得之結果經由內插方式，獲得近域範圍計算所需之邊界條件，再次計算近域範圍內之風浪，如此則可獲得近岸地區較為詳細與準確的風浪計算

結果。

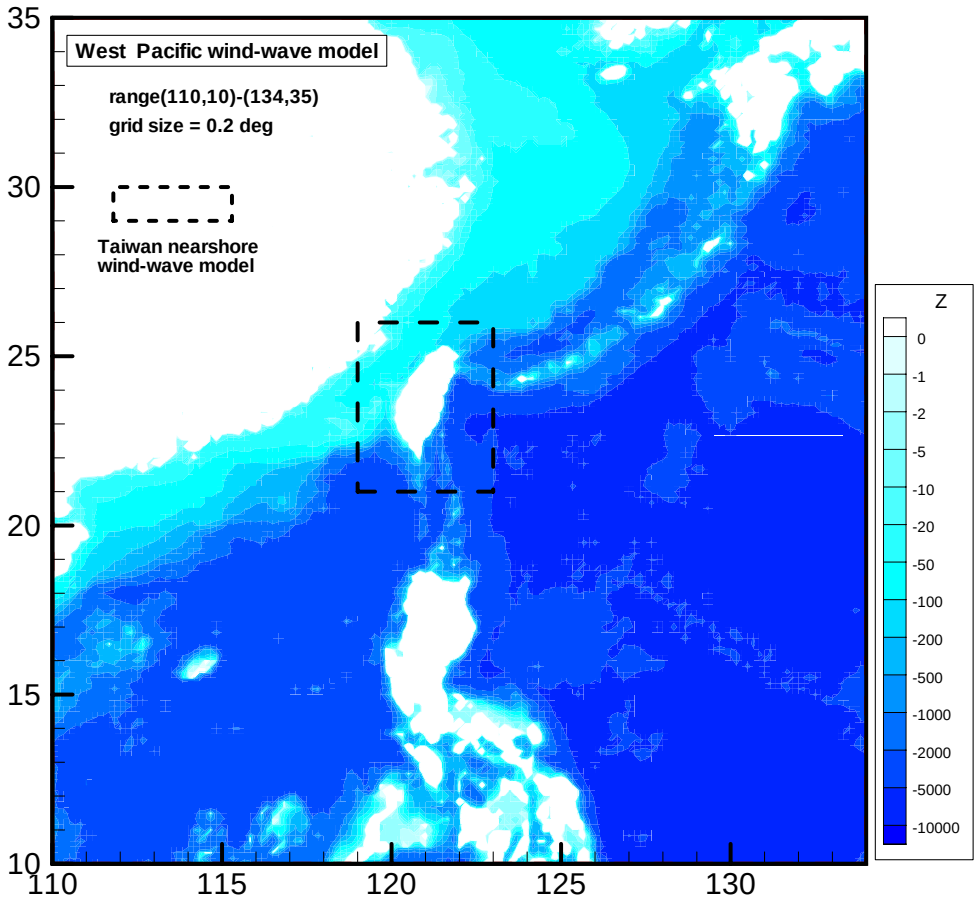


圖 3.1 風浪模式之計算範圍(方框為巢狀網格範圍)

3.1.1 大尺度風浪模式

目前使用的第三代風浪模式 WAM 係經由 WAMDI (The Wave Model Development and Implementation) Group (1988) 改良模式之物理過程及數值計算方法，使其適用於海面風浪之預報。WAM 模式所使用的基本方程式為二維波浪能量平衡方程式，此方程式能夠描述方向波譜在時間及空間上的變化過程。這些變化過程包括風傳遞到波浪的波能輸入條件、白沫效應、底床摩擦和波、波之非線性交互作用。其波浪能量平衡方程式可表示為：

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \bullet \left(C_g E\right) = S_{iot} \quad \text{.....(3.1)}$$

式中 $E = E(f,\theta,\vec{x},t)$ 為波浪能量密度譜，f 為波浪的頻率，θ 為波浪的傳播方向，$\vec{x}$ 為位置，t 為時間，C_g 為波浪群速度(group velocity)，S_{tot} 為源項(source)。

在大範圍波場計算時，地球曲率會影響波浪的傳遞，為使模式適用於大範圍之計算，將式(3-1)從直角座標轉換為球面座標，其方程式為(WAMDI Group，1988)：

$$\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{1}{\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(C_\phi E\right)+\frac{\partial}{\partial\lambda}\left(C_\lambda E\right)+\frac{\partial}{\partial\theta}\left(C_\theta E\right)=S_{iot} \quad \text{.....(3.2)}$$

式中 ϕ 為緯度，λ 為經度，C_ϕ、C_λ 與 C_θ 分別 ϕ、λ 與 θ 領域之傳遞速度，各領域的傳遞速度如下：

$$C_\phi = C_g \sin\theta/R \text{ 、} C_\lambda = C_g \cos\theta/R\cos\phi \quad \text{.....(3.3)}$$

$$C_\phi = \frac{1}{\kappa}\frac{\partial\sigma}{\partial d}\left(\frac{\sin\theta}{\cos\phi}\frac{\partial d}{\partial\lambda}-\cos\theta\frac{\partial d}{\partial\phi}\right)\Big/R \quad \text{.....(3.4)}$$

式中 R 為地球半徑(m)，σ 為波浪角頻率，k 為波數(wave number)，d 為水深。

如同波譜之線性假設，源項 S_{tot} 可表示為不同波浪成長與消散的能量總和，即

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad \text{.....(3.5)}$$

式中 S_{in} 為風傳遞到波浪的波能輸入通量，S_{nl} 為波與波間之非線性交互作用波能傳遞通量，S_{ds} 為白沫效應所引起的波能消散通量。其中

$$S_{in} = \gamma \cdot F \quad \text{.....(3.6)}$$

式中 γ 為波能成長率，可表示如下

$$\gamma = \varepsilon\sigma\beta(u_*/c)^2\cos^2(\theta-\theta_w)\ ,\quad |\theta-\theta_w|<\pi/2 \quad \text{.....(3.7)}$$

式中 ε 為空氣與水之密度比率，β 為 Miles 參數，u_*為風作用於海面之摩擦速度(=$\tau^{1/2}$)，θ_w 為風向。

S_{nl} 為描述弱非線性、共振(resonant)及波浪與波浪間之交互作用之過程，代表波浪能量由高頻至低頻之能量傳輸，如圖 3.2 所示。

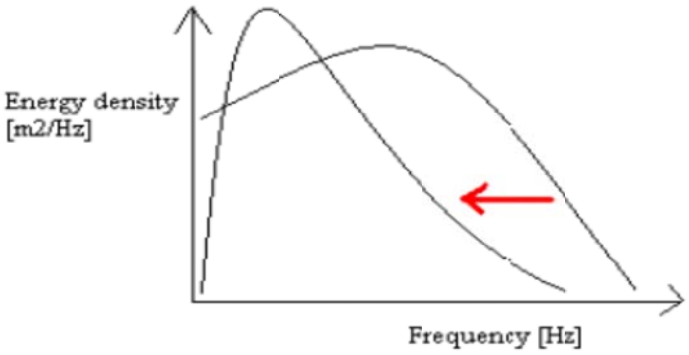


圖 3.2 波浪能量由高頻向低頻傳遞之示意圖

S_{ds} 係描述波浪能量損失之項目(Komen et al., 1994)、共振(resonant)及波浪與波浪間之交互作用之過程，代表波浪能量由高頻至低頻之能量傳輸，如圖 3.2 所示。

$$S_{ds} = -3.33\times10^{-5}\bar{f}\left(\frac{f}{\bar{f}}\right)^2\left(\frac{\overline{\alpha}}{\overline{\alpha}_{PM}}\right)^2 E \quad \text{.....(3.8)}$$

其中

$$\bar{f} = E_0^{-1}\cdot\int E(f,\theta)fdfd\theta \quad \text{.....(3.9)}$$

$\bar{f}$ 為平均頻率，E_0 為總能量；$\overline{\alpha}$ 為整合的波浪尖銳度(integral wave steepness)參數，定義為

$$\overline{\alpha} = E_0\bar{f}^4 g^{-2} \quad \text{.....(3.10)}$$

g 為重力加速度，$\overline{\alpha}_{PM}$ 為 Pierson-Moskowitz 波譜之理論值(WAMDI, 1988) 。

3.1.2 中尺度風浪模式

SWAN(Simulating WAves Nearshore)風浪模式(Booij et al. 1996)，是由由荷蘭 Delft 技術大學統合以往學者之研究並加以改良所發展而成，模式具有第三代風浪模式的特徵，且在能量成長與消散項的參數選擇上，比其它模式更具彈性；同時也提供第一代、第二代與第三代的相關波浪成長與消散參數，可供使用者應用。因此，模式具有可預報近岸海域風浪之功能。此模式也經過學者 Holthuijsen et al.(1997)和 Booij et al.(1998)應用實測風浪資料加以驗證。而歐等人(1999，2000，2001)也曾利用 SWAN 對侵襲台灣之颱風風浪做過一系列之研究與模擬，並且已有初步成果。

SWAN 模式是一個利用風、海底底床及海流狀況以獲得在海岸地區、湖泊或河口附近水域的合理預估的波浪參數的波浪數值模式，這個數值模式基本上是依據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)，它是屬於第三代的風浪預報模式。此一模式係累積過去學者的研究成果為基礎加以整合及改良而成，它可以計算波浪在時間及空間領域中的傳遞、波與波的非線性交互作用、波浪受風的成長、碎波、因底床摩擦所造成的能量衰減、及受到海流及地形變化而產生的頻率位移、淺化與折射。因此，SWAN 模式具有推算近岸波浪的功能。從 SWAN 的功能中可表現出下列的波浪傳播過程：

(1)在地理空間中的正線性傳播

(2)由於海底底床與水流在空間上的變化而引致的折射與淺化

(3)由於對向海流引起的阻滯與反射

(4)障礙物所引致的反射、阻滯或通過的情形

以及下列有關波浪的生成及消散過程：

(1)因為風所引致的波浪生成

(2 因為白沫(whitecapping)所引致的波浪消散

(3)因為水深引起碎波(depth-induced wave breaking)所引致的波浪消散

(4)因為底床摩擦(bottom friction)所引致的波浪消散

(5)波浪間的交互作用(quadruplets and triads wave-wave interaction)

(6)障礙物

此外，SWAN 也可以計算因為波浪所引致的平均海水面的上升(wave-induced set-up)。SWAN Cycle III 可以在直角座標及球面座標系統中進行定常(stationary)及部分非定常狀態(optionally non-stationary)的波浪模擬。定常狀態的模擬應用於短期的波浪作用，例如當波浪通過該水域的時間小於地理學上的條件(如波浪的邊界條件、風、潮位及暴潮等)。而類定常的模擬(quasi-stationary)則可以結合定常的 SWAN 計算模擬在時變序列上的定常狀況。

然而，我們也必須了解到 SWAN 並沒有考慮波浪的繞射。因此，SWAN 不應使用於在很短波長的距離內水深變化很大的場合，也因此 SWAN 不適用於島嶼或港灣附近的波浪模擬。SWAN 也不計算因為波浪引致的水流，該項水流必須被視為資料輸入的一部份。

在 SWAN 波浪推算中，不論非線性效應是否明顯，波浪均是利用二維的波浪作用力頻譜密度函數來描述。其理由是當在高度非線性的情形下，波浪作用力頻譜密度函數似乎可以比較合理且正確地預測波浪的二階頻譜矩的分佈。因此，SWAN 中所適用的頻譜是波浪作用力頻譜密度函數 $N(\sigma,\theta)$ (其中，σ為相對頻率；θ為波浪方向角)，而不是能量頻譜密度函數 $E(\sigma,\theta)$，主要是因為當有流的作用時，作用力密度可以守恆，但能量密度則否(例如，Whitham, 1974)。$N(\sigma,\theta)=E(\sigma,\theta)/\sigma$。在 SWAN 中，此一頻譜可以隨著時間及空間而改變。其理論簡述如下，詳細的理論敘述可參考 SWAN 的使用手冊：

1.作用力平衡方程式(wave action balance equation)

波譜的發展過程可以用頻譜作用力平衡方程式來描述(Hasselmann et al., 1973)

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial c_x N}{\partial x}+\frac{\partial c_y N}{\partial y}+\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}+\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}=\frac{S}{\sigma} \quad \text{.....(3.11)}$$

其中，左式第一項表示作用力密度隨時間的變化率；第二及第三項為作用力在空間中分別以c_x及c_y的速度在 x-及 y-軸方向傳遞；第四項為受到水深及流的變化所導致相對頻率在 σ-軸上以c_σ的速度位移；第五項係表示因為水深或流所引起的折射(在 θ-軸上以c_θ的速度傳遞)；這些速度可以線性波理論計算而得(如，Whitham, 1974；Mei, 1983；Dingemans, 1997)。右式的 S(=S(σ,θ))是以能量密度表示的來源項，包含能量的生成、衰減、及非線性的波浪交互作用。

2.風的能量輸入

風的能量傳入波的理論是以 Phillips(1957)的共鳴機制(resonance mechanism)以及 Miles(1957)的回饋機制(feed-back mechanism)來描述，其關係式如下：

$$S_{in}(\sigma,\theta)=A+BE(\sigma,\theta) \quad \text{.....(3.12)}$$

其中，A 及 B 的係數值受到波浪頻率及方向，以及風速及風向的影響。流的影響也是以區域性的風速及風向來表示。

3. 能量消散

SWAN考慮的波浪能量的消散項包含了三個部分：飛沫$S_{ds,w}(\sigma, \theta)$、底床摩擦$S_{ds,b}(\sigma, \theta)$、及水深引起碎波$S_{ds,br}(\sigma, \theta)$。

飛沫主要是由波形尖銳度(wave steepness)所控制，依據 Hasselmann(1974)所推導的 Pulse-based 模式，此一消散項可表為

$$S_{ds,w}(\sigma,\theta) = -\Gamma\tilde{\sigma}\frac{k}{\tilde{k}}E(\sigma,\theta) \quad \text{.....(3.13)}$$

其中，Γ是與波形尖銳度有關的係數；k=2π/L 是波數；L 是波長；$\tilde{\sigma}$ 及 $\tilde{k}$ 分別為平均相對頻率及平均波數。

因為水深引致的能量消散的原因包含了底床摩擦、底床運動、底部滲漏、及因為底床不規則性所產生的逆向散射。對於屬砂質底床的大陸棚海域，其主要的消散機制應該是底床摩擦

$$S_{ds,b}(\sigma,\theta) = -C_{bottom}\frac{\sigma^2}{g^2\sinh^2 kd}E(\sigma,\theta) \quad \text{.....(3.14)}$$

其中，C_{bottom} 為底床摩擦係數。由於底床摩擦所引致的平均水流對能量消散的影響並不在考慮範圍內，其原因是在於該項因子的影響程度尚無法掌握。

有關因為水深引致的碎波過程，至今我們的了解仍然有限，更遑論它的頻譜變化。目前可以掌握的是因為碎波所引致的總能量消散

$$S_{ds,br}(\sigma,\theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}}E(\sigma,\theta) \quad \text{.....(3.15)}$$

其中，E_{tot} 是總波浪能量；D_{tot} (負值)是依據 Battjes 及 Janssen(1978)所提有關因為碎波導致的總能量消散。D_{tot} 的值與碎波參數 $\gamma=H_{max}/d$ 有明顯關係，其中 H_{max} 為最大可能個別波高；d 為當地水深。

SWAN 可以估算透過一個結構體(如防波堤或壩)的波浪。這樣的結構物可能以兩種方式影響波浪場：其一，它可以沿著結構體的堤身局部性降低波高；其次，在結構體的端緣產生波浪的繞射。SWAN 本質上並不考慮繞射現象，但對於多方向不規則波場而言，除非波譜為窄頻，且在結構物附近一至二個波長的範圍內，波浪繞射效應並不顯著，因此 SWAN 仍可以很合理地計算結構物附近的波場。就 SWAN 的海底地形格點分割而言，因為結構物的橫斷面積相對太小而無法顯示，因

此往往將結構物視為一條線。如果防波堤是容許越波情形發生時，其透過係數可表為

$$K_t = 0.5\left[1-\sin\left(\frac{\pi}{2\alpha}\left(\frac{F}{H_i}+\beta\right)\right)\right] \quad for \quad -\beta-\alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha-\beta \quad .....(3.16)$$

其中，F=h-d 是堤體的乾舷高度；H_i 是入射波高；h 是冠牆高度；d 是平均水位；α 及 β 係數則與堤體的形狀有關，參考值如表 2-1。

表 3-1 不同堤體之透過係數參數表

堤 體 種 類	α	β
直立薄板	1.8	0.10
沉　　箱	2.2	0.40
2:3 坡度的壩體	2.6	0.15

4. 非線性波浪交互作用

在深水區裡，四波交互作用(quadruplet wave-wave interaction)的現象主導了頻譜的發展。它將能量從譜峰處下低頻區傳遞(所以譜峰頻率向低頻方向移動)以及向高頻區傳遞(以白沫型式消散能量)。而在非常淺水區，三波交互作用將能量低頻區傳遞至高頻區而引起較高的諧波。

在 SWAN 波浪數值模式中，主要是利用有限差分法來求解，對於邊界之處理，SWAN 模式中假定波浪能量遇陸地邊界為完全消散，亦即無任何波浪能量反射，而外海開放邊界條件則假設沒有任何波能可以由邊界外進入，且波能可以由邊界內自由離開計算領域。

由於計算網格的大小會影響計算結果與精度，故其需要與解析問題互相配合。例如在模擬颱風波浪時，在颱風中心處所形成的波浪向外傳遞形成湧浪 (swell)，其可傳遞至相當遠的距離，因此計算領域亦需夠大才可模擬此一現象。較小計算網格距離固然可以提高波浪解析的精度，但計算時間較長。此外在海岸工程的應用上，複雜的地形與

多變的海岸線也需要較小的網格距離才能加以描述，使近岸推算處的波浪能達到適當精度。巢狀網格 (nested grid) 與非結構性網格的應用可以有效解決網格大小問題。較粗的網格應用在起始計算領域，使得計算能快速模擬大範圍的波浪演變，較細的巢狀網格可以插入其中，以適當模擬海岸之波浪變化，如此可以更精確地預報波浪，也可以有效率地解決問題。

3.1.3 小尺度波浪模式

Radder (1979)依據線性緩坡方程式之理論基礎，將波浪場分離成向前之進行波與向後之進行波(忽略向後之散射波)等兩種成份波，發展出拋物線型緩坡波浪模式。相較於橢圓型緩坡方程式及雙曲線型緩坡方程式，拋物線型緩坡模式具有下列優點：(1)模式下游端之邊界條件不再是必要的，(2)具有高度數值運算效率。其缺點為受到垂直波向之橫向導數近似表示式之限制，波浪傳播僅適用於給定波向之 45°範圍內。

Booij (1981)採用 Lagrangian 求解方法發展出含波、流交互作用影響之拋物線型緩坡方程式，同時引入較多的項次代表側向導數之近似解，將拋物線波浪模式適用範圍提升至給定波向之 60°範圍內。Kirby and Dalrymple (1983)先於 Booij (1981)之模式中增加非線性修正項，使其可以處理弱非線性波浪及較強流速等問題。模式基本控制方程如下：

$$\left(C_g+U\right)A_x+VA_y+i\left(\bar{k}-k\right)\left(C_g+U\right)A+\frac{\sigma}{2}\left\{\left(\frac{C_g+U}{\sigma}\right)_x+\left(\frac{V}{\sigma}\right)_y\right\}A$$
$$-\frac{i}{2\sigma}\left[\left(p-V^2\right)A_y\right]_y-\sigma\frac{k^2}{2}D|A|^2A=0 \qquad \text{.....(3.17)}$$

式中 $A(x,y)$ 為複數型式之自由表面波形振幅，A_x 及 A_y 分別為 x 及 y 方向之振幅分量，$\sigma=\omega-kU$ 為內在頻率(intrinsic frequency)，ω 為波浪之角頻率，$k(x,y)$ 為波浪週波數，$\bar{k}$ 為參考週波數(定義為沿 y 軸上週波數之平均值)，U 及 V 分別為 x 及 y 方向之平均流速度，參數 $p=CC_g$，C 為波浪之波速，C_g 為波浪群速度，D 為非線性影響項等於

$$D=\frac{\cosh\left(4kh\right)+8-2\tanh^2\left(kh\right)}{8\sinh^4\left(kh\right)} \qquad \text{.....(3.18)}$$

式中 h 為靜水深。Kirby (1986)進一步依據 minimax 原則將 Booij 之近似解延伸以提升模式適用性之範圍，使得模式可以處理較大角度波浪傳播問題。因此，REF/DIF 模式之基本方程式如下：

$$\begin{aligned}
&\left(C_g+U\right)A_x-2\Delta_1 VA_y+i\left(\bar{k}-a_0k\right)\left(C_g+U\right)A+\left\{\frac{\sigma}{2}\left(\frac{C_g+U}{\sigma}\right)_x-\Delta_1\sigma\left(\frac{V}{\sigma}\right)_y\right\}A\\
&+i\Delta'\left[\left(p-V^2\right)\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y\right]_y-i\Delta_1\left\{\left[UV\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y\right]_x+\left[UV\left(\frac{A}{\sigma}\right)_x\right]_y\right\}\\
&+i\sigma\frac{k^2}{2}D|A|^2A+\frac{\upsilon}{2}A+\frac{-b_1}{k}\left\{\left[\left(p-V^2\right)\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y\right]_{yx}+2i\left[\sigma V\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y\right]_x\right\}\\
&+b_1\beta\left\{2i\omega U\left(\frac{A}{\sigma}\right)_x+2i\sigma V\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y-2UV\left(\frac{A}{\sigma}\right)_{xy}+\left[\left(p-V^2\right)\left(\frac{A}{\sigma}\right)_y\right]_y\right\}\\
&-\frac{i}{k}b_1\left[\left(\omega V\right)_y+3\left(\omega U\right)_x\right]\left(\frac{A}{\sigma}\right)_x-\Delta_2\left[\omega U\left(\frac{A}{\sigma}\right)_x+\frac{1}{2}\omega U_x\left(\frac{A}{\sigma}\right)\right]\\
&+ik\omega U\left(a_0-1\right)\left(\frac{A}{\sigma}\right)=0
\end{aligned} \tag{3.19}$$

式中

$$\beta=\frac{k_x}{k^2}+\frac{\left[k\left(p-U^2\right)\right]_x}{2k^2\left(p-U^2\right)} \tag{3.20}$$

$$\Delta_1=a_1-b_1\ ,\quad \Delta_2=1+2a_1-2b_1\ ,\quad \Delta'=a_1-b_1\frac{\bar{k}}{k} \tag{3.21}$$

上述各式中，υ 為波浪消散因子，可依據能量消散特性給定不同的型式。而係數 a_0，a_1 及 b_1 可依據所考慮的波浪入射角度範圍利用 Minimax approximation 決定之，此處模式所採用的係數值分別為 a_0= 0.994733，a_1=-0.890065，b_1=-0.451641。

當考慮波浪受到底床摩擦影響以及波浪碎波所產生的波能損失，模式採用具有消散項的線性緩坡方程式處理，即

$$\frac{\partial A}{\partial x}=\frac{i}{k}\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}+\upsilon A \quad \text{.....(3.22)}$$

式中 $i=\sqrt{-1}$ 。

本計畫 REF/DIF 模式採用有限差分數值方法求解此一拋物線型方程式，亦即將計算領域分割成具Δx 及Δy 大小之矩形網格，並求解格點上之複數振幅 $A(x,y)$ ，振幅 A 所在之位置係以(i, j)表示而非以座標 (x,y) (x, y)，如圖 3.3 所示，惟模式計算所需之地形可以輸入具 (x_i,y_j) 座標，其中 $x_i=(i-1)\Delta x$ ， $y_j=(j-1)\Delta y$ 。

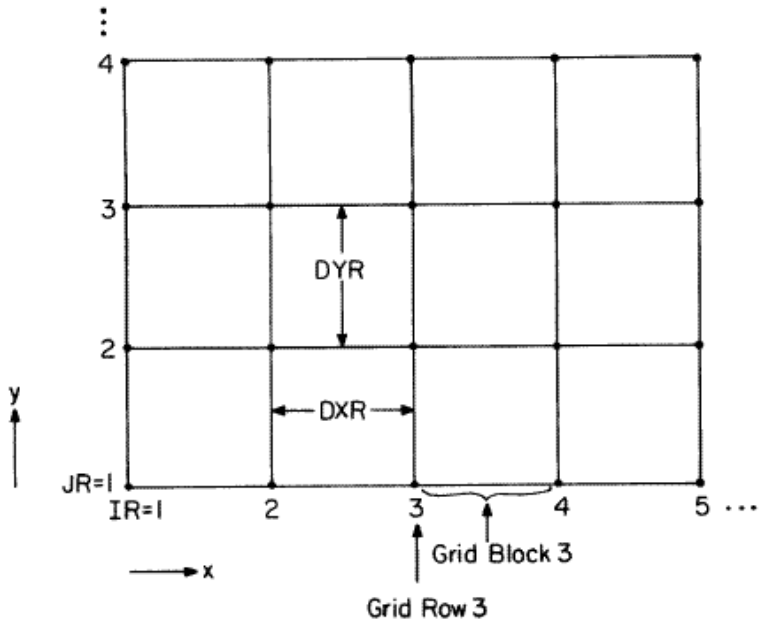


圖 3.3 REF/DIF 數值計算網格座標系統

3.1.4 細尺度波浪模式

當波浪自外海傳播至港域時，受到水深地形變化以及海岸線、防波堤和港內岸壁等結構物之影響，波浪會產生繞射、折射及反射等現象。針對此一問題常見之求解方法是將整個問題的領域分為外海半無限領域和港池有限領域等兩個領域，如圖 4.2 所示；同時假設外海半無限領域為等水深，僅考慮港池有限領域則為緩變之不等深水域，且不考慮波浪的碎波現象。

如圖 3.3..2 所示，所取之直角座標系統為 X 軸與海岸線重合，Y 軸向外海為正，Z 軸垂直紙面向上為正，Z＝0 為靜水面。外海半無線領域及有限領域別以領域(I)及(II)稱之，領域(I)及領域(II)之相連邊界為半徑 R_0 之半圓，以 B_1 表示。領域(II)則包含了港池內及港外半徑 R_0 之半圓區內水域部分，其所包括的海岸邊界、防波堤邊界及港池岸壁邊界以 B_2 表示。假設領域(I)為等水深 h_1，領域(II)之水深變化為 $h_2(x,y)$。各領域內水位變化 $\eta_j(x,y;t)$ 可表示成

$$\eta_j(x,y,t) = f_j(x,y)e^{i\omega t} \quad , \ \mathrm{j} = 1,2 \qquad .....(3.23)$$

式中 $f_1(x,y)$ 及 $f_2(x,y)$ 分別稱為領域(I)及領域(II)之波浪水位函數，ω 為入射波之角頻率 $\omega = 2\pi/T$，T 為入射波之週期。所欲求解之波浪水位函數 $f_j(x,y)$，$j = 1, 2$ 分別滿足下列控制方程式：

$$\nabla^2 f_1 + K_1^2 f_1 = 0 \quad , \text{在領域(I)內} \qquad .....(3.24)$$

$$\nabla\cdot(C_2C_{2g}\nabla\phi) + (C_2C_{2g}K_2^2 + i\omega\mu + iC_{2g}\omega\gamma)\phi = 0 \ , \text{在領域(II)內} \quad (3.25)$$

式中 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 為二維梯度運算子，μ 為摩擦因子，γ 為考慮波浪碎波之碎波參數，K_1 及 K_2 分別為波浪在領域(I)及(II)內之波數，C_2 為波浪在領域(II)內之波速$(= L_2/T)$，C_{2g} 為群速度$(= \kappa C_2)$。其中 κ 定義為

$$\kappa = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2K_2h_2}{\sinh 2K_2h_2}\right) \quad \text{.....(3.26)}$$

有關摩擦因子μ之計算可採用 Dalrymple et al. (1984)之表示式：

$$\mu = \frac{2\kappa\omega}{K_2}\left(\frac{2f_r}{3\pi}\frac{\alpha K_2^2}{(2K_2h_2 + \sinh 2K_2h_2)\sinh K_2h_2}\right) \quad \text{.....(3.27)}$$

式中，a為波浪之振幅，f_r 為摩擦係數。碎波參數γ採用下列計算式

$$\gamma = \frac{\chi}{h_2}\left(1 - \frac{\Gamma^2 h_2^2}{4a^2}\right) \quad \text{.....(3.28)}$$

式中χ及Γ分別為經驗常數(其值分別採用 0.15 及 0.4)。

在領域(I)及(II)之交接假想邊界(B_1)上須滿足下列連續條件：

$$f_1 = f_2 \quad \text{，在假想邊界} B_1 \text{上} \quad \text{.....(3.29)}$$

$$C_1C_{1g}\frac{\partial f_1}{\partial n} = -C_2C_{2g}\frac{\partial f_2}{\partial n}, \quad \text{在假想邊界} B_1 \text{上} \quad \text{.....(3.30)}$$

此外，在一般海岸線或結構物邊界(B_2)上須滿足下列部份反射邊界條件：

$$\frac{\partial f_2}{\partial n} = -i\alpha K_2 f_2 \quad \text{，在假想邊界} B_2 \text{上} \quad \text{.....(3.31)}$$

式中n表示邊界面上離開領域向外之單位法線向量，α為消能係數，其值與波浪入射角、相位及港池岸壁之反射係數有關，$\alpha = 0$時表示港池岸壁為完全反射之情況(即$\partial f_2/\partial n = 0$)，而$\alpha = 1$則表示港池岸壁具有完全消能之作用。一般常用之計算式如下：

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad \text{.....(3.32)}$$

式中K_r為邊界之反射係數。

在領域(I)內波浪水位函數f_1通常是由入射波f_I及受到直線海岸線影響產生的反射波f_R及受到防波堤配置和港池開口影響而向外傳播之散射波f_S等構成的，因此f_1可表示

$$f_1 = f_I + f_R + f_S \quad \text{.....(3.33)}$$

其中散射波f_S係由港池開口往外海方向輻射出去，在無窮遠處滿足波浪輻射條件：

$$\lim_{K_1 r \to \infty} \sqrt{r}\left(\frac{\partial}{\partial r} + iK_1\right) f_S = 0 \quad \text{.....(3.34)}$$

假設入射波浪$\eta^I(x,y;t)$之振幅為A^I，波長為L_1，週波數為K_1，波向為與正 X 軸成θ°角度，其複數表示為：

$$\eta^I(x,y;t) = A^I e^{-i[K_1(x\cos\theta_0 + y\sin\theta_0) - \omega t]} \quad \text{.....(3.35)}$$

針對上述邊界值問題，一般常採用混合方法求解(Mei, 1989)，即對於領域(I)使用理論解析法，領域(II)使用有限元素法合併求解(詳細求解過程請參考 Mei, 1989，或李等, 2002)。

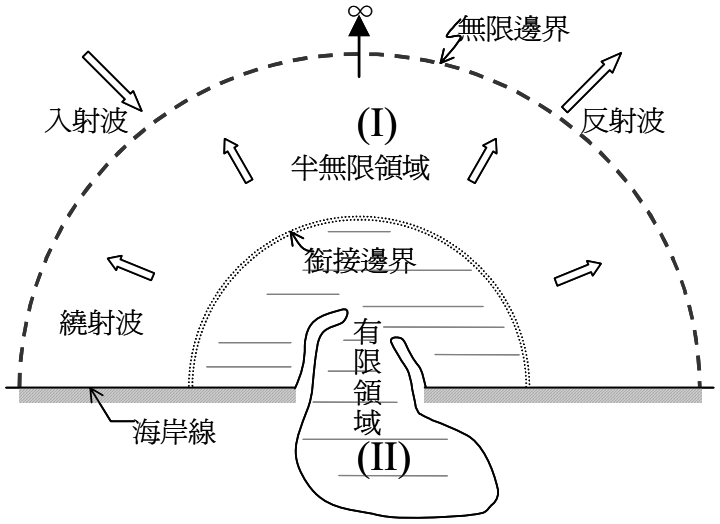


圖 3.4 港域波浪模式計算領域示意圖

3.2 風浪模式之精進與評估

本章風浪模式之精進主要針對TaiCOMS下大尺度西太平洋風浪模式(WAM)及中尺度臺灣周圍海域風浪模式(SWAN)進行模式模擬結果之精進與研究。基於 SWAN 模式之複雜性與 SWAN 模式邊界條件必須由 WAM 模式模擬結果給定，因此本年度計畫以 WAM 模式為研究重點，探討 TaiCOMS 下大尺度西太平洋風浪模式模擬結果改善之空間。

3.2.1 WAM 模式精進與評估

3.2.1.1 WAM 模式架構與程式流程

依據 WAM Model cycle 4 使用手冊可知完整之模式包含前置處理模組(PREPROC 及 PRESET)、波浪模擬主程式(CHIEF 及 BOUINT)以及後處理模組(PGRID、PSWGRID、PSPEC 及 PSWSPEC)等三部份。其中 PREPROC 模組主要用於產生模式所有與時間無關之資料，包括網格資料(粗網格或巢狀網格)、地形水深資料、頻率及方向角陣列等；PRESET 模組主要產生當波浪模擬為冷起動(cold start)狀態時，模式之初始條件；CHIEF 模組為 WAM 模式之核心，BOUINT 為巢狀網格被模擬時之必要程式，用於處理巢狀網格之邊界波譜。

雖然目前 TaiCOMS 架構下之 WAM 模式僅存在 PREPROC、PRESET、CHIEF 與後處理模組 PGRID 等模組，惟上述四模組已足以建構基本 WAM 模式模擬海面風浪之生成與傳播。目前 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式(WAM)之基本程式執行流程如圖 4.1 所示，其中 PREPROC 及 PRESET 對於本計畫 TaiCOMS 之波浪模擬作業化流程而言，實際上僅需於首次或系統重新啟動或模式相關參數有變動時才需執行，亦即每日作業化流程僅需配合前一日模擬過程產生的熱啟動輸出檔由主程式 CHIEF 切入即可。

惟目前 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式每日作業化流程，仍依照圖 4.1 所示之流程架構始於 PREPROC 模組，而止於 PGRID 模組。

此與 TaiCOMS 規劃風浪模式之每日作業化模擬應屬於熱啟動(hot start)狀態相違背，且由於 TaiCOMS 對於主程式 CHIEF 程式執行過程中所產出的熱啟動輸出檔案名稱均設定與 PRESET 模組所產出之初始條件輸入檔案名稱(即 blspanal、slatanal、lawianal 等名程)一致。此導致目前西太平洋風浪模式每日作業過程雖執行 PRESET 模組，但不會產生符合 TaiCOMS 規劃所需之熱啟動初始條件檔，而是將前一日作業化模擬最後產出之熱啟動輸出檔當作西太平洋風浪模式每日作業化模擬之熱啟動初始條件檔。此亦是目前 TaiCOMS 西太平洋風浪模式每日作業化模結果與前一日作業化模結果在模擬時間銜接處易出現不連續現象之原因，此一模擬結果不連續現象在模擬颱風波浪時尤其顯著。

此外，現有主程式 CHIEF 對於檔案名稱為 blspanal、slatanal、lawianal 等檔案除了提供作為模式運算終止前寫入熱啟動輸出相關資料外，在運算過程中亦提供模式作為寫入及讀取運算資料之暫存檔，因此原程式 code 已無法配合 TaiCOMS 系統作業於運算中途處理隔日運算所需之熱啟動輸出檔。因此為使目前主程式 CHIEF 能符合本計畫 TaiCOMS 之波浪模擬預報作業流程，本計畫亦將對原程式有關熱啟動輸出部份提出修正版本。為解決此一問題，本計畫將改寫程式 code 熱啟動輸出檔案名稱(如將上述檔案名程之後加上日期)，並在每日作業化模擬過程直接產生隔日作業化模擬所需之熱啟動輸出檔資料。亦即在每日作業化過程中，先將前一日產生之熱啟動輸出檔案名稱複製成程式設定之檔案名稱(即 blspanal、slatanal、lawianal)作為模式熱啟動之起始條件，再直接執行主程式 CHIEF，如此即可解決目前大尺度西太平洋風浪模式(WAM)模擬無法連續問題。

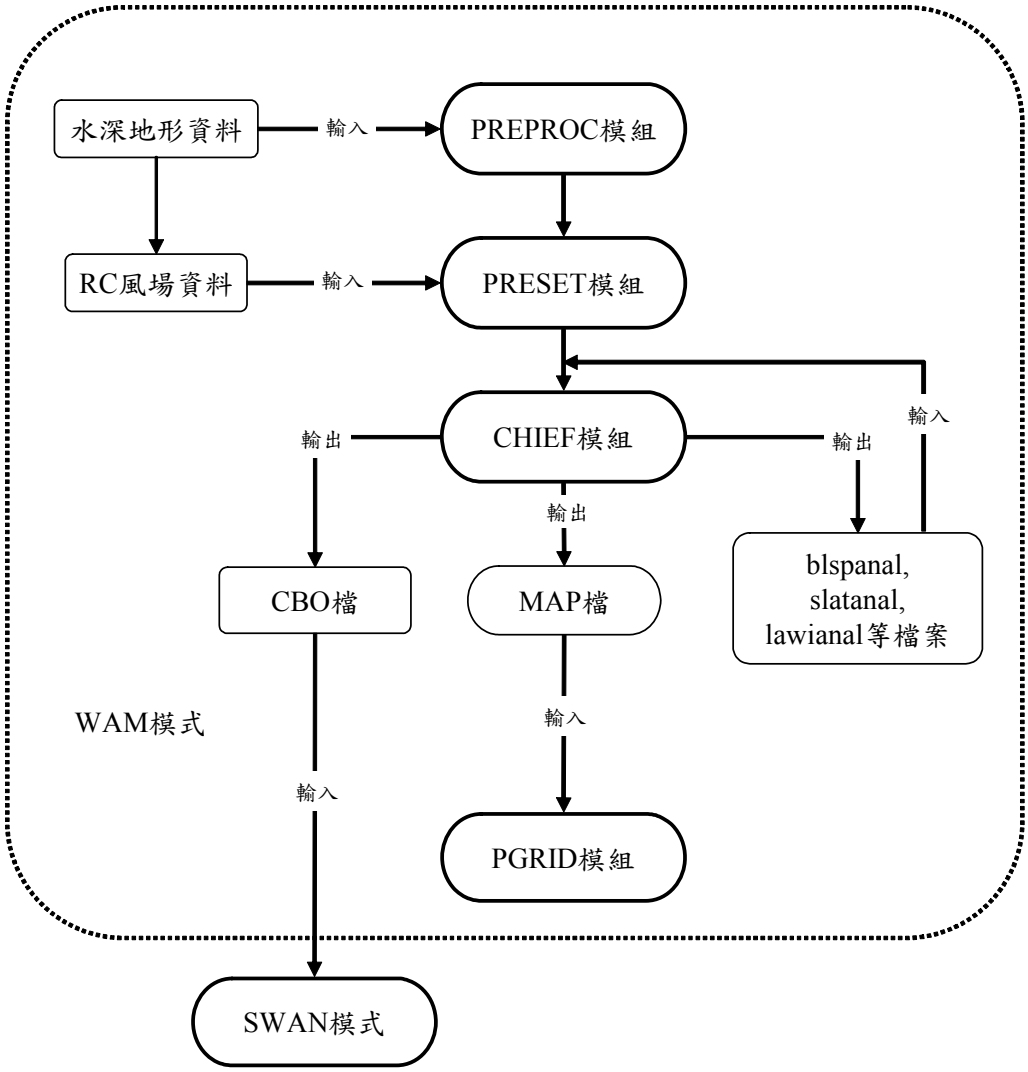


圖 3.5 WAM 風浪模式操作流程

3.1.2.2 WAM 模式模擬選項

WAM Model cycle 4 在波浪模擬方面提供兩種功能選項分別為(1)深水波浪模擬及(2)淺水波浪模擬，其中深水波浪模擬時所有波浪參數均採用深水波公式計算，此時模式地形水深對波浪之影響將被忽略(包括底床摩擦引起的能量損失)；當模式採用淺水波浪模擬選項時，模式在計算過程會考慮地形水深變化引起的波浪淺化效應，此時波浪相關參數(如波數 k 及群速度 C_g 等)將採用與水深有關之公式計算。此外，

在淺水波浪模擬選項內，WAM 模式除了程式可以計算地形引起的波浪淺化效應外，亦提供可以計算含水流引起的折射效應之選項。

關於模式邊界條件之設定，WAM 模式提供粗網格及細網格波浪模擬兩種方式。由於 WAM 模式發展之初，模式之計算網格假設全由陸地所包圍，因此模式(粗網格)邊界條件以給定自然邊界條件(natural boundary condition)為主，即假設在海岸網格點上無任何能量通率(energy flux)進入網格且能量以 free advection 方式傳到網格外。至於細網格之開放邊界條件則必需先經由粗網格模擬輸出細(巢狀)網格邊界線上格點(在粗網格上)之波浪能譜($E(f_i,\theta_j)$，$j = 1, KL$，$i = 1, ML$，其中 KL 為波譜方向切割數目，ML 為頻率數目)，作為細(巢狀)網格之開放邊界條件。

經檢視目前運作中 TaiCOMS 有關大尺度西太平洋風浪模式(WAM)之模擬選項得知，目前西太平洋風浪模式實際作業化模擬預報僅設定為深水波浪模擬，因此模式模擬結果在臺灣西部及北部大陸棚之海域上，將可能因風浪模擬結果僅為深水波浪情況而造成模式模擬結果與實際波浪現象出現較大誤差。為瞭解深水波及淺水波浪模擬之差異程度，本計畫將對西太平洋風浪模式分別採用深水波及淺水波浪模擬兩程選項進行波浪模擬與測試，以期能改善或提升模式模擬結果之準確性。

目前已知在西太平洋風浪模式之淺水波浪模擬測試結果上，模式仍因在計算波浪引起的表面應力方面會產生發散現象而受阻。初步檢討其原因包括網格中陸地與水深格點之配置不佳(如模式模擬範圍內之菲律賓群島及日本海域列島等)以及模式相鄰計算格點水深變化太大等因素，因此模式對於淺水波浪模擬測試仍有待進一步研究。

3.1.2.3 WAM 模式輸出結果

WAM Model cycle 4 之模擬結果輸出資料分為平面二維資料輸出及點位一維資料輸出兩種，其中一維及二維資料輸出主要內容包括示

性波高(H_s)、平均波向(θ_m)、平均週期(T_m)、風引起的摩擦速度(u_*)、風向(θ_w)、譜峰週期(T_p)、風曳力係數及無因次化波浪應力等 8 項，以及湧浪資料(波高、波向及平均週期)、海面波譜及湧浪波譜等次要選項輸出。

模式中關於波浪之積分參數說明如下：

1. 波浪能譜 $E(f,\theta)$之 n 階動差(moment)，M_n

$$M_n = \int f^n E(f,\theta) df \cdot d\theta \quad \text{.....(3.36)}$$

2. 頻率譜 $\bar{E}(f)$為

$$\bar{E}(f) = \int E(f,\theta) d\theta \quad \text{.....(3.37)}$$

3. 示性波高(significant wave height，H_s)為

$$H_s = 4\sqrt{E_0} = 4\sqrt{M_0} \text{ ，其中波浪能量 } E_0 = M_0 \quad \text{.....(3.38)}$$

4. 平均週期(T_m 或 T_{-1})，模式採用-1 階動差計算波浪平均週期即

$$T_m (= T_{-1}) = M_{-1} / M_0 \quad \text{.....(3.39)}$$

5. 平均波向定義為

$$\langle \theta \rangle = \tan^{-1}(SF/CF) \quad \text{.....(3.40)}$$

其中

$$SF = \int \sin\theta \cdot E(f,\theta) df \cdot d\theta \text{ ，} \quad CF = \int \cos\theta \cdot E(f,\theta) df \cdot d\theta \quad \text{.....(3.41)}$$

目前 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式(WAM)對於模擬波浪之波譜頻率數(ML)及波向數目(KL)設定分別為 25 及 24，其中頻率譜之最小頻率為 0.05。頻寬之計算採用對數尺度，即 $\Delta f/f = 1.1$，模擬之波浪頻率範圍為 $f_{max}/f_{min} = (1.1)^{ML-1}$，因此 TaiCOMS 波浪模擬之頻率介於 0.05 ~ 0.4925 之間(或波浪週期約介於 2.0 ~ 20.0 sec 之間。由於波譜頻寬大

小將影響波浪週期及波高之計算結果，而頻率數目及波向數多寡將影響模式模擬作業時間，針對上述波譜參數之設定是否最適於臺灣海域波浪之模擬均有進一步探討之空間。

此外，對於波浪平均週期之計算亦有探討之空間，例如採用一階或二階動差計算波浪平均代表週期(T_1 或 T_2)

$$T_1 = M_0 / M_1 \quad \text{.....(3.42)}$$

$$T_2 = \sqrt{M_0 / M_2} \quad \text{.....(3.43)}$$

目前模式針對譜峰頻率之定義僅由波浪頻率譜 $\bar{E}(f_i)$找出其最大值所在頻率位置定義為譜峰頻率(f_P)，其結果導致譜峰週期輸出結果呈現階梯狀變化，如圖 3.6 所示。針對此現象除了可以利用二次拋物線契合(fit)方法加以改善外，或可利用平均週期(T_m)與譜峰週期(T_P)間之回歸關係由平均週期(T_m)推估譜峰週期(T_P)。

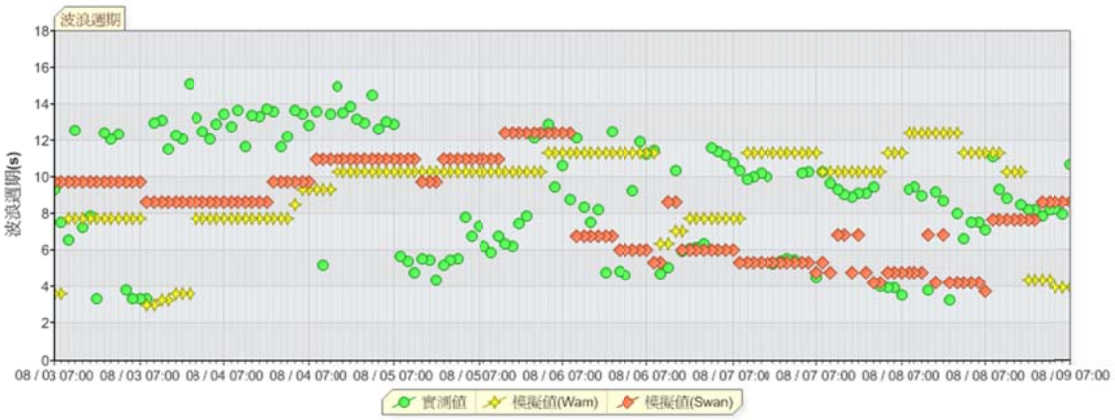


圖 3.6 TaiCOMS 風浪模式波浪譜峰週期輸出結果

由於 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式計算網格大小為 0.2°×0.2°，屬於低解析度之網格，因此，瞭解基隆港與臺北港波浪模擬結果輸出點位與波浪觀測點之間相對位置，如圖 3.7 所示，將有助於模式模擬結果之評估。於圖 3.7 中空白顏色內之格點代表陸地格點，其中臺北港觀測點緊臨陸地格點，故模式選取之輸出代表格點距離觀測點約一個網格間距；基隆港之模式輸出代表格點則與觀測點位相鄰。

對於各港口代表波浪模擬結果之輸出，目前 TaiCOMS 系統均採取鄰近各港口之計算格點模擬結果為其代表波浪，此一作法將可能因計算格點距離港口過遠(如圖 3.7 之臺北港)而導致模式模擬港口代表波浪與實際波浪觀測值產生較大偏差。針對此一問題，本計畫將採用圖 4.4 所示之內插方式計算港口代表波浪，惟各港口計算代表波浪之內插點位仍需經過評估才能決定最適內插位置。

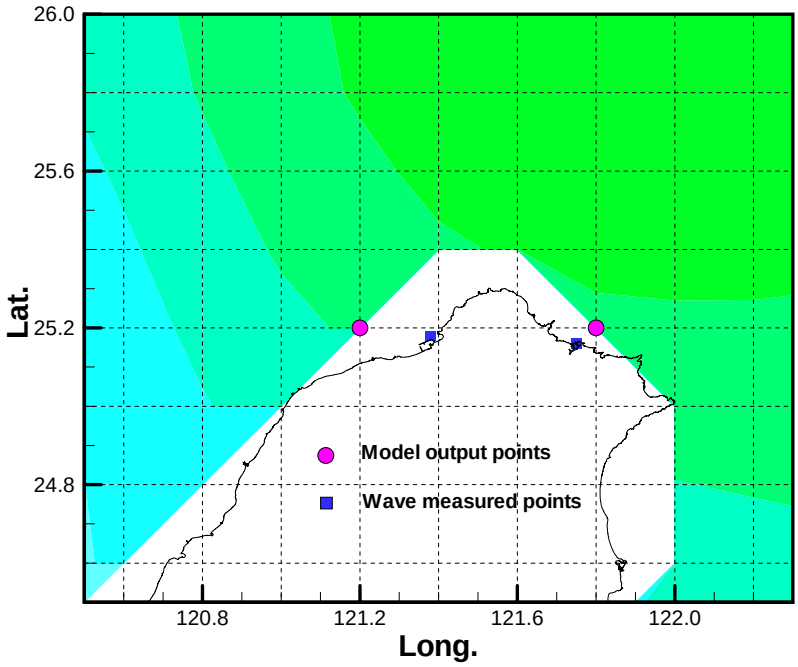


圖 3.7　大尺度西太平洋風浪模式(WAM)基隆港與臺北港模擬結果輸出點位示意圖

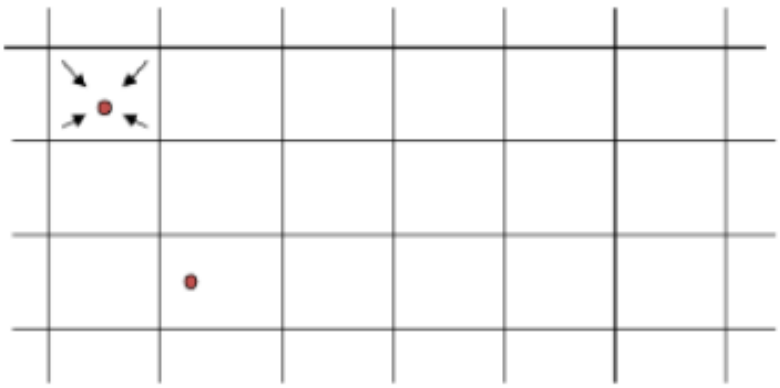


圖 3.8 利用四個網格點計算內插點位代表波浪值之示意圖

3.1.2.4 WAM 模式模擬結果與討論

本年度計畫已就 TaiCOMS 目前使用之 WAM 模式程式進行研究，並針對該程式中部份疑慮之處(如風向及波向角度定義及計算等)以及有關熱起動及模式模擬結果輸出等部份提出程式修正版本。以下文章敘述為與目前 TaiCOMS 系統運作中之程式版本區隔，分別以本文 WAM 模式及 TaiCOMS 系統大尺度(西太平洋風浪)模式稱之。

為瞭解與評估本文 WAM 模式模擬結果之合理性及本文 WAM 模式與目前 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式模擬結果之差異性，本計畫選取中度颱風梅花前後之風場資料(2011 年 7 月 28 日至 8 月 9 日)進行風浪模擬業。其中風場之組成係根據 TaiCOMS 每日作業化系統產生的 RC 風場及 MC 風場資料，取其前 24 小時之風場資料組合而成的。

目前 TaiCOMS 作業化系統採用中央氣象局之 RC 風場資料作為大尺度西太平洋風浪模式之輸入風場，另以 MC 風場資料作為中尺度臺灣周圍海域風浪模式之輸入風場。上述作法係起因於 TaiCOMS 發展之初，大尺度西太平洋風浪模式規劃之模擬範圍遠大於 MC 風場範圍，而必須採用解析度較低之RC風場作為西太平洋風浪模式之輸入條件。惟 TaiCOMS 發展至今，大尺度西太平洋風浪模式模擬範圍已修正至與 MC 風場範圍相符，因此本年度擬將大尺度西太平洋風浪模式之風場資料修正為 MC 風場，藉由較高解析度(或較準確)之風場資料作為本計畫提升或精進風浪模擬技術改善方案之一。

3.2.2 RC 風場與 MC 風場比較

本計畫風浪模擬之風場資料係根據TaiCOMS每日作業化系統產生的 RC 風場及 MC 風場資料，取其前 24 小時之風場資料組合而成的。亦即上述中度颱風梅花前後之風場資料係由 2011 年 7 月 29 日至 8 月 10 日系統作業化產生的 RC 風場及 MC 風場資料組合而成。由表 4-1 中央氣象局大氣模式 RC 及 MC 風場格網資訊得知，RC 風場格網解析

度低於本計畫西太平洋風浪模式之網格解析度，因此採用 RC 風場為模式輸入之風場資料，必須經由內插方式產生模式計算格點之風場資料；而 MC 風場格網解析度高於本計畫大尺度風浪模式之網格解析度，因此採用 MC 風場為本計畫大尺度風浪模式之輸入風場，可降低風場內插所產生的模擬誤差。

圖 3.9 及圖 3.10 所示分別為本計畫風浪模式評估採用之 RC 及 MC 風場資料，圖中所示之風場資料均為中央氣象局所發布預報風場資料之第一組資料，屬於已經校正後之追算風場資料。整體而言，中央氣象局所發布之追算 RC 及 MC 風場資料大致上相近似，而 MC 風場資料因解析度較高，故對臺灣周圍海域風場模擬結果應較佳，尤其臺灣西部海域之風速及風向均較為顯著。此外，在近颱風中心附近處 MC 風場呈現之風速值亦較高於 RC 風場之風速。

針對上述風場特性說明如下：

1. 7 月 28 日風場顯示在菲律賓西側海域有一熱帶低氣壓氣旋風場向西移動，此時梅花颱風中心位置仍在本計畫大尺度模擬範圍之外；

2. 7 月 29 日梅花颱風中心位置約在本計畫大尺度模擬範圍之右下角落，此時模式模擬範圍內出現兩個低壓氣旋風場，其中在臺灣西南方向之低壓氣旋風場因接近陸地而呈現減弱之趨勢；

3. 7 月 31 日之後模式模擬範圍內風場主要受到梅花颱風之低壓氣旋風場影響，此時梅花颱風行進路徑約為沿著大尺度模擬範圍之東側邊界向北；

4. 8 月 6 日梅花颱風中心位置約臺灣東北部海域，移動方大約為北北西方向。

有關梅花颱風行進之路徑可參考中央氣象局發布之梅花颱風路徑圖，如圖 4.7 所示。

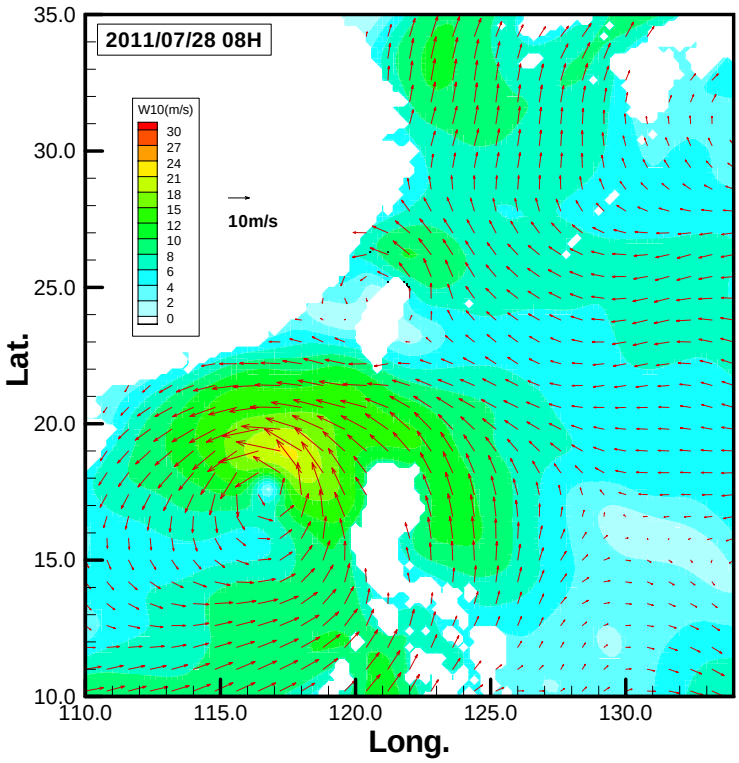


圖 3.9 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

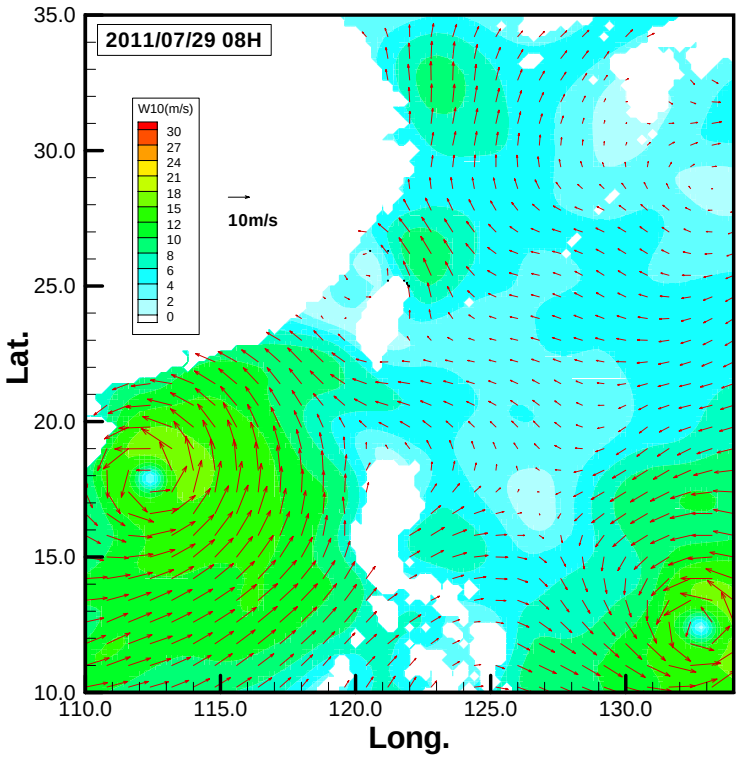


圖 3.9 (續 1)西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

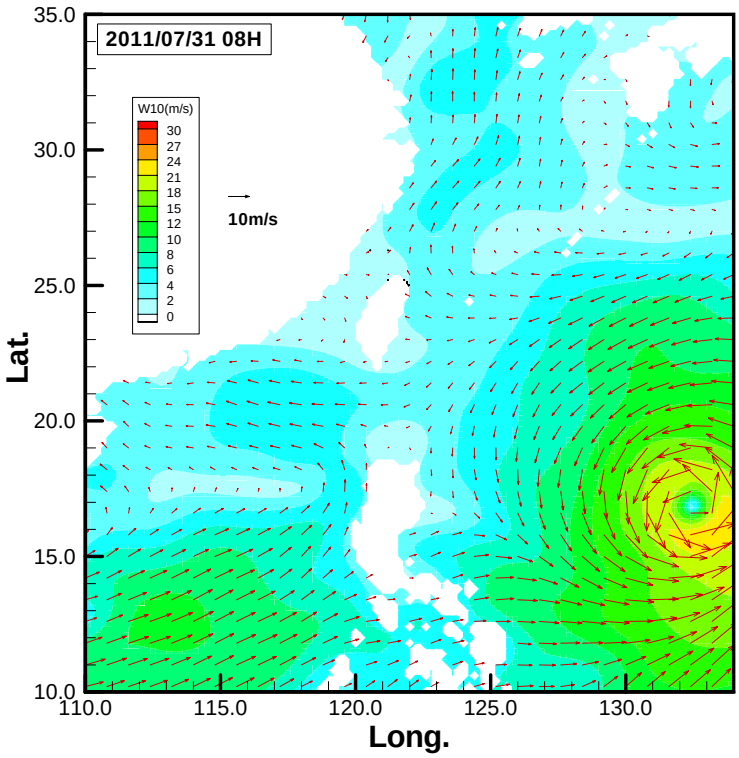


圖 3.9(續 2) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

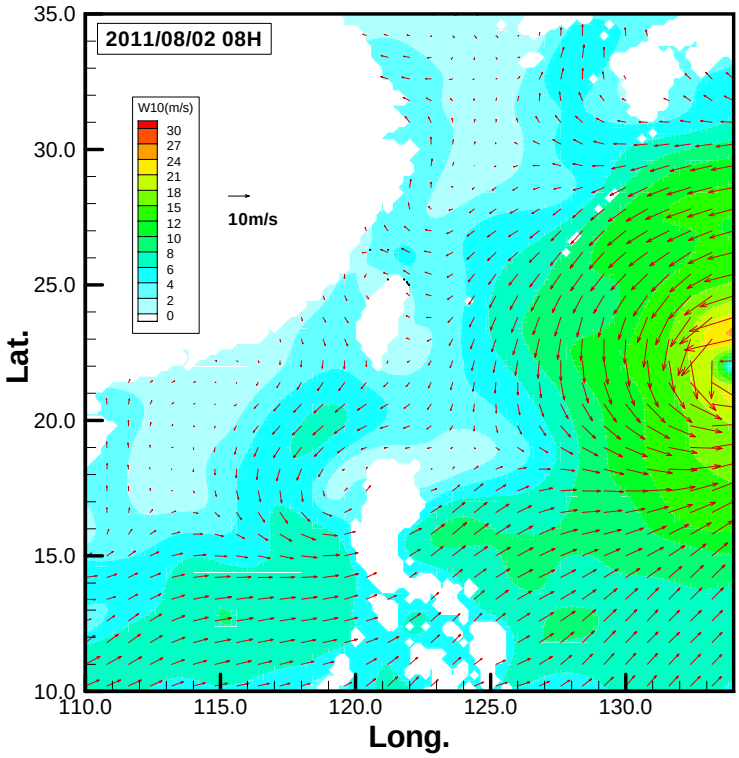


圖 3.9(續 3) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

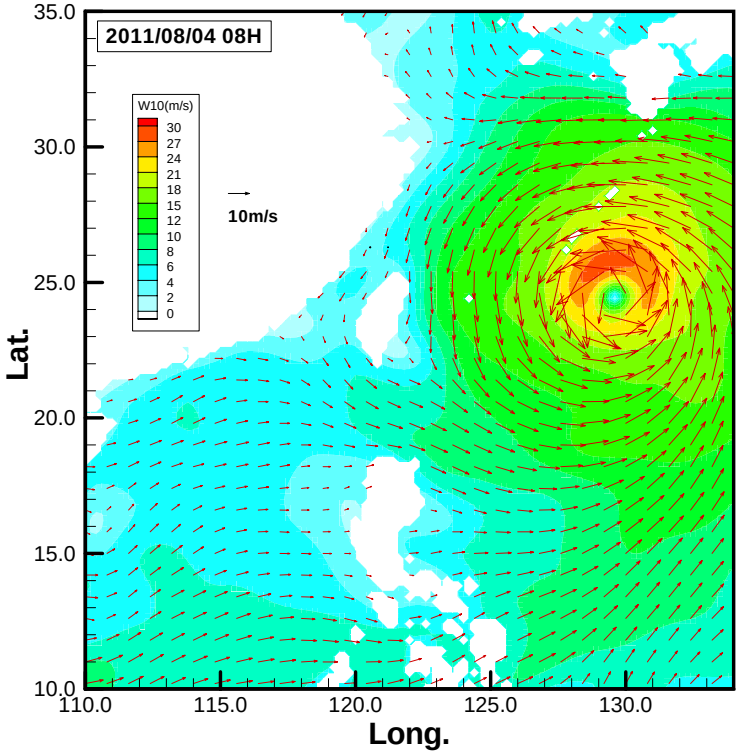


圖 3.9(續 4) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

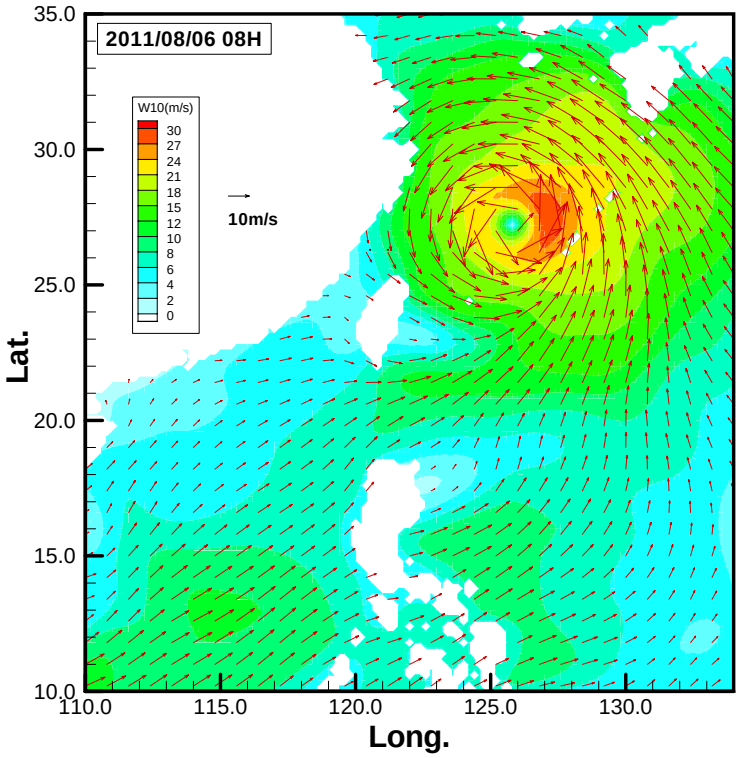


圖 3.9(續 5) 西太平洋風浪模式輸入之 RC 風場向量及風速分布圖

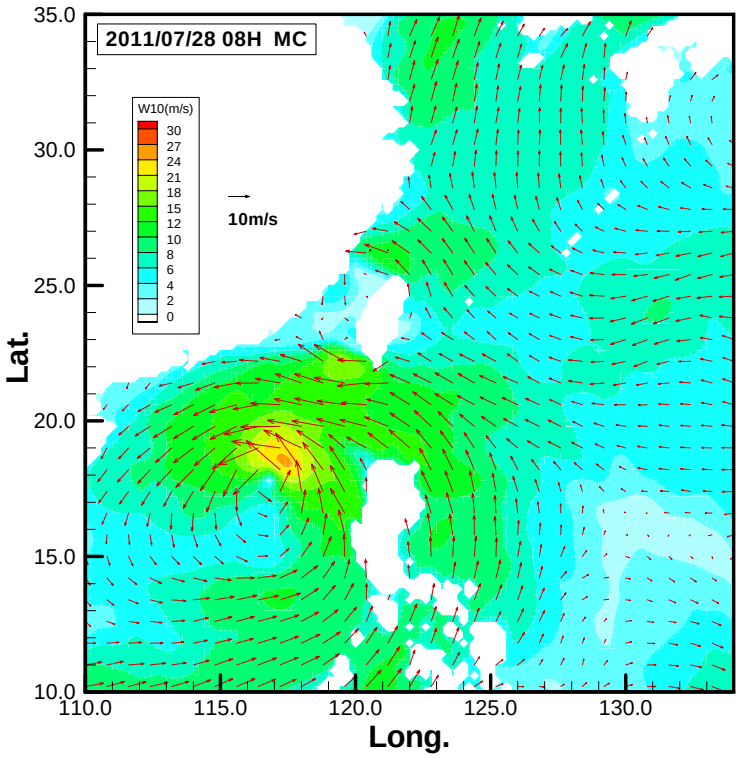


圖 3.10 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

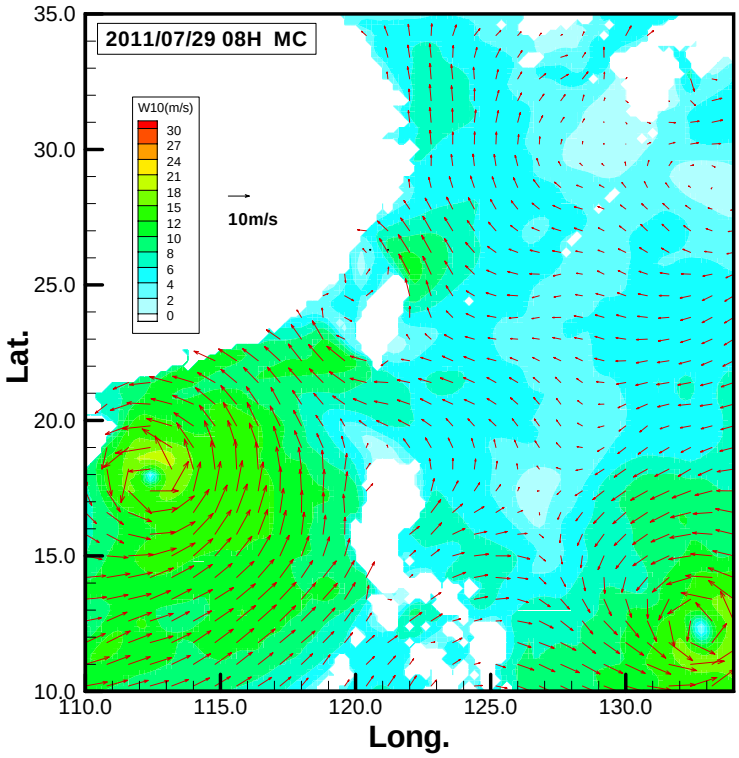


圖 3.10(續 1) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

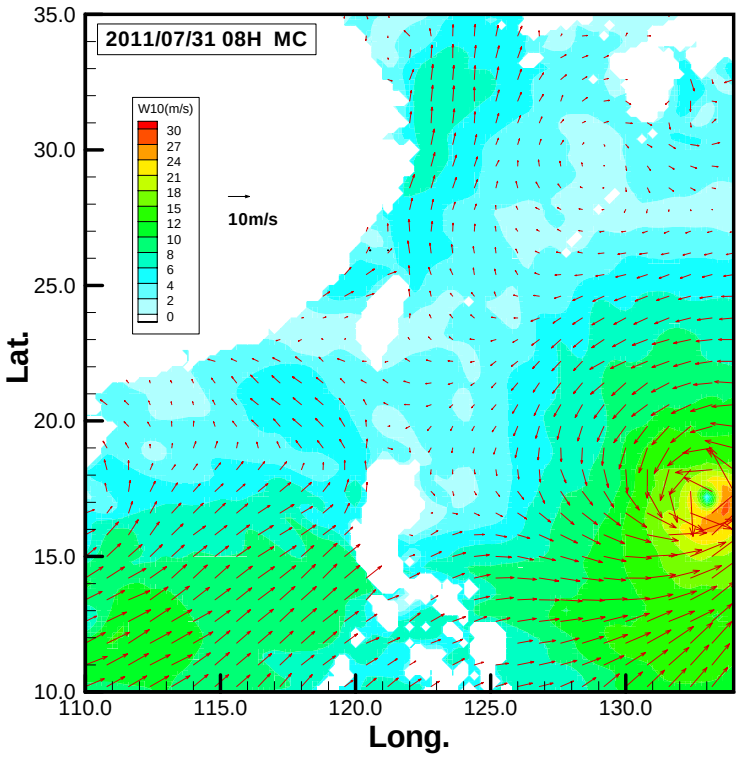


圖 3.10(續 2) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

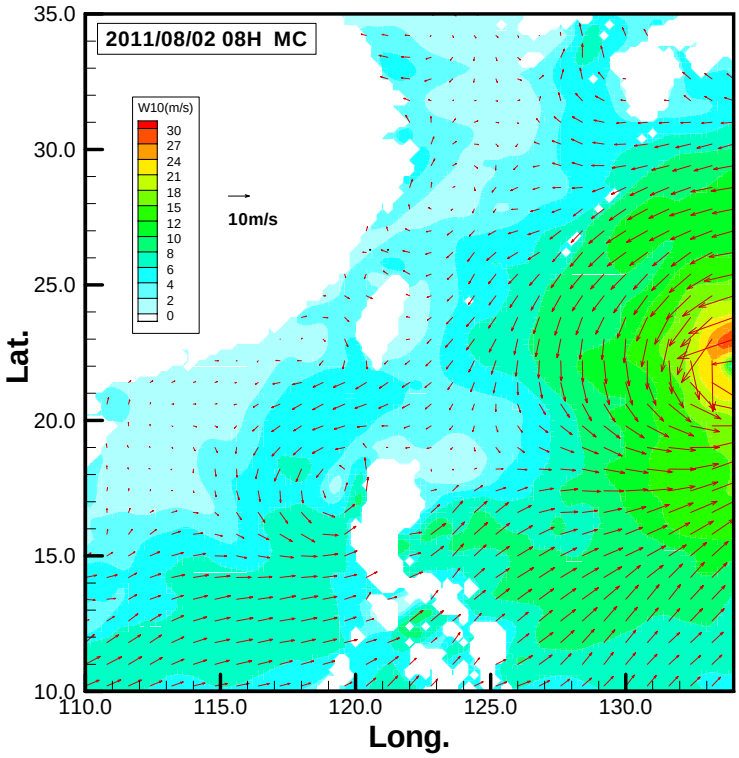


圖 3.10(續 3) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

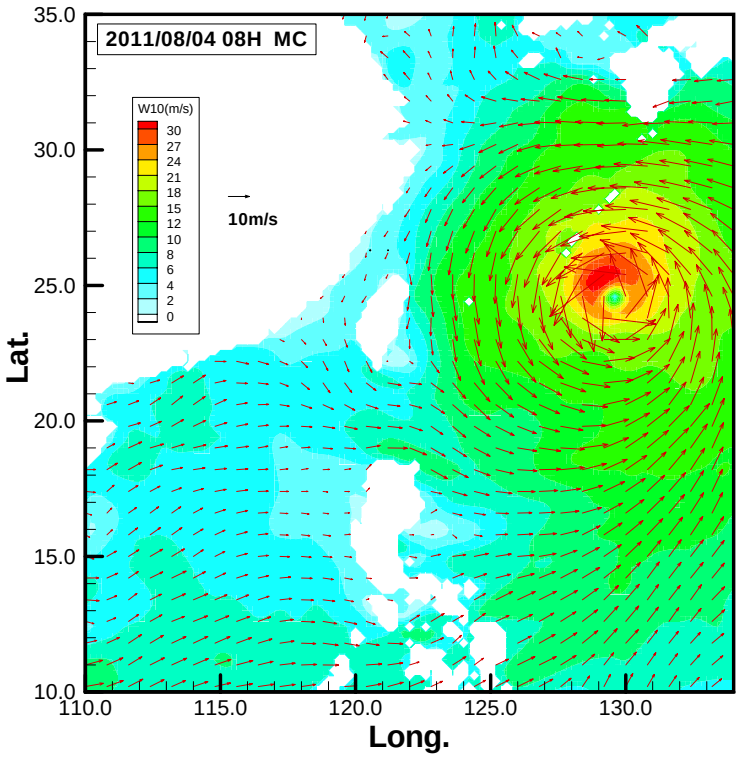


圖 3.10(續 4) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

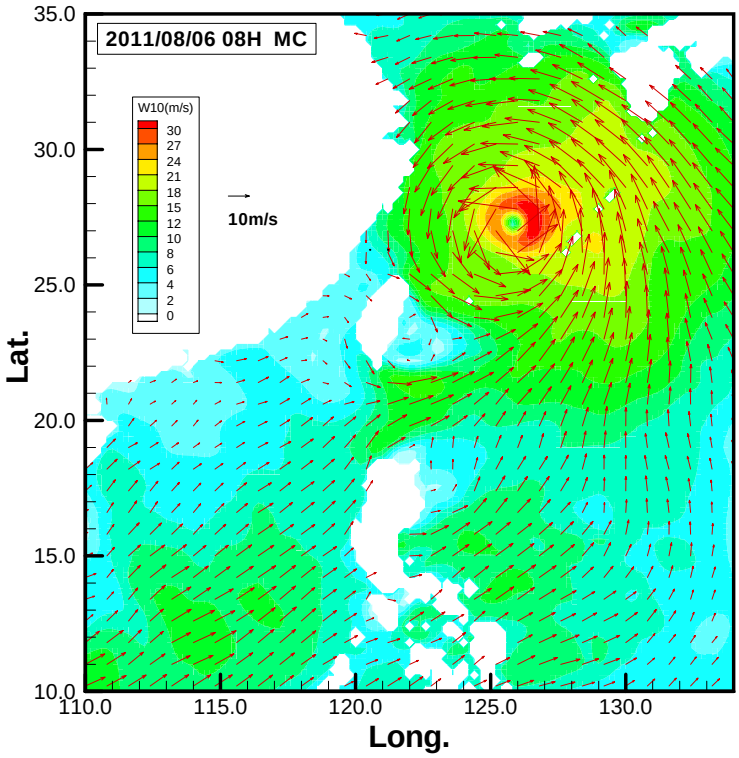


圖 3.10(續 5) 西太平洋風浪模式輸入之 MC 風場向量及風速分布圖

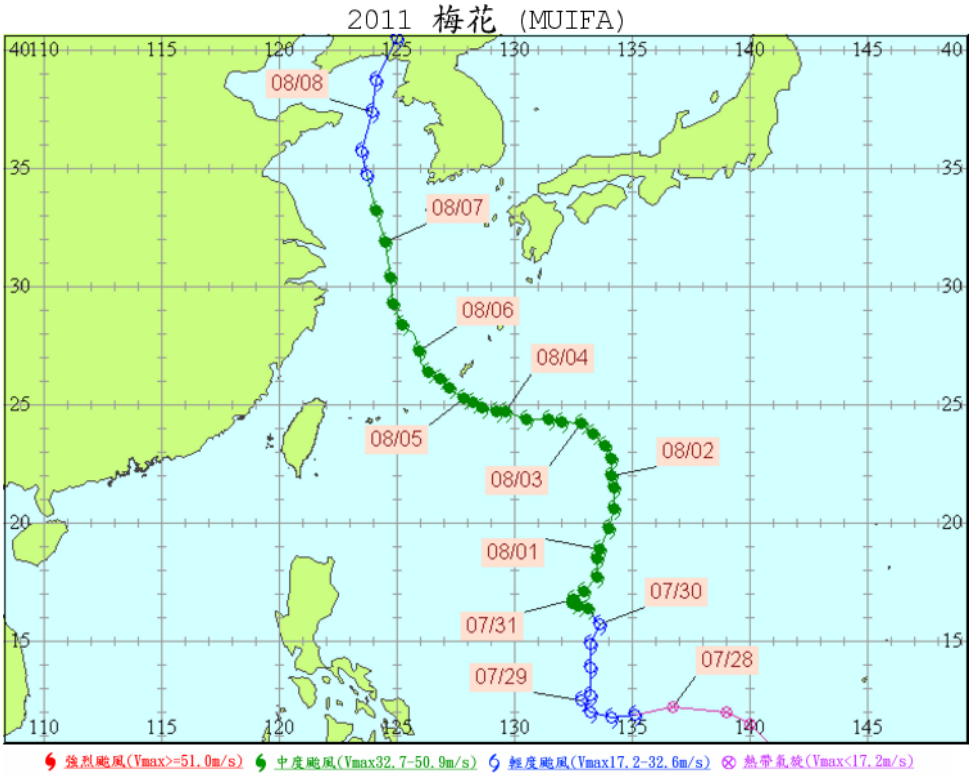


圖 3.11 中央氣象局發布之梅花(MUIFA)颱風路徑圖

3.2.3 RC 風場與 MC 風場波浪場模擬結果

本節將針對上述 RC 風場與 MC 風場以本文修正模式測試模擬大尺度(即西太平洋風浪模式模擬範圍)之風浪場，並檢討採用 RC 風場或 MC 風場模擬波浪場時二者之差異性。有關模式模擬條件簡述如下：

1. 考慮深水波情況，

2. 模式之初始條件採用 JONSWAP 波譜參數計算格網點之初始波譜條件，並假設初始波向(波浪傳播方向)為 0 度(向北)。

模式給定之波譜參數分別為：譜峰頻率(f_p)為 0.2、α 為 0.018、γ 為 3.0、σ_a 及 σ_b 分別為 0.07 及 0.09、吹風距離為 0.5 倍網格間距(約 11.111 km)。有關 JONSWAP 波譜之計算如下：

$$S(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^b \quad \text{..... (4-9)}$$

其中

$$b = \exp\left[-\frac{f - f_p}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad \text{..... (4-10)}$$

當 $f < f_p$ 時 $\sigma = \sigma_a$ ；當 $f > f_p$ 時 $\sigma = \sigma_b$ 。

本計畫波浪場模擬結果之輸出時間間距為 1 小時，模擬模擬結果經後處理模組 PGRID 產生包括風場資料在內之二維網格資料。

1. 初始波浪場模擬結果(模擬時間 1 小時)

為瞭解模式給定之初始條件之特性，本計畫以 RC 風場為例，繪出模式波浪場模擬時間 1 小時之輸出結果，如圖 3.12.所示，其中圖 3.12.a 所示為初始波浪場模擬 1 小時後之波高分布與 RC 風場之向量圖，圖 3.12.b 為波高分布與波浪傳播方向之向量圖，圖 3.12.c 為波浪平均週期之分布與波浪傳播方向之向量圖。結果顯示當波浪場由假設之均勻波場條件開始模擬受輸入風場影響之波浪場時，模式模擬結果必需經歷一段所謂冷啟動之發展階段，才能得到合理的風浪場模擬結果。此外，由圖 3.13a 所示得知，模式給定之初始波高值(或波浪能量)通常可能偏大，因此在模擬波浪發展階段易呈現出鄰近陸地之背風面海域波高有明顯衰減現象；此外，圖中在臺灣南端與菲律賓之間海域，波高減衰現象應是受到其下方低壓氣旋風場影響所致；其原因應為該低壓氣旋所產生的風場之風向與模式給定之初始波向間夾角大於 90 度之故，此時風的能量不僅無法轉換成波浪能量,反而成為抑制波浪發長之外力。圖 3.12.c 所示平均波向仍維持初始假設之情況(即波向朝北)，代表在冷啟動階段波向受風場影響改變是相當緩慢而不顯著，因此，以假設均勻波譜能量為初始條件之冷啟動階段必需經歷一段模擬時間才能達到完全發達之波浪場階段。

2. 模擬時間 48 小時之結果

由於模式所輸入之 RC 風場屬於非穩態之風場，故不易直接由海面波浪場模擬結果判斷是否已達到完全發展階段，因此本計畫假設模式模擬時間達 48 小時後之海面波浪模擬結果可視為已達到完全發展階段，如圖 3.13 所示。圖 3.13 所示為 RC 風場模擬時間 48 小時之模擬結果，其中圖 3.13a 為波高分布與風場之向量圖，圖 3.13b 為波高分布與波向之向量圖，圖 3.13c 為平均週期分布與波浪傳播方向之向量圖。此時波高分布以鄰近低壓氣旋之迎風面附近海域波高較大，背風面海域波高值較低；主要波浪傳播方向亦與風向一致，臺灣東部海域波浪來向為西南向，西部海域波浪來向為南向。此外，由於波浪模擬結果為深水波浪，因此模式模擬之波浪傳播方向並不會受地形水深淺化影響而呈現出折射現象，故模式波向模擬結果會與實際近岸波向不符。在平均週期方面，臺灣周圍海域波浪週期約 5~6 秒之間，西南海域波浪週期較大係受到西南海域低壓氣旋影響所致。整體而言，本文 WAM 模式之波浪場模擬結果與物理機制相符，故判斷經本計畫修正後的程式應具正確性。

3. 本文模式與 TaiCOMS 大尺度模式模擬結果之比較

本文以梅花颱風侵臺期間同一時間波浪場模擬結果為例說明，本文 WAM 模式與目前運作中 TaiCOMS 大尺度西太平洋風浪模式在波浪場模擬結果上二者之差異性。

圖 3.14a,b 所示分別為本文 WAM 模式與 TaiCOMS 大尺度風浪模式以 RC 風場模擬之波高分佈情況，結果顯示本文 WAM 模式模擬結果之波高最大值分布集中在颱風中心之上半部，而目前 TaiCOMS 模擬結果之波高最大值分布則集中在颱風中心之右半部。由於在北半球低氣壓氣旋所形成颱風風場最大風速分布通常在颱風中心上半部之迎風面，如圖 3.14a 中風速向量分布所示，因此，本文模式模擬之波高分布結果應較目前 TaiCOMS 之模擬結果為正確。圖 3.15a,b 所示分別為本文模式及目前 TaiCOMS 模式對波浪場平均週期模擬結果之比較，其中本文

平均週期模擬結果可顯示出波浪週期受到風速大小之影響，而目前TaiCOMS 模式之模擬結果無法呈現波浪週期與風速大小之關係，且在TaiCOMS 模式模擬結果中週期較大之波浪分布區域似乎不合理。圖3.16a,b 所示分別本文模式及目前 TaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪場之平均波向(指來向)分布情況，結果顯示二者波向雖然均圍繞颱風中心向外擴散分布，但整體而言本文波向模擬結果亦較目前 TaiCOMS 模式之模擬結果為佳。

4. RC 風場及 MC 風場之波浪模擬結果比較

為瞭解採用 RC 風場或 MC 風場模擬大尺度模式之風浪，對於波浪模擬結果之影響，乃以本文 WAM 模式分別以 RC 風場及 MC 風場為輸入條件模擬大尺度模式之風浪，模擬結果如圖 3.17 及圖 3.18 所示。圖 3.17a,b 所示分別為 RC 風場模擬結果在臺灣周圍海域之波高分布及平均週期分布之情況，圖 3.18a,b 所示為 MC 風場模擬結果在臺灣周圍海域之波高分布及平均週期分布之情況。整體而言，本文模式以 RC 風場或 MC 風場模擬大尺度模擬範圍之波浪，模擬結果之波向、波高及平均週期分布趨勢是相當近似的，僅在模擬結果之數值大小上略有差異。

為進一步比較 RC 風場及 MC 風場對波浪場模擬結果之影響，本計畫選取基隆港與臺北港波浪觀測資料與 RC 風場、MC 風場之波浪模擬結果比較，如圖 3.19 至圖 3.21 所示。圖 3.19 所示分別為基隆港與臺北港波浪觀測之示性波高(H_s)與模式模擬結果之比較，波高模擬結果顯示：對臺北港波浪模擬結果而言，MC 風場模擬之波高大小變化之趨勢與波高觀測值大小變化之趨勢較為一致；對基隆港波浪模擬結果而言，RC 風場及 MC 風場模擬之波高值均略大於波浪觀測結果，當颱風中心接近臺灣東北部海域時模式波高模擬結果有顯著高於波浪觀測值，其原因可能模式網格解析度太低無法反應基隆港外海及海岸地貌對波浪之影響所致。整體而言，MC 風場波高模擬結果略大於 RC 風場模擬之波高，對於部份波高微小變化上 MC 風場波高模擬結果較易顯現。

圖 3.20 所示分別為基隆港與臺北港波浪觀測之平均週期(T_{mean})與模式模擬結果之比較，結果顯示：本文模式平均週期之模擬結果均大於基隆港與臺北港波浪觀測之平均週期(T_{mean})，此係由於模式之平均週期(T_{-1})定義與波浪觀測資料之平均週期(T_2)定義不一致之緣故。此外，由模式模擬之週期變化與波浪觀測資料之週期變化趨上得知，採用 MC 風場模擬風浪其週期變化趨勢與波浪觀測資料較接近。圖 3.21 所示分別為基隆港與臺北港波浪觀測之平均波向與模式模擬結果之比較，結果顯示本文模式波向模擬結果均與波浪觀測之波向有較大的誤差，其原因除了受到大尺度網格解析度較低之影響外，亦與模式模擬結果為深水波浪不受地形影響之故。此外，圖 3.22 所示為本計畫模式波浪平均週期採用二階動差及負一階動差分別定義之波浪平均週期(T_2 及 T_{-1})與波浪觀測資料之平均週期(T_{mean})之比較結果，顯示各港口波浪觀測資料之平均週期與模式波浪模擬結果由二階動差所定義的平均週期(T_2)相當接近。

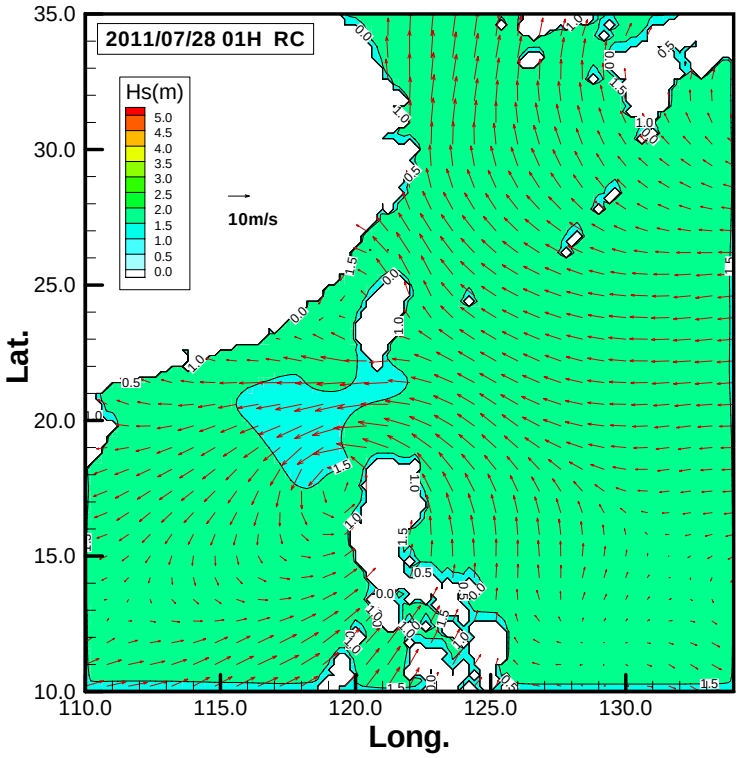


圖 3.12.a　模式模擬時間 1 小時之波高分布及 RC 風場向量圖

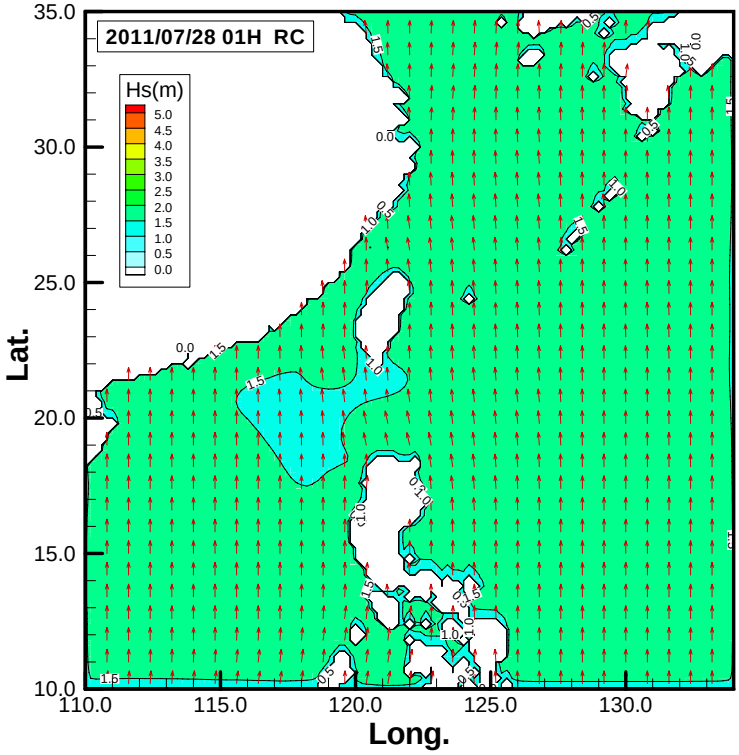


圖 3.12.b　模式模擬時間 1 小時之波高分布及波向之向量圖

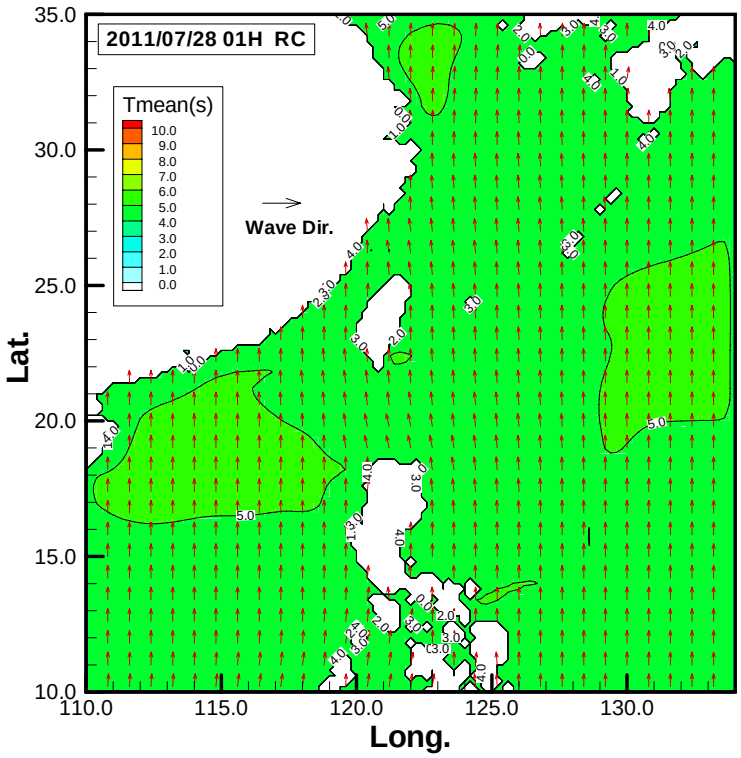


圖 3.12.c　模式模擬時間 1 小時之平均週期分布及波向之向量圖

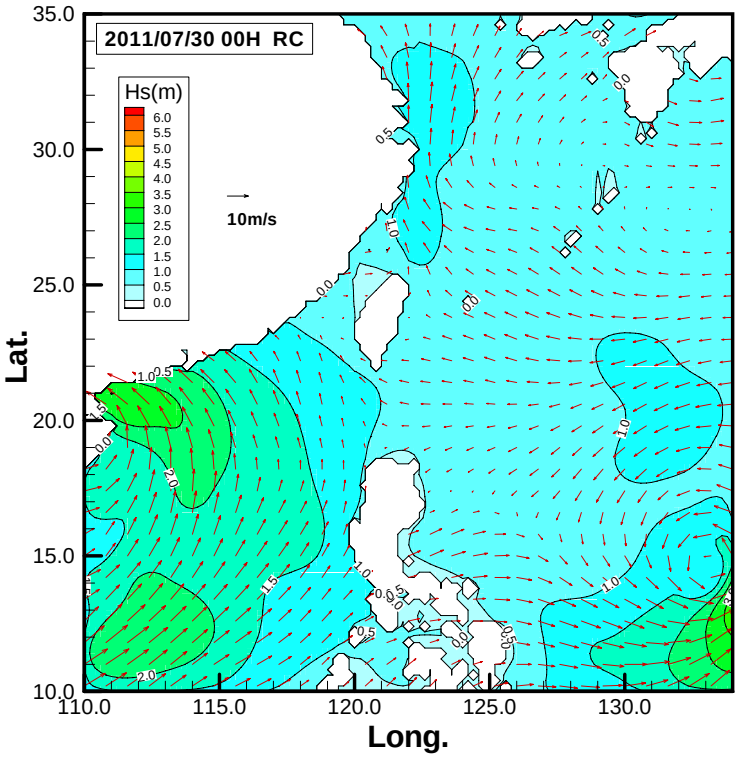


圖 3.13a　模式模擬時間 48 小時之波高分布及 RC 風場向量圖

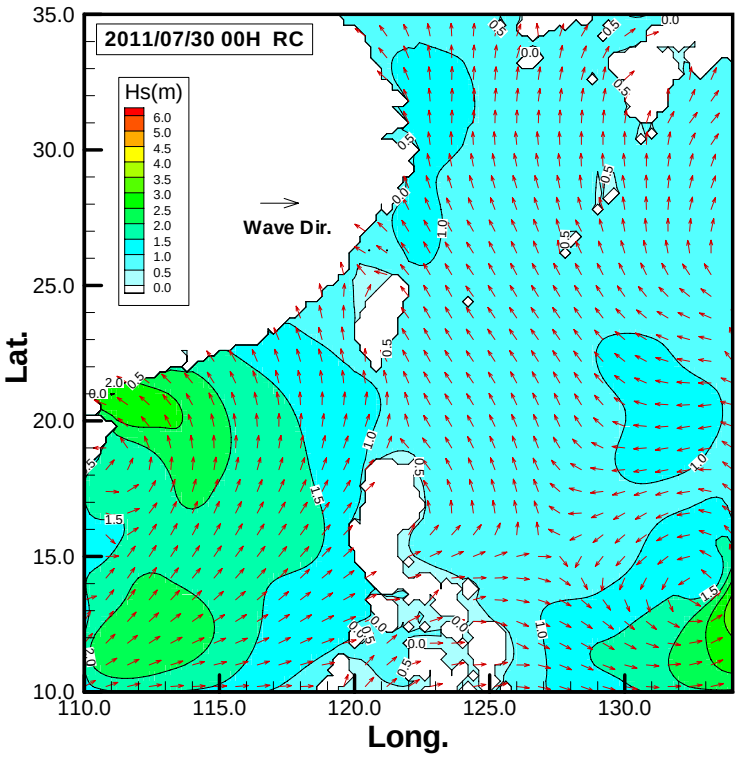


圖 3.13b　模式模擬時間 48 小時之波高分布及波向之向量圖

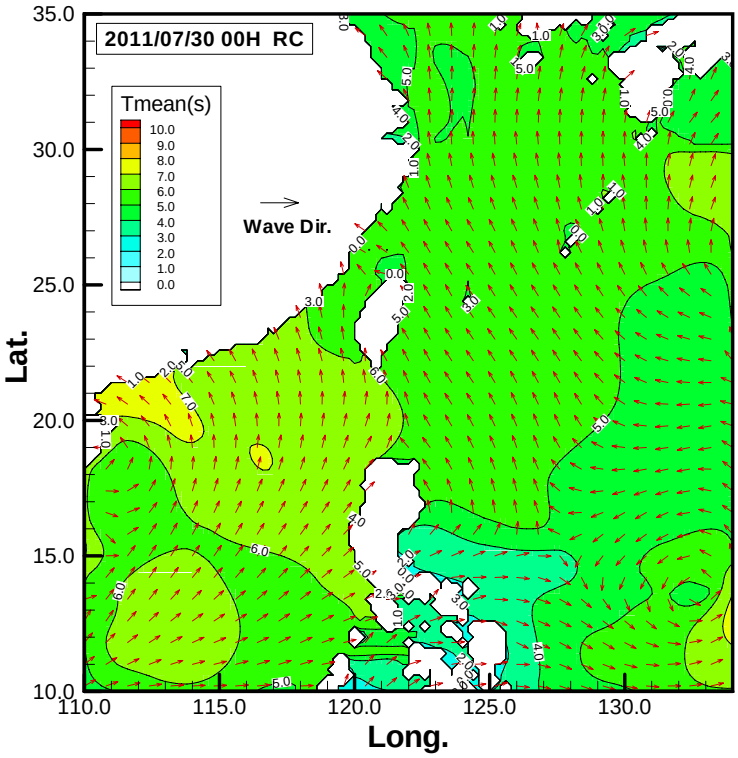


圖 3.13c　模式模擬時間 48 小時之平均週期分布及波向之向量圖

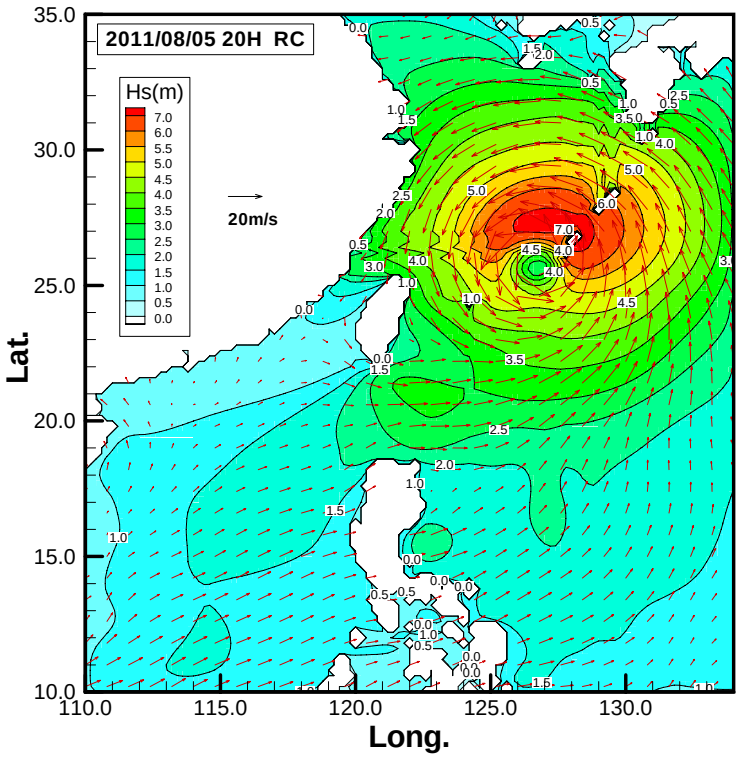


圖 3.14a　本文模式以 RC 風場模擬波浪之波高分布及風速向量圖

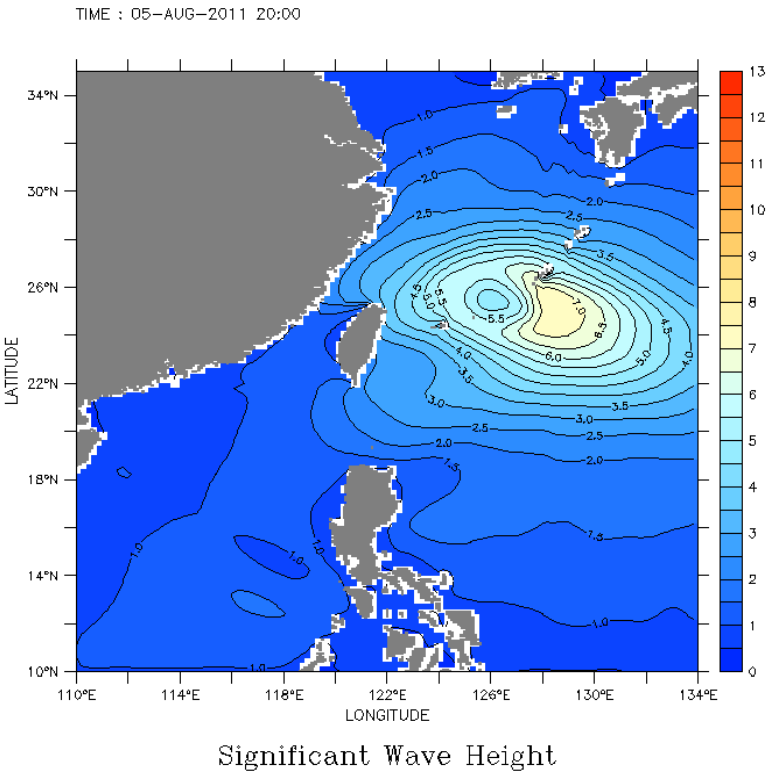


圖 3.14b　TaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之波高分布圖

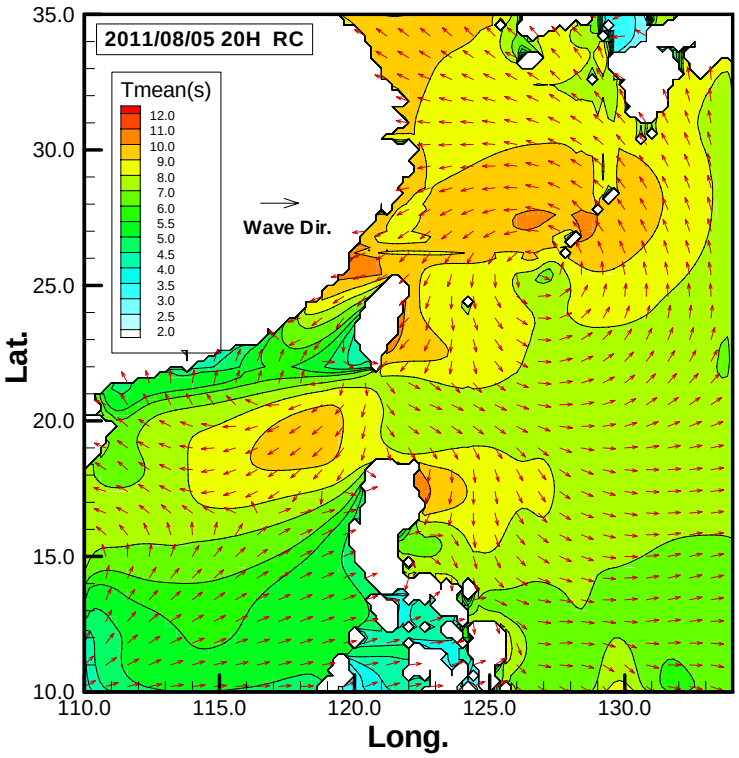


圖 3.15a　本文模式以 RC 風場模擬波浪之平均週期分布及波向向量圖

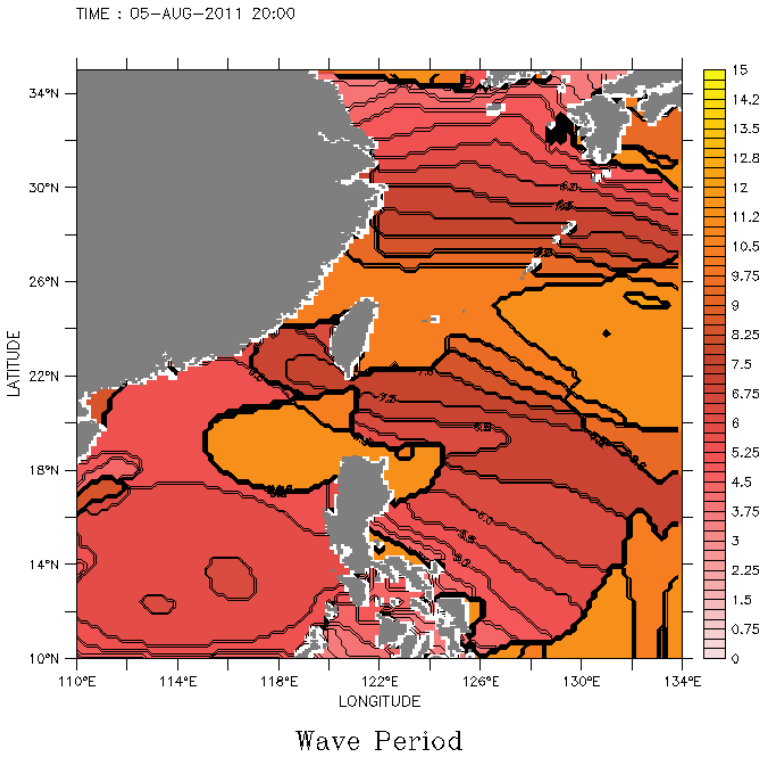


圖 3.15b　TaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之平均週期分布圖

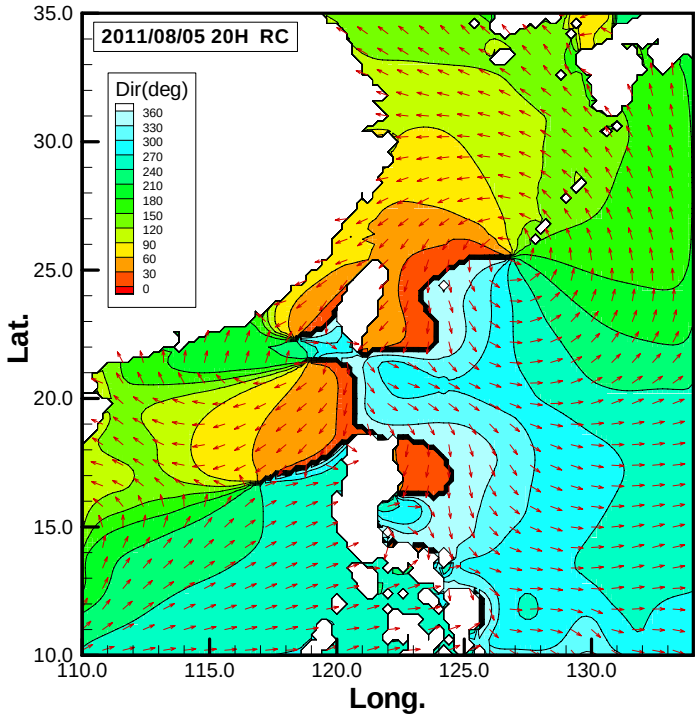


圖 3.16a　本文模式以 RC 風場模擬波浪場之平均波向(來向)分布及波向(去向)之向量圖

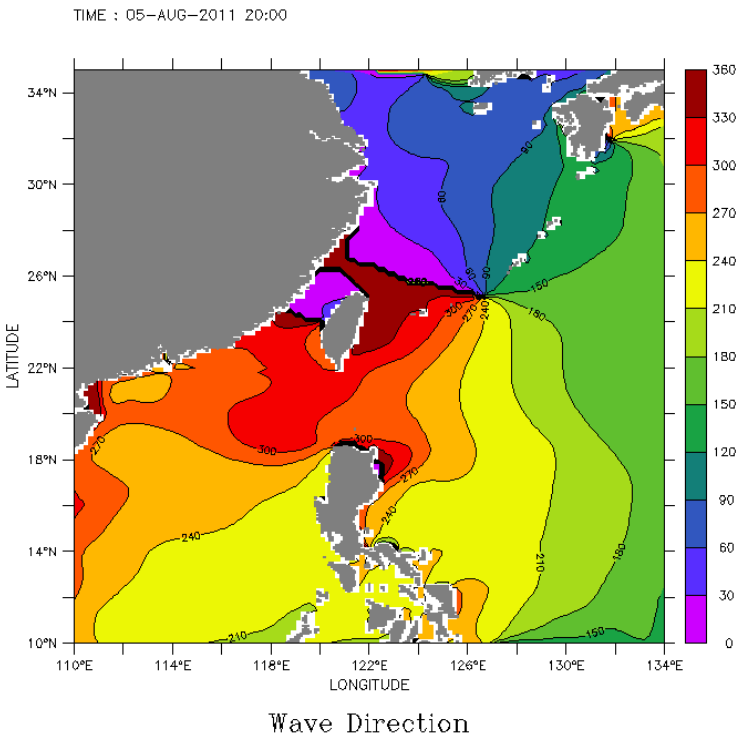


圖 3.16b　TaiCOMS 模式以 RC 風場模擬波浪之平均波向(來向)分布圖

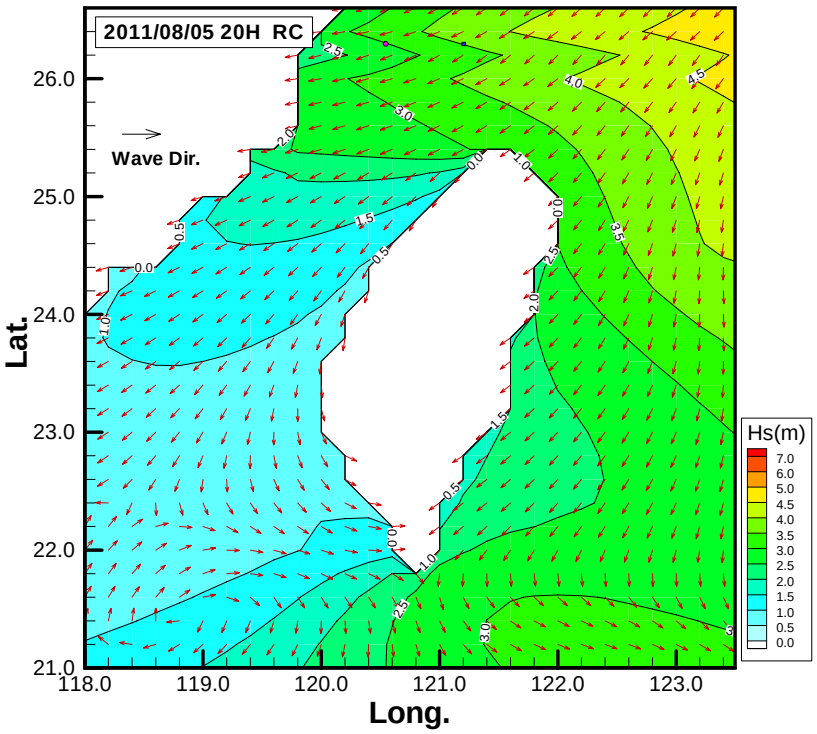


圖 3.17a　RC 風場模擬結果之波高分布及波向向量圖

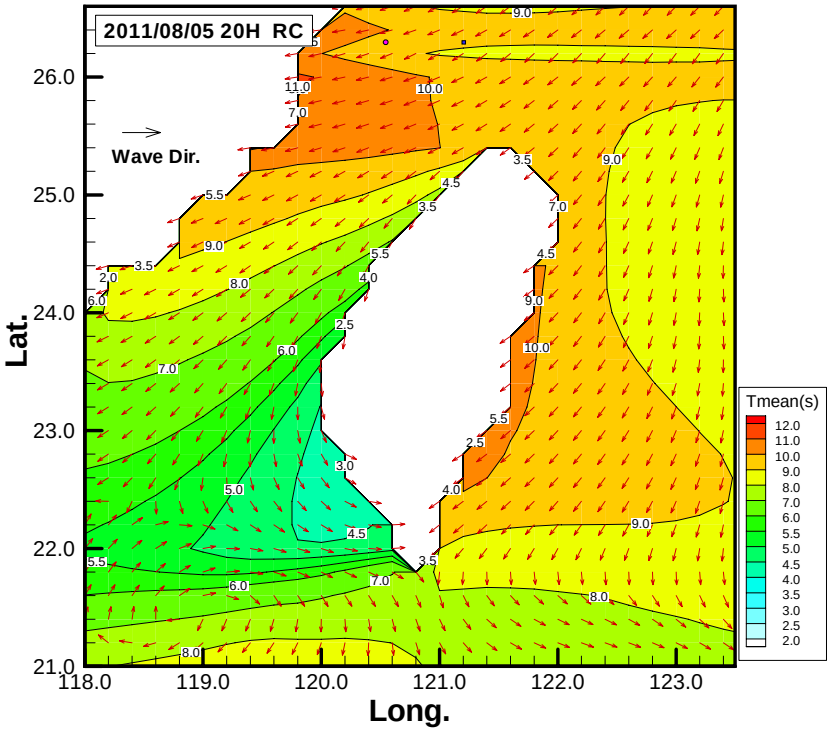


圖 3.17b　RC 風場模擬結果之平均周期分布及波向向量圖

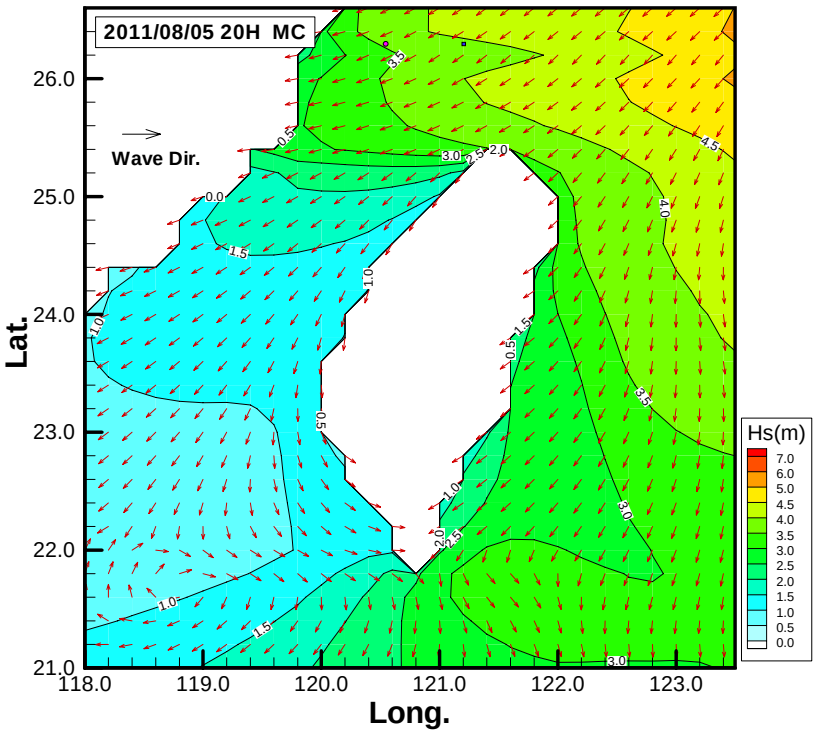


圖 3.18a　MC 風場模擬結果之波高分布及波向向量圖

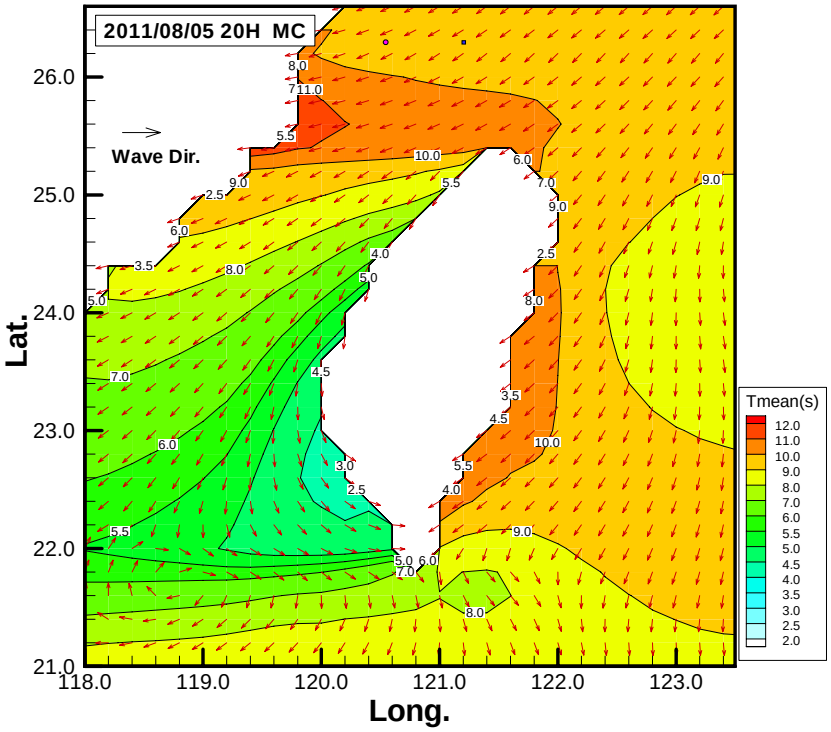


圖 3.18b　MC 風場模擬結果之平均周期分布及波向向量圖

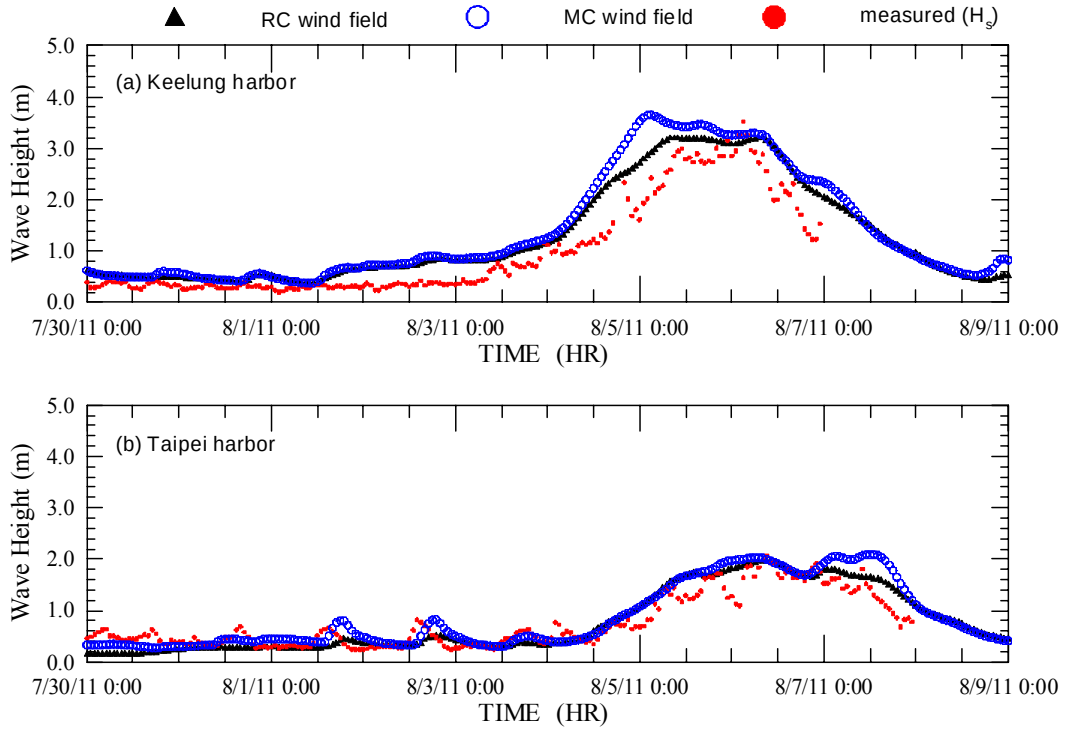


圖 3.19　基隆港與臺北港波浪觀測資料之示性波高(H_s)與模式 RC 風場及 MC 風場波高模擬結果之比較

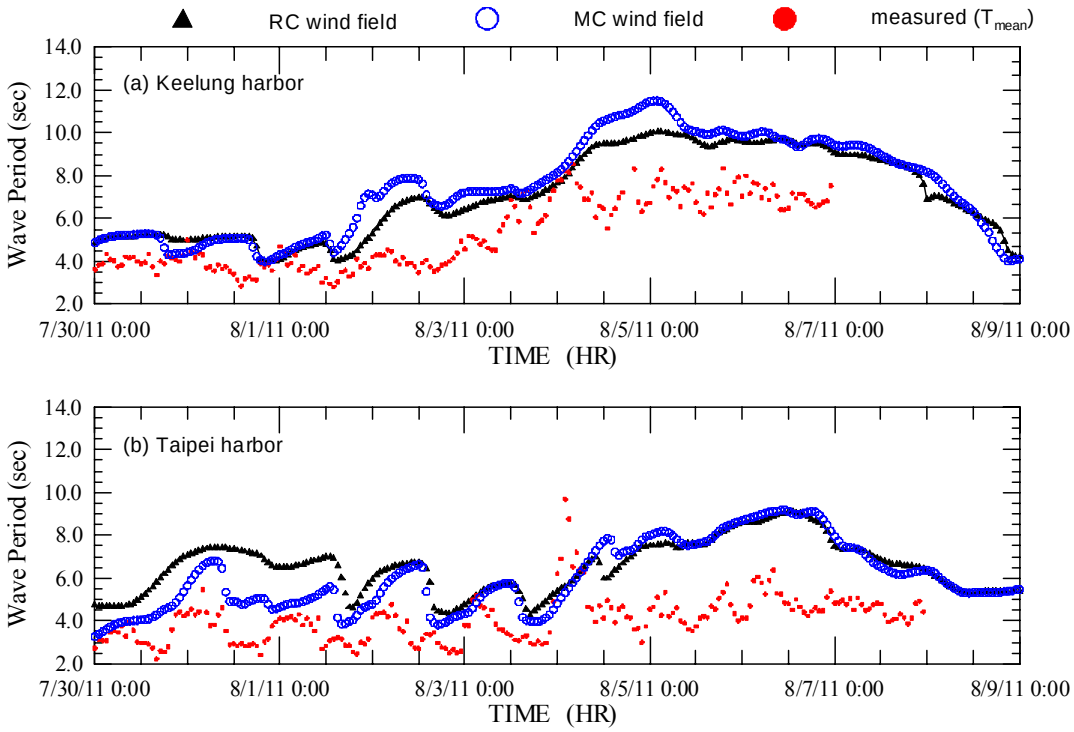


圖 3.20　基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均週期與模式 RC 風場及 MC 風場波浪平均週期模擬結果之比較

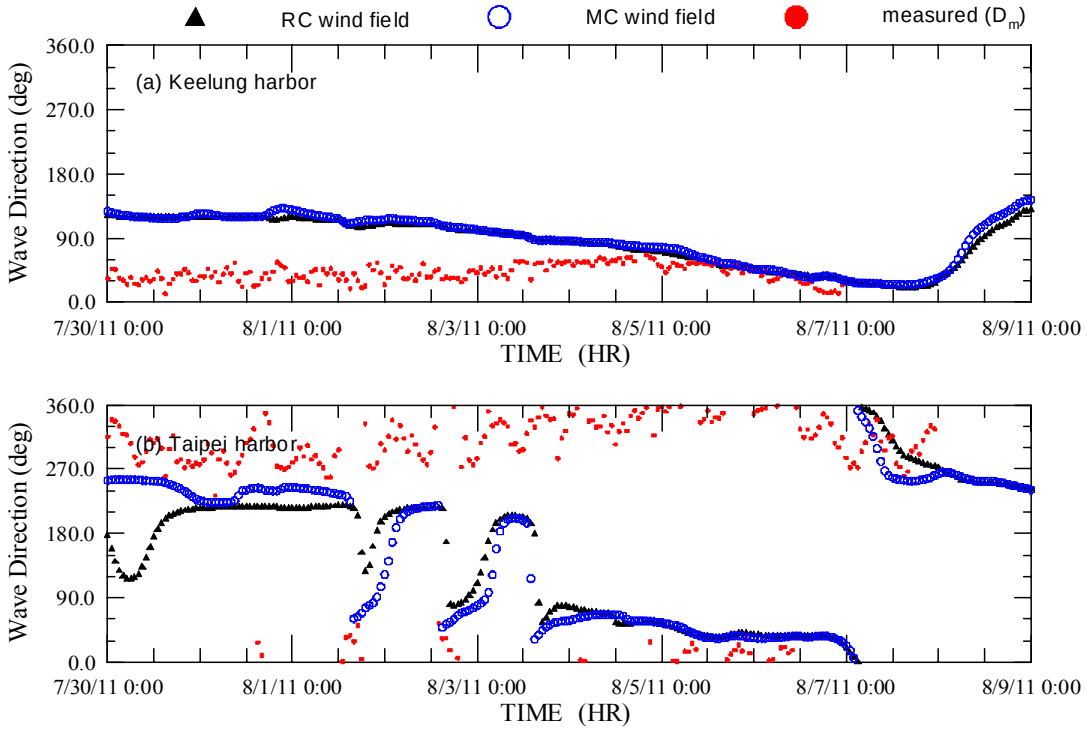


圖 3.21　基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均波向與模式 RC 風場及 MC 風場波向模擬結果之比較

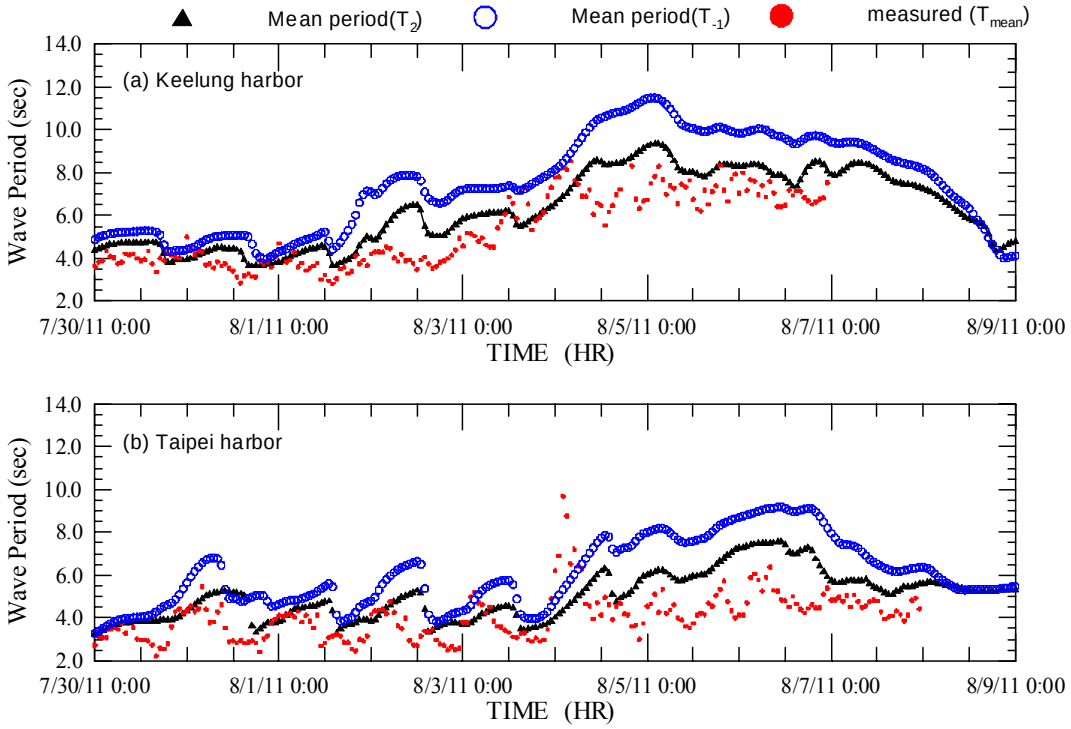


圖 3.22　基隆港與臺北港波浪觀測資料之平均週期與模式模擬之波浪平均週期 T_2 及 T_{-1} 之比較

3.2.4 中尺度臺灣周圍海域模擬範圍之檢討

自從兩岸開放離島小三通之後，離島航運之經濟價值更顯重要，因此離島船舶航程之安全將是交通部未來議題之一。有鑑於目前TaiCOMS 模擬範圍並未含蓋金門與馬祖等離島地區，因此本年度先針對 TaiCOMS 中尺度臺灣周圍海域風浪模式之模擬範圍進行檢討，測試將金門與馬祖等離島地區納入模式模擬範圍後之作業化流程，以因應港研中心未來可能之需求。

目前TaiCOMS在風浪模擬範圍上分為大尺度西太平洋風浪模擬範圍及中尺臺灣周圍海域風浪模擬範圍，如圖 3.23 所示，其中中尺度臺灣周圍海域風浪模擬範圍為 119°E~123°E 及 21°N~26°N，如圖 3.24 所示，並未含蓋金門及馬祖等離島地區。因此本計畫如欲將金門與馬祖等離島地區風浪預報增列為 TaiCOMS 每日作業化風浪模擬之工作，則需將目前中尺度臺灣周圍海域風浪模式之模擬範圍向西延伸 2 個經度(2°)與往北增加 1 個緯度(1°)，亦即修正之中尺度風浪模擬範圍為東經 117°E~123°E 及北緯 21°N~27°N 之海域，如圖 3.25 所示。

為因應本計畫中尺度風浪模式模擬範圍擴大後，數值計算網格之地形水深資料需要重新建置，本計畫將對目前 TaiCOMS 各風浪模式之地形水深資料進行更新與檢討。由於目前 TaiCOMS 大尺度及中尺度風浪模式模擬範圍內地形水深資料係依據美國國家地球物理資料中心(National Geophysical Data Center, NGDC)公布的全球 2 弧分格網數值地形資料(Etopo2)建置的，如圖 3.24 所示。為提升模式地形水深之精確性，本計畫乃採用 NGDC 公布之全球 1 弧分格網數值地形資料(Etopo1)，建置本計畫擴大模擬範圍之中尺度臺灣周圍海域風浪模式(new)之地形水深資料，如圖 3.25 所示。至於由 1 弧分格網數值地形資料(Etopo1)與 2 弧分格網數值地形資料(Etopo2)所建置的模式水深資料差異如圖 3.26 所示，圖中正值表示 Etopo1 網格數值水深值小於 Etopo2 數值水深值，顯示兩種版本之數值地形誤差頗大。

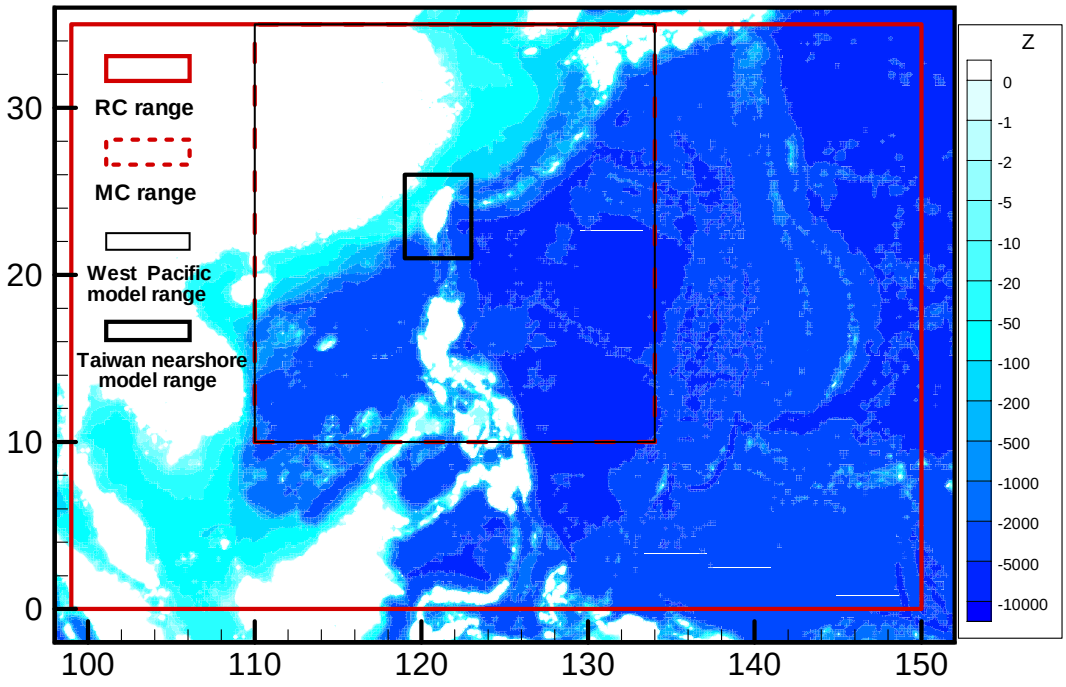


圖 3.23　TaiCOMS 風浪模式模擬範圍與風場範圍示意圖

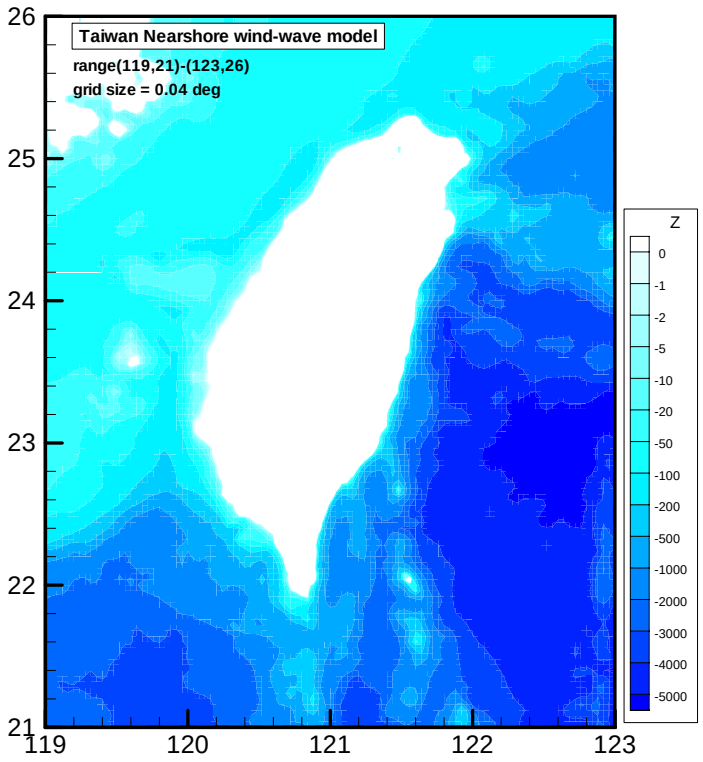


圖 3.24　目前 TaiCOMS 中尺度臺灣周圍海域風浪模式之地形水深圖 (Etopo2)

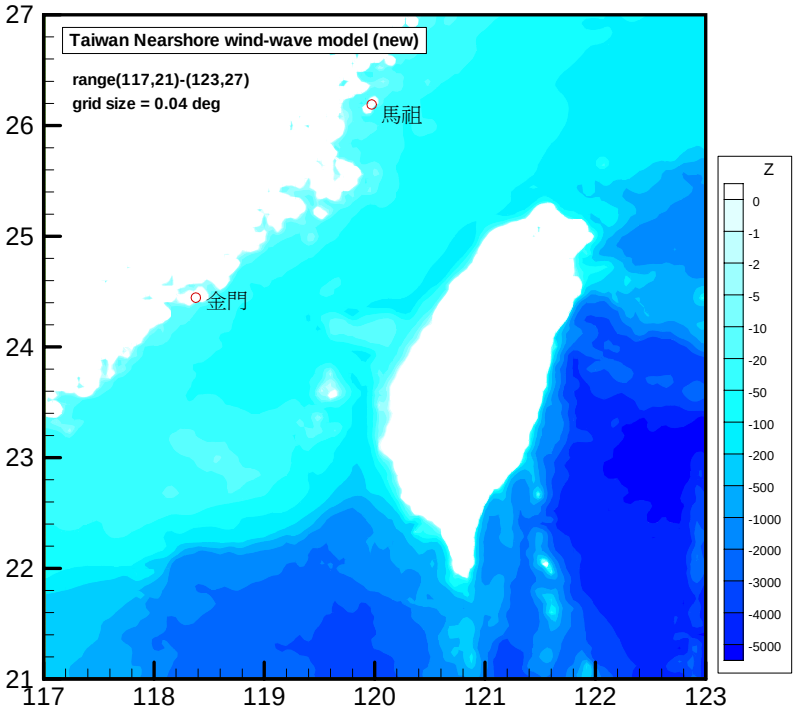


圖 3.25 本計畫擴大之中尺度臺灣周圍海域風浪模式(new)之地形水深圍(Etopo1)

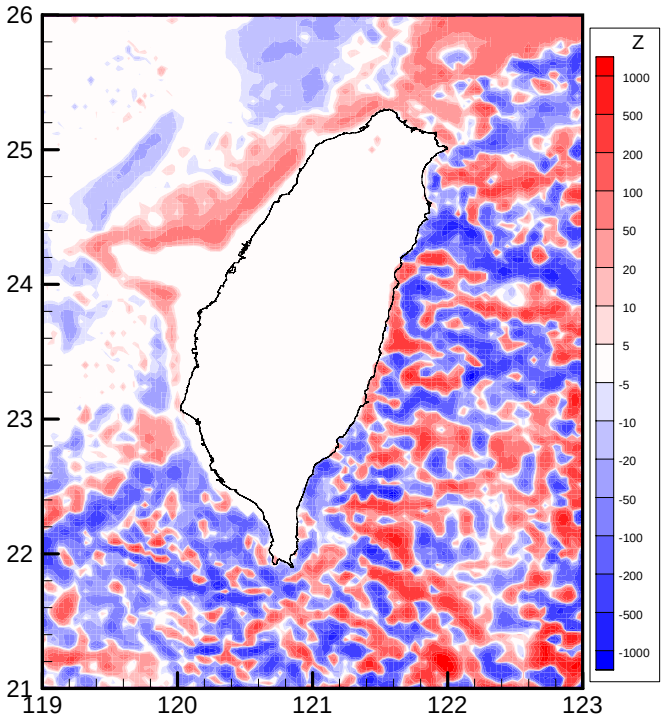


圖 3.26 臺灣周圍海域數值地形 Etopo1 及 Etopo2 水深資料之差異比較

為瞭解中尺度臺灣周圍海域風浪模式更新模擬範圍與地形水深資料之影響，本計畫以新的中尺度臺灣周圍海域風浪模式(簡稱本文模式)重新模擬波浪場，並與目前 TaiCOMS 資料庫中尺度風浪模式模擬結果比較，如圖 3.27 至圖 3.29 所示。經初步結果檢視，除了波向上差異性較不顯著外，在波高分布與平均週期分布上，本文模式模擬結果與目前 TaiCOMS 中尺度風浪模式模擬結果有一些趨勢上的差異。至於造成這些差異性之原因與模式之地形水深資料更新有關、或模式邊界條件不同所造成的，仍有待下年度再進一步分析與研究。

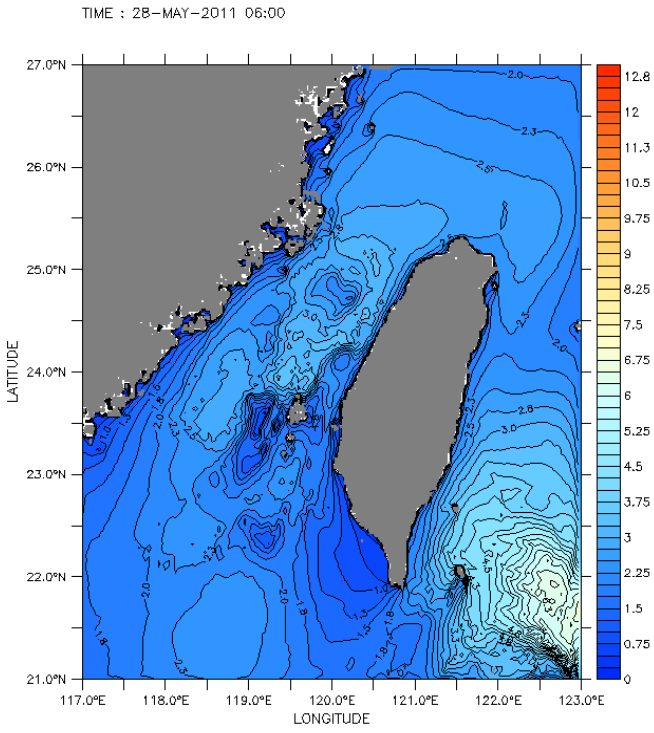


圖 3.27a　本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之波高分佈圖

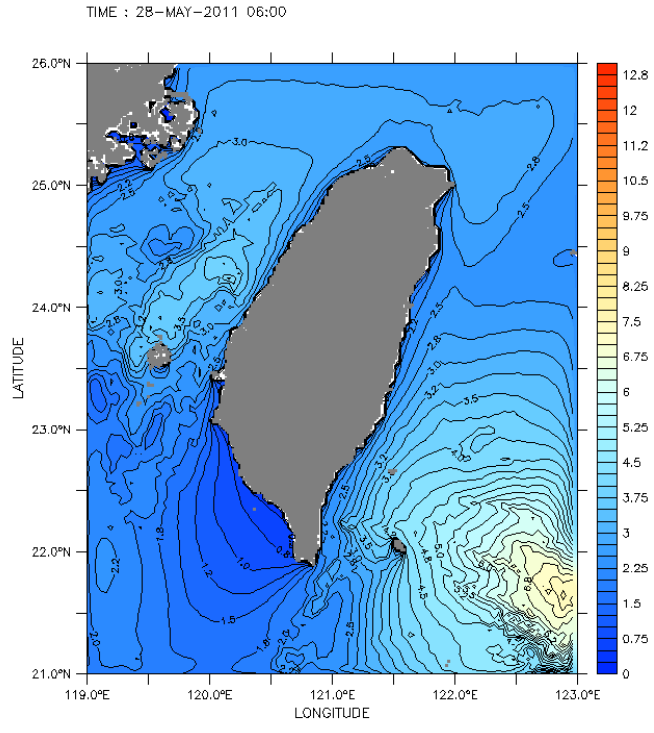


圖 3.27b　TaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之波高分佈圖

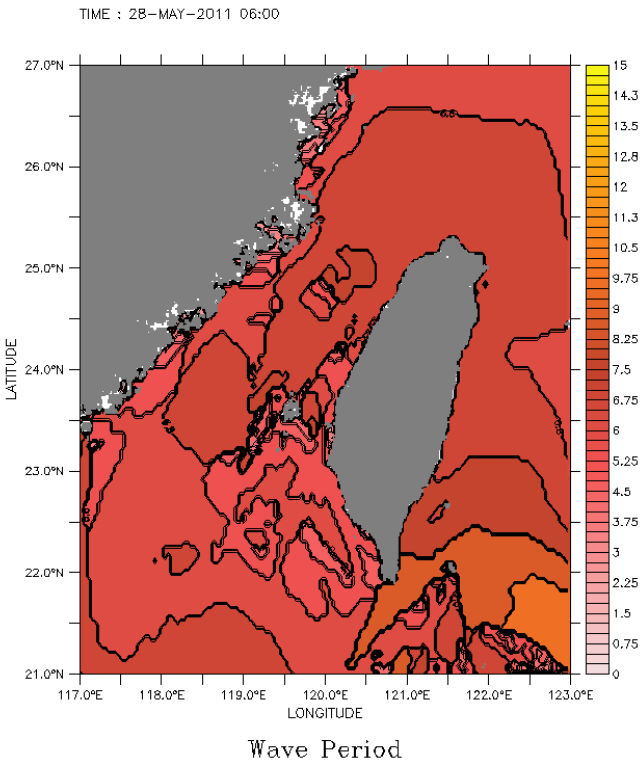


圖 3.28a　本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之平均週期分佈圖

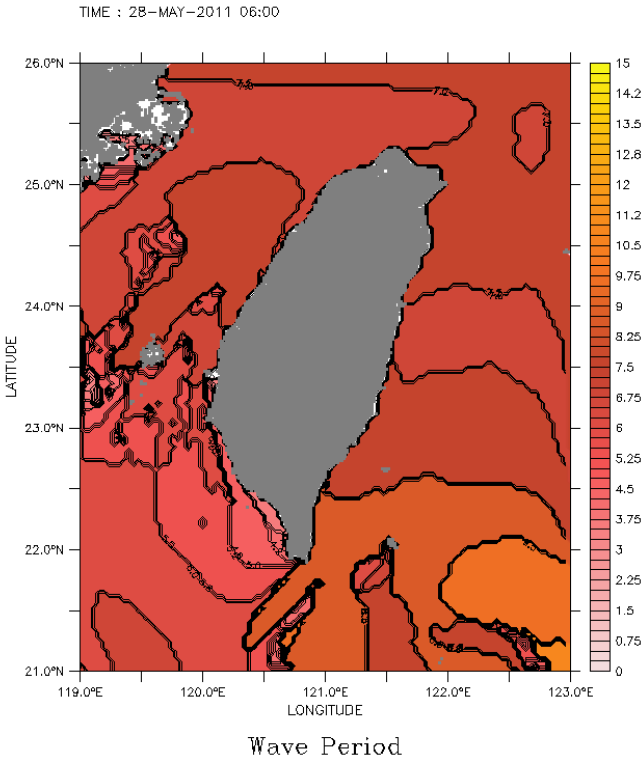


圖 3.28b　TaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之平均週期分佈圖

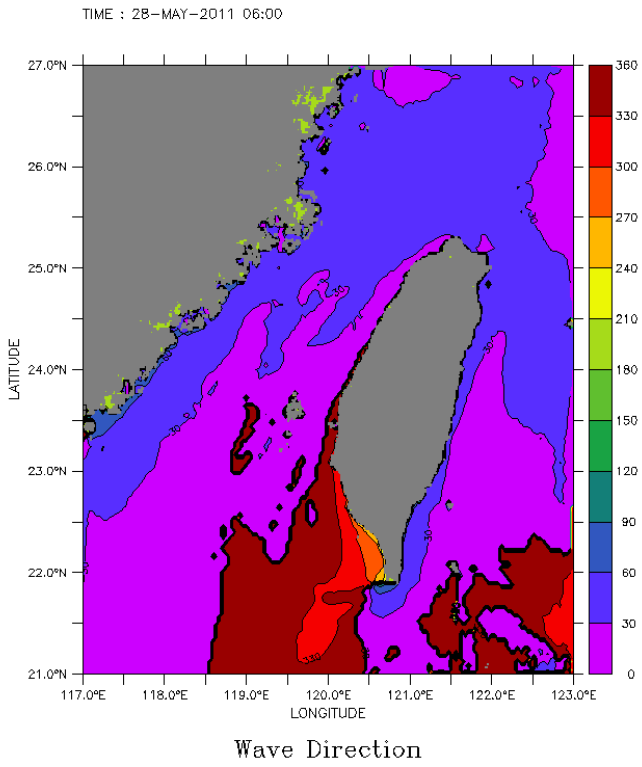


圖 3.29a　本文臺灣周圍海域風浪模式(new)推算之平均波向分佈圖

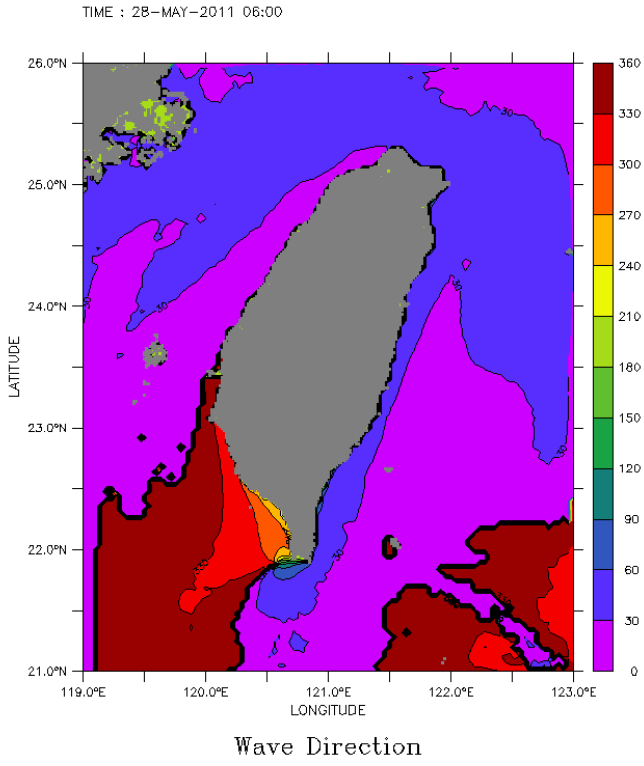


圖 3.29b　TaiCOMS 臺灣周圍海域風浪模式推算之平均波向分佈圖

3.3 港區風浪模擬預警子系統

本年度計畫目的之一為建置基隆港區及臺北港區風浪模擬預警子系統，其中基隆港區風浪模擬預警子系統為上年度計畫之延續，因此本年度乃以臺北港區風浪模擬預警子系統之建置為本計畫之研究重點。有關本計畫基隆港區及臺北港區風浪模擬預警子系統之建置說明如下。

3.3.1 基隆港港區風浪模擬預警子系統

有關基隆港區風浪模擬預警子系統建置之相關研究工作已於上年度(99 年)著手進行，初步已完成工作內容包括基隆港東防波堤延伸工程完工(如圖 3.30 所示)以及基隆港西 18、19 號貨櫃碼頭延建及後線場地填建工程完工(如圖 3.31 所示)後，基隆港近岸港區波浪模式及港域波浪模式之數值計算網格之修正，如圖 3.32 及圖 3.33 所示；以及基隆港近岸港區波浪場及港域波浪場數值模擬研究。其中基隆港近岸港區波浪模式採用 Kirby and Dalrymple (1983)所發展的有限差分法波浪折繞射模式(REF/DIF)模擬港區周圍近岸波浪場狀況；港域波浪模式則採用以有限元素法求解橢圓型緩坡方程式之港域波浪模式，模擬港域內波浪受港池形狀及結構物影響之波高變化情形。

3.3.1.1 數值計算網格

基隆港近岸港區波浪模式之值計算網格採用方格網建置(模式本射亦適用矩形網格)，依據基隆港港區近岸波浪場模擬範圍，如圖 3.32 所示，其在沿海岸線方向(y 軸)之距離為 7.3km，離岸方向(x 軸)之距離為 6.2km，外海邊界水深約介於 50m~60m 間。本計畫採用 10m 網格間距建置數值計算網格，則基隆港近岸港區波浪模式數值計算網格之大小為 621×731；計算網格原點之二度分帶座標(TW67)為(322539.0，2787360.0)，網格 Y 軸與方位正北之逆時針方向夾角為 256.0°。

基隆港港域波浪模式之數值計算網格係依據圖 3.33 之三角元素粗粗網格分布而產生的，本計畫選取波浪模擬最小週期為 8 sec 以及網格大小必須滿足一個波長內至少涵蓋 8 個節點等條件，再配合水深資料產生基隆港港域波浪模式之數值計算細網格，如圖 3.34 所示。本計畫數值計算細網格是由 38,554 個節點及 74,850 個三角元素組成的。

3.3.1.2 港區近岸波浪場模擬

本計畫基隆港港區近岸波浪模式輸入條件主要為波浪週期、波高及波向等波浪條件，其來源主要有二分別為 TaiCOMS 作業化中尺度臺灣海域波浪模式(SWAN)之模擬結果(基隆港代表波浪輸出資料)及基隆港外海波浪觀測資料。前者為本計畫基隆港區風浪模擬預警子系統作業化部份，屬於每日 72 小時作業化模擬預報工作，目前此部份作業化模擬流程已由港研究中心完成建置並進行測試；後者配合基隆港每小時觀測資料而執行之波浪場模擬，此部份作業化模擬流程尚待建置。

圖 3.35 所示為基隆港區近岸波浪模擬結果之波高分布及波向向量示意圖，圖中波浪條件為 $H_{1/3}$ = 4.07m，$T_{1/3}$=10.7sec，D = 35.4°，模擬結果顯示基隆港港口附近波浪明顯受到外海海底淺灘地形及港口防波堤影響。

此外，在波浪場模擬精度提升方面，本年度已針對模式模擬過程提升 y 軸方向數值計算網格精度一倍，以期增加模式波浪場模擬之精度。

3.3.1.3 港域波浪場模擬

本計畫基隆港港域波浪場模擬主要針對不同波向及波浪週期之波浪進行波高變化數值模擬。港域波浪模擬輸入條件包括波浪資料，網格資料(節點座標、水深資料、節點代碼、元素節點連結資料等)以及邊界條件(如邊界節點之法線角度、反射係數等)。

本計畫基隆港港域波浪模式之邊界包括自然海岸線、防波堤、碼頭區及其他非碼頭區邊界等，由於邊界反射係數大小不僅與其構造有關，且與波浪週期關係密切，因此如何決定模式邊界反射係數大小在實際操作上相當困難。除了針對特定波浪條件進行模擬與驗証外，本計畫基於簡化考量，假設邊界反射係數為定值，且不受波浪週期影響而改變。目前基隆港港埠碼頭設施大多為直立壁，其反射率通常接近全反射，因此本計畫假設其反射係為 1.0；港口外防波堤及港內防波堤構造多為直立堤及消波塊，其反射率約介於 0.6~0.8 之間，本計畫對於外防波堤假設其反射係為 0.8，內防波堤反射係為 0.65；至於港內非碼頭區之其他邊界，則假設其反射係為 0.75，如圖 3.36 所示。

本年度基隆港港域波浪模擬條件如下：入射波浪波向(來向)選取 NE、NNE、N、NNW 及 NW 等波向，波浪週期模擬範圍為 4 ~ 17 sec，其中 13 ~ 17 sec 間隔為 0.5 sec，其餘週期間隔為 0.1 sec。上述波浪條件模擬結果已移交給港研中心建置成港域波浪資料庫，以備不時之需。圖 3.37 所示為基隆港港域波浪模擬結果之波高分布情形。



圖 3.30　基隆港東防波堤延伸工程施工現況



圖 3.31　基隆港西 18、19 貨櫃碼頭延建工程完工後現況

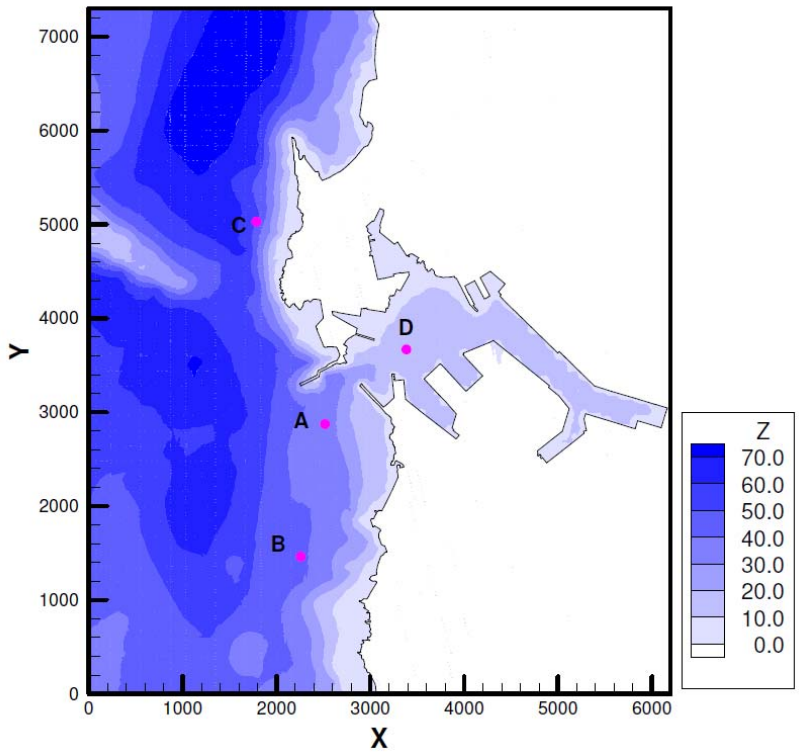


圖 3.32　基隆港港區近岸波浪模式數值計算網格及地形水深分布圖
(點位 A~D 為模式模擬結果之輸出點位)

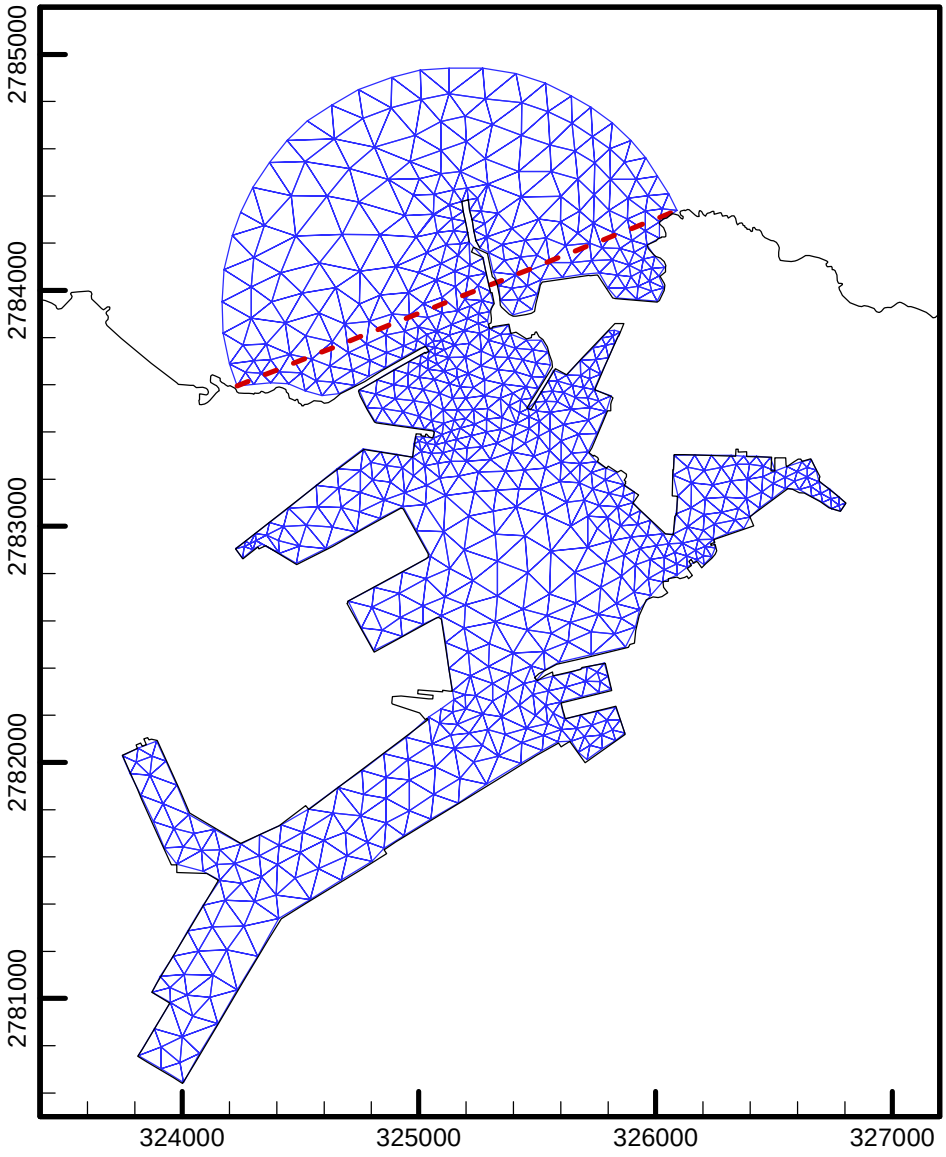


圖 3.33　基隆港東防波堤延伸工程及西 18、19 號貨櫃碼頭延建工程施工後之港池形狀及其粗網格分布圖

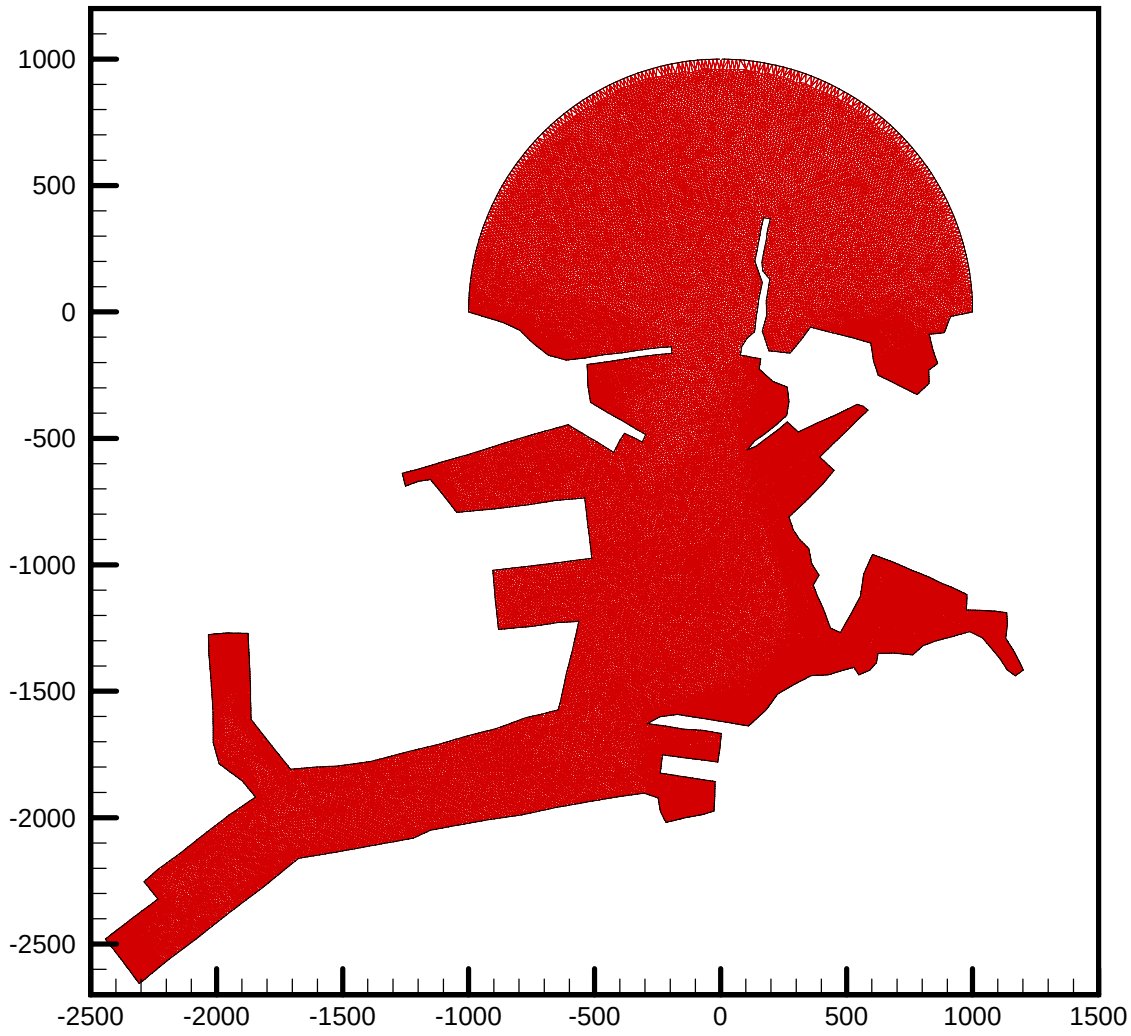


圖 3.34　基隆港港域波浪場數值模擬之細網格分布圖(共 38,554 個節點及 74,850 元素)

