

104-49-7823

MOTC-IOT-103-H2DB004

港灣構造物與波流互制研究(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 104 年 5 月

104-49-7823

MOTC-IOT-103-H2DB004

港灣構造物與波流互制研究(2/4)

著 者：蔡立宏、曾相茂、黃茂信

交通部運輸研究所

中華民國 104 年 5 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港灣構造物與波流互制研究. (2/4) / 蔡立宏, 曾相
茂, 黃茂信著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所,
民 104.05
面 ; 公分
ISBN 978-986-04-4699-9(平裝)

1.海岸工程 2.防波堤

443.3

104006212

港灣構造物與波流互制研究(2/4)

著 者：蔡立宏、曾相茂、黃茂信
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 104 年 5 月
印 刷 者：群彩印刷科技股份有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 70 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：150 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書坊松江門市：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：1010400501

ISBN：978-986-04-4699-9 (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。

港灣構造物與波流互制研究
(2/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1010400501

定價 150 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣構造物與波流互制研究(2/4)			
國際標準書號 ISBN978-986-04-4699-9 (平裝)	政府出版品統一編號 1010400501	運輸研究所出版品編號 104-49-7823	計畫編號 103-H2DB004
本所主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 研究人員：曾相茂、黃茂信 光碟製作：單誠基、馬維倫 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26560661			研究期間 自 103 年 01 月 至 103 年 12 月
關鍵詞：港灣結構物；防波堤；水理機制；異常波浪			
摘要： 港灣開發常需建造各式港灣結構物如碼頭、防波堤以及各項消波防沙設施等，以保護船隻人員安全，其中防波堤常需以較長結構物深入海中，以達到遮蔽波浪的效果。這些大型的近岸結構物與波流交互作用，其水理機制甚為複雜，常在附近發生嚴重刷深甚至有可能威脅堤體安全。近年來全球接連發生極端的氣候事件，臺灣未來可能面臨更嚴峻的海氣象條件的侵襲，為確保結構物在未來極端的海氣象條件下，能夠安全穩定，有必要對結構物與波流互制作用，作進一步的分析研究。本計畫目的為探討波浪及海流與港灣結構物互制之作用，並探討異常波浪與海流對於結構物穩定性之影響。 本計畫為 4 年期之第 2 年，以臺中港為目標港區，在夏季以雷達、船載海流儀、浮標追蹤、定點波流儀等設備，同時在北防波堤附近進行現場觀測與分析，觀測項目包括波場、流場、風、潮位以及地形等。分析結果顯示北防波堤附近海流縱水深各層之流速及方向存在差異，表層海流受風趨動影響，而底層海流有一股向北恆流，海流並受北防波堤影響而改變方向，所造成漩渦可能為堤頭刷深的主要動力。本研究所建置的波流數值模式，提供後續探討異常波浪對結構物影響之工具。本研究成果可提供各港務相關單位如港務公司、航港局對於港灣長結構物附近的水理機制以及造成地形沖刷更加瞭解，亦可作為未來改善港灣結構物以及沖刷問題之參考。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
104 年 5 月	154	150 元	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Interactions of waves and currents with structures (2/4)			
ISBN 978-986-04-4699-9 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010400501	IOT SERIAL NUMBER 104-49-7823	PROJECT NUMBER 103-H2DB004
DIVISION: Harbor and Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-hung PROJECT STAFF: Tseng Hsiang-mao, Huang Mao-hsin PHONE: +886-4-26587177 FAX: +886-4-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2014 TO December 2014
KEY WORDS: port structure, breakwater, , water behavior, extreme waves			
ABSTRACT: Most parts of the structures in a port must be built under the water, and will inevitably affect the behaviors of the waves and currents. A breakwater needs to be built long enough to keep waves from entering the port and keep the waters in the port's basin stable. In the process, however, the port's structures also make the local waves and currents behavior incredibly complicated. Many studies reveal that the frequency of occurrence and intensity of extreme events triggered by global climate change have increased. Taiwan can't avoid the impact of climate change in the future. The purpose of this project is to investigate the effects and interactions between the structures and the waves and currents, and the effects of the extreme weather condition on the stability of the harbor structures. Site surveys, statistical analysis, and numerical models are respectively carried out in this project. The topics including the present research are as follows: 1. reviewing related literature and documents, 2. analyzing and gathering statistics on the marine meteorology, 3. site surveys of winds, waves, currents, and tides of the nearby port structures, 4. studying the interaction mechanisms of waves and currents with structures. The results showing the differences of current speeds and directions in different depths and locations near northern breakwater are exist. The currents affected by the northern breakwater is the reason of seabed scour near the end of the breakwater. The numerical model was setup and verified with experimental data to discuss the wave field and interaction force on port structures. This study will increase our understanding of water behavior near port structures, as well as establish the inspecting procedure and evaluation standard. The results can be provided the government institutions and private sectors, including the Ministry of Transportation and Communications, Port authorities, consultant incorporations et al., with the references to evaluate the changes of water behavior by the structures and to design port structures for protecting the port.			
DATE OF PUBLICATION May 2015	NUMBER OF PAGES 154	PRICE 150	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

港灣構造物與波流互制研究 (2/4)

目 錄

摘 要	I
目 錄	III
表目錄	VI
圖目錄	VII
照片目錄	XIV
第一章 緒論	1-1
1.1 前言	1-1
1.2 研究動機及目的	1-2
1.3 研究項目與方法	1-2
1.4 本研究組織	1-3
第二章 資料蒐集與分析	2-1
2.1 港區概況	2-1
2.2 海象資料分析	2-2
2.2.1 風	2-3
2.2.2 海流	2-5
2.2.3 波浪	2-7
2.2.4 潮位	2-10
2.4 颱風資料	2-12
第三章 海氣象現場調查與分析	3-1

3.1 長期觀測系統	3-1
3.2 短期觀測系統	3-2
3.3 風速與風向分析	3-8
3.4 潮位分析	3-10
3.5 底碇觀測波流分析	3-11
3.6 雷達觀測波流分析	3-17
3.7 浮標觀測表面流分析	3-22
3.8 船碇觀測流場分析	3-26
3.8.1 表層海流分析	3-27
3.8.2 底層海流分析	3-33
3.9 堤頭外深坑分析	3-40
第四章 數值模式	4-1
4.1 NearCom 模式	4-2
4.1.1 SHORECIRC 模式	4-3
4.1.2 SWAN 模式	4-7
4.1.3 模式之率定驗證	4-8
4.2 COBARS 模式	4-14
4.2.1 控制方程式	4-14
4.2.2 $k-\varepsilon$ 紊流閉合模式	4-16
4.2.3 波場與結構作用計算模式	4-19
4.2.4 模式驗證	4-21
第五章 波流場模擬分析	5-1
5.1 平面波流場特性分析	5-1

5.1.1 流場模擬與現場資料比較	5-1
5.1.2 颱風條件之波流場模擬	5-4
5.2 結構物與波流作用分析	5-7
5.2.1 結構物安定性分析	5-7
5.2.2 結構物受力分析	5-13
5.2.3 受力安定性探討	5-27
第六章 結論與建議	6-1
6.1 結論	6-2
6.2 建議	6-3
6.3 成果效益及後續應用情形	6-4
參考文獻	參-1

表 目 錄

表 2-1	臺中港附近海氣象蒐集相關資訊表	2-2
表 2-2	臺中港 2001 年至 2013 年風統計表	2-3
表 2-3	臺中港 2003 年至 2013 年海流統計表	2-5
表 2-4	臺中港 2003 年至 2013 年示性波高、週期及波向資料 統計表	2-8
表 2-5	臺中港 1999-2013 年潮位資料統計表	2-11
表 2-6	1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表	2-13
表 2-6(續 1)	1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表	2-14
表 2-6(續 2)	1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表	2-15
表 2-7	1998 年至 2014 年期間颱風路徑分類統計表	2-16
表 3-1	浮標追蹤施放時間表	3-5
表 3-2	船碇海流觀測時間表	3-8
表 3-3	浮標軌跡不同時間平均流速表	3-22
表 4-1	大區域海潮流模式之格網及計算條件	4-10
表 4-2	一般性波浪條件計算點設置表	4-23
表 4-3	颱風波浪條件計算點設置表	4-23
表 4-4	波浪條件之數值相關參數設定表	4-24
表 5-1	計算模擬之波浪條件	5-4
表 5-2	天文潮最高高潮位之計算結果	5-12
表 5-3	天文潮最低低潮位之計算結果	5-12
表 5-4	數值相關參數設定表	5-14
表 5-5	安定因數數值計算與公式計算結果比較表	5-30

圖 目 錄

圖 2.1	臺中港附近海氣象觀測站位置圖	2-2
圖 2.2	臺中港 2001 年至 2013 年風速及風向之月統計圖	2-4
圖 2.3	臺中港 2001 年至 2013 年風速及風向之月統計比較圖	2-4
圖 2.4	臺中港 2003 年至 2013 年海流平均流速及最大流速之月統計比較圖	2-6
圖 2.5	臺中港 2003 年至 2013 年海流流速、流向及最大流速之月統計分佈圖	2-6
圖 2.6	臺中港 2003 年至 2013 年平均示性波高、平均週期及最大示性波高之月統計比較圖	2-9
圖 2.7	臺中港 2003 年至 2013 年平均示性波高、平均週期及波向之月統計分佈圖	2-9
圖 2.8	臺中港 2002 年至 2013 年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計圖	2-10
圖 2.9	颱風路徑分類圖	2-16
圖 3.1	臺中港長期海氣象觀測站示意圖	3-1
圖 3.2	各項觀測的範圍示意圖	3-3
圖 3.3	雷達回波影像示意圖	3-4
圖 3.4	垂直剖面流速觀測測線規劃圖	3-6
圖 3.5	垂直剖面流速觀測調查示意圖	3-7
圖 3.6	船碇 ADCP 實際航行軌跡圖	3-7
圖 3.7	風速變化圖	3-9
圖 3.7	風向變化圖	3-9
圖 3.9	風玫瑰圖(6/19 00:00~6/21 23:00)	3-9

圖 3.10	風玫瑰圖(6/20 08:00~6/21 08:00).....	3-9
圖 3.11	潮位變化圖(以天文潮最低低潮位為基準).....	3-10
圖 3.12	潮位變化圖(以平均潮位為基準).....	3-10
圖 3.13	波高逐時變化圖	3-11
圖 3.14	週期逐時變化圖	3-11
圖 3.15	波向逐時變化圖	3-12
圖 3.16	波浪玫瑰圖	3-12
圖 3.17	表面海流流速逐時分佈圖	3-13
圖 3.18	表面海流流向逐時分佈圖	3-13
圖 3.19	平均海流玫瑰圖（水面下約 2~8 公尺）	3-14
圖 3.20	上層水深海流玫瑰圖（水面下約 2~4 公尺）	3-14
圖 3.21	中層水深海流玫瑰圖（水面下約 12~14 公尺）	3-14
圖 3.22	底層水深海流玫瑰圖（水面下約 20~22 公尺）	3-14
圖 3.23a	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖.....	3-15
圖 3.23b	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-16
圖 3.23c	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖.....	3-16
圖 3.23d	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-17
圖 3.24a	雷達觀測不同潮時流場分佈圖(2014/06/20 12:00~ 2014/06/21 00:00).....	3-18
圖 3.24b	雷達觀測不同潮時流場分佈圖(2014/06/21 02:00~ 2014/06/21 14:00).....	3-19
圖 3.25a	雷達觀測不同潮時波場分佈圖(2014/06/20 12:00~ 2014/06/21 00:00).....	3-20

圖 3.25b	雷達觀測不同潮時波場分佈圖(2014/06/21 02:00～ 2014/06/21 14:00).....	3-21
圖 3.26a	漲潮時段浮標 F1～F3 測次漂流軌跡圖	3-23
圖 3.26b	漲潮時段浮標 F1～F3 測次漂流流矢圖	3-24
圖 3.27a	退潮時段浮標 E1～E3 測次漂流軌跡圖	3-25
圖 3.27b	退潮時段浮標 E1～E3 測次漂流流矢圖	3-26
圖 3.28	船碇與底碇觀測表層海流比較圖	3-27
圖 3.29a	S1 測次之表層海流流速分佈圖	3-29
圖 3.29b	S2 測次之表層海流流速分佈圖	3-29
圖 3.29c	S3 測次之表層海流流速分佈圖	3-30
圖 3.29d	S4 測次之表層海流流速分佈圖	3-30
圖 3.29e	S5 測次之表層海流流速分佈圖	3-31
圖 3.29f	S6 測次之表層海流流速分佈圖	3-31
圖 3.29g	S7 測次之表層海流流速分佈圖	3-32
圖 3.29h	S8 測次之表層海流流速分佈圖	3-32
圖 3.30	表層海流流速分佈圖	3-33
圖 3.31	船碇與底碇觀測底層海流比較圖	3-34
圖 3.32a	S1 測次之底層海流流速分佈圖	3-35
圖 3.32b	S2 測次之底層海流流速分佈圖	3-36
圖 3.32c	S3 測次之底層海流流速分佈圖	3-36
圖 3.32d	S4 測次之底層海流流速分佈圖	3-37
圖 3.32e	S5 測次之底層海流流速分佈圖	3-37
圖 3.32f	S6 測次之底層海流流速分佈圖	3-38
圖 3.32g	S7 測次之底層海流流速分佈圖	3-38

圖 3.32h	S8 測次之底層海流流速分佈圖	3-39
圖 3.33	底層海流流速分佈圖	3-39
圖 3.34	臺中港北防波堤附近海域等深線圖 (2014/06/21)	3-40
圖 3.35	回波強度校正前後對比圖	3-43
圖 3.36a	漲潮時段底部 1m 水層平均回波強度分佈圖	3-44
圖 3.36b	退潮時段底部 1m 水層平均回波強度分佈圖	3-44
圖 4.1	模式建置流程圖	4-1
圖 4.2	模擬區域示意圖	4-9
圖 4.3	海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖	4-9
圖 4.4	臺中港海象測站示意圖	4-10
圖 4.5	NearCom 模式參數率定圖	4-11
圖 4.6	臺中港內實測潮位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-12
圖 4.7	臺中港北防波堤外(AWCP)實測水位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-12
圖 4.8	烏溪外海實測沿岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-12
圖 4.9	烏溪外海實測離岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-12
圖 4.10	臺中港北防波堤(AWCP)實測沿岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-13
圖 4.11	臺中港北防波堤(AWCP)實測離岸海流與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)	4-13
圖 4.12	波高計設置圖	4-22
圖 4.13	波壓計設置圖	4-22

圖 4.14	結構物設置圖	4-22
圖 4.15	一般條件自由液面與流速分布圖	4-25
圖 4.16	一般條件水位資料驗證結果	4-26
圖 4.17	一般條件直立壁壁面波壓計算結果	4-27
圖 4.18	一般條件直立壁底部波壓計算結果	4-27
圖 4.19	颱風條件自由液面與流速分布圖	4-29
圖 4.20	颱風條件水位資料計算結果	4-30
圖 4.21	颱風條件直立壁壁面波壓驗證結果	4-31
圖 4.22	颱風條件直立壁底部波壓驗證結果	4-31
圖 5.1	臺中港附近海域潮流場模擬 (2014/6/20 17:00:00 起)	5-2
圖 5.2	臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場 (滿潮，2014/6/20 17:00:00)	5-2
圖 5.3	臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場 (退平潮，2014/6/20 20:00:00)	5-3
圖 5.4	臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場 (乾潮，2014/6/20 23:00:00)	5-3
圖 5.5	臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場 (漲平潮，2014/6/21 02:00:00)	5-3
圖 5.6	臺中港附近海域波流場模擬 (左：網格 50m；右：網格 100m) $H=7.2\text{m}$ ， $T=11.3\text{s}$ ， N (2011/5/20 17:00:00)	5-5
圖 5.7	臺中港附近海域波流場模擬 (2011/5/20 17:00:00 起) (颱風 風波浪： $H=7.2\text{m}$ ， $T=11.3\text{s}$ ， N)	5-6
圖 5.8	臺中港附近海域波流場模擬 (2014/6/20 17:00:00 起) (颱風 波浪： $H=5.7\text{m}$ ， $T=10.0\text{s}$ ， W)	5-6
圖 5.9	臺中港附近海域波流場模擬 (2014/6/20 17:00:00 起) (颱風 風波浪： $H=4.7\text{m}$ ， $T=9.1\text{s}$ ， SW)	5-7

圖 5.10 合田公式示意圖	5-11
圖 5.11 設計波推算流程圖	5-11
圖 5.12 波高計設置圖	5-14
圖 5.13 自由液面與流速分布連續圖	5-17
圖 5.14 自由液面與流速分布連續圖(續).....	5-18
圖 5.15 水位時序資料圖	5-19
圖 5.16 水位資料 g0 波高分析圖	5-20
圖 5.17 水位資料 g0 週期分析圖	5-20
圖 5.18 波浪作用力時序資料圖	5-20
圖 5.19 直立壁受波浪作用力的力矩時序資料圖	5-21
圖 5.20 自由液面與流速分布連續圖	5-23
圖 5.21 自由液面與流速分布連續圖	5-24
圖 5.22 水位時序資料圖	5-25
圖 5.23 水位資料 g0 波高分析圖	5-26
圖 5.24 水位資料 g0 週期分析圖	5-26
圖 5.25 波浪作用力時序資料圖	5-26
圖 5.26 直立壁受波浪作用力的力矩時序資料圖	5-27
圖 5.27 天文潮最高高潮位條件滑動安定因數時序圖	5-30
圖 5.28 天文潮最低低潮位條件滑動安定因數時序圖	5-30
圖 5.29 天文潮最高高潮位條件傾倒安定因數時序圖	5-30
圖 5.30 天文潮最低低潮位條件傾倒安定因數時序圖	5-31
圖 5.31 天文潮最高高潮位條件越波率時序圖	5-31
圖 5.32 天文潮最高高潮位條件越波量累計圖	5-31

圖 5.33 天文潮最低低潮位條件越波率時序圖	5-31
圖 5.34 天文潮最低低潮位條件越波量累計圖	5-31
圖 5.35 不同波浪作用時間紊流強度等值線分布圖	5-32

照 片 目 錄

照片 3.1 自記衛星定位浮標組設備	3-5
--------------------------	-----

第一章 緒論

1.1 前言

港灣開發常需建造各式港灣構造物如碼頭、防波堤以及各種消波設施等，以利岸上作業以及保護船隻人員安全。這些結構物需建造於海中，其中防波堤常需以較長結構物深入海中，以達到遮蔽波浪的效果，由於大型結構物的佈設，改變了原有未有結構物的水理機制，因波浪和水流與近岸結構物的交互作用，再加上近岸的水深地形變化，其水理機制甚為複雜，如臺中港北防波堤及花蓮港東防波堤的建造，雖達到了遮蔽浪效果，但此人工結構物使附近波流更為複雜。臺灣四周環海，夏秋季常受颱風之威脅，颱風所引起的波浪及海流，常造成港灣結構物的損害，如：如沈箱沈陷位移內部填充材料流失、防波堤堤面破損、消波胸牆毀損等，也造成港灣附近之海灘流失、海岸護岸及海堤之損壞，進而危及陸地以及海岸公路之安全。

近年來全球接連發生極端天氣與不斷創新紀錄的氣候事件，不但發生頻率有增加的趨勢，而且極端紀錄值亦屢創新高，颱風、暴雨、洪水乾旱、極高低溫度等極端氣候事件發生似已呈常態，根據聯合國 IPCC (2007) 指出未來幾十年全球的溫室氣體排放仍會成長，故氣候變遷的效應在 21 世紀仍會持續發酵。如2013年11月侵襲菲律賓的強烈颱風海燕，造成當地嚴重的傷亡，為人類有歷史記載以來罕見的極端強烈颱風。臺灣在全球氣候變遷下亦不例外，近年來的幾次颱風，如：莫拉克（2009）、桃芝（2004）、敏督利（2001），均造成臺灣的嚴重的傷害。從許多文獻研究資料顯示，臺灣近年來的夏季極端大波事件有增加的趨勢（王韻圓，2010），許與黃(2012) 針對臺灣西北海域進行模擬研究，評估2020 年至 2039 年海平面變遷量變動範圍約在 4.02 至 11.82 公分，颱風最大波高可能增加 50.3%，颱風最大潮位(暴潮+天

文潮)可能增加38%。此外，還有地震引起的海嘯亦不容忽視，如日本311地震所引起的海嘯，造成港灣結構物的破壞，為前所未見。臺灣未來可能面臨更嚴峻的海氣象條件的侵襲，為確保結構物在未來極端的海氣象條件下，能夠安全穩定，有必要對結構物與波流互制作用以及在極端波流作用下，作進一步的分析研究。

1.2 研究動機及目的

由於港灣結構物的穩定與安全，關係到整個港灣的營運，故對於港灣結構物與近岸波流的互制作用，需加以探討釐清，以作為未來港灣改善及損害減低的參考，期使港灣營運在安全無虞下，能更上層樓，對國家經濟提升以及增加國民福祉。本研究目的為探討波浪及海流與港灣結構物互制之作用，並探討異常波浪與海流對於結構物穩定性之影響。本研究為4年期之第2年，在港灣長結構物與波流互制作用研究上，以臺中港為目標港區，進行港灣構造物附近海象現場調查分析，包括波場、流場、風、潮位以及地形等項目，探討波浪和水流與港灣結構物之互制影響作用；在極端波浪所造成結構物的影響方面，則與國內研究機構共同合作。本研究成果期能提供學術、施政、設計及施工相關單位之參酌，並能提昇國內港灣海岸之研究技術水準。

1.3 研究項目與方法

本研究分別藉由資料蒐集、現場調查、理論解析以及數值模式等方式進行分析以及探討，目標港區以臺中港為研究對象。本研究總期程為四年期之研究，各年度主要研究工作項目如下：1.海氣象相關資料收集與分析(102-105年)。2.結構物附近波浪調查(102-105年)。3.結構物附近海流現場調查(102-105年)。4.結構物附近波浪特性分析(102-103年)。5.結構物附近海流特性分析(102-104年)。6.波浪與結構物互制作用分析(103-105年)。7.海流與結構物互制作用分析(103-105年)。8.異常波浪對結構物影響分析(104-105年)。9.研擬

結構物保護方案(102年)。茲將本年度(103年)研究內容說明如下：

1. 海氣象相關資料收集與分析

收集歷年臺中港區之海氣象等資料(包括風、波、流、潮)，以不同的統計分析方法整理，探討本區域海氣象特性。

2. 結構物附近波浪調查與分析

以雷達監測方式，量測結構物附近波浪在入射近岸時的變化。

3. 結構物附近海流調查與分析

以雷達以及浮標追蹤方式，量測結構物附近表面流場分佈並分析其特性，另外以船載波流儀的方式，量測結構物附近空間的流速分佈並分析其特性。

4. 結構物附近波浪特性分析

建立及驗證波場模式並分析與探討波浪受到近岸地形以及結構物影響之變形以及特性。

5. 結構物附近海流特性分析

建立及驗證流場模式並分析與探討海流受到近岸地形以及結構物影響之變化特性。

1.4 本研究組織

本研究共分為六章，第一章為緒論，說明本研究研究背景、動機、目的及方法；第二章為海氣象資料蒐集與分析，包括歷年海象以及氣象條件；第三章為現場調查與分析，說明相關儀器設備以及調查方法，分析結構物附近波流調查結果並探討其特性；第四章為波流數值模式的建置與驗證，第五章為波流場模擬結果的分析與探討；第六章為結論與建議，並說明成果效益及後續應用情形。

第二章 資料蒐集與分析

本研究探討波流與結構物互制作用，臺中港為人工港，為達到遮蔽波浪的目的，因此於民國 83 年以及民國 92 年再延長北防波堤 1,330 公尺長，總長達到 2,818 公尺，近年又為防止北淤沙區漂沙流入航道及港區，在北防波堤北側興建 450 公尺的突堤，以及延長北防沙堤 300 公尺，這些結構物的建造，均伸入水中，雖達到了遮蔽波浪以及防漂沙效果，但也因此使波流更為複雜，如北防波堤北側產生一深約 5 米直徑約 300 米的深坑，故以臺中港為探討波流與結構物互制作用之研究目標港區，收集歷年基本資料並分析，並進行現場潮波流的監測，本章針對基本資料收集以及分析敘述如下。

2.1 港區概況

臺中港位於臺中市梧棲區，為臺灣西海岸中心，距離基隆港約 110 哩，高雄港約 120 哩，港區範圍北起大甲溪南岸，南至大肚溪北岸，東以臨港路為界，西臨臺灣海峽，南北長 12.5 公里，東西寬 2.5 至 4.5 公里，總面積約 3,793 公頃，其中陸域面積佔 2,820 公頃，水域面積佔 973 公頃，包括商港、工業港及漁港三部份。

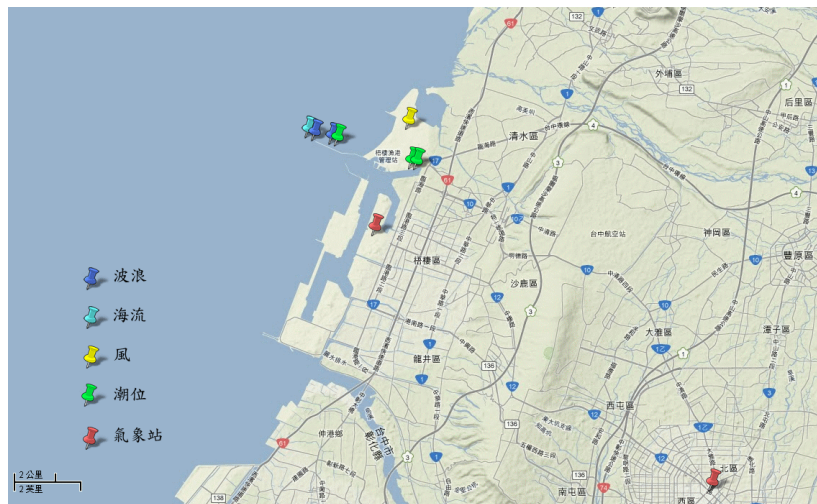
臺中港發展至今已興建之營運碼頭共 49 座，總長度 11,936 公尺，貨櫃 8 座、客運 1 座、穀類 2 座、煤炭 4 座、管道 8 座、水泥 3 座、散雜貨 21 座、LNG 1 座及廢鐵 1 座。碼頭後線儲轉區之倉棧設施有雜貨通棧 13 座，水泥筒倉 22 座，堆貨場 8 處，貨櫃場 3 處，液體貨儲槽 255 座，可提供業者良好的投資環境，棧埠裝卸及倉儲業務多開放民間投資經營，全港擁有許多自動化的裝卸倉儲設備，作業效率高。臺中港地處於臺灣南北交通的中心，有快速道路連接清泉崗國際機場，有利海空聯運；更位於上海到香港航運的中點，與大陸東南沿海各港呈輻射狀等距展開，距離最近，在未來兩岸直航具有最佳優勢。

本研究收集本所港灣技術研究中心自 1999 年至 2013 年臺中港港

區附近之海氣象觀測資料，彙整繪製分析比較分佈圖及表，詳細內容請參考表 2-1，各觀測站位置請參考圖 2-1。此外，本研究亦收集中央氣象局 1998～2013 年颱風資料探討颱風對臺中港之影響。

表 2-1 臺中港附近海氣象蒐集相關資訊表

資料類別	測站	經度 / 緯度	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
波浪	臺中港	24°17'54"N 120°29'39"E	1999/10-2000/08	本所港研中心	AWCP
波浪	臺中港	24°18'04"N 120°28'59"E	2003/08-2012/12	本所港研中心	AWCP
海流	臺中港	24°18'04"N 120°28'59"E	2003/08-2012/12	本所港研中心	AWCP
風	臺中港	24°18'18"N 120°31'52"E	2001/07-2012/12	本所港研中心	Young Brand 風速計
潮位	臺中港	24°17'16"N 120°31'57"E	1999/10-1999/10 2001/04-2012/12	本所港研中心	Water Log
潮位	臺中港	24°17'54"N 120°29'39"E	2003/08-2012/12	本所港研中心	AWCP



資料來源：本所港灣技術研究中心、Google Map

圖 2-1 臺中港附近海氣象觀測站位置圖

2.2 海象資料分析

以本所港灣技術研究中心在臺中港附近海域海象觀測站所觀測之潮位、海流、風及波浪作統計分析，說明如下。

2.2.1 風

風資料收集本所港灣技術研究中心自 2001 年 7 月至 2013 年 11 月期間在臺中港觀測所得，將逐年風速及風向之資料整理如表 2-2 所示。由表中顯示，港區附近主要風向為東至北向，約佔歷年觀測的 62.0% 為最多；其次為西至南向，約佔歷年觀測的 19.8%。風速小於 5 m/sec 以下約佔歷年觀測的 47.0%；風速介於 5-10 m/sec 之間約佔 27.8%；風速介於 10-15 m/sec 之間約佔 14.5%；風速大於 15 m/sec 以上約佔 10.7%。歷年之平均風速為 7.0 m/sec；歷年最大風速為 37.5 m/sec，其風向為北北東向。風速大於 15 m/sec 以上在 2008 年以後由 6%以下增加為 20%以上，另外，最大風速歷年均為 NNE 向，僅 2011 年及 2013 年為 NE 以及 SSW 向。

表 2-2 臺中港 2001 年至 2013 年風統計表

年份	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
		最大值 m/sec	風向									
2001	5.8	21.3	NNE	53.6	27.5	16.6	2.4	66.2	10.8	13.4	9.5	0.2
2002	5.6	26.5	NNE	59.2	26.0	8.9	5.9	59.3	12.6	18.8	9.2	0.1
2003	5.1	17.8	NNE	60.0	26.7	12.5	0.8	62.6	10.0	18.7	8.7	0.1
2004	5.2	17.9	NNE	57.7	29.6	12.3	0.4	65.2	9.4	15.8	9.6	0.0
2005	5.3	27.3	NNE	60.2	25.2	13.2	1.4	62.1	9.4	19.6	8.9	0.0
2006	5.3	18.7	NNE	57.5	28.8	12.0	1.8	64.3	9.2	19.6	6.9	0.1
2007	5.3	23.3	NNE	59.6	26.2	12.5	1.7	60.6	12.2	19.3	7.7	0.2
2008	9.1	37.5	NNE	32.2	32.9	15.3	19.7	55.8	4.6	28.9	10.7	0.0
2009	5.6	26.2	NNE	60.6	21.2	11.6	6.4	65.2	7.6	14.3	13.0	0.2
2010	9.3	30.3	NNE	28.7	30.6	20.4	20.3	62.8	6.7	22.8	7.7	0.0
2011	10.5	32.4	NE	26.8	26.3	17.4	29.5	66.1	4.9	20.7	8.2	0.0
2012	10.1	28.9	NNE	24.5	29.9	19.2	26.3	54.6	6.7	22.3	16.4	0.3
2013	9.2	29.3	SSW	30.6	30.6	16.6	22.2	60.7	7.3	23.3	8.7	0.0
統計值	7.0	37.5	NNE	47.0	27.8	14.5	10.7	62.0	8.6	19.8	9.6	0.1

圖 2-2 為歷年逐月之風速及風向之月統計圖，由圖中顯示，歷年之月平均風速介於 2.4 m/sec 至 17.7 m/sec 之間，月平均風速大於 10 m/sec 以上者皆發生在冬季，最大風速不同季節在 2010 年後有增加之趨勢，冬季可達 25 m/sec。圖 2-3 為臺中港歷年風速及風向之月統計分布圖，

由圖形顯示，夏季風速多小於 10 m/sec，風向介於南至西向所佔的比例較大；冬季風速約 10 m/sec 左右，風向介於北至東向所佔的比例較大。在 13 年的風資料中，由圖 2-3 顯示冬季在近幾年的風速似有增大的趨勢，如 2010、2011、2012 以及 2013 年。

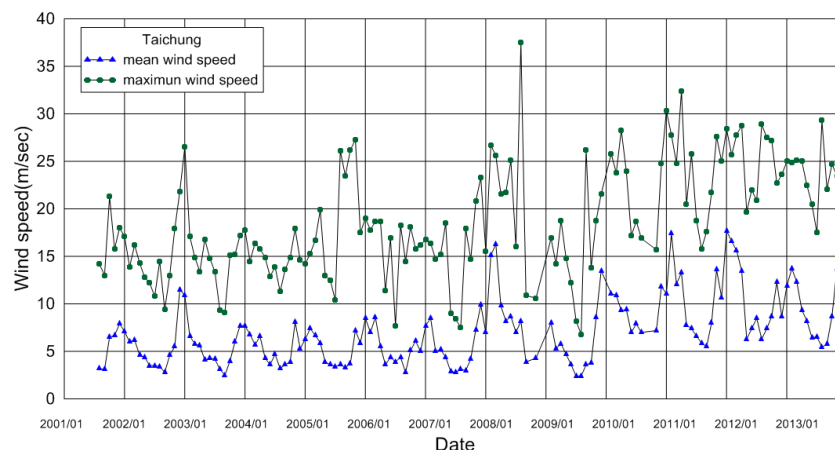


圖 2.2 臺中港 2001 年至 2013 年風速及風向之月統計圖

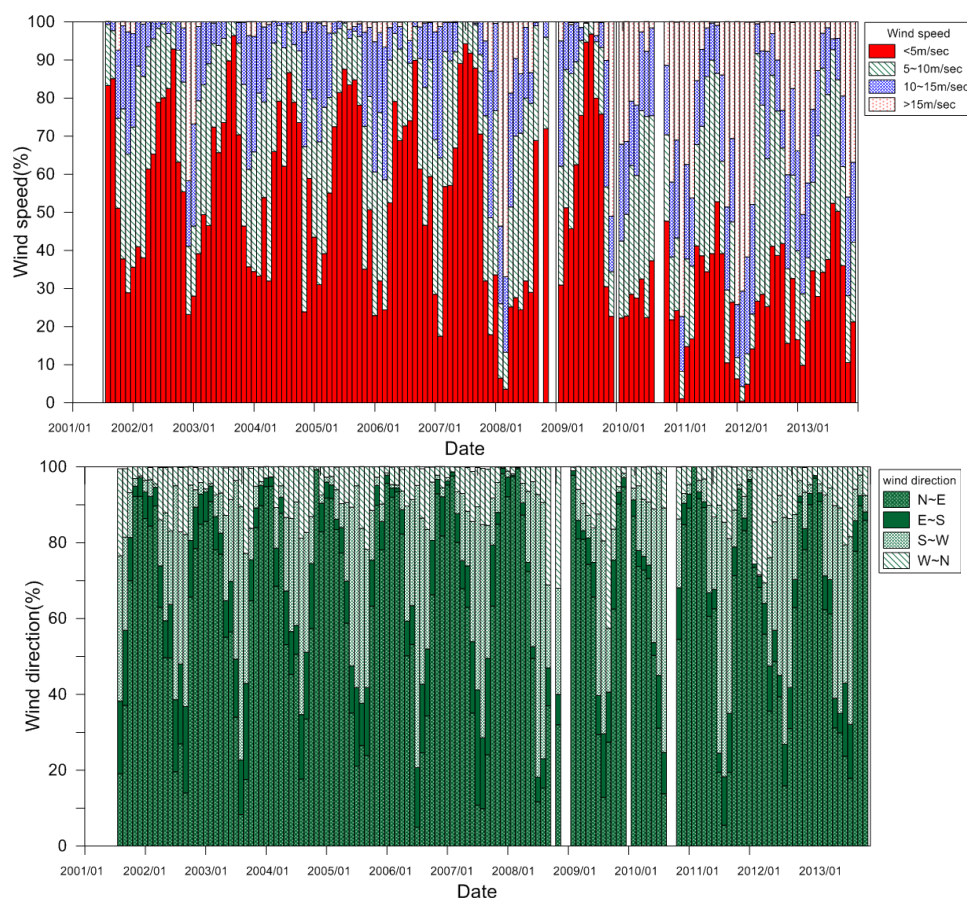


圖 2.3 臺中港 2001 年至 2013 年風速及風向之月統計比較圖

2.2.2 海流

臺中港區域位於臺灣海峽中間地區，其海流主要由沿岸流、風驅流、潮流及洋流所組成，本研究收集本所港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2013 年 11 月期間的海流觀測資料，將歷年海流之流速及流向的統計結果整理如表 2-3 所示。由表中可知，港區附近主要流向為西至北向，約佔歷年觀測的 47.6%；其次為南至西向，約佔歷年觀測的 25.1%。流速介於 25~50 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 38.2%；流速介於 50~100 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 28%；流速大於 100 cm/sec 以上者，約佔歷年觀測的 3.6%。歷年之平均流速為 41.8 cm/sec；最大流速為 248.3 cm/sec 流向為西向，發生在 2005 年。在 2009 年以前平均流速均大於 40 cm/sec，而 2010 年以後則均小於 40 cm/sec，主要原因可能為 2009 年 6 月以後底碇儀器由距離堤頭 200m 移往外海距堤頭 600m 處。

圖 2-4 為歷年逐月之流速及流向之月統計圖，圖中顯示歷年之月平均流速介於 15 cm/sec 至 80 cm/sec 之間。圖 2-5 為臺中港海流歷年逐月之流速及流向統計分布圖，由圖 2-5 顯示，流速在各組距上的比例分布互有消長，流向介於西至北向所佔的比例較大。夏季以東北向為主，而冬季以西南向為主，主要原因可能受風趨流影響所致。

表 2-3 臺中港 2003 年至 2013 年海流統計表

年份	平均流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
		流速 (cm/sec)	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
2010	39.1	168.8	WSW	27.9	45.7	24.5	1.8	36.8	1.6	25.4	36.2
2011	29.7	143.6	WSW	47.6	38.0	13.1	1.3	42.1	11.7	23.6	22.7
2012	34.5	124.6	WSW	37.3	41.9	20.0	0.8	36.1	1.0	33.4	29.5
2013	34.5	148.6	SE	39.4	41.0	18.1	1.4	22.2	4.0	34.8	39.0
統計值	41.8	248.3	W	30.2	38.2	28.0	3.6	22.0	5.2	25.1	47.6

資料來源：本所港灣技術研究中心

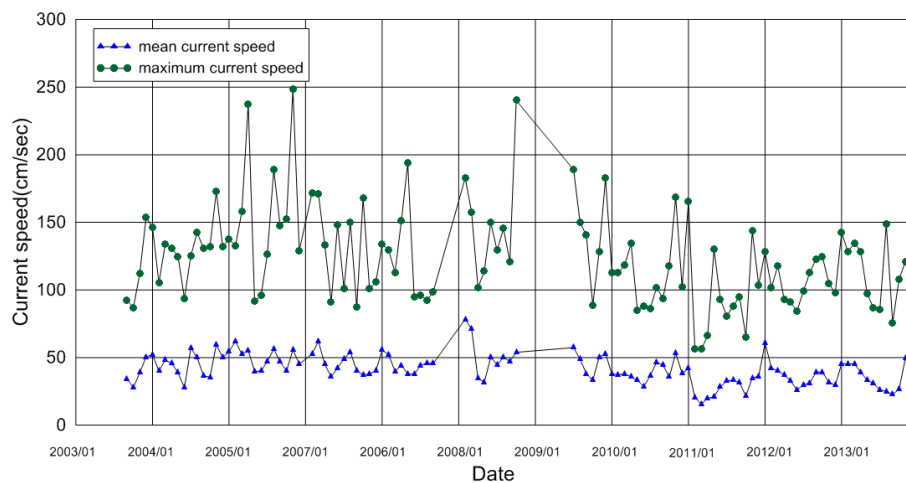


圖 2.4 臺中港 2003 年至 2013 年海流平均流速及最大流速之月統計比較圖

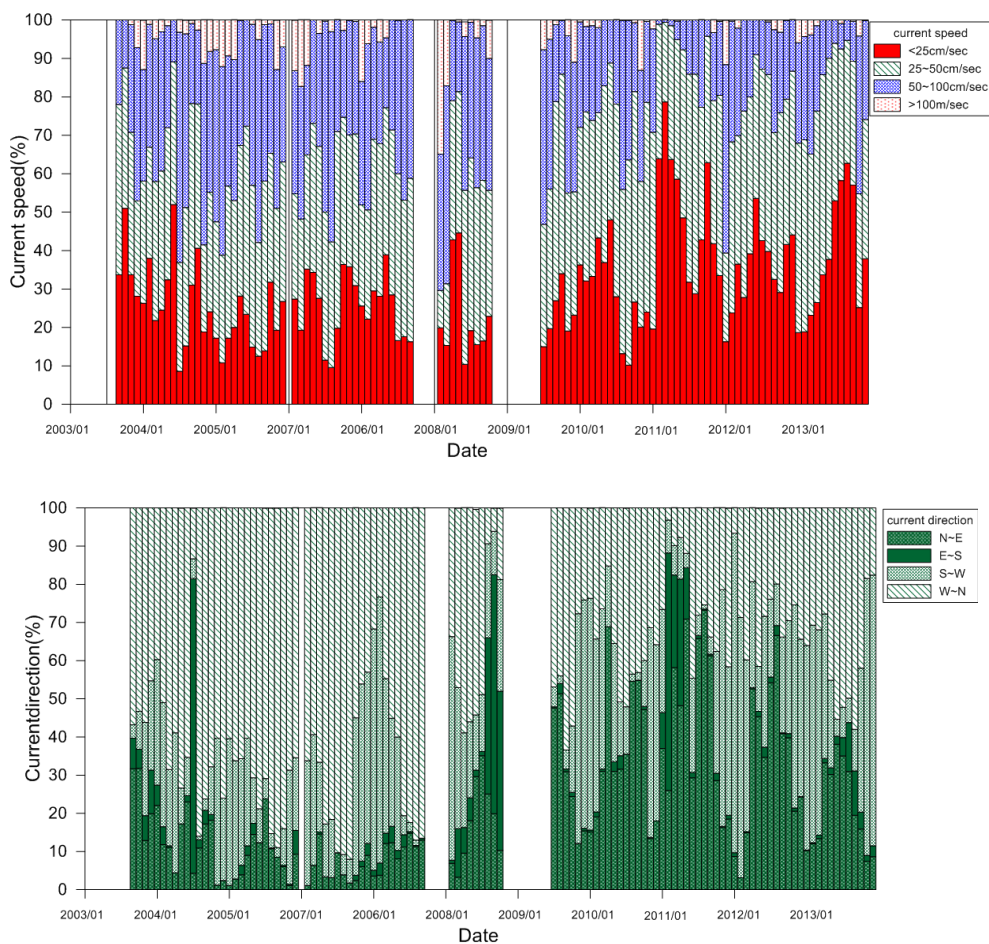


圖 2.5 臺中港 2003 年至 2013 年海流流速、流向及最大流速之月統計分佈圖

2.2.3 波浪

本研究收集本所港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2013 年 11 月期間的波浪觀測資料，歷年之波高、週期及波向整理如表 2-4 所示。表中顯示港區附近主要波向為北至東向，約佔歷年觀測的 65.8%；其次為西至北向，約佔歷年觀測的 23.0%。 $H_{1/3}$ 波高小於 0.5 m 以下者，約佔歷年觀測的 12.5%； $H_{1/3}$ 波高介於 0.5 m 至 1 m 之間者，約佔歷年觀測的 28.9%； $H_{1/3}$ 波高介於 1 m 至 5 m 之間者，約佔歷年觀測的 58.4%； $H_{1/3}$ 波高大於 5 m 以上者，約佔歷年觀測的 0.2%。 $T_{1/3}$ 週期集中在 8 秒以內，小於 6 sec 以下者，約佔歷年觀測的 39.4%；介於 6 sec 至 8 sec 之間者，約佔歷年觀測的 49.2%。近年來（2008 年以後）， $T_{1/3}$ 週期在 8 ~ 10sec 發生的比率比 2007 年以前增加，顯示長浪發生的比率在近年似有增加，但需再比對每年波浪的樣本數才能下定論。歷年之平均 $H_{1/3}$ 波高為 1.5 m；平均 $T_{1/3}$ 週期為 6.4 sec；歷年最大 $H_{1/3}$ 波高為 8.44 m，其週期為 11.1 sec，發生於 2010 年 12 月 16 日。

圖 2-6 為歷年逐月之 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 統計圖，由圖顯示歷年之月平均 $H_{1/3}$ 小於 3 m 以下，月平均 $T_{1/3}$ 除 2005 年 8 及 9 月較高（達約 12sec）外，大多介於 5 sec 至 8 sec 之間。圖 2-7 為臺中港歷年逐月之波高、週期及波向統計分布圖，由圖 2-7 顯示，在夏季波向介於西至北向所佔的比例較大；在冬季平均波向介於北至東向所佔的比例較大。

表 2-4 臺中港 2003 年至 2013 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}			H _{1/3} <0.5m (%)	H _{1/3} 0.5~1m (%)	H _{1/3} 1~5m (%)	H _{1/3} >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T _{1/3} <6sec (%)	T _{1/3} 6~8sec (%)	T _{1/3} 8~10sec (%)	T _{1/3} >10sec (%)
			最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2003	1.61	5.5	5.92	5.6	NNE	16.7	23.4	59.9	0.0	79.0	0.5	3.3	17.2	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	71.7	0.3	4.6	23.4	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	63.3	0.2	8.1	28.5	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	67.9	0.1	4.8	27.0	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	42.5	1.5	5.1	30.8	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	57.0	0.9	12.1	30.0	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	68.3	0.0	3.6	28.2	28.1	56.8	13.7	1.4
2010	1.65	6.4	8.44	11.1	5.4	1.2	28.9	69.6	0.2	72.2	0.1	7.6	20.2	36.7	49.1	13.6	0.6
2011	1.18	6.3	4.31	10.7	1.40	16.7	36.8	46.5	0.0	64.7	11.3	14.7	9.4	40.4	46.5	11.7	1.4
2012	1.35	6.6	5.5	8.9	S	13.4	29.7	57.0	0.0	74.0	7.2	5.1	13.7	28.3	55.6	14.1	2.0
2013	1.39	6.5	4.58	8.2	WNW	9.6	34.5	55.9	0.0	63.1	1.7	10.4	24.7	31.3	51.7	15.6	1.3
統計值	1.5	6.4	8.44	11.1	5.4	12.5	28.9	58.4	0.2	65.8	2.2	7.2	23.0	39.4	49.2	10.4	0.9

資料來源：本所港灣技術研究中心

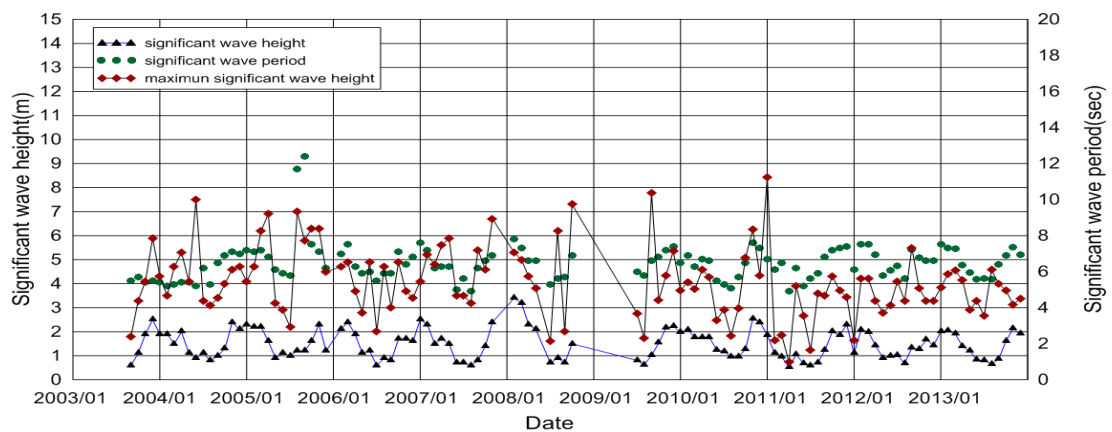


圖 2.6 臺中港 2003 年至 2013 年平均示性波高、平均週期及最大示性波高之月統計比較圖

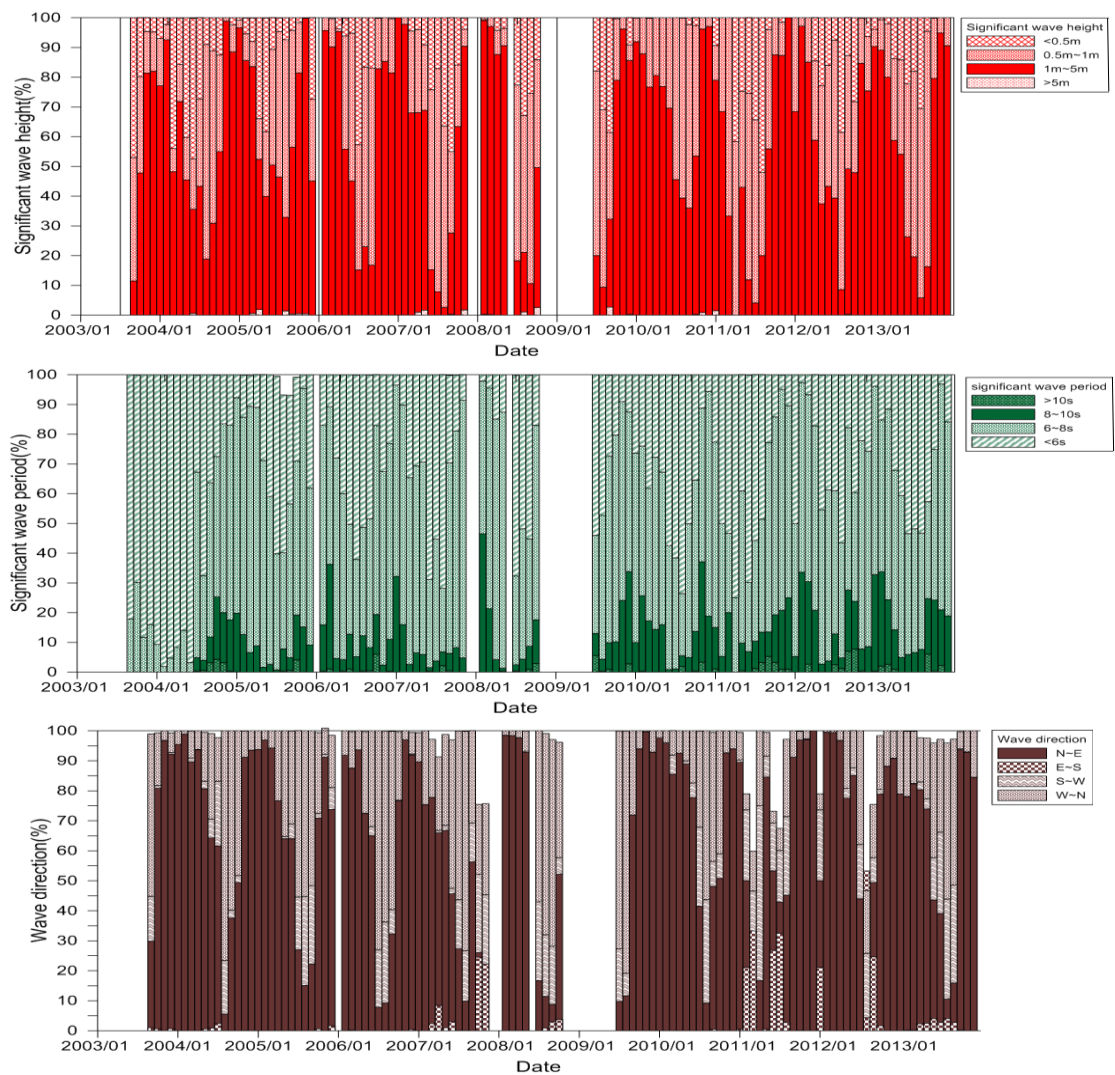


圖 2.7 臺中港 2003 年至 2013 年平均示性波高、平均週期及波向之月統計分佈圖

2.2.4 潮位

臺中港之潮汐為每日漲落 2 次之半日潮，本研究收集中央氣象局自 1999 年 1 月至 2013 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，故缺潮位觀測資料，且因參考基準面的差異，導致 2004 年以前的潮位有所差異，2002 至 2013 年 12 月之年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計比較如圖 2-8 所示。而歷年潮位資料之統計結果如表 2-6 所示，由表 2-6 之統計結果可知，自 1999 年 2013 年期間，其平均潮差為 377 公分，大潮平均潮差為 466 公分，最大潮差為 619 公分。