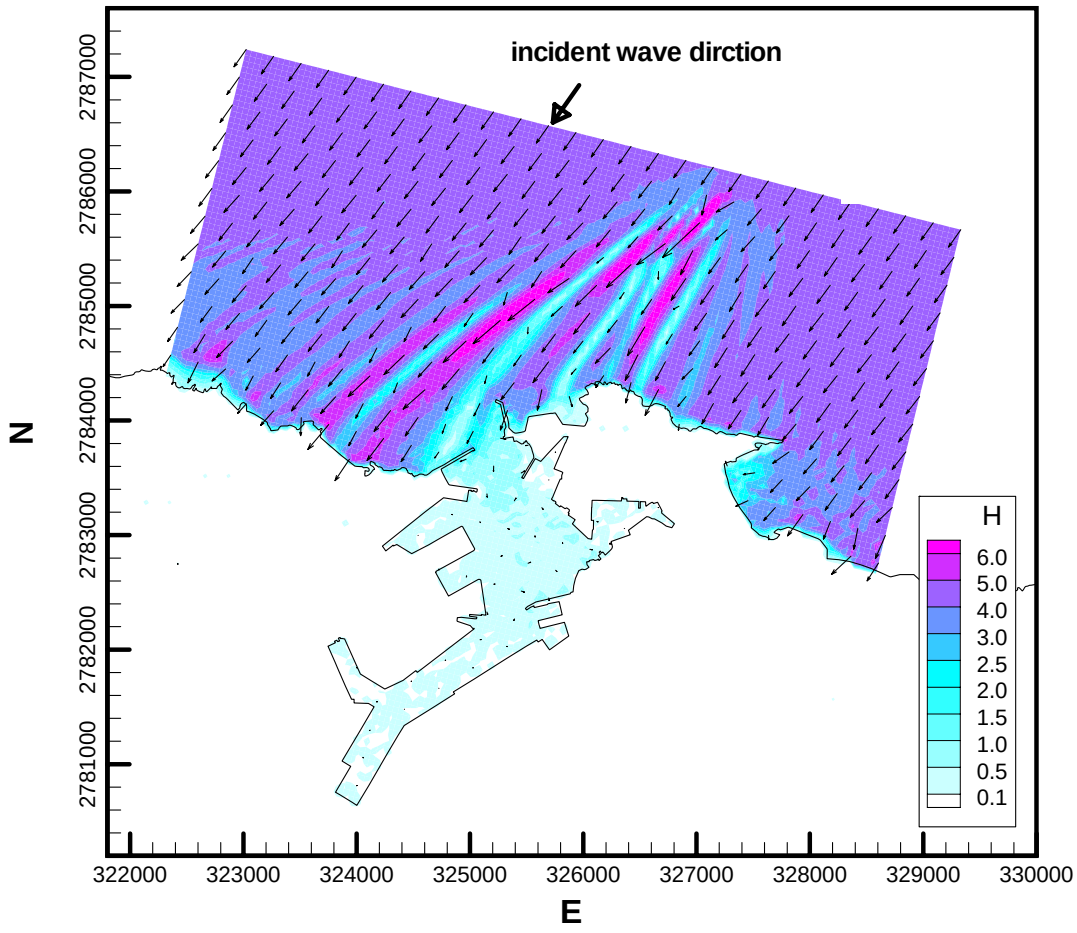


圖 3.35　基隆港近岸波浪場模擬結果之波高分布與波向向量平面圖(波浪條件：$H_{1/3}$ = 4.07m，$T_{1/3}$=10.7sec，D = 35.4°)

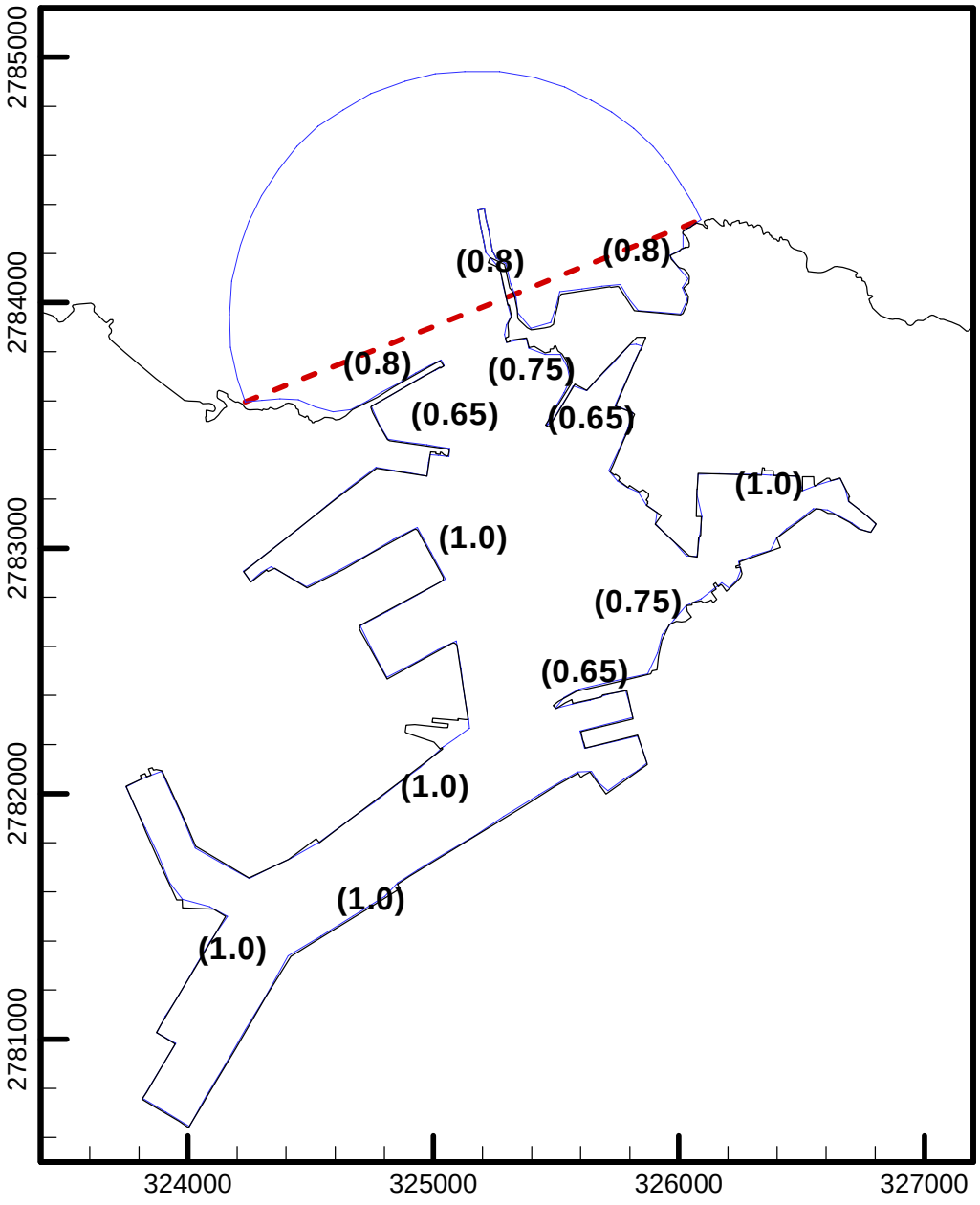


圖 3.36　基隆港港域波浪模式之港池邊界反射係數假設值示意圖

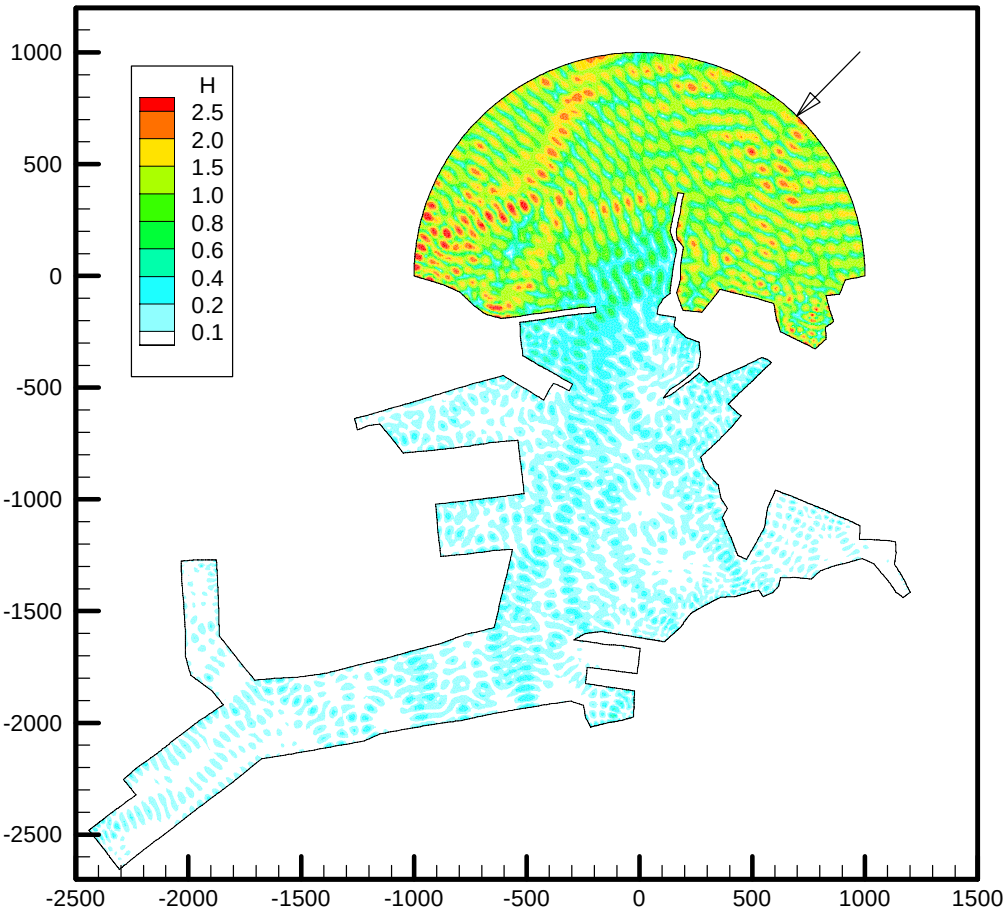


圖 3.37　基隆港港域波浪模擬結果之波高分布情形(波向 NNE、波浪週期 8 秒)

3.3.2 臺北港港區風浪模擬預警子系統

目前 TaiCOMS 系統下小尺度臺北港港區近岸波浪模式(如圖 3.38 所示)及細尺度港域波浪模式(如圖 3.39 所示)均為 97 年度建置的，由於臺北港仍持續擴建中，因此北外堤外廓形狀已有重大改變，如圖 3.40 所示。本年度首要工作為針對現有臺北港港區近岸波浪模式及港域波浪模式進行模式修正，內容包括數值計算網格、相關參數之率定及模擬作業系統更新等工作。

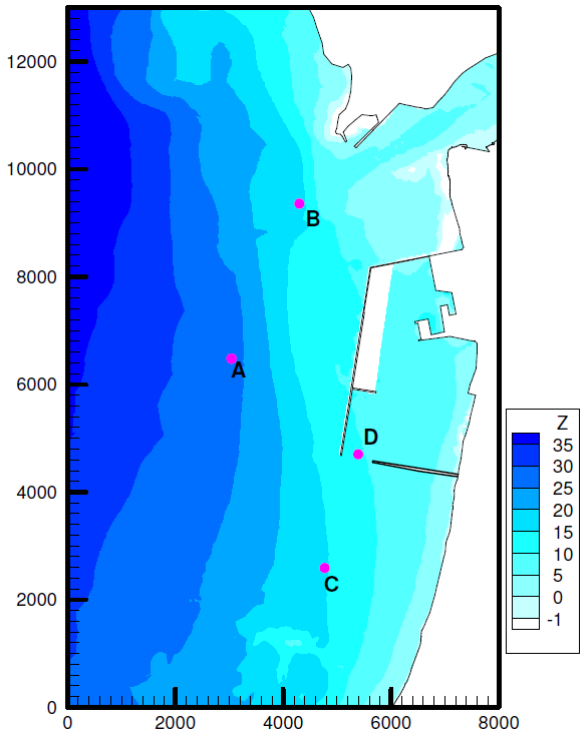


圖 3.38　TaiCOMS 系統下小尺度臺北港港區近岸波浪模式模擬範圍及地形水深分布圖

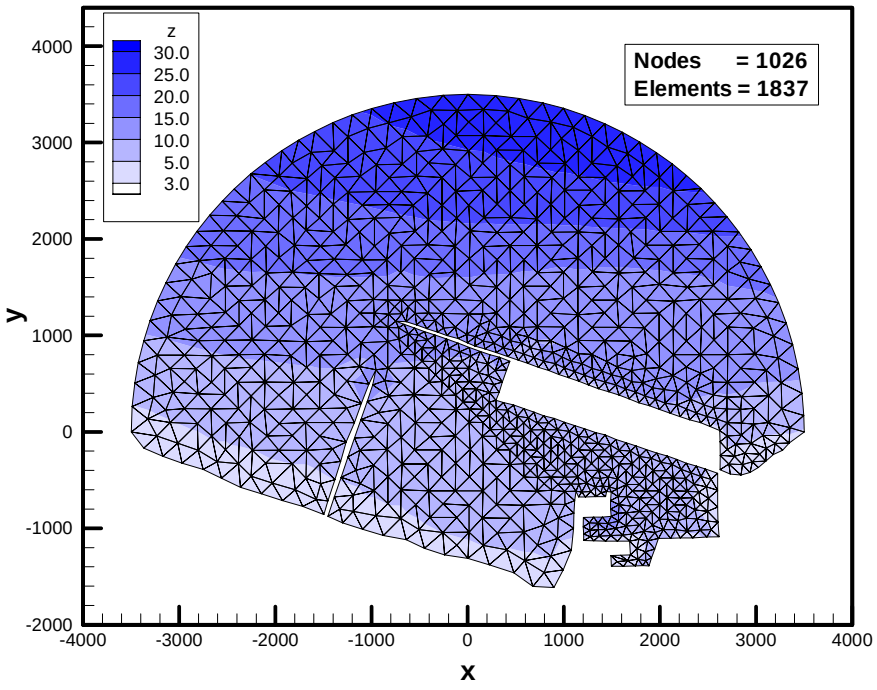


圖 3.39　TaiCOMS 系統下細尺度臺北港港域非結構三角元素粗網格及水深分布圖



圖 3.40　臺北港港池外廓(拍攝日期 2009/07/05)

3.3.2.1 數值計算網格之修正

本計畫依據 97 年度臺北港港區近岸波浪模式之模擬範圍，如圖 3.41 所示，選取相同之模擬範圍，即圖中所示 8km×13km 之矩形範圍。配合本計畫蒐集 99 年 10 月臺北港港區水深調查資料，如圖 3.42 所示，更新近岸波浪模式之數值計算網格水深資料，如圖 3.43 所示。圖中數值計算網格間距($\Delta x = \Delta y$)為 10m，網格點數為 801×1301，x 軸與二度分帶座標 x 軸夾角為-55.0º。於圖 3.43 中點位 A、B、C、D 為波浪模擬結果輸出之點位，其中點位 A 代表臺北港目前波浪觀測之位置，顯示該觀測點位離臺北港外廓最短距離約 1.2km。

臺北港港域波浪模式之模擬範圍則因北外堤外廓形狀已變，導致 97 年度所建置之模擬範圍已無法滿足，而必須重新研擬模式模擬範圍大小。基於臺北港仍持續擴建中，對於臺北港港域波浪模式之模擬範圍之修正擬待臺北港擴建告一段落再進行。

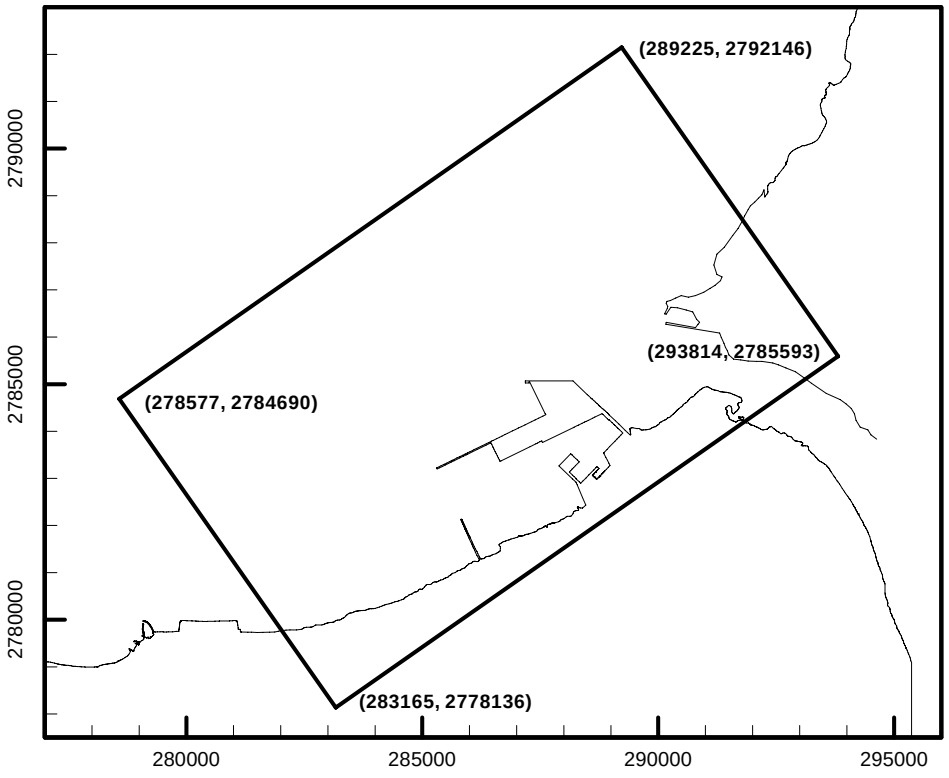


圖 3.41　臺北港港區近岸波浪模式模擬範圍圖

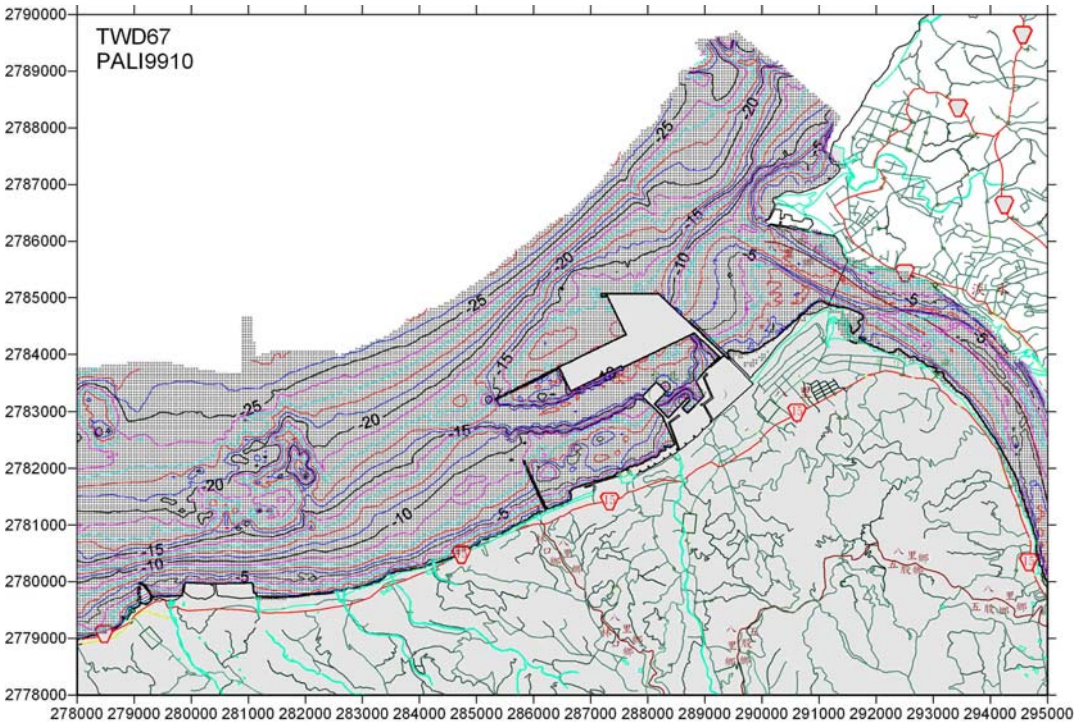


圖 3.42　臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖

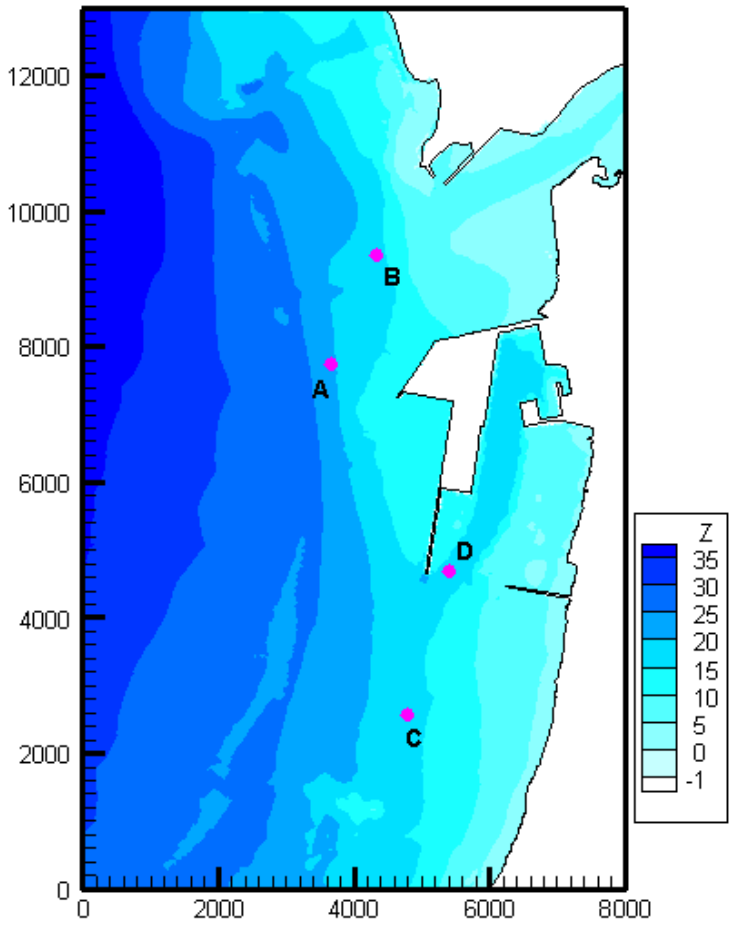


圖 3.43　本年度臺北港近岸港區波浪模式修正之數值計算網格及地形水深分布圖

3.3.2.2 港區近岸波浪場模擬

如前述，本計畫臺北港港區近岸波浪模式輸入條件主要為波浪週期、波高及波向等波浪條件，波浪模擬條件來源主要有二分別為TaiCOMS 作業化中尺度臺灣海域波浪模式(SWAN)之模擬結果(臺北港代表波浪之輸出資料)以及臺北港外海觀測樁之波浪觀測資料。前者為本計畫臺北港港區風浪模擬預警子系統作業化部份，屬於每日 72 小時作業化模擬預報工作，目前關於港區近岸波浪模擬作業化流程已由港研究中心完成建置並進行測試；後者為配合臺北港外海觀測樁每小時波浪觀測資料而執行之波浪場模擬，此部份作業化模擬流程尚待建置。

1. 模式波浪模擬條件之校正

由於臺北港外海波浪觀測位置(圖 3.43 之點位 A)位於本研究臺北港港區近岸波浪場模擬範圍之內部，距離模式波浪條件之輸入邊界(圖 3.43 之座標軸 x=0 邊界)有相當之距離。因此考量外海波浪由模式邊界(x=0)向岸傳播至波浪觀測位置時，波浪之波高及波向受到海域地形水深變化之影響而產生折射及受底床影響導致波浪發生能量損失而與模式邊界上波浪條件出現差異。有鑑於此，本計畫如利用臺北港波浪觀測資料進行臺北港波浪場模擬時，必須先針對波浪觀測資料與模式邊界波浪輸入條件間建立其關連性，藉以校正模式實際輸入之波浪模擬條件。

為建立波浪觀測資料與模式邊界輸入波浪條件間之關係式，本計畫以冬季波浪觀測資料選取波浪週期大於 3 秒且波向(來向)介於 WSW~NNE 間之波浪觀測資料為模式模擬之邊界條件進行波浪場模擬，再依據觀測點(A)波浪模擬結果(波高、波向)與波浪觀測資料進行比較。圖 3.44 所示為觀測點位 A 波高觀測值與模式波高模擬結果之對應關係，顯示在觀測點位上模式波高模擬值略小於波高觀測值，其原因主要為本文模式有考慮波浪傳播過程受底床摩擦所造成的波能損失，且波高

愈大波能損失愈大，以及外海波浪傳播至觀測點之過程中波浪淺化效應不顯著。有鑑此，本研究臺北港近岸波浪場模擬條件之波高值必須考量波浪能量損失(即模式輸入之波高值須大於波高觀測值)，才能降低觀測點位上的波高模擬結果與觀測值間之誤差。此外，圖 3.45 所示為觀測點位 A 在波向上模式模擬值與波向觀測值之比較結果，模式模擬結果顯示受到地形水深變化之影響，外海波浪傳播到觀測點時，波向都會產生些微變化；當波浪入射角度(指模式網格座標定義之角度)愈大時，觀測點位之波向與模式外海邊界波向之偏差會愈大，如圖中波向介於 N 至 NE 方向之模擬結果。

由上述模擬結果得知，如圖 3.44 及圖 3.45 所示，在波浪觀測點位上不論波高或波向本文模式模擬值與觀測值間均具有高度一致性之特性；因此本計畫以線性回歸方式處理上述模式模擬值與觀測值間之關係，分別得到波高模式模擬值與觀測值間及波向模式模擬值與觀測值間之線性回歸關係式，如圖 3.44 及圖 3.45 所示之虛線，且此二線性回歸關係式之相關係數(R-squared)分別為 0.995 及 0.987。因此本計畫乃依據上述線性回歸關係式修正臺北港近岸波浪場模擬之外海波浪條件。

2. 模式波浪模擬結果之驗証

本計畫以校正後之波浪條件重新模擬臺北港近岸波浪場，並依據模式模擬結果輸出觀測點位 A 之波高值與波高觀測值比較，如圖 3.46 所示，結果顯示觀測點位之波高模擬結果與觀測值間已趨於一致。因此証明上述波浪模擬條件之校正關係式可作為為本計畫臺北港港區近岸波浪場模擬條件校正之依據。

圖 3.47 所示為本計畫針對 2011 年強烈颱風桑達侵臺期間(發布海上颱風警報)利用臺北港波浪觀測資料逐時模擬臺北港波浪場之結果與波高觀測值之比較，顯示觀測點位上波高模擬結果與觀測值相當接近，僅少部份時段波高模擬結果出現較大誤差。針對模擬結果與觀測值誤差較大部份，本計畫進一步分析模式模擬之波浪條件，研判多發生於

觀測值之波浪平均週期偏小之情況，並繪出模式模擬結果如圖 3.48 所示。圖 3.48 所示為波浪觀測值波高為 3.52m 且週期為 3.9sec 之情況下，本文模式模擬結果之波高分布及波向變化情形，結果顯示波浪由外海邊界向岸傳播過程，波高呈現顯著遞減之現象，導致觀測點位上波高模擬結果明顯偏小；此一波高顯著減衰變化趨勢與其他波浪條件模擬結果不一致的原因，仍有待進一步探討。

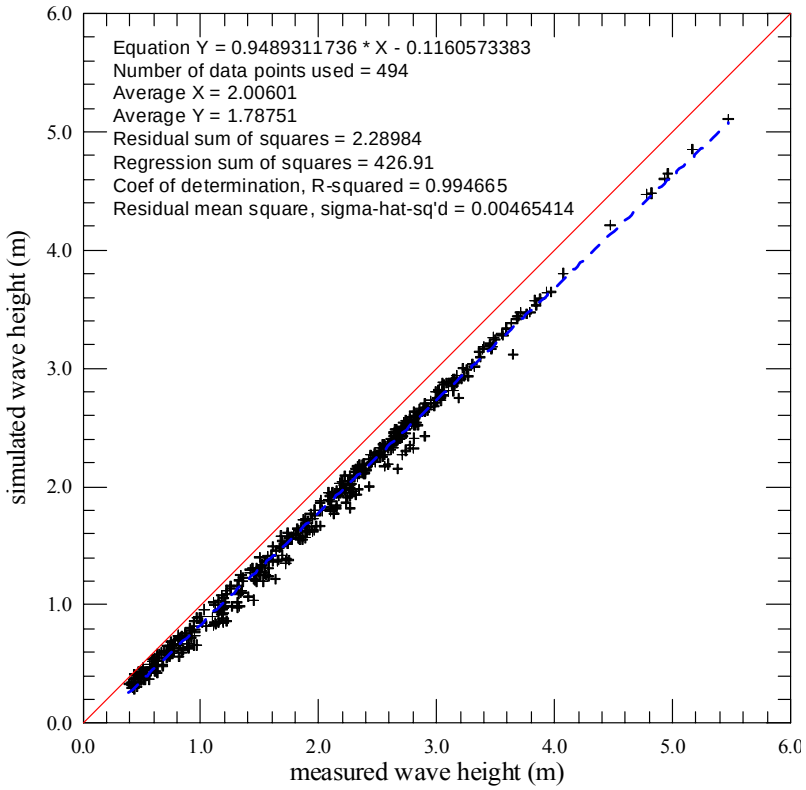


圖 3.44　臺北港觀測點位波高觀測值(橫座標)與模式波高模擬結果(縱座標)之比較

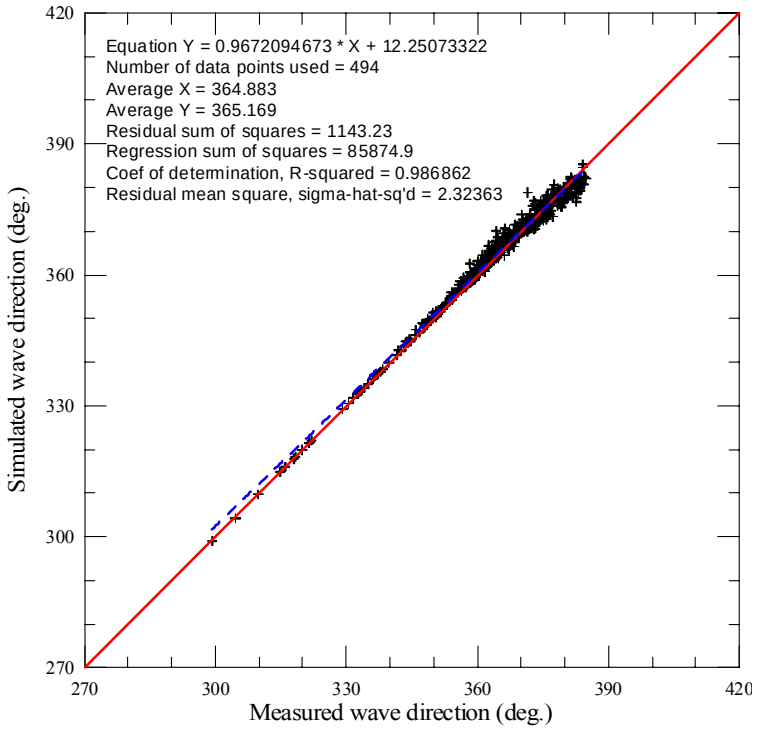


圖 3.45　臺北港觀測點位波向觀測值(橫座標)與模式波向模擬結果(縱座標)之比較

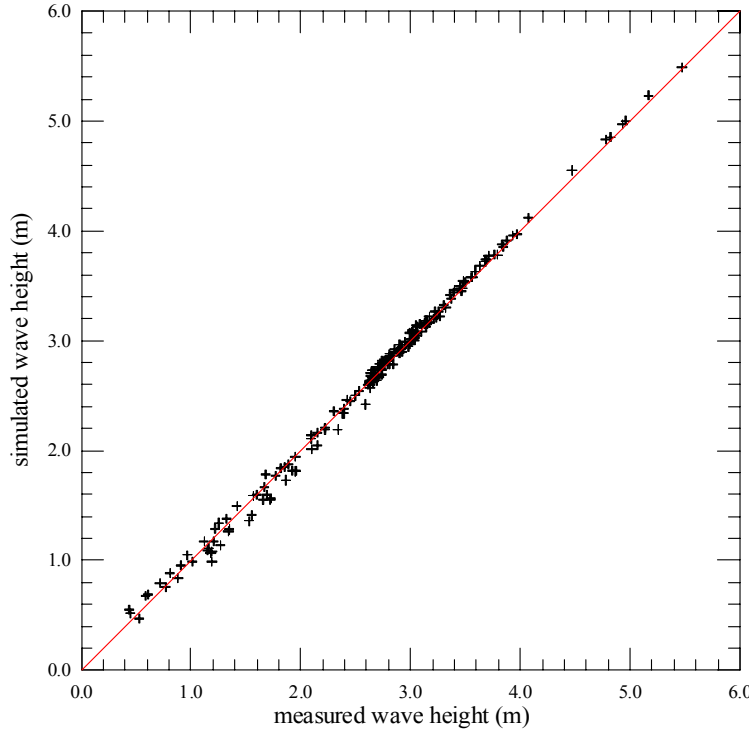


圖 3.46　臺北港觀測點位波高觀測值(橫座標)與模式校正後波高模擬結果(縱座標)之比較

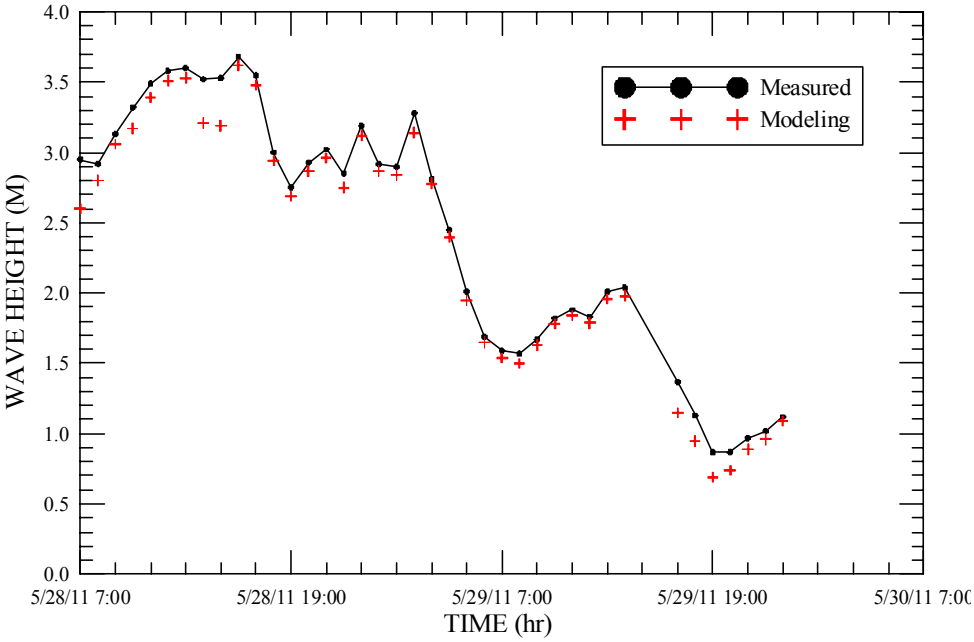


圖 3.47　臺北 2011 年強烈颱風桑達侵臺期間臺北港近岸波浪場波高模擬值與觀測值之比較

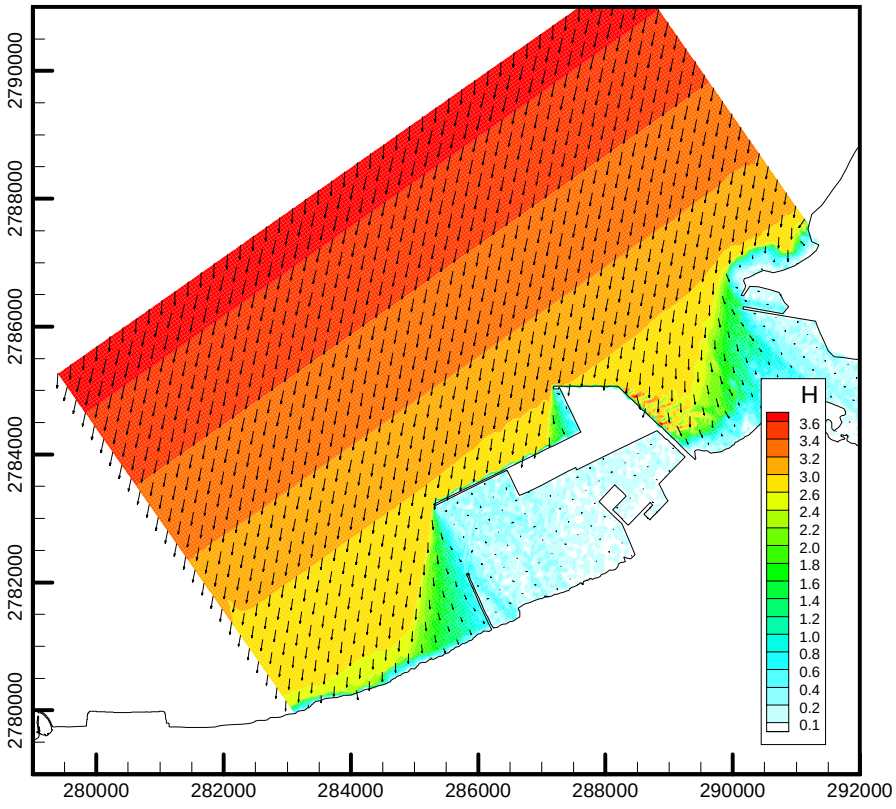


圖 3.48　臺北港近岸波浪場模擬結果(波浪觀測資料：H_s=3.52m、T_m=3.9sec、D_m=3°)

3.3.3 2011 年颱風波浪模擬與評估

本計畫選取南瑪都登陸臺灣前(8 月 28 日 12:00)之波浪模擬結果進行說明，此時強烈颱風南瑪都位置約在臺灣南端鵝鑾鼻南方海面，如圖 3.49 所示，由圖中 MC 風場之風速向量及氣壓分布得知，此時颱風中心位置仍在中尺度臺灣周圍海域風浪模式範圍之外圍附近。此外，受到颱風南瑪都之影響，臺灣海峽海面風速明顯較鄰近陸地上風速為大。圖 3.50 至圖 3.52 所示分別為中尺度臺灣周圍海域風浪模式(SWAN)推算之示性波高($H_{1/3}$)、平均波向(θ_m)及譜峰週期(T_p)分佈圖。由圖 3.49 模擬結果得知，此時颱風中心位置雖尚未進入中尺度臺灣周圍海域風浪模式範圍內，但模式模擬結果仍可看出波高最大值分布集中出現在颱風中心上半部迎風面之海域。此外，在臺灣海峽波浪最大值分布則在海峽寬度最窄海域附近。

南瑪都颱風期間基隆港與臺北港之波浪實測值與中尺度臺灣周圍海域風浪模式模擬之示性波高、平均波向與譜峰週期之比較，如圖 3.53 與圖 3.54 所示。由圖 3.53 與圖 3.54 得知，於南瑪都颱風期間，基隆港與臺北港之平均波向與譜峰週期之模擬結果與觀測值相當一致，但模式模擬之示性波高有明顯高估現象。究其原因可能與大尺度 WAM 模式模擬結果偏大之影響有關。

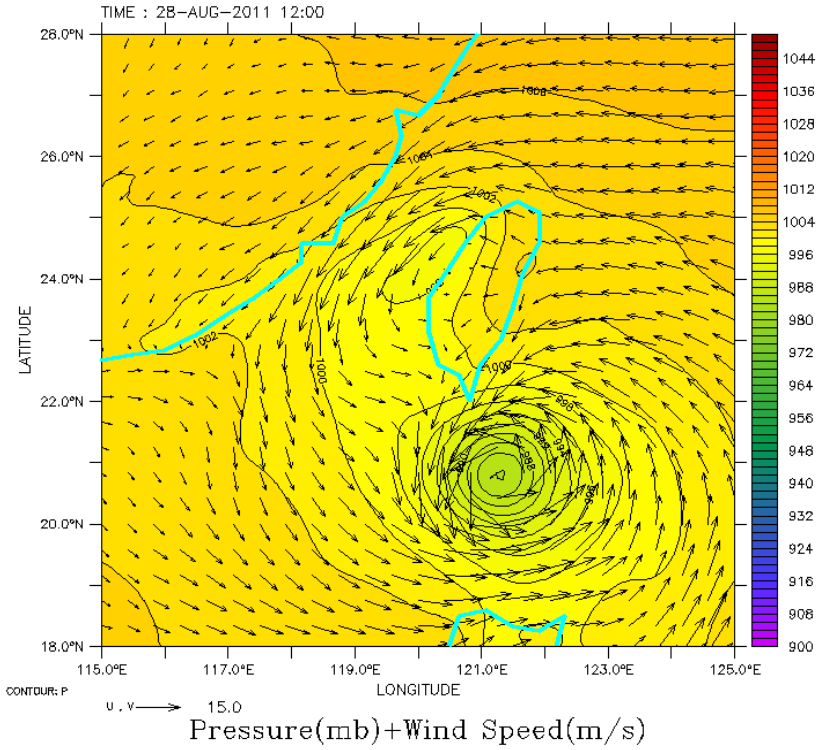


圖 3.49　2011/8/28 12H 南瑪都颱風 MC 風場分佈及向量圖

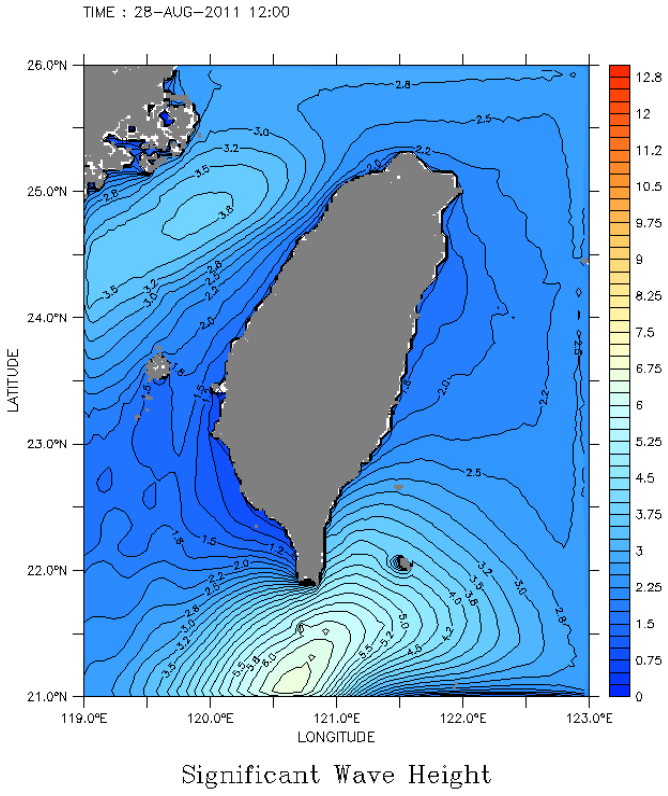


圖 3.50　2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算示性波高分佈圖

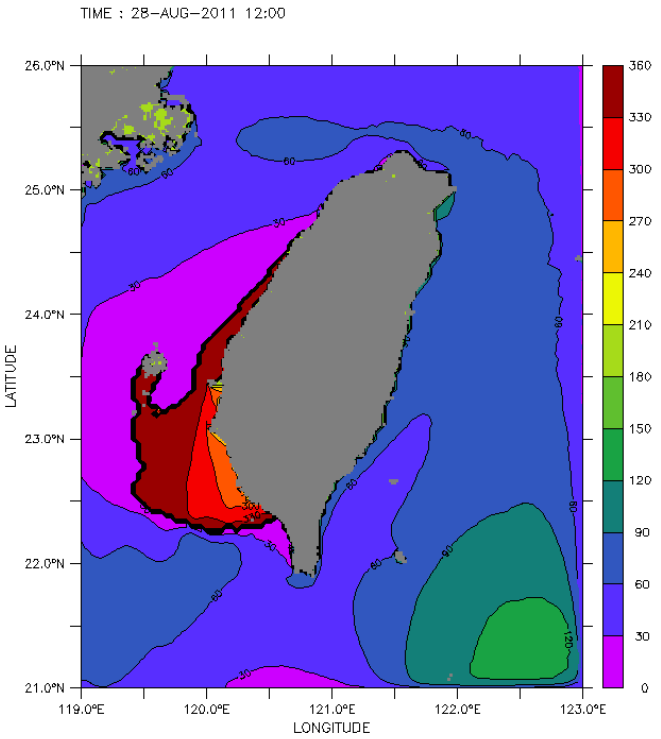


圖 3.51　2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算平均波向分佈圖

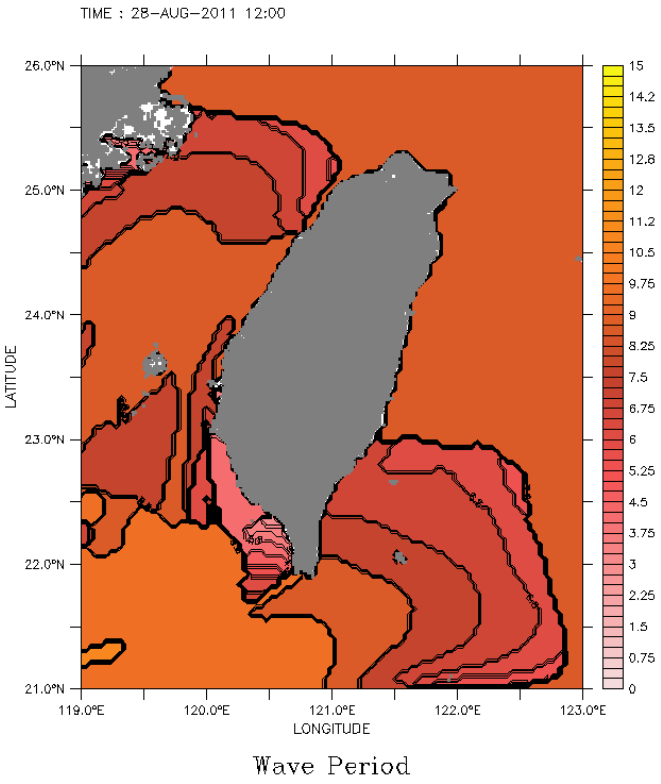


圖 3.52　2011/8/28 12H 南瑪都颱風 SWAN 推算譜峰週期分佈圖

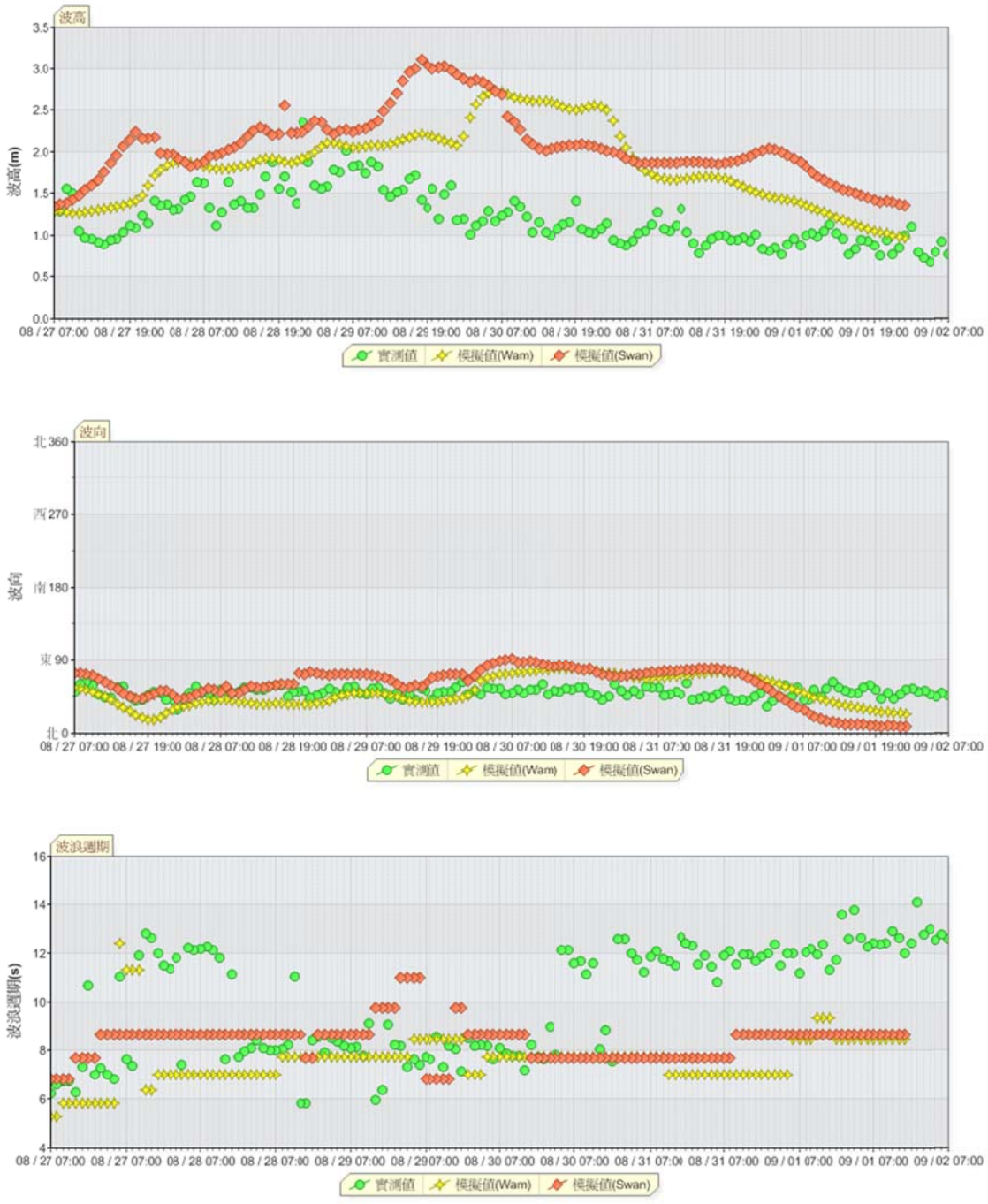


圖 3.53　2011 年南瑪都颱風基隆港之波浪模擬結果

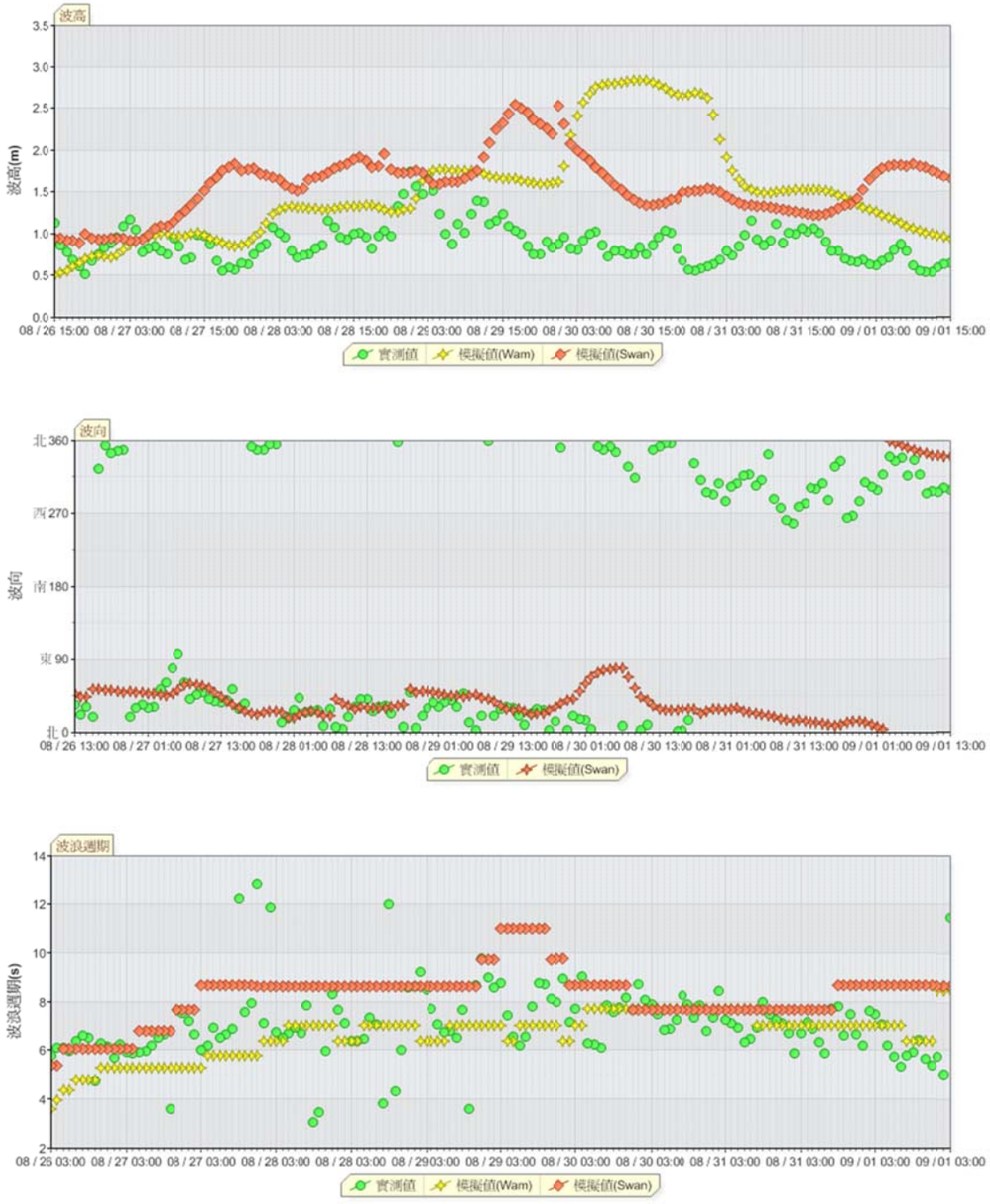


圖 3.54　2011 年南瑪都颱風臺北港之波浪模擬結果

3.3.4 長期風場與波浪模擬結果評估

本年度長期風場與波浪模擬結果之評估選取冬季季風(2010 年 12 月至 2011 年 1 月)與夏季季風(2011 年 7 月至 2011 年 8 月)風場進行長期風浪模擬。本年度長期風場之組成選取中央氣象局每日發布 2 次預報風場之前 12 小時組成，亦即每日 4 時及 16 時之風場資料屬於校正之風場資料。在風浪模擬方面，本計畫依據第四章修正之 WAM 模式以 RC 風場資料分別模擬大尺度冬季季風波浪及夏季季風波浪，並輸出本計畫第四章擴大模擬範圍之中尺度臺灣海域風浪模式(SWAN)之波浪邊界條件；之後，由擴大模擬範圍之中尺度臺灣海域風浪模式(SWAN)依據 MC 風場資料及上述波浪邊界條件分別模擬中尺度冬季季風波浪及夏季季風波浪。

本章節針對冬季季風波浪及夏季季風波浪模擬結果分別討論如下：

3.3.4.1 冬季季風波浪模擬評估

關於冬季季風波浪場模擬結果，本文選取 2011 年 1 月 1 日 16 時之模擬結果進行說明。圖 3.55 及圖 3.56 所示分別代表本計畫風浪模擬輸入之冬季季風之 RC 風場及 MC 風場；圖 3.57 至圖 3.59 所示分別為本文 WAM 模式模擬大尺度西太平洋範圍之平均波向、示性波高與譜峰週期之分佈圖，其中圖 3.57 所示之平均波向定義為波浪傳播之方向，即所謂的波浪的”去向”；圖 3.60 至圖 3.62 所示分別為本文擴大模擬範圍後之中尺度臺灣海域風浪模式(SWAN)以 MC 風場模擬之平均波向、示性波高與譜峰週期之分佈圖。整體而言，冬季季風大尺度西太平洋範圍波浪場模擬結果與中尺度臺灣海域風浪模式模擬結果在波高、波向及週期分布上趨勢是一致的。

為進一步評估波浪模擬結果，本文以基隆港與臺北港波浪觀測資料與本計畫大尺度及中尺度冬季季風波浪模擬結果比較，如圖 3.63 及

圖 3.64 所示。圖 3.63 所示為基隆港、臺北港冬季季風波浪模擬結果之波高與觀測資料之波高比較結果，結果顯示不論大尺度或中尺度模擬模擬結果均與觀測資料相當接近。圖 3.64 所示為基隆港、臺北港冬季季風波浪模擬結果之波向與觀測資料之波高比較結果，結果顯示大尺度模式波向模擬結果與觀測資料誤差較大，其中臺北港比基隆港更為顯著，其原因已於第四章說明。整體而言，中尺度模式模擬結果較佳之原因，除了網格解析度較高外，中尺度模式波浪模擬有考慮波浪淺水效為其主因。

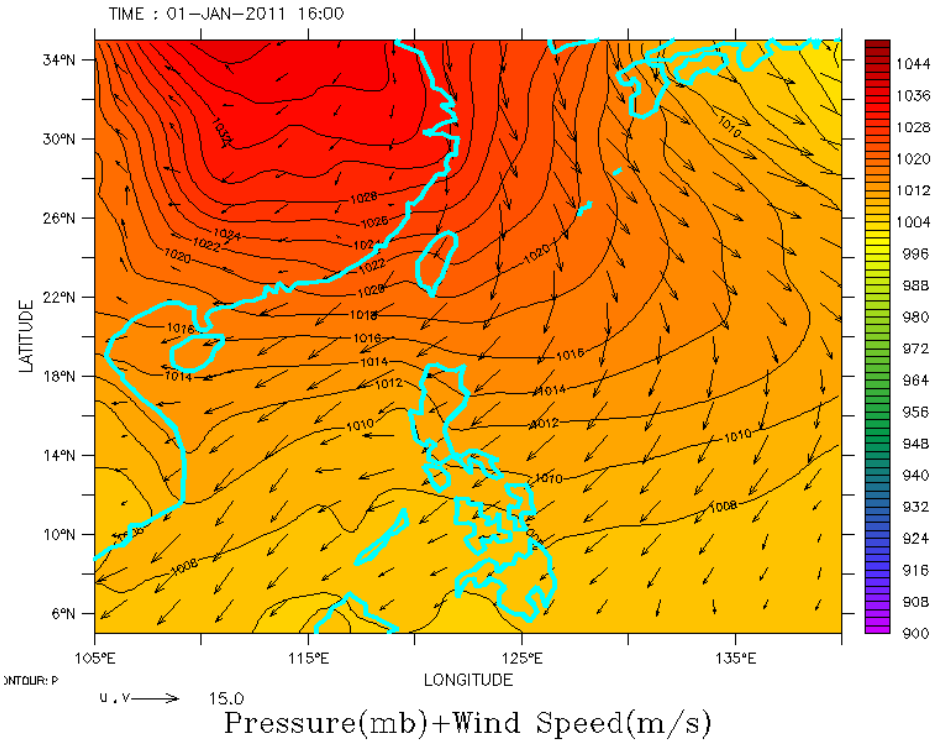


圖 3.55　冬季季風之 RC 風場氣壓分佈及風場向量圖

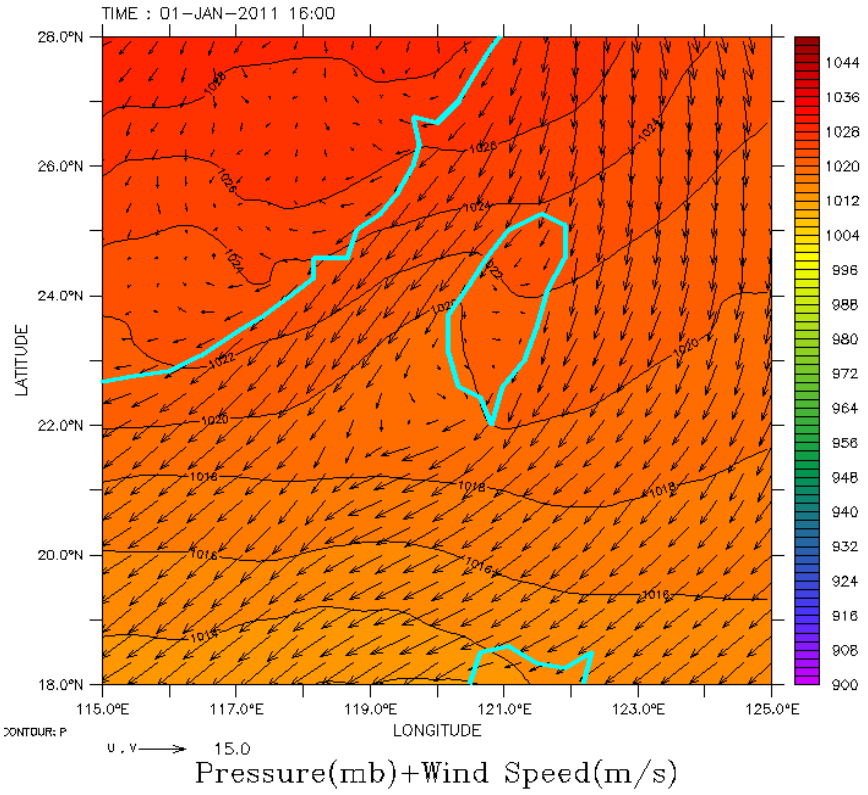


圖 3.56　冬季季風之 MC 風場氣壓分佈及風場向量圖

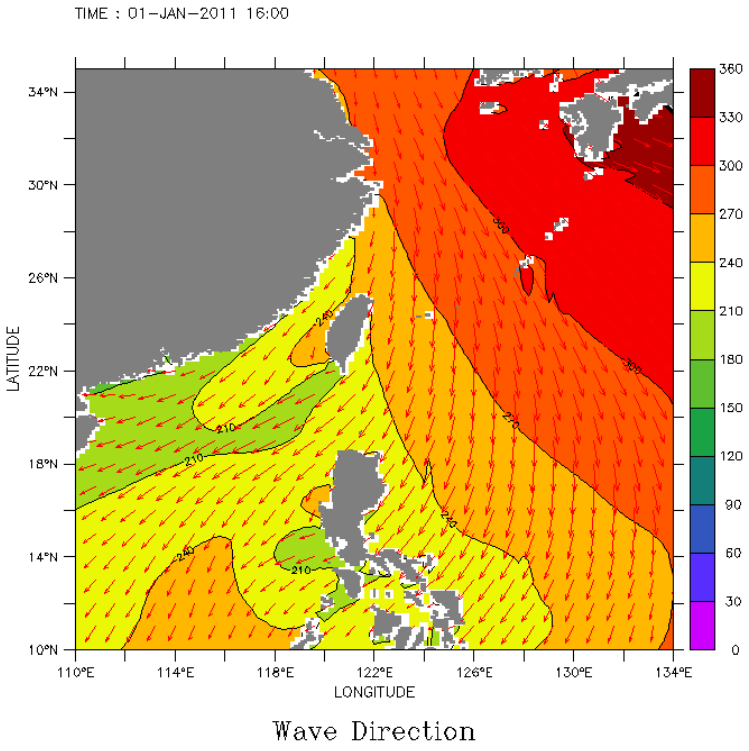


圖 3.57　冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖

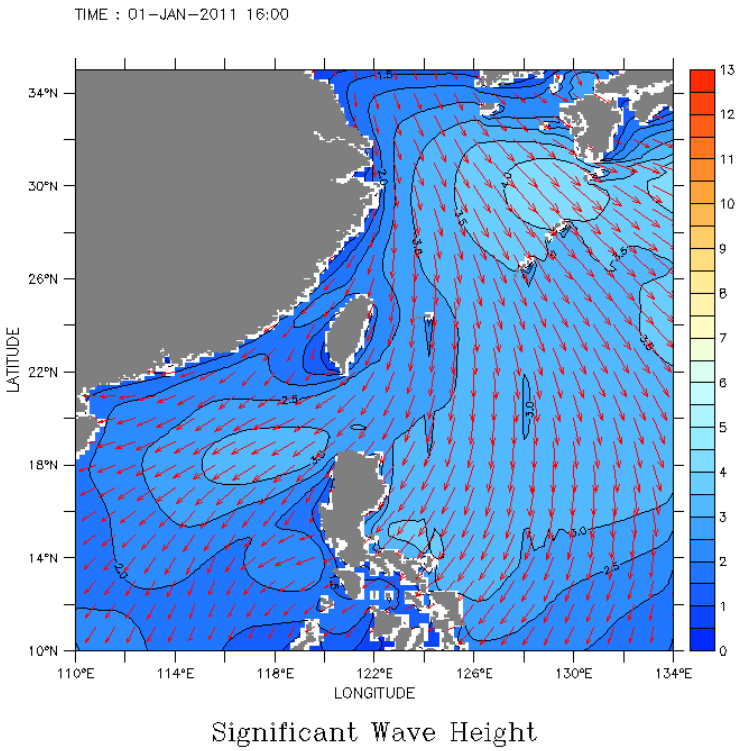


圖 3.58　冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖

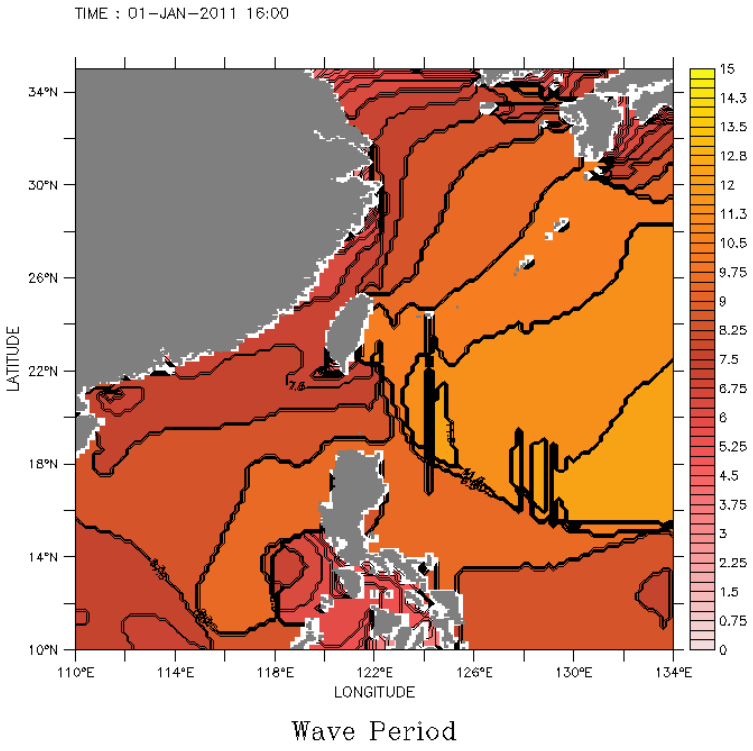


圖 3.59　冬季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖

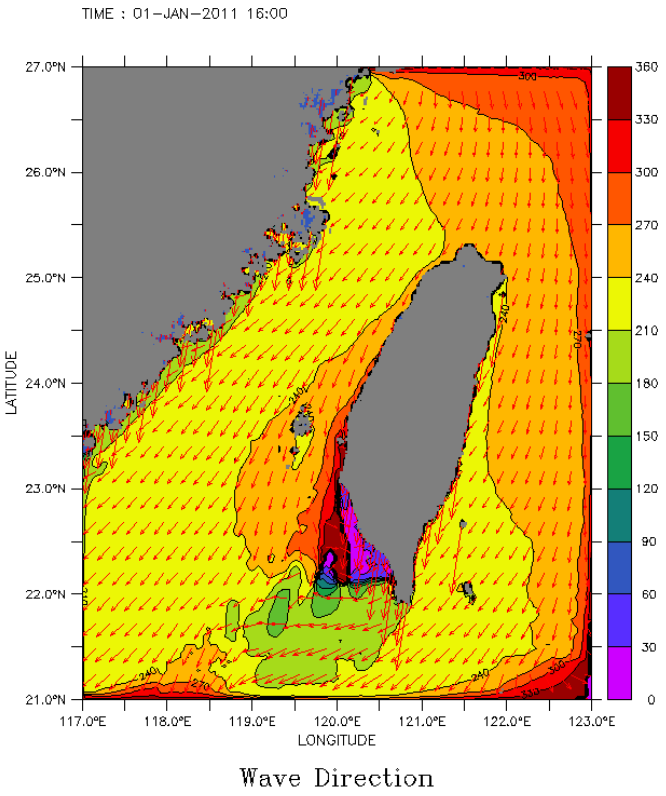


圖 3.60　冬季季風 MC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖

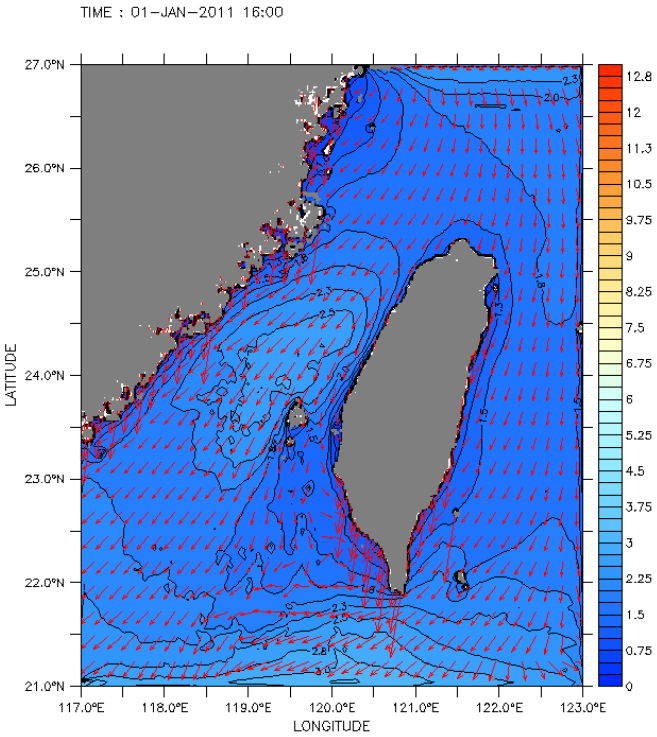


圖 3.61　冬季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖

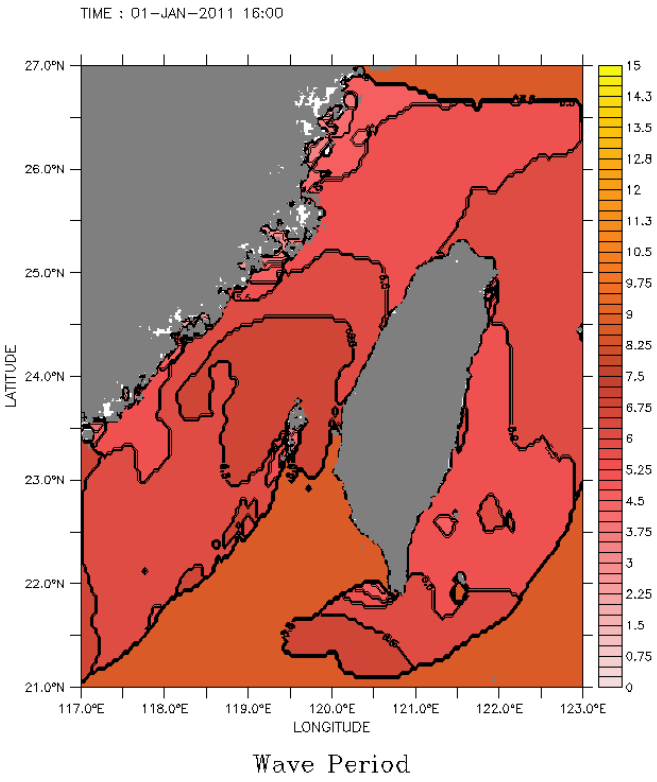


圖 3.62　冬季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖

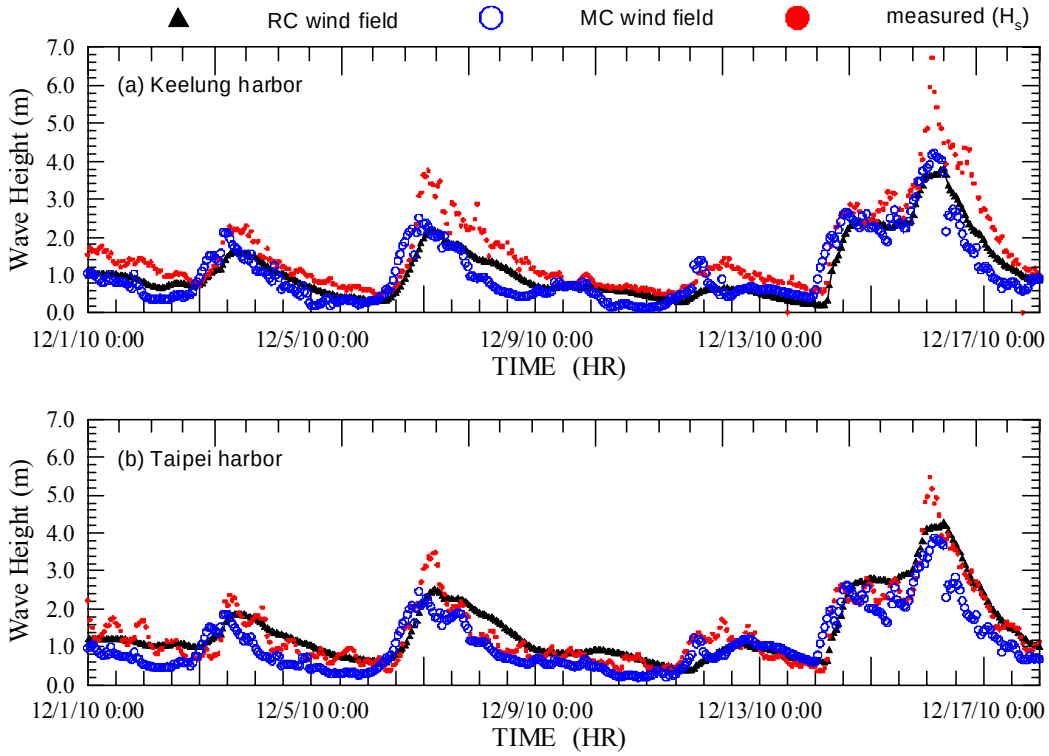


圖 3.63　冬季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波高比較

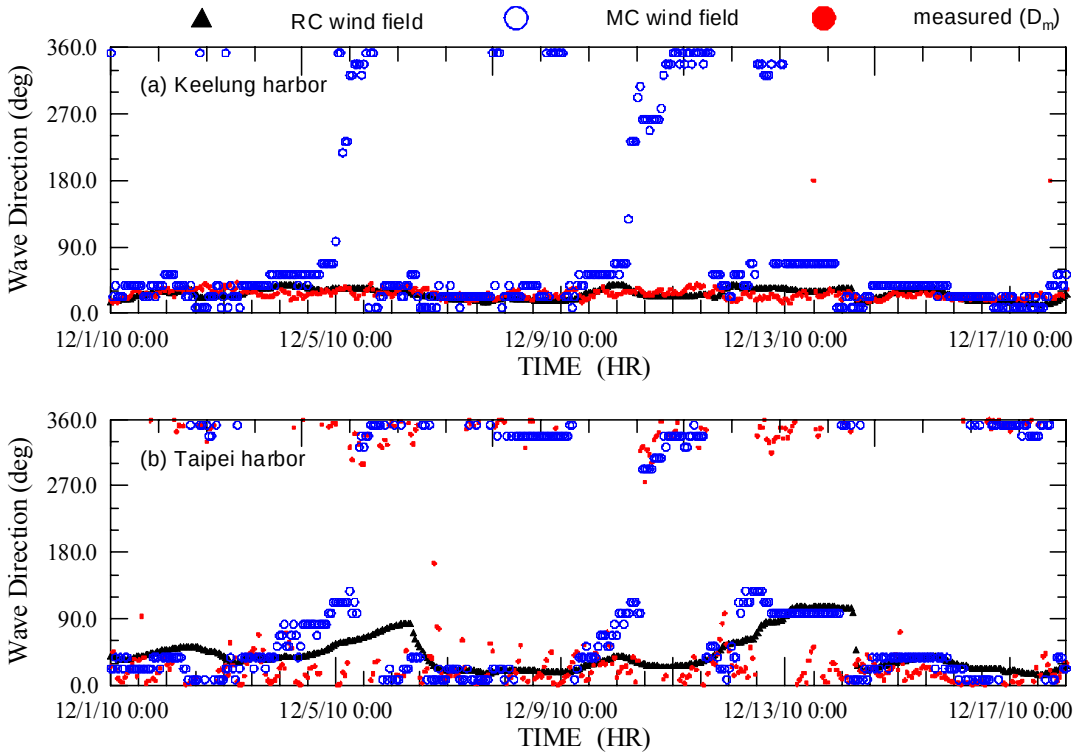


圖 3.64　冬季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波向比較

3.3.4.2　夏季季風波浪模擬評估

針對夏季季風波浪場模擬結果，本文選取 2011 年 7 月 21 日 16 時之模擬結果進行說明。圖 3.65 及圖 3.66 所示分別代表本計畫風浪模擬輸入之夏季季風之 RC 風場及 MC 風場；圖 3.67 至圖 3.69 所示分別為本文 WAM 模式以 RC 風場模擬大尺度西太平洋範圍之平均波向、示性波高與譜峰週期之分佈圖，其中圖 3.67 所示之平均波向定義為波浪傳播之方向，即所謂的波浪的"去向"；圖 3.70 至圖 3.72 所示分別為本文擴大模擬範圍後之中尺度臺灣海域風浪模式(SWAN)以 MC 風場模擬之平均波向、示性波高與譜峰週期之分佈圖。整體而言，夏季季風大尺度西太平洋範圍波浪場模擬結果與中尺度臺灣海域風浪模式模擬結果在波高、波向及週期分布上趨勢是一致的。

同理，本文以基隆港與臺北港波浪觀測資料與本計畫大尺度及中尺度冬季季風波浪模擬結果比較，如圖 3.73 及圖 3.74 所示。

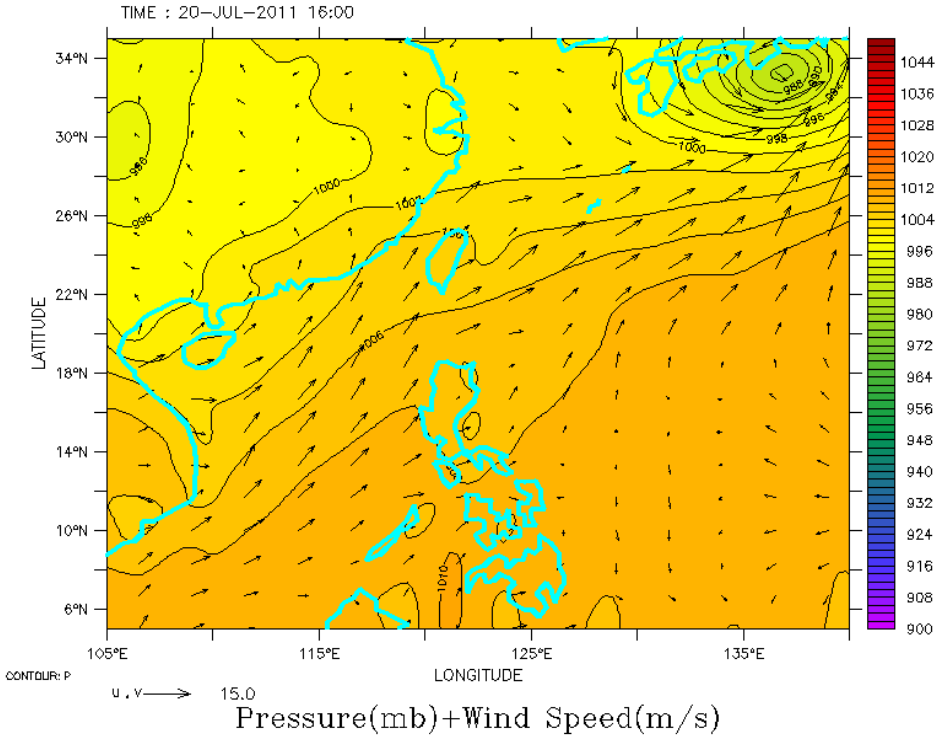


圖 3.65　夏季季風之 RC 風場氣壓分佈及風場向量圖

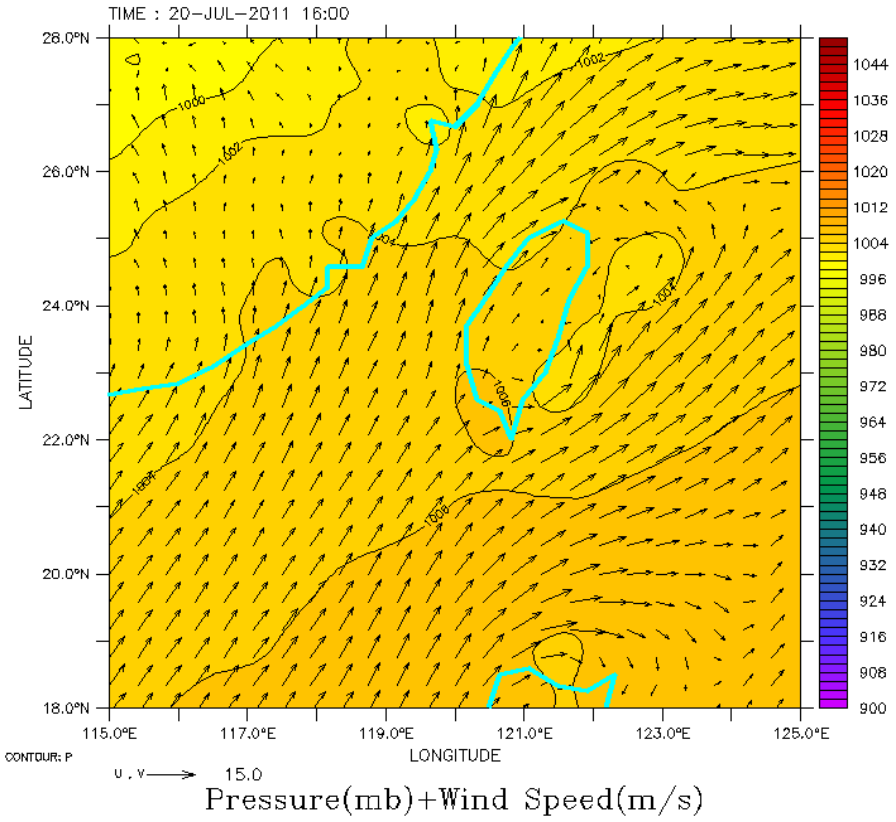


圖 3.66　夏季季風之 MC 風場氣壓分佈及風場向量圖

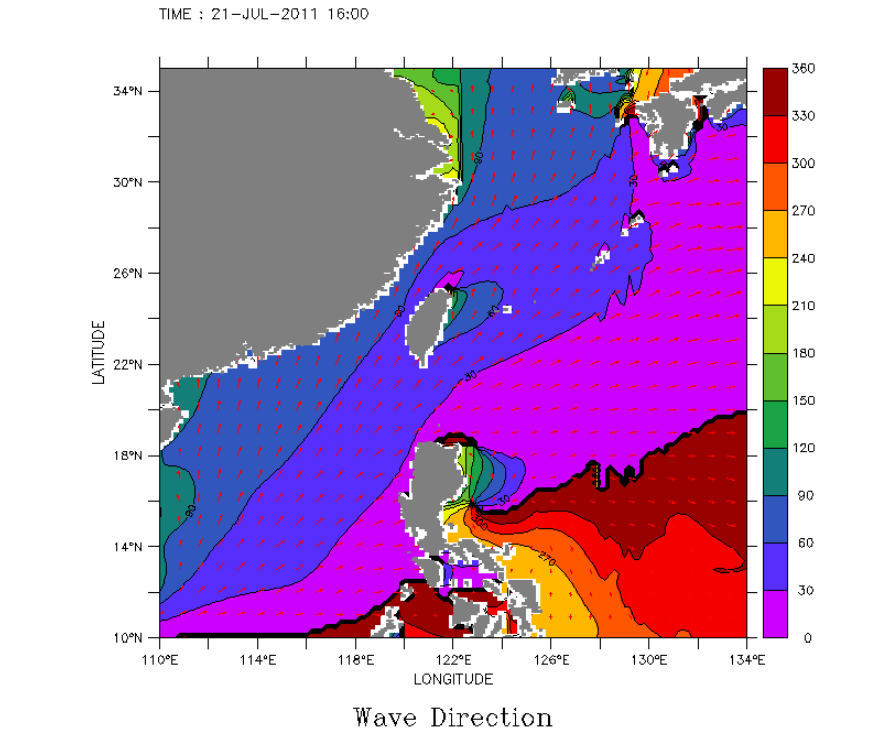


圖 3.67　夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖

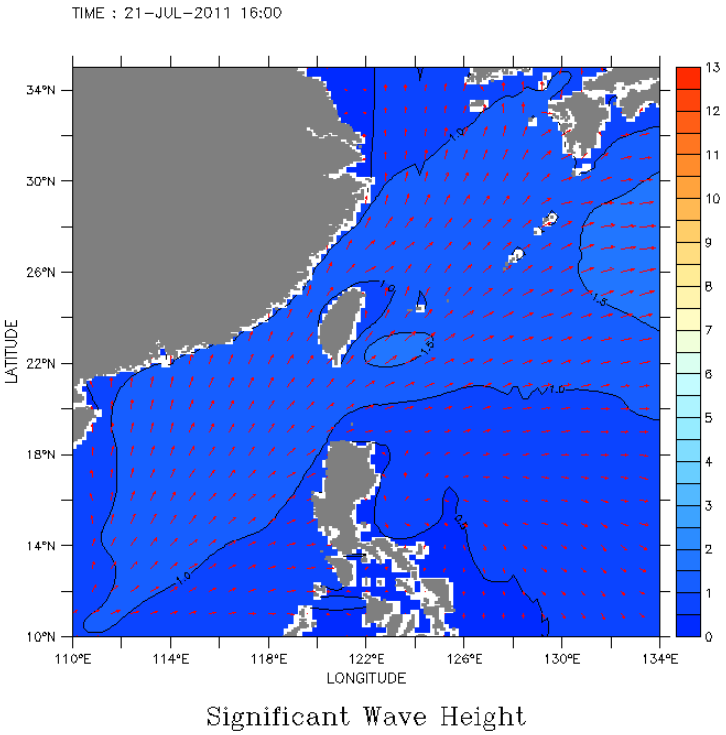


圖 3.68　夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖

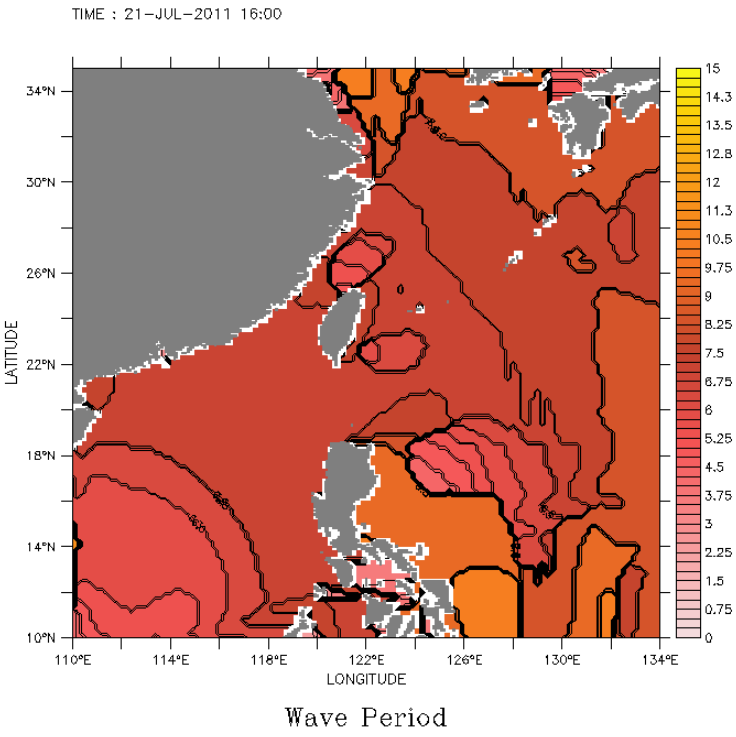


圖 3.69　夏季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖

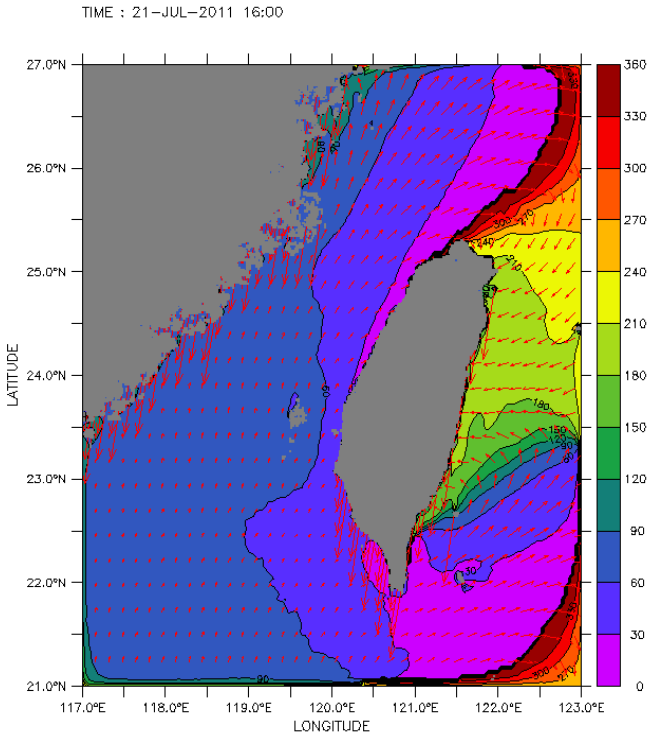


圖 3.70　夏季季風 MC 風場模擬結果之平均波向(傳播方向)分佈圖

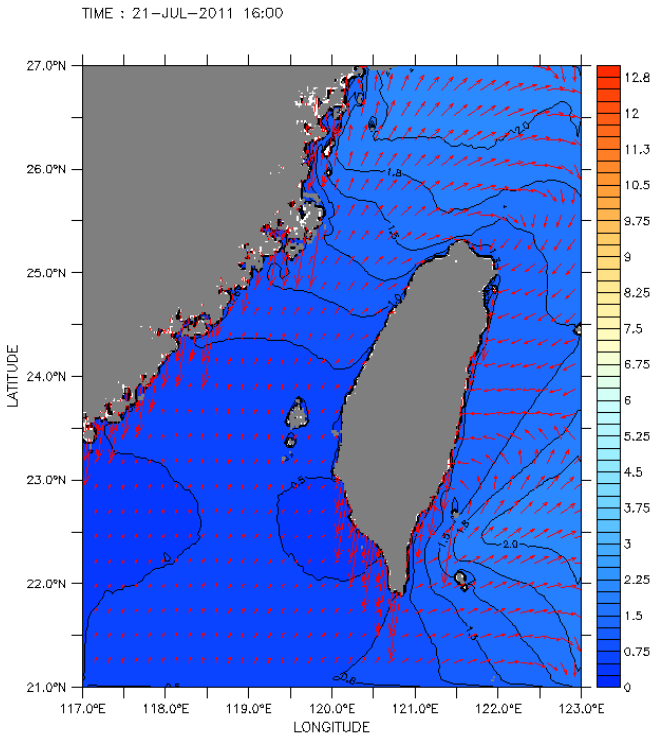


圖 3.71　夏季季風 RC 風場模擬結果之平均波高分佈圖

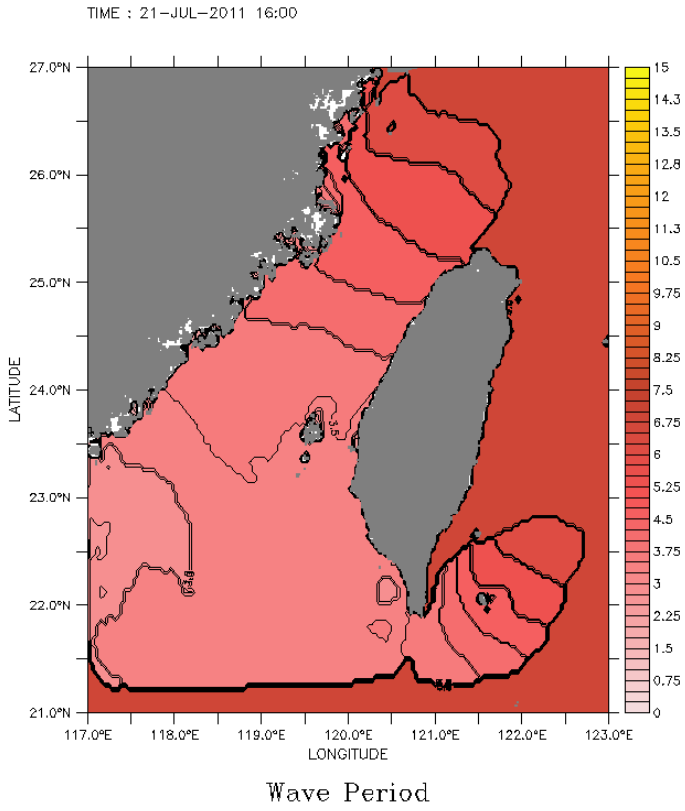


圖 3.72　夏季季風 RC 風場模擬結果之譜峰週期分佈圖

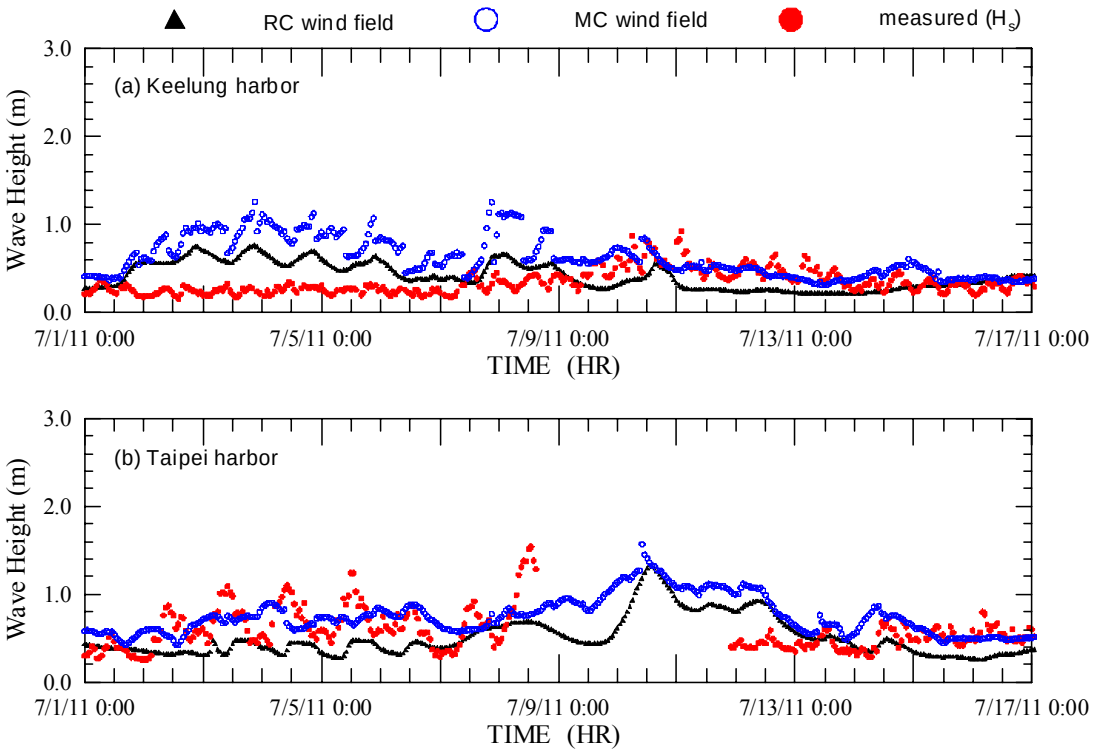


圖 3.73　夏季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波高比較

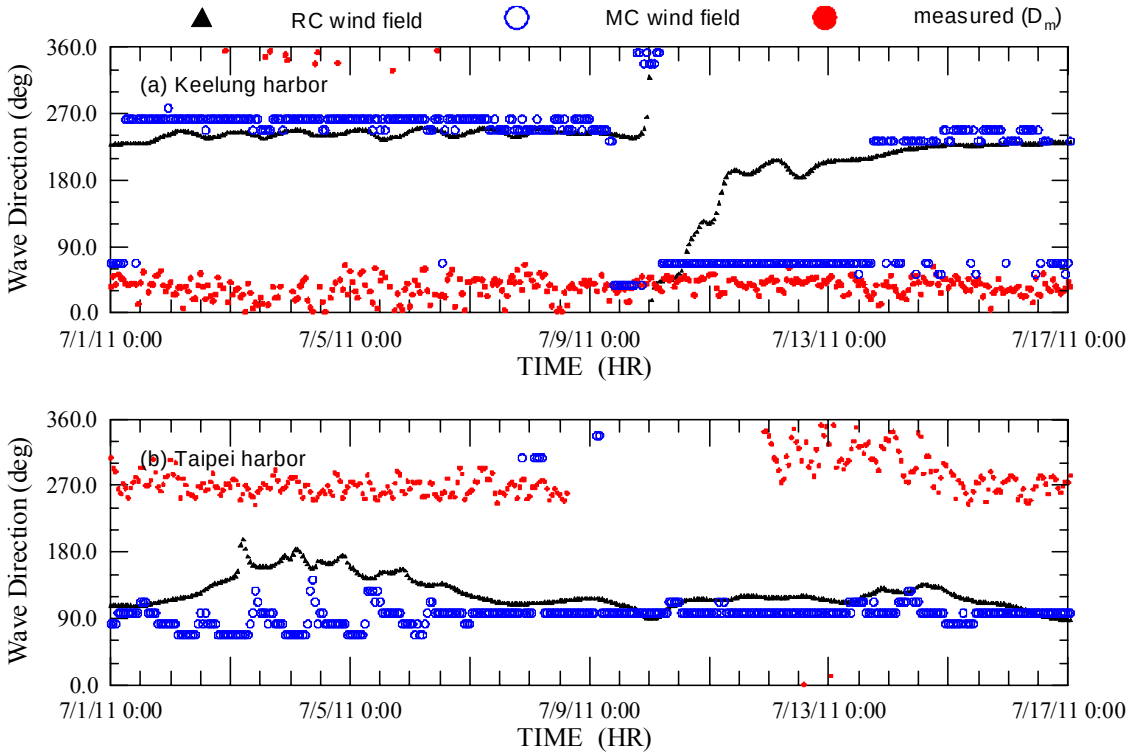


圖 3.74　夏季季風波浪場模擬結果與觀測資料之波向比較

3.4 小結

本年度為有關波浪模擬技術研究已陸續完成下列工作事項：

1.針對本計畫大尺度西太平洋風浪模式模擬結果進行檢討，並提出作業化程式修正版本，經測試初步已達到提升模式模擬結果精確性之目的。

2.擴大本計畫中尺度臺灣海域風浪模式模擬範圍至包含離島金門、馬祖等海域，並完成相關模式作業化流程之修正。

3.完成基隆港區及臺北港港區近岸風浪模擬預警子系統建置相關模式之更新工作。

4.完成基隆港及臺北港港區波浪模擬作業化預報成果評估相關之工作事項。

5.完成颱風期間基隆港及臺北港波浪預報作業化成果評估。

6.完成基隆港及臺北港長期風場與波浪場模擬結果之評估。

第四章 水動力模式及設計水位分析

4.1 前期發展及水動力模式發展主要內容

目前本所建置之「近岸海象數值模擬及預警系統」涵蓋風場、波浪、水位、流場及擴散等模擬架構。其中水位及流場模擬同屬海洋及海岸水動力模擬之範疇，其涵蓋大尺度(西太平洋海域)、中尺度(臺灣周圍海域)及小尺度(基隆港、臺北港、臺中港、安平港、高雄港、花蓮港及蘇澳港等七大港口)等三種不同空間尺度之水動力模式。其中大、中尺度水動力模式已分別於 2005 年度完成預報模擬之作業化程序，並自 2008 年由本所港灣技術研究中心持續運作與維護中。

前期計畫「臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化研究」 (2007年~2010 年)，建立七個主要商港—基隆港、臺北港、臺中港、安平港、高雄港、花蓮港、蘇澳港，及其附近海域水位及流場模式，同時針對基隆港港域水位及海流建立模擬子系統及相關設計水位分析。然而後續利用這樣的成果繼續進行流場預測，則需要繼續利用潮位站紀錄，並藉由資料分析調整數值模式邊界條件，然後提供後續預測。因此，每年仍然需要有經常性的計算和分析工作，由觀測值和預測值差異的大小，選擇需要調整的港域再進行計算。2010 年計畫除了將上年度七大商港港口水位及流場模擬成果模擬作業外，再針對基隆港水位及海流模擬子系統提出水動力修正模式,模式修正內容包括模式模擬範圍、港池外廓配置、數值計算網格及邊界條件等。計算結果除提供較精確基隆港模擬結果外，並增加風場效應對於港域水位和流場模擬結果之影響。

本期為延續前期計畫持續對七大商港港域水位和流場模擬、預測和評估進行改善，在作法上則針對個別商港港域進行即時觀測的潮流資料分析，並與模式預測結果比較，藉以檢討和修正所建立模式的計算範圍、邊界條件以及模式所使用各種參數值，除了讓數值模式預測

更為精確可靠外，也讓模式預測作業化進行更為有效快速。本年度計畫為針對基隆港和臺北港進行模式精進，本章主要內容如下：

1. 資料收集與分析

(a)地形水深資料部份—基隆港模擬範圍東西邊界分別設在龍洞及麟山鼻二潮位站附近；臺北港則北起新北市三芝區麟山鼻海岸，南至桃園縣蘆竹鄉竹圍海岸，南北距離約為 25.5 公里，離岸方向則由近岸往外海延伸約 9 公里。(b)潮位站資料則收集龍洞(LD)、麟山鼻(LSB)、淡水第二漁港、竹圍(CWE)及基隆港等驗潮站之潮位記錄，並進行潮汐資料調和分析。另外，使用 EEMD 方法分析基隆港和臺北港外海測站海流觀測資料，研究觀測資料中非天文潮流之成份流機制，如風驅流等特性。

2. 基隆港潮流模式修正

分析 2010 年氣象局潮位站資料作為基隆港潮流模式邊界條件，進行 2011 年基隆港水位和潮流預測，結果並與觀測資料比較評估。

3. 臺北港潮流模式修正

分析 2010 年氣象局潮位站資料作為臺北港潮流模式邊界條件，進行 2011 年臺北港水位和潮流預測，結果並與觀測資料比較評估。

4. 基隆港與臺北港預測結果評估

預測基隆港與臺北港 2011 年水位和潮流結果與觀測值比較並評估預測結果的好壞。

5. 對於發生在 2011 年颱風期間基隆港和臺北港水位和潮流的結果進行分析。

6. 藉由暴潮分析結果針對基隆港與臺北港之設計水位進行檢核。

4.2 資料蒐集與分析

本年度除針對基隆港及臺北港持續蒐集2010年海象觀測資料如地形水深、潮位及海流等外，另配合基隆港及臺北港小尺度水動力模式邊界條件更新之需，針對龍洞(LD)、麟山鼻(LSB)、淡水第二漁港、竹圍(CWE)及基隆港(KL)等潮位站蒐集2010年潮位觀測資料並進行潮汐分析。此外，為評估基隆港及臺北港水動力模式2011年流場模擬預測結果，亦蒐集本年度(2011年)基隆港及臺北港2月~5月海象觀測資料以及侵臺颱風資料進行相關分析與研究。

4.2.1 地形水深

基隆港和臺北港港口附近地形水深資料簡述如下：

1. 基隆港

圖4.1所示為基隆港水動力模式之模擬範圍及地形水深分布情形，東西邊界分別設在龍洞及麟山鼻二潮位站附近，圖中基隆港外海水深資料主要來自於海軍測量局出版之海軍水道圖(圖號為 0352、0353A與04513等)之數位化水深資料。由圖顯示在模擬範圍內近岸地形等深線大致與海岸線平行，離岸較遠處則以東邊水深較深。

2. 臺北港

臺北港及鄰近海域潮流流場模擬範圍(2009年)及其水深分布情形如圖4.2所示，北起新北市三芝區麟山鼻海岸，南至桃園縣蘆竹鄉竹圍海岸，南北距離約為25.5公里，離岸方向則由近岸往外海延伸約9公里。模擬範圍內水深資料主要來自於海軍測量局出版之海軍水道圖圖號04512與04513之水深資料及臺北港2007年水深量測資料。

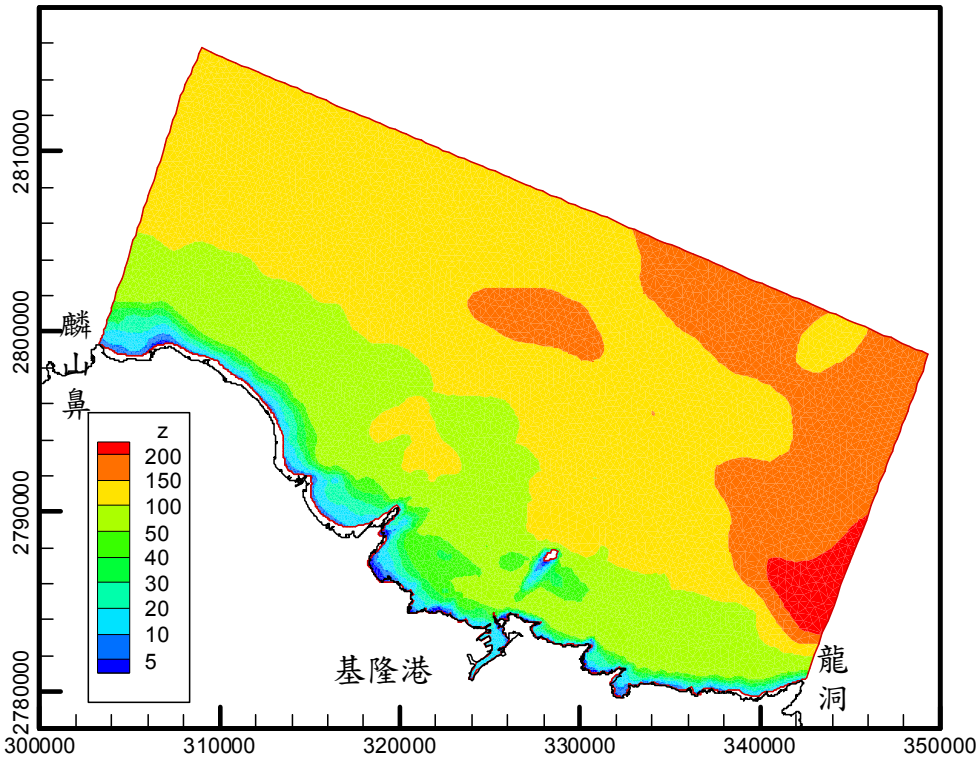


圖 4.1 基隆港模擬範圍及水深分佈圖

4.2.2 潮汐資料分析

潮汐資料之分析流程為先利用已建立的各潮位站潮汐調和分析預測模式，預測各潮位站 2010 年潮位資料，據此補遺各潮位站 2010 年觀測資料遺漏部份；之後，分別針對 2010 年觀測資料以 60 個天文分潮進行潮位調和分析，並依據調和分析結果更新 2010 年潮位補遺資料；最後，依據更新資料再進行 2010 年潮位潮位調和分析。

同時為了提升基隆港及臺北港水動力模式模擬結果之準確性，模式之邊界條件有其更新之必要性，針對上述各潮位站補遺後之潮位資料選取 2009 及 2010 年潮位資料(17280 筆)另進行潮汐調和分析以更新模式水位邊界條件預測值；在分潮數之篩選方面，本年度捨棄以往僅選取主要全日潮(O_1、K_1)及半日潮(N_2、M_2、S_2)之作法，改選擇與潮汐模式 Nao99b 相同之分潮數共 34 個，經潮汐調和分析分別得到各潮位站平均水位及 34 個分潮之調和常數(分潮振幅及相位角)，如表 4-1 至

表 4-5 所示。表 4-1 至表 4-5 所示分別為龍洞、麟山鼻、淡水第二漁港、竹圍及基隆港等潮位站 2009 年及 2010 年潮位資料之調和分析結果，依據表中各潮位站全日潮(O_1 及 K_1)及半日潮(M_2 及 S_2)振幅計算潮型指標，即$(O_1+K_1)/(M_2+S_2)$，分別為 1.18(龍洞)、0.44(麟山鼻)、0.32(淡水第二漁港)、0.25(竹圍)及 1.22(基隆港)，顯示麟山鼻、淡水第二漁港、竹圍等地潮汐型態屬於半日潮型(指標值<0.5)，龍洞及基隆港屬於偏向全日潮之混合潮型(0.5<指標值<1.25)。

有關龍洞、麟山鼻、竹圍及淡水第二漁港等四潮位站 2009 年至 2010 年潮位觀測資料與調和分析結果之比較，詳列於附錄 II。

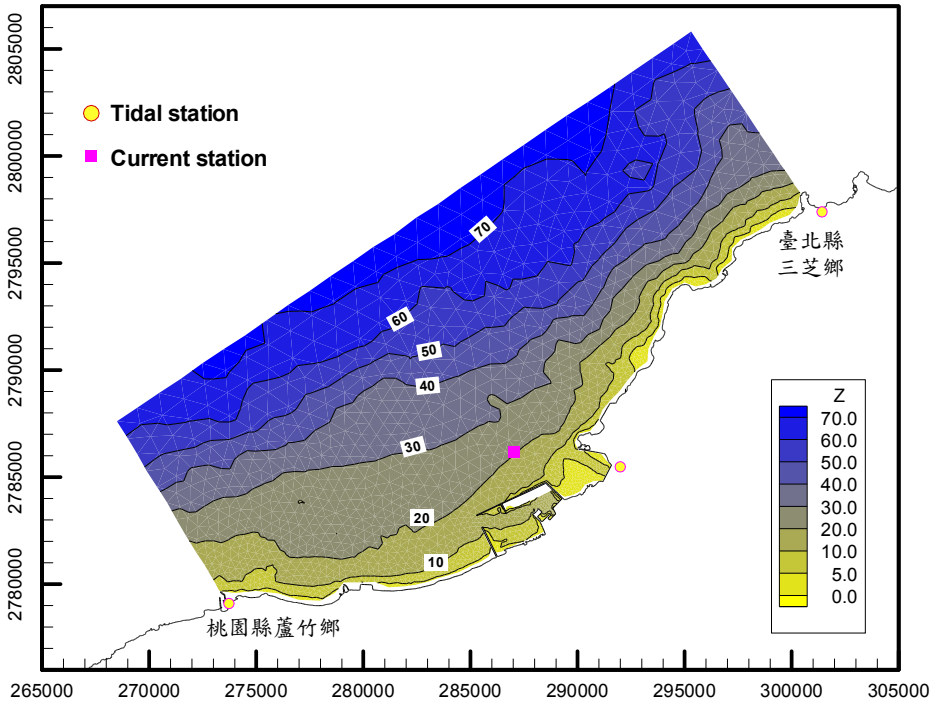


圖 4.2 臺北港模擬範圍與水深分佈圖

表 4-1 龍洞驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)	分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)
SA	0.04106860	0.1587	217.7931	NU2	28.51258278	0.0080	292.4660
SAA	0.08213730	0.0142	100.6015	OP2	28.90196609	0.0030	69.0474
MM	0.54437470	0.0084	240.2797	M2	28.98410416	**0.2196**	247.6665
MSF	1.01589584	0.0116	233.0905	LAM2	29.45562553	0.0037	185.6906
MF	1.09803307	0.0026	134.8018	L2	29.52847862	0.0023	279.3282
Q1	13.39866066	0.0363	187.4592	T2	29.95893288	0.0068	241.0861
RO1	13.47151470	0.0077	243.2952	S2	30.00000000	**0.1062**	256.8777
O1	13.94303513	**0.1759**	230.8568	K2	30.08213806	0.0330	32.4283
M1	14.49202538	0.0133	159.2548	2SM2	31.01589584	0.0032	302.1421
P1	14.95893097	0.0658	243.2419	M3	43.47615814	0.0072	229.4090
K1	15.04106903	**0.2084**	218.8406	MK3	44.02517319	0.0029	338.5745
J1	15.58544350	0.0131	259.7315	MN4	57.42383194	0.0055	312.8898
SO1	16.05696487	0.0033	268.9263	M4	57.96820831	0.0129	6.0114
OO1	16.13910103	0.0076	33.0429	MS4	58.98410416	0.0079	23.5804
MNS2	27.42383385	0.0041	122.5537	MK4	59.06624222	0.0028	165.5796
MU2	27.96820450	0.0211	179.5623	M6	86.95231628	0.0048	354.7995
N2	28.43972969	0.0547	210.7118	2MS6	87.96820831	0.0048	43.5750
平均潮位＝0.0252m 資料時間： 2009/12/31 23:00:00							

表 4-2 麟山鼻驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)	分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)
SA	0.04106860	0.1608	214.9927	NU2	28.51258278	0.0388	3.9553
SAA	0.08213730	0.0112	96.3816	OP2	28.90196609	0.0113	73.2549
MM	0.54437470	0.0239	226.8743	M2	28.98410416	**0.7544**	345.7213
MSF	1.01589584	0.0463	217.0507	LAM2	29.45562553	0.0214	182.2406
MF	1.09803307	0.0084	343.5113	L2	29.52847862	0.0404	245.5791
Q1	13.39866066	0.0417	201.8952	T2	29.95893288	0.0135	11.3198
RO1	13.47151470	0.0102	257.3155	S2	30.00000000	**0.2077**	16.8201
O1	13.94303513	**0.1991**	247.0362	K2	30.08213806	0.0635	157.3915
M1	14.49202538	0.0148	176.7822	2SM2	31.01589584	0.0100	294.0887
P1	14.95893097	0.0711	261.8158	M3	43.47615814	0.0067	197.0533
K1	15.04106903	**0.2257**	236.7334	MK3	44.02517319	0.0099	262.4522
J1	15.58544350	0.0143	281.5361	MN4	57.42383194	0.0284	253.5686
SO1	16.05696487	0.0066	303.6068	M4	57.96820831	0.0754	306.5217
OO1	16.13910103	0.0088	54.0921	MS4	58.98410416	0.0515	339.3650
MNS2	27.42383385	0.0112	76.5087	MK4	59.06624222	0.0155	118.7650
MU2	27.96820450	0.0411	142.5481	M6	86.95231628	0.0029	73.8085
N2	28.43972969	0.1541	290.7045	2MS6	87.96820831	0.0050	125.0754
平均潮位＝-0.0292m							
資料時間： 2009/12/31 23:00:00							

表 4-3 淡水第二漁港驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)	分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)
SA	0.04106860	0.1698	220.7479	NU2	28.51258278	0.0538	359.3639
SAA	0.08213730	0.0118	119.5338	OP2	28.90196609	0.0246	122.4741
MM	0.54437470	0.0077	230.3078	M2	28.98410416	**1.0331**	349.0552
MSF	1.01589584	0.0103	224.5444	LAM2	29.45562553	0.0305	183.9513
MF	1.09803307	0.0015	203.1748	L2	29.52847862	0.0527	239.6765
Q1	13.39866066	0.0415	205.1361	T2	29.95893288	0.0177	44.8812
RO1	13.47151470	0.0106	250.8770	S2	30.00000000	**0.3007**	23.1156
O1	13.94303513	**0.1959**	251.1925	K2	30.08213806	0.0879	158.9597
M1	14.49202538	0.0132	178.2302	2SM2	31.01589584	0.0125	288.8379
P1	14.95893097	0.0693	266.1336	M3	43.47615814	0.0047	196.1587
K1	15.04106903	**0.2266**	241.5040	MK3	44.02517319	0.0055	336.3207
J1	15.58544350	0.0132	288.6123	MN4	57.42383194	0.0098	278.0670
SO1	16.05696487	0.0043	336.2002	M4	57.96820831	0.0235	323.7901
OO1	16.13910103	0.0087	60.2596	MS4	58.98410416	0.0167	349.9696
MNS2	27.42383385	0.0130	55.4848	MK4	59.06624222	0.0048	128.6721
MU2	27.96820450	0.0527	131.6360	M6	86.95231628	0.0024	312.6112
N2	28.43972969	0.2059	295.7611	2MS6	87.96820831	0.0019	86.8515
平均潮位＝0.0219m 資料時間： 2009/12/31 23:00:00							

表 4-4 竹圍驗潮站 2009-2010 年潮汐資料調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)	分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)
SA	0.04106860	0.1647	217.9676	NU2	28.51258278	0.0605	7.0106
SAA	0.08213730	0.0141	129.2947	OP2	28.90196609	0.0169	71.9780
MM	0.54437470	0.0104	237.9388	M2	28.98410416	**1.1990**	349.9297
MSF	1.01589584	0.0155	220.3415	LAM2	29.45562553	0.0307	177.5407
MF	1.09803307	0.0018	172.1804	L2	29.52847862	0.0621	239.6052
Q1	13.39866066	0.0418	208.4943	T2	29.95893288	0.0215	24.5366
RO1	13.47151470	0.0098	261.4684	S2	30.00000000	**0.3540**	24.2592
O1	13.94303513	**0.2007**	253.3174	K2	30.08213806	0.1065	164.3210
M1	14.49202538	0.0148	178.6469	2SM2	31.01589584	0.0140	293.5280
P1	14.95893097	0.0738	267.5649	M3	43.47615814	0.0037	181.9338
K1	15.04106903	**0.2329**	243.7161	MK3	44.02517319	0.0066	358.0227
J1	15.58544350	0.0135	290.6343	MN4	57.42383194	0.0079	238.2412
SO1	16.05696487	0.0047	325.7839	M4	57.96820831	0.0214	291.5018
OO1	16.13910103	0.0084	69.4712	MS4	58.98410416	0.0161	325.2939
MNS2	27.42383385	0.0165	58.1164	MK4	59.06624222	0.0049	95.1232
MU2	27.96820450	0.0586	129.0522	M6	86.95231628	0.0033	248.2873
N2	28.43972969	0.2353	296.7553	2MS6	87.96820831	0.0021	245.0973

平均潮位＝0.0536m

資料時間： 2009/12/31 23:00:00

表 4-5 基隆港驗潮站 2010 年潮汐資料調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)	分潮名稱	角頻率(度/小時)	振幅(m)	位相角(度)
SA	0.04106860	0.1554	41.8283	NU2	28.51258278	0.0155	12.9752
SAA	0.08213730	0.0164	135.2293	OP2	28.90196609	0.0036	205.0630
MM	0.54437470	0.0072	46.1156	M2	28.98410416	**0.2323**	81.9975
MSF	1.01589584	0.0117	27.3834	LAM2	29.45562553	0.0053	28.9450
MF	1.09803307	0.0027	199.3791	L2	29.52847862	0.0142	173.5338
Q1	13.39866066	0.0348	186.2579	T2	29.95893288	0.0025	130.4641
RO1	13.47151470	0.0079	291.7747	S2	30.00000000	**0.0587**	311.4169
O1	13.94303513	**0.1623**	6.2033	K2	30.08213806	0.0163	83.5732
M1	14.49202538	0.0162	40.0794	2SM2	31.01589584	0.0047	180.7879
P1	14.95893097	0.0593	249.9501	M3	43.47615814	0.0059	232.4740
K1	15.04106903	**0.1939**	223.9487	MK3	44.02517319	0.0024	76.6393
J1	15.58544350	0.0105	26.8070	MN4	57.42383194	0.0045	74.3936
SO1	16.05696487	0.0031	185.8758	M4	57.96820831	0.0109	251.3064
OO1	16.13910103	0.0081	265.1652	MS4	58.98410416	0.0080	139.7481
MNS2	27.42383385	0.0091	214.4274	MK4	59.06624222	0.0029	270.0384
MU2	27.96820450	0.0273	72.6706	M6	86.95231628	0.0037	9.1341
N2	28.43972969	0.0565	252.1074	2MS6	87.96820831	0.0028	307.1370
平均潮位＝0.0564m 資料時間： 2010/07/02 11:00:00							

4.2.3 潮流資料分析

為瞭解基隆港與臺北港港口潮流之特性及提供各港口流場模擬之驗証所需資料，將針對本年度(2011 年)海流觀測資料進行分析與探討。

一般而言，海流觀測資料之主要組成成份包括恆流、潮流及區域性風吹流等，三者組成之強弱比率則視海域之特性及季節而定。潮流通常是指由潮汐漲退所引起的海洋水體週期性往復流動之現象，而潮流之強弱不僅會隨著月齡之不同而有所變化外，其流速大小及方向亦受到海底地形之影響，因此潮流現象各地區不同。本年度潮流資料分析除了延續上年度潮流資料分析方法，選取全日潮(O_1、K_1)及半日潮(M_2、S_2)等四個主要分潮針對觀測資料逐月進行調和分析，求取各分潮東西向及南北向之流速振幅及其相位角外，針對本年度基隆港及臺北港 2~5 月水位及海流觀測資料相關分析結果說明如下：

1. 基隆港

針對基隆港外海測站資料選取 2011 年 2 月 18 日至 2011 年 5 月 31 日之水位及海流觀測資料，如圖 4.3 所示，先針對觀測資料以快速傅利葉轉換(FFT)進行能譜分析，圖 4.4 至圖 4.6 所示分別為基隆港外海測站之水位、東西向(EW)及南北向(EW)速度之能譜圖，其中橫座標為時頻率(1/hr)，結果顯示基隆港天文潮水位變化主要以全日潮(O_1、K_1)及半日潮(M_2、S_2)為主，其中全日潮 O_1、K_1 及半日潮 M_2 之能量大小相當；潮流能量則以半日潮 M_2 為主(此與水位能譜有顯著差異性)，其次依序分別為半日潮 S_2、1/4 日潮(M_4)及全日潮(O_1、K_1)。此外，由圖 4.3 水位與東西向速度歷線圖發現觀測點水位之高、低潮位發生時間與向東(退潮)、向西(漲潮)最大流速發生之時間近乎同步，針對此一特有現象推測應與 1/4 日潮(M_4)能量佔顯著比例有關。此外，東西向流速能譜亦顯示週期較長之半月潮對基隆港外海潮流佔有一定程度之影響。

為瞭解基隆港外海潮流主要分潮之流速大小，依能譜分析結果選取全日潮(O_1、K_1)、半日潮(M_2、S_2)、1/4 日潮(M_4)以及長週期半月潮(M_f)等 6 個分潮分別對東西向及南北向流速觀測資料進行分潮流速調和分析，得到各分潮流速之振幅及相位角如表 4-6 所示。由潮流調和分析結果顯示基隆港外海測站潮流東西向分量大於南北向分量接近一個等級(order)，其中東西向平均流速約為 5.7cm/s。圖 4.7 所示為海流觀測資料與潮流調和分值之比較，圖中圓點代表海流觀測資料，實線代表上述 6 個天文分潮流速之調和分析預測值。由東西向流速比較結果得知在漲退潮週期變化之間向東(退潮)之流速觀測值有明顯大於調和分析預測之流速值之現象，且以 3 月至 4 月上旬之觀測資料最為顯著；推測若非儀器觀測上受到外在因素影響所產生的現象，則極可能與局部地形以及東防波堤延伸有關，且此種流速單一方向變大的變化已非傳統的調和分析方法可以預測。

表 4-6 基隆港 2011 年天文潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	EW		NS	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
Mf	1.09803307	0.0202	176.023	0.0050	238.129
O1	13.94303513	0.0138	214.628	0.0098	176.778
K1	15.04106903	0.0119	254.520	0.0045	24.254
M2	28.98410416	0.1735	127.936	0.0508	122.266
S2	30.00000000	0.0690	340.406	0.0171	336.968
M4	57.96820831	0.0217	197.145	0.0158	33.125
平均流速		0.0574 m/s		0.0081 m/s	
觀測資料時間		2011/002/18 00:00 ~ 2011/05/31 22:00			
原點時間		2011/04/10 11:00			

2. 臺北港

針對臺北港選取 2011 年 2 月 24 日至 2011 年 5 月 3 日之水位及海流觀測資料，如圖 4.8 所示，先針對觀測資料以快速傅利葉轉換(FFT)進行能譜分析，圖 4.9 至圖 4.10 所示分別為臺北港外海海流東西向(EW)及南北向(EW)速度之能譜圖，其中橫座標為時頻率(1/hr)，結果顯示臺北港天文潮流能量分布以半日潮 M_2 為主，其次為半日潮 S_2，其他次要分潮能量包括全日潮(O_1、K_1)、1/4 日潮及 1/6 日潮等。有鑑於此，選取半日潮(M_2、S_2)、全日潮(O_1、K_1)、1/4 日潮(M_4)、1/6 日潮以及長週期之半月潮等 8 個分潮分別對東西向及南北向流速觀測資料進行分潮流速調和分析，得到各分潮流速之振幅及相位角如表 4-7 所示，其中東西向平均流速為-1.76 cm/s，南北向平均流速為 4.66 cm/s。圖 4.12 所示為臺北港海流觀測資料與潮流調和分值之比較，圖中圓點代表海流觀測資料，實線為表 4-7 潮流調和分析結果之預測值，顯示二者流速大小及變化趨勢相當接近，代表臺北港外海海流主要以潮流為主。

表 4-7 臺北港 2011 年天文潮流調和分析成果表

分潮名稱	角頻率(度/小時)	EW		NS	
		振幅(m/s)	位相角(度)	振幅(m/s)	位相角(度)
Mf	1.09803307	0.0307	126.036	0.0203	116.546
O1	13.94303513	0.0242	108.777	0.0154	132.279
K1	15.04106903	0.0340	16.793	0.0124	33.806
M2	28.98410416	0.4931	270.182	0.3090	281.576
S2	30.00000000	0.1798	45.236	0.1034	47.380
M4	57.96820831	0.0491	265.162	0.0198	184.741
MK4	59.06624222	0.0319	61.289	0.0148	308.470
2MS6	87.96820831	0.0215	69.485	0.0122	201.710
平均流速		-0.0176 m/s		0.0466 m/s	
觀測資料時間		2011/002/24 12:00 ~ 2011/05/03 11:00			
原點時間		2011/03/30 12:00			

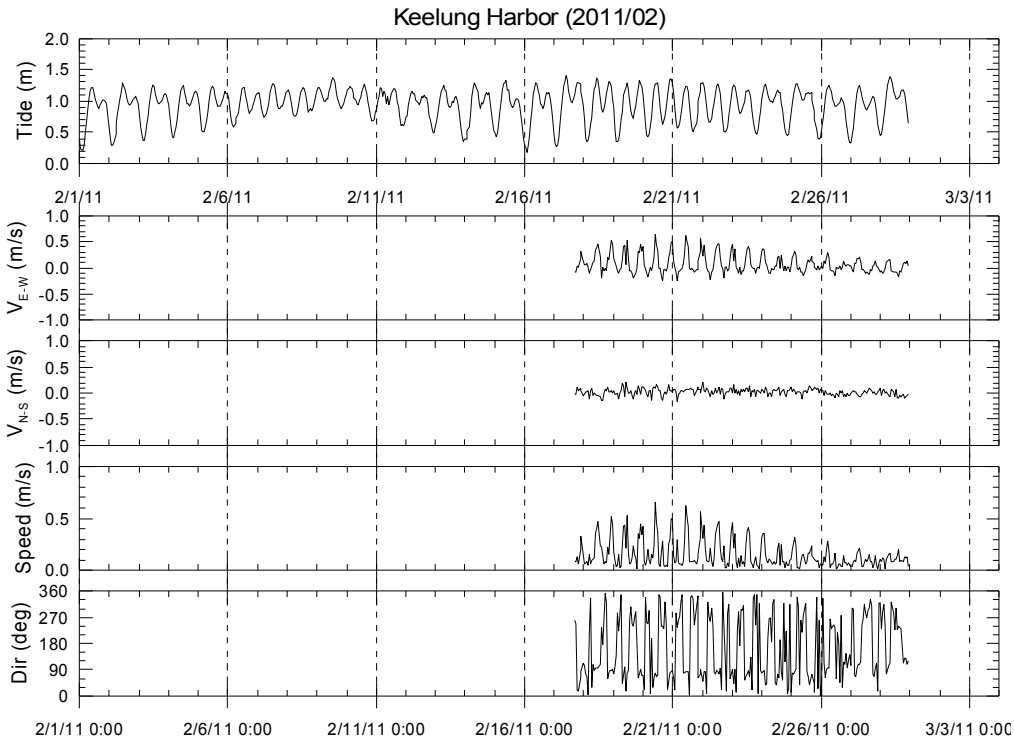


圖 4.3 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

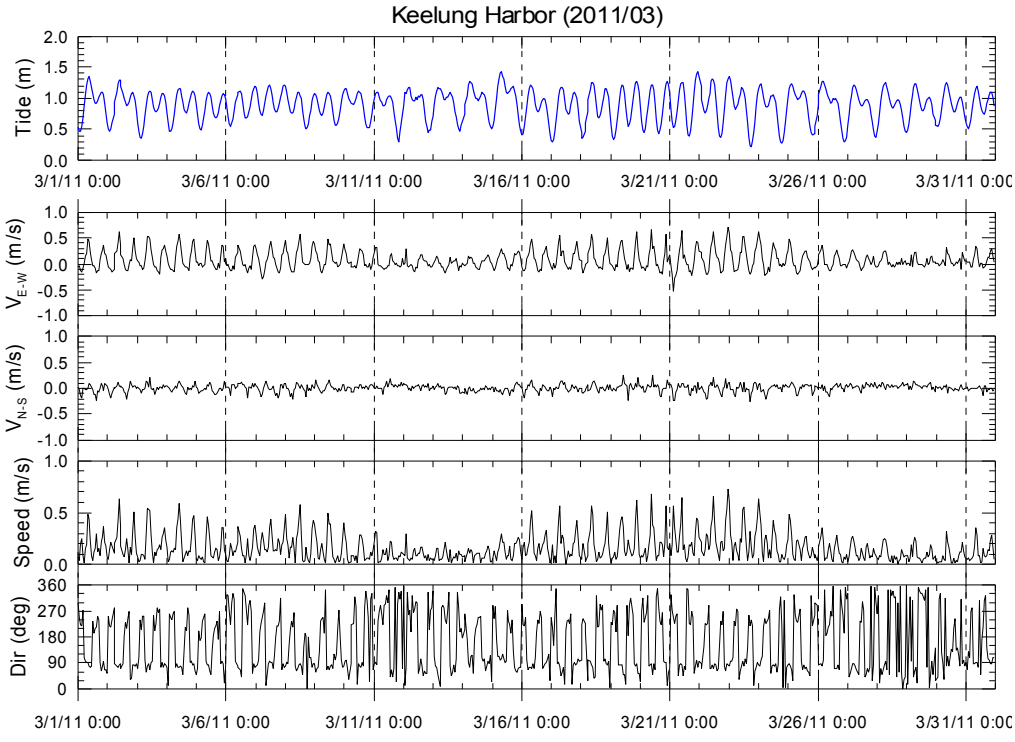


圖 4.3(續 1) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

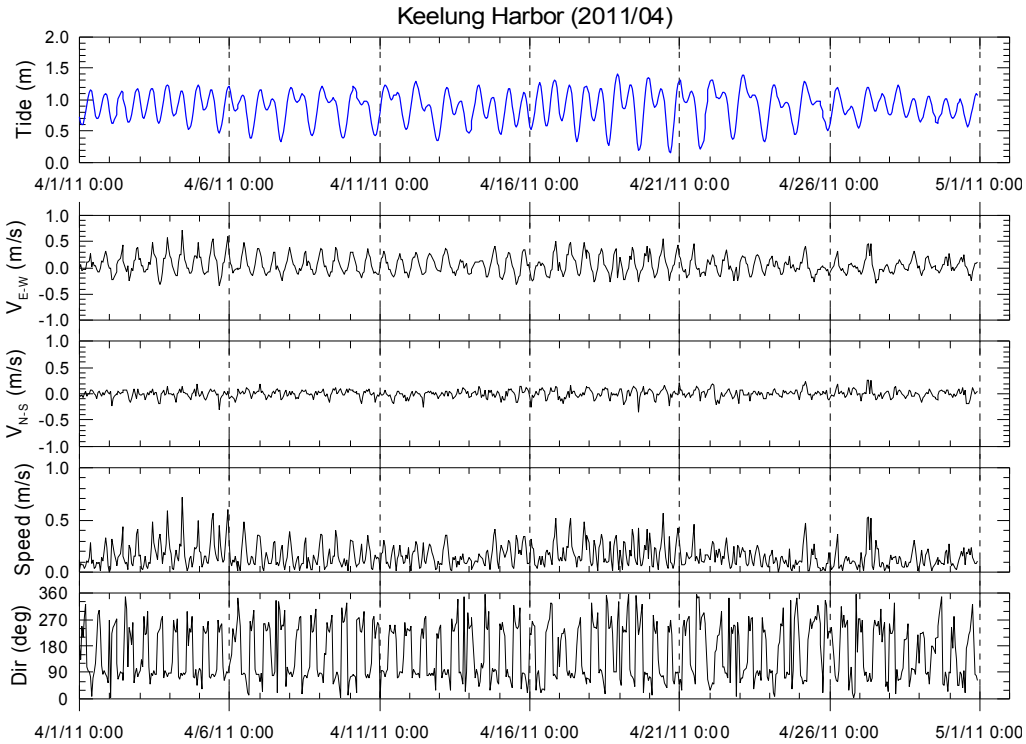


圖 4.3(續 2) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

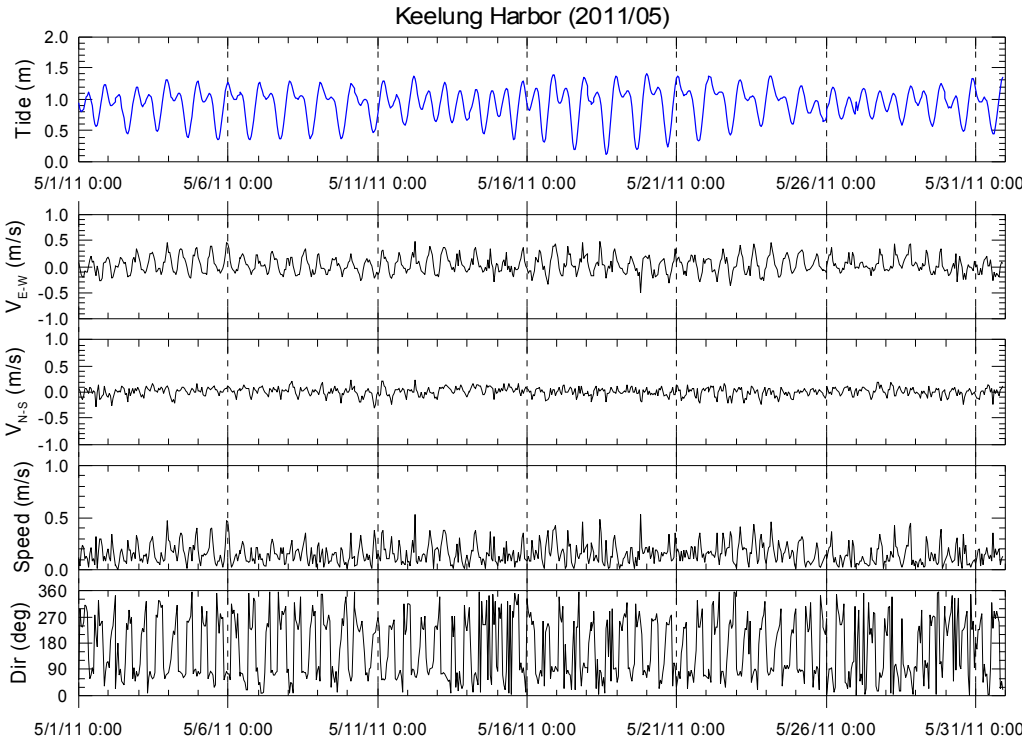


圖 4.3(續 3) 基隆港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

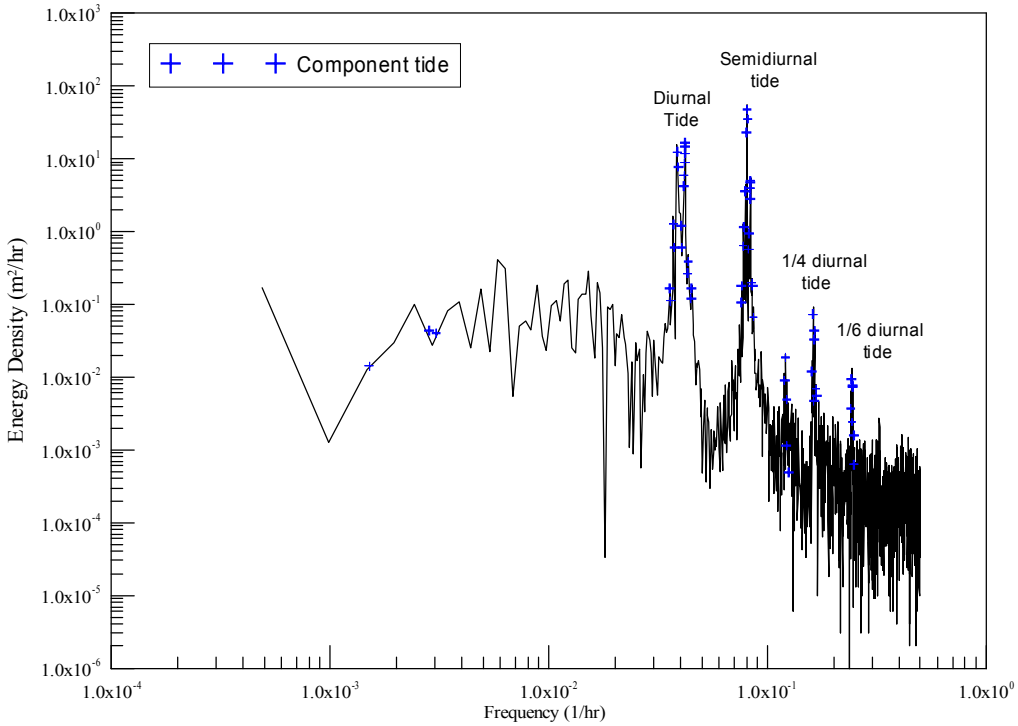


圖 4.4 基隆港水位觀測資料頻譜分析結果(2011/02/18~05/31)

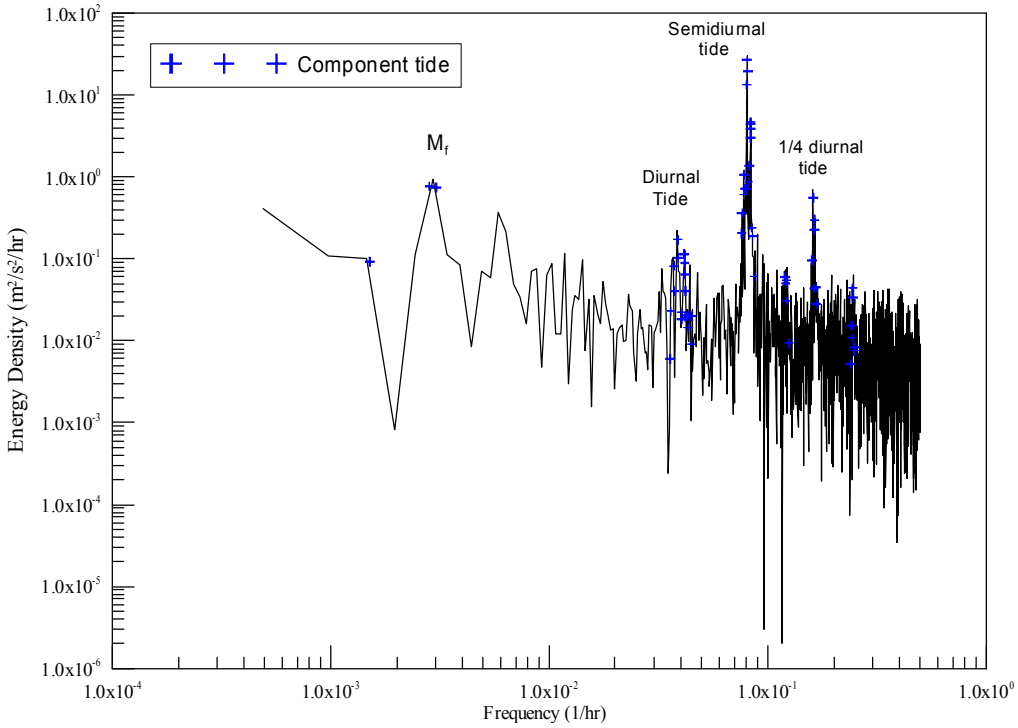


圖 4.5 基隆港海流觀測資料 E-W 方向分量頻譜分析結果 (2011/02/18~05/31)

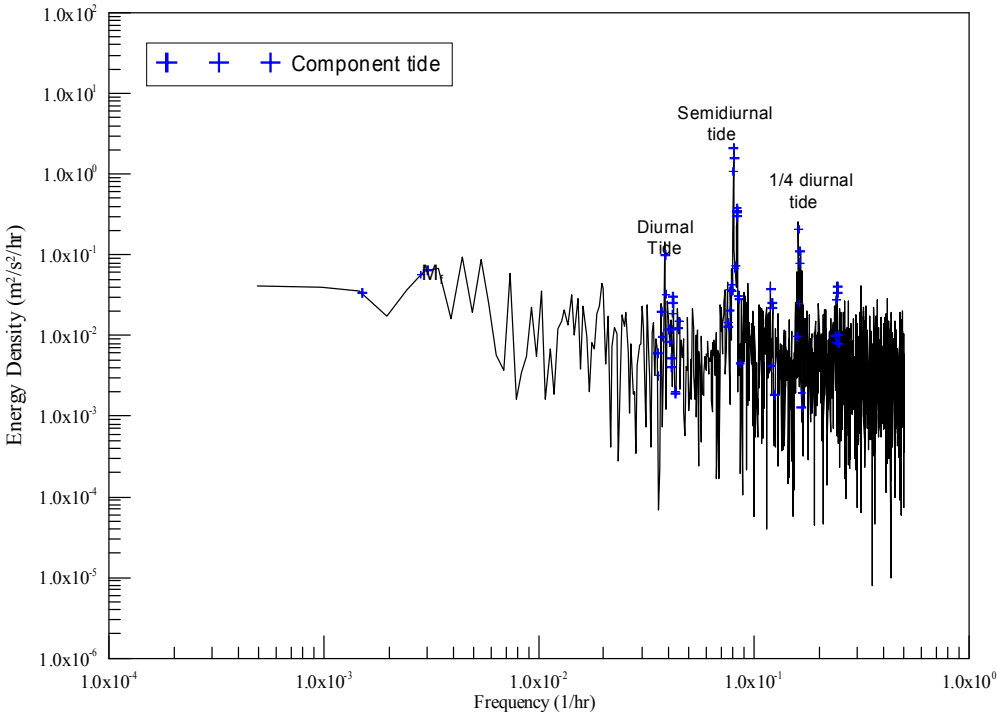


圖 4.6 基隆港海流觀測資料 N-S 方向分量頻譜分析結果 (2011/02/18~05/31)

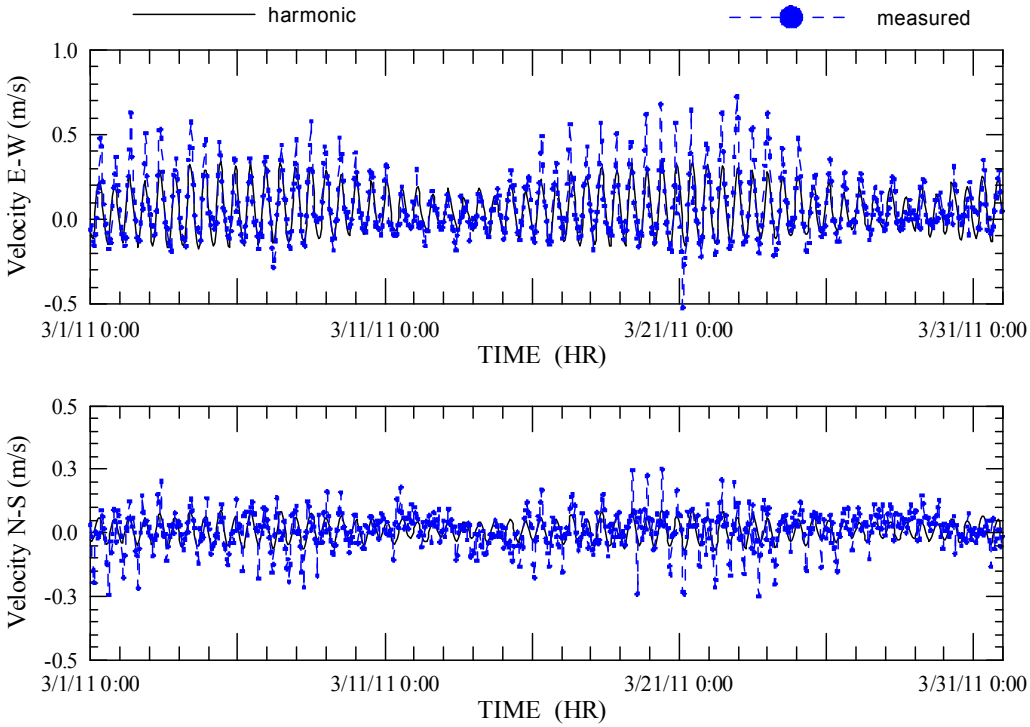


圖 4.7 基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較

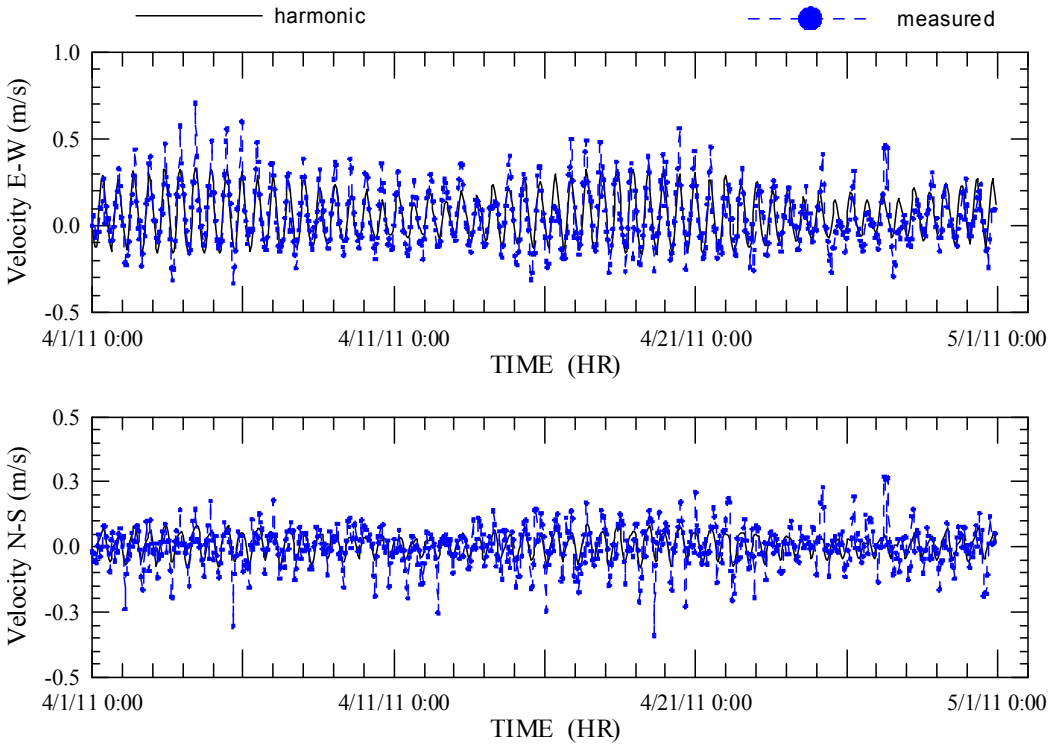


圖 4.7(續 1) 基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較

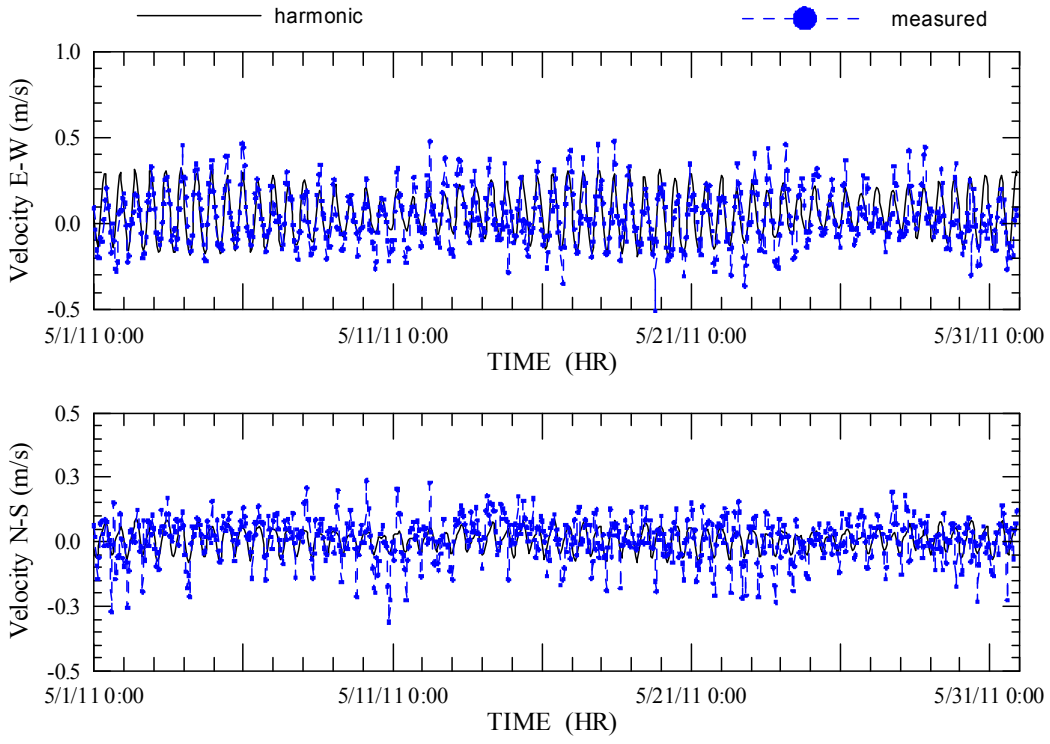


圖 4.7(續 2) 基隆港 2011 年海流觀測資料與潮流調和分析結果之比較

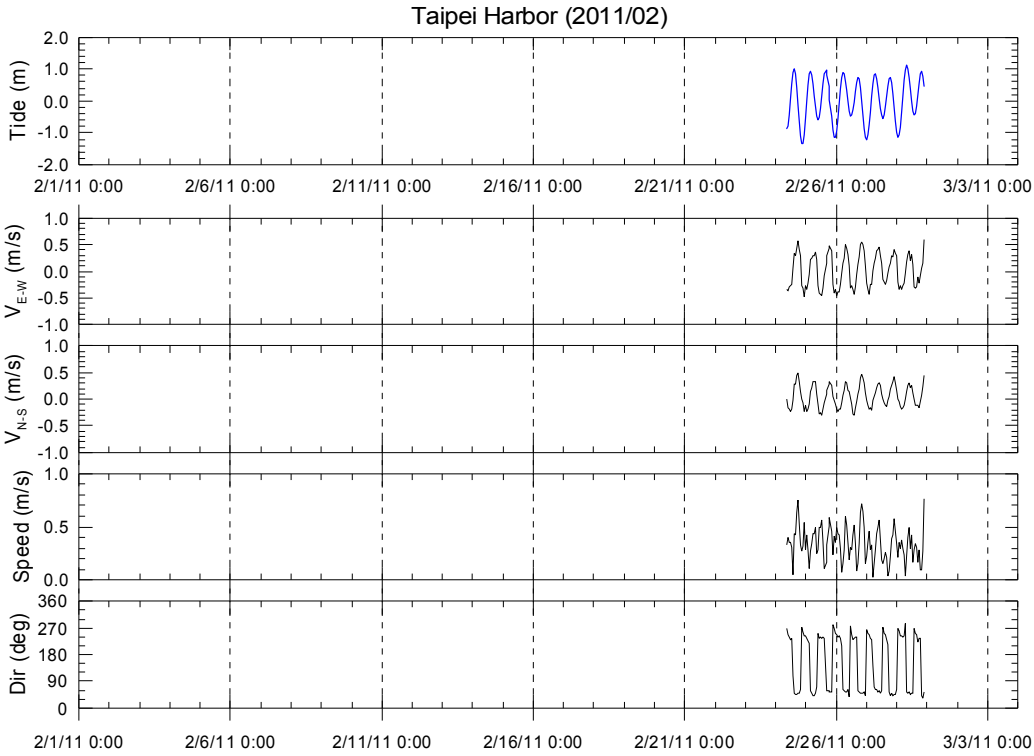


圖 4.8 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

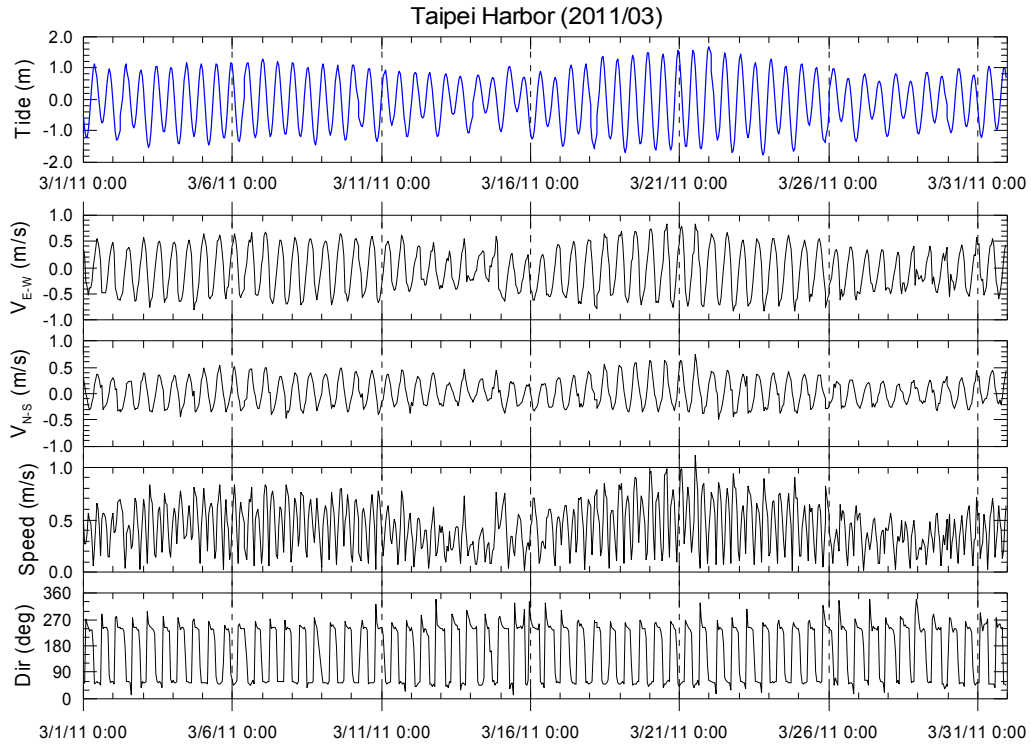


圖 4.8(續 1) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

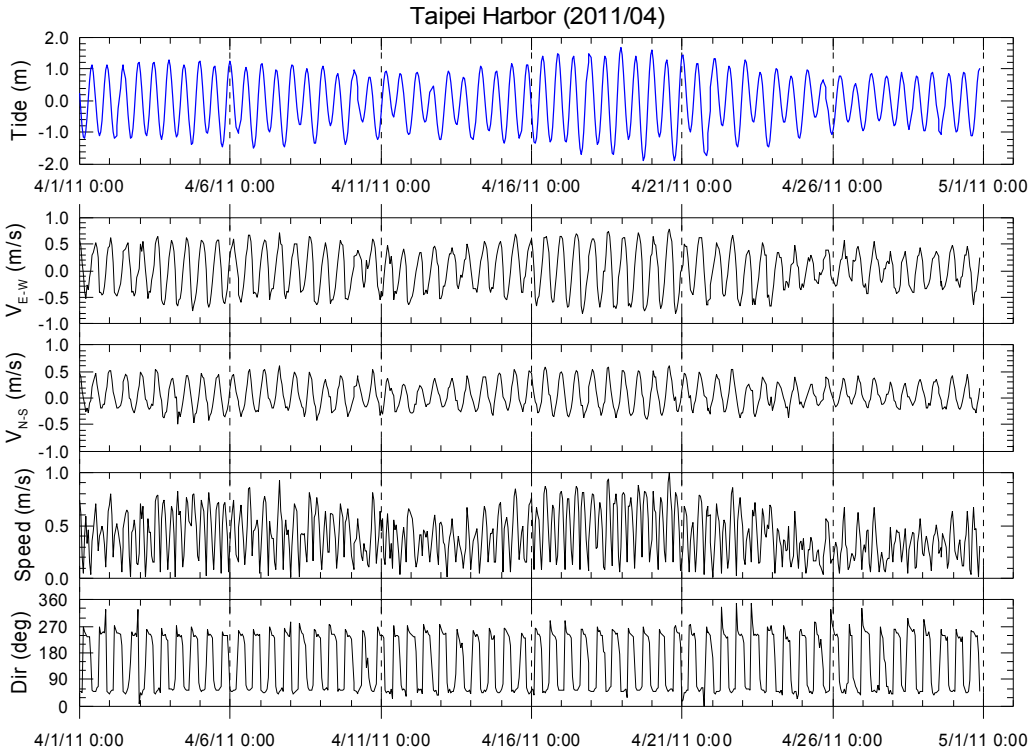


圖 4.8(續 2) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

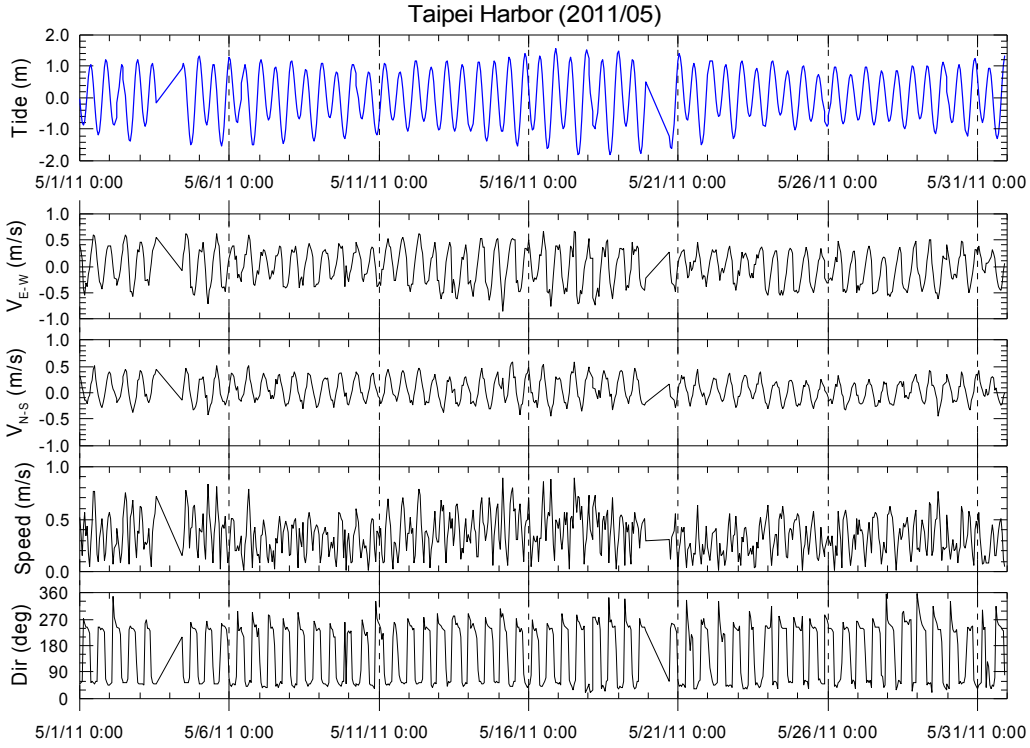


圖 4.8(續 3) 臺北港 2011 年水位、海流觀測資料時序列歷線圖

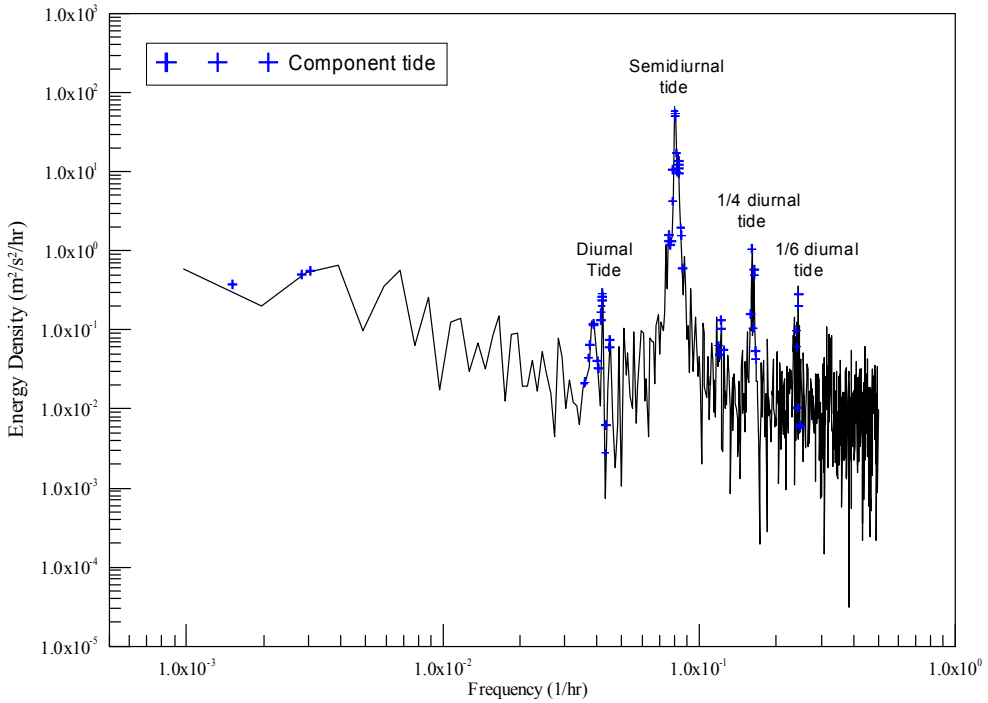


圖 4.9 臺北港海流觀測資料 E-W 方向分量頻譜分析結果 (2011/02/24~05/03)

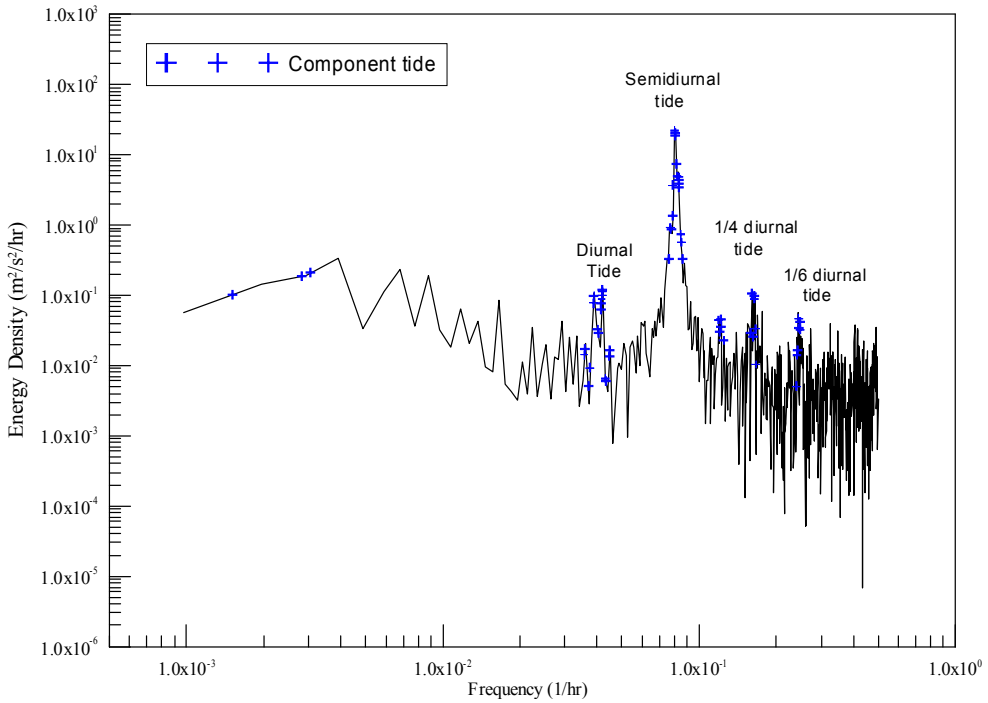


圖 4.10 臺北港海流觀測資料 N-S 方向分量頻譜分析結果 (2011/02/24~05/03)

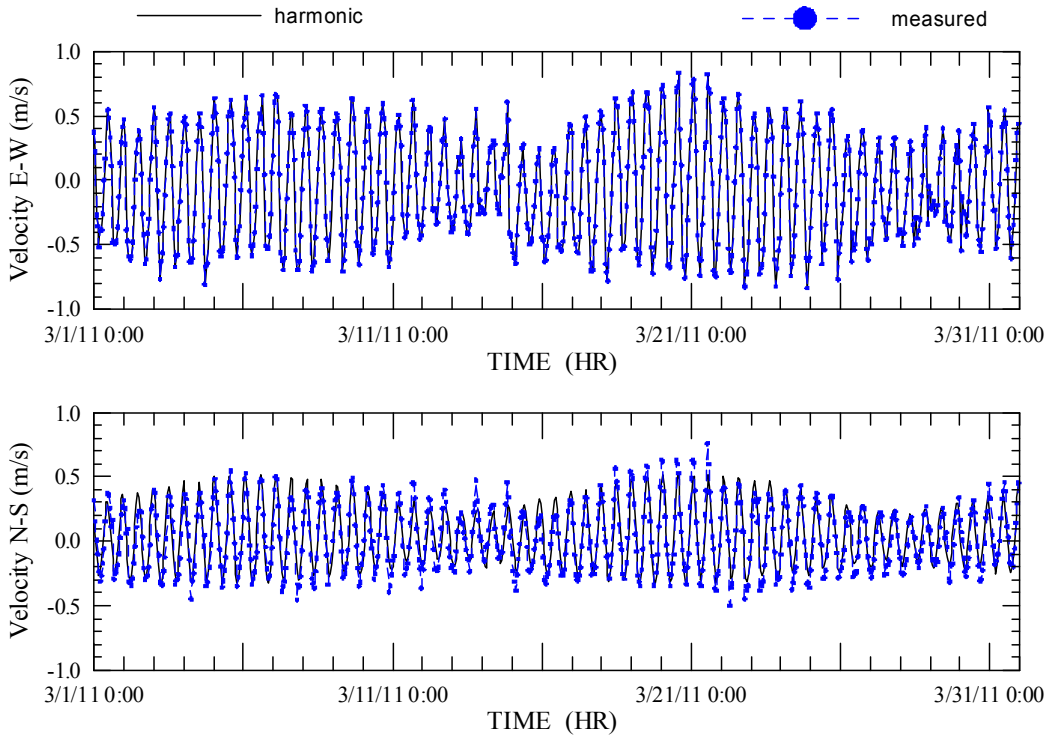


圖 4.11 臺北港 2011 年海流觀測資料與調和分析結果之比較

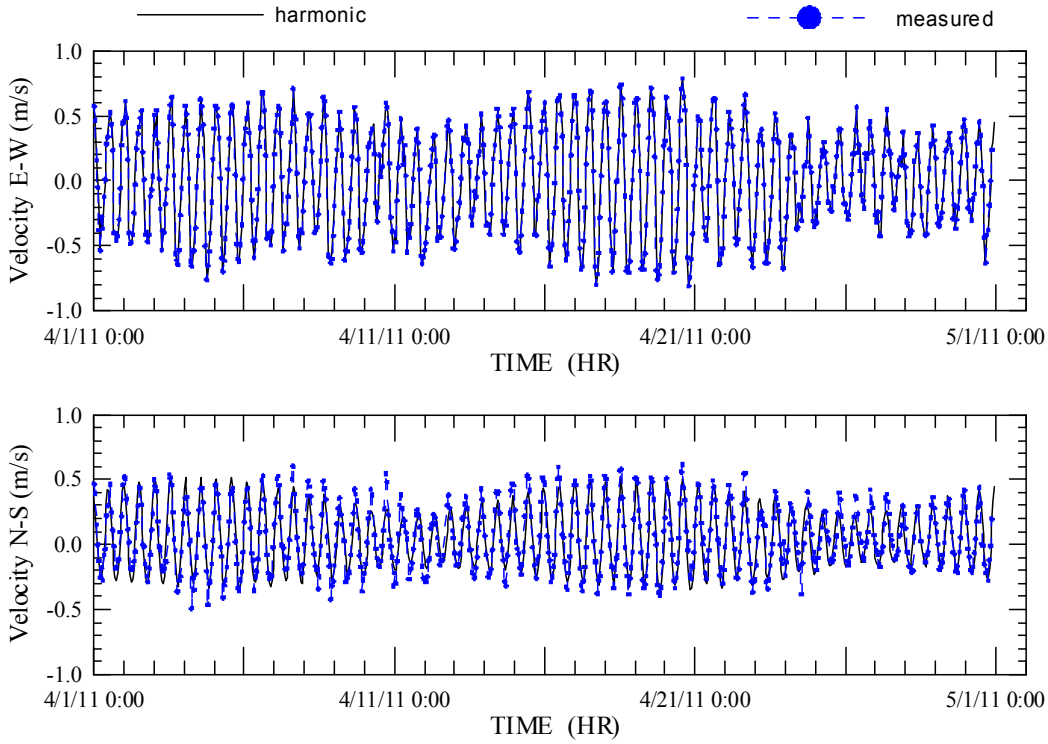


圖 4.11 (續)臺北港 2011 年海流觀測資料與調和分析結果之比較

綜合以上各節所述，共蒐集了基隆港與臺北港附近外海地形水深資料，以及 2010 年兩商港之潮位與海流資料。同時蒐集了龍洞、麟山鼻、竹圍、基隆港及淡水第二漁港等五個潮位站 2010 年潮位觀測資料並進行調和分析，並將各潮位站觀測資料與調和分析結果比較。本計畫亦分析了基隆港與臺北港之海流資料，分析結果顯示此二港海流成份以半日潮流為主。

4.3 基隆港水動力模式

本節主要依據 2010 年修正之基隆港水動力模擬子系統，配合本年度之工作項目進行 2011 年基隆港港區水位及流場模擬，內容包括地形與計算格網之建立、模式邊界條件之建立、模式參數率定與驗證以及基隆港流況模擬結果。有關水動力模式理論介紹與模式有限元素法求解過程及其相關數值計算則參考。

4.3.1 地形與計算格網之建立

基隆港水動力模式模擬範圍東起新北市瑞芳區鼻頭角海岸，西至新北市三芝區富貴角海岸，東西長約 43 公里；模式離岸邊界大致與基隆海岸平行，東側離岸距離約 20 公里，西側離岸距離約 17 公里。其中模式東側邊界鄰近龍洞潮位站，西側邊界鄰近麟山鼻潮位站。基隆港水動力模式數值計算格網係由 2610 個節點及 4745 個三角形元素構成，如圖 4.17 所示，其中基隆港港區及港口附近之數值計算格網分布情形，如圖 4.18 所示。模式之地形水深資料主要依據海軍測量局刊行之海軍水道圖圖號為 0352、0353A 與 04513 等水深資料建置得到，模式模擬範圍內之水深變化如圖 4.19 所示。

4.3.2 邊界條件之建立

在水動力數值模式中，模式邊界型態分為海域開放邊界及陸地邊界兩種，其中海域開放邊界通常採用水位(潮位)條件為模式之邊界條件；常見之陸地邊界條件分為不滑動邊界條件(即邊界節點流速等於零)及滑動邊界條件(即邊界節點垂直方向流速為零)，模式採用滑動邊界為陸地邊界條件。在海域開放邊界之水位邊界條件方面，本年度依據所蒐集的潮位資料(基隆港、龍洞及麟山鼻潮位站)選取 2009 年及 2010 年潮位觀測資料以 34 個分潮(參考第二章)進行調和分析建立各分潮調和常數，並參考 2010 年度基隆港水動力模式水位邊界條件建立方式，預測

2011 年 1 月 1 日零時至 2012 年 1 月 1 日零時模式各開放邊界節點之每小時水位變化資料建立模式水位邊界輸入檔(格式配合模式讀取方式及減少誤差採用機械碼方式儲存)。模式在執行時會依模擬時間由邊界水位檔案讀取該時段之邊界水位，由於邊界水位為每小時資料，因此模式新增時間內插功能,即每小時間之邊界水位值以線性內插方式得到。圖 4.20 所示為模式東、西兩側邊界水位變化之時間序列圖，其中東、西兩側水位邊界係分別依據第二章龍洞及麟山鼻潮位調和分析(34 個分潮)預測值建立的。

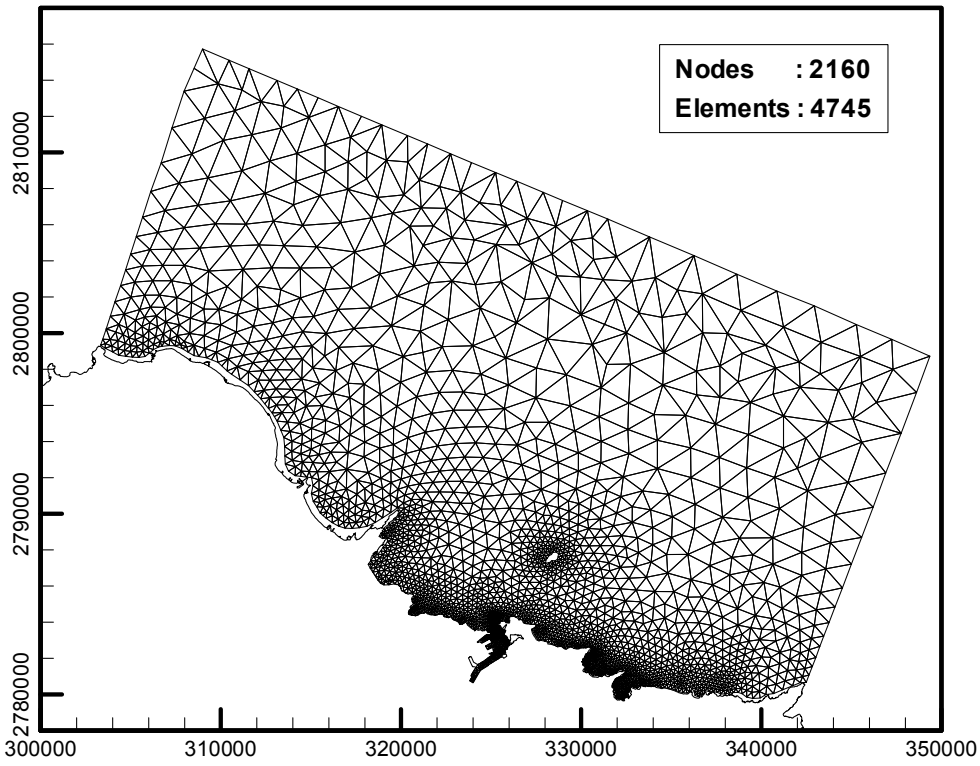


圖 4.17 基隆港水動力模式之有限元素細格網分佈圖

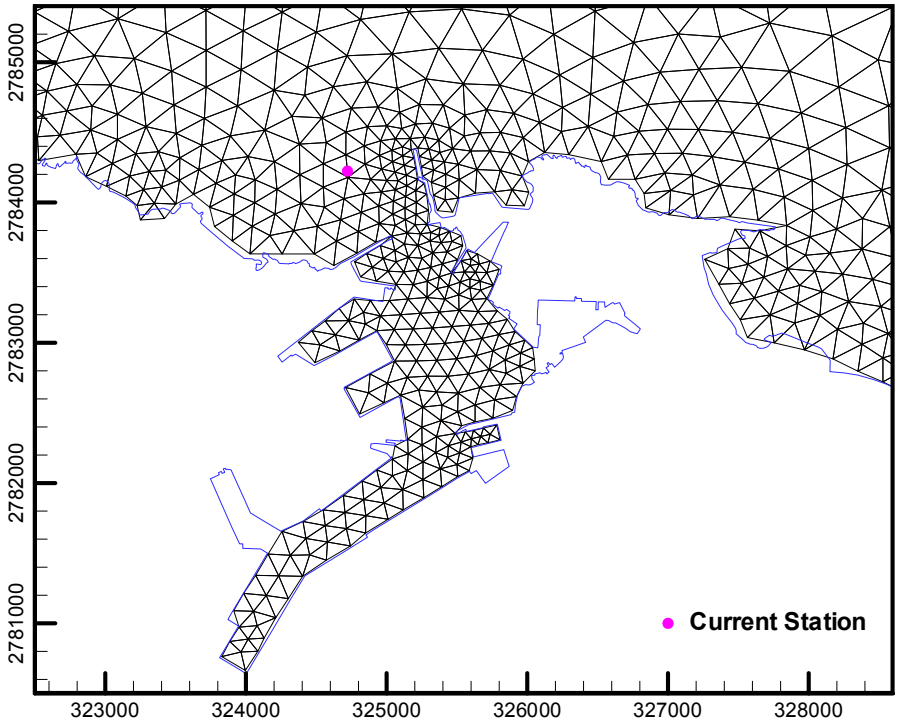


圖 4.18 基隆港港域及港口附近三角形元素分布圖

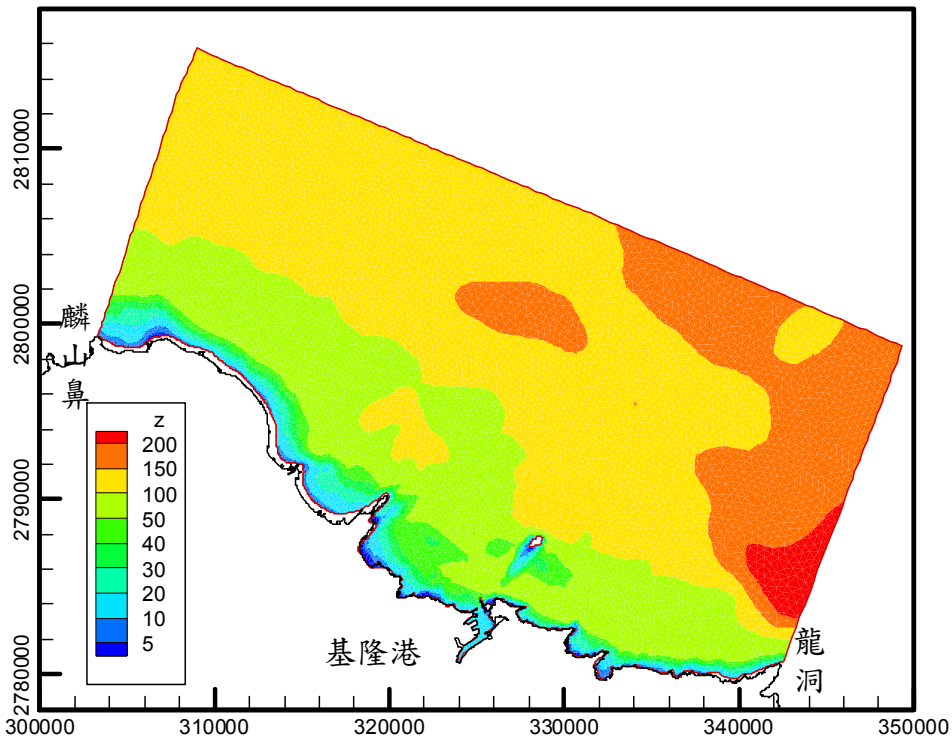


圖 4.19 基隆港水動力模式之地形水深分布圖

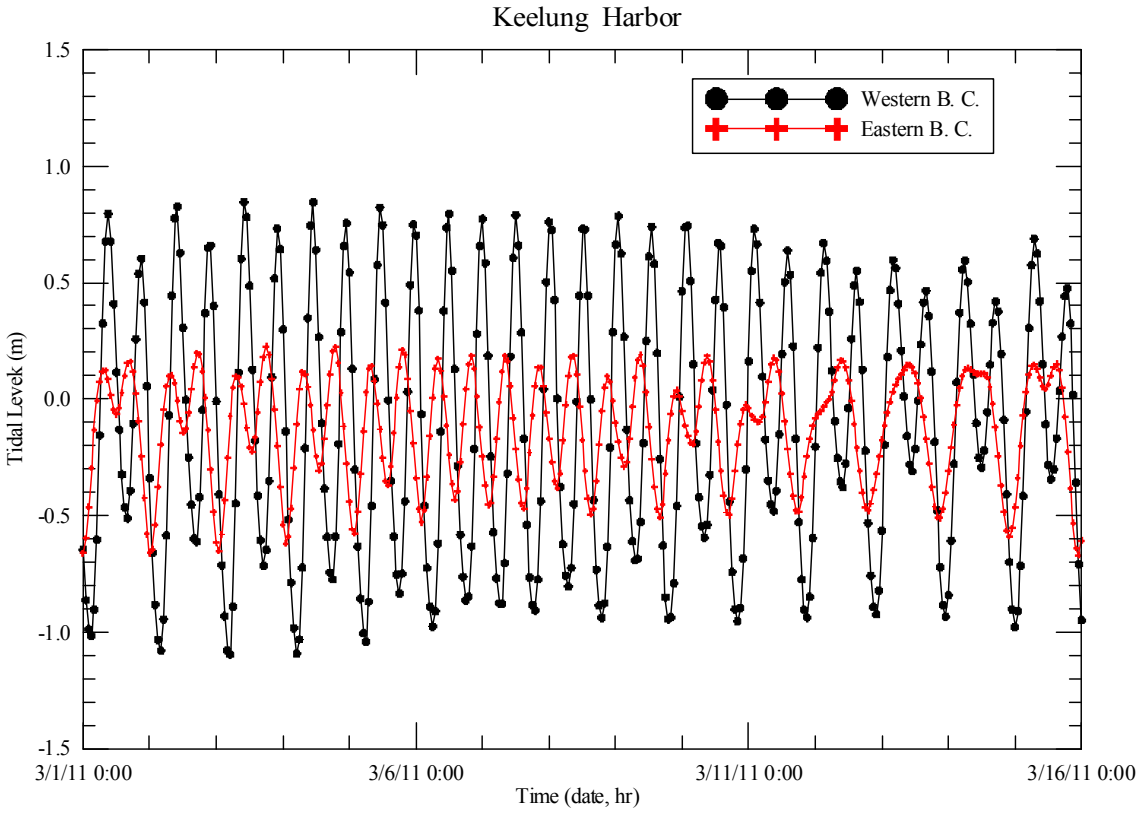


圖 4.20 基隆港水動力模式東、西開放邊界之水位邊界條件時序圖

由於基隆港水動力模式東、西兩側水位邊界潮汐型態及水位振幅差異相當大，因此離岸開放邊界水位條件如何決定至今未有明確之定論。除了延續上年度以兩側邊界各對應分潮之振幅及相位差以節點距離為依據進行線性內插得到各節點對應分潮之振幅及相位，再以調和分析方法預測各節點之水位變化為模式離岸開放邊界之水位條件外，並嚐試其他決定離岸開放邊界水位邊界件方法，如以兩側邊界水位值直接線性內插得到離岸開放邊界各節點水位邊界條件等。圖 4.21 所示係採用先建立離岸開放邊界各節點對應分潮之振幅及相位，再預測各節點在相同時段下之水位所形成之空間變化情形。

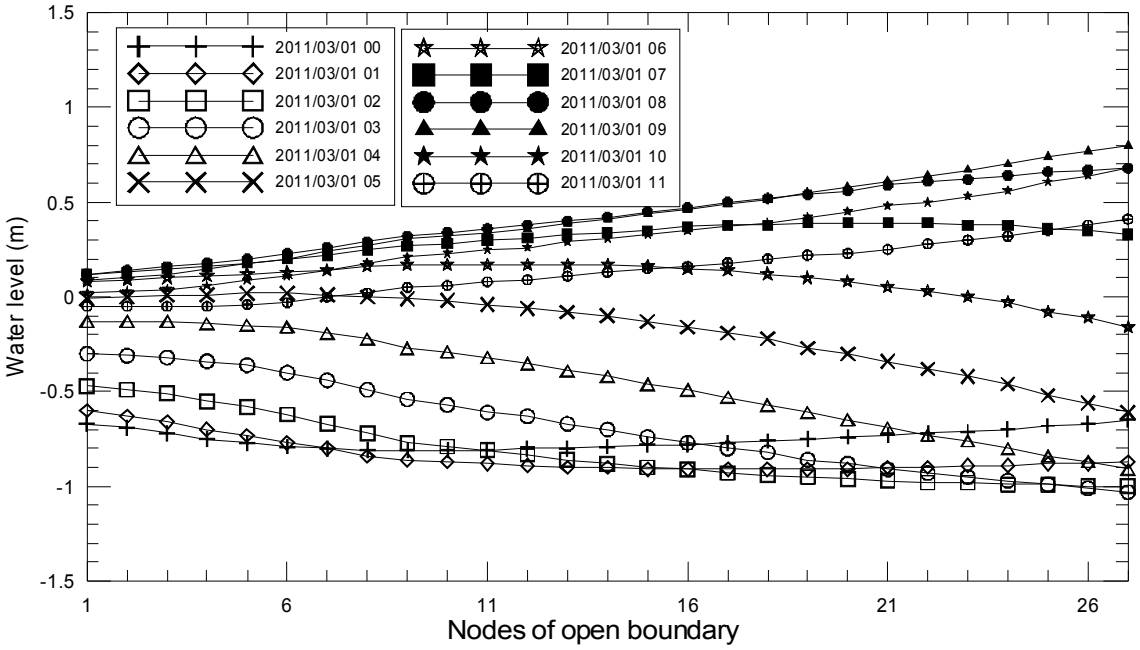


圖 4.21 基隆港水動力模式離岸開放邊界節點之水位邊界條件空間變化圖

4.3.3 模式參數率定與驗證

由於水動力模式數值計算之穩定性除了與三角元素大小、節點水深大小及時間項差分之間距△t 大小有關外，模式所使用的物理參數如渦動粘滯性係數及底床摩擦係數大小，以及模式模擬之起始條件等均會影響至模式計算之穩定性。因此相關參數值需進行率定與測試，而基隆港水動力模式最終採用的時間間距△t 為 1.0 sec。渦動粘滯性係數參考 Wang and Connor (1974)之假設，即

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \quad \text{.....} (4.1)$$

式中 a 為無因次係數，其合理的範圍為 0.01~0.1 之間；g 為重力加速度，$\tilde{\eta}$ 為潮汐代表性潮差，$\tilde{u}$ 為潮流代表性流速，$\tilde{x}$ 為三角元素代表性邊界。依據 2010 年基隆港水動力模式驗証結果得知：模式渦動粘滯性係數計算無因次係數 a 為 0.02，代表性流速$\tilde{u}$ 為 0.5m/s，代表性潮差 $\tilde{\eta}$ 為 1.0m；底床摩擦係數隨水深而變，其值介於 0.0024~0.023 之間。

選取基隆港外海水位及海流觀測資料與模式鄰近觀測點之節點模擬結果進行模式之驗証，其中海流觀測點位置示意圖如圖 4.18 所示。由於模式模擬結果主要為天文潮流成份，而海流觀測資料除了天文潮流成份外，尚有其他成份流及觀測誤差存在，因此先針對海流觀測資料採逐月方式選取 O_1、K_1、M_2 及 S_2 等四個主要分潮以調和分析方法得到觀測資料之天文潮流大小，再與基隆港水動力模式 2011 年潮流預測模擬結果比較。如圖 4.22 所示為模式模擬預測基隆港 2011 年 3 月水位與潮流(東西向及南北向)之結果與觀測點天文潮流分析結果之比較，其中水位部分並未做調和分析，直接採用觀測資料與模式模擬結果比較。

由驗証結果顯示模式最大流速發生時間與潮流最大流速發生時間約有 2~3 小時之延遲，大潮期間尤其顯著。由水位、海流觀測資料分析發現基隆海域天文潮流最大流速普遍發生於高、低潮位轉潮階段；此一特有現象可能與水動力物理機制相抵觸(模式模擬結果顯示高、低潮位轉潮階段通常為停潮現象)。此外，基隆港潮汐在大潮期間偏向半日潮，如 3 月 5 日(初一)及 3 月 19 日(農曆十五)，小潮期間潮汐偏向混合潮，每日高低水位差則呈現小潮期間大於大潮期間，但在潮流流速大小方面，大潮期間流速振幅仍大於小潮期間之流速振幅。

基隆港港口附近流場模擬結果如圖 4.23 與圖 4.24 所示，圖 4.23 與圖 4.24 分別為 2011 年 3 月 5 日(大潮)與 3 月 12 日(小潮)基隆港港口附近流場模結果之流況向量分佈圖。

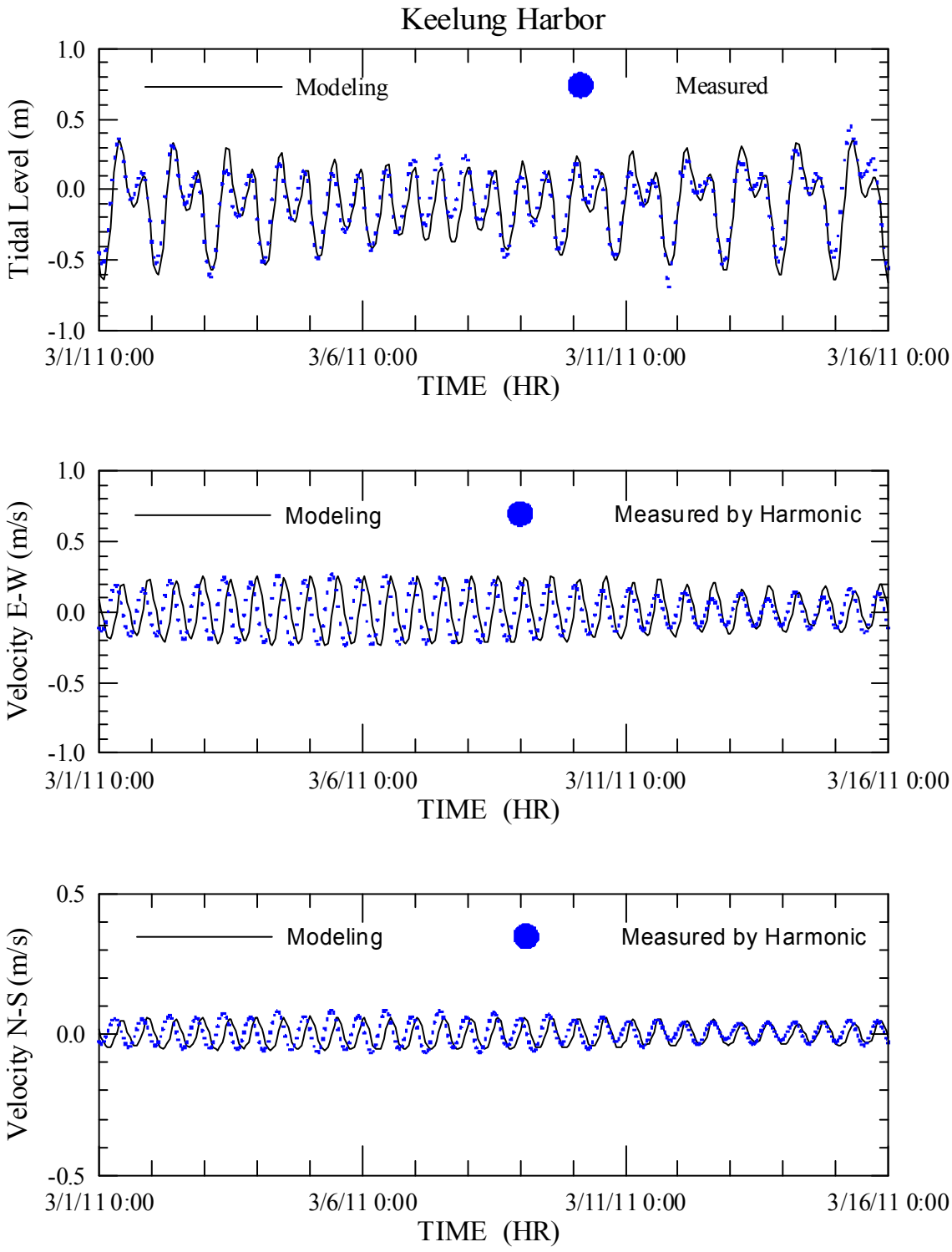


圖 4.22 基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

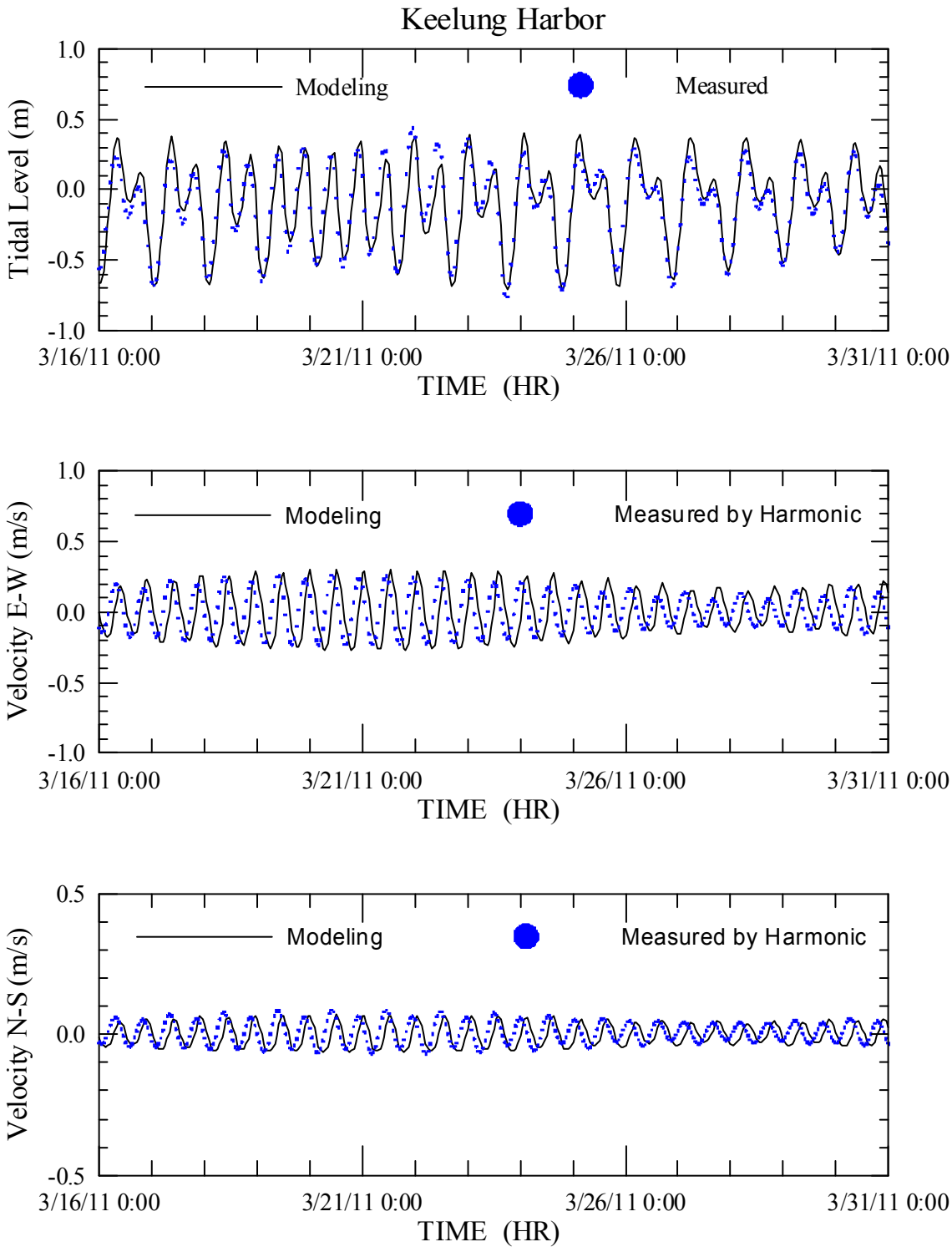


圖 4.22 (續)基隆港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

4.3.4 考慮風場效應之流況模擬結果

有關風場對基隆港港口流況之影響，已於上年度(99 年)初步選取固定風場(假設風速 10.0 m/s，東北向)之條件進行數值模擬，並比較有風場與無風場作用時流速大小之差異。研究結果顯示在風場作用下，除了岸邊水深較淺處流速變化較大外，基隆嶼與平和島間之海底淺灘區亦有較大的流速變化，如圖 4.25 及圖 4.26 所示；整體而言，在持續風場作用下流速有逐漸微量增加之趨勢。

針對風場對流場之影響，除了修正模式風曳力係數(C_a)計算公式外，同時採用基隆港風速及風向觀測資料模擬非穩態風場之情況。一般而言，風曳力係數通常可表示成風速之函數如下：

$$C_a = \begin{cases} c_0 & ;U_{10} \le U_{cr} \\ c_0 + c_1\left(1 - U_{cr}/U_{10}\right) & ;U_{10} \ge U_{cr} \end{cases} \quad \text{..... (4.2)}$$

式中係數值 c_a、c_1 及臨界風速 U_{cr} (m/sec)值，採取 Wilson (1960) 及 Reid & Bodine (1968)之建議值分別為 0.0011、0.0025 及 7.2。

選取基隆港 2011 年 3 月風速風向每小時之觀測資料，如圖 4.27 所示，為模式風場資料進行水位及流場模擬。圖 4.27 顯示 3 月份海面東北季風仍盛行，由於風速風向觀測站位於港口，受到陸地地形影響最大風速約為 10.9 m/s。依據上述每小時風速風向資料及修正之風曳力係數計算模式中風表面應力，模擬基隆港水位及流場之變化；同時選取鄰近海流觀測站之節點水位及流速(東西向及南北向分量)模擬結果與無風場作用下水位及流速之模擬結果比較，如圖 4.28 所示。結果顯示風場對水位影響相當有限，但對東西向之流速分量則較有較為明顯的變化，顯示本年度採用的風曳力係數計算公式較能表現出風場對流場之影響。由於目前海流觀測資料中風場影響之成份流尚無明確地分析結果，因此現階段當無法對風曳力係數計算公式中之係數進行詳細之率定，僅能引用前人之研究結果進行模式之修正。

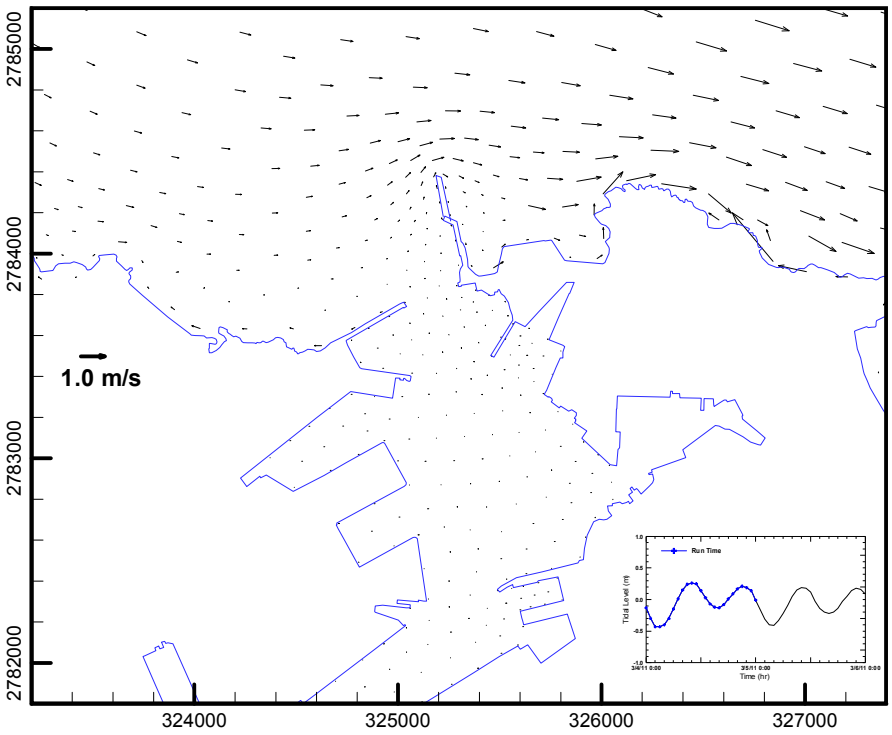


圖 4.23 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 0 時)

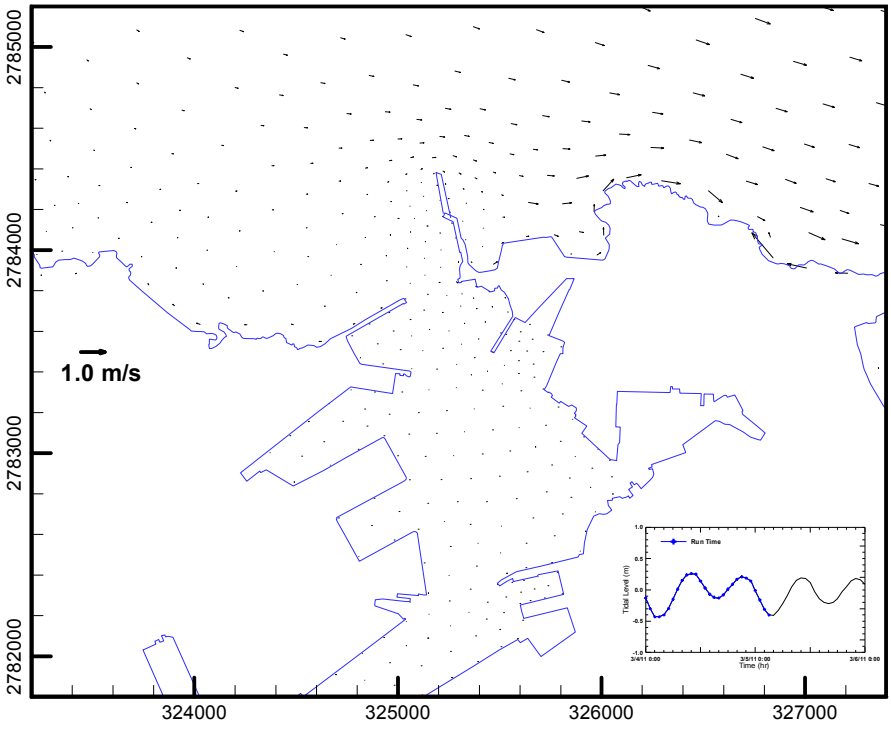


圖 4.23 (續 1)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 3 時)

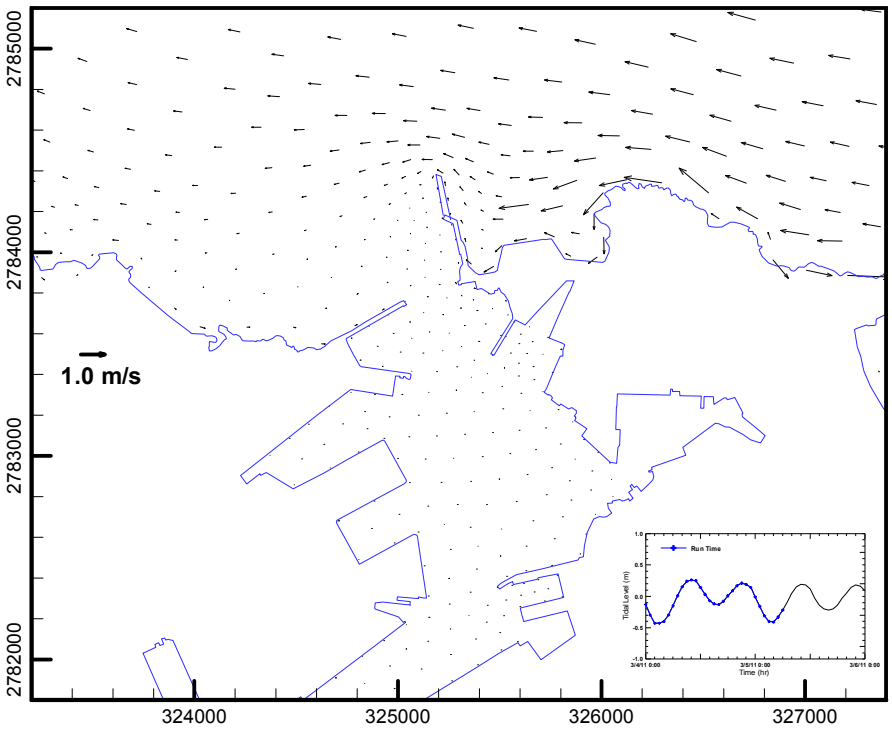


圖 4.23 (續 2)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 6 時)

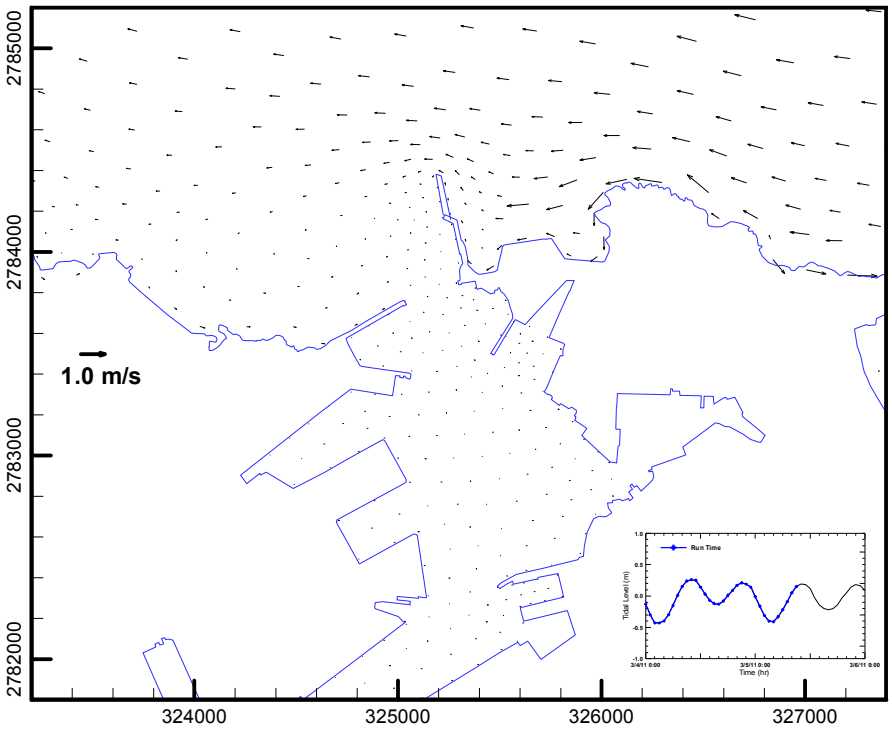


圖 4.23 (續 3)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 9 時)

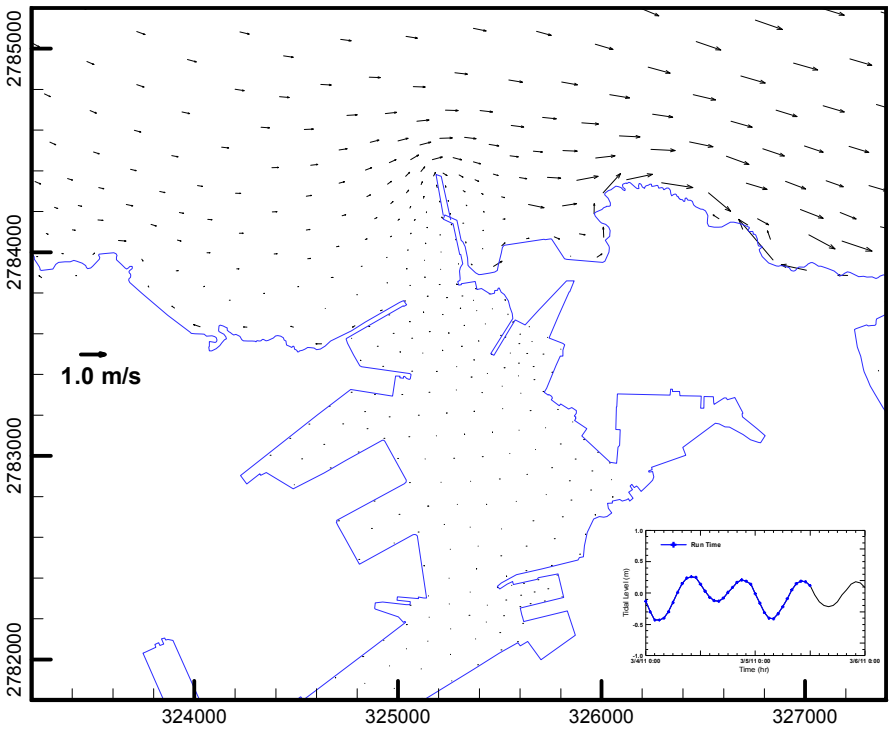


圖 4.23 (續 4)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 12 時)

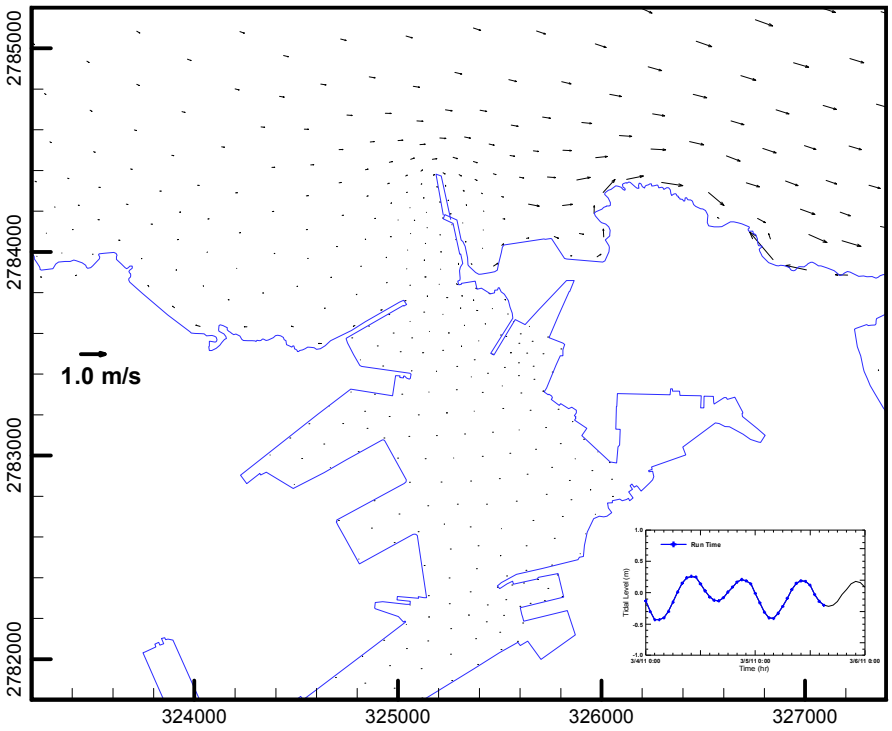


圖 4.23 (續 5)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 15 時)

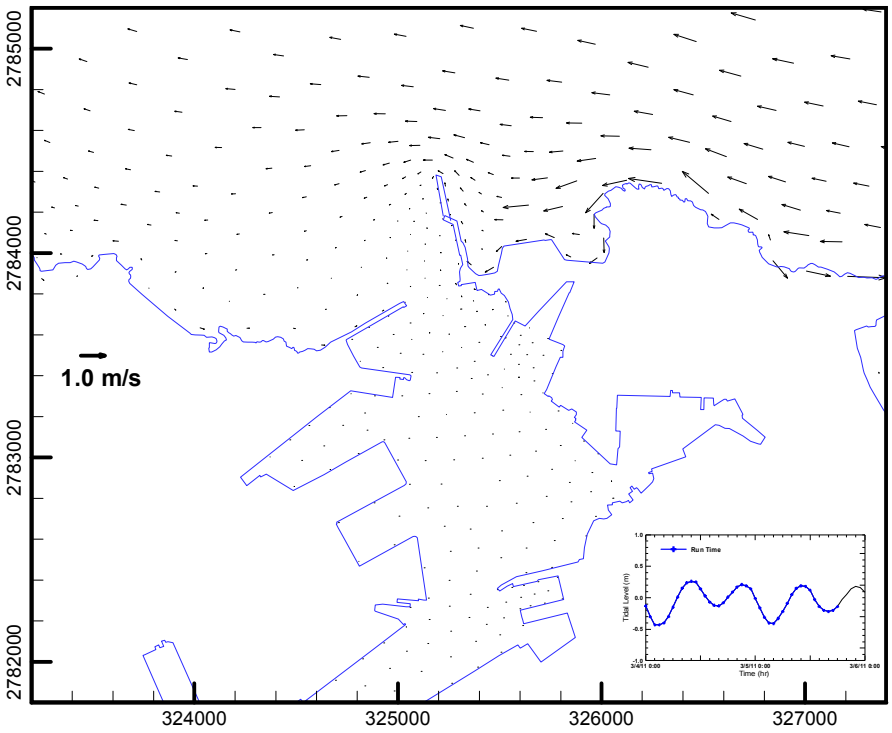


圖 4.23 (續 6)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 18 時)

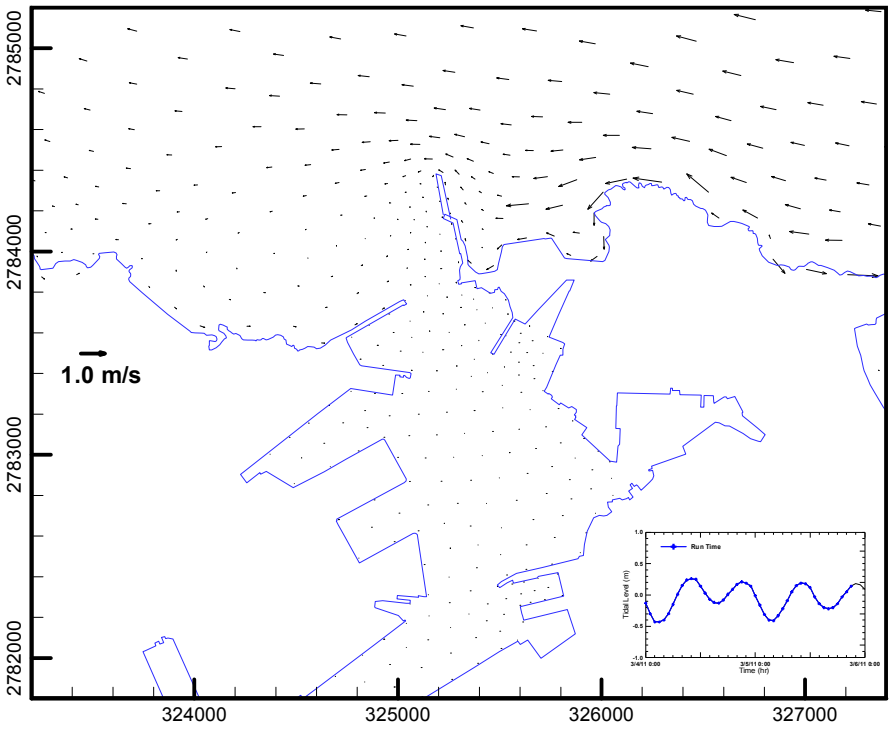


圖 4.23 (續 7)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 5 日 21 時)

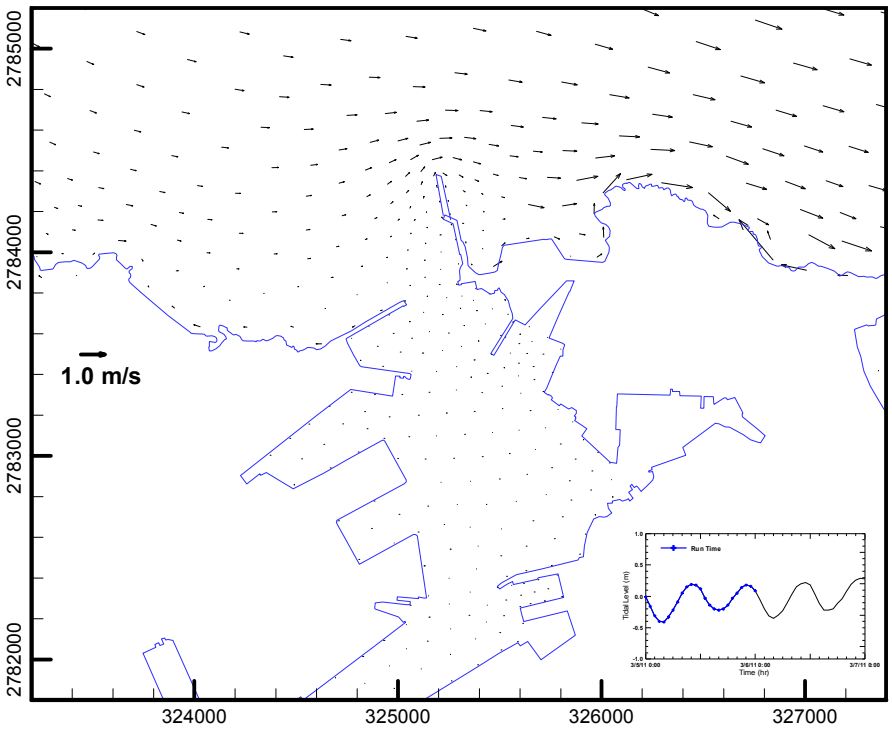


圖 4.23 (續 8)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 6 日 0 時)

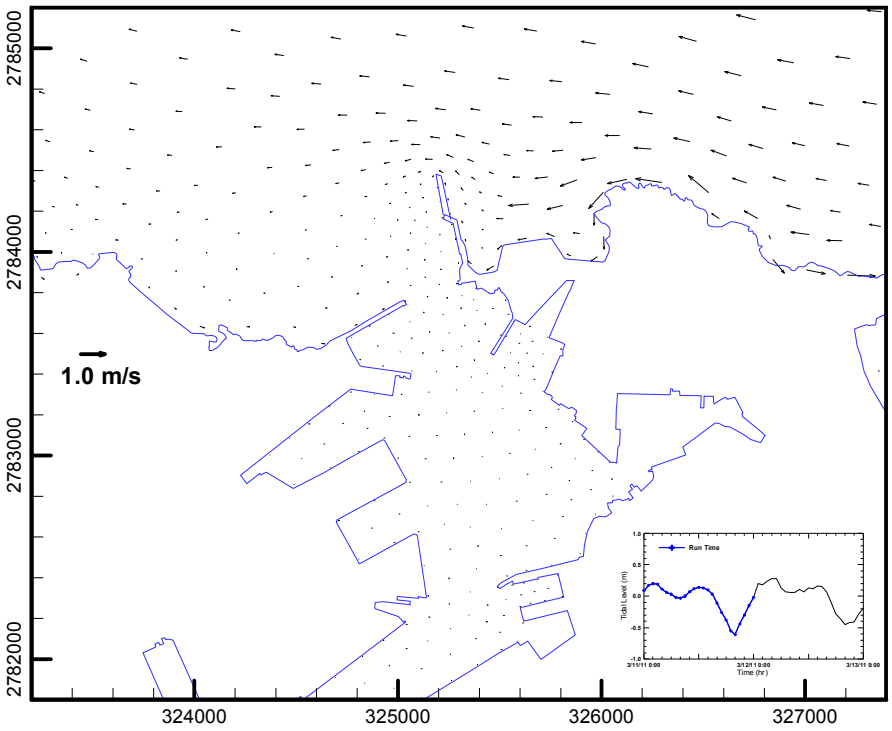


圖 4.24 基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 0 時)

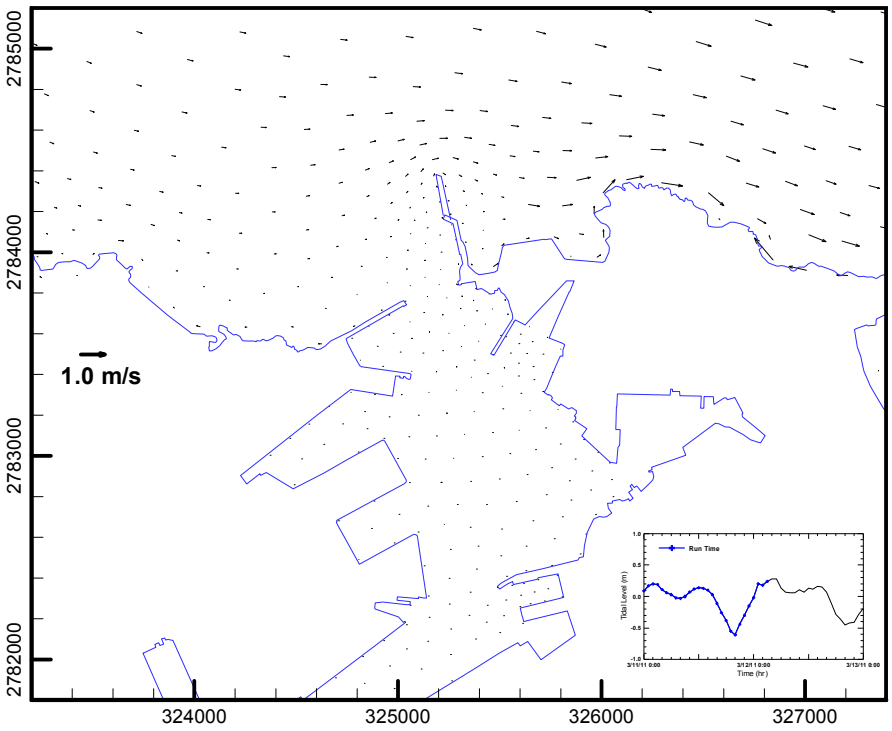


圖 4.24 (續 1)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 3 時)

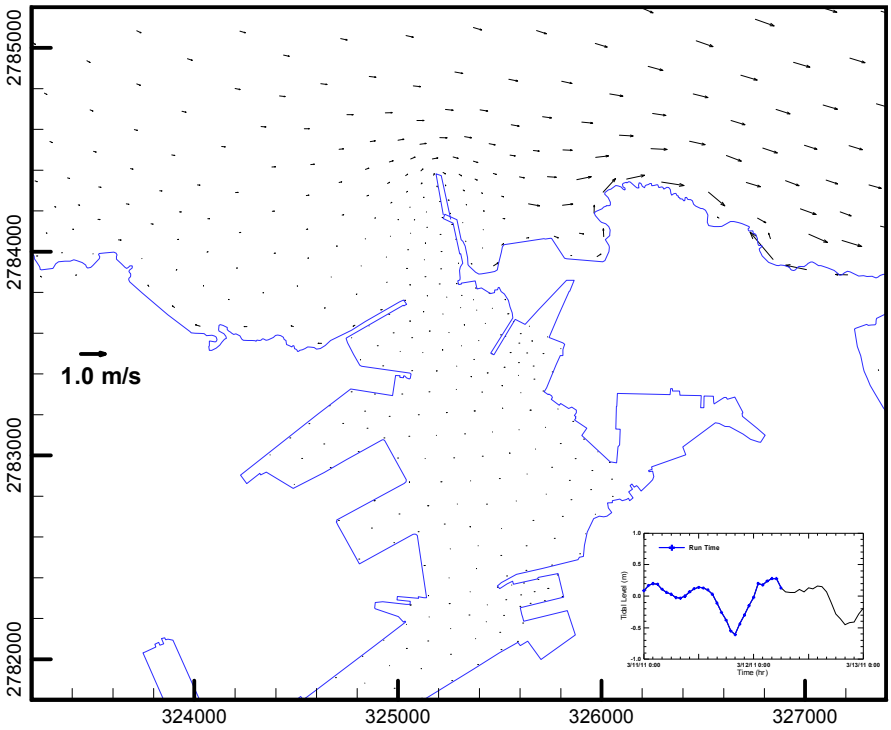


圖 4.24 (續 2)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 6 時)

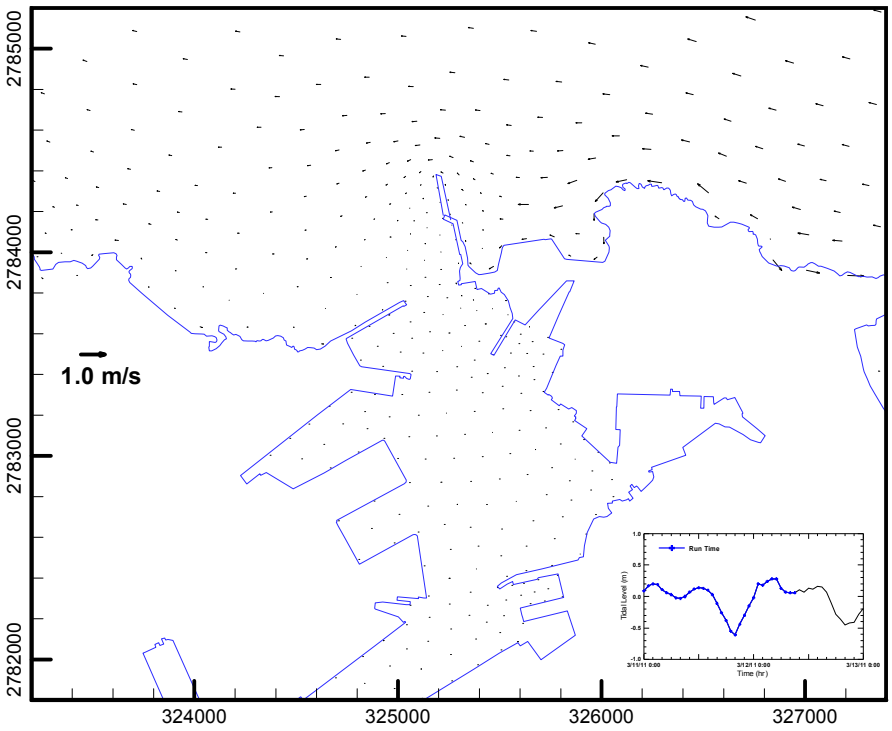


圖 4.24 (續 3)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 9 時)

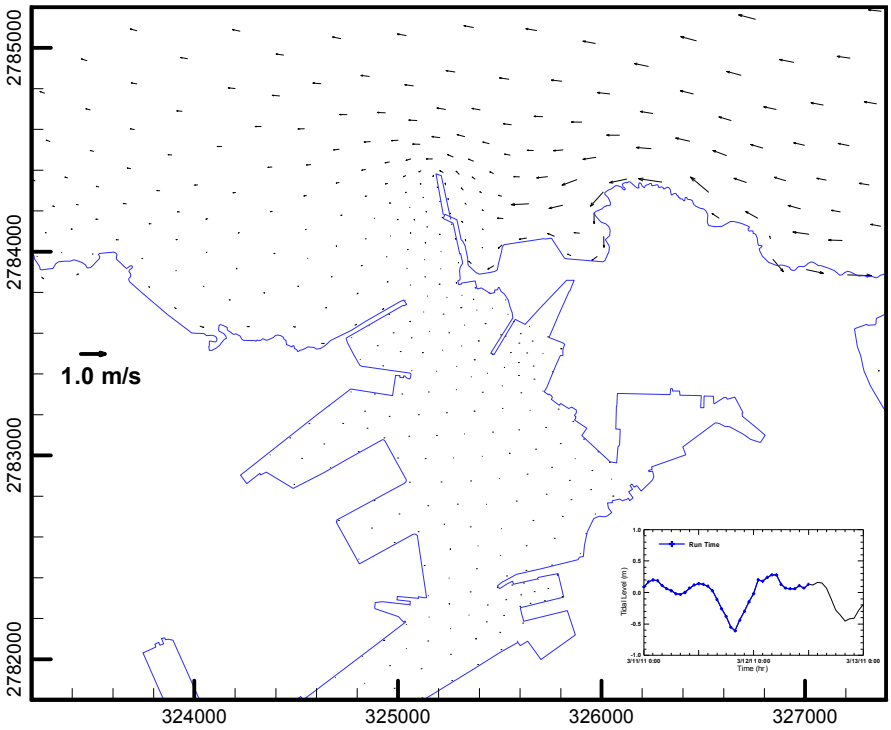


圖 4.24 (續 4)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 12 時)

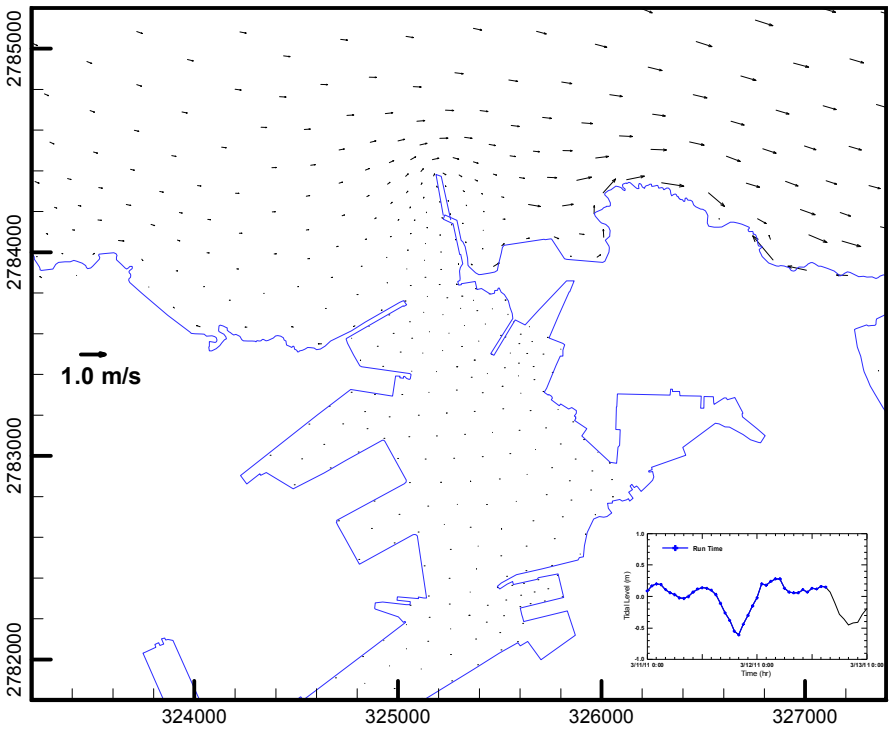


圖 4.24 (續 5)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 15 時)

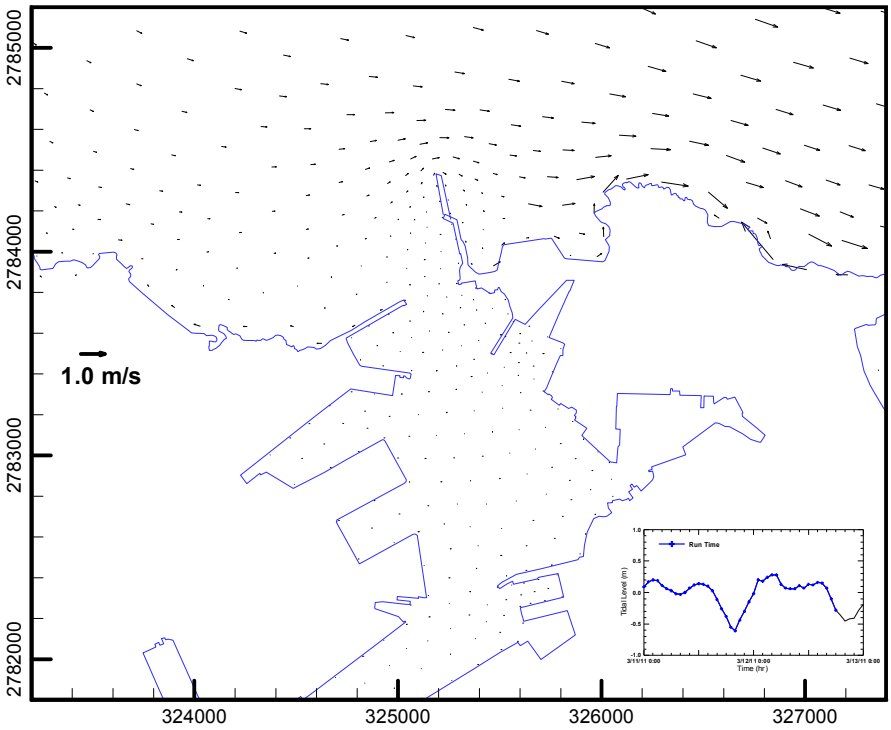


圖 4.24 (續 6)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 18 時)

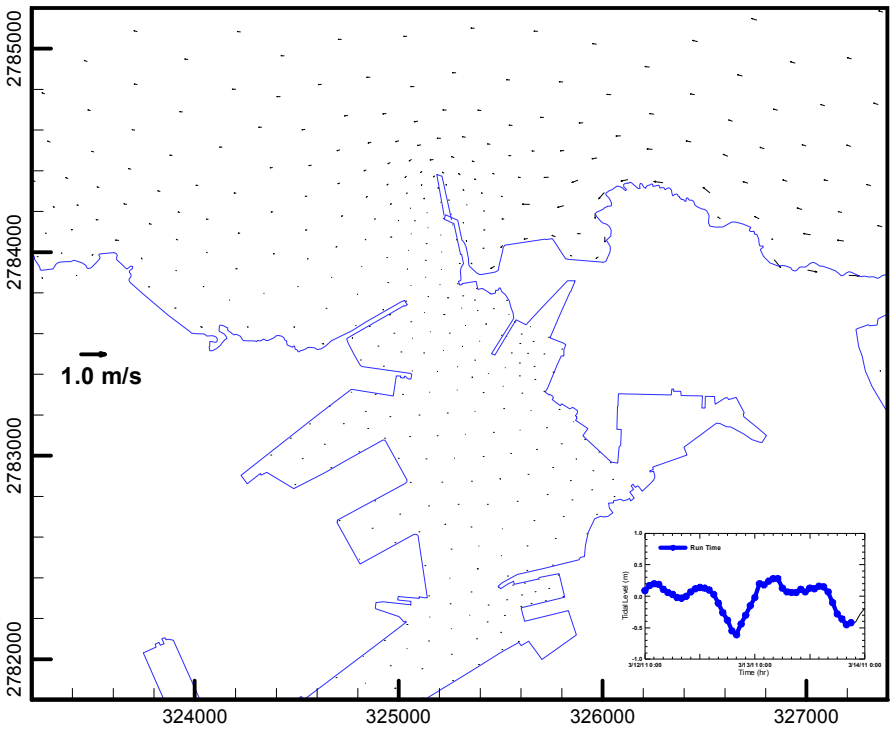


圖 4.24 (續 7)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 12 日 21 時)

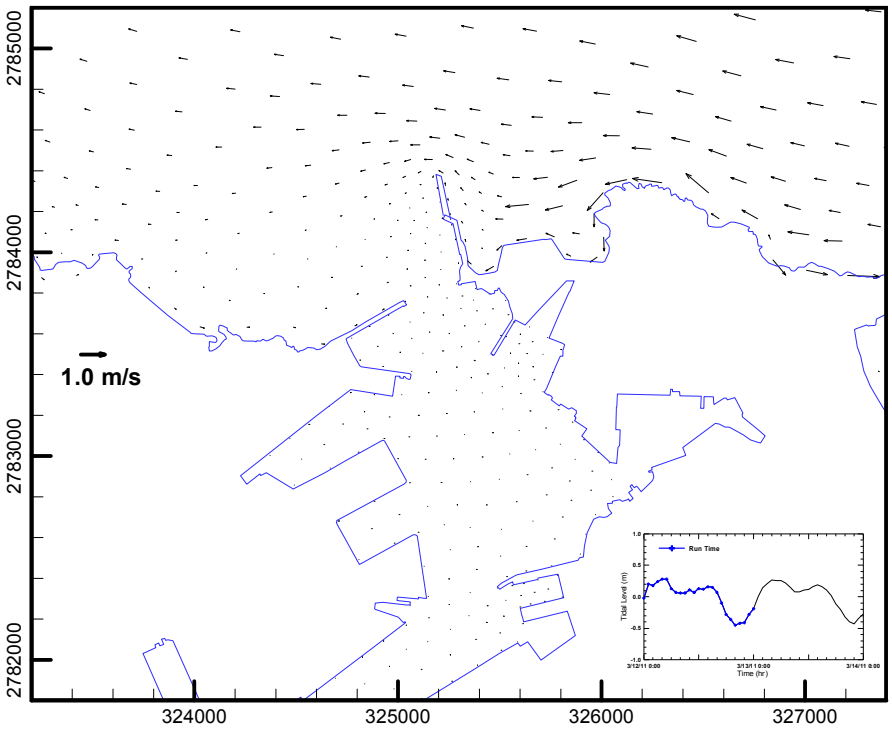


圖 4.24 (續 8)基隆港港口附近流況向量分佈圖(3 月 13 日 0 時)

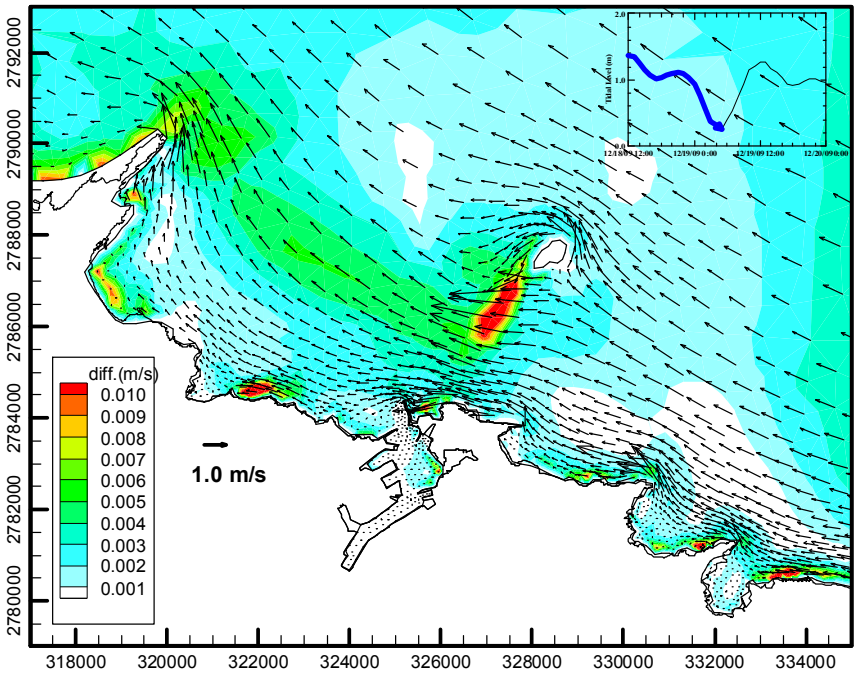


圖 4.25 無風場及有風場作用下，基隆港外海大潮期間漲潮流況與流速差分布情形(風速為 10 m/s，風向為東北)

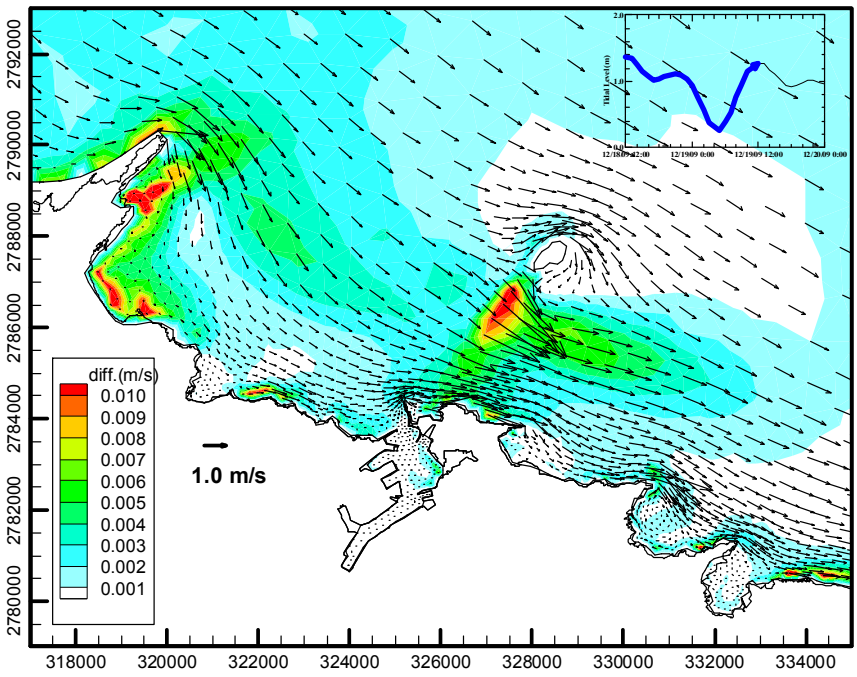


圖 4.26 無風場及有風場作用下，基隆港外海大潮期間退潮流況與流速差分布情形(風速為 10 m/s，風向為東北)

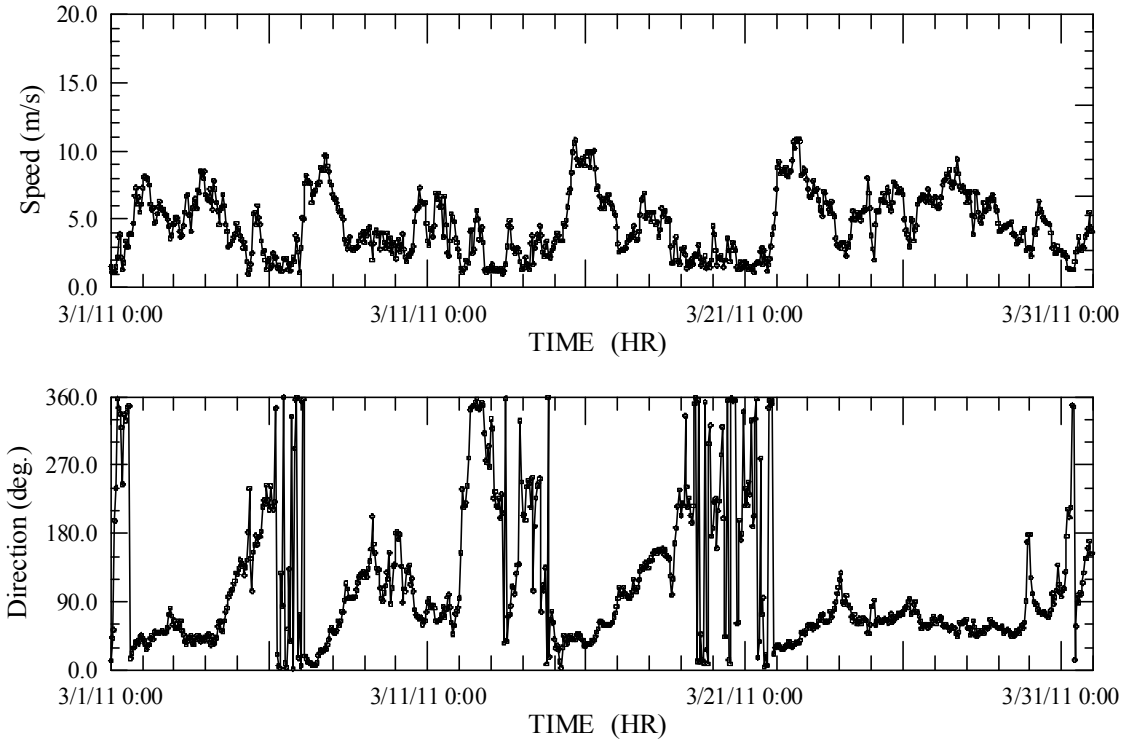


圖 4.27 基隆港港 2011 年 3 月份風速風向觀測資料

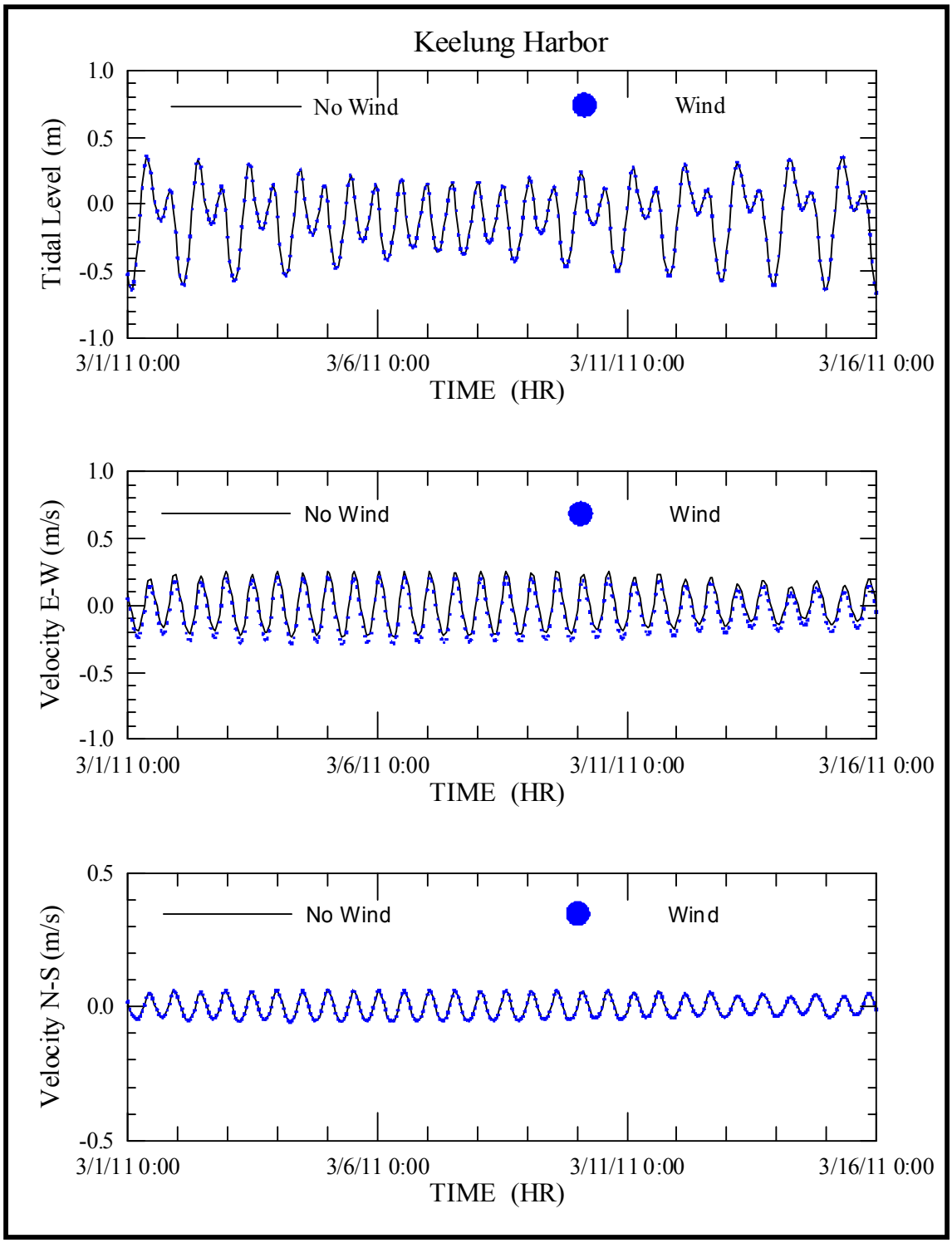


圖 4.28 有、無風作用下基隆港海流觀測點附近節點水位及流速模擬結果比較

4.4 臺北港水動力模式

本章節主要針對 2009 年度建置之臺北港水動力模式提出修正，修正內容內容包括地形與計算格網之建立、模式邊界條件之建立、模式參數率定與驗證以及臺北港流況模擬結果。

4.4.1 地形與計算格網之建立

2009 年臺北港水動力模式之模擬範圍北起新北市三芝區麟山鼻海岸，南至桃園縣蘆竹鄉竹圍海岸，南北距離約為 25.5 公里，離岸方向則由近岸往外海延伸約 9 公里，如圖 4.29 所示。圖 4.30 所示為 2010 年臺北港海域水深地形量測結果，顯示臺北港外廓形狀已有顯著改變外，臺北港南外堤防興建進度亦未達到 2009 年度模式建置之長度。因此本年度針對上述差異提出數值計算格網之修正，如圖 4.31 所示，圖中模式數值計算格網係由 1867 個節點及 3388 個三角形元素構成，其中臺北港港區及港口附近之數值計算格網分布情形，如圖 4.32 所示。模式之地形水深資料係由海軍測量局刊行之海軍水道圖圖號為 04512 與 04513 之水深資料及臺北港 2010 年 10 月水深量測資料內插得到。

4.4.2 邊界條件之建立

本年度臺北港水動力模式開放邊界之水位邊界條件設定分為兩階段：第一階段利用 NAO.99b 計算模式開放邊界各節點之每小時水位資料為模式水位邊界輸入檔，進行臺北港水動力模擬，並率定模式相關參數值；第二階段則依據蒐集的潮位資料(竹圍、淡水第二漁港及麟山鼻潮位站)選取 2009 年及 2010 年潮位觀測資料以 34 個分潮進行調和分析建立各分潮調和常數，並參考基隆港水動力模式水位邊界條件建立方式，預測模式開放邊界節點之水位變化資料成為模式水位邊界輸入檔。

NAO.99b 模式係由 Matsumoto et al.(2000)所發展的，並應用

TOPEX\POSEIDON (T/P)衛星測高儀資料結合全球海洋水動力模式模擬結果，利用資料同化(Assimilation)技術而發展出的全球海洋潮汐模式，其空間數值格網解析度為 0.5 度；NAO.99Jb 模式則屬於鄰近日本之高解析度(其空間格網精度為 5 分)區域海洋潮汐模式，其範圍含蓋東經 110 度至 165 度、北緯 20 度至 65 度。由於 NAO.99Jb 模式採用 219 個潮位站實測資料混合 T/P 衛星測高儀資料於數值模式之中，因此對於天文潮汐預測具有較高之精確性。近年來，陸續有許多國內學者應用 NAO.99Jb 模式預測臺灣海域天文潮汐，如張及黃(2001)、劉等(2006)、廖等(2010)、顏等(2010a,b)。

利用 NAO.99b 模式計算臺北港水動力模式各開放邊界節點，2011 年 1 月 1 日零時至 2012 年 1 月 1 日零時每小時水位變化資料為臺北港水動力模式之邊界條件。圖 4.33 所示為臺北港水動力模式左、右開放邊界之水位邊界條件時序圖，顯示模式左、右兩側水位邊界潮汐型態相近似，但水位振幅差異相當大；圖 4.34 所示為不同時段離岸開放邊界節點水位之空間變化情形。

4.4.3 模式參數率定與驗證

參考 2009 年度臺北港水動力模式之結果，本年度臺北港水動力模式採用的時間間距$\triangle t$ 為 1.0 sec。渦動粘滯性係數則參考 Wang and Connor (1974)之假設，即

$$E_{xx} \sim ag(\tilde{\eta}/\tilde{u})\tilde{x} \quad \text{.....(4.3)}$$

式中 a 為無因次係數，其合理的範圍為 0.01~0.1 之間；g 為重力加速度，$\tilde{\eta}$ 為潮汐代表性潮差，$\tilde{u}$ 為潮流代表性流速，$\tilde{x}$ 為三角元素代表性邊界。經由模式之模擬與率定：臺北港水動力模式渦動粘滯性係數計算無因次係數 a 為 0.02，代表性流速$\tilde{u}$ 為 0.5m/s，代表性潮差$\tilde{\eta}$ 為 1.5m；底床摩擦係數隨水深而變，其值介於 0.0014~0.020 之間。

為驗証模式模擬結果與率定模式相關參數，選取臺北港外海觀測

樁水位及海流觀測資料與模式鄰近觀測樁之節點模擬結果進行模式之驗証，其中臺北港外海觀測樁位置示意圖如圖 4.31 所示。由於水動力模式模擬之流場主要為天文潮流，海流觀測資料除了天文潮流成份外，尚有其他成份流及觀測誤差存在。同理先針對臺北港海流觀測資料採逐月方式選取 O_1、K_1、M_2 及 S_2 等四個主要分潮以調和分析方法得到觀測資料之天文潮流大小，再與臺北港 2011 年潮流流場模擬預測結果比較。如圖 4.35 所示為模式模擬預測臺北港 2011 年 3 月至 5 月水位與潮流(東西向及南北向)之結果與觀測樁天文潮流分析結果之比較。

臺北港港口附近流場模擬結果如圖 4.36 與圖 4.37 所示，其中圖 4.36 與圖 4.37 分別為 2011 年 5 月 18 日(大潮時期，農曆 4 月 16 日)與 2011 年 5 月 27 日(小潮時期，農曆 4 月 25 日)臺北港港口附近每隔 3 小時之流況向量分佈圖。圖 4.36 顯示大潮時期退潮時段潮流由西南向東北流動，漲潮時段潮流由東北向西南流動。潮流於高、低潮位附近流速較小，平潮時段附近流速則較大，平潮時段臺北港港口附近外海流速可達 1 m/s 左右。圖 4.37 顯示小潮時期漲退潮時段流向與大潮時期相同，唯平潮附近流速均較小，在高、低潮位附近流速接近零。整體而言，臺北港港口附近流場模擬結果顯示，退潮時段潮流由西南向東北流動，漲潮時段潮流由東北向西南流動，大潮時期潮流流速較大，小潮時期潮流流速較小。

4.4.4 考慮風場效應之流況模擬結果

針對風場對臺北港流場之影響，以臺北港 2011 年 3 月風速風向每小時之觀測資料，如圖 4.38 所示，為模式風場資料進行水位及流場模擬。圖 4.38 所示為臺北港海上觀測樁觀測之風速風向資料，顯示 3 月份海面仍受到東北季風影響，且最大風速可達 17.5 m/s。依據上述每小時風速風向資料模擬臺北港水位及流場變化，並與無風場作用下水位及流場之模擬結果比較，如圖 4.39 所示。圖 4.39 為有、無風場作用下，模式鄰近觀測樁之節點水位及流速之模擬結果比較，結果顯示風場對水位影響相當有限，對流速之影響則較為明顯。受到東北季風影響西

南向流速有一顯著之增量。

本章節首先說明了臺北港水動力模式格網建立情形及模擬範圍內的水深分布，接著利用 NAO.99b 模式計算臺北港水動力模式各開放邊界節點水位邊界條件，依 2009 年臺北港水動力模式驗証結果率定模式參數，並與本年度潮位觀測資料與海流觀測資料調和分析結果做驗證。最後模擬臺北港港口附近之二維平面流場，結果顯示退潮時段潮流由西南向東北流動，漲潮時段潮流由東北向西南流動，大潮時期潮流流速較大，小潮時期潮流流速較小。

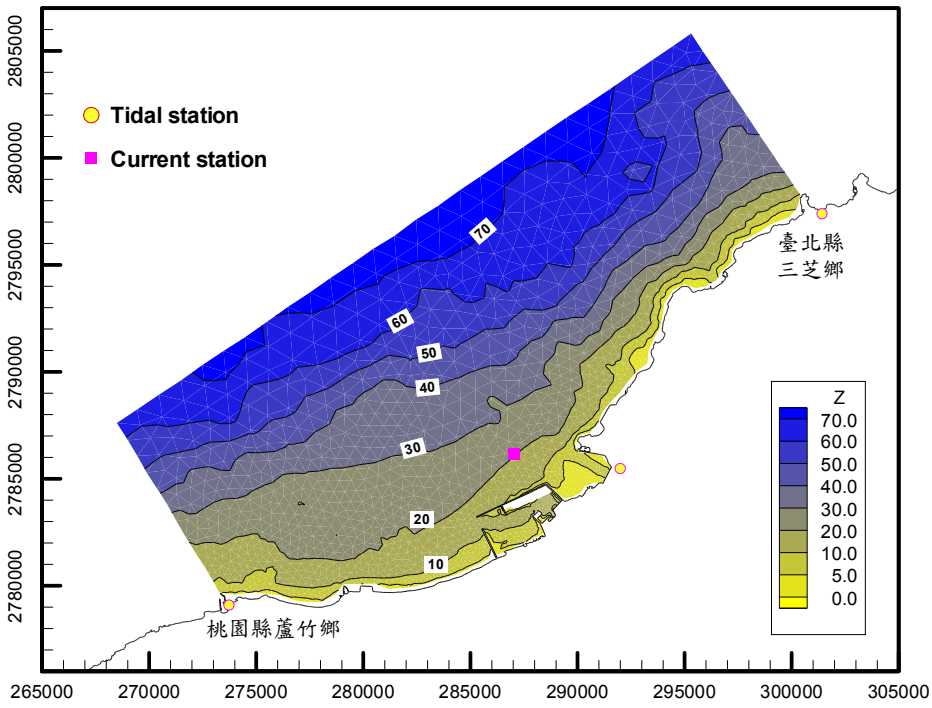


圖 4.29 臺北港水動力模式模擬範圍及其水深分佈圖

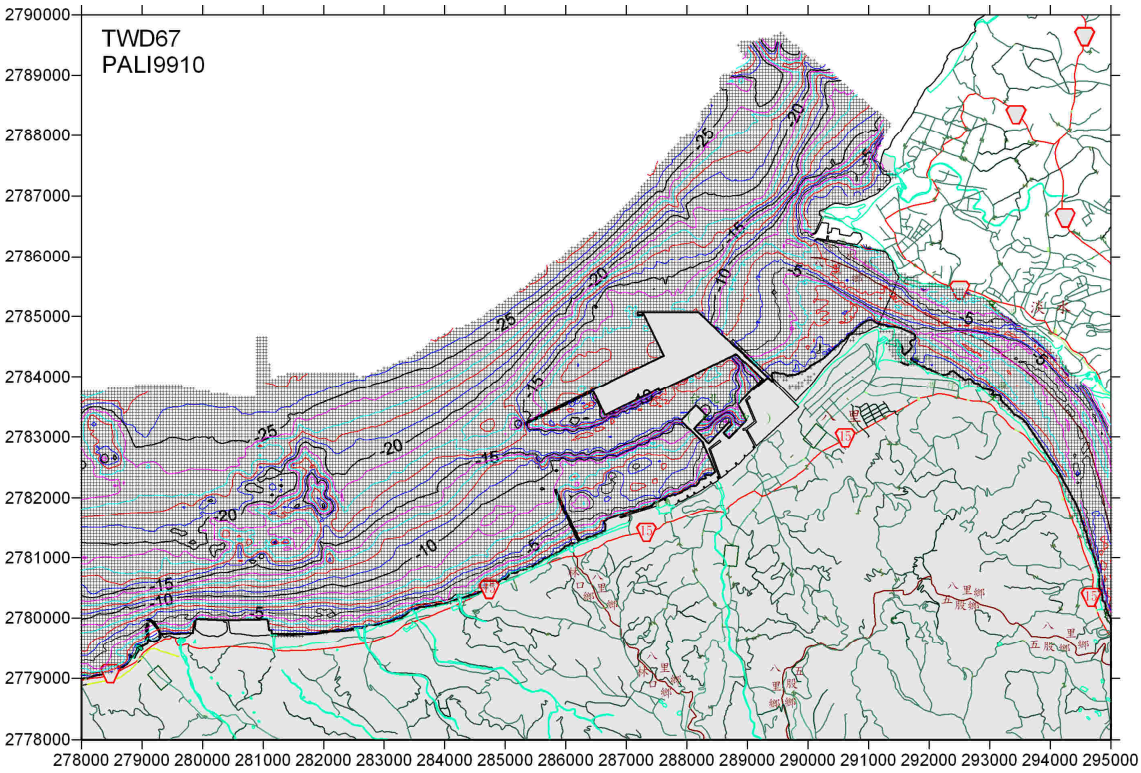


圖 4.30 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖

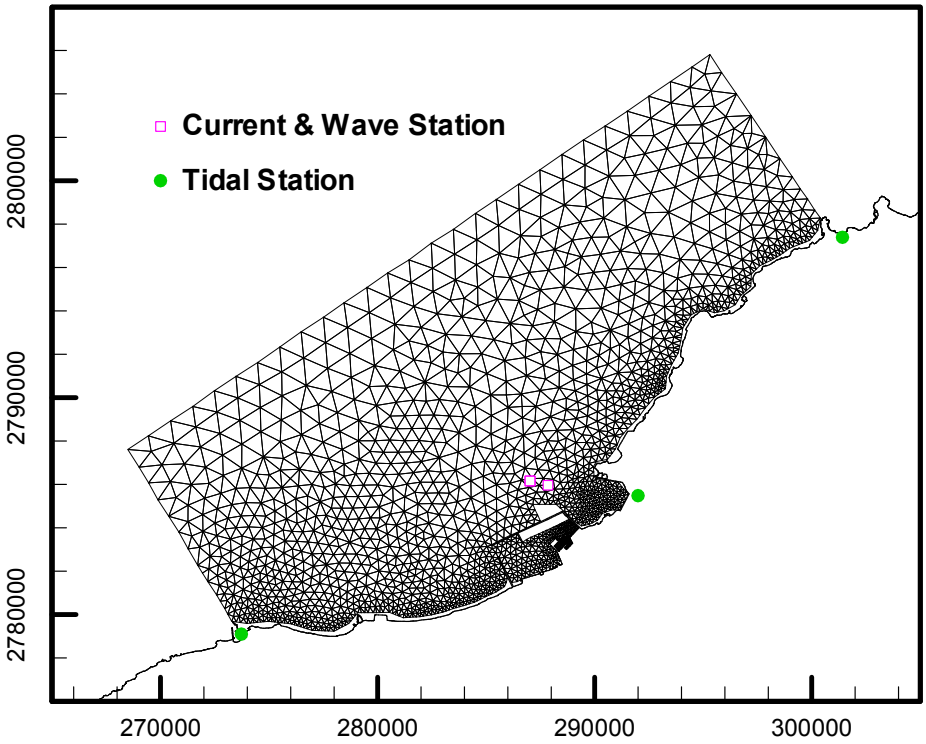


圖 4.31 臺北港水動力模式之有限元素細格網分佈圖

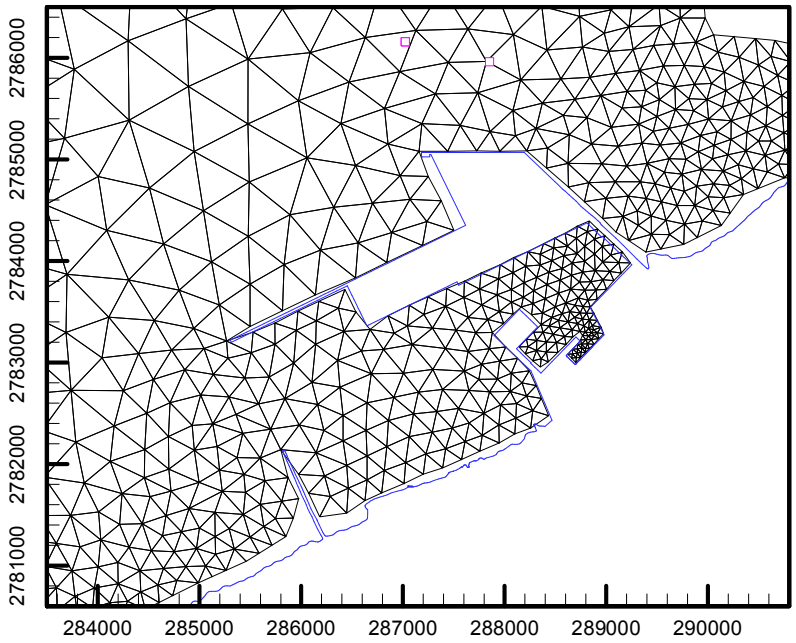


圖 4.32 臺北港港域及港口附近三角形元素分布圖

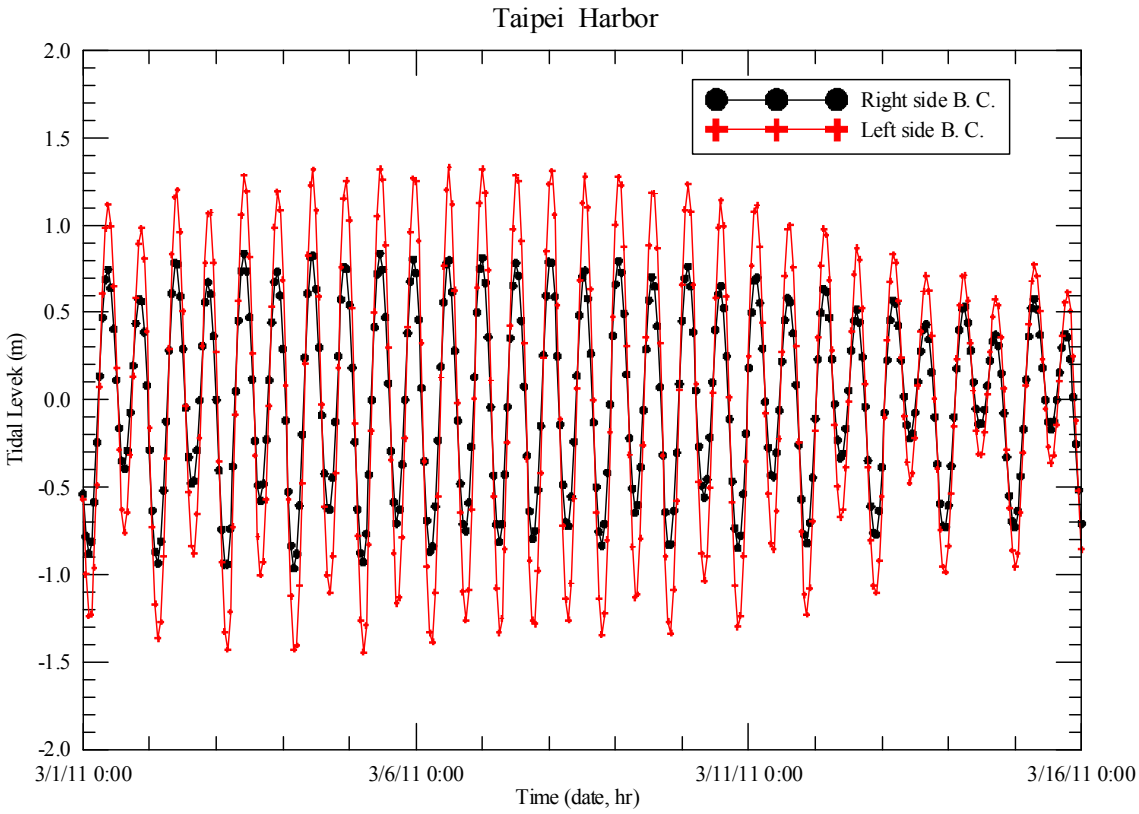


圖 4.33 臺北港水動力模式左、右開放邊界之水位邊界條件時序圖

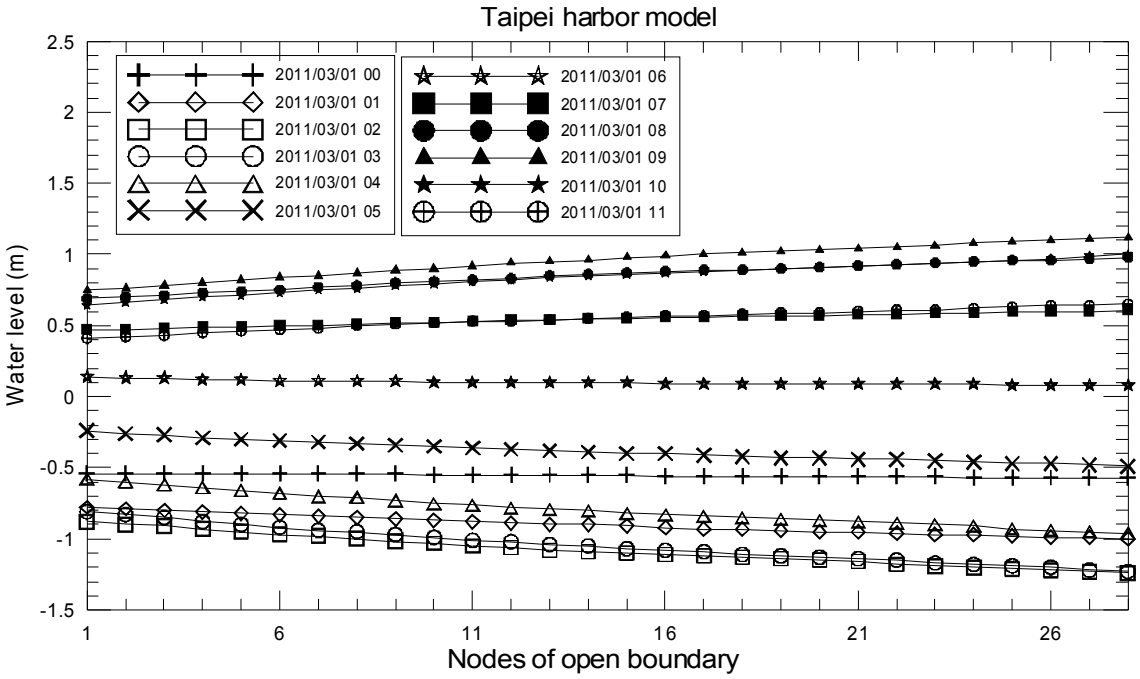


圖 4.34 臺北港水動力模式離岸開放邊界節點之水位邊界條件空間變化圖

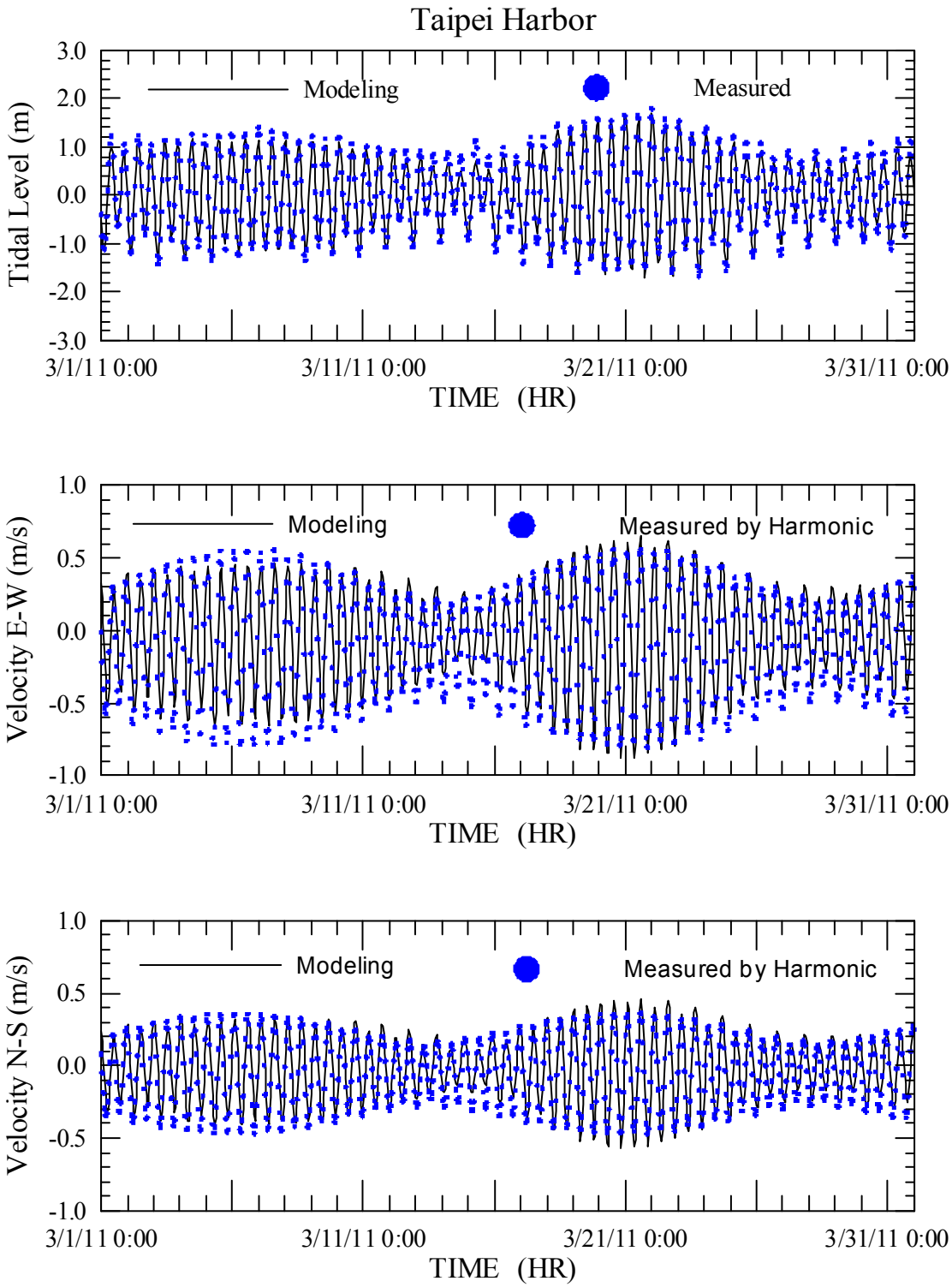


圖 4.35 臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

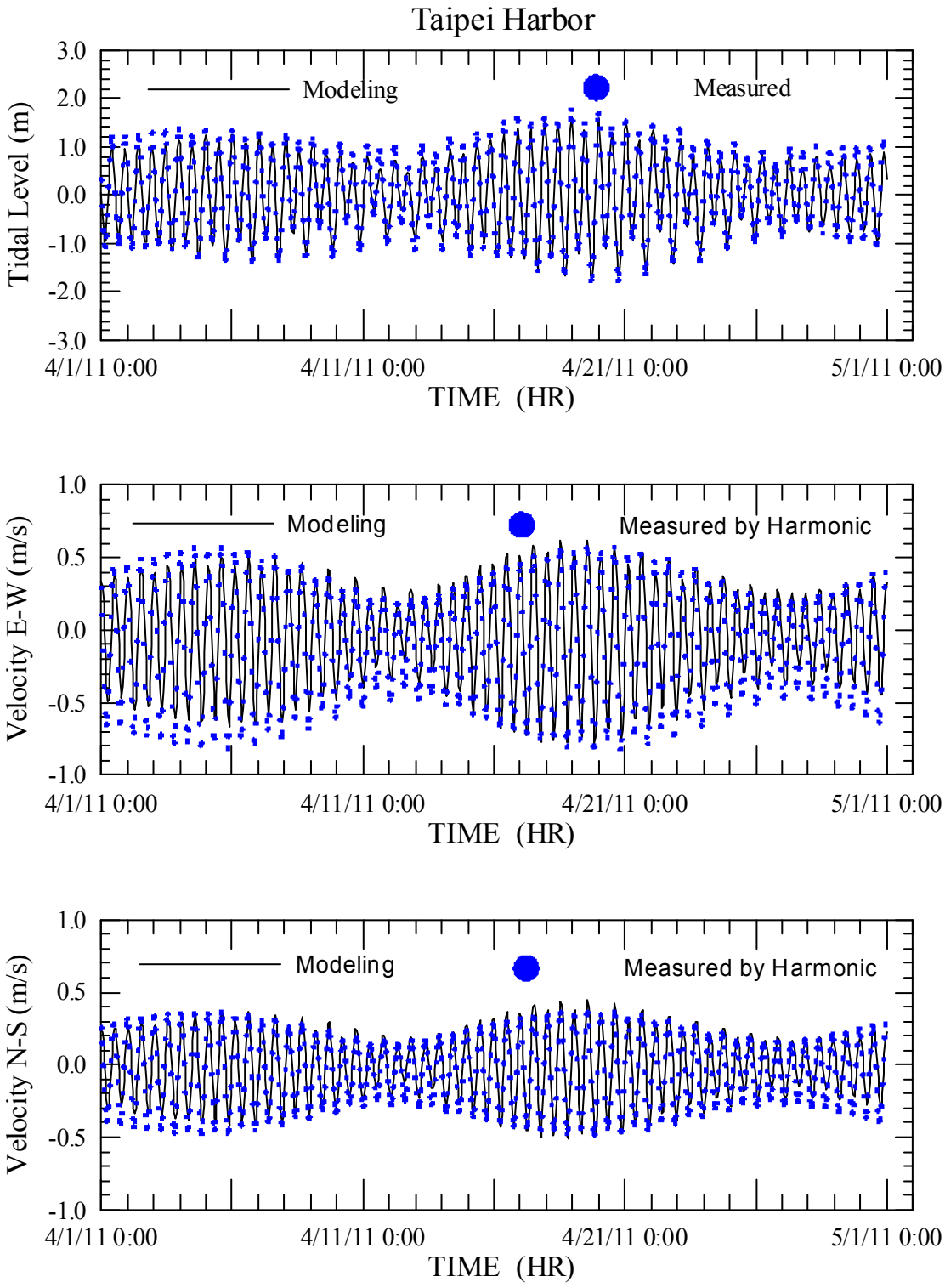


圖 4.35 (續 1)臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

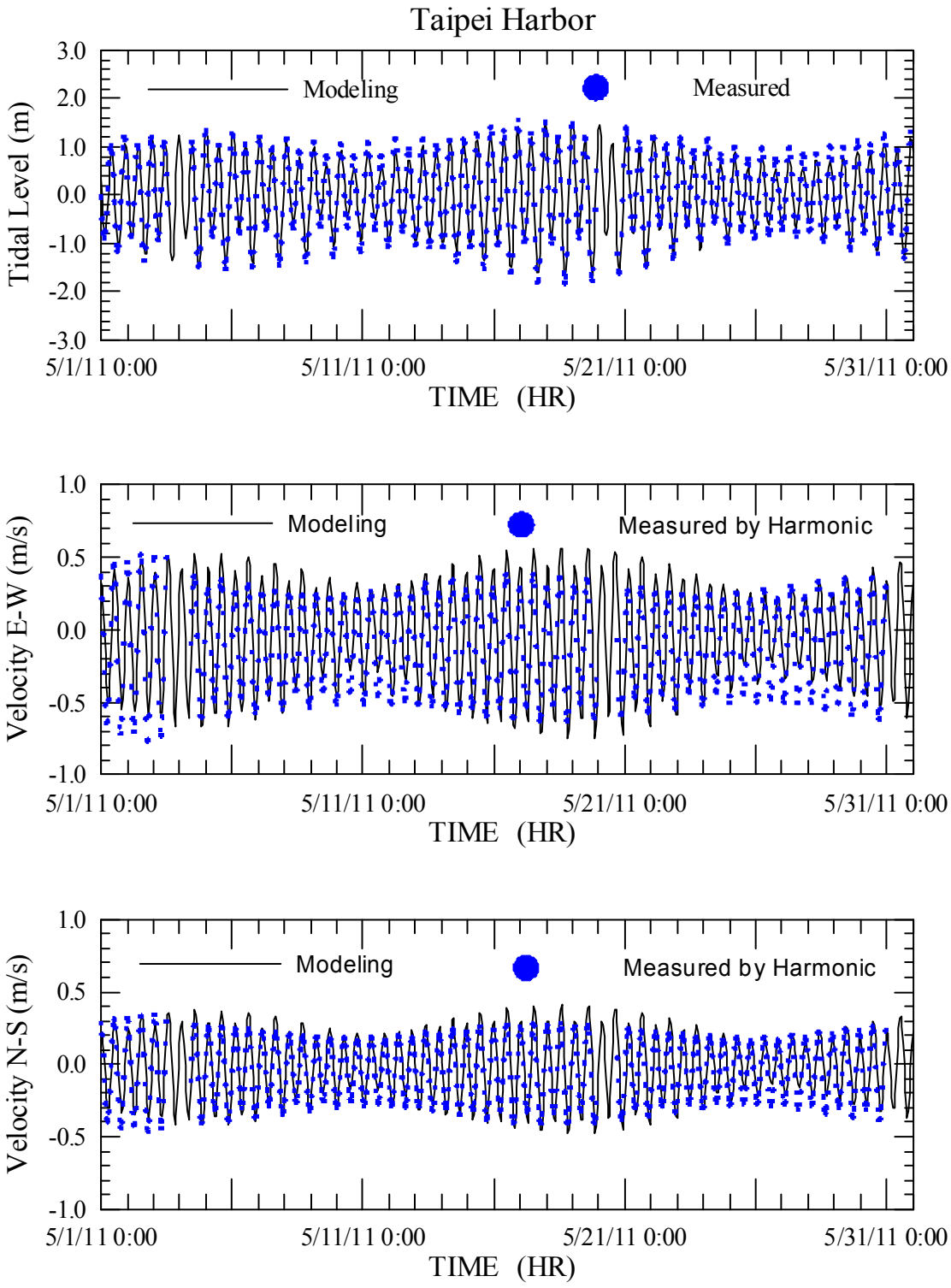


圖 4.35 (續 2)臺北港水位及潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

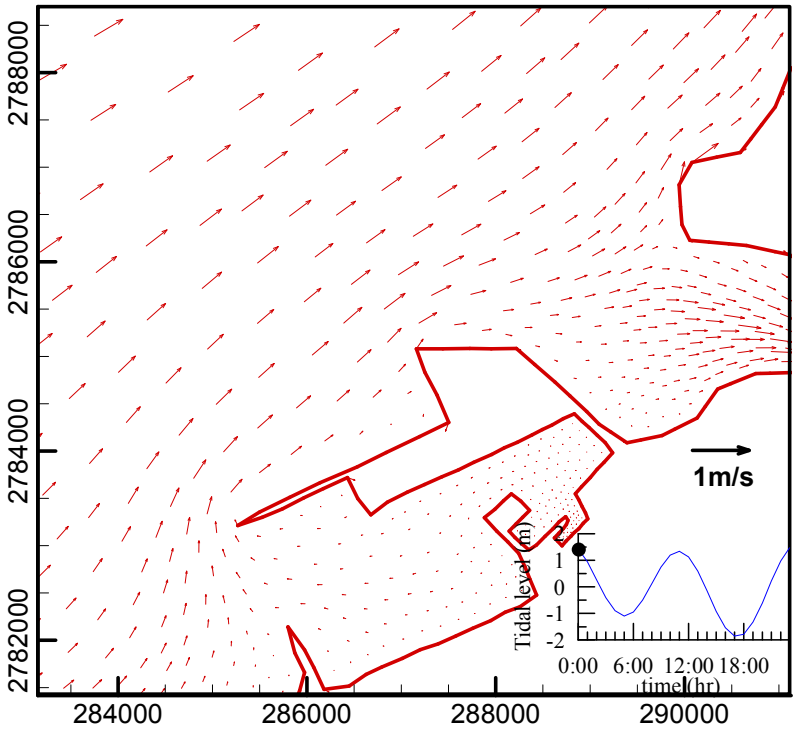


圖 4.36 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 0 時)

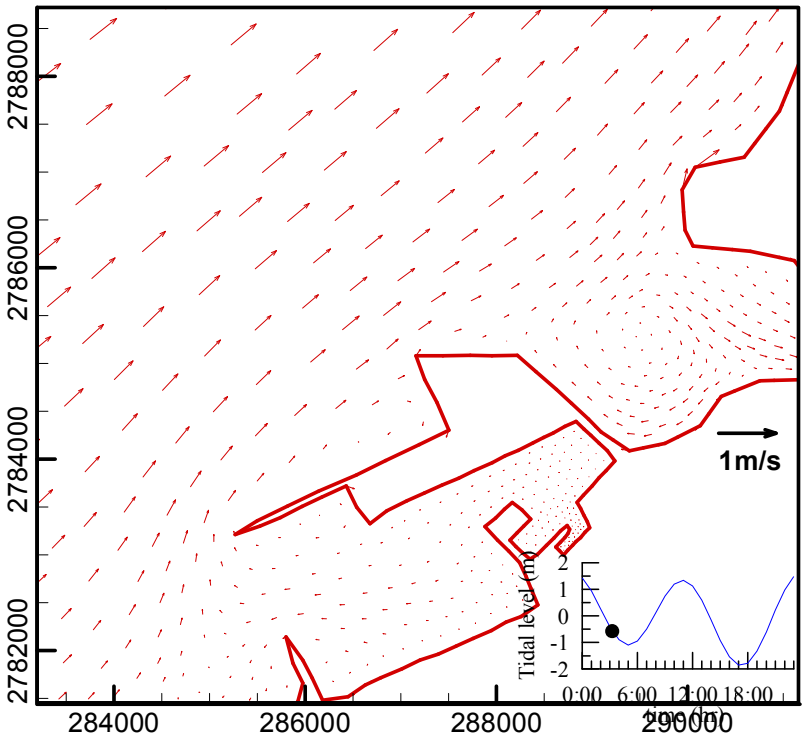


圖 4.36(續 1) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 3 時)

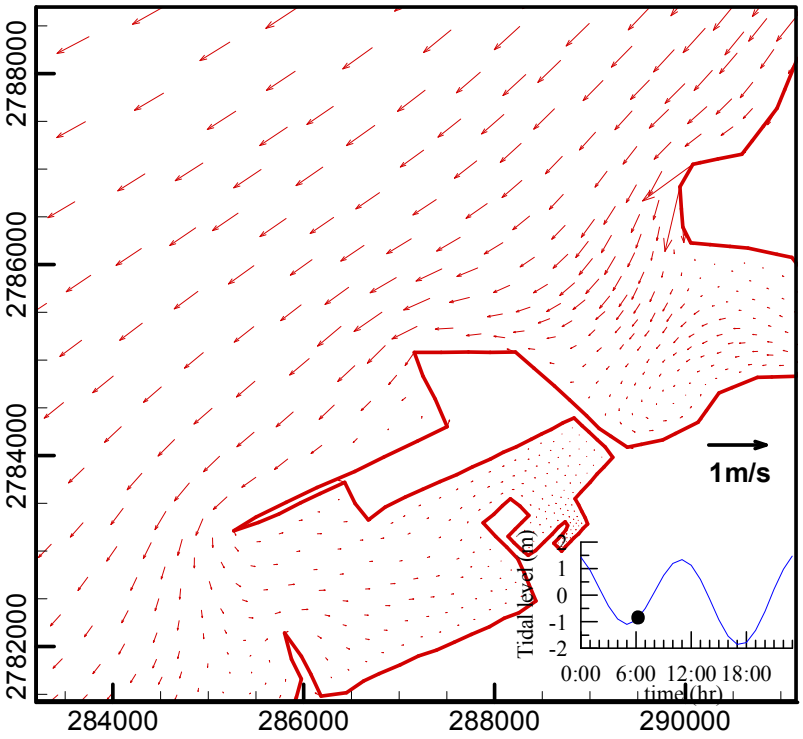


圖 4.36(續 2) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 6 時)

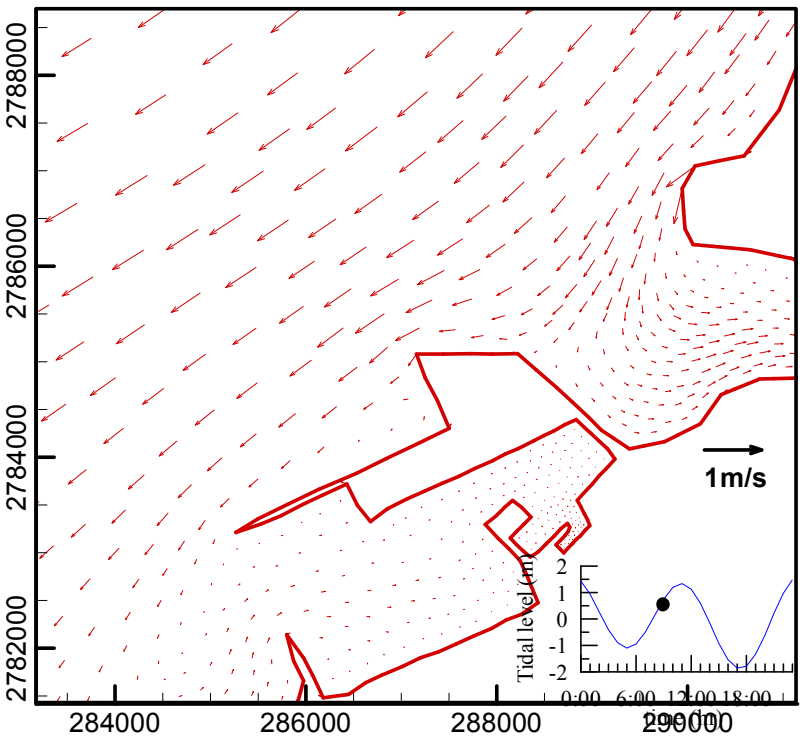


圖 4.36(續 3) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 9 時)

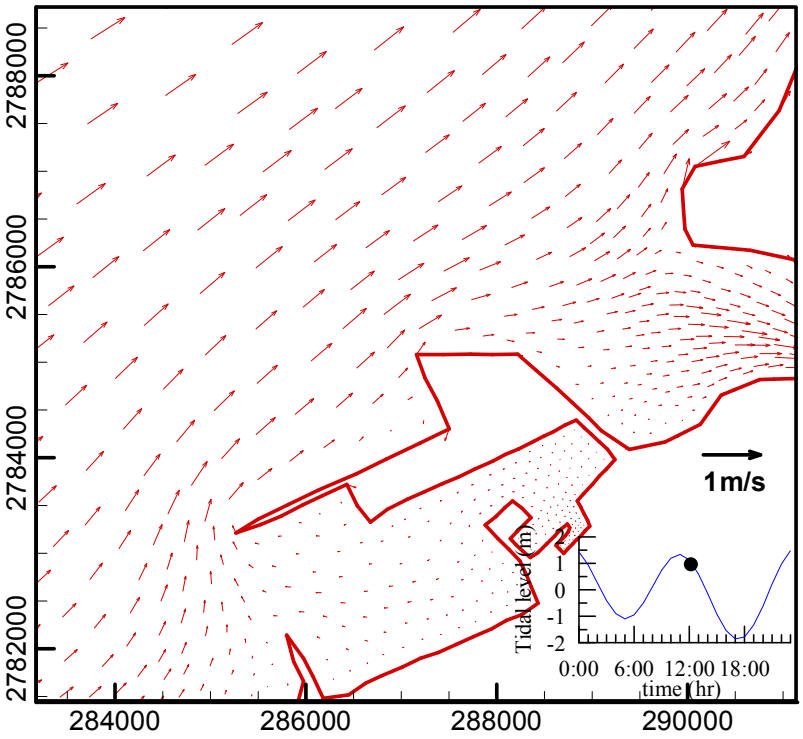


圖 4.36(續 4) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 12 時)

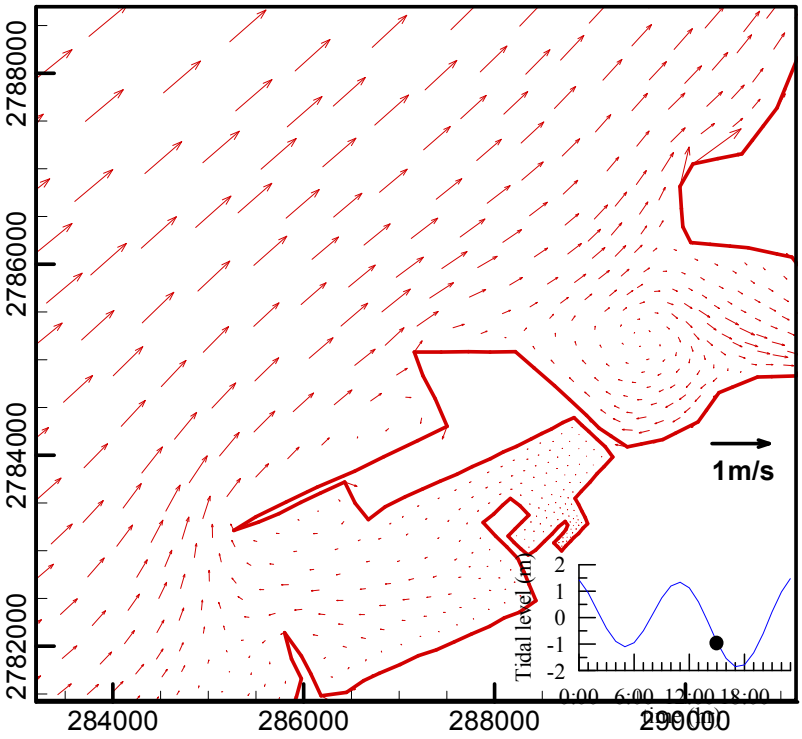


圖 4.36(續 5) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 15 時)

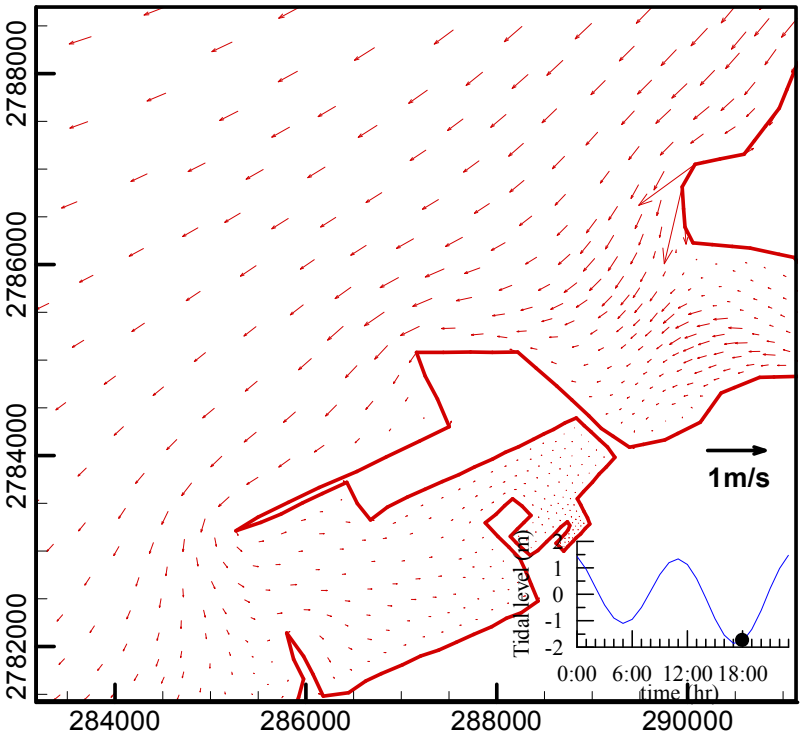


圖 4.36(續 6) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 18 時)

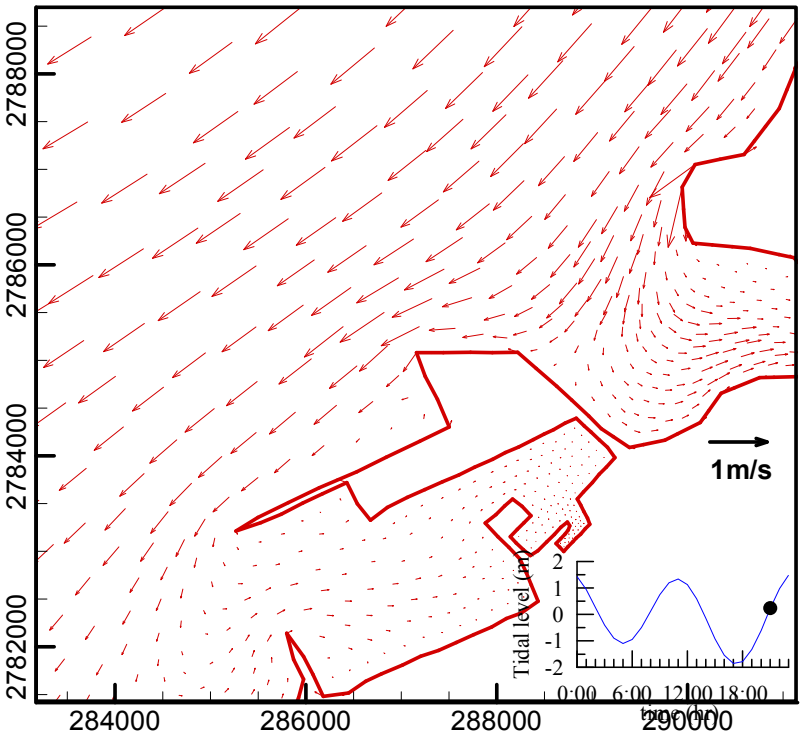


圖 4.36(續 7) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 18 日 21 時)

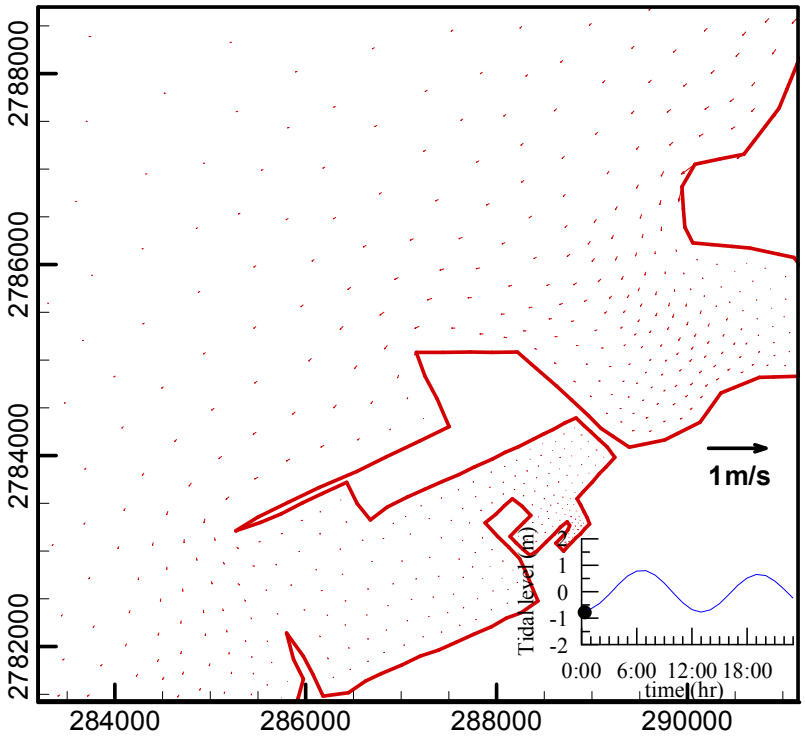


圖 4.37 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 0 時)

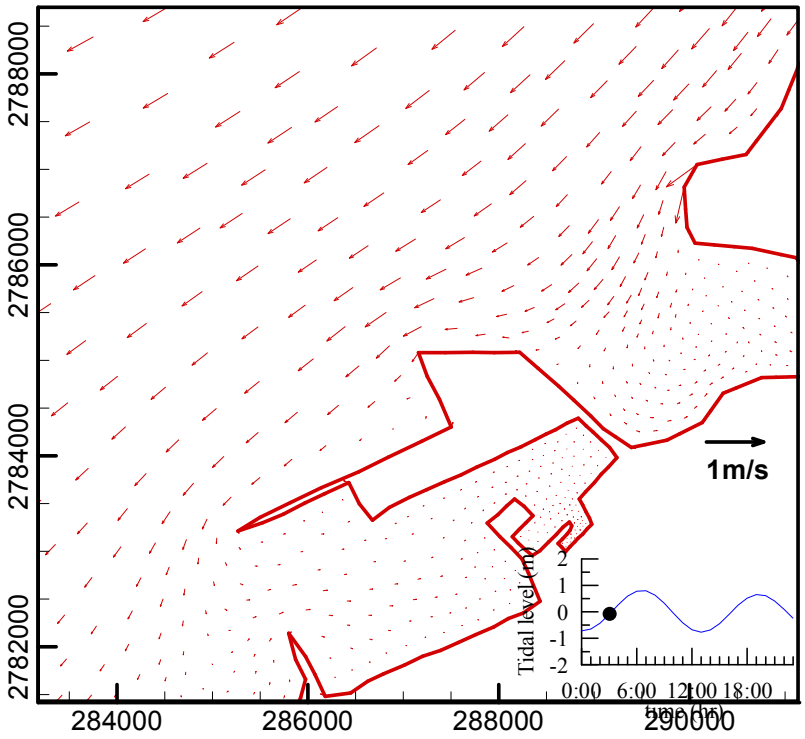


圖 4.37(續 1) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 3 時)

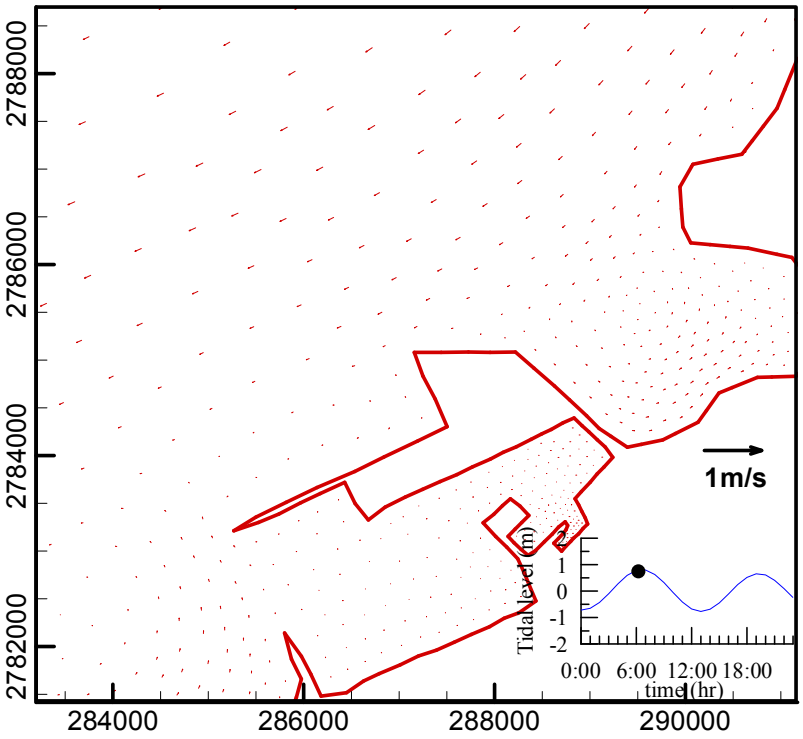


圖 4.37(續 2) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 6 時)

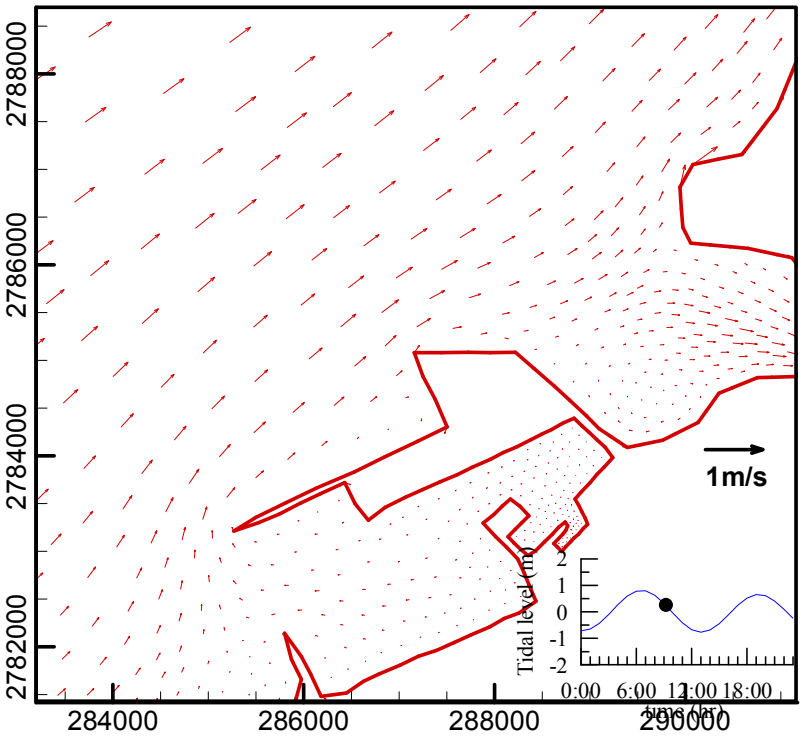


圖 4.37(續 3) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 9 時)

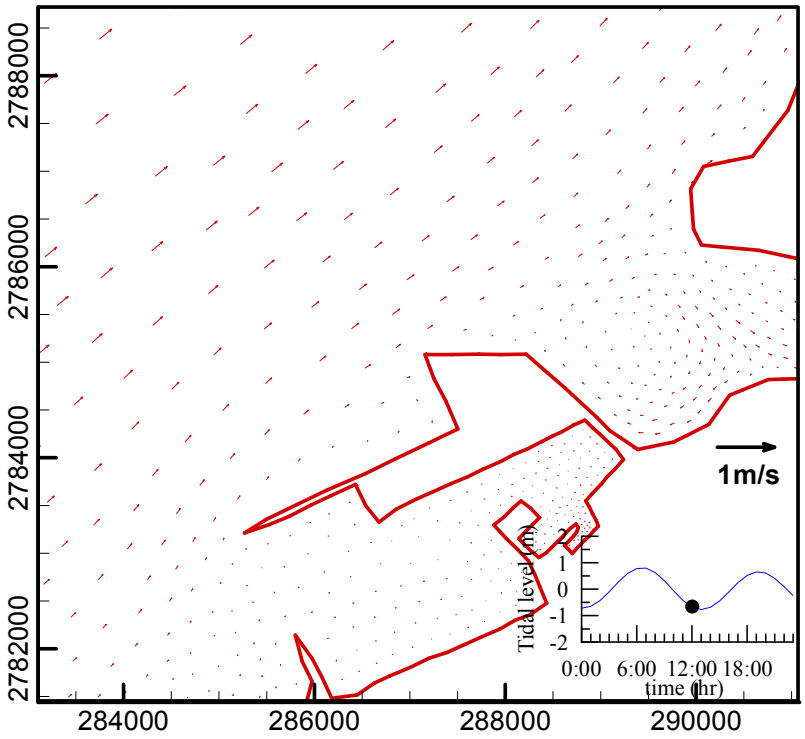


圖 4.37(續 4) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 12 時)

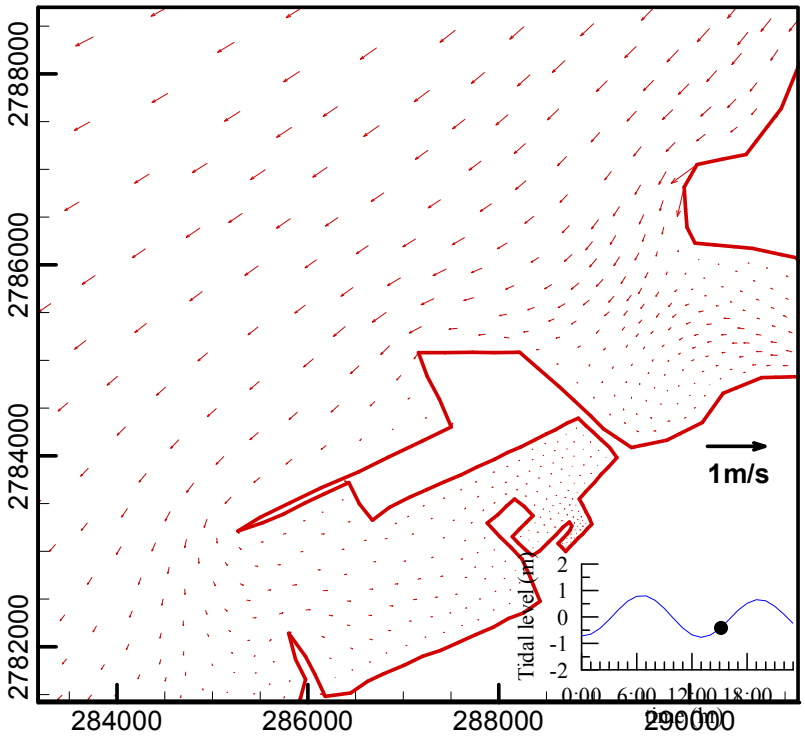


圖 4.37(續 5) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 15 時)

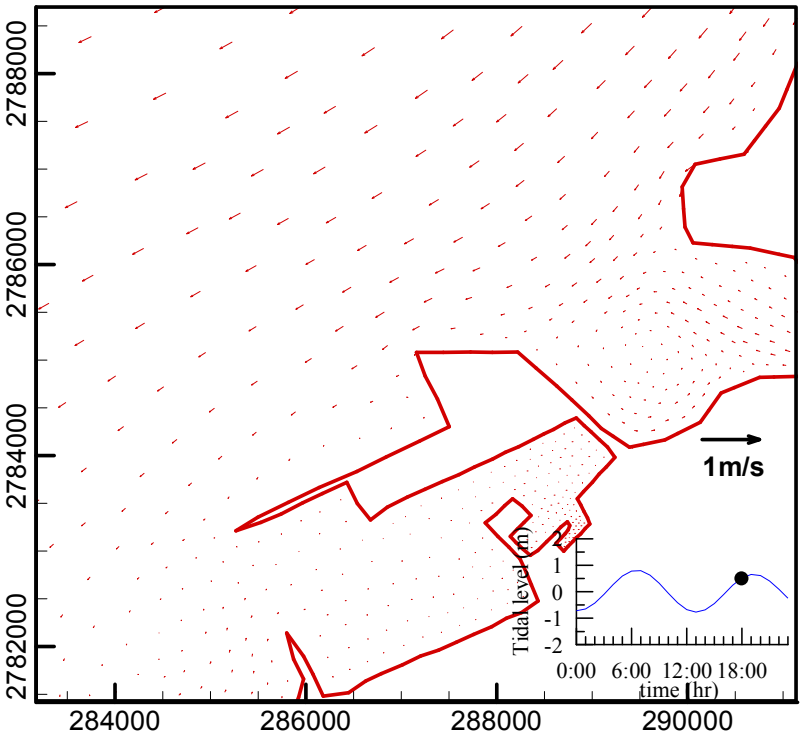


圖 4.37(續 6) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 18 時)

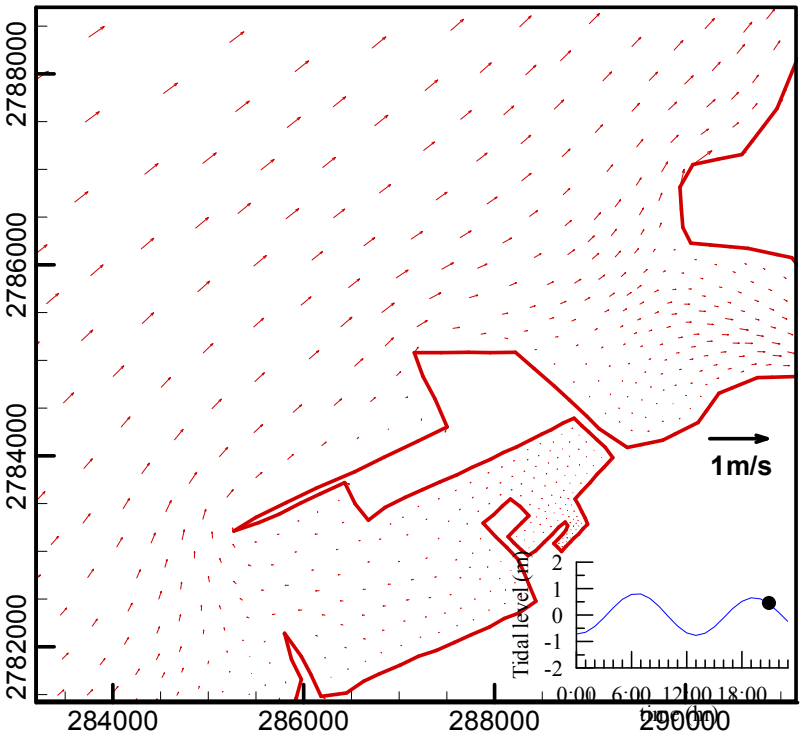


圖 4.37(續 7) 臺北港港口附近流況向量分佈圖(5 月 27 日 21 時)

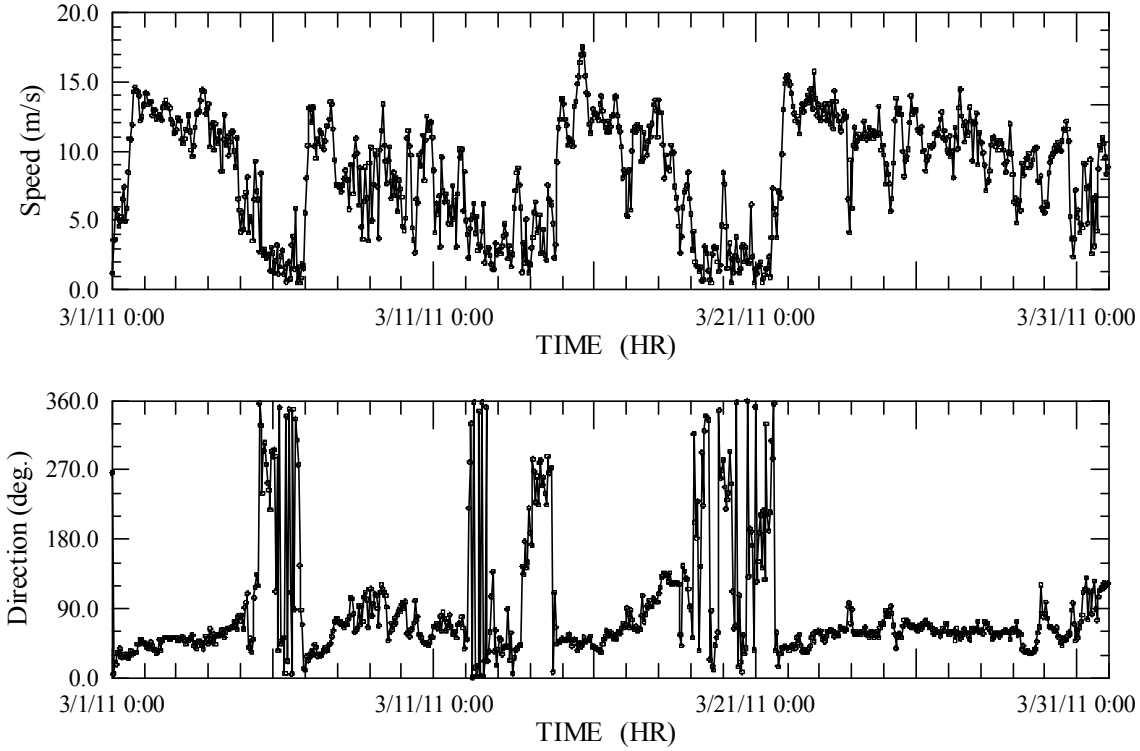


圖 4.38 臺北港 2011 年 3 月份風速風向觀測資料

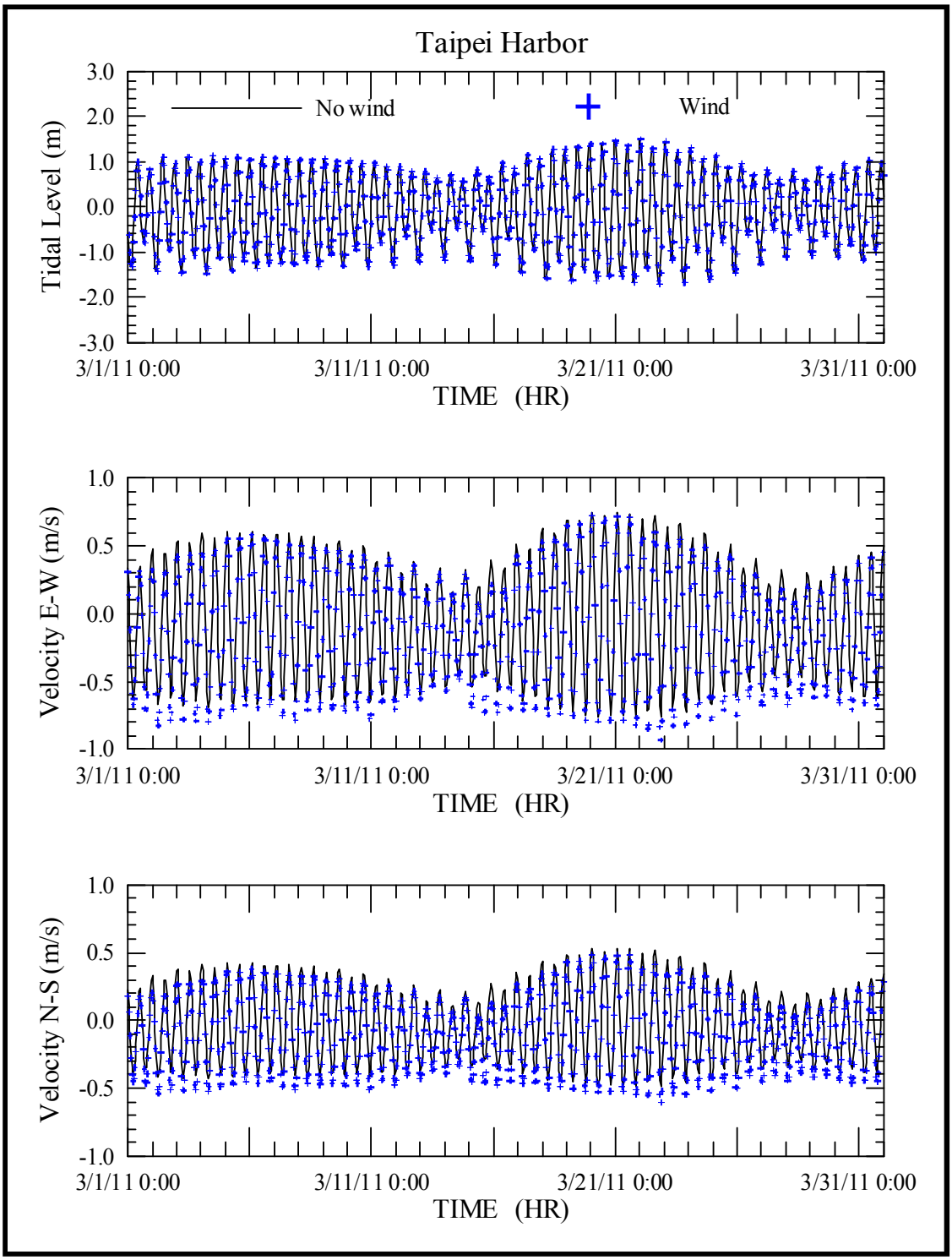


圖 4.39 有、無風作用下臺北港觀測樁附近節點水位及流速模擬結果比較

4.5 模式預測結果評估

本章節將分別針對基隆港與臺北港於本年度 3 月至 9 月期間水位及海流觀測資料與利用水動力模式預測成果進行比對評估，另外亦針對颱風期間兩商港水位與海流模擬成果評估。

4.5.1 基隆港水位與流速

圖 4.40 所示為基隆港 2011 年 3 月至 9 月潮位觀測與基隆港水動力模式預測資料之比較，由圖顯示觀測資料與模式預測之水位比對結果趨勢相當一致。觀測期間基隆港潮位觀測與預報資料蒐集率、平均水位、最高水位與最低水位分別列於表 4-8 至表 4-11，各表中 OBS1 表示為港灣技術研究中心觀測 1 站資料，近岸模式指小尺度水動力模式。由表 4-9 可知 3 月至 9 月模式預測結果每月平均水位不為零，以 8 月平均水位最高為 0.165 m；港研中心所提供觀測資料經處理後已扣除平均水位，故每月平均水位趨近零。表 4-10 指出 3 至 9 月基隆港觀測最高水位為 0.543 m，發生於 3 月 15 日 7 時，預測最高水位為 0.615 m，發生於 5 月 18 日 23 時，觀測最高水位與模式預測到最高水位之偏差約為 0.07 m。表 4-11 則指出 3 至 9 月觀測到最低水位為-0.807 m，發生於 5 月 18 日 15 時，模式預測最低水位為-0.917 m，發生於 4 月 20 日 16 時，兩者偏差為 0.11 m。

基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料經調和分析後結果之比較如圖 4.41 所示，潮流觀測資料的調和分析係指利用第三章所述之四個分潮(O_1、K_1、M_2、S_2)調和分析後計算所得。由圖顯示基隆港水動力模式模擬結果與潮流觀測資料調和分析結果相當一致。基隆港海流觀測與預報資料蒐集率與最大流速則分別列於表 4-12 及表 4-13。表 4-13 說明基隆港每月測站所觀測到最大流速均大於模式預測結果許多，觀測最大流速為 0.95 m/s，發生於 9 月 15 日 14 時，流向為東北東向；模式預測最大流速僅為 0.331 m/s，發生於 9 月 29 日 0 時，流向亦為東北東向。