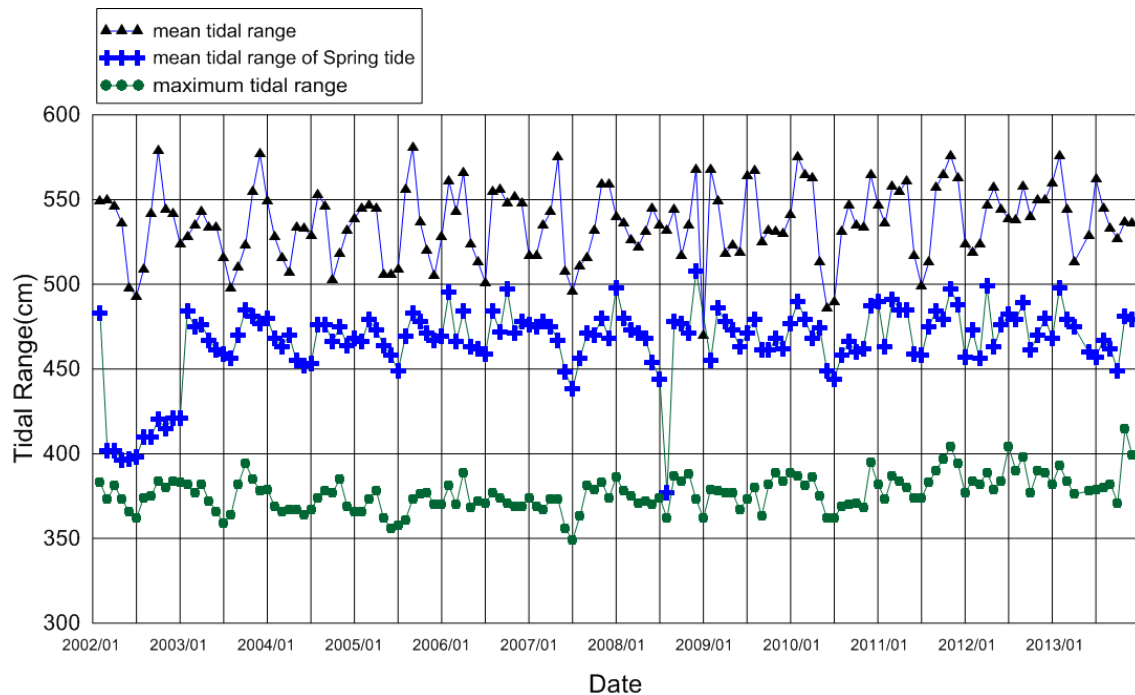


圖 2.8 臺中港 2002 年至 2013 年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計圖

表 2-5 臺中港 1999-2013 年潮位資料統計表

年份	平均 潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮 平均 高潮位 HWOSt	大潮 平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL		最低低潮位 LLWL		平均 潮差 MR	大潮 平均潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生時間	潮高	發生時間	潮高			
1999	284	475	91	—	—	3 月 20 日	557	1 月 3 日	-26	384	—	583
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2001	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	297	484	108	492	77	9 月 7 日	588	1 月 30 日	-25	376	415	613
2003	299	486	109	519	46	9 月 27 日	573	12 月 24 日	-13	377	473	586
2004	305	490	119	521	55	8 月 30 日	580	1 月 23 日	-10	371	466	590
2005	13	197	-172	232	-237	8 月 21 日	291	1 月 12 日	-305	369	469	596
2006	15	201	-172	237	-239	7 月 14 日	298	1 月 2 日	-297	373	476	595
2007	5	189	-182	223	-246	4 月 17 日	274	12 月 26 日	-302	371	469	576
2008	8	193	-181	225	-239	9 月 1 日	276	1 月 23 日	-299	374	464	575
2009	13	201	-177	232	-237	9 月 19 日	300	1 月 13 日	-319	378	469	619
2010	19	205	-171	240	-229	9 月 9 日	305	1 月 2 日	-307	376	469	612
2011	17	208	-177	241	-236	8 月 30 日	312	11 月 27 日	-295	385	477	607
2012	22	215	-172	248	-226	8 月 02 日	321	12 月 15 日	-294	387	474	615
2013	18.3	211	-174	248	-233	9 月 22 日	307	1 月 12 日	-297	385	471	604
統計值										377	466	619

潮高單位：公分

基準面：1999 年：+707.7cm 水準點標高(基隆 MSL)+621.8cm。

2002 年：+618.75cm 水準點標高(基隆 MSL)+351.25cm。

2003 年：+719.37cm 水準點標高(基隆 MSL)+351.25cm。

2004 年：基準面相對 KP：-268.12cm。

2005 年～2011 年：基準面相對 KP：0cm。

資料來源：中央氣象局。

2.4 颱風資料

臺灣位處太平洋西側，為颱風移動路徑常經過的地方，颱風通過夾帶的風以及雨常造成災害，其災害要包括風災、水災、海水倒灌、土石坍方及土石流等。當颱風在海上行進接近陸地時，近岸邊常出現較高潮位，稱為暴潮(Storm surge)。暴潮主要由強風及低氣壓所引起，由於颱風是一個向內輻合之低壓系統，中心附近風速較大，波浪也較高，且以較長的波長以及週期傳遞向岸邊，因此近岸常出現波高較大的長浪。颱風所引起的巨浪，威脅行進以及停靠之船隻，常發生船隻毀損或沉沒，在近岸則常發生海岸沙灘流失侵蝕，也容易淘空地基造成臨海公路損害或岸邊建物崩落的現象，甚至越波帶上的海水以及砂石對海岸公路用路人造成威脅。如果颱風期間適逢大潮期間，加上夾帶暴雨河川水位上漲，若河川之出海口又風向正好相反，致使河水無法順利排至大海，將導致海水倒灌，並使低窪地區淹水，摧毀農漁作物，並對生命安全造成威脅。

由過去長期的觀測統計結果顯示，臺灣海域每年平均約有 3.5 次颱風經過，近年來，隨著全球氣候變遷的影響，侵襲臺灣之颱風次數也相對增加。自 1998 年至 2014 年期間共有 101 個颱風侵襲臺灣海域，平均每年約有 5.94 次颱風侵襲臺灣海域。因此，本研究收集颱風相關資料並分析，以提供未來對港灣防災改善規劃之參考。

根據 1998 至 2014 年間中央氣象局有發佈颱風警報的颱風資訊，本研究彙整 101 個颱風資料，項目包括：颱風警報發佈期間、颱風路徑與強度、近中心最大風速以及中心最低氣壓等等相關資訊如表 2-6 所示。在所有颱風案例中，依圖 2-9 之颱風分類法將颱風路徑分為 9 類，各類颱風路徑之發生次數統計如表 2-7 所示。表中顯示，在侵臺的九類颱風路徑中，未侵臺及特殊路徑發生的次數最多，共發生 40 次佔全部發生次數的比例為 39.6%；其次為第三類路徑的颱風，佔 11.9%；第九類路徑的颱風，佔 8.9%；以第七及第八類佔最少，均為 2%；其他各類的颱風路徑之發生次數及所佔的百分比，如表 2-7 所示。

表 2-6 1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表

颱風 編號	中文 名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風 路徑 (九類)	近中心 最低氣壓 (hPa)	近中心 最大風速 (m/sec)	七級風 暴風 半徑	十級風 暴風 半徑
9801	妮蔻兒	NICHOLE	07/09~07/10	輕度	9	998	18	100	-
9802	奧托	OTTO	08/03~08/05	輕度	3	985	30	150	-
9809	楊妮	YANNI	09/27~09/29	輕度	6	975	25	100	-
9810	瑞伯	ZEB	10/13~10/17	強烈	6	920	55	350	150
9812	芭比絲	BABS	10/25~10/27	中度	9	950	35	250	100
9906	瑪姬	MAGGIE	06/04~06/06	中度	5	965	38	250	100
9911	山姆	SAM	08/19~08/21	輕度	--	970	30	200	-
9920	丹恩	DAN	10/04~10/09	中度	7	968	38	250	80
0004	啟德	KAI-TAK	07/06~07/10	中度	6	965	35	150	50
0010	碧利斯	BILIS	08/21~08/23	強烈	3	930	53	300	120
0012	巴比倫	PRAPIROON	08/27~08/30	輕度	6	965	33	250	-
0015	寶發	BOPHA	09/08~09/10	輕度	特殊路徑	990	23	180	-
0019	雅吉	YAGI	10/23~10/26	中度	--	970	33	180	50
0020	象神	XANGSANE	10/30~11/01	中度	6	960	38	250	100
0021	貝碧佳	BEBINCA	11/06~11/07	輕度	--	970	28	200	-
0101	西馬隆	CIMARON	05/11~05/13	輕度	8	990	23	150	-
0102	奇比	CHEBI	06/22~06/24	中度	7	965	35	200	80
0104	尤特	UTOR	07/03~07/05	中度	5	960	38	350	120
0105	潭美	TRAMI	07/10~07/11	輕度	4	995	20	80	-
0107	玉兔	YUTU	07/23~07/24	輕度	--	962	30	150	-
0108	桃芝	TORAJI	07/28~07/31	中度	3	962	38	250	100
0116	納莉	NARI	09/13~09/19	中度	特殊路徑	960	40	150	50
0116	納莉	NARI	09/08~09/10	中度	特殊路徑	960	40	150	50
0119	利奇馬	LEKIMA	09/23~09/28	中度	4	965	35	180	50
0121	海燕	HAIYAN	10/15~10/16	中度	--	965	35	250	100
0205	雷馬遜	RAMMASUN	07/02~07/04	中度	--	950	45	300	100
0208	娜克莉	NAKRI	07/09~07/10	輕度	9	987	18	80	-
0216	辛樂克	SINLAKU	09/04~09/08	中度	1	950	40	300	100
0302	柯吉拉	KUJIRA	04/21~04/24	中度	--	925	43	250	100
0305	南卡	NANGKA	06/01~06/03	輕度	--	990	23	100	-
0306	蘇迪勒	SOUDELOR	06/16~06/18	中度	--	960	38	200	50
0307	尹布都	IMBUDO	07/21~07/23	中度	--	935	48	300	120
0309	莫拉克	MORAKOT	08/02~08/04	輕度	4	990	23	100	-

表 2-6(續 1) 1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表

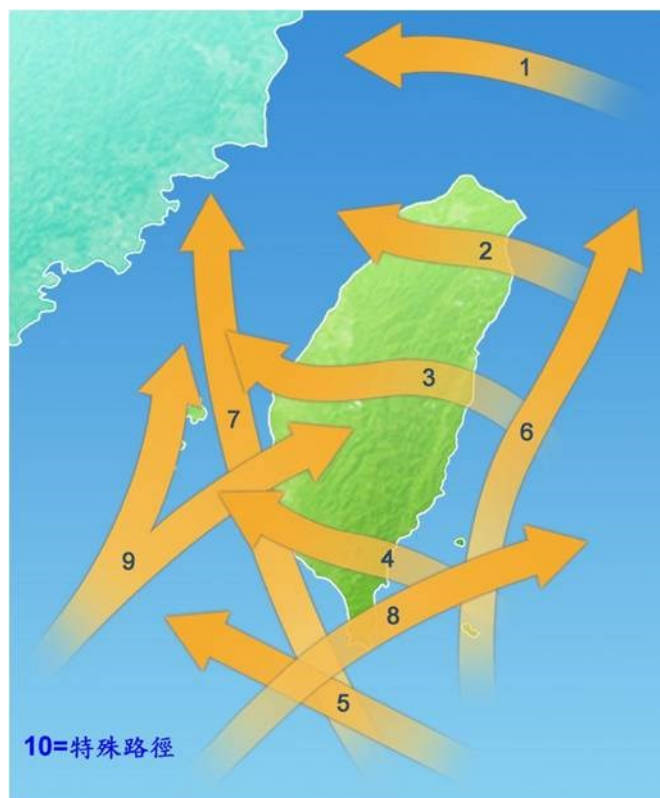
颱風 編號	中文 名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風 路徑 (九類)	近中心 最低氣壓 (hPa)	近中心 最大風速 (m/sec)	七級風 暴風 半徑	十級風 暴風 半徑
0311	梵高	VAMCO	08/19~08/20	輕度	--	998	18	100	-
0312	柯羅旺	KROVANH	08/22~08/23	中度	--	970	33	250	100
0313	杜鵑	DUJUAN	08/31~09/02	中度	5	950	43	250	100
0319	米勒	MELOR	11/02~11/03	輕度	8	975	25	150	-
0404	康森	CONSON	06/07~06/09	中度	--	970	33	150	50
0407	敏督利	MINDULLE	06/28~07/03	中度	6	942	45	250	100
0409	康柏斯	KOMPASU	07/14~07/15	輕度	--	995	20	100	-
0413	蘭寧	RANANIM	08/10~08/13	中度	--	955	40	250	100
0417	艾利	AERE	08/23~08/26	中度	1	960	38	200	50
0420	海馬	HAIMA	09/11~09/13	輕度	6	998	18	100	-
0421	米雷	MEARI	09/26~09/27	中度	--	940	40	200	80
0424	納坦	NOCK-TEN	10/23~10/26	中度	6	945	43	250	100
0427	南瑪都	NANMADOL	12/03~12/04	中度	9	940	38	250	80
0505	海棠	HAITANG	07/16~07/20	強烈	3	912	55	280	120
0509	馬莎	MATSA	08/03~08/06	中度	1	955	40	250	80
0510	珊瑚	SANVU	08/11~08/13	輕度	--	985	25	200	-
0513	泰利	TALIM	08/30~09/01	強烈	3	920	53	250	100
0515	卡努	KHANUN	09/09~09/11	中度	--	950	43	200	80
0518	丹瑞	DAMREY	09/21~09/23	中度	--	955	25	200	-
0519	龍王	LONGWANG	09/30~10/03	強烈	3	925	51	200	80
0601	珍珠	CHANCHU	05/16~05/18	中度	9	943	45	300	100
0603	艾維尼	EWINIAR	07/07~07/09	中度	--	925	43	300	80
0604	碧利斯	BILIS	07/12~07/15	輕度	2	978	25	300	-
0605	凱米	KAEMI	07/23~07/26	中度	3	960	38	200	80
0608	桑美	SAOMAI	08/09~08/10	中度	--	935	48	180	80
0609	寶發	BOPHA	08/07~08/09	輕度	4	985	23	120	-
0613	珊珊	SHANSHAN	09/14~09/16	中度	--	945	48	200	80
0706	帕布	PABUK	08/06~08/08	輕度	4	980	28	150	-
0707	梧提	WUTIP	08/08~08/09	輕度	3	992	18	100	-
0708	聖帕	SEPAT	08/16~08/19	強烈	3	920	53	250	100
0712	韋帕	WIPHA	09/17~09/19	中度	1	935	48	200	80
0715	柯羅莎	KROSA	10/04~10/07	強烈	2	925	51	300	120
0723	米塔	MITAG	11/26~11/27	中度	--	955	35	200	80

表 2-6(續 2) 1998 年至 2014 年有發佈警報之颱風基本資訊表

颱風編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風路徑(九類)	近中心最低氣壓(hPa)	近中心最大風速(m/sec)	七級風暴風半徑	十級風暴風半徑
0807	卡玫基	KALMAEGI	07/16~07/18	中度	2	970	33	120	50
0808	鳳凰	FUNG-WONG	07/26~07/29	中度	3	948	43	220	80
0812	如麗	NURI	08/19~08/21	中度	--	955	40	220	80
0813	辛樂克	SINLAKU	09/11~09/16	強烈	2	925	51	250	100
0814	哈格比	HAGUPIT	09/21~09/23	中度	--	940	45	280	100
0815	薔蜜	JANGMI	09/26~09/29	強烈	2	925	53	280	100
0903	蓮花	LINFA	06/19~06/22	輕度	9	980	28	150	-
0906	莫拉菲	MOLAVE	07/16~07/18	輕度	--	980	28	100	-
0908	莫拉克	MORAKOT	08/05~08/10	中度	3	955	40	250	100
0917	芭瑪	PARMA	10/03~10/06	中度	特殊路徑	945	43	250	80
1006	萊羅克	LIONROCK	08/31~09/02	輕度	9	990	23	100	-
1008	南修	NAMTHEUN	08/30~08/31	輕度	--	995	18	80	-
1010	莫蘭蒂	MERANTI	09/09~09/10	輕度	--	990	23	100	-
1011	凡那比	FANAPI	09/17~09/20	中度	4	940	45	200	80
1013	梅姬	MEGI	10/21~10/23	中度	9	935	48	250	100
1101	艾利	AERE	05/09~05/10	輕度	--	990	23	150	-
1102	桑達	SONGDA	05/27~05/28	強烈	--	920	55	220	100
1105	米雷	MEARI	06/23~06/25	輕度	--	982	28	200	-
1109	梅花	MUIFA	08/04~08/06	中度	--	945	43	280	-
1111	南瑪都	NANMADOL	08/27~08/31	強烈	4	920	53	180	50
1205	泰利	TALIM	06/19~06/21	輕度	9	985	25	150	-
1206	杜蘇芮	DOKSURI	06/28~06/29	輕度	5	995	23	120	-
1209	蘇拉	SAOLA	07/30~08/03	中度	2	960	38	220	80
1211	海葵	HAIKUI	08/06~08/07	中度	1	960	35	180	50
1213	啟德	KAI-TAK	08/14~08/15	輕度	5	995	20	150	-
1214	天秤	TEMBIN	08/21~08/25	中度	特殊路徑	945	45	180	50
1214	天秤	TEMBIN	08/26~08/28	中度	特殊路徑	965	35	180	50
1217	杰拉華	JELAWAT	09/27~09/28	強烈	--	910	55	250	100
1307	蘇力	SOULIK	07/11~07/13	強烈	2	925	51	280	100
1308	西馬隆	CIMARON	07/17~07/18	輕度	--	998	18	100	--
1312	潭美	TRAMI	08/20~08/22	輕度	1	970	30	180	--
1315	康芮	KONG-REY	08/27~08/29	輕度	6	985	25	120	--
1319	天兔	USAGI	09/19~09/22	強烈	5	910	55	280	120
1323	菲特	FITOW	10/04~10/07	中度	1	960	38	250	80

資料來源：中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/> (2014.10.30)

--表示該颱風未侵臺



資料來源：臺灣氣候變遷與資訊平台計畫網站，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>

圖 2-9 颱風路徑分類圖

表 2-7 1998 年至 2014 年颱風路徑分類統計表

颱風路徑分類	發生次數	發生百分比
1	7	6.9 %
2	7	6.9 %
3	12	11.9 %
4	7	6.9%
5	6	6.0 %
6	9	8.9 %
7	2	2.0 %
8	2	2.0 %
9	9	8.9 %
其他及特殊路徑	40	39.6 %
合計	101	100.0 %

資料來源：中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/>

第三章 海氣象現場調查與分析

臺中港為達到遮蔽波浪以及防止淤沙，以長北防波堤來加以避浪防沙，近岸波流受到北防波堤長結構物之影響，可能形成不同尺度之渦漩，波流的改變進而影響漂沙傳輸並造成地形的改變，更可能對港灣結構物之安全穩定造成影響。為瞭解此長防波堤結構物附近區域的波流分布特性以及與波流互制的作用，本研究改變傳統定點海流儀觀測所得到之空間資料不足的限制，於 103 年 6 月 20 日至 6 月 21 日間，在臺中港北防波堤附近海域，同時進行包含漂流浮標追蹤、船碇都卜勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)及微波雷達遙測等之點、線及面的海象觀測。此外，本所於北防波堤堤頭外 570 公尺處，設置有一定點長期波高波向與剖面海流即時監測系統(Acoustic Wave and Current Profile system, AWCP)，四號碼頭處有潮位監測以及北防波堤堤頭白燈塔頂的風速觀測，本研究將本區域在上述期間的觀測值作一分析、比較與探討。

3.1 長期觀測系統

本所在臺中港北防波堤附近設有定點長期之風波潮流觀測站，其相關位置如圖 3.1 所示。不同觀測項目儀器以及觀測方式說明如下：



圖 3.1 臺中港長期海氣象觀測站示意圖
(W1：波流儀，T1：風速儀，T0：潮位計)

1. 風速風向觀測

本所在北防波堤堤頭白燈塔頂，裝設有超音波式風速儀(GILL)，其高程約為 10 米，擷取頻率為 1Hz，取整點前十分鐘(50:01~00:00)平均當成該整點之風速風向代表值。

2. 波浪觀測

在臺中港北防波堤堤頭外 570 公尺水深約 25 公尺處，本所設置一組波高波向與剖面海流即時監測系統，所使用儀器為 AWCP。波浪取樣頻率為 1Hz，每小時取樣 2048 筆，可分別量測速度 U、V 及 W 的向量，再將所得到的資料整合分析後得到波高以及波向資料。

3. 海流觀測

以臺中港北防波堤堤頭外 570 公尺水深約 25 公尺處所設置的波高波向與剖面海流即時監測系統(AWCP)量測海流。設定垂直海面水深縱向間距 1 公尺，每小時連續量測 600 秒，再平均為每一層的海流流速以及流向，共分 23 層，每 1 小時經由海底電纜傳訊回接收站之電腦中儲存。

4. 潮位觀測

於臺中港四號碼頭前之水域設置潮位接收站，以壓力式感應器所測得的壓力訊號再轉換為水位資料，每小時觀測 6 分鐘，再平均其水位當成該小時之潮位。

3.2 短期觀測系統

為克服傳統單點式海流儀觀測所得之空間資訊不足的受限，本所於 2014 年 6 月 20 日至 6 月 21 日間於臺中港北防波堤附近海域，同時進行包含漂流浮標追蹤、船碇都卜勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)及微波雷達觀測等之點、線及面的海象觀測。各項觀測的位置範圍(如圖 3.2)、儀器設備以及觀測方法說明如下。

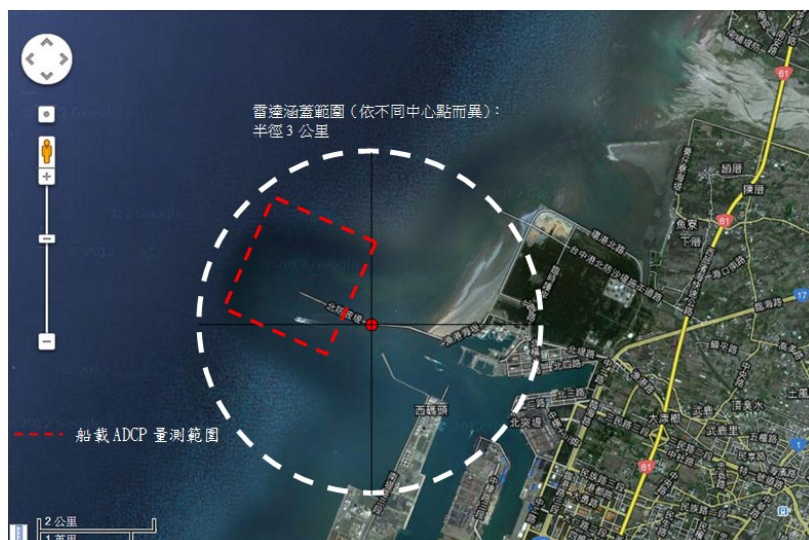


圖 3.2 各項觀測的範圍示意圖

1. 雷達平面波流場觀測

本研究以移動式 X 波段雷達觀測系統，觀測北防波堤附近之波流場。在臺中港北防波堤頭擇一適當點($E 120^{\circ}29'25.799''$, $N 24^{\circ}17'53.399''$)為雷達中心點，以雷達進行波流場觀測圓形範圍，此系統搭載 X 波段雷達，可觀測表面波以及流場，其觀測原理為海面短波(波長約為 0.016m)與雷達電磁波產生布拉格散射，而海面重力波的起伏會改變雷達波入射海面的角度，因此回波訊號中包含重力波起伏所造成的訊號強弱變化，此強弱變化的空間訊號經由雷達在時間上的連續記錄，即可獲得時空之海面回波影像，此回波影像的強度變化與重力波參數的關係，可以透過三維快速傅立葉轉換、訊噪比與調變函數獲得波高、週期與波向參數，而表面流參數可經由波浪線性波理論獲得。此外此系統搭載兩具 2.8kW 發電機與不斷電系統，可進行 24 小時不間斷觀測，而觀測所獲得之資料則儲存於網路磁碟陣列中，可確保資料儲存之安全性。

平面波流場觀測觀測範圍為 3 公里，其空間解析度為 100 公尺，且每 10 分鐘產出 1 筆平面波流場資料，雷達觀測作業期間為 2014/06/20 08:00~2014/06/21 08:00 共計 25 小時，觀測資料包含波浪(波高、週期與波向)與流場(東西向與南北向流速)，時間間隔為 10 分鐘，空間解析度為 100 公尺，雷達回波影像示意如圖 3.3。

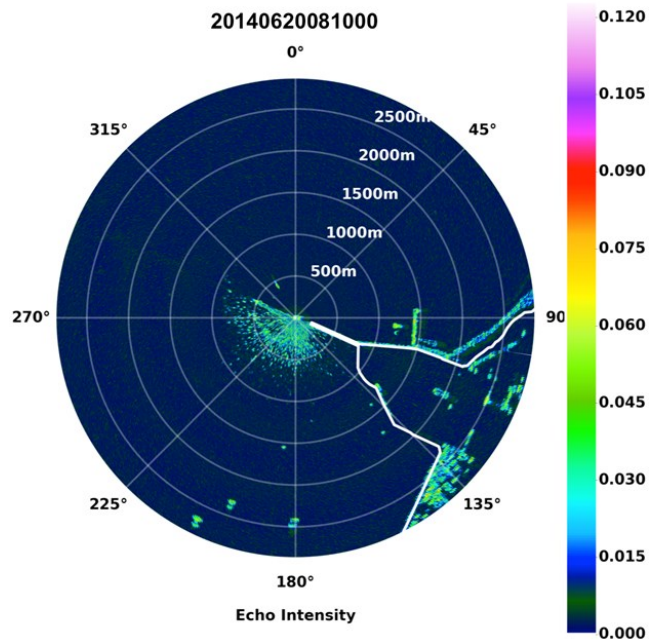


圖 3.3 雷達回波影像示意圖

2. 平面流場浮標軌跡追蹤

浮標設備為配有 GARMIN 公司製造 DAKOTA20 單頻衛星定位儀 (如照片 1-4) 所示，主要記錄平面坐標位置資料，本設備航點記錄可達 1000 點、航跡可記錄 20 條、航跡攫取頻率達每秒 1 筆、距離則可以每 10 公尺攫取記錄 1 筆資料，其定位誤差 $\pm 3 \sim 5\text{m}$ ($\pm 95\%$)、電子羅經則 ± 2 度 (± 1 度)、氣壓式高度計-2,000~30,000ft ($\pm 1\text{ft}$)，氣壓式高度計並可供最大紀錄時間 48 小時。

以 3 組浮標利用平均定位精度約 2 公尺之 GPS 定位系統安置於浮標球上(漂浮球導流板沒入深度約 0.5m~1.0m)，並依不同潮位時間，以每 2 秒觀測一筆 TWD97 坐標系統資料。觀測浮標之編號係依據漲潮時段(F)、退潮時段(E)配合測次 n 及漂浮球施放水深(由東向西)由淺而深依序編為 Fn-R、Fn-G 及 Fn-B 與 En-R 及 En-G 及 En-B，並記錄漂浮球之觀測時間、坐標資料以及運動軌跡資料。



照片 3.1 自記衛星定位浮標組設備

軌跡追蹤作業係於 2014 年 6 月 20 日進行，其中退潮時段於 08：03 開始，11：06 結束，合計觀測 3 個測次，佈置地點以臺中港北防堤至堤頭外側為主，第 1 漂次為於堤防內側時漂流過程緩慢，第 2 漂次近堤頭處漂流過程逐漸加快，第 3 漂次為於堤頭外側漂流過程明顯更快。漲潮時段於 12：07 開始，11：07 結束，合計觀測 3 個測次，佈置地點以臺中港北防波堤至堤頭外側及堤防南側 2 公里處，漂流 3 次過程中明顯快速，詳細之軌跡追蹤觀測起迄時間如表 3-1 所示。

表 3-1 浮標追蹤施放時間表

退潮時段				漲潮時段			
測次	浮標	觀測時間 (hh:mm~ hh:mm)	觀測時間 合計(min)	測次	浮標	觀測時間 (hh:mm~ hh:mm)	觀測時間 合計(min)
E1	R	08:05~08:46	41	F1	R	12:07~12:51	44
	B	08:04~08:48	44		B	12:08~12:52	44
	G	08:03~08:49	46		G	12:09~12:54	45
E2	R	09:19~10:15	46	F2	R	13:22~13:58	36
	B	09:20~10:07	47		B	13:23~13:57	34
	G	09:22~10:04	42		G	13:24~13:56	32
E3	R	10:21~11:06	45	F3	R	14:20~15:02	42
	B	10:20~11:07	47		B	14:19~15:03	53
	G	10:18~11:08	50		G	14:18~15:04	46

3. 垂直剖面流速觀測(船碇 ADCP)

垂直剖面流速觀測為測量海域垂直分層流速的情形，使用都卜勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)進行流速測量，主要探測原理是利用水中聲波傳遞的特性，藉由都卜勒原理推算出分層水流的速度。依據垂直剖面流速規劃測線(如圖 3.4)，於 24 小時期間內，反復執行觀測作業。其中，垂直剖面流速觀測設定(如圖 3.5)，在垂直剖面共 185 層，每層間距為 0.2m，水下第一層為水面下 1.8m 處，時間取樣間隔為 1.66 秒。本次船碇 ADCP 之海流流場觀測係於 2014 年 6 月 20 日~21 日期間進行，依據規劃航線共進行 8 測回，實際船隻航行資訊與軌跡分別如表 3-2 與圖 3.6 所示。

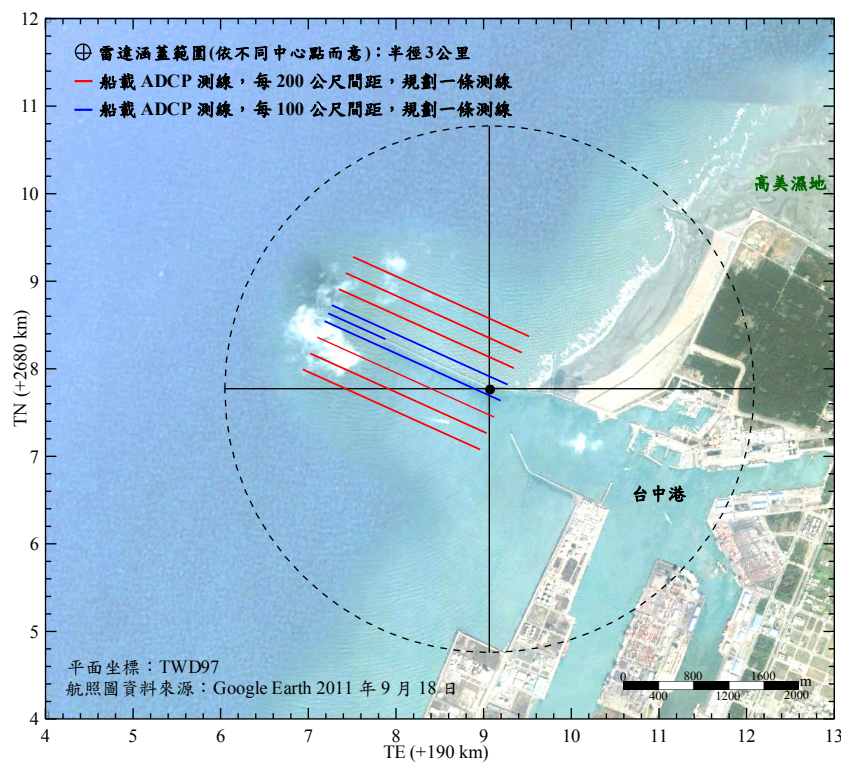


圖 3.4 垂直剖面流速觀測測線規劃圖

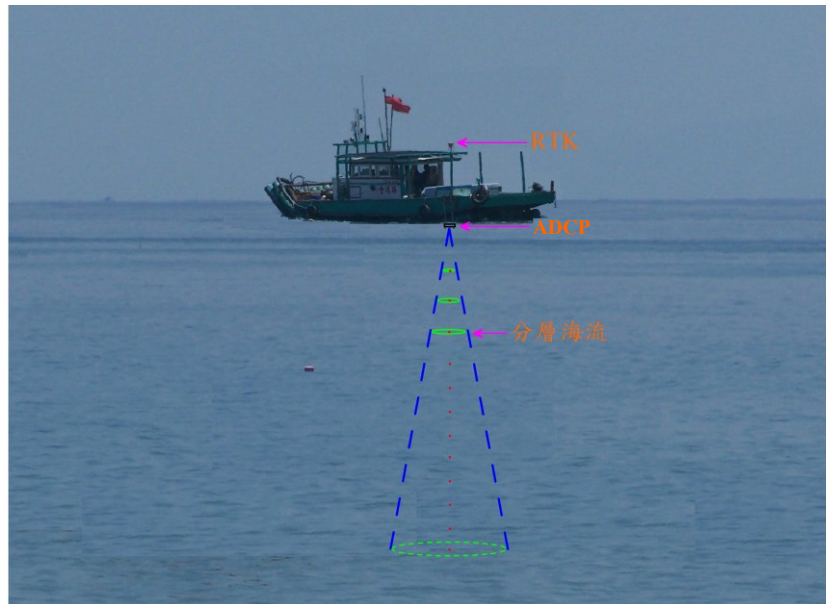


圖 3.5 垂直剖面流速觀測調查示意圖

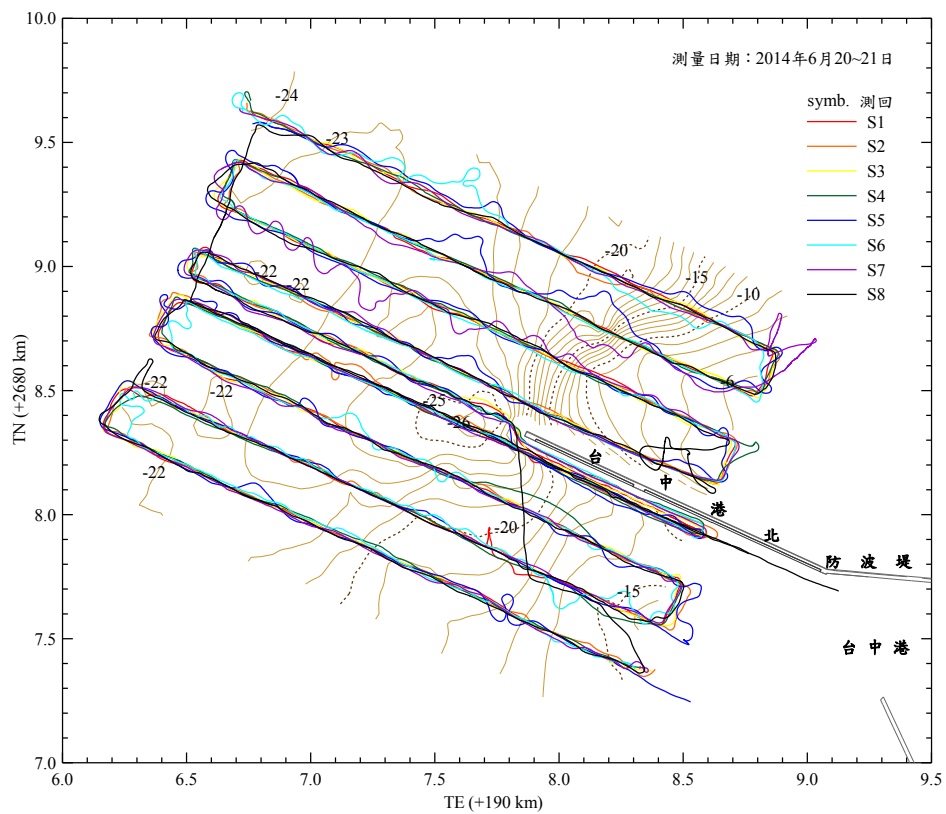


圖 3.6 船碇 ADCP 實際航行軌跡圖

表 3-2 船碇海流觀測時間表

測回	測回編號	起始時間	結束時間
第1次	S1	06/20 08:30:32	06/20 10:42:39
第2次	S2	06/20 11:11:21	06/20 13:36:29
第3次	S3	06/20 13:41:15	06/20 16:17:36
第4次	S4	06/20 16:18:44	06/20 18:41:45
第5次	S5	06/20 20:24:16	06/20 22:58:10
第6次	S6	06/20 22:59:30	06/21 01:30:11
第7次	S7	06/21 01:30:52	06/21 04:39:55
第8次	S8	06/21 05:30:25	06/21 08:41:26

3.3 風速與風向分析

本所在北防波堤堤頭白燈塔頂，裝設有超音波式風速儀，長期觀測風速，其高程約為 10 米，本研究分析在 103 年 6 月 19 日至 6 月 21 日期間觀測之風速，其變化如圖 3.7 所示而風向變化如圖 3.8 所示。圖形顯示 3 天期間，風速介於 4~14 m/s 間，在晚間約 0 時左右風速最小約 5 m/sec，而在正午期間風速較大，可達 10~14 m/sec。風向圖顯示若以 0 度為正北向，則風向大多介於 180~240 度之間，亦即為南向至西南西向間。在本次觀測期間由於風速不大，故容易受海陸風影響，白天正午時間海風由西向東，與季風相結合，風速較大，風向偏向西南(225°)，夜晚因陸風較小影響，風速偏小，風向偏向南(180°)。為與同時段之波流場作比較，故將上述風速風向資料以玫瑰圖分析以兩時段繪製顯示如圖 3.9 及圖 3.10 所示，圖 3.9 為 6/19 00:00~6/21 23:00 之 3 天的風玫瑰圖，而圖 3.10 為 6/20 08:00~6/21 08:00 之 1 天的風玫瑰圖。由圖形清楚看出風向介於南向至西南西向間，圖 3.9 顯示西南方向有較高風速比例，此為 6 月 21 中午 12:00 左右有西南西向較高風速發生。

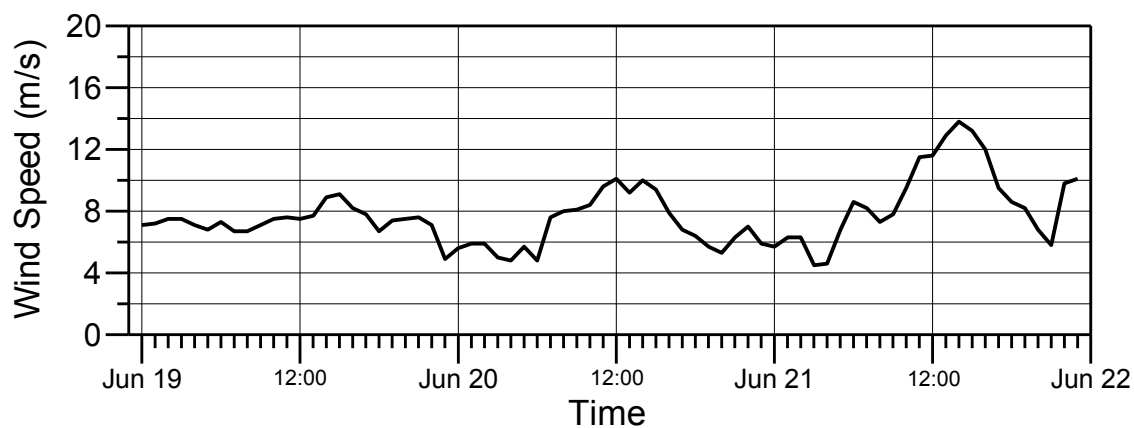


圖 3.7 風速變化圖

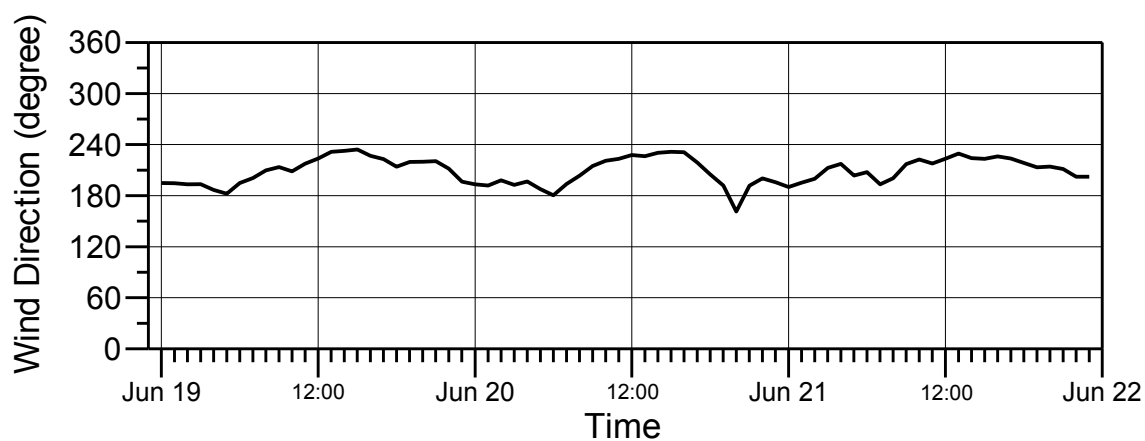


圖 3.8 風向變化圖

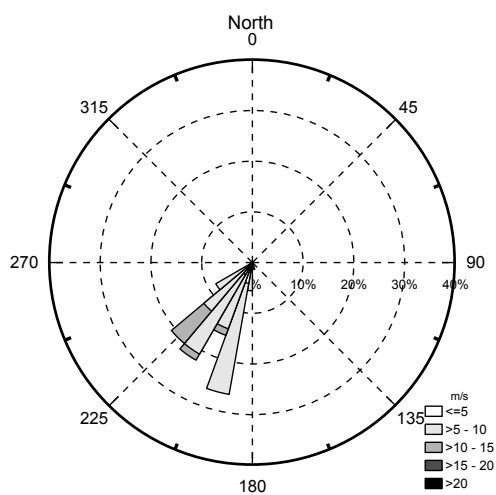


圖 3.9 風玫瑰圖
(6/19 00:00~6/21 23:00)

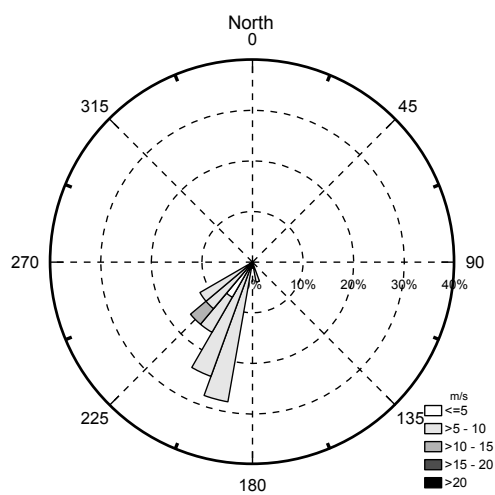


圖 3.10 風玫瑰圖
(6/20 08:00~6/21 08:00)

3.4 潮位分析

以本所港灣技術研究中心於臺中港四號碼頭潮位站的潮位資料，選取資料時間為 103 年 6/19 00:00~6/21 23:00 3 天，繪製逐時潮位變化如圖 3.11 及圖 3.12 所示。圖形顯示臺中港為半日潮，平均潮差為 3.80 公尺，由於本次測量時間為農曆 22 日至 24 日為下弦月時間，故潮差為小潮。

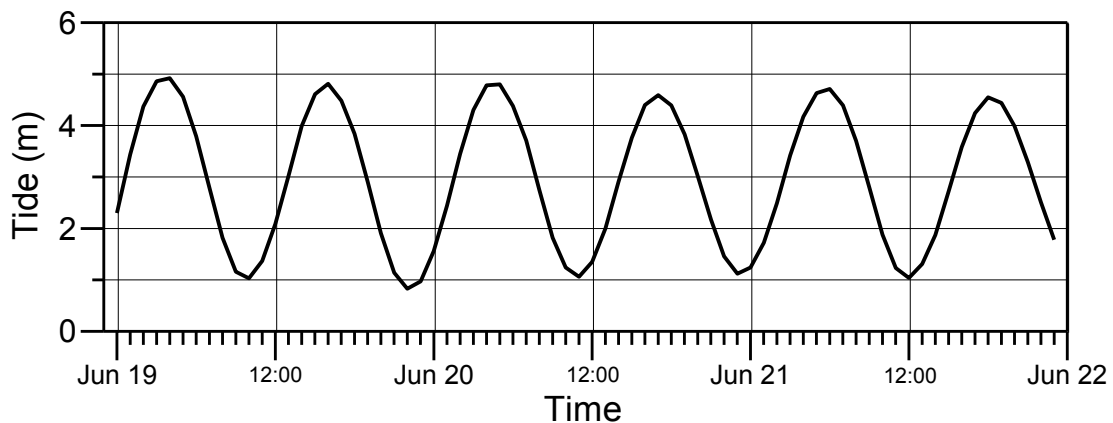


圖 3.11 潮位變化圖(以天文潮最低低潮位為基準)

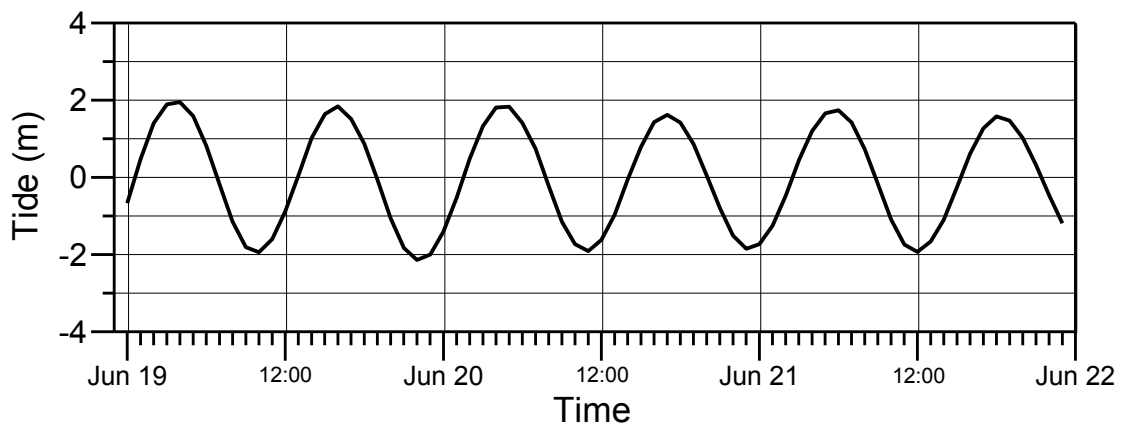


圖 3.12 潮位變化圖(以平均潮位為基準)

3.5 底碇觀測波流分析

1. 波浪

以本所港灣技術研究中心於臺中港北防波堤堤頭 570 公尺水深 25 公尺處的波高波向與剖面海流即時傳送監測系統所得到的波浪資料，選擇 103 年 6 月 19 日至 6 月 21 日三日的波流資料作分析，波高逐時分佈如圖 3.13 所示，相對應之週期逐時分佈如圖 3.14 所示，而波向逐時分佈如圖 3.15 所示，圖形顯示三天的波高介於 0.18m 至 0.54m，平均為 0.32m，週期介於 5.86sec 至 8.76sec 間，平均為 7.13sec，波向介於 235° 至 38° 之間，平均為 336.4° 。

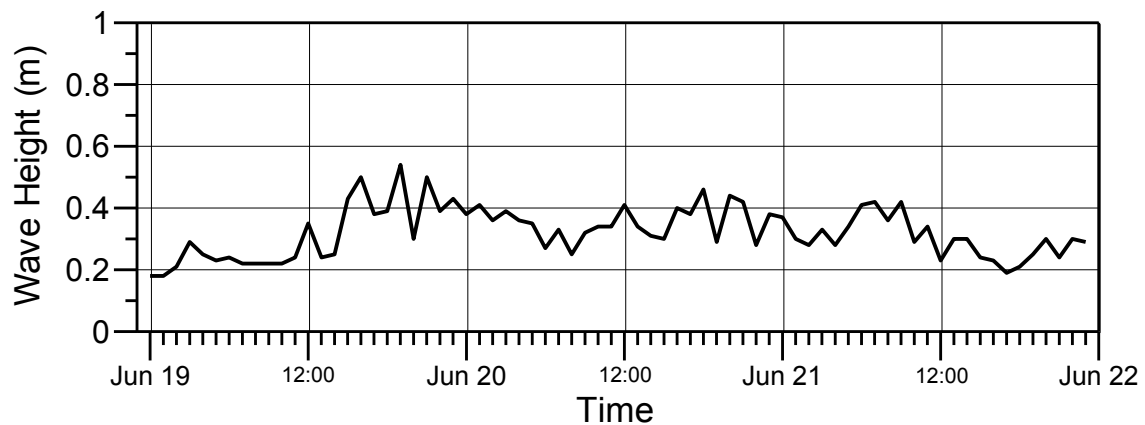


圖 3.13 波高逐時變化圖

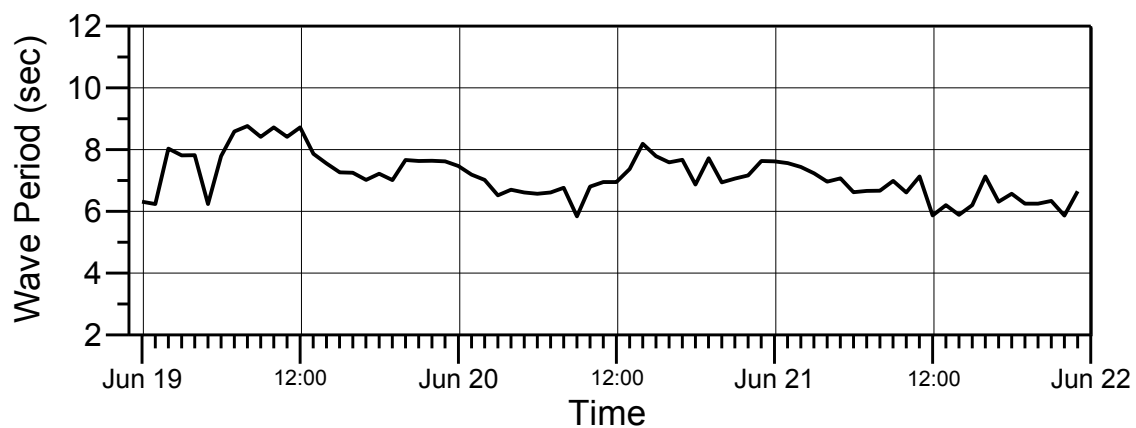


圖 3.14 週期逐時變化圖

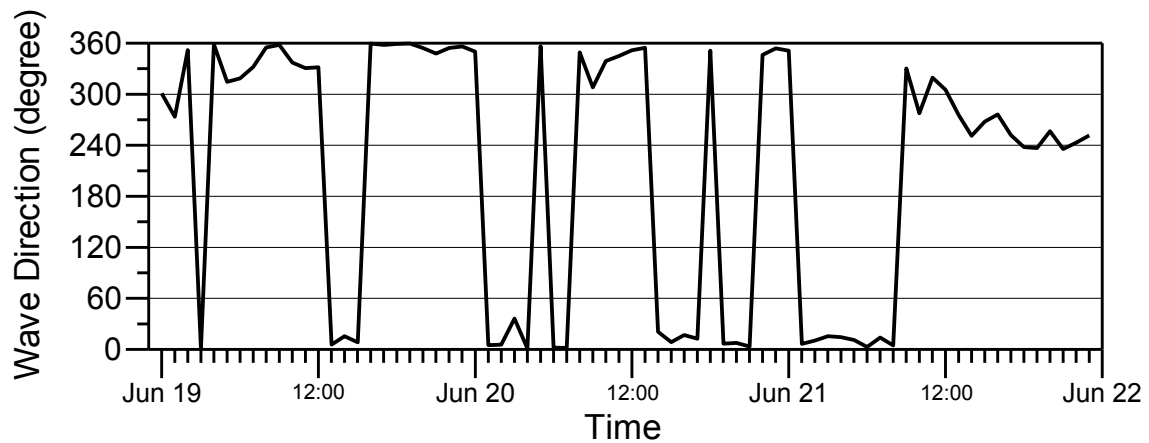


圖 3.15 波向逐時變化圖

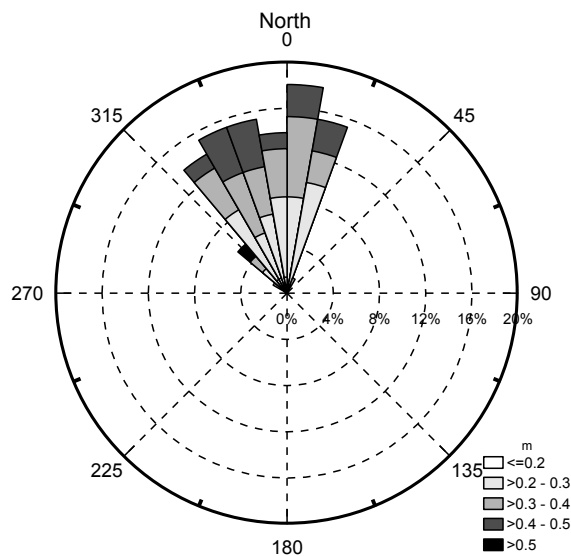


圖 3.16 波浪玫瑰圖

2. 海流

以本所港灣技術研究中心於臺中港北防波堤堤頭 570 公尺水深 25 公尺處的波高波向與剖面海流即時傳送監測系統之波流資料，選擇 103 年 6 月 19 日至 6 月 21 日三日的海流資料作分析，以上部 7 層 6 公尺垂直水深平均表面流速，繪製逐時分佈如圖 3.17 所示，而相對應的流向逐時分佈如圖 3.18 所示，圖形顯示三天的流速介於 0.18m/sec 至 0.80m/sec，平均為 0.43m/sec，波向介於 315.3° 至 18.8° 之間，亦即西北

至北北東向之間，平均為 341.4° ，將其流速流向分析玫瑰分布如圖 3.19 所示，以流速 $0.4\text{m/sec} \sim 0.6\text{m/sec}$ 佔最多，大於 0.4m/sec 較大流速其流向則分佈在北至北北東之間。為探討不同縱向水深其海流流速與流向的特性，以瞭解各分層海流分佈情形，本研究將縱水深分為上層（表面）、中層（中間水深）以及下層（深水底床上部）分別繪製海流玫瑰分佈如圖 3.20～圖 3.22 所示，圖形顯示較靠近表層海流方向介於北北西至北北東向之間，而在中間水深海流方向則集中在北向附近，而底層海流 0.4m/sec 以上流速則以北北東向佔較多。比較圖 3.17 之表面流速與之圖 3.7 風速，顯示 6 月 20 日下午 14 時左右以及 6 月 21 日下午 14 時左右，表面流速與風速均有明顯的高值，顯示兩者為相關性高，風會驅動表面水體流動。

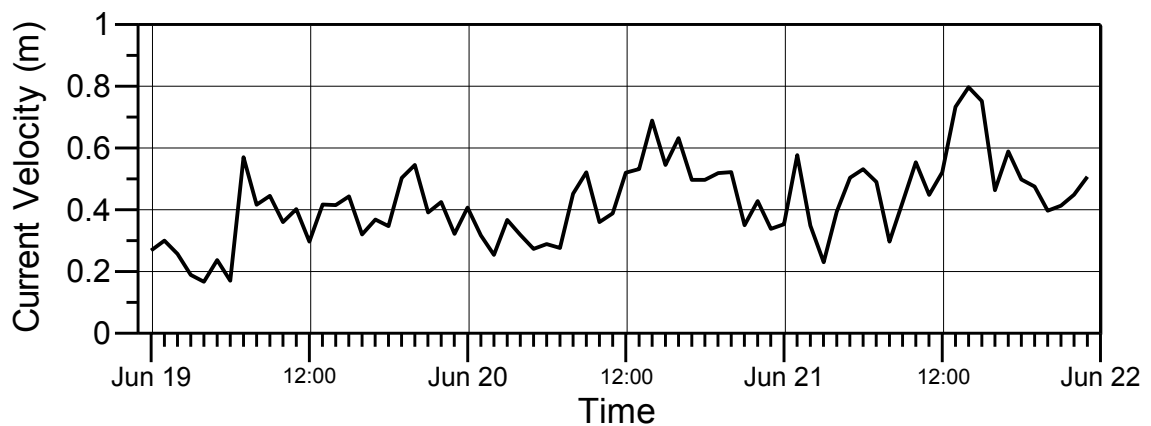


圖 3.17 表面海流流速逐時分佈圖

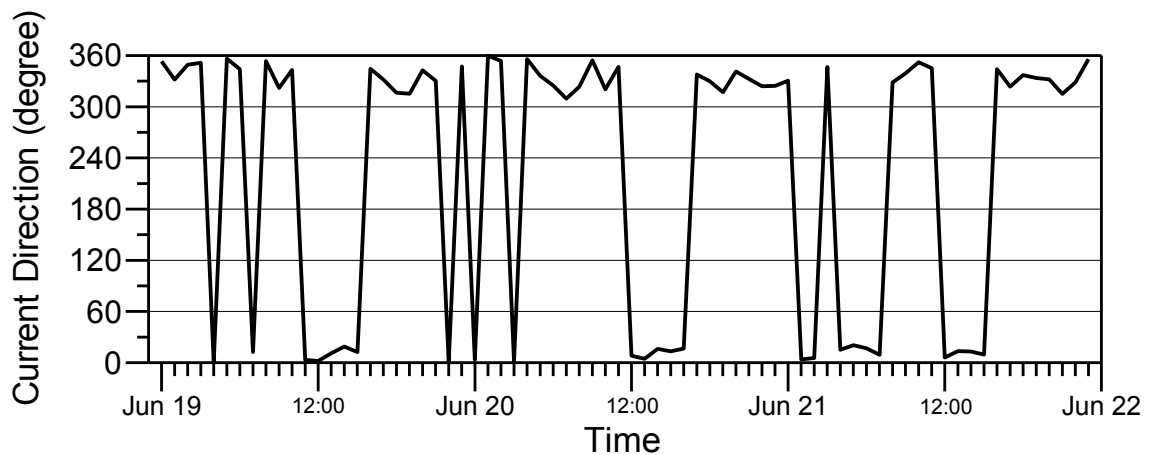


圖 3.18 表面海流流向逐時分佈圖

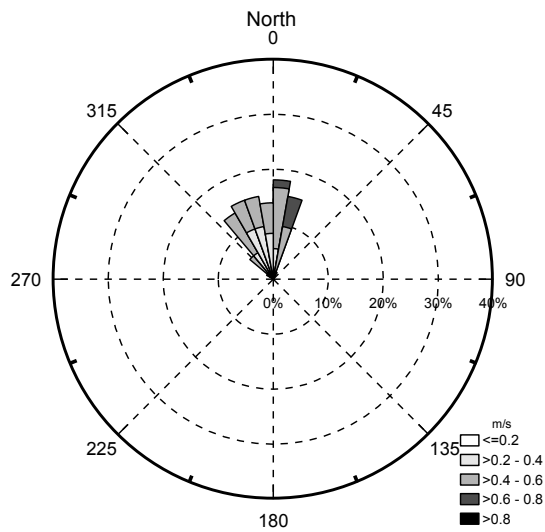


圖 3.19 平均海流玫瑰圖
(水面下約 2~8 公尺)

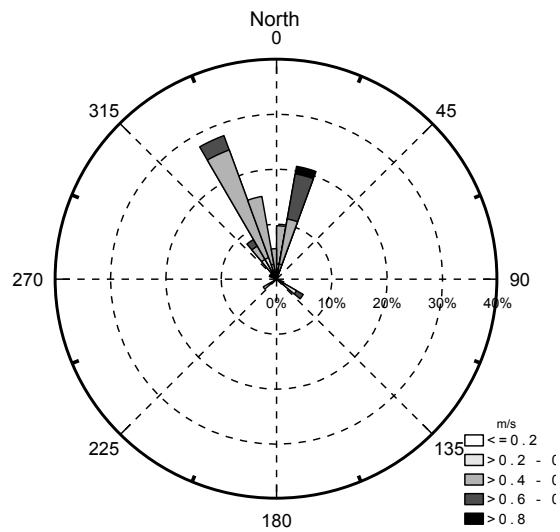


圖 3.20 上層水深海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

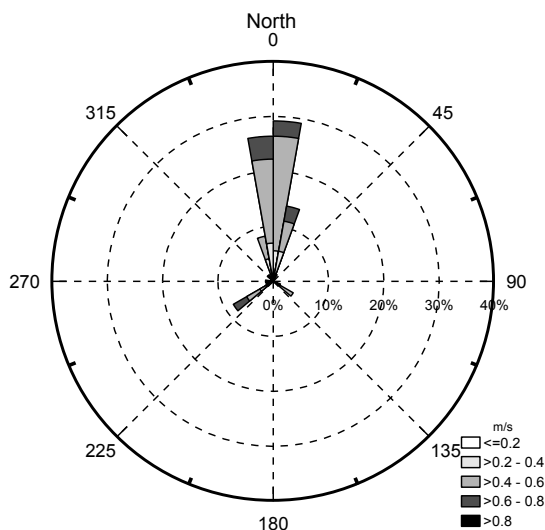


圖 3.21 中層水深海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

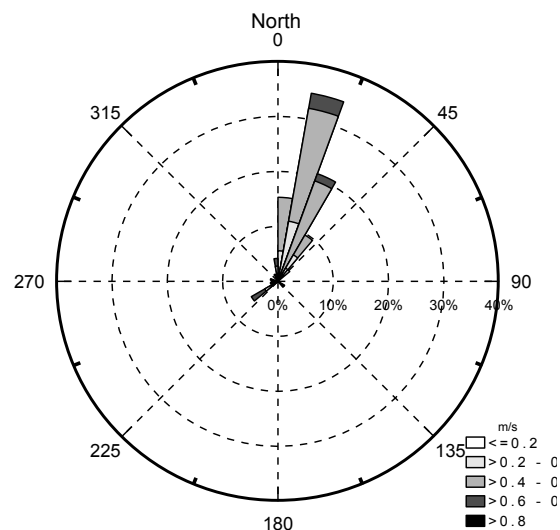


圖 3.22 底層水深海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

為探討不同潮位時其縱水深剖面其海流流速與流向的特性，將其繪製分布比較如圖 23a~圖 23d 所示，圖形顯示不同時間潮位之流速分布均不相同，以乾潮位 (low) 時的平均流速較大，且其靠近水表面的 2 公尺水流速度明顯增加，其對應風速並非最大，可見其水流並非風趨流所造成，且亦非主要由潮流所造成，因若由潮流所引起，其在漲退潮期

間尤其在平均水位時的流速應該達到最大，故其原因值得根據平面流場量測結果再進一步探討。

檢視在所有的縱水深水流方向顯示，在不同的潮位垂直水深之水流方向介於北北西至北北東向之間。在退潮（Ebb）期間的流向分佈，較淺處方向偏向北北西向，隨著往深水底床處，水流方向漸漸轉成北北東向，其表示在退潮期間，有股表面水流推動水體往北北西轉，水深愈深處其推動的動能愈小。

值得注意的是，在最靠近底床的水流方向大致相同，均介於北向至北北東向之間，由此看出其流向似乎不受漲退潮的影響，而且由於 25 公尺水深處較不受風趨流的影響，故以上現象顯示這附近應該有一股恆流流向北方，其流速約為 0.5m/sec。

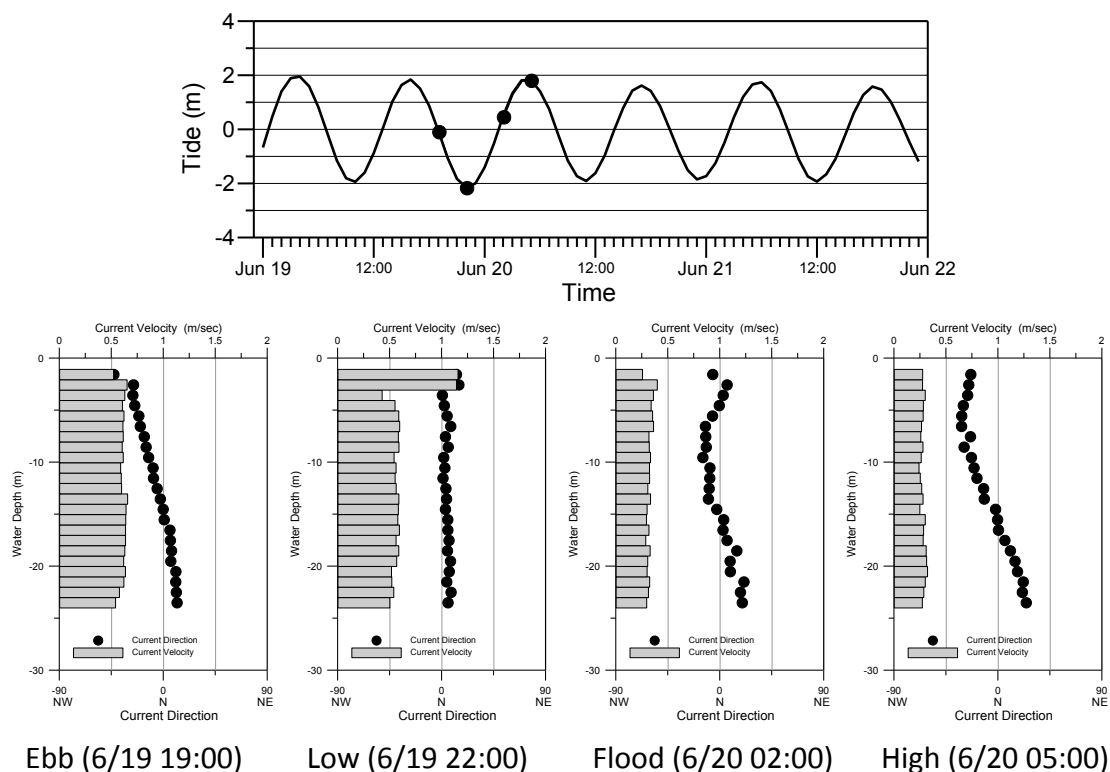


圖 3.23a 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

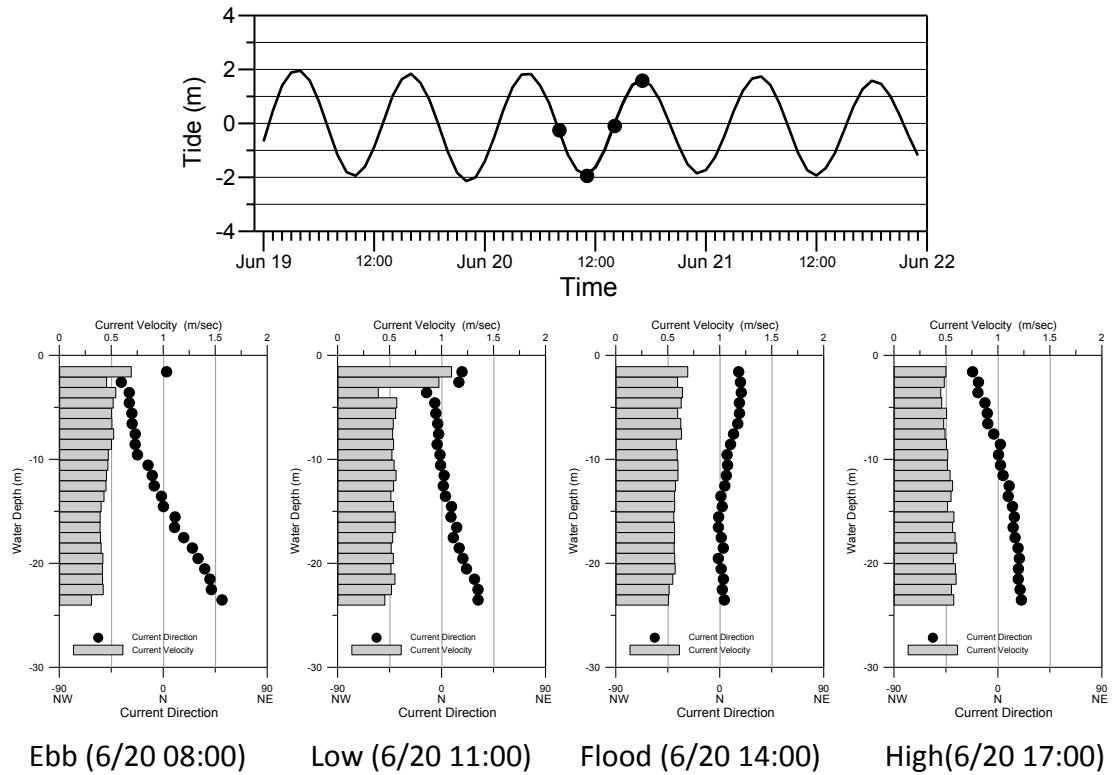


圖 3.23b 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

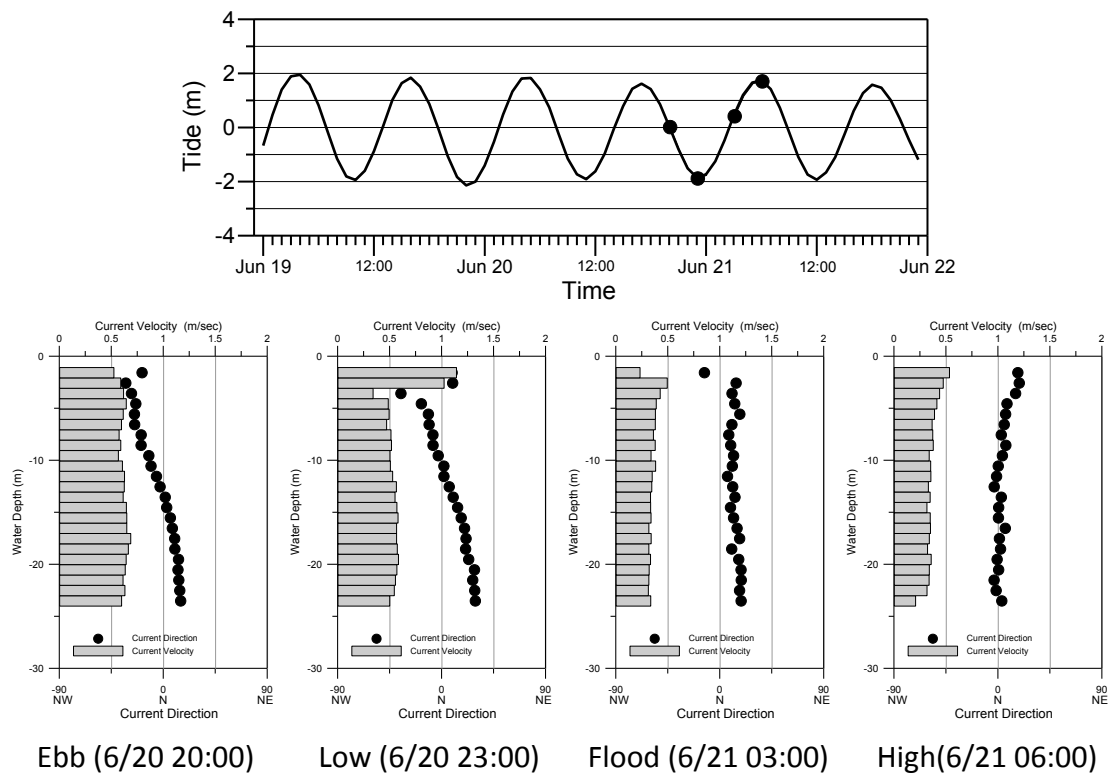


圖 3.23c 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

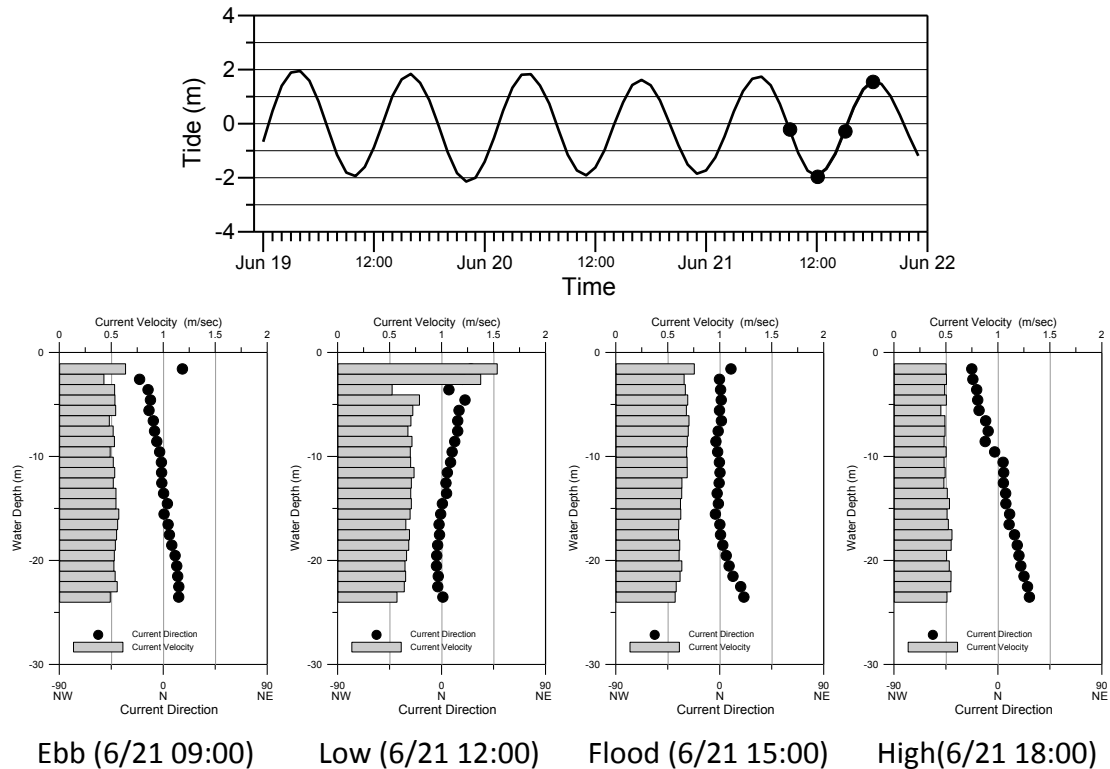


圖 3.23d 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

3.6 雷達觀測波流分析

1. 流場

雷達觀測時間為 2014/06/20 08:00~2014/06/21 08:00，觀測間距為 10 分鐘一筆，觀測所得資料經分析轉換為海流資料後，將其在潮位為漲潮、滿潮、退潮以及乾潮時的兩個小時流場資料平均，繪製成平面流矢圖如圖 3.24a 及圖 3.24b 所示。由圖可看出雷達觀測之海水表面流場之連續變化，顯示流場在不同水位受近岸港灣結構物的影響變化很大，北防波堤南側之流速速度大於北防波堤北側之流速，且堤頭附近西南處流速亦較大，退潮時之流速大於漲潮時之流速，流速約 90cm/sec。北防波堤南側在靠近堤頭處的流向在不同潮位時均為西北向，此原因可

能是向北恆流碰到北防波堤後，轉向往西北深水處所致。在靠近航道口處，在漲潮時流向為向港內，而在退潮時轉為向港外，惟其流速並不大。北防波堤北側其流向並不固定，隱約可看出有環流現象，尤其在退潮時段，探究其原因可能為向北恆流經由堤頭後轉為向岸方向所造成。

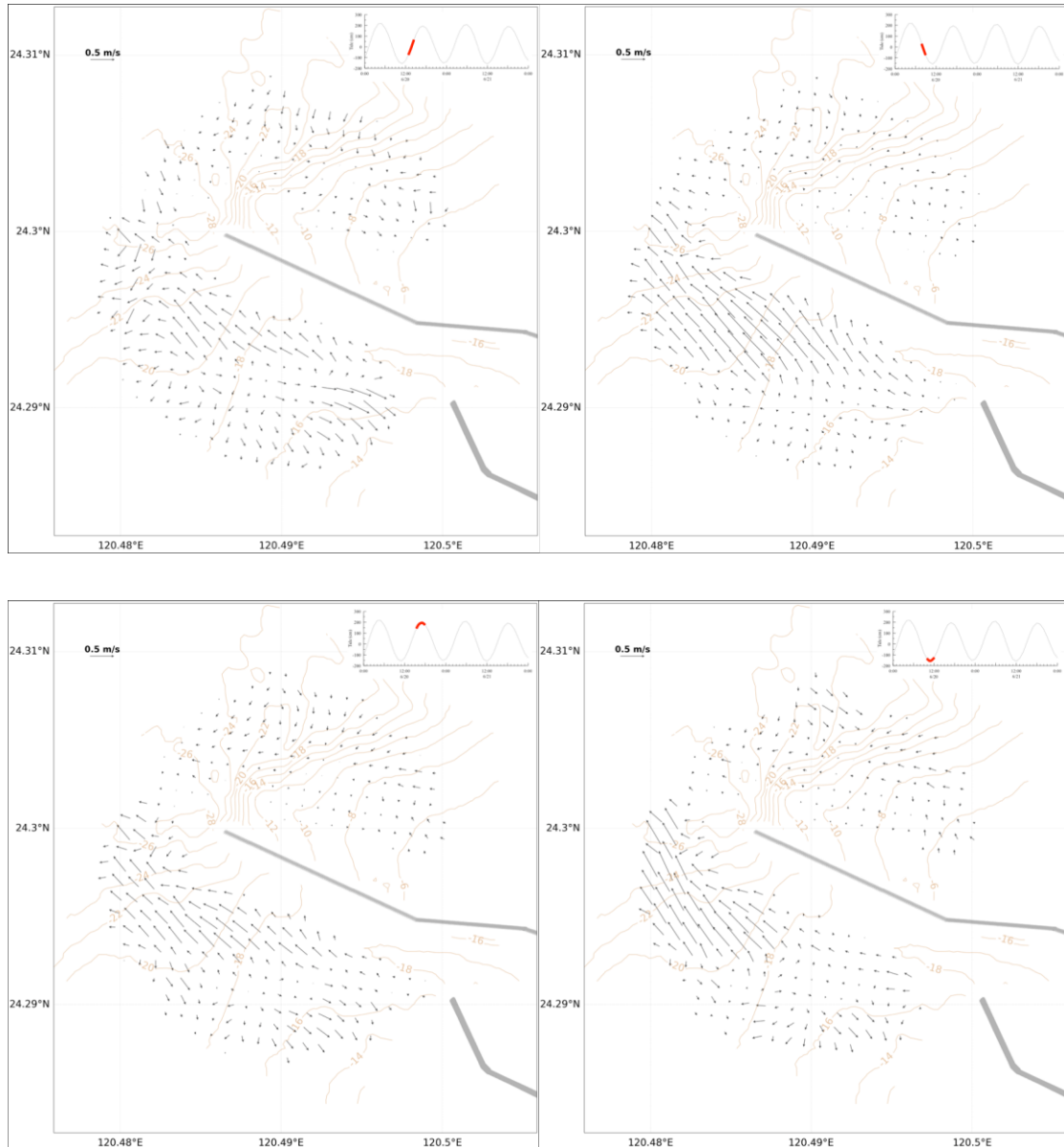


圖 3.24a 雷達觀測不同潮時流場分佈圖
(2014/06/20 12:00~2014/06/21 00:00)

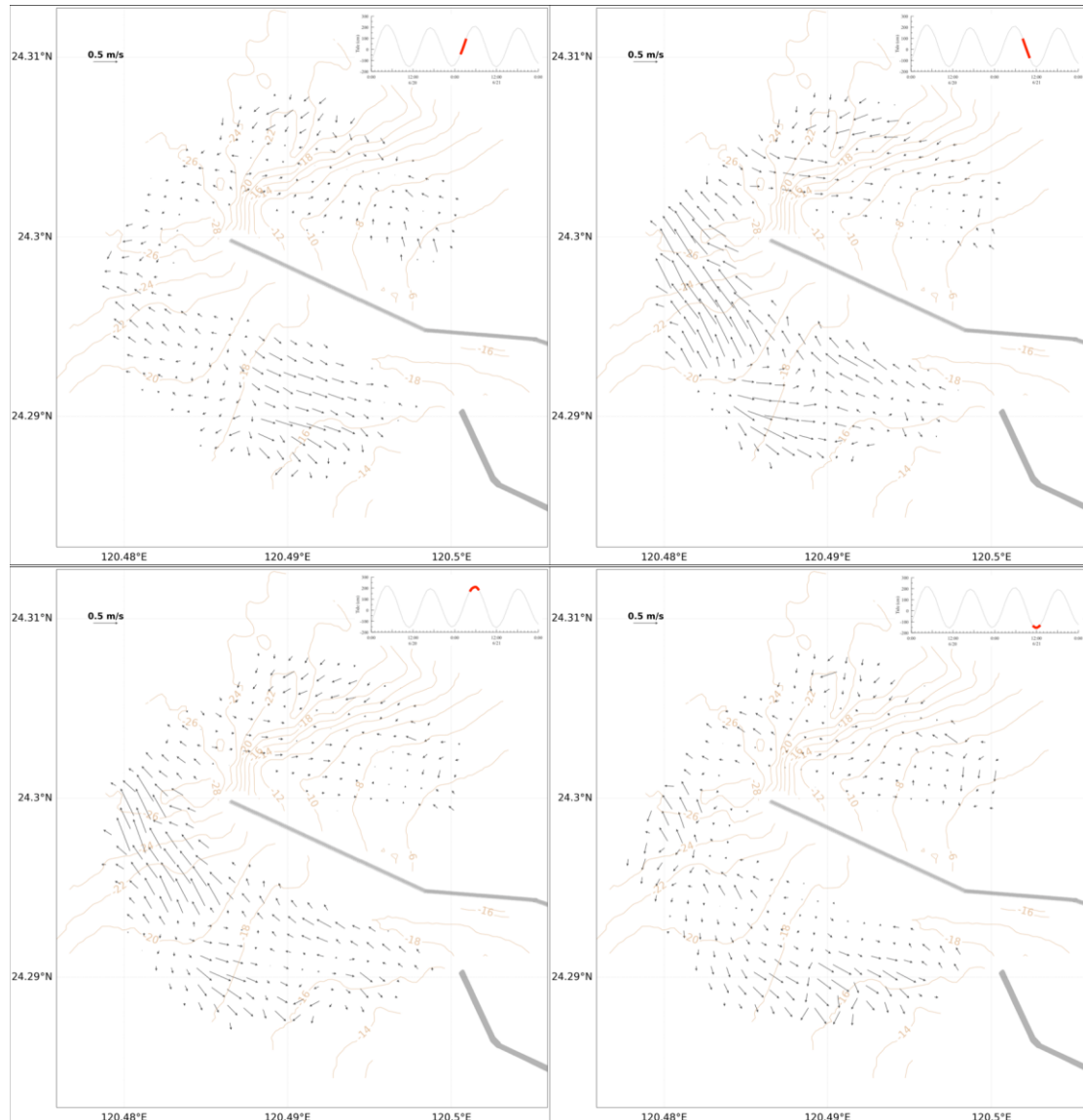


圖 3.24b 雷達觀測不同潮時流場分佈圖
(2014/06/21 02:00~2014/06/21 14:00)

2. 波場

圖 3.25a 與圖 3.25b 為觀測期間分為漲潮、退潮、滿潮與乾潮時段之波高分佈圖，圖 3.25a 為觀測期間前 12 小時之結果，圖 3.25b 為後 12 小時之結果，由圖可知觀測期間之波高場變化趨勢為逐漸變大再逐漸變小，觀測期間風向為南風，波高在北防波堤之南側較大，北防波堤北側受遮蔽之影響，波高小於 0.2 公尺。

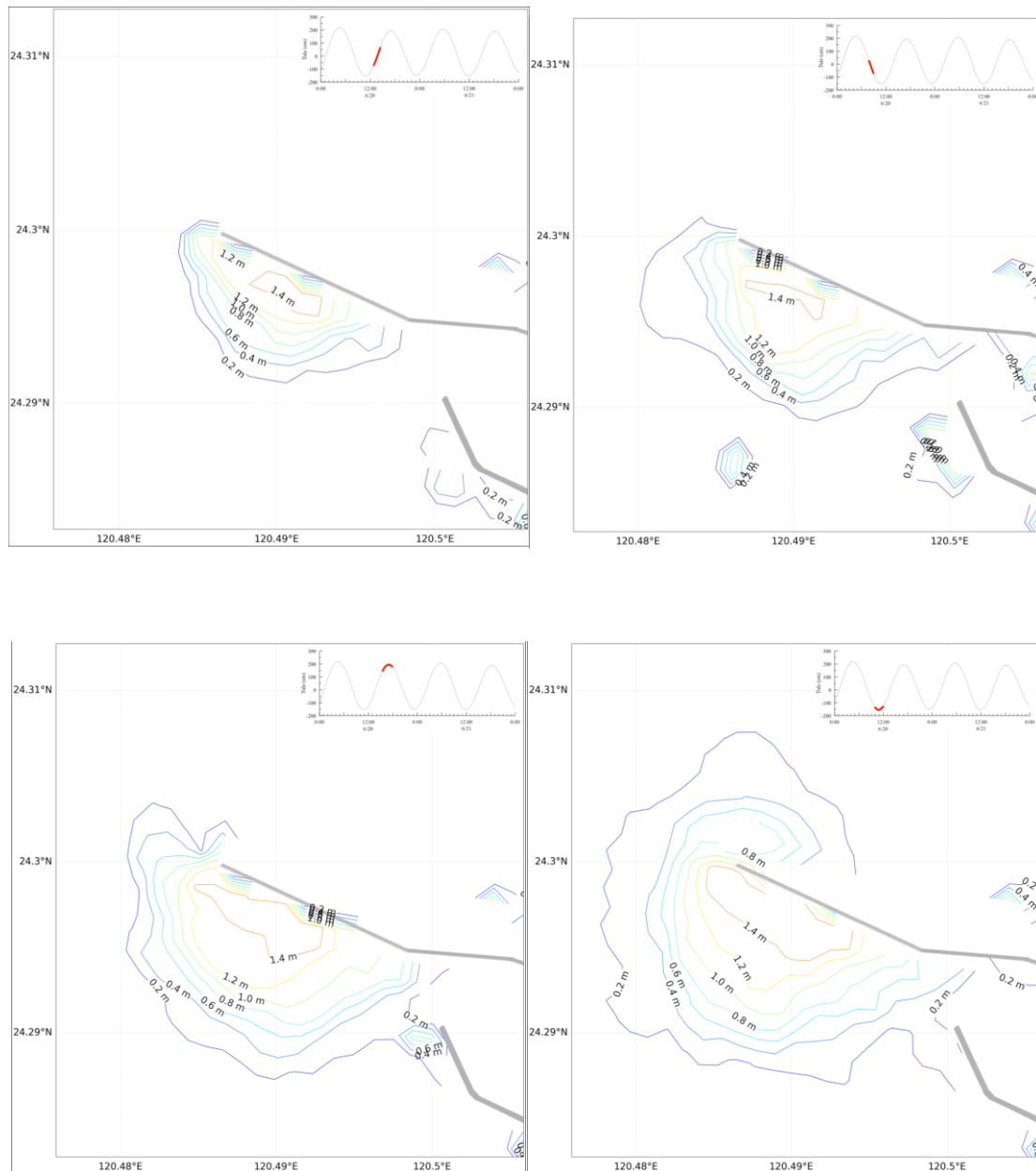


圖 3.25a 雷達觀測不同潮時波高分佈圖
(2014/06/20 12:00~2014/06/21 00:00)

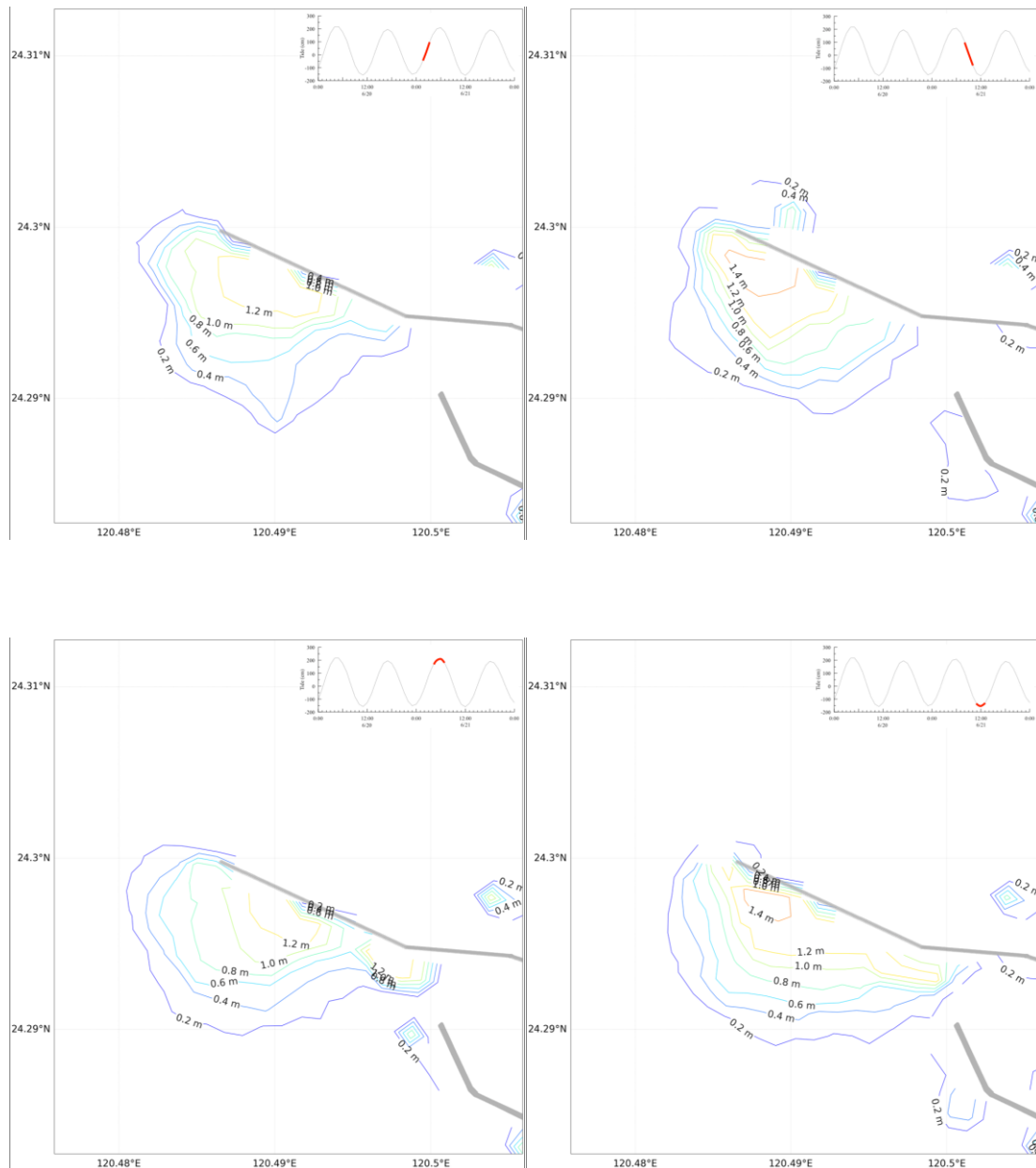


圖 3.25b 雷達觀測不同潮時波高分佈圖
(2014/06/21 02:00~2014/06/21 14:00)

3.7 浮標觀測表面流分析

本研究以浮標追蹤分析得到北防波堤附近表面流，觀測時間為 2014 年 6 月 20 日，以 0.5Hz 的資料取樣頻率，共 6 測次 (E1、E2、E3、F1、F2 及 F3)，漲潮以及退潮時段各為 3 測次，其各測次期間之相對應平均流速分析製如表 3-3 所示，另外以每 1 分鐘平均流速及相對漂流軌跡繪製如圖 3.26 至圖 3.27，圖中包括等深線、浮標編號、潮位、觀測日期以及時間，以利探討平面流場分佈特性。

表 3-3 浮標軌跡不同時間平均流速表

退潮時段				漲潮時段			
測次	浮標	觀測時間 (hh:mm~hh:mm)	平均流速 (cm/sec)	測次	浮標	觀測時間 (hh:mm~hh:mm)	平均流速 (cm/sec)
E1	R	08:05~08:46	4.6	F1	R	12:07~12:51	81.0
	B	08:04~08:48	7.8		B	12:08~12:52	84.4
	G	08:03~08:49	15.7		G	12:09~12:54	83.3
E2	R	09:19~10:15	22.9	F2	R	13:22~13:58	83.1
	B	09:20~10:07	55.4		B	13:23~13:57	85.3
	G	09:22~10:04	69.7		G	13:24~13:56	92.8
E3	R	10:21~11:06	13.2	F3	R	14:20~15:02	72.5
	B	10:20~11:07	15.7		B	14:19~15:03	76.2
	G	10:18~11:08	18.7		G	14:18~15:04	72.3

由圖 3.26、圖 3.26 及表 3-3 顯示，在漲潮時段，浮標在 3 測次均朝東北方向前進，深水處浮標前進速度比淺水處浮標快。堤頭前附近 F1 測次平均流速介於 81.0~84.4 cm/sec，浮標明顯由快逐漸減慢，且方向由北北東轉為東北向，三個浮標隨漂流時間增加而逐漸漂散，靠近岸的浮標轉向的幅度較深水處浮標明顯；堤頭南南西方約 2 公里處浮標平均流速介於 83.1~92.8 cm/sec，F2 測次在三測次中漂流速度最快；

置放於北防波堤較靠淺水處南南西方約 2.2 公里之 F3 測次，平均流速介於 72.3~76.2 cm/sec，在三測次中漂流速度最慢。

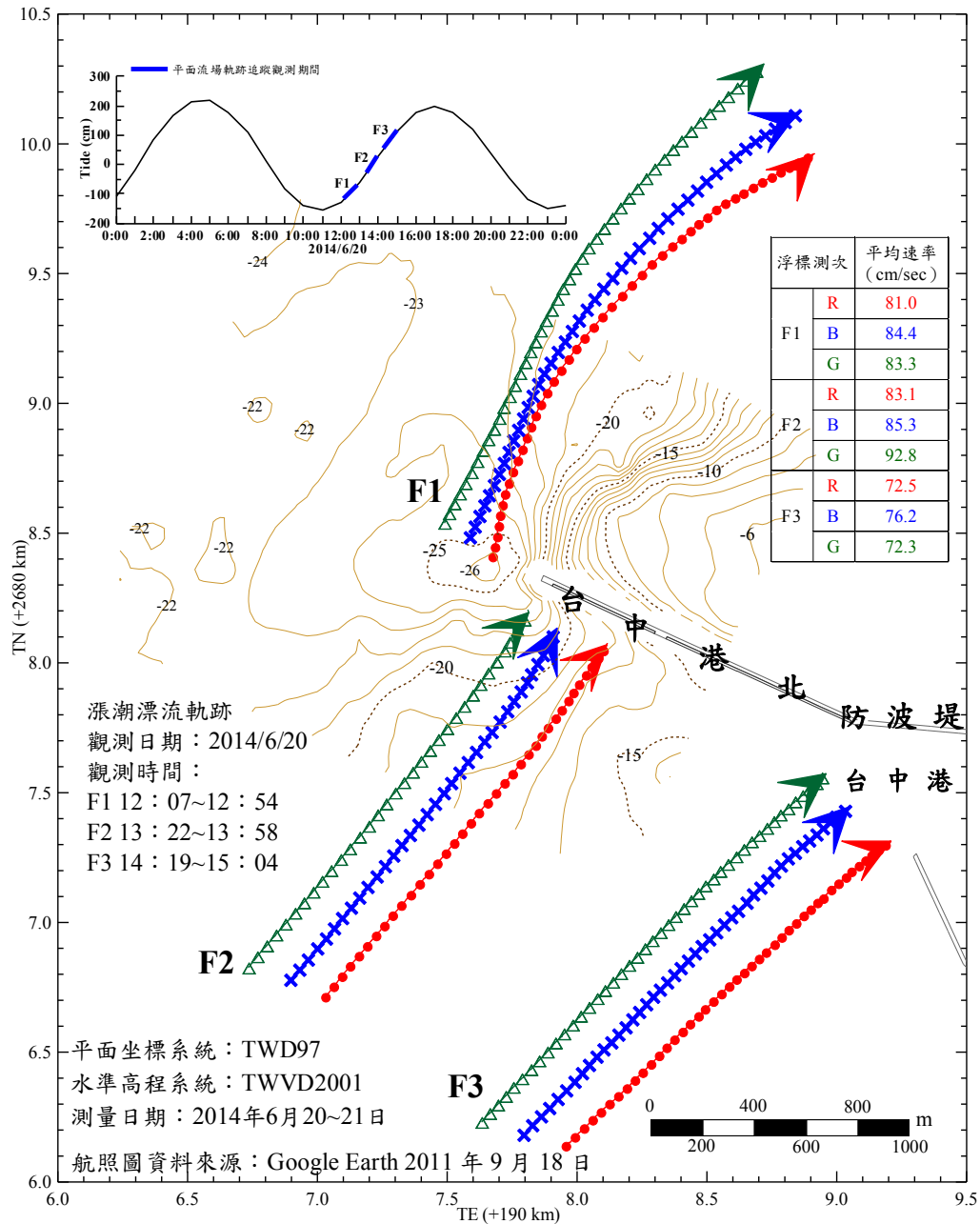


圖 3.26a 漲潮時段浮標 F1~F3 測次漂流軌跡圖

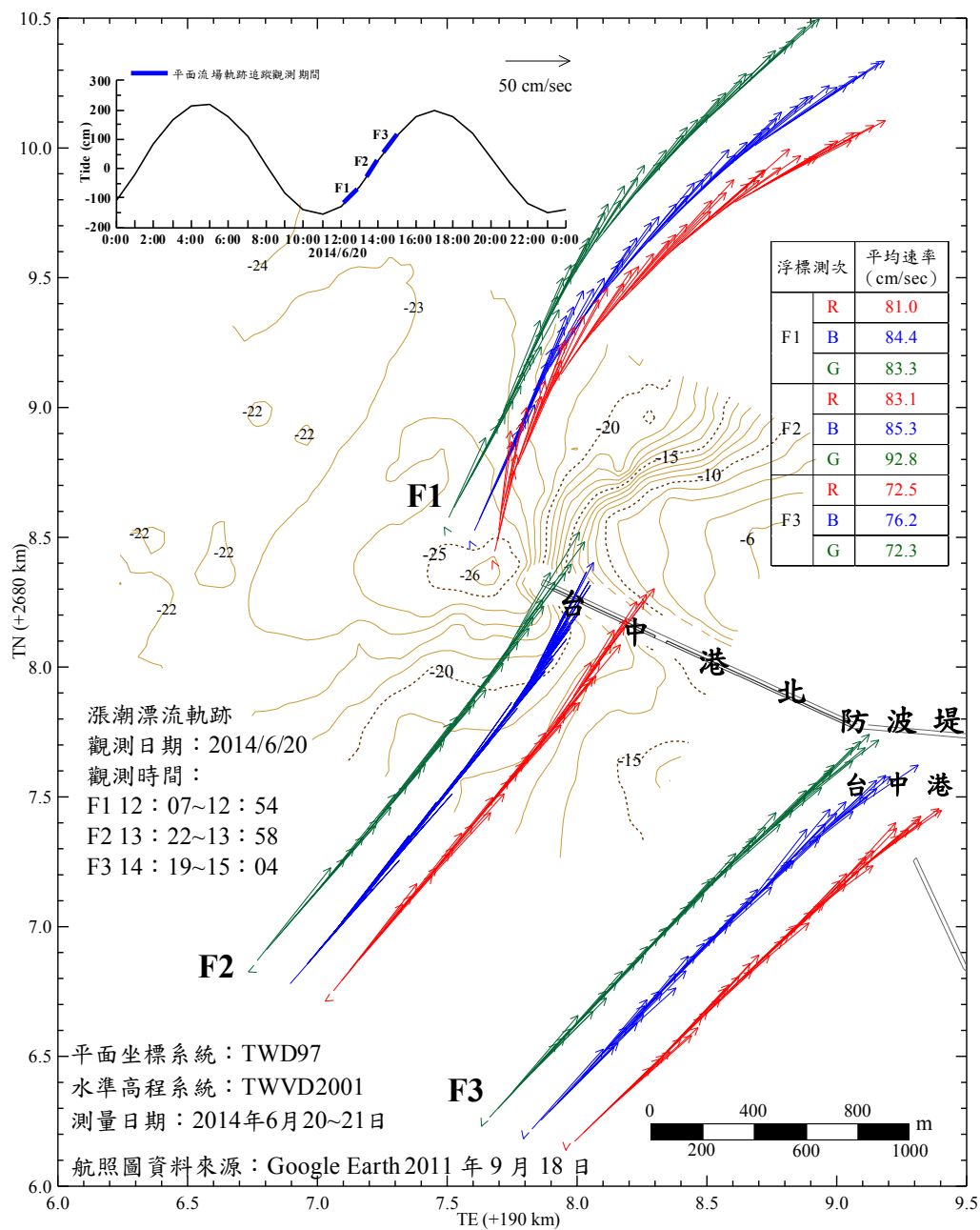


圖 3.26b 漲潮時段浮標 F1~F3 測次漂流流矢圖

退潮時段觀測分析結果如圖 3.27、圖 3.27 及表 3-3 所示，深水處浮標漂流速度比淺水處浮標速度快，E1 測次明顯呈現滯留情形，流場也呈現不穩狀態；E2 測次在較深水處的兩個浮標漂流方向先由北北西向，在離開堤頭較遠處後，則逐漸轉為北北東向；堤頭東北東方約 1.8 公里處之 E3 測次則向東北東漂流。由各測次平均流速顯示，E1 平均