由表 5-6 結果顯示測站流速除潮流外，其他流速成份可能大於潮流，觀測與預測最大流速多發生於東北東向。

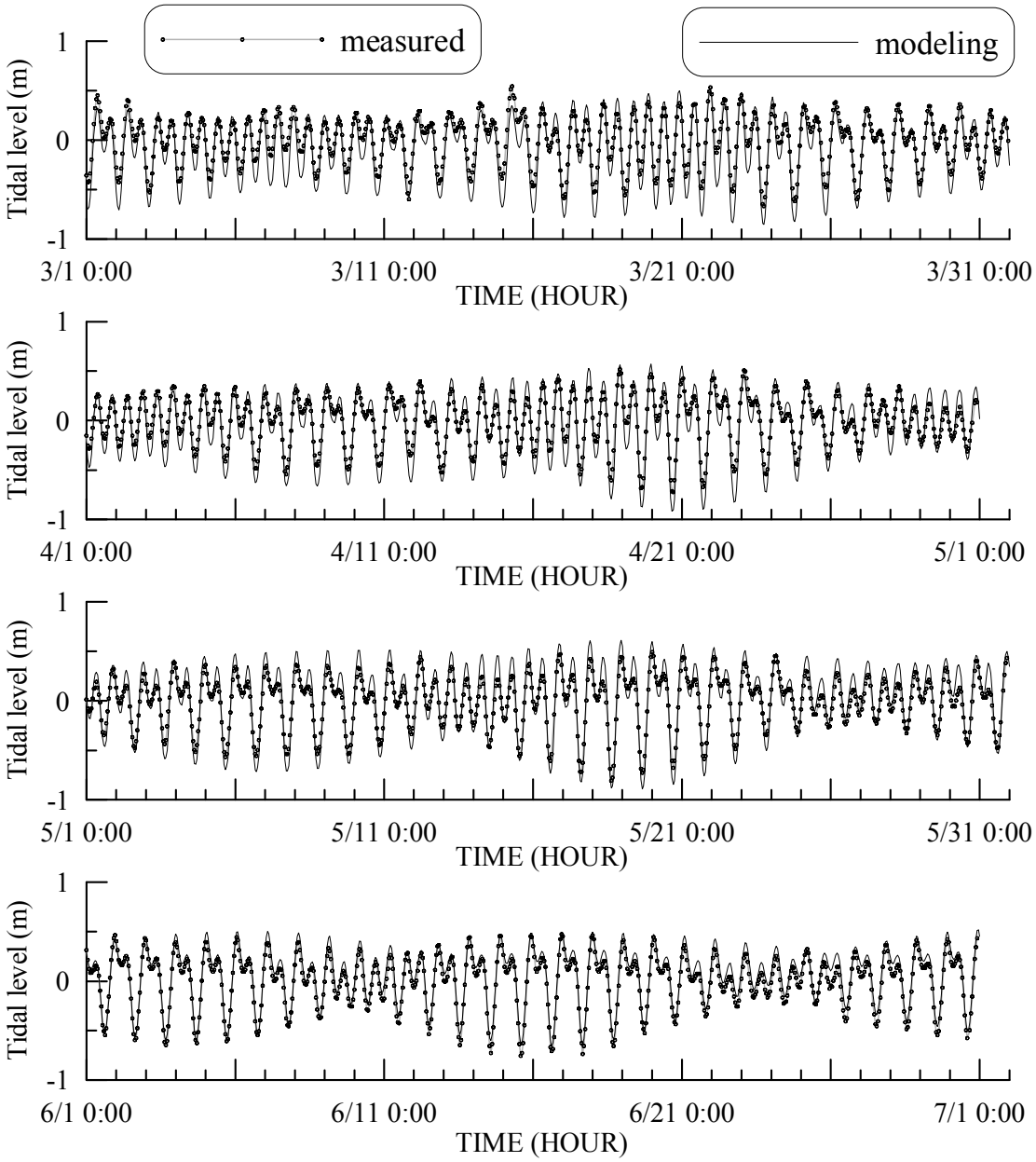


圖 4.40 基隆港水位觀測資料與模擬結果之比較

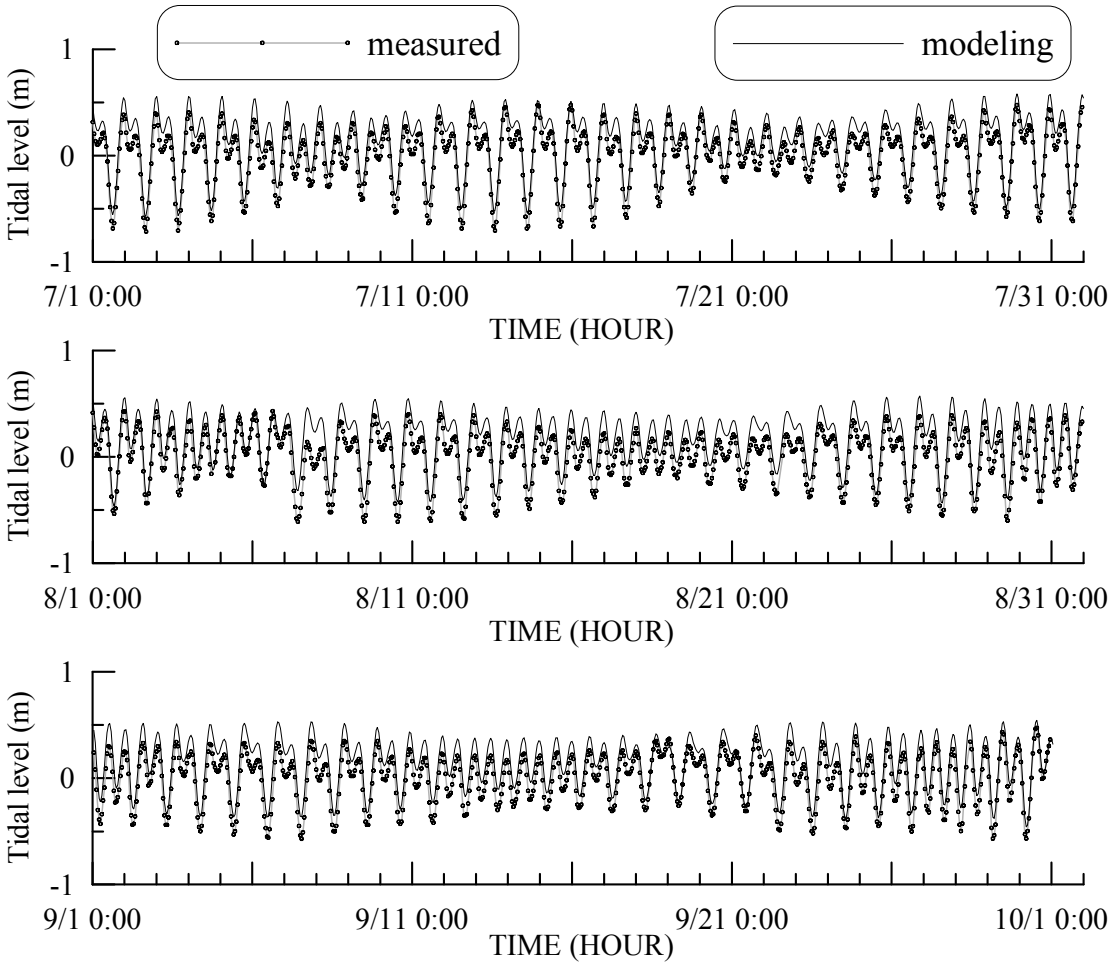


圖 4.40(續 1) 基隆港水位觀測資料與模擬結果之比較

表 4-8 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表

2011 年月份	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
3	OBS1	742 (99.7%)
	近岸模式	744 (100%)
4	OBS1	712 (98.9%)
	近岸模式	720 (100%)
5	OBS1	736 (98.9%)
	近岸模式	744 (100%)
6	OBS1	717 (99.6%)
	近岸模式	720 (100%)
7	OBS1	744 (100%)
	近岸模式	744 (100%)
8	OBS1	739 (99.3%)
	近岸模式	744 (100%)
9	OBS1	682 (94.7%)
	近岸模式	720 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-9 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位資料平均水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	平均水位
3	OBS1	0.000
	近岸模式	-0.081
4	OBS1	0.000
	近岸模式	-0.036
5	OBS1	0.000
	近岸模式	0.036
6	OBS1	0.000
	近岸模式	0.065
7	OBS1	-0.005
	近岸模式	0.130
8	OBS1	0.006
	近岸模式	0.165
9	OBS1	-0.003
	近岸模式	0.146

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-10 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位最高水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	最高水位(發生日/時)
3	OBS1	0.543 (15/7)
	近岸模式	0.506 (21/23)
4	OBS1	0.517 (18/22)
	近岸模式	0.572 (19/23)
5	OBS1	0.493 (20/0)
	近岸模式	0.615 (18/23)
6	OBS1	0.474 (16/23)
	近岸模式	0.519 (30/23)
7	OBS1	0.475 (29/22)
	近岸模式	0.580 (29/22)
8	OBS1	0.430 (6/15)
	近岸模式	0.574 (26/21)
9	OBS1	0.473 (30/12)
	近岸模式	0.546 (30/12)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-11 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報潮位最低水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	最低水位(發生日/時)
3	OBS1	-0.667 (23/18)
	近岸模式	-0.852 (23/18)
4	OBS1	-0.723 (20/17)
	近岸模式	-0.917 (20/16)
5	OBS1	-0.807 (18/15)
	近岸模式	-0.892 (19/16)
6	OBS1	-0.756 (15/14)
	近岸模式	-0.655 (16/15)
7	OBS1	-0.715 (2/16)
	近岸模式	-0.566 (3/16)
8	OBS1	-0.610 (7/10)
	近岸模式	-0.467 (1/16)
9	OBS1	-0.569 (7/12)
	近岸模式	-0.458 (30/4)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

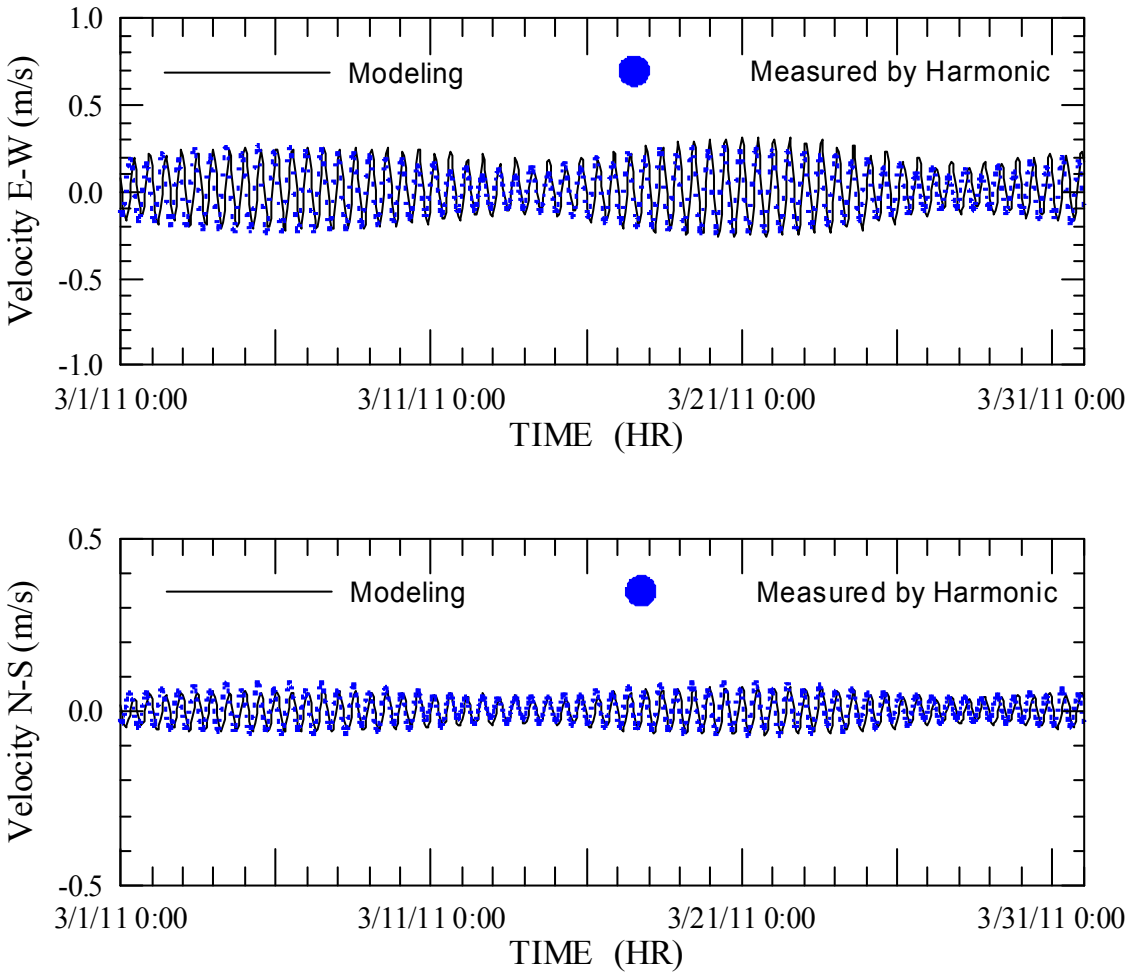


圖 4.41 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

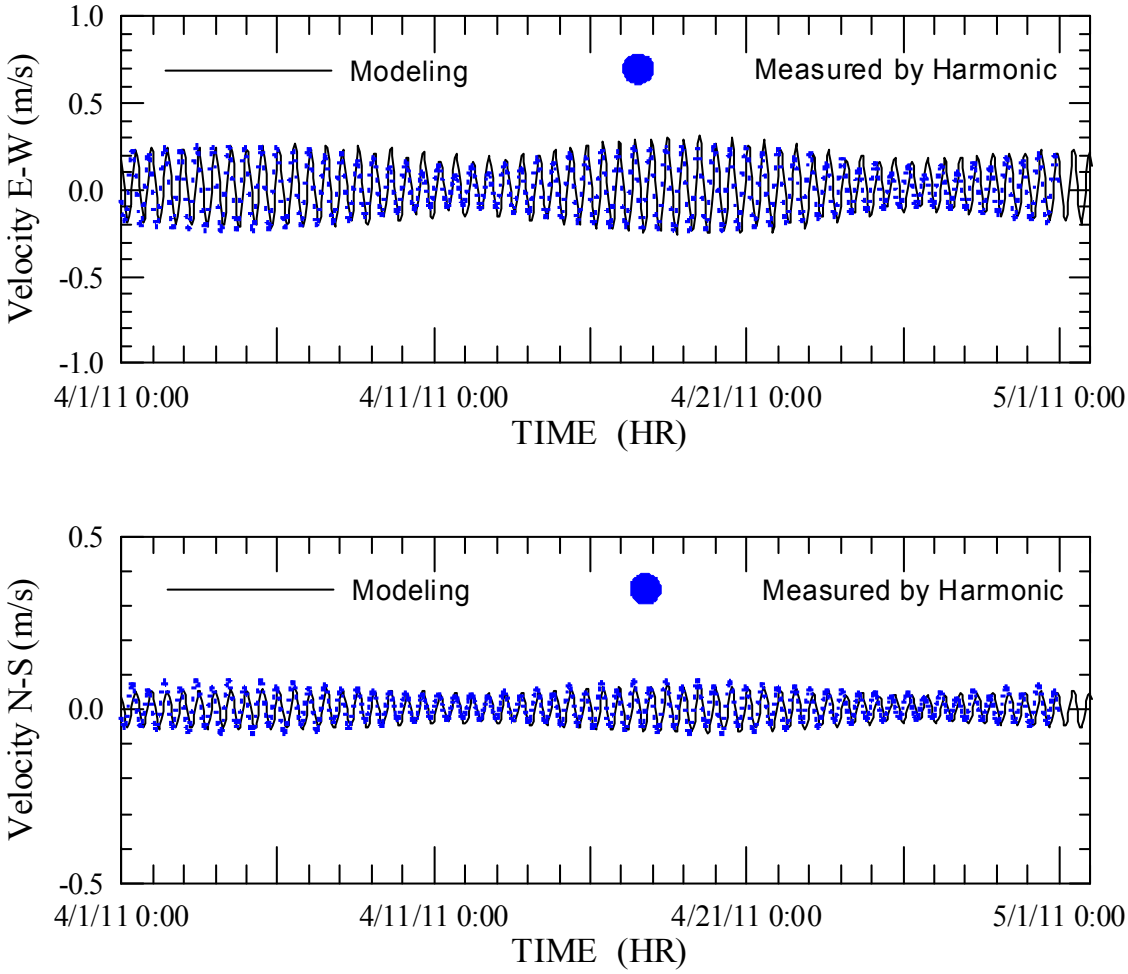


圖 4.41(續 1) 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

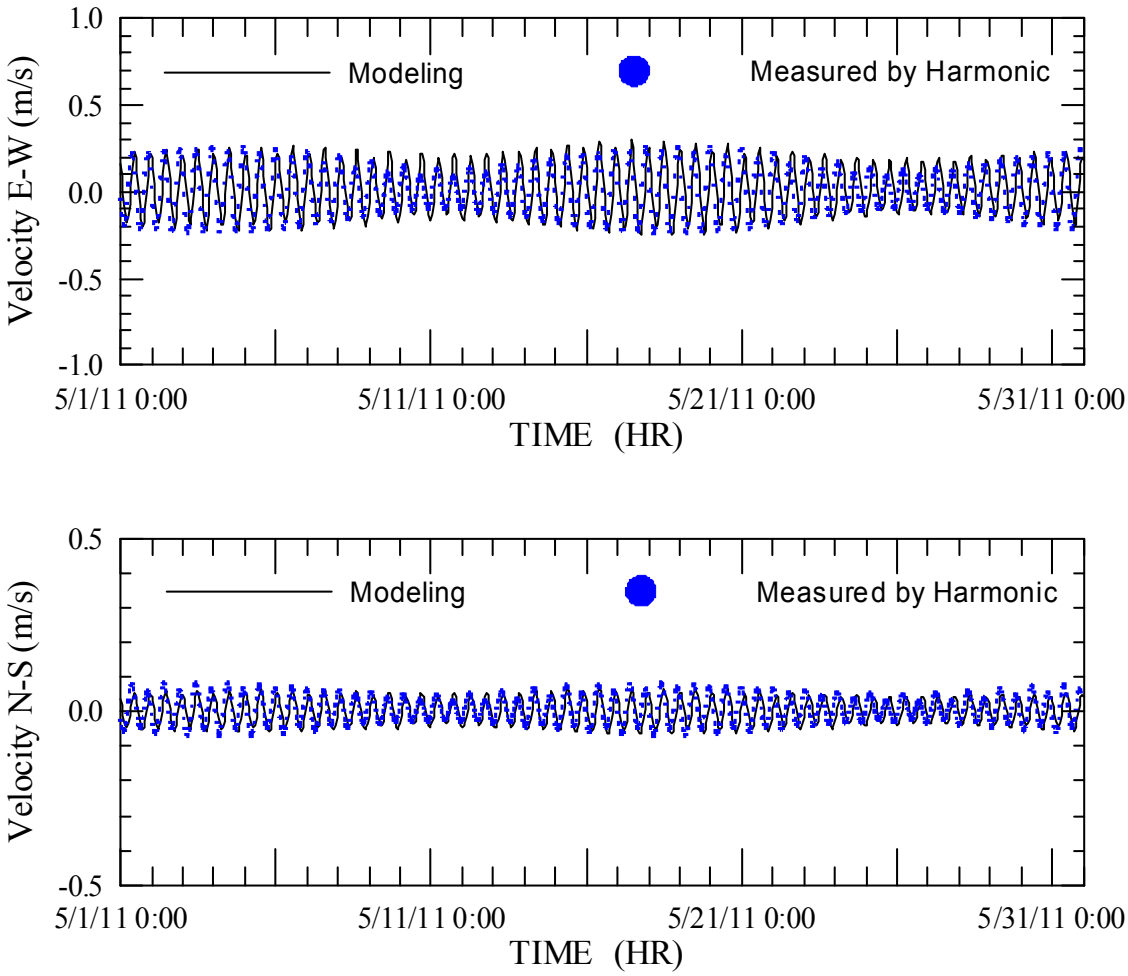


圖 4.41(續 2) 基隆港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析 (O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

表 4-12 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報海流資料蒐集率統計表

2011 年月份	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
3	OBS1	741 (99.6%)
	近岸模式	744 (100%)
4	OBS1	711 (98.8%)
	近岸模式	720 (100%)
5	OBS1	736 (98.9%)
	近岸模式	744 (100%)
6	OBS1	716 (99.4%)
	近岸模式	720 (100%)
7	OBS1	744 (100%)
	近岸模式	744 (100%)
8	OBS1	739 (99.3%)
	近岸模式	744 (100%)
9	OBS1	682 (94.7%)
	近岸模式	720 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-13 2011 年 3 月至 9 月基隆港觀測與預報流場最大流速統計表

(單位：m/s)

2011 年月份	方法	最大流速(發生時流向、日/時)
3	OBS1	0.73 (E 22/23)
	近岸模式	0.22 (ENE 22/13)
4	OBS1	0.72 (ENE 4/10)
	近岸模式	0.218 (ENE 19/12)
5	OBS1	0.53 (ENE 12/6)
	近岸模式	0.205 (ENE 17/11)
6	OBS1	0.62 (ENE 11/4)
	近岸模式	0.278 (ENE 15/11)
7	OBS1	0.54 (WSW 5/18)
	近岸模式	0.293 (ENE 31/12)
8	OBS1	0.94 (ENE 31/8)
	近岸模式	0.325 (ENE 30/12)
9	OBS1	0.95 (ENE 15/14)
	近岸模式	0.331 (ENE 29/0)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

4.5.2 臺北港水位與流速

圖 4.42 所示為臺北港 2011 年 3 月至 9 月潮位觀測與臺北港水動力模式預報資料之比較，由圖顯示模式預測之水位與觀測資料比對結果趨勢相當一致。觀測期間臺北港潮位觀測與預報資料蒐集率、平均水位、最高水位與最低水位分別列於表 4-14 至表 4-17。由表 4-15 可知 3 月至 9 月模式預測結果臺北港每月平均水位均較小，最大僅 0.013 m。表 4-16 指出 3 月至 9 月臺北港觀測到最高水位為 1.768 m，發生於 3 月 22 日 0 時，模式預測最高水位為 1.689 m，發生於 9 月 29 日 12 時，觀測最高水位與模式預測到最高水位之偏差約為 0.08 m。表 4-17 則指出 3 至 9 月測站觀測到最低水位為-1.826 m，發生於 5 月 18 日 17 時，模式預測最低水位為-1.689 m，發生於 9 月 30 日 6 時，兩者偏差約為 0.14 m。

臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較如圖 4.43 所示，由圖顯示潮流觀測資料調和分析結果與臺北港水動力模式預測結果亦相當吻合。臺北港海流觀測與預報資料蒐集率與最大流速則分別列於表 4-18 及表 4-19。表 4-19 說明臺北港測站觀測到每月最大流速與模式預測結果相差不大，觀測最大流速為 1.15 m/s，發生於 7 月 4 日 15 時，流向為東北東向；模式預測最大流速為 1.011 m/s，發生於 3 月 20 日 20 時，流向則為西南西向。由以上結果顯示臺北港測站附近流速成份仍以天文潮流為主。觀測到最大流速多發生於東北向，模式預測最大流速則發生在西南西向。

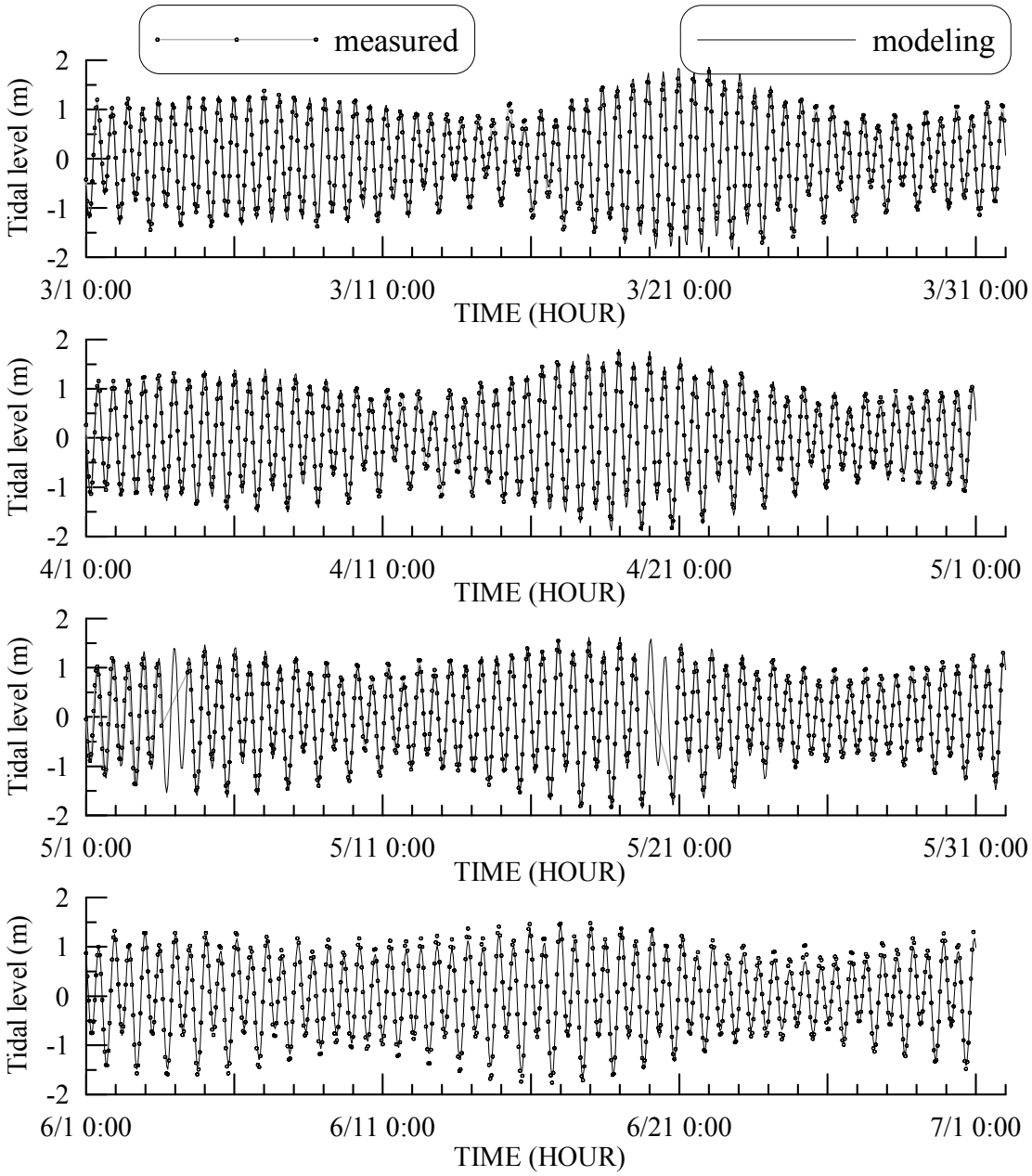


圖 4.42 臺北港水位觀測資料與模擬結果之比較

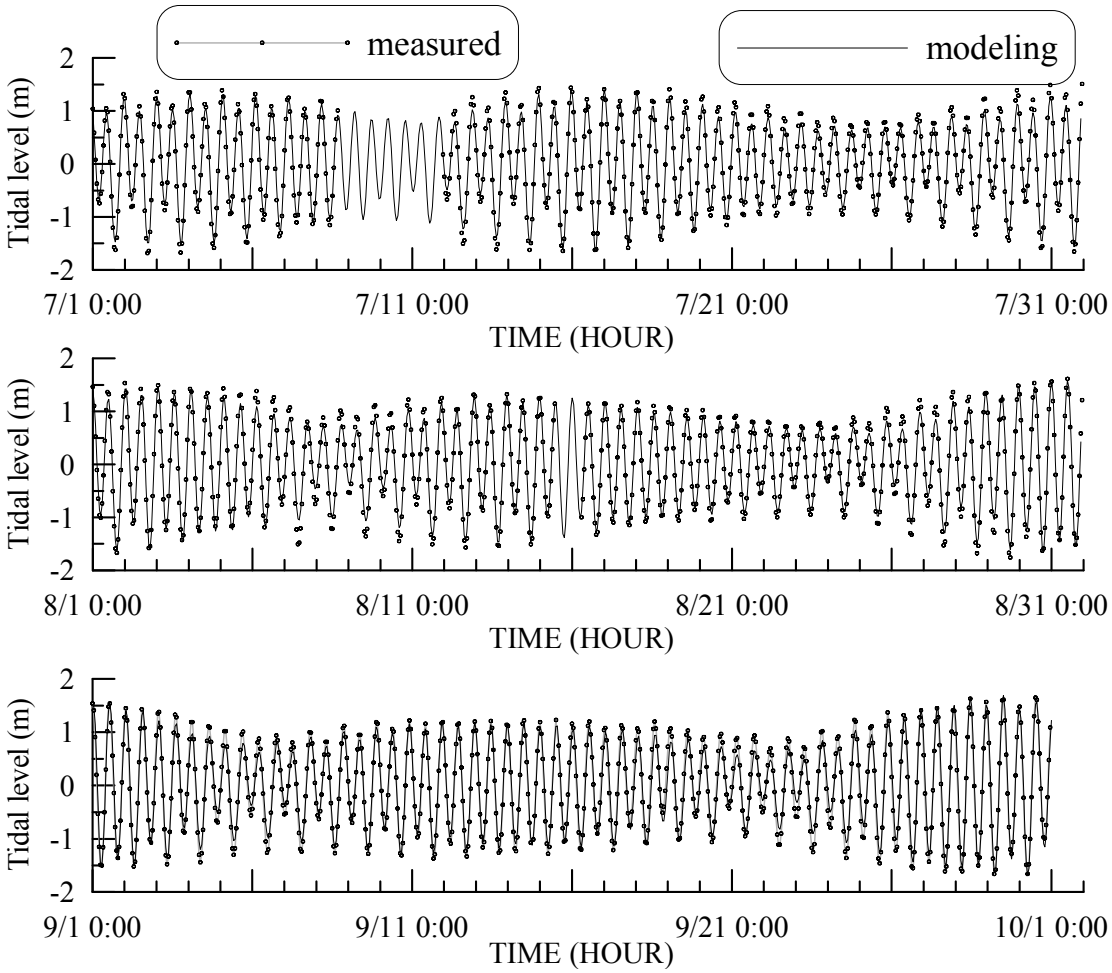


圖 4.42(續 1) 臺北港水位觀測資料與模擬結果之比較

表 4-14 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表

2011 年月份	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
3	OBS1	732 (98.4%)
	近岸模式	744 (100%)
4	OBS1	706 (98.1%)
	近岸模式	720 (100%)
5	OBS1	699 (94.0%)
	近岸模式	744 (100%)
6	OBS1	714 (99.2%)
	近岸模式	720 (100%)
7	OBS1	664 (89.2%)
	近岸模式	744 (100%)
8	OBS1	723 (97.2%)
	近岸模式	744 (100%)
9	OBS1	715 (99.3%)
	近岸模式	720 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-15 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位資料平均水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	平均水位
3	OBS1	0.000
	近岸模式	0.010
4	OBS1	0.000
	近岸模式	0.009
5	OBS1	0.000
	近岸模式	0.006
6	OBS1	0.000
	近岸模式	0.004
7	OBS1	0.000
	近岸模式	0.003
8	OBS1	0.000
	近岸模式	0.010
9	OBS1	0.000
	近岸模式	0.013

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-16 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位最高水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	最高水位(發生日/時)
3	OBS1	1.768 (22/0)
	近岸模式	1.676 (22/0)
4	OBS1	1.715 (18/23)
	近岸模式	1.624 (18/23)
5	OBS1	1.544 (16/22)
	近岸模式	1.481 (19/0)
6	OBS1	1.481 (18/0)
	近岸模式	1.421 (17/0)
7	OBS1	1.509 (31/23)
	近岸模式	1.405 (17/0)
8	OBS1	1.614 (31/12)
	近岸模式	1.584 (31/12)
9	OBS1	1.649 (30/12)
	近岸模式	1.689 (29/12)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-17 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報潮位最低水位統計表

(單位：m)

2011 年月份	方法	最低水位(發生日/時)
3	OBS1	-1.702 (23/19)
	近岸模式	-1.672 (21/18)
4	OBS1	-1.825 (19/17)
	近岸模式	-1.681 (19/17)
5	OBS1	-1.826 (18/17)
	近岸模式	-1.676 (18/17)
6	OBS1	-1.759 (16/17)
	近岸模式	-1.674 (17/18)
7	OBS1	-1.681 (2/17)
	近岸模式	-1.611 (15/17)
8	OBS1	-1.756 (29/17)
	近岸模式	-1.625 (1/18)
9	OBS1	-1.661 (29/5)
	近岸模式	-1.689 (30/6)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

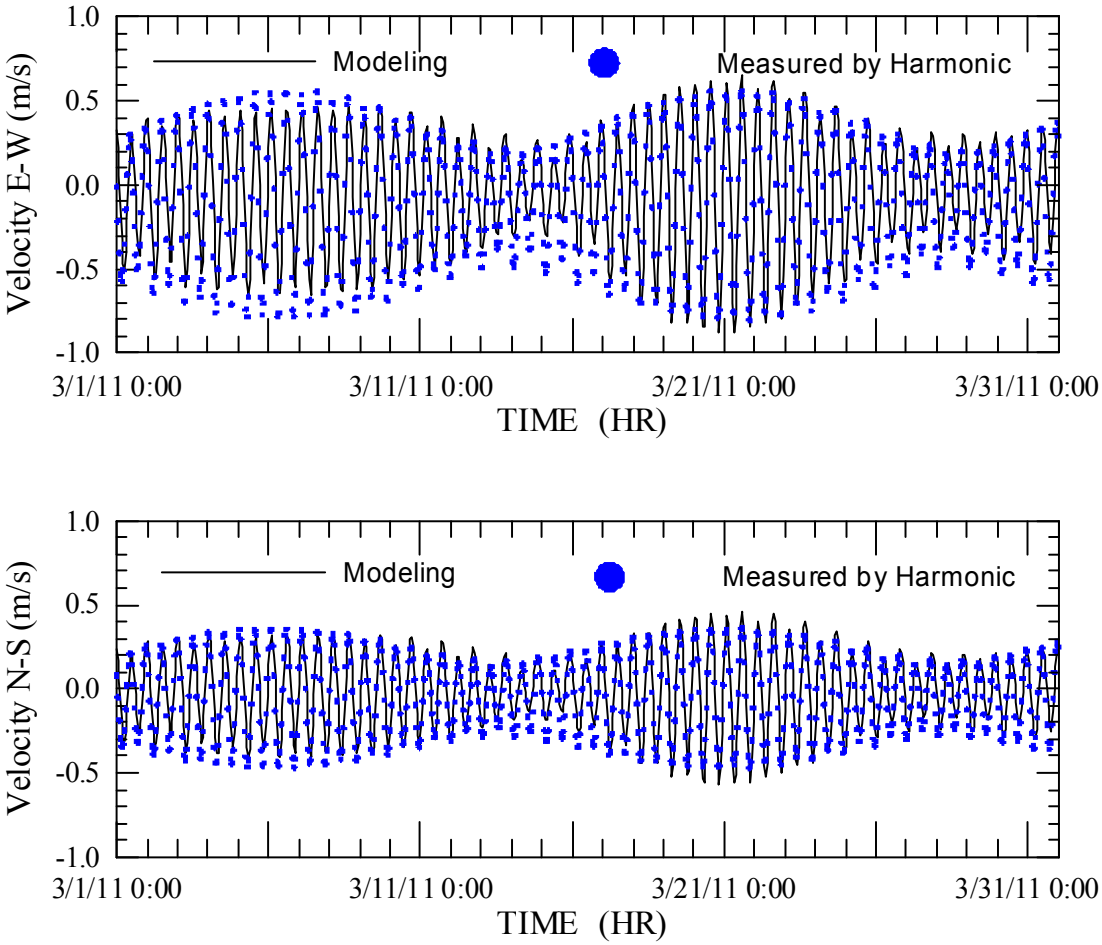


圖 4.43 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

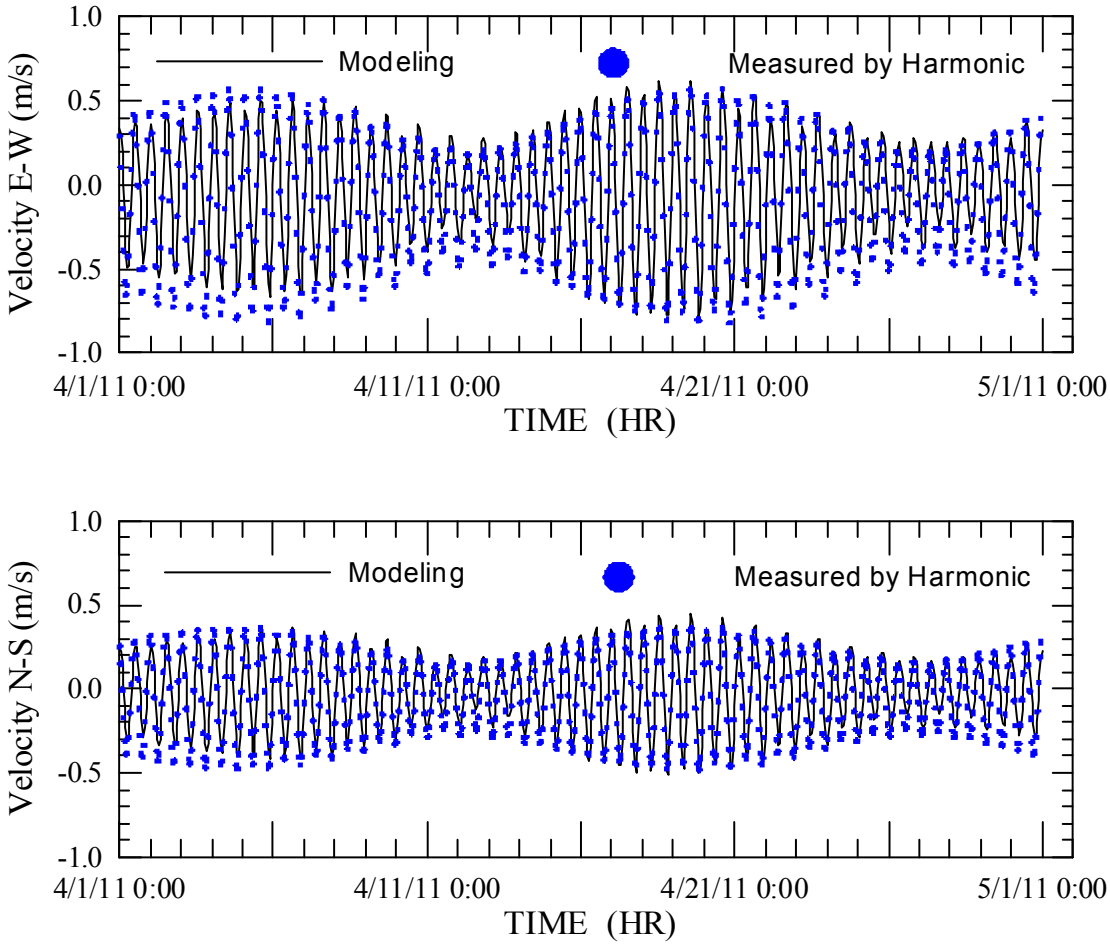


圖 4.43(續 1) 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

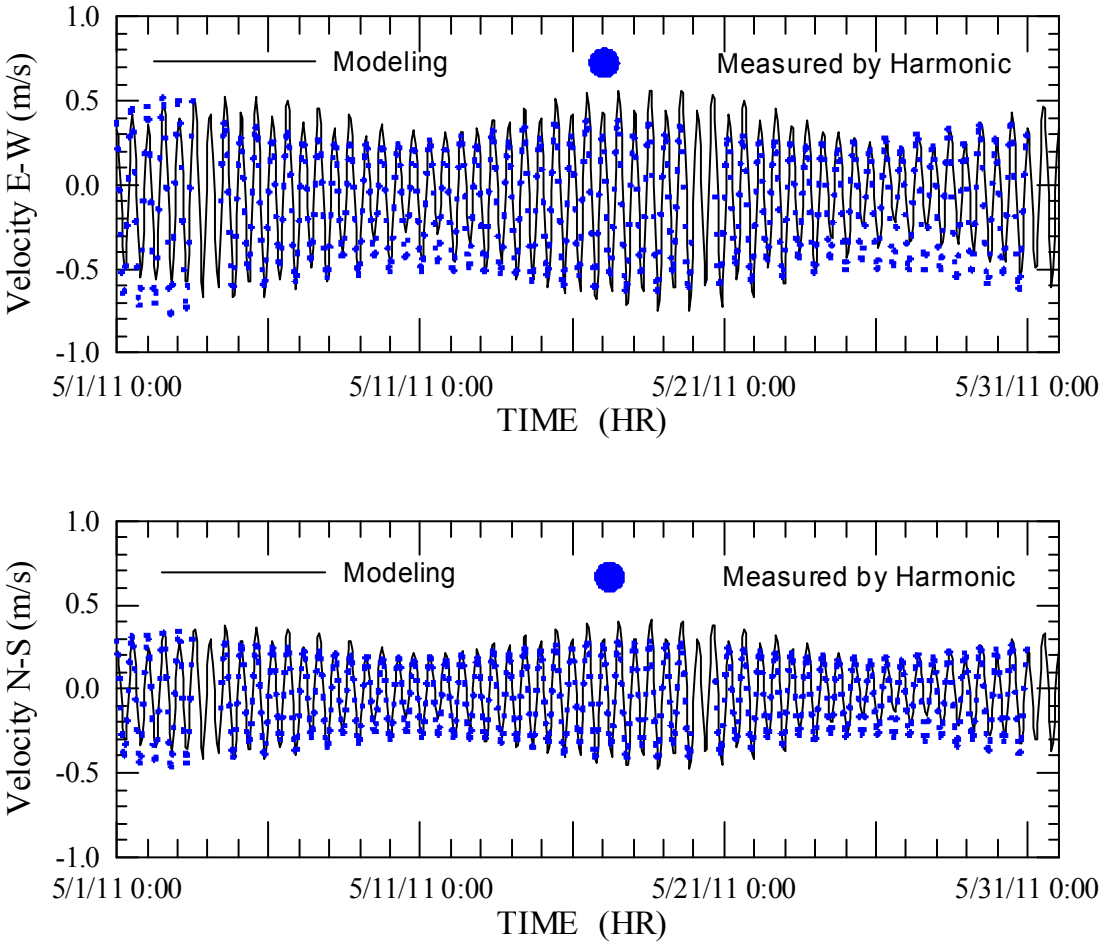


圖 4.43(續 2) 臺北港潮流模擬結果與潮流觀測資料調和分析(O_1、K_1、M_2、S_2)結果之比較

表 4-18 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報海流資料蒐集率統計表

2011 年月份	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
3	OBS1	732 (98.4%)
	近岸模式	744 (100%)
4	OBS1	706 (98.1%)
	近岸模式	720 (100%)
5	OBS1	699 (94.0%)
	近岸模式	744 (100%)
6	OBS1	714 (99.2%)
	近岸模式	720 (100%)
7	OBS1	664 (89.2%)
	近岸模式	744 (100%)
8	OBS1	723 (97.2%)
	近岸模式	744 (100%)
9	OBS1	715 (99.3%)
	近岸模式	720 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-19 2011 年 3 月至 9 月臺北港觀測與預報流場最大流速統計表

(單位：m/s)

2011 年月份	方法	最大流速(發生時流向、日/時)
3	OBS1	1.12 (NE 21/13)
	近岸模式	1.011 (WSW 20/20)
4	OBS1	1.00 (NE 20/14)
	近岸模式	0.929 (WSW 18/20)
5	OBS1	0.89 (WNW 15/3)
	近岸模式	0.888 (WSW 19/21)
6	OBS1	1.12 (NE 14/11)
	近岸模式	0.894 (WSW 17/21)
7	OBS1	1.15 (ENE 4/15)
	近岸模式	0.877 (WSW 31/20)
8	OBS1	0.99 (NE 1/13)
	近岸模式	1.005 (WSW 30/20)
9	OBS1	1.02 (NE 29/1)
	近岸模式	0.992 (WSW 29/8)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

4.5.3 颱風期間水位與流速

本年度至 9 月底止共計有 5 個颱風影響台灣本島或附近海域，分別為艾利、桑達、米雷、梅花及南瑪都颱風。各個颱風警報發佈期間基隆港水位及海流觀測資料與模式預測結果之比較分別如圖 4.44 至圖 4.48 所示，其中海流資料包括流速大小、流向以及東西向與南北向流速分量，圖中亦包括觀測水位與預測水位的偏差。由圖 4.44 至圖 4.48 可觀察出基隆港測站於各颱風影響期間觀測水位的變化趨勢與模式預測結果一致，觀測水位與預測水位最大偏差(觀測值減預測值之絕對值)為 0.285 m，發生於南瑪都颱風影響時期。在艾利和桑達颱風時期觀測流速普遍大於預測流速，而在米雷、梅花及南瑪都颱風時期觀測流速與預測流速較為接近，但流速的變化較不一致。由流向變化顯示觀測流向相較於預測流向有提前 1 至 3 小時轉向的情形，唯在南瑪都颱風時期流向的變化較不一致，顯示基隆港測站流況較為複雜。本年度各個颱風期間基隆港水位觀測與預報資料蒐集率、平均水位、最高水位與最低水位分別列於表 4-20 至表 4-23；各颱風期間基隆港海流觀測與預報資料蒐集率、平均流速及最大流速分別列於表 4-24 至表 4-26。

圖 4.49 至圖 4.53 為臺北港於各個颱風影響期間水位及海流觀測資料與模式預測結果之比較圖，由圖可觀察出臺北港測站於各颱風影響期間觀測水位的變化與模式預測結果亦為一致，觀測水位與預測水位最大偏差為 0.352 m，發生於米雷颱風影響時期。除了米雷颱風時期觀測流速普遍大於預測流速，其餘颱風時期觀測流速的大小與預測值較為接近，整體流速的變化也大部分一致。在流向變化方面，於各颱風影響期間觀測流向相較於預測流向有提前 1 至 2 小時轉向的情形。本年度各個颱風期間臺北港水位觀測與預報資料蒐集率、平均水位、最高水位與最低水位分別列於表 4-27 至表 4-30；各颱風期間臺北港海流觀測與預報資料蒐集率、平均流速及最大流速分別列於表 4-31 至表 4-33。

綜合以上評估結果，基隆港與臺北港水動力模式預測之水位與觀

測資料比對結果趨勢相當一致。基隆港觀測最高水位與預測最高水位相差約為 0.07 m，觀測最低水位與預測值相差為 0.11m。基隆港和臺北港潮流觀測資料調和分析結果與潮流模式預測結果之比較亦相當一致。基隆港觀測流速除潮流外，其他流速成份可能大於潮流，觀測與預測最大流速多發生於東北東向。臺北港每月觀測最高水位與預測最高水位相差最大約為 0.08 m，每月觀測最低水位與預測最低水位相差最大約為 0.14 m。臺北港海流最大流速與模式預測結果相差不大，但觀測最大流速多發生在東北向，模式預測最大流速則多發生於西南西向。本年度各颱風影響期間基隆港和臺北港觀測水位變化與模式預測結果一致，基隆港觀測水位與預測水位最大偏差為 0.285 m，臺北港觀測水位與預測水位最大偏差為 0.352 m。基隆港觀測流速的變化與預測流速較不一致，觀測流向相較於預測流向有提前 1 至 3 小時轉向的情形；臺北港觀測流速的變化與預測流速則大部分一致，但觀測流向相較於預測流向有提前 1 至 2 小時轉向的情形。

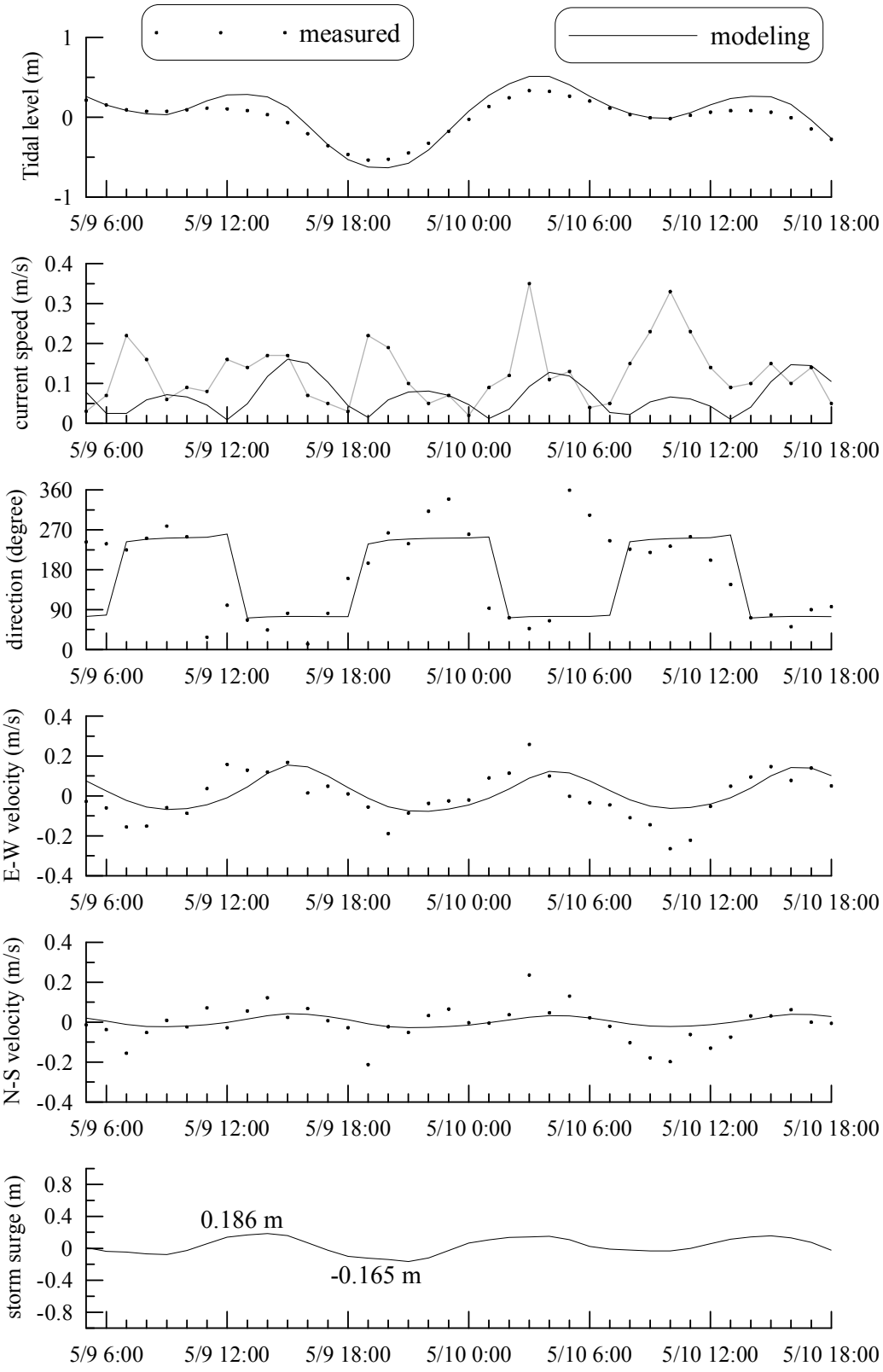


圖 4.44 艾利颱風期間(5/9~5/10)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

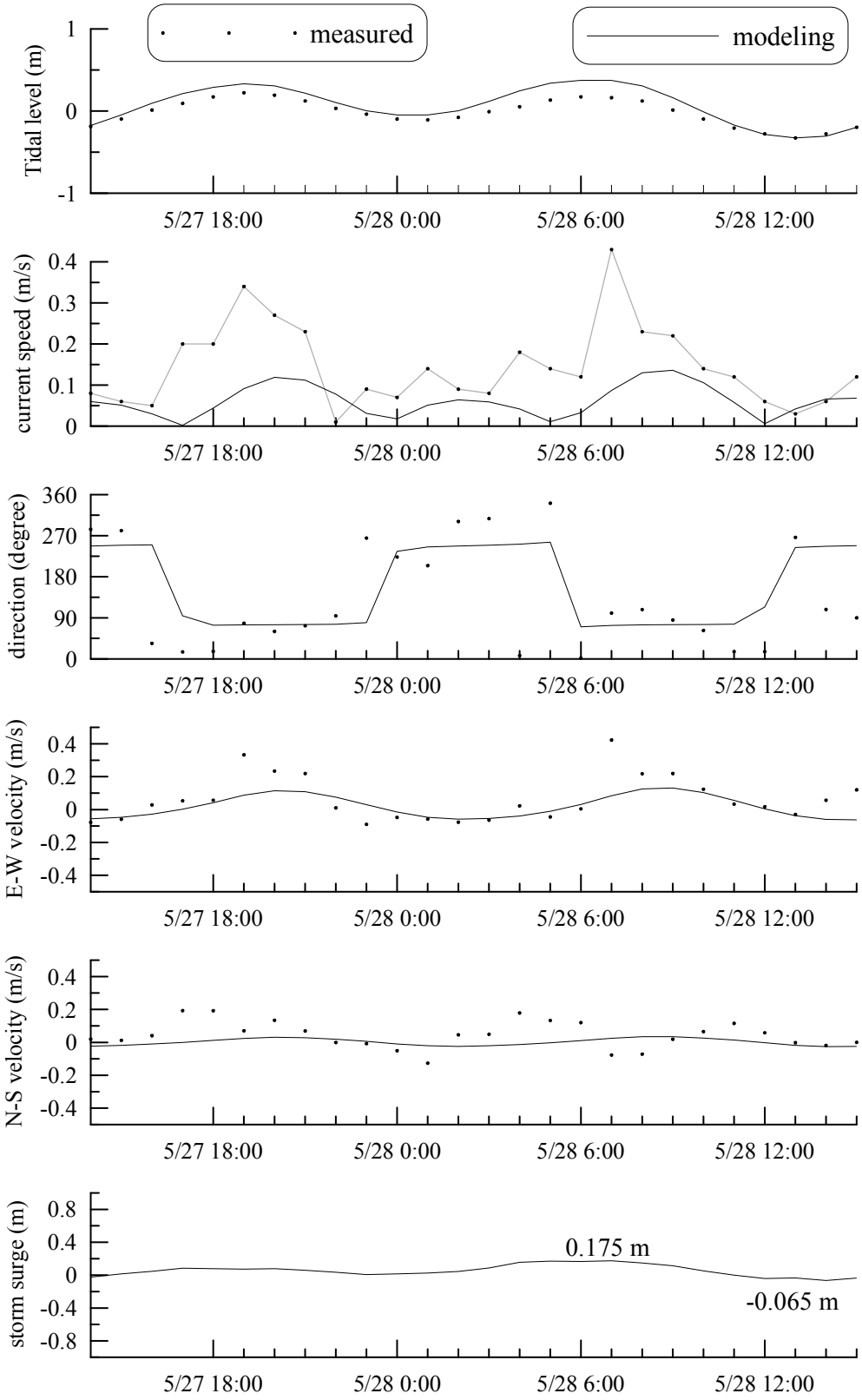


圖 4.45 桑達颱風期間(5/27~5/28)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

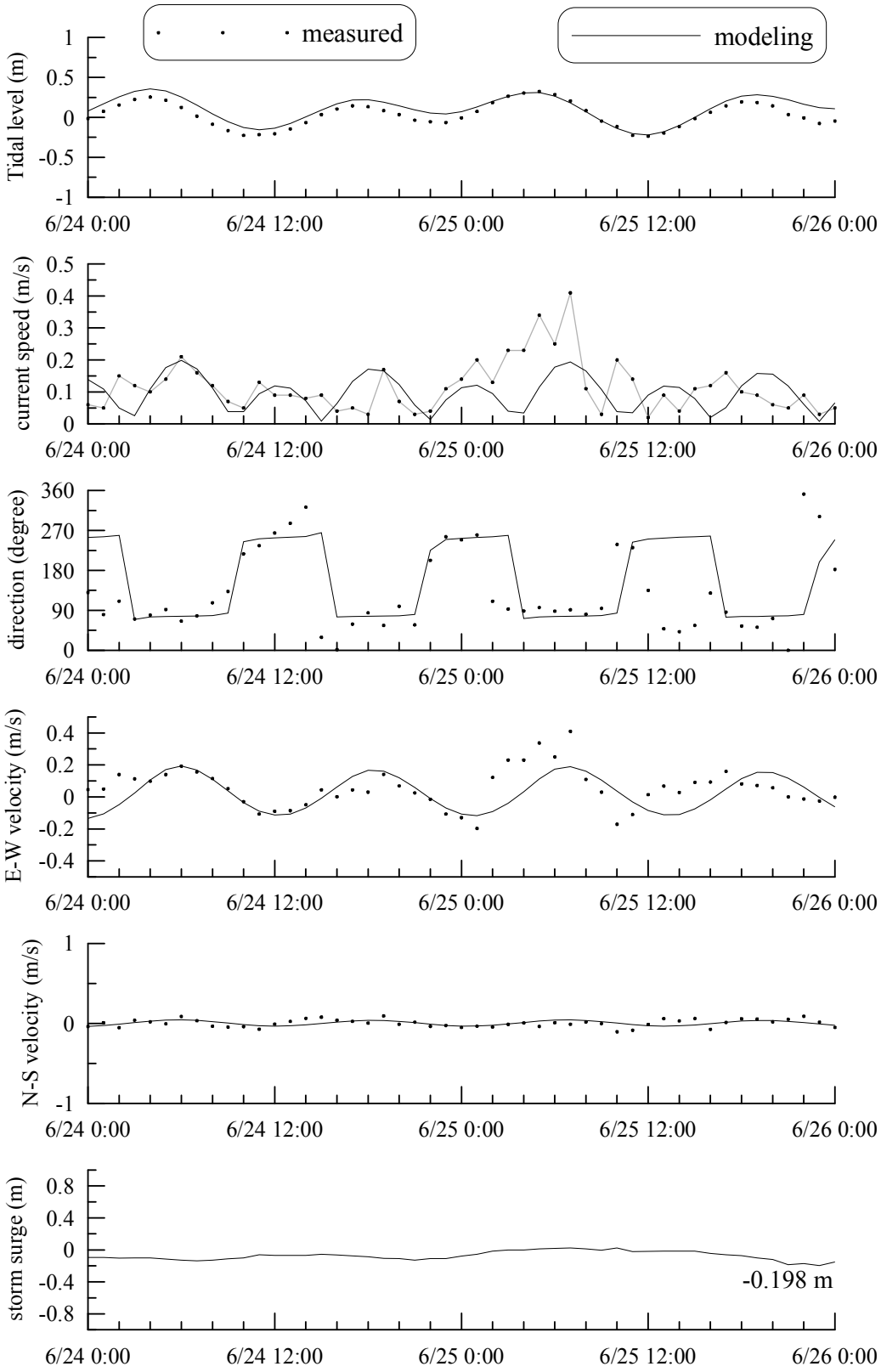


圖 4.46 米雷颱風期間(6/24~6/25)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

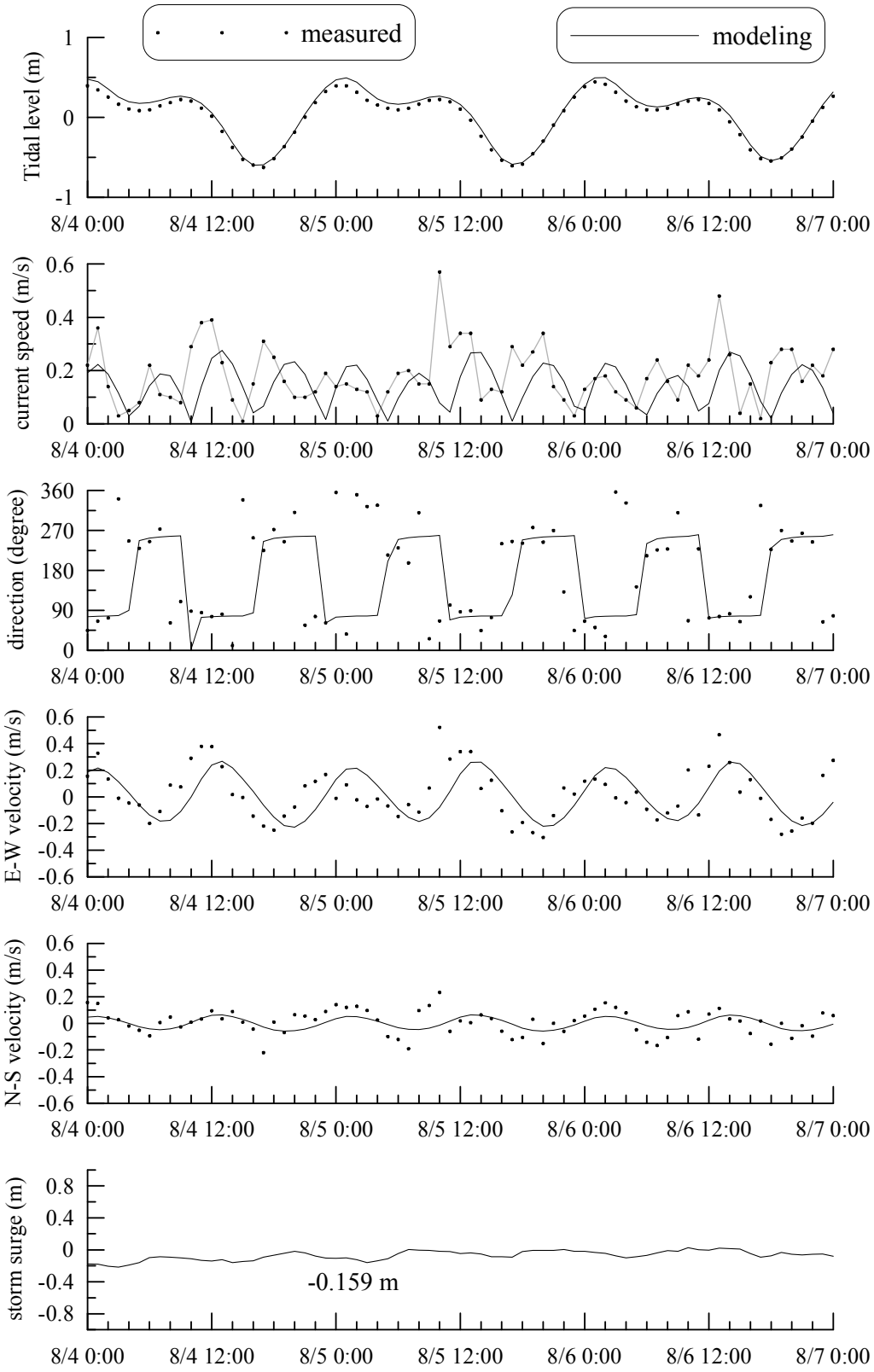


圖 4.47 梅花颱風期間(8/4~8/6)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

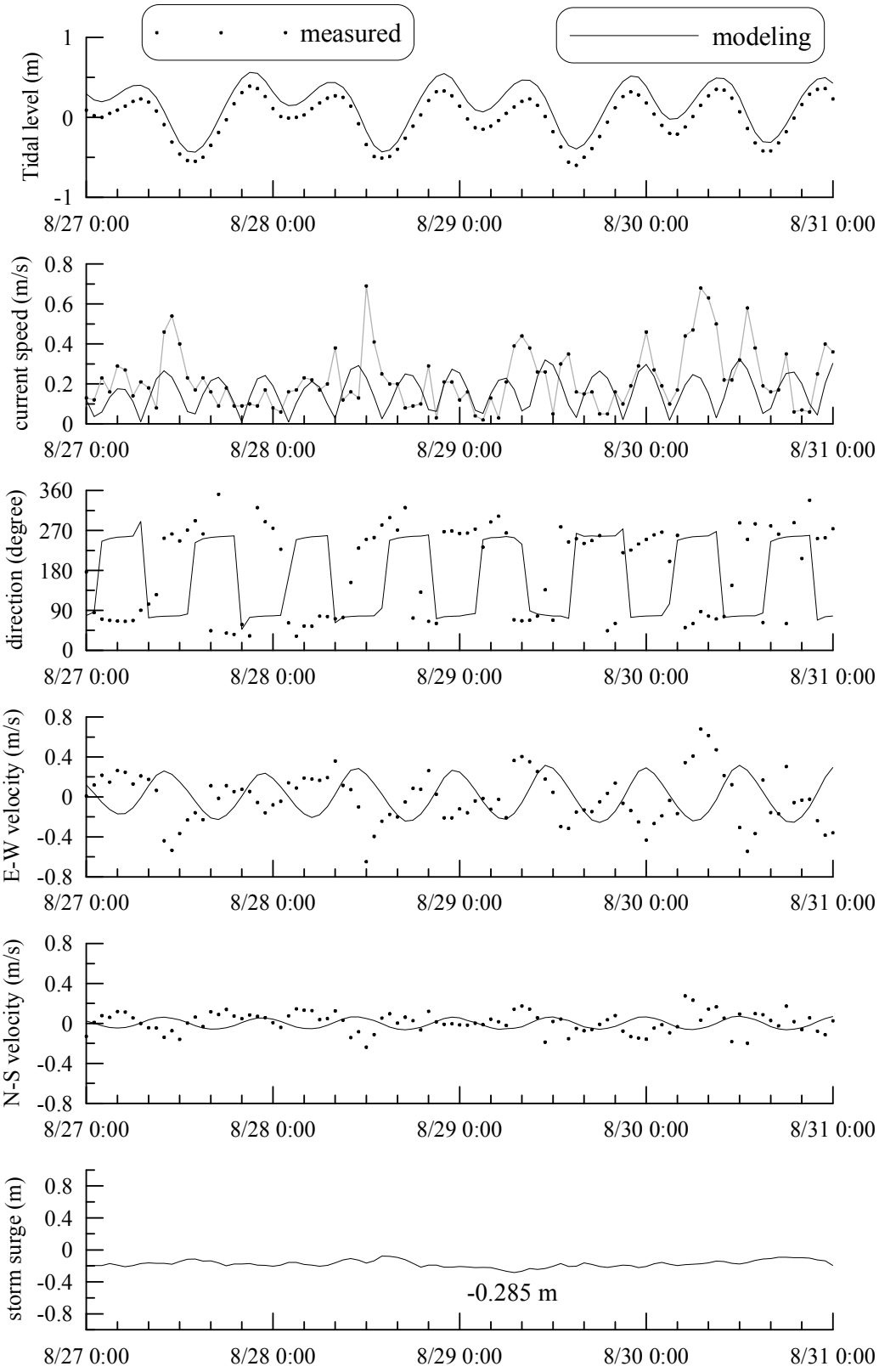


圖 4.48 南瑪都颱風期間(8/27~8/31)基隆港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

表 4-20 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表

序號	颱風名稱	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
1	艾利	OBS1	38 (100%)
		近岸模式	38 (100%)
2	桑達	OBS1	26 (100%)
		近岸模式	26 (100%)
3	米雷	OBS1	41 (100%)
		近岸模式	41 (100%)
4	梅花	OBS1	44 (100%)
		近岸模式	44 (100%)
5	南瑪都	OBS1	101 (100%)
		近岸模式	101 (100%)

表 4-21 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位資料平均水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	平均水位
1	艾利	OBS1	0.03
		近岸模式	0.05
2	桑達	OBS1	-0.02
		近岸模式	0.07
3	米雷	OBS1	0.02
		近岸模式	0.09
4	梅花	OBS1	0.09
		近岸模式	0.14
5	南瑪都	OBS1	-0.02
		近岸模式	0.15

表 4-22 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位最高水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	最高水位(發生日/時)
1	艾利	OBS1	.36 (10/4)
		近岸模式	.51 (10/3)
2	桑達	OBS1	.21 (28/6)
		近岸模式	.38 (28/6)
3	米雷	OBS1	.32 (25/5)
		近岸模式	.35 (24/4)
4	梅花	OBS1	.41 (6/2)
		近岸模式	.49 (5/1)
5	南瑪都	OBS1	.39 (27/21)
		近岸模式	.56 (27/21)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-23 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報潮位最低水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	最低水位(發生日/時)
1	艾利	OBS1	-.50 (9/20)
		近岸模式	-.63 (9/20)
2	桑達	OBS1	-.25 (28/13)
		近岸模式	-.33 (28/13)
3	米雷	OBS1	-.24 (25/12)
		近岸模式	-.22 (25/12)
4	梅花	OBS1	-.27 (6/9)
		近岸模式	-.25 (6/9)
5	南瑪都	OBS1	-.60 (29/15)
		近岸模式	-.44 (17/14)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-24 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報海流資料蒐集率統計表

序號	颱風名稱	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
1	艾利	OBS1	38 (100%)
		近岸模式	38 (100%)
2	桑達	OBS1	26 (100%)
		近岸模式	26 (100%)
3	米雷	OBS1	41 (100%)
		近岸模式	41 (100%)
4	梅花	OBS1	44 (100%)
		近岸模式	44 (100%)
5	南瑪都	OBS1	101 (100%)
		近岸模式	101 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-25 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報海流平均流速統計表

(單位：cm/s)

序號	颱風名稱	方法	平均水位
1	艾利	OBS1	12.5
		近岸模式	7.0
2	桑達	OBS1	14.5
		近岸模式	6.1
3	米雷	OBS1	12.1
		近岸模式	10.1
4	梅花	OBS1	44.4
		近岸模式	14.6
5	南瑪都	OBS1	25.0
		近岸模式	16.7

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-26 2011 年颱風期間基隆港觀測與預報流場最大流速統計表

(單位：cm/s)

序號	颱風名稱	方法	最大流速(發生時流向、日/時)
1	艾利	OBS1	35.0 (NE 10/03)
		近岸模式	16.1 (ENE 09/15)
2	桑達	OBS1	43.0 (E 28/07)
		近岸模式	13.6 (ENE 28/09)
3	米雷	OBS1	41.0 (E 25/7)
		近岸模式	19.9 (ENE 24/6)
4	梅花	OBS1	92.0 (ENE 6/4)
		近岸模式	28.6 (ENE 5/3)
5	南瑪都	OBS1	94.0 (ENE 31/8)
		近岸模式	32.5 (ENE 30/12)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

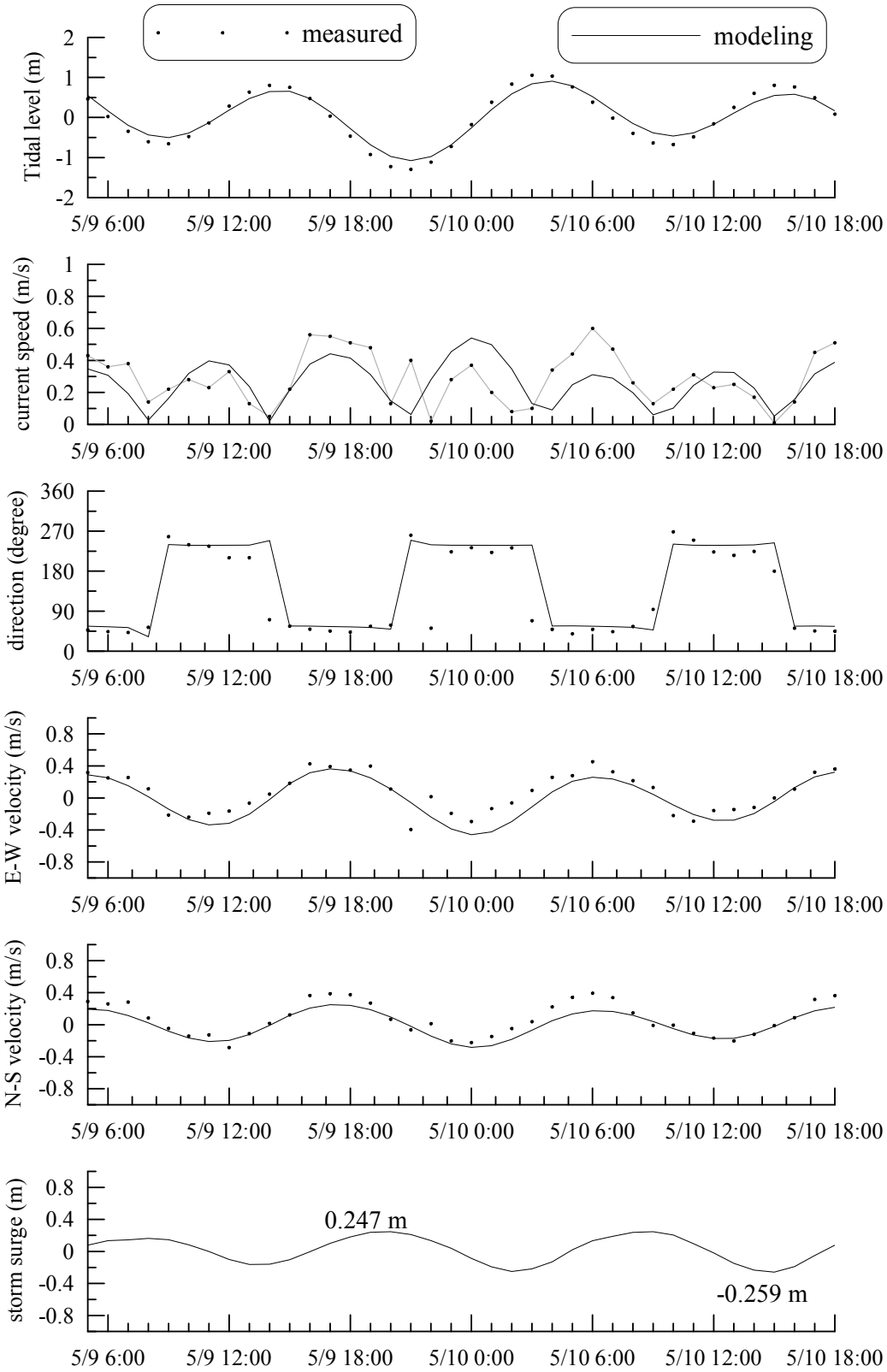


圖 4.49 艾利颱風期間(5/9~5/10)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

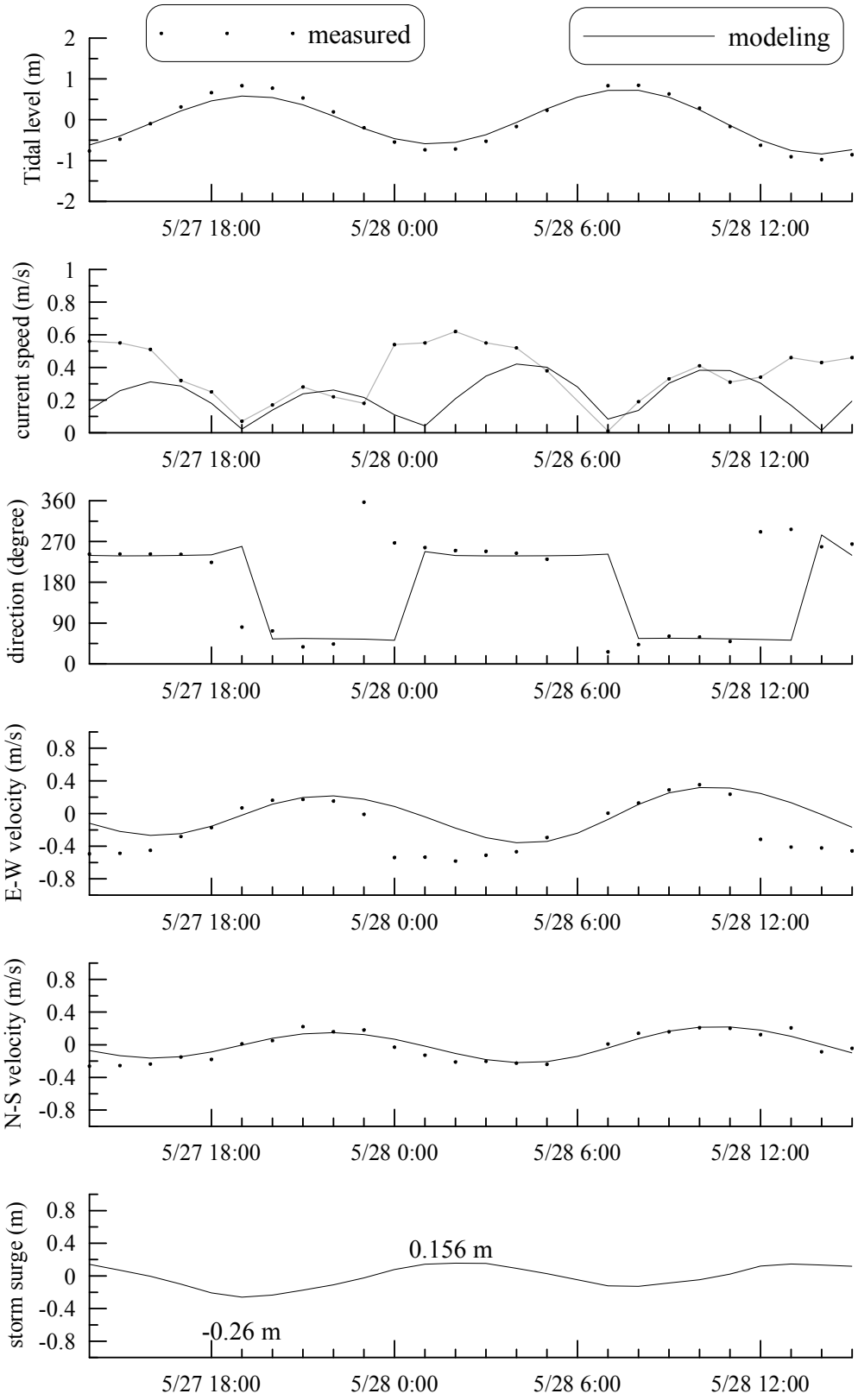


圖 4.50 桑達颱風期間(5/27~5/28)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

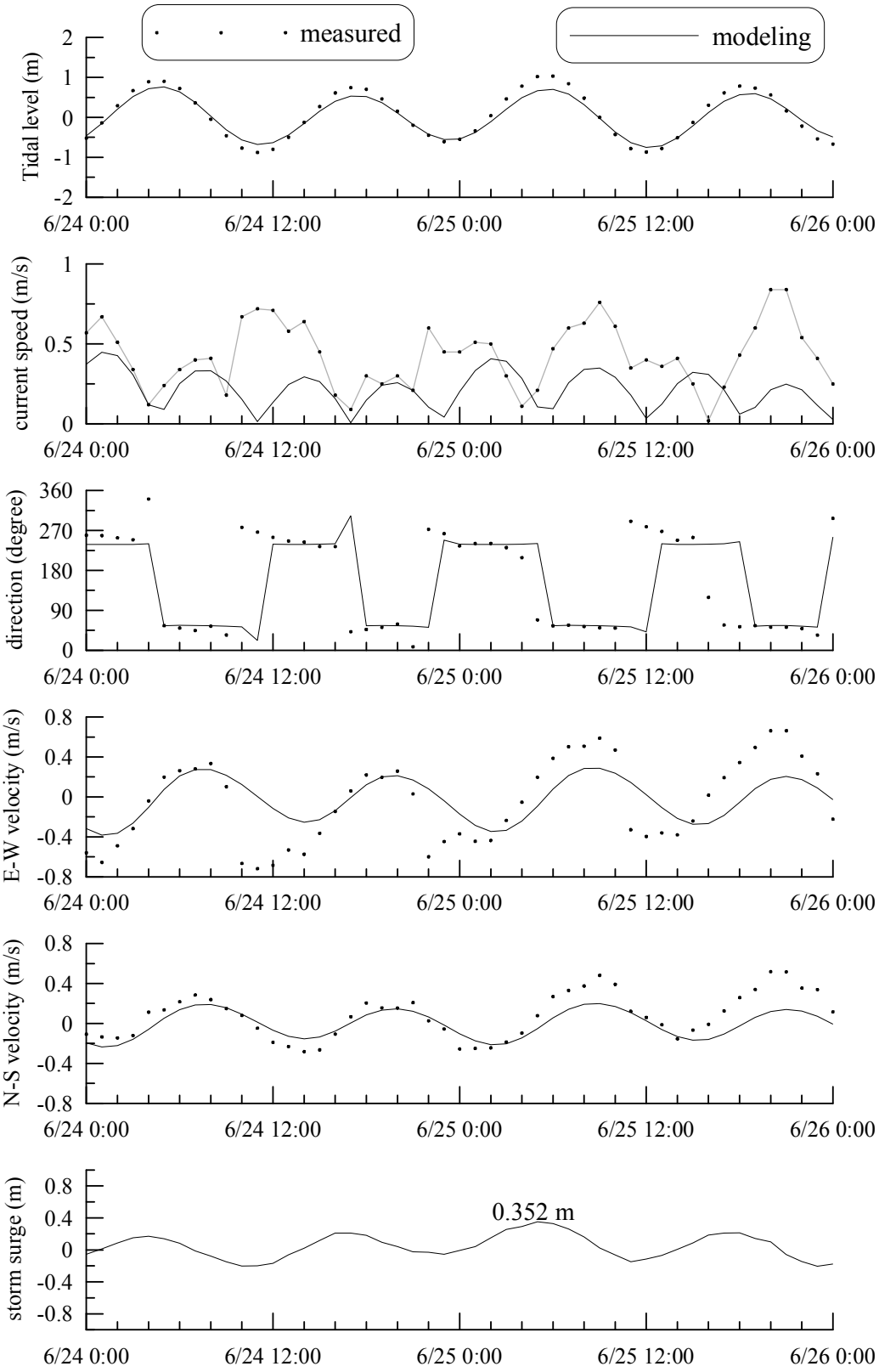


圖 4.51 米雷颱風期間(6/24~6/25)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

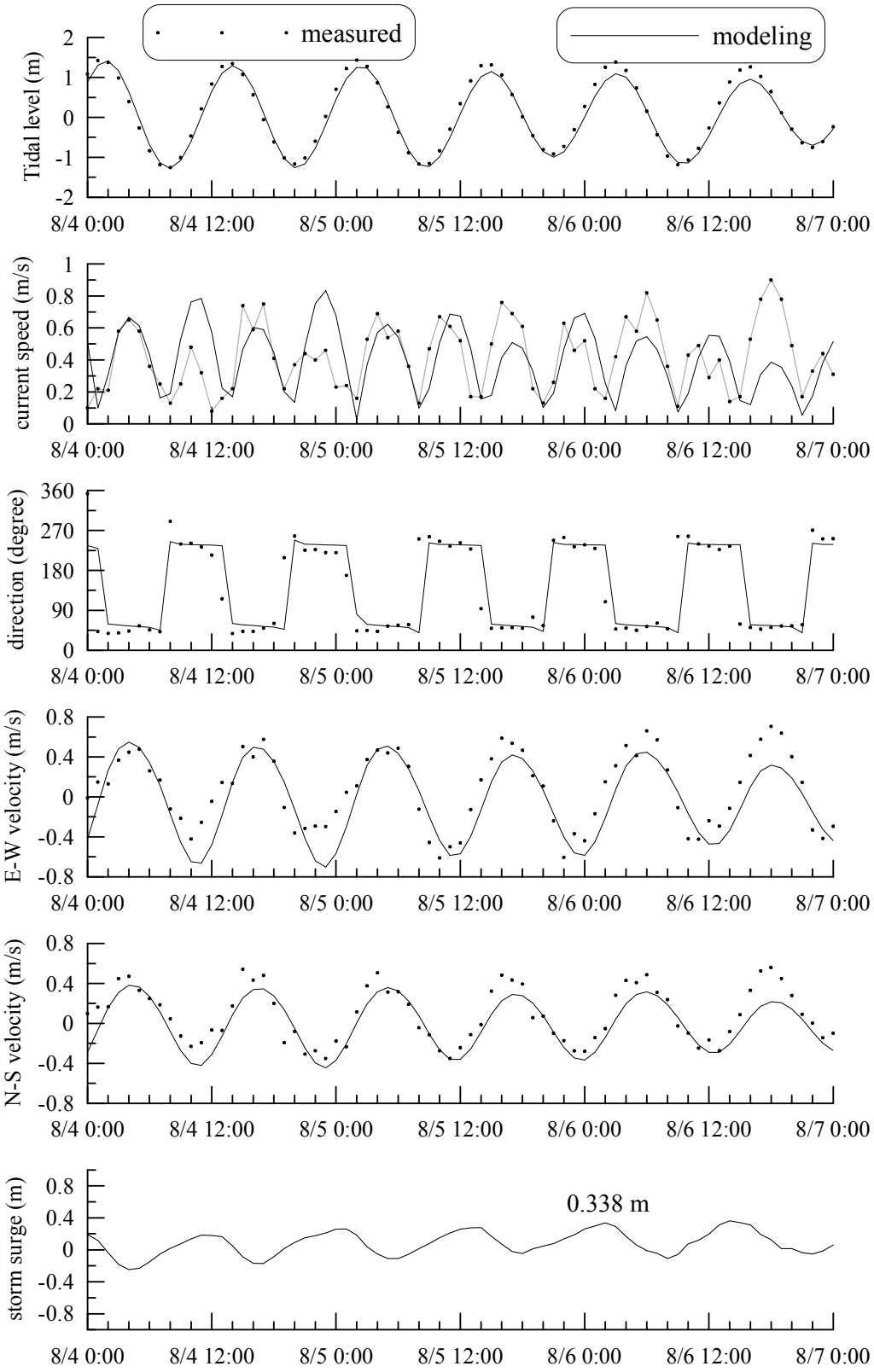


圖 4.52 梅花颱風期間(8/4~8/6)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

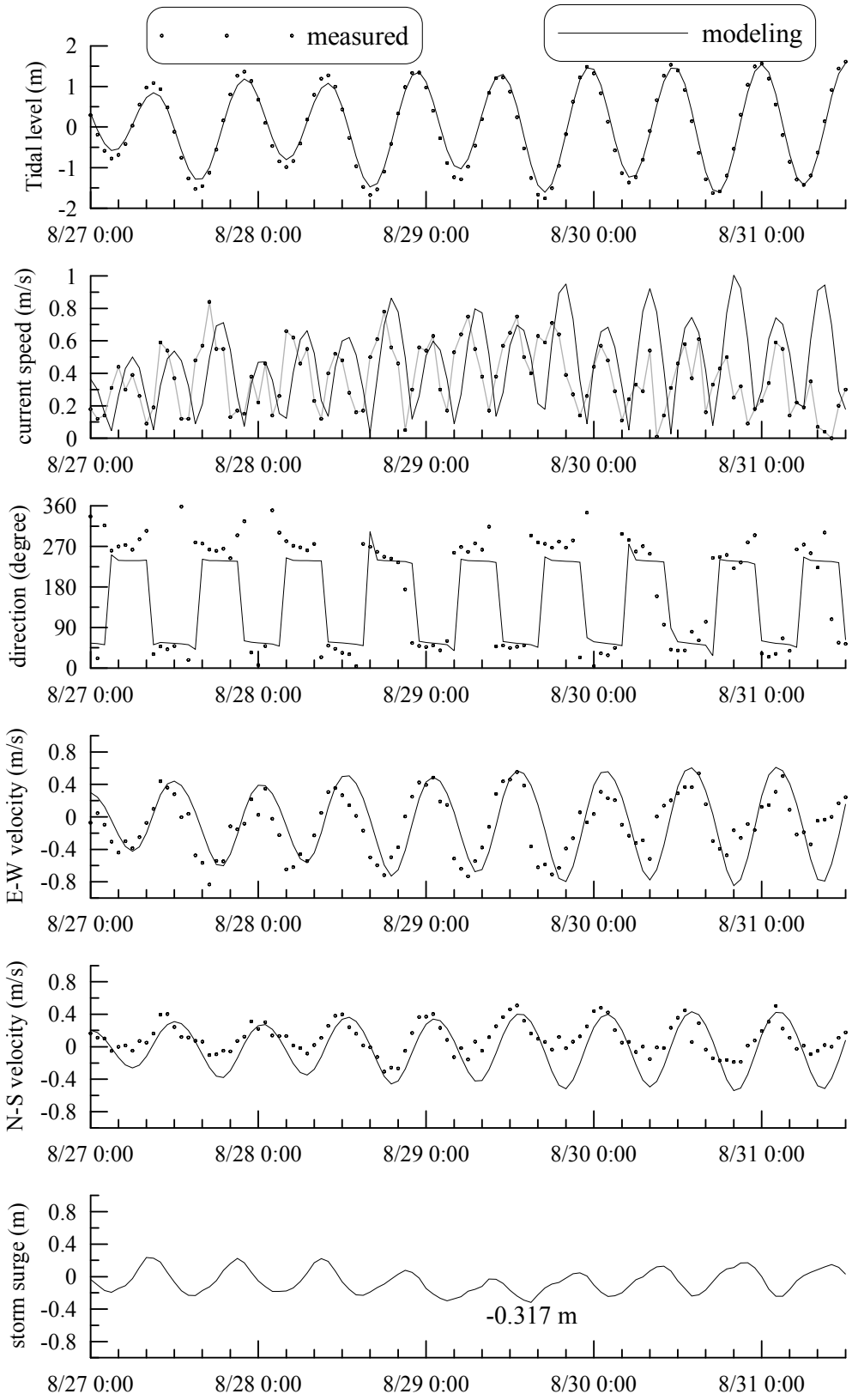


圖 4.53 南瑪都颱風期間(8/27~8/31)臺北港水位及潮流觀測資料與模式預測結果之比較

表 4-27 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位資料蒐集率統計表

序號	颱風名稱	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
1	艾利	OBS1	38 (100%)
		近岸模式	38 (100%)
2	桑達	OBS1	26 (100%)
		近岸模式	26 (100%)
3	米雷	OBS1	41 (100%)
		近岸模式	41 (100%)
4	梅花	OBS1	44 (100%)
		近岸模式	44 (100%)
5	南瑪都	OBS1	101 (100%)
		近岸模式	101 (100%)

表 4-28 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位資料平均水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	平均水位
1	艾利	OBS1	0.06
		近岸模式	0.04
2	桑達	OBS1	-0.03
		近岸模式	-0.04
3	米雷	OBS1	0.02
		近岸模式	-0.03
4	梅花	OBS1	0.00
		近岸模式	-0.10
5	南瑪都	OBS1	-0.07
		近岸模式	-0.01

表 4-29 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位最高水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	最高水位(發生日/時)
1	艾利	OBS1	1.11 (10/4)
		近岸模式	.91 (10/4)
2	桑達	OBS1	.61 (28/8)
		近岸模式	.72 (28/8)
3	米雷	OBS1	1.03 (25/6)
		近岸模式	.76 (24/5)
4	梅花	OBS1	1.43 (5/2)
		近岸模式	1.25 (5/2)
5	南瑪都	OBS1	1.56 (31/0)
		近岸模式	1.56 (31/0)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-30 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報潮位最低水位統計表

(單位：m)

序號	颱風名稱	方法	最低水位(發生日/時)
1	艾利	OBS1	-1.39 (9/21)
		近岸模式	-1.08 (9/21)
2	桑達	OBS1	-.64 (28/14)
		近岸模式	-.84 (28/14)
3	米雷	OBS1	-.88 (24/11)
		近岸模式	-.75 (25/12)
4	梅花	OBS1	-1.19 (6/9)
		近岸模式	-1.26 (4/20)
5	南瑪都	OBS1	-1.76 (29/17)
		近岸模式	-1.62 (30/18)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-31 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報海流資料蒐集率統計表

序號	颱風名稱	方法	資料蒐集筆數(蒐集率百分數)
1	艾利	OBS1	37 (97.4%)
		近岸模式	38 (100%)
2	桑達	OBS1	25 (96.2%)
		近岸模式	26 (100%)
3	米雷	OBS1	41 (100%)
		近岸模式	41 (100%)
4	梅花	OBS1	44 (100%)
		近岸模式	44 (100%)
5	南瑪都	OBS1	101 (100%)
		近岸模式	101 (100%)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-32 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報海流平均流速統計表

(單位：cm/s)

序號	颱風名稱	方法	平均流速
1	艾利	OBS1	28.9
		近岸模式	26.2
2	桑達	OBS1	36.8
		近岸模式	22.4
3	米雷	OBS1	42.4
		近岸模式	23.0
4	梅花	OBS1	43.4
		近岸模式	41.2
5	南瑪都	OBS1	38.2
		近岸模式	47.6

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

表 4-33 2011 年颱風期間臺北港觀測與預報流場最大流速統計表

(單位：cm/s)

序號	颱風名稱	方法	最大流速(發生時流向、日/時)
1	艾利	OBS1	60.0 (NE 10/06)
		近岸模式	54.0 (WSW 10/00))
2	桑達	OBS1	62.0 (WSW 28/02)
		近岸模式	42.1 (WSW 28/04)
3	米雷	OBS1	76.0 (NE 25/9)
		近岸模式	44.9 (WSW 24/1)
4	梅花	OBS1	82.0 (NE 6/6)
		近岸模式	83.4 (WSW 4/23)
5	南瑪都	OBS1	84.0 (W 27/17)
		近岸模式	100.5 (WSW 30/20)

OBS1：港灣技術研究中心觀測 1 站資料

4.6 港區設計水位探討

港區設計水位通常分為高水位及低水位兩種，就港灣建設而言，前者(高水位)通常用於決定港埠設施及防波堤之高度，後者(低水位)常見於維護港域水深及航道之通暢。目的著重於近岸防救災，因此設計水位將著重於港口最高水位之探討。

4.6.1 設計水位之定義

在不考慮波浪影響之前題下，近岸海水位的變化主要為因天體引力作用所產生的海水面週期性升降，稱之為天文潮，其次為因氣象因素(如氣壓及風場)作用而引起的水位變化，稱之為氣象潮(Meteorological tide)或暴潮(storm surge)，如水位因低氣壓通過而引起水面抬升或海面強風作用下因風之壅積作用(piling up)造成風下方之水位升高等，此種受氣象因素影響之潮位與當時之天文潮位之差稱為潮位偏差(sea level departure from normal)或暴潮位。其中天文潮可由各地水位觀測資料利用天文潮理論予以正確地預測，而暴潮之推算則需要藉助於經驗公式或數值模式。

有關設計水位之定義，依據海岸工程規劃設計(中國農村復興聯合委員會特刊新二號，1971)之描述得知：在不考慮海嘯引起的水位變化之情況下，針對海岸前水位先求出其天文潮最高水位及最大潮位(暴潮)偏差；並假設此最大潮位偏差，適在天文潮最大滿潮位時發生，則此時之最高水位即為設計水位。簡言之，最大暴潮偏差加上天文潮最高水位為國內海岸或港灣工程之設計水位。

本年度計畫針對基隆港及臺北港兩港設計水位之具體做法說明如下：

1. 以各港一年以上的潮汐記錄，利用調和分析方法求出天文潮各分潮之常數(振幅及相位)，建立天文潮預報公式；並預測太陰週期 18.6 年之潮位變化，求得最高天文潮位值。

2. 依歷年侵臺颱風路徑、配合模型颱風模擬颱風風場及氣壓場，以暴潮數值模式模擬各港口暴潮偏差值。再以極端值回歸分析方法求得不同復現期距(如 25 年或 50 年)之最大暴潮偏差值。

3. 各港口最高天文潮位預測值+不同復現期距之最大暴潮偏差值即為各港口不同復現期距之設計水位。

4.6.2 暴潮數值模式

所使用的二維暴潮數值模式其基本控制方程式與求解方法(FEM)均與前述水動力模式相同，二者差異在於暴潮模式增加模型颱風風場及氣壓場模擬。有關模型颱風風場及氣壓場之計算說明如下：

假設颱風圈內等壓線幾近呈圓形分佈，則颱風之氣壓分佈可採用 Myers(1954)之經驗式，即

$$P = P_c + a\exp\left(-r_0/r\right) \quad \text{.....(4.4)}$$

式中 P_c 為颱風中心之氣壓(mb)，r_0 為颱風最大風速之半徑，a 為颱風中心氣壓常數。氣壓場之氣壓力梯度計算如下：

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{r_0\left(x - x_c\right)}{r^3} a\exp\left(-r_0/r\right) \quad \text{.....(4.5)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{r_0\left(y - y_c\right)}{r^3} a\exp\left(-r_0/r\right) \quad \text{.....(4.6)}$$

式中 x_c 及 y_c 為颱風中心之 x, y 座標。於(4.4)式中 r_0 及 a 值較不易估計，如有數站氣壓資料，便可由最小二乘法求出，惟海上颱風暴風圈內之氣壓值通常不易獲得。因此 a 值之取定，通常採用假設 $a = \Delta P_c = P_\infty - P_c$ ，P_∞ 為遠離颱風中心之外圍氣壓，一般取其值為標準海平面氣壓約 1013mb。

颱風最大風速半徑 r_0 值可根據 Graham 及 Nunn 提出之經驗公式如下：

$$r_0 = [28.52\tanh[0.0873(\phi - 28)]] + 12.22\exp[(P_c - 1013.2)/33.86] + 0.2V_F + 37.22 \quad \text{..... (4.7)}$$

式中ϕ為緯度，V_F為颱風移動速度(km/hr)。

在颱風風場之計算上，模式考慮科氏力之影響計算颱風風場之傾度風風速W_g如下

$$W_g = \left[\frac{ar_0}{\rho_a r}\exp(-r_0/r) + (fr/2)^2\right]^{1/2} - (fr/2) \quad \text{..... (4.8)}$$

式中ρ_a為空氣密度，a為颱風中心氣壓常數，f為科氏參數，r_0為颱風最大風速之半徑。當$r = r_0$時可得到最大傾度風$(W_g)_{\max}$。

此外，移動中之颱風除了因氣壓梯度引起的風速$\vec{W}'$外，尚有因颱風移動而產生的速度$\vec{W}''$。其中$\vec{W}'$與傾度風成正比，$\vec{W}''$與颱風進行速度$\vec{V}_f$成正比，即

$W' = c_1 V_g$，其方向與等壓線切線夾角α約為30°～35°；

$\vec{W}' = c_2 \vec{V}_f$，其方向與颱風進行方向同。

其中c_1值約為0.5～0.7之間，臺灣地區可用0.6；$c_2 = \dfrac{0.6V_g}{(V_g)_{\max}}$。

因此颱風圈內，任何地點之海面上風速可表示如下：

$$W_x = -\frac{c_1 W_g}{r}[(x - x_c)\sin\alpha + (y - y_c)\cos\alpha] + c_2\frac{(V_f)_x}{(W_g)_{\max}}W_g \quad \text{..... (4.9)}$$

$$W_y = \frac{c_1 W_g}{r}[(x - x_c)\cos\alpha - (y - y_c)\sin\alpha] + c_2\frac{(V_f)_y}{(W_g)_{\max}}W_g \quad \text{..... (4.10)}$$

4.6.3 歷年侵臺颱風暴潮模擬

4.6.3.1 數值計算網格

暴潮數值模式模擬範圍分別以東經 116º 及 123º 經線為模式之東、西邊界，以北緯 20º 及 26º 為模式之南、北邊界。模式內之地形水深資料採用海軍測量局所繪製之海圖(編號 0307)資料，如圖 4.54 所示，近岸海域地形則採用海軍測量局所製之海域地形資料(精度約為 500m)。臺灣周圍海域暴潮模式計算使用之有限元素計算網格，如圖 4.55 所示，圖中數值計算網格之座標系統為六度分帶投影座標系統，網格共有 5,807 個節點及 11,103 個三角形元素。其中最小三角形元素之邊長約 2.5km，主要構建於本計畫所在之海域；最大三角形元素之邊長約 15km，分佈於水深較深之海洋開放邊界附近。

4.6.3.2 歷年侵臺颱風資料

由於颱風所引起的暴潮水位變化常因颱風強度與路徑之不同而有明顯的差異，因此整理歷年(1961～2005)中央氣象局發布之侵台颱風路徑及其相關颱風資料(如颱風中心位置座標、最低氣壓、移動速度及方向等)，並選取通過暴潮模擬範圍(116º, 20º)－(123º, 26º)侵台颱風並繪出其侵臺路徑。

4.6.3.3 模式之驗証

以民國 85 年侵襲臺灣北部地區之中度颱風賀伯(HERB，1996)為例，如圖 4.56 所示，並選取由基隆港及梗枋潮位記錄分析之暴潮歷線與模式模擬結果比較，藉以率定模式相關參數。圖 4.57 及圖 4.58 所示分別賀伯颱風侵臺期間暴潮模式模擬之暴潮偏差歷線(虛線)與基隆港及梗枋潮位記錄之暴潮偏差歷線(實線)比較，顯示模式模擬之最大暴潮偏差值與潮位記錄分析之最大暴潮偏差值近似。

4.6.3.4 基隆港與臺北港暴潮模擬結果

依據歷年(1961～2005)侵臺颱風資料(路徑及中心低氣壓等)進行暴潮數值模擬，並依據每小時模擬結果分別整理基隆港海域及臺北港海域於颱風侵臺期間發生之最大暴潮偏差如表 4-34 所列。模擬結果顯示基隆港及臺北港歷年來因颱風所引起的最大暴潮偏差分別為 1.05 m 及 1.13 m，發生於 1977 年強烈颱風薇拉(VERA)侵臺期間。

表 4-34 基隆港及臺北港海域侵台颱風暴潮數值模擬結果

年_颱風名稱	暴 潮(m)		年_颱風名稱	暴 潮(m)	
	基隆港	臺北港		基隆港	臺北港
1961_Betty	0.16	0.34	1977_Vera	1.05	1.13
1961_June	0.05	0.04	1978_Della	0.12	0.05
1961_Lorna	0.08	0.09	1980_Norri	0.29	0.23
1961_Pamel	0.19	0.07	1980_Ida	0.03	0.06
1961_Sally	0.04	0.05	1981_Ike	0.11	0.14
1962_Amy	0.11	0.07	1981_Maury	0.25	0.34
1962_Opal	0.55	0.35	1982_Andy	0.06	0.10
1963_Wendy	0.14	0.09	1982_Dot	0.04	0.03
1963_Gloria	0.70	0.92	1983_Wayne	0.05	0.11
1965_Dinah	0.21	0.25	1984_Wynne	0.03	0.03
1965_Mary	0.27	0.25	1985_Nelso	0.40	0.65
1965_Harri	0.04	0.07	1986_Abby	0.10	0.35
1966_Cora	0.35	0.70	1986_Nancy	0.26	0.28
1967_Clara	0.22	0.14	1987_Vernon	0.16	0.19
1967_Gilda	0.07	0.12	1987_Alex	0.42	0.55
1967_Nora	0.08	0.05	1988_Warren	0.10	0.07
1969_Betty	0.25	0.31	1989_Sarah	0.36	0.50
1969_Elsie	0.32	0.27	1990_Ofeli	0.08	0.16
1969_Viola	0.08	0.10	1990_Yancy	0.45	0.43
1970_Fran	0.23	0.36	1991_Amy	0.05	0.10
1971_Agnes	0.09	0.02	1991_Ellie	0.32	0.34
1971_Bess	0.68	0.91	1992_Ted	0.19	0.39
1971_Nadin	0.07	0.06	1993_Abe	0.05	0.04
1972_Betty	0.48	0.77	1994_Glady	0.20	0.12
1973_Nora	0.06	0.13	1994_Fred	0.35	0.29
1974_Wendy	0.30	0.40	1994_Doug	0.67	0.75
1975_Betty	0.08	0.04	1995_Deann	0.04	0.06
1975_Nina	0.45	0.34	1995_Gary	0.05	0.11
1976_Billi	0.67	0.71	1995_Kent	0.05	0.02
1977_Thelm	0.06	0.06	1995_Ryan	0.07	0.09

表 4-34(續) 基隆港及臺北港海域侵台颱風暴潮數值模擬結果

年_颱風名稱	暴 潮(m)		年_颱風名稱	暴 潮(m)	
	基隆港	臺北港		基隆港	臺北港
1996_Herb	0.89	0.90	2001_Nari	0.53	0.46
1996_Glori	0.02	0.01	2001_Toraji	0.07	0.07
1997_Amber	0.10	0.02	2002_Nakri	0.17	0.21
1997_Cass	0.05	0.12	2003_Melor	0.04	0.03
1998_Babs	0.06	0.12	2003_Soudelor	0.11	0.11
1998_Otto	0.05	0.05	2004_Aere	0.53	0.85
1998_Zeb	0.21	0.24	2004_Mindu	0.21	0.40
1999_Dan	0.07	0.12	2004_Conson	0.06	0.06
1999_Maggi	0.03	0.07	2005_Haita	0.40	0.48
2000_Bilis	0.12	0.15	2005_Talim	0.18	0.22
2000_KaiTa	0.31	0.45	2005_LongW	0.18	0.08
2001_Chebi	0.07	0.13	2005_Tailim	0.27	0.17

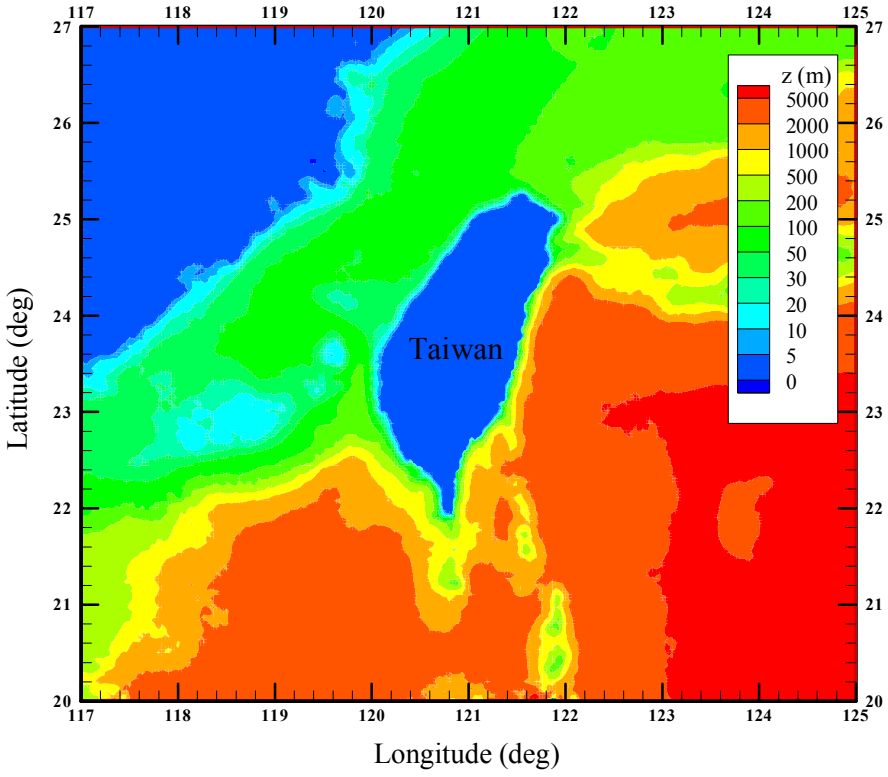


圖 4.54 臺灣四周海域水深地形

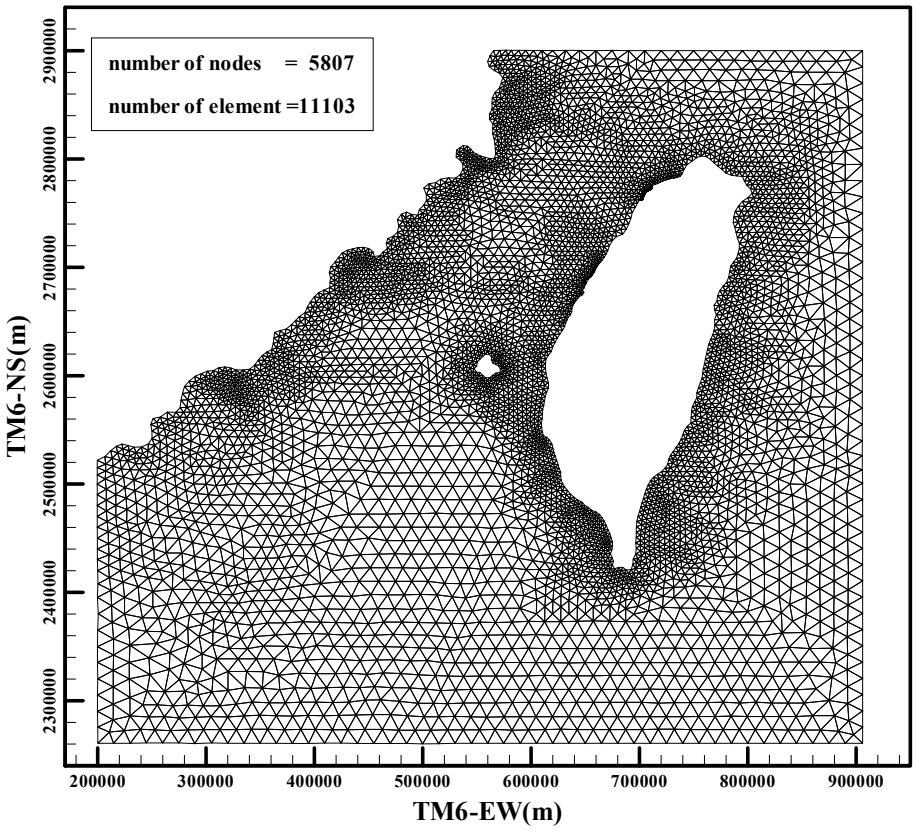


圖 4.55 臺灣四周海域暴潮數值模式之計算網格圖

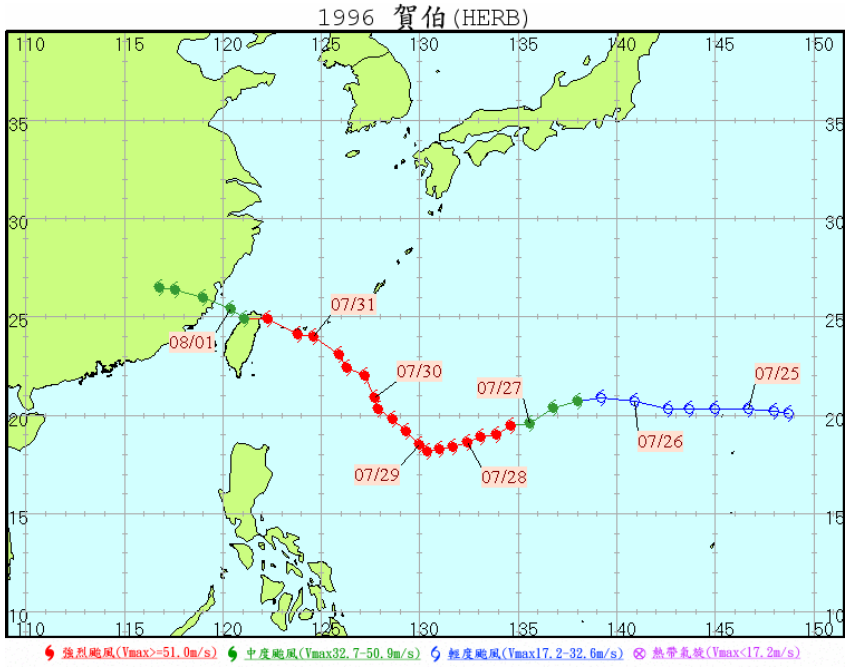


圖 4.56 1996 年中度颱風賀伯侵台路徑圖

資料來源:中央氣象局網站

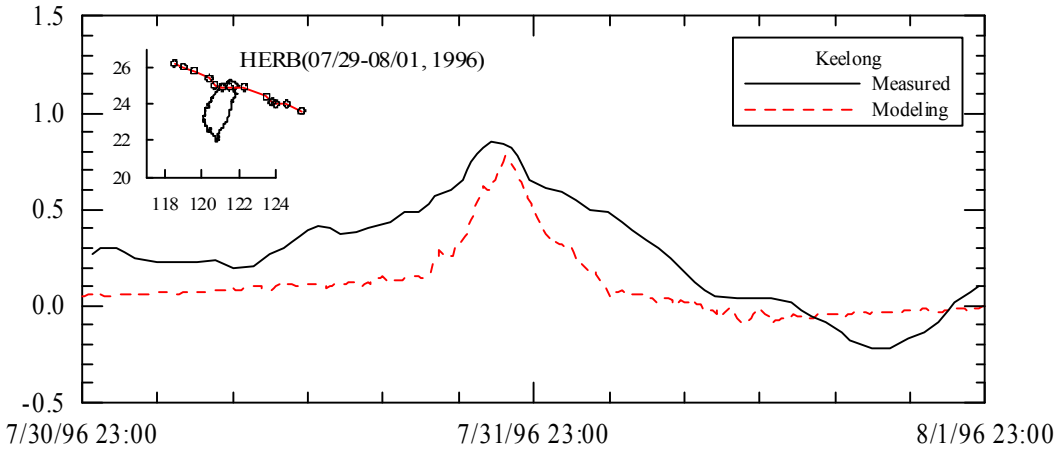


圖 4.57 1996 年中度颱風賀伯侵台期間，基隆海域暴潮偏差變化

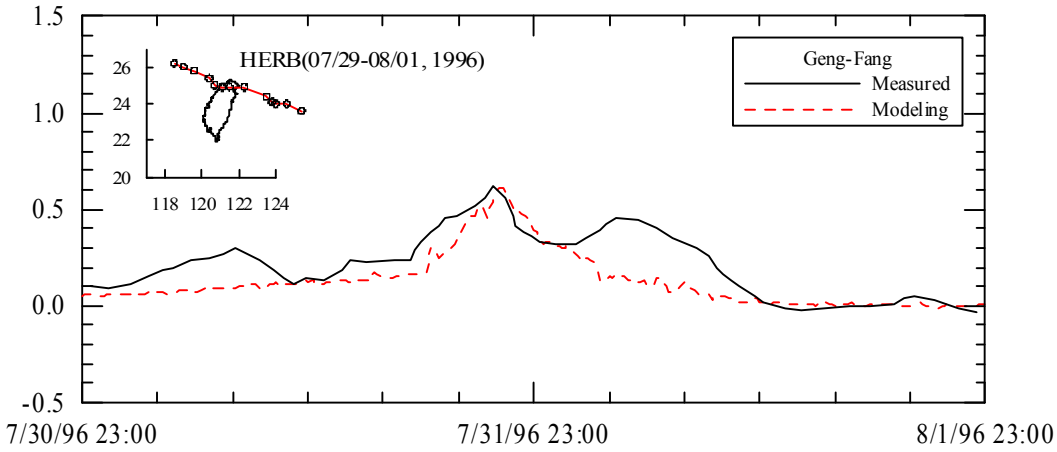


圖 4.58 1996 年中度颱風賀伯侵台期間，梗枋海域暴潮偏差變化

4.6.4 極端值分佈理論

常見極值機率分布型態有常態分布機率函數、對數常態分布機率函數、極端值一型分布機率函數、對數皮爾遜三型分布機率函數以及皮爾遜三型分布機率函數等五種機率函數。將先利用卡方檢定及 95% 信賴度的 K-S 檢定方法，分別針對上述五種機率分布函數分別檢定七大商港之潮位年極值樣本，找出最適合之機率分布函數。再依周氏(1951)所提出之頻率分析一般式決定不同復現期距下之發生頻率量 X_T，其數學表示式為

$$X_T = \overline{X} + K_T S_X \quad \text{.....(4.11)}$$

其中 $\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$ ， $S_X=\left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)^2\right]^{1/2}$

式中 $\overline{X}$ 為數列 X 之樣本平均值，S_X 為數列 X 之樣本標準偏差，K_T 為復現期距 T 年時之頻率因子。

由於不同的機率分布及不同的復現期距可決定不同的頻率因子 K_T，因此針對已知樣本找出適合之最佳機率分布後，即可由給定之復現期距 T 決定復現物理量 X。所選取的各種機率分布函數之頻率因子 K_T 計算方式分述如下：

(1) 常態分布(Normal Distribution)

為一對稱鐘形之連續分布，其累積機率分布為

$$P(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\exp(-z^2/2)dz \quad \text{..... (4.12)}$$

式中 $z=\left(X-\overline{X}\right)/S_X$ 為單位化變量，$\overline{X}$ 為數列 X 之樣本平均值，S_X 為數列 X 之樣本標準偏差。常態分布之頻率因子

$$K_T=z \quad \text{..... (4.13)}$$

(2) 對數常態分布(Lognormal Distribution)

令新變數 y= lnX，若 y 符合上述常態分布，則可依常態分布之方法求得頻率因子 K_T 值；再依下列逆轉方式還原數列之對應值

$$X=e^y \quad \text{..... (4.14)}$$

(3) 皮爾遜三型分布(Pearson Type III Distribution)

此為一具有 α 、 β 、 γ 三參數之 Gamma 型機率分布函數，令 $z=(X-\gamma)/\alpha$ ，則其累積機率表示如下：

$$P(z)=\frac{1}{\Gamma(\beta)}\int_{-\infty}^{y}z^{\beta-1}\exp(-z)dz \quad \text{..... (4.15)}$$

式中 $\Gamma(.)$ 為 Gamma 函數。其頻率因子 K_T 值計算如下：

$$K_T = z + (z^2 - 1)\frac{G_x}{6} + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)(\frac{G_x}{6})^2 - (z^2 - 1)(\frac{G_x}{6})^3 + z(\frac{G_x}{6})^4 + \frac{1}{3}(\frac{G_x}{6})^5 \quad (4.16)$$

式中 G_x 為數列 X 之偏態係數(Coefficient of Skewness)。

(4) 對數皮爾遜三型分布(Logpearson Type III Distribution)

令新變數 X_t= lnX，若 X_t 符合上述皮爾遜三型分布，則可依上述(三)之方法求得頻率因子 K_T 值；再依 X=exp(X_t)反轉方式求值。

(5) 極端值 I 型分布(Gumbel's Extremal-Value Type I Distribution)

此為一具有 α 、β 二參數之機率分布函數，令 $z = (X - \beta)/\alpha$ ，則其累積機率表示如下：。

$$P(z) = \exp[-\exp(-z)] \quad (4.17)$$

其中 α 、β 可由動差法推估得到 α=0.7797S_X 及 $\beta = \bar{X}$ - 0.45S_X，則其頻率因子 K_T 值計算如下：

$$K_T = -\left\{0.45 + 0.7797 \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]\right\} \quad (4.18)$$

一般而言，對於資料分布機率型態之確定需經由統計檢定或點繪機率圖紙等方式為之。為得到分析資料之最佳機率分布函數，採用最佳統計分布的判斷方法，即利用等機率間距卡方(Chi-square)檢定及95%信賴度的 K-S 檢定。由可接受之機率分布中以選取卡方值較小者為原則，若無法由卡方值決定者則改由較小 K-S 檢定差值擇取最適之機率分布。以下針對卡方檢定、K-S 檢定與最小值標準差做摘要敘述：

(一) 卡方檢定(Chi-Square Test)

卡方檢定乃將樣本數分配成 m 組數，再決定各組之界限範圍(Class Limits)；計算出各組範圍界限中之樣本個數(O_i)，然後與各組界限之理論期望發生次數(E_i)，依據下式：

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^{m} (O_i - E_i)^2 \Big/ E_i \quad (4.19)$$

式中 $E_i = n/m$。基本上，先求出觀測值與理論值之絕對差距的總和，此值具有 m-1 個自由度，再由 χ^2 檢定表，判斷此值是否通過檢定。

(二) K-S 檢定(Kolmogorov-Smirnov Test)

K-S 檢定是應用觀測值的累積機率分布與理論值的累積機率分布間之最大偏差距 D_{max} 為檢定依據。

$$D_{\max} = MAX\left[\left|P_{ss}(X_i) - P_{st}(X_i)\right|\right] \quad \text{..... (4.20)}$$

上式中 $P_{ss}(X_i)$為觀測值之累積機率分佈，$P_{st}(X_i)$為理論值之累積機率分佈。於求出 D_{max} 值後，由 Kolmogorov-Smirnov 表，檢查是否通過。

(三) 標準差(SE)

標準差值是考慮樣本中各觀測值變量與變量有相同累積機率時之理論值之誤差，定義為

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_i')^2}{n-m}} \quad \text{..... (4.21)}$$

式中 X_i 為第 i 個觀測值變量，X_i' 為與變量 X_i 具有相同累積機率時之理論值，m 為統計分布中之參數數目，n 為樣本數目。

為瞭解桃園縣觀音鄉及新屋鄉海域及海岸暴潮水位發生頻率，依據歷年颱風暴潮數值模擬結果，選取每年之最大值為暴潮頻率分析之樣本，如表 4-35 所列。為得到暴潮頻率分析樣本之最佳機率分布函數，利用卡方檢定及 95%信賴度的 K-S 檢定方法，分別檢定常態分布機率函數、對數常態分布機率函數、極端值一型分布機率函數、對數皮爾遜三型分布機率函數以及皮爾遜三型分布機率函數等五種機率函數之信賴度。檢定結果顯示基隆港及臺北港之最大暴潮位頻率分析樣本分別以常態分布機率函數為最佳統計分布函數(如表 4-36 及表 4-37 所列)，據此推算基隆港及臺北港海域之不同復現期距之暴潮偏差如表 4-38 及表 4-39 所示。其中基隆港 5、10、20、50 及 100 年復現期距之暴潮偏

差分別為 0.53m、0.64m、0.73m、0.83m 及 0.89m，臺北港海域 5、10、20、50 及 100 年復現期距之暴潮偏差分別為 0.64m、0.76m、0.87m、0.98m 及 1.06m。

表 4-35 基隆港及臺北港海域最大暴潮位年頻率分析樣本

年份	最大暴潮位(m)		年份	最大暴潮位(m)	
	基隆港	臺北港		基隆港	臺北港
1961	0.19	0.34	1986	0.26	0.35
1962	0.55	0.35	1987	0.42	0.55
1963	0.70	0.92	1988	0.10	0.07
1964	—	—	1989	0.36	0.50
1965	0.27	0.25	1990	0.45	0.43
1966	0.35	0.70	1991	0.32	0.34
1967	0.22	0.14	1992	0.19	0.39
1968	—	—	1993	0.05	0.04
1969	0.32	0.27	1994	0.67	0.75
1970	0.23	0.36	1995	0.07	0.11
1971	0.68	0.91	1996	0.89	0.90
1972	0.48	0.77	1997	0.10	0.12
1973	0.06	0.13	1998	0.21	0.24
1974	0.30	0.40	1999	0.07	0.12
1975	0.45	0.34	2000	0.31	0.45
1976	0.67	0.71	2001	0.53	0.46
1977	1.05	1.13	2002	0.17	0.21
1978	0.12	0.05	2003	0.11	0.11
1980	0.29	0.23	2004	0.53	0.85
1981	0.25	0.34	2005	0.40	0.48
1982	0.06	0.10			
1983	0.05	0.11			
1984	0.03	0.03			
1985	0.40	0.65			

表 4-36 基隆港最大暴潮位之卡方檢定及 K-S 檢定結果

	Normal		Log-normal		Extreme I		Log-pearson III		Pearson III	
	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S
cal.	1.93	0.101	5.14	0.095	2.21	0.080	3.64	0.080	2.57	0.072
crt.	5.99	0.205	5.99	0.205	5.99	0.205	5.99	0.205	5.99	0.205
Summary：the best fitted probability is Normal distribution										

表 4-37 臺北港最大暴潮位之卡方檢定及 K-S 檢定結果

	Normal		Log-normal		Extreme I		Log-Pearson III		Pearson III	
	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S	Ski-squared	K-S
cal.	2.21	0.110	3.07	0.086	2.79	0.111	6.79	0.077	10.50	0.097
crt.	5.99	0.205	5.99	0.205	5.99	0.205	5.99	0.205	3.84	0.205
Summary：the best fitted probability is Normal distribution										

表 4-38 基隆港最大暴潮位頻率分析結果

復現期距(年)	5	10	20	25	50	100
最高水位值(公分)	53.4	64.0	72.7	75.2	82.5.	89.1
標準偏差	4.31	5.00	5.69	5.90	6.54	7.14

表 4-39 臺北港最大暴潮位頻率分析結果

復現期距(年)	5	10	20	25	50	100
最高水位值(公分)	63.8	76.4	86.9	89.9	98.6	106.4
標準偏差	5.14	5.96	6.77	7.03	7.79	8.50

4.7 小結

本章為延續前期計畫持續對七大商港港域水位和流場模擬、預測和評估進行改善。本年度特別針對基隆港和臺北港潮流模擬精確性改進。本章內容整理得以下結論：

1. 收集分析 2010 年龍洞(LD)、麟山鼻(LSB)、淡水第二漁港、竹圍(CWE)及基隆港(KL)等潮位站之潮流記錄，以及臺北港地形水深資料作為數值模擬使用。

2. 利用所分析 2010 年潮位站資料作為基隆港和臺北港潮流模式邊界條件，進行 2011 年水位和潮流預測，結果並與觀測資料比較評估。由基隆港模擬結果顯示，潮流最大流速發生時間與模式最大流速發生時間約有 2~3 小時之相位提前，大潮期間尤其顯著。由臺北港模擬結果顯示，顯示退潮時段潮流由西南向東北流動，漲潮時段潮流由東北向西南流動，大潮時期潮流流速較大，小潮時期潮流流速較小。

3. 2011 年 3 月至 9 月基隆港和臺北港水位和流速觀測與預測值比較結果，基隆港水位和潮流比較結果趨勢相當一致，基隆港觀測最高水位與預測最高水位相差約為 0.07 m，觀測最低水位與預測值相差為 0.11m；臺北港水水位與潮流比較結果亦相當吻合，臺北港每月觀測最高水位與預測最高水位相差最大約為 0.08 m，每月觀測最低水位與預測最低水位相差最大約為 0.14 m。

4. 對於颱風期間基隆港及臺北港水位與潮流觀測和預測結果比較結果，基隆港觀測水位與預測水位最大偏差為 0.29 m，臺北港觀測水位與預測水位最大偏差為 0.35 m。颱風期間基隆港觀測流速略大於預測流速，觀測流向較預測流向有提前 1 至 3 小時的情形；臺北港觀測流速與預測流速差異不大，觀測流向較預測流向提前約 1~2 小時。

5. 在考慮風場效應對流況的影響方面，基隆港海域風場對水位影響相當有限，但對東西向之流速分量則較有較為明顯的變化，在風場作用下，除了岸邊水深較淺處流速變化較大外，基隆嶼與平和島間之海底淺灘區亦有較大的流速變化，整體而言，在持續風場作用下流速有逐漸微量增加之趨勢。臺北港海域風場對水位影響亦相當有限，對流速之影響則較為明顯，受到東北季風影響西南向流速有一顯著之增量。

6. 設計水位檢定結果顯示基隆港及臺北港之最大暴潮位頻率分析樣本分別以常態分布機率函數為最佳統計分布函數，據此推算基隆港及臺北港海域之不同復現期距之暴潮偏差，其中基隆港 5、10、20、50 及 100 年復現期距之暴潮偏差分別為 0.53m、0.64m、0.73m、0.83m 及 0.89m，臺北港海域 5、10、20、50 及 100 年復現期距之暴潮偏差分別為 0.64m、0.76m、0.87m、0.98m 及 1.06m。

第五章 海嘯模式建置及分析

5.1 海嘯資料蒐集與地震規模表示法

5.1.1 臺灣鄰近海域海嘯紀錄

根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對台北港及基隆港威脅性最大的是來自於發生在東海、琉球群島一帶之海嘯，如圖 5.1 及圖 5.2 所示。

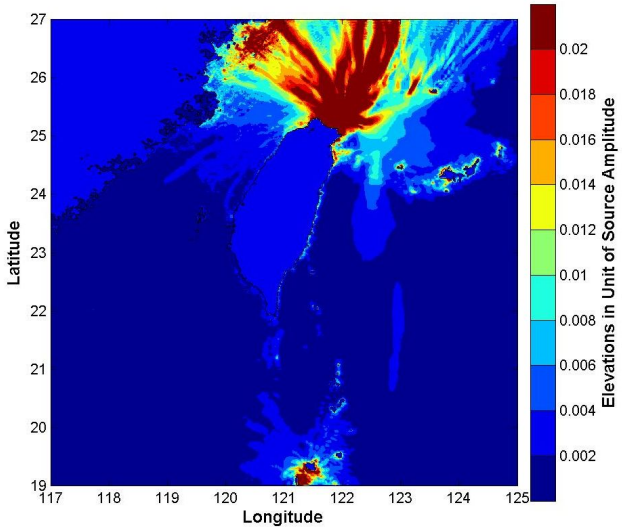


圖 5.1 對基隆港影響較大之海嘯波源區

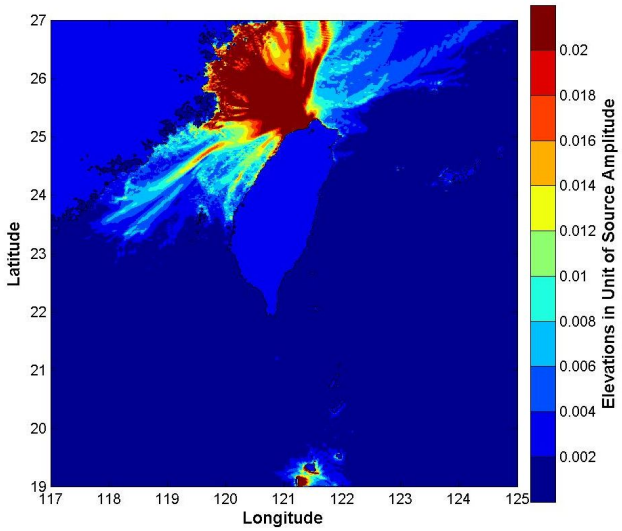


圖 5.2 對台北港影響較大之海嘯波源區

海嘯發生成因甚多，本研究僅探討由強烈海底較淺層地震所產生之海嘯。臺灣位於環太平洋地震帶，也有海嘯紀錄；臺灣北部海域有琉球海溝，長期以來由於缺乏相關震災紀錄，故一般咸信不會發生大地震；但今年年初，日本學者經過 GPS 之檢測，發現琉球海溝有發生地震規模 8 之潛在危機；鄰近台灣宜蘭海域之八重山群島、宮谷島一帶，也被認為有發生海嘯之疑慮；臺灣西南海域之馬尼拉海溝，經美國地調所認為是下一個「海嘯危險區」，經過海嘯模擬顯示，馬尼拉海溝發生海嘯時，其海嘯波在 30-40 分鐘內即可到達恆春半島；加以西南海域地形較為平緩，有利於海嘯之溯上，此區人口密集，重要設施林立，若有海嘯引起之災情，其嚴重程度可見一斑。

臺灣對於海嘯之相關史料或紀錄甚多，但因早期欠缺科學概念，故這些歷史紀錄目前有許多學者正利用不同科學方式驗證其可信度，但從歷史紀錄來看，有許多史料記載臺灣地區也曾發生災害性之海嘯，造成不小之傷亡。

近百年來，臺灣地區雖有海嘯事件發生，但均未對臺灣造成大規模之災害，加上海嘯發生機率較地震低，是故缺乏國內相關災害統計資料可供研究；根據美國 NGDC 之天然災害資料庫顯示臺灣地區自西元 1500~2011 年共有 19 起海嘯事件，詳見表 5-1 及圖 5.3 所示。

表 5-1 臺灣地區西元 1500~2011 年之海嘯事件

發生時間	地震規模	國家	震央位址	緯度	經度
1661.1.8	6.4	台灣	台灣	23.0	120.1
1661.2.15	6.0	台灣	台灣	23.0	120.2
1721		台灣	台灣	23.0	120.2
1792.8.9	6.0	台灣	台灣	23.6	120.5
1853.10.29		台灣	台灣		
1903.9.7		台灣	台灣		
1917.5.6	5.8	台灣	台灣	23.2	121.6
1922.9.1	7.6	台灣	台灣	24.5	122.0
1951.10.22	7.3	台灣	台灣	23.8	121.7
1963.2.13	7.3	台灣	台灣	24.4	122.1
1966.3.12	7.6	台灣	台灣	24.1	122.6
1972.1.25	7.5	台灣	台灣	22.5	122.3
1978.7.23	7.4	台灣	台灣	22.282	121.512
1986.11.14	7.8	台灣	台灣	23.901	121.574
1990.12.13	6.3	台灣	台灣	23.722	121.627
1998.5.3	7.5	台灣	台灣	22.306	125.308
2001.12.18	6.8	台灣	台灣	23.954	122.734
2002.3.31	7.1	台灣	台灣	24.279	122.179
2006.12.26	7.0	台灣	台灣	21.799	120.547

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database.

表 5-1 中最後一筆之海嘯紀錄即為 2006.12.26 屏東恆春海嘯，造成大約 0.6 公尺之水位變化，恆春半島陸地區域並未遭受產生太大之災情，但卻造成數條海底通訊電纜斷裂，使得對外連絡通訊蒙受嚴重之損失，其災損金額亦相當可觀。

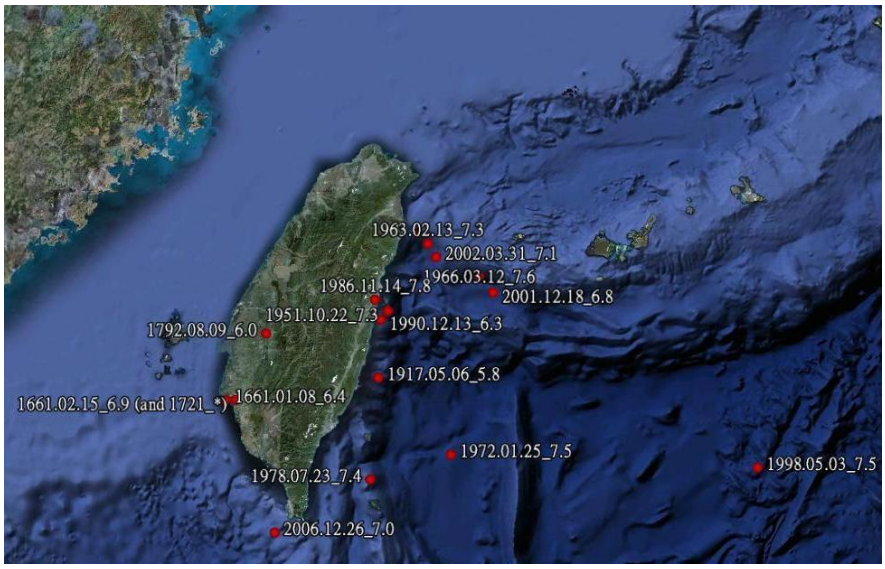


圖 5.3　臺灣海嘯事件之震源分佈

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database.

根據已知歷史文件記載，基隆於 1867 年發生過災難性海嘯；震源區大致落在圖 5.1 之潛勢震源區內；故對於基隆及台北兩港而言，海嘯之潛勢波源區是台灣之東北方；對於西南方而言，呂宋島、馬尼拉海溝是一個高風險之震源區域。東北方海域主要是在宜蘭龜山島附近海域、基隆外海之金山斷層及琉球海溝。蘭陽平原位於台灣的東北部，外形為一個三角形向東開口的沖積盆地。由於沖繩海槽緊鄰在其東側，而且直觀上沖繩海槽與蘭陽平原間的地形特徵幾乎是相連接的，故研究認為蘭陽平原的構造成因應與沖繩海槽一致，即菲律賓海板塊沿著琉球弧溝系統向西北方向隱沒時，所引起沖繩海槽弧後張裂機制可往西延伸到蘭陽平原；其他的地質及地球物理觀測似乎也支持這一個模式。台灣東北方的琉球群島及日本海域均為地震頻繁地區，與台灣的距離在 2000 公里以內，這些海域發生的大規模地震活動所引發的海嘯亦將有可能侵襲台灣東北部。

臺灣西南方之馬尼拉海溝是研究海嘯學者認為是高風險之潛勢震源區。由圖 5.1 及圖 5.2 可以發現雖然對於台北及基隆兩港之威脅性低於東北方之震源區，但也是屬於近域之海嘯波源區。臺灣西南部與南部海域雖然較少活動斷層，地震頻率及規模均較少，但 2006 兩起規模

6 以上之地震在此區產生，既有科學文獻也顯示台灣西南海域有許多斷層帶。再加上位於臺灣南方的菲律賓與臺灣同屬於菲律賓海板塊與歐亞板塊的聚合帶，地震頻繁，呂宋島有許多活動斷層延伸至海域，大規模斷層活動可能引發海嘯，於數十分鐘至一小時即可到達臺灣西南部海域，衝擊臺灣南部及西南部海岸。地質文獻可以看出台灣陸地斷層其實往南延伸至海底，故對某些海底斷層，可以從陸地露頭推測之性質。其中馬尼拉海溝為重要之斷層系統，由此圖也可以看出馬尼拉海溝自呂宋島北方一路延伸至台灣海域。

5.1.2 遠海域海嘯紀錄

遠海域海嘯部分需注意由日本北海道一帶以及由東太平洋傳遞而來之海嘯。但為利於資料之蒐集，本研究將以範圍擴展至整個環太平洋地震帶，如此上述兩個遠海域海嘯之波源區亦可包含在其中。

環太平洋地震帶(又稱環太平洋帶、環太平洋火山帶或火環；Circum-Pacific seismic zone)是一個圍繞太平洋經常發生地震和火山爆發的地區，全長 40,000 公里，呈馬蹄形，約起澳洲東南方外海，順時針方向至南美洲西部外海，如圖 5.4 所示。環太平洋火山帶上有一連串海溝、列島和火山，板塊移動劇烈。其主要的國家及地區有：日本、台灣、菲律賓、印尼、紐西蘭等。世界上約 80% 震源深度小於 70 公里的地震、90% 震源深度介於 70 公里和 300 公里之間的地震和幾乎所有震源深度大於 300 公里的地震，都發生在這個地震帶上。

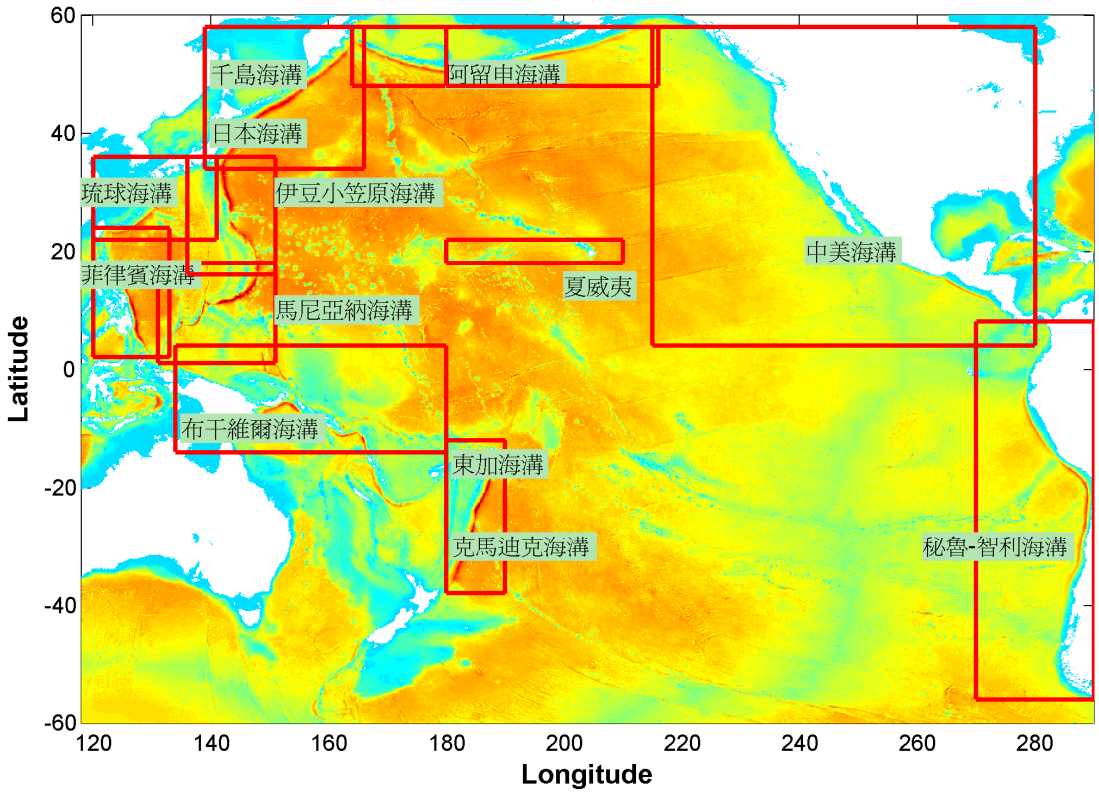


圖 5.4 環太平洋地震帶主要海溝

本研究預計廣泛蒐集海嘯及地震資料庫進行樣本數之搜集以及特性分析。資料來源為美國 NOAA 之海嘯災難資料庫，檢索時間為 1500~2011 年，檢索範圍為東經 120~西經 60 度，北緯 60 度~南緯 60 度，檢索結果顯示共有 1235 起海嘯事件，34 件是由火山運動所造成，871 件是由地震所引起的，其中地震規模多在 4 以上，多半集中於 6~8.9 之區間。

圖 5.5 為海嘯事件中之地震規模分佈圖，96%之海嘯事件之地震規模均達 6.0 以上；與一般引起海嘯之地震所需規模相符。在 871 起樣本數中，僅有 584 起有紀錄震源深度，震源深度 91%均發生在 60 公里以內，如圖 5.6。由於海底斷層資料實不如陸地斷層有許多田野資料可供引用，故本研究將廣泛收集台灣近岸潛勢震源區之相關地質/斷層資料，以充分了解潛勢震源區之斷層特性。

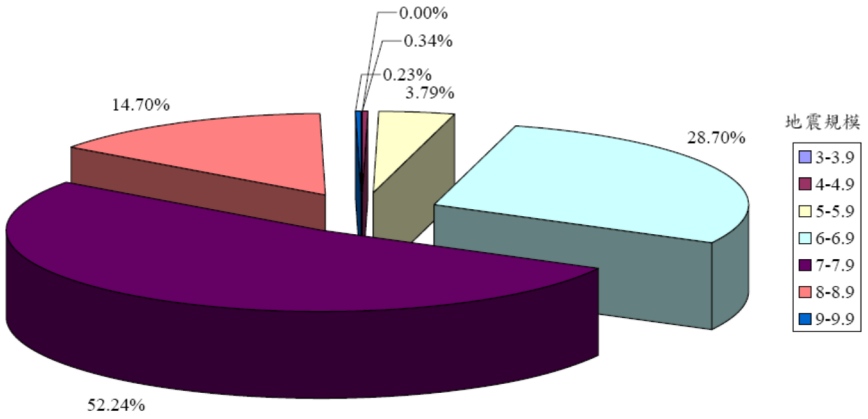


圖 5.5 海嘯事件中之地震規模分佈圖

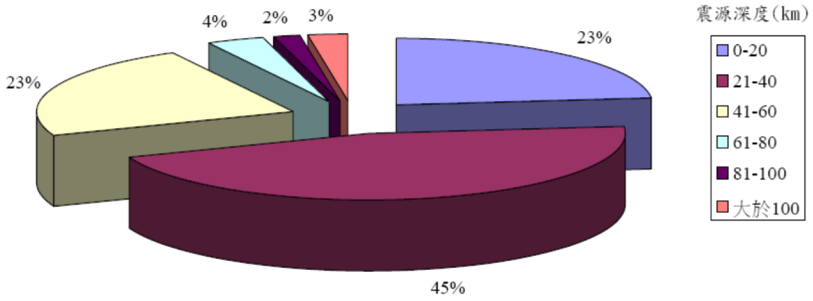


圖 5.6 海嘯事件中之震源深度分佈圖

由於海嘯波在大洋傳遞時不易察覺，加以早期對於海嘯並無具體概念，往往在近岸抬升之過程中，造成許多傷亡。在已知之海嘯事件中，有多起海嘯傷亡超過千人以上，如表 5-2 所列。

表 5-2 西元 1500~2011 年傷亡人數超過千人之海嘯事件

發生時間	發生所在地	傷亡人數	地震規模
1512/10	Japan	3700	8.8
1570/2/8	Chile	2000	
1575/12/16	Chile	1300	8.5
1586/1/18	Chile	8000	8.2
1605/2/3	Japan	1000	7.9
1611/12/2	Japan	5000	8.1
1674/2/17	Indonesia	2243	6.8
1687/10/20	Peru	5000	8.5
1692/6/7	Jamaica	2000	7.7

發生時間	發生所在地	傷亡人數	地震規模
1696/7/25	Japan	2450	
1700/4/1	Japan	1000	
1700/4/16	Japan	1000	7.0
1703/12/10	Japan	5233	8.2
1707/10/28	Japan	2000	8.4
1707/10/28	Japan	30000	8.4
1721	Taiwan	2000	
1737/10/11	India	300000	
1741/8/29	Japan	1475	
1746/10/29	Peru	4800	
1751/5/20	Japan	2100	6.6
1755/11/1	Portugal	60000	8.5
1765/5	China	10000	
1766/3/8	Japan	1700	6.9
1771/4/24	Japan	13486	7.4
1783/2/6	Italy	1500	5.9
1792/5/21	Japan	4300	6.4
1815/11/22	Indonesia	1200	7.0
1819/6/16	India	1543	7.7
1854/12/24	Japan	3000	8.4
1861/2/16	Indonesia	1105	8.5
1868/8/13	Chile	25000	8.5
1877/5/10	Chile	2477	8.3
1883/8/27	Indonesia	36000	
1896/6/15	Japan	27122	7.6
1899/9/29	Indonesia	2460	7.8
1906/1/31	Ecuador	1000	8.8
1923/9/1	Japan	2144	7.9
1933/3/2	Japan	3022	8.4
1944/12/7	Japan	1223	8.1
1946/8/4	Dominican	1790	8.1
1946/12/20	Japan	1362	8.1

發生時間	發生所在地	傷亡人數	地震規模
1951/8/3	Nicaragua	1000	
1960/5/22	Chile	1223	9.5
1976/8/16	Philippines	4456	8.1
1992/12/12	Indonesia	2500	7.8
1998/7/17	Papua New Guinea	2183	7.0
2004/12/26	Indonesia	227898	9.0
2011/3/11	JAPAN	15093	9.0

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

在近幾年所發生之著名海嘯事件，當屬 2004 年南亞大海嘯、2009 年薩摩亞海嘯、2010 年海地及智利海嘯及 2011 年日本海嘯；南亞海嘯及日本海嘯對於當地造成相當慘重的災情及傷亡，其餘三起海嘯事件對於當地也產生不小之災情；1960 智利海嘯及南亞海嘯之案例證明了海嘯可傳遞相當遠的距離，對於遠海域的國家而言仍是不可輕忽；1960 年智利海嘯橫跨太平洋，連太平洋西岸之日本也遭受波及；2004 年南亞海嘯雖發生在印尼外海，海嘯波橫跨印度洋，2 小時後襲擊印度洋西岸各國，遠在 1600 公里外之斯里蘭卡也造成慘重之災情，此一案例也促成了印度洋周邊國家開始研擬海嘯預警作業；2011 年日本海嘯，對當地宮城縣、岩手縣沿海各地產生 5 至 15 公尺巨浪，日本受災地區約 400 平方公里，並造成多處火災災情，更影響沿海核能電廠安全，產生除了海嘯災情外的核災問題。

5.1.3 地震資料來源

本計劃地震資料來源採用 United States Geological Survey (USGS) National Earthquake Information Center(NEIC)中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2011 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，如圖所示。地震紀錄採用下限為 4.5，地形資料則採用 NOAA-ETOPO1 之數值資料。

USGS-NEIC 資料庫不同於 Global Centroid-Moment-Tensor (CMT)，

在 NEIC 資料庫中含有 M_W、m_B、M_S…等不同地震規模的測值，可透過經驗式的轉換來彌補有些地震資料不足的情形。地震規模(earthquake magnitude)和地震震度(earthquake intensity)之表示略有不同。地震震度(earthquake intensity)是在地震儀發明之前，用來表示地震強度的指標。震度是指在發生地震時，人們所感受到震動大小的程度或者是物體受到地震震動所遭到的破壞程度，距離地震震央愈接近，其震度大小就愈大，破壞力也愈強；世界各國在使用地震強度分級上，會因環境、背景的差異，所訂定的標準也會不同；現今地震儀器已經能描述地震的加速度，所以震度亦可由加速度值來劃分。

5.1.4 地震表示方法

一般地震報告中所指的地震規模(earthquake magnitude)是依據地震的威力大小，此和其釋放出的能量多寡有關，故每當有地震發生時，地震規模只有單一值，不會因為觀測的位置不同而產生不同的數值。我國常使用之芮氏地震規模(Richter magnitude scale)，亦稱為近震規模(local magnitude,M_L)，是在 1935 年為了研究美國加州地區發生的地震而制定，使用伍德-安德森扭力式地震儀(Wood-Anderson torsion seismometer)來測量。由於當初設計芮氏地震規模的限制，當芮氏地震規模大於某數值(約 7.5)以上時會有「飽和」現象，也就是計算出來的所有地震規模值都趨近相同。此外，觀測點距離震央超過約 600 公里以上時，芮氏地震規模的計算會產生極大誤差而不適用。於是地震學家發展出表面波規模(surface waves magnitude,M_S)和體波規模(body waves magnitude,m_B)來描述較遠距離的地震規模值，以地震波中特定波相的最大振幅來計算，但是這兩種計算規模的方法，對於大型地震也會有飽和的問題。

21 世紀初，地震學者採用更能直接反應地震破裂過程物理特性(如地層錯動的大小和地震的能量等)的表示方法即地震矩規模(Moment magnitude scale,M_w)來描述地震大小，地震矩規模的優點在於它不會發生飽和現象。亦即，大於某規模的所有地震之數值都相同的情況將不會發生。另外，此地震矩規模與震源的物理特性有較直接的聯繫。因

此，地震矩規模已經取代芮氏地震規模成為全球地震學家估算大規模地震時最常用的尺度。以下為幾個常見的地震規模介紹：

(1)M_L：芮氏地震規模(Richter magnitude)

此種地震規模的概念是由 C. F. Richter 教授在 1935 年所提出的，稱為芮氏地震規模 M_L，或近震規模(Local magnitude)。芮氏地震規模是以地震儀所記錄到的地震波振幅為基礎。倘落地震震源大小一定時，距離震源愈遠震波的振幅就愈小；而當與震源的距離一定時，則震波的振幅與震源的大小成正相關。

芮氏地震規模之定義為：一標準扭力式之伍德-安得生（Wood-Andersion）式地震儀（自由週期 0.8 秒，倍率 2800 倍，阻尼常數 0.8）在距震央 100 公里處所記錄的最大振幅以微米（μm）記的對數值。其公式為：

$$M_L = \log(A/A_0) = \log A - \log A_0 \quad \text{.....(5.1)}$$

M_L：芮氏(近震)地震規模。A：伍德-安得生(Wood-Andersion)式地震儀在測站所觀測之最大幅。A_0：標準地震(M_L= 0)時，同式地震儀在該測站所記錄之最大振幅。

地震規模是一個統一的數值，地震本身的大小與測站位置無關。但是地震並非都發生在距離測站 100 公里處，也因此在計算地震規模時，必須考慮離震央距離(即震央與測站之距離)。若考慮震央距的修正，則上式可以修正為：

$$M_L = \log(A) + 2.56\log(\Delta) - 5.12 \quad \text{.....(5.2)}$$

其中 A 為地震記錄最大振幅，以微米（μm）為單位，△為距震央的距離，以度為單位。

(2)M_S：表面波規模(surface waves magnitude)

此為根據 Guttenburg 教授和 Richter 教授的研究所訂，因芮氏地震規模僅適用在離震央距離小於 600 公里的地震，而當距震央距離大於 600 公里時，以表面波來求地震規模較恰當。表面波規模是根據

表面波之振幅(A)及週期(T)而定的，在定義中不指定使用何種儀器，僅選用週期 20 秒左右的最大水準地動合成振幅A(單位為 μ)來定義 M_S。而在 1966 年蘇黎士國際地震學會上規定，除計算表面波規模(M_S)時，應考慮其最大振幅之外，還須考慮週期、振幅以及距離函數(亦稱檢定函數)σ，即

$$M_S = \log(A/T) + \sigma(\Delta) \quad \text{.....(5.3)}$$

$$\sigma(\Delta) = 1.66\log\Delta + 3.3 \quad \text{.....(5.4)}$$

上兩式可以合為：

$$M_S = \log(A/T) + 1.66\log(\Delta) + 3.3 \quad \text{.....(5.5)}$$

對於週期 20 秒的表面波,上式可修正為：

$$M_s = \log(A20) + 1.66\log\Delta + 3.3 \quad \text{.....(5.6)}$$

其中 A20 為週期 20 秒的表面波之最大振幅，值得注意的是須考慮實際地動的振幅量，即由記錄中的最大振幅量，再除去儀器的放大倍率,得到真正的地動量。表面波規模其優點為任何儀器皆可使用，缺點則為較深的地震則無法定出表面波規模。

(3)m_B：體波規模(body waves magnitude)

此為 1945 年 Guttenburg 研究體波之振幅衰減曲線$Q(\Delta)$，所定義出的遠地地震體波規模 m_B。此定義根據體波之振幅(A)及週期(T)其為：

$$m_B = \log(A/T) + Q(\Delta) \quad \text{.....(5.7)}$$

由以上的地震規模(M_L、M_s、m_B)可用一個通式來表示之有

$$M = \log A + f(d, h) + C_s + C_R \quad \text{.....(5.8)}$$

其中M是規模，A是除去儀器效應後所記錄到之地震波的真實振幅，$f(d,h)$是一些計算關於震央距離及震源深度的函數；C_S，C_R是測站(station)及區域(region)計算出的修正值。因所記錄的週期不夠

長或是有儀器使用限制上的關係，所以以上的地震規模對於能量較大或深度較深的地震，無法完全定出其規模，也就是說上述對於規模較大的地震有所限制，無法表示出來。因此，發展出一地震矩之概念(Seismic Moment) 來輔助。

(4)M_W：地震矩規模(Moment magnitude scale)

地震矩規模是由 Kanamori 教授所發展出的。因為芮氏地震規模(M_L)對於較大的地震有其界限且會受儀的器限制，故其對大地震無法正確描述，進而發展出由地震矩(M_0)來計算地震規模的方法。

地震的主要原因為地層的錯動，錯動處稱之為斷層。地震震源本身之大小與造成地層錯動的作用力有著直接的相關。因此，總力矩為表示震源大小的一個很重要且直接的參數。而震源機制之總力矩稱為地震矩(Seismic Moment)，造成單一斷層之地震的地震矩可簡化為：

$$M_0 = \mu \times S \times \bar{D} \quad \text{.....} \quad (5.9)$$

其中 μ 為斷層上物質的剛硬係數(rigidity 或 shear modulus)， S為斷層面積，$\bar{D}$ 為斷層的平均滑動量，地震矩(M_0)的單位為 dyne-cm(達因-公分)，一般地震的地震矩值約為 1012-1030 dyne-cm 。地震矩規模(M_w)是根據地震矩(M_0)所發展出的關係式為

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad \text{.....} \quad (5.10)$$

即由計算所得的M_0得出其相對的M_w，就可適當的描述出地震的大小，此對大地震無界限限制的現象。

本研究出現最多資料的是 m_B(體波規模)者，其他還有少數以 M_w、M_s、M_L 等者；另外，還有一個少見的單位 UK(在本研究不考慮此參數)。其本研究所採用之轉換公式為：Scordilis ,E.M.(2006)對地震規模轉換之經驗公式及台灣地區經驗公式。

(1)M_S 轉換成 M_W 之迴歸公式(圖 5.7)：

$$M_w = 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03)$$
$$3.0 \le M_s \le 6.1,$$
$$R^2 = 0.77, \quad \sigma = 0.17, \quad n = 23{,}921 \quad \text{..... (5.11)}$$

$$M_w = 0.99(\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13)$$
$$6.2 \le M_s \le 8.2,$$
$$R^2 = 0.81, \quad \sigma = 0.20, \quad n = 2{,}328 \quad \text{..... (5.12)}$$

(2)m_B 轉換至 M_w 之迴歸公式(圖 5.8)

$$M_w = 0.85(\pm 0.04)M_B + 1.03(\pm m_B\ 3)$$
$$3.5 \le M_B \le 6.2, \quad m_B$$
$$R^2 = 0.53, \quad \sigma = 0.29, \quad n = 39{,}784 \quad \text{..... (5.13)}$$

雖然由相關系數 R 之 R^2 值顯示轉換公式間的相關性不很高、且僅在 6.2 以下適用。但在找到更好的經驗式之前，即在尚未找到相關性更高的經驗轉換公式之前，本計劃將以此作為轉換公式之用。

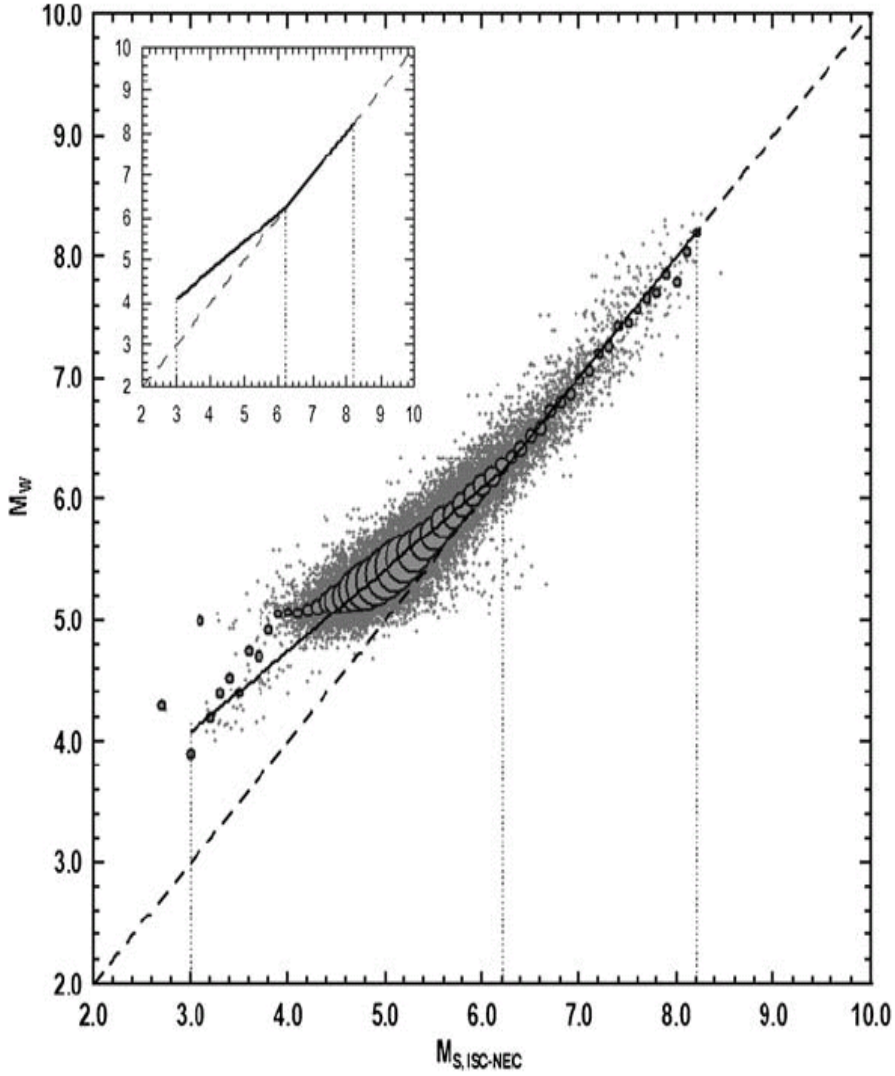


圖 5.7 M_S 規模轉換之 M_W 規模之對應圖 (Scordilis 2006)

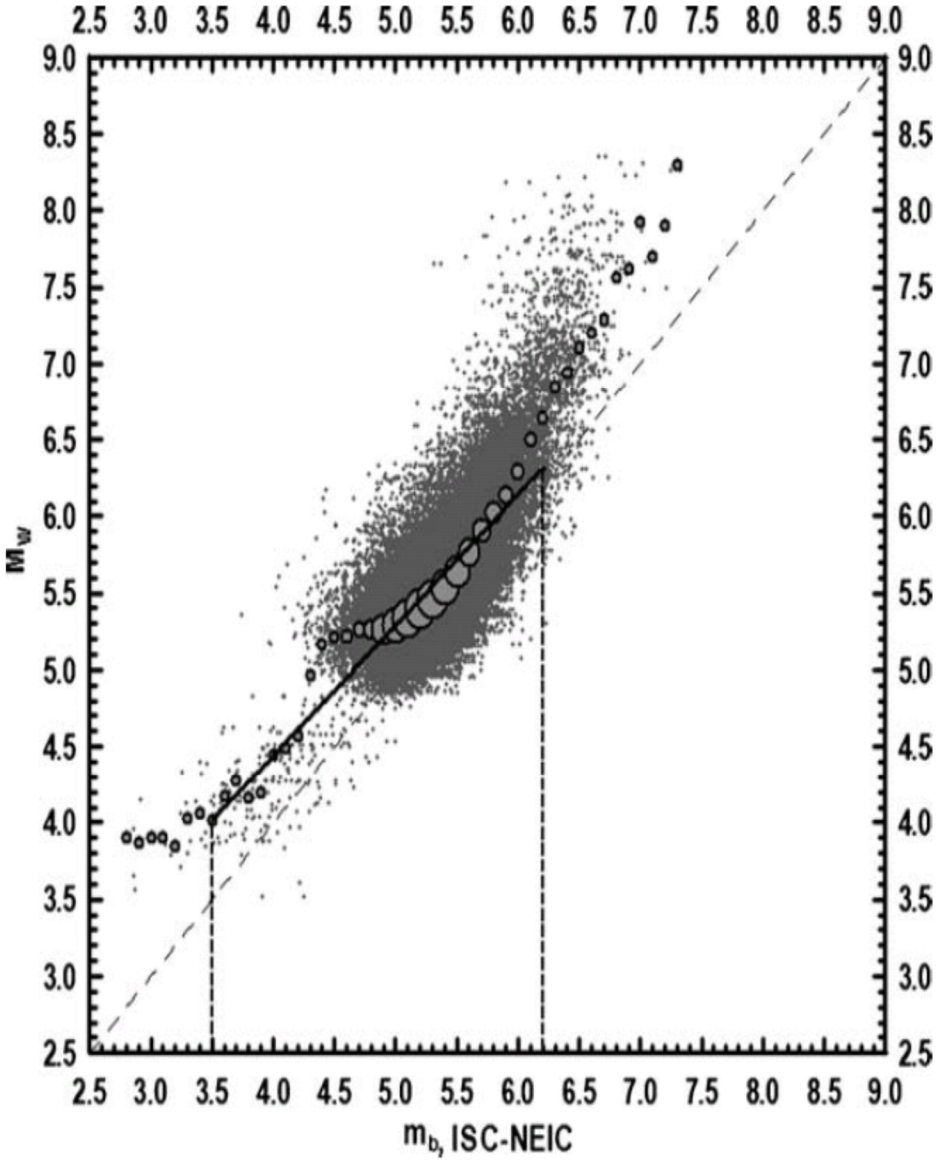


圖 5.8 mB 規模轉換至 MW 規模之對應圖 (Scordilis 2006)

5.2 精進預報子系統之格林函數與實例驗證

5.2.1 互逆格林函數

由海嘯數值模擬顯示，現行之海嘯數值模式之模擬程序及計算效率由於地震測報技術未得以進入應用階段以及計算方式之問題，故若應用在海嘯測報及早期預警上仍有實際上之困難，故本計畫以格林函數之基本理論以及應用提升目前海嘯模擬之計算效率。

本計畫所採用之基本理論稱為互逆格林函數(reciprocal Green's function以下以RGF簡稱)，其構想主要源自Loomis (1979)與Xu (2007)；該研究結果指出利用線性系統中之可逆性可以降低對初始條件之依賴性及提高計算效率。

由於海嘯波在大洋中之傳遞，非線性效應可以忽略，所以可視為一個「線性系統」，一般數值模式中可以用線性淺水方程式(Linear shallow water equation)來描述傳遞行為；據此計算出各點之水位時序列變化，即稱為「格林函數」(Green's function)；以數學方式解釋，即是格林函數可視為是線性淺水方程式之 fundamental 解；儘管海嘯波靠近近岸時會呈現高度非線性變化，但在水深深於 50 公尺的海域，線性淺水方程式依舊能適用於描述其傳播過程(Shuto, 1991)，故線性系統之可逆性仍可適用。「格林函數」之可逆性被稱為是「互逆格林函數」。格林函數的運用在傳統上觀察線性系統中波源所造成的反應，而格林函數通常以波源振幅表示，如果區域內各點的格林函數已經求得，只要計算起始波源的水位與其格林函數的乘積後進行加總，便可得知波源對各點所引起的水位變化。

上述的格林函數(Green's Function，以下以 GF 簡稱)是代表一個已知波源對區域內各點所產生的水位時序列變化。若 s 表示波源位置(source)，而 r 則為接收位置(receiver，即是計算點位)，其 GF 即是由 s 到 r 而其逆向的 GF 代表以 r 產生的單位波源振幅，在 s 所造成的反應。