流速介於 4.6~15.7 cm/sec；E2 平均流速介於 22.9~69.7 cm/sec，三測次中為最快；E3 平均流速介於 13.2~18.7 cm/sec。此外，由投放地點位置與過程顯示，E1、E2 以及 E3 測次均由深水處往淺水處漂流速度遞減。漲潮漂流速度比退潮時段快，越近北防波堤或淺處，漂流速度顯示較慢與不穩現象，其漂流方向大致朝東北至東北東範圍前進情形。

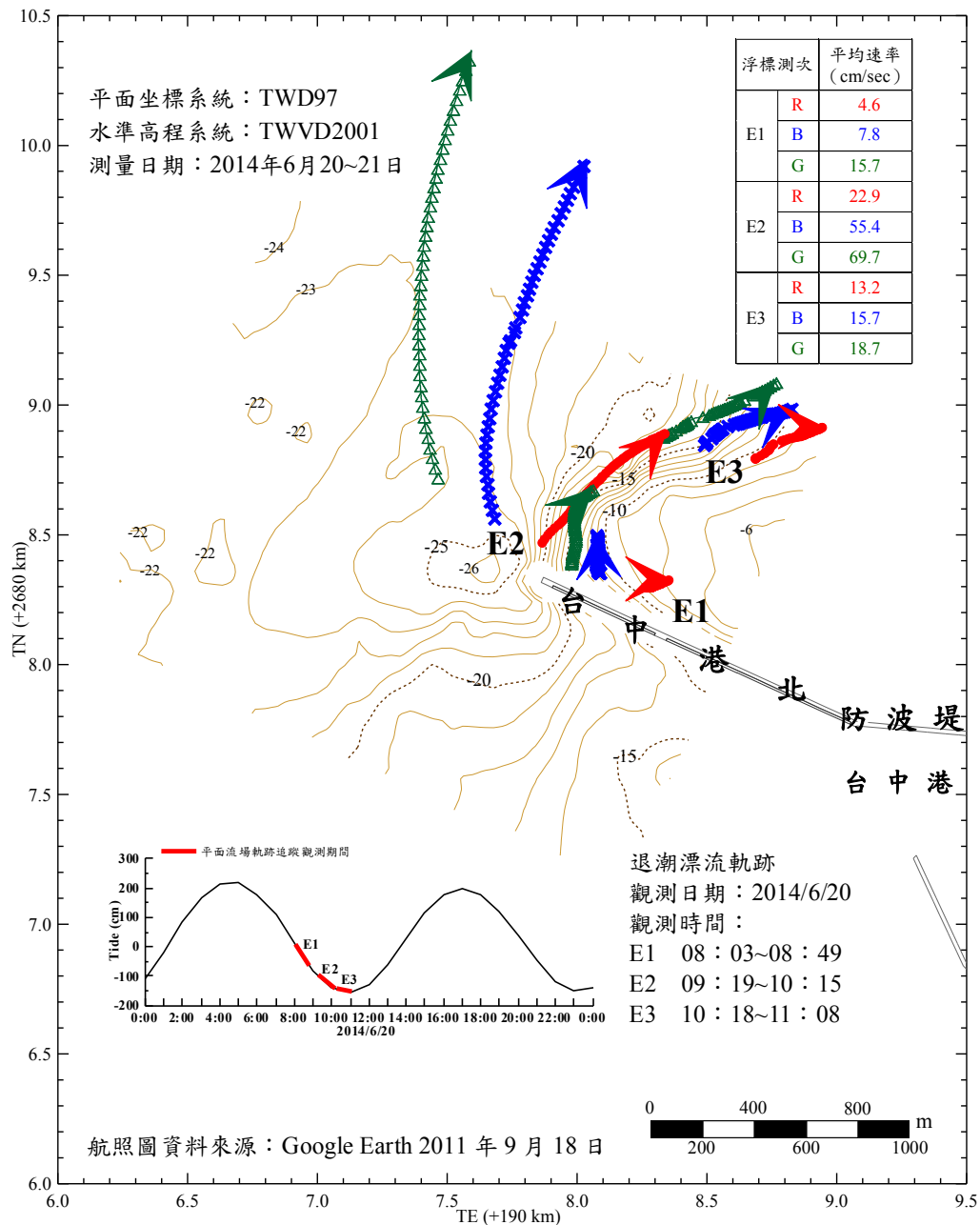


圖 3.27a 退潮時段浮標 E1~E3 測次漂流軌跡圖

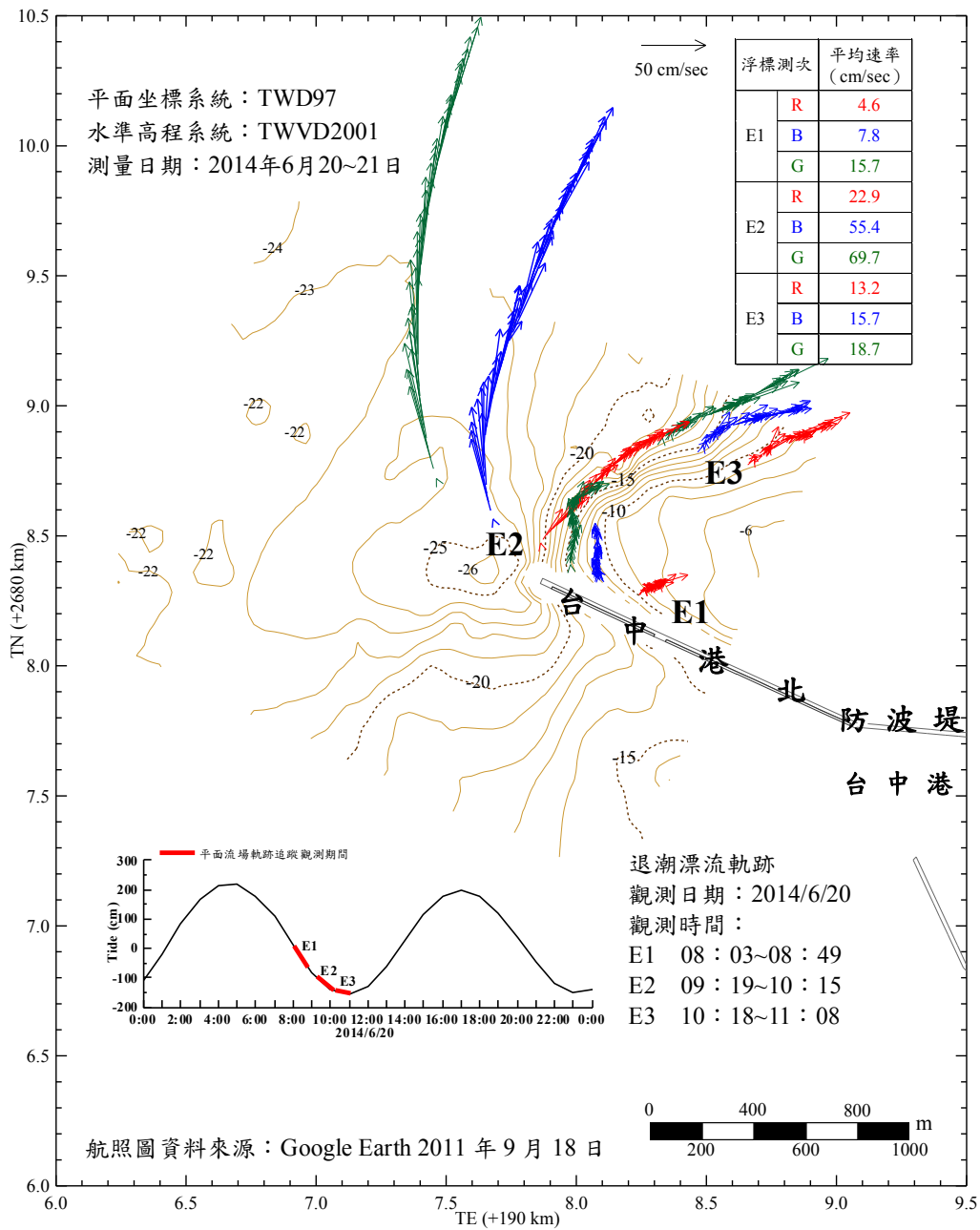


圖 3.27b 退潮時段浮標 E1~E3 測次漂流流矢圖

3.8 船碇觀測流場分析

為方便與其他觀測項目進行比較探討，本研究以 ADCP 所監測到最接近海面之 5 層流速向量之平均進行分析比較，其中船碇 ADCP 儀

器沒水深度 1.8m，流速每層間距 20cm，故表層海流即為自海水表面 1.8~2.8m 間之平均流速。以下就船碇 ADCP 表層海流與定點底碇觀測海流以及各測回表層海流分佈作分析說明。

3.8.1 表層海流分析

1. 船碇與底碇表層流觀測比較

為瞭解船碇 ADCP 表層海流與底碇觀測海流之差異，以本所臺中港北防波堤外 570 公尺水深 25 公尺處 TC-W1 定點觀測站之海流資料作分析比較。船碇 ADCP 每測回觀測起迄之中點時間為其平均時間，同時將各測回表層流速流向資料，進行格網內插分析後，取對應於定點底碇 TC-W1 站位置之海流資料進行比對，其結果如圖 3.28 示。

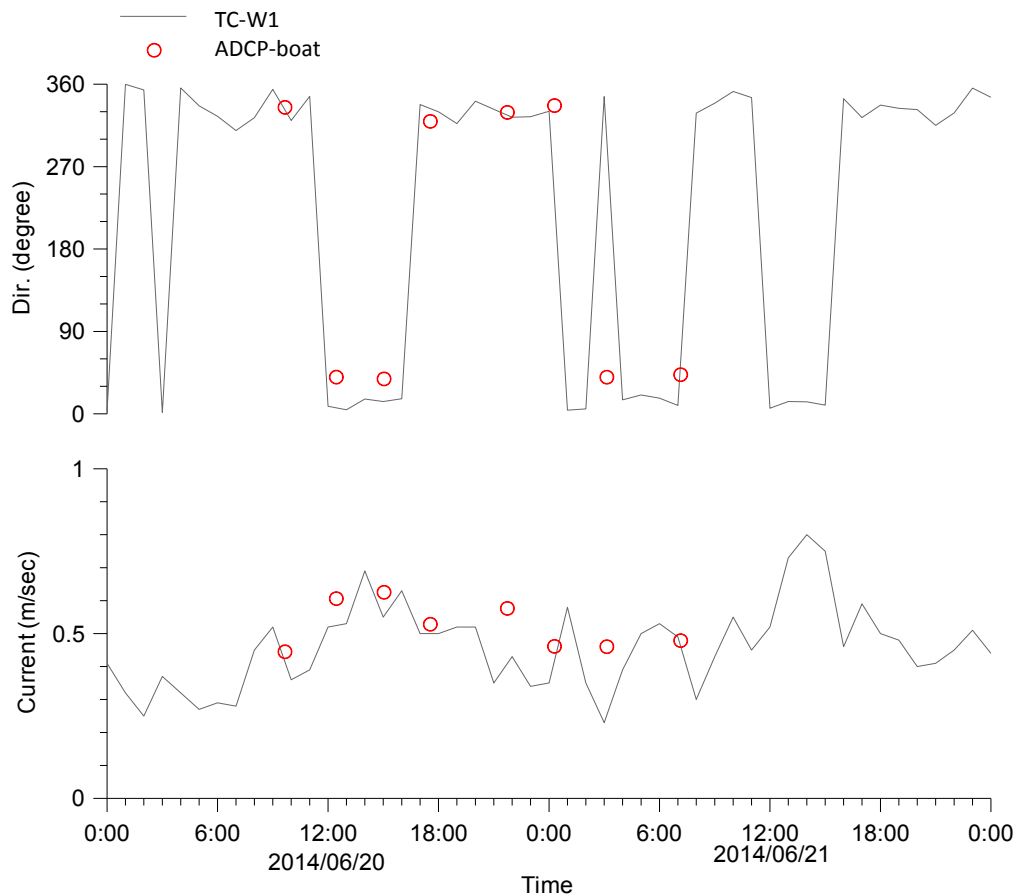


圖 3.28 船碇與底碇觀測表層海流比較圖

由船碇 ADCP 與本所定點 TC-W1 觀測站海流分析結果比較顯示，船碇 ADCP 表層海流流速與流向變化趨勢約與定點 TC-W1 測站相近，但船碇 ADCP 表層海流略大於定點 TC-W1 測站，平均約 0.09m/sec。在海流方向方面，船碇觀測海流於部分測回期間之流向，較定點 TC-W1 測站者偏東約 25 度。其原因應係表層流速觀測期間海面風主要來自西南向，且風速約 4~10m/s 間，而前述流速流向觀測之偏差即符合 Ekman(1905)有關表面風場對於表層海水的風驅效應經驗關係的描述，即表層風驅流流速約為海面風速的 1.9%，而在北半球之表層風驅流方向為風的去向順時針偏轉 45 度。

2. 船碇觀測表層海流分佈

將各測回表層流速流向加以內插分析，繪製各測回觀測期間平面流矢分佈如圖 3.29 至圖 3.29，而全部 8 測回平均之表層海流平面分佈，則繪如圖 3.30 示。

由各測回表層平均流速（圖 3.29a 至圖 3.30h）顯示，在臺中港北防波堤以西之海域，等深線-23m 以外地區之流向大致多為往北~東北方向，其中在漲潮時段之流向偏向東北，退潮時段則較偏北。在臺中港北防波堤西側凹坑地形區域之流向大致多為往西北~東北方向，其中在漲潮時段之流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略較其西側海域大，可能係退潮時段港嘴區海流與往北海流之匯流所致。在北防波堤北側區域因防波堤遮蔽影響，無論在漲潮或退潮時段，其流速均比其他地區小，流向約呈順時針旋轉情形。

此外，依整體觀測期間(8 測回)之表層平均流速分佈(如圖 3.30)顯示，在臺中港北防波堤以西之海域，其平均海流流速約在 0.42~0.58m/sec 間，流向大致為往東北~北之方向前進；而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.2~0.35m/sec，其流向為沿北防波堤往西北方向前進；北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯較小(約 0.05m/sec 以下)，其流向約呈順時針旋轉情形。

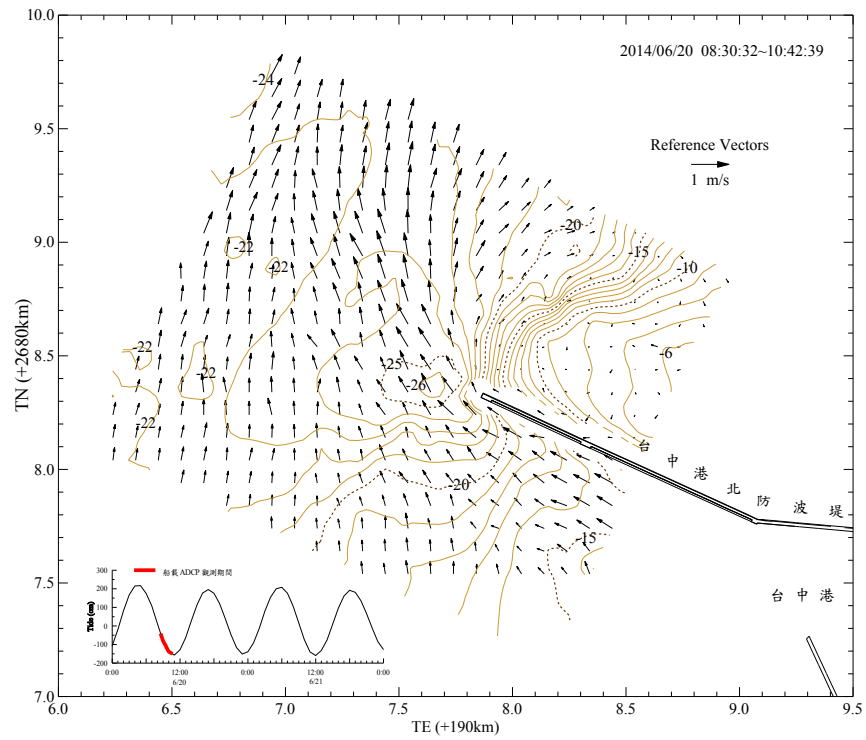


圖 3.29a S1 測次之表層海流流速分佈圖

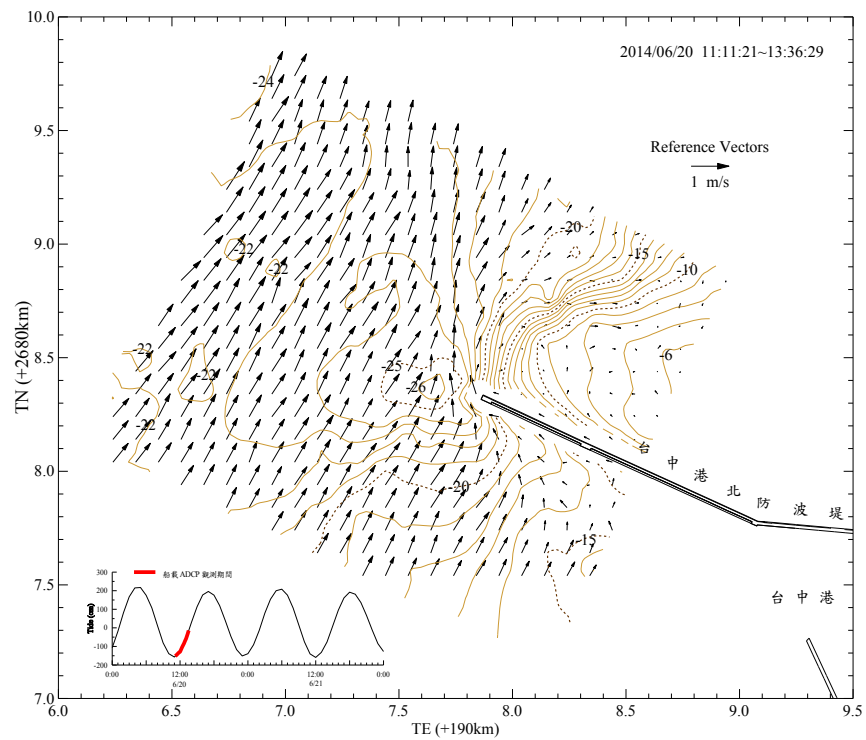


圖 3.29b S2 測次之表層海流流速分佈圖

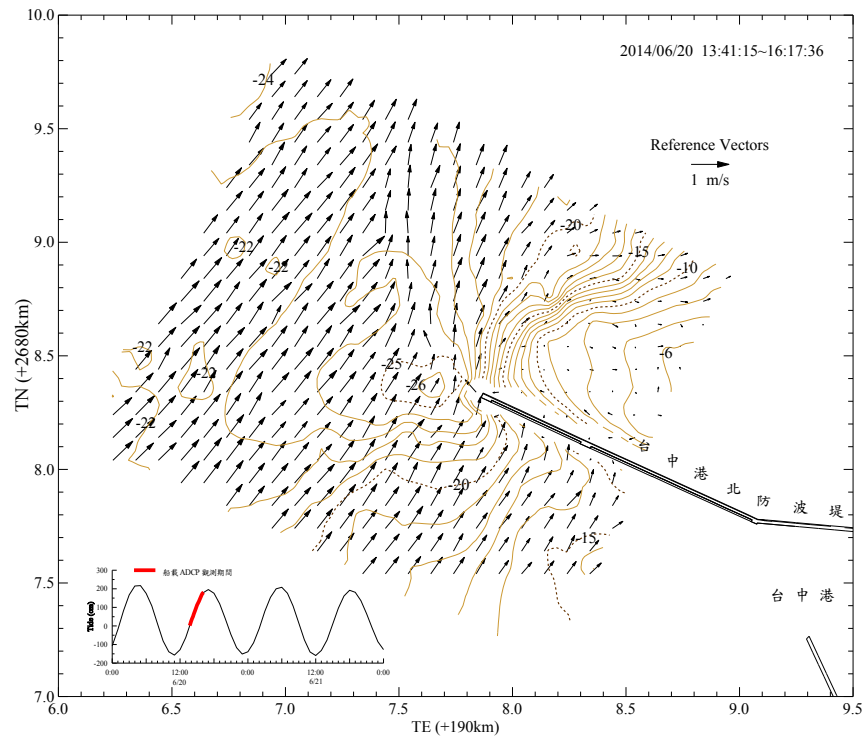


圖 3.29c S3 測次之表層海流流速分佈圖

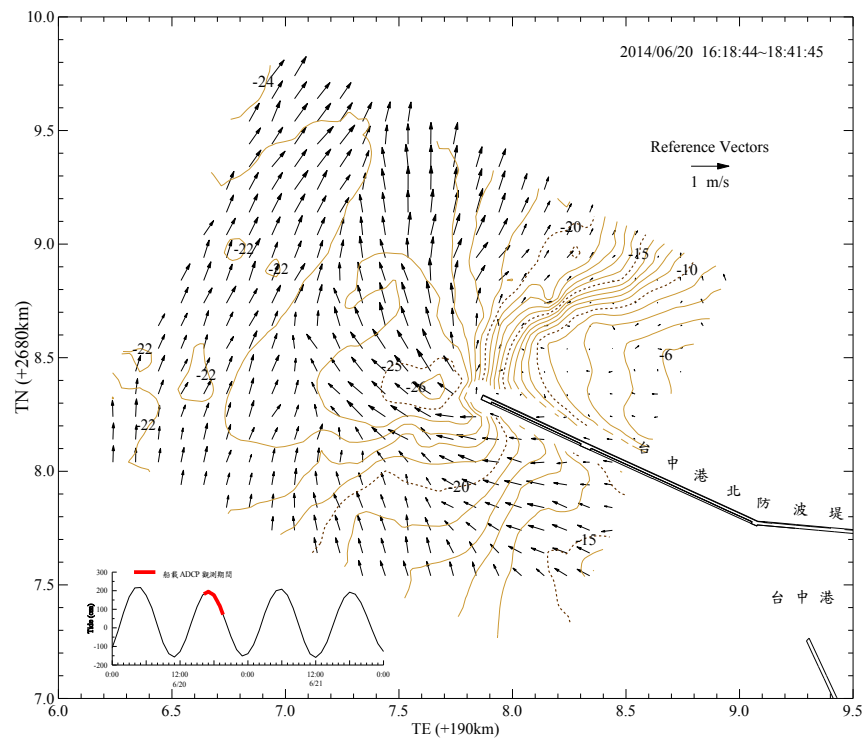


圖 3.29d S4 測次之表層海流流速分佈圖

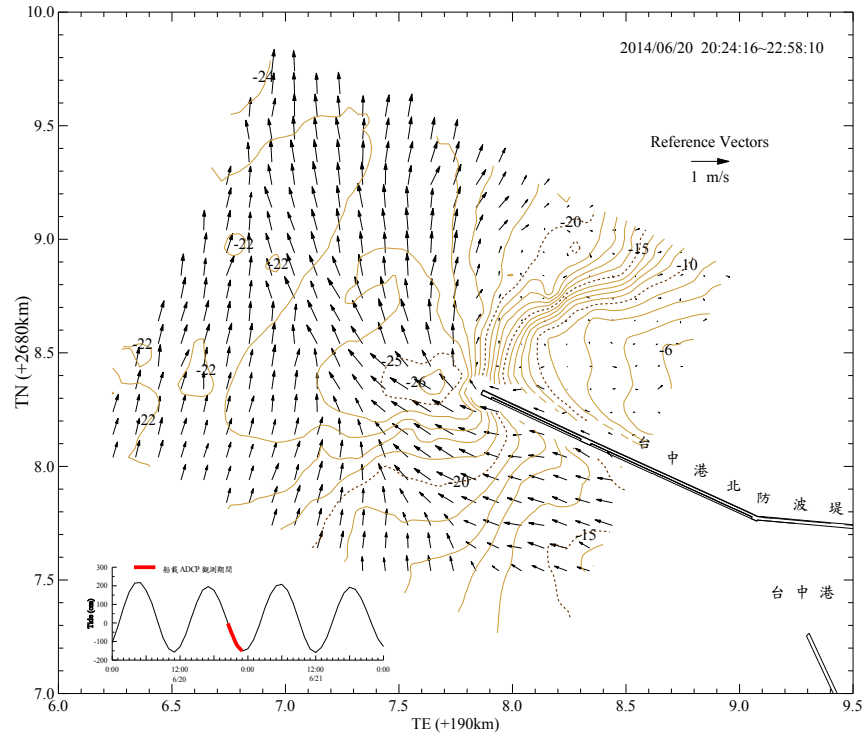


圖 3.29e S5 測次之表層海流流速分佈圖

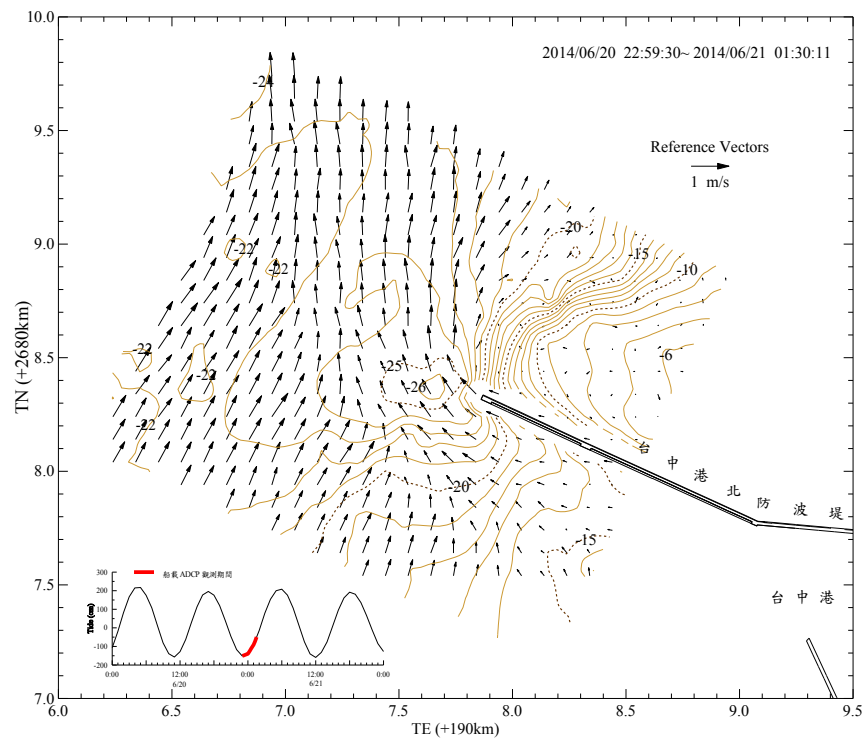


圖 3.29f S6 測次之表層海流流速分佈圖

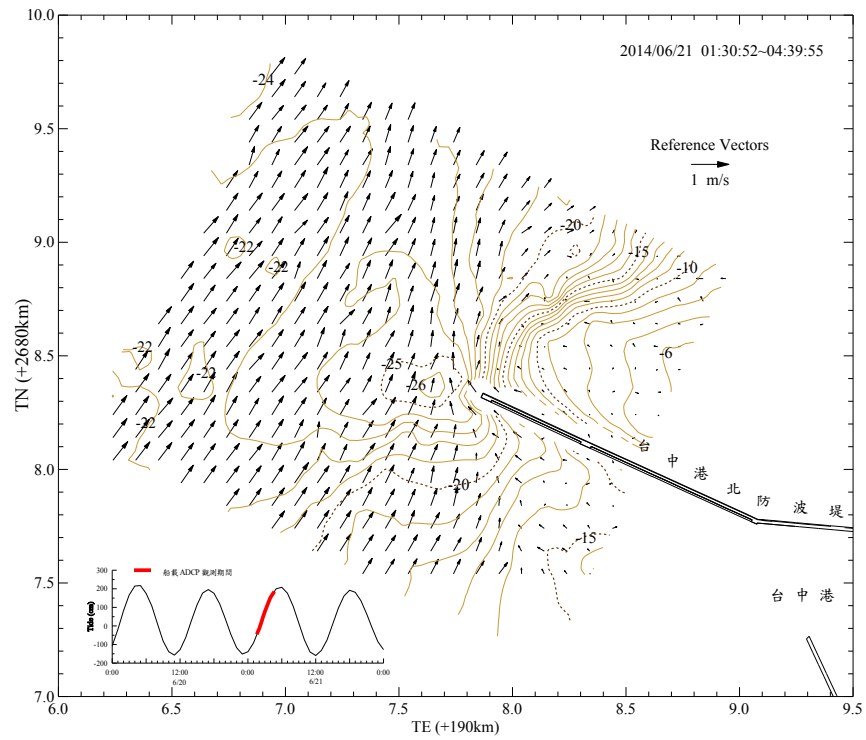


圖 3.29g S7 測次之表層海流流速分佈圖

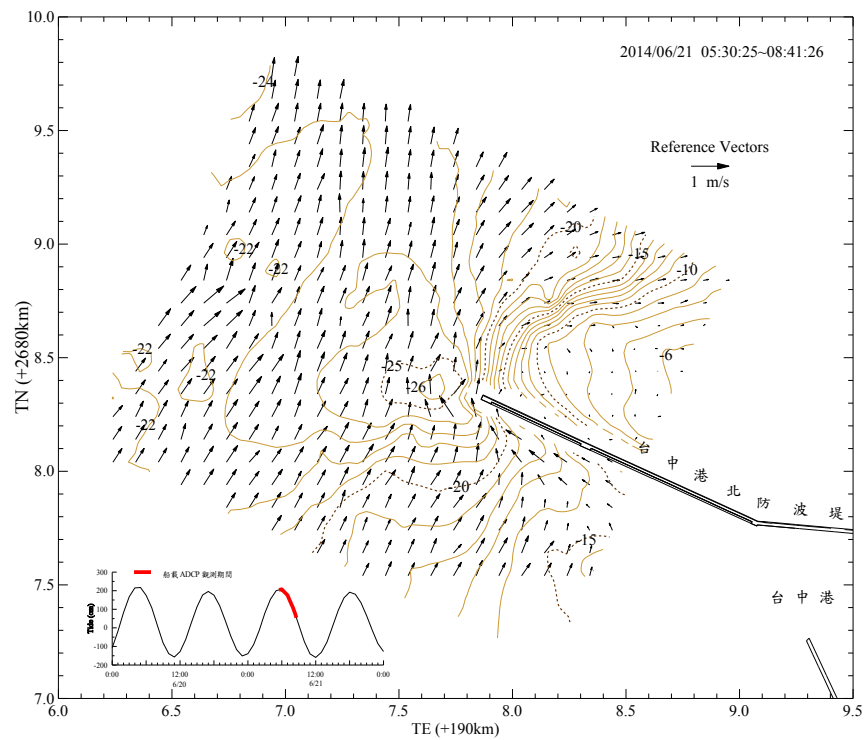


圖 3.29h S8 測次之表層海流流速分佈圖

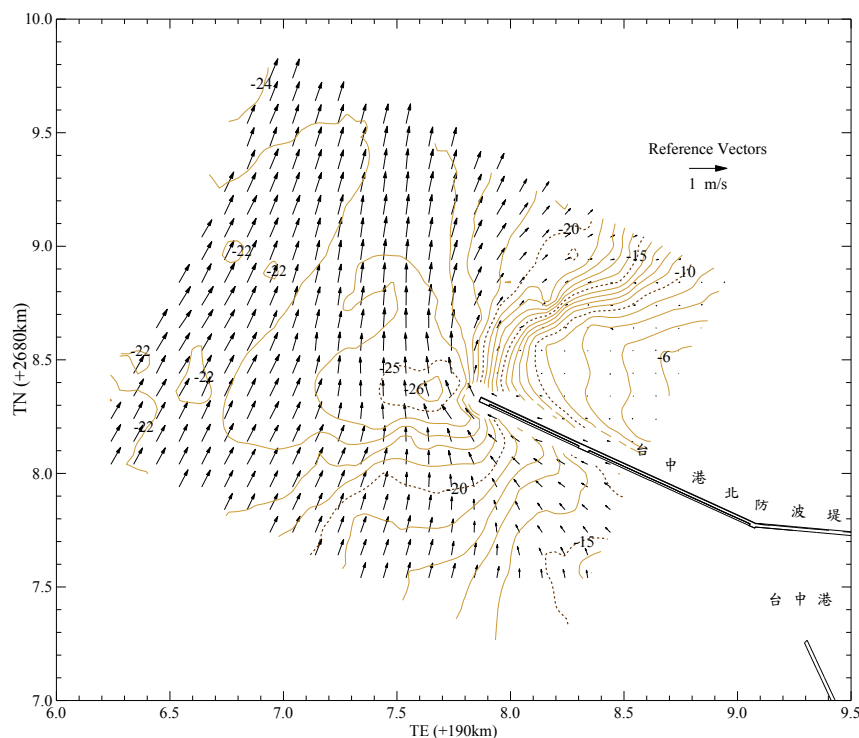


圖 3.30 表層海流流速分佈圖

3.8.2 底層海流分析

1. 船碇與底碇底層流觀測比較

為瞭解船碇 ADCP 底層海流與定點觀測海流之差異，本研究以本所在定點底碇 TC-W1 站長期海流觀測資料，選擇相同時段及水深資料作比較，以船碇 ADCP 每測回觀測起迄之時間終點為其平均時間，同時將各測回底層流速與流向資料，進行格網內插分析後，取對應於定點底碇 TC-W1 測站位置之海流資料進行比對，其結果如圖 3.31 所示。

由船碇 ADCP 底層海流與定點底碇 TC-W1 站海流比較結果顯示，船碇 ADCP 底層海流流速與流向之變化趨勢以及其值大小均與定點底碇 TC-W1 站者相當接近。

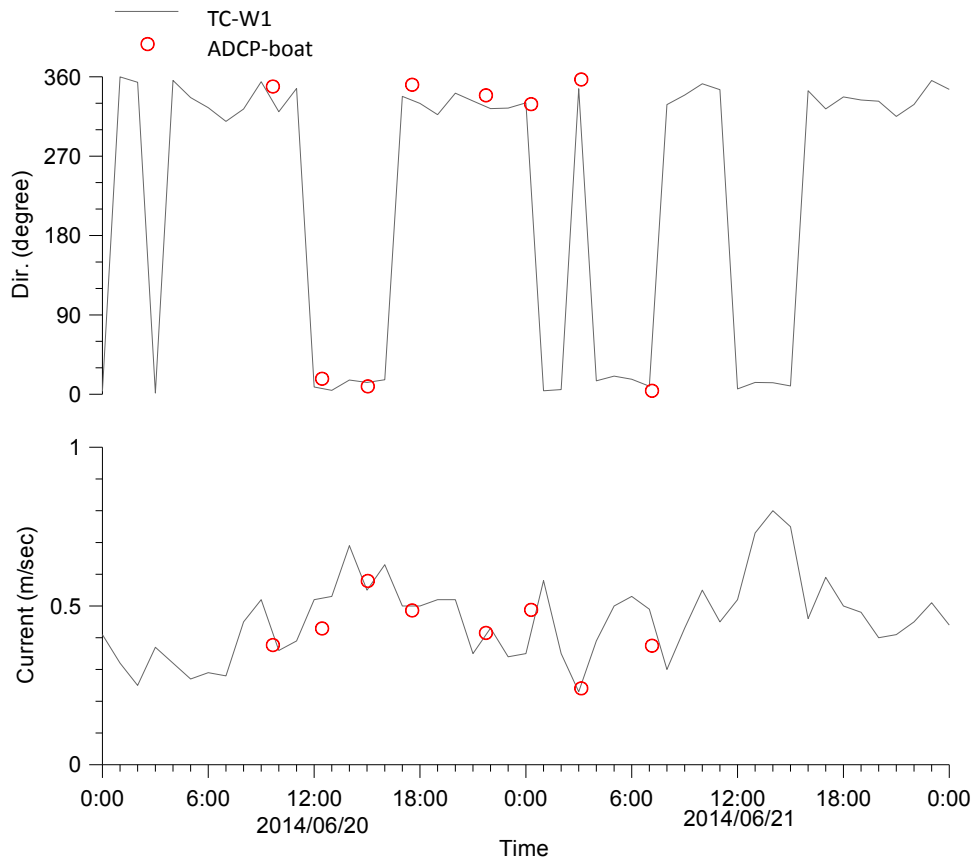


圖 3.31 船碇與底碇觀測底層海流比較圖

2. 船碇觀測底層海流分佈

以每測回表層流速流向內插分析資料，繪製各測回觀測期間平面流矢分佈如圖 3.32a 至圖 3.32h，而全部 8 測回平均之表層海流平面分佈，則繪如圖 3.33 所示。

由底層海流平面分佈分析結果顯示，於臺中港北防波堤西北較遠之海域，其流向大致為往東北～北之方向。在接近乾潮的漲退潮期間如圖 3.32a 圖 3.32b、圖 3.32e 及圖 3.32f，流向偏東北向，而在接近滿潮的漲退潮期間流向偏北向，如圖 3.32c、圖 3.32d、圖 3.32g 及圖 3.32h，流速介於 0.4~0.6m/sec 間，以接近乾潮的漲退潮期間流速較大。而臺中港北防波堤南側航道口(港嘴附近海域)流向為沿北防波堤往西北方向前進，愈接近航道內流速愈小，不同時間以接近乾潮的

漲退潮期間流速較大。北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯較小(約 0.05m/sec 以下)，其流向約呈順時針旋轉情形。

對於所有 8 測次平均底層流分布結果顯示 (如圖 3.33)，以北防波堤外海北北西處流速較大，值得注意的在堤頭深坑處附近流速亦較其他地區大。再與表層流分布(如圖 3.30 比較結果顯示，底層流平均流速比表層流速小，在北防波堤西側區域由深水往淺水處，底層流向由北北東向至凹坑處轉為北向，再至接近堤頭處轉為北北東向，而表層流向則為東北轉至北北西向，且在深坑西側即轉為北向。