Loomis(1979)觀察到 GF 及其互逆 GF 對於 s 和 r 是呈現對稱的形式，亦即相同的波源出現在 s 所造成對 r 的反應相當於出現在 r 所造成

對 s 的反應，Loomis 所提的互逆特性可以提高計算各點 GF 的效益，只要計算 s 傳播後對所有 r 的 GF，等同於得知當任何 r 出現波源時對 s 造成的反應。

以上由圖 5.9 說明其概念，對某一個接收點 r 而言，由於可能有許多未知震源，故用 si 來表示所有可能之震源，其 GF 即是由 si 到 r。由於格林函數具有可逆性，所以任一點 si 之單位振幅對 r 所造成之反應(即是格林函數)等於 r 之單位振幅對 si 所造成的反應；所以當海嘯發生時，僅需利用相關斷層參數得知起始水位後，做簡單之乘積加總後即可獲得與傳統海嘯模式運算後相同之結果。

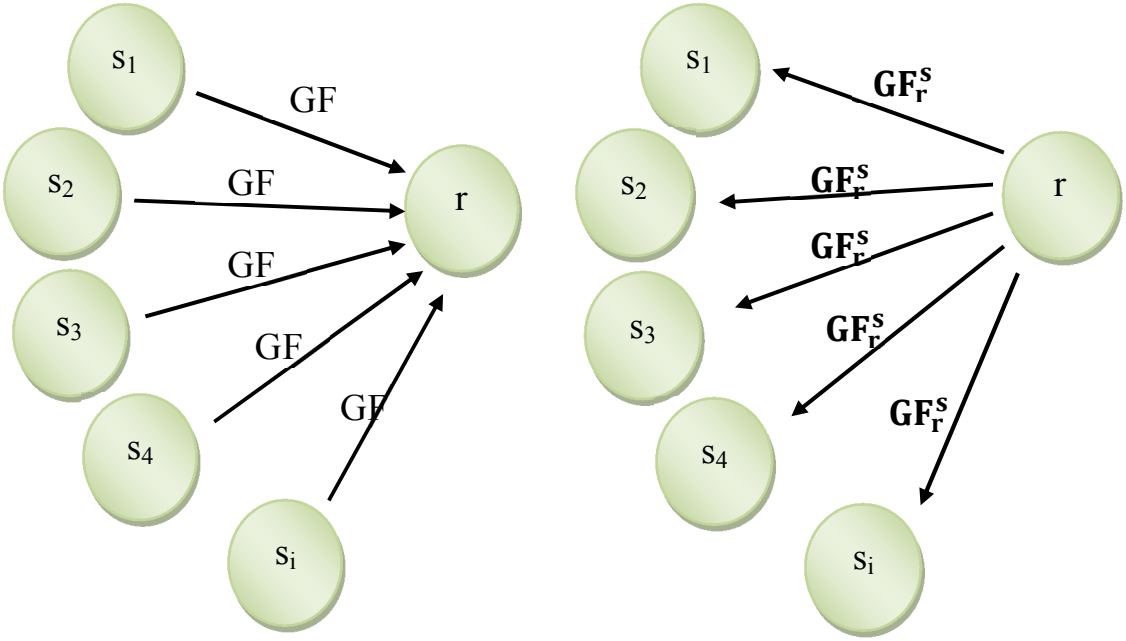


圖 5.9 傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖

簡易之理論說明如下：為了解區域內任何 s 點發生海嘯時，其當地水位將對 r 點位置的造成多大的水位高度，故先計算所有 r 點對應 s 點的 GF。首先將某一時段內各 r 點的水位經(5.14)式正規化便是 r 點傳播至各點的 GF 值，又因波源振幅為 1 公尺，所以模式計算後的水位值即為 GF 值。再根據 GF 的互逆性質，r 點對應 s 點的 GF 等同於 s 點對應 r 點的 GF(5.15)式。只要透過(5.16)式作簡單的乘積與加總就可到 s 點在海嘯發生後的該時段水位變化。

$$GF_r^s = \frac{r\text{點水位}}{\text{波源}s\text{之初始水位}} \quad \text{.....(5.14)}$$

$$GF_s^r(t) = GF_r^s(t) \quad \text{.....(5.15)}$$

$$H_r(t) = \sum_{r=1}^{N} GF_r^s(t) \times H_s \quad \text{.....(5.16)}$$

其中(5.16)式的 $H_r(t)$ 為各接收點(或是預報點位)r 在時間 t 的水位變化，$GF^s{}_r(t)$ 為各 r 點在時間 t 的 GF，H_s 為各波源點的初始水位高度，N 為所有 r 點的總數。$H_r(t)$ 即是傳統海嘯數值模式之結果，換句話說，(5.16)式可以得到與傳統海嘯模式相符之結果；對於(5.16)式而言， $GF^s{}_r(t)$ 可以用海嘯數值模式在各個接收點處以單位振幅之方式計算出，故是一個已知之時序列資料；唯一的未知是 H_s，該項可由地震相關網站上即時擷取相關參數後帶入斷層模式中計算即可得到。透過互逆格林函數，可以以資料庫之方式先行計算單位波高之時序列變化，在海嘯發生後，即可初步了解最大波高及其到達時間，大幅度提升計算效率。

格林函數之最適水深為 50 公尺，但實際上受限於台灣東西兩岸地形不同，東岸陡峭西岸平緩，且離陸地亦不能過遠；故實務上之點位選擇仍須配合當地地形條件，圖 5.10 為本計畫台北港格林函數計算位置。

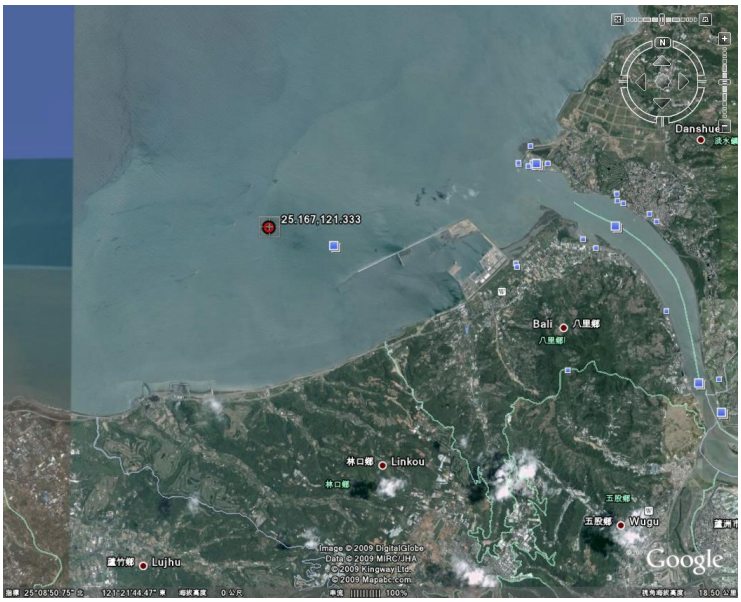


圖 5.10 台北港之預報點位圖

由於互逆格林函數是由單位振幅所計算，故可以資料庫之型態事先建置完成，此一特點容易應用在海嘯早期預警系統上。

5.2.2 系統建構

本計劃之海嘯預警之構想,即是利用互逆格林函數之高計算效率，在遠/近域海嘯發生後，能夠快速掌握可能之最大波高以及到達時間，提供給各港務局作為後續應變之作為之參考。其預警系統主要流程如圖 5.11 所示：

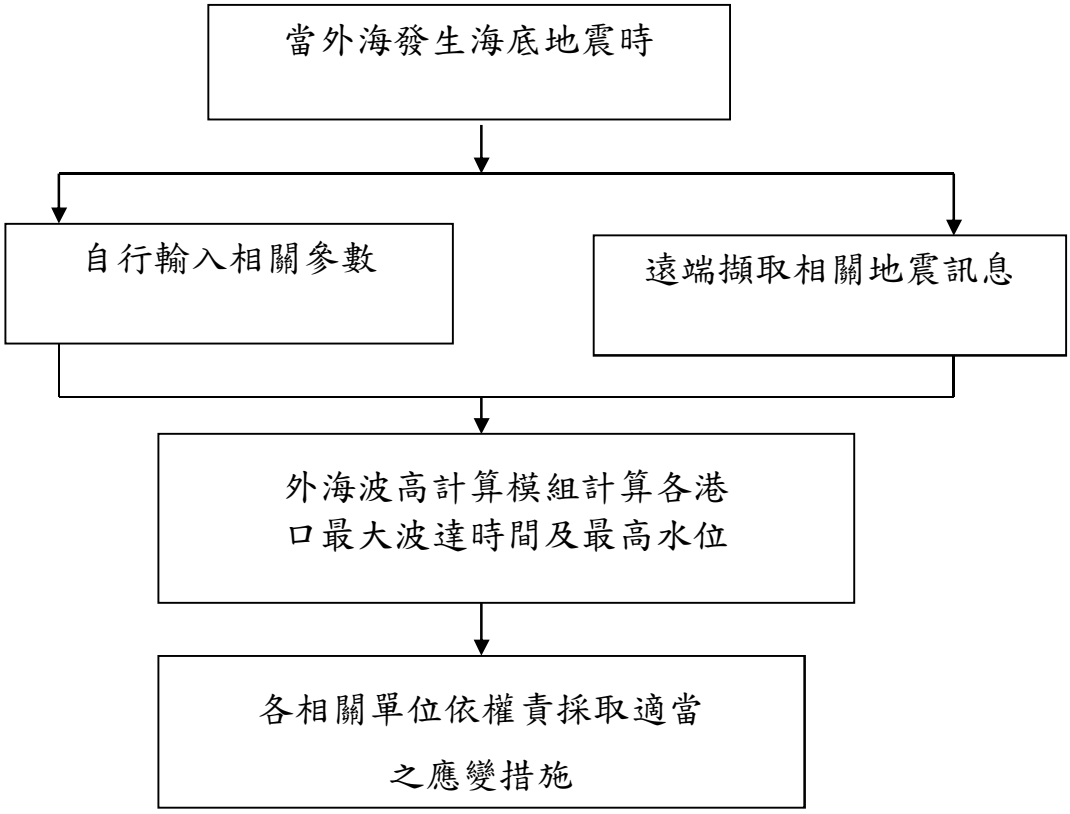


圖 5.11 海嘯預警系統之規劃圖

本操作系統是由 Matlab 軟體所建構而成，該軟體提供了方便之數學運算指令及圖形繪製，更提供了內建之操作者介面設定程序；使用者本身不須安裝 Matlab 軟體，僅須下載編譯器等基本套件即可於個人電腦上執行查詢作業。本計畫利用 Matlab 內建的介面設計模組 GUIDE (Graphic User Interface Design Environment)，提供使用者一個設計「圖形使用者介面」（Graphical User Interface，GUI）的程式設計環境，建立近域之海嘯預警系統。它可以產生每一個控制物件的標準反應函式，

使用者只要填入所需的指令或敘述。並利用滑鼠快速地拖曳出所需的介面物件及其大小；類似 VB 的物件導向概念。其基本建立程序如下：

(1)如圖 5.12 所示。在 Matlab 的命令視窗鍵入'guide'便可啟動，GUIDE 設計模組並選擇起始介面的面板。

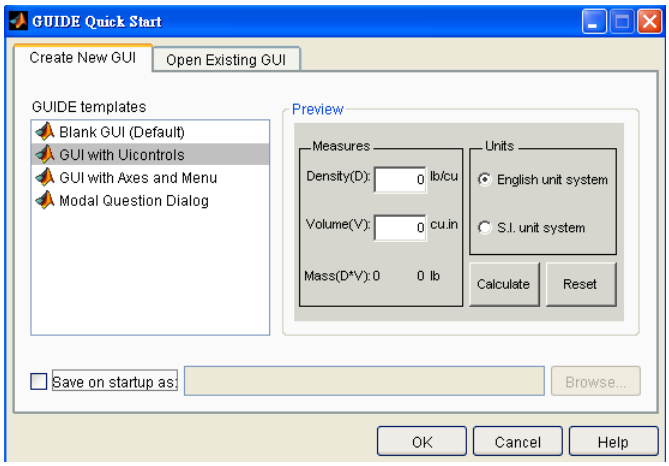


圖 5.12 GUI 程式設計環境

(2)利用左列的物件選單將所需子面板及物件拖曳到面板並進行排版，在介面主程式內撰寫特定物件的介面互動程式。如圖 5.13 所示。

(3)上圖為編譯完成後的執行畫面，於左上方的面板輸入相關斷層參數(斷層長度、寬度、滑移量等)。或是選擇直接輸入地震矩規模自動產生斷層經驗參數。

(4)輸入完成後點選確定按鈕之後便會根據斷層參數計算起始波源，並於右上圖輸出波源的水位分佈。如圖 5.14 所示。

(5)起始波源設定完成後，在預報時間長度的面板(左中)選擇水位預報時間。

(6)最後於左下角面板選擇預報地點進行水位預報。如圖 5.15 所示。

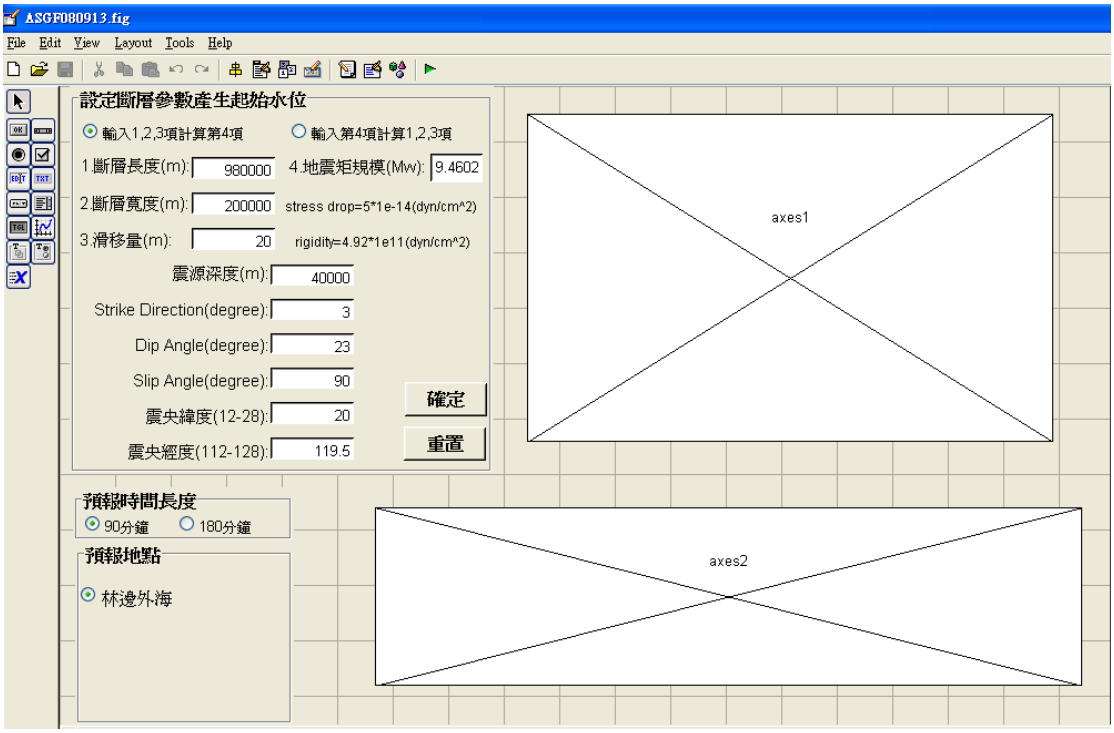


圖 5.13 視窗化操作系統之建立與排版

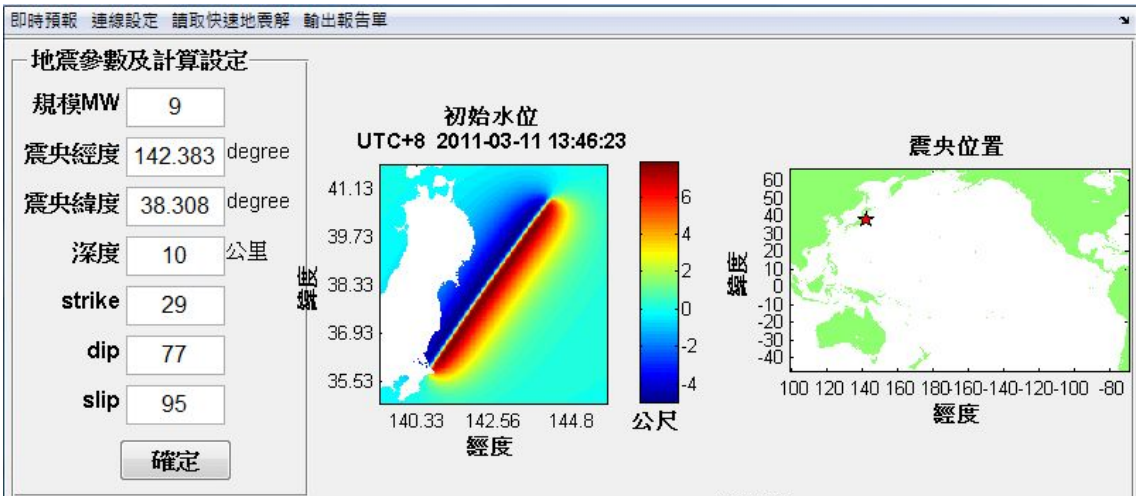


圖 5.14 視窗化介面之編譯完成圖

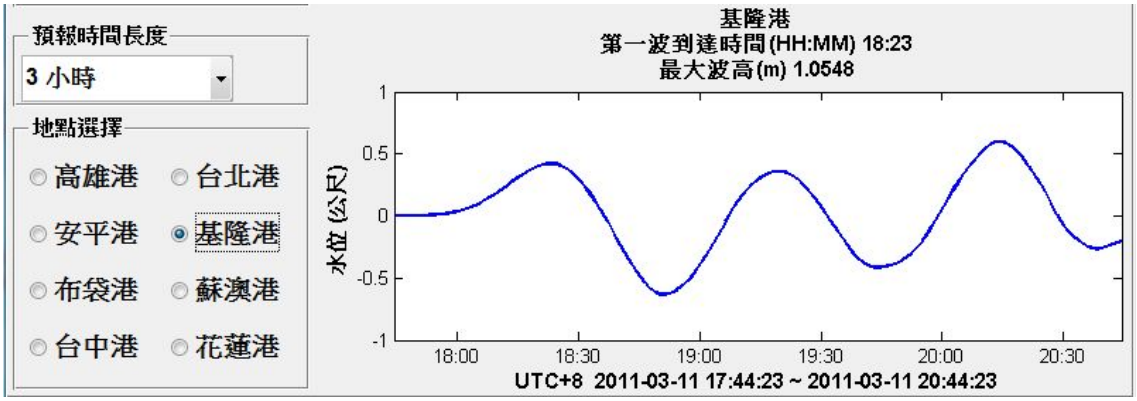


圖 5.15 視窗化介面之計算成果圖

本系統之參數輸入方式是直接輸入地震矩規模，反算斷層長度、寬度及滑移量。就地震警報而言，得知地震矩規模較為容易也較為一般人所接受；斷層長度等資料由於海底斷層探測比較不易，故斷層尺度之換算通常也經由經驗公式得出，其他之斷層參數(例如走向等)可參考 HCMT 等網站得知。

海嘯成因眾多，本系統目前僅適用於因海底地震所產生之海嘯；在計算效率方面，以恆春地震為例，若不考慮近岸波浪非線性之模擬，則使用傳統海嘯數值模式進行全區域模擬且進行後續資料處理則約需 1~2 天；使用本系統計算相同案例，由於已事先完成資料庫運算及建置，故僅需於地震發生初期得知海嘯初始水位即可進行運算以及圖形畫輸出，僅需數秒到數分鐘即可完成計算作業。

5.2.3 精進系統數值模式之格林函數

本計畫已完成互逆格林函數之海嘯波高資料庫涵蓋範圍擴展至太平洋海盆地區，如圖 5.16。

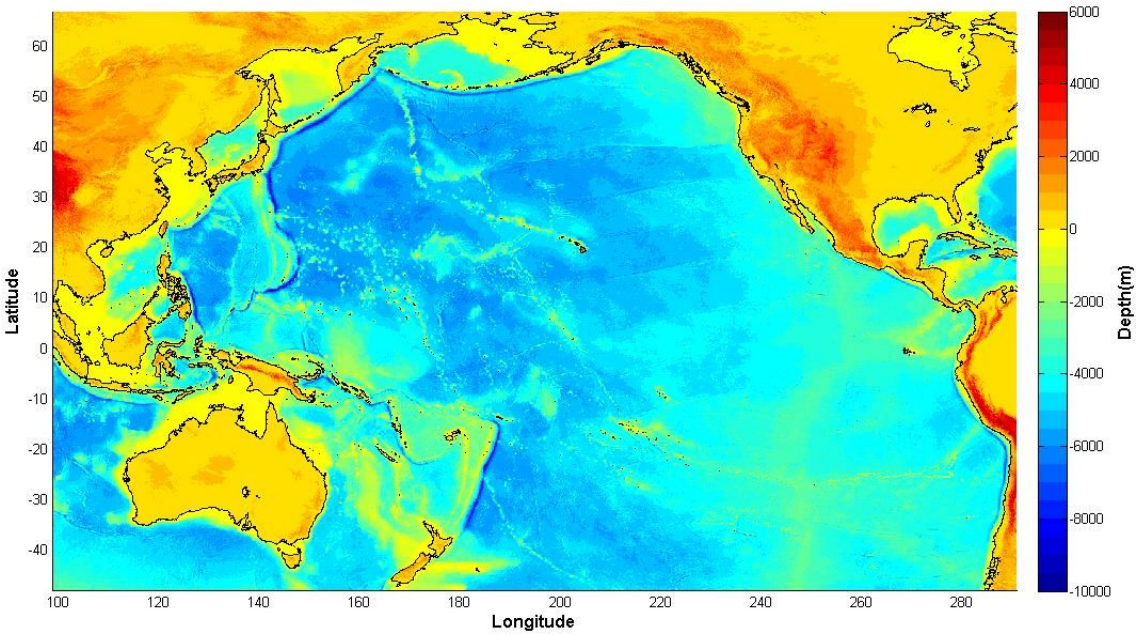


圖 5.16 視窗化系統之計算範圍圖

由於計算範圍涵蓋整個環太平洋地震帶且時間長度甚長，即使以較具效率之 nc 檔格式進行儲存，也需要數百 GB(Gigabyte)，故單港所需之硬碟空間甚大，對儲存空間需求甚高，故有必要進一步改良其儲存方式，同時也可進一步提升計算效率。

目前海嘯波高資料庫中有相當多零值之數值資料，以時間上來說則包含第一波到達時間之前以及預報時間之後，如圖 5.17 所示；以空間上來說，陸地及陸地上未流通之水域(例如湖)則是不必要之資料，如圖 5.18 所示。這些零值資料是造成資料庫龐大的原因。

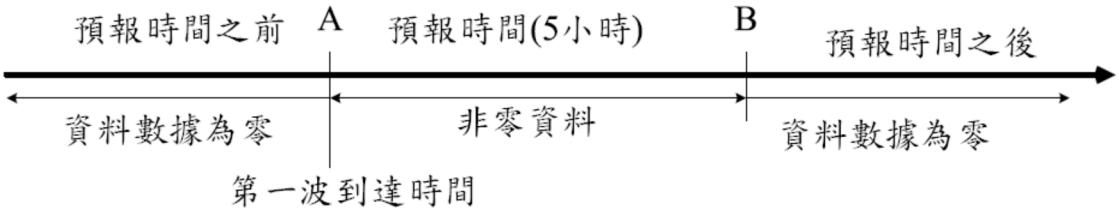


圖 5.17 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態

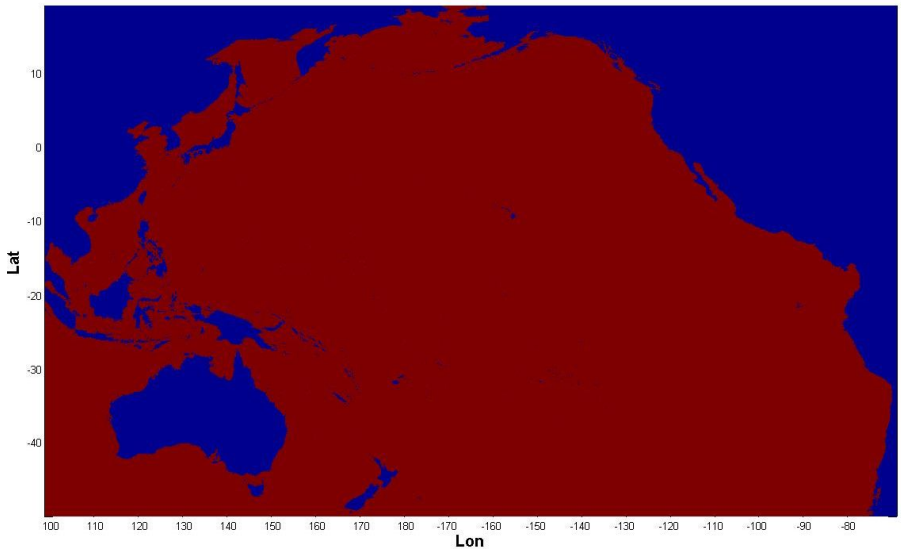


圖 5.18 單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域)

因此對於單一預報點而言，第一波到達時間之前之資料可省略不予儲存，待確定第一到達時間時即予用零補齊即可；因此，利用等值線之觀念可以得知每一預報點之第一波到達時間，這稱之為「時間索引」；當預報點之格林函數出現不為零時即定義到達時間。這種資料儲存概念可有效降低時間長度之資料儲存量，僅為原先容量之 1/4。

另一方面，非水域之空間點位也是會佔據大量之儲存空間，因此，本計劃將陸域之點位自資料庫中除去，可再降低約 10GB(Gigabyte)之容量；故時間及空間均作儲存方式及點位精進後，約可減少 80%之儲存空間，同時也提高約 30%之計算速率。以高雄港為例，可由原 124GB(Gigabyte)降為 26GB(Gigabyte)，其水位時序列變化(圖 5.19)是一致的，故可說明本法之可行性，並可大幅度降低儲存空間之需求。

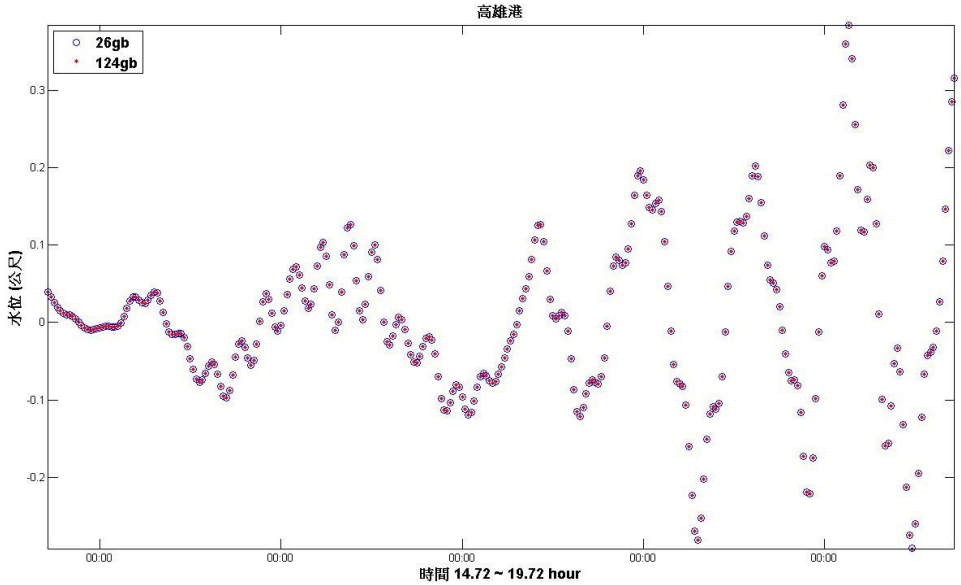


圖 5.19 高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證

減少了海嘯波高資料庫單筆檔案的容量大小，一方面資料庫所需硬碟空間減少，另一方面系統在讀取資料庫時能夠更加快速讀取完成用以後續計算；精進後結果與精進前結果一致，使系統能更加便利及完善。

5.2.4 基隆港域及台北港域海嘯預警子系統

5.2.4.1 海嘯預警子系統

基隆港位於台灣北部，是我國最北端之國際商港；相較於其他國際商港，基隆地區是有可信度較高之海嘯歷史事件發生過，且基隆港區與基隆市區緊密相連，故基隆港面臨之海嘯潛勢威脅較其他港口為高。

台北港位於新北市之八里地區淡水河出海口南岸，是一個經由人工填海造陸而成之人工港，涵蓋之總面積為 3,102 公頃，港區範圍約為基隆港五倍；主要之海嘯威脅除了與基隆港相同外，另外包含了大陸沿岸一帶之震源區。

由於兩港之特性不同，故本計劃也預定分別建置適用於兩個港口之子系統，潛勢震源區包含整個環太平洋地震帶，並使用前小節所述

之方式減少資料庫所需之空間；預報時間長度為自第一波到達時間起算 5 小時；至於震源參數之連線設定，遠端資料來源仍是即時擷取美國 USGS 之地震即時資料(如圖 5.20)，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業。

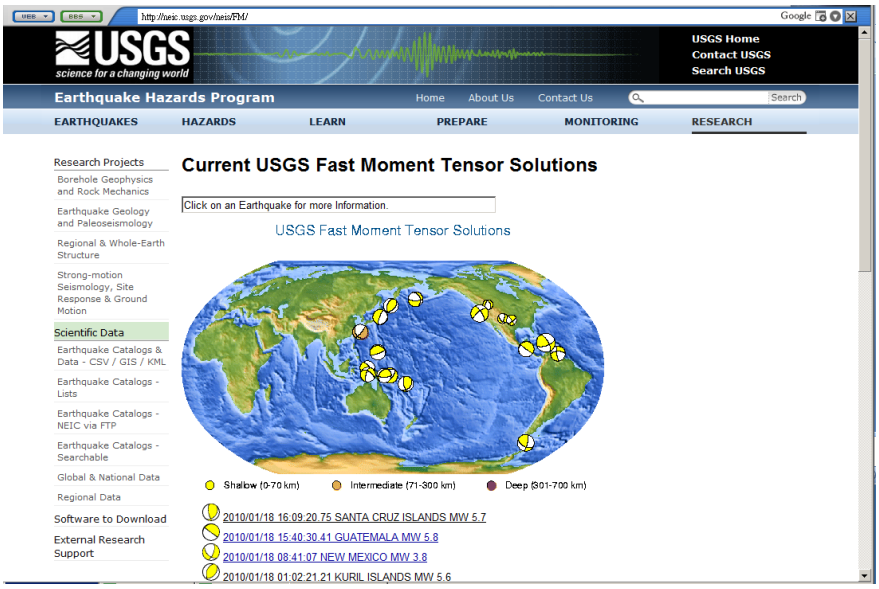


圖 5.20 美國 USGS 資料庫

5.2.4.2 即時地震資料擷取

USGS-NEIC 之地震資料庫範圍為全球，但其資料擷取約在地震發生後約 1 小時才可遠端擷取其參數；對於震央發生在台灣周邊海域恐有不及，因此在台灣區附近(東經 119 度~123 度，北緯 21 度~26 度)採用中央氣象局之地震即時資料(http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/CMT/quick/quick.html，如圖 5.21 所示)，約在地震後 5 分鐘即可獲得相關訊息，而其他區域仍使用 NEIC 之資料。目前計畫完成之即時地震擷取系統之資料來源為 USGS、CWB，並增設日本防災科學技術研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention NIED)所提供之 F-net (Full Range Seismograph Network of Japan)，其範圍在東經 120 度到 156 度，北緯 20 度到 49 度，以供地震資料參考（圖 5.22）。圖 5.23 為目前完成之即時地震擷取系統介面。

Quick CMT Reports:

Recent Qcmt Distribution In Taiwan

Subscribe Quick CMT

Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	Dep.	Mw	Strike	Dip	Slip	Misfit	CMT	Detail
2010-11-10	9:36:58.70	22.87	121.26	18.00 18	3.70	216 344	39 63	135 60	0.504		Trace Map Image Solution
2010-11-09	18:30:52.90	24.55	121.82	9.80 12	3.70	96 6	71 89	1 161	0.581		Trace Map Image Solution
2010-11-08	13: 1:21.30	23.22	120.41	19.90 17	4.50	337 218	42 67	37 126	0.584		Trace Map Image Solution
2010-11-06	0:22: 6.50	24.04	121.93	57.30 59	3.40	127 27	64 69	23 152	0.651		Trace Map Image Solution
2010-11-04	18:22:25.50	22.05	121.61	42.20 44	3.60	257 11	33 75	153 60	0.712		Trace Map Image Solution

圖 5.21 中央氣象局網站之即時地震資料

NIED F-net Broadband Seismograph Network

F-net HOME | Questions&Comments | User registration | NIED | JAPANESE

What is F-net | Station Info | Waveforms | Access Count | Renewal History

Topics | Moment Tensors | Search for Mechanism | FAQ | Retrieval of Waveforms

Earthquake Information 2011/04 (UT)

2011 04 Search ■Introduction ■Information ■publication ■What is Mj? ■Updated << Prev Next >>

Origin Time(UT)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Region	Var Red
2011/04/18,19:14	39.6 N	140.4 E	20 km	Mj 4.8	SOUTHERN AKITA PREF	79.82
2011/04/18,17:37	35.5 N	139.6 E	90 km	Mj 4.1	KANAGAWA PREF	70.58
2011/04/18,17:26	41.5 N	142.0 E	50 km	Mj 4.0	E OFF AOMORI PREF	61.61
2011/04/18,08:16	35.4 N	136.3 E	40 km	Mj 3.5	SHIGA GIFU BORDER REGION	65.22
2011/04/18,02:08	37.1 N	140.7 E	20 km	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	77.38
2011/04/17,18:33	37.0 N	140.8 E	10 km	Mj 4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	82.41
2011/04/17,18:09	35.8 N	140.1 E	80 km	Mj 4.4	NORTHERN CHIBA PREF	96.46
2011/04/17,15:47	37.1 N	141.3 E	30 km	Mj 4.8	E OFF FUKUSHIMA PREF	90.43
2011/04/17,14:46	37.1 N	140.8 E	shallow	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	73.98
2011/04/17,12:51	37.1 N	140.7 E	10 km	Mj 4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.32
2011/04/17,08:03	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	89.40
2011/04/17,06:49	35.9 N	140.5 E	40 km	Mj 4.7	SOUTHERN IBARAKI PREF	89.94
2011/04/17,05:38	37.0 N	140.7 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.88
2011/04/17,04:39	35.9 N	140.6 E	40 km	Mj 4.5	SOUTHERN IBARAKI PREF	88.09
2011/04/17,01:38	38.7 N	142.3 E	40 km	Mj 4.6	E OFF MIYAGI PREF	85.75
2011/04/16,20:21	36.2 N	141.0 E	40 km	Mj 4.8	E OFF IBARAKI PREF	79.14
2011/04/16,20:19	37.1 N	140.9 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	71.96
2011/04/16,19:17	37.0 N	138.7 E	10 km	Mj 3.5	MID NIIGATA PREF	75.37
2011/04/16,15:56	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID NIIGATA PREF	85.74
2011/04/16,13:40	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS	79.47
2011/04/16,04:20	37.6 N	141.6 E	50 km	Mj 4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	69.52

圖 5.22 日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料

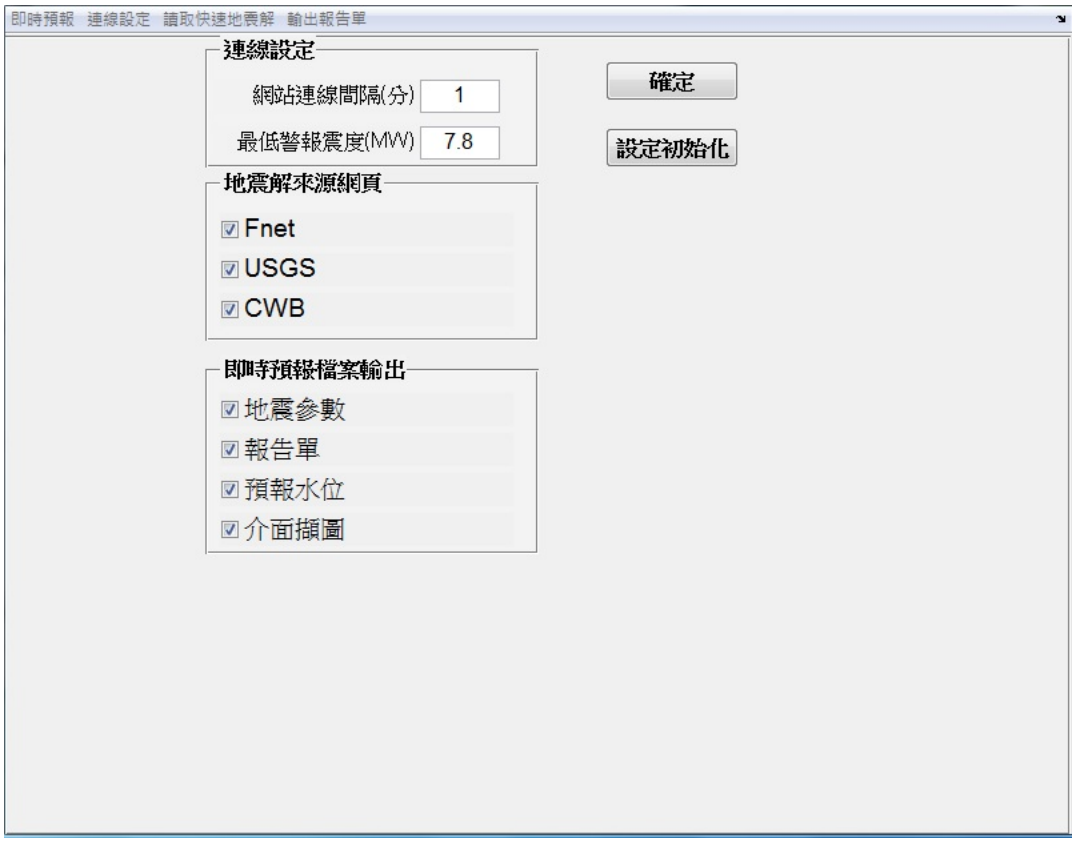


圖 5.23 建構完成之即時地震資料擷取系統

另一方面，由於本研究所發展之海嘯模擬預警系統其基本概念及精神迥異於其他海嘯模式，其操作介面與軟體設置雖適用於個人電腦，但仍需透過教育訓練移轉至使用者使用，故當編寫簡易之使用手冊及教育訓練將技術移轉至台北及基隆港務局。

5.2.5 系統驗證

5.2.5.1 東日本大震災海嘯

台灣時間 2011 年 3 月 11 日下午 1 點 46 分於日本發生芮氏規模 9.0 之大地震，交通部港灣研究中心以本系統提供災防中心海嘯在台灣各大港口的水位變化，得到相當好的結果。本節利用交通部港灣研究中心提供台北港 2011 年日本海嘯之水位變化，與本系統所計算之結果比較驗證。

日本氣象廳針對 311 東日本地震地震波等相關資料進行詳細分析

後，發現這次地震的震央區域長達 500 公里，寬度約有 200 公里，地震斷層的破壞持續 5 分鐘以上。此地震造成數公尺高的巨浪，將沿岸許多房屋、汽車，夾雜大量碎片和土石沖進內陸數公里。至少 20 國政府和許多太平洋島嶼都發布海嘯警報。受海嘯威脅的國家和地區擴及俄羅斯、印尼、中南美洲國家如瓜地馬拉、薩爾瓦多和哥斯大黎加，以及美國領土夏威夷。

驗證之方法利用總體經驗模態分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition，簡稱 EEMD)的方式解析日本地震所引起海嘯傳達至台北港外的水位觀測資料，藉以了解海嘯到達時間以及海嘯高度。同時將美國國家地震資訊中心(U.S. ,National Earthquake Information Center)對日本地震估算的 FMT 解(Fast Moment Tensor solution)代入海嘯預報系統，藉以計算台北港附近海嘯的預報水位。最後比較海嘯預報系統產生的水位與 EEMD 解析出的海嘯水位兩者的差異。

5.2.5.2 總體經驗模態分解法(EEMD)

傳統之經驗模態分解法會產生混模(mode mixing)問題，即在同一個 IMF 裡會有不同尺度的訊號混雜，或者是同一尺度的訊號出現在不同的 IMF。產生混模的主要原因是部分訊號在整段時序資料中呈現斷斷續續的分布，而非連續性分布；加以海面水位變化的資訊常是非線性(nonlinear)與非穩態(nonstationary)，所以不適合傅立葉系列的分析方法，故本研究利用 Wu and Huang(2008) 之 EEMD 分析法。此方法能將原始訊號分解成多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function，簡稱 IMF)。EEMD 的基本作法就是把一組白噪序列(white noise series)加入目標訊號分解後可得到一組 IMF 分量，再將多組不同白噪序列分別加入目標訊號分解出各自的 IMF 分量組，分別將每個 IMF 分量組其相對應的 IMF 分量加總平均後求得一組 IMF 分量，此 IMF 組即為最終的結果。

5.2.5.3 海嘯模擬預警系統

本文使用的海嘯模擬預警系統(圖 5.24)基本運作分為地震引起初始波源生成與互逆格林函數計算預報水位兩部分。前者利用美國國家

地震資訊中心(USGS)的 FMT 解代入 Mansinha and Smylie(1971)提出的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，此斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量，藉以獲得地震引發的海嘯初始水位。

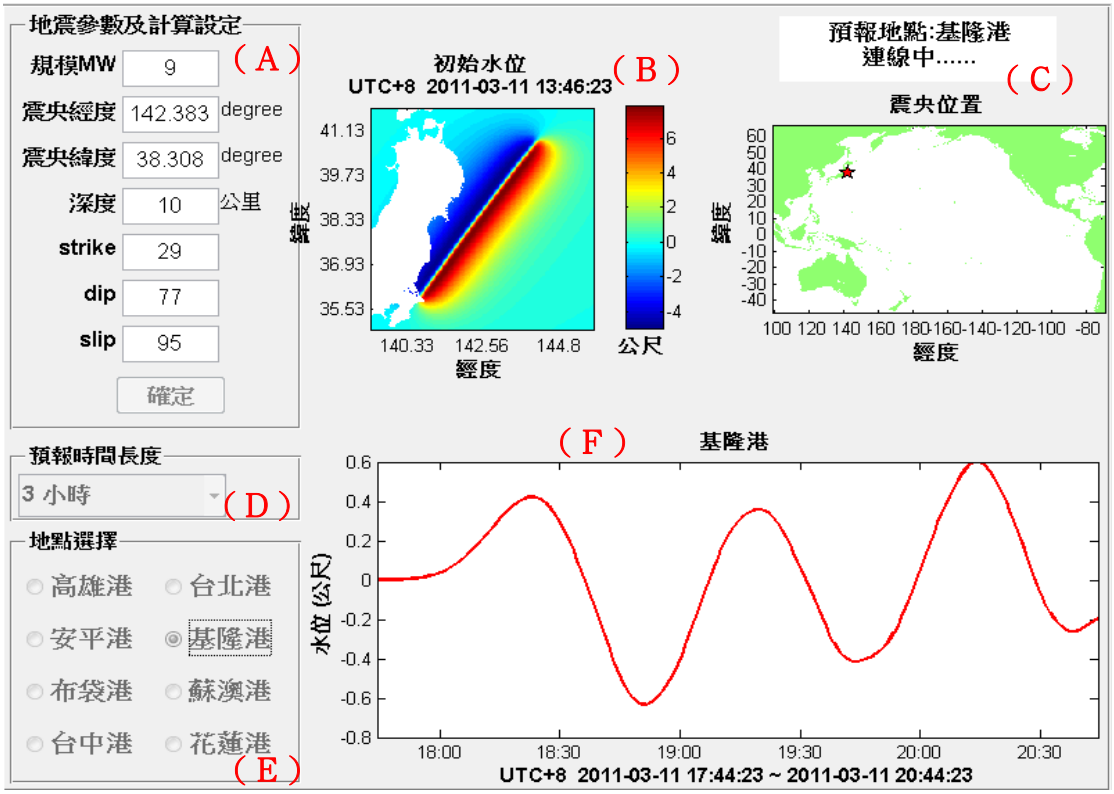


圖 5.24 海嘯預警系統

系統程序：

(A)輸入地震解。

(B)由經驗公式計算斷層長、寬及位移後，再代入斷層模式產生地震造成的初始水位。

(C)同時標示震央位置。

(D)選擇預報時間長度。

(E)選擇模擬地點。

(F)模擬海嘯抵達的水位結果。

5.2.5.4 系統驗證

使用 USGS 最新地震解（圖 5.25）帶入海嘯模擬預報系統中得到台北港水位變化結果，與使用 EEMD 法濾潮後台北港觀測水位資料比較，如圖 5.26。

```
Epicenter:  38.308  142.383
MW 9.0

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
11/03/11 05:47:47.20
Centroid:  38.486  142.597
Depth  10          No. of sta: 151
Moment Tensor;   Scale 10**22 Nm
  Mrr= 2.03        Mtt=-0.16
  Mpp=-1.87        Mrt= 2.06
  Mrp= 3.49        Mtp=-0.60
 Principal axes:
  T  Val=  4.57  Plg=58  Azm=306
  N       -0.05       5      208
  P       -4.52      32      115

Best Double Couple:Mo=4.5*10**22
 NP1:Strike= 29 Dip=77 Slip=  95
 NP2:       187     14        68
```

圖 5.25 USGS 日本 311 宮城海嘯參數

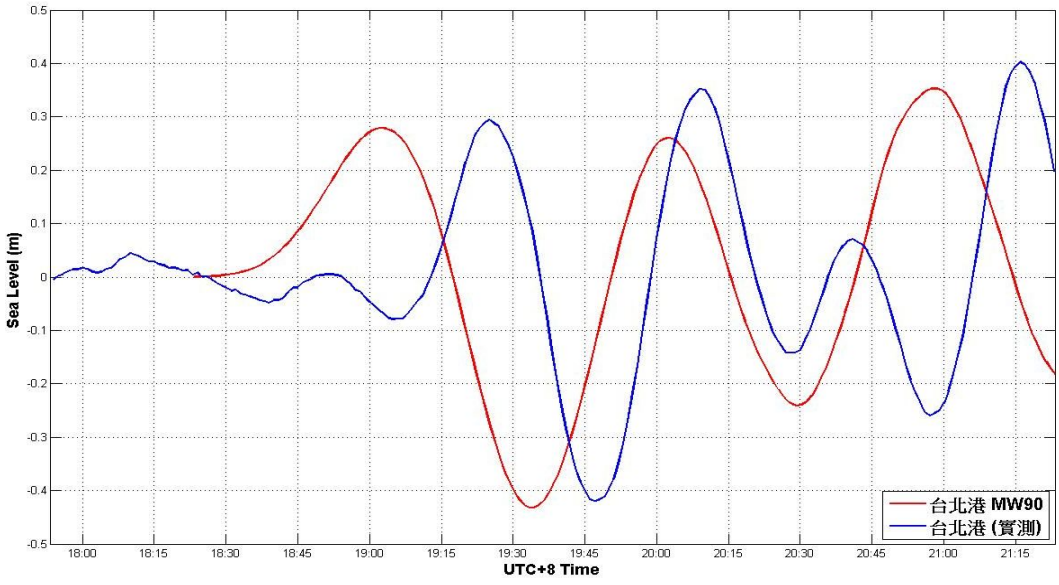


圖 5.26　台北港系統模擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較

此系統計算水位時間約數秒鐘到數分鐘，模擬結果台北港部分波高大約一致，到達時間約提前十幾分鐘。系統為求快速預報，計算格

林函數使用線性淺水方程，地形使用 2 分解析度的數值地形，及簡單的初始水位產生方式，都是產生誤差的可能原因，但其結果在運算速度與預報功能上應符合實際需求。

5.2.5.5 海嘯事件檢討

此次東日本大震災地震引發海嘯襲擊日本東北地區南部(宮城、仙台、千葉、福島一帶)；地震發生後一小時，美國地質調查所(USGS)公佈相關地震參數後，台灣國際商港海嘯速算系統(以下簡稱速算系統)計算出海嘯波到達台灣各國際商港之抵達時間與水位變化，如圖 5.27 所示即為蘇澳港之抵達時間與水位變化。

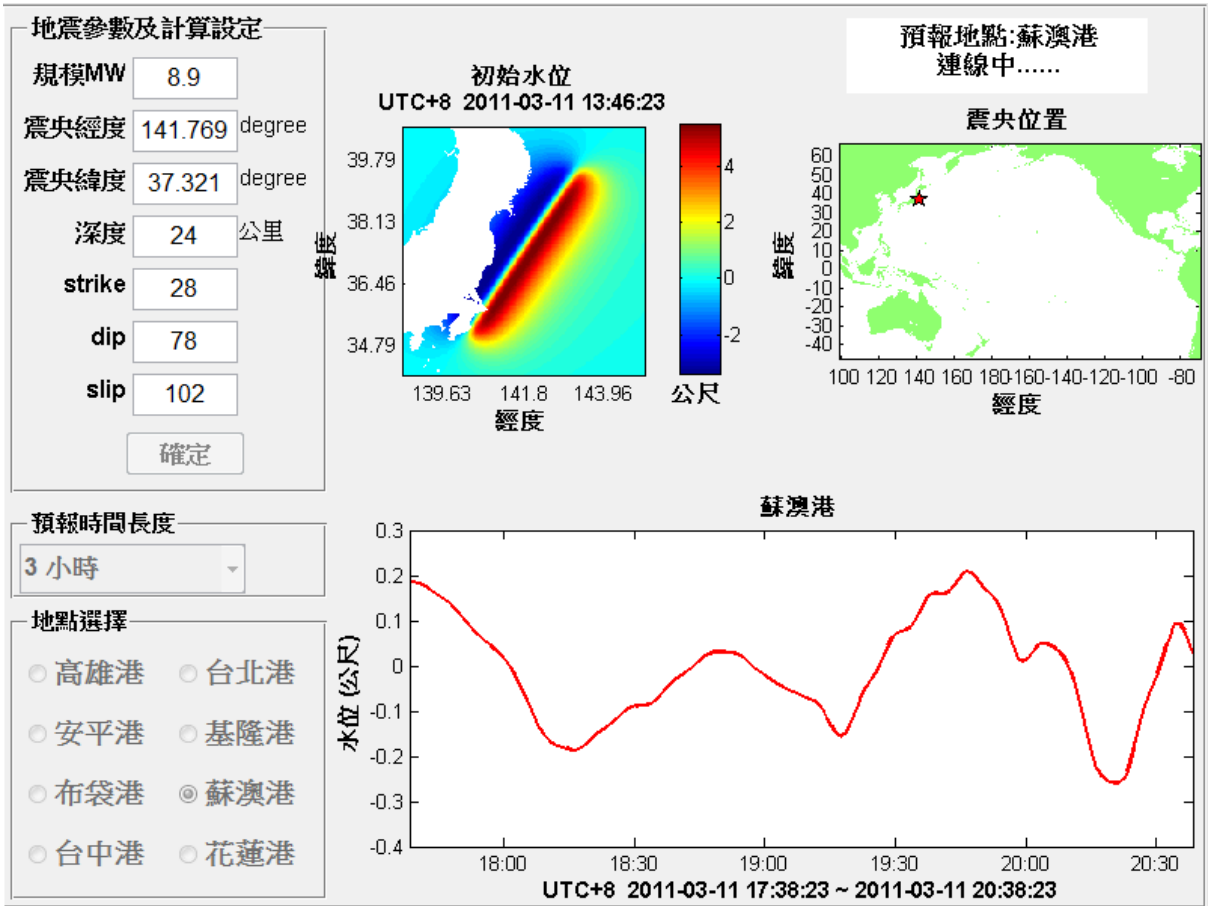
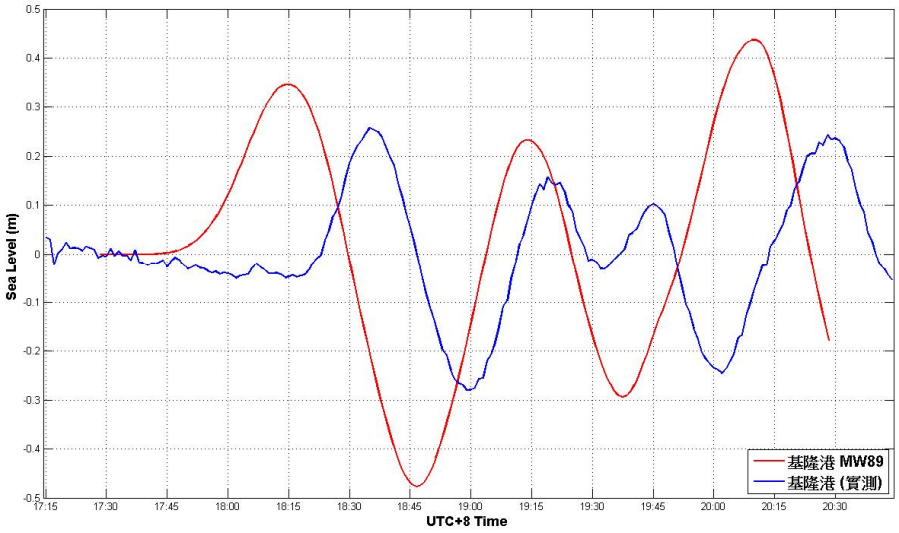


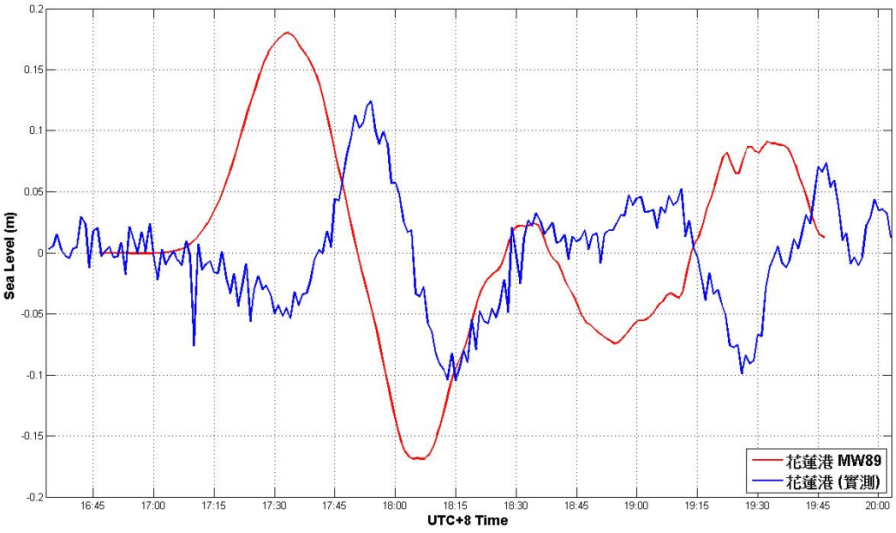
圖 5.27 以速算系統及新公佈之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈

速算系統計算出之水位變化與運研所港研中心現場觀測結果之比較則如圖 5.28；其中速算系統計算出之抵達時間大致正確，基隆、花

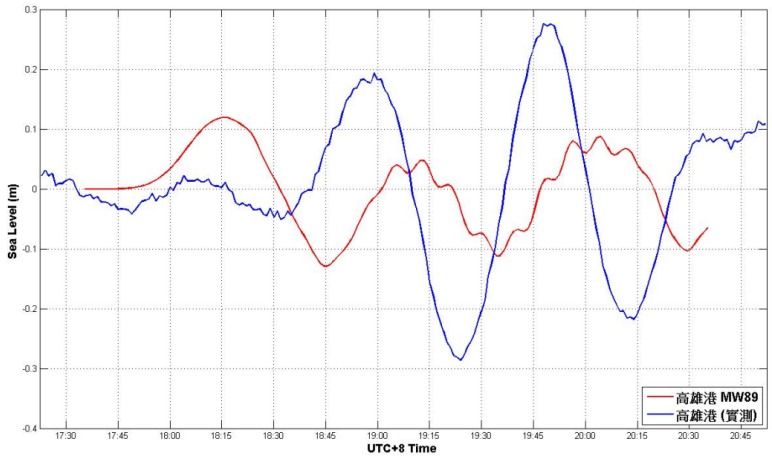
蓮、高雄、安平以及圖 5.29 所示蘇澳港之海嘯波形與現場觀測之波形相似，但有 15-20 分鐘的時間差。布袋港、台中港及台北港水位變化與現場觀測之波形相似度較差；由於三港皆位於台灣海峽中間，此現象顯示台灣海峽較淺的水深造成海嘯波變短，因此需要更準確的海底地形才能準確模擬。在海嘯高度的比較上，除台灣海峽中間三港之波形相似度較差不予討論外，速算系統計算出之基隆港、花蓮港以及安平港水位變化較現場之海嘯高度大。反之，高雄港波高較現場觀測之波高小；圖 5.29 所示蘇澳港之海嘯波高則與現場觀測之波高相當。



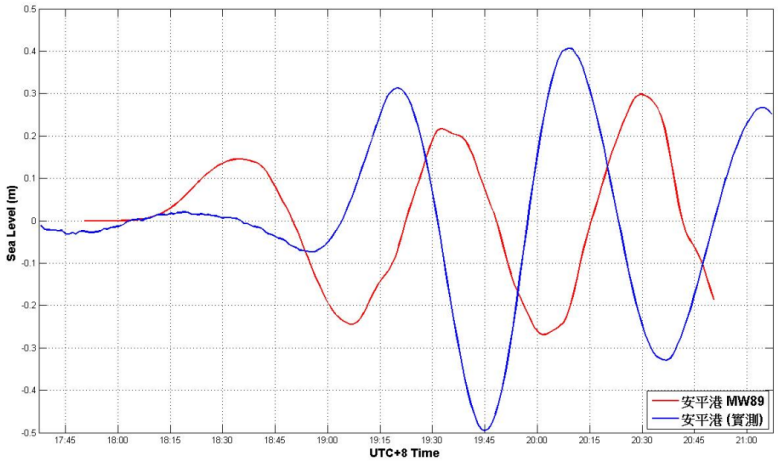
(a)



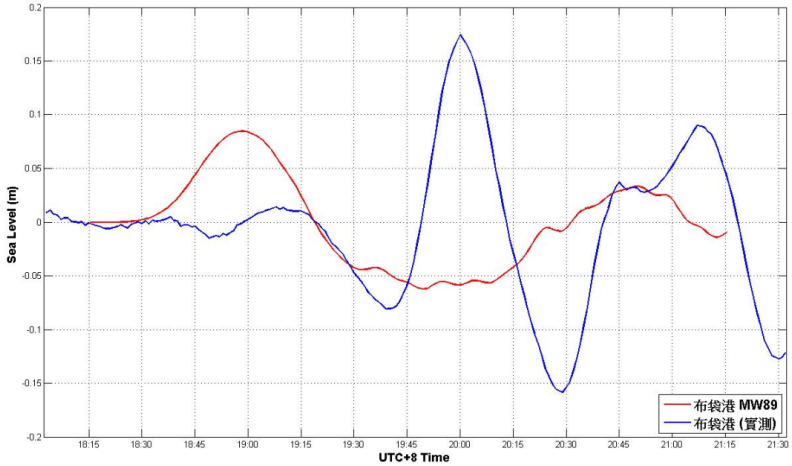
(b)


Sea Level (m)
UTC+8 Time
高雄港 MW89
高雄港 (實測)

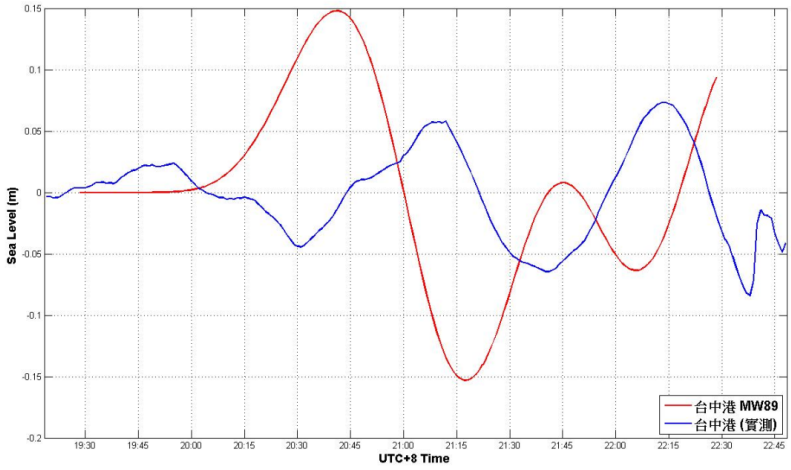
(c)


Sea Level (m)
UTC+8 Time
安平港 MW89
安平港 (實測)

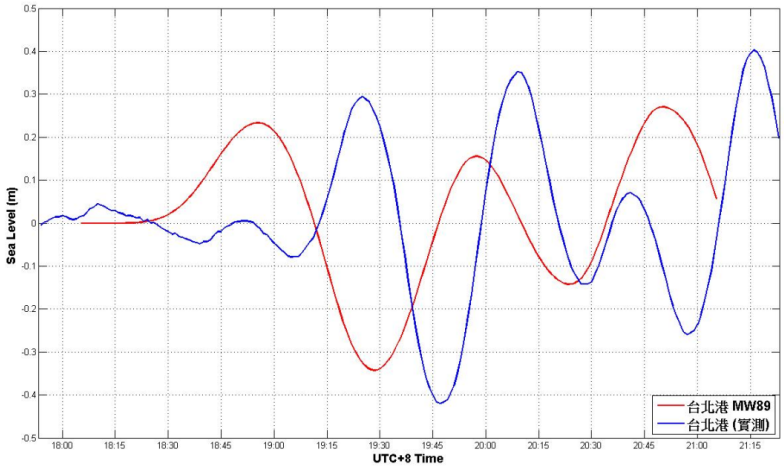
(d)


Sea Level (m)
UTC+8 Time
布袋港 MW89
布袋港 (實測)

(e)



(f)



(g)

圖 5.28 以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數計算(a)基隆港、(b)花蓮港、(c)高雄港、(d)安平港、(e)布袋港、(f)台中港及(g)台北港水位時序分佈與實測資料比較

之後，美國地質調查所上修地震矩規模至 9.0 並及修正地震參數，速算系統計算所得之海嘯高度差異不大，波形也大同小異，如圖 5.29 所示蘇澳港之例子：

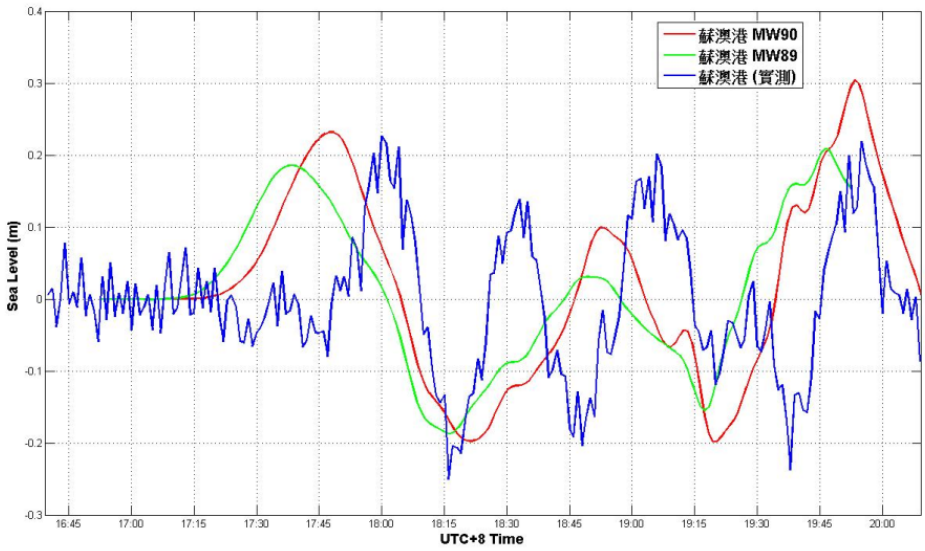


圖 5.29 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模 Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模 Mw9.0)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較

美國地質調查所在地震發生後一小時才公佈相關地震參數，之後又陸續修正，如上修地震矩規模至 9.0，震源深度也由 24 公里修正為 20 公里，再修正為 10 公里。這些困難顯示地震參數並不易確定，而正確的海嘯水位變化必須依靠正確的地震參數；氣象局能提供近域地震的參數，惟其正確性與對時效之掌握都必須十分可靠。而目前除了美國地質調查所外，並無遠域地震參數之可靠來源。不過，站在「料敵從寬」的立場，速算系統計算出之水位變化與現場之海嘯高度有差異並不是太嚴重的缺失；缺乏即時的地震參數也可以使用近似值，取其結果較嚴重者即可。

此次日本海嘯事件，太平洋海嘯預警中心發佈海嘯警報範圍包括台灣；因此政府亦發佈海嘯警報。但是在實務上國外發佈海嘯警報常採用分級制度，將海嘯警報分為 1.馬上避難的海嘯警報（warning）、2.僅淨空沙灘與海岸地區的警戒勸阻（advisory）、以及 3.觀察中(watching)等三級。此次海嘯事件，根據速算系統計算出之水位變化，

屬於警戒勸阻的範疇(波高 0.3m-1m)，應該淨空沙灘與海岸地區並加強警戒勸阻即可。

海嘯波高的預測常有誤差。有的強震造成了海嘯，但波高卻又甚小，使原先發佈的警報成了假警報(false alarm)。例如 2010 年智利 8.8 強震後，太平洋沿岸國家，從夏威夷到紐西蘭、日本，接連發佈海嘯警報，各國忙著疏散民眾，沒想到成了假警報。久而久之，民眾戒心降低，因為以前的經驗，反而認為是假警報，或是認定自己居住的縣市不會有海嘯；倘若真有大海嘯來襲，生命損失更大。所以政府提供的資料越詳細，越能減少假警報的發生。如果大大小小的海嘯都一視同仁，民眾無法判斷，反而把所有警報都當作是假警報。

本次海嘯事件，氣象局只發佈海嘯抵達時間，但是實際上如圖 5.29 所示，海嘯並非只有一個波，最大波可能在第一個波過後一段時間才到來。氣象局可能尚未建立海嘯預報系統，故未能提供第一個波過後之水位變化，提供的資料不夠詳細。此外，台灣各地海岸特性不同，對海嘯的地形放大效應也不同；海嘯預報系統應該分區發佈才合理。

5.3 海嘯災害風險評估

5.3.1 機率式海嘯風險評估

海嘯發生的主要原因為海底地震，雖然目前為止地震無法準確預測，地震發生後可能造成的災害評估技術也趨於成熟，在地震引發海嘯方面可包括(一)可能發生災害的地區(二)破壞發生的機率(三)破壞的程度等，對於提升救災效率、降低生命財產損失，有明顯的幫助，也是在目前最可預期的成效。

本研究提出一種評估方法：「引發海嘯之地震期望數 Tsunamigenic Earthquake expectation Number (TEN) 」，其方法由歷史地震紀錄推算未來可能發生的地震次數，配合海嘯的發生條件：海源(震央位置位於海洋)，且震源深度小於 30 公里之條件；以此條件推算未來可能發生海嘯的次數期望值。接著提出「海嘯溢淹機率 Tsunami Inundation Probability (TIP)」，其方法使用二維海嘯模式計算若發生不同規模海嘯地震時，對於台灣東南沿岸各鄉鎮所產生的最大波高，以及此波高以模式模擬對於陸地所產生的溢淹狀況，取溢淹高度 50 公分且離岸 50 公尺為溢淹點，再與模式模擬數值地形岸線點位長度作比值，定義為溢淹機率。綜合海嘯發生次數期望值，與發生海嘯地震所產生的溢淹機率，可得到研究區域發生不同規模海嘯地震且溢淹的機率，將不同區域、不同規模得到的機率加總，則可得到台灣東南沿海鄉鎮評估區域的發生海嘯且溢淹的機率值。以作為發生海嘯地震且溢淹的災害評估。整體之機率評估方式可寫為如(5.17)~(5.18)式所示：

$$\sum_i \sum_j TEN_j^i \, TIP_j^i = \sum_i \sum_j EN_j^i \, P_{ocsh}^i \, TIP_j^i \quad \text{.....(5.17)}$$

$$TEN_j^i = EN_j^i P_{ocsh}^i \quad \text{.....(5.18)}$$

式中，EN^i_j 代表子震源區 i 發生 j 地震級距主要地震次數的期望值，P^i_{ocsh} 則是指 EN^i_j 中發生震源深度小於 30 公里海底地震的機率。上標 i 代表子震源區之數目；下標 j 代表地震級距。圖 5.30 為此一概念之計算流程圖。

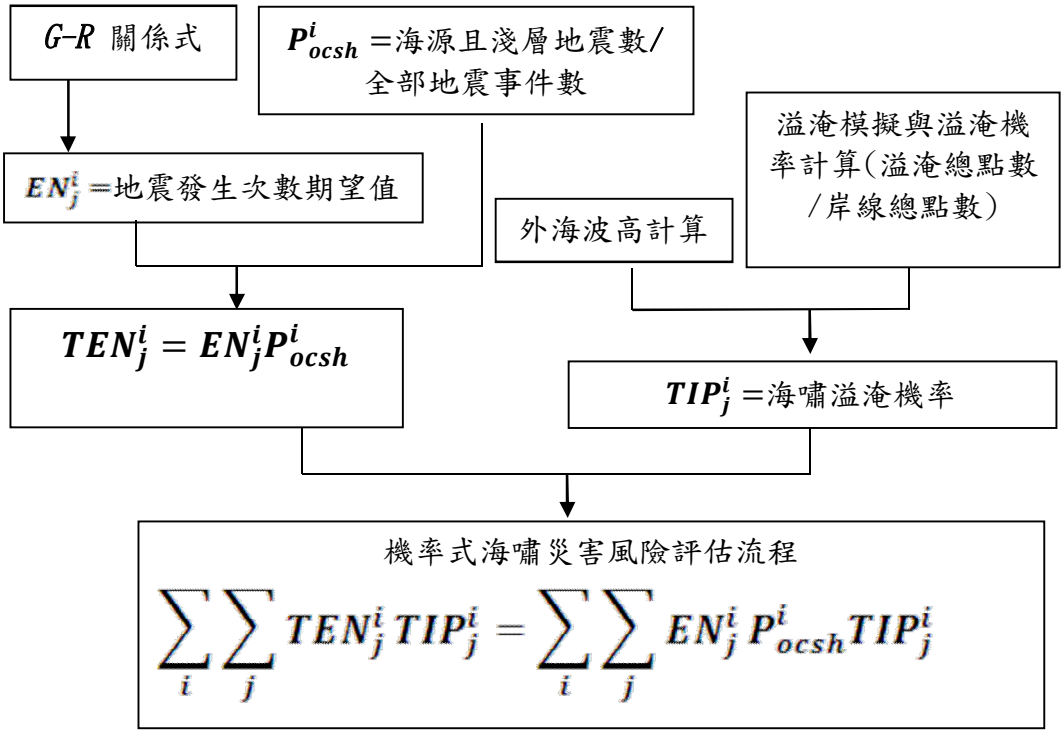


圖 5.30 規劃流程圖

5.3.2 海嘯地震發生次數期望值

5.3.2.1 研究區域

研究區域主要為環太平洋地震帶，全球有 80%的地震發生在此，而歷史海嘯記錄則有 85%發生在環太平洋地震帶的島弧-海溝地帶。環太平洋地震帶幅員廣闊，主要地震發生地大抵分為中央地區之南北太平洋及各版塊之海溝、島弧；自 USGS-NEIC 資料庫中所擷取之地震資料(含陸源及海源地震)總數約為十餘萬筆，其數量主要分佈概況如圖所示，可以發現位於太平洋中央海底盆地之數量較少；東西兩岸之海溝還是主要地震發生地。其次，由於各版塊及海溝地質條件各異，為便利後續海嘯模擬及溢淹機率計算，需將各海溝做適當之分塊，Gusiakov(2005)建議以各主要海溝做為分類之依據，如圖所示。本研究之分類則如圖 5.31 所示。

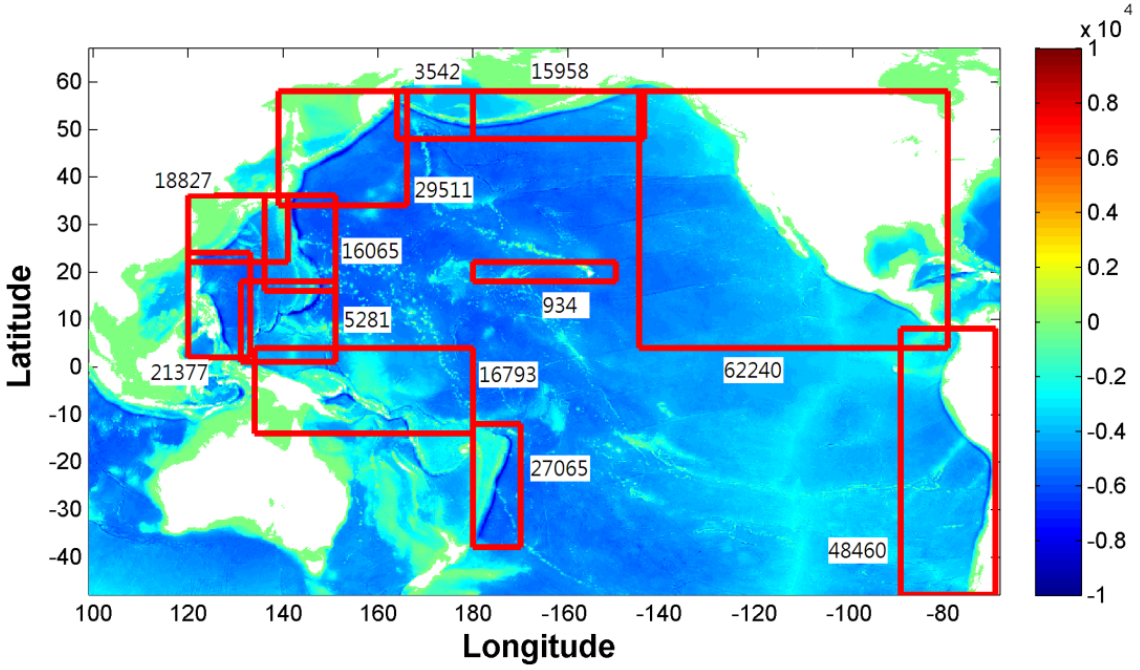


圖 5.31 環太平洋地震數量分佈圖

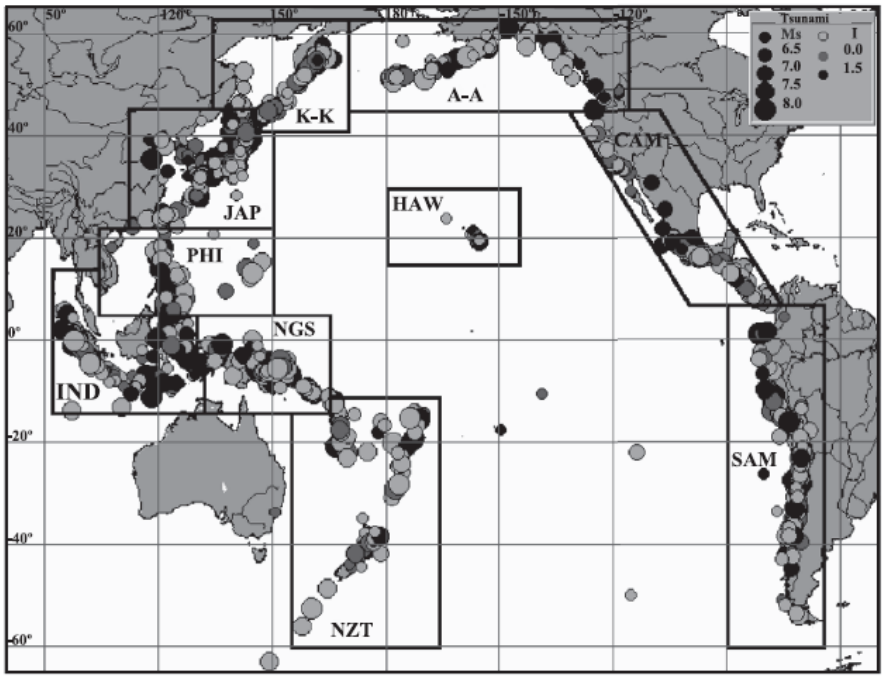


圖 5.32 太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議(Gusiakov, 2005)

根據上述之建議，本研究進一步以緯度 2 度為一單位，將各主要海溝做細部分區；主要目的為由於海溝一般甚長(例如馬尼拉海溝)，在選取可能震源及計算機率時，若將一海溝視為一整體，會減少可能之

震源數。表 5-3 為本研究主要海溝之基本資料及各所屬之子區塊數量。

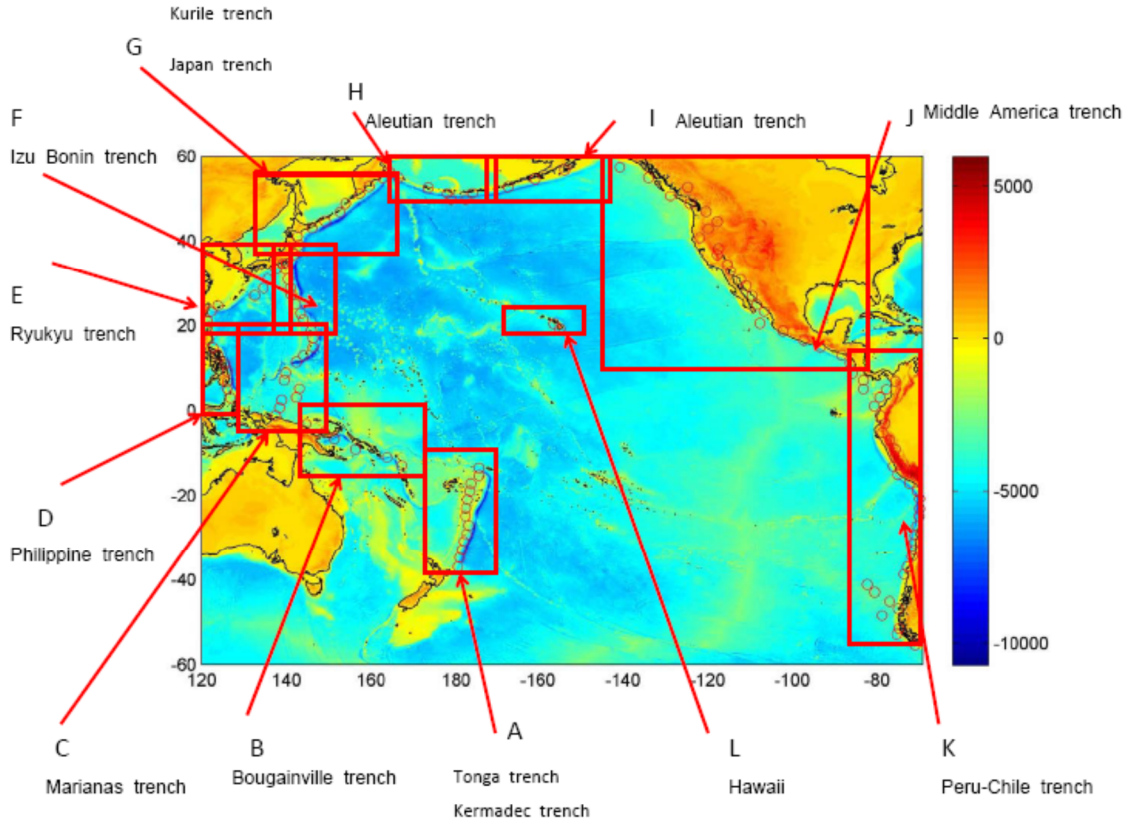


圖 5.33 本研究主要海溝分佈圖及名稱

表 5-3 各畫分區塊及資訊

區塊	名稱		大約經緯度	NEIC 地震筆數	計算挑選筆數
A	Tonga trench and Kermadec trench	東加海溝與克馬迪克海溝	(-180~-170,-38~-12)	27065	23816
B	Bougainville trench	布干維爾海溝	(134~180,-14~4)	16793	14039
C	Marianas trench	馬里亞納海溝	(131~151,1~18)	5281	4463
D	Philippine trench	菲律賓海溝	(120~133,2~24)	21377	17333
E	Ryukyu trench	琉球海溝	(120~141,22~36)	18827	12520
F	Izu Bonin trench	伊豆小笠原海溝	(136~151,16~36)	16065	12122
G	Kurile trench and Japan trench	千島海溝與日本海溝	(139~166,34~58)	29511	23417

區塊	名稱		大約經緯度	NEIC 地震筆數	計算挑選筆數
H	Aleutian trench	阿留申海溝	(164~180,48~58)	3542	2208
I	Aleutian trench	阿留申海溝	(-180~-144,48~58)	15958	5332
J	Middle America trench	中美海溝	(-145~-80,4~58)	62240	12678
K	Peru-chile trench	智利海溝	(-90~-70,-56~8)	48460	15704
L	Hawaii	夏威夷	(-180~-150,20-22)	934	215
M	Manila	馬尼拉	(118~123,12~23)	3856	3238

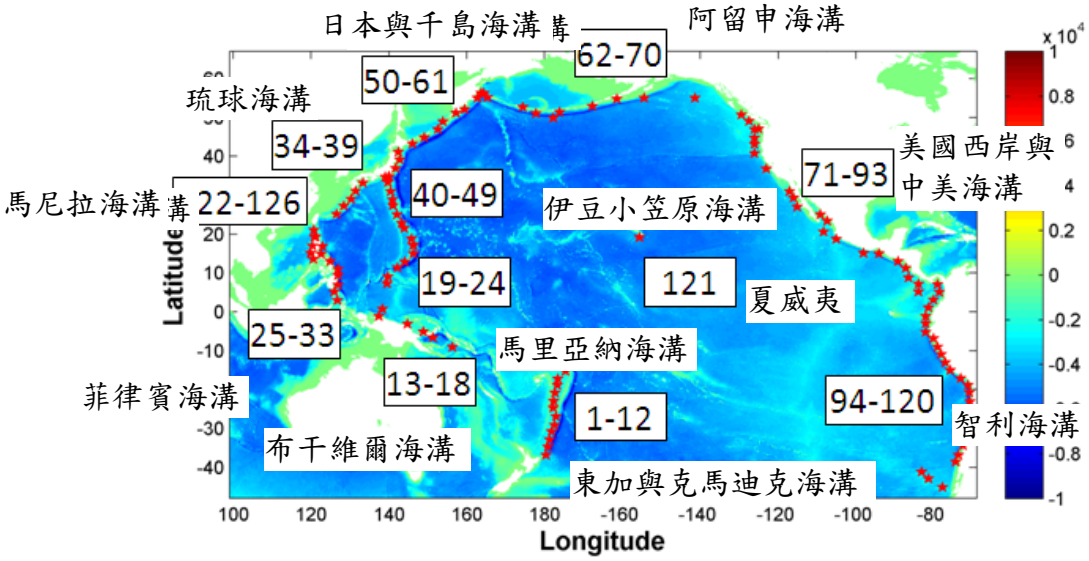


圖 5.34 研究區域與點位劃分

本研究依主要海溝分為數個大區域總共 126 個區域點位，由美國地質調查所(U.S. Geological Survey,USGS)NEIC 資料庫，取得歷史地震資料，並依區域範圍與歷史年份等條件挑選地震資料(例如 E120-123 ,N12-22 ,1976 ~ 2011)。美國地質調查所 USGS 監測全球地震活動並發布地震消息，對於規模大於 3.5 的地震幾乎都已經使用地震矩規模來描述地震大小。因此在本研究主要以地震矩規模為挑選條件，若有其他地震規模則由先前章節介紹地震規模轉換經驗公式適當換算地震矩規模，以此條件取得記錄較完整之歷史地震資料(地震矩規

模(M_w)記錄、震源深度記錄、震央位置記錄等)。



NEIC: Earthquake Search Results

U. S. GEOLOGICAL SURVEY

EARTHQUAKE DATA BASE

FILE CREATED: Mon Sep 5 01:33:27 2011
Geographic Grid Search Earthquakes= 19437
Latitude: 36.000N - 22.000N
Longitude: 141.000E - 120.000E
Catalog Used: PDE
Data Selection: Historical & Preliminary Data

CAT	YEAR	MO	DA	ORIG TIME	LAT	LONG	DEP	MAGNITUDE	IEM NFO TF	DTSVNWG	DIST km
PDE	1973	01	05	053105.80	33.47	140.87	56	4.5 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	05	114837.50	33.16	140.91	33	3.9 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	06	102116.30	33.49	140.85	33	4.2 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	06	112154.70	33.27	140.93	46	4.5 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	06	145552.80	33.15	140.71	61	4.7 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	10	075113.60	33.62	140.51	103	4.1 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	12	074443.90	33.11	140.98	20	3.9 mbGS	...	.....	
PDE	1973	01	15	090258.30	27.08	140.10	477	6.0 UKBRK	1F.	.....	
PDE	1973	01	15	091410.70	27.09	140.03	478	5.1 mbGS	...	.....	

圖 5.35 USGS-NEIC 地震資料庫

5.3.2.2 地震發生次數期望值

一般區域震源可用指數規模分佈模式來表示，而此模式中之地震規模與再現頻率關係式 (Gutenberg and Richter, 1944)，稱為 G-R 關係式，其形式為：

$$\log(N) = a - bM \quad \text{.....(5.19)}$$

G-R 關係式中，b 值是地震危害分析中一個極為重要的參數，其表示地震在某一地震規模內的大地震與小地震間的比例關係。b 值隨著研究區域內的地質分佈、構造、地溫與應力…等條件的不同而有所變化。此一回歸分析法，即是在一區域內對於地震規模$\geq M_b$(設定之地震下限)

而言的，式中 M 代表地震矩規模，並依小而大之順序排列，式中之 N 表示規模大於或是等於 M 之次數，在本研究中地震矩規模 M 的區間為 4.25、4.75、5.25、5.75、6.25、6.75、7.25、7.75、8.25、8.75、9.25 取各區間內累計數即為 N，而 a、b 則為線性迴歸係數。以日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36 為例，圖 5.36 藍點為各地震矩累計次數，35 年為過去地震次數記錄的時間長度，將此回歸線上各點除以統計年時間長度 35 乘上評估年時間長度 50、100 再轉換回 G-R 關係式，則可得到圖 5.36 上未來 50 年及未來 100 年的回歸係數與回歸線，紅點線(50 年)及綠點線(100 年)，此回歸線為評估未來 50 年及未來 100 年，可能發生之累計次數，進而可得到各地震矩規模區間的可能發生次數，將此發生次數乘上此區域發生海源且震源深度小於 30 公里之條件機率 P^{i}_{ocsh} 則可得到此區域各地震矩規模區間發生引發海嘯的地震在未來 50 年及 100 年的可能發生次數。

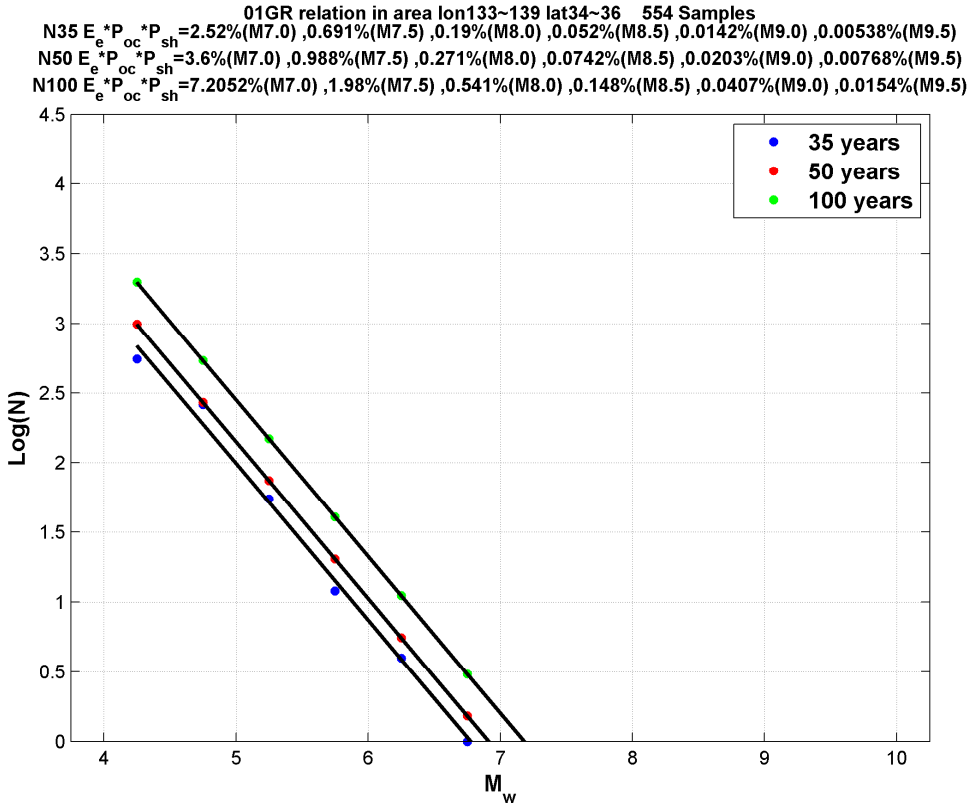


圖 5.36 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，G-R 關係式

表 5-4 圖上藍點及其回歸線

規模	4.25~4.75	4.75~5.25	5.25~5.75	5.75~6.25	6.25~6.75	6.75~7.25	7.25~7.75	7.75~8.25	8.25~8.75	8.75~9.25
35年累計次數	554	261	55	12	4	1	0	0	0	0
取 log	2.7435	2.4166	1.7403	1.0791	0.6020	0				

表 5-5 取各線上地震規模區間累計值

規模	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	989.2919	271.1991	74.3449	20.3804	5.5868	1.5314	0.4196	0.1149	0.0313	0.0084
100 年	1978.5834	542.3979	148.6895	40.7603	11.1732	3.0623	0.8388	0.2293	0.0622	0.0164

表 5-6 相減為各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值

規模	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	718.1157	196.8563	53.9640	14.7930	4.0552	1.1116	0.3047	0.0835	0.0228	0.0062
100 年	1436.2852	393.7175	107.9266	29.5850	8.1099	2.2231	0.6094	0.1670	0.0457	0.0125

5.3.2.3 海嘯發生次數期望值

在討論地震引發海嘯時，一般會引發海嘯的地震震源通常發生在較淺層的海底斷層；G-R 關係式求得地震發生次數期望值，再給與海嘯發生條件。在本研究中定義震央位置屬於海源且震源深度小於 30 公里為海嘯發生條件，此定義方法求得海嘯地震次數期望值。圖 5.37 為挑選海源且震源深度小於 30 公里地震資料，海源地震的定義為震央位置記錄在非陸地，圖中藍色方框點位置。接著在海源地震中挑選震源深度小於 30 公里條件下地震，圖中紅色圈圈點位置。海源且震源深度小於 30 公里地震數目除上統計總數，即可得海源且震源深度小於 30 公里比值。

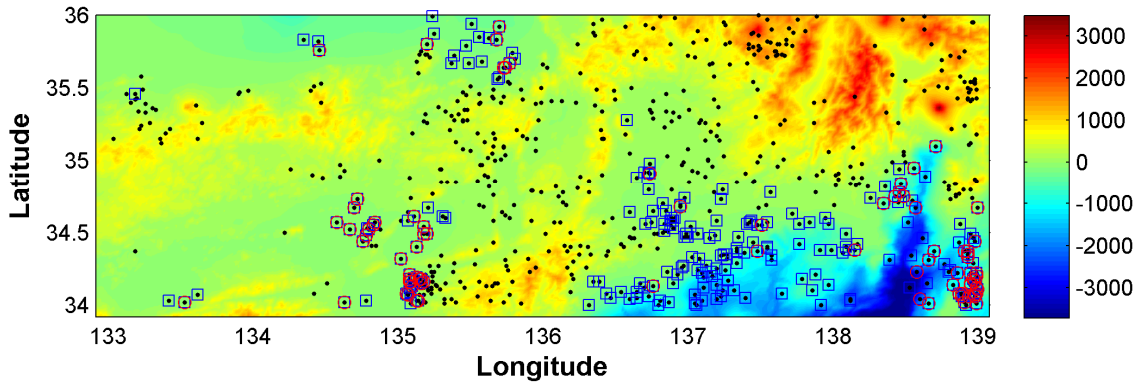


圖 5.37 挑選海源且震源深度小於 30 公里地震資料

此區域地震資料總數為 702 筆，海源且震源深度在 30 公里以內數為 83 筆，因此比值為 83/702=0.1182。與各地震規模區間發生次數期望值相乘，為海嘯地震發生次數期望值，下表 5-7。

表 5-7 海嘯地震發生次數期望值

規模	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	0.131434	0.03603	0.009876	0.002707	0.000742	0.000203
100 年	0.262846	0.072052	0.019751	0.005414	0.001484	0.000406

由以上方法計算所有區域，126 個點位 5 個地震矩規模 50 年與 100 年海嘯地震發生次數期望值。

5.3.3 波高計算

計算完各區域海嘯地震發生數期望值，針對各區域計算發生不同震度地震引發海嘯對台灣東南部海岸各鄉鎮所造成的水位變化。本研究使用二維海嘯模式 COMCOT，使用斷層參數以彈性半空間錯移模型理論計算初始水位，再以線性淺水方程式計算波在大洋傳遞的情形；但一般記算方式所耗時間因震央距離、網格解析度以及電腦硬體需求等因素需耗費相當多的時間(1 小時到 72 小時不等)，因此本研究應用格林函數的可逆性值(loomis)，建立波在大洋傳遞的格林函數數值資料庫，並利用與初始水位簡單的加總，即可快速記算台灣東南各鄉鎮資料庫點位受不同地震所產生之初始水位影響的水位時序變化。

5.3.3.1 初始水位計算

海嘯模式通常利用淺水方程式或是布斯尼斯克方程式結合海底斷層模式進行海嘯模擬。由於大多數的海嘯成因起源於海底地震，所以大部分之海嘯數值模式(例如前述之 COMCOT)之海嘯初始水位藉由 Mansinha and Smylie(1971)的彈性半空間錯移模型(elastichalf-space dislocation model)海底斷層模式來驅動，主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。此一模型即是假設起始海水面的變動是利用海床位移量的計算來產生水位，假設海水為不可壓縮；當海床產生錯動，則垂直方向上的海水面也會產生瞬間的變動，亦即地震與海水面變動的發生視為同一時間。海床位移量是由走向滑距(strike-slip displacement)及傾向滑距(dip-slip displacement)所構成。

本研究所使用的斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。彈性錯移理論(elastic dislocation theory)，即斷層在 j 方向的錯動造成均質均向的彈性半空間所產生 i 方向的位移場 Δu_i，並對整個矩形斷層錯動範圍積分；其關係式為：

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^l}{\partial \xi_l} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k dS \quad \text{..... (5.20)}$$

其中 v_k 為 Σ 向外的垂直向量、λ 與 μ 為拉梅常數(Lamé constants)、u^j_i 為受到破裂面(ξ_1, ξ_2, ξ_3)上 j 方向單位應力作用而在地表(x_1, x_2, x_3)於 i 方向上的位移。

假設一矩形斷層座標系統如圖 5.38 所示，其中 ξ 方向代表斷層傾角的正下方，而走向滑距(strike-slip displacement)和傾向滑距(dip-slip displacement)可分別用(5.21)與(5.22)式表示，其涵蓋範圍為$-L \leqq \xi_1 \leqq L$，以 $d \leqq \xi \leqq D$ ：有

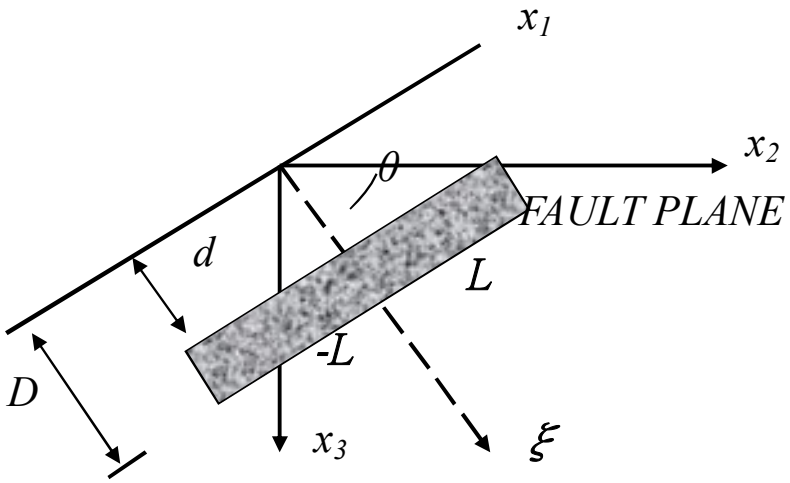


圖 5.38　斷層幾何形狀及座標系統

$$u_{is} = \mu \mathrm{U_l} \int_d^D \int_{-\mathrm{L}}^{\mathrm{L}} \left[\left(\frac{\partial u_i^l}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_l} \right) sin\theta + \left(\frac{\partial u_i^l}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_l} \right) cos\theta \right] d\xi_1 d\xi \quad (5.21)$$

$$u_{id} = \mu \mathrm{U} \int_d^D \int_{-\mathrm{L}}^{\mathrm{L}} \left[2 \left(sin\theta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} - cos\theta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi \quad (5.22)$$

由於斷層面是位於地底下，為了計算地下錯動對地面上位移的關係，則須將斷層面作座標轉換，如下圖 5.39 所示，並有

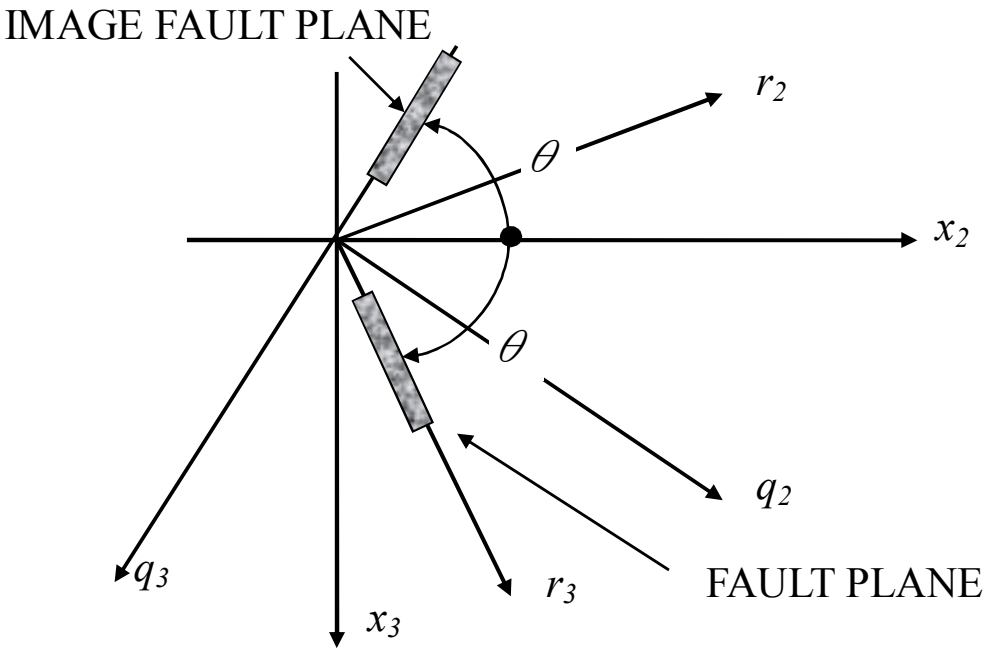


圖 5.39 斷層及映像斷層座標系統

$$S = \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + \left(x_3 - \xi_3{}^2\right)\right]^{1/2}$$

$$\mathrm{R} = \left[(\mathrm{x}_1 - \xi_1)^2 + (\mathrm{x}_2 - \xi_2)^2 + \left(\mathrm{x}_3 - \xi_3{}^2\right)\right]^{1/2}$$

$$\mathrm{r}_2 = \mathrm{x}_2 \sin\theta - \mathrm{x}_3 \cos\theta, \quad \mathrm{r}_3 = \mathrm{x}_2 \cos\theta + \mathrm{x}_3 \sin\theta$$

$$\mathrm{q}_2 = \mathrm{x}_2 \sin\theta + \mathrm{x}_3 \cos\theta, \quad \mathrm{q}_3 = -\mathrm{x}_2 \cos\theta + \mathrm{x}_3 \sin\theta \quad \text{..... (5.23)}$$

其中，R 和 S 分別代表斷層面上的震源點(ξ_1, ξ_2, ξ_3)至地表(x_1, x_2, x_3)的距離，以及對映像斷層面上的震源點(ξ_1, ξ_2, ξ_3)至地表(x_1, x_2, x_3)的距離。r_2、r_3 及 q_2、q_3 分別代表斷層面及映像面的垂直及向下傾斜之座標，由此可將 R 和 S 以新座標表示為：

$$S = [(x_1 - \xi_1)^2 + h^2]^{1/2} = [k^2 + (q_3 - \xi)^2]^{1/2}$$

$$\mathrm{R} = [(\mathrm{x}_1 - \xi_1)^2 + \mathrm{r}_2^2 + (\mathrm{r}_3 - \xi)^2]^{1/2}$$

$$\mathrm{h} = [\mathrm{q}_2^2 + (\mathrm{q}_3 + \xi)^2]^{1/2}$$

$$\mathrm{k} = [(\mathrm{x}_1 - \xi_1)^2 + \mathrm{q}_2^2]^{1/2} \quad \text{..... (5.24)}$$

其中，h 是 S 在 x_1=0 平面即地表切平面上的投影，而 k 是在 q_3=0 平面上的投影。最後經過座標轉換後，計算出斷層傾向滑距及走向滑距在地面上產生的垂直位移分量如下：

走向滑距(strike-slip displacement)在 x_3 方向之位移量為：

$$\frac{12\pi}{U_1} u_3 = cos\delta(a_1 + b_1 a_2 - b_2 a_4) + \frac{b_3}{R} + 2sin\delta \frac{b_4}{S} - \frac{b_5}{Rexp(a_1)} + \frac{b_7 - b_8}{Sexp(a_2)} + \frac{b_{10} b_{11}}{S^3} - \frac{b_{12} b_{13}}{b_{14}} \quad \text{..... (5.25)}$$

傾向滑距(dip-slip displacement)在 x_3 方向之位移量則為：

$$\frac{12\pi}{U}u_3 = sin\delta(x_2-\xi_2)\left[\frac{2(x_3-\xi_3)}{Rexp(a_5)}+\frac{4(x_3-\xi_3)}{Sexp(a_6)}-4\xi_3x_3(x_3-\xi_3)\frac{S+exp(a_6)}{S^3(exp(a_6))^2}\right]-$$
$$3sin\delta\left[2tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(x_2-\xi_2)}{(h+x_3+\xi_3)(S+h)}\right]-tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(r_3-\xi)}{r_2R}\right]\right]-$$
$$6sin\delta tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(q_3+\xi)}{q_2S}\right]+cos\delta\left[a_5-a_6-\frac{2(x_3-\xi_3)^2}{Rexp(a_5)}\right]-$$
$$4cos\delta\left[\frac{x_3^2+x_3\xi_3+\xi_3^2}{Sexp(a_6)}+\xi_3x_3(x_3+\xi_3)^2\frac{S+exp(a_6)}{S^3(exp(a_6))^2}\right]+$$
$$3x_3sin2\delta\left[\frac{2(q_3+\xi)}{Sexp(a_6)}+\frac{(x_1-\xi_1)}{Sexp(a_2)}+\frac{q_2cos2\delta}{Sexp(a_6)}\right] \quad \text{..... (5.26)}$$

5.3.3.2 格林函數應用

一般海嘯模式只需得知或猜測一個地震震源或是海嘯傳遞路徑，就可以模擬該點震源(S)對全計算區域各點(r_i)之可能之水位分佈；其影響即稱為格林函數(Green's Function，GF)，如圖 5.40。

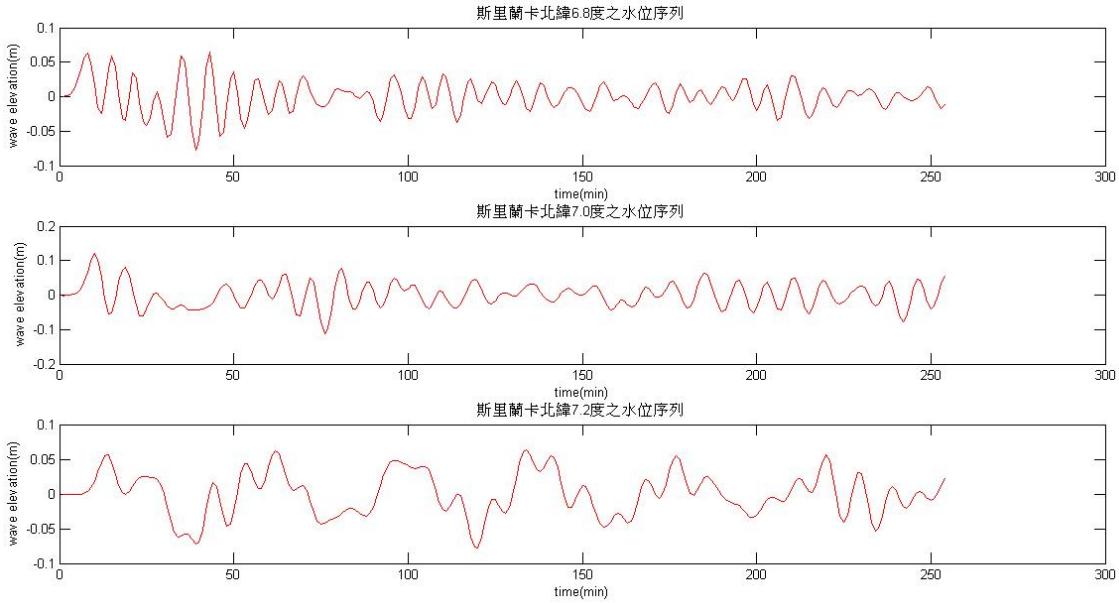


圖 5.40 傳統海嘯模式所計算出之水位時序列資料即為格林函數

傳統海嘯模式之最大缺點，在於必須知道海嘯之震央，藉以模擬海嘯之傳播路徑及受災範圍，依照目前地震測報之研究顯示，雖然有

些方式可以成功預測震央之可能位址，但也僅止於少數中之特例，並不能應用在目前實務上；另一方面，利用已知水位反推初始水位之方式目前仍在持續研究中；總而言之，依照傳統模式運算進行實務海嘯預報作業在效率上顯有不及。對於防災需求而言，人口密集區域才是預報作業之重點所在，故其他區域之計算便顯得可以忽略，以減少計算時間以及電腦儲存容量。

有鑑於此，本研究利用線性格林函數之可逆性(稱為互逆格林函數)為主要理論基礎，發展一簡單之海嘯計算模組，並以視窗化介面呈現。由於格林函數在線性系統裡具有可逆性，且海嘯波在水深 50 公尺以上者可以利用線性淺水方程式描述(Shuto, 1991)，故互逆格林函數可以應用在精進現有海嘯模式中。格林函數亦是線性淺水方程式之解，故此一解之物理結果也包含了海嘯波在深水區域之傳遞行為。互逆格林函數(Loomis, 1979)可以改進此一缺點並提高預報效率，利用線性互逆格林函數之特性可以降低對初始條件(即震央)之依賴性及提高計算效率，劉及陳(2008)即利用此一概念用來快速預估高雄港受海嘯侵襲時之最大高度。Chen et al.(2009)亦利用互逆格林函數來建議海嘯感測器於台灣北海岸之最佳佈放位址。

在互逆格林函數由於是在一個或數個接收點施加一單位振幅後計算其水位變化，並且 $GF_r^s = GF_s^r$ ，故表示互逆格林函數即可在未確定初始水位前針對重要點位先行計算後並以資料庫方式儲存之；當地震發生時，僅需透過資料分享方式獲得地震參數後，利用斷層模式計算可能之初始水位後，兩者相乘之後即可得到與海嘯模式一致之結果。故互逆格林函數可以減少對初始水位之依賴性以及提高測報之效率，並且可以用以建立單位振幅下之海嘯波高資料庫。

簡易之互逆格林函數可寫為

$$\boldsymbol{H_r(t) = \sum_{r=1}^{n} GF_r^s(t) \times H_s} \quad \text{..... (5.27)}$$

其中(5.27)式的 $H_r(t)$ 為各接收點(或是預報點位)r 在時間 t 的水位高度，GF^s_r 為各 r 點在時間 t 的 GF，H_s 各波源點的初始水位高度，N 為

所有 r 點的總數。GF^{s}_{r} 實務上由於傳遞時間及計算點位均為已知，故可以先行計算以資料庫方式儲存；(5.27)式唯一的未知是初始水位 H_r，該值只要在地震發生初期擷取地震參數後即可馬上得知，故互逆格林函數可以在海嘯發生初期時即可獲得該點之時序列資料，可以得知最大波及到達時間；同時(5.27)式經與海嘯模式相互驗證下，可發現兩者甚為符合，如圖 5.41 所示。

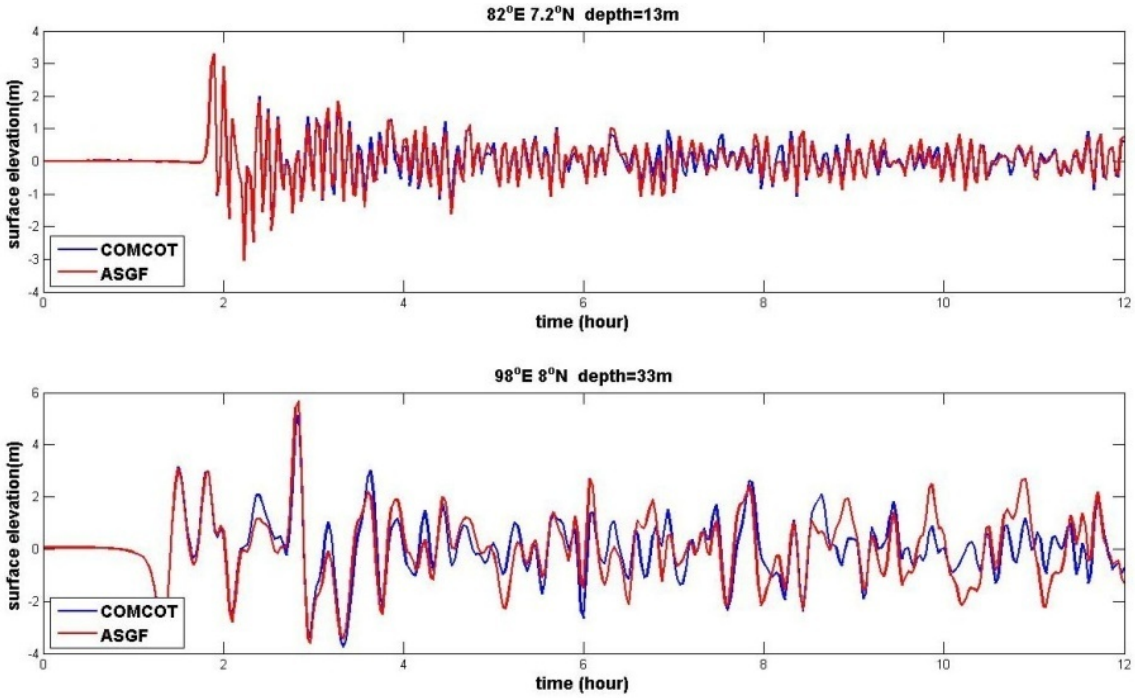


圖 5.41 互逆格林函數與傳統海嘯模式之水位變化驗證

5.3.3.3 點位設定

格林函數數值資料庫的建置，由上節所述位置需滿足水深大於 50 公尺，因此本研究在台北港以及基隆港外海水深大於 50 公尺一點位設置建立格林函數水位變化資料庫，如下圖 5.42、圖 5.43：

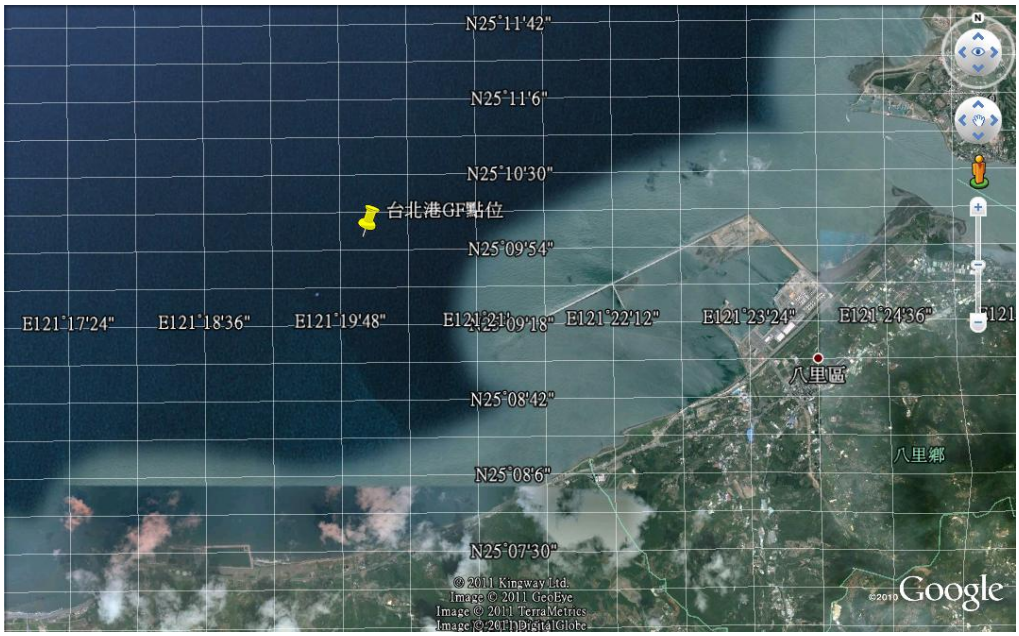


圖 5.42 台北港格林函數點位位置



圖 5.43 基隆港格林函數點位位置

來自太平洋東岸之海嘯波傳遞至台灣沿海約需 28 小時，也因此要計算太平洋區域對台北港之格林函數資料庫，其儲存量相當龐大，故以下選擇台北港之案例作為介紹。圖 5.44 為太平洋區對台北港地區之格林函數圖，時間長度為 28 小時；其模擬點位如圖 5.45 所示；其格林函數在第 24 小時之空間分佈則如圖 5.46 所示。

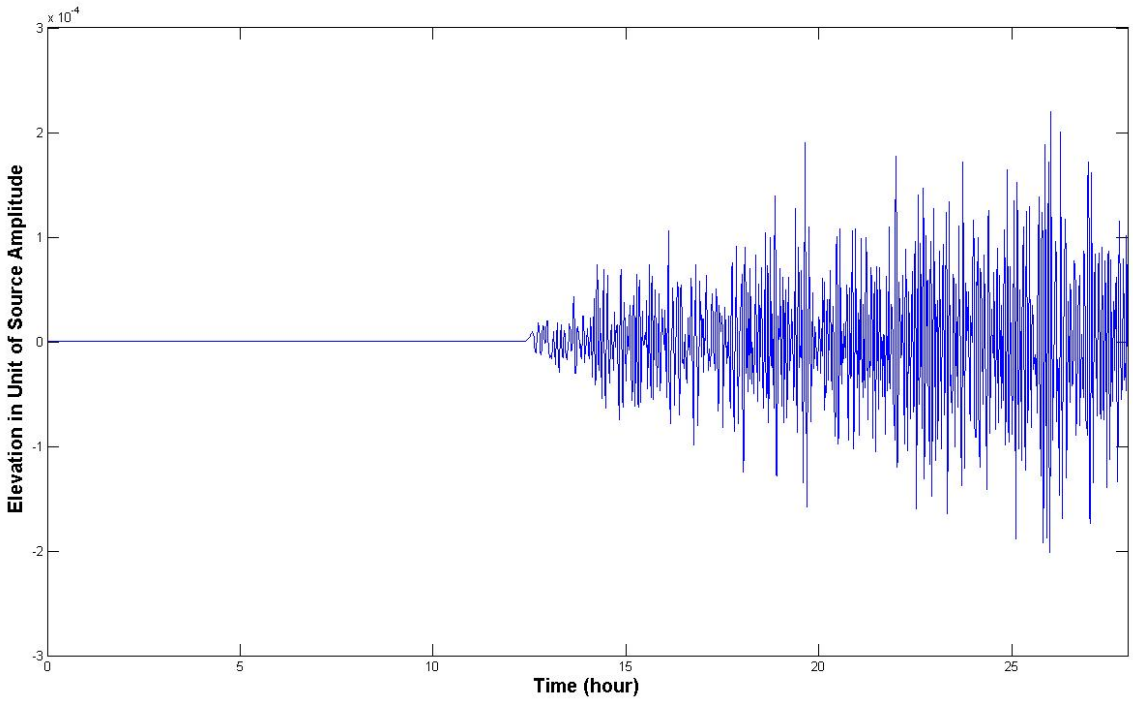


圖 5.44 太平洋區對台北港之格林函數

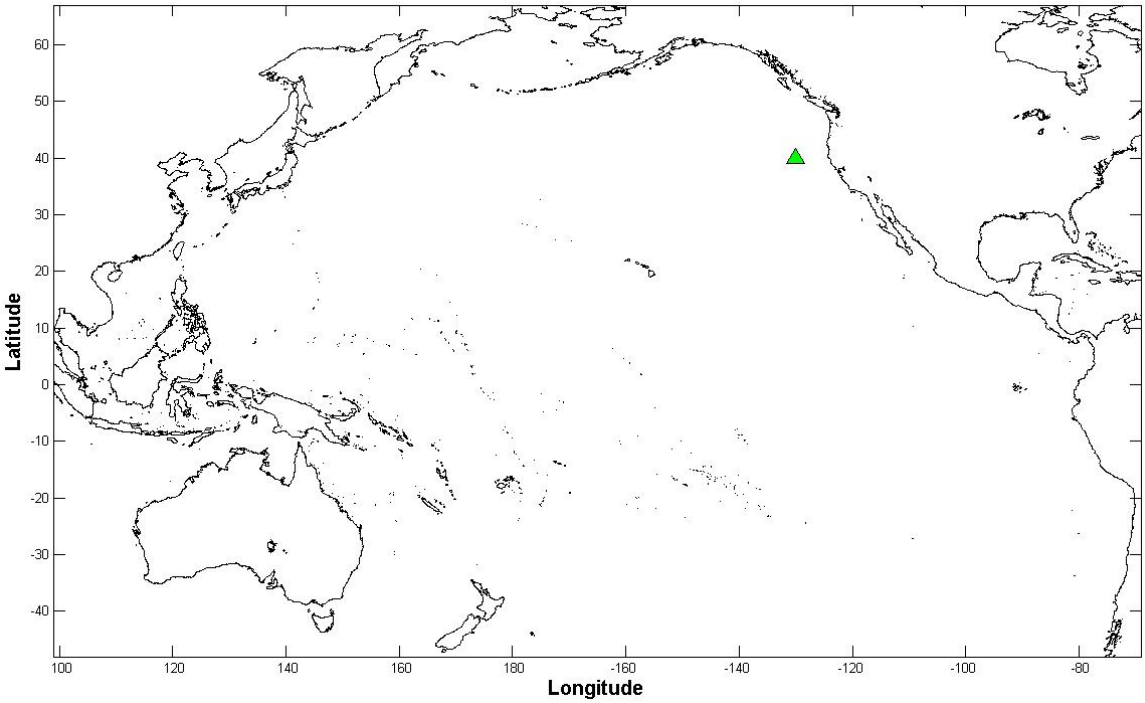


圖 5.45 上圖 5.44 所模擬之可能震源之點位

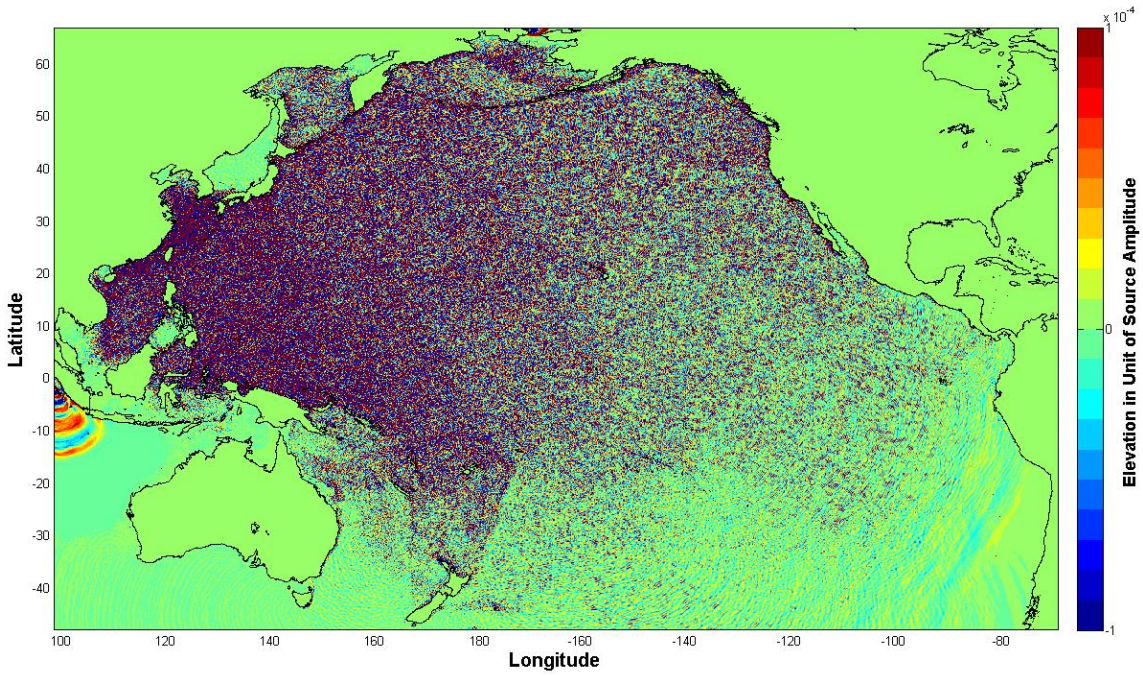


圖 5.46 可能震源對台北港在第 24 小時之水位值空間分佈

5.3.3.4 初始水位斷層參數設定

模式計算初始水未所需斷層參數，本研究使用全球 CMT(global CMT)地震解，如下圖 5.47。取得各區域在統計年內的地震參數資料，將震央位置剔除陸源部分後平均假設為可能發生地震位置，並將 strike 角度取平均並與海溝走向做比對，作為此區域走向角(strike)參數，傾角(dip)參數則對 dip 角度取平均，滑移角(slip)在本研究取 90 度。因此可得各點位參數如下表 5-8：

Global CMT Catalog

Search criteria:

```
Start date: 1976/1/1   End date: 2011/1/1
22 <=lat<= 36          120 <=lon<= 141
0 <=depth<= 1000         -9999 <=time shift<= 9999
0 <=mb<= 10        0<=Ms<= 10           0<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90         0 <=null plunge<= 90
```

Results

Output in GMT psvelomeca (old) format
Columns: lon lat str1 dip1 rake1 str2 dip2 rake2 sc iexp name

```
130.64 28.12 230 33 -114 78 61 -75 4.620 25 121476A
136.80 30.62 33 32 -163 289 81 -59 1.340 24 010177C
140.96 32.69 325 57 31 216 64 142 1.940 25 021877B
139.27 31.66 269 38 85 96 52 94 1.930 24 033077A
137.70 30.34 213 35 -117 65 59 -72 5.130 24 042077B
126.68 26.92 357 49 -57 133 51 -121 2.100 24 050977A
139.73 28.12 121 24 -129 342 72 -74 6.100 25 051377A
139.72 27.28 124 36 -132 352 64 -65 7.160 23 052177B
122.09 23.84 300 10 142 67 84 82 6.810 24 071577A
140.99 35.42 314 16 152 71 82 76 2.630 24 082177B
126.59 26.09 93 60 -167 357 79 -31 2.610 24 090277A
139.41 35.85 266 18 -158 155 83 -73 1.340 24 100477B
122.09 22.64 345 38 -119 200 57 -69 2.430 24 101977A
140.40 33.64 88 49 157 193 72 43 4.050 24 111777B
127.45 29.00 92 33 -55 233 64 -110 11.110 24 122277A
138.34 28.50 54 27 -136 283 72 -70 4.690 24 122977A
```

圖 5.47 Global CMT 地震資料庫

表 5-8 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，地震參數

經度	緯度	strike	dip
139.07	34.62	-12	45.49444

在本研究中所有點位滑移角(slip)度皆取 90，震源深度皆取 15 公里。因為求得相對較大之海嘯波高結果，故滑移角(slip)取 90 度，而討論地震震源深度為 30 公里，因此震源深度參數部分取 15 公里。圖 5.48 為各參數帶入彈性半空間錯移理論計算地震所造成之海嘯初始波高。

022090A NR S COAST HONSHU, JAPAN

Date: 1990/ 2/20 Centroid Time: 6:53:45.3 GMT
Lat= 34.62 Lon= 139.05
Depth= 32.2 Half duration= 5.6
Centroid time minus hypocenter time: 5.7
Moment Tensor: Expo=25 0.603 0.591 -1.194 -0.780 0.554 -4.104
Mw = 6.4 mb = 6.1 Ms = 6.4 Scalar Moment = 4.33e+25
Fault plane: strike=355 dip=79 slip=10
Fault plane: strike=263 dip=80 slip=169

接近此地震參數值之地震記錄

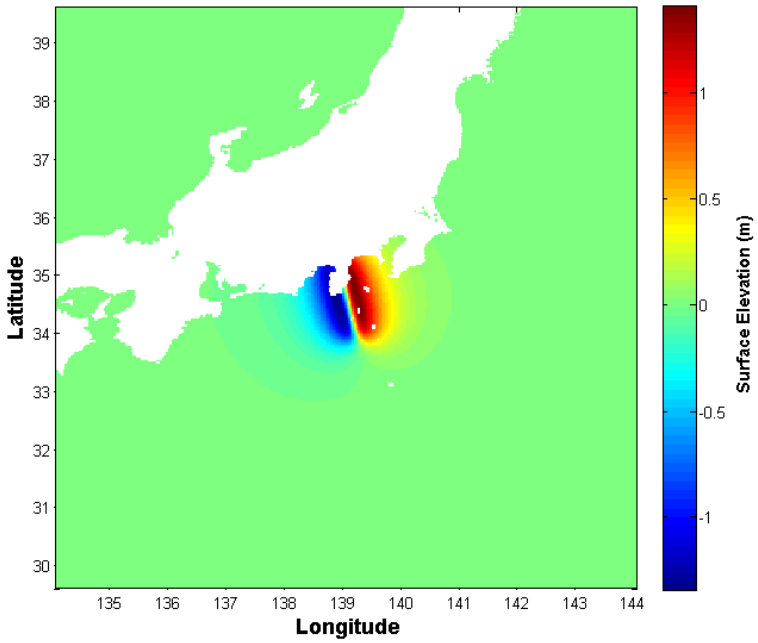
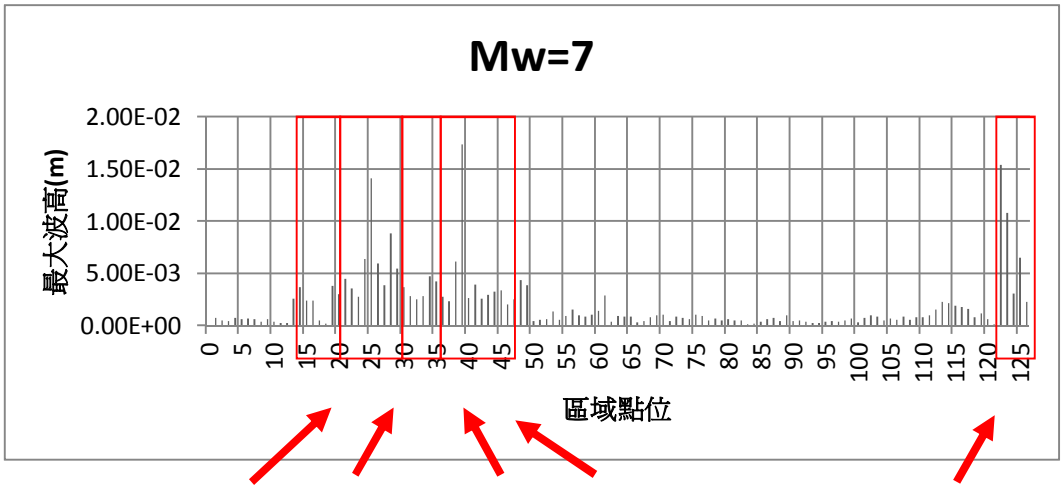


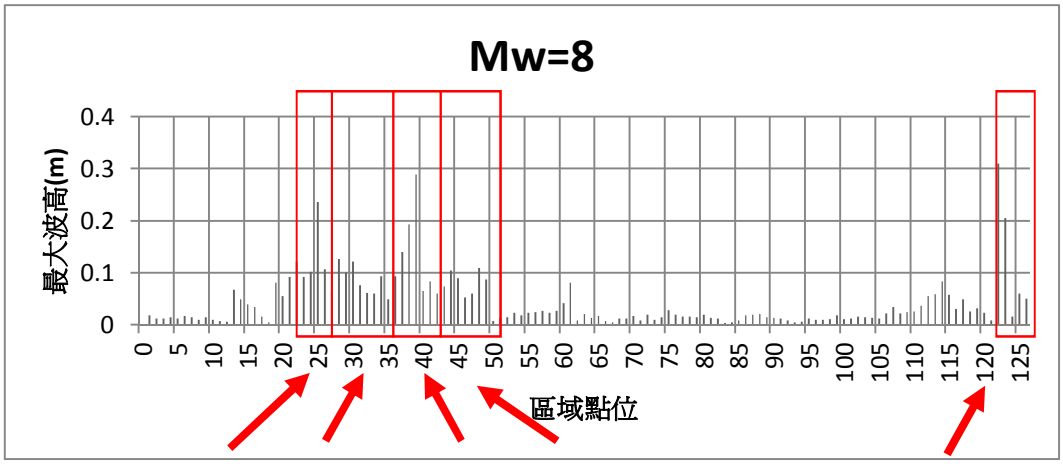
圖 5.48 日本東側東經 133 到 139，北緯 34 到 36，初始水位

5.3.3.5 波高計算結果

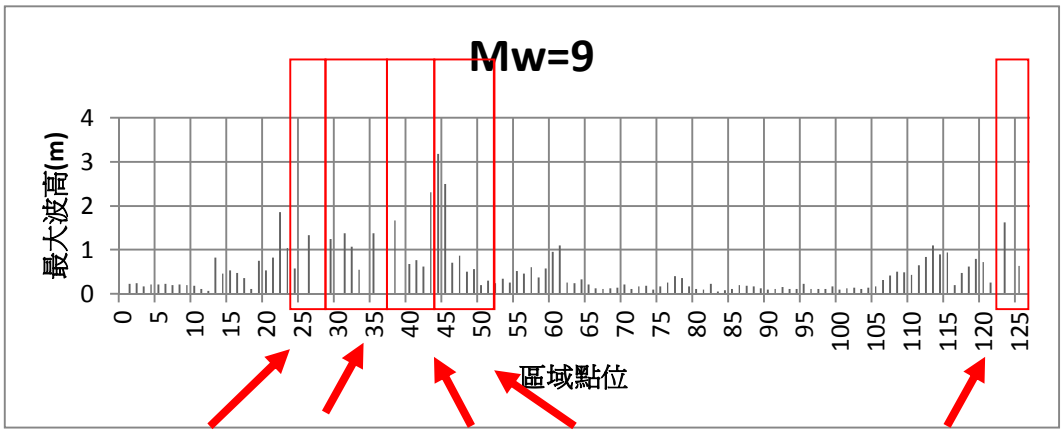
將各區域斷層參數帶入，以彈性半空間錯移理論記算此地震造成之初始水位變化，並應用已建置完成之格林函數水位變化資料庫，快速記算各地震引發海嘯對台北港及基隆港外海所產生之水位時序變化，並計算所產生之最大波高變化，以此估算出 126 個子區間發生不同地震矩規模之海嘯時，海嘯波在台北港以及基隆港之最大波高及到達時間。以台北港為例，分別計算地震矩規模 7、8、9 之結果如圖 5.49 所示。根據初步計算結果顯示，馬里亞納海溝(19-24)、菲律賓海溝(25-33)、琉球海溝(35-39)、伊豆小笠原海溝(40-49)以及馬尼拉海溝(122-126)對台北港較具威脅性。



馬里亞納海溝 | 菲律賓海溝 | 琉球海溝 | 伊豆小笠原海溝 | 馬尼拉海溝



馬里亞納海溝 | 菲律賓海溝 | 琉球海溝 | 伊豆小笠原海溝 | 馬尼拉海溝



馬里亞納海溝 | 菲律賓海溝 | 琉球海溝 | 伊豆小笠原海溝 | 馬尼拉海溝

圖 5.49 126 個震源區發生地震矩規模 7、8、9 之海嘯時，台北港最大波高

5.3.4 溢淹模擬

5.3.4.1 數值地形

本節說明本研究溢淹模擬部分，本研究為求模擬溢淹之精細度，數值地形檔水深採取台灣大學海洋資料庫網格解析度 500 公尺之數值地形檔(圖 5.50)，配合內政部網格解析度 5 公尺之陸地數值地形檔(圖 5.51)，內插製作網格解析度為 5 公尺之台北港、基隆港數值地形圖(圖 5.52)，選取接近/包含格林函數點位，且人口較密集區域圖　紅色框線處，製作網格解析度 5 公尺之數值地形檔，作為模式模擬之數值地形檔。

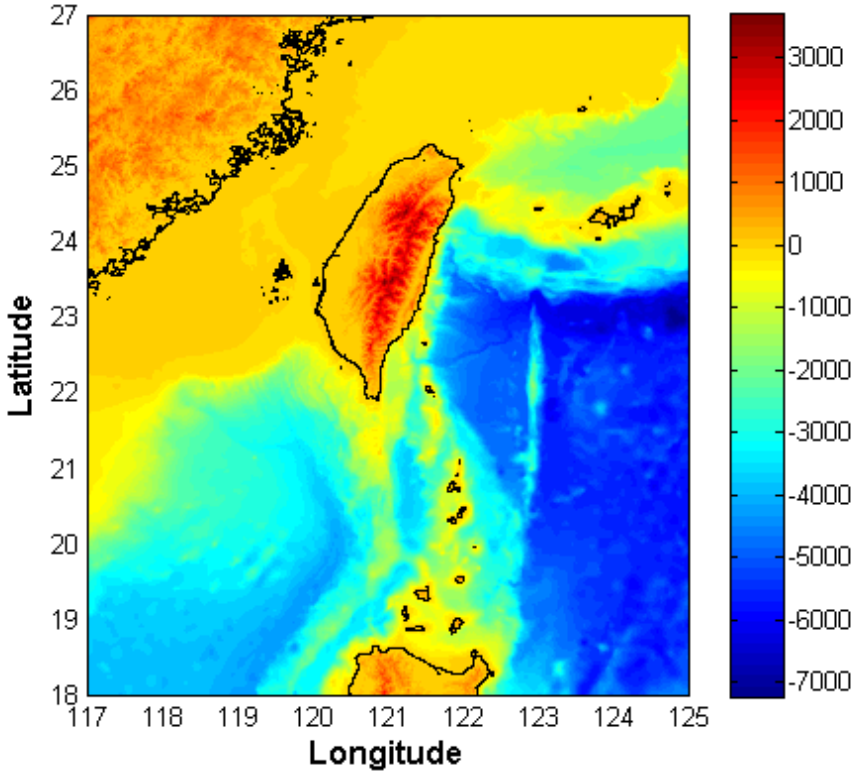


圖 5.50 台灣 500m 解析度水深地形資料

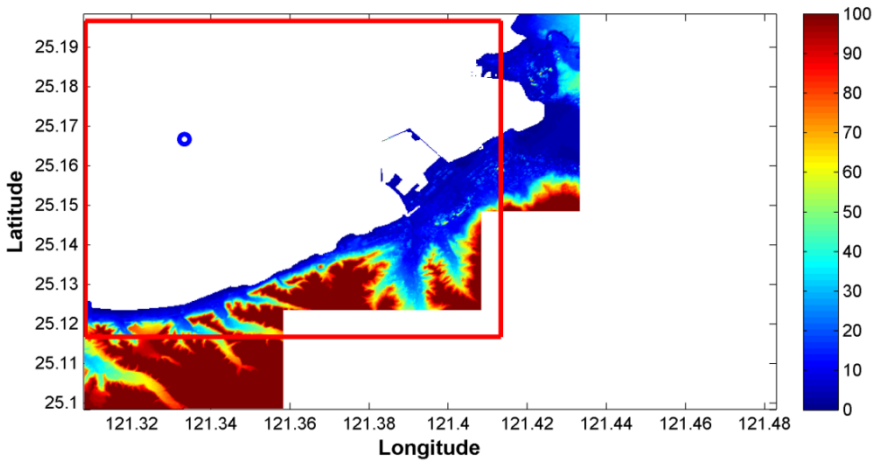


圖 5.51 台北港 5m 解析度數值地形檔

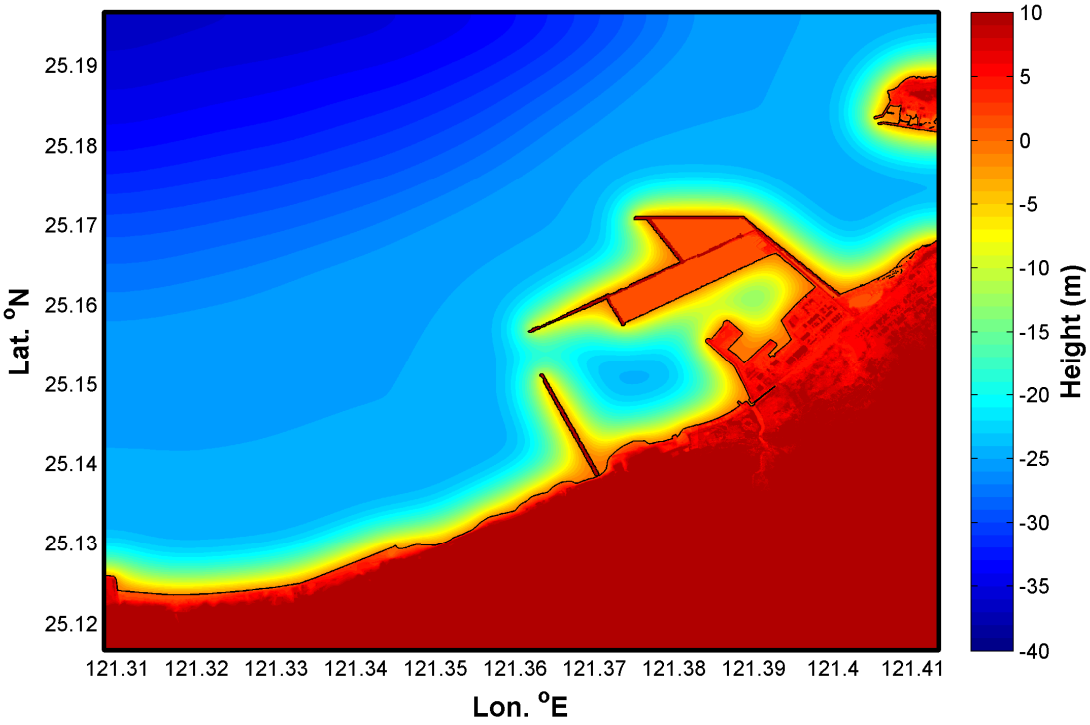


圖 5.52 內插修正溢淹模擬所需數值地形檔

5.3.4.2 溢淹模擬

本研究使用 COMCOT 溢淹模式，以不同波高之孤立波(邊界水深)模擬海嘯波垂直岸線入射(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、12m)，以台北港為例，模擬週期 20 分鐘海嘯波，圖 5.53 為波高 4m 週期 20 分鐘孤立波波形，以此波形在模式地形邊界上入射，模擬此情境下陸地之溢淹狀況。圖 5.54 為 4m 海嘯波溢淹台北港狀況。

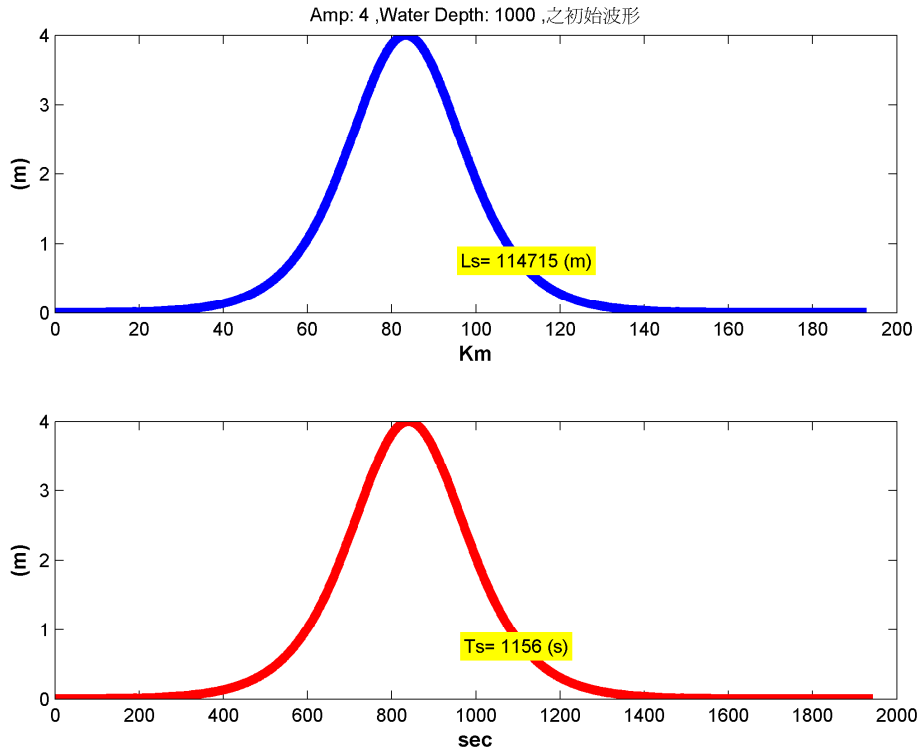


圖 5.53 週期 20 分鐘波高 4m 孤立波

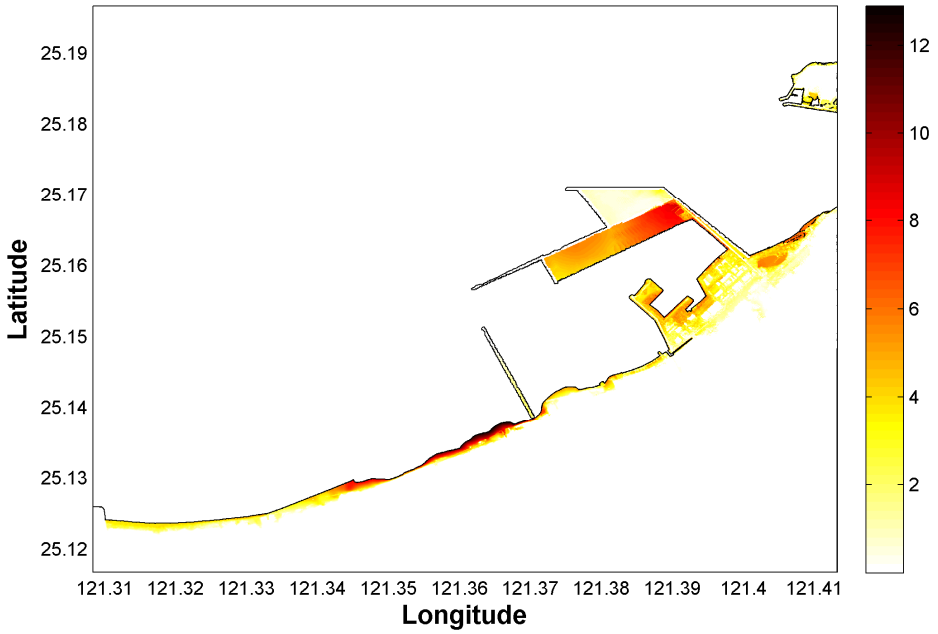


圖 5.54 台北港受 4m 海嘯波溢淹結果

5.3.4.3 溢淹機率

本研究之海嘯溢淹機率(IP)定義為當海嘯溢淹超過離岸 50 公尺，溢淹高度超過 50 公分時，即表示該處為發生溢淹。圖 5.55 為台北港離岸 50 公尺線，取 50 公尺是因為台北港沿海地區有較緩坡度之沿海沙灘或是礫灘地形，而在海堤地區若造成海水高過防波堤而溢淹，往往都會溢淹超過 50 公尺，因此本研究定義以 50 公尺為溢淹災害發生應當合適。本研究定義溢淹條件為溢淹高度超過 50 公分，主要考量到海水溢淹陸地後要產生危害需要一定的溢淹高度與強度，因此在定義選取溢淹的條件下，以溢淹入陸地 50 公尺且溢淹高度超過 50 公分為溢淹條件。此兩條件與模式模擬地形的離岸 50 公尺岸線網格數長度比值，定義為溢淹機率，圖 5.56 為溢淹機率定義之簡示圖：黑點為岸線，紅點為離岸 50 公尺線，藍點為水溢淹的點位，黃線為溢淹範圍線，此例紅點與藍點相疊的點位總計有 3 點，紅點總數為 8 點，因此溢淹機率為 3/8=0.375。

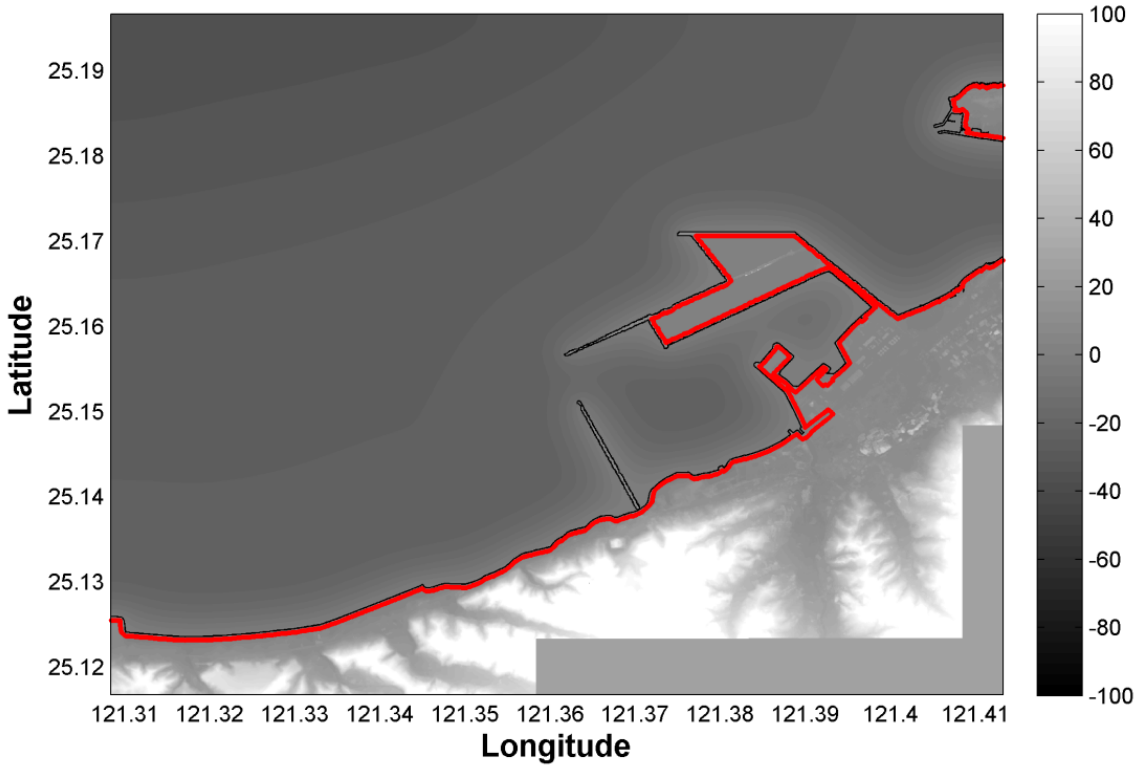


圖 5.55 台北港離岸 50m 岸線

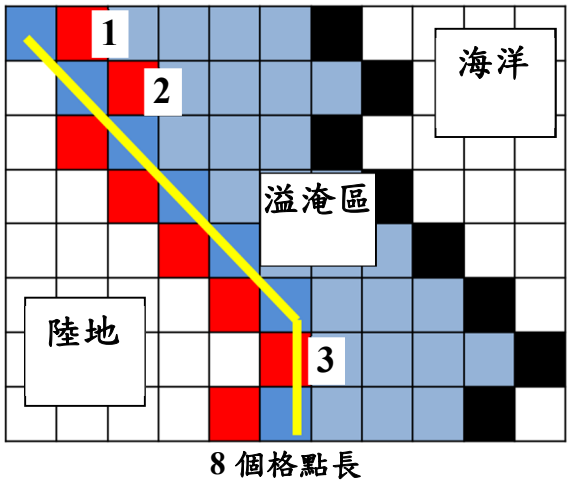


圖 5.56 溢淹機率簡示圖

計算不同波高(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、12m)對於區域內的溢淹機率結果，並對各波高之溢淹機率作內差可得 0 公尺到 12 公尺波高對應之溢淹機率，圖 5.57 。前一節由各地震參數應用互逆格林函數快速計算完之各鄉鎮外海波高，在與模式邊界水深修正過後之最大波高結果，與此節計算完成之各波高對應之溢淹機率互相對應，即可得到各區域產生不同規模地震海嘯，對台北港產生之溢淹機率。

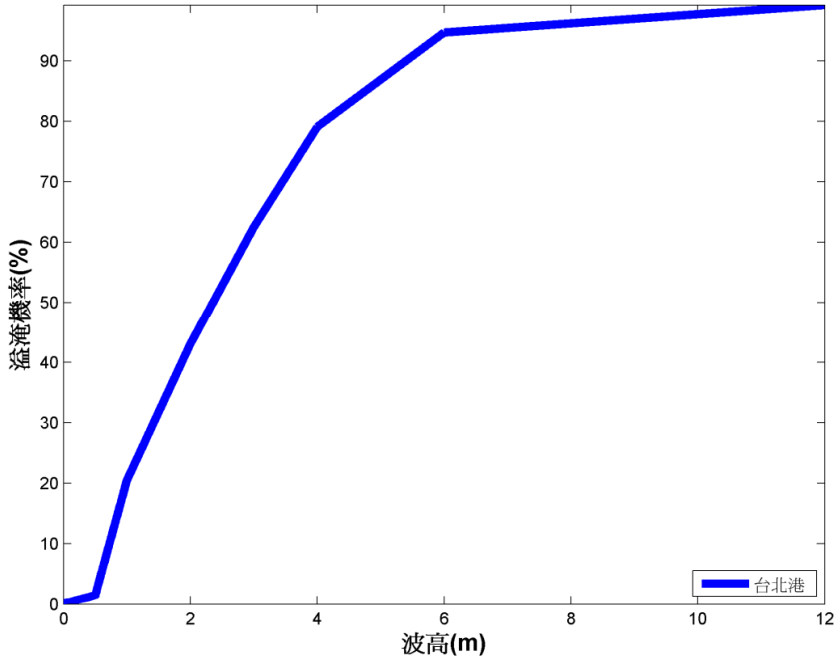


圖 5.57 台北港不同波高溢淹機率

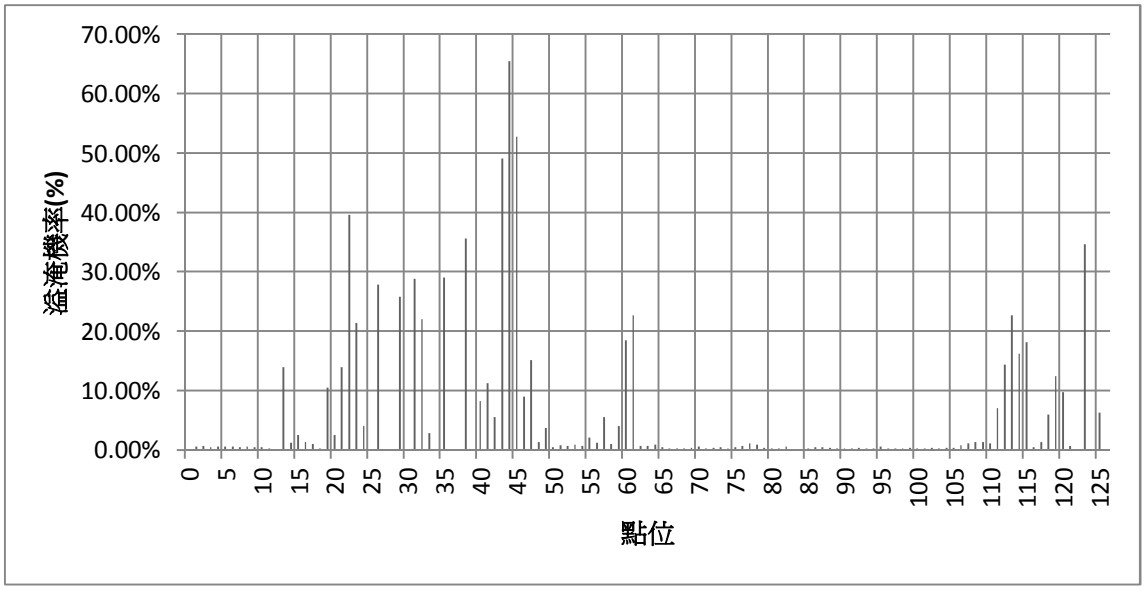


圖 5.58 台北港規模 9 地震海嘯產生最大波高對應溢淹機率

5.3.5 海嘯地震且溢淹機率

第二節計算完各區域海嘯地震發生次數期望值，第三節快速的計算各區域若發生海嘯對台灣東南部產生之水位變化，第四節使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率。最後本節將所有點位，五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總點位與規模得此區發生海嘯且溢淹之機率。以下以台北港為例，圖 5.59 為台北港各點位發生規模 9 海嘯地震次數期望值，圖 5.60 為規模 9 海嘯地震次數期望值與規模 9 海嘯的溢淹機率相乘結果。

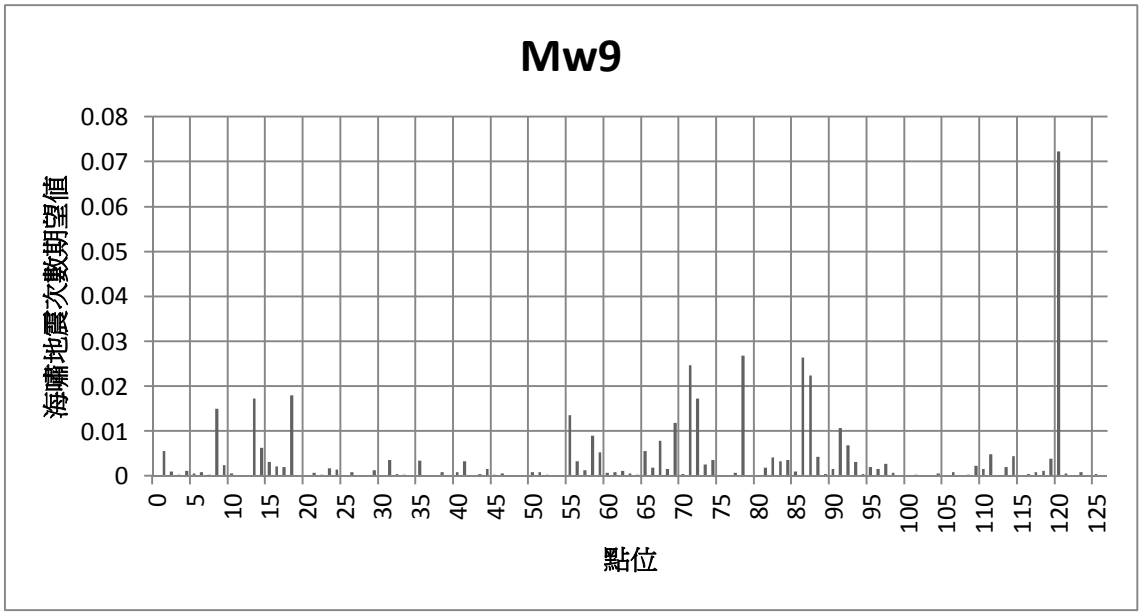


圖 5.59 台北港各點位未來 50 年發生規模 9 海嘯地震次數期望值

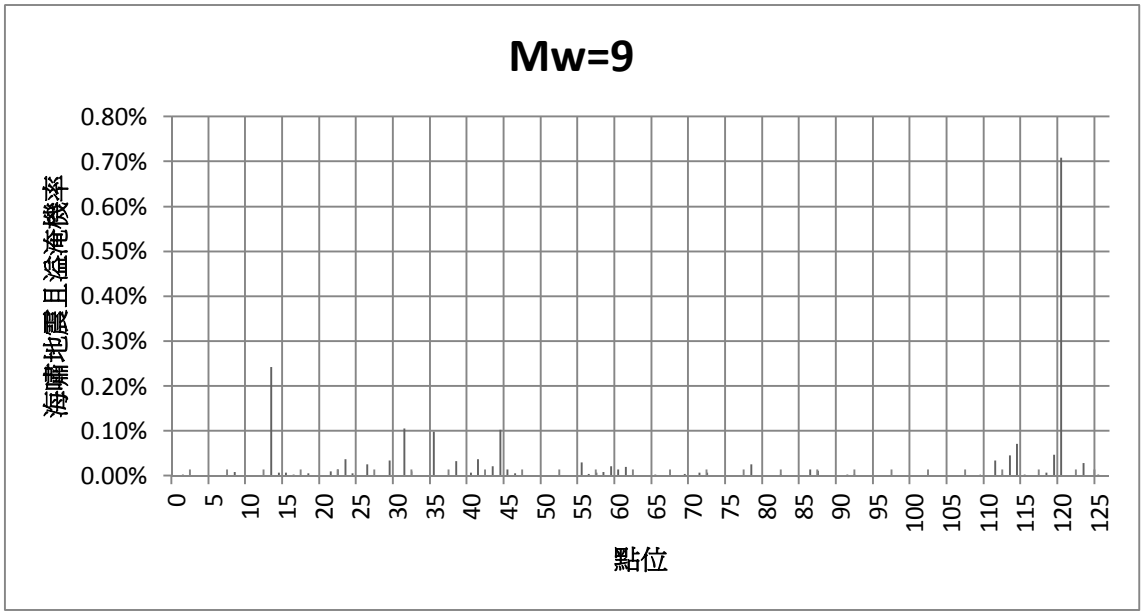


圖 5.60 台北港各點位未來 50 年發生規模 9 海嘯地震且溢淹機率

最後總機率部分，將 5 個規模、126 個點位各別發生海嘯且溢淹機率相加為此區發生海嘯且溢淹機率。以台北港為例，未來 50 年發生海嘯且溢淹機率為 2.79%，未來 100 年發生海嘯且溢淹機率為 5.59%

5.4 基隆港域及台北港域海嘯災害風險評估

5.4.1 前言

前章節中說明機率式海嘯風險評估中可能引發海嘯的地震評估方法，大多數海嘯發生源在板塊潛沒帶上，如圖 5.61；圖 5.62 為本計畫討論之環太平洋地震帶依海溝分佈，並包含台灣西南鄰近活躍的馬尼拉海溝共 126 個點位。本計畫使用 United States Geological Survey（USGS）－National Earthquake Information Center（NEIC）歷史地震資料庫，由上節所說明之機率式海嘯風險評估方法，分別對各點區域求得發生震源深度小於 30 公里海底地震的機率(P_{ocsh})，以及地震發生期望數(EN)，進而評估環太平洋地震帶未來 50 年及未來 100 年發海嘯地震次數期望值(TEN) 。並就機率式海嘯風險評估「海嘯溢淹機率 Tsunami Inundation Probability (TIP)」的計算方式討論其台北港與基隆港溢淹機率計算結果。最後將各區域各震度引發海嘯之地震期望數與海嘯溢淹機率作加總則可得到各評估位置未來可能遭受海嘯災害風險的機率值，流程圖如圖 5.63。

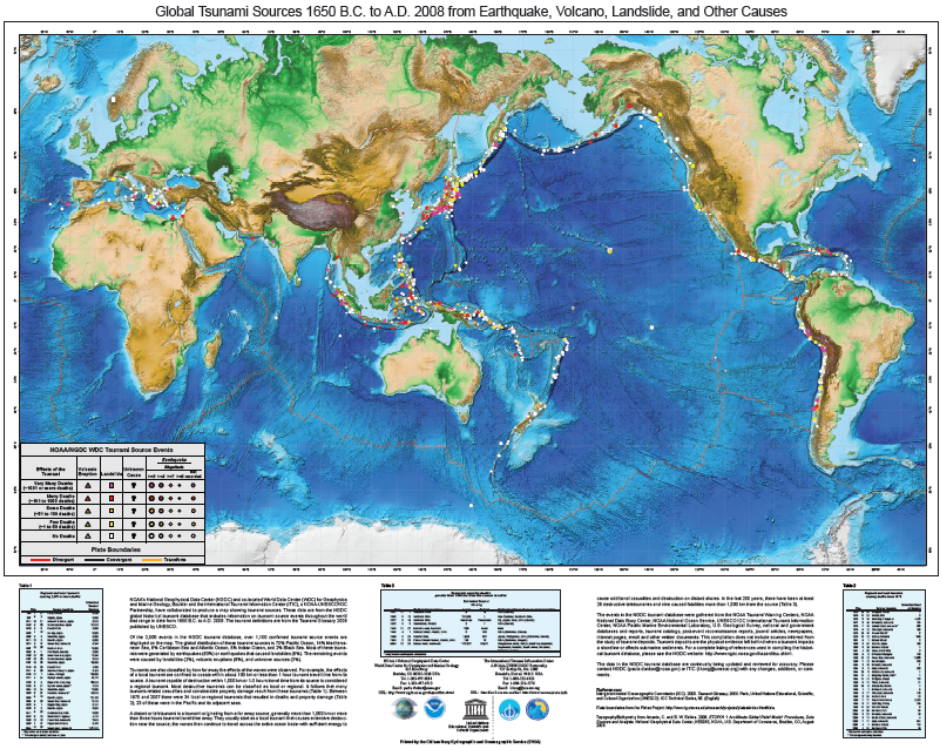


圖 5.61 NOAA-海嘯災害分佈圖

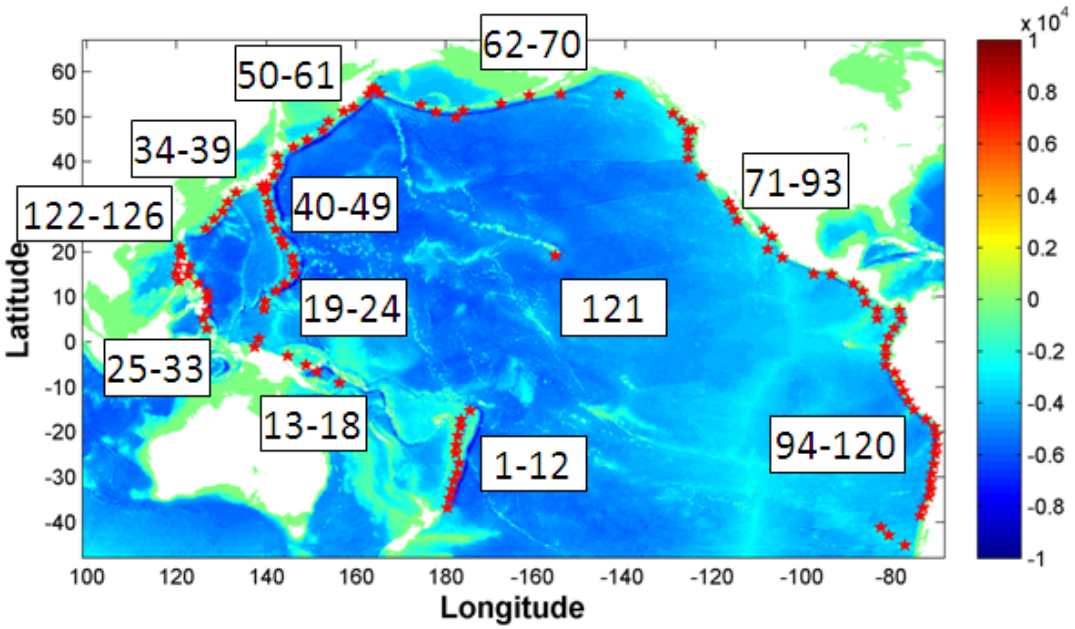


圖 5.62 環太平洋地震帶依海溝分佈 126 個點位

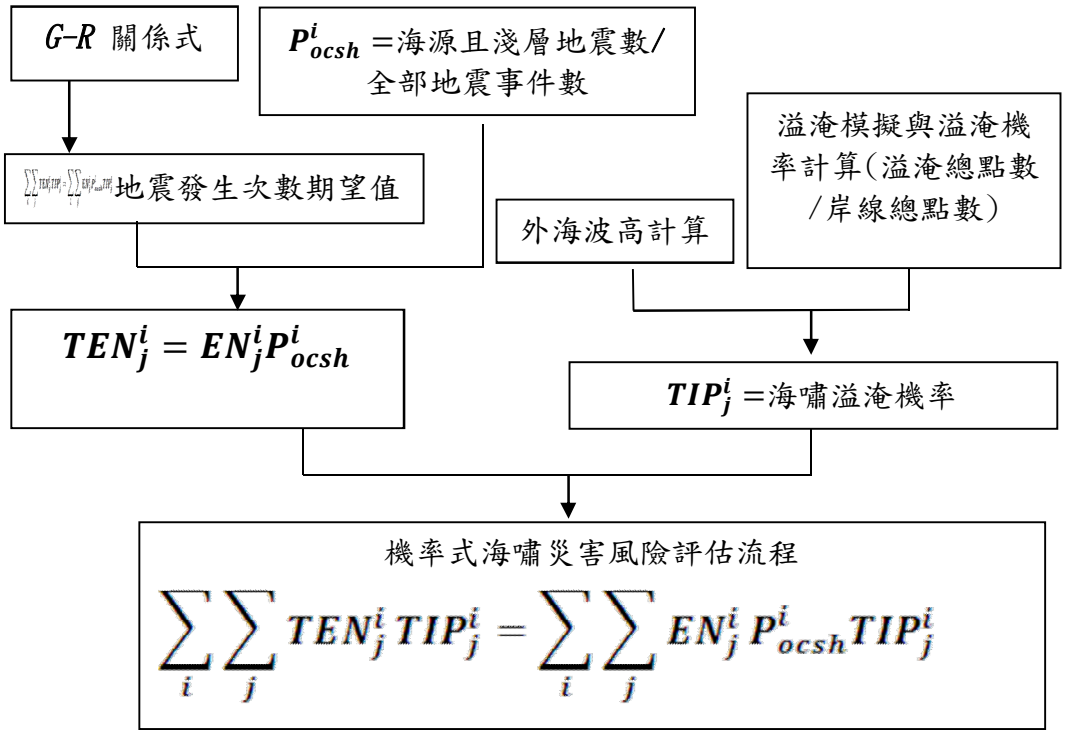


圖 5.63 機率式海嘯災害風險評估流程圖

5.4.2 海嘯地震次數期望數

由上節介紹之海嘯風險評估方法，討論劃分地區太平洋各主要海溝及台灣西南部活躍海溝：馬尼拉海溝共 126 個區域點位。分別針對各區域點位計算未來 50 年與未來 100 年發生海嘯地震次數期望值。圖 5.64 為本研究討論地區 126 個點位未來 50 年發生規模 8 與規模 9 海嘯地震次數期望值。

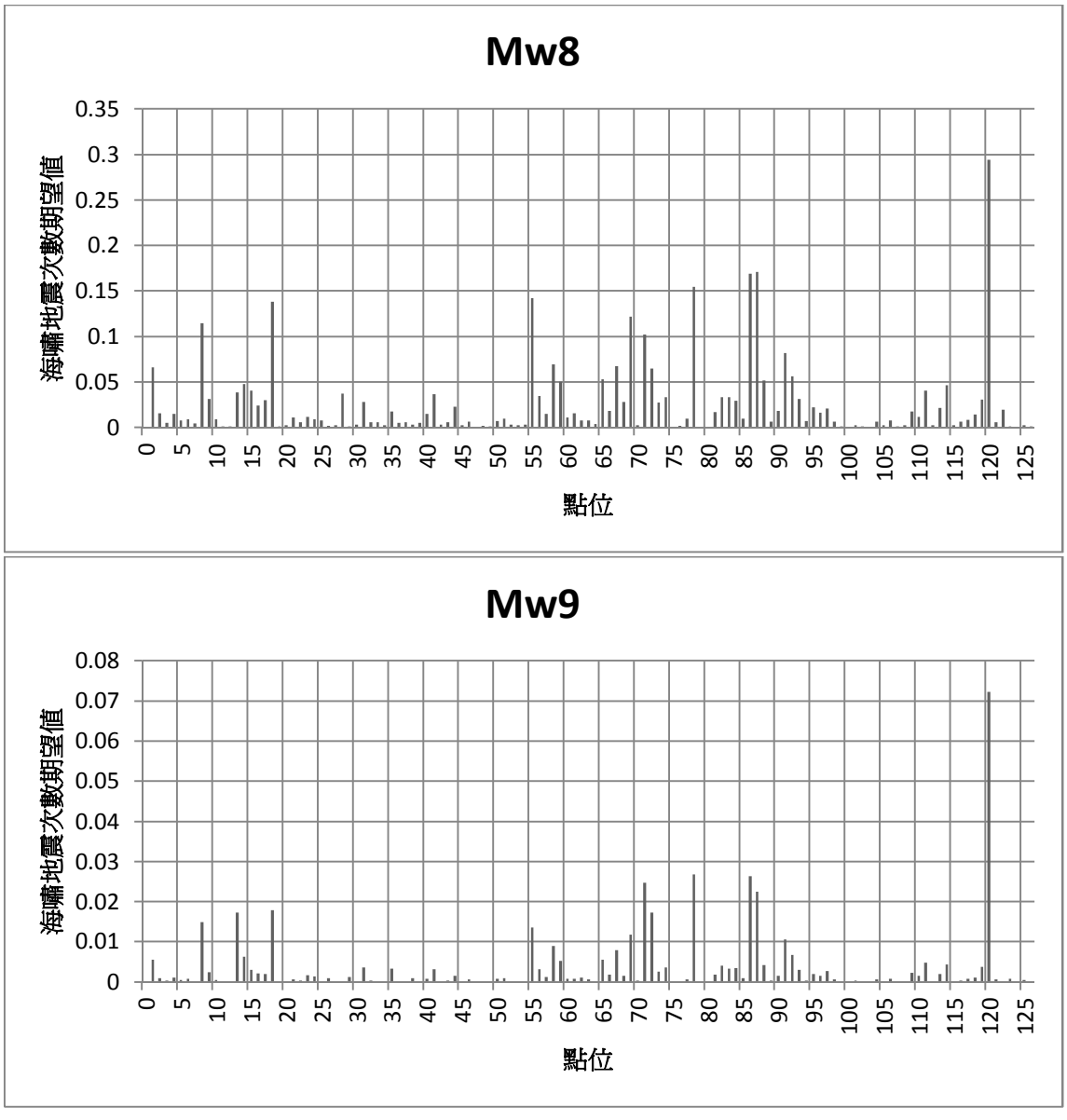


圖 5.64 研究區域 126 點位發生地震矩規模 Mw8 與 Mw9 之海嘯地震次數期望值

5.4.3 外海波高計算

外海波高計算部分應用已建構完成之介面化海嘯模擬預警系統如圖 5.65，由上節說明之地震參數給定方法，給予各點位（經度、緯度）不同程度地震矩規模以及各點位區域平均之地震解角度等參數，求得各點為若發生不同程度海嘯時對台北港域、基隆港域所產生之最大波高。

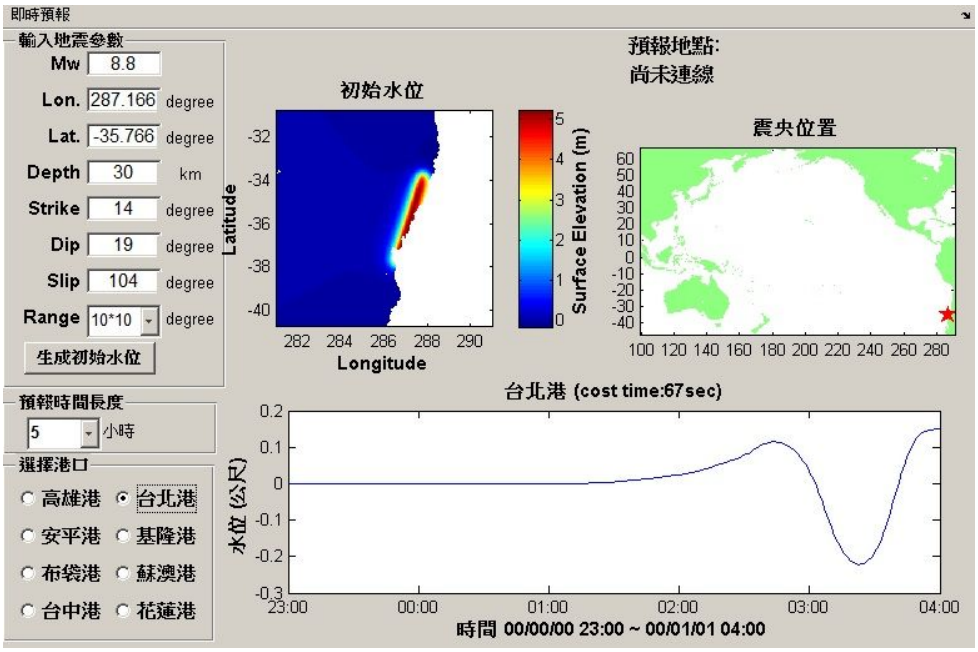


圖 5.65 介面化海嘯模擬預警系統

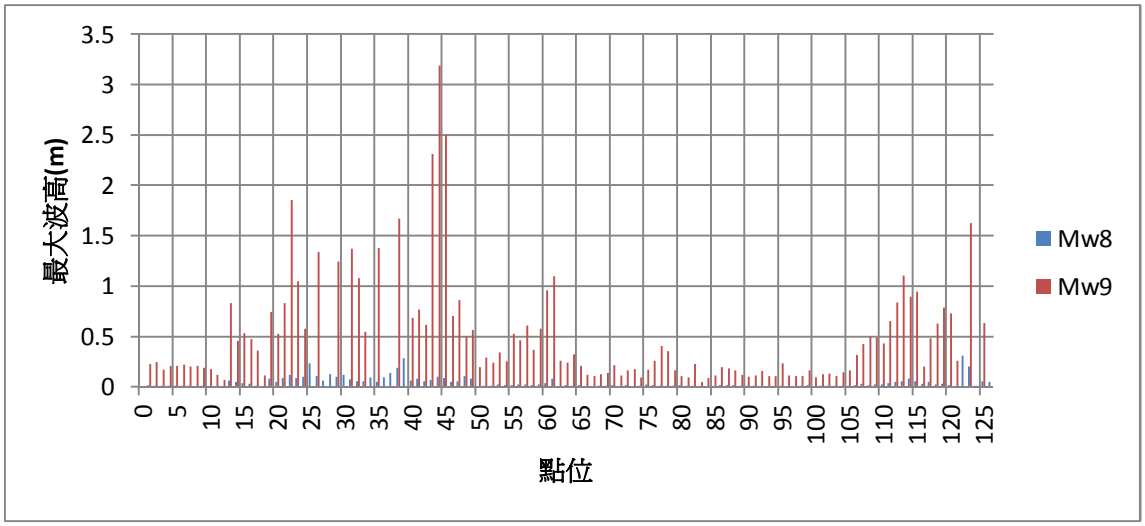


圖 5.66 台北港 126 點位地震矩規模 Mw8 與 Mw9 所求得最大波高

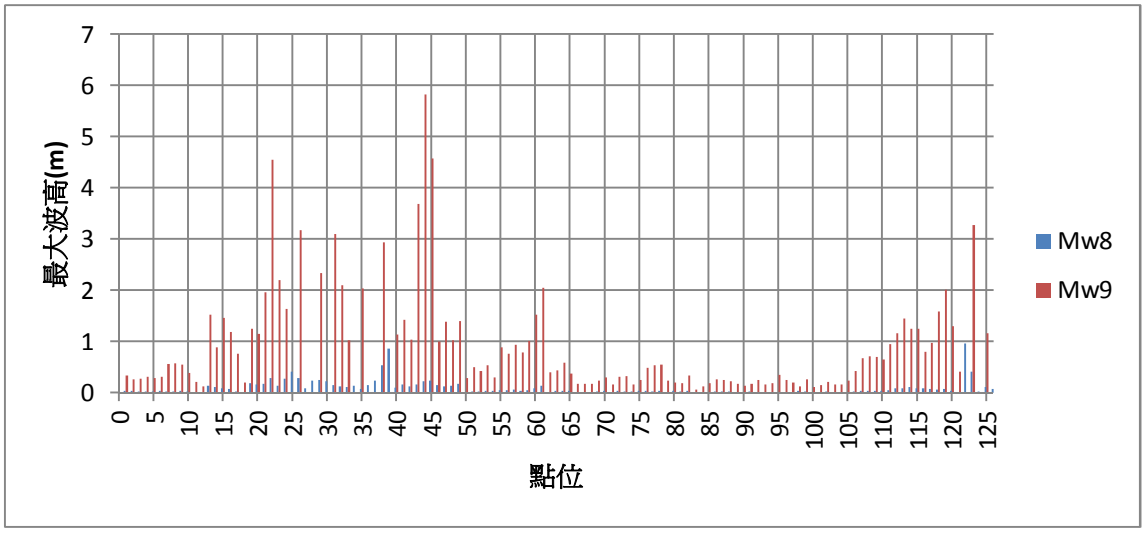


圖 5.67 基隆港 126 點位地震矩規模 Mw8 與 Mw9 所求得最大波高

5.4.4 數值地形處理

溢淹狀況部分，本計畫數值地形檔水深採取台灣大學海洋科技研究中心網格解析度 500 公尺之數值地形檔，配合內政部網格解析度 5 公尺之數值地形檔，圖 5.68、圖 5.69，內插製作網格解析度為 5 公尺之數值地形圖，並使用交通部港灣技術研究中心提供台北港與基隆港解析度 50 公尺水深地形圖做水深修正，圖 5.70、圖 5.71，作為模式模擬之數值地形檔，圖 5.72、圖 5.73。圖 5.74 為台北港離岸 50 公尺點位，圖 5.75 為基隆港離岸 50 公尺點位。

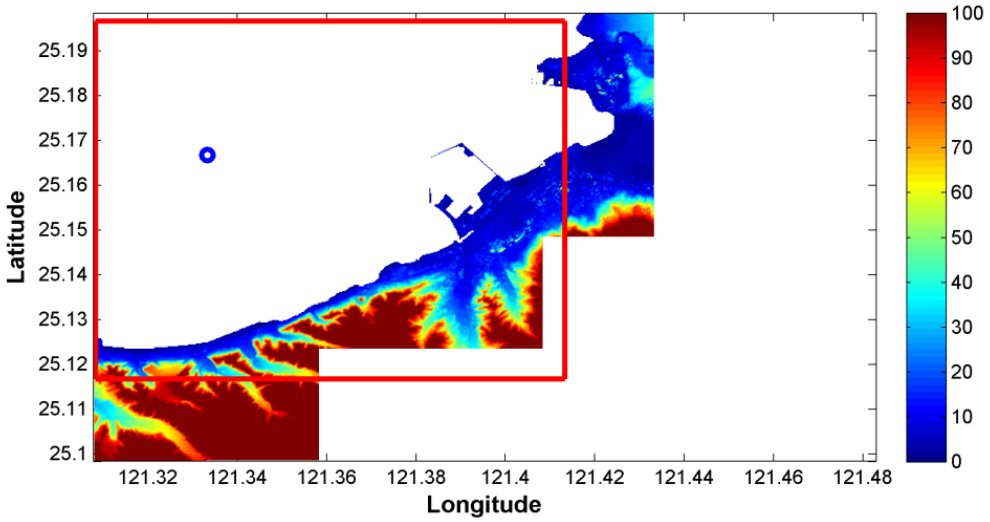


圖 5.68 台北港內政部網格解析度 5 公尺之數值地形檔

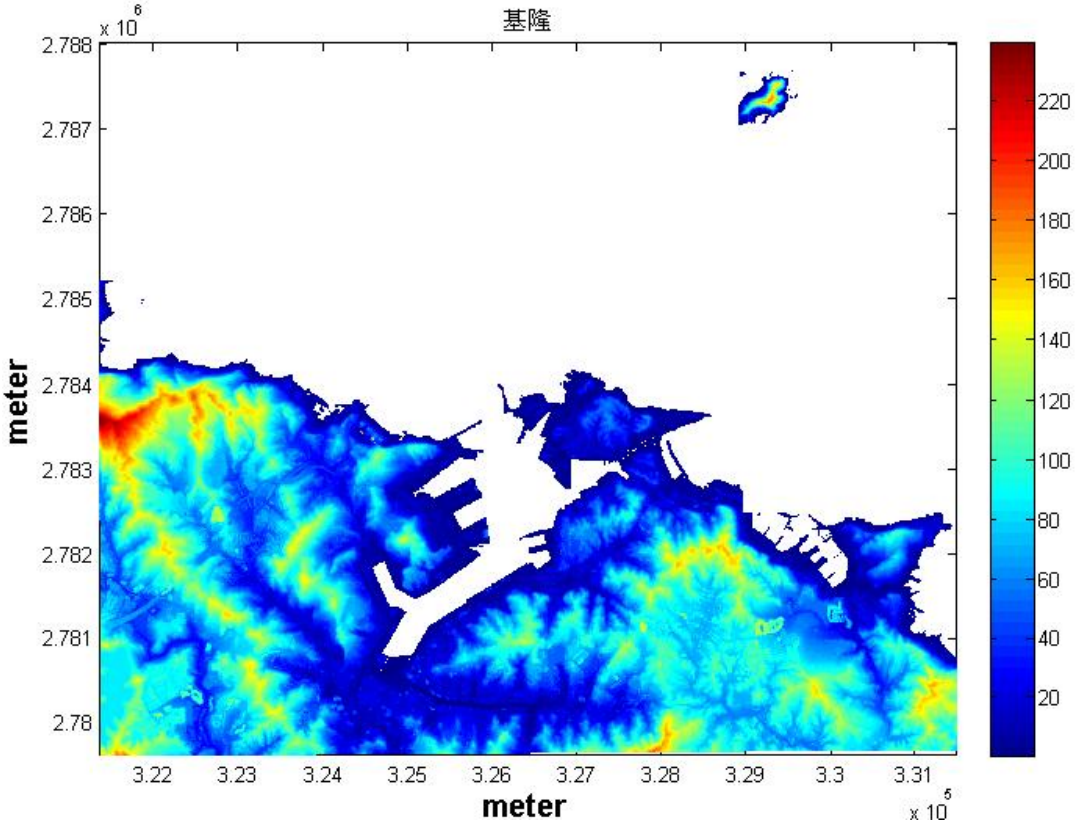


圖 5.69 基隆港內政部網格解析度 5 公尺之數值地形檔

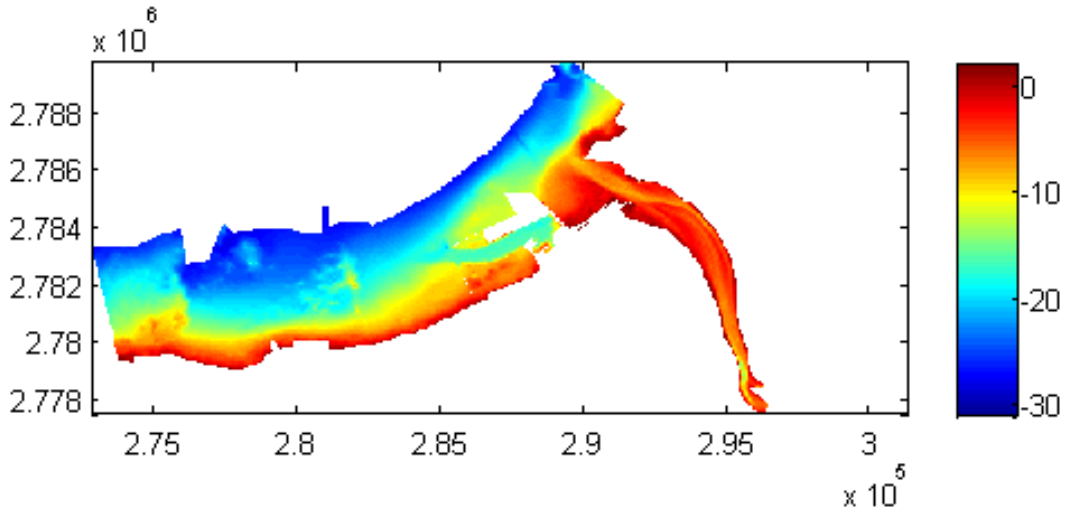


圖 5.70 台北港解析度 50 公尺水深地形圖

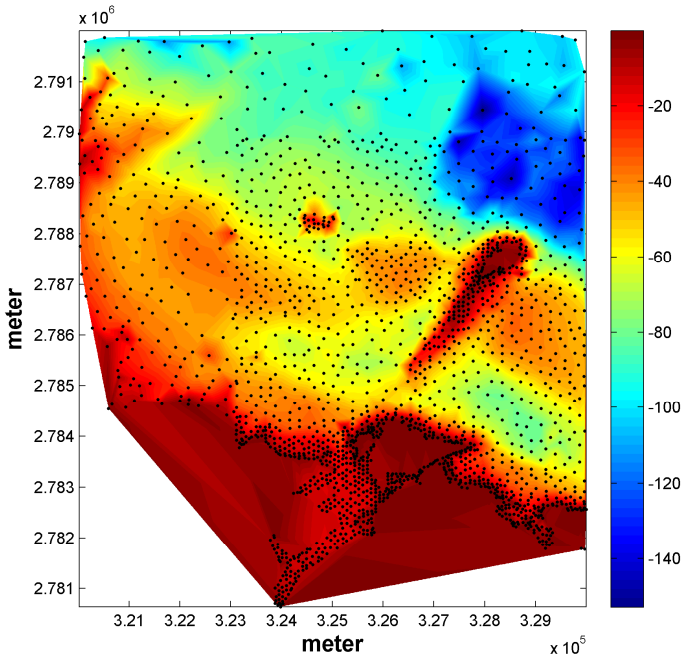


圖 5.71 基隆港解析度 50 公尺水深地形圖

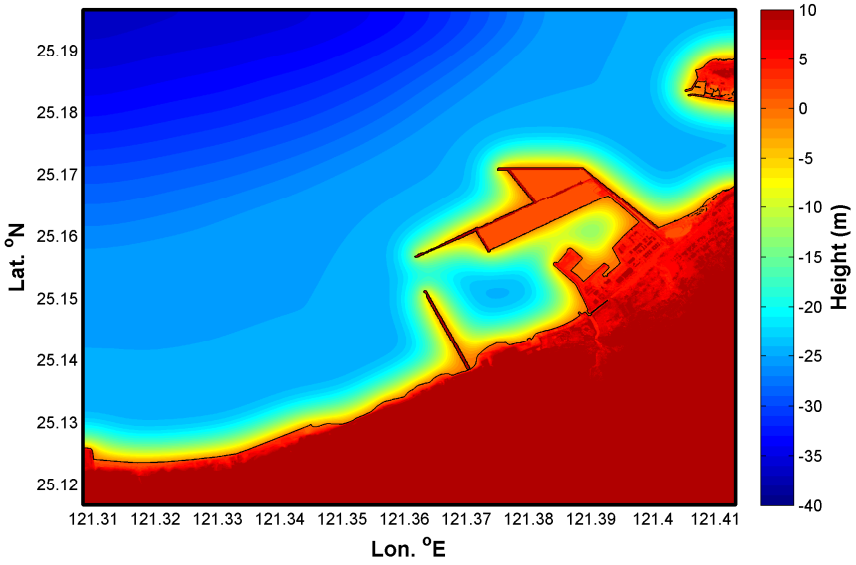


圖 5.72 台北港數值地形圖

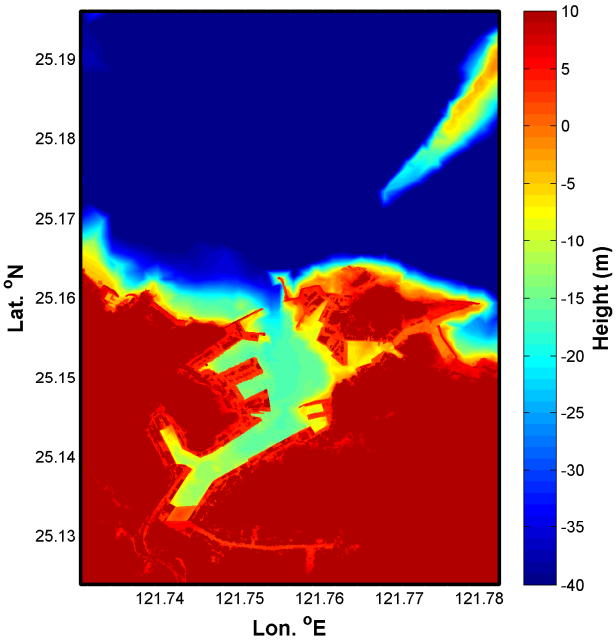


圖 5.73 基隆港數值地形圖

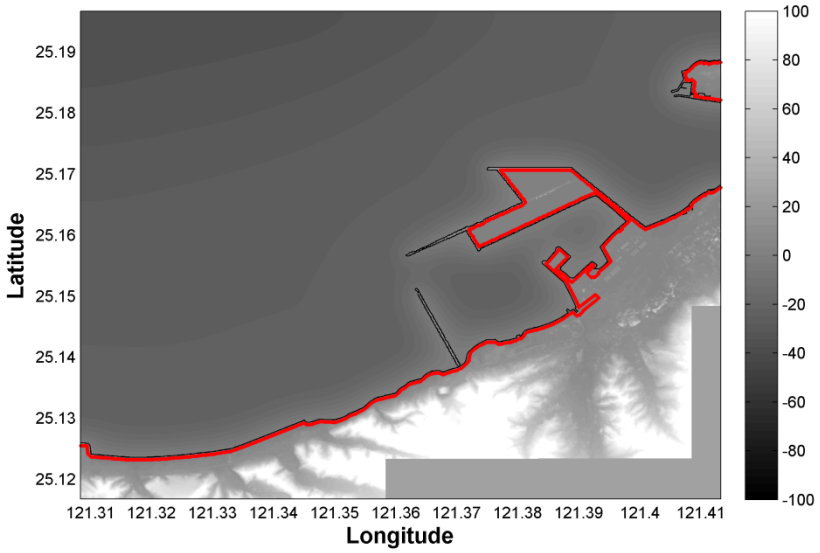


圖 5.74 台北港離岸 50 公尺點位

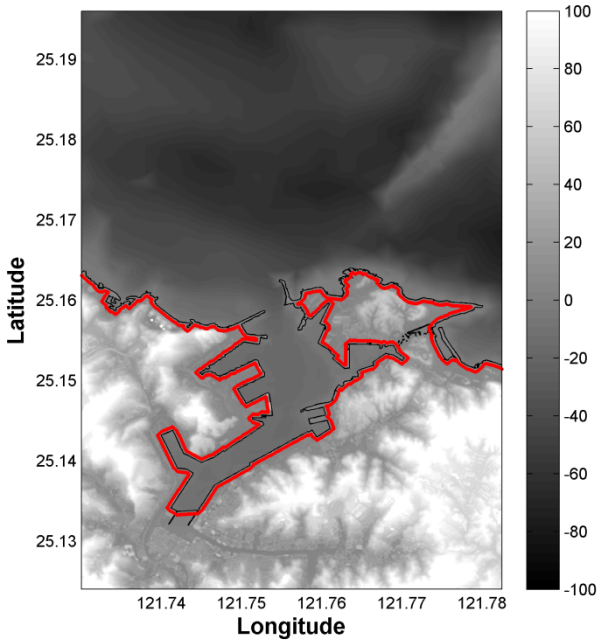


圖 5.75 基隆港離岸 50 公尺點位

5.4.5 海嘯溢淹模擬機率與溢淹機率

海嘯溢淹機率部分使用不同波高孤立波模擬海嘯波垂直岸線入射，圖 5.76 與圖 5.77 為台北港與基隆港不同波高海嘯波(週期 20 分鐘)所造成之溢淹狀況，由此可得不同海嘯波所對應的海嘯溢淹機率，圖 5.78 ，完成計算台北港、基隆港全區域 126 個點位最大波高對應機率。

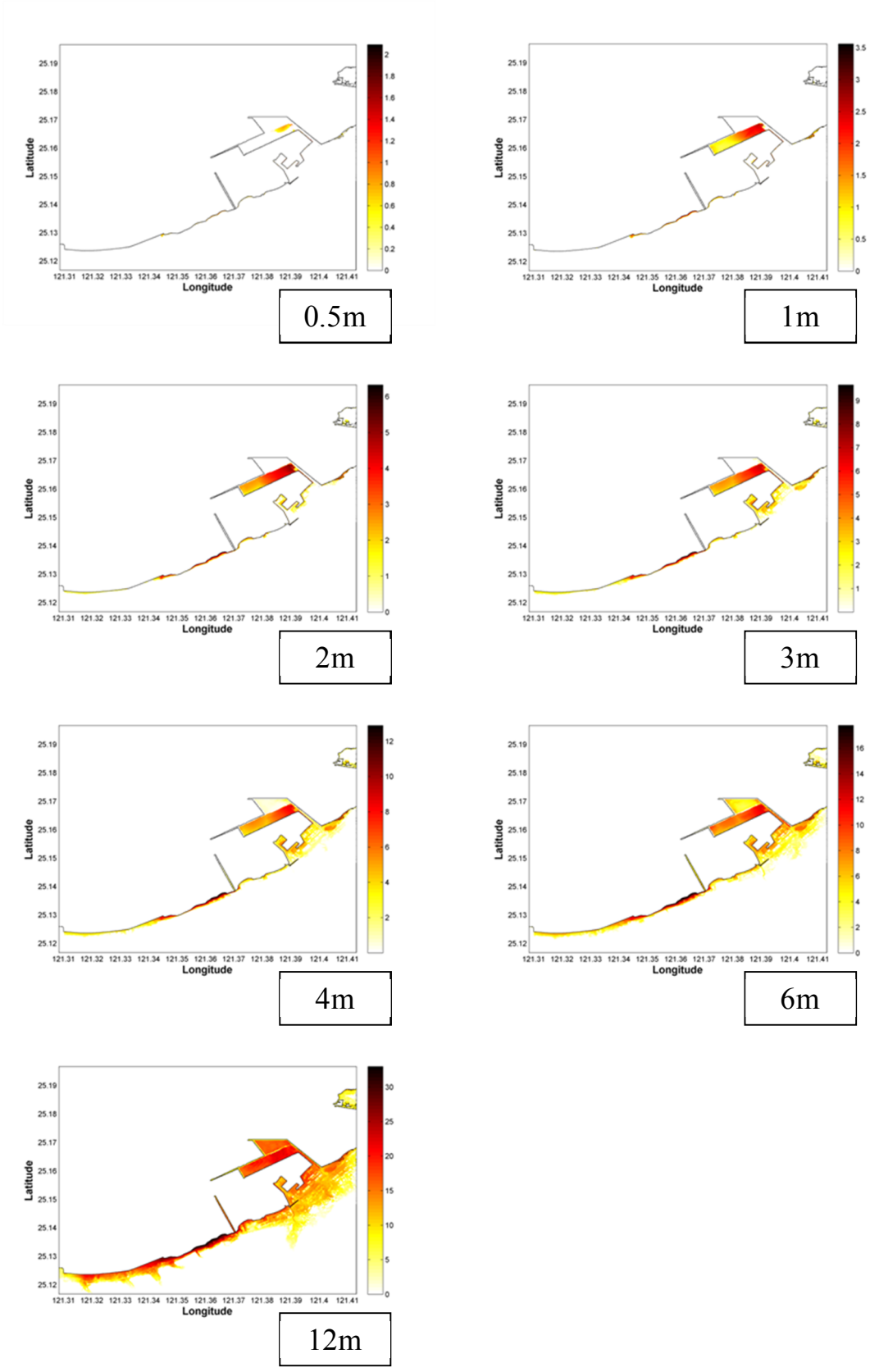


圖 5.76 台北港不同程度波高溢淹範圍圖

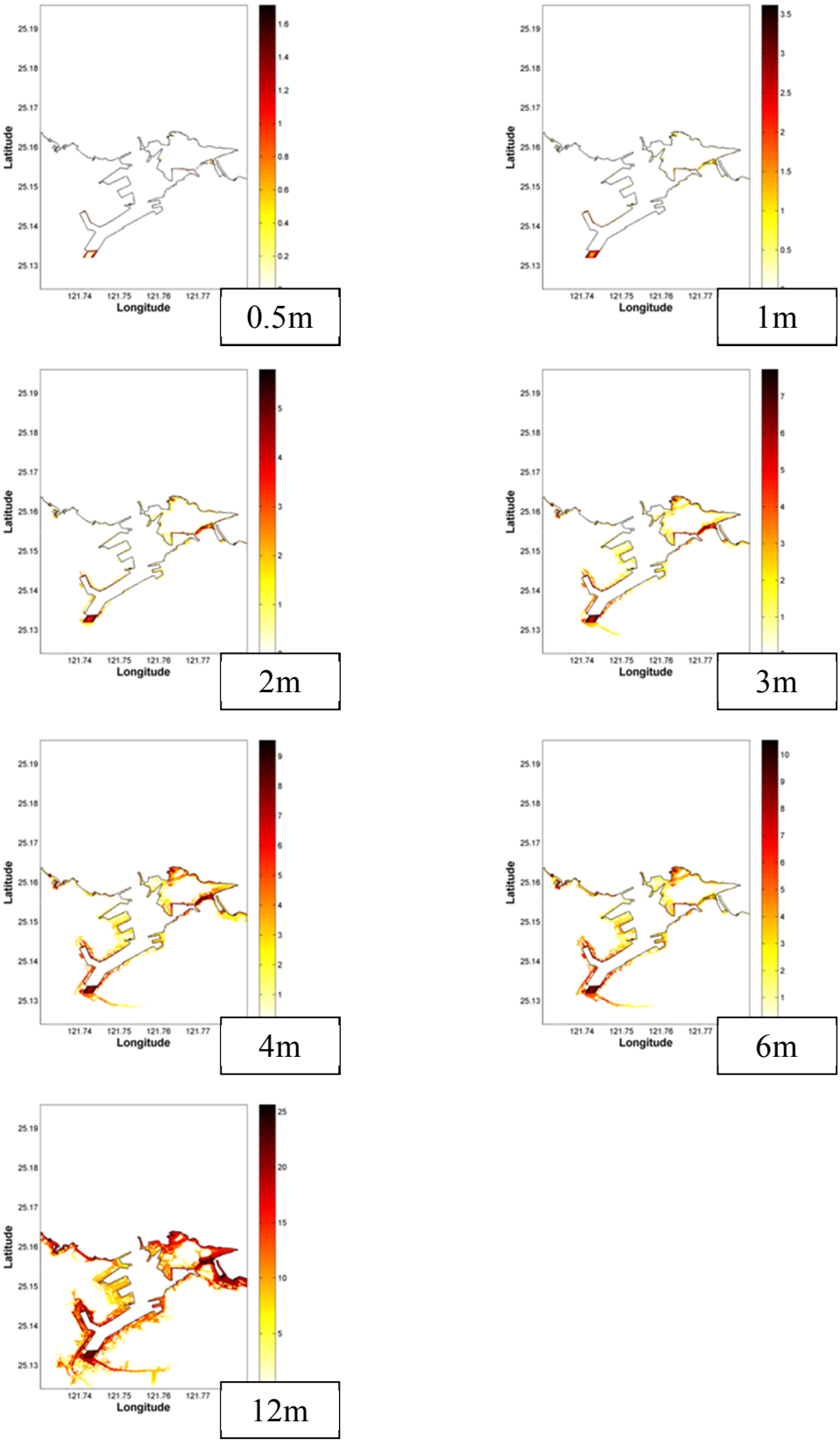


圖 5.77 基隆港不同程度波高溢淹範圍圖

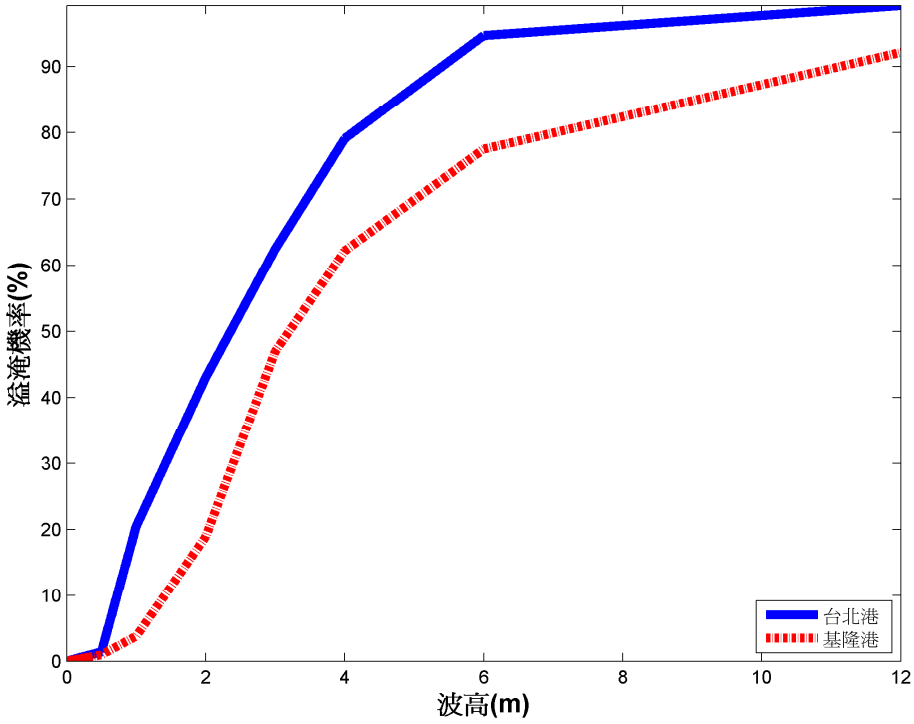


圖 5.78 台北港與基隆港不同波高溢淹機率

5.4.6 台北港、基隆港海嘯風險評估

經由上節所說明之機率式海嘯風險評估方法，將本章所計算引發海嘯之地震期望數乘上不同程度地震海嘯最大波高所對應的溢淹機率，求得台北港未來 50 年與未來 100 年發生引發海嘯之地震且溢淹的機率分別為 2.79%與 5.59%。基隆港未來 50 年與未來 100 年發生引發海嘯之地震且溢淹的機率分別為 3.25%與 6.49%。

5.5 小結

1. 有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等鄰國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度、減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。

2. 傳統海嘯模式模擬時間受網格解析度、海嘯源位置、模擬時間等因素影響,需要相當長之計算時間;本系統應用格林函數之可逆性值，加速海嘯模擬之時間，以提供災防之參考依據，爭取海嘯侵襲時的警報時間。

3. 本年度計畫精進基隆港域及台北港域海嘯數值模式之格林函數，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。

4. 完成海嘯模擬預警即時地震資料擷取系統，並增加日本防災科學技術研究所(NIED)所提供之 F-net 即時地震資料庫，以供與 USGS 與 CWB 資料庫結果比較。

5. 台北港域未來 50 年及 100 年海嘯災害風險，評估結果分別為 2.79%與 5.59%；基隆港域未來 50 年及 100 年海嘯災害風險，評估結果分別為 3.25%與 6.49%,以提供相關單位港灣構造物設計基準之參考。

第六章　臺中港及麥寮港港灣防波堤堤頭沖蝕特性分析

波浪或海流通過海中結構物時，會在結構物臨近底床造成沖蝕，導致結構的破壞甚或傾倒，如港灣防波堤堤頭附近的海底地形，可能因為波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕。國內的港灣防波堤堤頭侵蝕的實例中，以臺中港及雲林離島工業區之麥寮工業港最為明顯。以麥寮工業港為例，其北防波堤堤頭之原設計水深約為-22m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形形成一個約500m× 100m 的深坑，最深處達到 -48m，堤基被沖刷的深度可達26m。由於防波堤堤頭的海底地形侵蝕，嚴重時將危及防波堤堤身及港灣船隻航行的安全。然而造成侵蝕的原因與機制仍未明確，因此急需進一步的觀察、模擬與研析，以期提出有效的防制對策與工法。

6.1 背景資料蒐集與潮波流現場調查

6.1.1 相關文獻

對於沖刷之研究，多以橋墩沖刷為主，主要研究均集中於樁基礎沖刷或海底管線基礎的沖蝕等領域。目前有關沖刷作用在理論分析數學模式的建立上，多將沖刷區取一控制體，應用漂砂連續方程式，配合水流動量原理或對沖刷坑形狀作數學函數之指述，進而求得某流況下之最大沖刷深度之數學模型，相關特定係數則配合水工模型縮尺實驗來決定之，並以因次分析理論來分析實驗結果，進而得到具有工程實用性之經驗公式。

Gokce, T., Sumer, B.M., and Fredsøe J (1994)、Sumer and Fredsøe (1997)、Fredsøe and Sumer (1997)、Sumer and Fredsøe (2000)、Sumer, B.M., Richard J.S. Whitehouse, and Alf Tørum. (2001) 透過試驗研究，提出直立防波堤堤頭附近地形沖刷的特性與機制分析，包括有無堤頭護基保護工、波流交互作用等。上述研究成果彙整如下：

1. 波流作用於防波堤堤頭沖刷 (Sumer and Fredsøe, 1997)：

如圖 6.1 所示，當波浪入射方向與防波堤堤體垂直時，堤側所形成的渦流 (Vortex) 是造成沖刷的主要機制。波浪特性 (或引發的底床流) 與堤體尺寸的關係，可以 KC 參數 ($=U_mT/B$) 表示。KC<1 時，流場並無明顯渦流產生。1<KC<12 時，流場形成堤後尾跡渦流。KC>12 時，除了形成堤後尾跡渦流，堤前亦伴隨馬蹄形渦流 (Horseshoe Vortex)。

如圖 6.2 所示，若波流同時(同向)作用時，掏刷深度與純海流除以波浪引發的底床流速有關聯。當徐爾斯數大於臨界值，底床相對掏刷深度 (掏深和堤寬比) 隨著 KC 數變大而加大；當只有純流速作用時，掏深程度更加劇烈。

2. 波浪作用於有護基保護防波堤堤頭沖刷 (Gokce et al., 1994; Sumer and Fredsøe, 1997)：

當波浪入射方向與防波堤堤體垂直時，掏刷程度較嚴重；波浪引發的底床流或純海流平行防波堤流過時，沿著防波堤的堤址處可能產生沖蝕渠道。若底床加上護基保護工可以減少被沖刷的幅度，護基層越寬保護效果越好。如圖 6.3 所示，當堤頭處未設置護基設施時，護基寬度與堤體寬度比 $L_p/D = 0$，掏刷深度增加最顯著。當護基寬度與堤體寬度比 $L_p/D > 3.6$，堤頭處的掏深幅度可有效抑制。

3. 波浪作用於直立堤與斜坡拋石堤之防波堤堤頭沖刷 (Sumer et al., 2001)：

波浪尖銳度、堤前水深、防波堤坡度是影響沖蝕變化的重要因子，斜坡拋石堤比直立堤更可減緩堤前沖蝕的幅度，如圖 6.4 所示。

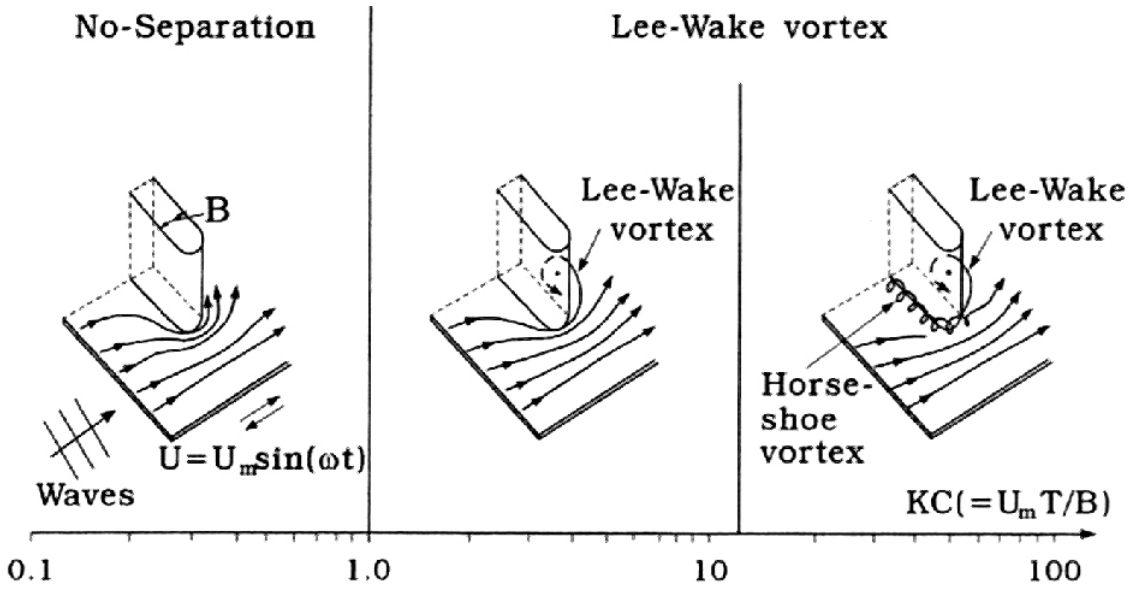


圖 6.1 直立堤堤頭附近水流流況示意圖 (Sumer and Fredsøe, 1997)

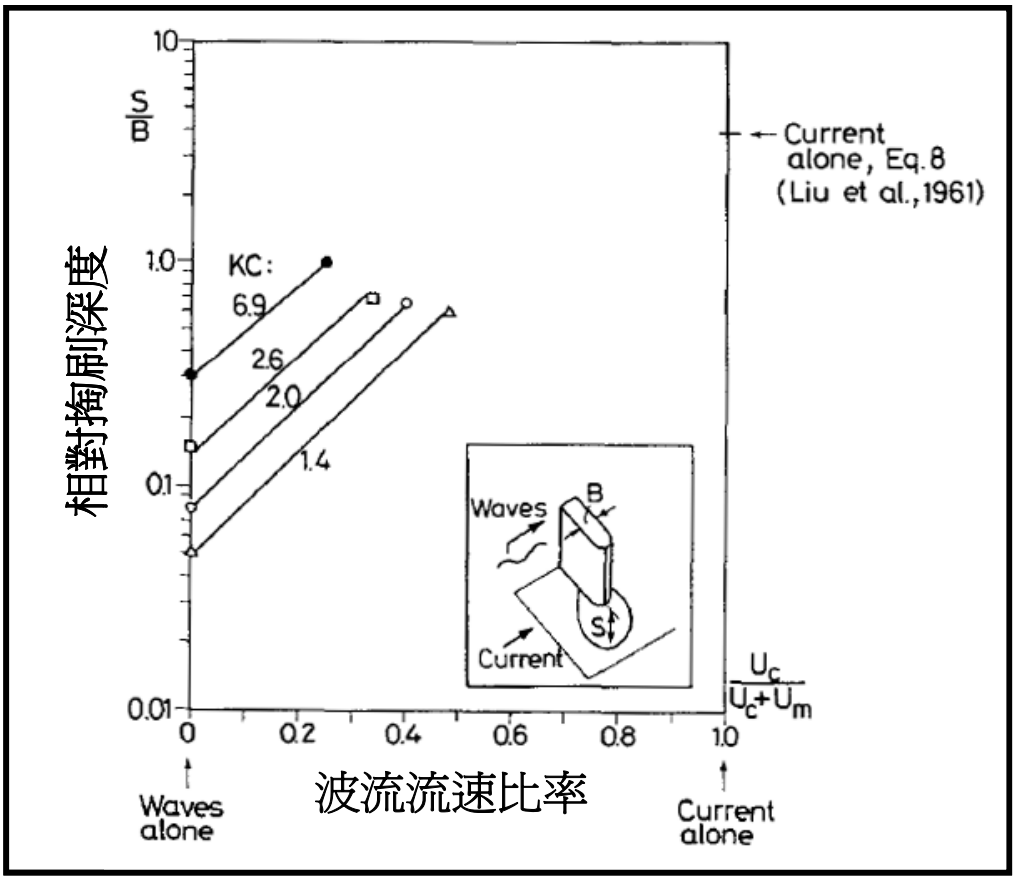


圖 6.2 直立堤堤頭附近波流共生之掏深關係 (Sumer and Fredsøe, 1997)

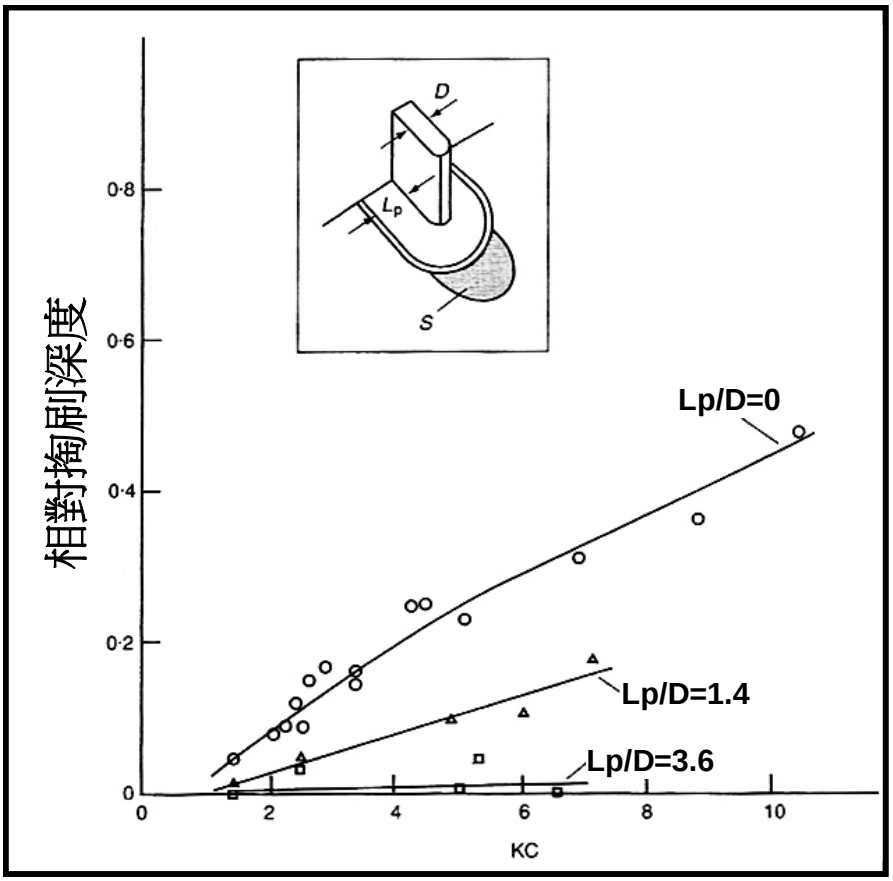


圖 6.3 具護基保護工之直立堤堤頭附近 KC 值與掏深關係 (Gokce et al., 1994、Sumer and Fredsøe, 1997)

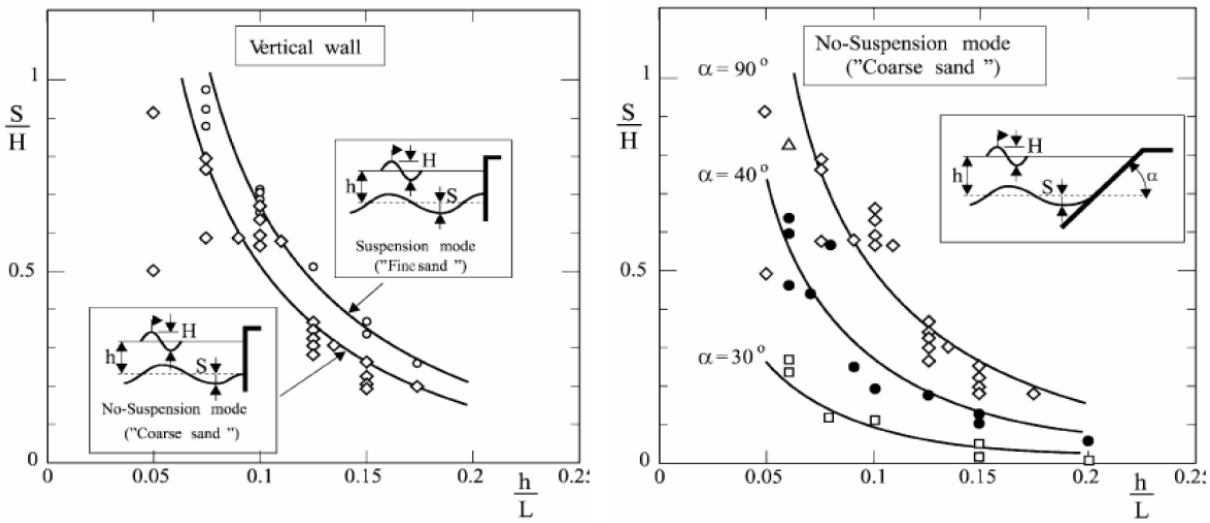


圖 6.4 直立堤與斜坡拋石堤之堤前掏刷關係 (Sumer et al., 2001)

6.1.2 背景資料收集

一、臺中港

臺中港北鄰大甲溪以及大安溪，南鄰大肚溪，臺中港為因應淤積以及航行安全，而延伸北防波堤，2002 年以來受到河川輸沙暴增的因素，於 2002～2005 年之年平均淤沙量為 1994～2002 年 4.9 倍之多，由於漂沙已有部分繞過北防波堤堤頭進到航道，未來勢必影響船隻航行安全。臺中港於民國 65 年完成主體工程，民國 79～84 年先延長北防波堤 850 公尺，民國 89～91 年再延長北防波堤 480 公尺，相關工程施工位置如圖 6.5a 所示。

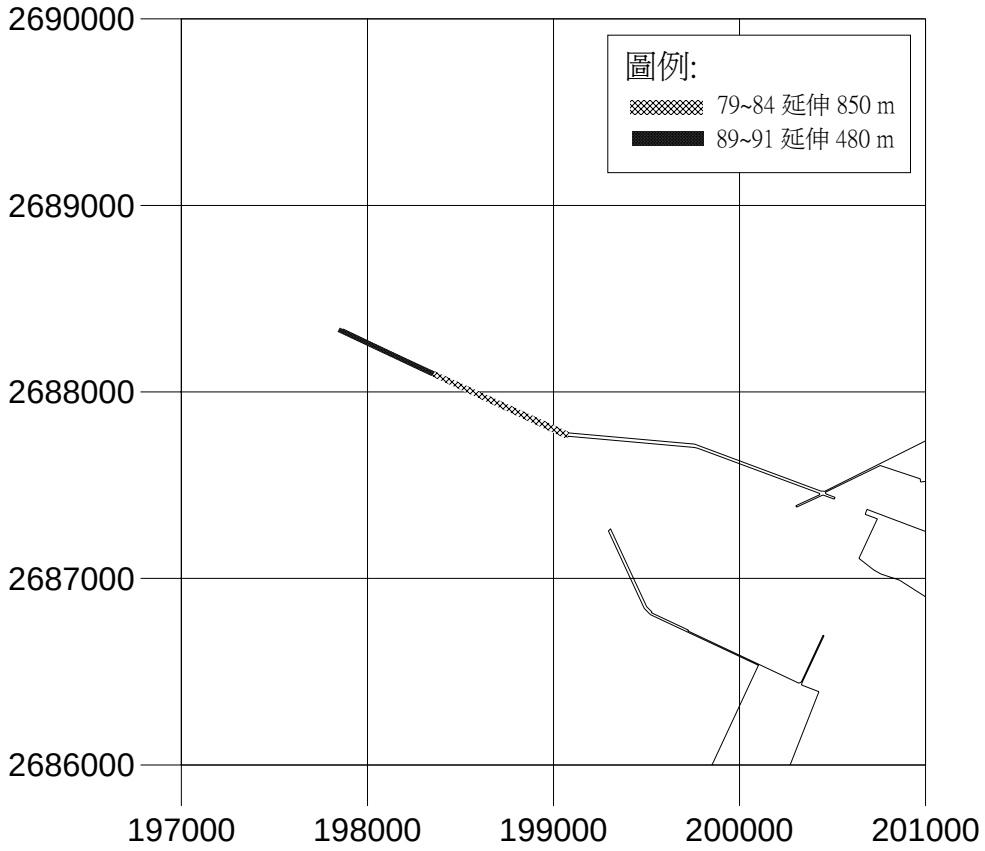


圖 6.5a 臺中港北防波堤延伸歷程圖

臺中港鄰近地區之海、氣、地象觀測調查資料，包括中央氣象局之梧棲氣象觀測站資料、港灣技術研究中心之臺中港海象分析資料、臺中港務局歷年地形水深觀測資料及水利署河川水文輸沙資料等，其

海氣象觀測站相關位置如圖 6.5b 所示。

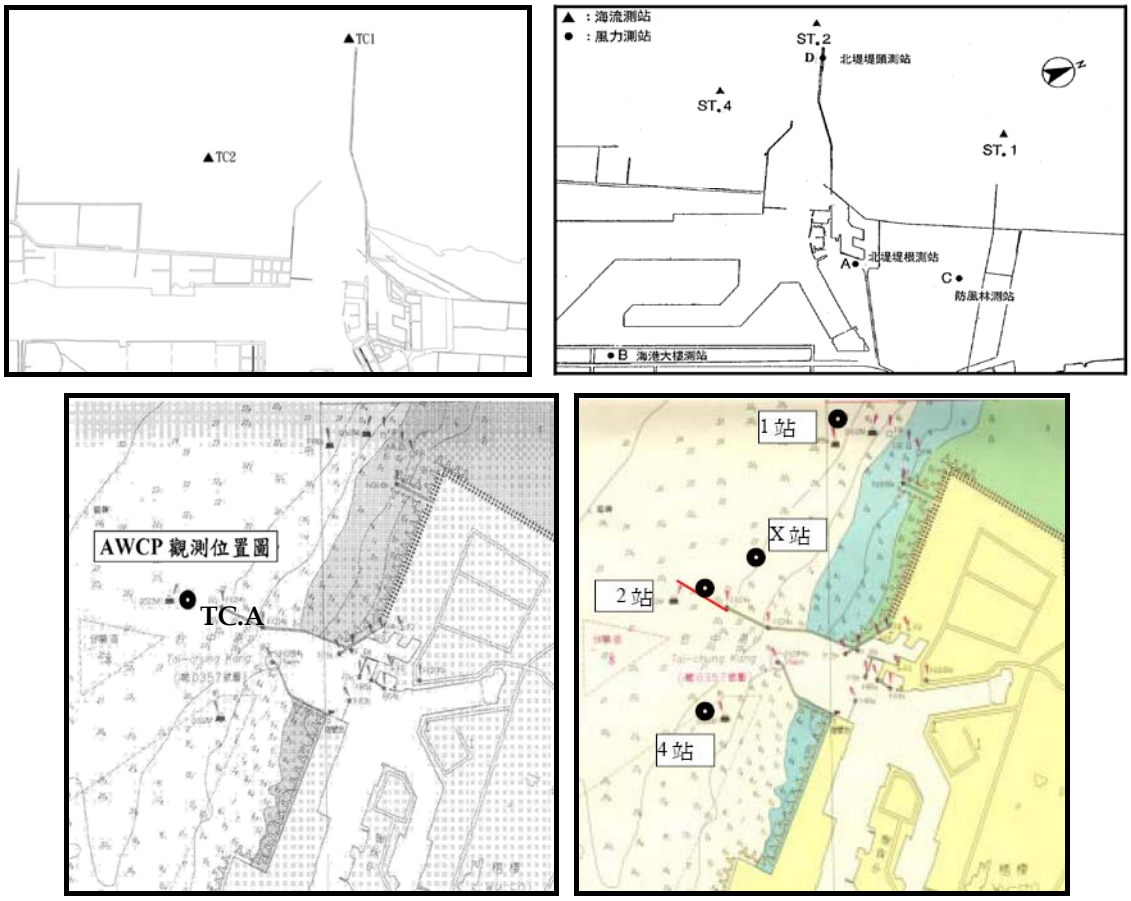


圖 6.5b 臺中港海氣象觀測站位置圖 (交通部運輸研究所，2010)

根據中央氣象局梧棲氣象站 2001 年 1 月~2008 年 2 月之觀測資料，梧棲地區歷年主要風向為 N 向，約佔 36.6%。9 月至翌年 5 月主要風向為 N 向，而 7、8 月份受颱風影響造成風向分佈以 SSE 向為最多。梧棲地區冬季期間主要風向為 N 向，約佔 54.67%，風速小於 12 m/sec 之累積機率約佔 97.65%。夏季期間主要風向為 N 向，約佔 21.83%；其次為 SSE 向，約佔 11.45%，風速小於 12 m/sec 之累積機率約佔 99.21%。

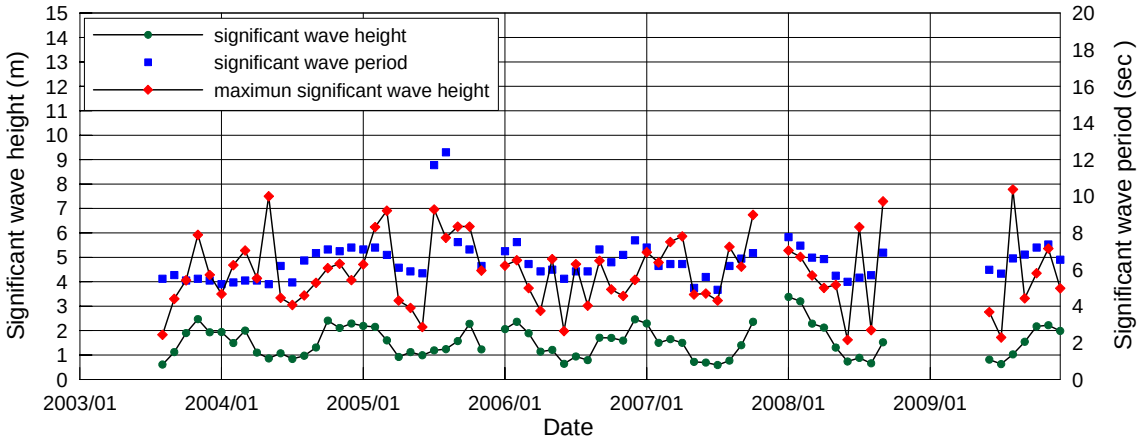
蔡及徐 (2011) 分析自 2003 年 8 月至 2009 年 12 月間波浪觀測資料，歷年之波高、週期及波向的統計結果如表 6-1，夏季波向介於西至北向之比例較大，冬季波向介於北至東向之比例較大。波向由北至東向，約佔觀測的 64.2%；其次為西至北向，約佔觀測的 28.2%。$H_{1/3}$ 小

於 1 m 以下者，約佔歷年觀測的 40.8%；$H_{1/3}$ 介於 1m 至 5 m 之間者，約佔歷年觀測的 58.8%；$H_{1/3}$ 大於 5 m 以上者，約佔觀測的 0.3%。$T_{1/3}$ 集中在 8 秒以內，小於 6 sec 以下者，約佔觀測的 42.3%；介於 6 sec 至 8 sec 之間者，約佔歷年觀測的 48.3%。歷年之平均 $H_{1/3}$ 為 1.54 m；平均 $T_{1/3}$ 為 6.4 sec；歷年最大 $H_{1/3}$ 為 7.78 m，週期為 8.7 sec，發生於 2009 年 8 月 7 日莫拉克 (Morakot) 颱風期間。圖 2.8 為歷年逐月之 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 統計圖，月平均 $H_{1/3}$ 小於 3 m，月平均 $T_{1/3}$ 介於 4.9 sec 至 7.8 sec 之間。

表 6-1 臺中港 2003 至 2009 年示性波高、週期及波向資料統計表

年份	$H_{1/3}$ 平均值 (m)	$T_{1/3}$ 平均值 (sec)	$H_{1/3}$ 最大值 (m)	$H_{1/3}$ 週期 (sec)	$H_{1/3}$ 波向	$H_{1/3}$ <0.5m (%)	$H_{1/3}$ 0.5~1m (%)	$H_{1/3}$ 1~5m (%)	$H_{1/3}$ >5m (%)	$T_{1/3}$ <6sec (%)	$T_{1/3}$ 6~8sec (%)	$T_{1/3}$ 8~10sec (%)	$T_{1/3}$ >10sec (%)
2003	1.61	5.5	5.92	5.6	NNE	16.7	23.4	59.9	0.0	83.0	17.0	0.0	0.0
2004	1.53	6.1	7.50	6.2	WSW	17.7	21.8	60.4	0.1	56.1	35.3	7.6	1.0
2005	1.50	7.6	6.96	8.9	N	12.8	25.8	60.8	0.5	29.6	60.9	7.6	0.5
2006	1.54	6.5	4.93	12.1	N	7.7	26.8	65.6	0.0	32.0	54.3	12.9	0.9
2007	1.35	6.1	6.74	9.8	-	16.4	32.8	50.3	0.6	35.7	57.9	6.1	0.0
2008	1.79	6.4	7.29	10.8	N	11.7	30.4	57.3	0.6	31.8	55.8	11.8	0.5
2009	1.48	6.6	7.78	8.7	-	13.8	27.0	58.8	0.4	28.1	56.8	13.7	1.4
統計值	1.54	6.4	7.78	8.7	-	13.8	26.8	59.0	0.3	42.3	48.3	8.5	0.6

資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 6.6 臺中港 2003~2009 年平均示性波高、週期之月統計

以中央氣象局曾發佈之侵台歷史颱風資料 (1940～2010 年)，篩選通過以臺中港海域 (120.42˚E，24.30˚N) 為中心、颱風中心氣壓小於或等於 970 mb 者，共 114 組對計算區影響較大之颱風進行颱風波浪推算，並利用迴歸分析的方式求得不同重現期之颱風波浪，如表 6-1 所示。

表 6-2 臺中港外海各重現期之颱風波浪推算

重現期	100 年		50 年		25 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	8.0	11.9	7.4	11.4	6.6	10.8	6.4	10.6	5.6	9.9
NNW	7.9	11.8	7.2	11.3	6.4	10.6	6.1	10.4	5.2	9.6
NW	7.2	11.3	6.6	10.8	5.9	10.2	5.7	10.0	4.9	9.3
WNW	6.6	10.8	6.1	10.4	5.5	9.8	5.4	9.8	4.7	9.1
W	6.3	10.5	5.8	10.1	5.3	9.7	5.2	9.6	4.6	9.0
WSW	6.2	10.5	5.8	10.1	5.2	9.6	5.1	9.5	4.5	8.9
SW	5.7	10.0	5.2	9.6	4.7	9.1	4.5	8.9	4.0	8.4

單位：波高 (m)、週期 (sec)；本計畫推算。

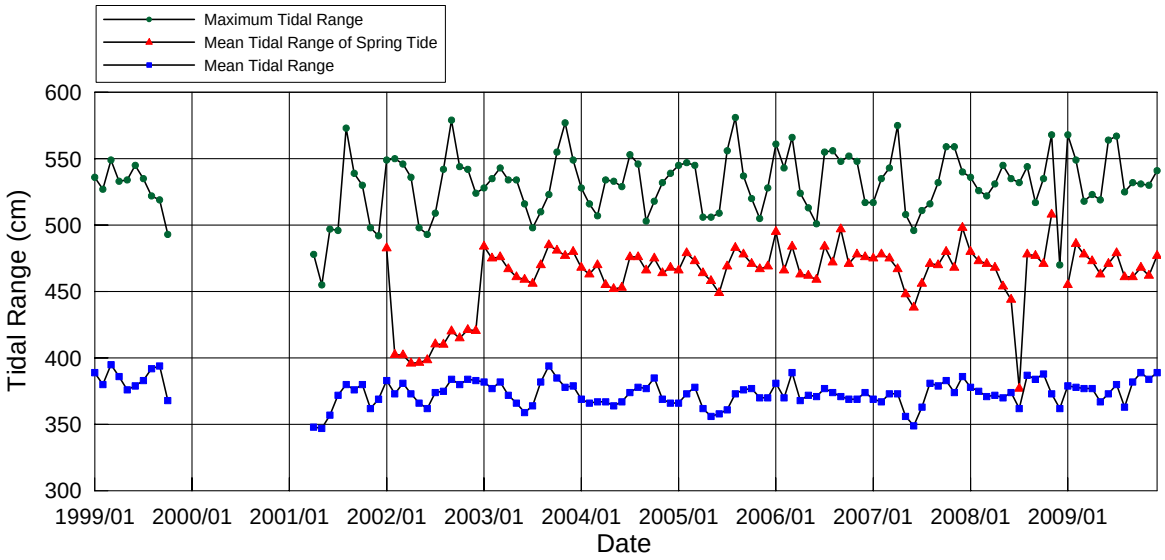
臺中港海岸流況主要由沿岸流、風驅流、潮流及黑潮所組成，港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2009 年 12 月期間的海流觀測資料，歷年海流之流速及流向的統計結果如表 6-3 所示。港區附近主要流向為西至北向，約佔歷年觀測的 56.6%；其次為南至西向，約佔歷年觀測的 22.7%。流速小於 25 cm/sec 以下者，約佔歷年觀測的 25.7%；流速介於 25-50 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 36.2%；流速介於 50-100 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 33.2%；流速大於 100 cm/sec 以上者，約佔歷年觀測的 4.9%。歷年之平均流速為 45.9 cm/sec；最大流速為 248.3 cm/sec，其流向為西向。

表 6-3 臺中港 2003 至 2009 年海流之流速及流向統計表

年份	平均流速 (cm/s)	最大流速		流速 <25cm/s (%)	流速 25~50cm/s (%)	流速 50~100cm/s (%)	流速 >100cm/s (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
		流速 (cm/s)	流向 (˚)								
2003	40.8	153.8	W	34.6	34.9	26.3	4.3	23.7	7.2	18.8	50.3
2004	45.3	173.0	W	27.0	34.3	34.7	4.0	10.2	7.6	19.1	63.1
2005	49.2	248.3	W	19.9	36.9	37.7	5.5	9.3	1.4	16.2	73.2
2006	45.9	171.9	W	26.1	35.4	32.8	5.7	5.4	0.7	26.8	67.1
2007	43.5	193.9	WSW	24.7	38.8	34.2	2.3	10.8	2.1	22.1	64.9
2008	51.3	240.2	WNW	23.0	33.8	35.0	8.1	17.5	19.4	26.1	37.0
2009	45.5	189.0	WNW	24.9	39.4	31.5	4.2	28.1	0.9	30.1	41.0
統計值	45.9	248.3	W	25.7	36.2	33.2	4.9	15.0	5.6	22.7	56.6

資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

臺中海域屬於半日潮，根據中央氣象局自 1999 年 1 月至 2009 年 12 月期間的潮位觀測資料，其中 1999 年 11 月至 2002 年 12 月因碼頭改建暫停潮位觀測，歷年潮位資料之統計結果得知，自 1999 年 2009 年期間，平均潮差為 3.75m，大潮平均潮差為 4.63m，最大潮差為 6.19m。最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計如圖 6.7 所示。



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 6.7 臺中港 1999 至 2009 年之潮位統計分佈圖

二、麥寮工業港

雲林離島工業區自民國 83 年麥寮區動工興建以來，麥寮區北側海堤受到濁水溪砂源的補注，已有淤積現象產生。圖 6.8 為麥寮工業區各區段海堤位置圖，其中西防波堤 I 約於民國 84 年期間完工，南防波堤 II 與西防波堤 II 分別於民國 85 年 6 月與 86 年 3 月完工，鄰近外航道之西防波堤 III 則於民國 87 年 3 月開始逐漸施工延伸至民國 89 年 9 月，外航道內側之南防波堤 I 則於民國 87 年底完工 (成大水工所，2002a)。麥寮工業港其西防波堤 III 堤頭之原設計水深約為 -22m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形形成一個約 500m× 100m 的深坑，最深處達到 -48m，堤基被沖刷的深度可達 26m。成大水工試驗所自民國 80 年起，於雲林縣離島工業區海域進行長期氣象、海象、水文及地形等各項調查工作，其海、氣象觀測站相關位置如圖 6.9 所示。

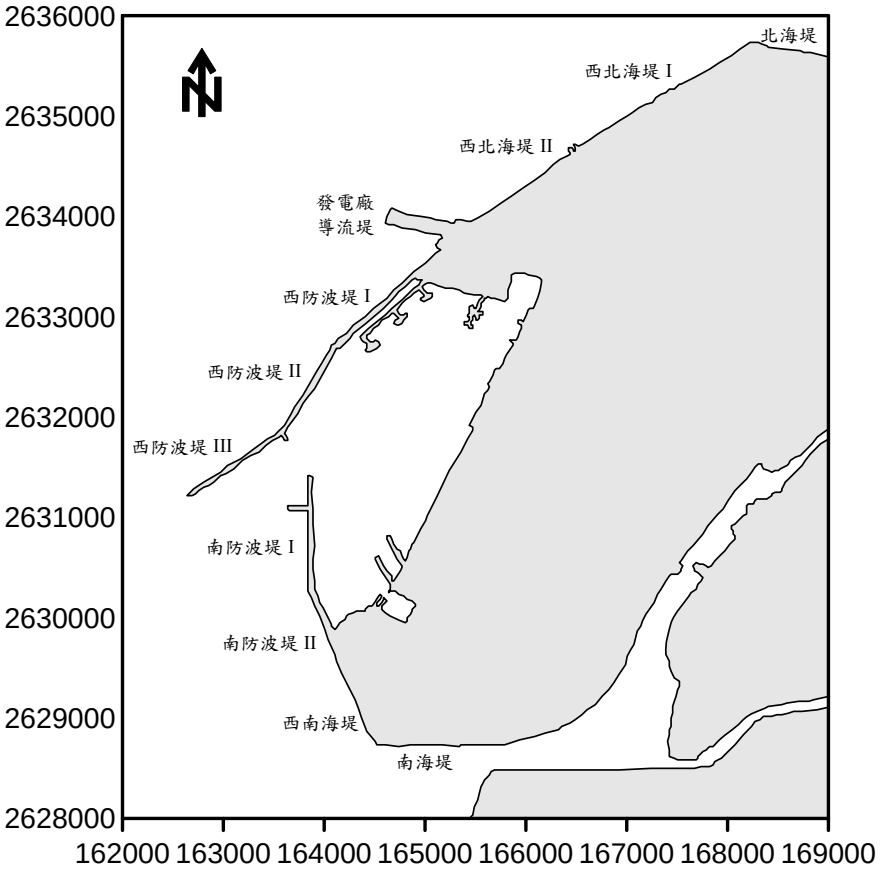


圖 6.8 麥寮工業區各區段海堤位置圖

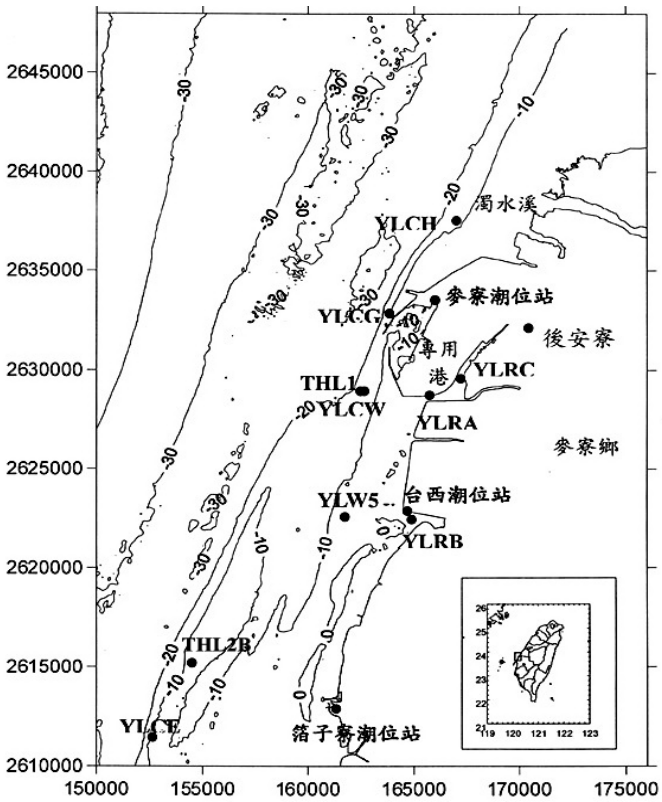


圖 6.9 雲林縣離島工業區海氣象觀測站位置圖 (成大水工所，1999)

根據經濟部水利署麥寮氣象站 2000~2006 年之分析資料，記錄期間平均風速為 5.7 m/sec，最大風速為九月時的 21.5 m/sec，發生於 2005 年 9 月 1 日強烈颱風泰利來襲時；冬季 (10 月至隔年 3 月) 平均風速為 6.24 m/sec，主要風向為 NNE 向；夏季 (4~9 月) 平均風速為 5.11 m/sec，其風向則較為紛紜，4、5 月時風向仍為 NNE 向，但 6、7 月則轉為 S~SW 向，8、9 月轉為 N~NNE 向。本區域全年風向主要為 NNE 向（約 42.24%），其次為 N 向（約 13.05%）及 NE 向（約 9.28%），三個主要風向群發生頻率合佔全年 64.57%以上，顯示麥寮區域之海岸風力以冬季的東北季風最為顯著。

成大水工所 THL1 測站又稱台西測站，位於麥寮工業港西防波堤西南方約 2km 處，水深約為-15m。根據 THL1 測站 1992~2002 年間之波浪統計資料 (成大水工所，2002b)，月平均示性波高及示性週期統計值，結果顯示夏季 (4 月至 9 月) 示性波高大部分小於 0.8 m，平均為 0.54 m，冬季 (10 月至隔年 3 月) 示性波高平均為 1.01 m；夏季之示性

週期平均為 4.96 sec；冬季之平均為 5.61 sec。另由 THL1 測站之風向資料得知，夏季之風向以 NNE 及 SSE 為主，而冬季之風波向則集中在 NNE。而 THL2B 測站又稱四湖測站，位於箔子寮外海 5km 處，水深約-18m。根據 THL2B 測站 2002~2008 年間之波浪統計資料 (成大水工所，2008)，本測站海域波高多集中於 0~1.0 m，約佔全年波浪之 59.99 %，週期多介於 4~6 sec 間；波高 1.0~2.0 m 約佔全年波浪之 27.90 %，週期多介於 5~6 sec 間，全年波高約 87.89%小於 2.0m。另 THL2B 測站海域風向主要集中在 NNE 向 (主要發生在 9 月~翌年 4 月)，約佔全年之 33.25 %；其次為 N 向 (主要發生在 5 月)，約佔全年之 16.40 %；再次為 NE、SSW、S 向，各佔全年之 6.76 %、6.61 %及 6.24 %。

THL1、THL2B 兩站歷年月平均與最大示性波高分佈如圖 6.10 所示，其中夏秋季颱風與東北季風鋒面為主要測得時期。THL1 測站近幾年於麥寮港築堤後，每年最大示性波高皆是於颱風影響下所測得，THL2B 測站年度極大值並不一定測得於颱風影響時期，東北季風冷鋒面所帶來之強風由於延時比颱風時期為長，更益於波浪之成長，因此屢次測得年度極值。另外發生於東北季風時期之颱風可能產生共伴效應，而於兩站同步測得年度最大示性波高，例如 2006 年柯羅莎颱風 (KROSA，警報期間 10/4~10/7，非共伴環流)。

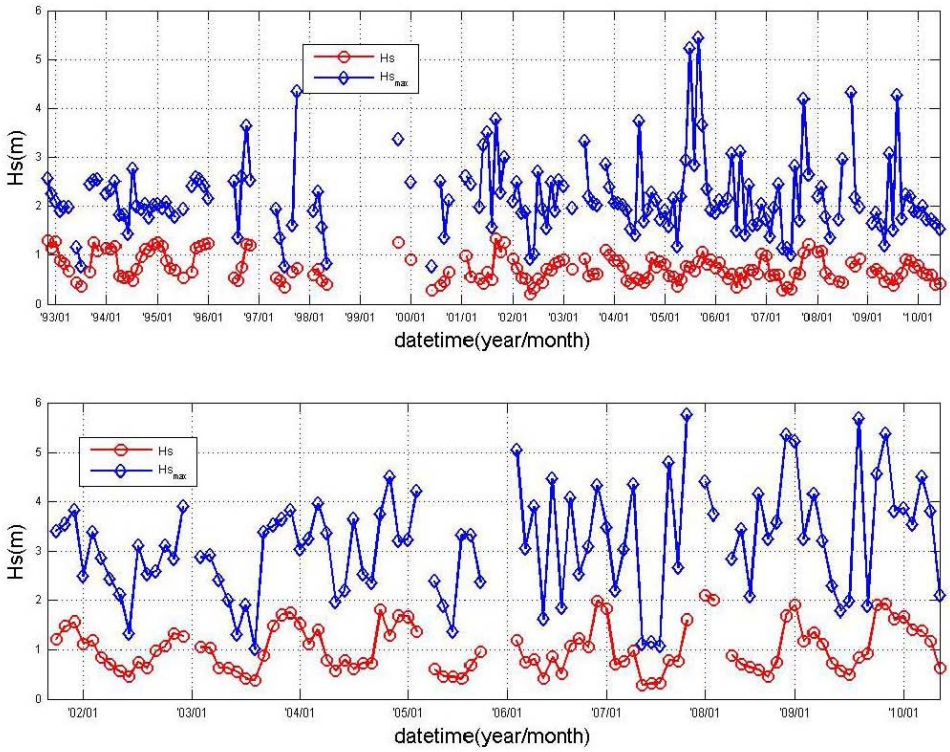


圖 6.10 THL1、THL2B 測站之月平均與月最大示性波高分佈

篩選通過以麥寮港海域 (120.10˚E，23.76˚N) 為中心、所求得不同重現期之颱風波浪，如表 6-4 所示。

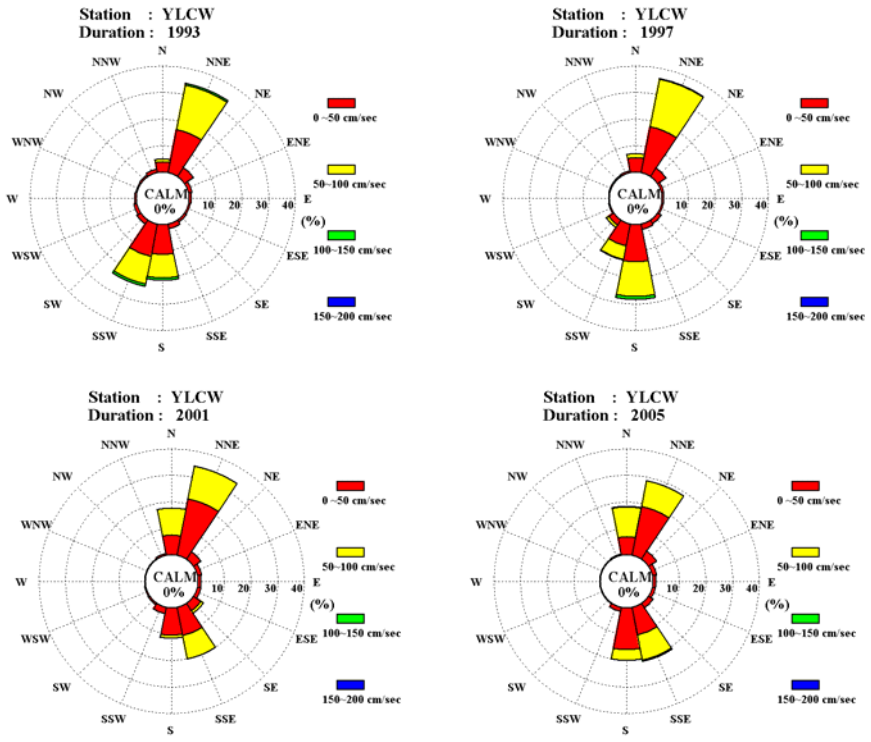
表 6-4 麥寮港外海各重現期之颱風波浪推算

重現期	100 年		50 年		25 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	6.4	10.6	5.9	10.2	5.3	9.7	5.1	9.5	4.5	8.9
NNW	5.6	9.9	5.1	9.5	4.6	9.0	4.4	8.8	3.8	8.2
NW	5.3	9.7	4.9	9.3	4.5	8.9	4.3	8.7	3.8	8.2
WNW	5.7	10.0	5.2	9.6	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
W	5.8	10.1	5.3	9.7	4.9	9.3	4.7	9.1	4.2	8.6
WSW	5.9	10.2	5.4	9.8	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
SW	6.3	10.5	5.6	9.9	4.9	9.3	4.7	9.1	3.9	8.3

單位：波高 (m)、週期 (sec)；本計畫推算。

麥寮港的海流觀測可由 YLCW 測站分析。YLCW 測站自 1993～2006 年之海流玫瑰圖如圖 6.11 所示，麥寮港西南側之流速、流向受海岸線變化，漲潮流向以 NNE 居多，但退潮流向受麥寮西堤向西南延伸

的影響，未築堤前原本 SSW 較多、S 向流次之的狀況，隨著築堤過程中，變成以 S 向為主，而目前築堤完成後再轉為以 SSE 為主的情況。



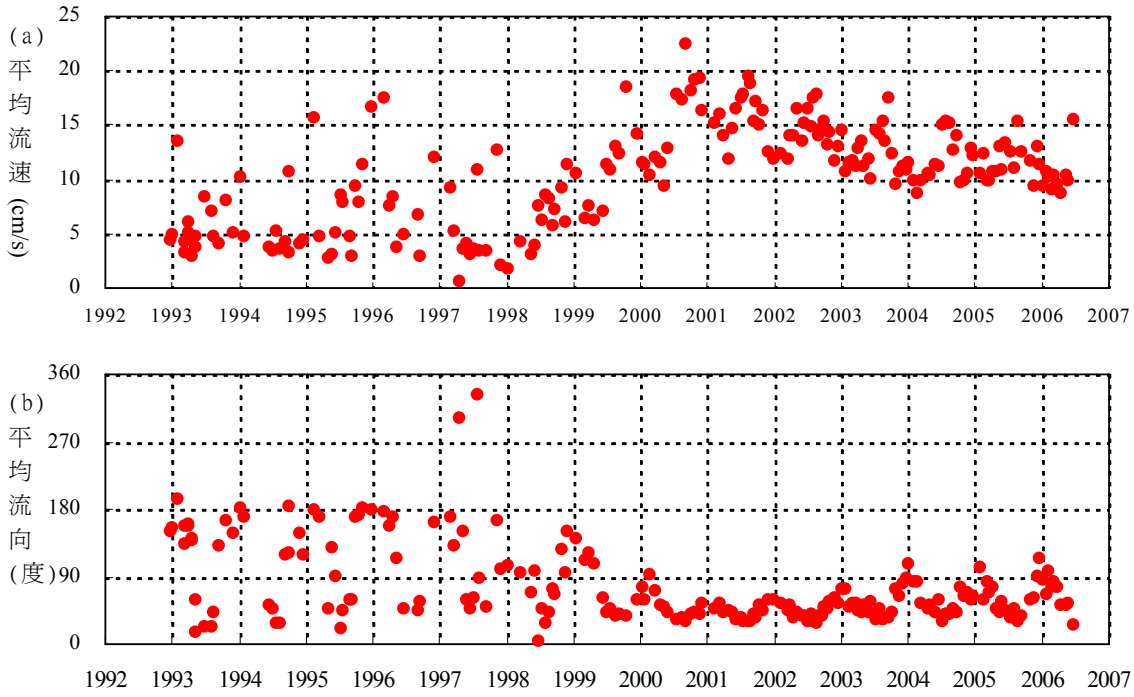
資料來源:「雲林離島式基礎工業區整體環境資源管理評估－96 年度(第 16 年)－(96 年 1 月～96 年 12 月)」第 1 部份第 1 冊，96 年 12 月。

圖 6.11 雲林海域 YLCW 測站歷年之流速流向玫瑰圖

YLCW 測站歷年 (1993～2006 年) 之平均流速與流向變化如圖 6.12 所示。由圖可知，YLCW 測站歷年平均流速之變化情形，自 1999 年後呈現逐年上升之趨勢，直到 2001 後趨於穩定，流速值約為 15 cm/sec；而且自 1999 年後海流之平均流向由東北季風期往南且非東北季風期往東北之趨勢，改變為長年往東北東方向。

而雲林麥寮海域在 1998 年至 2002 年期間之地形水深資料顯示，海域 15m 等深線之走向約在 15 度左右，漲潮時海流沿岸北上，流向以北北東居多，並不受港口興建之影響，但退潮時段，海流由北而下，未築堤前原本南南西較多 (即沿海岸地形等深線而南下，與漲潮流對稱)，但在圍堤興建港口等海岸結構物後，變成以南向為主，築堤完成後轉為以南南東為主，由於漲退潮流向不對稱，形成殘差流，其平均流向指向東北 ~東北東之間。此外，西防波堤結構物自 2002 年興建完

成後，至 2007 年之期間，麥寮港與新興區間之海域地形變化，其等深線也逐年向外移動，即該海域有淤積情形，在此一情況下，其漲退潮流況也隨之變化，其中漲潮流向較不受影響，流向仍以北北東居多，但退潮流向在 2006 年以後逐漸變成以南向為主，由於漲退潮流向之不對稱，也同樣形成殘差流，但其值因角度增加，使其淨流流速有逐年遞減之趨勢，因此推估淨流流況之變化，除受麥寮港防波堤結構物影響外，也與麥寮港與新興區間之海域地形歷年來之變化有關，也就是說西防波堤結構物的興建，為影響海域流場特性原因之一。此外流速於築堤後有趨於穩定之趨勢，然極端條件在近 3 年於東北季風期間仍可測得局部較大流速 (賴等人，2010)。



資料來源:「雲林離島式基礎工業區整體環境資源管理評估－96 年度(第 16 年)－(96 年 1 月～96 年 12 月)」第 1 部份第 1 冊，96 年 12 月。

圖 6.12 雲林海域 YLCW 測站歷年之平均流速與流向變化圖

雲林海域屬於半日潮，雲林縣海岸共設有三潮位站，包括麥寮站、三條崙站 (目前已停測) 以及箔子寮站。其中麥寮及箔子寮潮位站隸屬經濟部工業局，委託成功大學水工所進行潮位監測，目前仍持續監測中，前者位於麥寮工業港之港勤船渠，後者位於箔子寮漁港內。三條崙潮位站則隸屬經濟部水利署，位於三條崙漁港內。箔子寮、三條崙

及麥寮三個潮位站之歷年潮位統計結果，如表 6-5 所示 (以基隆中潮位系統為高程基準)。結果顯示，麥寮潮位站之平均潮差為 2.70 m，大潮平均潮差為 3.72 m，均為三站最大者。其次為三條崙潮位站，平均潮差為 2.22 m，大潮平均潮差為 3.27 m。

表 6-5 雲林海域各潮位站之潮位統計值

測站名稱		箔 子 寮	三 條 崙	麥 寮
潮 位		2002~2009 年	1983~1990 年	1998~2008 年
最高高潮位	(HHWL)	+2.34	+2.43	+2.56
大潮平均高潮位	(HWOST)	N/A	+1.79	+2.10
平均高潮位	(MHWL)	+1.51	+1.42	+1.74
平均潮位	(MWL)	+0.39	+0.30	+0.35
平均低潮位	(MLWL)	-0.63	-0.80	-0.96
大潮平均低潮位	(LWOST)	N/A	-1.48	-1.62
最低低潮位	(LLWL)	-2.84	-2.42	-2.09
平均潮差	(MR)	2.14	2.22	2.70
大潮平均潮差	(STR)	N/A	3.27	3.72

資料來源：三條崙－海岸水文氣象年報，麥寮、箔子寮－成大水工試驗所；潮位單位：米；以基隆中潮位系統為高程基準。

6.1.3 潮波流現場調查

一、臺中港

臺中港調查作業位置近於大甲溪與烏溪出海口處各有一監測點，分別標號 DK (座標 TWD97：E 120°31’8.1”、N 24°19’57.8”) 與 WU (座標 TWD97：E 120°25’30.3”、N 24°13’6.8”)，相關位置如圖 6.13 所示。潮波流儀放置約在水深 15~18 公尺處，可同時觀測海流、潮位、波浪與波向。烏溪 WU 測點觀測日期自 100 年 04 月 29 日至 08 月 02 日止共 96 天。大甲溪 DK 測點觀測日期自 100 年 04 月 29 日至 06 月 19 日止共 52 天。



圖 6.13 臺中海域電磁式海流儀施放點位示意圖

臺中海域 (測點 DK 與 WU) 的潮波流觀測儀器為美國 Inter-Ocean 公司生產之 S4ADW 電磁式海流儀，藉由計量流體移動時的電磁場變化，轉換為海流速度與流向，波浪與水位資料則由水壓力感測計取得。儀器取樣頻率 2Hz，每小時記錄前 9 分鐘。流速解析度為 0.3~3.5mm/s，準確度為讀數值之 2%±10mm/s。水位資料的解析度為 4mm，精度可達 0.1%。此外，港灣技術研究中心自民國 92 年起於臺中港北防波堤堤頭西側 150m、水深 25m 處 (E 120°28’40”、N 24°18’10”)，安裝挪威 NORTEK 波浪與剖面海流即時傳送系統 (AWCP)，測站編號 TC)。本計畫另向港研中心申請取得此測站於 2011 年 5 月 1 日至 7 月 31 日的海流與波浪實測資料，進行分析與驗證比較。

潮汐資料是由壓力式感應器轉換水位變化，臺中測點的儀器，WU、DK 測點分別安置於水深 15m 與 18m 處。DK 測站共施測 52 天，水位時序變化分月繪圖如圖 6.14 所示，平均水深為 13.74m，記錄最大水深 16.83m 發生於 5 月 28 日 7 時，最小水深 10.68m 發生於 5 月 17 日 16 時，最大潮差為 5.13m。經調合分析後顯示，主要分潮為 M2，

振幅為 1.85m，次要分潮 S2 振幅 0.39m，以美國 (Dietrich, 1980) 潮型因子 (form factor，$F=(a_{K1}+a_{O1})/(a_{M2}+a_{S2})$) 進行分析 F 值為 0.24，屬於半日潮型。WU 測站的水位時序變化分月繪圖如圖 6.15 所示。施測 96 日期間的平均水深為 16.65m，5 月 28 日 8 時，記錄最大水深 18.96m，5 月 17 日 17 時記錄最小水深 13.85m，最大潮差 5.03m。調合分析顯示，主要分潮為 M2，振幅為 1.74m，次要分潮 S2 振幅 0.37m。F 值為 0.24，屬於半日潮型。

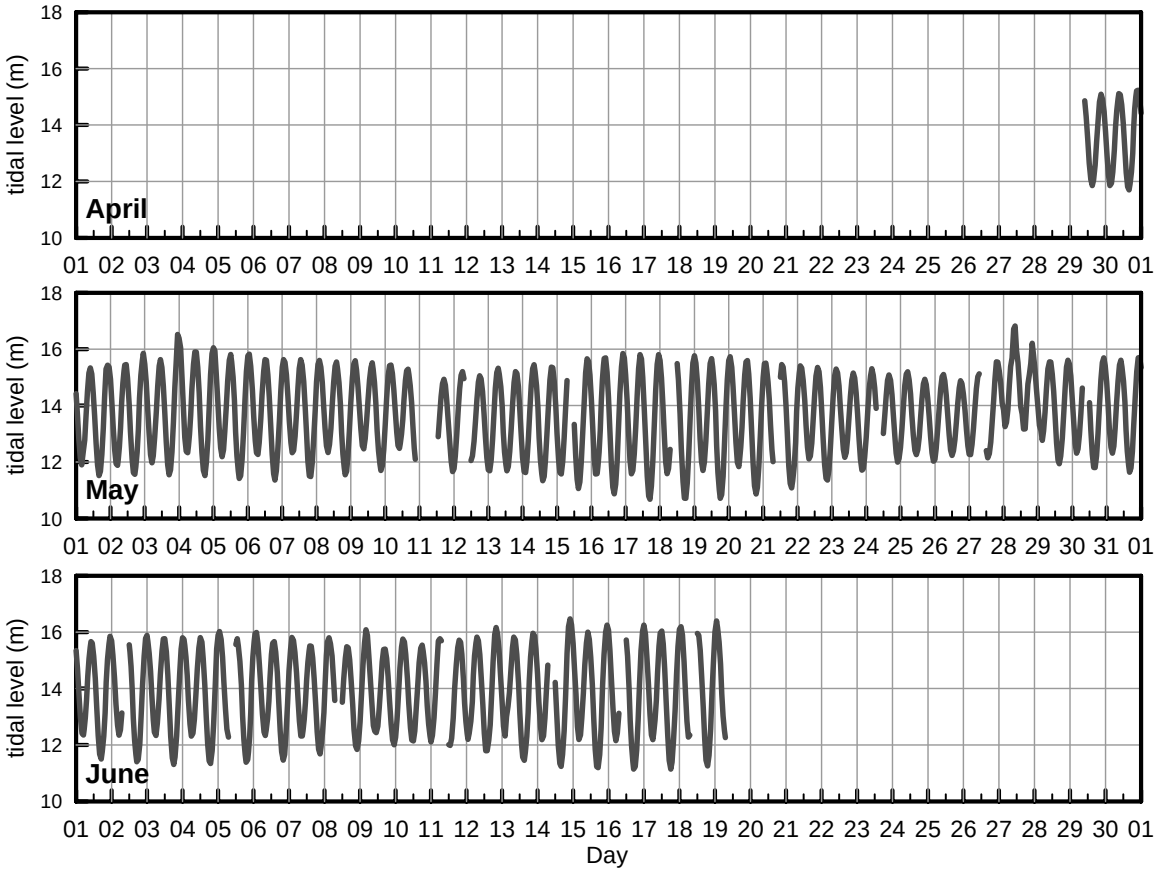


圖 6.14 臺中 DK 測站，2011 年 4/29~6/19 實測水位變化圖

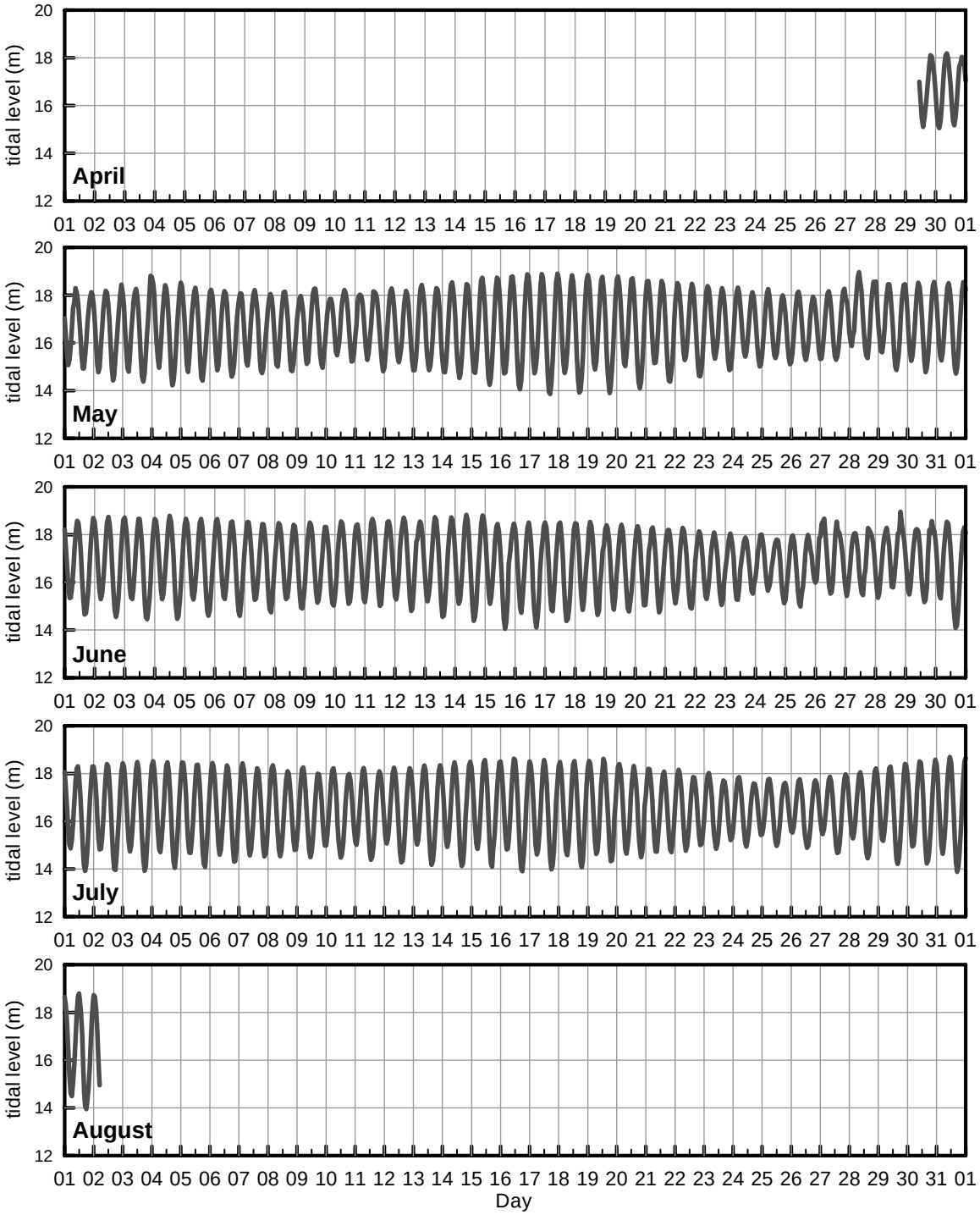


圖 6.15 臺中 WU 測站，2011 年 4/29~8/2 實測水位變化圖

臺中 WU、DK 觀測點設定每小時記錄前 9 分鐘，記錄頻率為 2Hz，以 9 分鐘資料平均值代表該小時之海流資料。臺中 WU 測站主要流向為 NE、ENE 與 N 方向，逐時流速最大值為 60.25cm/s，流向為 NE 方向，發生於 7 月 4 日 20 時。臺中 DK 測站逐時流速最大值為 49.62cm/s，

流向為 SW，發生於 5 月 28 日 8 時。主要流向 S 方位內，測得逐時流速最大值為 5 月 01 日 21 時的 27.90cm/s。臺中 TC 測站資料中，上層主要流向 N，逐時流速最大值為 95.23cm/s、對應方向為 WSW；下層主要流向則為 NNE，逐時流速最大值為 84.31cm/s、對應方向為 WSW。而統計資料之海流玫瑰圖，如圖 6.16 與圖 6.17 所示。臺中 WU 觀測點的流向分佈集中於 NE 至 ENE 方位，但在 6 月份則呈現大多數流像介於 W 至 N 方向，流向受漲、退潮影響不明顯。臺中 DK 觀測點流向呈現南北分佈，漲潮時主要流向為 N，退潮時則為 S 方向。南北方向的流速皆小於 25cm/s，可視為潮流驅動機制的流速。海流玫瑰圖，如圖 6-17 所示。TC 測站資料由上至下層的主要流向分佈，從方向 N 偏轉至 NNE，而流速位於 25~75cm/sec 區間者上下兩層皆超過全筆數 70%的比率，而流速大於 75cm/s 者，上層大於下層發生的機率超過 2 倍。

若近岸區域的海底地形平緩、海岸線平直，海流主要驅動機制多為潮汐、鄰域大尺度海流及海面風切應力。在各種驅動機制間交互作用而衍生的流況改變量是微小的假設下，觀測到的海流可視為成份驅動機制的線性疊加 (Csanady，1973)，即

$$u = \bar{u} + u_T + u_W + u' \quad \text{.....(6.1)}$$

其中 $\bar{u}$ 表示為平均流，u_T 表示為潮流，u_W 表示為風驅流，u' 代表高頻的流速擾動、紊流項及觀測過程的雜訊或誤差。要將 u' 從中分離，有相當的難度，因此分析方法將式(6.1)改寫為

$$u = \bar{u} + u_T + u'_W, \text{ where } u'_W = u_w + u' \quad \text{.....(6.2)}$$

即將高頻的成份納入風驅流之中，再依詹森等人(1997)所建議的方法，分解式(6.2)中的海流驅動機制成份。平均流的原定義為每月流速記錄的時間平均，但受限於資料長度不均等，某些月份的資料筆數過少，因此使用資料時間長度的平均值做為平均流，即

$$\bar{u} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_n \quad \text{.....(6.3)}$$

N 表示單一測點的資料總長度，u_n 表示對應的流速紀錄。WU 位置的平均流速為 19.21cm/s，平均流向 143°，DK 位置平均流速 10.99cm/s，平均流向 140°。兩觀測點平均流速差異達 8.22cm/s，但平均流向相近。

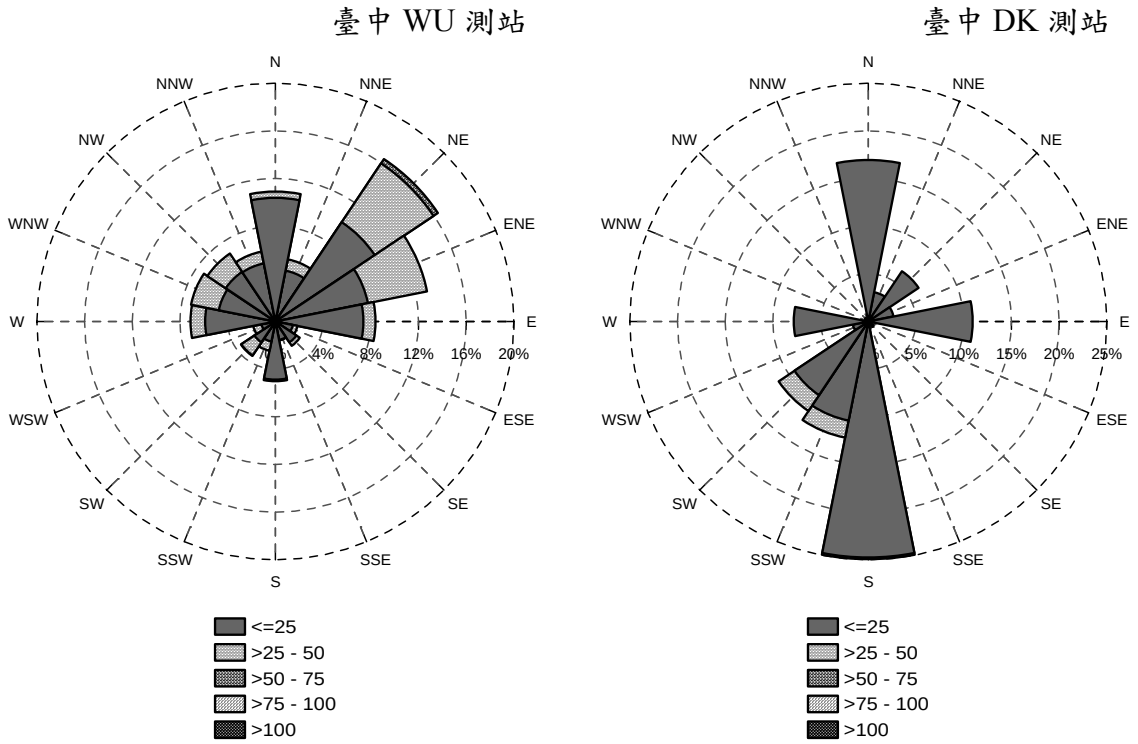
使用快速傅立葉轉換作為數值濾波器，剔除海流頻率小於 1/36 cph (cycle per hour)及大於 1/3 cph 的傅立葉常數項，並由反快速傅立葉轉換，將濾波後的頻域資料轉換回時間序列，視為潮流成份。剩餘的海流成份則歸類為風驅流。依其流速流向拆成直角座標系統的分量，即

$$U = u \cdot \cos\theta \quad \text{.....(6.4)}$$

$$V = u \cdot \sin\theta \quad \text{.....(6.5)}$$

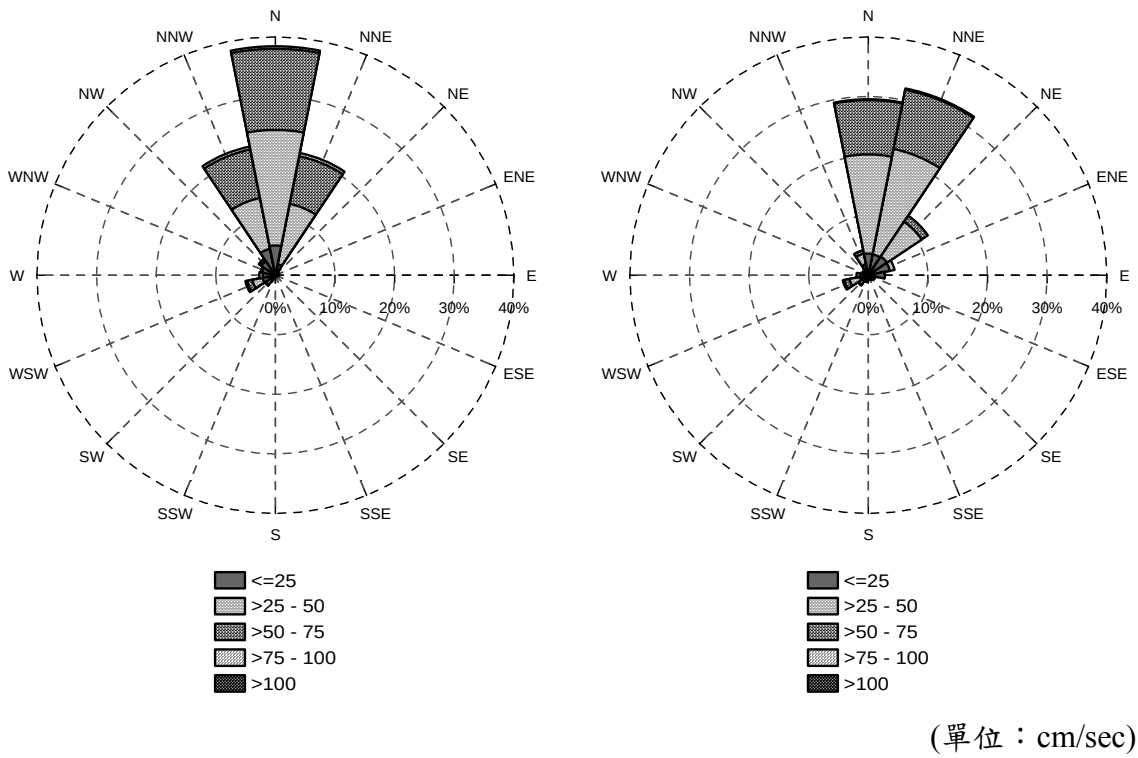
式(6.4)、(6.5)中θ代表海流流向與沿岸之夾角。以 FFT 方法計算 U、V 分量各頻率的傅立葉常數，並以最大能量無因次化繪製海流能譜。

WU 測站海流無因次能譜圖如圖 6.18 所示。主要峰值在半日週期頻率 0.08 cph 處，V 分量在全日週期 0.04 cph 處有次峰值。高頻 0.92 cph 處存在等同於頻率 0.08 cph 的分量，表示此處潮流與風驅流的數量級大小相當。U、V 分量濾除非潮流頻率的反快速傅立葉轉換如圖 6.19 所示。WU 處的潮流振幅為 10~39cm/s，而風驅流振幅平均約 18cm/s，最大達 44cm/s，發生於 5 月 28 日，推測為 2011 年強烈颱風桑達 (SONGDA) 的影響。DK 測站之結果則如圖 6.20 所示。U、V 分量主要峰值在 0.04 cph 處，次峰值皆在 0.08 cph 處。此測點亦有大能量高頻 (0.95 cph) 成份存在。反傅立葉的時間序列如圖 6.21 所示。潮流成份 U 分量的平均振幅為 19cm/s，V 分量的平均振幅則為 14cm/s，風驅流成份 U 分量平均振幅 12cm/s，V 分量平均振幅 5cm/s。與 WU 觀測點一樣，DK 測站在 5/28 日亦記錄了 35cm/s 的風驅流振幅最大值。臺中港 TC 資料之結果如圖 6.22 與圖 6.23 所示。各層 U 分量之主峰值約在 0.04cph，V 分量則在 0.08cph。反傅立葉的時間序列如 6.24 與圖 6.25 所示。U 分量因為流向超過 80%集中於 NNW 至 NNE，形成此方向的平均流速遠大於零(28.02cm/s)，相對而言 V 分量變小。



(單位：cm/sec)

圖 6.16 臺中港 WU、DK 測站之海流玫瑰圖



(單位：cm/sec)

圖 6.17 臺中港 TC 測站上、下層之海流玫瑰圖

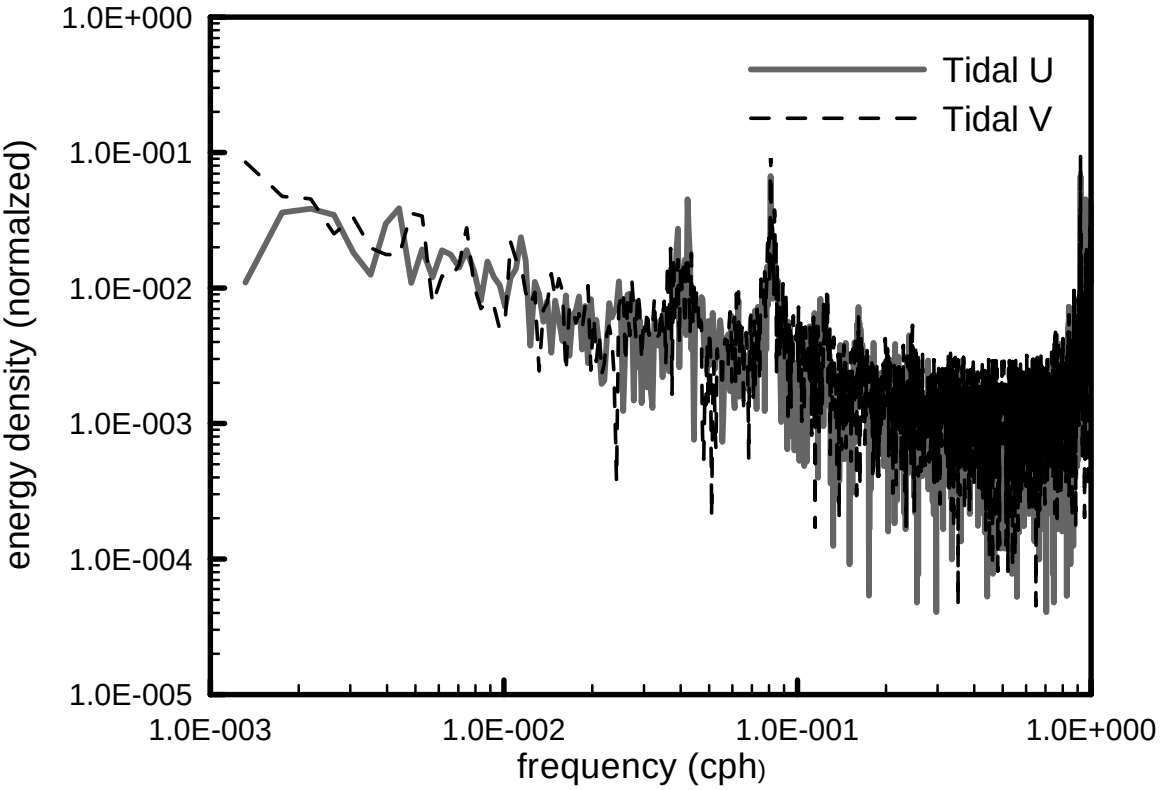


圖 6.18 臺中 WU 測站 U、V 分量海流無因次化能譜圖

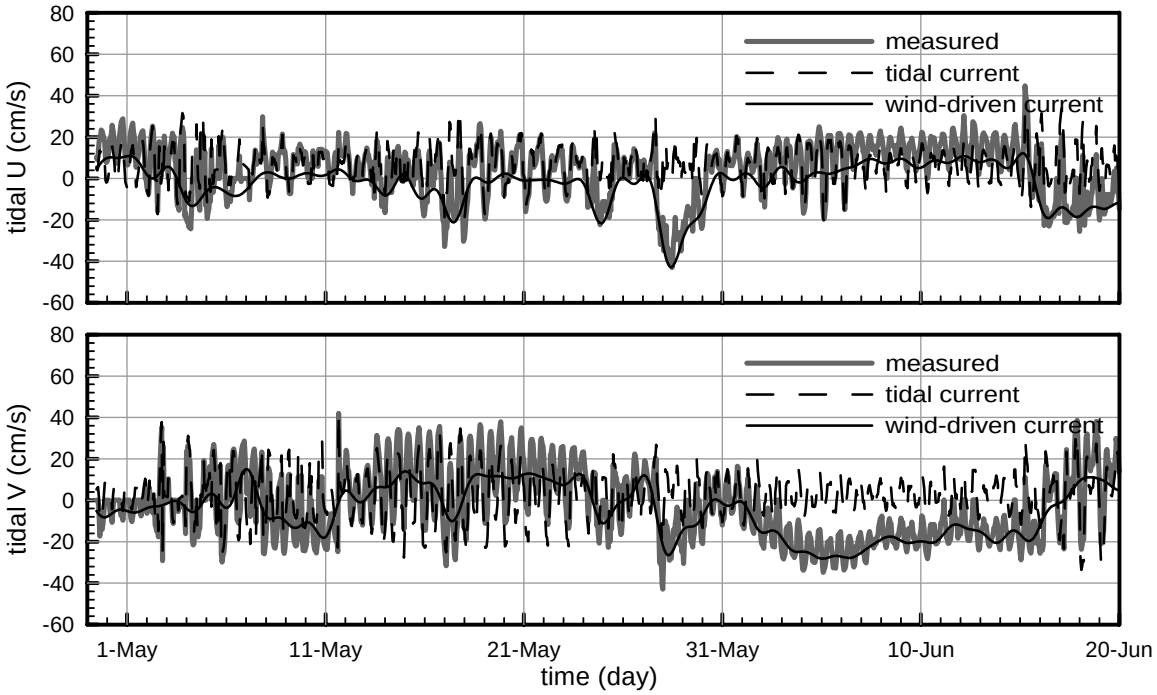


圖 6.19 臺中 WU 測站 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

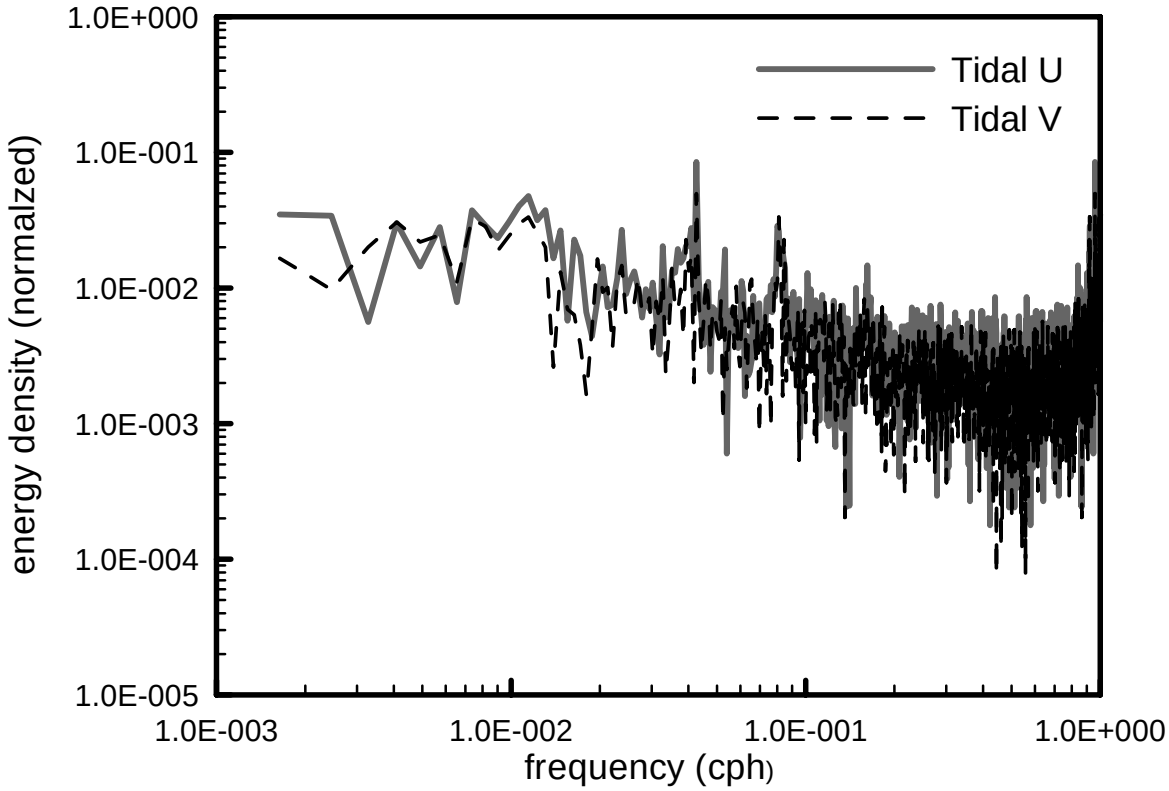


圖 6.20 臺中 DK 測站 U、V 分量海流無因次化能譜圖

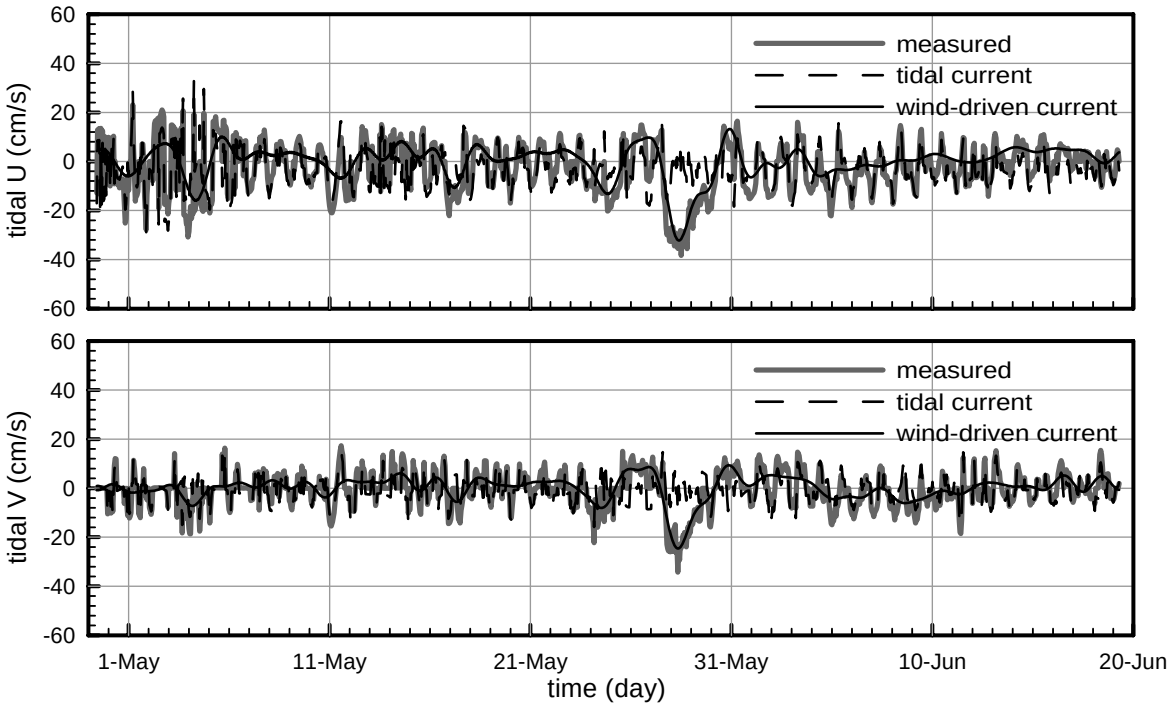


圖 6.21 臺中 DK 測站 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

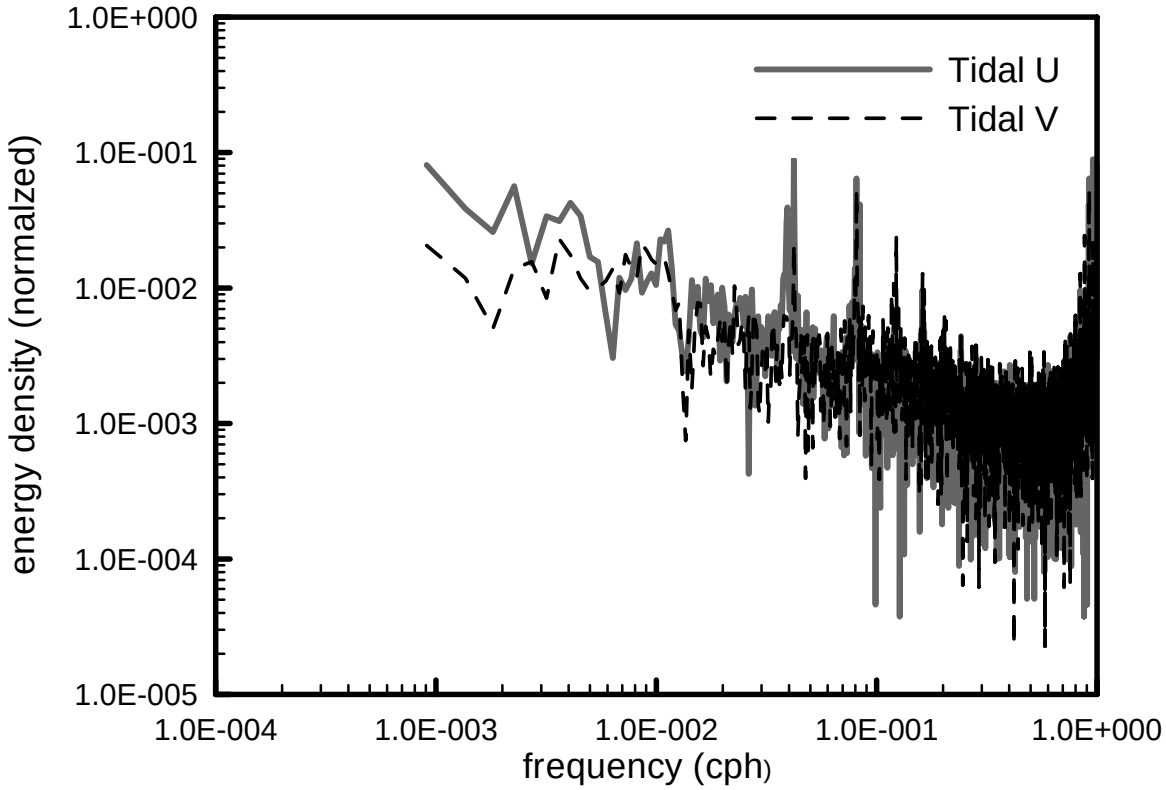


圖 6.22 臺中 TC 測站上層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

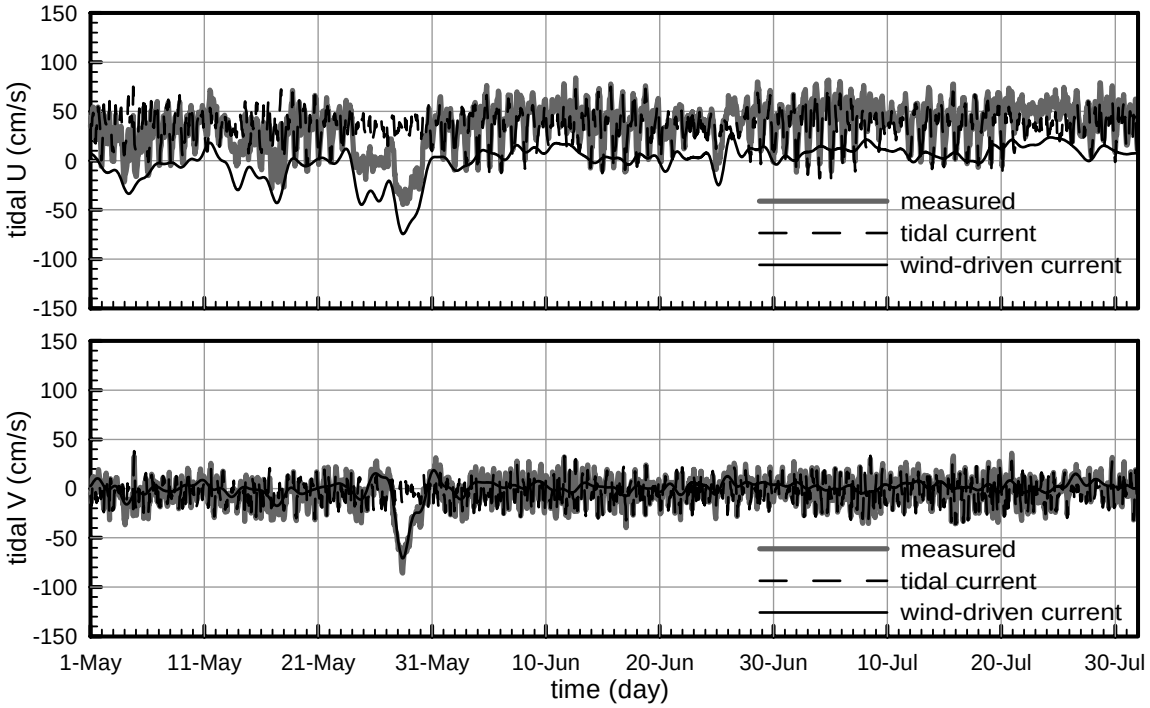


圖 6.23 臺中 TC 測站上層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

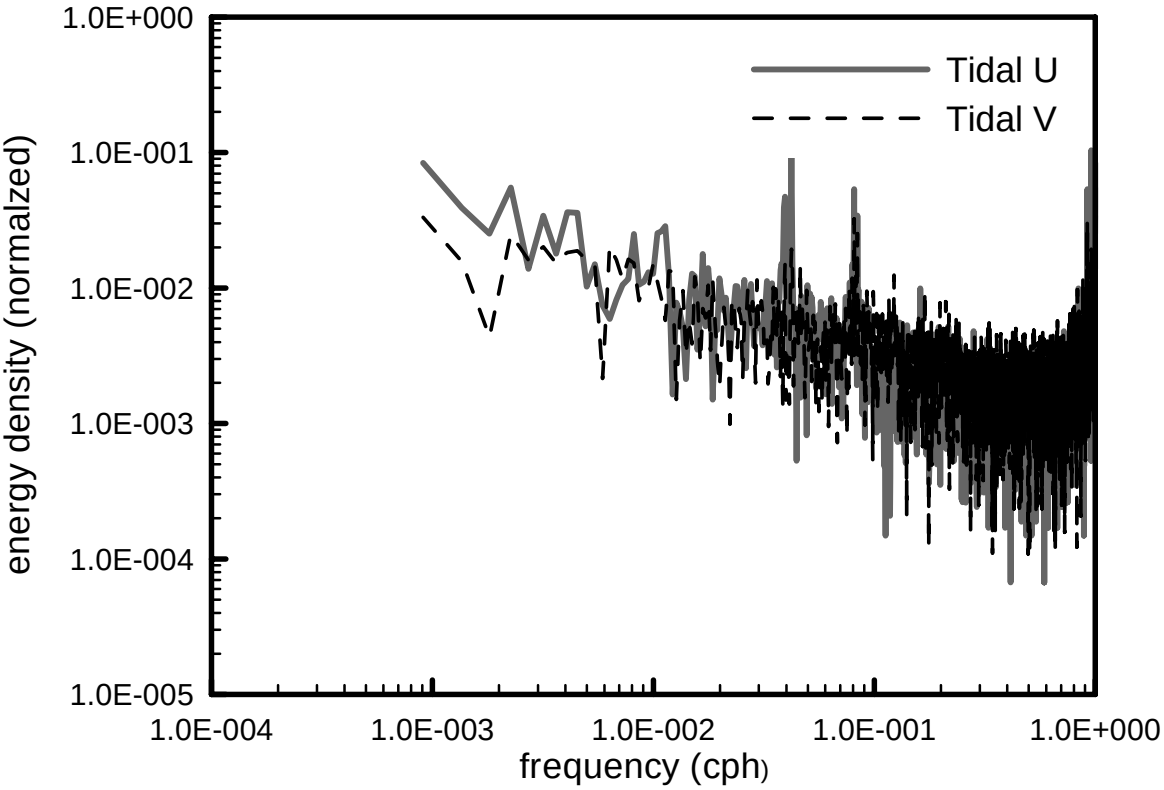


圖 6.24 臺中 TC 測站下層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

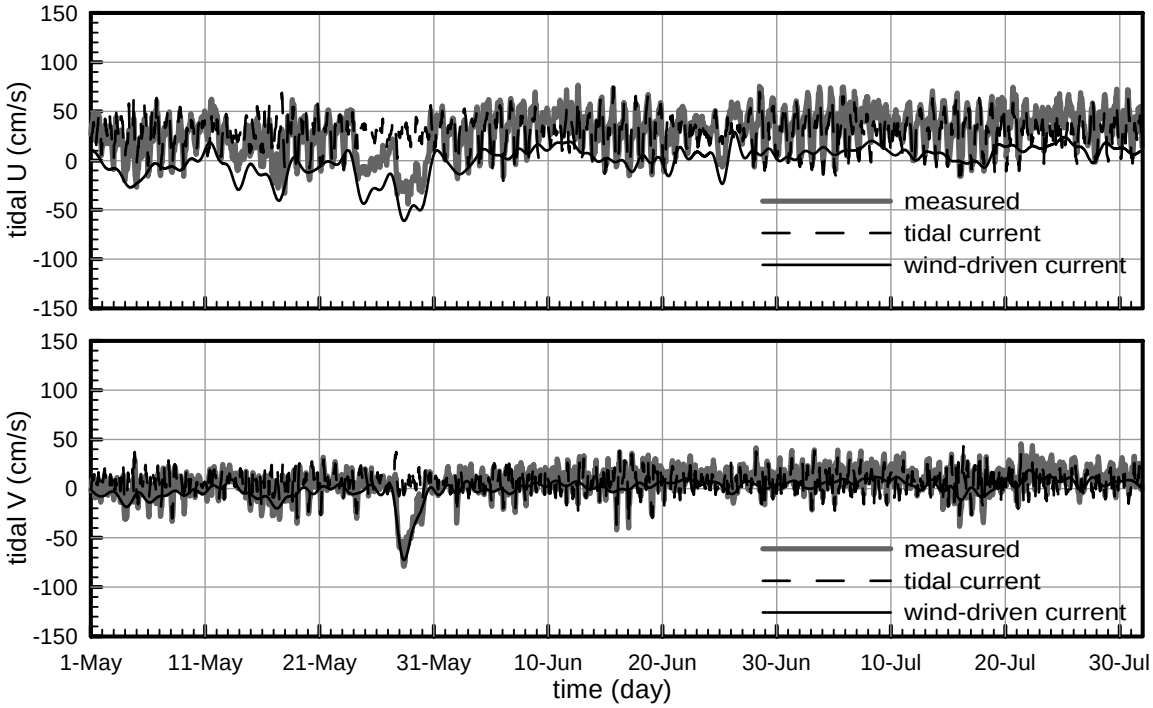


圖 6.25 臺中 TC 測站下層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

WU 觀測點主要波向 ESE 與 SE， $H_{1/3}$ 小於 25cm 者佔約全體的 86%，$T_{1/3}$ 集中於 7~9sec 區間；桑達 (SONGDA) 颱風期間，測得最大波高 (H_{max}) 為 2.18m，對應週期 ($T_{對應}$) 為 8.69sec，對應波向 SW，記錄時間為 4 月 29 日 10 時。臺中 DK 觀測點主要波向為 SSE、S、SE，$H_{1/3}$ 小於 25cm 者佔約全體的 72.5%，$T_{1/3}$ 集中於 6~8sec 間；桑達颱風期間 H_{max} 為 1.98m，$T_{對應}$ 為 8.75sec，對應波向 SSE，記錄時間為 4 月 29 日 10 時。TC 測站的實測日期從 2011 年 5 月 1 日至 7 月 31 日，波向統計結果顯示，主要波向為 NNE 與 W，而波高大於 1m 者達 22.59%。波浪週期集中於 4~7sec 的區間，佔全體的 56.75%。

二、麥寮港

麥寮港港嘴監測點標號 ML (座標 TWD97：E 120°09’08.22”、N 23°45’37.98”)，位置如圖 6.26 所示。自計式潮波流儀設置於水深約 10.0 公尺，觀測海面表層及海床底層之流速、波浪及潮位。觀測日期自 100 年 06 月 09 日至 07 月 04 日止共 26 天。



圖 6.26 雲林海域自計式潮波流儀施放點位示意圖

ML 測站水位時序變化如圖 6.27 所示。平均水深為 8.59m，最大水深 10.29m 發生於 6 月 17 日 11 時，最小水深 6.59m 發生於 6 月 15 日 16 時，最大潮差為 3.69m。ML 潮位資料天數較短，調合分析代表性稍不足，而經分析後顯示麥寮港海域潮型因子 *F* 值為 0.24，主要分潮為 M2 振幅 1.29m，次要分潮 K1 振幅為 0.30m，屬於半日潮型。

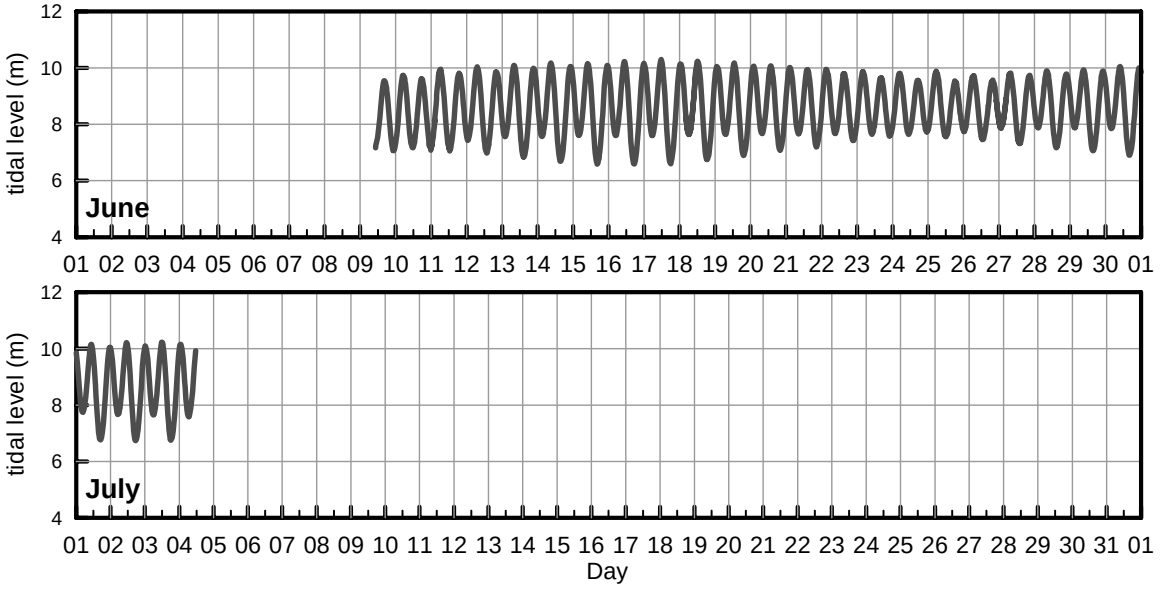
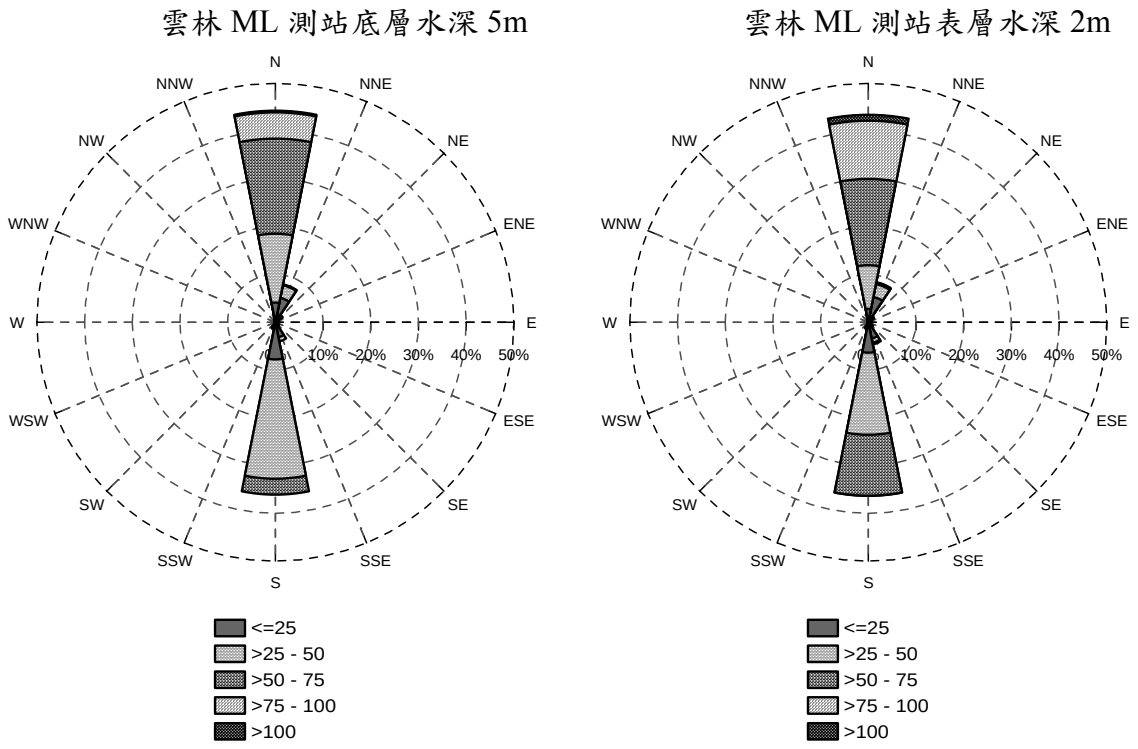


圖 6.27 雲林 ML 測站，2011 年 6/9~7/4 實測水位變化圖

ML 觀測點的 ADCP 海流觀測每 10 分鐘紀錄 1 筆資料，選取每半小時之海流資料進行時序列分析，所測資料之水深 5m 及水深 2m 分別代表底層與表層結果，而統計後的海流波浪玫瑰圖如圖 6.28 所示。ML 測站水深 5m 處，於主要流向 N 測到逐時流速最大值為 109.3cm/sec，時間是 6 月 11 日 15:20，於主要流向 S 所測到逐時流速最大值為 58.6 cm/s (6 月 16 日 00:30)。而於水深 2m 處，於主要流向 N 所測到逐時流速最大值為 120.0 cm/s (6 月 11 日 15:20)，於主要流向 S 所測到逐時流速最大值為 75.1 cm/s (7 月 4 日 02:30)。表、底層實測資料顯示，此地區流向大多為 N 及 S 方向，其中底層以 N 及 S 方向為主，而表層亦以 N 及 S 方向為主，由統計表顯示，流速大小之發生機率乃由下層向表層遞增，即越接近海平面其流速可能越大。觀察其海潮流流向與潮汐水位變化關係，漲潮段時其流向主要為 N 方向，而於退潮段時流向主要為 S 方向。

ML 測站底層與表層之海流無因次能譜圖，分別如圖 6.29 及圖 6.31 所示。底層處 *U* 分量的主要頻率為 0.08 cph，次要頻率 0.04 cph 及 0.16 cph (1/4 日週期)的能量，而 *V* 分量則是 0.04 cph、0.16 cph、0.24 cph 等三組頻率約有相同能量。表層狀況與底層相似，其峰值頻率亦極為相近。底層的潮流與風驅流成份時序列，如圖 6.30 所示。圖中顯示 ML 測站 *U* 分量海流主要驅動機制為潮流，風驅流平均振幅約為 8cm/s，因 *V* 分量不是潮汐運動方向，潮流分量極小，*V* 分量的主要成份為風驅流。表層海流分析結果如圖 6.32 所示，其與底層狀態相當接近，但 *U* 分量風驅流所佔比例增加，風驅流平均振幅約為 13cm/s，顯示越近於海水面受風切影響越大。

ML 測點主要波向為 WSW、W，$H_{1/3}$ 介於 25cm 至 75cm 之間者佔約全體的 63%，$T_{1/3}$ 集中於 3~6sec 間；平均波高 (H_{mean}) 為 54.1cm，平均週期 (T_{mean}) 為 4.53sec；最大波高 (H_{max}) 為 1.82m，對應週期 ($T_{對應}$) 為 7.20sec，對應波向 WSW，記錄時間為 6 月 11 日 12 時。



(單位：cm/sec)

圖 6.28 雲林測站底層、表層之實測海流玫瑰圖

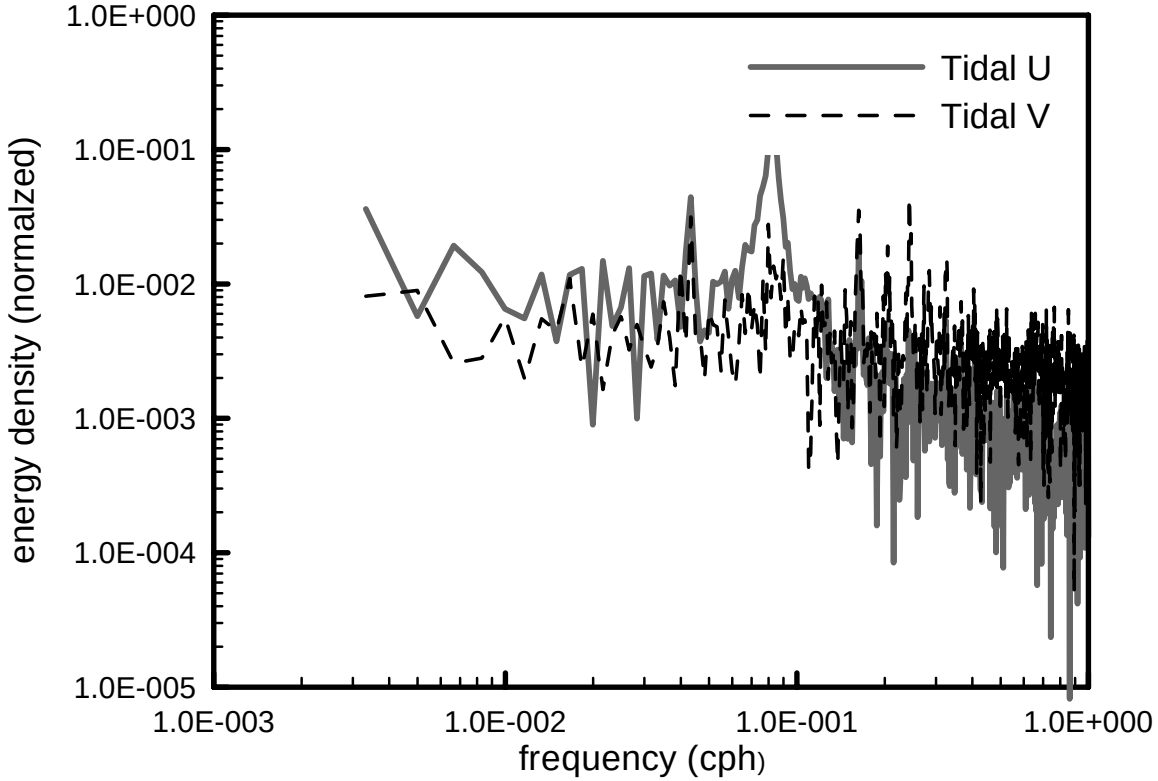


圖 6.29 雲林測站底層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

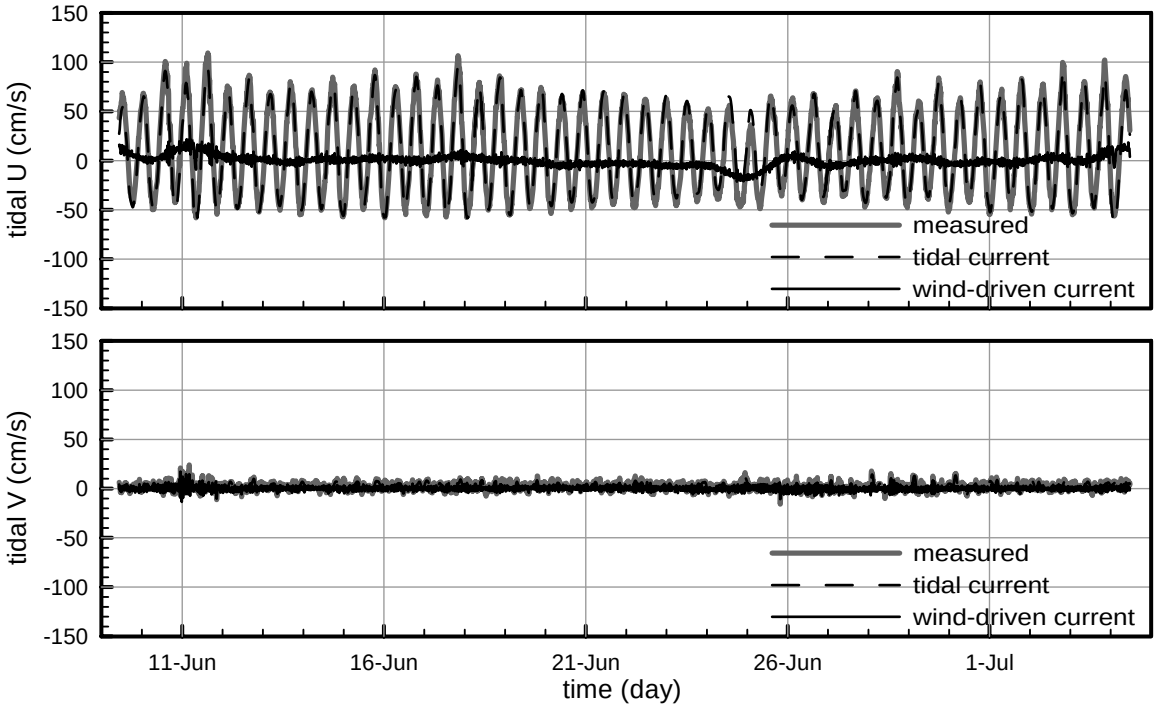


圖 6.30 雲林 ML 測站底層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

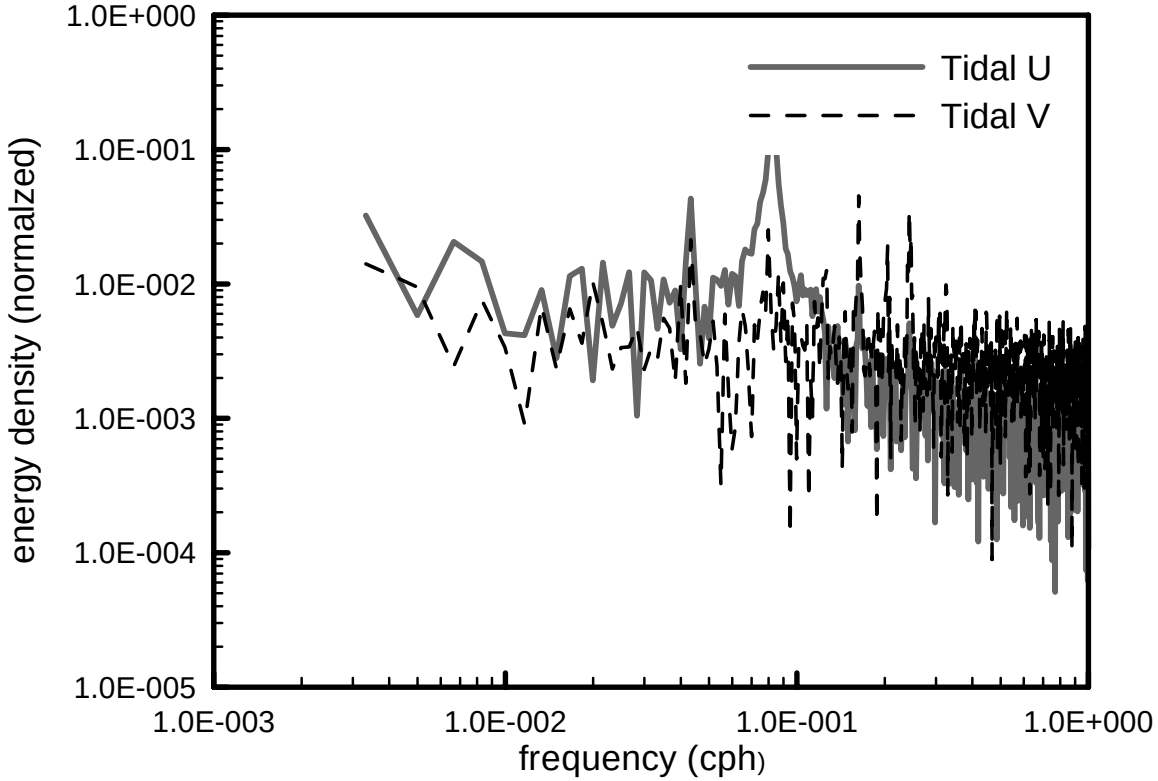


圖 6.31 雲林測站表層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

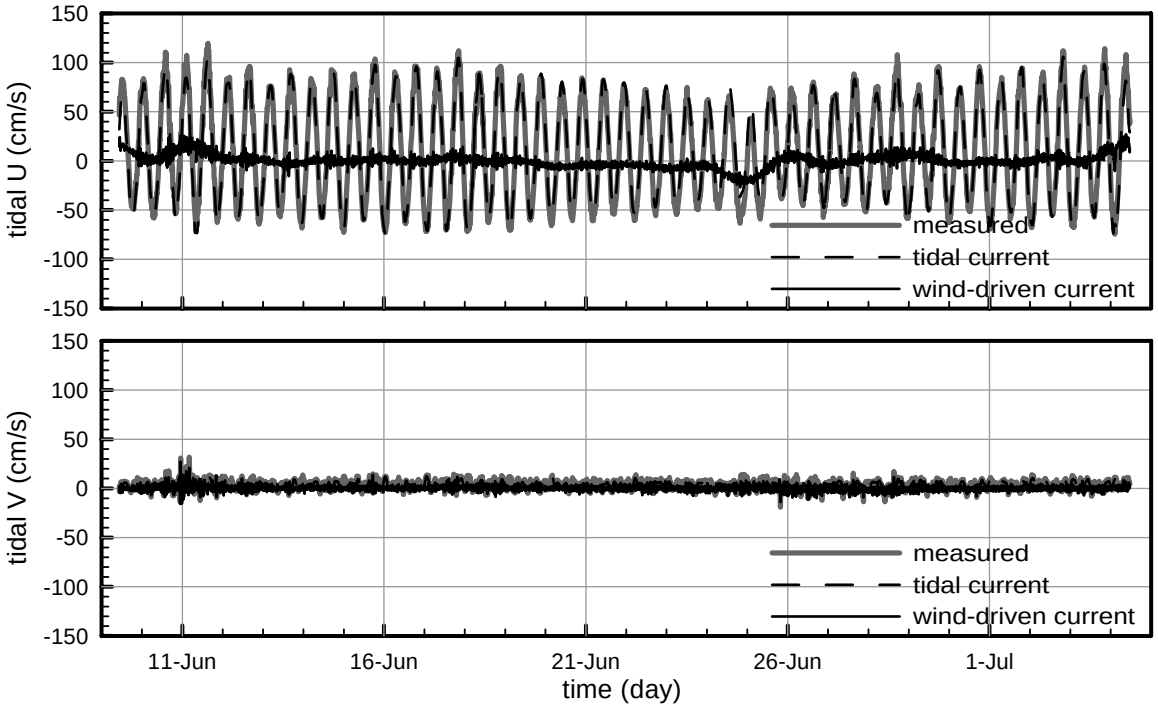


圖 6.32 雲林 ML 測站表層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

6.2 防波堤堤頭地形量測與沖蝕特性分析

6.2.1 海域地形變化歷年資料

一、臺中港

圖 6.33 為臺中港 85 年、87 年、90 年、91 年、93 年以及 95 年之實測地形水深圖，由圖中可發現北防波堤在延長過程中，於堤頭處所產生的掏深洞。

根據蔡等人 (2011) 之研究 (民國 85 年～95 年間)，進行相關之海岸地形變遷趨勢之分析。臺中港北防波堤至北防沙堤間有部分淤積，在北防波堤堤頭附近亦有產生淤積，並擴及至港口南側，形成港口南側區域遠岸淤積近岸侵蝕的現象。民國 89 年至 91 年間，北防波堤進行延長工程，造成北防波堤至北防沙堤間持續淤積，淤積深度最大可達 4m 以上，臺中港北側及南側遠岸區域亦快速淤積，尤其以北側遠岸區域淤積速度最快，淤積深度最大亦達 4m 以上，而在北防波堤堤頭附近及港口附近產生大量侵蝕，侵蝕深度最大可達-5m 以上。臺中港擴建完成後，北防波堤至北防沙堤間皆全面淤積，而擴及至港口南側的淤積面積亦有擴大並往南持續延伸，淤積深度則是逐年加深，港口南側近岸區則維持些微侵蝕的狀況，北防波堤堤頭附近及港口附近的侵蝕範圍則大致上維持穩定，並未持續刷深。除了民國 89 年防波堤延長工程進行中有最大累積侵蝕量外，其餘年度皆呈現淤積現象，並於民國 95 年達到最大累積淤積量，約 7650 萬 m^3。綜言之，臺中港北防波堤以北之區域，因北防波堤及防沙堤攔阻季節性之沿岸漂沙呈現淤積現象，而北防波堤以南之區域，目前因漂沙越過臺中港，亦於 94 年後由侵蝕轉為淤積。

依歷年 (民國 85~95 年) 臺中港海域地形資料，繪製地形斷面圖，其中標號 Sec.05 為北防波堤走向延伸斷面，斷面的變地形變化如圖 6.34 所示。圖 6.34 中，Sec.05 因防波堤陸續延伸，在堤頭附近明顯發現地形呈現逐年侵蝕現象。