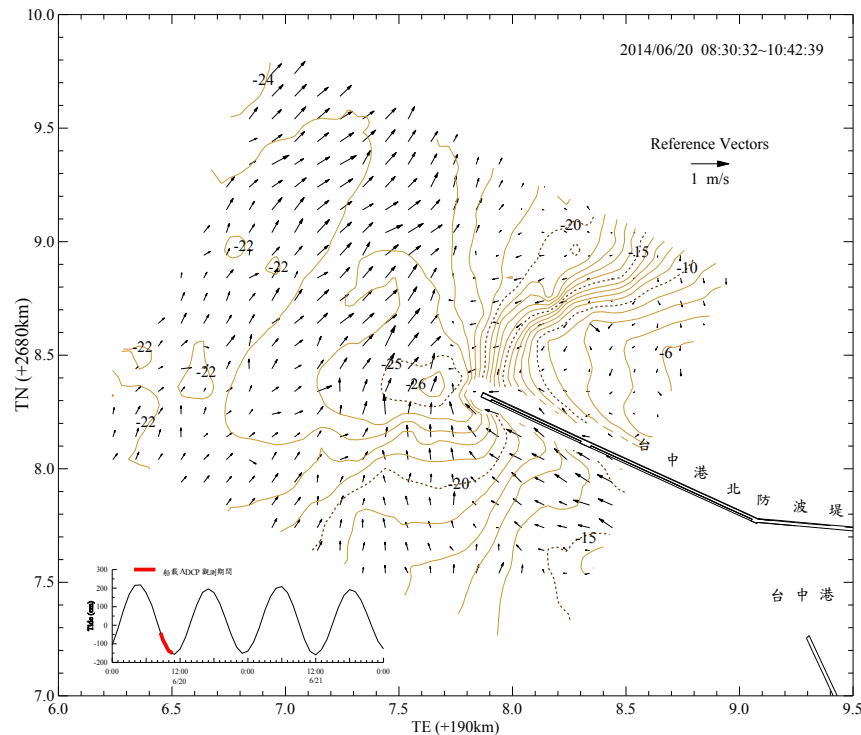


圖 3.32a S1 測次之底層海流流速分佈圖

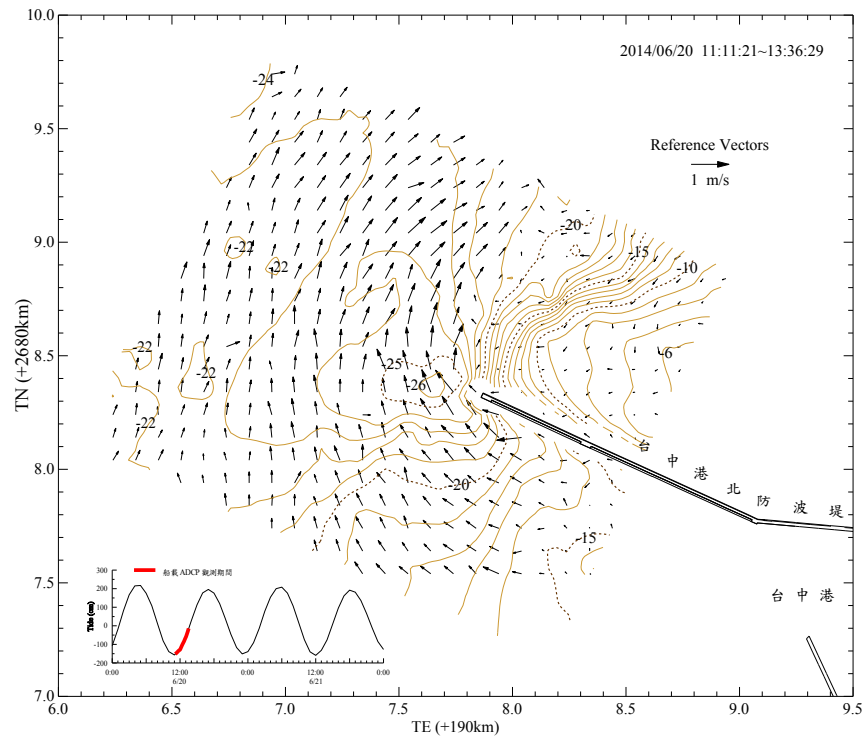


圖 3.32b S2 測次之底層海流流速分佈圖

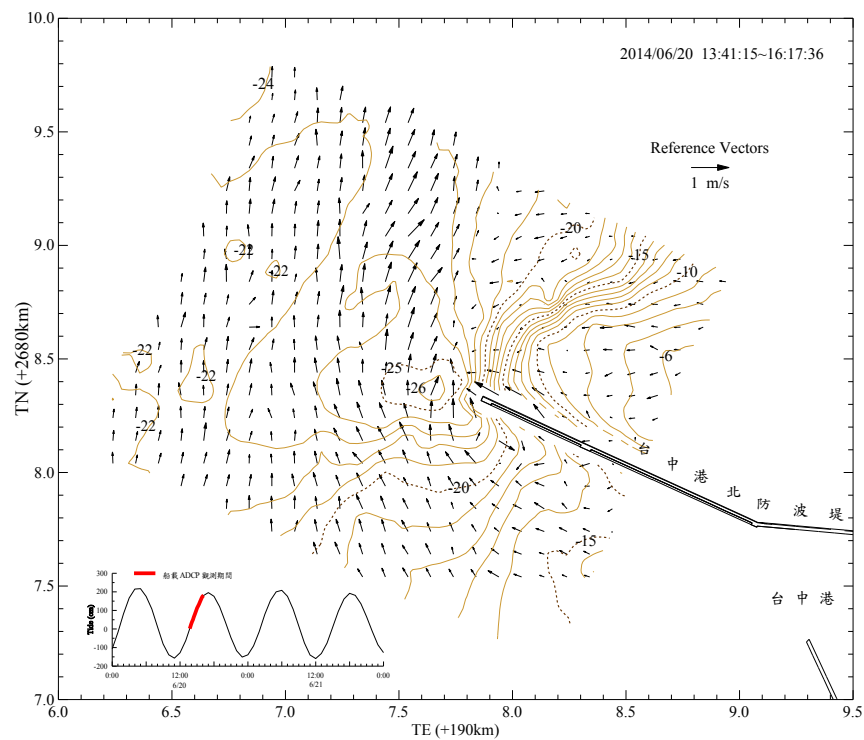


圖 3.32c S3 測次之底層海流流速分佈圖

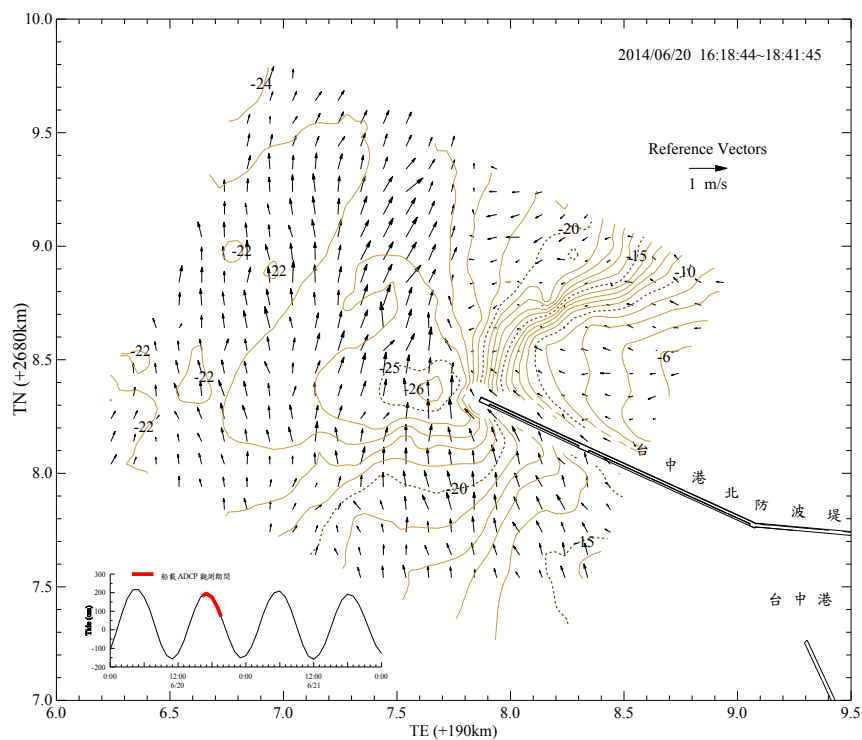


圖 3.32d S4 測次之底層海流流速分佈圖

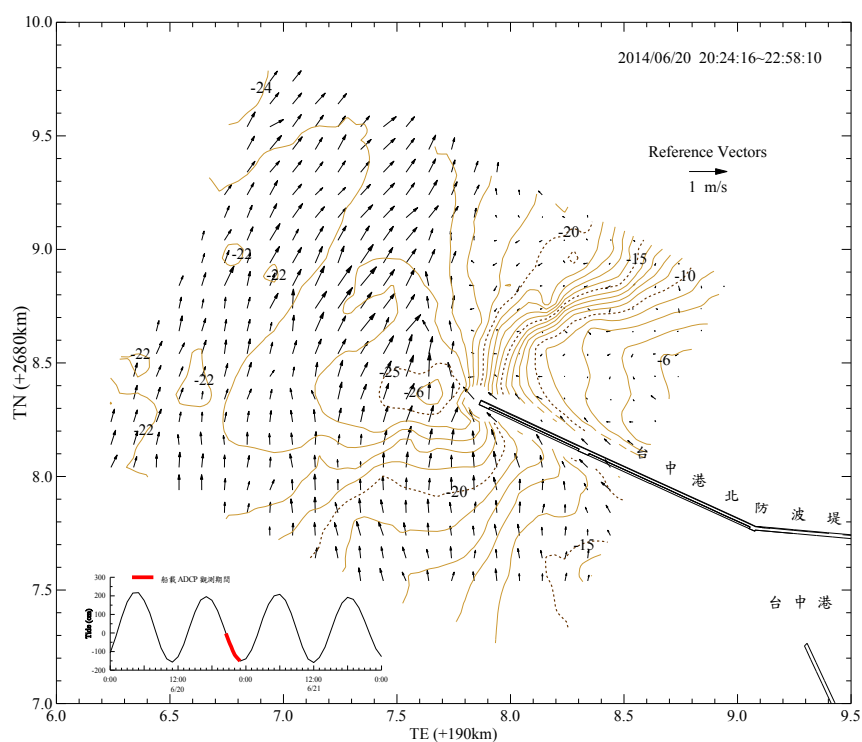


圖 3.32e S5 測次之底層海流流速分佈圖

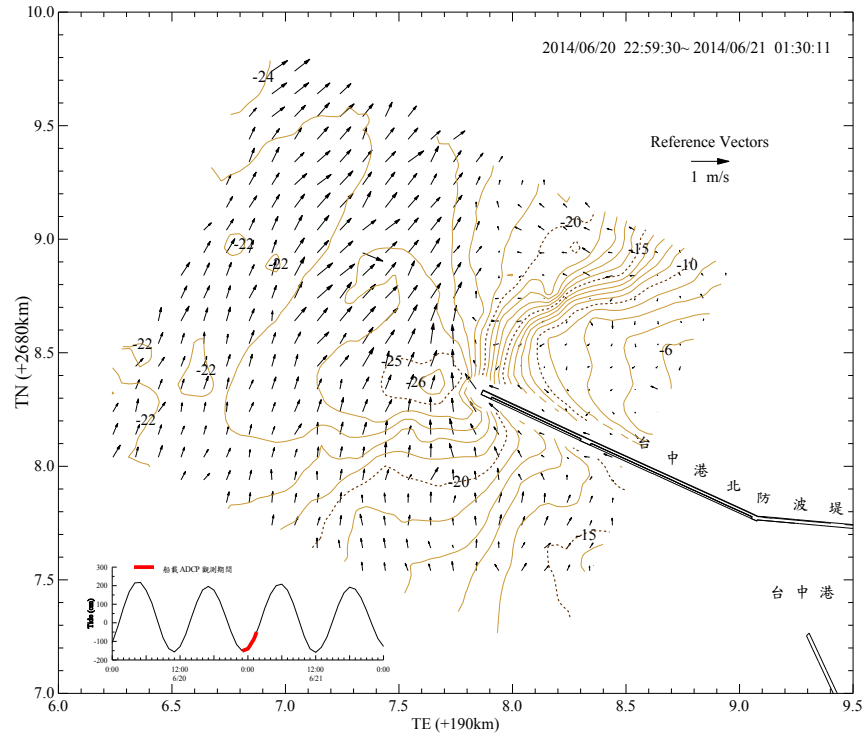


圖 3.32f S6 測次之底層海流流速分佈圖

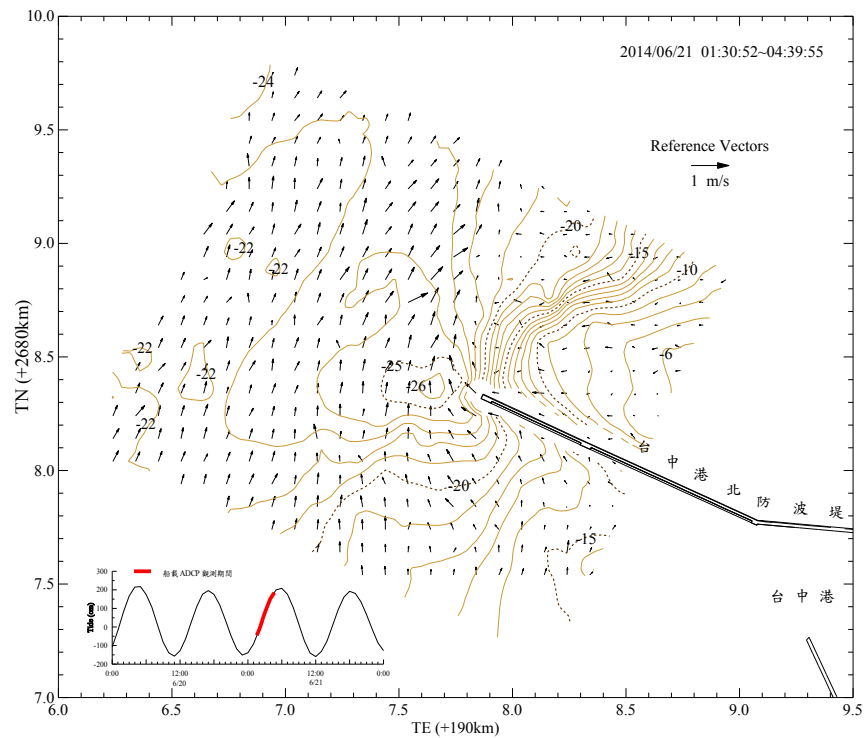


圖 3.32g S7 測次之底層海流流速分佈圖

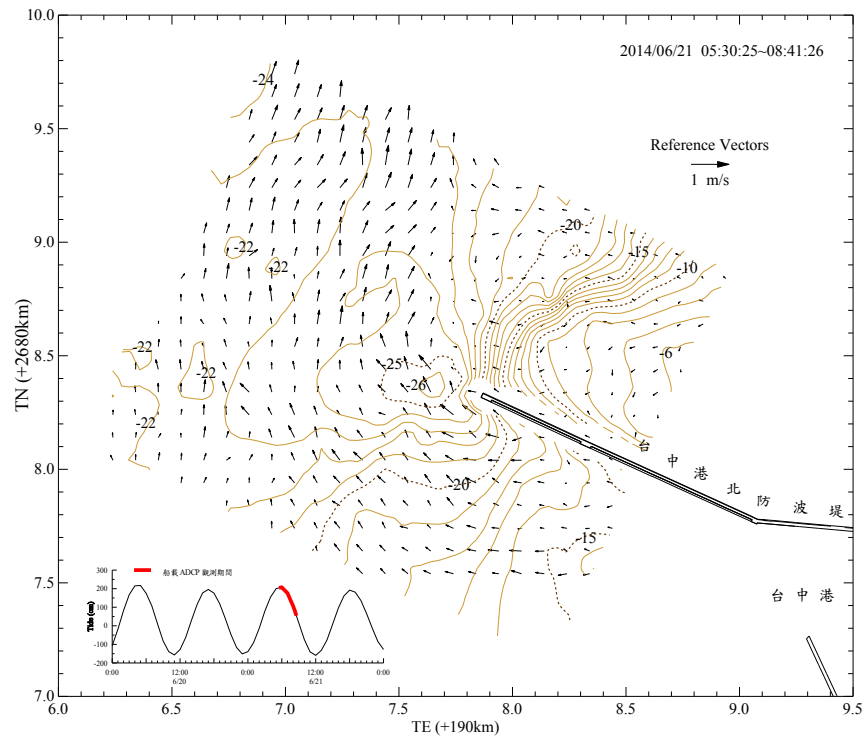


圖 3.32h S8 測次之底層海流流速分佈圖

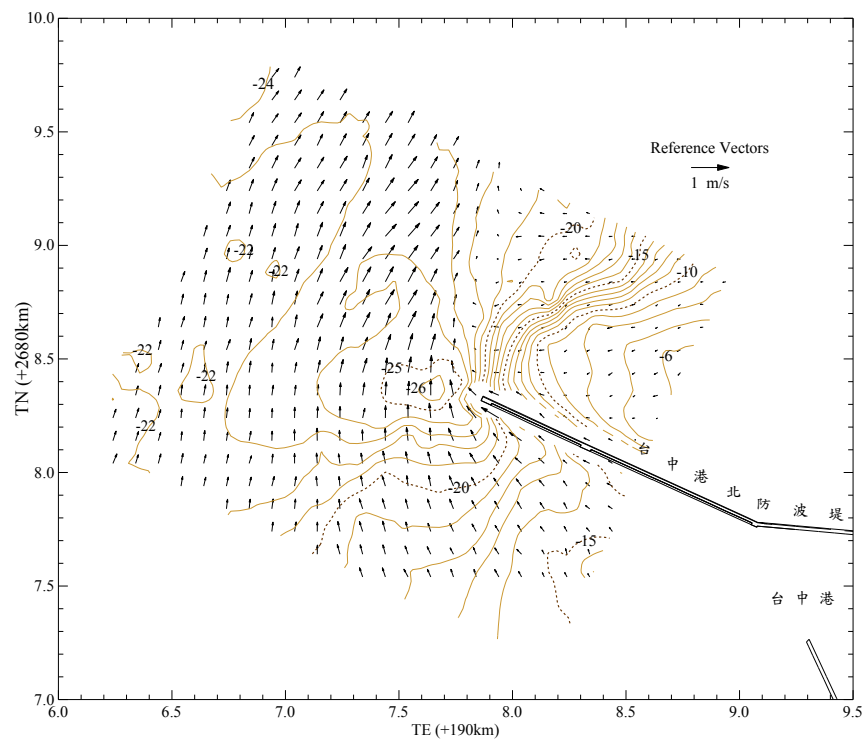


圖 3.33 底層海流流速分佈圖

3.9 堤頭外深坑分析

本研究在船碇 ADCP 海流觀測執行期間，同時以單音束測深儀與即時動態衛星定位系統(RTK)，將水深與定位(坐標、高程)資料進行彙整後，分析北防波堤附近海流觀測區域之水深地形，其結果如圖 3.34 所示。

由本次水深地形分析結果顯示，觀測海域等深線大致呈東北-西南走向，在北防波堤堤頭以西約 200m 處（最深處）存在一處高程約-24~-26m 之凹坑，其範圍直徑約 500m。另外，在臺中港北防波堤西側海域底床，除北防波堤西側凹坑外，其餘地區之底床坡度相當平緩，平均坡度約 1/300，北防波堤以南地區底床地形，除靠近前述凹坑之底床坡度較陡(1/60)外，其餘地區之底床坡度介於 1/90~1/220 間，在北防波堤以北地區底床地形，水深 10~20m 區域之底床坡度較陡，最陡底床坡度達 1/20，而等深線-6~-10m 區間底床坡度較緩，介於 1/65~1/140 之間。

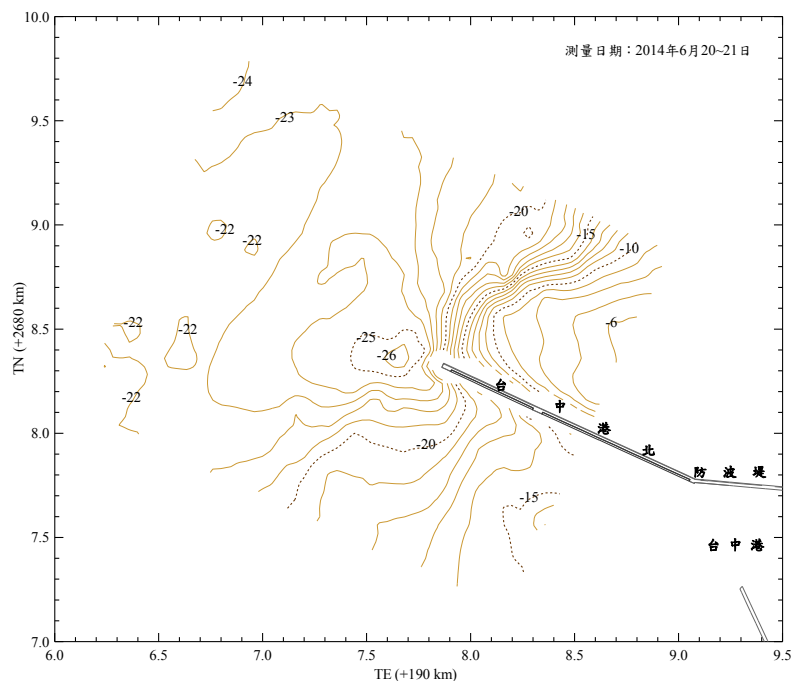


圖 3.34 臺中港北防波堤附近海域等深線圖 (2014/06/21)

本研究將船碇 ADCP 所觀測的回波強度採用 RDI 公司工程師 Deinis 在 1999 年提出的回波強度經驗校正公式，修正 ADCP 測量時由於聲波的球面擴散和介質吸收所產生的能量衰減，然後再計算北防波堤附近海域底層 1m 厚度水層之平均回波強度分佈，藉以進行堤頭外深坑形成的成因等分析。所用經驗校正公式如下：

$$S_v = K_c (E - E_r) + 10 \times \log_{10} \left((273.16 + T_x) R^2 \right) + 2\alpha_t R - L_{DBM} - P_{DBW} + C \quad (3-1)$$

式中 $S_v = \text{dB}/(4 \pi \text{ m})$ 是後向散射係數； $K_c = 0.45 \text{ dB/LSB}$ 是 count 轉換為 dB 的轉換係數； E 是接收信號強度指數 (Received Signal Strength Indicator, RSSI)，即回波強度 (count)； E_r 是未發射信號時的 RSSI 值，即儀器背景噪音 (count)； T_x 是 ADCP 換能器的溫度 ($^{\circ}\text{C}$)； R 是沿波束方向距 ADCP 音鼓的距離 (m)； α_t 是海水對聲波的吸收係數，一般 600kHz、 4°C 時為 0.153 dB/m ； L_{DBM} 是 ADCP 發射脈衝長度取 10 為底的對數值，本次觀測的發射脈衝長度為 37m； P_{DBW} 是 ADCP 發射功率取 10 為底的對數值，一般 600kHz 時約為 34.7W； C 是與 ADCP 系統有關的其他固定係數之和，一般 600kHz 時為 -141.4 dB 。利用上述公式，以測回 S2 (漲潮)、S8 (退潮) 為例，其回波強度校正前後對比如圖 3.35 所示，底部 1m 水層平均回波強度分佈如圖 3.36 所示。

由圖 3.35 顯示，校正前的回波強度在近表層處最大，隨著水深增加而迅速衰減，至底床附近時回波強度僅約為表層處的 1/5，這與聲波在水中的衰減規律相符，亦可見聲波在水中的衰減之強烈。經公式校正後的回波強度剖面則顯示了海水中不同水層處的絕對後向散射強度，聲波的幾何衰減和吸收衰減得到了補償修正。由於源散射強度的大小與散射水體中懸浮物的濃度成正比 (Thorne et al., 1991; Gordon, 1996) 的物理關係，校正後海水表層水體的後向散射強度最弱，而中下層水體，特別是局部底層水體的後向散射強度均較強。一般情況下近岸海域水體由於底部的泥沙再懸浮作用，使得中下層水體的懸浮物質濃度較高，

再加上臺中港北防波堤附近沒有河川入海，使得表層海水易保持低懸浮物質濃度的狀態。對比上述二者，校正後的後向散射剖面總體上符合港區水體的實際特徵，因此校正結果可信。

由圖 3.36 校正後的底層 1m 厚度水層之平均回波強度分佈顯示，無論漲潮還是退潮，觀測範圍內均存在一條源自堤頭附近且向北北東方向延展的高濃度懸浮物質水舌。由本研究船碇 ADCP 各測回底層海流分佈之分析結果，臺中港北防波堤以西海域之流向大致為北北東之方向，而北防波堤南側流向為沿北防波堤往西北方向，且於整個觀測範圍內以堤頭外深坑附近之底層流速最大。因此，可以合理推測如下：北防波堤南側之西北方向海流在堤頭外深坑附近匯入北防波堤西側之北北東方向海流，這種急劇的海流交匯使得該處流線急劇彎曲，在床面附近產生漩渦，劇烈淘刷底部泥沙。此外，觀測區域之底層亦存在平均流，乃致觀測區域無論漲潮或退潮時段整體之潮流均往北北東方向。這穩定的平均流進而把漩渦淘刷起來的泥沙向北北東方向連續輸運，使得該深坑得以穩定存在，若此深坑持續擴大，對堤頭結構物的安全可能構成威脅。

依據目前的觀測數據，尚無法確認該深坑是否已達平衡狀態或仍然繼續刷深，若確有繼續刷深的情況，則北防波堤的安全勢必會受到威脅。另一方面，平均流輸運的泥沙，部分會在北防波堤北側的低流速海域淤積，導致防波堤兩側淤積程度不同，使堤體兩側受力不平衡，進一步增加防波堤崩塌的風險。本研究建議應進行更詳細的觀測，加強對臺中港附近特別是深坑附近海床的動態特徵的了解，以便及早採取因應措施，防範於未然。

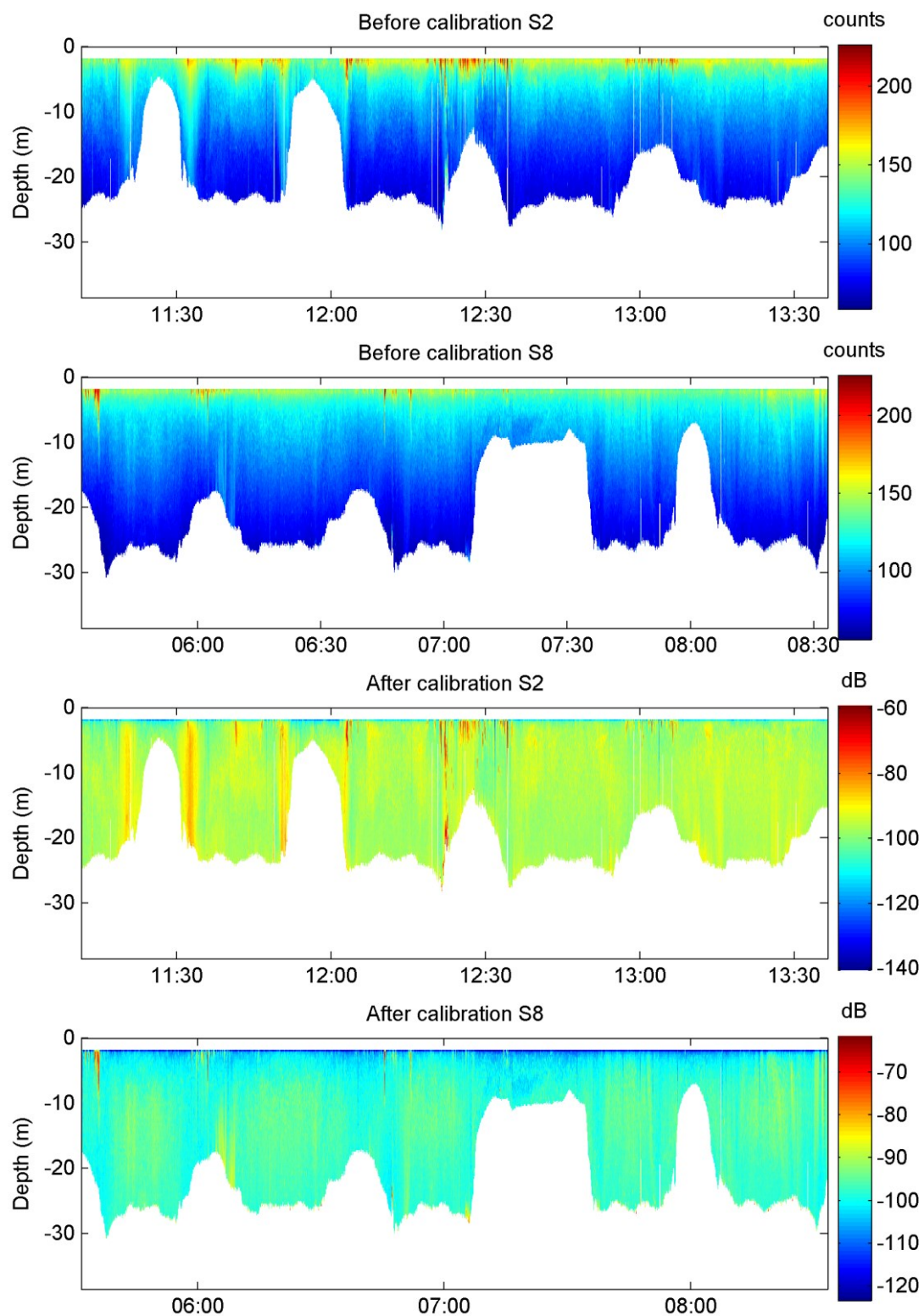


圖 3.35 回波強度校正前後對比圖

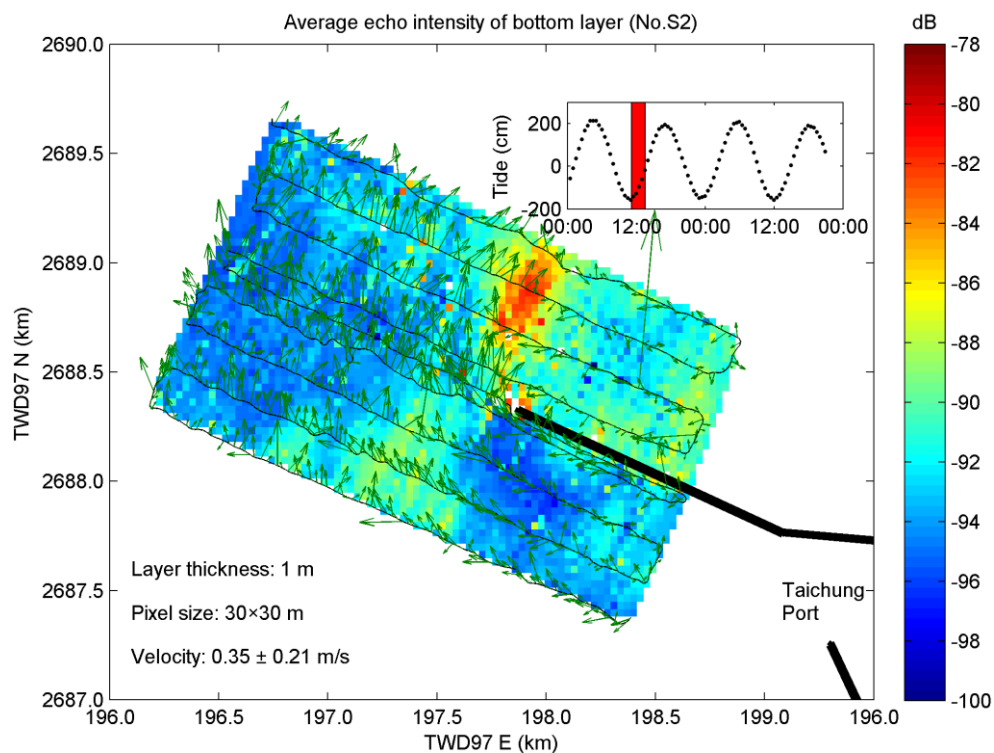


圖 3.36a 漲潮時段底部 1m 水層平均回波強度分佈圖

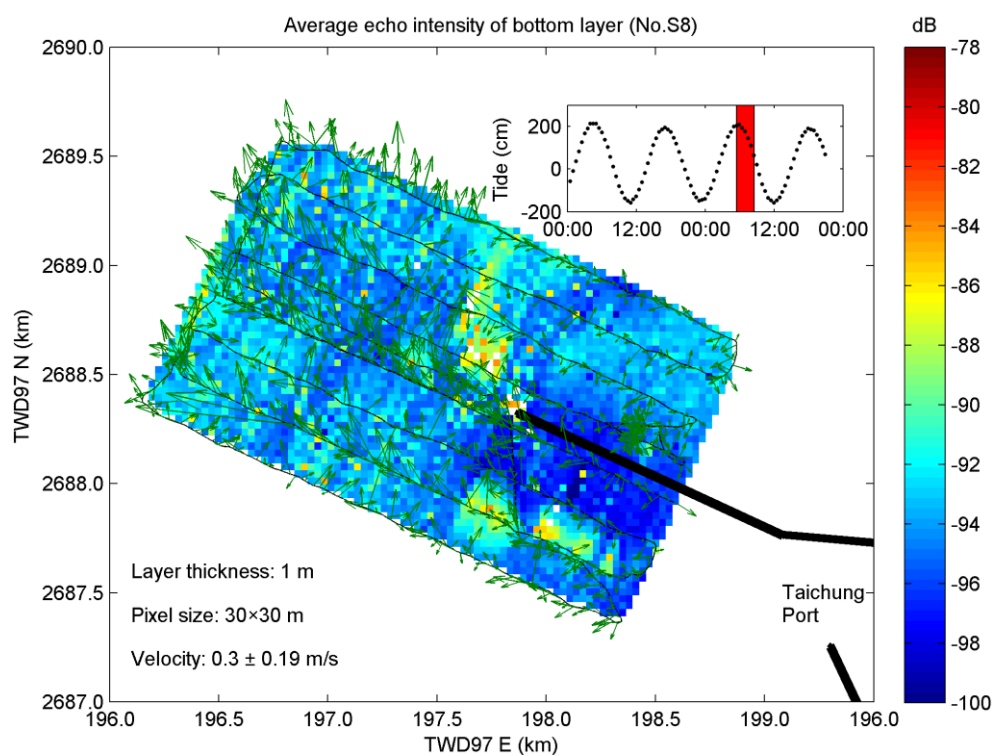


圖 3.36a 退潮時段底部 1m 水層平均回波強度分佈圖

第四章 數值模式

本研究應用 NearCom 模式建置適用於臺中港的近岸波流場模式，以及應用 COBARS 模式建置波浪受結構物以及地形影響之波場數值模式。首先透過資料收集所得的海氣象資料，作為 NearCom 模式的輸入條件，以進行臺中港海域波流場模擬。藉由 NearCom 模擬結果，以選定具代表性的防波堤斷面，並決定波浪條件，以作為 COBARS 模式的輸入條件，並進行不同條件狀況下之模擬，藉此探討防波堤受波浪衝擊之作用。模式建置流程如圖 4.1 所示，NearCom 以及 COBARS 模式說明如下。

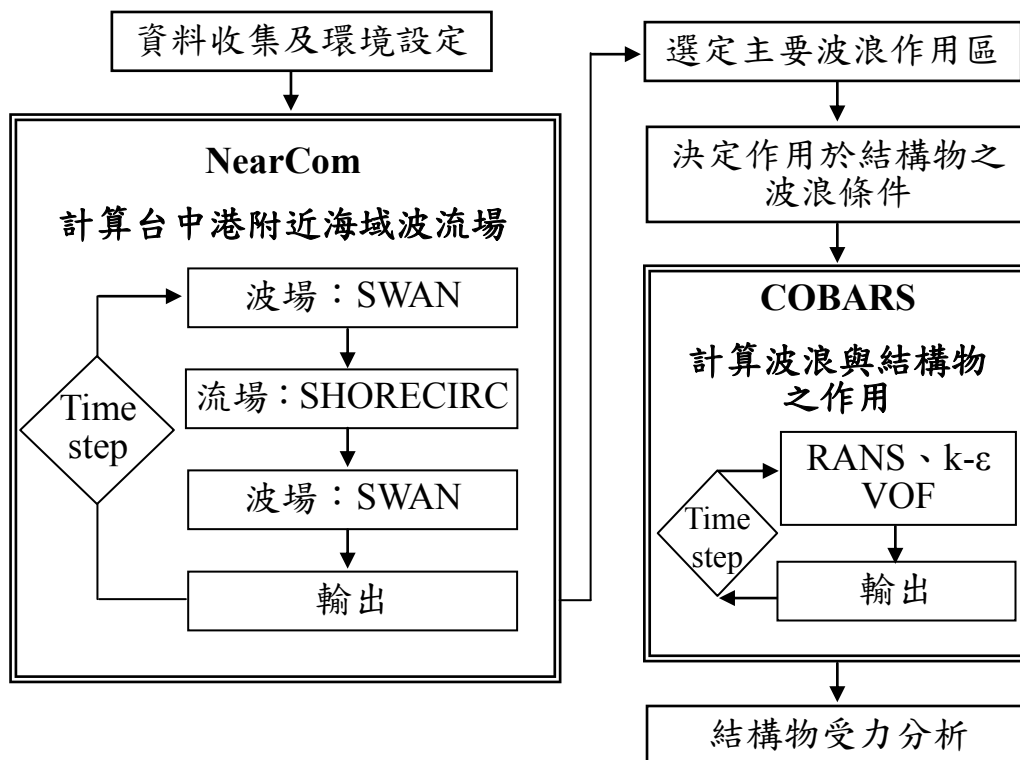


圖4.1 模式建置流程圖

4.1 NearCom 模式

本研究利用 NearCom 模式建立臺中港周邊波、流場數值模式，NearCom 近岸系統是結合數種子模式的整合系統模式 (Shi 等，2012)，主程式用於連結其他子模式 (通常為波浪、潮流、近岸流及漂沙) 並且處理資料的輸入、輸出及模式間資料轉換。NearCom 常用配置是結合 REF/DIF-1 波浪模式 (Kirby 和 Dalrymple，1992)、SHORECIRC 近岸流模式 (Svendsen 等，2003) 和 HH 漂沙模式 (Haas 等，2003)，近期 Newberger 和 Allen (2007) 則結合波浪模式以及三維環流模式 (POM)。由於 NearCom 是著重預測近岸波浪與潮流及其所引發的現象，故 NearCom 系統主要是針對海岸線至水深大約 10 米處的近岸地區所開發的模式。近年 Shi 等 (2012) 整合 SWAN 波浪模式並且修改系統中的 SHORECIRC 模式版本，將其擴展應用至大尺度海灘系統。

而在數值計算方面，原始版本的 SHORECIRC 是架構在直角坐標系統的方程式，在時間上採用有限差分預測校正法，而空間差分則是使用二階中央差分。曲線座標版本的 SHORECIRC 則將卡式坐標變換到廣義曲線網格系統 (Shi 等，2003)，並更進一步使用 CFL-free 的數值方法，以提高計算效率 (Shi 等，2007)。

最近 NearCom 應用於各種沿岸系統的案例日益增加，例如河口的波流相互作用之系統、暴潮引起的沿岸溢淹、沙灘和沙丘侵蝕及潮灘過程等。在大尺度區域的應用上，潮汐、風和波浪扮演了重要的角色，而這些應用必需考慮到模式在長時間間隔 (time step) 模擬的效率及穩定性。雖然最近版本使用的 CFL-free 數值方法在長時間間隔應用很有效率的，但在極大的 Courant 數仍會引起所謂的“ADI 效應” (Casulli 和 Cheng，1992)。

本研究使用的 SHORECIRC 模式為 Dr. F.Y. Shi 所提供的新版模式，該模式使用結合有限體積及有限差分的 TVD 法 (Toro，2009)。完全非線性 Boussinesq 模式以 TVD 法求解，在計算碎波與海岸線變遷間

題上，已證明 TVD 是一個穩定及有效率的數值方法 (Shi 等，2011a; 2011b; Tehranirad 等，2011；Kirby 等，2013)。使用 TVD 法求解 Boussinesq 方程及淺水方程式亦皆有很好的表現 (Tonelli 和 Petti，2009；Roeber 等，2010；Shiach 和 Mingham，2009；Erduran 等，2005)。

4.1.1 SHORECIRC 模式

SHORECIRC 是擬三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu 和 Svendsen (1999) 將瞬時水平速度設為為紊流項 u'^α 、波浪項 u_w^α 、水深及短波平均速度項 u^α 、以及短波平均速度的垂直變化 u_1^α 所組成，如式(3.1.1)：

$$u_{ins}^\alpha = u'^\alpha + u_w^\alpha + u^\alpha + u_1^\alpha \quad (4.1.1)$$

在廣義曲線座標， $()^\alpha$ 代表向量的逆變分量 (contravariant component)，我們使用上標代表逆變分量，用下標代表笛卡爾分量(下同)，而水深及短波平均速度 u^α 依 Lagrangian 平均定義如下：

$$u^\alpha = \frac{1}{h} \overline{\int_h^\zeta u_{ins}^\alpha dz} \quad (4.1.2)$$

此處 ζ 代表瞬時自由表面高程，這種分解方式不同於 Haas 等 (2003) 依 Eulerian 觀點來分解。Lagrangian 平均法假設：

$$\int_{-h}^\eta u_1^\alpha dz = -Q_w^\alpha \quad (4.1.3)$$

上式中 Q_w^α 或 $Q_{w\alpha}$ (Cartesian expression) 是短波通量， η 是波浪平均自由表面水位。

SHORECIRC 方程式在逆變形式下可寫成：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} [J u^\alpha H] = 0 \quad (4.1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\alpha H}{\partial t} + (u^\alpha u^\beta H)_{,\beta} + f^\alpha + \frac{1}{\rho} (S^{\alpha\beta})_{,\beta} + gHg^{\alpha\beta} \frac{\partial \eta}{\partial x_\beta} + \frac{\tau_b^\alpha}{\rho} - \frac{\tau_s^\alpha}{\rho} \\ - (H\tau^{\alpha\beta})_{,\beta} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (4.1.5)$$

其中 $H = h + \eta$ ， h 是靜止水深、 ρ 是水的密度、 f^α 是科氏力， $(\cdot)_{,\alpha}$ 代表共變導數，而 $g^{\alpha\beta}$ 是逆變度量張量， $S^{\alpha\beta}$ 是輻射應力 (Longuet-Higgins 和 Stewart, 1962; 1964)，其逆變形式在 Shi 等(2003) 中曾提及說明。 τ_s^α 和 τ_b^α 分別為風應力和底床應力， $\tau^{\alpha\beta}$ 代表等水深情況下的紊流剪力：

$$\tau^{\alpha\beta} = \nu_t T^{\alpha\beta} \quad (4.1.6)$$

其中 $T^{\alpha\beta}$ 是應變張量， ν_t 是渦粘度係數，渦黏滯度會影響碎波及底床所產生的紊流，可表示如下：

$$\nu_t = C_1 \kappa \sqrt{\frac{f_{cw}}{2} u_0 h} + Mh \left(\frac{D}{\rho}\right)^{1/3} + \nu_{t0} + \nu_s \quad (4.1.7)$$

其中 κ 是馮卡曼常數 ($k \sim 0.4$)， u_0 是波浪模式中短波的粒子速度振幅， D 是波浪模式中單位面積之能量消散。 $C_1 \sim 0.2$ 和 $M = 0.08$ (Svendsen 等, 2003)。常數 ν_{t0} 是由實驗所得的背景渦黏滯度。如果關閉三維頻散時可以使用較大的值(紊流黏滯度的 10~20 倍)。

在 SHORECIRC 中的風應力使用 Van Dorn's (1953) 公式：

$$\tau_s^\alpha = f_a \rho_a |\mathbf{W}| W_\alpha \quad (4.1.8)$$

其中 $\mathbf{W}$ 是水面上 10 米高的風速， f_a 是風阻係數 (Dean 和 Dalrymple, 1991)， ρ_a 代表空氣密度。

在 SHORECIRC 中之底床應力採用 Svendsen 和 Putrevu (1990) 結合波和流的波浪平均底床應力的公式：

$$\tau_b^\alpha = f_{cw} \rho u_0 (\beta_1 u_b^\alpha + \beta_2 u_w^\alpha). \quad (4.1.9)$$

其中 u_w 為在底床處的短波粒子速度振幅， f_{cw} 為摩擦係數， u_b^α 為底床流速，可從方程式中垂直項的理論解獲得， β_1 和 β_2 是流和波動的權重係

數 (Svendsen 和 Putrevu, 1990), 並且使用線性波理論來評估, ROT 在式(4.1.5)代表與大氣壓相關的剩餘項和三維頻散 (Shi 等, 2003)。

所結合的有限體積法和有限差分法, 並不適合在以上的逆變形式方程式。使用笛卡爾和逆變式相結合, 可以得到方程式的保守形式 (Shi 和 Sun, 1995; Shi 等, 1998), 即笛卡爾坐標 x_α 和廣義曲線坐標系 ξ_α 之間進行坐標變換。

速度向量的逆變項可表示如下：

$$u^\alpha = u_\beta L_\beta^\alpha \quad (4.1.10)$$

其中 u_β 是速度向量的笛卡爾項並且

$$L_\beta^\alpha = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x_\beta} \quad (4.1.11)$$

在直角坐標中的導數可(4.1.12)式轉換至曲線坐標

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} = L_\alpha^\beta \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \quad (4.1.12)$$

SHORECIRC 方程式的守恆形式如下，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial J P^\alpha}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (4.1.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H u_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \left[J P^\beta u_\alpha + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) J L_\alpha^\beta \right] + f_\alpha - g \eta \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} (h J L_\alpha^\beta) \\ + \frac{1}{\rho} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (S_{\alpha\beta} J L_\beta^\gamma) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (\tau_{\alpha\beta} J H L_\beta^\gamma) + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (4.1.14)$$

其中 $P^\alpha = H u^\alpha$, 表示體積通量的逆變項； f_α 代表科氏力的笛卡爾項, 如 $(-fHv, fHu)$, 其中 (u, v) 代表直角坐標中的速度； $S_{\alpha\gamma}$ 代表輻射應力的笛卡爾項； τ_α^b 和 τ_α^s 是底床應力和風應力的笛卡爾項, 注意(4.1.14)式的推導使用度量公制法(metric identity law, Thompson 等, 1985), 如：

$$\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (JL_\beta^\alpha) \equiv 0 \quad (4.1.15)$$

$$-gHJ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} \left[\frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\beta^\alpha \right] + g\eta \frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (hJL_\beta^\alpha) \quad (4.1.16)$$

使用(4.1.13)式和(4.1.14)式會比使用(4.1.3)式和(4.1.4)式有以下優點：(1)他們是守恆形式可用於混合數值方法中。(2)不同於(4.1.5)中的逆變項，所有外力項在直角座標中將恢復為向量形式。(3)輻射應力項 $S_{\alpha\beta}$ 使用直角坐標中的原始形式，因此二階張量不需要轉換。缺點是(4.1.14)式包含笛卡爾項 u_α 和逆變項 P^α ，然而在 SHORECIRC 使用的混合數值方法，為方便求解這二個變數，採用顯式法，而非隱式法 (Shi 等，2007)。

紊流剪應力項的處理如同輻射應力項的方式， $\tau_{\alpha\beta}$ 被定義在直角坐標中如下：

$$\tau_{\alpha\beta} = \nu_t \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (4.1.17)$$

使用(4.1.12)式可求得在直角坐標中的導數。

水平速度的垂直結構的控制方程式，可求解最低階之流的垂直變化方程式之解析解得之：

$$\frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial z} \right) = F_\alpha \quad (4.1.18)$$

其中 ν_t 是渦黏滯係數， F_α 為局部外力項(local forcing)，其一般形式如下：

$$F_\alpha = \frac{1}{\rho h} f_{w\alpha} - f_\alpha^{lrad} + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (4.1.19)$$

其中 f_α^{lrad} 代表局部輻射應力如 Putrevu 和 Svendsen (1999)所定義。在離岸區域無波力時，(4.1.19)式減化為

$$F^\alpha = \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (4.1.20)$$

(4.1.18)式的解可依 Putrevu 和 Svendsen (1999) 的方式被解出。底床流速 u_α^b 可由在底床的 u^α 和 $u_{1\alpha}$ 來表示，如：

$$u_\alpha^b = u_\alpha + u_{1\alpha}(z = -h) \quad (4.1.21)$$

4.1.2 SWAN 模式

SWAN(Simulating Waves Nearshore)，是由荷蘭的 Delft 大學統合以往學者的研究並加以改良而成風浪模式 (Booij 等，1999)，為求解波浪作用力之平衡方程式，在廣義曲線坐標下，其控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial(JC_g^\alpha)}{\partial \xi_\alpha} + \frac{\partial(C_{g\sigma}N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_{g\theta}N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (4.1.22)$$

其中 ξ_α 為曲線坐標，其定義與曲線型 SHORECIRC 模式相同； σ 是相對角頻率； θ 是每個波的前進方向； C_g^α 代表能量傳遞速度的逆變項，可利用坐標轉換求得：

$$C_g^\alpha = C_{g\beta} L_\beta^\alpha \quad (4.1.23)$$

其中在矩形直角坐標 $C_{g\beta} = (C_{gx}, C_{gy})$ ，為了使其符合環流方程式，(4.1.22) 式是張量不變形式，如 Booij 等 (1997) 中擴展的數值形式。 $C_{g\sigma}$ 和 $C_{g\theta}$ 分別代表在 σ 和 θ 能量傳遞速度， S 表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數， N 是波浪作用力，其定義如下：

$$N = E(\xi^\alpha, \sigma, \theta, t) / \sigma \quad (4.1.24)$$

式中 E 是波浪能量密度。

至於流對波變形的影響詳述如下：

A. 群波速度(包含流的項)

$$C_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_{\alpha}}{|\mathbf{k}|^2} + u_{E\alpha} \quad (4.1.25)$$

其中 k_{α} 或 $\mathbf{k}$ 代表波速， d 是短波平均下之水深，而 $d = h + \eta$ ， $u_{E\alpha} = u_a - Q_{w\alpha} / H$ 為回流項或 Eulerian 平均速度。

B. 相對頻率的改變

$$C_{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u}_E \cdot \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial s} \quad (4.1.26)$$

C. 流導致之波浪折射

$$C_{\theta} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial m} \right) \quad (4.1.27)$$

其中 s 是在方向 θ 的空間坐標， m 是 s 的法線坐標。

4.1.3 模式之率定驗證

數值模式之品質管制主要包括：(1)控制方程式之品管；(2)數值技巧之品管；(3)模式計算結果之品管。本研究應用美國 Delaware 大學發展之 NearCom 整合模式系統來模擬臺中港海域之波流場特性，由於此系統已被廣泛的應用於許多地區，其在模式控制方程式與數值技巧方面之品管均已有相當程度之公信力。因此本模式之品管重點將只在於模式參數之率定與模擬結果之驗證。

1. 模式模擬區域之選取

模式在計算前須先將所欲模擬之區域網格化，網格大小之選取，一方面希望愈小愈好以增加解析度，另一方面又希望愈大愈好以減小所需的電腦記憶容量以及加快電腦運算速度。本研究模擬區域(如圖 4.2 方框所示) 由北涵蓋臺中港海域至彰濱工業區崙尾區海域，其沿岸長度

約為 41 公里，向離岸範圍則延伸至水深-50 公尺處，長度約為 15 公里。圖 4.3 則為經座標轉換後之海潮流模擬範圍及地形水深分佈圖，模式領域在水平方向劃分為 408x148 個正方網格，每一網格之邊長為 100 公尺。表 4-1 則詳列模式所運用之計算時間間距及地理座標之轉換參數，模式開放邊界資料，採用臺灣近岸海象預報系統（TaiCOM Model）所提供的逐時預測水位。



圖4.2 模擬區域示意圖

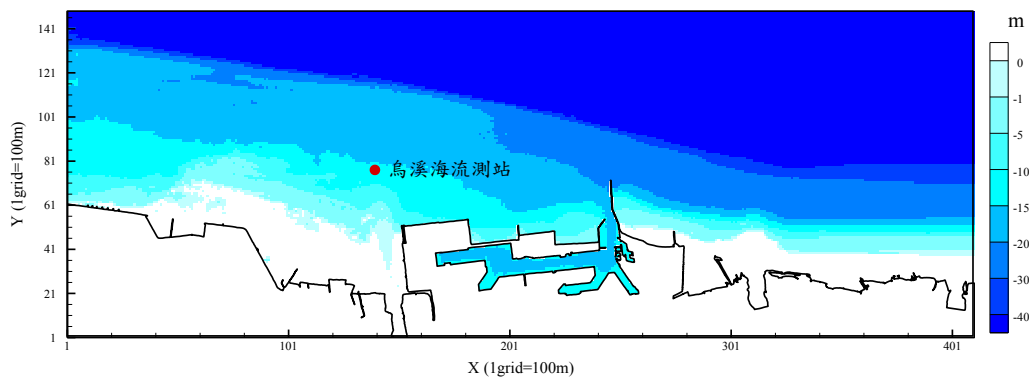


圖4.3 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖

表 4-1 大區域海潮流模式之格網及計算條件

模式面積	40.8 公里×14.8 公里
格網大小	100 公尺×100 公尺
格網數目	408×148
原點座標 (Twd 67)	E=191, 800 N=2, 663, 500
轉角 (由正北向順時針)	62°

2. 模式率定

水動力模式之主要參數包括渦動粘性係數及底床磨擦係數，這些參數值的選取將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。一般來說，模式使用之參數值必須經由模式之率定來決定。

本研究在流場模式之率定方面，利用本所設置於北防波堤堤頭外側 570m 水深 25m 處以 AWCP 儀器長期量測的海流資料(24°18'04"N 120°28'59"E)，以及本所 2011 年於臺中港南側，烏溪（又稱大肚溪）外海 (24°13'6.8"N 120°25'30.3"E) 之海流測站實測海流資料來進行模式檢核與驗證。並與臺中港內 (24°17'16"N, 120°31'57"E) 及北防波堤外 AWCP 測站的水位資料進行比對，測站位置如圖 4.4。



圖4.4 臺中港海象測站示意圖

SHORECIRC 模式之主要參數為底床磨擦係數與渦動黏性係數，其值將影響模式的穩定性及計算結果的準確確性。本研究利用測站資料進行參數值率定，測站實測資料與模擬結果的均方根誤差 (RMSE) 如圖 4.5 所示，率定所得到底床磨擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。

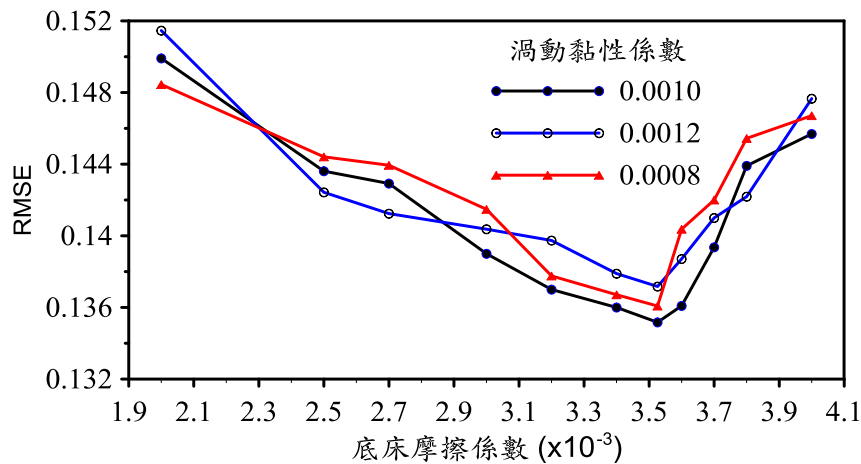


圖4.5 NearCom模式參數率定圖

流場模式計算結果，其沿岸方向之流速分量以往北為正，離岸方向流速分量則以離岸方向(往西方向)為正。模式計算結果與實測值之比較分析如下：

圖 4.6 與圖 4.7 分別為臺中港內以及北防波堤外 AWCP 的潮位及水位記錄與海潮流模式模擬結果，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中可發現此二處水位變化差異不大，模式計算結果略小於實測記錄，但大致相符。本模式開放邊界潮位資料係採用大區域模式計算所得資料，可預期會有誤差存在，但結果尚可接受。

圖 4.8 與圖 4.9 對烏溪海流測站記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.3m/sec，離岸方向最大流速 0.12m/sec。沿岸流速與離岸流速二者位相差約二分之一週期，約為 6 小時，圖中顯示模擬結果與實測值尚為吻合。

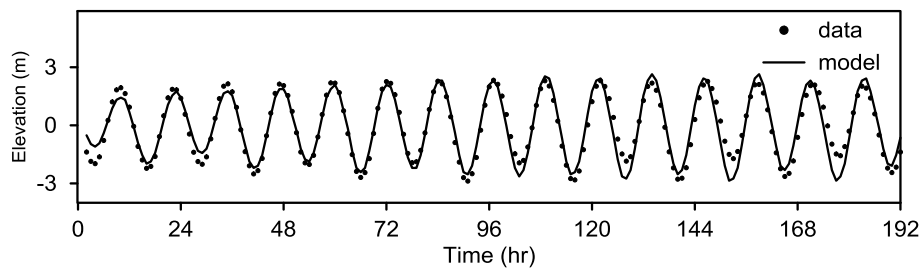


圖4.6 臺中港內實測潮位與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

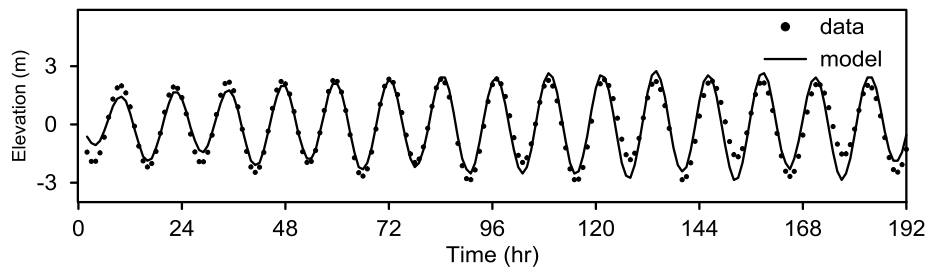


圖4.7 臺中港北防波堤外(AWCP)實測水位與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

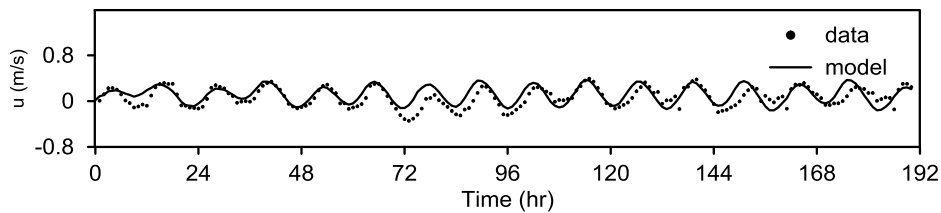


圖4.8 烏溪外海實測沿岸海流與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

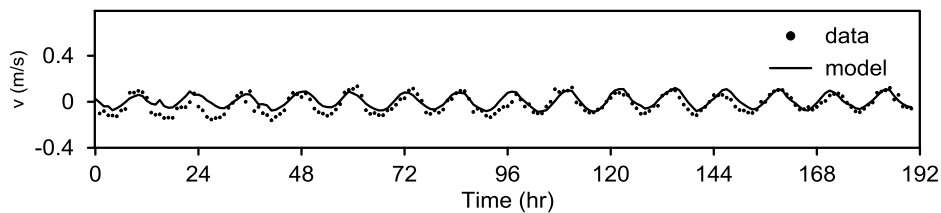


圖4.9 烏溪外海實測離岸海流與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

圖 4.10 與圖 4.11 對臺中港北防波堤外 AWCP 站測記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.64m/sec，離岸方向最大流速 0.34m/sec。此處海域存在恆流，沿岸流速平均為 0.20 m/sec，離岸流速平均為 0.15 m/sec，整體流向約為 N 方。此處受到波流及突堤影響，流場較為複雜，圖中顯示模擬結果不如烏溪外海測站理想，但趨勢仍與實測值相符。由以上分析可驗證本模式可適切模擬臺中港區域海潮流變化。