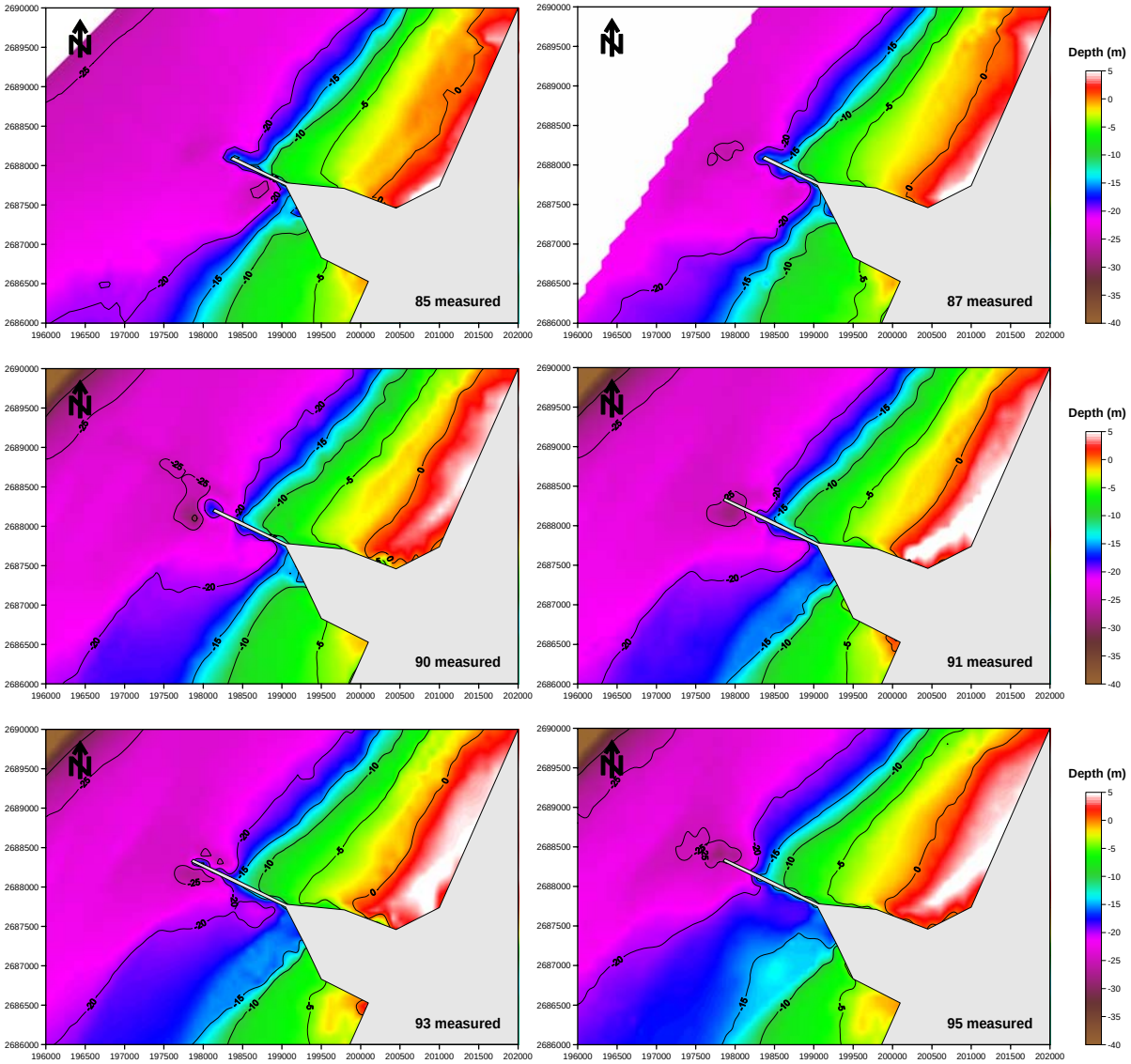


圖 6.33 臺中港海域 85~95 年實測地形水深圖

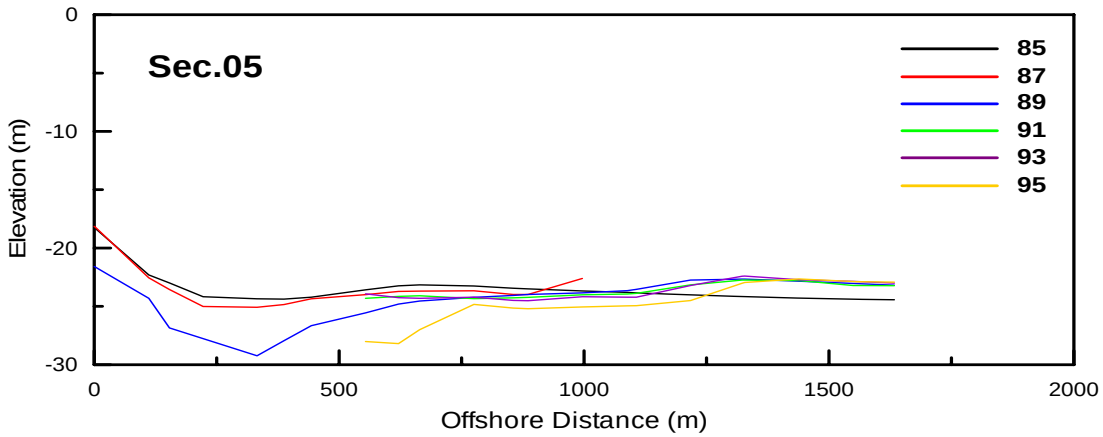


圖 6.34 臺中港海域 85~95 年間斷面 (Sec.05) 地形變化

二、麥寮港

圖 6.35 為雲嘉海域由濁水溪口至外傘頂洲間歷年海岸線變遷情形(林等人，2003)，1900 至 1947 年間，海豐島北側灘線侵蝕約 1 公里，沙洲末端向西南延伸約 5 公里，與陸側之間則形成一內海潟湖。1947 至 1962 年間，海豐島及外傘頂洲均出現劇烈變化。濁水溪以南至新虎尾溪間海豐島之北側灘線向外淤積約 1~1.5 公里，新虎尾溪至台西間灘線侵蝕約 1~1.2 公里，海豐島末端則向南延伸 5 公里。外傘頂洲在 1962 至 1980 年間，濁水溪口至新虎尾溪間海岸變化不大，海豐島則整體往南移動約 5 公里，逐漸萎縮貼近三條崙海岸。外傘頂洲外側 (西北側) 灘線則持續向陸側 (東南向) 侵蝕 0.8~1.2 公里，平均每年後退約 58 公尺。1980 至 2001 年間，外傘頂洲西北側灘線持續向東南方向侵蝕約 1.4 公里，平均每年約侵蝕 67 公尺。

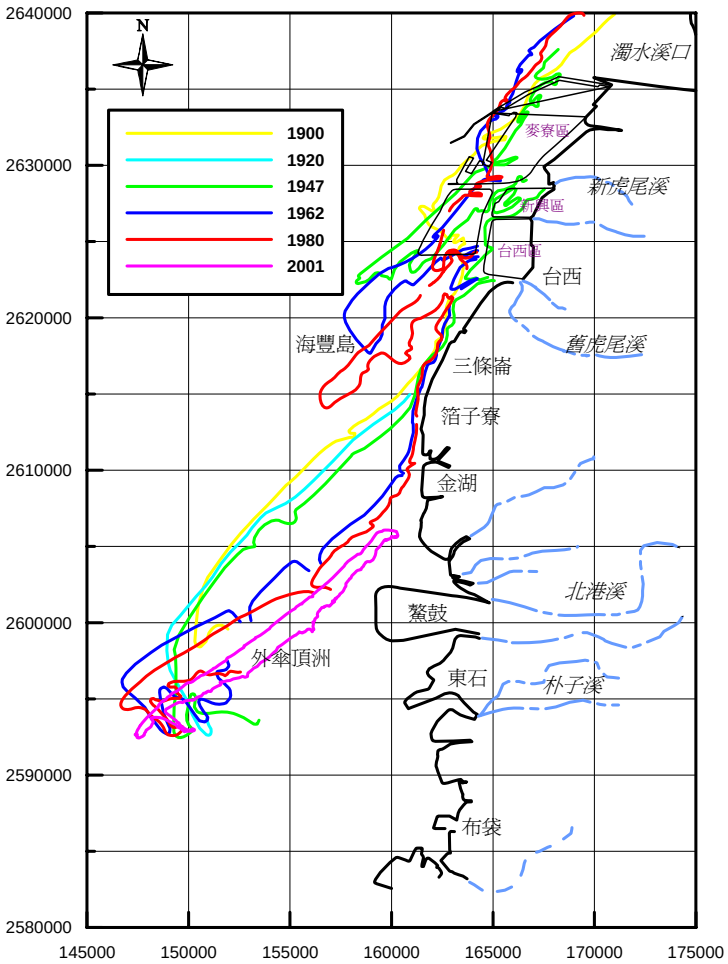


圖 6.35 雲嘉海域歷年海岸線變遷

圖 3.36 為雲林離島工業區 80 年、87 年、90 年、93 年、96 年以及 99 年之實測地形水深圖。

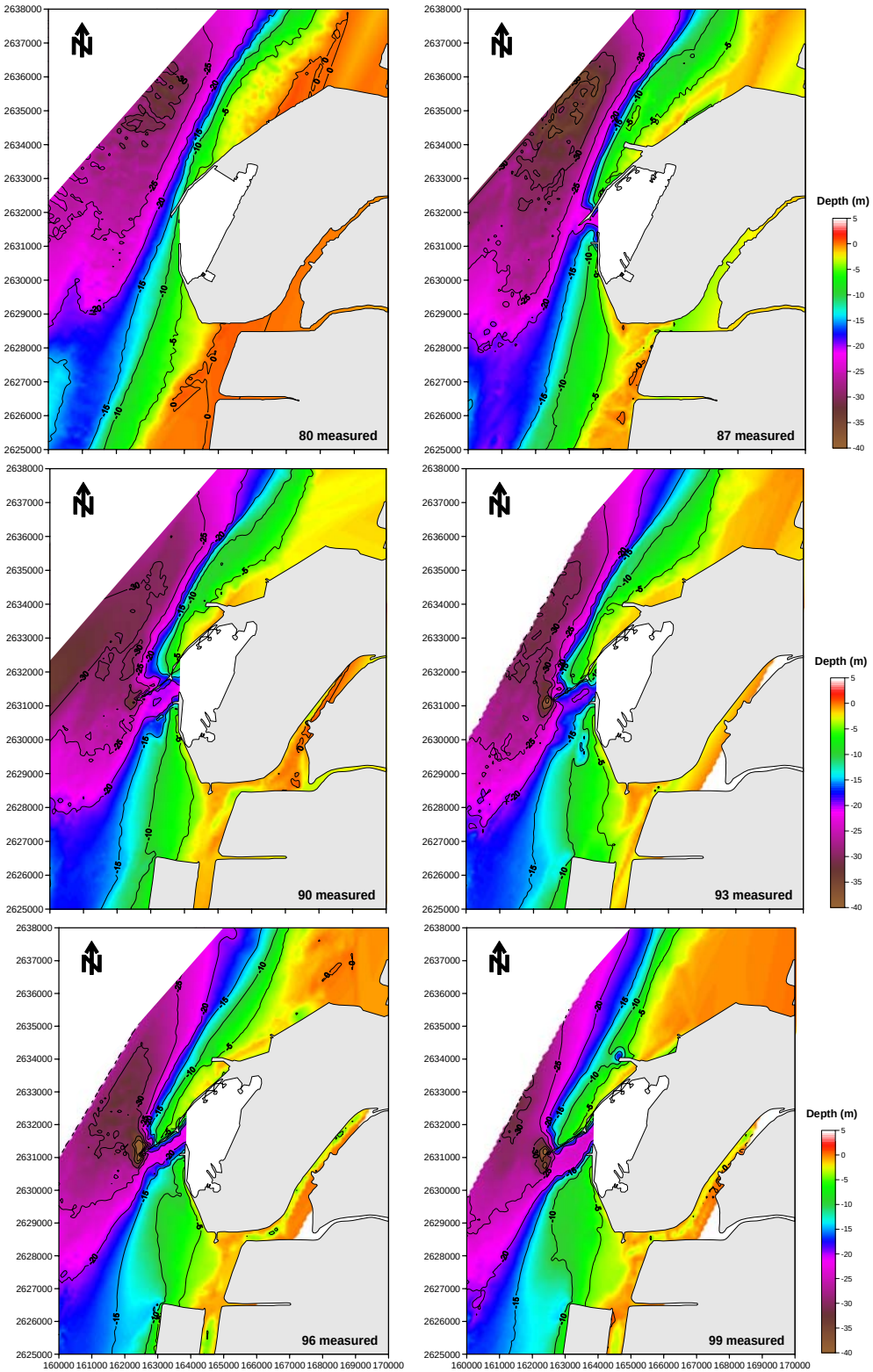


圖 6.36 雲林離島工業區海域 80~89 年實測地形水深圖

根據歷年 (民國 82~99 年) 麥寮海域地形資料繪製斷面圖，選擇通過堤頭處的斷面 (標號 Sec.05)，如圖 6.37 所示。圖 6.37 中在離岸 2.0~2.5km 之間堤頭附近，地形由 82 至 93 年逐年侵蝕幅度高達 18m，93 至 99 年間則變化較不明顯。在離岸 3.0km 附近，地形則呈現逐年淤積現象。

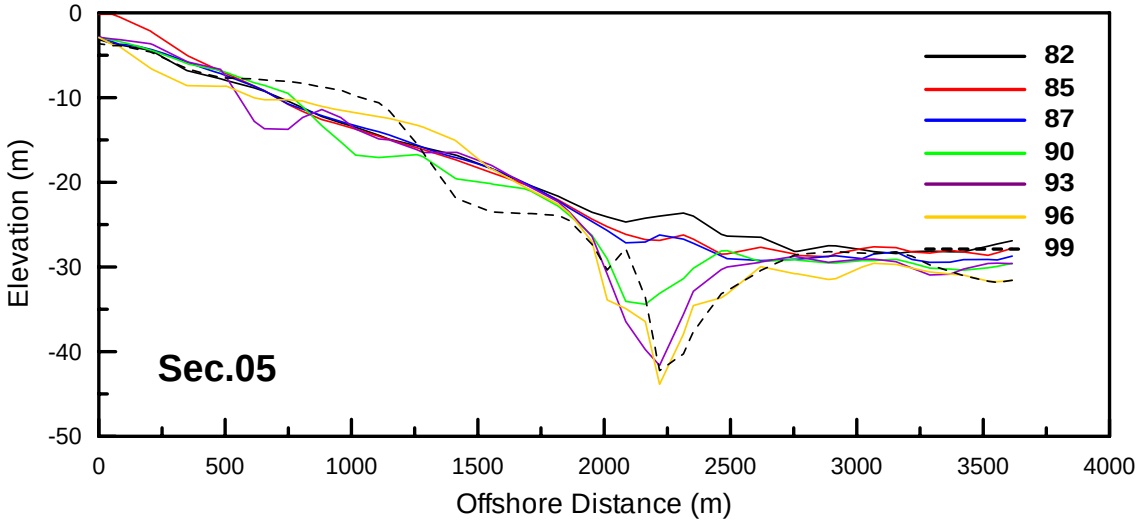


圖 6.37 雲林離島工業區海域 82~99 年間斷面 (Sec.05) 地形變化

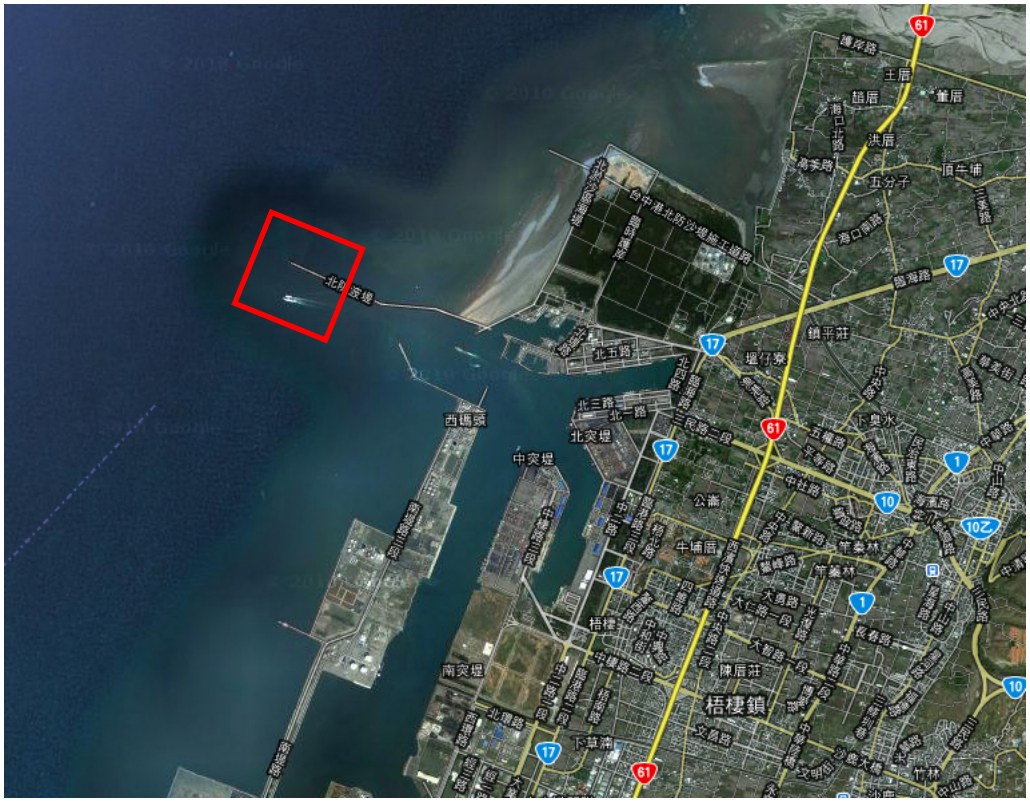
6.2.2 防波堤堤頭地形量測

一、臺中港海域

堤頭地形測量區域為臺中港北防波堤堤頭約 1 公里見方之範圍，如圖 6.38 所示，作業於 100/5/31 完成臺中港之潮位站引測與水深測量。平面控制系統採用採用台灣二度分帶 97 坐標系統（TWD97），即橫麥卡脫 TM 坐標系統，經差二度分帶，中央子午線尺度比率為 0.9999，坐標原點以東經 121 度為中央子午線與赤道之交點，橫坐標西移 250,000m。高程控制採用基隆中潮一等水準系統。海域水深測量採用單音束測深儀 (ODOM Hydrotrac 測深儀)，測深成果須達到 IHO SP-44 第 4 版規範標準；若作業時之波高超過 50 cm，則於測量作業時以船隻姿態收集校正船隻受波浪之起伏偏差。同時引測 (或收集) 施測水域附近之水準點以求出即時之水位修正值。於水深量測作業前，將於出發前進行現場檢核板 (Bar check) 校正，以確認測深儀之精度。所得資

料經由潮汐水位修正後，同時以聲速剖面儀或 CTD 施測測區當時之聲速剖面進行聲速校正，正確地量測出施測海域之三度空間資料。

海域地形三維立體圖如圖 6.39 所示。堤頭掏刷區域在正對堤頭往外海方向約 140m 處，掏刷最深約 -38m。臺中港北堤水深測量區域所測得水深最淺約為 -8m，堤頭附近掏刷最深處水深約 -39m，等深線於堤身附近大致呈現垂直海堤方向分布，堤頭形成輻射狀之等深線分布，掏刷最深處位於堤頭向外海延伸方向約 140m 處；堤頭正北方約 100m 處亦有刷深現象，最深處約 -32m，如圖 6.40 所示。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 6~7m。



（底圖來源：Google Earth）

圖 6.38 臺中港北防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖

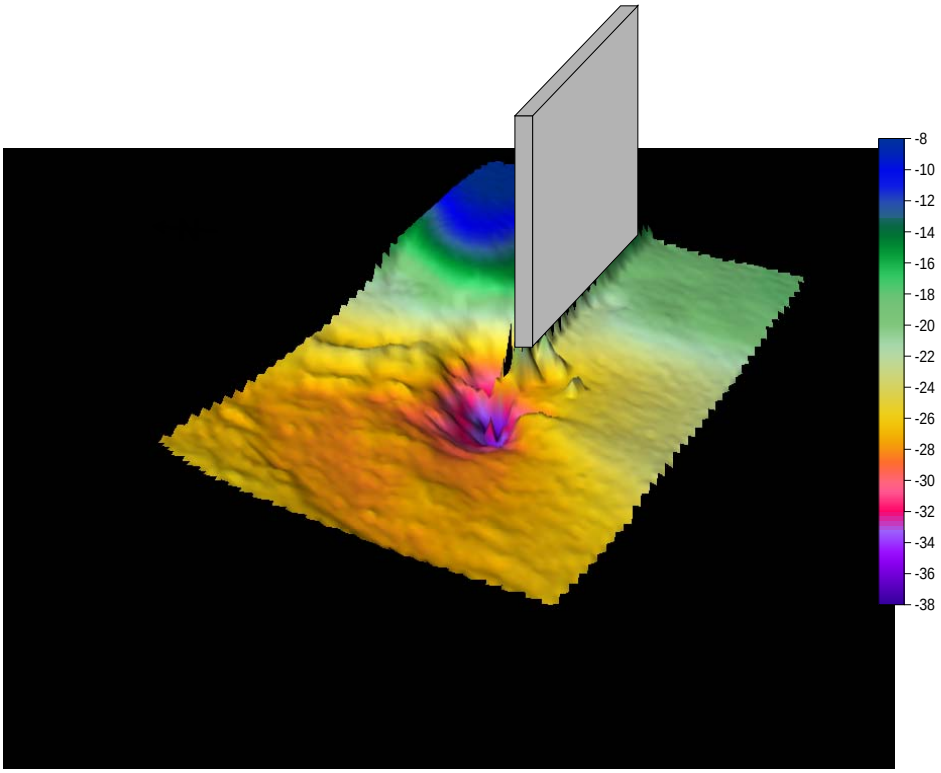


圖 6.39 臺中港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖

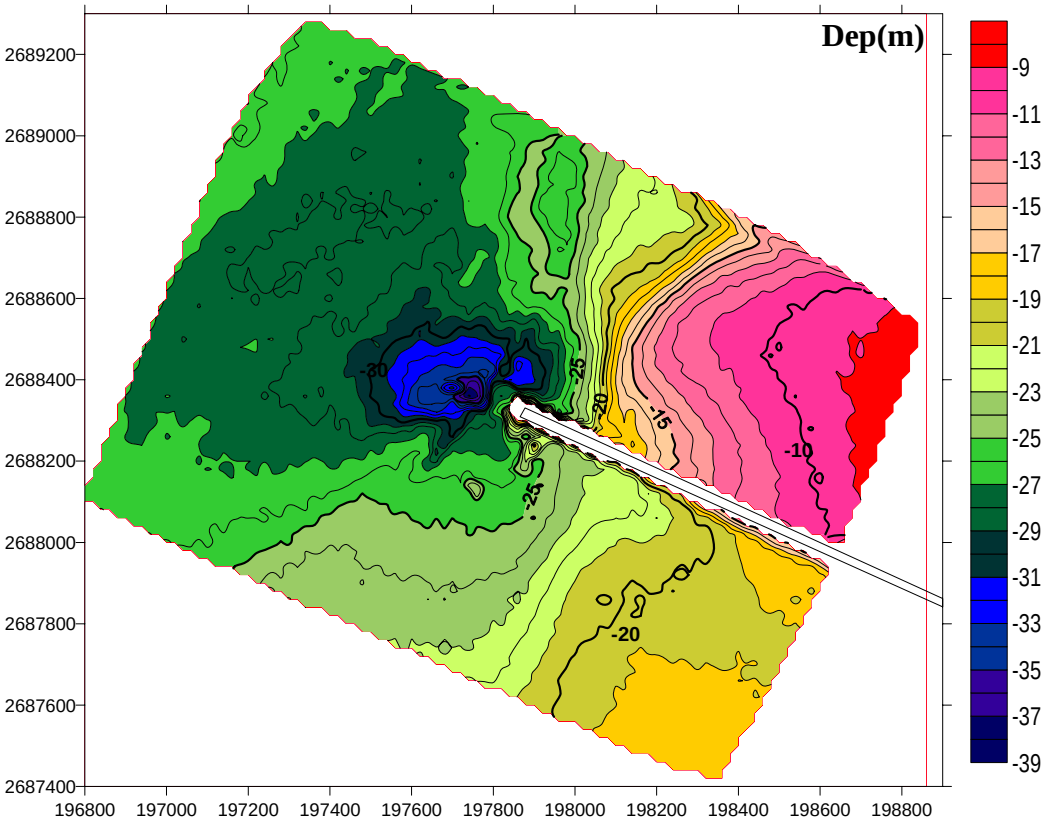
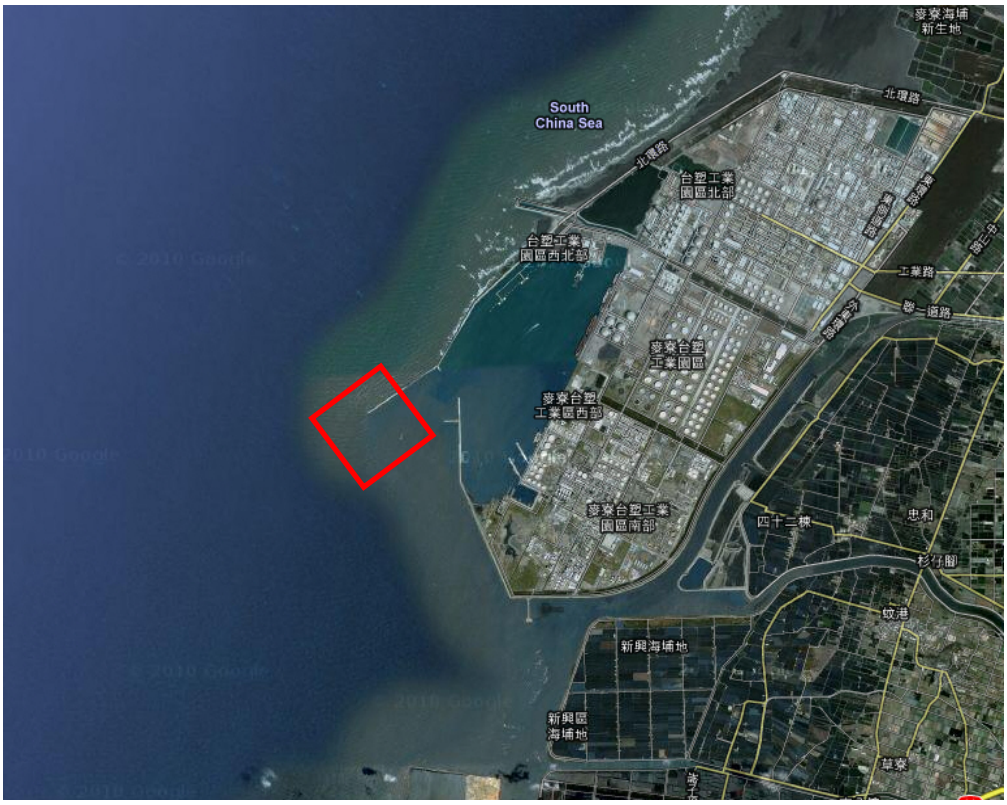


圖 6.40 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖

二、麥寮港海域

麥寮港堤頭地形測量區域為麥寮工業區專用港西防波堤堤頭約 1 公里見方之範圍，如圖 6.41 所示，作業於 100/6/9 完成麥寮港之潮位站引測與水深測量。海域地形三維立體圖如圖 6.42 所示，水深色階圖如圖 6.43 所示麥寮工業港西堤水深測量區域所測得水深最淺約為 -6m，堤頭附近掏刷最深處水深約 -45m ，等深線於堤身北側港域外大致呈現垂直海堤方向分布，堤身南側港域內則以平行海堤方向分布為主，堤頭附近則形成輻射狀之等深線分布，掏刷最深處位於堤頭向外海西南方延伸約 400m 處；堤頭西方約 180m 處亦有刷深現象，最深處約 -42m，如圖 3.24 與圖 3.25 所示。西防波堤北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，防波堤內、外之海域地形高低差約可達 8～10m。



（底圖來源：Google Earth）

圖 6.41 麥寮工業區專用港西防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖

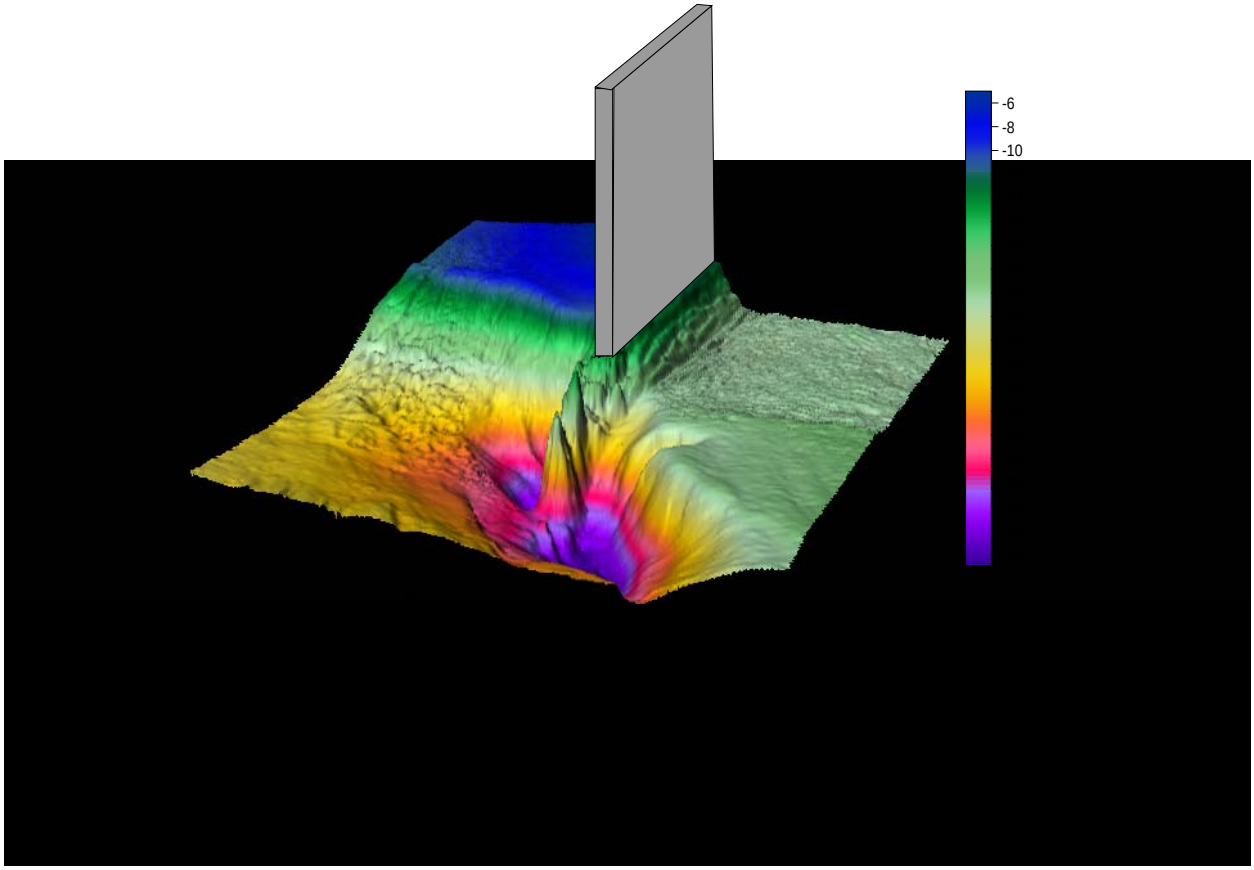


圖 6.42 麥寮工業港西防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖

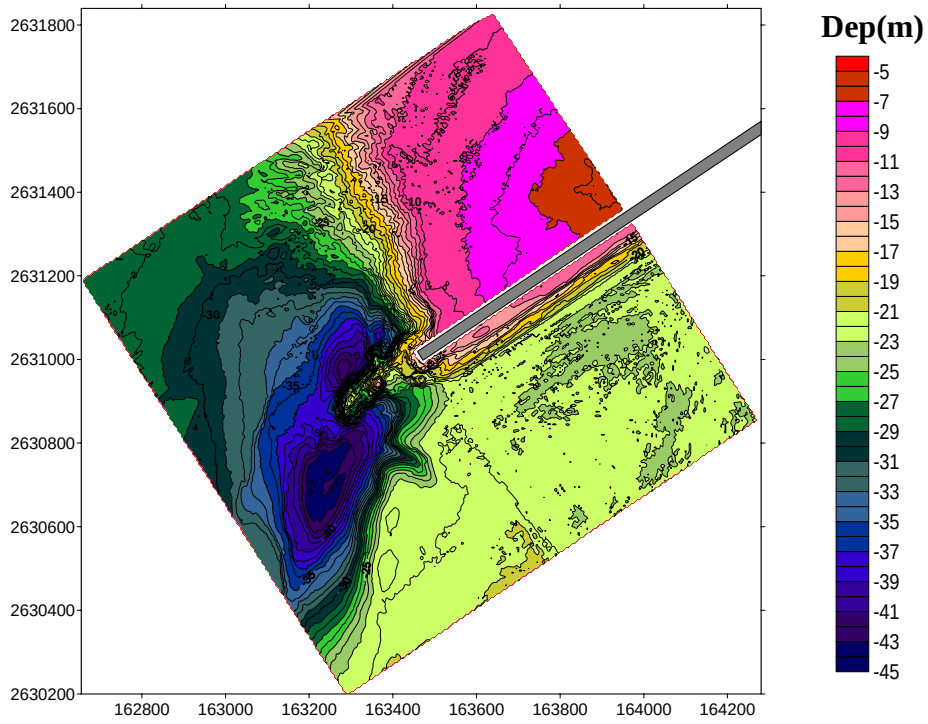


圖 6.43 麥寮工業港西防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖

6.2.3 防波堤堤頭沖蝕特性分析

一、臺中港海域

臺中港海域歷年的侵淤變化，除了緊鄰南、北防波堤的海域地形變化較大，大多數區域則保持逐年淤積的狀態，而處大部分時間是呈現侵蝕的狀態。85~95 年期間，北防波堤堤頭累積最大掏深幅度可達-6m；北防波堤北側累積最大淤積幅度則可達+10m。

圖 6.44 為民國 85~87 年與 89~95 年間臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖，包括 -15m、-20m 與-25m 等深線。其中，-25m 等深線範圍內為一封閉區域，可用以代表水深大於 -25m 的沖刷洞 (以下簡稱 -25m 沖刷洞)。民國 85 年時，北防波堤堤頭處附近並無明顯的沖刷洞，而港口存在一處 -25m 沖刷洞。自民國 86 年開始，-25m 沖刷洞在北防波堤堤頭西側形成，隨著時間的增加，至民國 89 年時，沖刷的區域逐漸變廣加深，且向堤頭的位置遷移。民國 90 年時北防波堤向西北側延伸，在堤頭西方至西北方形成二處 -25m 沖刷洞，涵蓋範圍略大於民國 89 年之沖刷洞。民國 91 年時，北防波堤再延長，此時 -25m 沖刷洞移動至堤頭周圍。而民國 92 年、93 年時，-25m 沖刷洞則在堤頭兩側形成。民國 94 年時，三處 -25m 沖刷洞在堤頭北側形成，沖刷區域縮小。至民國 95 年時沖刷範圍擴大，形成二處 -25m 沖刷洞。

另將各年度 -25m 沖刷洞以三維網格繪製，包括 -25m 等深線、沖刷洞的重心在 -25m 等深線截面的投影點 (以下簡稱形心) 與防波堤堤頭位置等，歷年沖刷洞之立體圖如圖 6.45 所示。各年度之形心與堤頭距離 (心堤距)、-25m 沖刷洞體積、-25m 等深線截面積與平均沖刷 (沖刷洞體積除以截面積) 等，如表 6-6 所示。由表 6-6 可知，最大沖刷截面積為民國 90 年的 226,200m^2，同時也造成最大沖刷體積為 5,903,893m^3；心堤距在民國 90 年之後縮小為 158~379m；平均沖刷則介於 25~27m 之間。

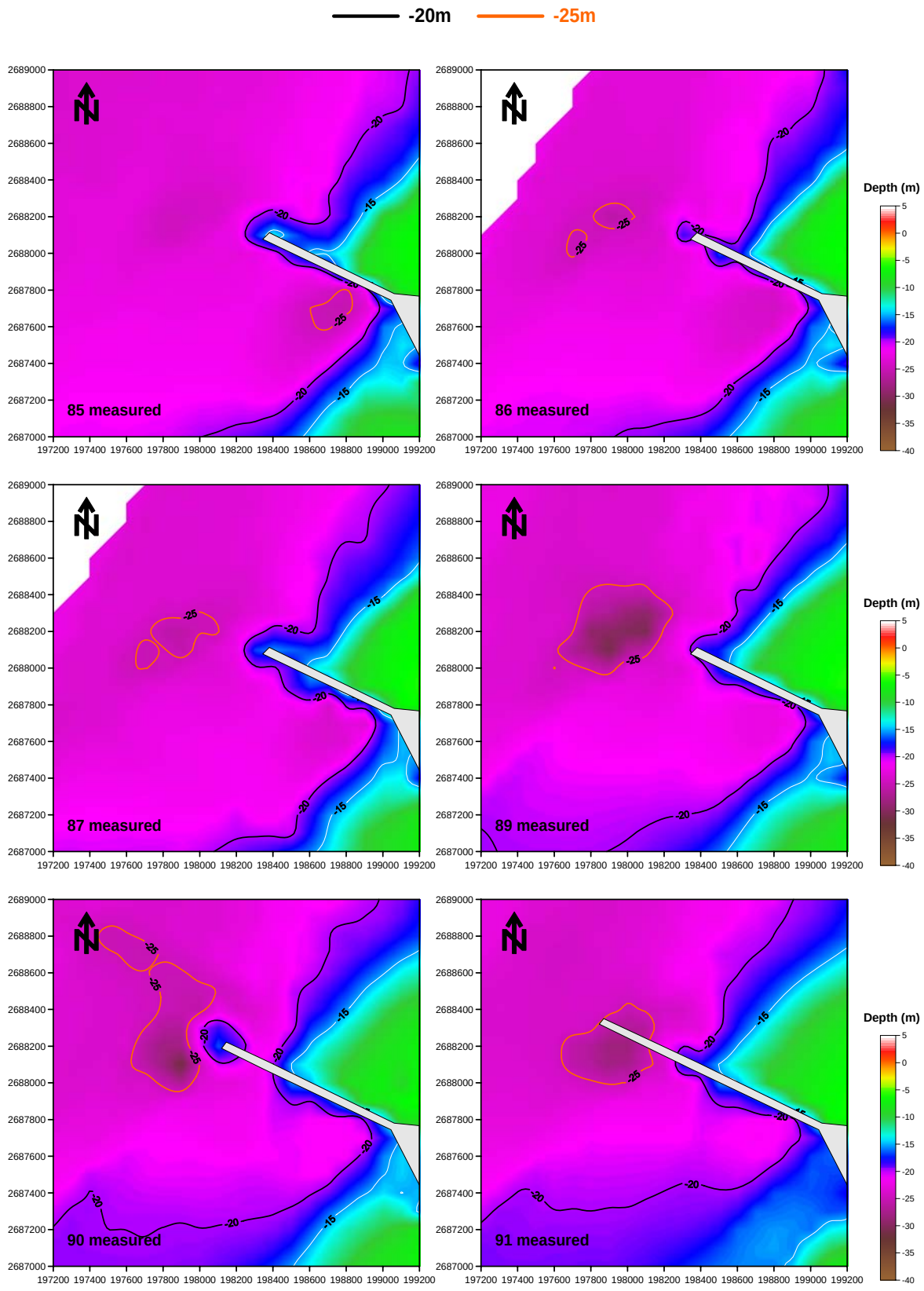


圖 6.44 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)

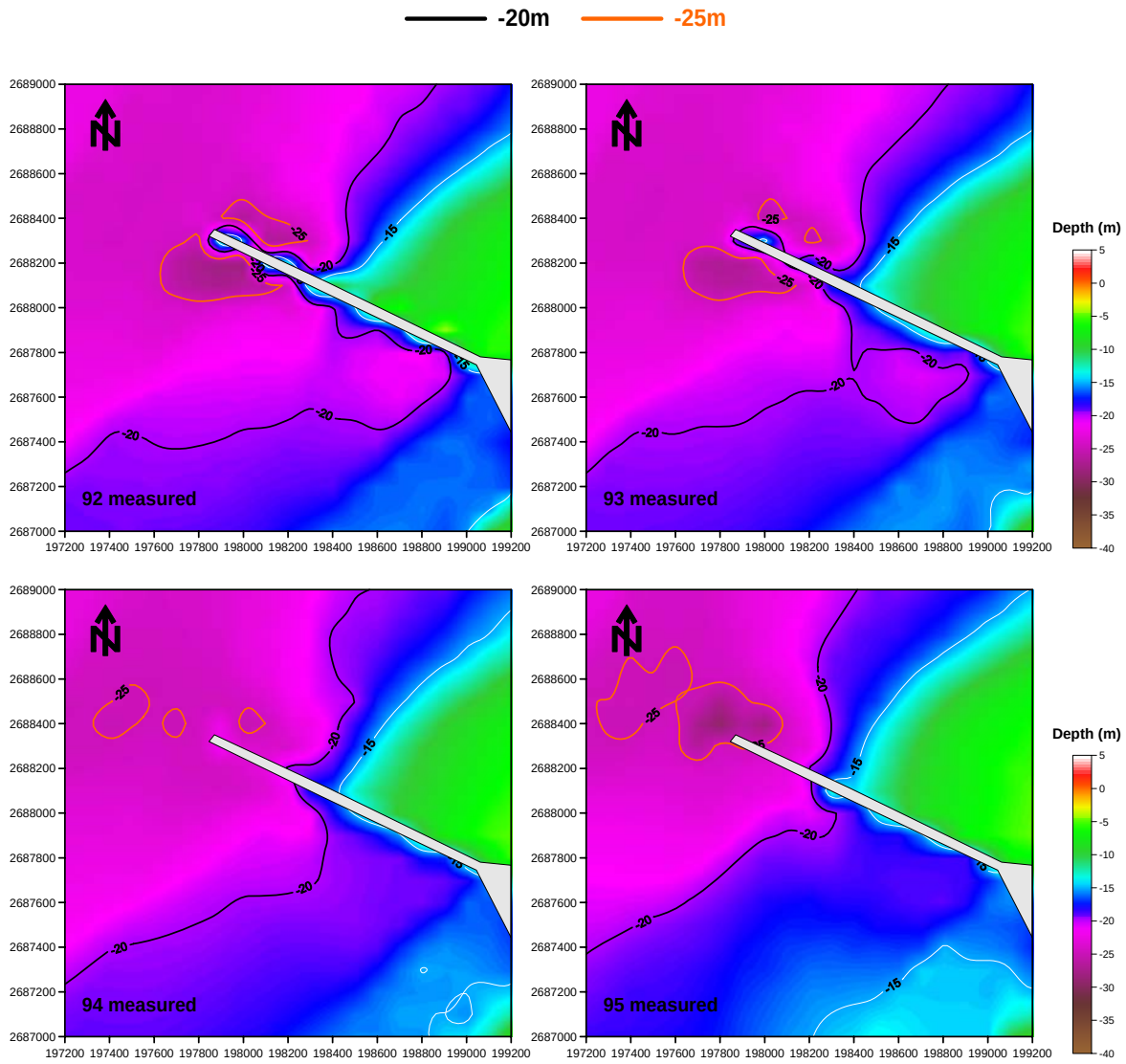


圖 6.44(續) 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)

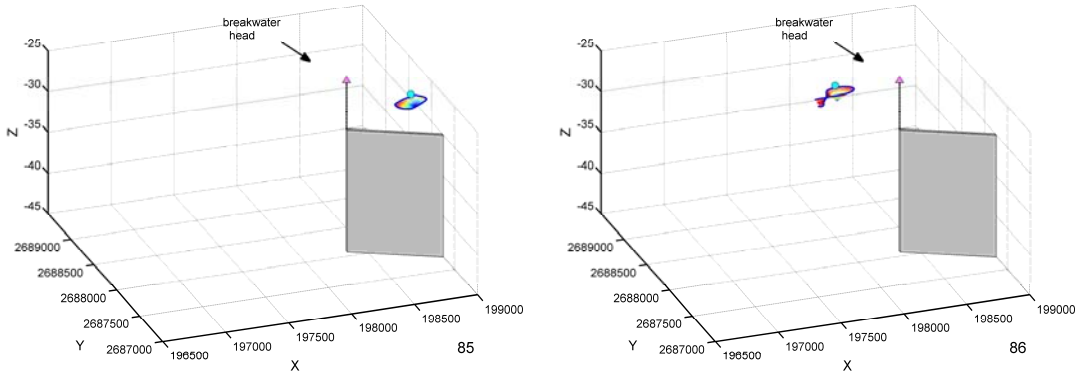


圖 6.45 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖 (85~95 年)

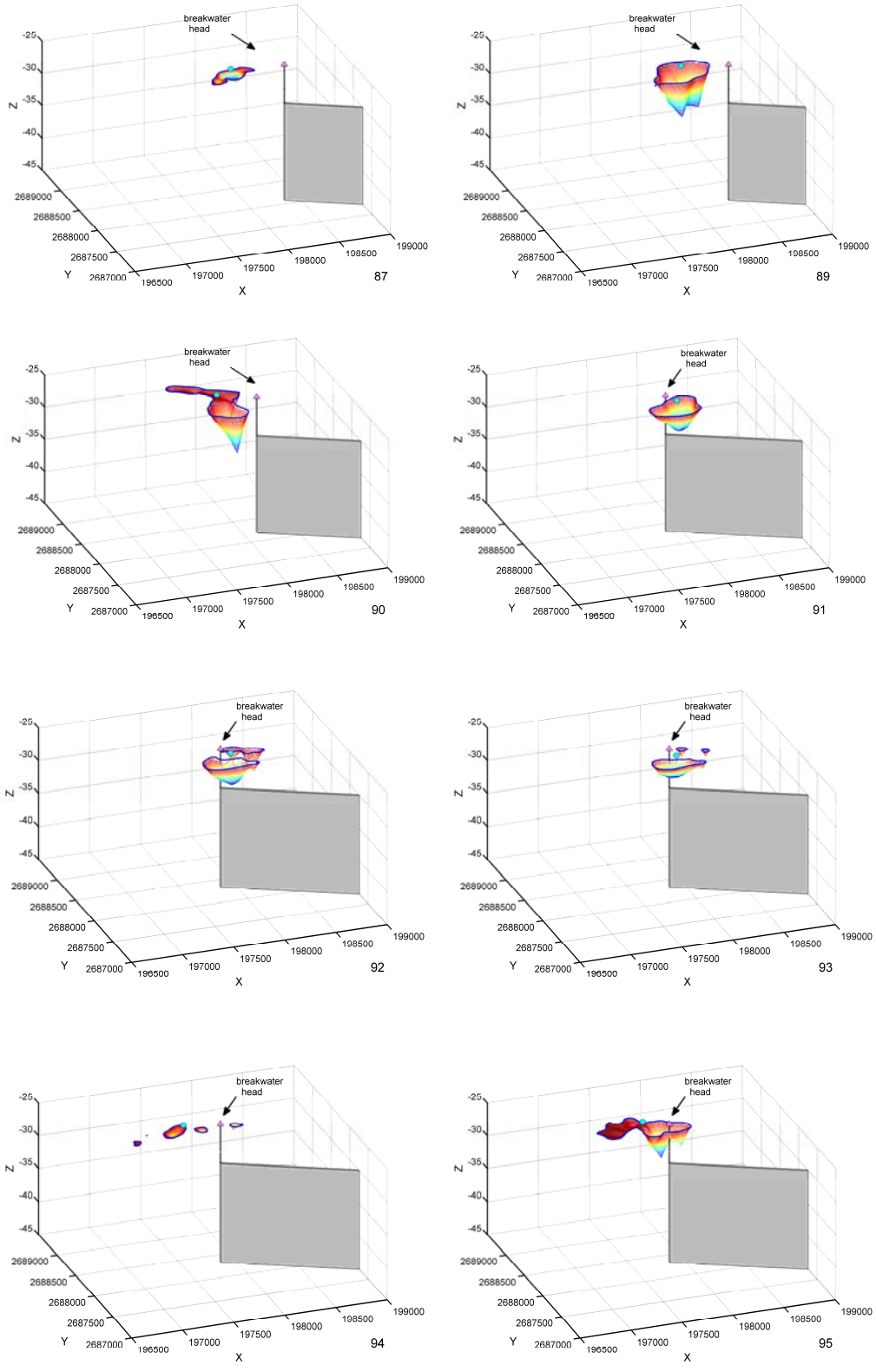


圖 6.45(續) 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖(85~95 年)

表 6-6 臺中港北堤堤頭-25m 沖刷洞變化量化表 (85~95 年)

年度	堤 頭 位 置 (X , Y)	形 心 位 置 (X , Y)	心堤距 (m)	沖刷截面積 (m2)	沖刷體積 (m3)	平均沖刷 (m)
85	198365, 2688099	198722, 2687691	542	37100	941345	25
86	198365, 2688099	197875, 2688171	495	33800	854299	25
87	198365, 2688099	197859, 2688161	510	75100	1902325	25
89	198365, 2688099	197933, 2688217	448	206900	5671288	27
90	198136, 2688207	197798, 2688378	379	226200	5903893	26
91	197863, 2688339	197916, 2688190	158	153800	4070127	27
92	197863, 2688339	197911, 2688211	137	123300	3233921	26
93	197863, 2688339	197865, 2688171	168	83200	2160492	26
94	197863, 2688339	197528, 2688431	347	63500	1593984	25
95	197863, 2688339	197646, 2688469	253	217800	5607723	26

二、麥寮港海域

雲林麥寮港區北側緊鄰濁水溪口，南向豐沛的砂源補注造成西防波堤以北易有淤積現象產生，而港區南方海域的漂砂受到防波堤阻擋，大幅減小淤積地形的生成。綜合地型侵於變化，麥寮港海域於 87~99 年期間，西防波堤以北呈現全面淤積現象，最大幅度可達+20m；西防波堤 III 堤頭西側與西南側則形成兩個沖刷洞，最大掏深幅度可達-20m。

麥寮工業區的開發，於民國 84 至 89 年間分階段逐步增建了西防波堤與南防波堤。在防波堤興建過程中，於堤頭處都發現淘刷的現象。圖 6.46 為民國 80~99 年麥寮港海域西防波堤 I~III 堤頭附近地形等深線變化圖，包括 -25m、-30m、-35m 與-40m 等深線。其中，-35m 等深線範圍內為一封閉區域，可用以代表水深大於 -35m 的沖刷洞 (以下簡稱 -35m 沖刷洞)。民國 80~85 年間，西防波堤尚未延伸到目前規模，-20m 等深線仍保持平行於海岸。民國 87 年時，西防坡堤 II 的興建，已造成堤頭地形由原來的水深 -15m 沖刷至 -25m。民國 89 年時，西防坡堤 III 的延伸，造成一小塊-30m 沖刷洞在堤頭北方形成。民國 90 年時，堤頭前 -30m 沖刷洞明顯變大，-35m 沖刷洞也出現在堤頭西南側。因

沖刷現象的持續作用，民國 92 年以後，堤頭前的最大沖刷洞已超過 -40m。

另將各年度 -35m 沖刷洞以三維網格繪製，包括 -35m 等深線、沖刷洞的重心在 -35m 等深線截面的投影點 (以下簡稱形心) 與防波堤堤頭位置等，歷年沖刷洞之立體圖如圖 6.47 所示。圖 6.47 中的圓點為沖刷洞之形心位置，堤頭位置以三角形標示。各年度的堤頭地形資料解算後，所得的 -35m 沖刷洞之形心與堤頭距離 (心堤距)、-35m 沖刷洞體積、-35m 等深線截面積與平均沖刷幅度 (沖刷洞體積除以截面積) 等數據，詳列於表 6-7。由表 6-7 可知，-35m 沖刷洞的面積與體積都在民國 96 年時達到最大，各為 197,300m^2 與 7,868,464m^3。民國 96 年以後沖刷區域已有縮小，但仍是維持相當大的範圍：X 軸方向約 264~293m、Y 軸在 669~742m 的跨距間變動；平均沖刷則介於 36~40m 之間。由圖 6.46 可看出，民國 91~96 年期間，堤頭北側 300m 範圍內的 -20m 等深線均呈現向岸凹陷的侵蝕狀態；民國 97 年以後， -20m 等深線已向外海側回淤，此現象即是有來自濁水溪口南向的砂源注入。由表 6-7 可知，堤頭在民國 96~97 年期間，沖刷洞大量淤積；民國 97 年以後，沖刷洞的面積與體積呈現逐年略微回淤的情形。

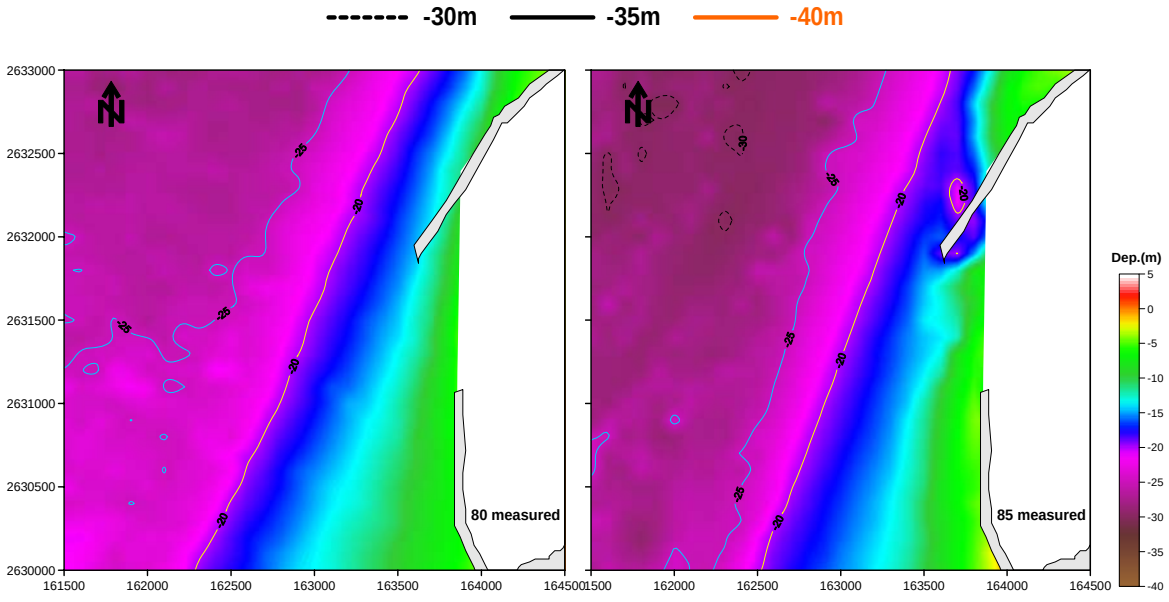


圖 6.46 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年)

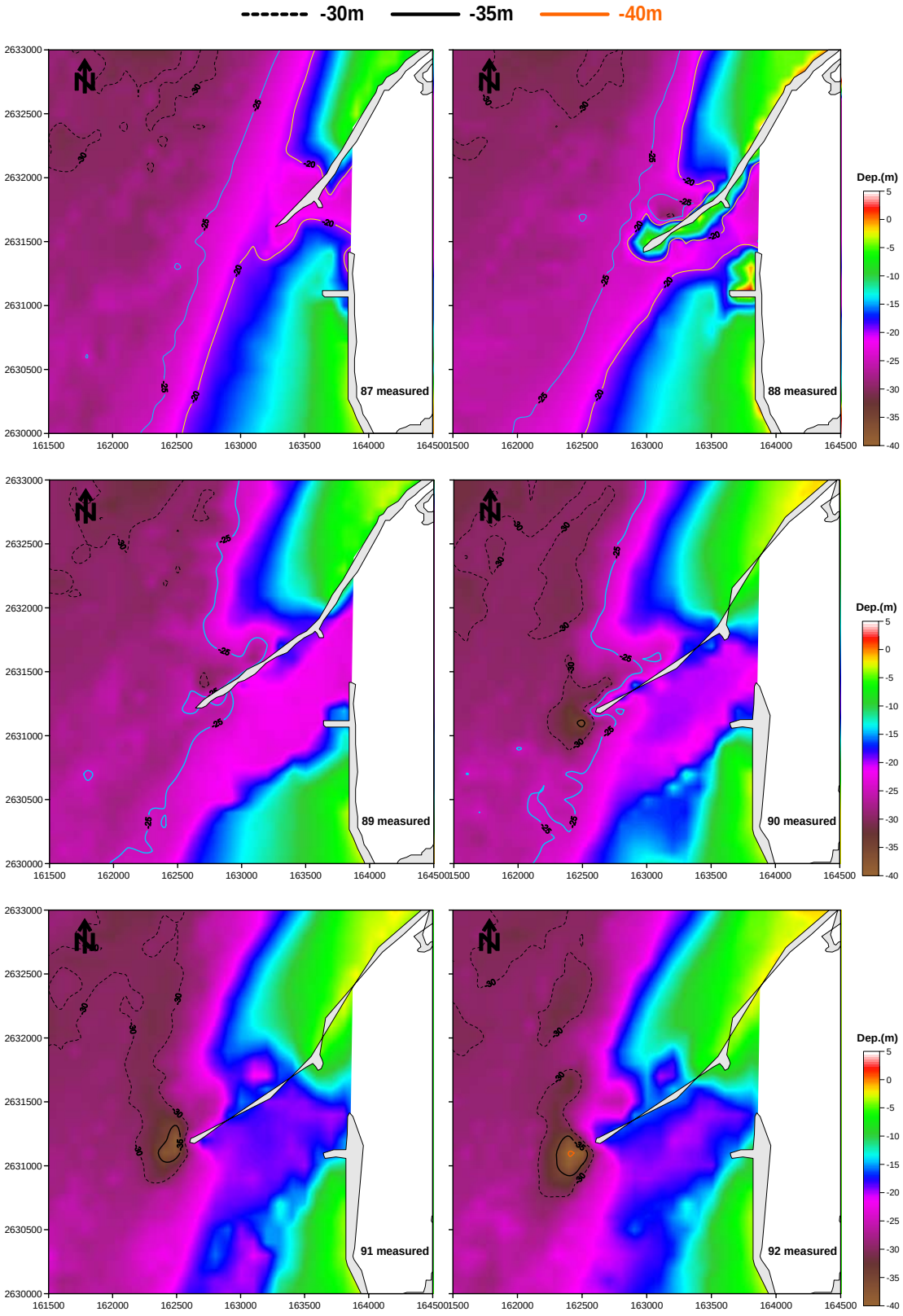


圖 6.46(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖(80~99 年)

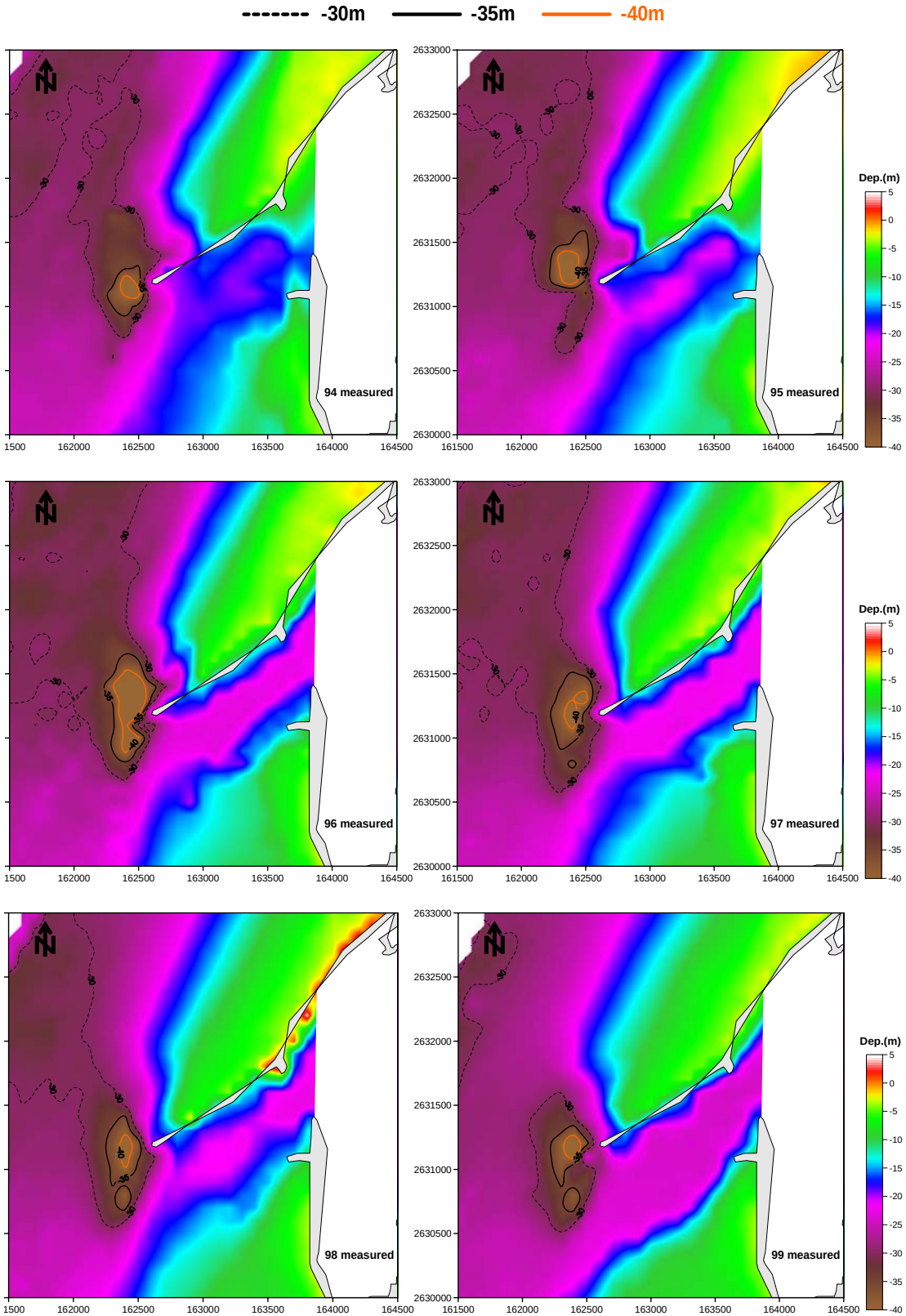


圖 6.46(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖(80~99 年)

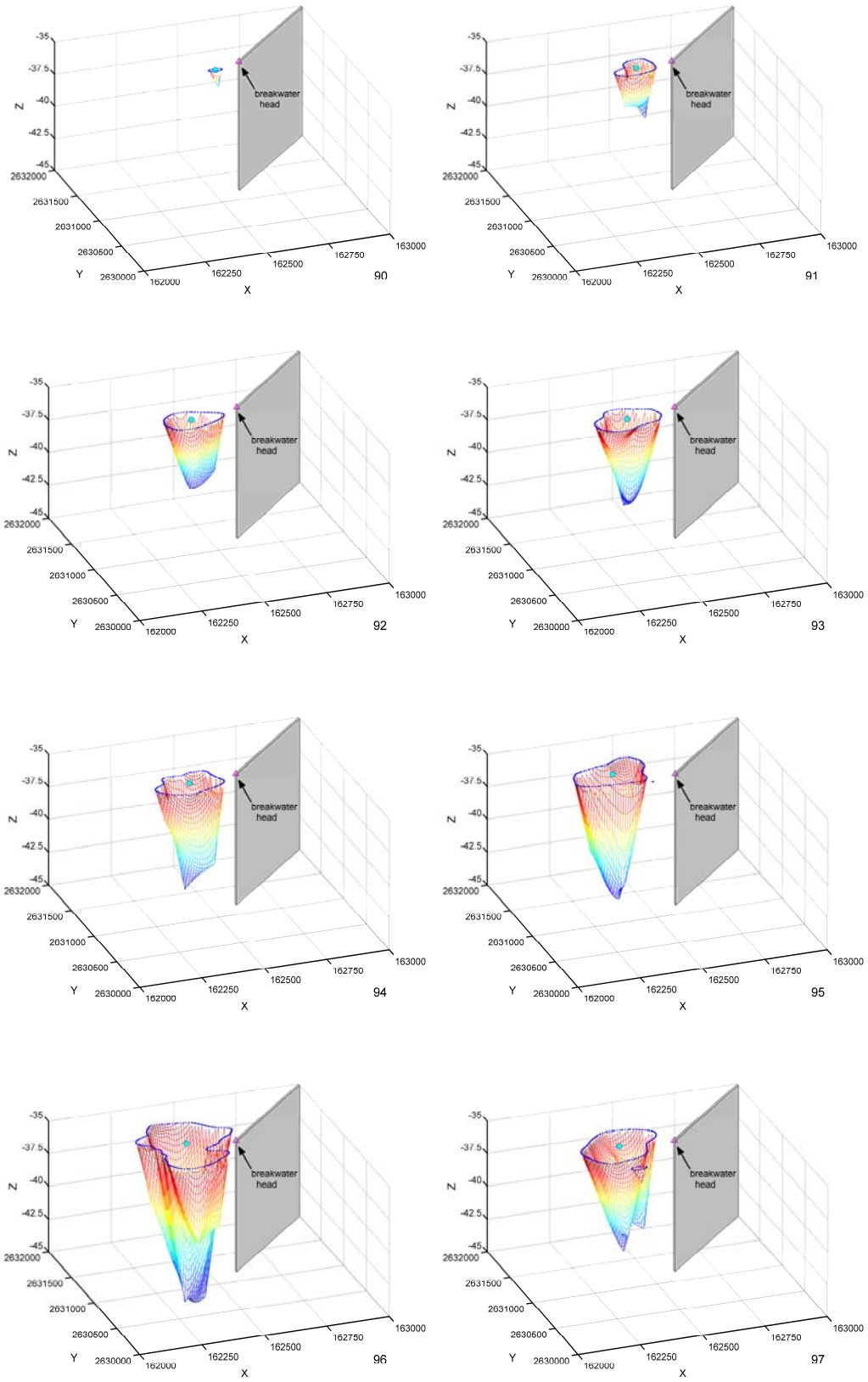


圖 6.47 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖(90~99 年)

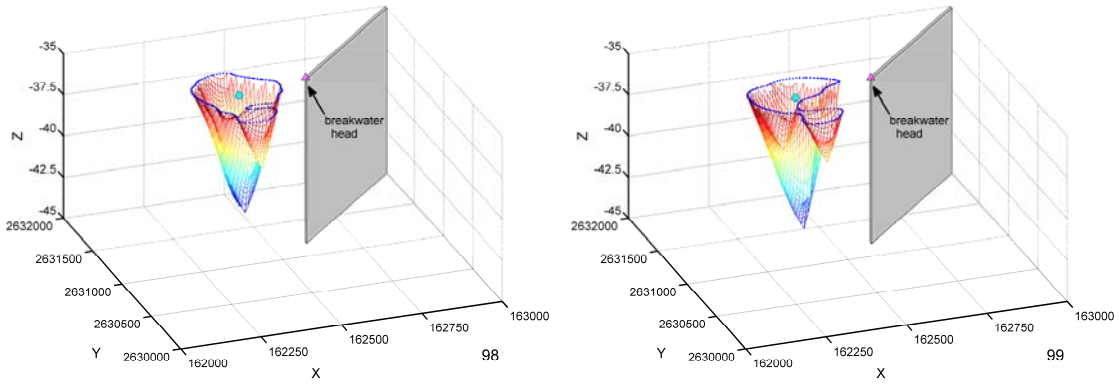


圖 6.47(續) 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖(90~99 年)

表 6-7 麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量化表 (90~99 年)

年度	堤頭位置 (X , Y)	形心位置 (X , Y)	心堤距 (m)	沖刷截面積 (m2)	沖刷體積 (m3)	平均沖刷 (m)
90	162601, 2631186	162488, 2631095	145	1800	63944	36
91	162601, 2631186	162456, 2631163	147	33900	1240470	37
92	162601, 2631186	162403, 2631073	228	52900	1979967	37
93	162601, 2631186	162395, 2631097	224	75200	2832137	38
94	162601, 2631186	162406, 2631135	202	75200	2869033	38
95	162601, 2631186	162381, 2631339	268	100900	3914629	39
96	162601, 2631186	162417, 2631259	198	197300	7868464	40
97	162601, 2631186	162388, 2631225	217	128400	4863288	38
98	162601, 2631186	162378, 2631080	247	125100	4686380	37
99	162601, 2631186	162349, 2631065	280	101000	3788176	38

三、海流與堤頭沖蝕關係特性分析

彙整臺中港北防波堤堤頭附近-25m 沖刷洞與麥寮港西防波堤堤頭附近-35m 沖刷洞歷年沖刷截面積與沖刷體積，如圖 6.48 所示，臺中港自民國 86 年開始 -25m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 90 年時到達最大；民國 90 年至 94 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，亦即沖刷洞又逐漸回淤。然而民國 95 年

時，沖刷洞又發生嚴重侵蝕現象。麥寮港自民國 90 年開始 -35m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 96 年時到達最大；民國 96 年至 99 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，沖刷洞逐漸回淤。

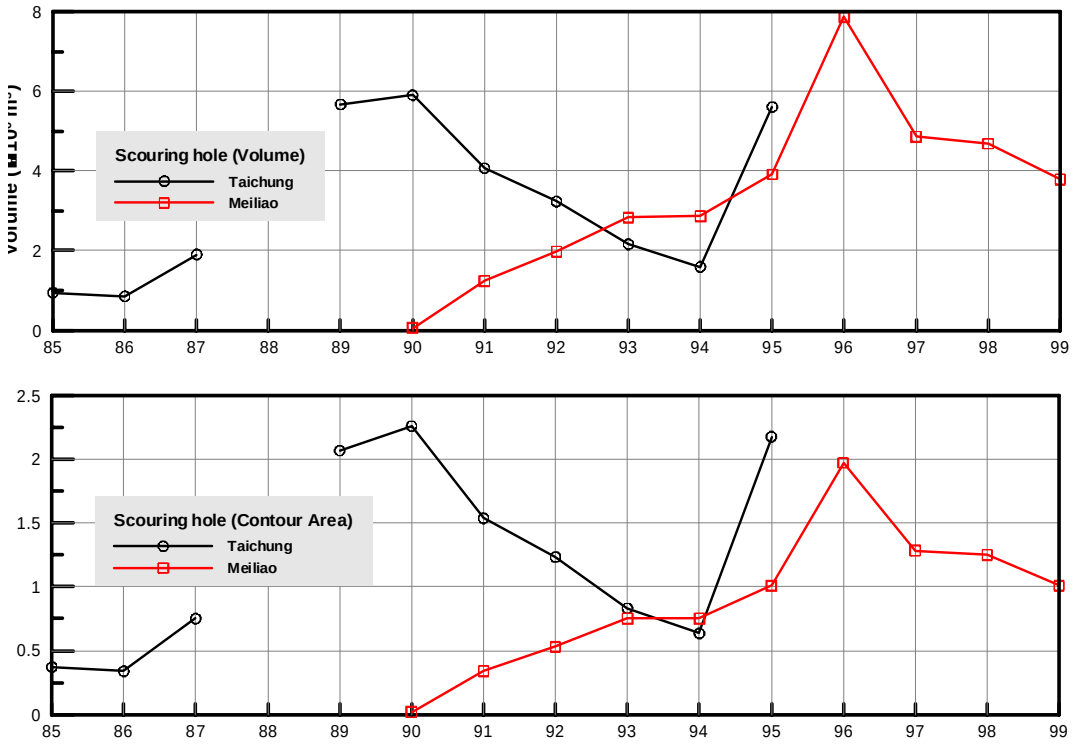
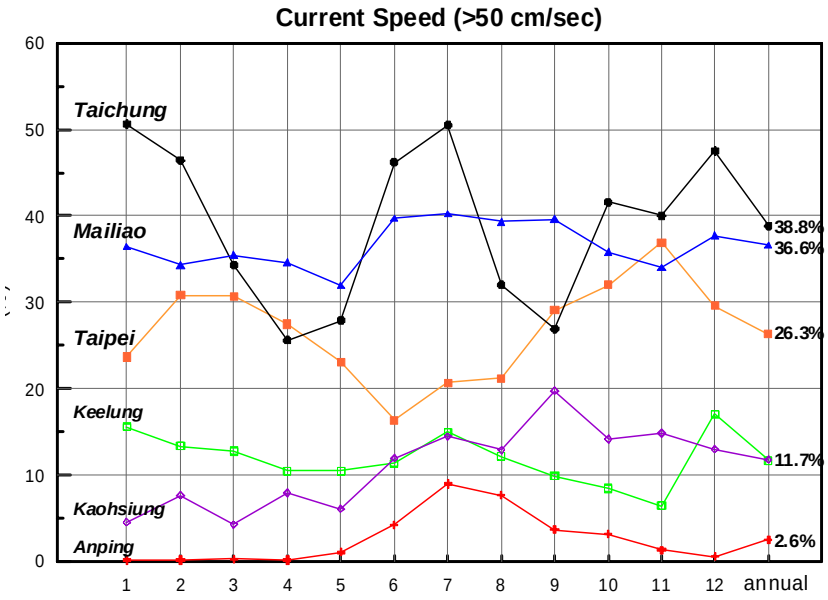


圖 6.48 臺中港北堤堤頭-25m 與麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變動圖

收集基隆、台北、臺中、麥寮、安平與高雄等六個港口歷年 (至 2008 年為止) 海流資料，統計分析各月份和全年的海流速度記錄超過 50cm/sec (約一節) 的發生機率，如圖 6.49 所示。由全年 (annual) 統計結果可知，臺中港和麥寮港的海流流速超過一節的發生機率各為 38.8%、36.6%，明顯大於其他港口；而臺中港在 1、7 月份流速超過一節的發生機率更超過 50%，麥寮港則在 6~9 月發生機率均接近 40%。在此種高速流況的深海域環境下，實可說明臺中港和麥寮港防波堤之堤頭地形沖蝕的主要原因，應為海潮流所致。

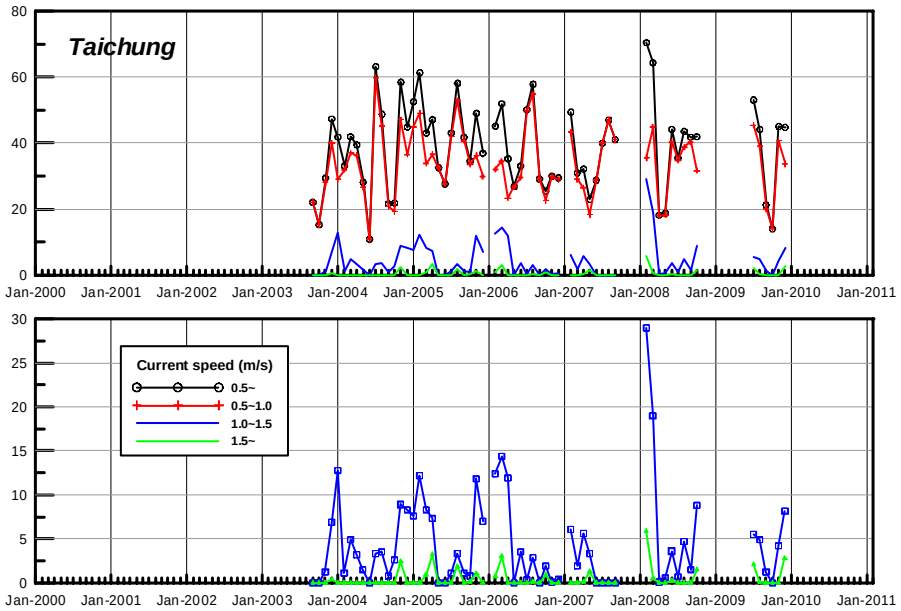
進一步統計臺中、麥寮兩港口於民國 89 年至 99 年期間，較大流速的分佈機率，包括流速大於 0.5m/sec、0.5~1.0m/sec、1.0~1.5m/sec、流速大於 1.5m/sec 等發生機率，如圖 6.50 及圖 6.51 所示。由圖 6.50 (下

圖) 可看出，臺中港海域冬季期間流速超過 1.0m/sec (約二節) 的發生機率可達 10%，夏季期間流速超過 1.0m/sec 的發生機率亦多介於 2~5%。由圖 6.51 (下圖) 可看出，麥寮港海域於 2000~2007 年期間流速超過 1.0m/sec 的發生機率小於 2%，但是 2007 年底以後流速超過 1.0m/sec 的發生機率則增加到 2~8 %。



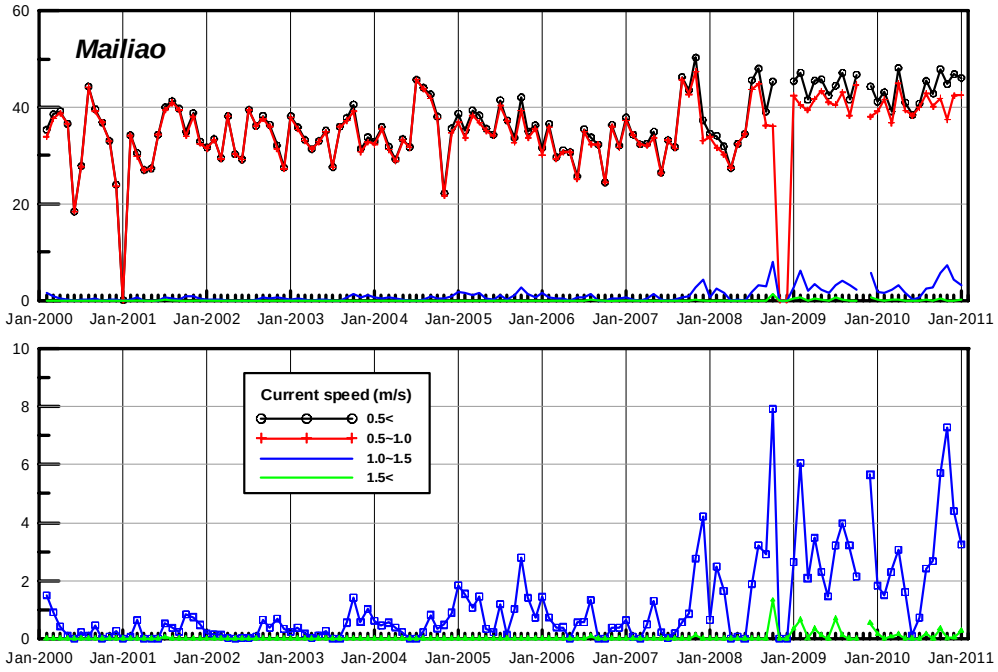
數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

圖 6.49 臺灣六大港海域歷年流速大於 50cm/sec 發生機率圖



數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

圖 6.50 臺中港 2003~2009 年流速分佈發生機率圖



數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

圖 6.51 麥寮港 2000~2010 年流速分佈發生機率圖

一般而言，近岸的漂沙行為，波浪多是扮演著啟動底質的角色；底質傳輸的行為，則是海流、潮流、風驅流或波浪引發的近岸流所造成的。然而，隨著水深增大，底床受波浪影響變小，此時潮流則為深水域漂砂傳輸主要驅動力。臺中與麥寮港海流經常性保持高流速狀態，致此二港區堤址水深雖達-20m 以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。此現象反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，主要是潮流所致。

而不同的海流方向會引發不同的漂砂方向，長期的淨漂砂量則決定此處海域的侵淤特性。若以麥寮港為例，分析 YLCW 測站的海流歷時特性，累計各月份的海流淨能量，與麥寮工業區專用港管理公司於 96/04~ 100/09 期間所施測的 30 筆堤頭地形資料進行關聯性比對分析。

首先從流能量探討，而各月份的海流淨能量的計算方式：以麥寮港 YLCW 測站 2007 年 5 月份的逐時海流資料為例，首先繪製逐時流速與流矢分佈圖，並僅選取流速大於 0.5m/sec 的部分進行探討。其次，將流速大於 0.5m/sec 的成分流，分成沿岸方向與向、離岸方向分量。

以各方向流速分量的平方表示為該方向的單位流能量 (以下簡稱流能量，即 $E_i \approx V_i^2$)。

沿岸方向：$E_{N\sim S} \approx \sum_i^{31}[(V_i)_N^2 - (V_i)_S^2] = +535.17$ (+表示向北)

向、離岸方向：$E_{E\sim W} \approx \sum_i^{31}[(V_i)_E^2 - (V_i)_W^2] = +20.93$ (+表示向東)

依據上述分析流程，將麥寮港 YLCW 測站由 2000 至 2010 年間之逐時海流資料計算出月淨流能量分佈，如圖 6.52 所示 (藍線為南、北方向，紅線為東、西方向)。由圖 6.52 可看出，逐月淨流能量呈現規律性，夏季期間北向的流能量逐漸增加；冬季期間相反，南向的流能量逐漸增加。其中，東、西方向的月淨流能量相對很小，故不予討論。

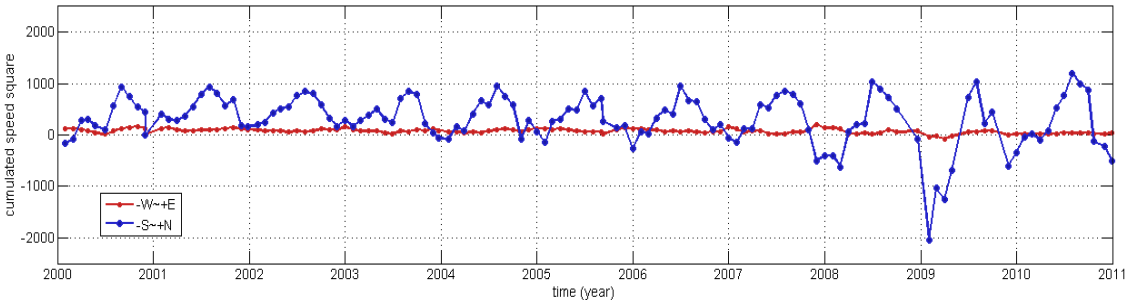


圖 6.52 麥寮港 YLCW 測站逐月淨流能量累積分佈圖 (2000~2010 年)

由上述分析流程可得麥寮海域不同月份或季節之淨流能量，配合麥寮工業區專用港管理公司於 96/04 ~ 100/09 期間所施測的堤頭地形資料，挑選同期間的海流與堤頭地形資料進行關聯比對，可初步歸納出，堤頭地形的沖蝕現象與海流的季節性變化直接相關。將 96/04~100/09 期間所有的堤頭 -35m 沖刷洞資，與同期間的流能量累積分佈進行比較，如圖 6.53 所示。結果可證實，夏季淨流能量向北 (主要流況向北)，沖刷洞在堤頭北側，但堤頭南側為較深的水域 (如航道)，並無漂砂向北補注沖刷洞，造成堤頭 -35m 沖刷洞持續侵蝕。冬季淨流能量向南 (主要流況向南)，沖刷洞在堤頭南側形成，但堤頭北側有來自濁水溪口的沖積沙，南向漂砂會先將原北側沖刷洞逐漸回填。如此週而復始，形成一個循環的現象。

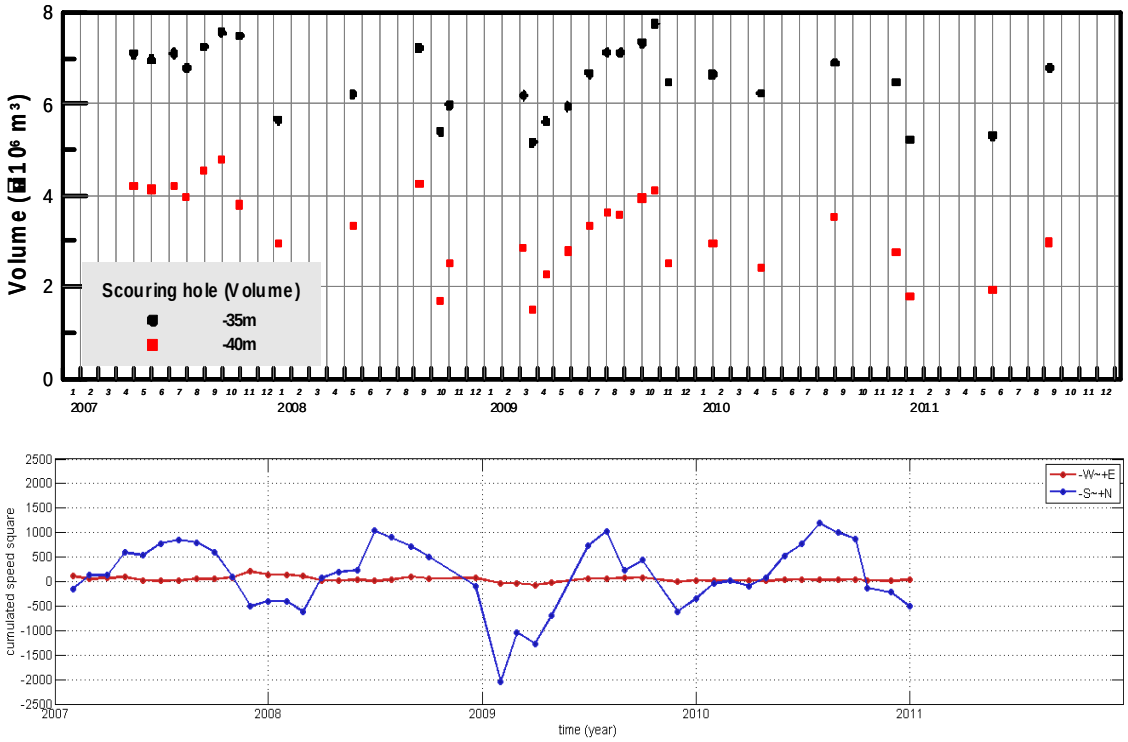


圖 6.53 麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化與流能量累積分佈之對應關係圖

6.3 防波堤堤頭沖蝕數值模型建立與初步模擬測試

以 FLOW-3D 進行防波堤堤頭附近之波、流場數值計算以及地形變化模擬，以期建立防波堤堤頭侵蝕機制。數值模擬以臺中港和麥寮港附近海域為計算範圍，如圖 6.54 所示 (綠色粗框線內)。臺中港計算範圍為 13.5 km × 17 km，北防堤堤頭約於計算領域的中心點北偏 800m 處；麥寮港計算範圍則是 13 km × 16 km 的區域，西防波堤堤頭約在計算領域中心點東偏 2.6 km 處。數值模型邊界採用附近海域實測地形資料，並搭配本計畫所觀測的防波堤堤頭地形資料做為初始水深條件。使用 10 m × 10 m 計算網格的佈置示意圖，如圖 5.55 所示。模型使用 Rhino 建立防波堤模型，並匯入 FLOW-3D，如圖 5.56 所示。

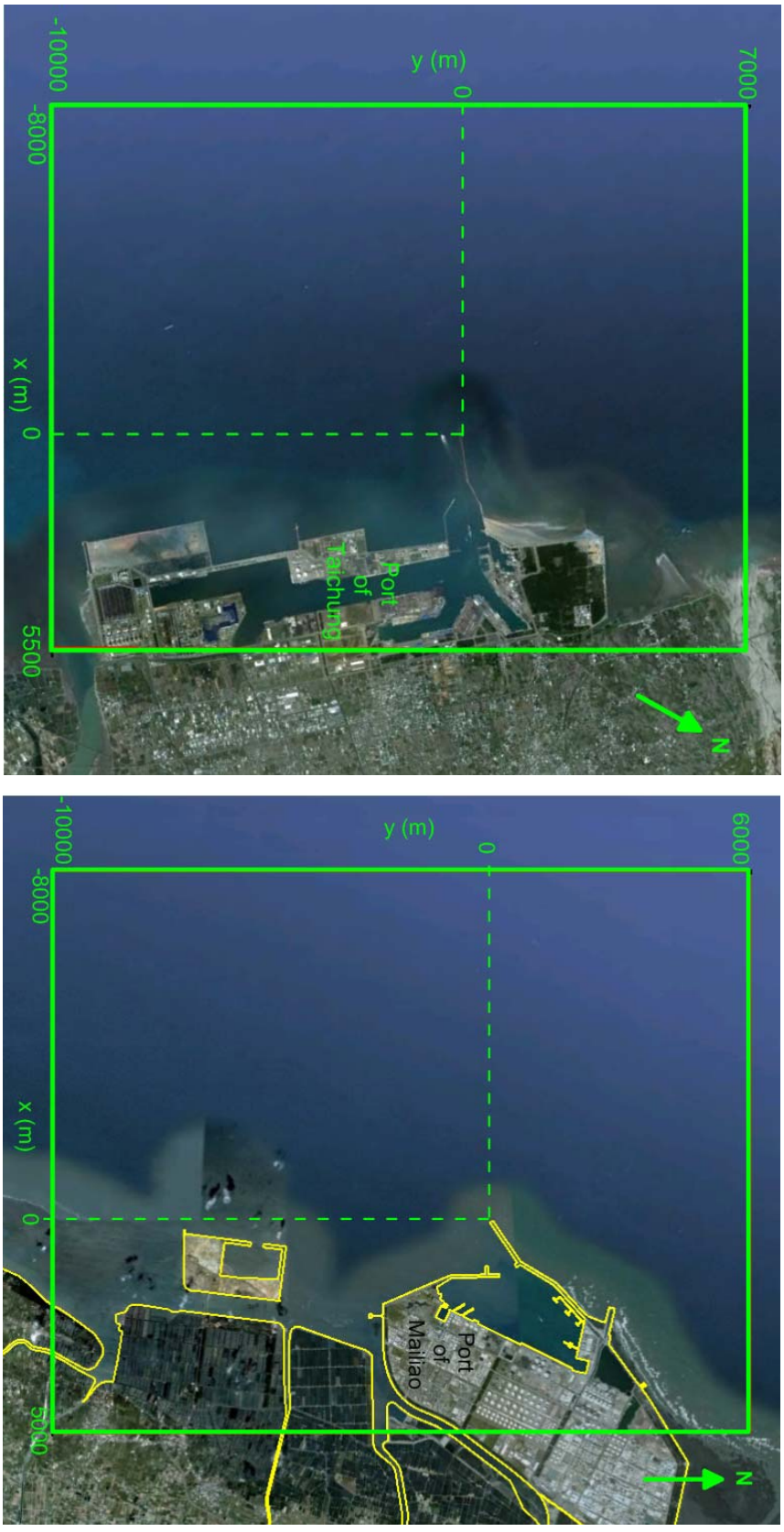


圖 6.54 臺中港與麥寮港數值模擬海域範圍示意圖

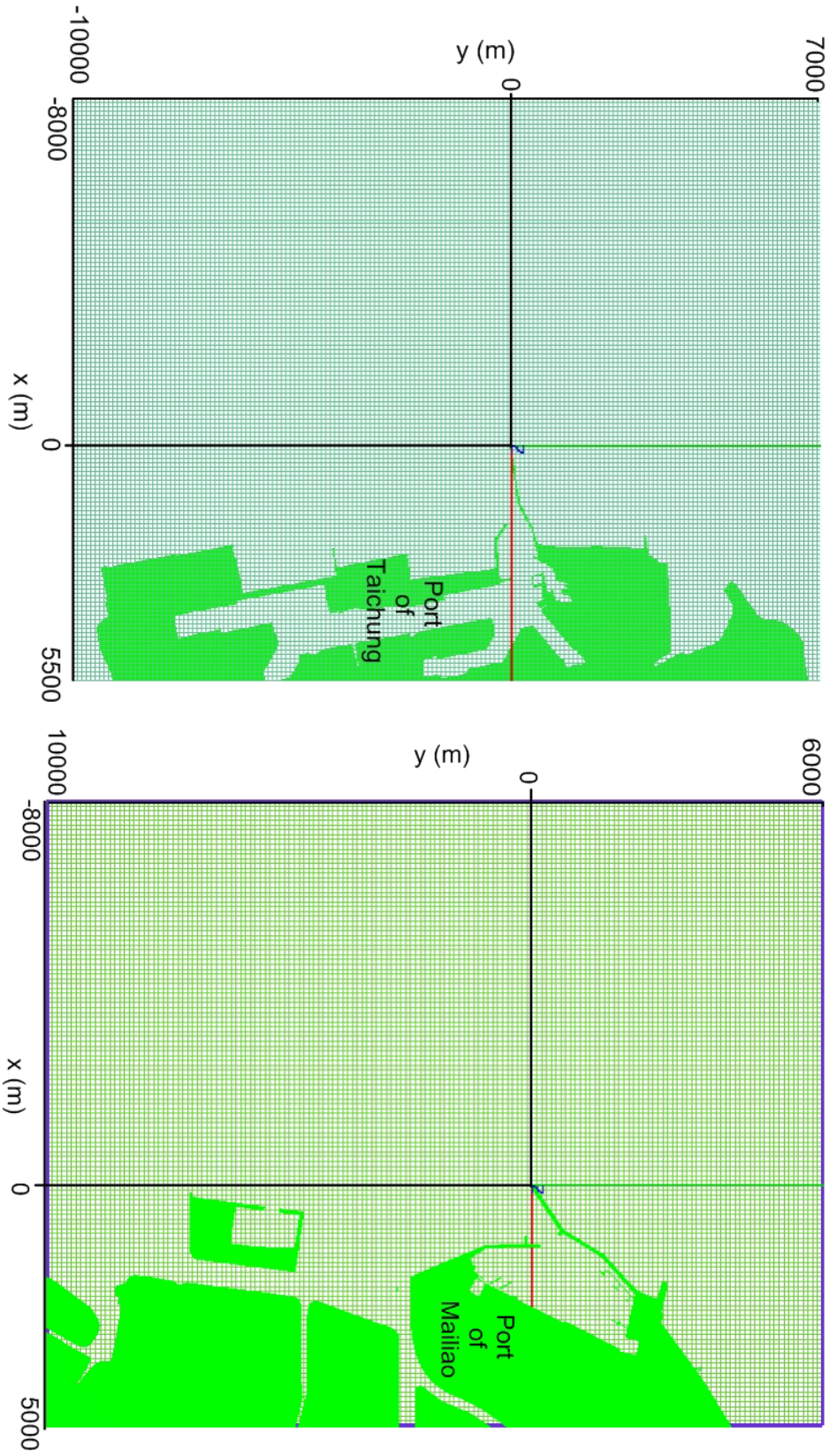


圖 6.55 臺中港與麥寮港數值模擬計算網格示意圖

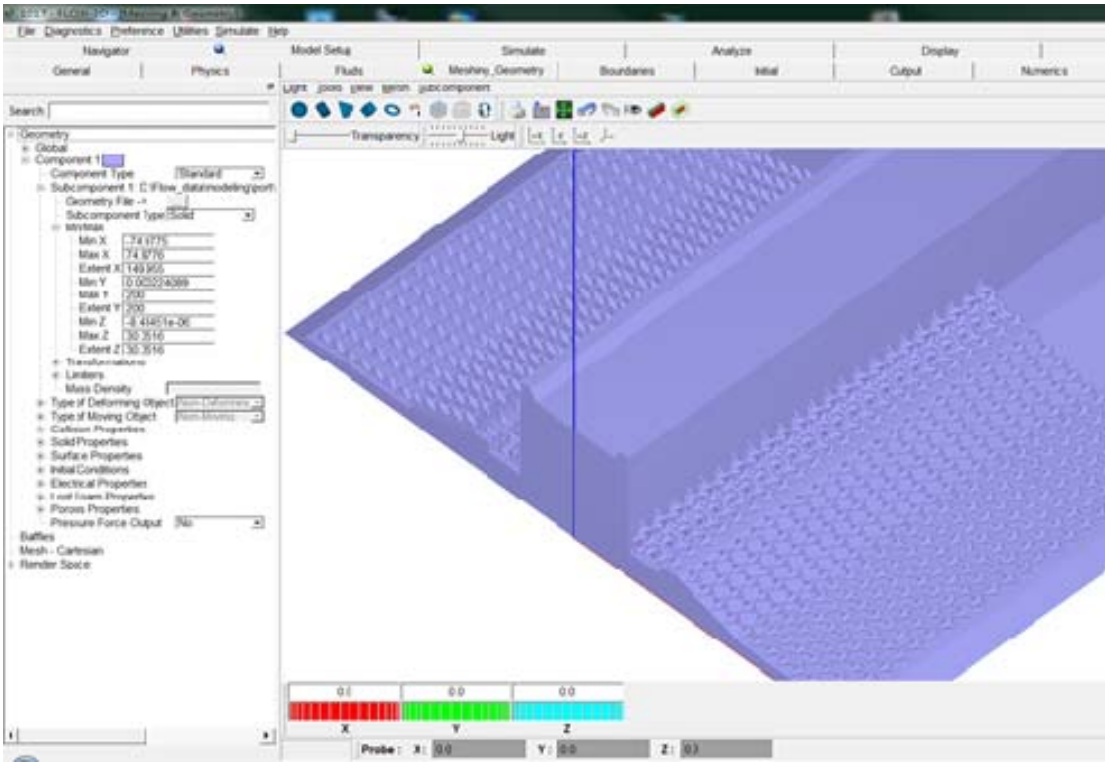


圖 6.56 FLOW-3D 防波堤模型

為簡易、快速地驗證 FLOW-3D 數值模式的計算成效，邊界輸入條件則選定週期性變化流速資料。在臺中港及麥寮港海域模型邊界上均給定週期 12 小時、最大振幅為 0.4m/sec 南北向往復的流速條件 (已簡化)，如圖 5.57 所示；再加上本計畫在臺中港及麥寮港所測得之潮位資料，作為初始水位條件。

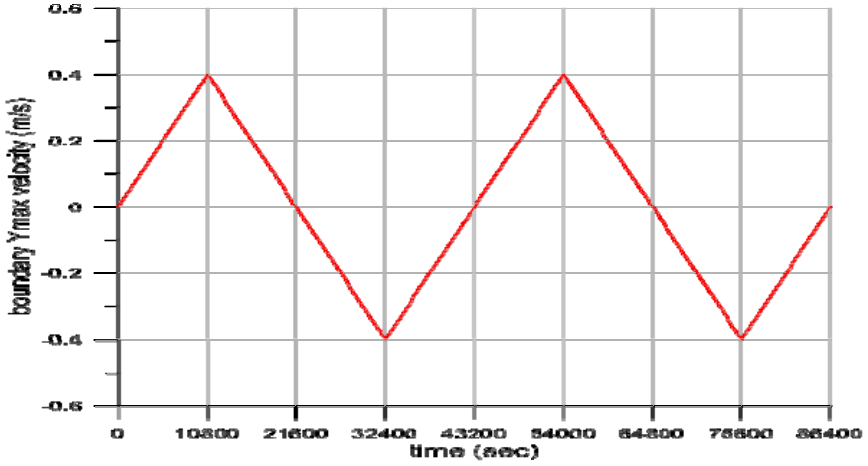


圖 6.57 開放水域之時序列流速邊界條件

數值模型的最佳效能，仰賴各項設定參數的調整與校核，時間與

空間尺度若調降太小，計算效益時間比率極低，若要模擬大區域的潮流流場特性時，為符合 Flow-3D 運算效能及縮短模擬時間，以 10m 網格進行數值計算即可符合要求。對於於臺中港與麥寮港海域之流場測試結果，如圖 5.58 所示。由圖 5.58 可看出，臺中港北堤堤頭之西側與西北側、麥寮港西堤堤頭之西側與西南側流速顯明增大，且在堤頭後側遮蔽區有渦流產生。靠近西側邊界的外海流況則呈現均勻流速的情形，已不受東側結構邊界與地形水深的影響。

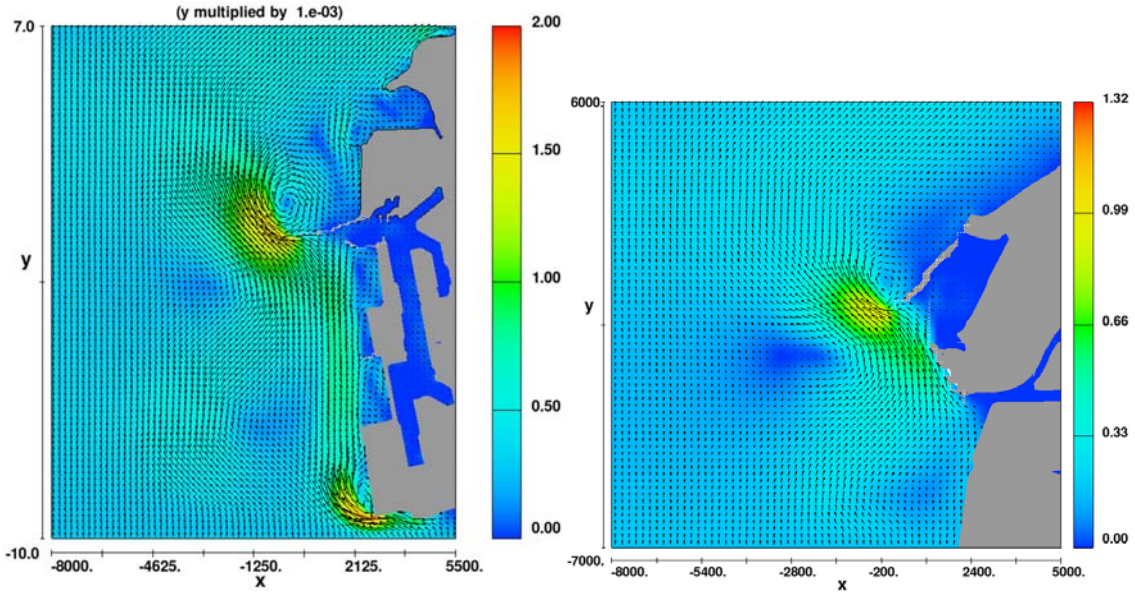


圖 6.58 臺中港與麥寮港海域流場初步測試結果

數值模型後續將進行二維平面流場模式之校驗、接續平面流場模式進行平均水深三維流場模式測試、三維流場不等水深模式測試、進行波場模式測試以及進行波流場混合模式測試等項目的測試。

6.4 小結

本章針對臺中港及麥寮港防波堤堤頭沖蝕現象，進行詳盡的研究。其中臺中港自民國 86 年開始 -25m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 90 年時到達最大；民國 90 年至 94 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，亦即沖刷洞又逐漸回淤。然而民國 95 年時，沖刷洞又發生嚴重侵蝕現象。麥寮港自民國 90 年開始 -35m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 96 年時到達最大；民國 96 年至 99 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，沖刷洞逐漸回淤。另由 96/04 至 100/09 五年期間麥寮港西防波堤堤頭附近 30 次加密測量之地形資料得知，在夏季期間 (約 4~9 月)，-35m 沖刷洞的面積與體積逐漸加大 (即侵蝕加劇)；而冬季期間 (約 10~3 月)，沖刷洞的面積與體積則逐漸減小 (即逐漸回淤)。

由本章研究成果可知，臺中港與麥寮港防波堤鄰近海域的地形侵於狀態，隨著防波堤長度延伸、海潮流作用與上游河川砂源補注而有明顯的變化。臺中港與麥寮港海域流況明顯大於台灣其他港域 (波浪並無此現象)，致此二港區堤址水深雖達-20m 以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。此現象反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，可能是潮流所致。防波堤堤頭附近之漲退潮流速與流向不對稱形成淨流，水流經堤頭後轉向造成速度梯度，此等現象均引起之漂砂不平衡，導致堤頭發生沖刷。由現場流況與沖蝕分析得知，夏季主要流況向北，沖刷洞在堤頭北側，但堤頭南側為較深的水域 (如航道)，無漂砂向北補注沖刷洞，以致沖蝕加劇。冬季主要流況向南，沖刷洞在堤頭南側形成，但堤頭北側有來自河口的沖積沙，南向漂砂會先將原北側沖刷洞逐漸回填。如此週而復始，在近期形成一個循環的現象。

第七章　海象模擬作業化系統

7.1 海象模擬作業化系統說明

臺灣近岸海象預報系統-TaiCOMS (Taiwan Coastal Operational Modeling System)，主要內容為包括臺灣近岸海象數值預報系統作業化的發展建置及與現場觀測資料比對驗證。

近年主要研究目標為國內主要港灣近岸波潮流之預警精度及作業化功能改進。模式現階段發展方面，風場及氣壓場由中央氣象局提供即時預報資訊，而各項本土化波浪模式、水位模式、流場模式及海嘯模式，已推算應用於國內主要港口，並進行長期持續性模式校驗。未來研究目標為透過作業化預報模擬系統持續性驗證及校調近岸及港域模式。

1 波浪模式作業系統簡述

波浪模式系統共規劃四種尺度的範圍，包括西太平洋範圍(遠域)、臺灣周圍海域範圍(近域)、近岸海域範圍及港域範圍，以期將臺灣海域所有可能預報的的波浪狀況包含在其中。以下分別就各推算範圍的相關資料進行說明：

(一) 遠域波浪推算：以西太平洋海域為範圍，屬於大尺度的推算，其目的是希望得到較佳的近域波浪推算邊界參考輸入值，同時也考慮能涵蓋各種侵台的颱風路徑。主要應用 WAM(WAve Model) 的波浪推算模式，與中央氣象局每日預報之動態風場結合。其模擬範圍由北緯 10°至 35°，東經 110°至 134°，數值計算格網解析度為 0.2°×0.2°(12 分網格)。

(二)近域波浪推算：指的是臺灣周圍海域模式範圍，屬於中尺度的推算，此部分模擬則可以提供近岸範圍模式的邊界條件，主要應

用波浪推算模式採用以荷蘭 Delft 大學發展的近海風浪模式 SWAN(Simulating WAves Nearshore)做為基礎並以適合臺灣海域的模式參數改善。近域波浪推算的輸入邊界條件是以巢狀計算的觀念，自遠域浪推算結果中擷取近域波浪推算範圍的邊界，與中央氣象局每日預報之動態風場結合。其模擬範圍由北緯 21°至 26°，東經由 119°至 123°，數值計算格網解析度為 0.04°×0.04°(2.4 分網格)。

(三)近岸波浪推算：小尺度的近岸區域模式系統，主要應用 Kirby and Dalrymple (1983)依據拋物線型緩坡方程式所發展的波浪折、繞射模式(REF/DIF，波浪折繞射模式)，此模式的輸入邊界條件係承接近域波浪推算的結果，並依據各個商港地區不同特性來規劃計算範圍。

(四)港域波浪推算：細尺度的近岸區域模式系統，所使用的模式是以橢圓型緩坡方程式為基礎的有限元素法數值模式。本範圍的推算依據個各商港地區不同特性來規劃計算範圍，但由於執行時間的考量並未直接進行預報模式計算，而是發展成後續應用驗證模式。

2 水動力模式作業系統簡述

水動力模式系統共規劃三種尺度的範圍，包括西太平洋範圍(遠域)、臺灣周圍海域範圍(近域)、近岸海域範圍，以期將臺灣海域所有可能預報的的潮位、海流狀況包含在其中。以下分別就各推算範圍的相關資料進行說明：

(一) 遠域水動力推算：以西太平洋海域為範圍，屬於大尺度的推算。主要應用歐盟發展的模式 COHERENS (COupled Hydrodynamical Ecological model for REgioNal Shelf seas)作為水位及海流的計算工具，並配合發展適合臺灣海域颱風作用的颱風模式及參數率定，與中央氣象局每日預報之動態風場結合，成為本土化應用之潮汐及風暴潮複合動力模式。本計畫大尺度模式又稱為西太平

洋模式，其模擬範圍為北緯 15°至 42°，東經 105°至 150°，數值計算網格大小為 10′×10′(10 分網格)。

(二)近域水動力推算：指的是臺灣周圍海域模式範圍，屬於中尺度的推算，主要應用歐盟發展的模式 COHERENS 作為水位及海流的計算工具，並配合發展適合臺灣海域颱風作用的颱風模式及參數率定，與中央氣象局每日預報之動態風場結合，成為本土化應用之潮汐及風暴潮複合動力模式，臺灣環島二維水位及海流模式，此部分為水深平均流速，主要驅動力為潮汐及風驅流，並無洋流的輸入。本計畫中尺度模式又稱為臺灣海域模式，其模擬範圍為北緯 21°至 26.5°，東經 116.5°至 125°，數值計算網格大小為 1′×1′(1 分網格)。

(三)近岸水動力推算：小尺度的近岸區域模式系統，主要應用的各港區近岸水動力模式則採用二維有限元素水動力模式 fehdm(有限元素水動力模式)，並依據各個商港地區不同特性來規劃計算範圍，各港口模擬範圍之選取主要以各港口為中心，配合海岸線及地形水深變化進行規劃，離岸之開放邊界則儘量與海岸線平行。基於此，本計畫各港口水動力模式模擬範圍大小在沿岸方向約介於 20km～30km 之間，離岸距離在各港口約介於 10km～15km 之間。

3 海嘯模式作業系統簡述

由美國康乃爾大學之 COMCOT(COrnell Multigrid COupled Tsunami model)海嘯模式及利用互逆格林函數計算方式，建立海嘯波高資料庫，利用 Matlab 軟體撰寫而成之介面以及遠端擷取之功能，可結合為一「台灣港口海嘯速算系統」，其計算範圍包含環太平洋地震帶，波高資料庫涵蓋國內各重要港口。透過作業化整合建置提供海嘯預警資訊。

本作業化系統最重要的工作便是提供臺灣主要港區每日 72 小時模擬(昨日、今日、明日)的風場、波浪、水位及海流資訊供使用者參考，目前已建置線上作業模式可參酌第二章至第四章，而大尺度及中尺度波浪及水動力模組作業化內相關數值網格範圍間距如表 7-1a 及表 7-1b 所示，其大尺度及中尺度涵蓋範圍圖如圖 3.1 所示。

表 7-1a 中央氣象局風場 NFS 風場資料格式

DMS FLAP	座標系統	DIMESION	RESOLUTION	格點位置
RC	Lambert conformal mapping	221*127	45KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(114,71)位置位於(30N,120E) 底圖 左下點(-5.34068N,77.91867E) 右上點(42.92812N,180.2034E)
MC	Lambert conformal mapping	181*193	15KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(76,148)位置位於(30N,120E) 底圖 左下點(9.28194N,109.7727E) 右上點(35.26665N,137.7342E) 座標(1,1)對應至 45KM MESH 之(89,22)座標位置
HC	Lambert conformal mapping	91*121	5KM	Center(120E), true(10N,40N) 座標(28,199)位置位於(30N,120E) 底圖 左下點(20.78609N,118.6597E) 右上點(26.33824N,123.2724E) 座標(1,1)對應至 15KM MESH 之(67,82)座標位置

表 7-1b 作業系統內大尺度及中尺度風、波及流場資料格式

	模式	DIMESION	模式格網	格點位置
風場	採用 NFS 之 RC 風場內插	307*211	1/6 度 =0.166667	底圖 左下點(0N,99E) 右上點(35N,150E)
	採用 NFS 之 MC 風場內插	301*301	1/12 度 =0.083333	底圖 左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
波場	西太平洋範圍模式(WAM 模式)	121*126	0.2 度 (約 20 公里)	底圖 左下點(10N,110E) 右上點(35N,134E)
	臺灣周圍海域波浪模式(SWAN 模式)	101*126	0.04 度 (約 5 公里)	底圖 左下點(21N,119E) 右上點(26N,123E)
流場	西太平洋海域複合潮模式 COHERENS 模式)	541*325	1/12 度 =0.083333	底圖 左下點(15N,105E) 右上點(42N,150E)
	臺灣海域複合潮模式(COHERENS 模式)	511*331	1/60 度 =0.016667	底圖 左下點(21N,116.5E) 右上點(26.5N,125E)

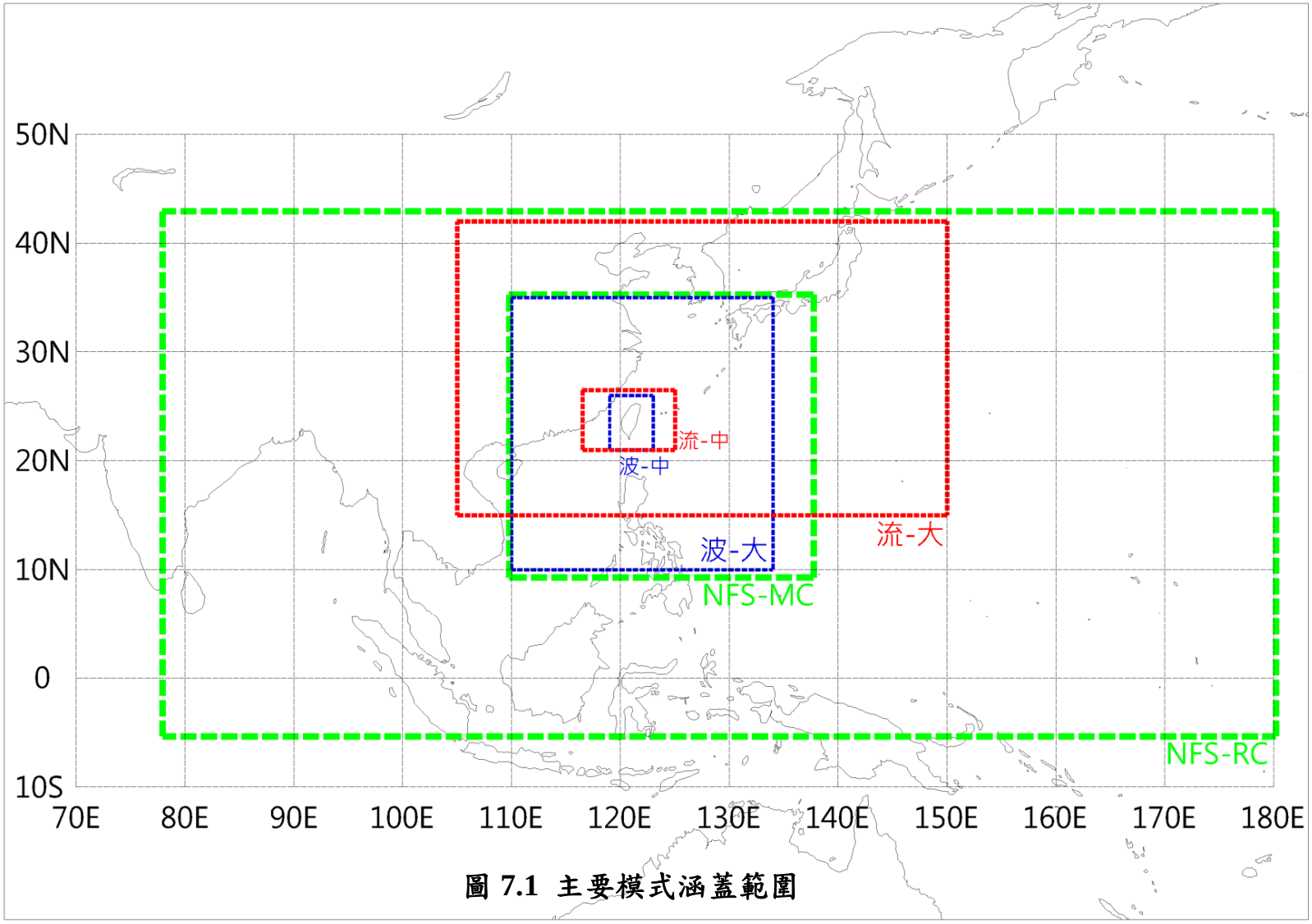


圖 7.1 主要模式涵蓋範圍

7.1.1 整體作業化流程

本系統之表面風場及氣壓資訊來源為接收中央氣象局每日 0 時及中午 12 時發布預報資訊為主，由於本系統氣象預報從取得資料至數值模擬完成並提供港灣環境資訊系統仍需數小時，為考量模擬計算預報的時效性,目前彙整前兩日發布的預報資料合成為72小時(昨日、今日、明日)作為本系統主要外力之氣象資料，因此可保留資料傳輸時間與減少因氣象局有時會發生少許氣象資料缺失而導致整體作業無法運作困擾。

本系統每日凌晨 3 時進行該日模擬計算，首先下載氣象資料，而後解碼重整及內插產出後續模式所需風場及氣壓場後，隨即開始進行各模式的計算作業，全部模擬結果會於上午 7 時以前完成並立即進行圖表製作及彙整固定資料夾，於每日 8 時由港灣環境資訊系統更新海象模擬資訊網頁，整體作業時間流程如圖 7.2 所示。現階段環境以達到若氣象資料取得後，已可約 5 小時內完成相關作業。

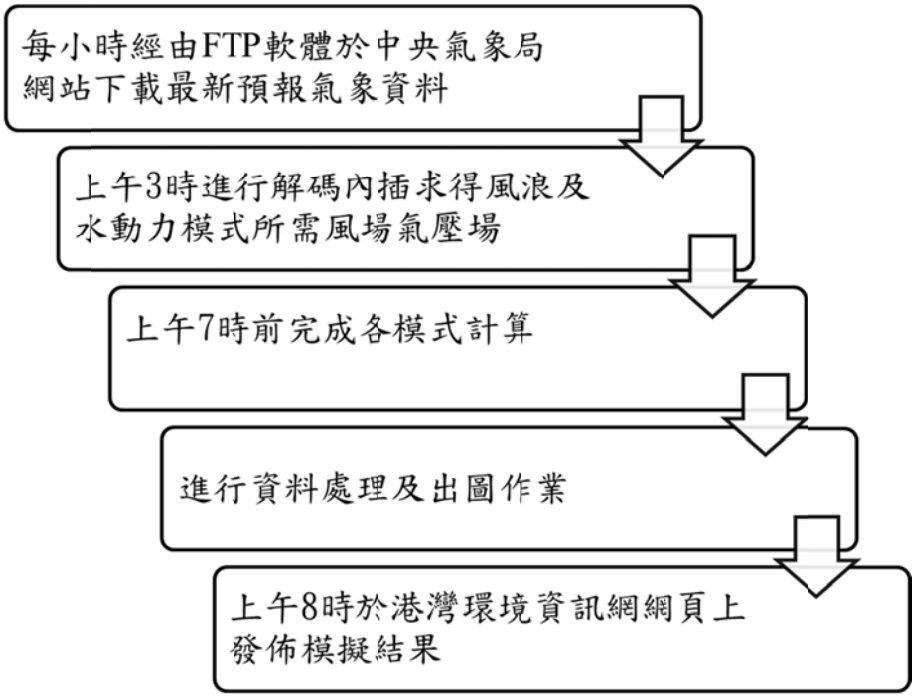


圖 7.2 海象模擬系統作業時間流程

系統每日線上作業每次模擬時間範圍為三天（72 小時，昨日、今日、明日），其中包含 24 小時追算模擬（模擬結果可與本所海象即時觀測系統資料比對展示以便使用者判斷本日模擬作業結果之可信度）及 48 小時預測模擬計算（僅提供模式計算結果）。圖 7.3 為作業流程範例圖，以 1 月 1 日及 1 月 2 日兩日模擬作業說明，1 月 1 日 8 時發佈的現報資料時間為 12 月 31 日 0 時至 1 月 3 日 0 時，此時會將 1 月 1 日 0 時的計算結果存檔，以作為 1 月 2 日的計算起始點(warm start data)，如此便可以直接將每日的氣象條件引入模式進行計算，無需重新啟動模式，因此可模擬時間不間斷的波浪、水位及潮流結果。該做法兼具作業化的考量與實際物理問題層面，會比模式重新計算每日海象模擬來的更具實質意義。

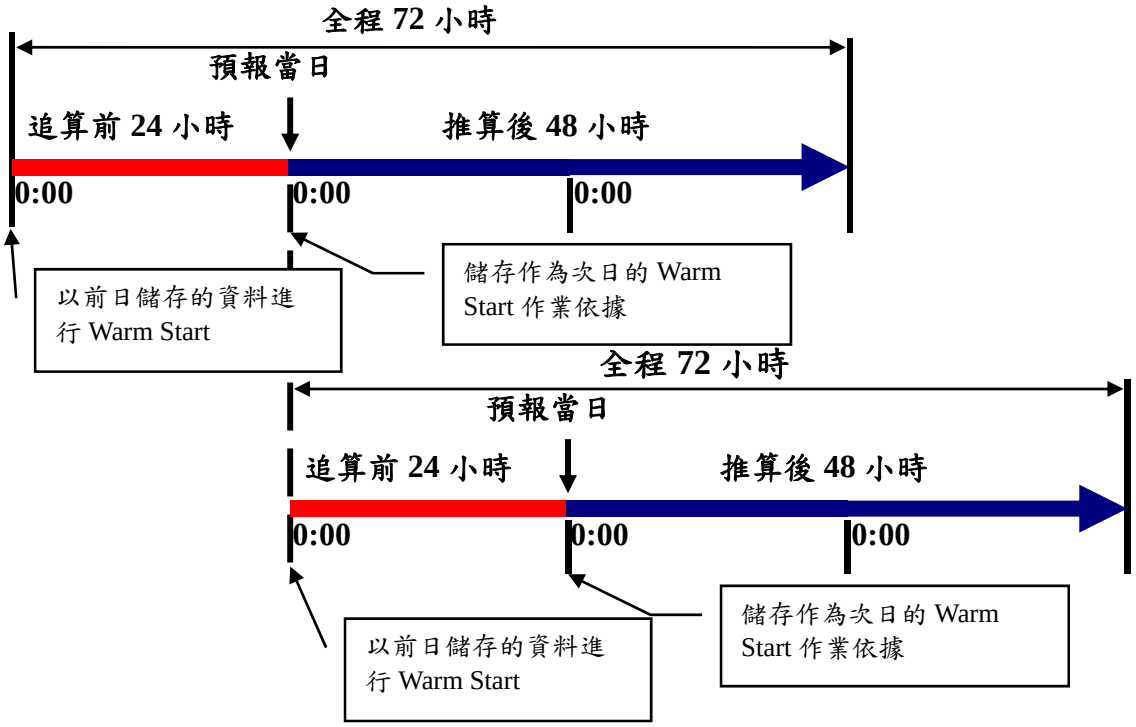


圖 7.3 海象數值模擬系統兩日作業流程範例圖

有關海象模擬作業化預報成果的評估分析主要分成兩個部份：其一為在本計畫駐點專案助理配合每日的預報作業彙整資料，並以月為單位整理相關報表，其二對於颱風的特殊事件則另建置分析報表進行評估。相關報表均亦放置於 FTP 網站提供計畫內參與人員下載評估及討論，並可瞭解臺灣環島主要港區近岸之風、波浪、潮、流的特性。

有關計畫成果的評估，今年度主要以海象大尺度及中尺度預報系統的推算成果評估為主，小尺度(基隆港及臺北港)波浪及海流部分，因從 8、9 月後才陸續完成作業化建置，僅就模式成果驗證說明。整體成果評估目前所採用為系統每天的預報資料,並彙整本中心的觀測資料，製作標準資料檔，包括風場、波場、水位場及流場等進行評估作業。本年度風力及波浪季評估報告及颱風期間評估報告成果彙集成專冊－2011 年海象作業化預報成果(風力及波浪部份)。而水位及海流季評估報告及颱風期間評估報告成果彙集成專冊－2011 年海象流作業化預報成果(水位及海流部份)。

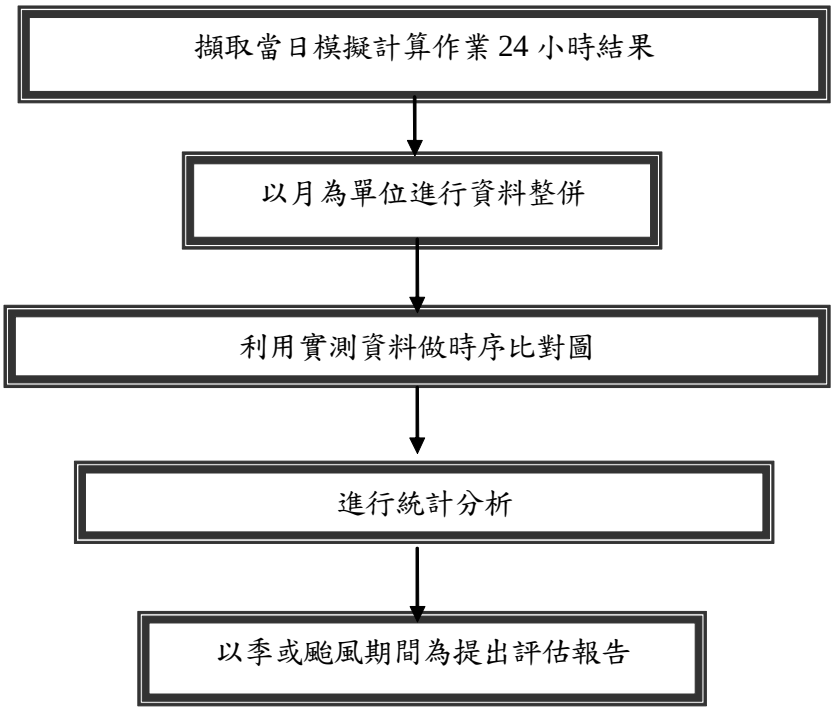


圖 7.4 海象數值系統線上作業成果評估流程

7.1.2 系統資料格式及應用軟體說明

海洋科學研究領域，常見以不同資料格式來處理其各類型資料如 GRIB （GRidded In Binary）、NetCDF （Network Common Data Form）與 HDF（Hierarchical Data Format）等格式。GRIB 與 NetCDF 是一種跨平臺、自我描述格式的檔案，GRIB 多用於氣象科學領域（如 NCEP Global Tropospheric Analyses Wind Field），NetCDF 則普遍用於海洋氣象科學領域的觀測與數值模式輸出（如 COADS project data sets, NOAA World Ocean Atlas），HDF 則為 MODIS 衛星影像及 QuickSCAT 衛星風場格式。

本系統彙整相關模式資訊時，最常面臨的問題為各模式間資料格式複雜性，如中央氣象局所提供風場為 GRIB 格式則須利用 wgrib 軟體解碼使用，而波場模式及流場則產生一般文字檔(ASCII 格式)但隨模式產生資料格式均不相同，並且一般文字檔檔案過大不易長期備份及使用，因此仍須調整成制式二進位檔案較為便利及可供後續使用，於是整體系統資料現階段除非結構性網格檔案外統一調整成 NetCDF 格式。

整體作業流程在大尺度及中尺度包含風、波浪、水位、海流部分與有關小尺度波浪部分，延續前期系統架構主作業軟體建置於 SUSE linux 作業系統內，並將風、波浪及水動力分別建置於不同伺服器進行運作，作業環境利用 linux 系統內 shell script 程式語言撰寫，部分則利用 fortran 程式語言撰寫，過程中同時使用美國海洋大氣總署(NOAA)太平洋環境實驗室(PMEL)所發展 鼬(ferret)軟體，作為本系統作業化主要的排程包含資料格式建置及前後處理軟體繪圖等。鼬軟體目前發展到 6.72 版本，鼬軟體主要功能可分析其數值海洋模式的產出和網格化，並觀測數據進行比較。

小尺度海流模組及海嘯模組部分則配合目前發展合作團隊建置於微軟作業系統，此部分分別透過商用 tecplot 及 matlab 軟體進行後處理出圖。系統內有關應用到主要軟體如表 7-2 所示。

系統內除作業所需軟體外，有相當多共同資料必須透過區域網路由各伺服主機提供整合應用，系統必須兼具能存取遠端伺服主機資料及資料庫資料，於是在各伺服主機上分別建置不同軟體安裝及程式撰寫，大略可分為下列四個部分。

(1)系統聯外部分：如連接中央氣象局，由於氣象局以 FTP (File Transfer Protocol server)方式提供氣象資料，於是本系統內已建置 FTP 軟體及 linux 系統內 shell script 程式語言撰寫排程定時下載相關資料。

(2)系統連結區網內它台電腦部分：由於系統內模擬資料必須讀取海象觀測資料庫內資料比對驗證，故在系統內安裝 freetds 及 sqsh 軟體，並撰寫資料庫語法建置相關程式後，可由 Linux 伺服主機直接讀取海象觀測所建置微軟資料庫伺服器。平時所內操作電腦則透過 SSH(Secure Shell)方式進行遠端登入，進行系統維護管理。

(3)在作業系統內部環境：主要透過 linux 作業系統內安裝 NFS 伺服器軟體(NFS 就是 Network FileSystem 的縮寫)。NFS 主要功能為透過網路，讓不同的電腦、可以彼此分享 NFS 伺服主機的檔案。所以本系統內主要檔案可以在其他伺服主機來將網路端的 NFS 伺服主機分享的目錄，掛載到本地端的主機中，在本地端的主機使用該目錄檔案就如同使用主機內的檔案。

(4)在 linux 作業系統及微軟作業系統資訊傳遞部分：該部分則是透過安裝 SAMBA 伺服器軟體的設定安裝的話，透過區域網路『網路芳鄰』的功能，直接連線遠端伺服器所提供的目錄。

表 7-2 系統內主要應用軟體說明

軟體套件	說明
一、作業系統：	
SUSE linux	作業系統
Window server 2003、2008	作業系統
二、原有 suse 套件	
gcc、gcc-fortran	編譯軟體
NFS server (NFS clicent)	提供各伺服器共同資料
samba	提供 linux 伺服器與 window 系統資料路徑網路芳鄰
三、個別安裝套件：	
pgi fortran	Fortran 語言編譯軟體
ferret	主要前後處理及繪圖工具
wgrib	讀取及解碼風場資料
gifsicle	產生 gif 動畫圖檔
freetds	為 linux 系統提供 TDS 協議的客戶端
sqsh	為資料庫系統提供交談介面
Tecplot(裝於微軟作業系統)	繪圖軟體

7.1.3 風場模組作業化架構

在本系統設定架構下風場及氣壓場預報資料係採用中央氣象局所提供的全域即時預報風場及氣壓場資料，經由作業化系統處理成系統內其他模式所需之風場及氣壓場格式。所提供風場為每日兩組 73 小時資料，分別於當日 12 時及 24 時(0 時)於 FTP 網站發布資料，透過自行撰寫排程檔抓取資料，每小時資料約為 3MB，故每天風場原始資料共約 440MB，其資料格式採用 GRIB 格式，每小時檔案內資訊共包含 87 層相關風場、氣壓場及溫度資料如表 7-3 所示，相關解碼則須配合此格式擷取不同資訊，在進行內插作業。

表 7-3 有限區域模式氣象資料彙整表

氣象資料	解析度
海平面氣壓場	(45km, 15km,5km)
地表空氣溫度場	(45km, 15km,5km)
700 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
850 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
925 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
1000 百帕溫度場高度場和風場	(45km, 15km,5km)
10 米高風場	(45km, 15km,5km)
2 米高風場	(45km, 15km,5km)

有關風場模組作業流程如圖 7.5 所示。原始風場解碼及內插後提供波波浪模組及潮流模組網格格式可參考上小節表 7-1 及 7-2；所提供原始風場資料範圍及系統內輸出範圍請參考圖 7.6 及圖 7.7。

作業化所展示資料為 RC 及 MC 2 維資料及各港口 MC 風場歷線資料，其風場向量圖檔如圖 7.9 及 7.10 所示，另圖 7.8 中央氣象局南瑪都颱風侵台時衛星照片可作為相關比對。

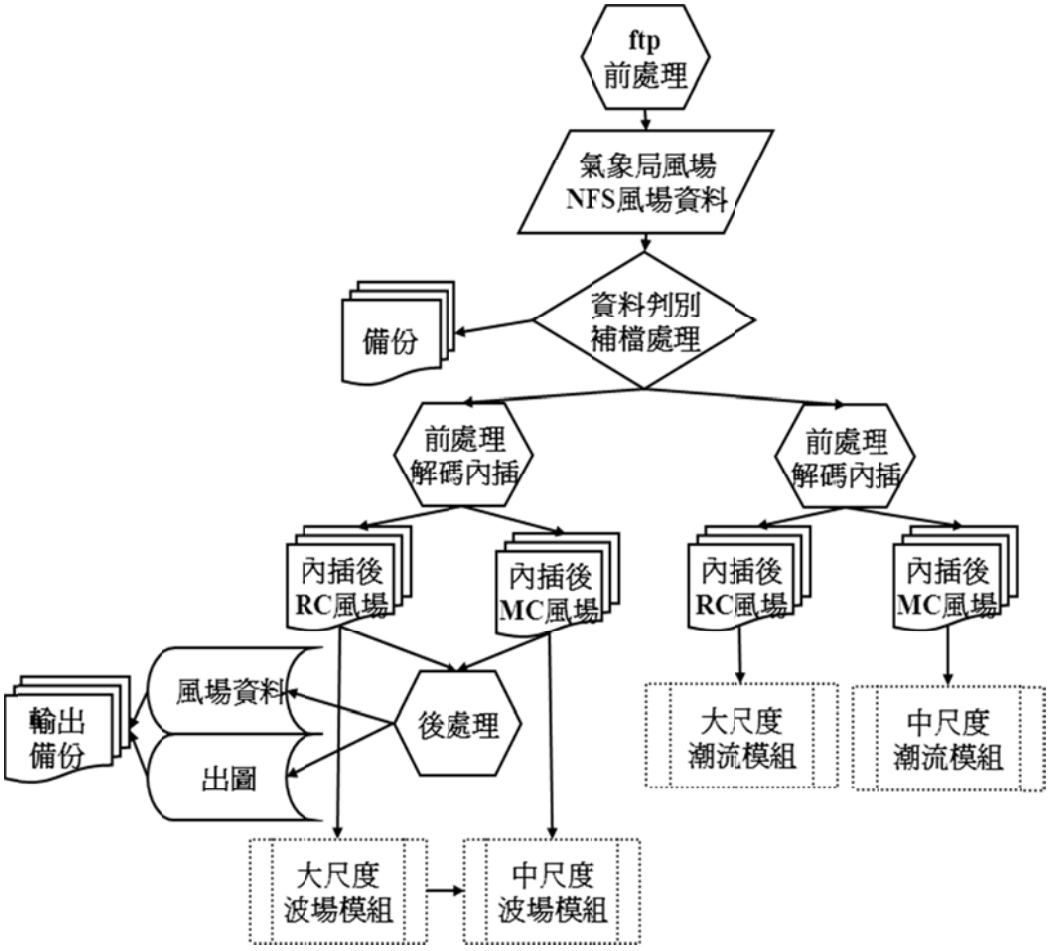


圖 7.5 風場模組作業流程圖

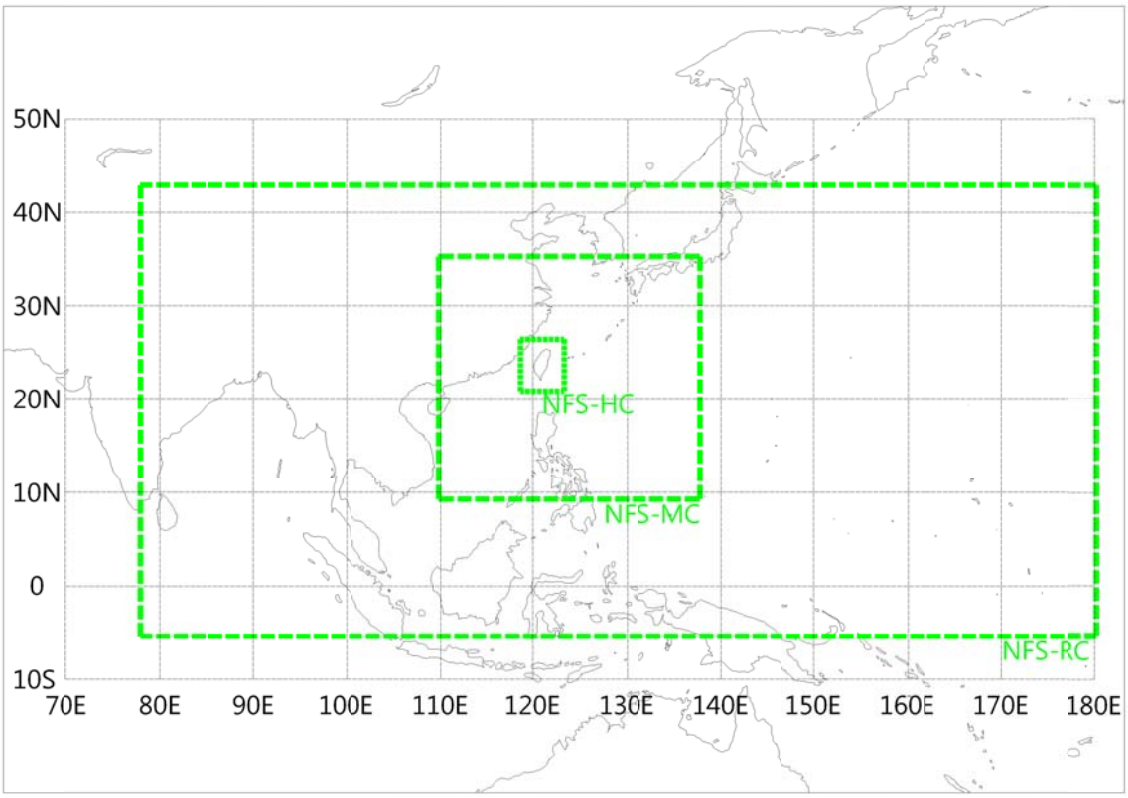


圖 7.6 中央氣象局提供原始風場範圍圖

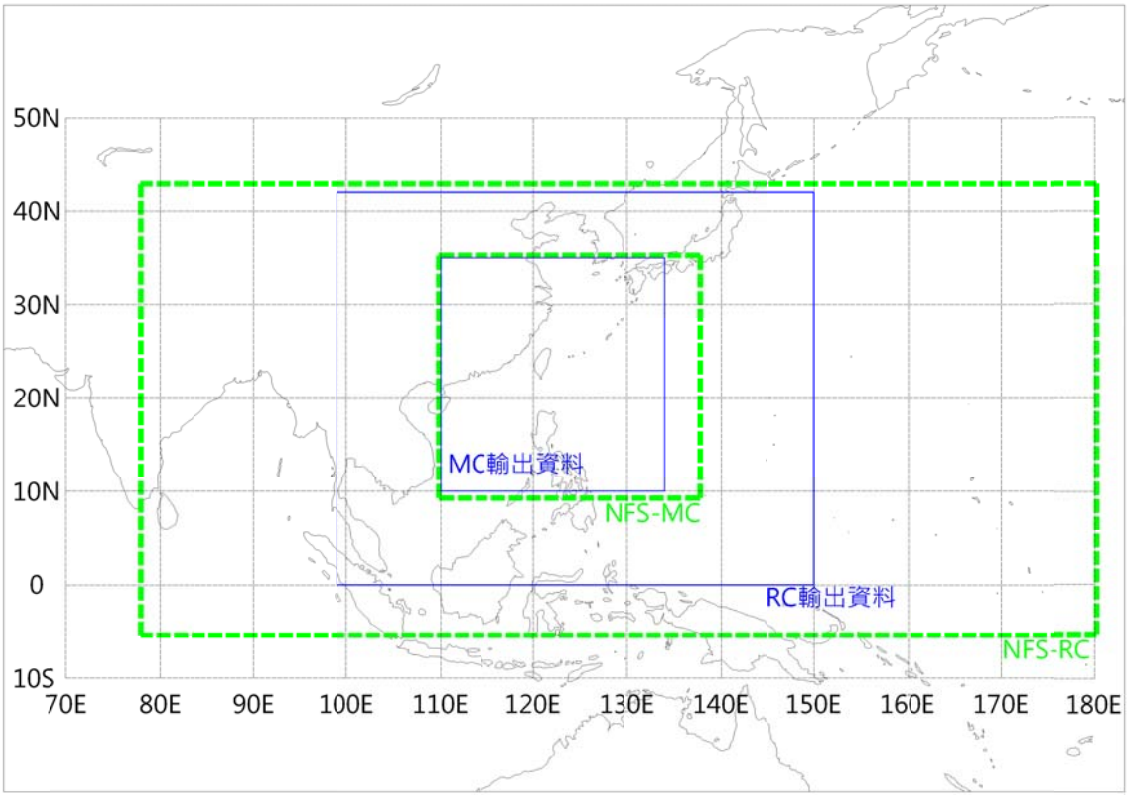


圖 7.7 系統內風場輸出範圍圖

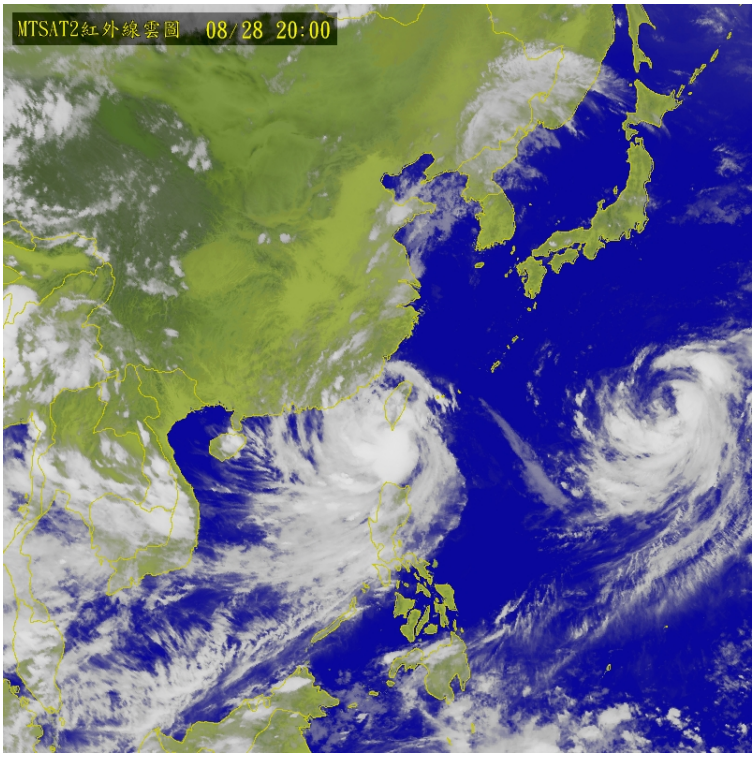


圖 7.8 中央氣象局南瑪都颱風衛星雲圖(08/28 20:00)

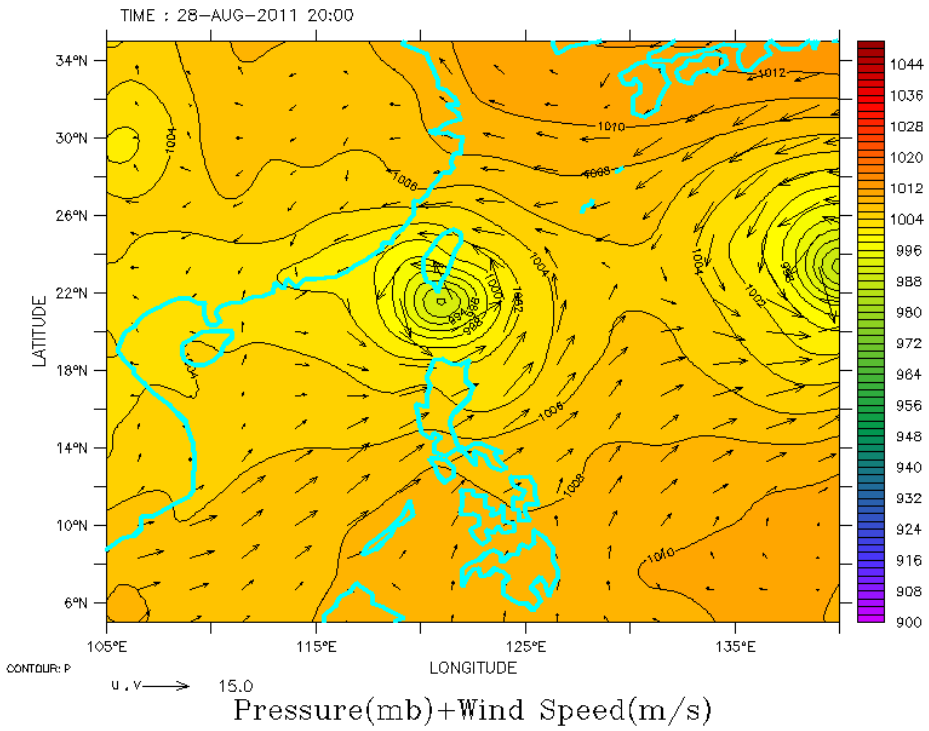


圖 7.9 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 RC 風場向量圖

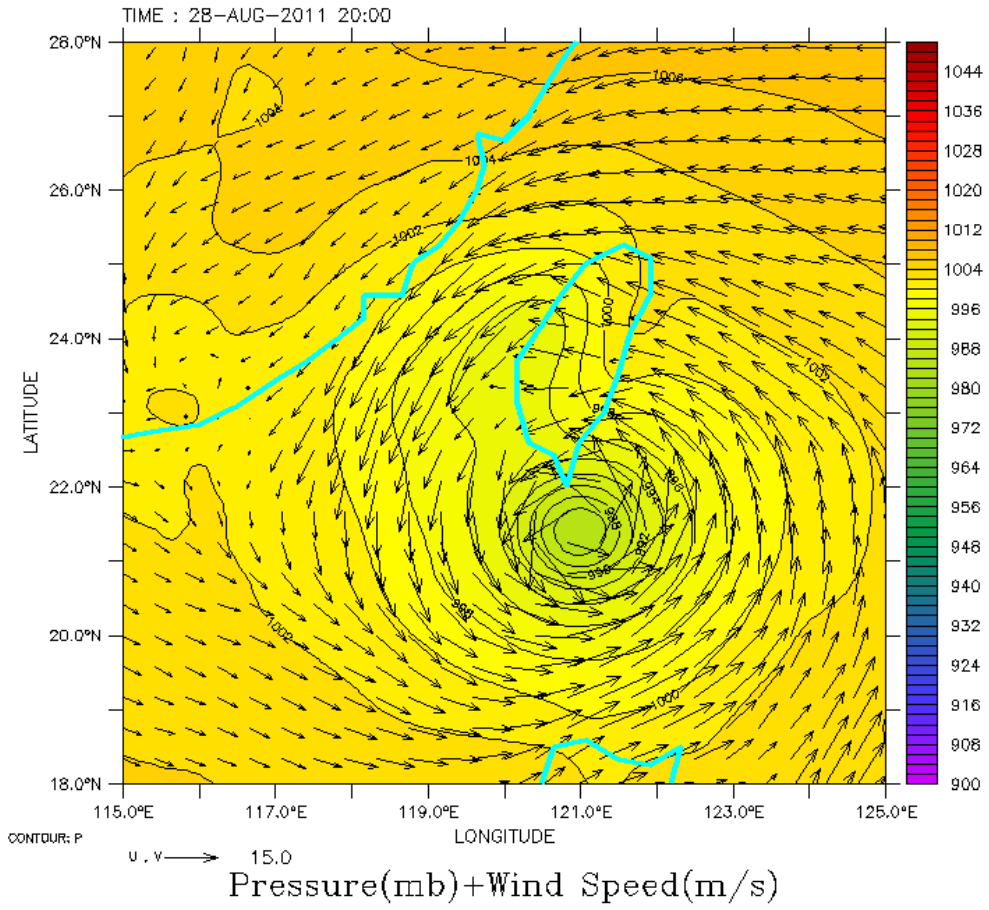
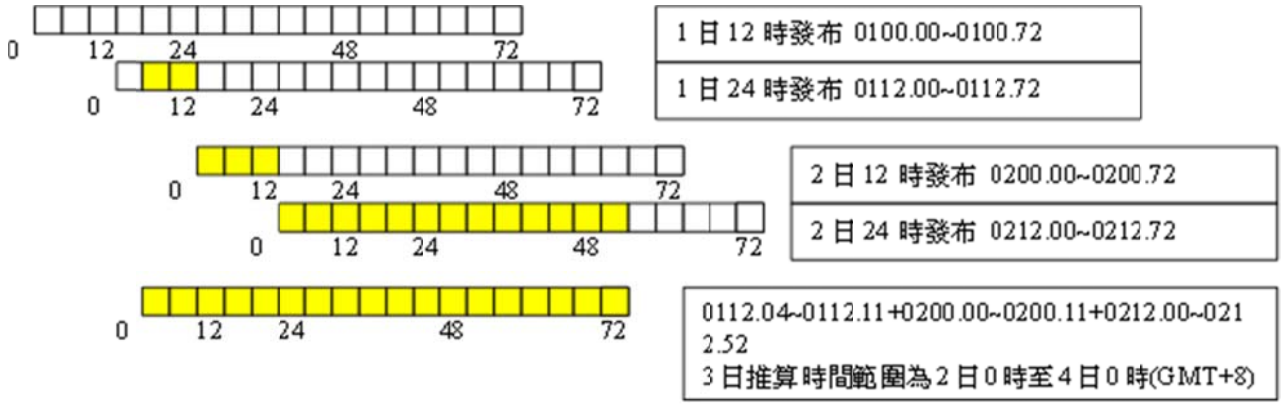


圖 7.10 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時 MC 風場向量圖

每日預報風場作業化配合整體海象作業化流程將氣象局所提供風場資料以較接近預報時間資料為先擷取方式彙整，實際擷取方式可以第 3 日模擬作業進行範例說明如表 7-4 及圖 7.11 所示，3 日氣象模擬資料設定時間範圍為 2 日 0 時至 4 日 0 時(GMT+8)在氣象局提供檔案為，lbyyyymm0112.04~lbyyyymm0112.11+lbyyyymm0200.00~lbyyyymm0200.11+lbyyyymm0212.00~lbyyyymm0212.52。其中中央氣象局風場檔名命名方式為 lbyyyymmddHH.hhm，yyyy=西元年、mm=月、dd=日、HH+hh=時，檔案原始時間為 GMT(Greenwich Mean Time 格林威治標準時間)時間。

表 7-4 每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例說明表

氣象局預報資料			海象模擬系統擷取資料	
氣象局發布時間(台灣時間 GMT+8)	預報資料檔名 每小時一筆資料	檔名對應成台灣時間(GMT+8)	03 日作業化擷取資料	03 日作業化擷取資料對應台灣時間(GMT+8)
01 日 12：00 發布	lbyyyymm0100.00m ~lbyyyymm0100.72m	*0108.00~*0108.72 (等於 1 日 8 時至 4 日 20 時)		
01 日 24：00 發布(02 日 00：00)	lbyyyymm0112.00m ~lbyyyymm0112.72m	*0120.00~*0120.72 (等於 1 日 20 時至 5 日 08 時)	*0112.04m ~*0112.11m	0120.04 ~0120.11 (等於 2 日 0 時至 2 日 7 時)
02 日 12：00 發布	lbyyyymm0200.00m ~ lbyyyymm0200.72m	*0208.00~*0208.72 (等於 2 日 8 時至 5 日 20 時)	*0200.00m ~*0200.11m	0208.00 ~0208.11 (等於 2 日 8 時至 2 日 19 時)
02 日 24：00 發布(03 日 00：00)	lbyyyymm0212.00m ~lbyyyymm0212.72m	*0220.00~*0220.72 (等於 2 日 20 時至 6 日 08 時)	*0212.00m ~*0212.52m	0220.00 ~0220.52 (等於 2 日 20 時至 4 日 0 時)
			共擷取 73 筆資料	模擬計算時間範圍為 2 日 0 時至 4 日 0 時



註：灰階部分為擷取資料範圍

圖 7.11 每日所擷取風場資料以第 3 日模擬風場為範例圖

7.1.4 波浪模組作業化架構

在本系統設定架構下波浪作業化預報系統建構出三種不同尺度的波浪模組，分別為大尺度之西太平洋風浪模組，中尺度之臺灣周圍海域風浪模組，以及針對國內主要港口分別建置小尺度波浪模組。另外本年度細尺度模組以基隆港為範例，透過資料庫概念以及 MATLAB 的介面設計模組 GUIDE (Graphic User Interface Design Environment)介面發展建立港區波浪展示系統。有關波浪模擬作業流程如圖 7.12 所示。

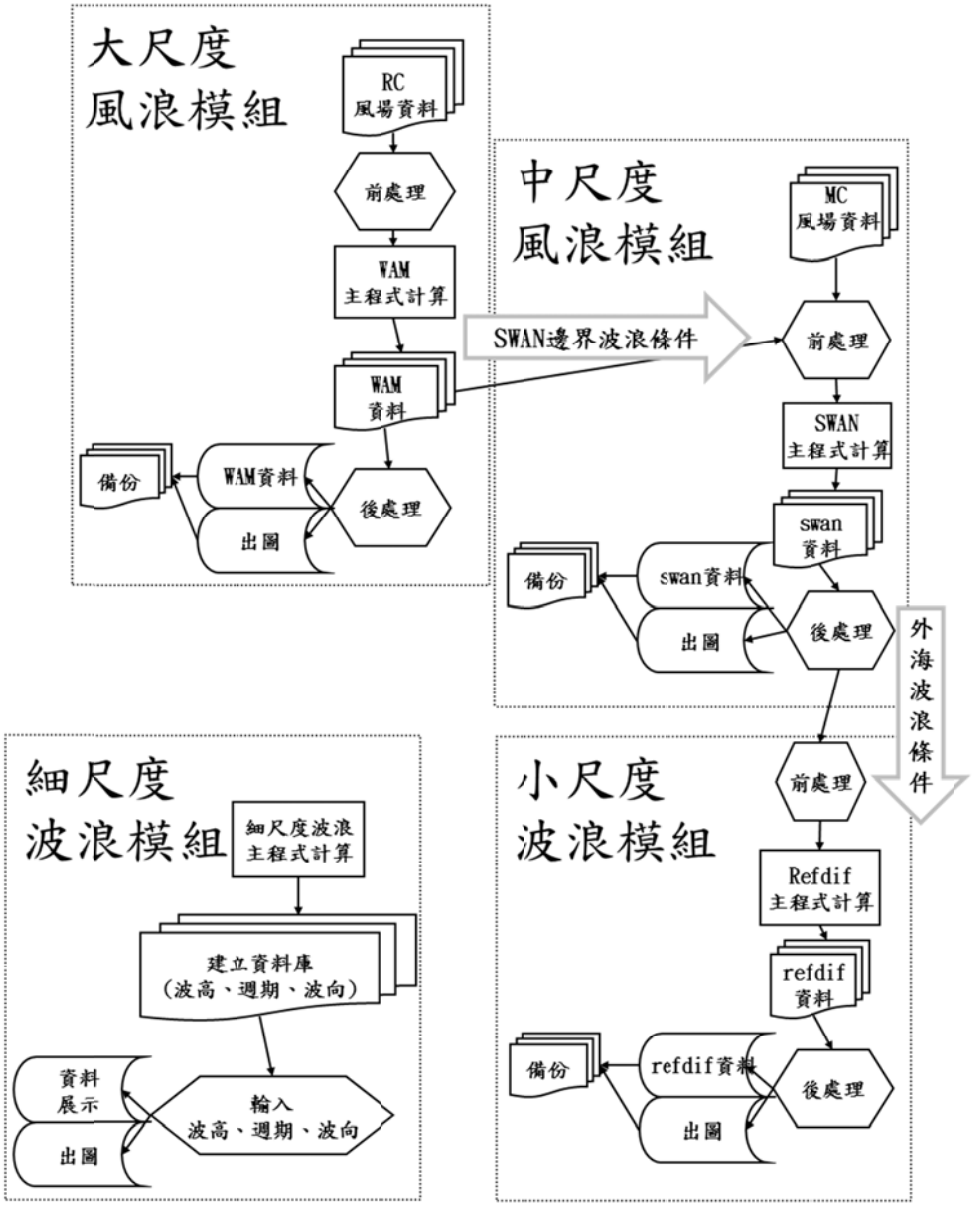


圖 7.12 波浪模擬作業流程圖

1.大尺度及中尺度風浪模組

大尺度及中尺度風浪模組為本系統內主要作業化風浪系統，每日取得內插後風場資料後即進行模擬，其中西太平洋風浪模式採用海洋波浪預測模式 WAM (Wave Modeling)為核心模式，目的在於產生中尺度臺灣周圍海域風浪模式所需之邊界條件，其模擬範圍涵蓋北緯 10 度至北緯 35 度及東經 110 度至 134 度，如圖 2.2 所示，網格大小為 12 分之地球弧形網格。中尺度之臺灣周圍海域風浪模式則採用荷蘭 Delft 大學所發展之近海風浪模式 SWAN (Simulating WAves Nearshore)為基礎，使其發展成適合於模擬臺灣周圍海域波浪特性之模式其模擬範圍以臺灣周圍海域為主，即北緯 21 度至 26 度以及東經 118 度至 123 度間海域，如圖 2.3 所示，模式網格解析度為 2.4 分網格。大尺度及中尺度模擬網格如表 7-2 所示，模擬範圍如圖 7.13。100 年度相關合作計畫已於期末完成風浪模式調整及中尺度範圍擴大，但由於時間上配合該部分預計 101 年度期初完成作業修改部分。

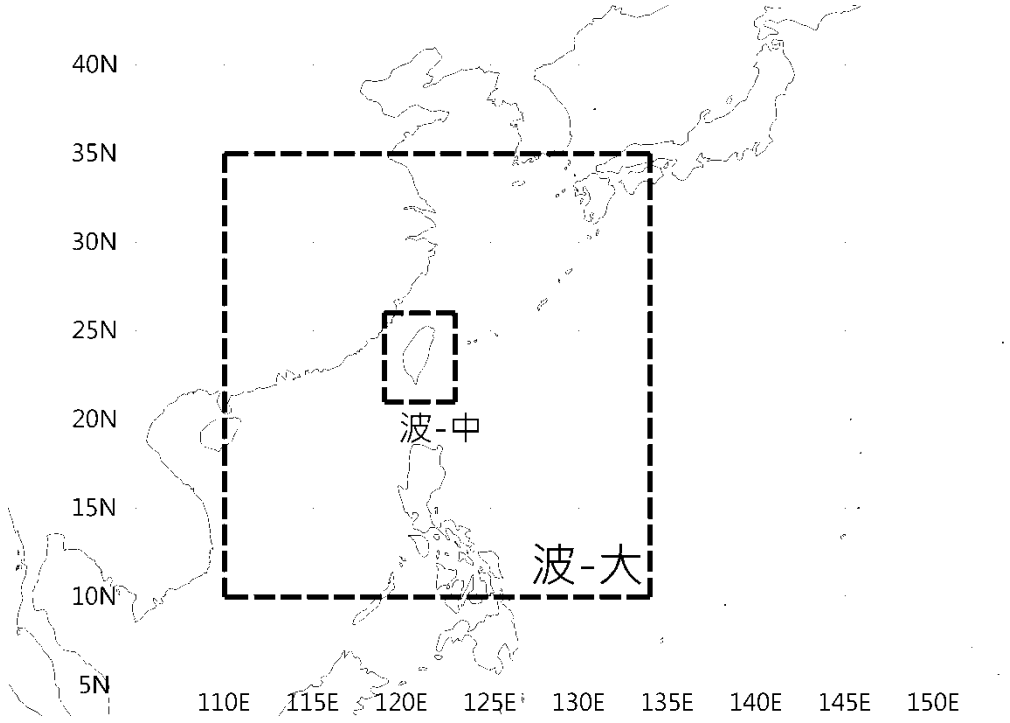


圖 7.13 大尺度及中尺度波場模擬範圍圖

其中大尺度西太平洋風浪模組利用昨日模擬第 24 小時結果作為初始資料並採用 RC 風場預報資料模擬海面上風浪之生成、發展及傳播過程；中尺度臺灣周圍海域風浪模式利用昨日模擬第 24 小時結果作為初始資料，使用 MC 風場預報資料，與當日 WAM 模組所提供邊界條件(波高、波浪週期、波向)，模擬臺灣周圍海域之風浪，並輸出主要港口外海波浪條件(波高、週期、波向)。模式模擬時間長度為三天(72 小時，昨日、今日、明日)。下圖 7.14、圖 7.15 為作業化所產生波高分布圖。

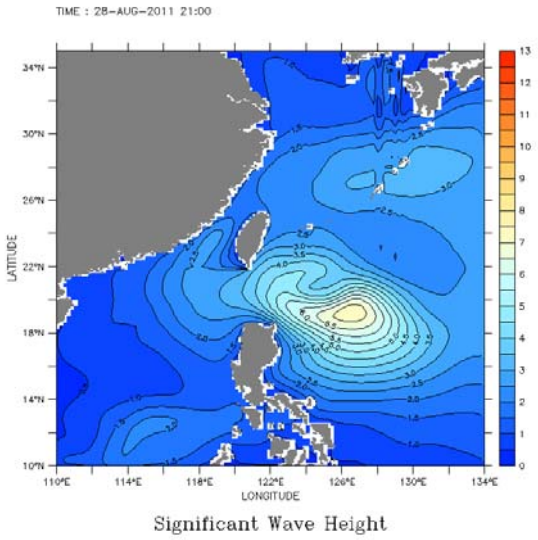


圖 7.14 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度波高分布圖

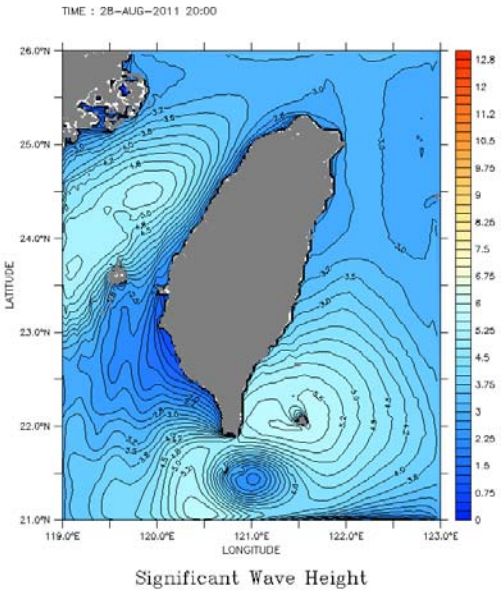


圖 7.15 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度波高分布圖

2.小尺度波浪模式

近岸波浪場模式以 Kirby 及 Dalrymple (1983)所發展的波浪折繞射(REF/DIF)模式為基礎，分別建構適合模擬臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港及臺中港等七大港區近岸波浪場特性之波浪模式，本年度延續上期發展各港模式及網格資料成果，已完成七大港區銜接中尺度波場作業化系統，直接由中尺度風浪結果擷取港域外海波浪資料(波高、週期、波向)作為輸入條件。而且基隆港及臺北港則配合今年度相關合作計畫調整網格及地形水深資料，其中基隆港近岸港區波浪模式之模擬範圍，如圖 7.17 所示，即圖中所示 6.2km×7.3km 之矩形範圍，外海邊界水深約介於 50m~60m 間。另臺北港港區近岸波浪模式之模擬範圍,如圖 7.18b 所示,即圖中所示 8km×13km 之矩形範圍。臺北港配合計畫內蒐集 99 年 10 月臺北港港區水深調查資料，更新近岸波浪模式之數值計算網格水深資料，如圖 7.18a 所示。

七大港區各港模式之網格解析度均提高為 10 公尺，其網格資料如表 7-5 所示，數值模擬範圍如圖 7.16 所示，今年度作業化建置已完成臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港及臺中港並提供 2 維圖檔及各港域 5 點輸出點位歷線資料(其中一點配合本所海象觀測位置)至港灣環境資訊網，各港作業化產生波高分布圖檔如圖 7-19a~圖 7-19g 所示。

表 7-5 近岸區域波浪模式數值計算網格資料

港口名稱	原點座標(二度分帶) X(m)	Y(m)	旋轉角度	座標系統 (10m)
台北港	278577	2784690	-55	801×1301
基隆港	322539	2787360	256	621×731
蘇澳港	341180	2725933	185	601×801
花蓮港	316892	2655232	150	321×801
高雄港	177877	2487555	38	801×1701
安平港	162072	2533583	30	1001×501
台中港	186945	2680791.6	-36	1001×1901