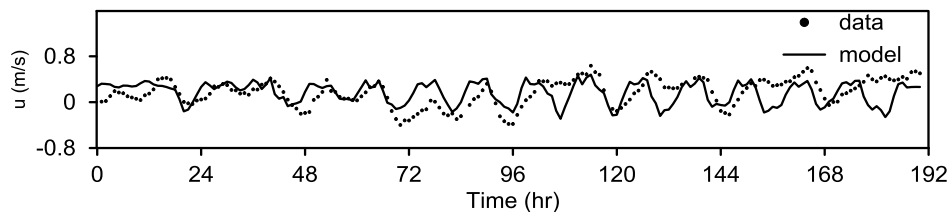


圖4.10 臺中港北防波堤(AWCP)實測沿岸海流與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

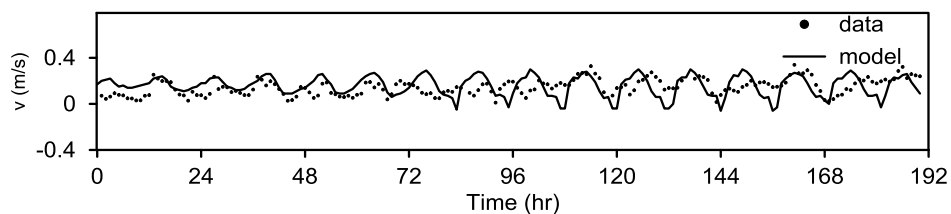


圖4.11 臺中港北防波堤(AWCP)實測離岸海流與模式計算比較圖
(起始時間：2011/05/14 00:00:00)

4.2 COBARS 模式

由 NearCom 模式模擬出臺中港周邊波、流場後，再依其結果，選定具代表性的防波堤斷面進行結構物與波浪作用的數值模擬，計算結構物受波浪交互作用影響下水位的變化，結構物受波浪作用的壓力，本研究使用 COBRAS (Cornell Breaking wave and Structure) 模式。此數值模式原為美國 Los Alamos 國家實驗用以計算二維不可壓縮的流體之數值模式「RIPPLE」(Kothe 等，1991)，由 Liu 和 Lin (1997) 將其修改以計算碎波相關問題，後來作波浪與孔隙介質交互作用問題 (Liu 等，1999) 和計算波浪與近岸複合結構物交互作用問題 (Hsu 等，2002)。此數值模型以 Fortran 程式語言撰寫，應用有限差分法 (Finite Difference Method) 計算二維 Reynolds Averaged Stokes (RANS) 方程式，結合非線性 k- ϵ 紊流模式用以求解流場中的紊流動能 k 與紊流消散率 ϵ ，並利用流體體積法 (Volume of Fluid, VOF) 描述自由液面，可計算壓力、水位變化、水平與垂直方向的流速以及越波量等。

4.2.1 控制方程式

假設流體為不可壓縮且黏性流動之牛頓流體，為了描述其流場的變動，可使用二維卡氏座標系統的質量守恆與動量守恆方程式。分別表示如下：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.2.2)$$

式(4.2.1)、(4.2.2)為 Navier-Stokes 方程式(NSE)。其中 $i, j=1, 2$ 分別表示為二維水平方向與垂直方向。 u_i 與 g_i 表示為 i 方向上的速度分量與重力加速度分量。 ρ 、 p 、 t 分別表示為密度、壓力、時間。 τ_{ij} 為牛頓流體假設下的分子剪應力張量可表示為：

$$\tau_{ij} = 2\mu\sigma_{ij} \quad (4.2.3)$$

上式(4.2.3)中 m 表示為動力黏滯系數以及 s_{ij} 為剪應變率張量可以進一步表示如下：

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.2.4)$$

由於現今的計算機的能力有限的情況下，直接求解 NSE(DNS) 模擬紊流流況下會消耗大量的運算容量與時間。因此直接求解 NSE 只能應用於低雷諾數的流況下。利用 NSE 取時間平均的方法為文獻上常採用的方法，這種對時間取平均的方法稱為雷諾分離法 (Reynolds decomposition)，其方法為將瞬時速度與瞬時壓力已時間平均量與瞬時擾動量表示之：

$$u_i = \langle u_i \rangle + u'_i \quad (4.2.5)$$

$$p_i = \langle p_i \rangle + p'_i \quad (4.2.6)$$

上兩式(4.2.5)、(4.2.6)中「 $\langle \rangle$ 」表示對物理量取時間平均，上標「 $'$ 」表示為物理量的瞬時擾動量。若瞬時擾動物理量為隨機且滿足高斯常態分佈則可以將瞬時擾動表示如下：

$$\langle u'_i \rangle = \langle p'_i \rangle \quad (4.2.7)$$

將上面兩式(4.2.5)、(4.2.6)代入式(4.2.1)、(4.2.2)中，並取時間平均，可以得到時間平均條件下的流場控制方程式：

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2.8)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (4.2.9)$$

可將上式(4.2.9)同乘以 ρ 改寫如下：

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (4.2.10)$$

而式(4.2.8)與式(4.2.9)或(4.2.10)即為 RANS 方程式。其中式(4.2.10)中 $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ 項為雷諾應力項(Reynolds stress)的張量式，其物理意義為受到對流作用的影響下而產生的動量交換量，用以表示紊流的影響。

4.2.2 k-ε 紊流閉合模式

由控制方程式中式(4.2.1)、(4.2.2)的NSE比較取時間平均之式(4.2.8)與式(4.2.10)的 RANS 方程式，增加了雷諾應力項 $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ ，由於雷諾應力項的增加使得 RANS 方程式中帶求解的變數多於方程式的數目，即為超靜定系統。導致 RANS 方程式無法閉合求解。因此為了求解則需要額外加入本構方程式(constitutive equation)來解決問題，此種求解方式稱為模式化。

為了解決超靜定系統的問題，本研究加入 k-ε 紊流閉合模式求解 RANS 方程式中的雷諾應力項。k-ε 紊流閉合模式原理式應用紊流動能 k (turbulence kinetic energy)和紊流消散率 ε (turbulence dissipation)來建立本構方程式以解決超靜定系統的問題。

一開始假設為線性及等向性(isotropic)之渦流動滯度(eddy viscosity)的閉合模式可將式(4.2.10)中的雷諾應力張量(Reynolds stress)表示如下：

$$\langle u'_i u'_j \rangle = -2\nu_t \langle \sigma_{ij} \rangle + \frac{2}{3} \kappa \sigma_{ij} \quad (4.2.11)$$

上式(4.2.11)中 σ_{ij} 為 Kronecker delta 函數，而 ν_t 為渦動滯度可以表示如下：

$$\nu_t = C_d \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4.2.12)$$

上式(4.2.12)中的 C_d 為經驗參數，根據 Rodi (1980) 建議 $C_d = 0.09$ ，而上式(4.2.12)中紊流動能 k 與紊流消散率 ε 可定義如下：

$$k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle \quad (4.2.13)$$

$$\varepsilon = \nu \left\langle \left(\frac{\partial u'_i}{x_j} \right)^2 \right\rangle \quad (4.2.14)$$

式(4.2.14)中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 為分子運動黏滯係數(molecular kinematic viscosity)。

Shih 等(1996) 提出以時間平均流速的剪應變率(strain rate)參數化雷諾應力張量，而這些參數是由潛堤附近紊流之研究所校驗制定的。本研究之模式即採用 Shih 等(1996) 所提出的閉合模式，表示如下：

$$\begin{aligned} \rho \langle u'_i u'_j \rangle = & -C_d \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij} \\ & - \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[\begin{aligned} & C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \\ & + C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \\ & + C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.2.15)$$

上式(4.2.15)中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_d 是經驗參數，其中 C_1 、 C_2 、 C_3 可由在 Couette shear flow 實驗中所量測而得的，根據 Lin 和 Liu (1998) 三個參數分別為 $C_1 = 0.0054$ 、 $C_2 = -0.0171$ 、 $C_3 = 0.0027$ 。當 $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ 時，則上式(4.2.15)可還原成線性且等向性之模型如式(4.2.12)，Rodi(1980)建議 $C_d = 0.09$ 。

然而引用以上常數經驗參數，在一些較極端的條件下，這經驗參數的適用範圍將受到限制，例如 $(k/\varepsilon) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right) \rightarrow \infty$ 時，依照式(4.2.15)和 $C_d = 0.09$ 的條件下紊流動能 i 方向之 $\langle u'_i u'_i \rangle$ 可能為負值，為了滿足物理上無負值紊流動能的限制，應用上 Shih 等 (1996) 給定 C_d 為 $(k/\varepsilon) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right)$

的反函數，Lin 和 Liu(1998)同樣將 C_1 、 C_2 、 C_3 給定為 $(k/\varepsilon)\left(\frac{\partial\langle u_i \rangle}{\partial x_j}\right)^2$ 的反函數，提出參數數值修正如下：

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + D_{\max}^2} \\ C_2 &= \frac{1}{58.5 + D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + D_{\max}^2} \end{aligned} \quad (4.2.16)$$

上式參數之修正，能確保紊流場中的紊流速度不被忽略且滿足雷諾應力項。上式(4.2.16)中的 $S_{\max}$ 與 $D_{\max}$ 分別表示如下：

$$S_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right| \right] = 0 \quad (4.2.17)$$

$$D_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right] = 0 \quad (4.2.18)$$

上兩式(4.2.17)、(4.2.18) $S_{\max}$ 與 $D_{\max}$ 若趨近於零時，則經驗參數便可以還原為前面所敘述 $C_d = 0.09$ 、 $C_1 = 0.0054$ 、 $C_2 = -0.0171$ 、 $C_3 = 0.0027$ 之經驗參數。

紊流動能 k 與紊流消散率 ε 的控制方程式可以直接由 Naver-Stokes 方程式推導得到，其中雷諾應力僅在紊流動能 k 方程式的紊流動能生成項，根據 Rodi(1980)，紊流動能 k 與紊流消散率 ε 之控制方程式如下：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (4.2.19)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\
& - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \\
& - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}
\end{aligned} \tag{4.2.20}$$

式(4.2.19)與式(4.2.20)中 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 為實驗校驗所得到的經驗參數。由 Rodi(1980)建議四個經驗參數分別為 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 由紊流動能 k 控制方程中，可以發現雷諾應力張量只以紊流生成項 $-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u'_i \rangle}{\partial x_j}$ 的形式出現。而紊流動能 k 的控制方程(4.2.19)中各項物理意義表示如下：

$$\text{紊流動能對流項: } \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j}$$

$$\text{紊流動能擴散項: } \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\text{紊流動能生成項: } -\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u'_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$\text{紊流動能消散項: } -\varepsilon$$

紊流消散 ε 控制方程(4.2.20)中各項物理意義表示如下：

$$\text{紊流消散率影響之擴散項: } \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$\text{紊流消散率影響之生成項: } -C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$\text{紊流消散率影響之消散項: } -C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

4.2.3 波場與結構作用計算模式

本節說明 COBRAS 模式應用在港灣結構物問題的研究進度。臺灣的港口或岸壁常見以基礎拋石底座和沉箱組合的直立式防波堤抵抗波浪作用以保護港阜內部的航行安全與結構物安定。過去不乏相關於波浪場和透水結構物的水工模型試驗研究，但是成本昂貴且在透水材質的孔隙大小作比例縮尺時會遭遇相當程度問題難以克服。

理論解析的發展部分，Sollitt 和 Cross(1972)將線性波作用在透水性防波堤傳遞情形以線性的邊界值問題處理。Vidal 等人(1988)提出半經驗理論描述孤立波通過透水性防波堤。Liu 和 Wen(1997)推導出一組水深積分方程式描述長波通過透水性結構物。然而對水深積分的缺點是損失了波浪場內部的物理量分佈，且面對波浪與近岸結構物交互作用的問題，淺化、碎波和反射的過程都和波浪場內的速度與壓力分佈有顯著的關係，且實際工程問題面對複雜的幾何結構增加了解析方法研究的困難和應用範圍。

數值方法的發展部分，Sulisz(1985)根據 Sollitt 和 Cross(1972)的結果發展邊界元素法研究波浪作用在不同形狀的複合式防波堤，由於引入勢能流理論的關係，因此無法適當的描述波浪碎波過程。Kobayashi 和 Wurjanto(1990)發展有限差分法研究波浪與結構物的交互作用。考慮波浪和結構物交互作用可能發生的碎波過程和結構物的透水性，本研究採用 Lin 和 Liu(1997)發展的 COBRAS 模式，Hsu, Sakakiyama 和 Liu(2002)進一步以透水性複合式防波堤水工試驗數據比較得到良好的模擬結果，COBRAS 模式以 Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes(VARANS)方程式描述與近岸結構物交互作用的二維波浪場，模式中的近岸結構物可為一般不透水材質或具有孔隙的透水材質，只要給定孔隙率和中值粒徑等透水係數，VARANS 中體積平均的雷諾應力項引入非線性渦度黏滯性的假設，將 $k-\varepsilon$ 紊流模式化計算紊流動能和紊流消散率。

COBRAS 的其他研究發展部分，Kuo 和 Hsu(2012)利用 COBRAS

模式模擬在直立壁上的溯升情況，並以試驗資料做驗證，有相當良好的一致性。Hsiao 和 Lin(2010)提出孤立波碎波通過不透水斜波式海堤的研究，設置 COBRAS 模式模擬波浪前進在斜波底床上，受淺化效應的自由表面變化情形和波浪通過衝擊海堤時，結構物上的壓力變化，並將此數值模擬結果和試驗資料驗證。Shin 等 (2006)則是模擬波浪在變動底床上的波形演化，流速，衝擊波壓等並且與大尺度試驗結果比較一致。

由上述研究可知 COBRAS 模式應用於波浪與結構物的模擬上效果非常的好，很適合用於本研究的數值模式設置。因此本研究決定應用 COBRAS 模式設置模擬波場與結構作用問題，藉由 NearCom 模擬結果，選定臺中港北防波堤斷面為模擬目標，並決定波浪條件，作為 COBRAS 模式的輸入條件，並進行模擬試驗。

4.2.4 模式驗證

1. 防波堤水工模型試驗設置

本研究研究波場與結構物作用問題，考慮波場受地形與結構物影響的水位變化與結構物受波場交互作用產生的壓力分佈，對模擬結果有決定性的影響，因此參考李(2006)海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究，李(2006)透過直立式防波堤的水工模型試驗，研究直立堤前波浪、波壓、波力的作用，足以作為本研究的波場與結構物作用計算模式之驗證，因此設置 COBRAS 模式模擬規則波前進在斜波底床上，受淺化效應的自由表面變化情形和波浪通過斜波衝擊直立式防波堤時，結構物上的壓力變化，並將此數值模擬結果和試驗資料驗證。

李(2006)在臺中港直立式防波堤的水工模型試驗中，其結構物原型設計水深-14 公尺、拋石堤高度 5 公尺，堤身高度 17 公尺，冠牆高度 5.5 公尺，水工模型試驗縮尺 1/36。數值模擬的地形與結構物相對位置配置說明如圖 4.12 及圖 4.13 所示，結構物的尺寸設置可參考圖 4.14，參考試驗的波高計與波壓計擺放位置將一般性波浪條件計算點位置整

理如表 4-2，颱風波浪條件計算點位置整理如表 4-3。

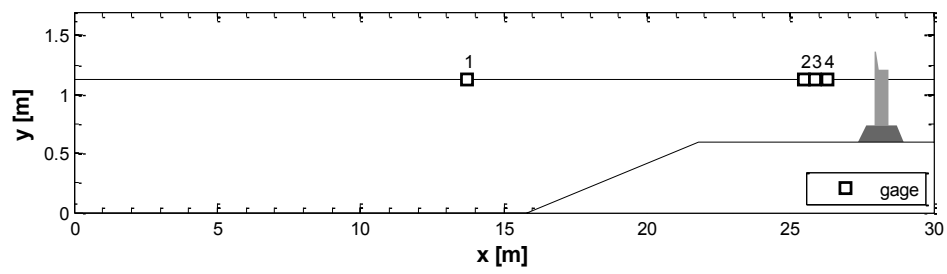


圖4.12 波高計設置圖

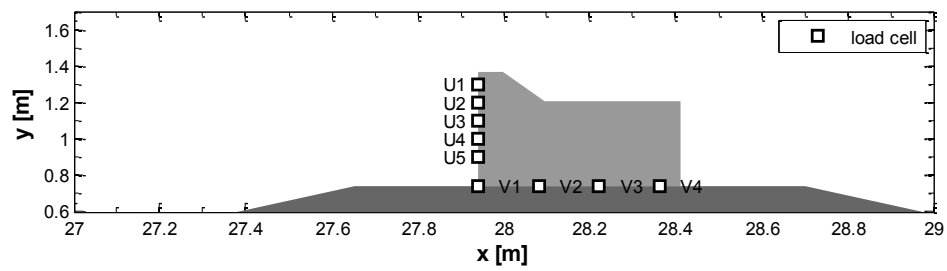


圖4.13 波壓計設置圖

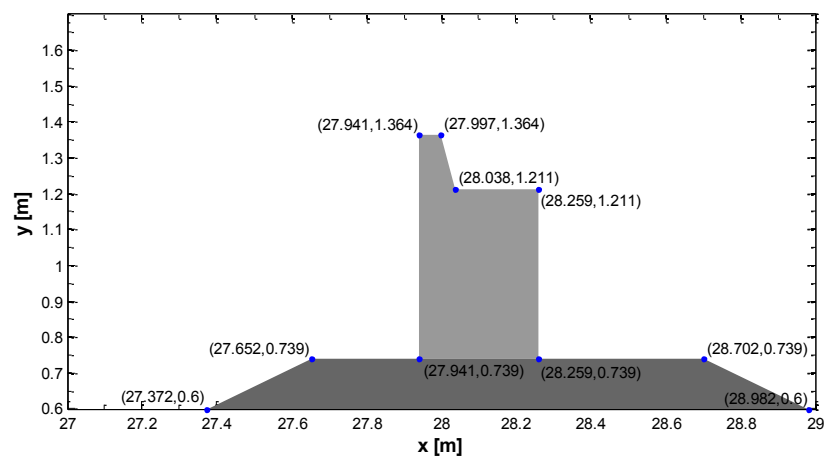


圖4.14 結構物設置圖

表 4-2 一般性波浪條件計算點設置表

一般性波浪條件		
波高計(gage)	水平位置 X [m]	垂直位置 Y [m]
1	13.741	1.126
2	25.463	1.126
3	25.846	1.126
4	26.289	1.126
波壓計(cell)	水平位置 X [m]	垂直位置 Y [m]
U1	27.941	1.301
U2	27.941	1.201
U3	27.941	1.101
U4	27.941	1.001
U5	27.941	0.901
V1	27.941	0.740
V2	28.081	0.740
V3	28.222	0.740
V4	28.362	0.740

表 4-3 颱風波浪條件計算點設置表

颱風波浪條件		
波高計(gage)	水平位置 X [m]	垂直位置 Y [m]
1	13.741	1.126
2	24.835	1.126
3	25.353	1.126
4	25.870	1.126
波壓計(cell)	水平位置 X [m]	垂直位置 Y [m]
U1	27.941	1.301
U2	27.941	1.201
U3	27.941	1.101
U4	27.941	1.001
U5	27.941	0.901
V1	27.941	0.740
V2	28.081	0.740
V3	28.222	0.740
V4	28.362	0.740

2. 防波堤水工模型試驗驗證

因試驗數據的取得有限，本研究僅就現有的試驗資料作驗證，驗證一般性波浪條件的水位資料和颱風波浪條件的波壓資料，一般性波浪條件為波高 0.1944 公尺，週期 1.67 秒，波長 3.304 公尺；颱風波浪

條件為波高 0.25 公尺，週期 2 秒，波長 4.141 公尺，數值相關參數設定整理於表 4-4。

表 4-4 波浪條件之數值相關參數設定表

參數名稱	數值	備註
數值參數設定		
時間間格	0.005	秒
終止時間	64	秒
左邊界	6	入射波邊界
右邊界	1	自由滑動邊界
上邊界	1	自由滑動邊界
下邊界	1	自由滑動邊界
造波設定		
水深	1.126 m	公尺
	一般性波浪	颱風波浪
週期	1.67 s	2 s
波高	0.1944 m	0.25 m
規則波類型	14	STOKE五階規則非線性波
網格設定		
網格數目	300	水平方向
網格間距	0.1	公尺
網格數目	34	垂直方向
網格間距	0.05	公尺
透水性設定		
孔隙率	0.49	無因次
中值粒徑	0.007	公尺

一般性波浪條件的數值模擬結果如圖 4.15，圖中顯示不同時間點的自由液面與流速分布，針對堤前壁面水位和速度的變化，在 60.4 秒時水位在平均水深之下，波浪形狀在波谷的位置，速度受直立壁影響垂直向上，在 60.6 秒時，水位約在平均水深，速度持續向上增強，60.8 秒時水位已高出平均水位，速度減弱但是仍然持續向上，61 秒水位越過直立壁堤頭，產生越波，61.2 秒堤前壁面速度向下，61.4 秒水位回到平均水位，速度向下且有水平方向的回流分量，以反射波向離岸方向傳遞，61.6 秒水降到平均水位以下，61.8 秒反射波和前進波交會在堤前約半波長處，形成駐波。

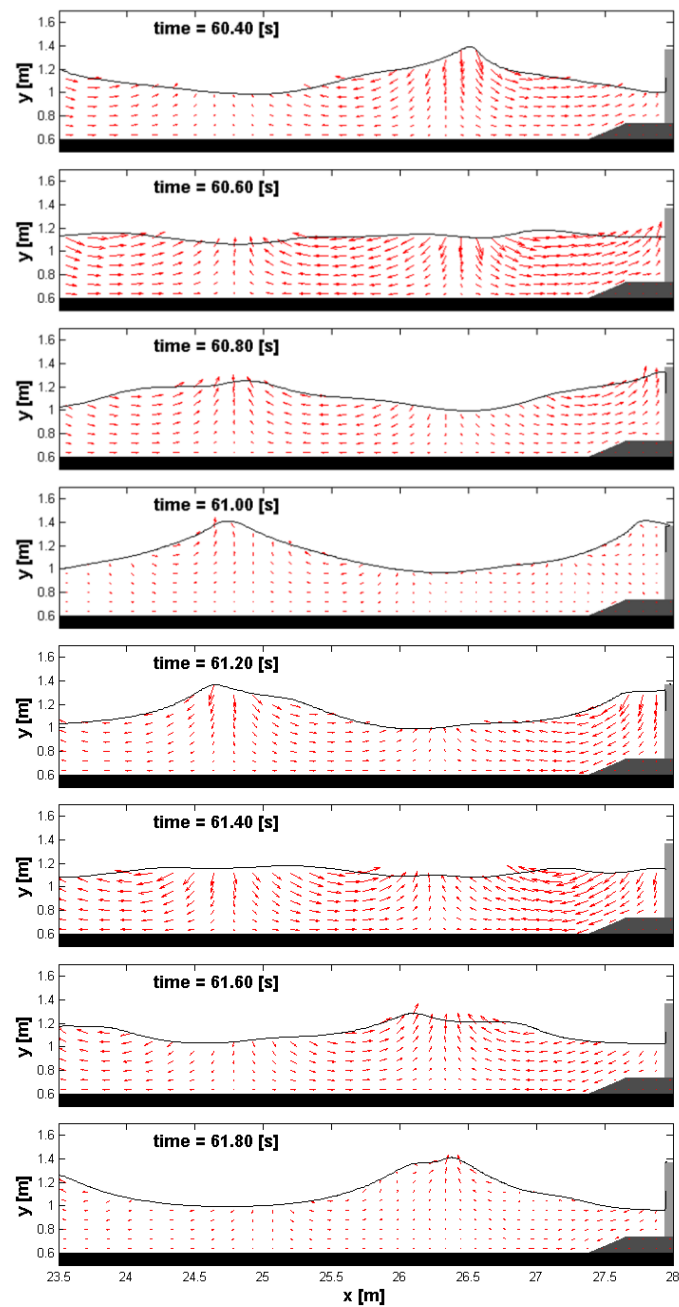


圖4.15 一般條件自由液面與流速分布圖

圖 4.16 為水位資料驗證結果，圖中 g0 是入射波時序圖，取前三個成熟波的平均，波高是 0.194 公尺，週期是 1.674 秒，g1 至 g4 是數值結果與水工模型試驗資料的比較，實線是數值模擬結果，虛線是水工模型試驗資料，驗證結果大致良好，圖中 g1 的波高為 0.1892 公尺，週

期 1.7295 秒，g2 由於在入射波和直立壁反射波形成駐波的節點位置，所以模擬結果較差。而 g3 和 g4 所代表的波浪在波腹與波節之間和波腹處則有良好的驗證結果。

波壓資料分作直立壁壁面位置的水平方向作用和直立壁底部垂直方向作用，直立壁壁面的波壓分部考慮堤後水位的原因，波壓表示為總壓力減去靜水壓。而直立壁底部的波壓則以總壓力表示，說明此壓力以包含動壓和靜水壓。圖 4.17 是直立壁壁面波壓資料的模擬結果，部分資料點位如 U1、U2 因為在平均水位之上，離水時無波壓的情況較明顯，其波壓的週期一致，而波壓強度在堤前沿水深方向漸強，圖 4.18 是直立壁底部垂直方向波壓資料的模擬結果，其波壓強度沿堤前距離而漸弱。

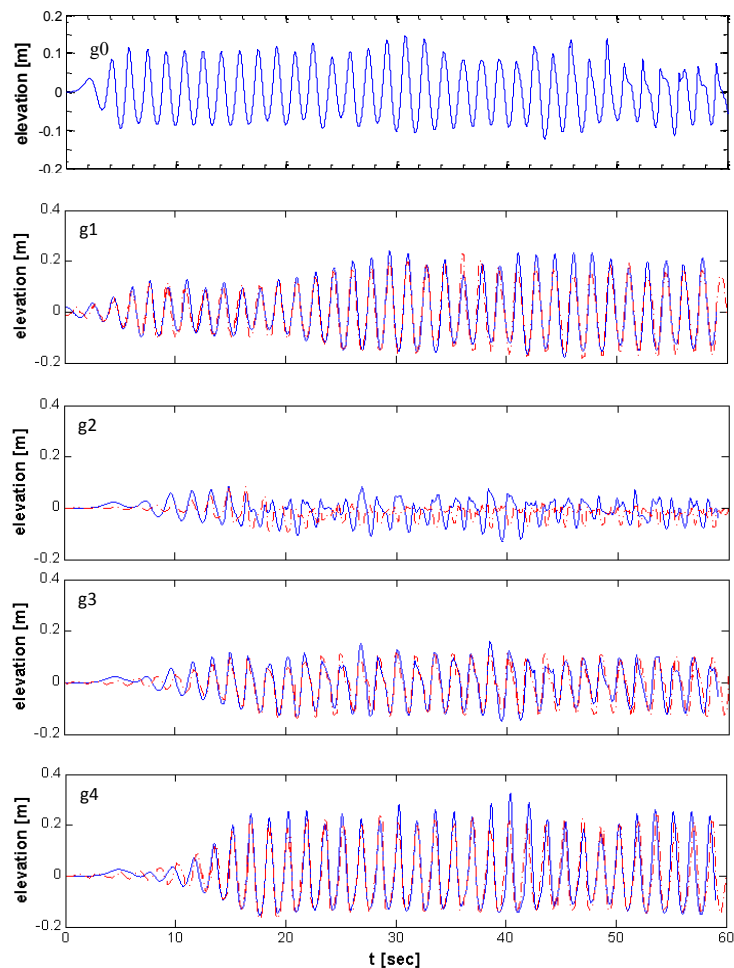


圖4.16 一般條件水位資料驗證結果

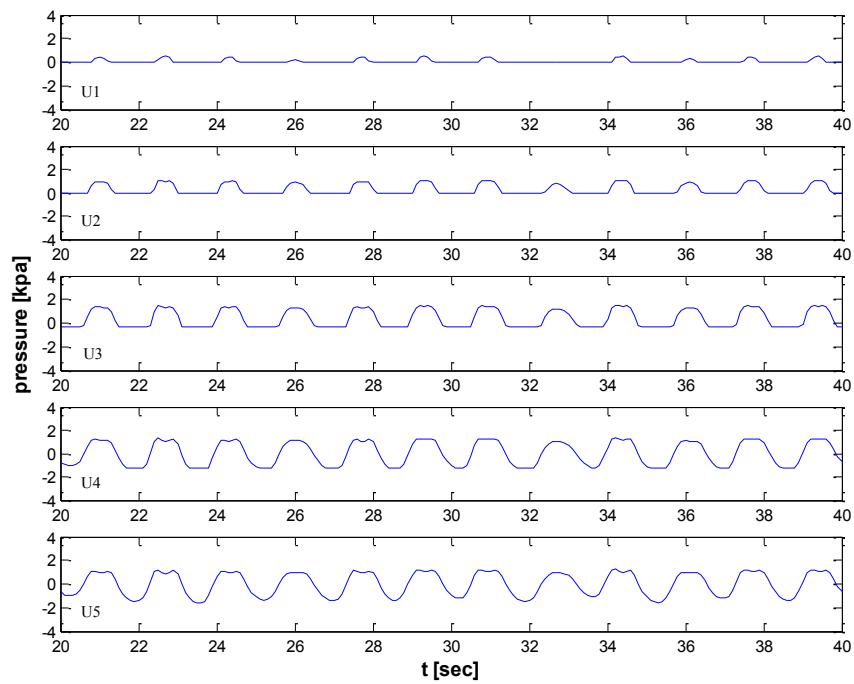


圖4.17 一般條件直立壁壁面波壓計算結果

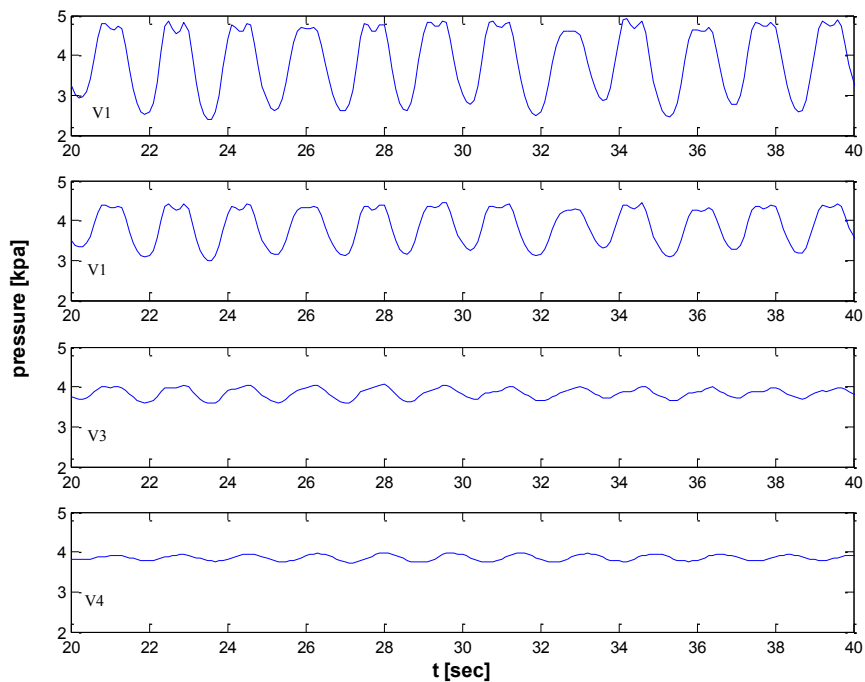


圖4.18 一般條件直立壁底部波壓計算結果

颱風波浪條件的數值模擬結果如圖 4.19，圖形顯示不同時間點的自由液面與流速分布。圖 4.20 是水位資料數值模擬結果，圖中 g0 是入射波時序圖，取前三個成熟波的平均，波高是 0.253 公尺，週期是 2.019 秒，g1 波高為 0.289 公尺，週期 2.08 秒。

波壓資料分作直立壁壁面位置的水平方向作用和直立壁底部垂直方向作用，圖 4.21 是直立壁壁面波壓資料的驗證結果，實線是數值模擬結果，虛線是水工模型試驗資料，以上 5 個量測點，U1、U2 量測點位於平均水深之上，U3、U4 和 U5 位於平均水深之下。驗證資料與水位資料具一致性，雖然數值模擬結果稍大於試驗數據，但是仍是良好的驗證結果。

圖 4.22 是直立壁底部波壓資料的驗證結果，實線是數值模擬結果，虛線是水工模型試驗資料，以上 4 個量測點，V1 的數值模擬結果和試驗資料比較差異明顯較大，由於此計算點位置 $x=27.94$ 公尺， $y=0.74$ 公尺，恰巧位於直立壁壁面和底部的交界處，其邊界位在透水和不透水的交界處，一般情況數值較不易模擬，但是整體來看數值模擬的結果是可靠的範圍。

本節驗證 COBRAS 波場與結構物計算模式，經由李(2006)關於海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究的試驗資料，驗證模式在一般性波浪條件下的水位資料和颱風條件下的波壓資料，在水位資料的驗證大致良好，除了在節點部分的資料點位，這可能與透水結構物的設定參數有關，而波壓資料的驗證上週期性驗證結果良好，而趨勢上數值結果普遍稍大於試驗資料，但是綜觀而言實屬可靠，可作為波場與結構物研究的計算模式。

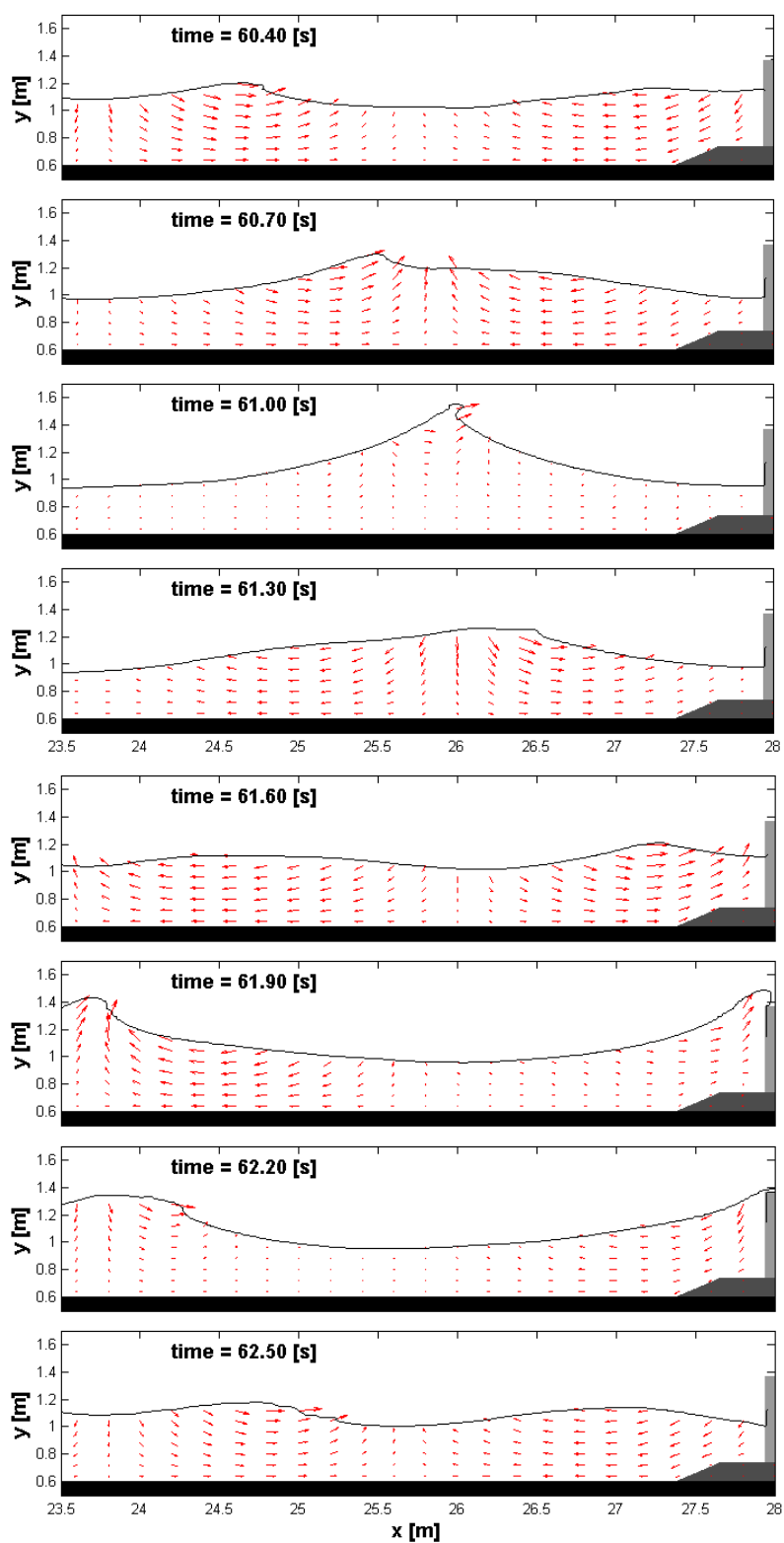


圖 4.19 颱風條件自由液面與流速分布圖

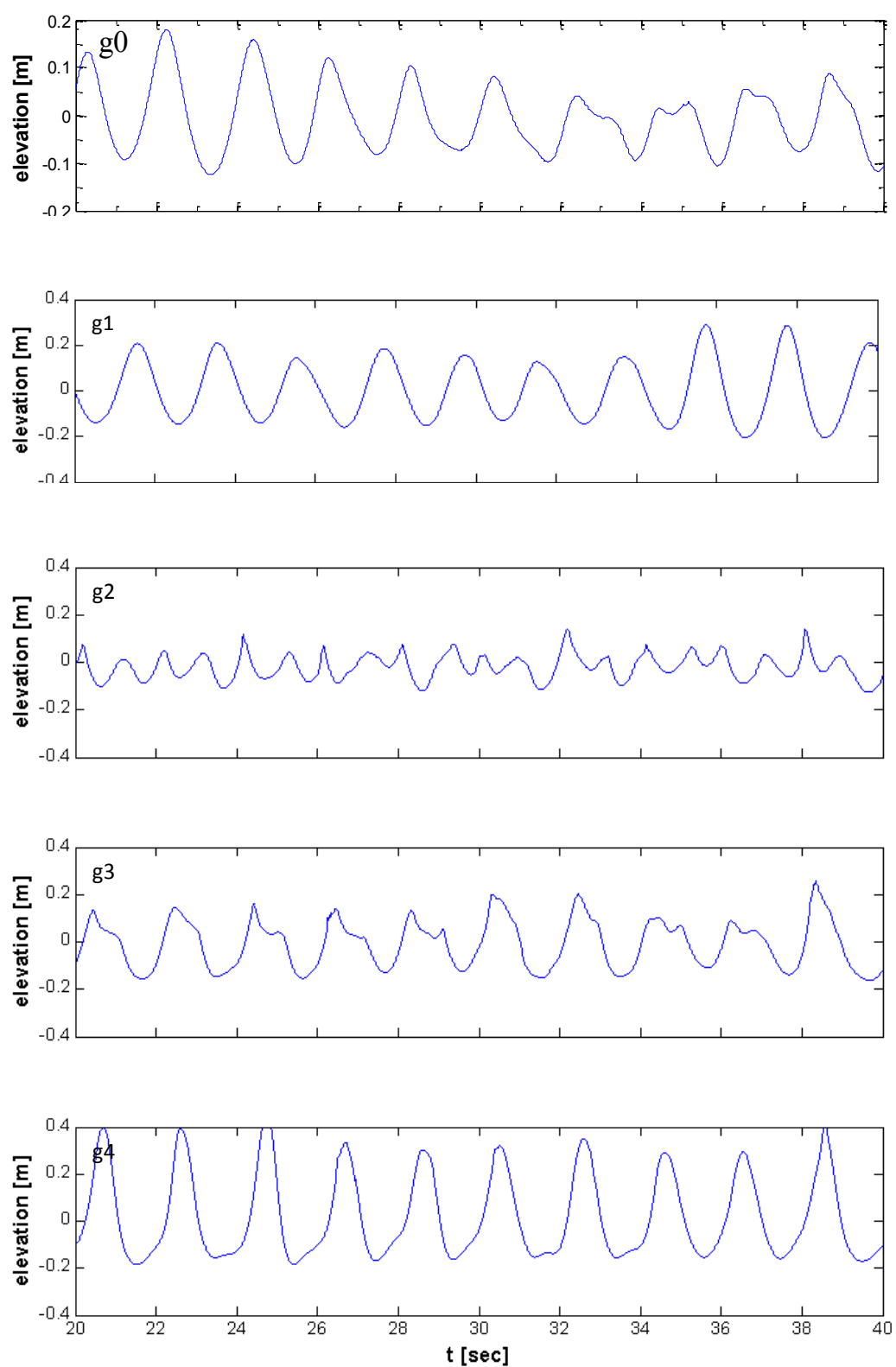


圖4.20 颱風條件水位資料計算結果

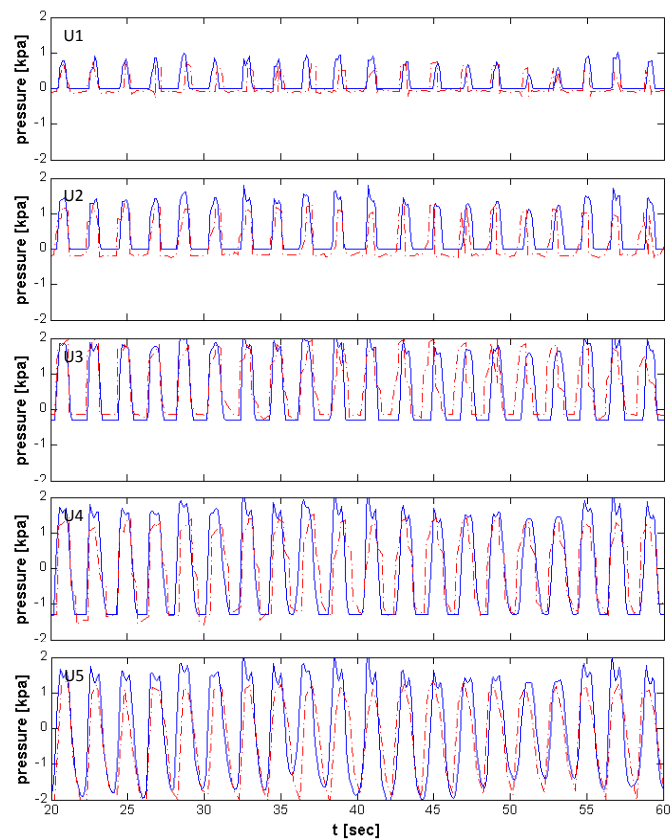


圖4.21 颱風條件直立壁壁面波壓驗證結果

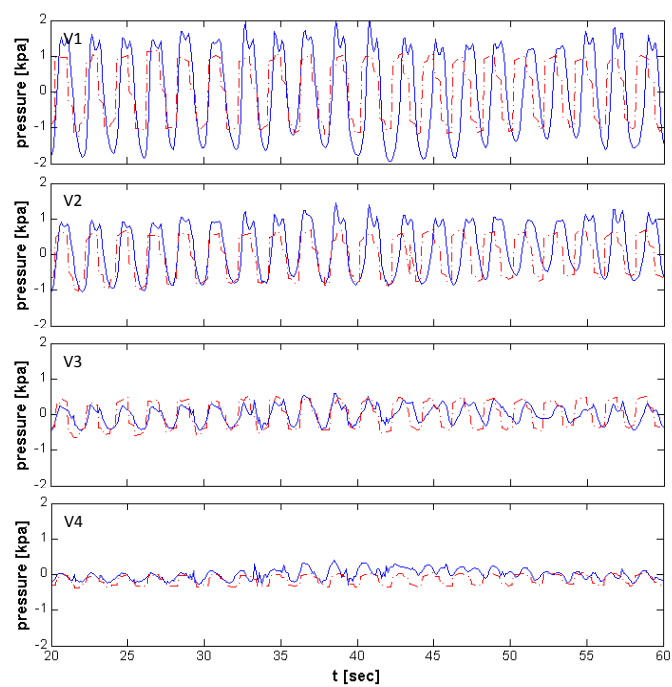


圖4.22 颱風條件直立壁底部波壓驗證結果

第五章 波流場模擬分析

5.1 平面波流場特性分析

5.1.1 流場模擬與現場資料比較

圖 5.1 為本模式在相同時間所模擬臺中港鄰近海域於滿潮、退平潮、乾潮及漲平潮時之潮流場向量圖。圖形顯示流場隨不同潮時作不同的變動，並以北防波堤附近變化更加明顯。本所於 2014 年 6 月 20 日在臺中港北防波堤附近海域進行船碇 ADCP 量測平面海流，並進行流場分析如第三章。本研究將數值模擬與現場觀測結果放在一起作比較。圖 5.2 至圖 5.5 為北防波堤堤頭附近的實測流場與模式模擬結果之比較圖，左圖為實測圖，右圖為模擬結果。實測資料為一段時間(約 2 至 3 小時)量測的結果，數值模擬呈現的則為某一瞬間的流場，二者條件有所差異，但應有相似的趨勢。

圖 5.2 至圖 5.5 顯示臺中港北防波堤堤頭西側海域，海流流向大致呈現為往北以及東北向，漲潮時段的流向較偏東北，退潮時段則較偏北；在臺中港北防波堤西側凹坑地形區之流向大則呈現往西北及東北方向，漲潮時段的流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略大於其西側海域，可能肇因於退潮時港嘴區海流與之匯流而產生較大流速；臺中港北防波堤北側區域則受到防波堤遮蔽影響，無論漲潮或退潮，其流速都明顯小於其他地區，且流向呈現順時針旋轉。模式計算結果與實測流場分布，趨勢尚屬一致，惟漲、退潮的流況差異，模式計算結果較為不明顯。

此次觀測期間之表層平均流速，在臺中港北防波堤以西之海域，其平均海流流速約在 0.42~0.58m/sec 間，流向大致為往東北~北之方向前進，而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.2~0.35m/sec，其流向為沿北防波堤往西北方向前進，而北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯較小(約 0.05m/sec 以下)。

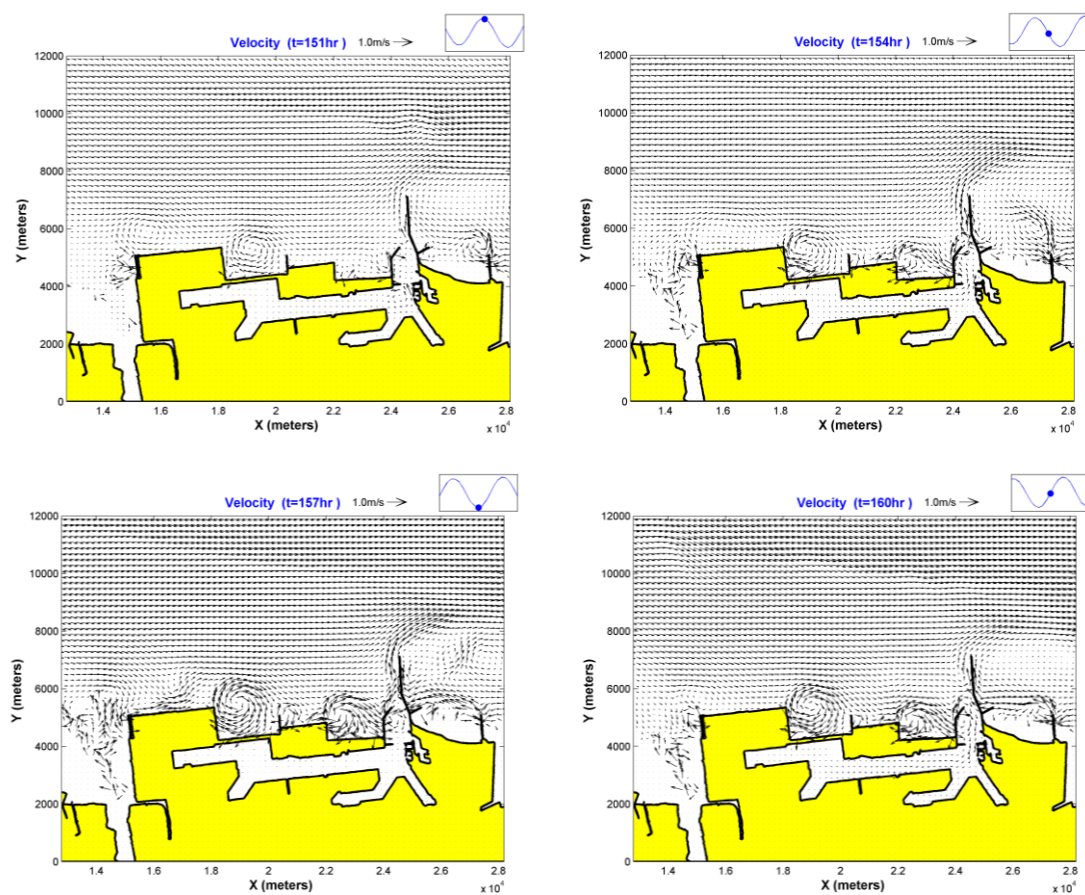


圖5.1 臺中港附近海域潮流場模擬 (2014/6/20 17:00:00 起)

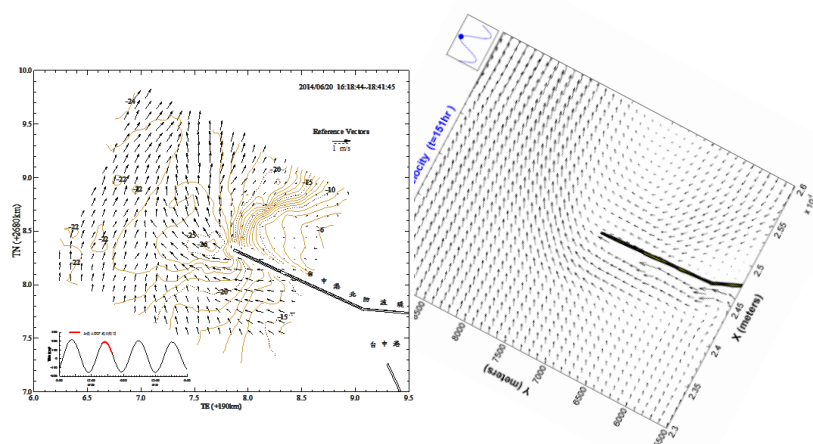


圖5.2 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場
(滿潮，2014/6/20 17:00:00)

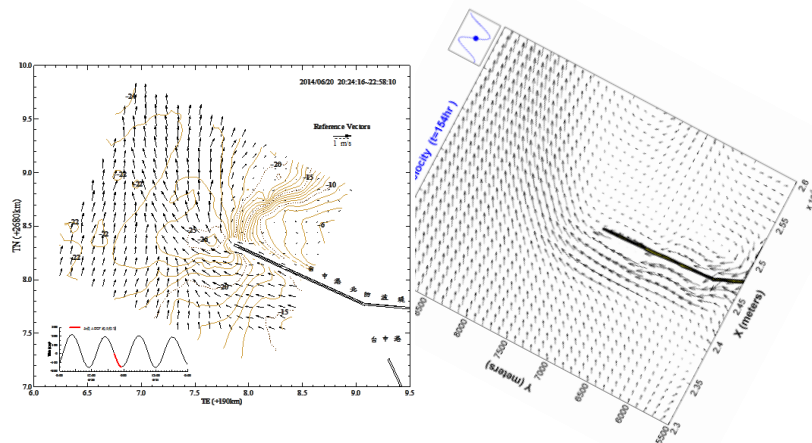


圖5.3 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場
(退平潮，2014/6/20 20:00:00)

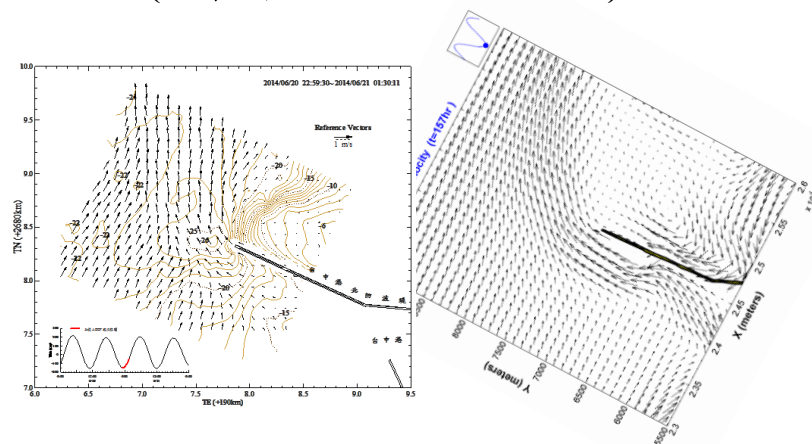


圖5.4 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場
(乾潮，2014/6/20 23:00:00)

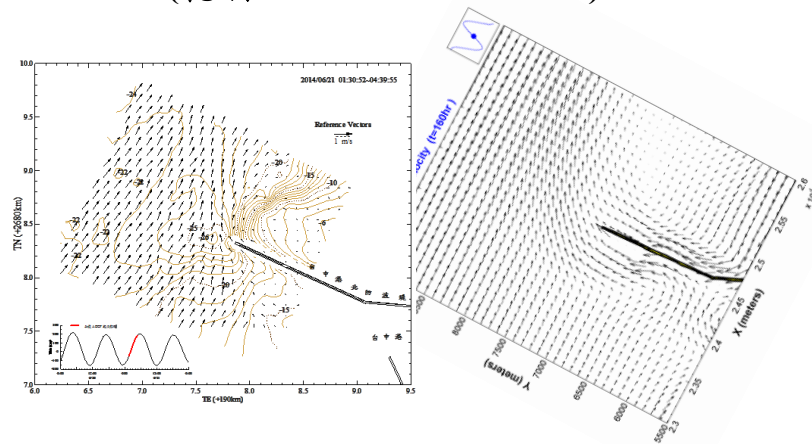


圖5.5 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場
(漲平潮，2014/6/21 02:00:00)

5.1.2 颱風條件之波流場模擬

本節探討臺中港附近海域受颱風波浪作用之影響，颱風資料則由台灣世曦工程顧問有限公司（2013 年）「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書」之臺中港外海颱風波迴歸分析統計資料，取其 50 年迴歸週期之代表颱風波浪，模擬之波浪條件如表 5-1 所示，將作為 NearCom 模式波浪資料輸入條件。與上一節相同條件下，圖 5.6 至圖 5.9 為其受不同颱風波浪條件下，於滿潮、退平潮、乾潮及漲平潮時之波流交互作用流場圖，圖中示性波高值以色階表示，流速以箭頭表示。圖中波場及流場，皆受波浪、潮流、恆流及風聯合作用影響。

表 5-1 計算模擬之波浪條件

波高 H (m)	週期 T (s)	波向
7.2	11.3	N
5.7	10.0	W
4.7	9.1	SW

圖 5.9 為網格為 50 公尺及 100 公尺狀況下，N 向颱風波浪作用下，滿潮時於北防波堤附近的流場，包含潮流及近岸流。圖形顯示，除北防波堤西北渦漩較外圍處有較差異外，其他區域的流場分佈則相當相似，為節省計算時間，故本研究 NearCom 模式皆採用網格為 100 公尺進行計算。

圖 5.7 為北向之颱風波浪，圖 5.8 為西向之颱風波浪，圖 5.9 為西南向之颱風波浪。圖中顯示，不同潮時造成水深差異，碎波位置亦隨之產生變化。

與單純潮流場的模擬結果相比較，北向之颱風波浪造成強大的向南沿岸流，該沿岸流會沿著北防波堤向外海傳送，在此狀況下，北防波堤北側順時針的渦流有更加強的趨勢。在北向之颱風波浪作用下，北防波堤中段至堤頭附近的示性波高最大，最大值約為 4.7 公尺；臺中港南側波浪則明顯受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

西向之颱風波浪在臺中港南側近岸處產生向北的明顯沿岸流，原先於北防波堤堤頭外，漲潮會向東北流，退潮則會向北流的趨勢，在西向之颱風作用下，則無論漲退潮皆往東北向流，且速度亦增強。在西向之颱風波浪作用下，南防波堤堤頭附近的示性波高較大，最大值約 3.9 公尺；臺中港北側波浪則受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

西南向之颱風波浪在臺中港附近並無產生較明顯的沿岸流，北防波堤中段至堤頭的內側(南側)的示性波高較大，最大值約 1.6 公尺，臺中港北側波浪則受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

由於 NearCom 的波浪模組使用 SWAN 模式，該模式在海、陸域交界邊界，採用波浪能量完全消散之處理，故不會有反射波的產生。以本研究計算區域而言，波浪作用於防波堤，應該會有明顯的反射波產生，但本節所繪製的波場圖並未顯現此特性，此為模式之限制。惟本研究是先藉由 NearCom 模式計算出結構物前的波浪資訊，再作為 COBRAS 模式的波浪入射條件，而反射波在 COBRAS 模式中會有適足的呈現，可彌補 NearCom 模式的限制。

臺中港北防波堤堤頭北側有明顯的順時針渦流，尤其在北向颱風波浪作用下，渦流的強度更為加劇。因此，堤頭附近的漂沙會被沖刷帶離，造成侵蝕；漂沙經由順時針渦流，在北防波堤北側產生淤積。此現象與實測地形變化的結果相符。

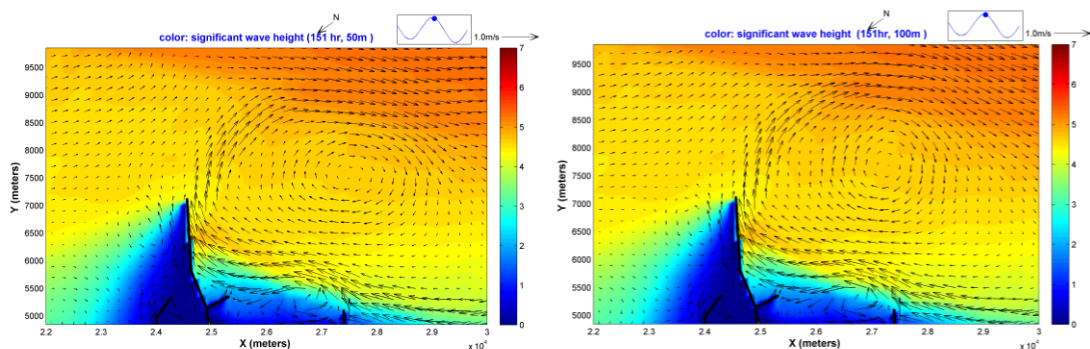


圖5.6 臺中港附近海域波流場模擬 (左：網格50m；右：網格100m)
H=7.2m，T=11.3s，N (2011/5/20 17:00:00)

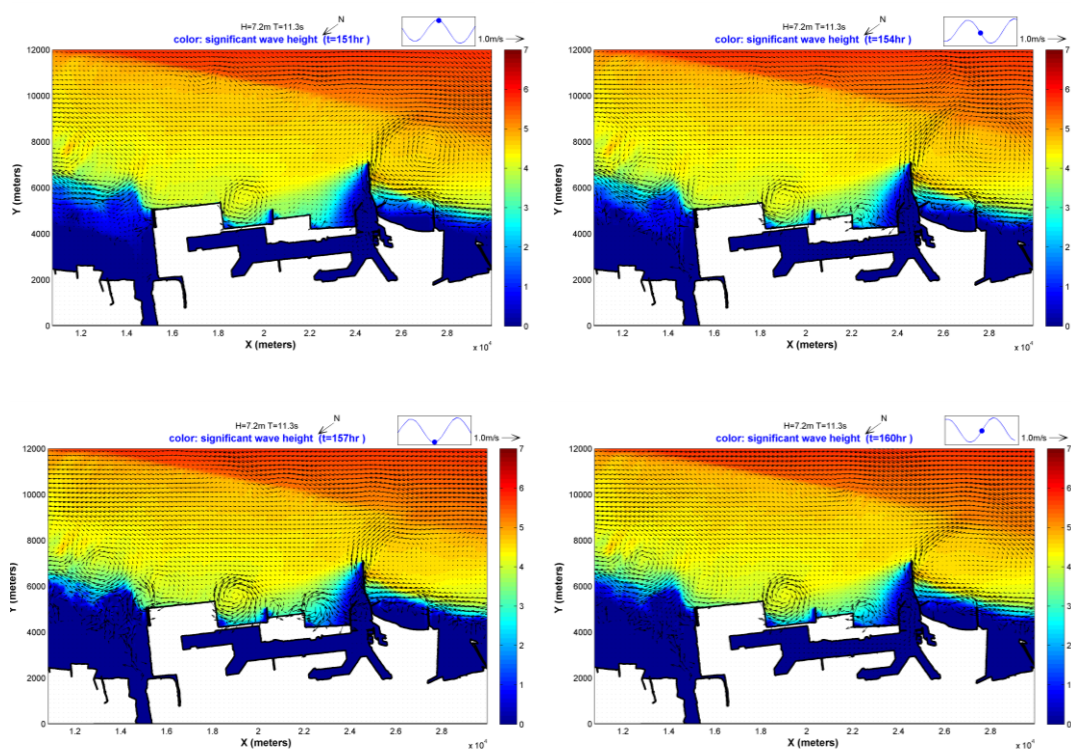


圖5.7 臺中港附近海域波流場模擬 (2011/5/20 17:00:00 起)
(颱風波浪：H=7.2m，T=11.3s，N)

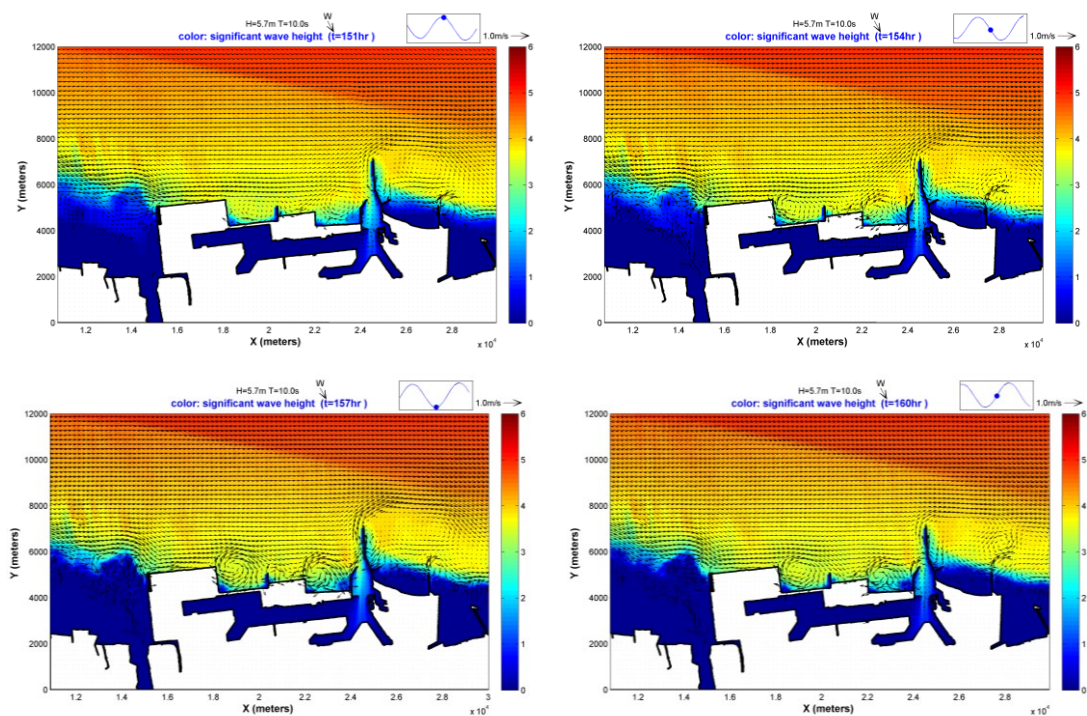


圖5.8 臺中港附近海域波流場模擬 (2014/6/20 17:00:00起)
(颱風波浪：H=5.7m，T=10.0s，W)

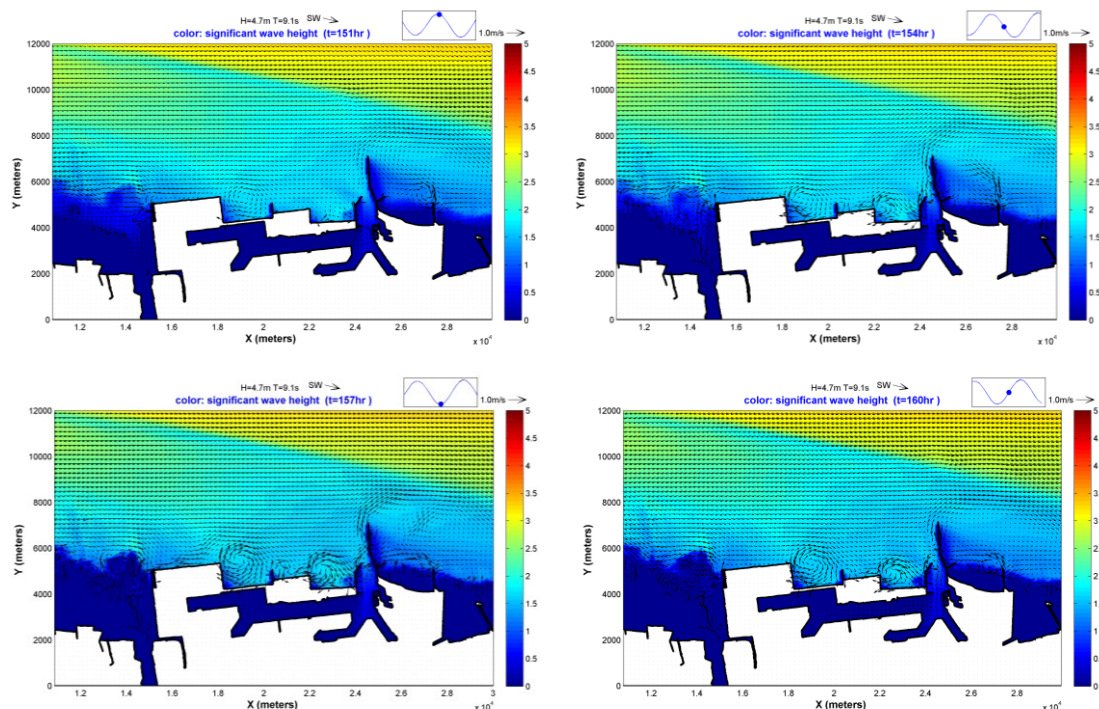


圖5.9 臺中港附近海域波流場模擬 (2014/6/20 17:00:00 起)
(颱風波浪：H=4.7m，T=9.1s，SW)

5.2 結構物與波流作用分析

5.2.1 結構物安定性分析

完成 COBRAS 模式建立波場和結構物問題的建置與驗證後，本節將以臺中港北防波堤結構物作為研究對象，討論波場與結構物的作用，以 COBRAS 模式計算波場與結構物上的受力情形，並檢視過去規劃設計基準中直立壁沉箱安定性分析。

參考張等人(1999)「臺中港港口第二期擴建工程規劃—工程初步設計報告書」，臺中港港口第二期擴建工程規劃延建北防波堤 480 公尺，設計波高分析流程主要分為三個階段，首先是深海設計波的推算，再來根據地形折繞射情形研定等值深海設計波，最後再依據合田良實之堤前波高計算法(以下稱合田設計波高公式)計算堤前設計波的有義波與最大波，取最大波為堤前設計波，代入合田公式計算堤前壁面與底

部波壓分布(以下稱合田波壓公式)。

合田設計波高公式如下， $h/L_0 \geq 0.2$ 表示堤址位置在碎波帶外側， $h/L_0 \leq 0.2$ 表示堤址位置在碎波帶內側， h_b 為防波堤壁面至5倍有義波高外海處的水深，有義波高 $H'_{1/3}$ 的水深值，取防波堤設置處水深 h 。 $\tan \theta$ 為海底波度， K_s 表示淺化係數， $H'_{1/3}$ 為外海有義波高。

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H'_{1/3}; h/L \geq 0.2 \\ \min((\beta_0^* H'_{1/3} + \beta_1^* h_b), \beta_{\max}^* H'_{1/3}, 1.8K_s H'_{1/3}); h/L_0 \leq 0.2 \end{cases} \quad (5.2.1)$$

$$\beta_0^* = 0.052(H'_{1/3} / L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \quad (5.2.2)$$

$$\beta_1^* = 0.063 \exp(3.8 \tan \theta) \quad (5.2.3)$$

$$\beta_{\max}^* = \max(1.65, 0.53(H'_{1/3} / L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)) \quad (5.2.4)$$

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H'_{1/3}; h/L \geq 0.2 \\ \min((\beta_0 H'_{1/3} + \beta_1 h_b), \beta_{\max} H'_{1/3}, K_s H'_{1/3}); h/L_0 \leq 0.2 \end{cases} \quad (5.2.5)$$

$$\beta_0 = 0.028(H'_{1/3} / L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \quad (5.2.6)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta) \quad (5.2.7)$$

$$\beta_{\max} = \max(0.92, 0.32(H'_{1/3} / L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)) \quad (5.2.8)$$

合田波壓公式根據規則波波壓試驗及參照日本港灣實測波壓資料。該公式可應用於碎波前甚至碎波後之波浪，使波浪作用範圍之波壓得以連續，合田並建議以最大波高作為設計波高，以及引入不規則波之概念，解決使用規則波波壓公式推算不規則波波壓時應使用何種波高作為設計波高之困擾。波壓公式同時適用於直立堤及合成堤，當波浪正向入射時，合田波壓公式計算如下，相關符號可參考圖 5.10。 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 表示波壓修正係數， $\min(a,b)$ 表示取 a 或 b 兩者間值小者，d

為基礎上水深， h' 為直立部底面至靜水面間高度， h_b 為防波堤壁面至 5 倍有義波高外海處的水深， β 是入射波與垂直於壁面法線間夾腳， η^* 是波壓作用頂部的高度。

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) \omega_o H_d \quad (5.2.9)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh 2\pi h / L} \quad (5.2.10)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (5.2.11)$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1 \quad (5.2.12)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \omega_o H_d \quad (5.2.13)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi h / L}{\sinh 4\pi h / L} \right)^2 \quad (5.2.14)$$

$$\alpha_2 = \min \left(\frac{h_b - d \left(\frac{H_d}{d} \right)^2}{3h_b}, \frac{2d}{H_d} \right) \quad (5.2.15)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh 2\pi h / L} \right) \quad (5.2.16)$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \quad (5.2.17)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_d \quad (5.2.18)$$

依據張等人(1999) 颱風波浪統計分析，以 50 年迴歸期選定深海設計波，水深為 22 公尺，平均潮位面是+2.63 公尺，選擇天文潮最高高潮位+5.86 公尺和天文潮最低低潮位-0.55 公尺兩種潮位設計，計算出等值深海波高，再依據合田設計波高公式計算堤前波高，其中以最大

波波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒為模式的造波條件，代入合田波壓公式計算，其分析流程可如圖 5.11 所示。

直立式防波堤的安定性分析需檢討於颱風或地震時直立壁部分的滑動與傾倒，將其作為設計規劃的考量之一，工程應用在安定性分析計算時多以安定因數為參考，滑動與傾倒的安定因數至少需大於 1.2，直立壁部分的滑動安定性需滿足下式：

$$f_s \leq \frac{fW}{p} \quad (5.2.19)$$

式中 f_s 是滑動安全因數，波壓作用時以 1.2 以上為標準，唯以模型試驗能確認直立壁部分安定時，方可小於 1.2。 f 是直立壁部分與拋石底床部分的摩擦係數，張等人(1999)並提出混凝土對拋石材料間的摩擦係數是 0.6， W 是作用在直立壁部分的垂直合力， p 是作用在直立壁的水平合力。直立壁部分的傾倒安定性需滿足下式：

$$f_o \leq \frac{Wt}{ph} \quad (5.2.20)$$

式中 f_o 是傾倒安全因數，波壓作用時以 1.2 以上為標準，唯以地震作用時，方以 1.1 為標準。 W 是作用在直立壁部分的垂直合力， p 是作用在直立壁的水平合力， t 是垂直合力作用力的力矩長， h 是水平合力作用力的力矩長。

以下分別在最高高潮位和最低低潮位的以合田公式代入安定性分析公式，將計算結果列於表 5.2 和表 5.3 中。 p_1 是靜水面之波壓強度， p_3 是直立壁底部之波壓強度， p_4 是堤頂處的波壓強度， p_u 是波浪造成的上揚波壓強度， p 波浪作用造成的合力， M_p 是波浪作用造成的合力矩， U 是上揚力， M_u 是上揚力矩， W_b 是浮力， M_b 是浮力矩， W_o 是直立壁重量造成的重力， M_o 是直立壁重量造成的力矩， f_s 是滑動安定因數， f_o 是傾倒安定因數。

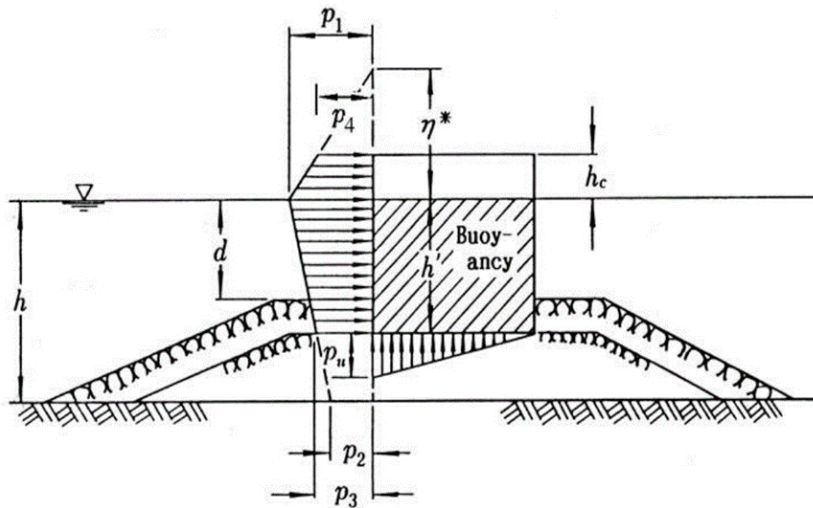


圖5.10 合田公式示意圖

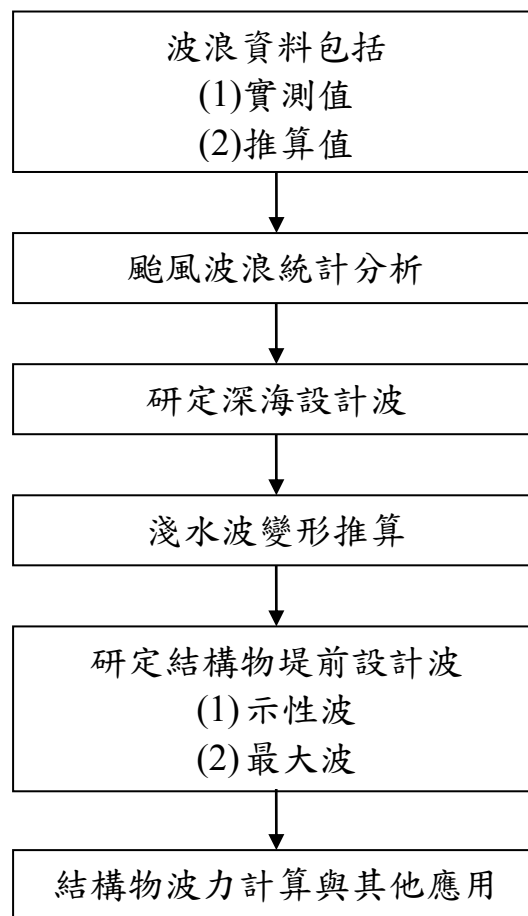


圖5.11 設計波推算流程圖

表 5-2 天文潮最高高潮位之計算結果

符號	數值	單位
p_1	80.413	千牛頓/平方公尺
p_3	55.564	千牛頓/平方公尺
p_4	54.416	千牛頓/平方公尺
p_u	47.265	千牛頓/平方公尺
p	1832.733	千牛頓
M_p	25642.251	千牛頓公尺
U	590.807	千牛頓
M_u	9846.846	千牛頓公尺
W_b	4904.803	千牛頓
M_b	61310.475	千牛頓公尺
W_o	11230.194	千牛頓
M_o	141851.717	千牛頓公尺
f_s	1.8	無因次
f_o	2.2	無因次

表 5-3 天文潮最低低潮位之計算結果

符號	數值	單位
p_l	84.219	千牛頓/平方公尺
p_3	65.354	千牛頓/平方公尺
p_4	23.039	千牛頓/平方公尺
P_u	57.084	千牛頓/平方公尺
P	1774.963	千牛頓
M_p	21769.439	千牛頓公尺
U	713.648	千牛頓
M_u	11894.174	千牛頓公尺
W_b	3520.809	千牛頓
M_b	44017.47	千牛頓公尺
W_o	11230.194	千牛頓
M_o	141851.717	千牛頓公尺
f_s	2.3	無因次
f_o	2.9	無因次

5.2.2 結構物受力分析

依據北防波堤延伸段標準斷面圖，設置 COBRAS 模式模擬臺中港北防波堤結構物，圖 5.12 是整個計算區域的地形與結構物示意圖，圖中方塊標示表示波高資料點位置。第一個波高資料點在水平方向 300 公尺位置，作為波高的檢視，第二到第四個波高資料點則依據波浪條件不同而調整位置，第二個波高資料點放置在距離堤前壁面 $3/4$ 波長的位置處，代表入射波與反射波合成後的合成波之節點位置，第三個波高資料點放置在距離堤前壁面 $5/8$ 波長的位置處，位於節點與腹點之間，而第四個波高資料點放置在距離堤前壁面 $1/2$ 波長的位置處，代表入射波與反射波合成後的合成波之腹點位置。

依照原比例臺中港北防波堤建置 COBRAS 數值模式，位於水平位置 475 公尺處有一直立式防波堤結構物，將此結構物簡化為兩個部分，第一部分為一具透水性的梯型拋石基座，下底 72 公尺，上底 48 公尺，高為 6 公尺，模擬此拋石基座為一透水材質，設定平均粒徑為 0.1 公尺，孔隙率設定為 0.49。第二部分為一不透水的直立式沉箱，直立壁位置在水平距離 475 公尺處，底部的寬度為 22 公尺，最頂端的寬為 3 公尺，高為 27 公尺。結構物的尺寸設置可參考圖 5.12。

由於數值模式設置考量計算時間效益，將模式的計算範圍定為水平方向 $0 \leq x \leq 700$ 公尺，垂直方向 $0 \leq y \leq 60$ 公尺，水平方向有一個子網格，範圍 $0 \leq x \leq 700$ 公尺的網格大小 $dx=1$ 公尺，垂直方向為有一個子網格，範圍 $0 \leq y \leq 60$ 公尺的網格大小 $dy=1$ 公尺，計算時間從波浪通過計算範圍起點開始 180 秒。

造波條件為連續 STOKES 五階規則非線性波，波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒之颱風波浪。邊界條件之左邊界為入射波邊界條件，右邊界、上邊界和下邊界為自由滑動條件，初始條件為靜止水面，天文潮最高高潮位情況下水深設定是 27.86 公尺，波長是 161.3 公尺，而在天文潮最低低潮位情況下水深設定是 21.45 公尺，波長是 146.8 公尺。計算的數值相關參數設定整理如表 5-4 所示。

表 5-4 數值相關參數設定表

參數名稱	數值	備註
數值參數設定		
時間間格	0.005	秒
終止時間	180	秒
左邊界	6	送波邊界
右邊界	1	自由滑動邊界
上邊界	1	自由滑動邊界
下邊界	1	自由滑動邊界
造波設定		
水深	天文潮最高高潮位	天文潮最低低潮位
	27.86 公尺	21.45 公尺
週期	11.4	秒
波高	10.6	公尺
規則波類型	14	STOKE 五階規則非線性波
網格設定		
網格數目	700	水平方向
網格間距	1	公尺
網格數目	60	垂直方向
網格間距	1	公尺
透水性設定		
孔隙率	0.49	無因次
中值粒徑	0.1	公尺

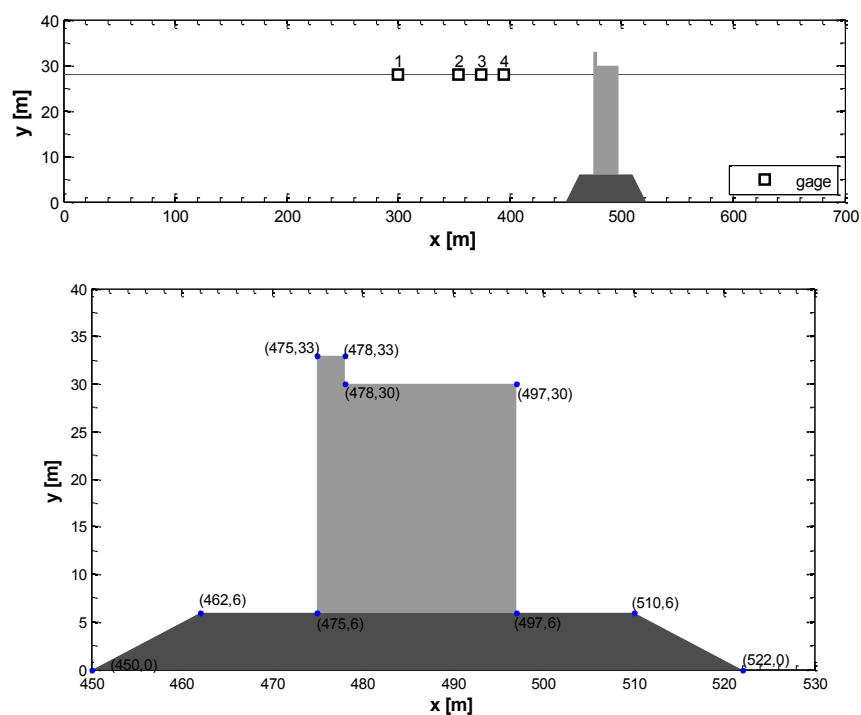


圖5.12 波高計設置圖

1. 天文潮最高高潮位條件

數值模擬結果輸出自由液面與流速分布連續圖如圖 5.13 和圖 5.14 所示。圖中於 155 秒時壁面水位於波谷位置，水體在壁面的前方，水平位置 390 公尺處附近集中形成波峰，於 156 秒時集中的水體到達波峰位置的波高高度後，流速開始往波峰前後兩邊增強，於 157 秒時可見壁面水位開始上升，至 158 秒時水位接近平均水位而壁面的流速增強，於 159 秒時水位持續上升接近堤頂且流速持續增強，至 160 秒時超過堤頂，水位持續上升，開始越波，161 秒、162 秒可見明顯的越波，於 163 秒壁面水位降自接近堤頂高度，並可見後方的波浪向前傳遞，164 秒降至約平均水位，壁面水位的下降速度增強，165 秒可見流速持續增強，壁面水位持續下降，至 166 秒波峰處在水平位置 410 公尺處，波峰附近的流速減緩，持續如 167 秒作週期性的波浪運動。

在此高潮位情況下波高 10.6 公尺以逾極端的颱風波浪條件受入射波與反射波交會的影響，預期水位會出現約兩倍的波高，因此輸出水位資料模擬結果如圖 5.15，圖中的 g0 是水平位置 30 公尺處的水位資料點位，以零下切法分析波高與週期如圖 5.16 和圖 5.17，取前三個成熟波平均，波高是 10.78 公尺，週期是 11.41 秒，由波高分析圖可見波浪受入射波與反射波影響，變動浮動較大，前四個波後波浪成熟，波高約維持在 10 公尺左右，接著受反射波的疊加，波高最大約 16 公尺，圖中 g2 代表距離直立壁壁面入射波四分之三波長處的水位資料，約駐波的節點位置，由圖可見波高在第五個波浪後驟降，g4 代表駐波腹點位置處的水位資料，其水位變化與第二張圖恰巧相反，而 g3 的水位則位於腹點情況與節點情況之間。

模式模擬波壓資料分作直立壁壁面位置的水平方向作用和直立壁底部垂直方向作用，直立壁壁面的波壓分部考慮堤後水位的原因，波壓表示為總壓力減去靜水壓，而直立壁底部的波壓則以總壓力表示，說明此壓力以包含動壓和靜水壓。直立壁壁面位置的波壓對壁面單位面積積分得到水平作用力，直立壁底部位置的波壓對底部單位面積積分得到垂直作用力，將直立壁壁面波高與水平方向作用力和垂直

方向作用力圖輸出如圖 5.18，圖中第一列為壁面位置的水位資料，第二列是水平方向作用力，第三列是垂直方向作用力，由圖可見作用力的變化情形和壁面水位的變化情形一致，水平方向作用力的變化幅度約 3,000 千牛頓，而垂直方向作用力的靜水壓約 4,800 千牛頓，可視為浮力作用力大小，其變化幅度約 2,000 千牛頓，可視為上揚作用力。

以防波堤直立壁部分中水平方向 497 公尺，垂直方向 6 公尺的堤趾做支點，計算水平方向作用力造成的力矩、垂直方向作用力造成的力矩和總力矩輸出如圖 5.19。因為波浪作用，水平方向作用力造成的力矩變化幅度約 40,000 千牛頓公尺，垂直方向作用力造成的力矩受浮力作用的部分約 54,000 千牛頓公尺，波浪作用的部分變化幅度約 20,000 千牛頓公尺，因此總力矩在靜水位時候約 54,000 千牛頓公尺，波浪作用的部分變化幅度約 60,000 千牛頓公尺。

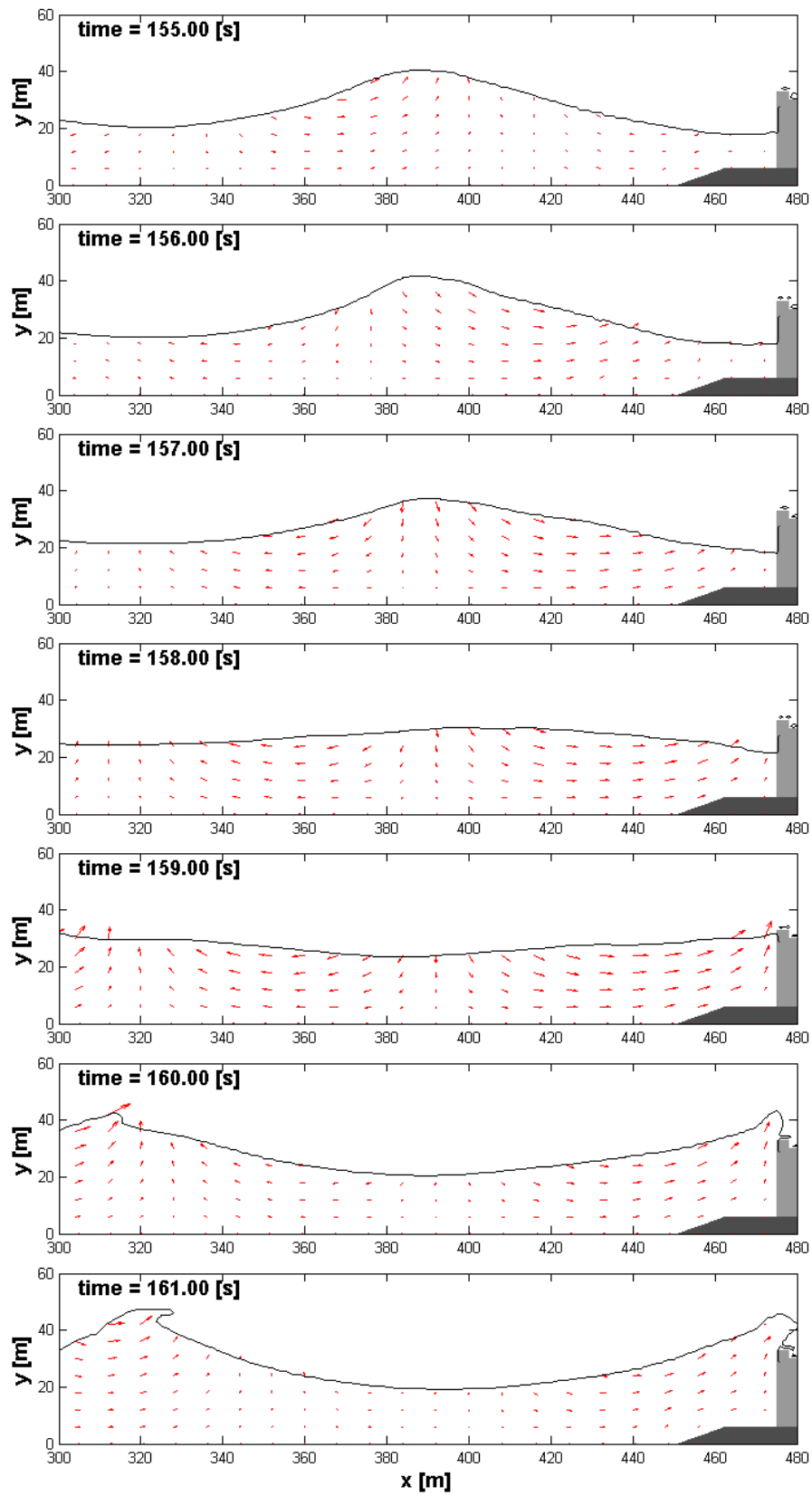


圖5.13 自由液面與流速分布連續圖

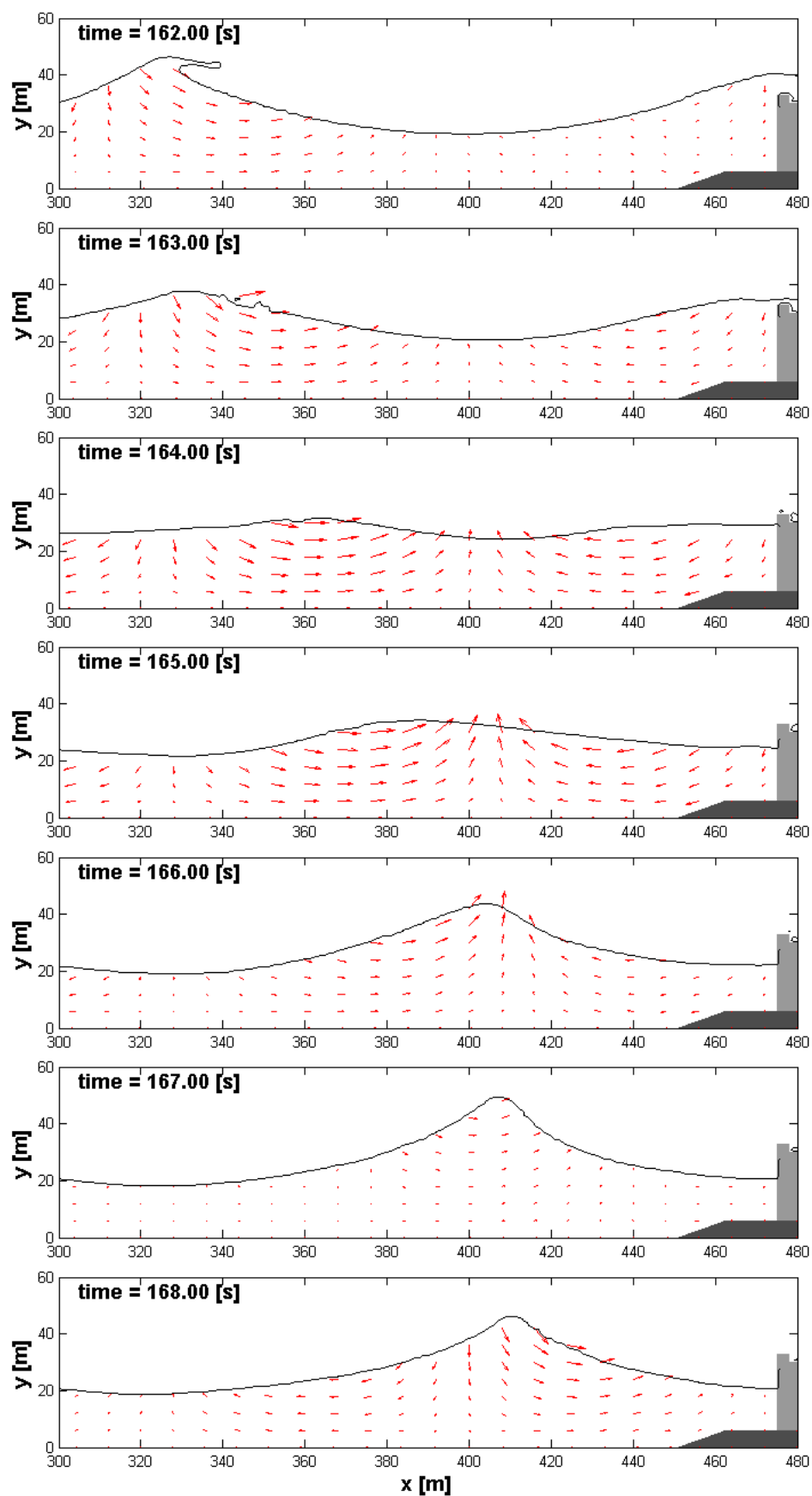


圖5.14 自由液面與流速分布連續圖(續)

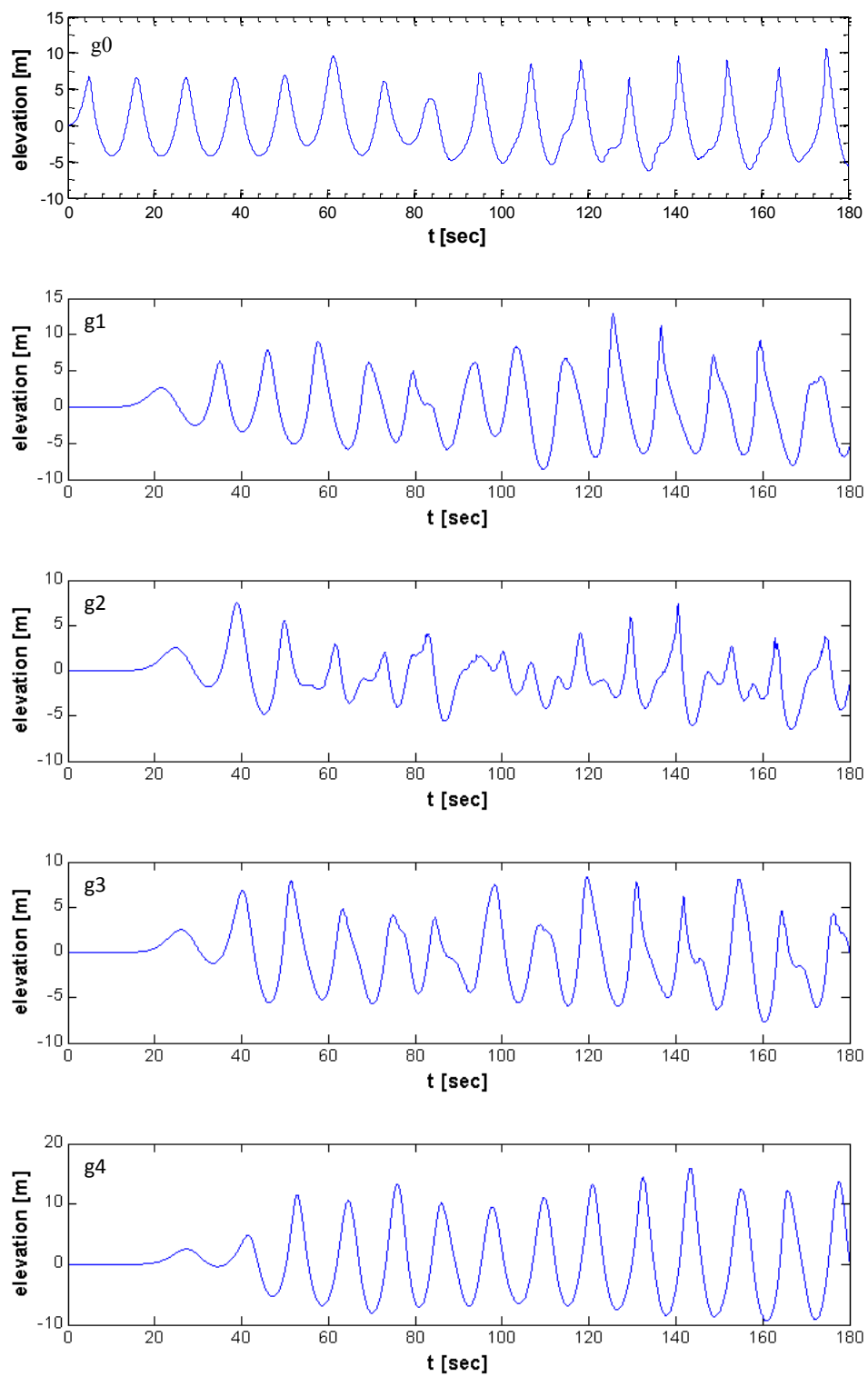


圖5.15 水位時序資料圖

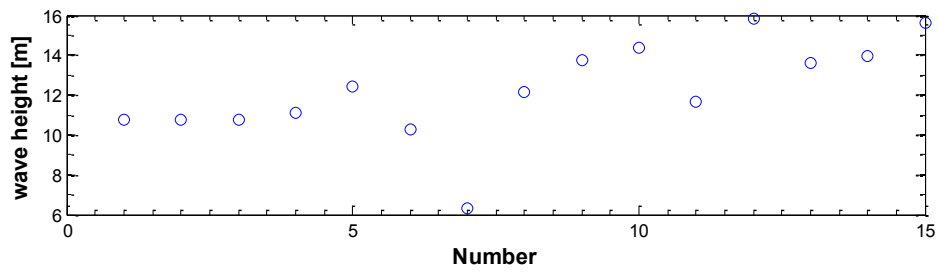


圖5.16 水位資料g0波高分析圖

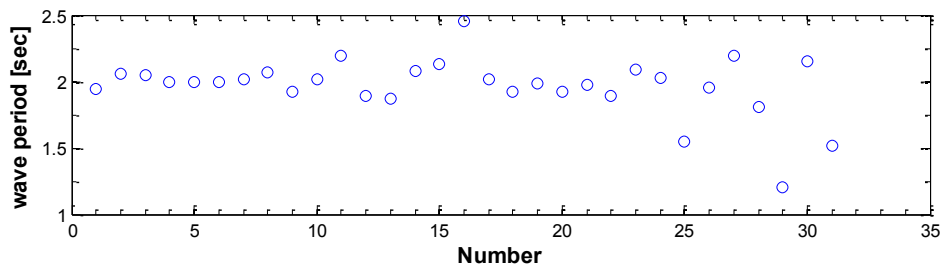


圖5.17 水位資料g0週期分析圖

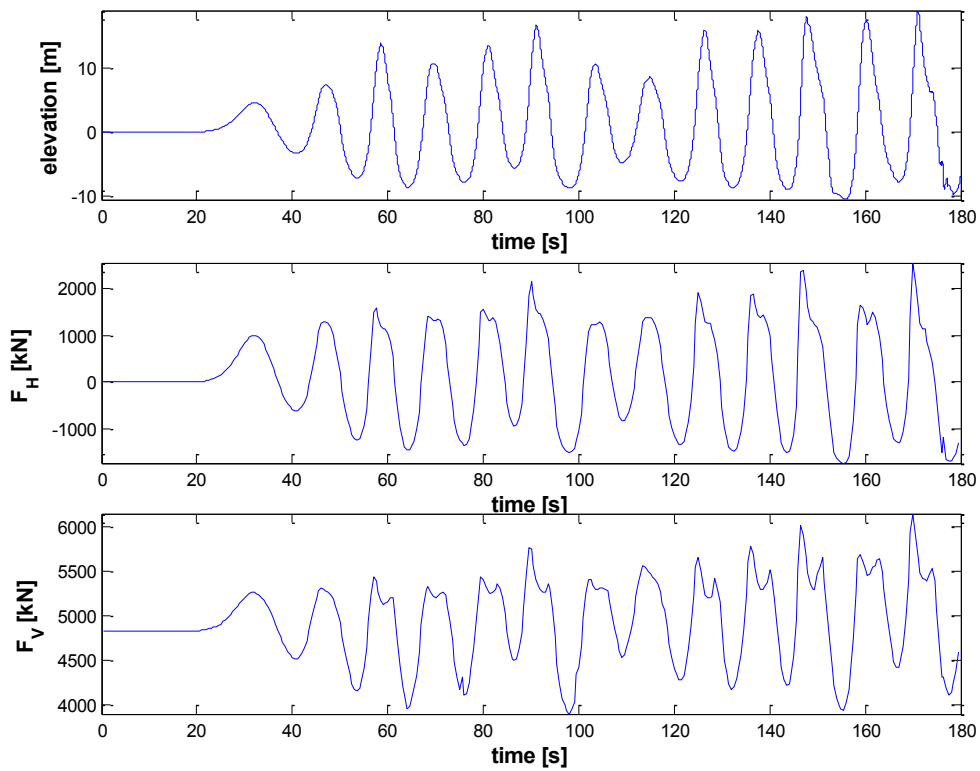


圖5.18 波浪作用力時序資料圖

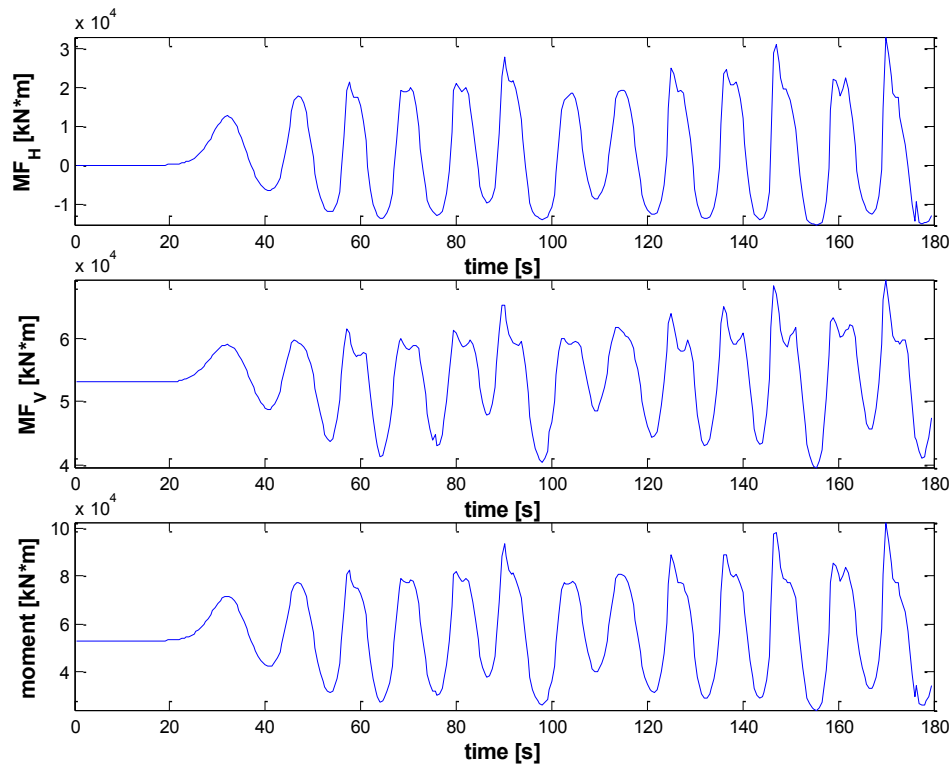


圖5.19 直立壁受波浪作用力的力矩時序資料圖

2. 天文潮最低低潮位條件

雖然造波的週期和波高條件一樣，但是因為波長是週期與水深的函數，因此天文潮最低低潮位的波長較天文潮最高高潮位的短，數值模擬結果輸出自由液面與流速分布連續圖如圖 5.20 和圖 5.21 所示。圖中於 155 秒水位往壁面溯上，發生越波情形，於 156 秒至 160 秒水位下降至波谷，161 秒開始壁面流速向上開始溯升，於 165 秒到達波峰，向上方向流速減弱至零，由於是天文潮最低低潮位情況，平均水位 21.45 公尺較低，距離堤頂高度仍有 21.55 公尺，因此並非每次波浪沿直立壁溯升時都會產生越波，至 166 秒至 168 秒水位回復到平均水深附近作週期性的波浪運動。