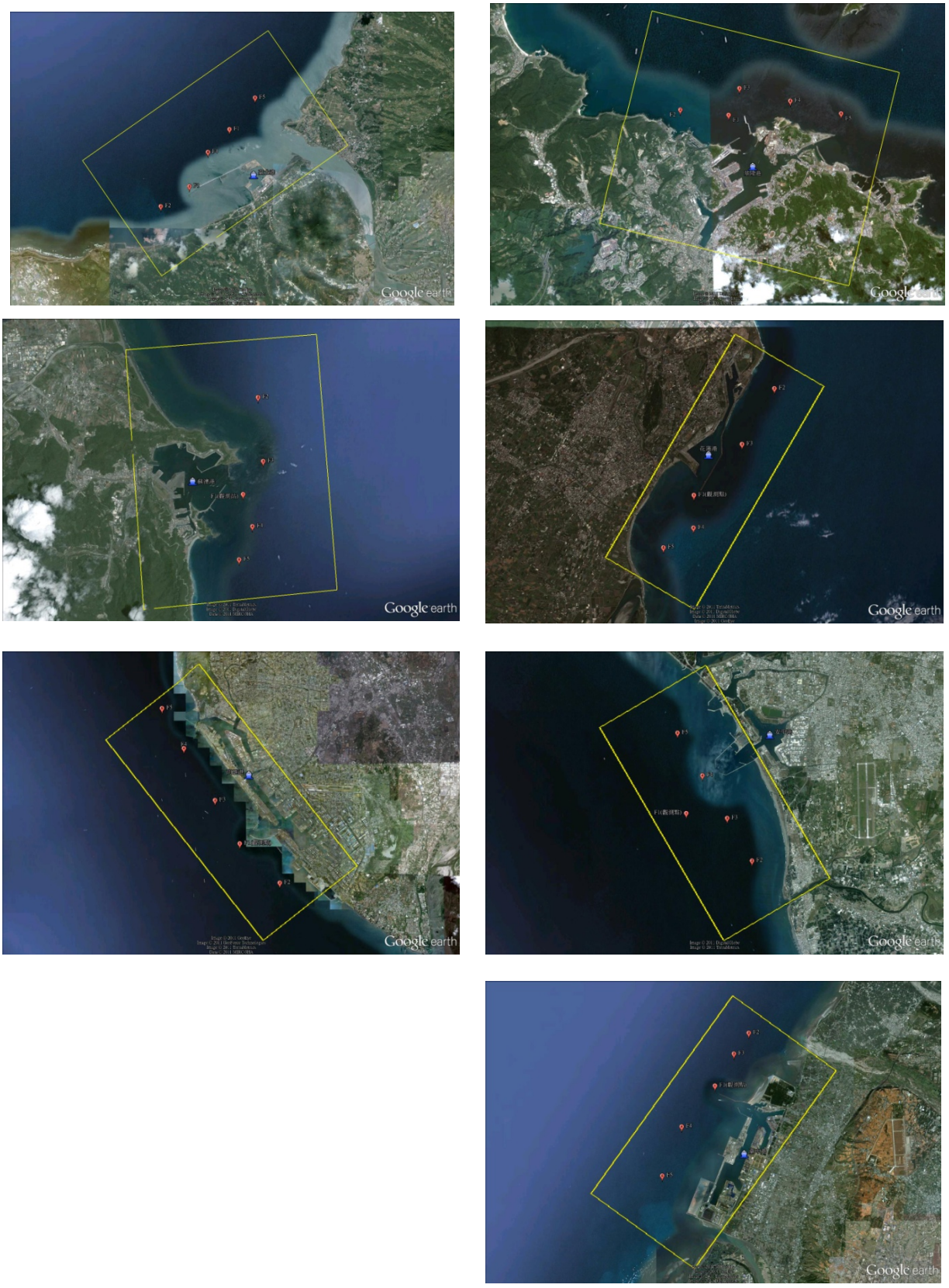


圖 7.16 近岸區域波浪模擬範圍圖

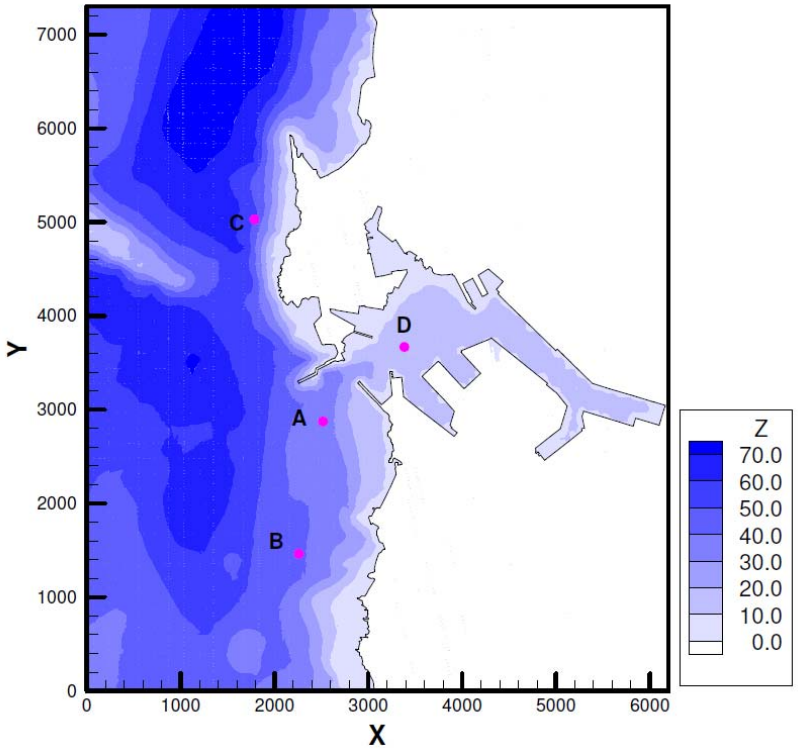


圖 7.17 本年度基隆港近岸港區波浪模式地形水深分布圖

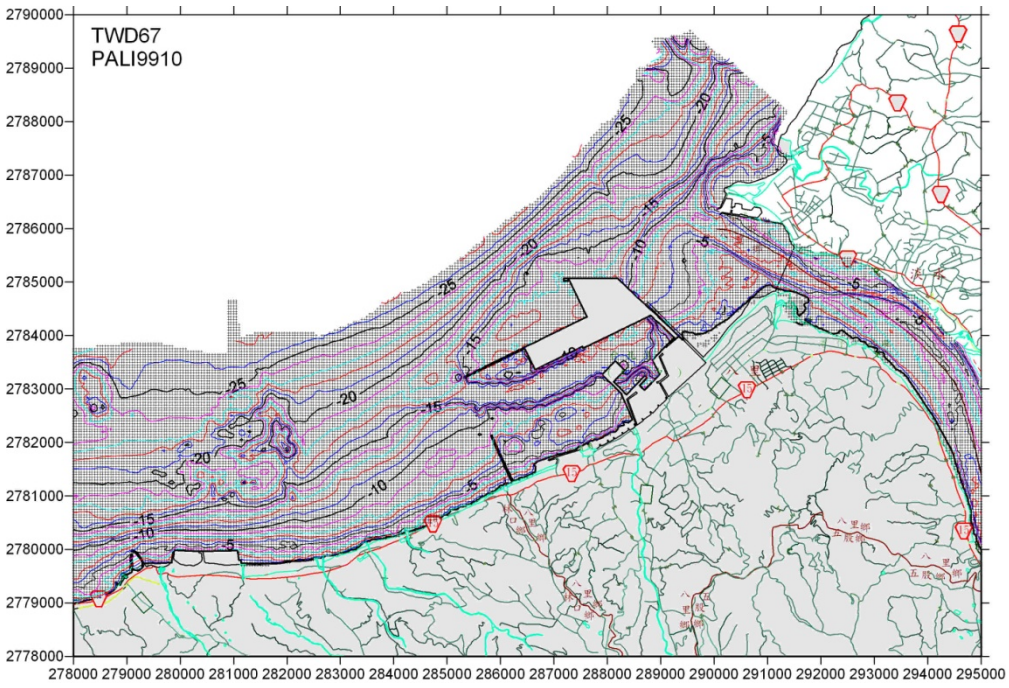


圖 7.18a 臺北港 99 年度水深地形量測結果之水深分佈圖

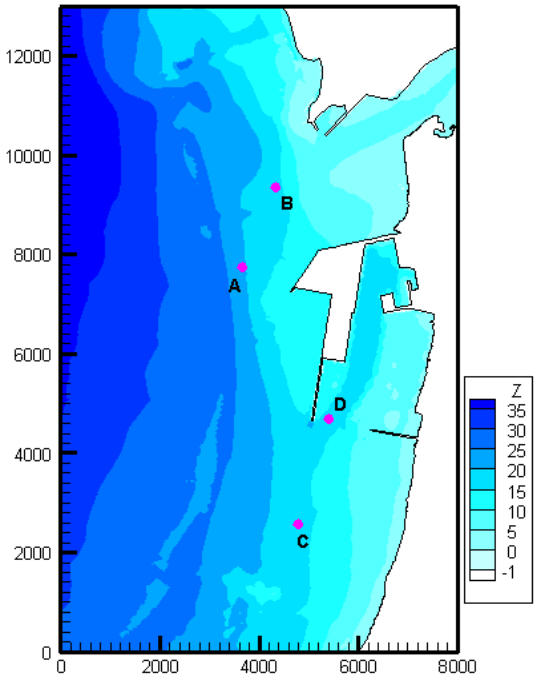


圖 7.18b 本年度臺北港近岸港區波浪模式修正之數值計算網格及地形水深分布圖

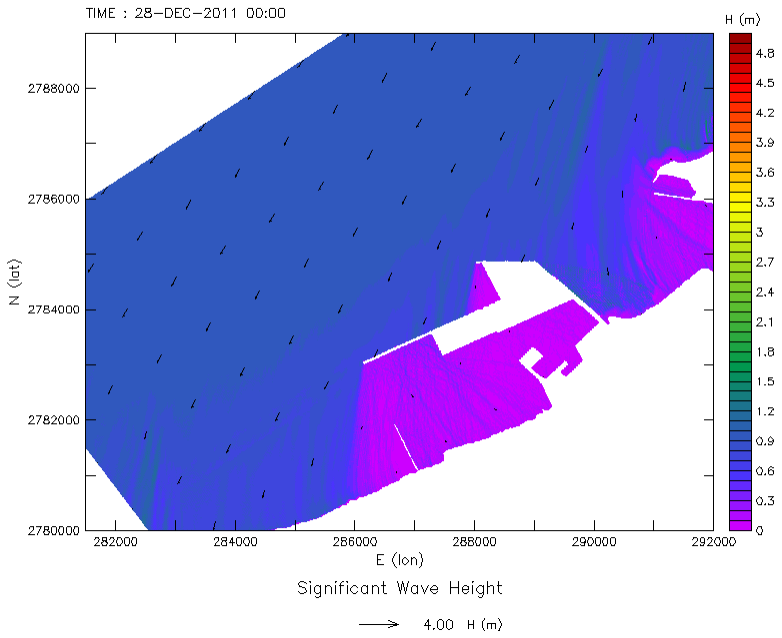


圖 7.19a 臺北港作業化波高分布圖

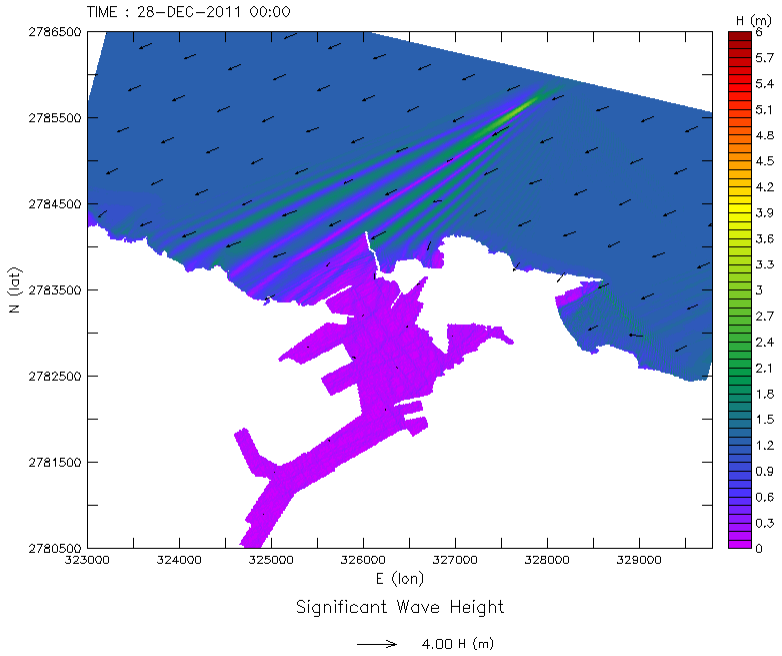


圖 7.19b 基隆港作業化波高分布圖

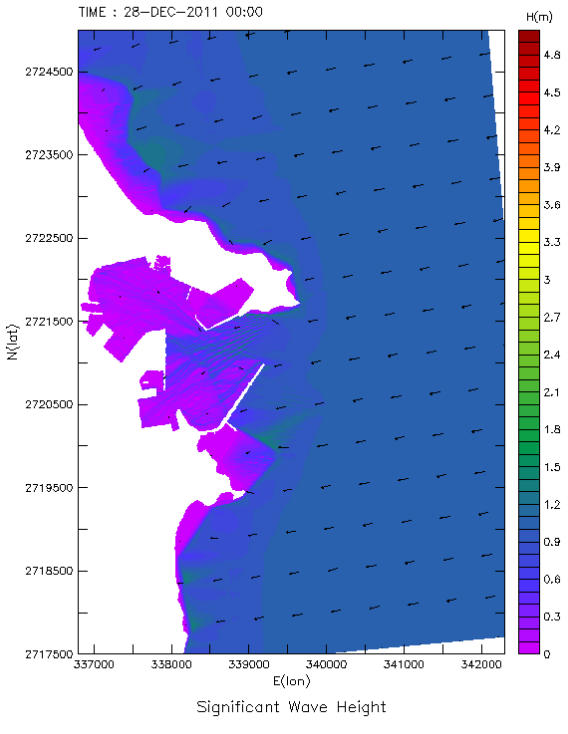


圖 7.19c 蘇澳港作業化波高分布圖

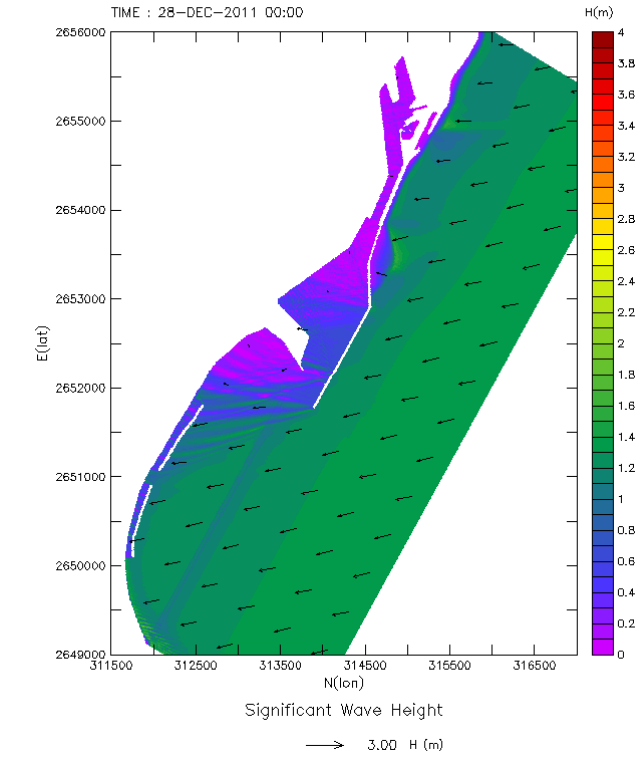


圖 7.19d 花蓮港作業化波高分布圖

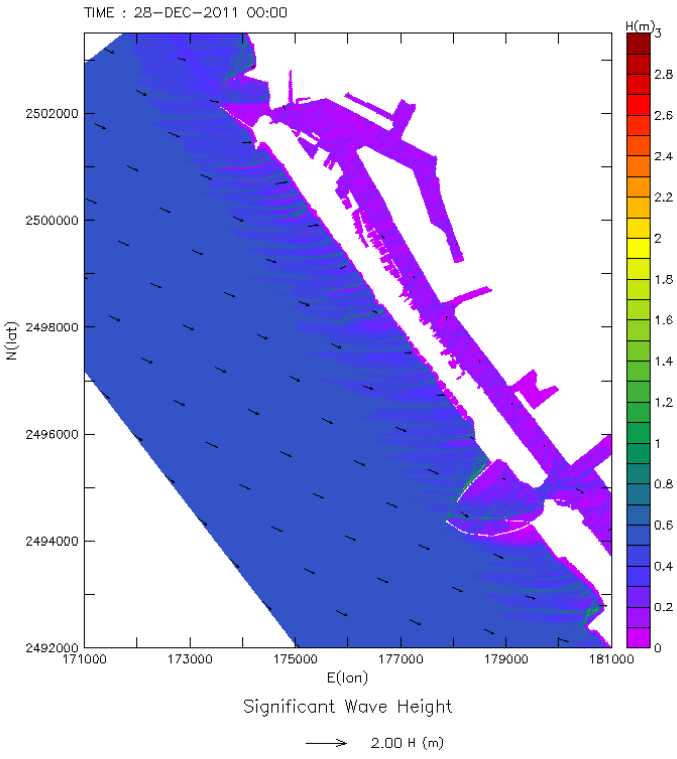


圖 7.19e 高雄港作業化波高分布圖

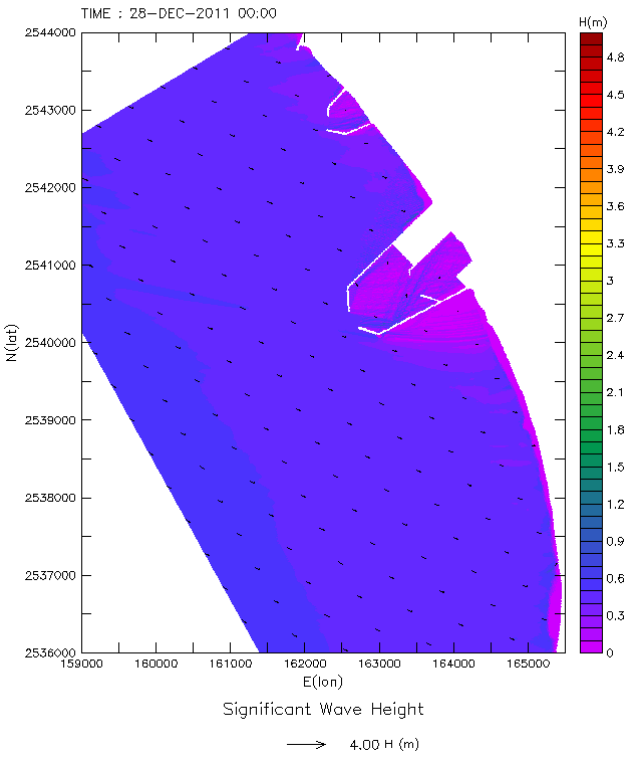


圖 7.19f 安平港作業化波高分布圖

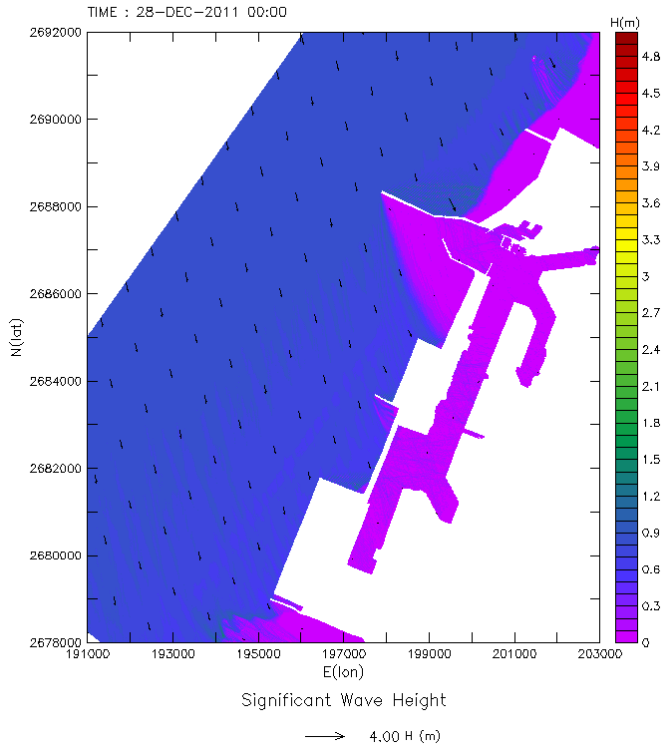


圖 7.19g 臺中港作業化波高分布圖

7.細尺度波浪模式

因應颱風波浪侵襲下為能夠快速清楚瞭解港內波浪狀況，並今年度建置基隆港港區規畫細尺度三角網格有限元素港域波浪模式(Finite Element Harbor wave model)，並使用資料庫概念建置不同波浪週期及波向資料之波浪進行波高變化數值模擬，快速獲得整體港區內波浪情形。波浪模擬輸入條件包括波浪資料，網格資料(節點座標、水深資料、節點代碼、元素節點連結資料等)以及邊界條件(如邊界節點之法線角度、反射係數等）。其模擬範圍如圖 7.20 所示

基隆港港域波浪模式之數值計算網格依據圖 7.20 之三角元素粗網格分布而產生的，本計畫選取波浪模擬最小週期為 8 sec 以及網格大小必須滿足一個波長內至少涵蓋 8 個節點等條件，再配合水深資料產生基隆港港域波浪模式之數值計算細網格，如圖 7.21 所示。本計畫數值計算細網格是由 38,554 個節點及 74,850 個三角元素組成的。

基隆港港域波浪模式之邊界包括自然海岸線、防波堤、碼頭區及其他非碼頭區邊界等，由於邊界反射係數大小不僅與其構造有關，且與波浪週期關係密切，因此如何決定模式邊界反射係數大小在實際操作上相當困難。除了針對特定波浪條件進行模擬與驗証外，本計畫基於簡化考量，假設邊界反射係數為定值，且不受波浪週期影響而改變。目前基隆港港埠碼頭設施大多為直立壁，其反射率通常接近全反射，因此假設其反射係為 1.0；港口外防波堤及港內防波堤構造多為直立堤及消波塊，其反射率約介於 0.6~0.8 之間，對於外防波堤假設其反射係為 0.8，內防波堤反射係為 0.65；至於港內非碼頭區之其他邊界，則假設其反射係為 0.75，如圖 7.22 所示。

因此建置資料庫設定基隆港港區波浪模擬條件如下：入射波浪波向(來向)選取 16 方位中港區可能的方向包含 NE、NNE、N、NNW 及 NW 等波向，波浪週期模擬範圍為 4 ~ 16.5 秒，其中 13 ~ 16.5 秒間隔為 0.5 秒，其餘週期間隔為 0.1 秒。以上述波浪條件模擬結果建置成基隆港港區波浪資料庫，共產生 490 筆資料約 2GB 資料量。透過 MATLAB

的 GUI 介面發展建立港區波浪展示系統展示畫面如圖 7.23 所示，由輸入波高、週期、波向即可讀取檔案並立即輸出港區內波高分布，並可輸出不同點位的波高值。如圖 7.23 即為設定外海入射波高 4 公尺，週期 10 秒及波向為北北東時為基隆港港區波浪模擬結果之波高分布情形及各點平均波高值。

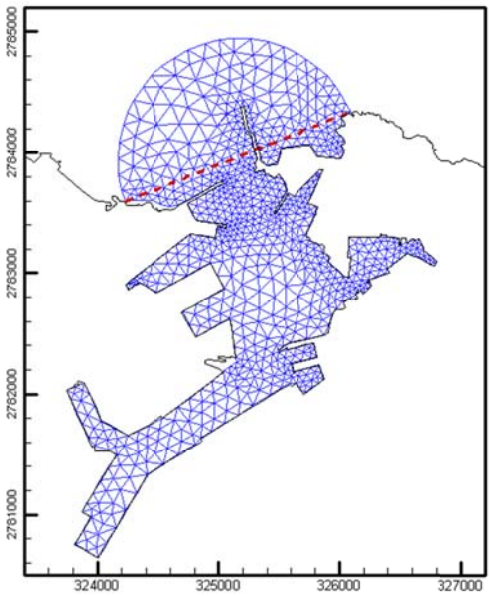
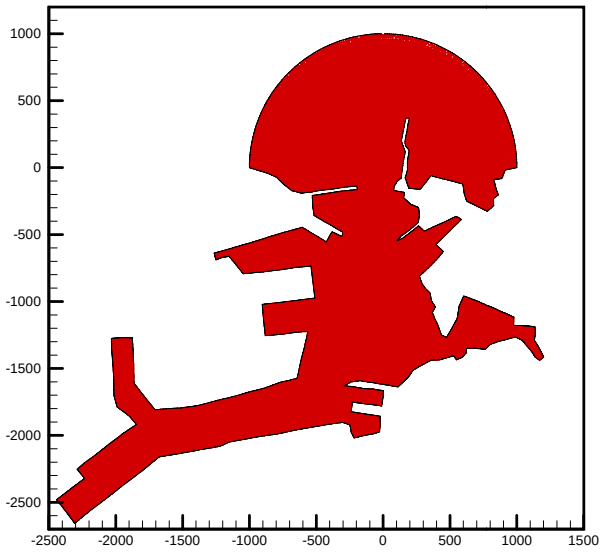


圖 7.20 細尺度基隆港波浪模式模擬範圍及粗網格圖



(共 38,554 個節點及 74,850 元素)

圖 7.21 細尺度基隆港波浪模式之細網格分布圖

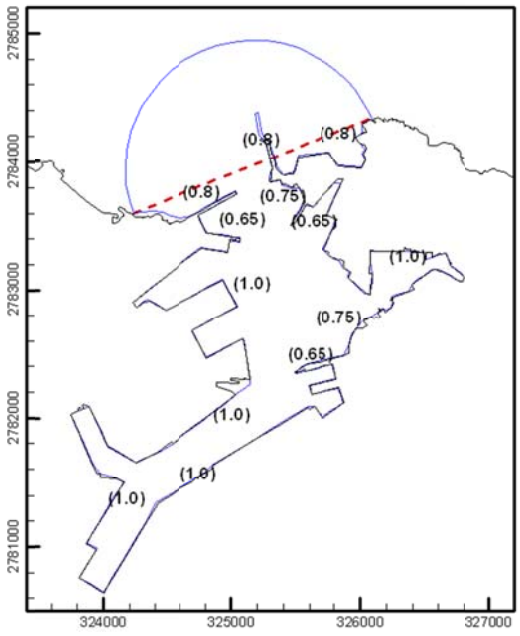


圖 7.22 細尺度基隆港波浪模式之港池邊界反射係數假設值示意圖

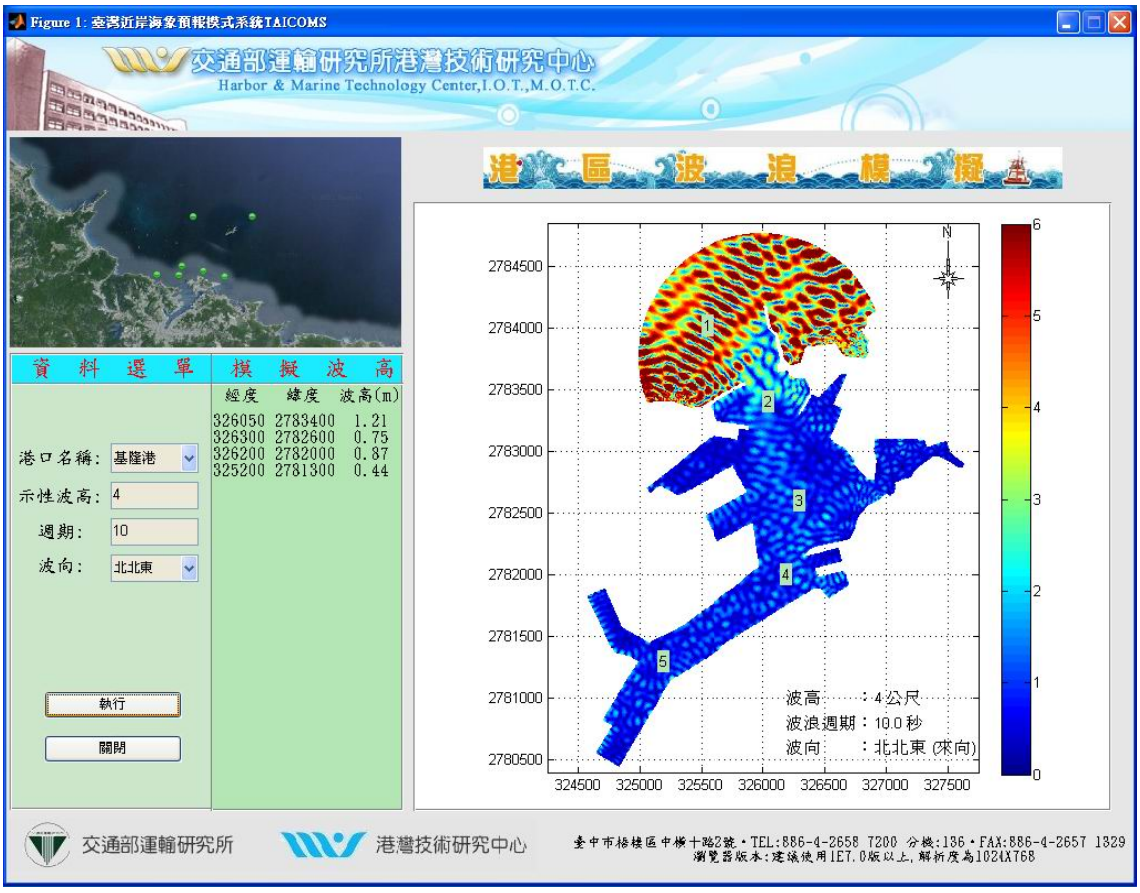


圖 7.23 細尺度基隆港波浪模擬視窗畫面圖

7.1.5 水動力模組作業化架構

在本系統設定架構下，水動力作業化預報建構出三種不同尺度的水動力模組，分別為大尺度之西太平洋水動力模組；中尺度之臺灣周圍海域水動力模組，以及針對國內主要港口分別建置小尺度水動力模式提供水位及海流變化以供參考，有關水動力模擬作業流程如圖 7.24 所示。

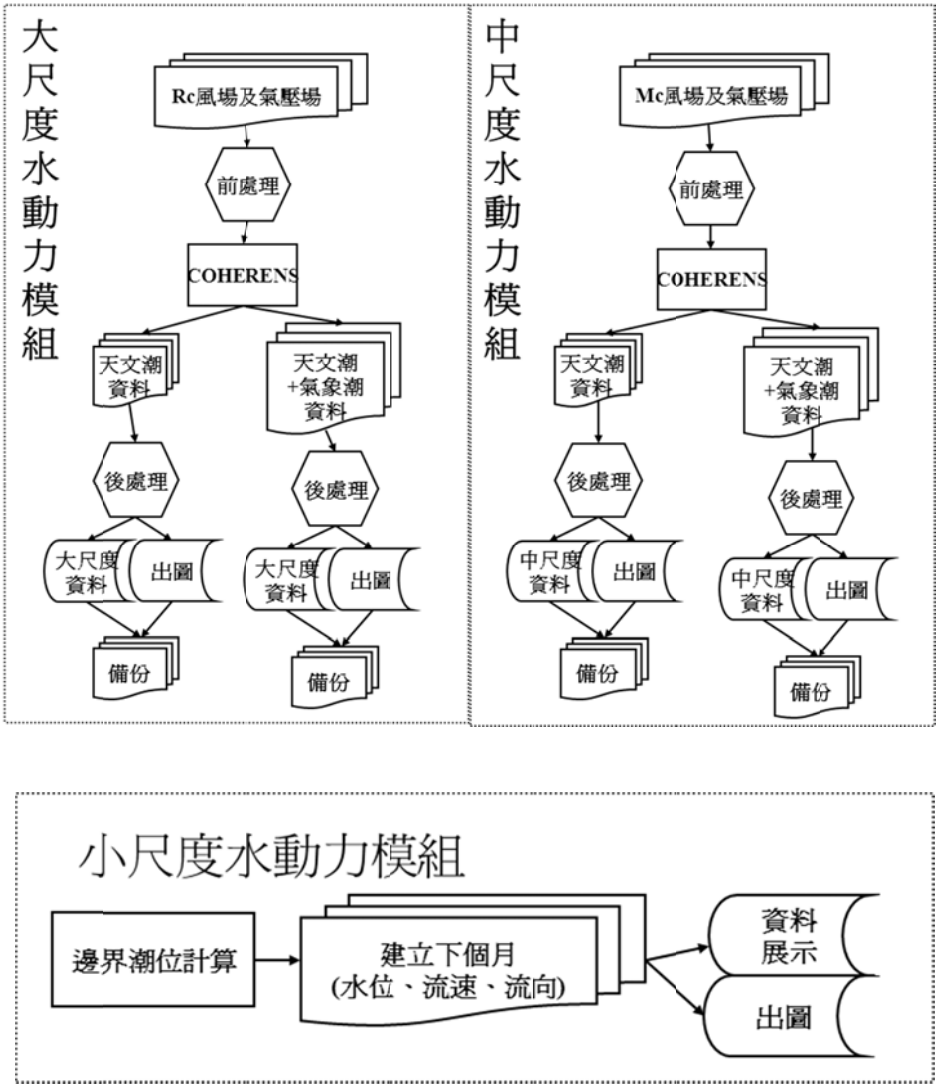


圖 7.24 水動力模擬作業流程圖

1.大尺度及中尺度水動力模組

本計畫前期已完成臺灣環島水位及海流計算二維全域流場的資料，並上線即時作業。計畫內所建置臺灣環島二維水位及海流模式，此部分為水深平均流速，主要驅動力為潮汐及風驅流，並無洋流的輸入。目前模式計算網格大小為 10 分及 1 分解析度，時間步長為 20 秒。模式範圍如圖 7.25 所示。數值模擬範圍及數值計算網格如下：(1)大尺度之西太平洋模組模擬範圍為北緯 0°至 35°，東經 105°至 150°，數值計算網格大小為 10′×10′(十分網格)。(2)中尺度之臺灣海域模組模擬範圍為北緯 21°至 26°，東經 116.5°至 125°，數值計算網格大小為 1′×1′(一分網格)。

本計畫範圍模式之潮汐邊界條件是利用全球潮汐模式 (Schwiderski, 1982) 資料產生邊界上各點之分潮振幅及相位，使用分潮為 O1、P1、Q1 及 K1 四個主要全日潮以及 N2、M2、S2 及 K2 四個主要半日潮，共 8 個分潮重組後輸入邊界。目前提供港灣環境資訊系統包含 2 維資料圖檔，如圖 7.26 至 7.29 所示及各港水位歷線資料，而港外模擬流場與觀測流場由於尺度差異其比對僅為內部參考，並改由小尺度水動力模擬資料提供港域流場資訊。

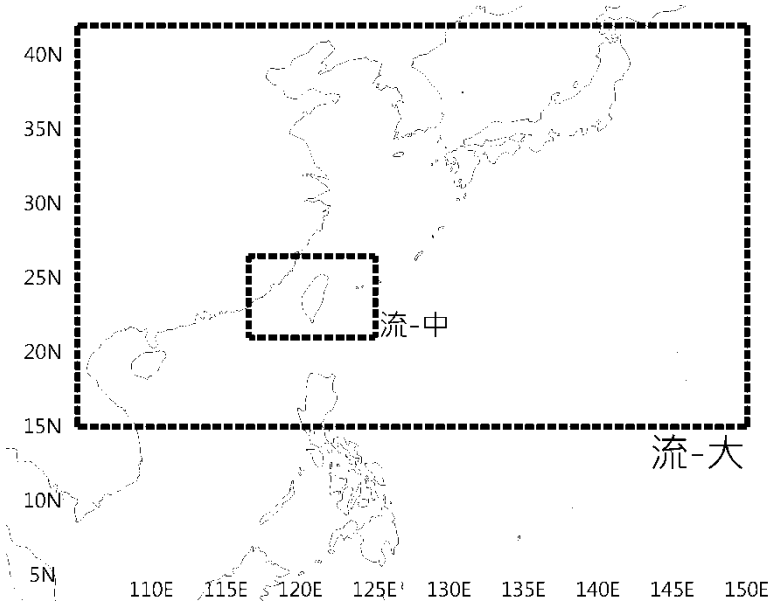


圖 7.25 大尺度及中尺度流場模擬範圍圖

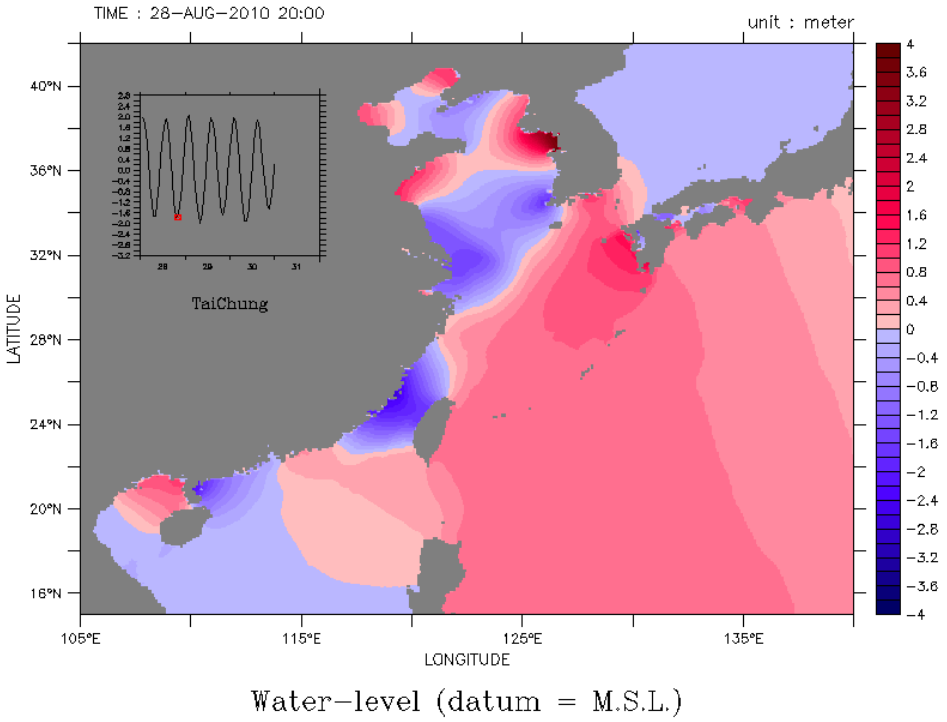


圖 7.26 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度水位分布圖

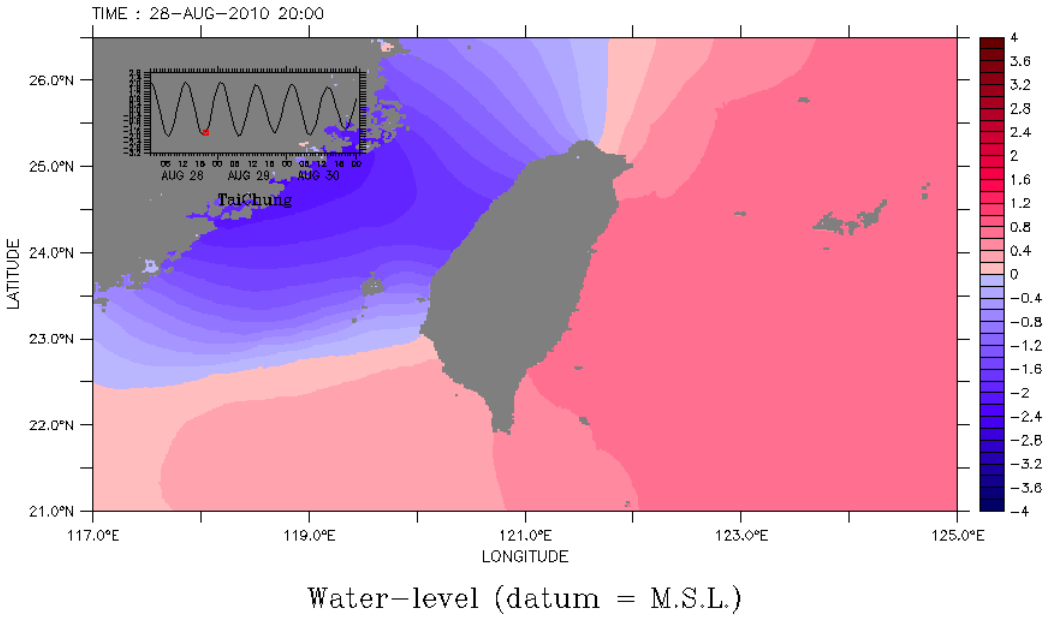


圖 7.27 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度水位分布圖

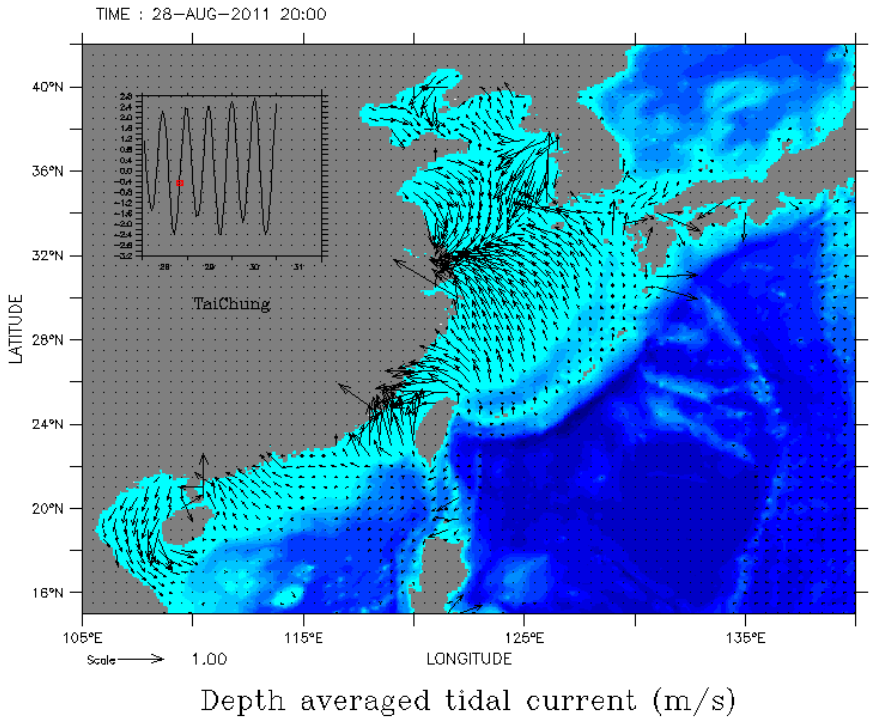


圖 7.28 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時大尺度流速流向分布圖

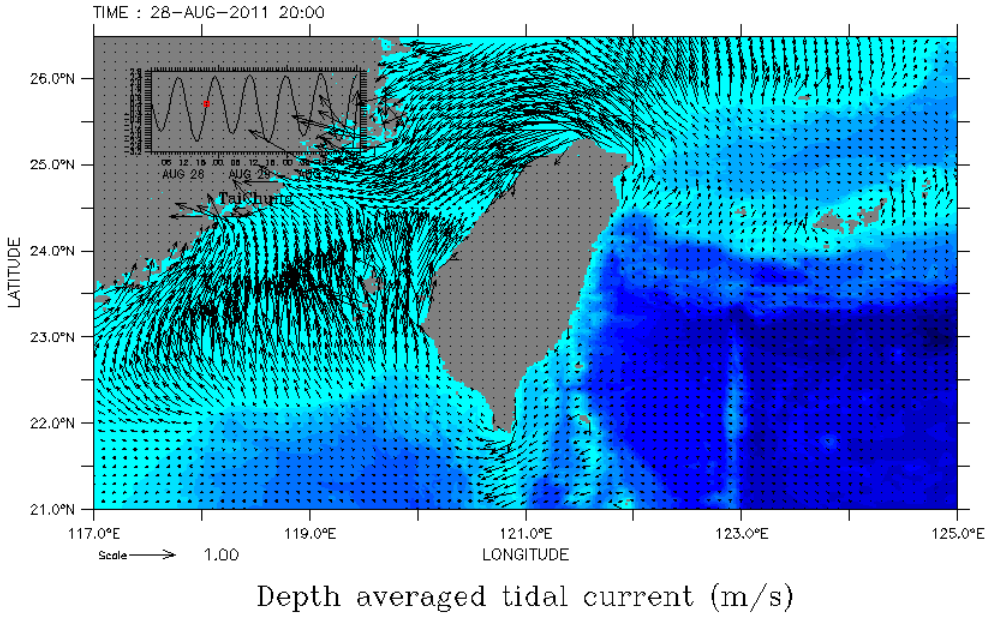


圖 7.29 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時中尺度流速流向分布圖

2.小尺度水動力模組

由於近岸區域水動力模組主要模擬各港口潮汐水位及流場之變化情形，因此各港口模擬範圍之選取主要以各港口為中心，配合海岸線及地形水深變化進行規劃，離岸之開放邊界則儘量與海岸線平行。基於此，本計畫前期已發展臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港及臺中港等七大港區水動力模式，模擬範圍大小在沿岸方向約介於 20km～30km 之間，離岸距離在各港口約介於 10km～15km 之間但前期並無完成作業化建置。本年度主要對於基隆港及臺北港，調整其地形水深並進行作業化模擬的建置，相關資料參考第四章內容。

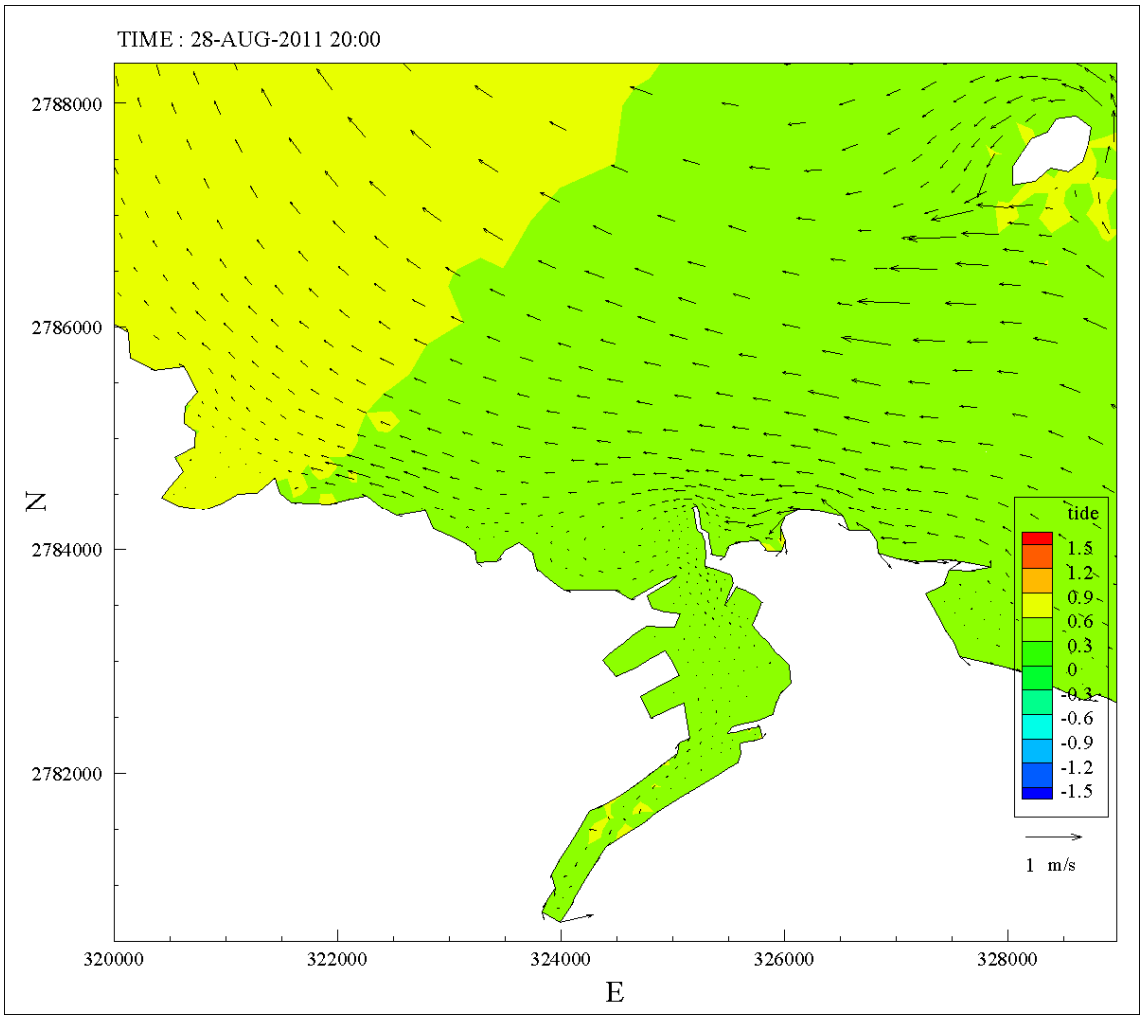


圖 7.30 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時基隆港小尺度流速流向分布圖

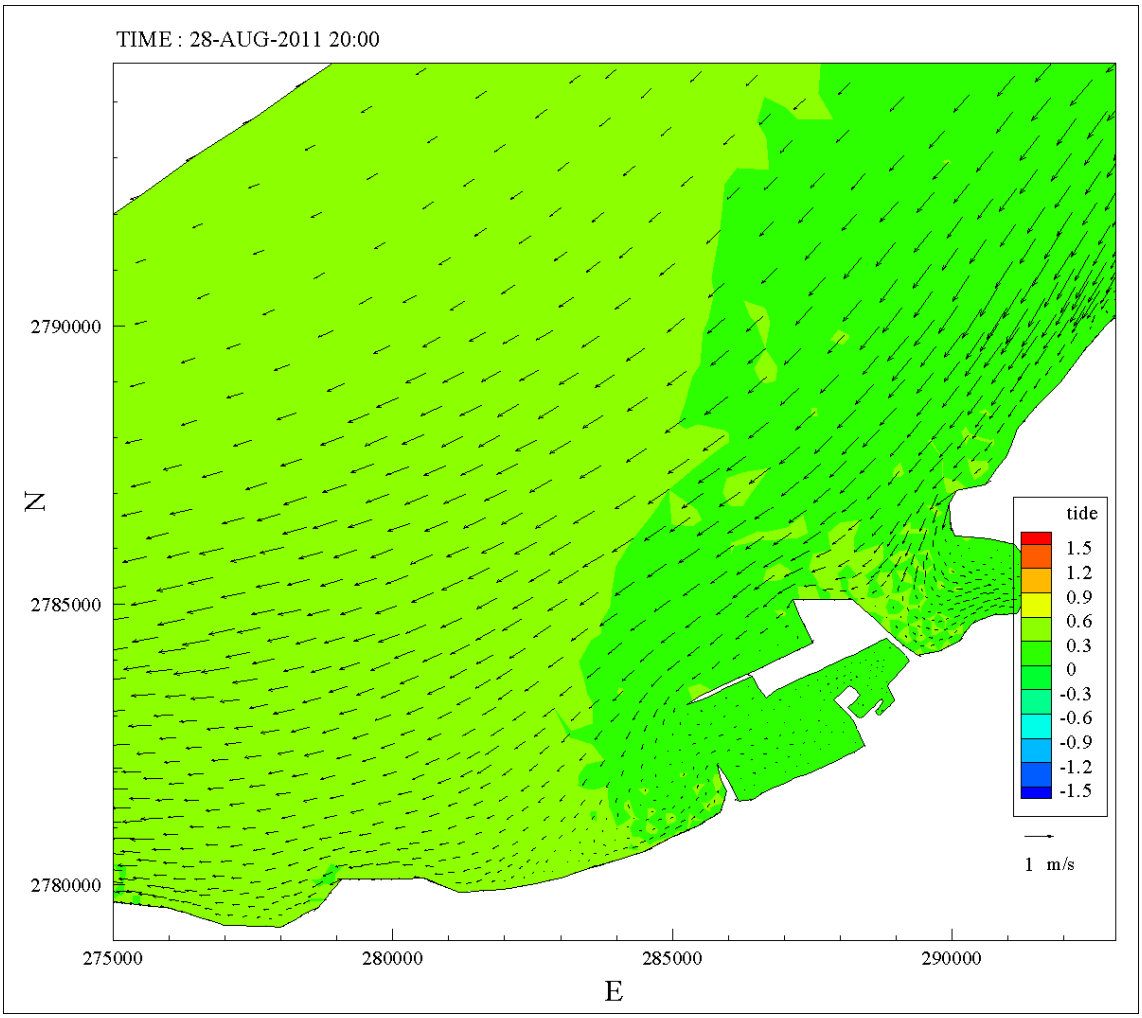


圖 7.31 南瑪都颱風 8 月 28 日 20 時台北港小尺度流速流向分布圖

7.1.6 海嘯模組作業化架構

在本系統設定架構下，延續前期成果有關海嘯模式作業化部份，目前主要有兩種方式，一種為建置於全自動作業化系統內固定時間(目前設定為 3 分鐘)於網上擷取相關地震資訊參數進行模擬並展示，另一種為視窗化手動可離線軟體，可由使用者輸入地震資訊參數輸出。

台灣國際商港海嘯速算系統流程如下，即是利用互逆格林函數之高計算效率，在遠/近域海底地震引起海嘯後，能夠快速掌握可能之最大波高以及抵達時間，提供給各港務局作為後續應變之作為之參考。其預警系統主要流程如圖 7.32 所示：

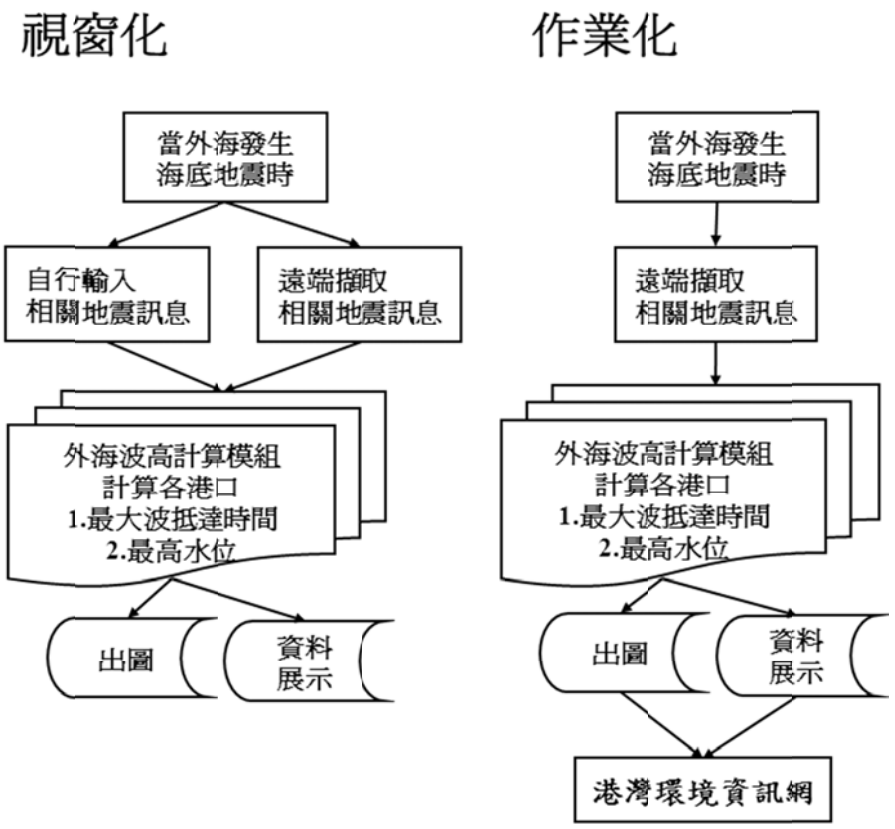


圖 7.32 台灣國際商港海嘯速算系統流程圖

1.視窗化模組

本文發展的海嘯模擬預警系統基本運作分為地震引起初始波源生成與互逆格林函數計算預報水位兩部分。前者利用美國國家地震資訊中心(USGS)的 FMT 解代入 Mansinha and Smylie(1971)提出的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，此斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量，藉以獲得地震引發的海嘯初始水位。

本視窗化模組操作系統是由 Matlab 軟體所建構而成，該軟體提供了方便之數學運算指令及圖形繪製，更提供了內建之操作者介面設定程序；使用者本身不須安裝 Matlab 軟體，僅須下載編譯器等基本套件即可於個人電腦上執行模擬作業，前期發展資料量較大每個港口點位需要建立資料量約為 120GB，但本年度已大幅下降資料量至每港口點 25GB，8 個港口共約 200GB 資料。下圖 7.33 為程式內有關視窗化系統之計算範圍圖，圖 7.34 為編譯完成操作介面

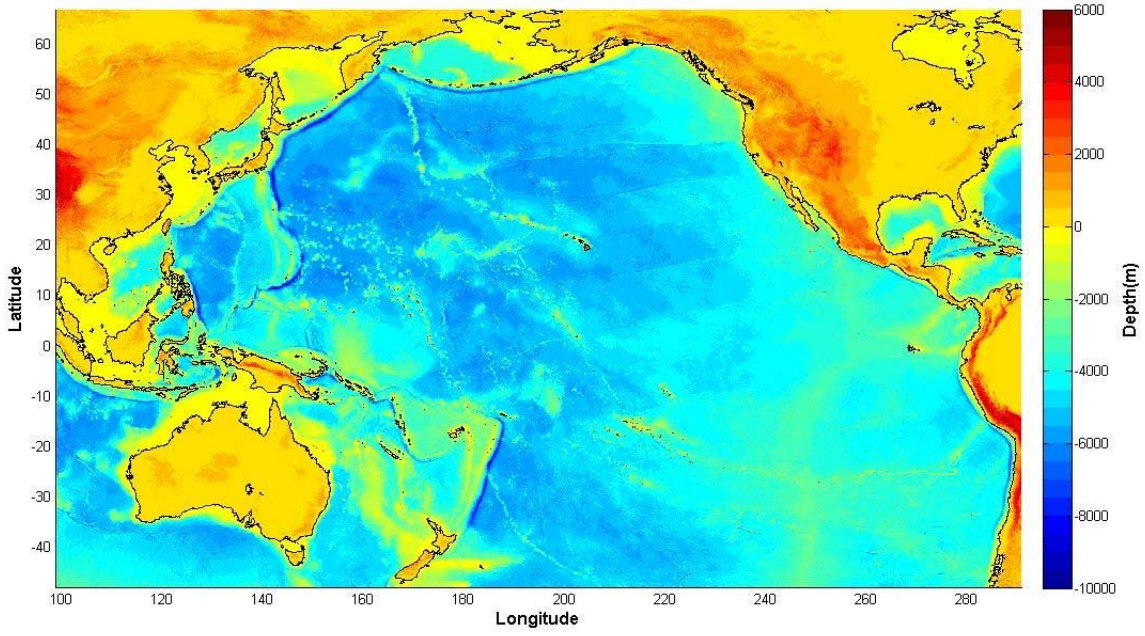


圖 7.33 視窗化系統之計算範圍圖

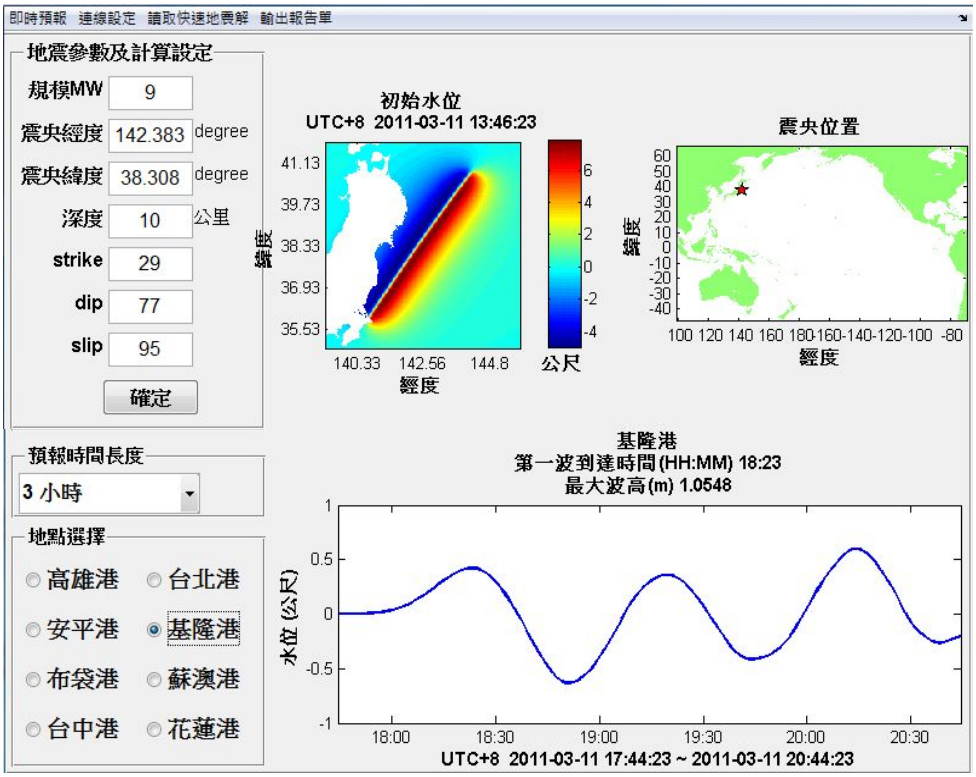


圖 7.34 視窗化介面之計算成果圖

本系統之參數輸入方式是直接輸入地震矩規模，反算斷層長度、寬度及滑移量。就地震警報而言，得知地震矩規模較為容易也較為一般人接受；斷層長度等資料由於海底斷層探測比較不易，故斷層尺度之換算通常也經由經驗公式得出，其他之斷層參數(例如走向等)可參考相關網站得知。

海嘯成因眾多，本系統僅適用於因海底地震所產生之海嘯；在計算效率方面，以恆春地震為例若不考慮近岸波浪非線性之模擬，則使用傳統海嘯數值模式進行全區域模擬且進行後續資料處理則約需 1~2 天；使用本系統計算相同案例，由於已事先完成資料庫運算及建置，故僅需於地震發生初期得知海嘯初始水位即可進行運算以及圖形畫輸出，依系統硬體設備不同僅需數秒到數分鐘即可完成單一港口計算作業。

2.作業化模組

由於日本 311 海嘯，所幸為平日上班時間，本所可透過前期已發展海嘯視窗系統即時利用手動方式計算，但若為其他時間防災應變將可能出現缺口，因此本年度海嘯作業化主要為利用現有模式改成全自動作業情形，並透過港灣環境資訊網展示。

海嘯作業化模組主程式均與視窗化模組相同，但此部分去除 GUI 介面，主要針對是作業化的建置，並加上作業排程，最大不同於視窗化部分為本系統為每隔 3 分鐘，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業，目前已建置系統可同時擷取下列三個網頁包含美國國家地震資訊中心、美國國家地震資訊中心及日本防災科學技術研究所其網址如下。

(1)USGS(U.S. Geological Survey) 美國國家地震資訊中心

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/

(2)CWB(Central Weather Bureu) 台灣寬頻地震網資訊系統

http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/

(3)Fnet(Full Range Seismograph Network of Japan) 日本防災科學技術研究所

http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/event/joho.php?LANG=en

USGS-NEIC 之地震資料庫範圍為全球(如圖 7.35)，但其資料擷取約在地震發生後約 1 小時才可遠端擷取。對於震央發生在台灣周邊海域恐有不及，因此在台灣區附近(東經 119 度~123 度，北緯 21 度~26 度)採用中央氣象局之地震即時資料(如圖 7.36 所示)，約在地震後 5 分鐘即可獲得相關訊息，而其他區域仍使用 NEIC 之資料。並增設日本防災科學技術研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention NIED)所提供之 F-net (Full Range Seismograph

Network of Japan)，其範圍在東經 120 度到 156 度，北緯 20 度到 49 度，以供地震資料參考（圖 3.37）。

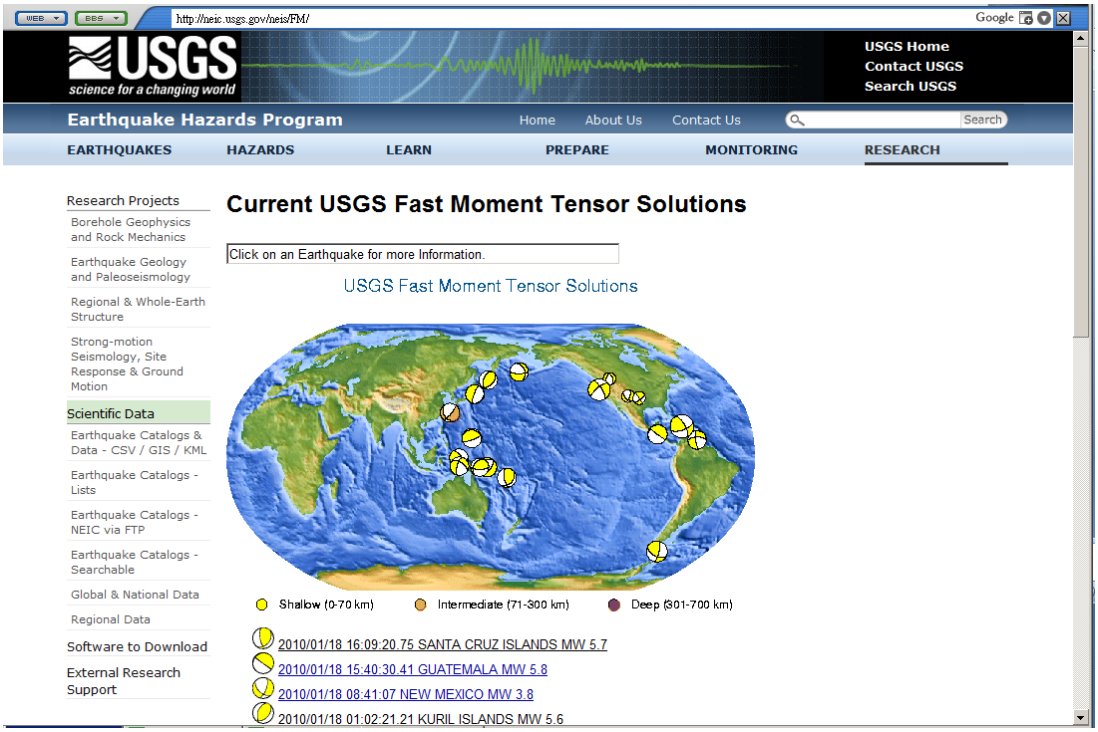


圖 7.35 美國 USGS 資料庫

Quick CMT Reports:

Recent Qcmt Distribution In Taiwan

Subscribe Quick CMT

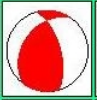
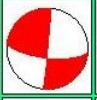
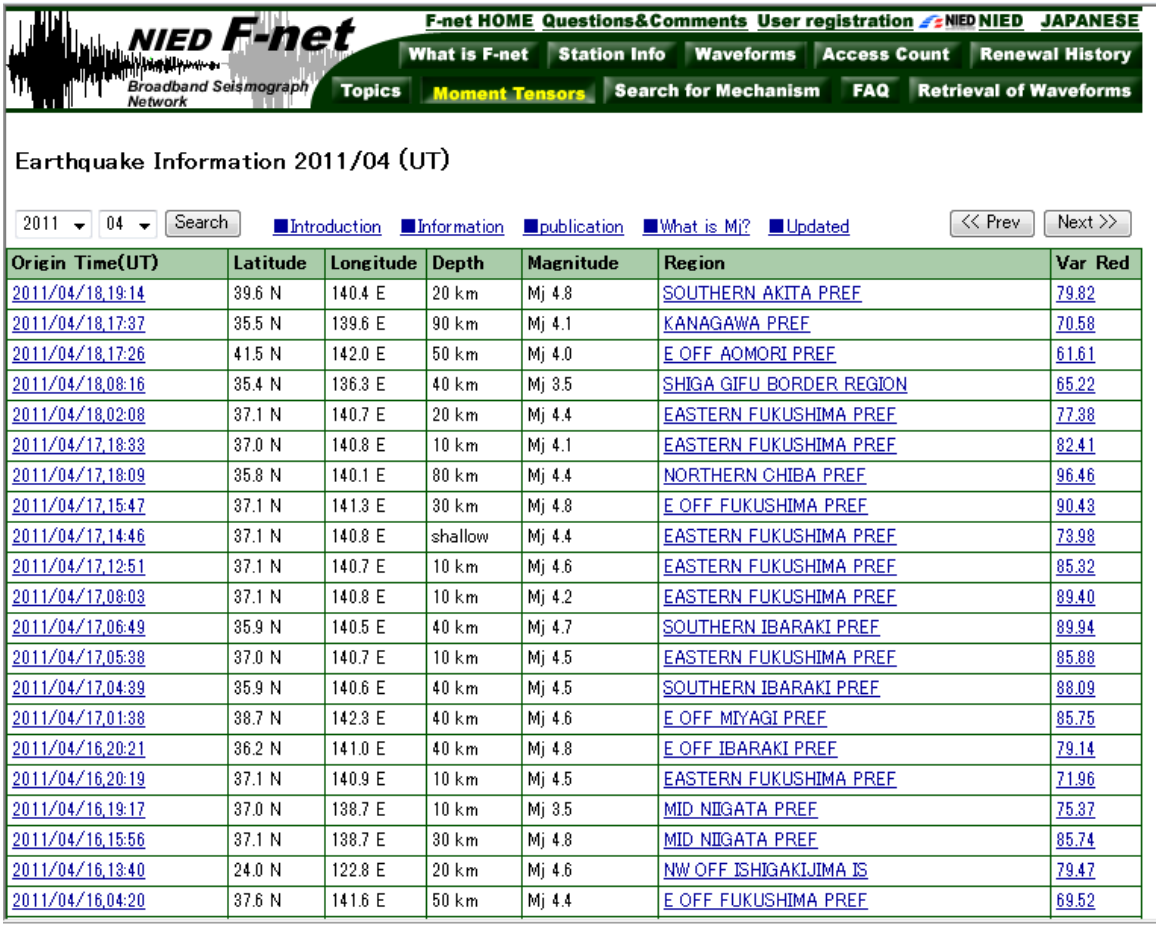
Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	Dep.	Mw	Strike	Dip	Slip	Misfit	CMT	Detail
2010-11-10	9:36:58.70	22.87	121.26	18.00 18	3.70	216 344	39 63	135 60	0.504		Trace Map Image Solution
2010-11-09	18:30:52.90	24.55	121.82	9.80 12	3.70	96 6	71 89	1 161	0.581		Trace Map Image Solution
2010-11-08	13: 1:21.30	23.22	120.41	19.90 17	4.50	337 218	42 67	37 126	0.584		Trace Map Image Solution
2010-11-06	0:22: 6.50	24.04	121.93	57.30 59	3.40	127 27	64 69	23 152	0.651		Trace Map Image Solution
2010-11-04	18:22:25.50	22.05	121.61	42.20 44	3.60	257 11	33 75	153 60	0.712		Trace Map Image Solution

圖 7.36 中央氣象局網站之即時地震資料



NIED F-net Broadband Seismograph Network

F-net HOME Questions&Comments User registration NIED JAPANESE

What is F-net | Station Info | Waveforms | Access Count | Renewal History

Topics | Moment Tensors | Search for Mechanism | FAQ | Retrieval of Waveforms

Earthquake Information 2011/04 (UT)

2011 04 Search ■Introduction ■Information ■publication ■What is Mj? ■Updated << Prev Next >>

Origin Time(UT)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Region	Var Red
2011/04/18,19:14	39.6 N	140.4 E	20 km	Mj 4.8	SOUTHERN AKITA PREF	79.82
2011/04/18,17:37	35.5 N	139.6 E	90 km	Mj 4.1	KANAGAWA PREF	70.58
2011/04/18,17:26	41.5 N	142.0 E	50 km	Mj 4.0	E OFF AOMORI PREF	61.61
2011/04/18,08:16	35.4 N	136.3 E	40 km	Mj 3.5	SHIGA GIFU BORDER REGION	65.22
2011/04/18,02:08	37.1 N	140.7 E	20 km	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	77.38
2011/04/17,18:33	37.0 N	140.8 E	10 km	Mj 4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	82.41
2011/04/17,18:09	35.8 N	140.1 E	80 km	Mj 4.4	NORTHERN CHIBA PREF	96.46
2011/04/17,15:47	37.1 N	141.3 E	30 km	Mj 4.8	E OFF FUKUSHIMA PREF	90.43
2011/04/17,14:46	37.1 N	140.8 E	shallow	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	73.98
2011/04/17,12:51	37.1 N	140.7 E	10 km	Mj 4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.32
2011/04/17,08:03	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	89.40
2011/04/17,06:49	35.9 N	140.5 E	40 km	Mj 4.7	SOUTHERN IBARAKI PREF	89.94
2011/04/17,05:38	37.0 N	140.7 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.88
2011/04/17,04:39	35.9 N	140.6 E	40 km	Mj 4.5	SOUTHERN IBARAKI PREF	88.09
2011/04/17,01:38	38.7 N	142.3 E	40 km	Mj 4.6	E OFF MIYAGI PREF	85.75
2011/04/16,20:21	36.2 N	141.0 E	40 km	Mj 4.8	E OFF IBARAKI PREF	79.14
2011/04/16,20:19	37.1 N	140.9 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	71.96
2011/04/16,19:17	37.0 N	138.7 E	10 km	Mj 3.5	MID NIIGATA PREF	75.37
2011/04/16,15:56	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID NIIGATA PREF	85.74
2011/04/16,13:40	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS	79.47
2011/04/16,04:20	37.6 N	141.6 E	50 km	Mj 4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	69.52

圖 7.37 日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料

現階段作業情形，若有擷取到新的地震資訊時約 3 分鐘內即可完成推算出各港口資訊(預計抵達時間及水位歷時變化)，其模擬結果都將提供港灣環境資訊網進一步使用，有關海嘯資訊資料包含，產生即時預報的個別地震目錄名稱，目錄名稱依時間、地震矩、dep 及來源單位建置，例如 EQ20110805145238_Mw38_dep021_CWB，其目錄下內容有(1)地震參數：將網頁擷取的地震參數輸出成文字檔與 mat 檔，後者提供頂部選單讀取快速地震解。(2)報告單：輸出地震訊息及預報水位的報告單(jpg 圖檔)。(3)預報水位：將預報水位輸出成文字檔(txt)。介面擷圖：將預報主介面輸出成圖檔(jpg 圖檔)。

7.2 臺灣主要港口海氣象現場觀測及蒐集

二十多年來港本中心在臺灣地區幾個國內主商港，進行海氣地象等資料觀測站建立觀測系統，以期獲得較長期的海氣象資料，目前並已在各港口建立即時海氣象監測系統，將即時之海氣象資料，透過資訊網路提供各種方便的資訊服務。以下將簡略介紹風力、波浪、潮位及海流等海氣象資料，於七個主要商港設置觀測及蒐集情形，相關位置圖如。

(1)風力現場觀測及蒐集

風力大小直接影響到船隻在碼頭卸貨等港埠作業，風力也直接作用於船隻，對船隻進港操船安全也有影響。其次風力也是造成波浪之主要外力，而風吹海面引起之風吹流，皆為影響整個海面及港池之靜穩重要因素。季節來分 12 月、1 月及 2 月份風速較大，為典型冬季東北季風；3 月、4 月屬春季季風型態；7 月及 8 月屬夏季季風型態；9 月、10 月及 11 月屬秋季為夏、冬間之轉換期。

本中心於基隆港、臺中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港、臺北港、布袋港及安平港等 8 個主要港口，安裝以 Young Brand 風速計為主之風速計，各港安裝位置如圖 7.42~圖 7.50 所示，各測站歷年觀測風資料蒐集概況如表 7-8。各港口也於隔年蒐集中央氣象局所屬之風速資料，氣象局各港安裝位置也如圖 7.42~圖 7.50 所示，同樣歷年觀測風資料蒐集概況如表 7-8。

(2)波浪現場觀測及蒐集

波浪之觀測，本中心於基隆港、臺中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港、臺北港及安平港等 7 個主要港，安裝以 NORTEK 剖面海流表面波浪與潮汐監測系統(AWCP)為主之潮波儀，各港安裝位置如圖 7.38~圖 7.46 所示，各測站歷年觀測波浪資料蒐集概況如表 7-9。

(3)潮位現場觀測及蒐集

潮汐觀測是海象調查中最基本的項目，也是港灣工程設計重要的參考數據，本中心於基隆港、臺中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港、臺北港、布袋港及安平港等 8 個主要港，在港口碼頭附近安裝以 Water Log 之潮位計，在港口附近海域安裝以 NORTEK 剖面海流表面波浪與潮汐監測系統(AWCP)為主之潮波儀，各港安裝位置如圖 7.42~圖 7.50 所示，各測站歷年觀測潮汐資料蒐集概況如表 7-10。各港口也於隔年蒐集中央氣象局所屬之潮汐資料，氣象局各港安裝位置也如圖 7.42~圖 7.50 所示，同樣歷年觀測潮汐資料蒐集概況如表 7-10。

(4)海流現場觀測及蒐集

海流之觀測，本中心於基隆港、臺中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港、臺北港及安平港等 7 個主要港口，安裝以 NORTEK 剖面海流表面波浪與潮汐監測系統(AWCP)為主之海流儀，各港安裝位置如圖 7.42~圖 7.50 所示，各測站歷年觀測波浪資料蒐集概況如表 7-11。

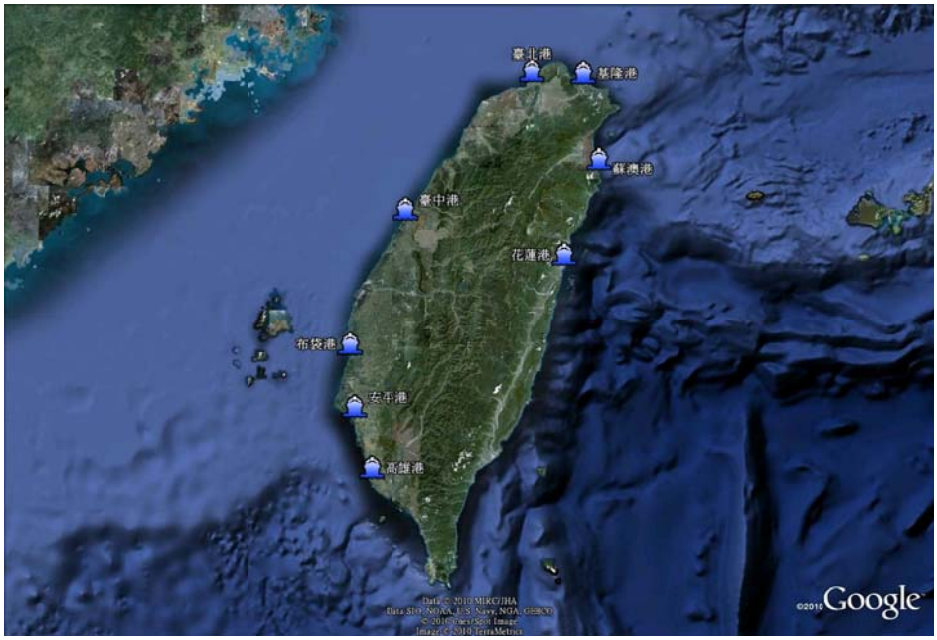


圖 7.38 商港位置圖



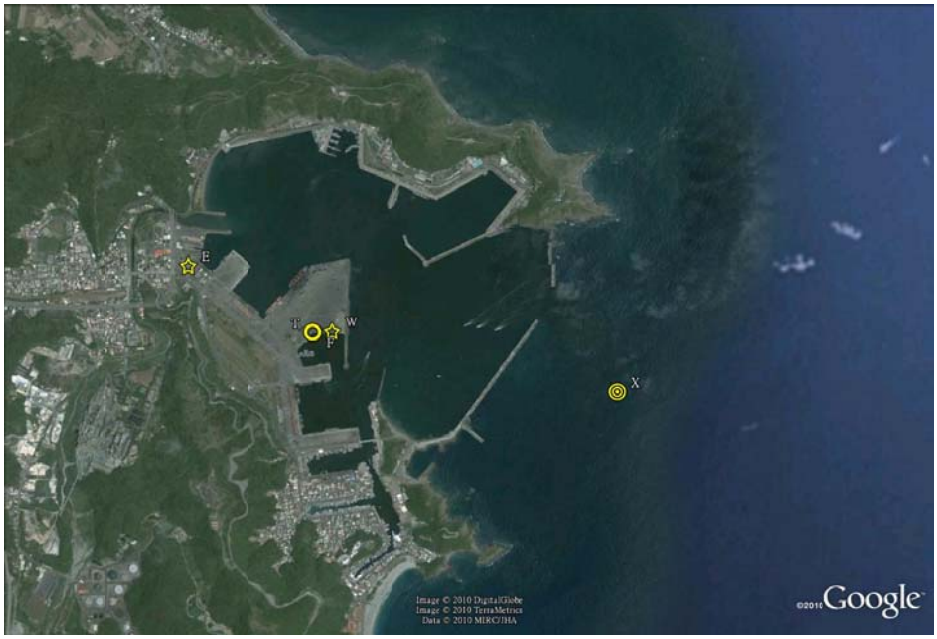
☆風速儀 ◎潮位計 ⬡觀測樁

圖 7.39 臺北港海氣象觀測位置圖



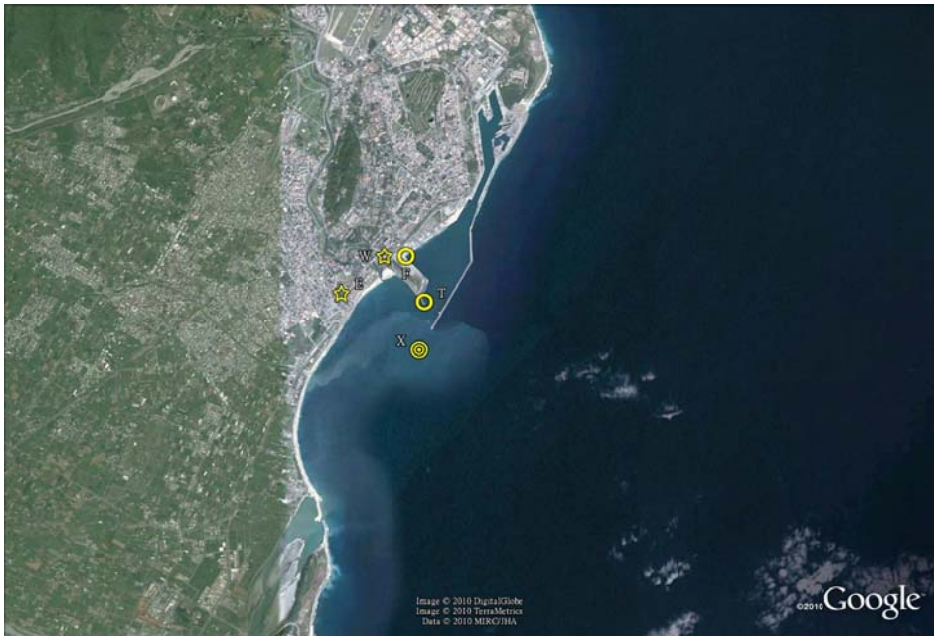
☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.40 基隆港海氣象觀測位置圖



☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.41 蘇澳港海氣象觀測位置圖



☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.42 花蓮港海氣象觀測位置圖



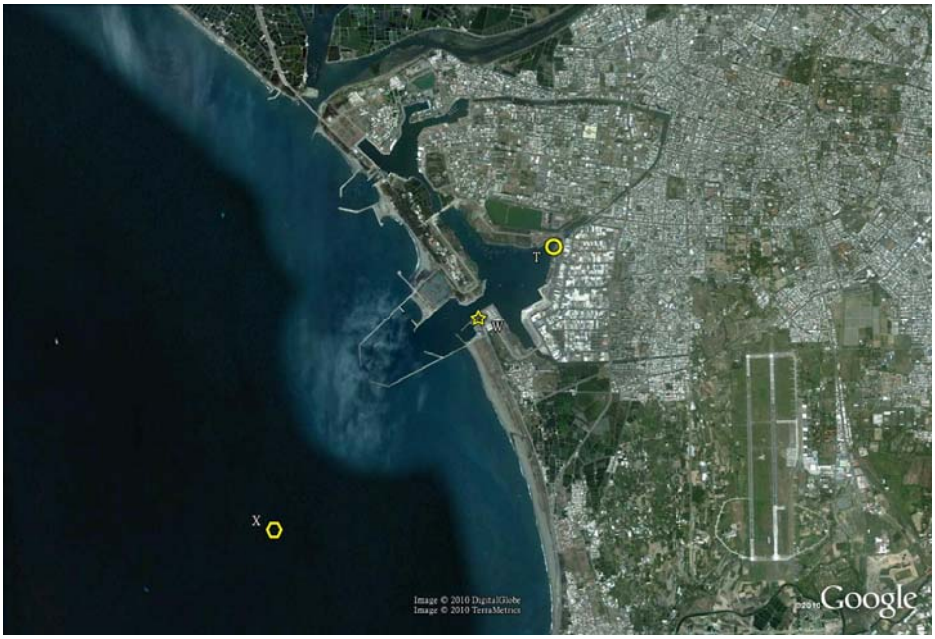
☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.43 高雄港海氣象觀測位置圖



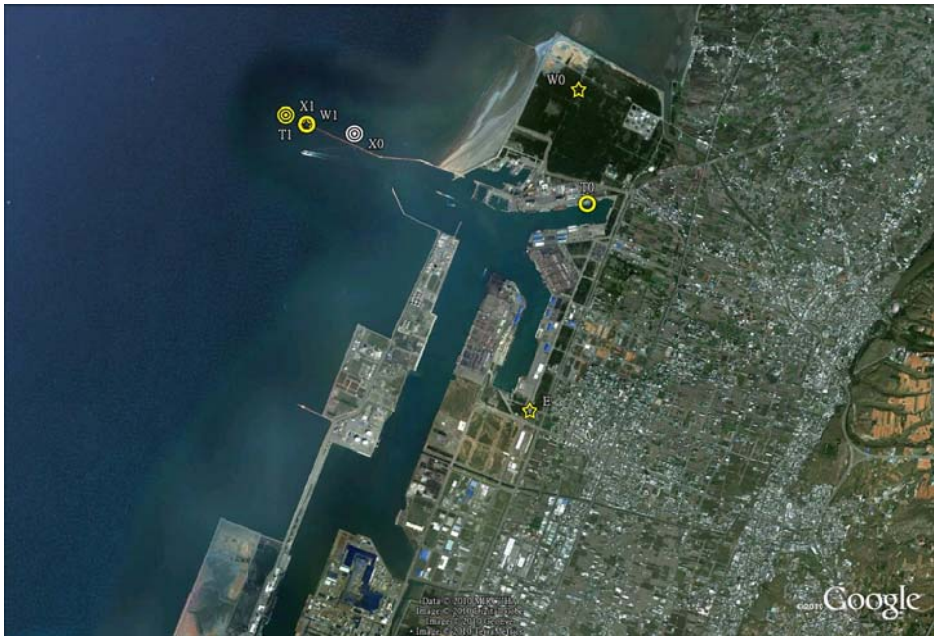
☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.44 布袋港海氣象觀測位置圖



☆風速儀 ◎潮位計 ⬡觀測樁

圖 7.45 安平港海氣象觀測位置圖



☆風速儀 ◎潮位計 ◎波流儀

圖 7.46 臺中港海氣象觀測位置圖

表 7-8 觀測風力資料蒐集概況表

序號	港區名稱	測站	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
1	臺北港(TP)	X0	1996/10-2004/09	港研中心	舊觀測樁 Young Brand 風速計
2	臺北港(TP)	X1	2005/01-2011/11(觀測中)	港研中心	新觀測樁 Young Brand 風速計
3	臺北港(TP)	E	2004/01-2011/11(觀測中)	中央氣象局	Young Brand 風速計
4	臺北港(TP)	W	2009/08-2011/11	港研中心	Young Brand 風速計
5	基隆港(KL)	W	2002/06-2011/11 (觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
6	基隆港(KL)	E	1999/01-2011/11 (觀測中)	中央氣象局	
7	蘇澳港(SA)	W	2003/06-2011/11 (觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
8	蘇澳港(SA)	E	1999/01-2011/11 (觀測中)	中央氣象局	
9	花蓮港(HL)	W	2002/06-2011/11 (觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
10	花蓮港(HL)	E	1981/02-2011/11 (觀測中)	中央氣象局	0
11	高雄港(KH)	W	2002/06-2011/11 (觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
12	高雄港(KH)	E	1999/01-2011/11 (觀測中)	中央氣象局	0
13	安平港(AP)	X	1999/10-2011/11(觀測中)	港研中心	觀測樁 Young Brand 風速計
14	安平港(AP)	W	2009/08-2011/11(觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
15	布袋港(PT)	W	2006/08-2011/11(觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
16	臺中港(TC)	W0	1981/02-2011/11(觀測中)	港研中心	Young Brand 風速計
17	臺中港(TC)	E	1996/09-2011/11 (觀測中)	中央氣象局	
18	臺中港(TC)	W1	新增	港研中心	

表 7-9 觀測波浪資料蒐集概況表

序號	港區名稱	測站	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
1	臺北港(TP)	X0	1996/10-2004/09	港研中心	S4 舊觀測樁
2	臺北港(TP)	X1	2004/12-2011/11(觀測中)	港研中心	S4 新觀測樁
3	基隆港(KL)	X0	2001/06-2006/05	港研中心	AWCP
4	基隆港(KL)	X1	2006/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
5	蘇澳港(SA)	X	2002/08-2011/11(觀測中)	港研中心	AWCP
6	花蓮港(HL)	X	2000/09-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
7	高雄港(KH)	X0	2000/12-2005/08	港研中心	AWCP
8	高雄港(KH)	X1	2005/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
9	安平港(AP)	X	1999/10-2011/11(觀測中)	港研中心	S4 觀測樁
10	布袋港(PT)	X1	2006/06-2010/03(暫停觀測)	港研中心	AWCP
11	布袋港(PT)	X2	2007/06-2007/09	港研中心	AWCP
12	臺中港(TC)	X0	1999/10-2001/08	港研中心	AWCP
13	臺中港(TC)	X1	2003/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP

表 7-10 觀測潮汐資料蒐集概況表

序號	港區名稱	測站	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
1	臺北港(TP)	X0	1996/10-2004/09	港研中心	S4 舊觀測樁
2	臺北港(TP)	X1	2005/01-2011/11 (觀測中)	港研中心	S4 新觀測樁
3	臺北港(TP)	F	1994/10-2011/11 (觀測中)	水利署	Water Log 潮位計
4	臺北港(TP)	T	2009/09-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
5	基隆港(KL)	T	2002/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
6	基隆港(KL)	X0	2001/06-2006/05	港研中心	AWCP
7	基隆港(KL)	X1	2006/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
8	蘇澳港(SA)	T0	1994/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
9	蘇澳港(SA)	F	1981/01-2011/11(觀測中)	中央氣象局	
10	蘇澳港(SA)	X	2002/08-2011/11(觀測中)	港研中心	AWCP
11	花蓮港(HL)	F	2001/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
12	花蓮港(HL)	T	1980/01-2011/11(觀測中)	中央氣象局	0
13	花蓮港(HL)	X	2000/09-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
14	高雄港(KH)	T	2003/06-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
15	高雄港(KH)	F	1988/01-2011/11(觀測中)	高雄港務局	
16	高雄港(KH)	X0	2000/12-2005/08	港研中心	AWCP
17	高雄港(KH)	X1	2005/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
18	安平港(AP)	X	1999/10-2011/11 (觀測中)	港研中心	觀測樁
19	安平港(AP)	T	2008/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
20	布袋港(PT)	X1	2006/06-2010/03 (觀測中)	港研中心	AWCP
21	布袋港(PT)	X2	2007/06-2007/09	港研中心	AWCP
22	布袋港(PT)	T	2008/08-2011/11(觀測中)	港研中心	Water Log 潮位計
23	臺中港(TC)	T0	1989/12-2011/11(觀測中)	港研中心	Water Log
24	臺中港(TC)	T1	新增	港研中心	
25	臺中港(TC)	X0	1999/10-2000/08	港研中心	AWCP
26	臺中港(TC)	X1	2003/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP

表 7-11 觀測流場資料蒐集概況表

序號	港區名稱	測站	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
1	臺北港(TP)	X0	1996/10-2004/09	港研中心	S4 舊觀測樁
2	臺北港(TP)	X1	2004/12-2011/11(觀測中)	港研中心	S4 新觀測樁
3	基隆港(KL)	X0	2001/06-2006/05	港研中心	AWCP
4	基隆港(KL)	X1	2006/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
5	蘇澳港(SA)	X	2002/08-2011/11(觀測中)	港研中心	AWCP
6	花蓮港(HL)	X	2000/09-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
7	高雄港(KH)	X0	2000/12-2005/08	港研中心	AWCP
8	高雄港(KH)	X1	2005/08-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP
9	安平港(AP)	X	1999/10-2011/11(觀測中)	港研中心	S4 觀測樁
10	布袋港(PT)	X1	2006/06-2010/03(暫停觀測)	港研中心	AWCP
11	布袋港(PT)	X2	2007/06-2007/09	港研中心	AWCP
12	臺中港(TC)	X0	1999/10-2000/08	港研中心	AWCP
13	臺中港(TC)	X1	2003/07-2011/11 (觀測中)	港研中心	AWCP

7.3 港灣環境資訊系統

本系統對外展示部分已逐步整合於本所港灣環境資訊系統內，維持每日提供數值預報資訊及即時海嘯模擬資訊等相關資料包括 72 小時(昨日、今日、明日)模擬等預報資料相關風、波、潮及流數值模擬結果以及海嘯最大波抵達時間及最大值等，以提供外界使用，本節即對此系統及系統內對於海象觀測資訊、海象模擬資訊及海嘯模擬資訊如何介接做一概述說明。

7.3.1 港灣環境資訊系統概觀

港灣環境資訊系統主要為提供港灣技術研究中心於各港口所佈放之海氣象儀器之觀測資料回傳接收彙整儲存機制，該系統主要利用網頁結合 Google Map 與網際網路之技術，結合空間與屬性資訊以提供分析、展示、儲存、管理及之應用支援系統。依據目前港灣環境資訊系統硬體規劃架構，可區分現場觀測儀器、海情中心應用系統主機群及使用者三大部分。

現場觀測儀器主要負責觀測各種海氣象觀測資料，如風、潮汐、波浪、海流及溫度等即時資料以及提供 CCTV 港區即時影像等，目前港灣環境資訊系統與海氣象觀測資料之間以 Intranet 進行 SQL DB replication 方式接收資料，港灣環境資訊系統的資料接收模組於接收到資料後進行資料品管加值處理儲存於海氣象資料庫中，並且整合近岸數值模擬系統模式 72 小時(昨日、今日、明日)海氣象數值模擬預報資訊。於即時影像部分則透過 GSN /VPN 進行各即時影像系統連接以提供港區域即時影像。以上之系統架構如下圖 7.51 港灣環境資訊系統架構圖所示：

港灣環境資訊網共區分為一般版、PDA 版及無障礙空間網頁版三大類。於一般版共區分為海象觀測資訊、海象模擬資訊、港區影像系

統、港區地震系統、海嘯模擬資訊、港埠基本資料及資料申請說明等共計 7 項子系統，一般版對外提供網頁如圖 7.48 所示，七項子系統內的功能架構圖如圖 7.49 所示

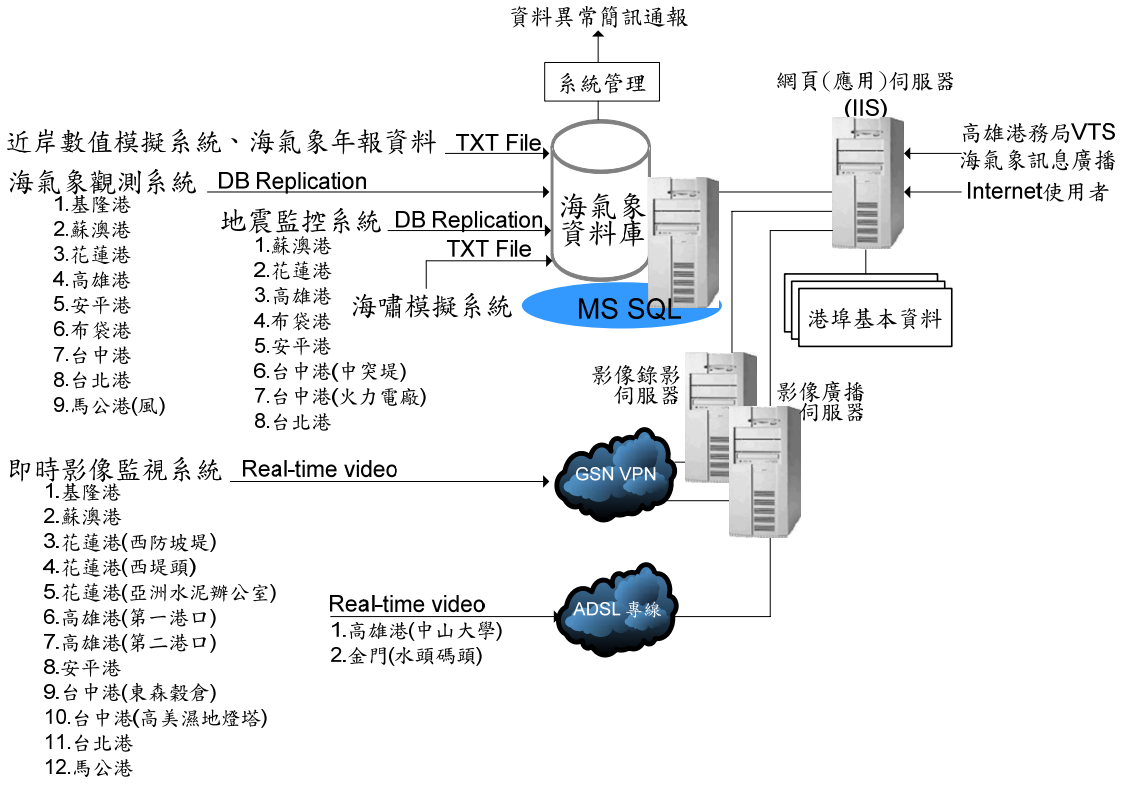


圖 7.47 港灣環境資訊網系統架構圖



圖 7.48 港灣環境資訊網頁

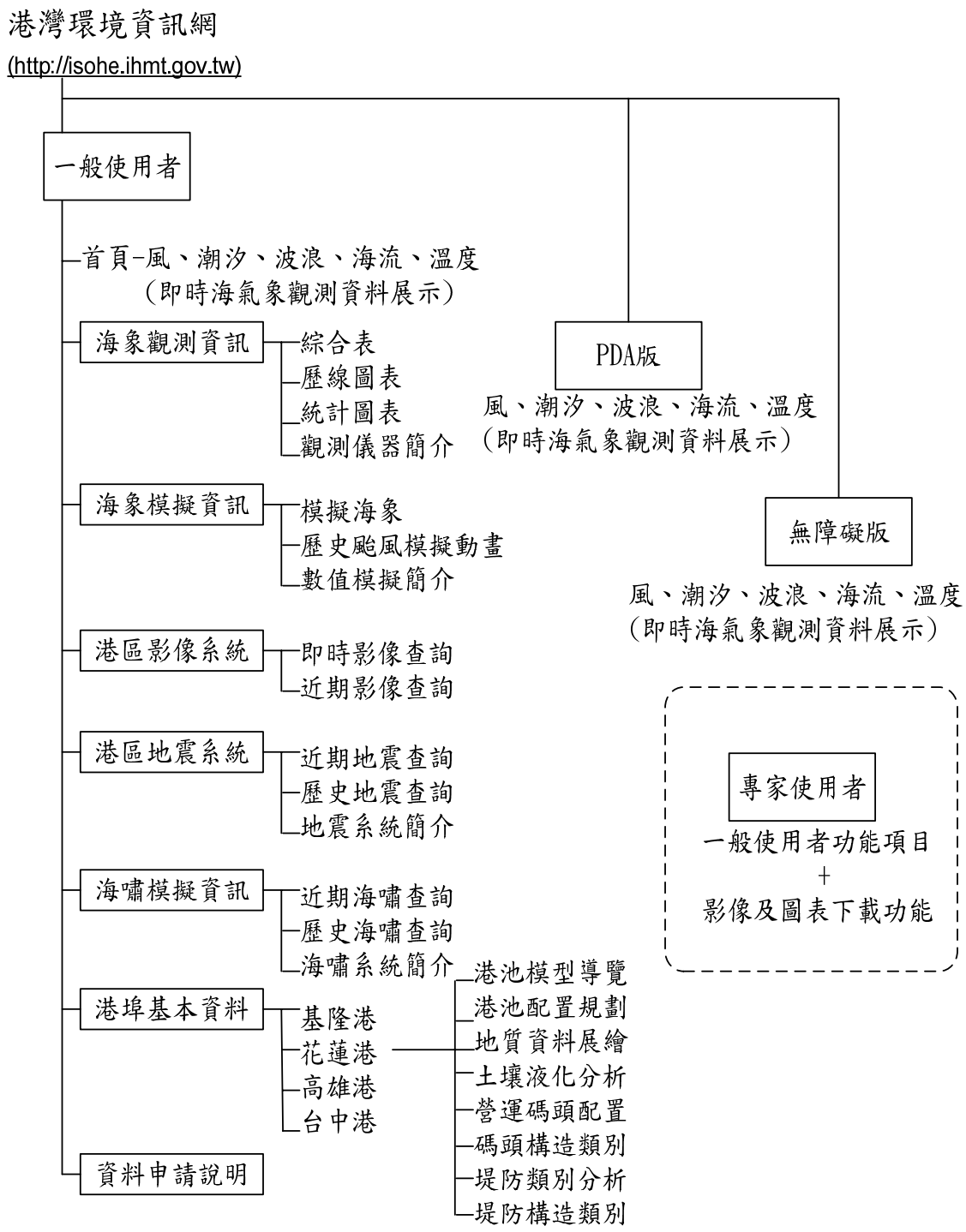


圖 7.49 港灣環境資訊網之功能架構圖

7.3.2 海象觀測資訊

已完成建立資料庫連結中心即時海氣象資料包含臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、布袋港、澎湖等港口的海氣象資料會由資料庫同步程式定時擷取以及每年匯入上年度相關海象觀測年報資料。

1.資料庫介接架構

目前已完成建立資料庫連結包含臺北港、基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、布袋港、澎湖等港口的海氣象資料會由資料庫同步程式定時擷取，將資料同步複製至海情暫存資料庫(Wap_Temp)，再藉由資料品管及匯入程式將國際港以及商港的海氣象即時資料(風力、潮汐、波浪、海流、水溫)匯入至海情正式資料庫(Wap_Formal)。架構圖(網路)如下圖 7.50 及圖 7.51 所示：

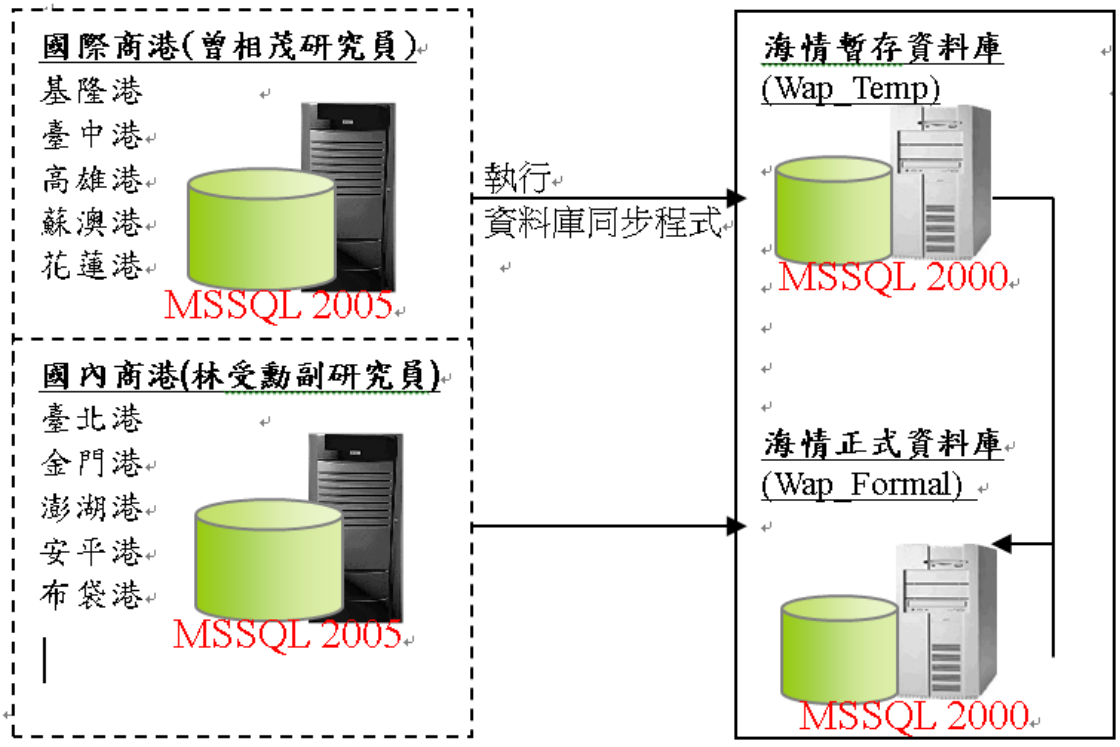


圖 7.50 海氣象觀測資料庫介接架構圖(網路)

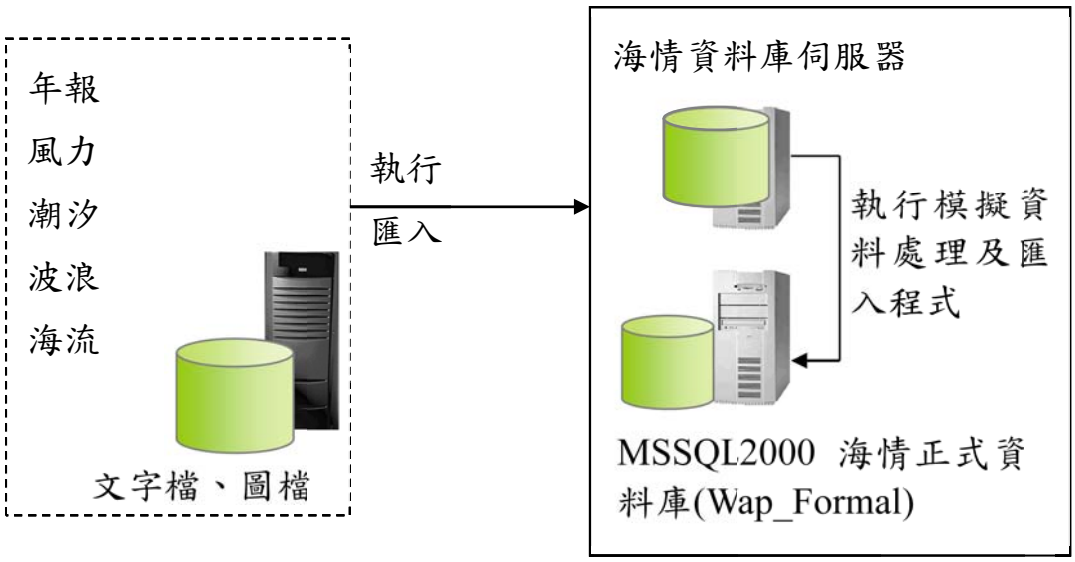


圖 7.51 年報資料庫介接架構圖

2.網頁展示

目前港灣環境資訊網點選頁籤中即時觀測系統主項目，即可進入海氣象歷線圖,此部分改善可直接切換瀏覽其他港口的海氣象歷線圖，並且將現有系統的海氣象項目和歷線圖種類作整合和調整查詢選項的順序，便於使用者查詢提高版面的簡潔度。

由於使用者不易在文字上辨識測站名稱的位置，為了讓使用者更清楚、進一步地了解港區地理位置以及觀測儀器測站/模擬測站位置，於海氣象測站位置圖頁面中如圖 7.52 所示，也增加了測站位置說明，採用 Google map 的互動呈現方式，同時標示觀測海氣象儀器之測站以及模擬測站的相關位置，使用者可明確地對照海氣象歷線圖的測站名稱，如圖 7.53 海氣象歷線圖/資料表。

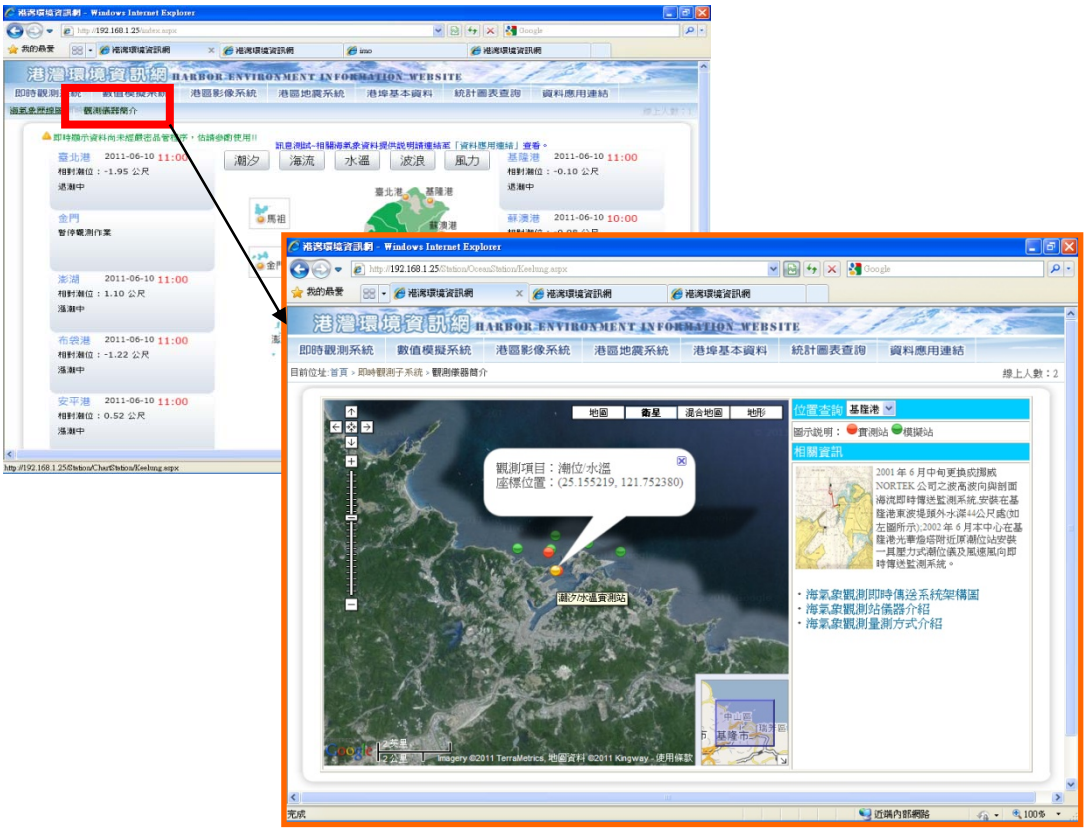


圖 7.52 海氣象測站位置圖查詢畫面



圖 7.53 海氣象歷線圖/資料表(以基隆港 風速歷線圖為例)

7.3.3 海象模擬資訊

近岸數值模擬系統將各海氣象相關的模組每日所計算的數值匯整成文字檔與圖片檔，而海情中心的伺服器以定時同步資料夾的程式，將相關的資料複製至伺服器的硬碟。並且將文字檔的資料透過程式匯入海情正式資料庫。而數值模擬資料則是用來提供海氣象歷線圖所使用的數據，且於網頁中與實測值套疊作展示，讓使用者查詢觀看。今年度新增波浪(Refdif 模式)數值模擬與小尺度的海流(Fehdm 模式) 數值模擬，並於港區附近挑選 5 個模擬測站，目前已完成有基隆港和臺北港的模擬資料。另有關小尺度波浪已陸續建置完成主要港口包含蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、臺中港。

1.資料介接架構

有關港灣環境資訊系統每日定時自動蒐集數值預報子系統資料介接現況說明如圖 7.54 所示，每日定時由模擬資料同步程式複製近岸數值模擬系統之相關資料(文字檔和圖片檔)，其相關來源路徑連接及儲存位置設定，其來源資料會儲存於海情伺服器上的硬碟。接著再透過模擬資料品管及匯入程式，將近岸模擬之海氣象數值資料(風力、潮汐、波浪、海流)分別匯入至海情正式資料庫(Wap_Formal)。

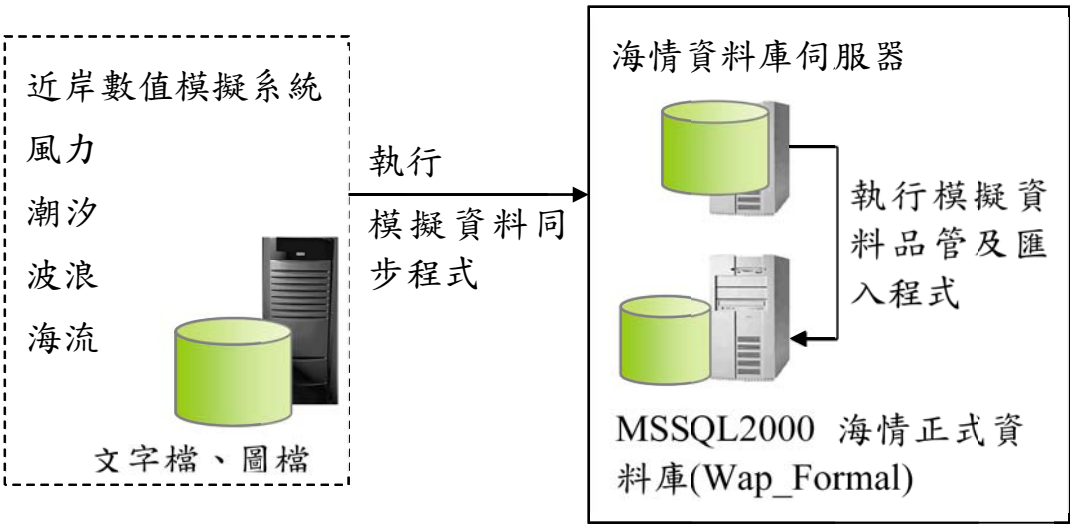


圖 7.54 近岸數值模擬資料介接系統架構圖

2.網頁展示

海象模擬網頁展示加入套疊觀測及模擬資料之歷線圖表以及整合其相關的海氣象圖形動畫，並且依模擬尺度範圍(大、中以及小尺度)規劃區分做呈現，使用者可點選欲要瀏覽的模擬尺度範圍，做進一步的查詢(如圖 7.55 所示)，其內包含模擬資料如表 7-12 所示。且其模擬尺度範圍所提供的資料有歷線圖表查詢以及海氣象圖形動畫展現。而針對模擬測站查詢的部分，增加測站相關的詳細資訊呈現，讓使用者在查詢更具人性化以及便於清楚瀏覽相關資訊。有關其歷線圖展示以基隆港波浪模擬 (大尺度、中尺度、小尺度) 歷線圖及臺北港相對潮位歷線圖及流速歷線與流向歷線說明如圖 7.56、圖 7.57、圖 7.58 所示，展示網頁內容包含港口名稱、圖形選擇、模擬資訊輸出位置點，日期、3 日歷線圖以及資料表。有關圖檔展示部分已小尺度波高及流場動畫圖如圖 7.59、3.60 為例，系統內展示當日 72 張圖檔並做動畫可任選時間點暫停，便於使用者了解該小時平面概略波流資訊。

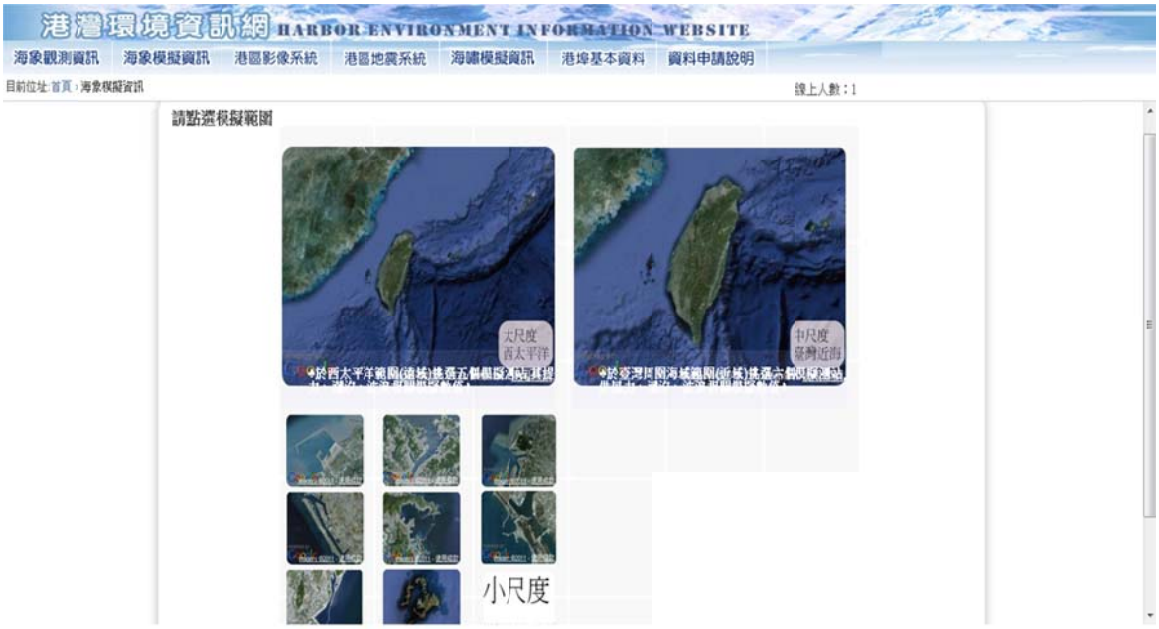


圖 7.55 海象模擬資訊網頁展示圖

表 7-12 海象模擬資訊展示內容彙整表

大尺度西太平洋範圍	歷線圖 (在外海選 5 點資料輸出)	風速歷線圖
		風向歷線圖
		相對潮位歷線圖
		波高歷線圖
		波向歷線圖
		波浪週期歷線圖
	平面圖	氣壓+風速向量場分佈圖
		水位分佈圖
		波高分佈圖
		波浪週期分佈圖
		波向分佈圖
		流速向量場分佈圖
中尺度台灣近海範圍	歷線圖 (台灣周圍海域選6點資料輸出)	風速歷線圖
		風向歷線圖
		相對潮位歷線圖
		波高歷線圖
		波向歷線圖
		波浪週期歷線圖
	平面圖	氣壓+風速向量場分佈圖
		水位分佈圖
		波高分佈圖
		波浪週期分佈圖
		波向分佈圖
		流速向量場分佈圖
小尺度港區範圍	歷線圖 (基隆港及臺北港海域選5點資料輸出)	風速歷線圖
		風向歷線圖
		相對潮位歷線圖
		波高歷線圖
		波向歷線圖
		波浪週期歷線圖
		流速歷線圖
		流向歷線圖
	平面圖 基隆港及臺北港海域)	近岸波高分佈圖
		近岸流速向量場分佈圖



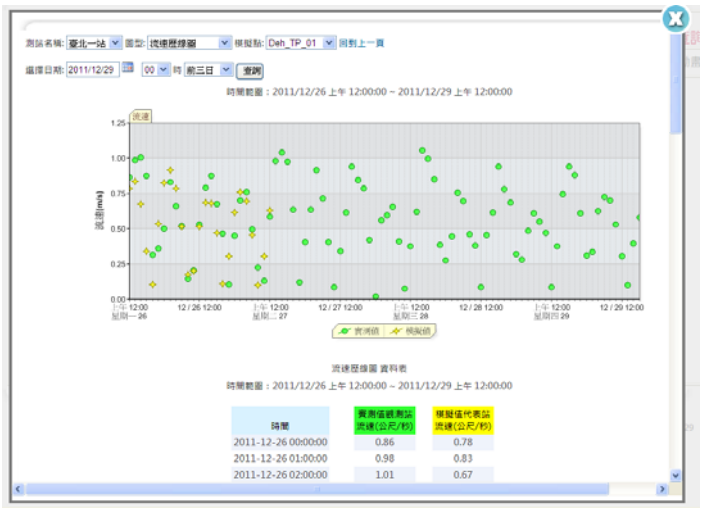




圖 7.56 展示基隆港波浪模擬 (大尺度、中尺度、小尺度) 歷線圖



圖 7.57 展示臺北港相對潮位歷線圖



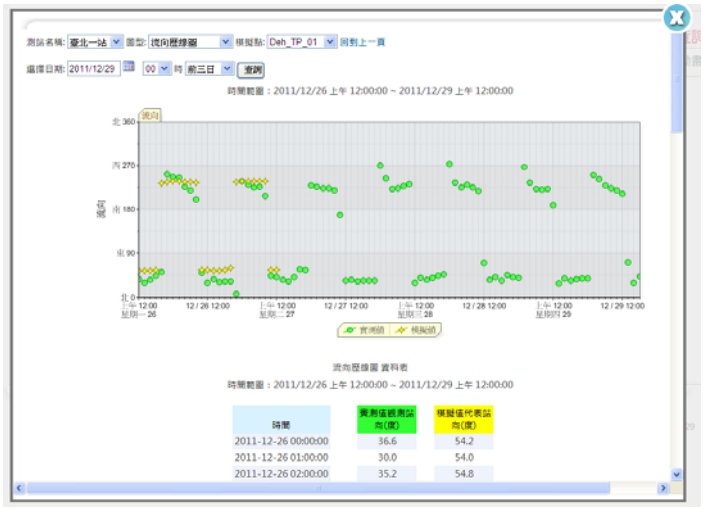


圖 7.58 展示臺北港流速及流向歷線圖

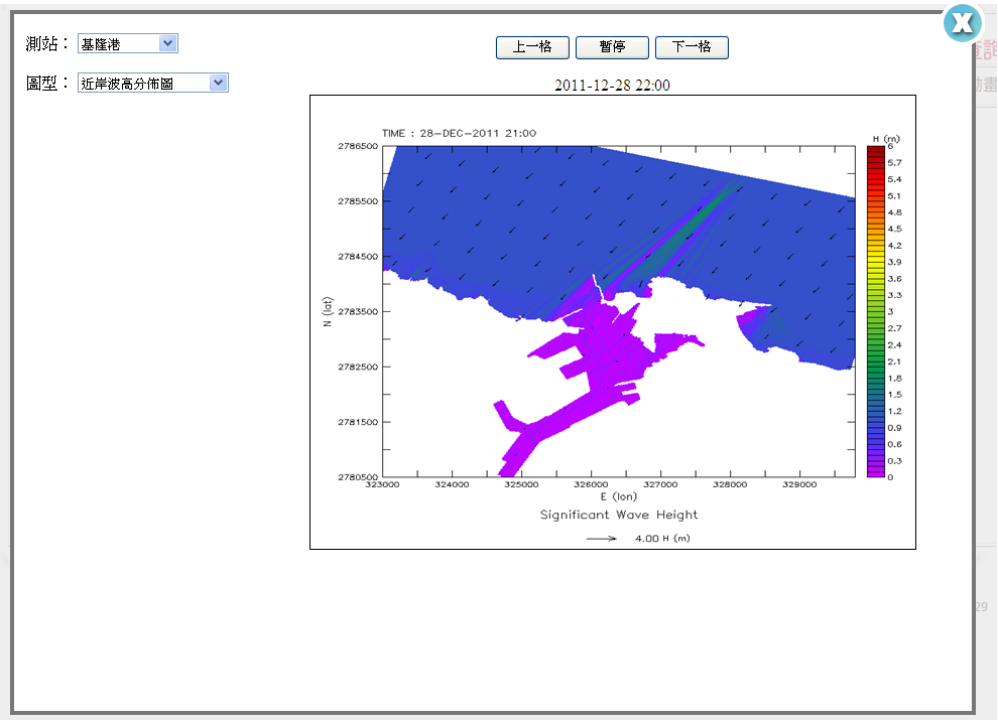


圖 7.59 展示基隆港近岸波高分佈圖

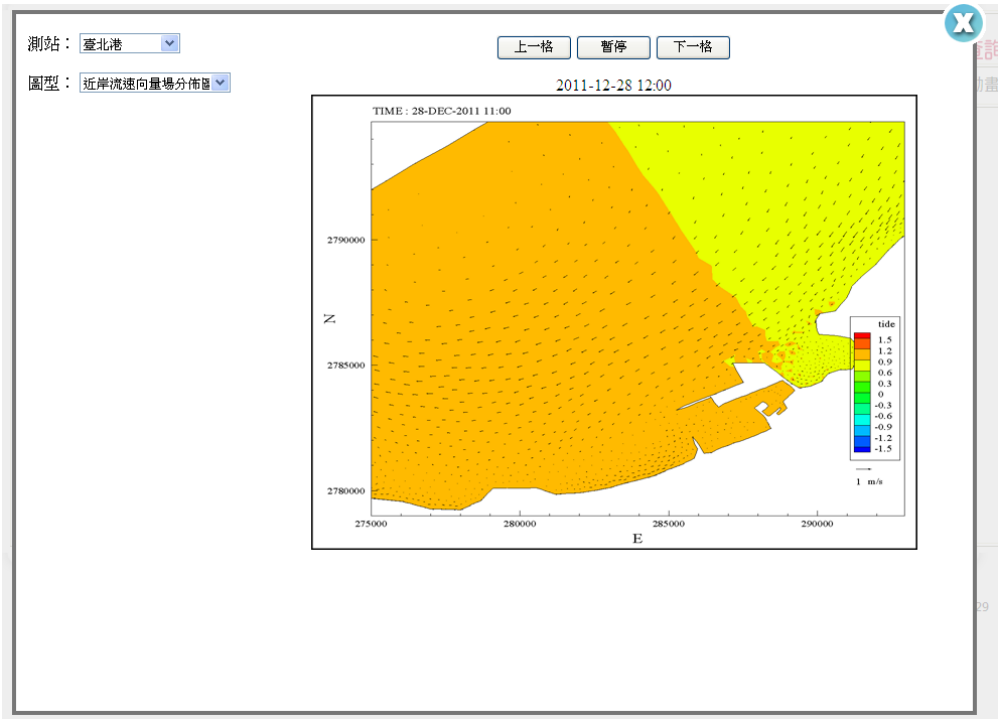


圖 7.60 展示臺北港流速向量場分佈圖

7.3.4 海嘯模擬資訊

海嘯模擬資訊將海嘯模擬數值所提供文字檔以及圖片檔彙整展示，而海情中心的伺服器以定時同步資料夾的程式，將相關的資料複製至伺服器的硬碟。並且將文字檔的資料透過程式匯入海情正式資料庫，此部分的作業會持續性方式執行，一旦資料更新則立即於網頁中作展示，讓使用者可隨時於網頁查詢觀看。

1.資料介接架構

每日定時由海嘯資料同步程式(批次檔)同步複製海嘯模擬系統之相關資料(文字檔和圖片檔)，其同步的訊息會記錄於檔案。而來源資料會儲放於海情伺服器上的硬碟，接著其地震相關詳細資訊、水位分析結果訊息、海嘯模擬數值，再透過海嘯模擬資料及匯入程式，將海嘯模擬之地震相關詳細資訊、水位分析結果訊息、數值資料分別匯入至海情正式資料庫(Wap_Formal)。網路架構如圖 7.61 所示。

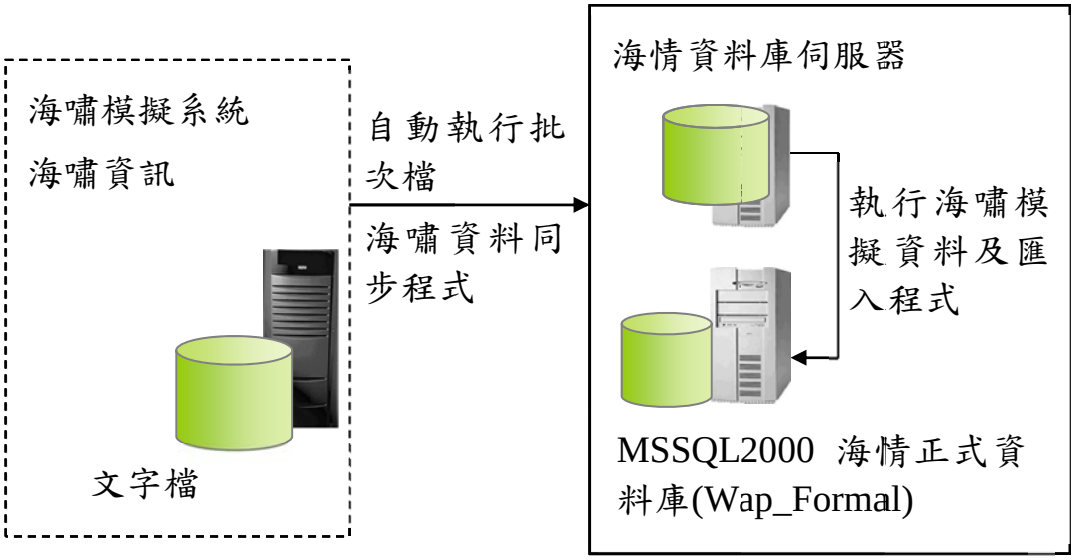


圖 7.61 海嘯模擬子系統網路架構圖

2.海嘯模擬資訊展示與查詢

目前建置以2011/03/11日本海嘯生成樣本做範例(如圖7.62所示)，匯整後之海嘯模擬資訊作業，大致可分為地震資訊、各港水位歷線及表，說明如下：

海嘯資訊於GoogleMap標示臺灣港區位置(基隆、臺北、臺中、安平、布袋、高雄、蘇澳以及花蓮)，網頁畫面如圖7.62所示。其包含了地震的相關詳給資訊、震央位置圖如圖7.63所示以及到達臺灣各港區的相關預警訊息資料海嘯模擬水位資訊查詢(如圖7.64、3.65所示)。

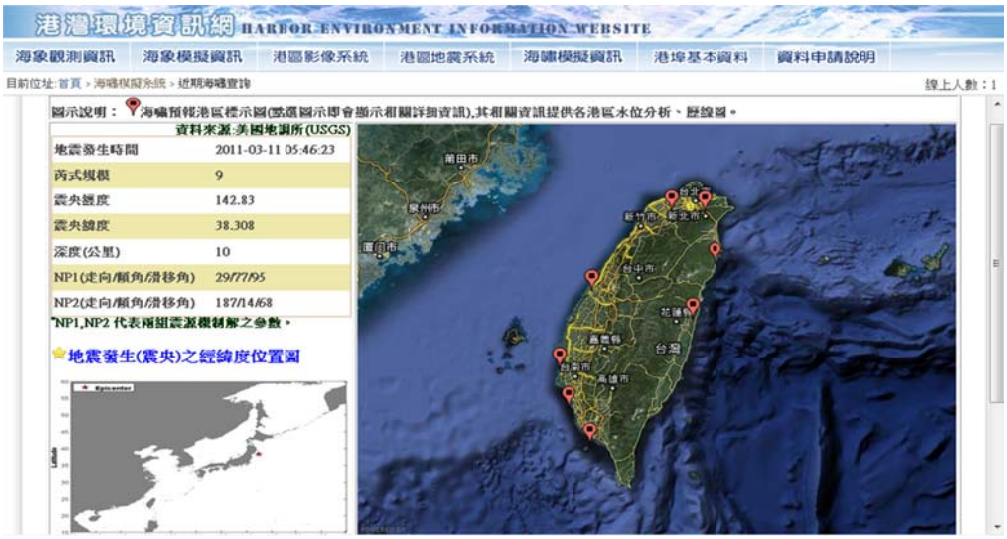


圖 7.62 海嘯查詢網頁

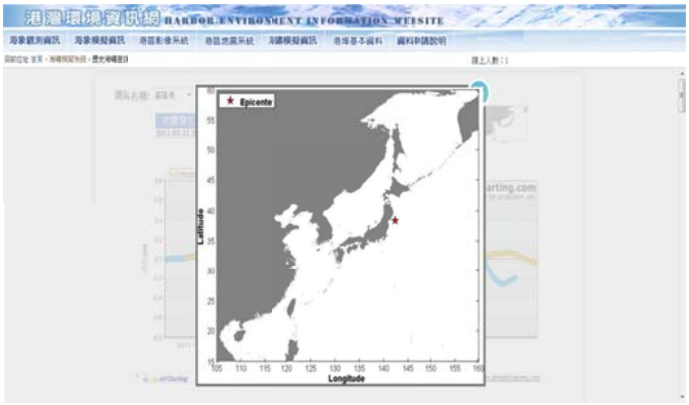
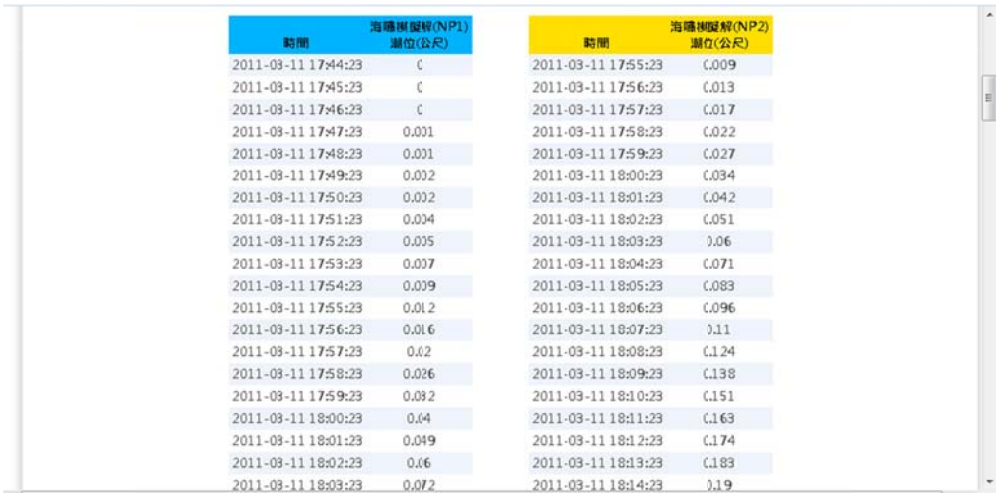


圖 7.63 展示海嘯震央位置圖



時間	海嘯模擬解(NP1) 潮位(公尺)	時間	海嘯模擬解(NP2) 潮位(公尺)
2011-03-11 17:44:23	0	2011-03-11 17:55:23	0.009
2011-03-11 17:45:23	0	2011-03-11 17:56:23	0.013
2011-03-11 17:46:23	0	2011-03-11 17:57:23	0.017
2011-03-11 17:47:23	0.001	2011-03-11 17:58:23	0.022
2011-03-11 17:48:23	0.001	2011-03-11 17:59:23	0.027
2011-03-11 17:49:23	0.002	2011-03-11 18:00:23	0.034
2011-03-11 17:50:23	0.002	2011-03-11 18:01:23	0.042
2011-03-11 17:51:23	0.004	2011-03-11 18:02:23	0.051
2011-03-11 17:52:23	0.005	2011-03-11 18:03:23	0.06
2011-03-11 17:53:23	0.007	2011-03-11 18:04:23	0.071
2011-03-11 17:54:23	0.009	2011-03-11 18:05:23	0.083
2011-03-11 17:55:23	0.012	2011-03-11 18:06:23	0.096
2011-03-11 17:56:23	0.016	2011-03-11 18:07:23	0.11
2011-03-11 17:57:23	0.02	2011-03-11 18:08:23	0.124
2011-03-11 17:58:23	0.026	2011-03-11 18:09:23	0.138
2011-03-11 17:59:23	0.032	2011-03-11 18:10:23	0.151
2011-03-11 18:00:23	0.04	2011-03-11 18:11:23	0.163
2011-03-11 18:01:23	0.049	2011-03-11 18:12:23	0.174
2011-03-11 18:02:23	0.06	2011-03-11 18:13:23	0.183
2011-03-11 18:03:23	0.072	2011-03-11 18:14:23	0.19

圖 7.64 展示海嘯水位歷線表

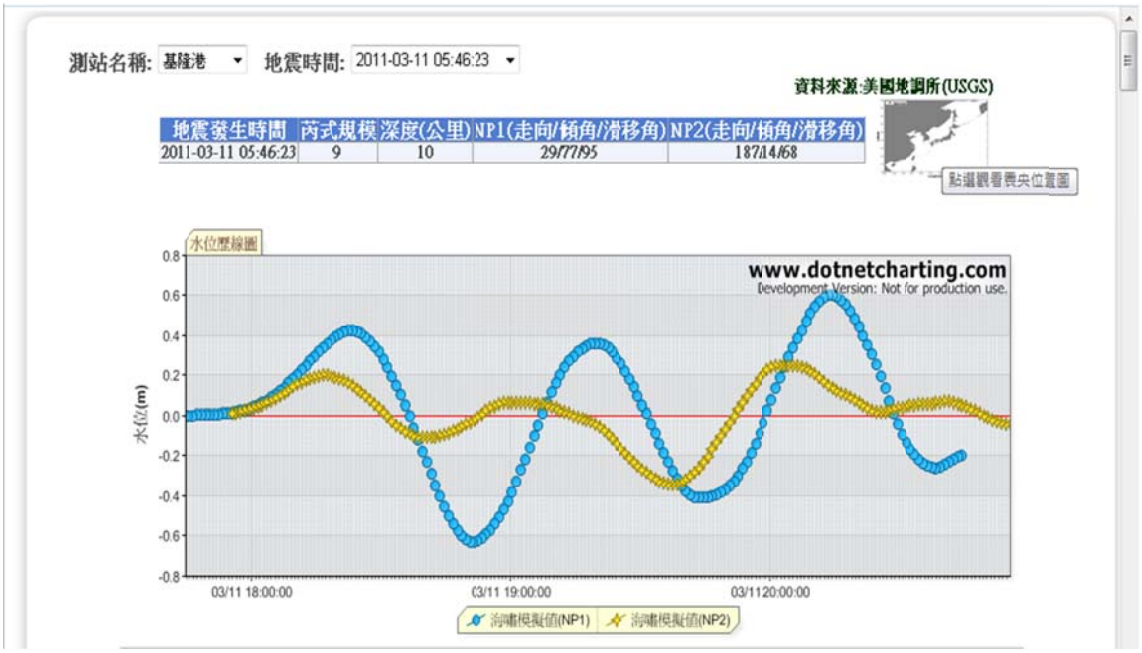


圖 7.65 展示基隆港海嘯水位變化歷線圖

7.4 系統備援機制建立

本計畫最主要工作項目之一就是維持每日定時各數值預報各子系統正常運作，提供數值資料包括 72 小時風場、波場、潮位及流等數值模擬結果。今年度卻因硬體發生故障造成波場模擬中斷，故為使系統更為穩定，在今年度初步建立以異機備援構想方式提供本系統內資訊硬體設備故障即時使用。

本系統在 97 年逐步移轉於中心管控後，整體而言就以硬體區分方式將各主要模擬程式規劃成分工計算以節省部分時間並可確保整體系統資料不至於同時發生損毀情形，在中心伺服器內原規劃共區分為網頁、資料、風場、波場、水動力共五台中低階伺服器計算。主要功能說明如下

(1)網頁伺服器：主要功能提供網頁展示平台。

(2)資料伺服器：主要功能為讀取本中心各港口觀測資料。

(3)風場伺服器：主要功能為讀取氣象局的風場資料，解碼內插風場資料(昨日、今日、明日)，彙整本所相關觀測資料，做為本系統資料溝通平台且提供波場伺服器及水動力伺服器相關計算所需風場資料及時間參數。

(4)水動力伺服器：主要功能為計算三日的水動力模擬(昨日、今日、明日)，其中包含了大尺度流場、中尺度流場及早期發展港域流場的即時模擬。

(5)波場伺服器:主要功能為提供三日的波場模擬(昨日、今日、明日)，其中包含了大尺度風浪模擬、中尺度風浪模擬、及早期發展小尺度和港域波場的即時模擬。

(6)資料儲存備份伺服器：主要功能為備份各模組程式及輸出結果。

各臺伺服器為確保資料安全，且由於經費及實際工作考量僅於硬碟部分採用硬碟陣列 RAID level 5 方式 （RAID，Redundant Array of Independent Disks），此方式可將多個硬碟組合起來，成為一個大的硬碟陣列組，其效能達到甚至超過一個價格昂貴、容量巨大的硬碟，並確保當伺服器內硬碟若有一顆損壞時，並不影響整體系統資料，且可持續運作，另加入資料儲存備份伺服器來保全資料完整性。原先硬體及資料流程相關說明如圖 7.66 所示，其中資料介接部分可參考上節說明：

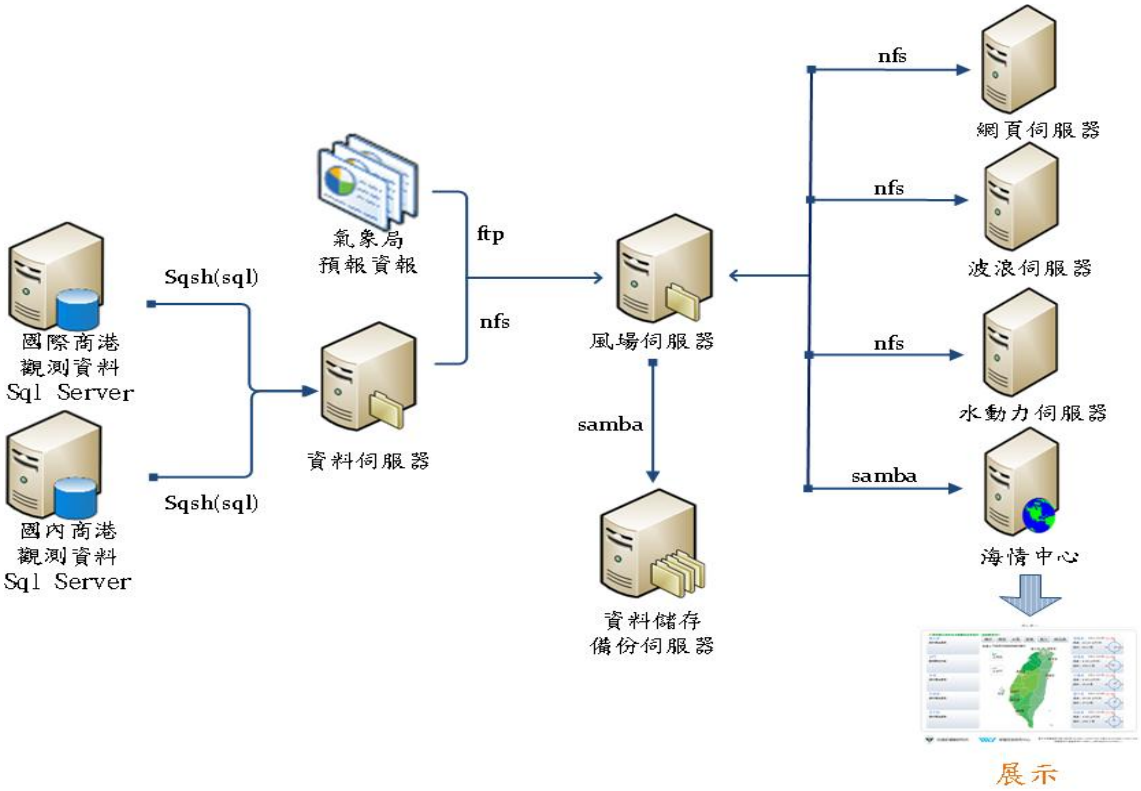


圖 7.66 系統原硬體及資料流程說明圖

而本年度波場伺服器於 100 年 8 月 20 日伺服器發生無預警停止運作，雖然於下一個上班日透過資訊人員積極查明造成運作停止原因為主機板損壞，並於後續幾日追蹤確認該伺服器內部資料並無損毀情形，但由於該型號伺服器已過保固所以主機板取得不易、加上磁碟陣列(raid 5)資料需要透過介面卡及原本硬體才能完整存取資料，並且在他台伺服器重新建置所有波場模擬作業流程不易。造成本系統波場計算

將近一個月的時間停擺，先於其他伺服器主機建置波場模組，而待主機板重新更換後並重新建置才完成波場追算。

有鑒於此次教訓，為避免日後發生同樣不可預期之硬體災難導致系統內重要資料遭受破壞、損毀及遺失，並確保模擬資料的提供，因此待於波場伺服器重新建置完成及添購新型海象模擬伺服器後，始進行備援機制的建立及對各伺服器的計算功能進行調整，並於 11 月 3 日建置完成，主要為建置備援伺服器同時可替換風場、波浪及水動力伺服器，如此整體海象模擬系統與異機備援系統都處於正常運作狀態，平時可進行相互資料備份及確認資料正確性與否，而當原系統發生硬體故障時，並可迅速將資訊系統切換至異機端，接替目前系統正常運作，確保海象模擬業務的持續性，如圖 7.67 所示。

另本計畫內今年度新增小尺度流場計算及海嘯計算系統部分建置於微軟作業系統，亦採取相似觀念同時建置兩套模式於各伺服主機內，平時已主要系統為主，可作為相互備援並防止伺服主機損毀造成作業中斷。如圖 7.68 所示，調整後的伺服器主要功能說明如表 7-13 所示。

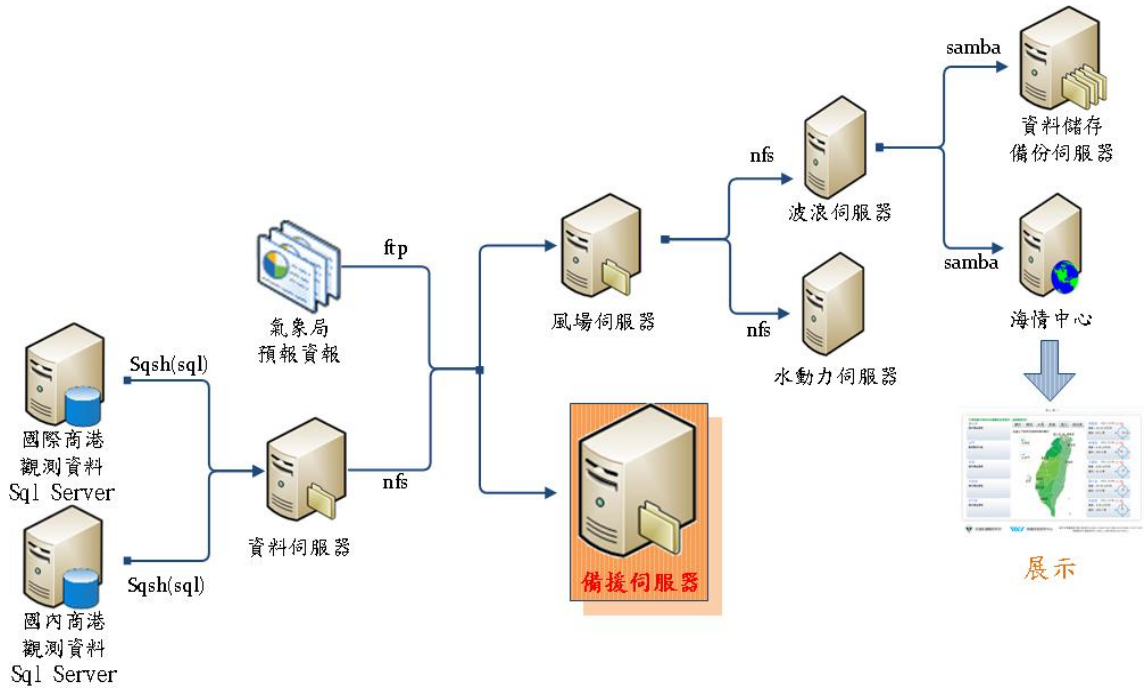


圖 7.67 系統新硬體及資料流程說明圖

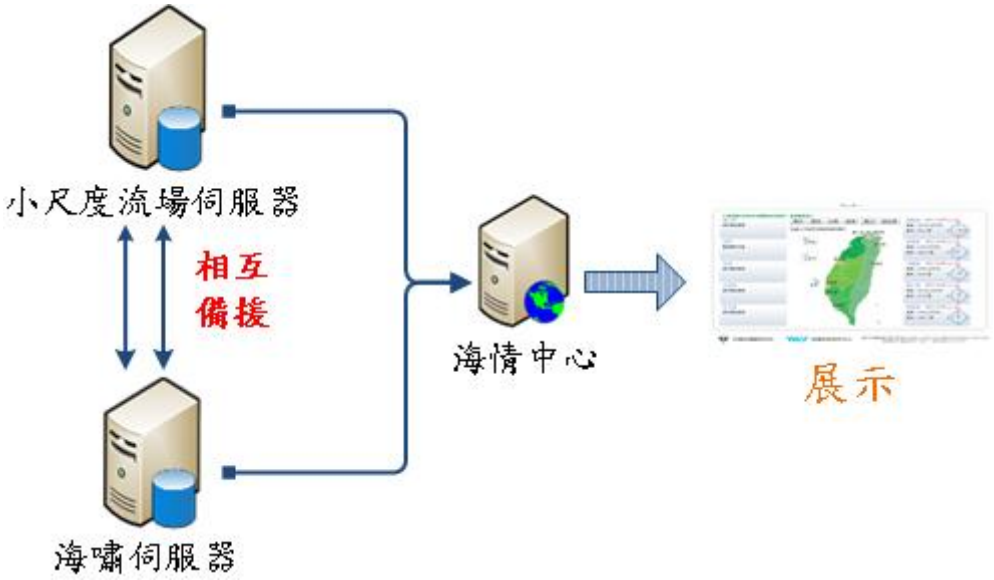


圖 7.68 小尺度流場及海嘯系統硬體及資料備援流程說明圖

表 7-13 本中心海象模擬伺服器主要功能說明

伺服器	主要功能
風場伺服器	抓取氣象局風場資料並進行資料解碼內插(昨日、今日、明日)。 彙整本所相關觀測資料。 提供波場伺服器及水動力伺服器相關計算所需之風場資料。
資料伺服器	抓取各港口觀測資料。
水動力伺服器	大尺度流場、中尺度流場
波場伺服器	1. 資料平台 2. 三日模擬：大尺度波場、中尺度波場、小尺度波場
備援伺服器	每日同步進行風場、波場及水動力模擬。
小尺度水動力伺服器	小尺度流場(作為海嘯伺服器備援)
海嘯伺服器	海嘯模擬計算(作為小尺度水動力伺服器備援)
資料儲存備份伺服器	主要功能為備份各模組程式及輸出結果

7.5 小結

本計畫維護系統工作包括大尺度(西太平洋模式)與中尺度(臺灣海域全域模式)風浪模式及水動力之作業化預報、並建置小尺度之近岸波浪及水動力海象波浪數值模擬系統建置，得到以下結論：

1.本年度除整體作業化作業化維護及局部調整增加位置(如澎湖、布袋港等) 外，並持續提供有關風、波、潮、流等資料至港灣環境資訊系統展示，建立作業系統異機備援機改善目前若發生硬體故障無法維持運作問題。

2.作業化預報模擬本計畫已完成小尺度基隆港及臺北港波浪模式建置以及小尺度基隆港及臺北港水動力模式建立。

3.細尺度波浪模組以基隆港為範例，透過資料庫概念以及 MATLAB 的介面設計模組發展建立港區波浪展示系統。

4.今年度已完成海嘯模式作業化建置並提供給港灣環境資訊系統整合，當海底地震發生引起海嘯將可提供主要港區海嘯最大波抵達時間及水位歷線。

第八章 結論與建議

本計畫包含不同子計畫。整合本所多年來已累積對海象模擬研究經驗，並完成持續建置相關海象模擬(波浪、水動力、海嘯)等系統作業化，與配合本所港灣環境資訊網建置計畫，提供海象模擬資訊，隨時提供各相關單位參考，提昇港埠營運效能，同時對於各種突發狀況，快速研擬緊急因應對策。

8.1 結論

1. 本計畫在近海海象預報模擬系統的預報時間已能夠在完整取得中央氣象局提供風場及氣壓場預報後 5 小時之內完成大尺度及中尺度預報及已建置基隆港及臺北港小尺度模式。包括風場(氣壓)、波浪、水位及流場等數值模式建置及自動化預報系統作業。

2. 風場方面：計畫內不執行風場的預報模擬，平時及颱風期間主要引用中央氣象局 NFS 海上風場模式配合風浪及水動力模式需求內插後所產生的全域預報風場及氣壓場，並長期進行各港區風場(氣壓)預報模式作業化成果評估。

3. 波浪模式方面：維護評估已建置大尺度風浪模式(WAM)、中尺度風浪模式(SWAN)等，針對本計畫大尺度西太平洋風浪模式模擬結果進行檢討，並提出作業化程式修正版本，經測試初步已達到提升模式模擬結果精確性之目的。擴大本計畫中尺度臺灣海域風浪模式模擬範圍至包含離島金門、馬祖等海域，並完成相關模式作業化流程之修正。完成建置基隆港及臺北港小尺度波浪模式(REFDIF)作業化，並長期進行各港區波浪預報模式作業化成果評估。

4. 水位及海流模式方面：維護評估已建置大尺度及中尺度的全域環島作業化水動力模式，完成建置基隆港及臺北港小尺度水動力模式作業化並長期進行各港區水位及海流預報模式作業化成果評估。利

用所分析 2010 年潮位站資料作為基隆港和臺北港潮流模式邊界條件，進行 2011 年水位和潮流預測，結果並與觀測資料比較評估。由基隆港模擬結果顯示,潮流最大流速發生時間與模式最大流速發生時間約有 2~3 小時之相位提前，大潮期間尤其顯著。

5. 海嘯模式方面：本所以前期發展海嘯速算系統在日本 311 海嘯期間提供災防中心(NCDR)海嘯在臺灣各大港口的水位變化，得到相當好的即時預報成果,本年度計畫精進基隆港域及台北港域海嘯數值模式之格林函數,達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。完成建置海嘯預警作業系統,提供地震發生後各主要港區受海嘯波影響時間及可能之水位變化。完成海嘯模擬預警即時地震資料擷取系統，並增加日本防災科學技術研究所(NIED)所提供之 F-net 即時地震資料庫，以供與 USGS 與 CWB 資料庫結果比較。

6. 配合本中心港灣環境資訊系統需求，協助建立海象模擬預報網頁，平時提供各港區(基隆港、蘇澳港、花蓮港、高雄港、安平港、布袋港、臺中港、布袋港、澎湖)，包含風場、波浪、水位及流場等本系統可提供海象資訊,以供各港務局港口船舶交通航運安全及各相關單位參考使用。

7.臺中港與麥寮港防波堤鄰近海域的地形侵於狀態，隨著防波堤長度延伸、海潮流作用與上游河川砂源補注而有明顯的變化。臺中港與麥寮港海域流況明顯大於台灣其他港域 (波浪並無此現象)，反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，可能是潮流所致。

8.2 建議

1. 傳統海嘯模式模擬時間受網格解析度、海嘯源位置、模擬時間等因素影響，需要相當長之計算時間；本系統應用格林函數之可逆性值，加速海嘯模擬之時間，以提供災防之參考依據，爭取海嘯侵襲時的警報時間。

2. 南瑪都颱風期間中尺度風浪模擬並未反應出蘇澳港、花蓮港、

高雄港有長週期波浪，後續須評估對於目前中尺度模式否能有效推算出遠方風場所造成湧浪。

參考文獻

1. 李兆芳、劉正琪、邱永芳、蘇青和等， 2011， "提升海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心， 研究報告，MOTC-IOT- 100- H3DB005a。

2. 李兆芳、劉正琪、邱永芳、蘇青和等， 2011， "近岸海象數值模擬及預警系統之建立 –水動力部分(4/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，MOTC-IOT- 99- H3DB001b。

3. 李兆芳、劉正琪、邱永芳、蘇青和等， 2010， "近岸海象數值模擬及預警系統之建立 –水動力部分(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，MOTC-IOT- 98- H3DB001b。

4. 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，1-22 頁。

5. 何良勝、蘇青和等，2011，"台灣主要港口海域長期性海象觀測及資料特性應用研究(2/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-99-H2DA001。

6. 何良勝、蘇青和等，2010，"台灣主要港口海域長期性海象觀測及資料特性應用研究(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-98-H2DA001。

7. 林廷燦、曾惠君、簡仲璟等，2011， "港灣環境資訊服務系統整合及建置(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告， MOTC-IOT- 99- H3DB003。

8. 林廷燦、曾惠君、簡仲璟等，2010， "港灣環境資訊服務系統整合及建置(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告， MOTC-IOT- 96- H3DB003。

9. 林炤圭、劉正琪、邱永芳、蘇青和等， 2011， "近岸海象數值模擬及預警系統之建立 –波浪部分(4/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心， 研究報告，MOTC-IOT- 99- H3DB001a。

10. 林炤圭、劉正琪、邱永芳、蘇青和等， 2010， "近岸海象數值模擬及預警系統之建立 --波浪部分(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心， 研究報告，MOTC-IOT- 98- H3DB001a。

11. 邱永芳、劉正琪、蘇青和等， 2011， "提升海岸及港灣海域水位與海流模擬技

術之研究(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心， 研究報告，MOTC-IOT- 100- H3DB005b。

12. 邱永芳、蘇青和、李俊穎等，2011，"臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化之研究(4/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-99-H3DA005。

13. 邱永芳、蘇青和等，2010，"臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化之研究(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-98-H3DA003。

14. 邱永芳、蘇青和等，2009，"臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化之研究(2/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-97-H3DA003。

15. 邱永芳、蘇青和等，2008，"臺灣近岸防救災預警系統技術與作業化之研究(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，基本研究報告，MOTC-IOT-96-H3DA003。

16. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和等，2011， "提升海岸及港灣海嘯模擬技術與淹水潛勢分析(1/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，MOTC-IOT- 100- H3DB005c。

17. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和等，2011， "臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(4/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告， MOTC-IOT-99- H3DB002。

18. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和等，2010， "臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告， MOTC-IOT-96- H3DB002。

19. 劉俊志、陳冠宇，2008，“以格林函數快速預報高雄港外海嘯高度”中華民國第 30 屆海洋工程研討會。

20. 劉俊志、陳冠宇，2008，“以逆向格林函數快速預報高雄港外海嘯高度”天氣分析與預報研討會，中央氣象局。

21. 廖建明、歐善惠、許泰文、方介群、臧效義，2002，應用 SWAN 模式模擬臺灣附近颱風波浪之特性，臺中，第二十四屆海洋工程研討會論文集，第 469-476 頁。

22. 歐善惠、許泰文、臧效義、方介群、廖建明，1999，「應用 SWAN 波浪模式推算臺灣附近海域颱風波浪之研究」，第二十一屆海洋工程研討會論文集，87頁–95 頁。

23. 歐善惠、許泰文、臧效義、廖建明、方介群，2000，「應用 SWAN 模式於臺灣西部海岸之波浪預測」，第二屆國際海洋大氣會議論文集，台北，183 頁–188頁。

24. 簡仲璟、劉清松、林廷燦、劉益琪、林珂如等，2011， "港灣環境資訊服務系統整合及建置(3/4)"，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，研究報告，MOTC-IOT- 100- H3DB003a。

25. 蘇青和、吳基、廖慶堂、徐如娟，2003，「台北港港口區域潮汐及海流特性研究」，第二十五屆海洋工程研討會論文集，23 頁-30 頁。

26. 成大水工試驗所 (2002a)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析」，第二部份數值模擬第二冊工業區開發期間海岸地形變化數值模擬，國立成功大學水工試驗所研究報告第 287 號 (2002b)。

27. 成大水工試驗所 (2002b)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析」，第一部份第一冊波浪調查，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 287 號*，經濟部工業局主辦。

28. 許泰文、黃清哲、藍元志、蔡金晏、曾以帆、謝志敏、林俊遠 (2003)，「防波堤堤前沖刷問題數值模擬研究」，財團法人中華顧問工程司主辦，中華民國 92 年 12 月。

29. 蔡立宏、徐如娟 (2011)，「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究(2/4)」，交通部運輸研究所主辦，中華民國 100 年 1 月。

30. Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M., “Energy loss and set-up due to breaking of random waves,” *Proc. 16th Int. Conf. Coastal engineering, ASCE*, 569-587 (1978).

31. Booji, N., 1981, Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Department of Civil Engineering, Delft University of Technique, Delft, The Netherlands, Report No. 81-1.

32. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., “The “SWAN” wave model for shallow water,” *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng*., Orlando, 668-676 (1996).

33. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Haagsma, IJ. G., "Comparing the secondgeneration HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model," *5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, Melbourne, Florida, 215-222 (1998).

34. Dingemans, M. W., *Water wave propagation over uneven bottoms. Part 1 –linear wave propagation*, Advanced Series on Ocean Engineering, 13, World Scientific, 471p (1997).

35. Fredsøe, J., and Sumer, B.M., 1997. Scour at the round head of a rubble-mound breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 29, pp. 231-262.

36. Hasselmann, S., C. Brüning and P. Lionell, 1994, Towards a generalized optimal interpolation method for the assimilation of ERS-1 SAR retrieved wave spectra in a wave model, *Proc. 2nd ERS-1 Symp.*, ESA SP-361, 21-25.

37. Hasselmann, S., P. Lionello and K. Hasselmann, 1997, An Optimal Interpolation Scheme for the Assimilation of Spectral Wave Data, *J. Geophys. Res.*, 102, 15823-15836.

38. Holthuijsen, L. H., Booij, N., Ris, R., Andorka Gal, J. H. and de Jong, J. C. M., "A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast," *Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, *WAVES '97, ASCE*, 49-63 (1997).

39. Gokce, T., Sumer, B.M., and Fredsøe J., 1994, Scour around the head of a vertical wall breakwater, *Proc. International Conference on Hydro-Technical Engineering for Portand Harbor Construction*, Hydro-Port' 94, Yokosuka, Japan, V ol. 2, pp. 1097-1116.

40. Kirby, J. T. and Dalrymple R. A., 1983, The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents, *Proc. 20th Congress I.A.H.R.*, Moscow.

41. Kirby, J. T., 1986, Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91, No. C1, pp. 933-952.

42. Komen, G.J., 1985, Introduction to Wave Models and Assimilation of Satellite Data in Wave Models, In: The Use of Satellite Data in Climate Models, *Proc. Alpbach Conference*, *ESA Pub.*, *ESA SP*, 244, 21-26.

43. Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M. Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P. A. E. M., *Dynamics and modeling of Ocean Waves*. Cambridge Univ. Press, Cambridge UK (1994).

44. Lee, T.L., and D.S. Jeng, 2002. Application of artificial neural networks in tide

forecasting, *Ocean Engineering*, Vol. 29, pp. 1003-1022.

45. Loomis, H.G. (1979), "Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions," Mar. Geod., 2(1), pp.27-39.

46. Mei, C. C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wiley, New York (1989).

47. Miles, J. W., "On the generation of surface waves by shear flows," *J. Fluid Mech.*, 3, 185-204 (1957).

48. Radder, A. C., "On the parablic equation method for water-wave propagation," *J. Fluid. Mech*., Vol. 95, 159-176 (1979).

49. Sumer, B.M., and Fredsøe, J., 1997, Scour at the head of a vertical-wall breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 29, pp. 201-230.

50. Sumer, B.M., and Fredsøe, J., 2000, Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 40, pp. 59-87.

51. Sumer, B.M., Richard J.S. Whitehouse, and Alf Tørum, 2001, Review Scour around coastal structures: a summary of recent research, *Coastal Engineering*, Vol. 44, Issue 2, December 2001, pp. 153-190.

52. WAMDI group, "The WAM model − a third generation ocean wave prediction model," *J. Phys. Oceanogr*., 18, 1775-1810 (1988).

53. Whitham, G. B., *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 636 p (1974).

54. X. Wang and Liu, P. L.-F.(2007): Cornell Multigrid Coupled Tsunami model (COMCOT) User Manual, Cornell University.

55. Xu, Z.(2007), "The All-source Green's Function and its Applications to Tsunami," Science of Tsunami Hazards, 26(1), pp.59-69.