水位資料數值模擬計算結果如圖 5.22 所示，圖中的 g0 是水平位置 30 公尺處的水位資料點位，以零下切法分析波高與週期如圖 5.23 和圖 5.24 所示，取前三個成熟波平均，波高是 10.76 公尺，週期是 11.37 秒，其波高與週期的分析結果與最高高潮位情況有差異，波高

分布前四個波約 10 公尺左右，後面上反射波影響明顯，最高約 20 公尺，最低約 5 公尺。圖 5.22 的 g2 是距離直立壁壁面入射波四分之三波長處的水位資料，約駐波的節點位置，g4 代表駐波腹點位置處的水位資料，g3 的則位於腹點情況與節點情況之間的水位資料。

圖 5.25 中第一列為壁面位置的水位資料，第二列是水平方向作用力，第三列是垂直方向作用力，由圖可見作用力的變化情形和壁面水位的變化情形一致，水平方向作用力的變化幅度約 2,000 千牛頓，而垂直方向作用力的靜水壓約 3,500 千牛頓，可視為浮力作用力大小，其變化幅度約 2,000 千牛頓，可視為上揚作用力。

以防波堤直立壁部分中水平方向 497 公尺，垂直方向 6 公尺的堤趾做支點，計算水平方向作用力造成的力矩、垂直方向作用力造成的力矩和總力矩輸出如圖 5.26。水平方向作用力造成的力矩變化因為波浪的波高和波谷，幅度約 30,000 千牛頓公尺，垂直方向作用力造成的力矩受浮力作用的部分約 38,000 千牛頓公尺，波浪作用的部分變化幅度約 20,000 千牛頓公尺，因此總力矩在靜水位時候約 38,000 千牛頓公尺，波浪作用的部分變化幅度約 50,000 千牛頓公尺。

最低低潮位情況和最高高潮位情況比較，在同樣的造波條件下，最低低潮位的作用力與力矩的變化幅度較小，原因主要是水深的影響。由於靜水壓是水深的函數，而波浪作用力的動壓主要受波高的影響，因此在靜水位面情況，波壓作用力和力矩大小都較小，但是波浪作用影響的波壓作用力和力矩變化幅度一致。

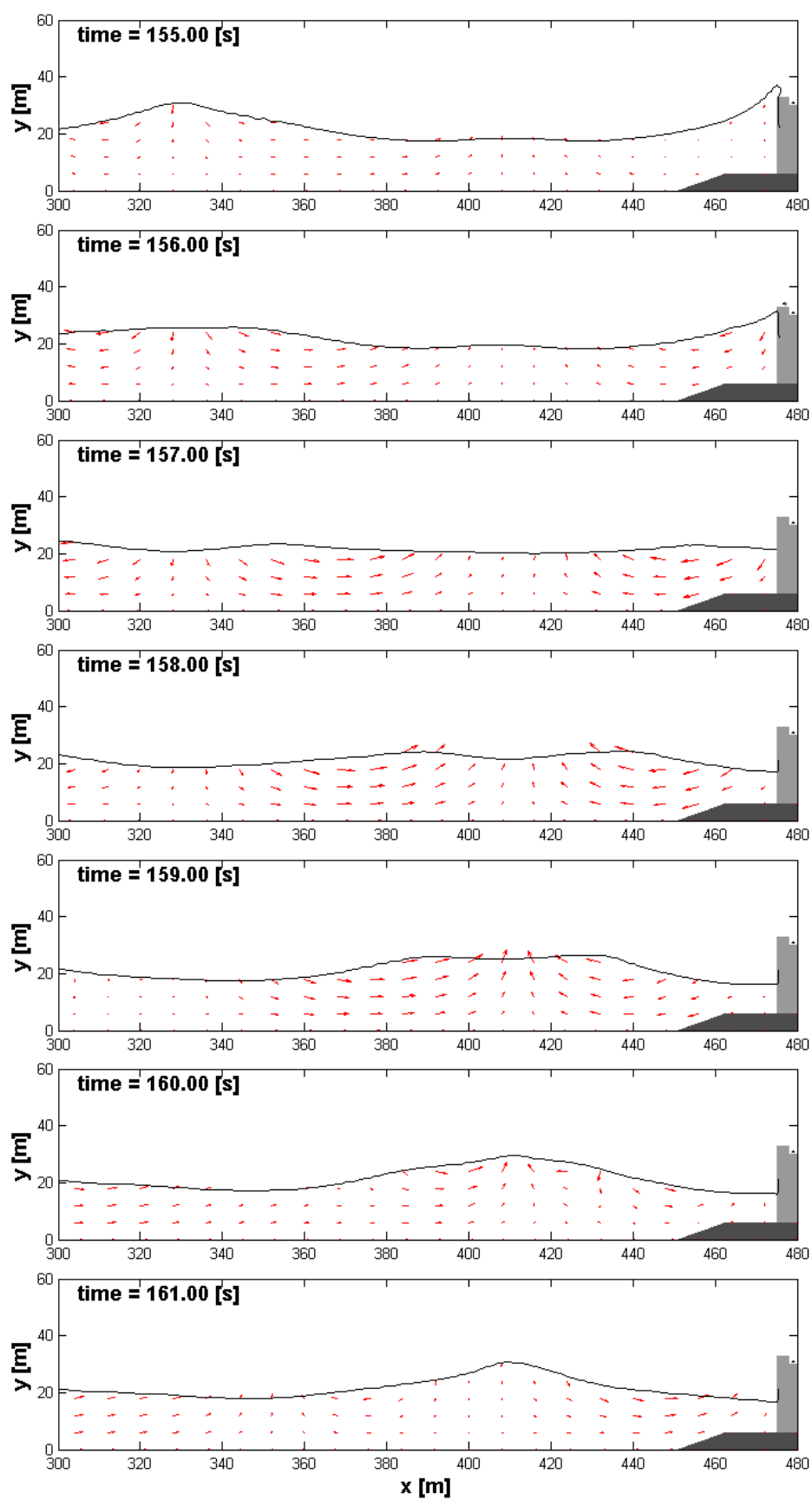


圖5.20 自由液面與流速分布連續圖

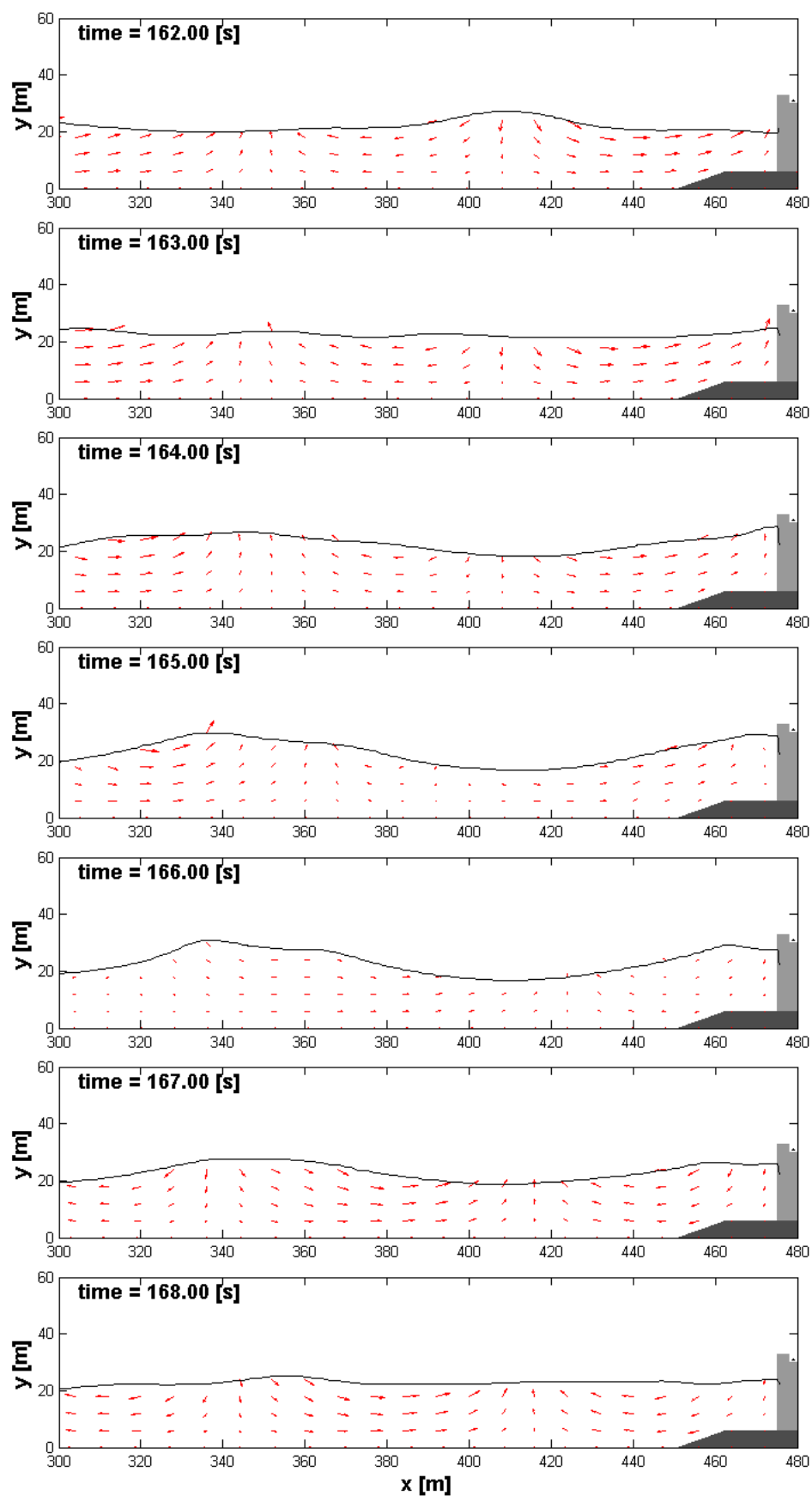


圖5.21 自由液面與流速分布連續圖

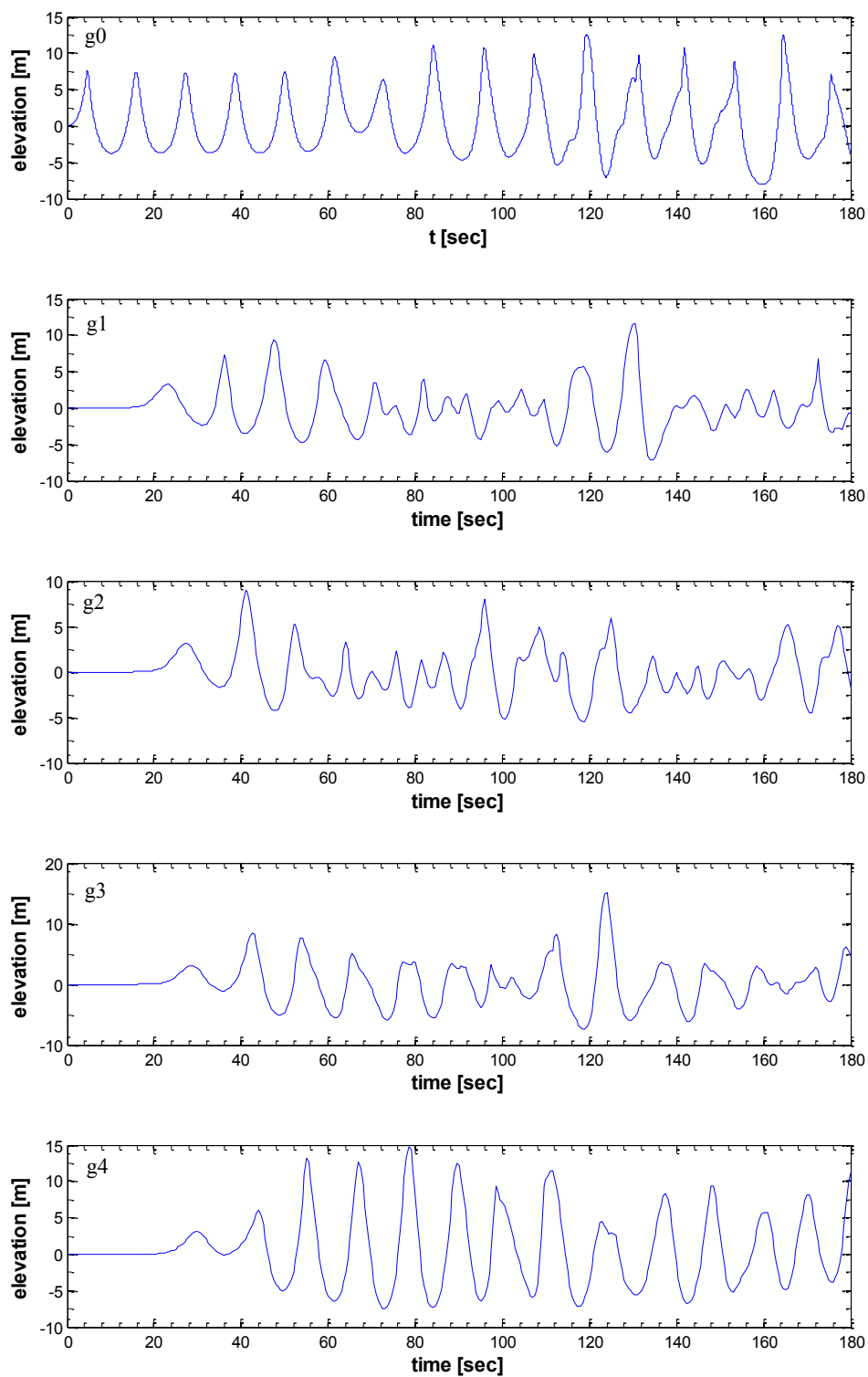


圖5.22 水位時序資料圖

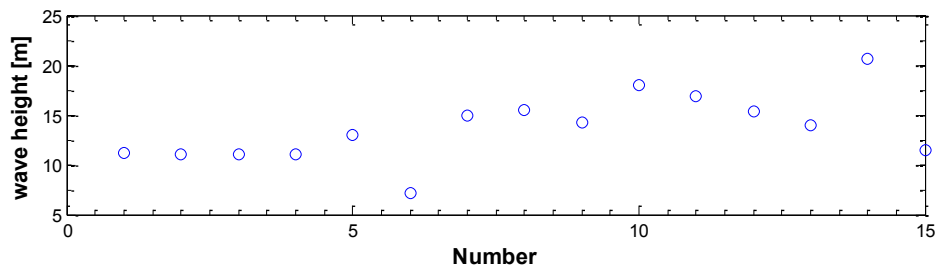


圖5.23 水位資料g0波高分析圖

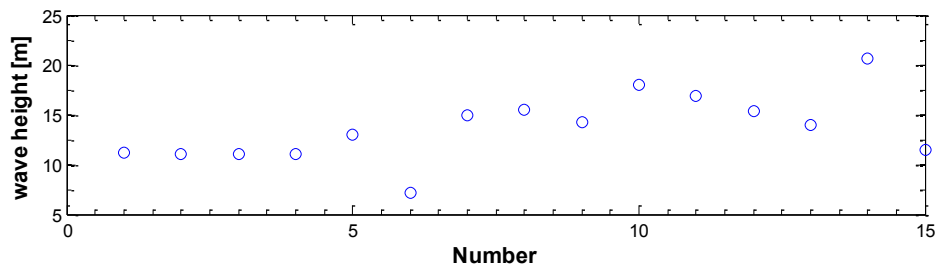


圖5.24 水位資料g0週期分析圖

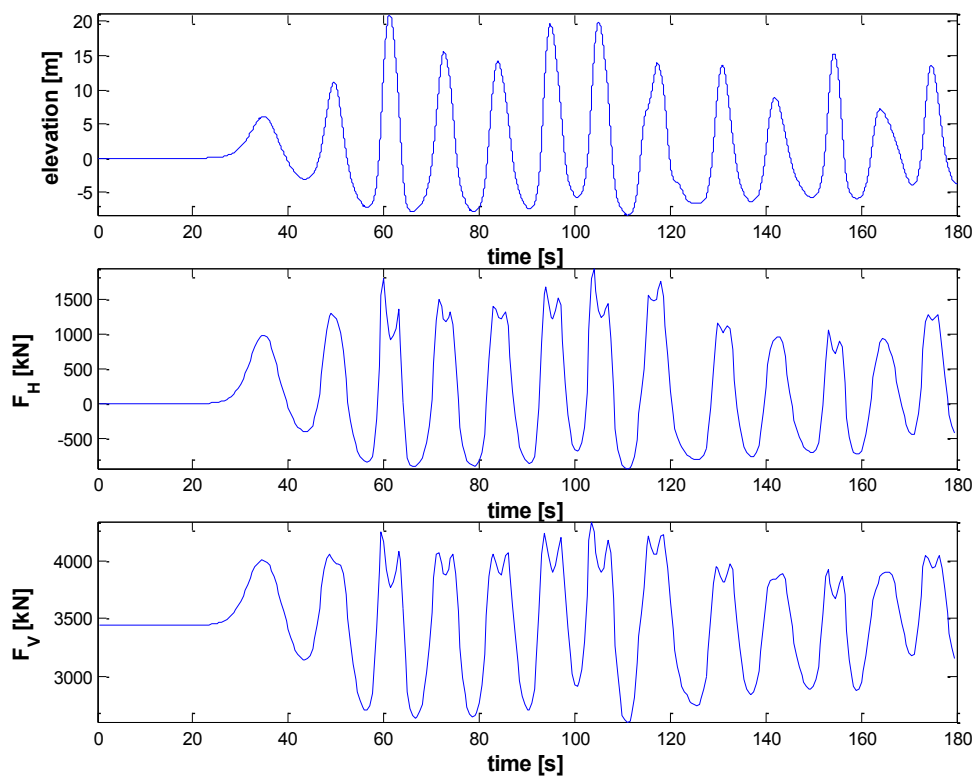


圖5.25 波浪作用力時序資料圖

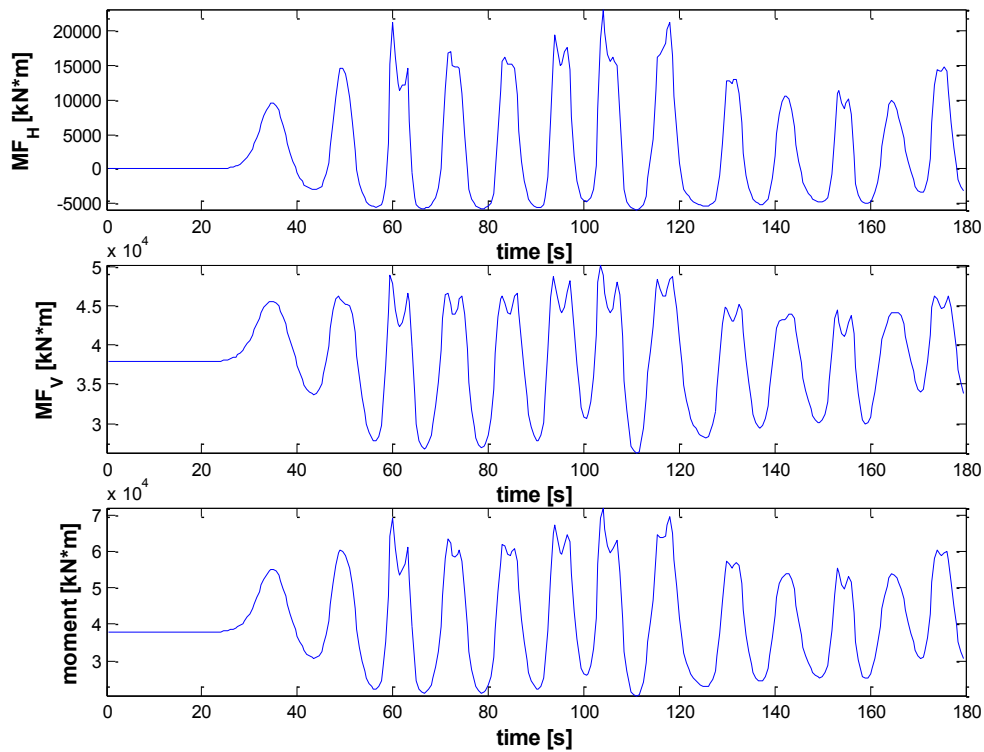


圖5.26 直立壁受波浪作用力的力矩時序資料圖

5.2.3 受力安定性探討

以上述之滑動與傾倒的安定性計算公式來檢視其安全因數是否合乎標準，並引用張等人(1999)中以合田經驗公式計算結果加以比較。滑動安定性分析主要探討防波堤直立壁部分重量作用的重力和波浪垂直方向作用力的合力轉換成摩擦力後，與水平方向的作用力的比較；傾倒安定性分析主要討論防波堤直立壁部分以直立壁靠近內港部分的堤趾做支點，討論重量作用的抵抗力矩與波浪力作用的力矩其力矩平衡的情況。張等人(1999)估算防波堤直立壁部分相關波壓分布，水平方向和垂直方向作用合力與其合力矩，將以上數據資料和模式計算的波浪作用力和作用力矩一同代入滑動與傾倒安定性分析的計算，取水平方向的最大作用力與其力矩為固定，作波浪垂直方向作用力與力矩的安全因數，取最小安全因數作為計算結果，並擷取前 100 秒的安全因數時序變化。

圖 5.27 為水深 27.86 公尺情況的滑動安全因數時序變化圖，滑動安全因數約 1.8，最小滑動安全因數是 1.6；圖 5.28 為水深 21.45 情況

的滑動安全因數時序變化圖，滑動安全因數約 2.6，最小滑動安全因數是 2.3；圖 5.29 為水深 27.86 情況的傾倒安全因數時序變化圖，傾倒安全因數約 3.1，最小傾倒安全因數是 2.2；圖 5.30 是水深 21.45 情況的傾倒安全因數時序變化圖，傾倒安全因數約 4.3，最小傾倒安全因數是 3.2。將水深 27.86 公尺情況的安定因數數值計算結果與代入合田經驗公式比較如表 5-5 所示。

由表中可見數值計算結果與合田公式計算結果大致吻合，但是在最高天文潮潮位情況，水深 27.86 公尺時的滑動安定因數數值計算結果 1.6 較合田公式計算結果 1.8 更小，檢視數值計算結果的最小滑動安定因數發生在 90 秒處，參考圖 5.18 中水平方向作用力時序資料圖，於 90 秒處水平方向作用力達到最大值 2,000 千牛頓，而垂直方向包含浮力和波力的作用力合力約 5,600 千牛頓，直立壁部分受較大的垂直方向作用力向上導致水平方向摩擦抵抗力降低，因此產生此最小滑動安定因數，由於還在標準安全因數 1.2 以上，故評估臺中港北防波堤在波高 10.6 公尺的滑動分析仍屬於安定。相較於合田經驗公式計算出來的最大波壓分布再代入安定性分析公式，以數值模式計算可以更精準的計算出時序列的波壓分布，表現安全因數的動態變化情形，再取最大作用力發生點計算滑動與傾倒安定因數，可以獲得整個波浪週期的作用力與力矩安定性變化情形，實際工程設計應用上提供更多的資訊以利面對不同海域與海況的防波堤設計。

由於在數值模擬的時候發生越波情況，因此應用此模式數值計算結果估算越波浪，越波率即波浪於海岸結構物頂部每秒所能通過之水量，計算模式中水位超過直立壁堤頂部分之高度與流速分布再將其相乘便可得知通過堤頂之每單位寬度越波率。將水深 27.86 公尺情況的天文潮最高高潮位越波率計算繪製如圖 5.31 所示，圖中顯示每單位寬度最高越波流率約每秒 80 立方公尺，發生在時間約 175 秒，對照圖 5.18 的壁面堤前水位時序資料可見波浪於 47 秒左右開始產生越波，之後的越波發生時間與週期 11.4 秒一致，由於在天文潮最高高潮位，平均水位距離堤頂高度只有 5.14 公尺，因此參考壁面堤前水位，超過此波高的波峰高度都會產生越波，其中以時間 90 秒、150 秒和 175 秒的越波率最大，對照圖 5.15 的時序資料，其最大越波率

發生時，波高也最大，而越波發生對作用力並沒有顯著的影響，將越波率經時間累加為越波量，如圖 5.32 所示，由圖中可見於天文潮最高高潮位時，經過約 15 個週期後，每單位寬度累積越波量達 1000 立方公尺。將天文潮最低低潮位的越波流量計算於圖 5.33，最高越波率約每秒 30 立方公尺，發生在時間約 11 秒，其平均水位距離堤頂高度約 21.55 公尺，其越波發生的時間較晚，約 60 秒時才產生越波，而連續六個波浪都有越波的發生，但是下一次越波卻發生在 190 秒時，其間 70 秒全無越波的發生，將其越波率累計為越波量，如圖 5.34 所示，經過約 15 個週期後，每單位寬度累積越波量達 100 立方公尺，較天文潮最高高潮位情況，其越波發生的次數和越波量都減少許多。

本研究另以紊流強度討論波浪在近岸遭遇直立壁溯升並越過堤頂形成越波的情況，首先將紊流強度 $\langle k \rangle$ 以造波條件的波速正規化如下式：

$$K = \frac{\sqrt{2\langle k \rangle}}{H/h\sqrt{gh}} \quad (5.3.21)$$

式中 $\langle k \rangle$ 是紊流強度， H 是入射波波高， h 是水深， g 是重力加速度。將最高高潮位情況，波浪一個週期從溯升到越波的正規化紊流強度變化以等高線繪於圖 5.35。圖形顯示 153 秒時波浪剛越波，水位從波高降回到平均水位處，此時堤頂上留有部分之前越波的紊流強度殘餘，透水性拋石底床也有因為波浪通過透水性材質產生的紊流強度，水體部分的紊流強度在壁面堤前的附近，水位持續下降，於 156 秒時水位降至波谷位置，紊流強度 0.1 的區域自壁面往外擴大，水位開始往上升，上升至平均水位後持續沿直立壁溯上，紊流強度在堤頭持續增強，於 159 秒至堤頂高度時開始越波至 162 秒波浪越波並把紊流強度帶往堤後方，此時堤前壁面的紊流強度減弱，直至 165 秒時，波浪回復週期性運動，紊流強度重新在堤前壁面增強。

由以上計算分析結果顯示，COBRAS 模式計算結果可適切地模擬波浪與結構物作用區的時序列流場速度、作用力分布變化，包含碎波、越波及透水結構物作用等特性，可供港灣工程從業人員了解異常

波浪與非線性長波對結構物受力，依本研究之分析步驟與方法可著手評估既有碼頭構造物之安定能力。另外，本研究所模擬的流場速度分布，可視為堤腳沖刷的主要動力，此為港灣結構物設計的重要依據。

表 5-5 安定因數數值計算與公式計算結果比較表

最高高潮位	合田公式	數值計算
最小滑動安定因數	1.8	1.6
最小傾倒安定因數	2.2	2.2
最低低潮位	合田公式	數值計算
最小滑動安定因數	2.3	2.3
最小傾倒安定因數	2.9	3.2

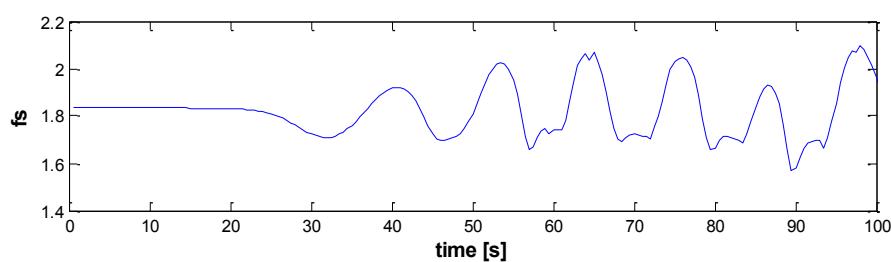


圖5.27 天文潮最高高潮位條件滑動安定因數時序圖

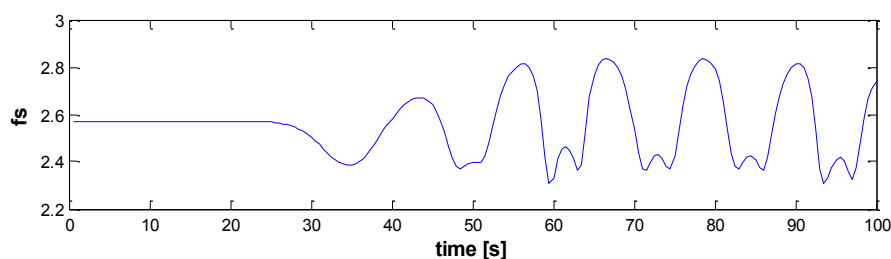


圖5.28 天文潮最低低潮位條件滑動安定因數時序圖

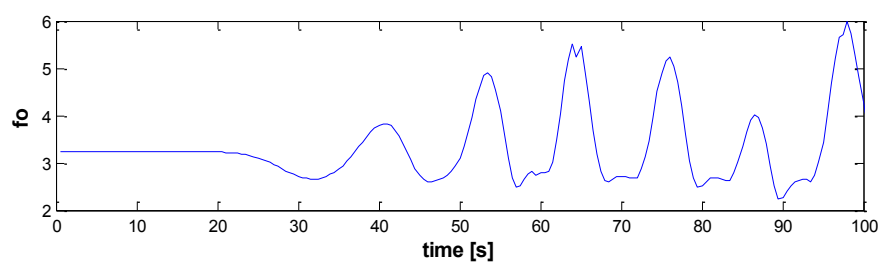


圖5.29 天文潮最高高潮位條件傾倒安定因數時序圖

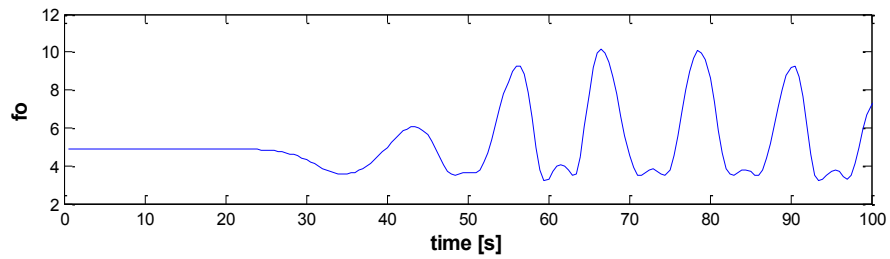


圖5.30 天文潮最低低潮位條件傾倒安定因數時序圖

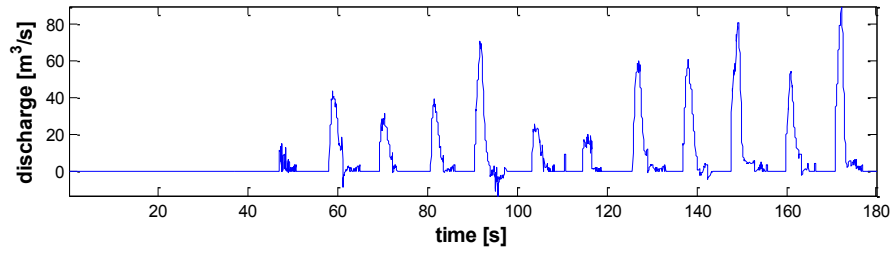


圖5.31 天文潮最高高潮位條件越波率時序圖

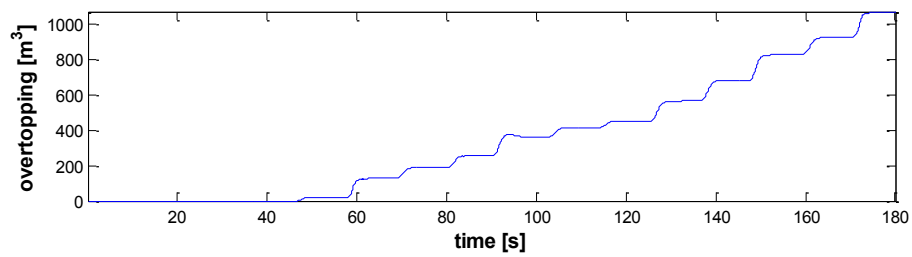


圖5.32 天文潮最高高潮位條件越波量累計圖

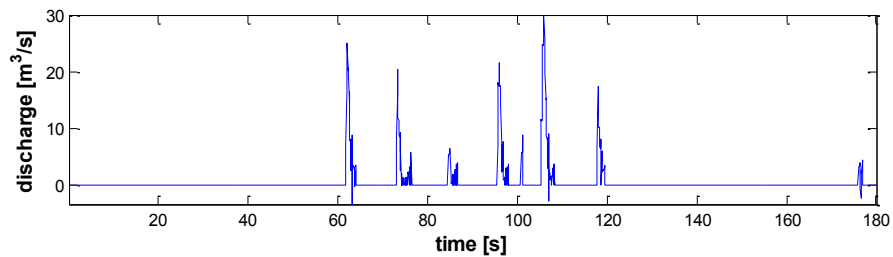


圖5.33 天文潮最低低潮位條件越波率時序圖

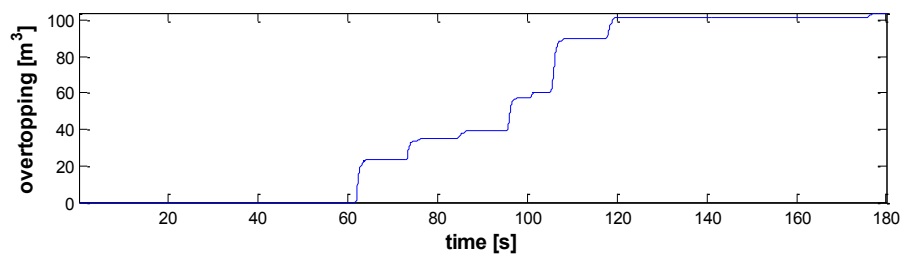


圖5.34 天文潮最低低潮位條件越波量累計圖

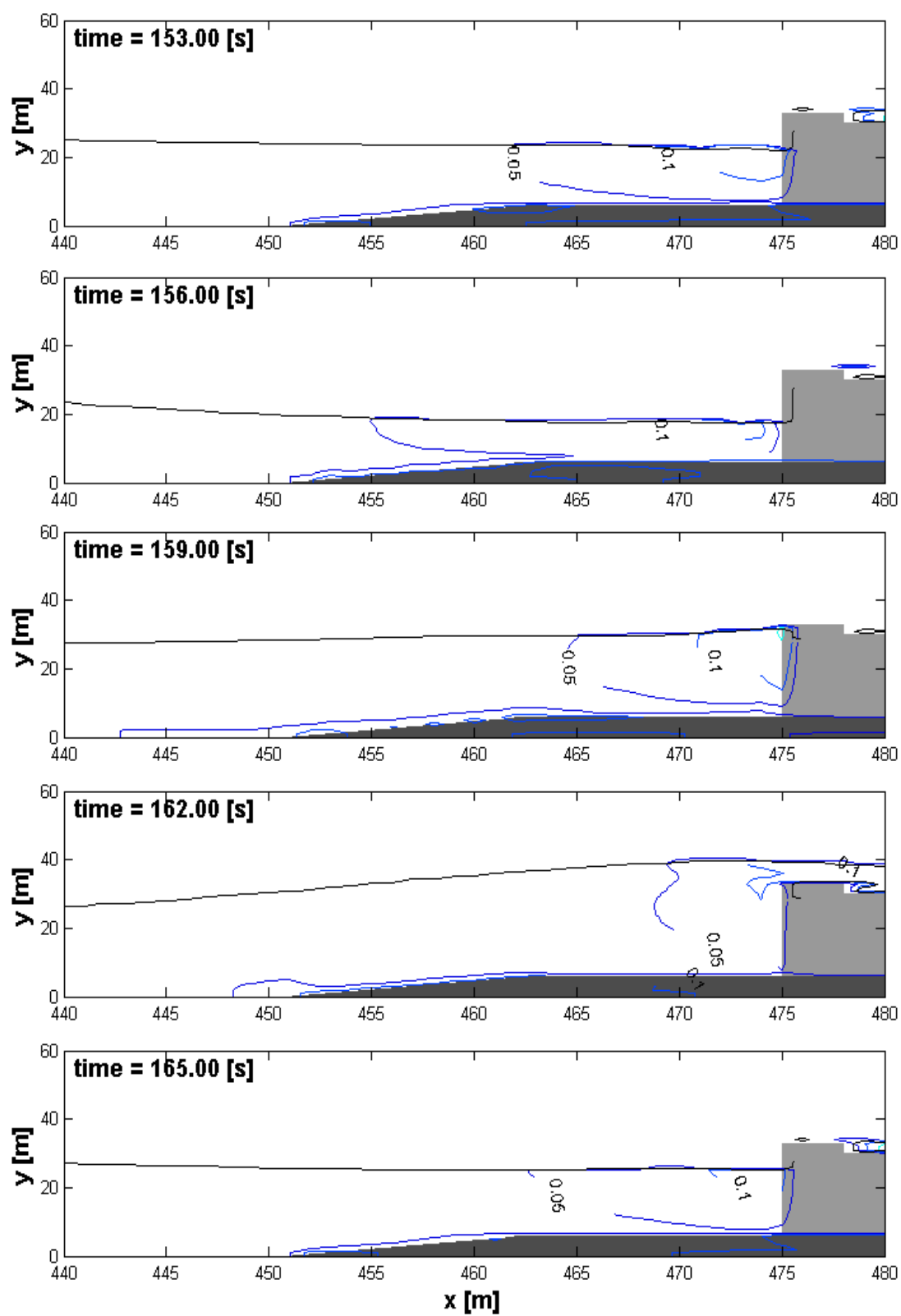


圖5.35 不同波浪作用時間紊流強度等值線分布圖

第六章 結論與建議

港灣構造物包括防波堤、碼頭以及各種消波設施等，其中防波堤常需以較長結構物深入海中，以達到遮蔽波浪的效果。當波浪及海流經過此長防波堤大型結構物發生交互作用，再加上近岸的水深的變化，故使原沒有結構物時的水理機制改變且更加複雜。在結構物附近水流以及波浪場的改變，常會威脅船隻航行安全，而水流加速易造成底床沖刷而可能威脅堤體結構物的穩定安全，如臺中港北防波堤、花蓮港東防波堤以及麥寮工業港的西防波堤的建造，雖都達到了波浪遮蔽效果，但此人工結構物使附近波流場更為複雜。臺灣四周環海，夏秋季常受颱風之威脅，颱風所引起的波浪及海流，常造成港灣結構物的損害，如：如沈箱沈陷位移內部填充材料流失、防波堤堤面破損、消波胸牆毀損等，也常造成港灣附近之海灘流失、海岸護岸及海堤之損壞，亦可能危及鄰近陸地以及海岸公路之居民安全。此外，近年來全球接連發生極端的氣候事件，不但發生頻率有增加的趨勢，而且極端紀錄值亦屢創新高，臺灣未來可能面臨更嚴峻的海氣象條件的侵襲。為確保結構物在未來極端的海氣象條件下，能夠安全穩定，有必要對結構物與波流互制作用，作進一步的分析研究。本研究目的為探討波浪及海流與港灣海岸結構物之作用，並探討異常波浪與海流對於結構物穩定性之影響。本計畫為 4 年期之第 2 年，以臺中港為目標港區作研究探討，在波流與結構物互制作用方面，進行港灣構造物附近多項海象現場觀測調查與分析，包括平面流場、垂直流場以及平面波場等項目，探討波浪和水流與港灣結構物之互制影響作用；在極端波浪影響方面，建置及驗證波與流的數值模式，並探討波流與結構物互制之作用。本研究成果期能提供學術、施政、設計及施工相關單位之參酌，並能提昇國內港灣海岸工程之研究技術水準。

6.1 結論

1. 以定點海流儀分析不同縱向水深其海流流速與流向的特性顯示，在本研究觀測期間（72 小時），靠近表層海流介於北北西至北北東向之間，中間水深海流方向則集中在北向附近，而較底層海流以北北東向佔較多。不同潮位分析上，在最靠近底床的水流方向均介於北向至北北東向之間，流向不受漲退潮的影響，顯示觀測點附近有一股恆流流向北方，流速約為 0.5m/sec。
2. 由雷達監測分析表面流場在觀測期間（24 小時）分析結果顯示，流場在不同水位受近岸港灣結構物的影響變化很大，北防波堤南側之流速大於北防波堤北側之流速，且堤頭附近西南處流速亦較大，退潮時之流速大於漲潮時之流速。北防波堤南側在靠近堤頭處的流向在不同潮位時均為西北向，可能是向北恆流碰到北防波堤後，轉向往西北深水處所致。
3. 在浮標追蹤觀測分析結果顯示，在漲潮時段，堤頭前附近平均流速介於 81.0~84.4 cm/sec，方向由北北東向遠離堤頭後轉為東北向，較淺水靠近岸的浮標轉向幅度較深水處浮標明顯。在退潮時段，堤頭附近平均流速介於 22.9~69.7 cm/sec，深水處浮標漂流速度比淺水處浮標速度快，浮標漂流方向先由北北西向，在離開堤頭較遠處後，則逐漸轉為北北東向。
4. 船碇 ADCP 觀測空間流場結果顯示，在臺中港北防波堤以西之海域，其表層流(1.8~2.8m 水深)平均流速約在 0.42~0.58m/sec 間，流向大致為往東北~北向，漲潮時段偏東北向，退潮時段則較偏北；而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.2~0.35m/sec，其流向為沿北防波堤往西北方向前進；北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯更小。平均底層流以北防波堤外海北北西處流速較大，在堤頭深坑處附近流速亦較其他地區大。底層流平均流速比表層流速小，在北防波堤西側區域由深水往淺水處，

底層流向由北北東向至凹坑處轉為北向，再至接近堤頭處轉為北北西向，而表層流向則為東北在凹坑西側及附近即轉為北向。

5. 利用船碇 ADCP 分析底層 1m 厚度水層之平均回波強度結果顯示，無論漲潮還是退潮，觀測範圍內均存在一條源自堤頭附近且向北北東方向延展的高濃度懸浮物質水舌。北防波堤南側之西北方向海流在堤頭外深坑附近匯入北防波堤西側之北北東方向海流，這種急劇的海流交匯使得該處流線急劇彎曲，在床面附近產生漩渦，劇烈淘刷底部泥沙。此外，觀測區域之底層存在平均流，這穩定的平均流而把漩渦淘刷起來的泥沙向北北東方向連續輸運，使得該深坑得以穩定存在。
6. 本研究以 COBRAS 模式模擬斜坡底床上，波浪與結構物的作用情形，經實驗驗證水位資料和波壓資料後說明模擬結果具一致性與可靠性，模式在模擬等深底床前進波，波浪通過緩斜坡的變形和淺化，和遭遇防波堤直立壁面的反射與防波堤拋石基座的透水性材質等一系列複雜的作用尚能適切的反應波浪場的水位變化、速度向量和波壓分佈，而且波壓資料轉換成水平力和上揚力，未來將應用在結構物的安定性分析的討論與研究。
7. 本研究以數值模式計算可精準計算出時序列的波壓分佈，相較於合田經驗公式以最大波壓分佈再代入安定性分析公式，可以表現更佳安全因數的動態變化情形，再取最大作用力發生點計算滑動與傾倒安定因數，可以獲得整個波浪週期的作用力與力矩安定性變化情形，實際工程設計應用上提供更多的資訊，以符合面對不同海域與海象條件的防波堤設計。

6.2 建議

1. 本年度船碇 ADCP 表層海流與臺中港 TC-W1 站之海流觀測結果相近，但表層海流流速平均快了 0.09m/sec，且在表層海流流向較臺中港 TC-W1 站者偏東約 25 度，此現象與 Ekman(1905)有關表面風場

對表層海水的風驅效應經驗關係描述相似，但風驅流流速與風速之關係仍需進一步分析探討。臺中港鄰近海域為臺灣沿海重要的風場，夏季季風期間平均風速約 3.7m/sec，冬季季風期間則風速平均達 6.9m/sec，故欲更深入瞭解此海域之表層海流的特性機制則需要同時掌握風場相關資訊。

2. 本研究目前以多種觀測儀器同時監測的時間為夏季，目前僅針對夏季在臺中港北防波堤附近海域作量測分析，臺中港冬季海象條件並不適合作現場量測，但仍希望能克服在冬春季節，能夠執行上述多項海象觀測同時進行的作業，以得到本研究地區不同季節波流與結構物互制之特性。

6.3 成果效益及後續應用情形

本研究分別以蒐集資料整理分析、現場調查、數值模擬計算以及統計分析等方式，探討港灣大型結構物對波流場影響，大型結構物對波流場影響成果可提供各港務單位以及工程設計單位對於港灣大型結構物（如長防波堤）附近的水理機制以及造成地形沖刷更加瞭解，可作為未來改善港灣結構物以及沖刷問題之參考。

參考文獻

1. 張金機、簡仲璟、蘇青和、曾哲茂、陳冠宇、陳毓清，1999，台中港港口第二期擴建工程規劃－工程初步設計報告書，交通部運輸研究所。
2. 交通部中央氣象局，1999～2012，氣候資料年報-地面資料。
3. 交通部中央氣象局，1999～2012，潮汐觀測資料年報。
4. 李勁毅，2006，海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究，國立臺灣海洋大學碩士論文。
5. 王韻圓，2010，西北太平洋長期波候變遷之研究。
6. 許泰文、黃清哲，2012，強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(1/2)，經濟部水利署。
7. 台灣世曦工程顧問有限公司，2013，臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司。
8. 臺灣氣候變遷與資訊平臺計畫網站，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>
9. Booij, N., Holthuijsen, L. H., Doorn, N. and Kieftenburg, A. T. M. M., 1997, "Diffraction in a spectral wave model", *Proceedings of 3th International Symposium Ocean Wave Measurement and Analysis WAVES 97*, ASCE, New York, 243-255
10. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999, "A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
11. Casulli, V. and Cheng, R. T., 1992, "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15 (6), 629-648.
12. Climate Change 2007, the Fourth Assessment Report (AR4) of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

13. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, WorldScientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
14. Ekman, V.W., 1905, On the influence of the earth's rotation on ocean currents, *Ark. Mat. Astron. Fys.*, 2 (11), 1-52.
15. Erduran, K. S., Ilic, S., and Kutija, V., 2005, "Hybrid finite-volume finite-difference scheme for the solution of Boussinesq equations", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 49, 1213-1232.
16. Haas, K. A., Svendsen, I. A., Haller, M. C. and Zhao, Q., 2003, "Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems", *Journal of Geophysical Research*, 108 (7), 3217.
17. Hsu, T. J., Sakakiyama T. and Liu, P. L.-F., 2002, "A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater", *Coastal Engineering*, 46, 25-50.
18. Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A., 1992, *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.4. Documentation and User's Manual*, Research Report No. CACR-92-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
19. Kirby, J. T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J. C. and Grilli, S. T., 2013, "Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects", *Ocean Modeling*, 62, 39-55.
20. Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1990, "Numerical Model for Wave on Rough Permeable Slopes", *Journal of Coastal Research*, 7, 149-166.
21. Kothe, D. B., Mjolsness, R. C. and Torrey, M. D., 1991, "*RIPPLE: A computer program for incompressible flows with free surfaces*", available to DOE and DOE contractors from OSTI.

22. Kuo, P. C. and Hsu, H. C., 2012, “Numerical Study of Solitary Wave Runup at a Vertical Wall”, *Proceedings of the 34th Ocean Engineering Conference in Taiwan*, 167-172.
23. Lin, P. and Liu, P.L.-F., 1998 “A numerical study of breaking waves in the surf zone”, *Journal of Fluid Mechanics*, 359, 239-264
24. Liu, P. L. and Lin, P., 1997, *A Numerical Model for Breaking Waves: The Volume of Fluid Method*, Research Report No. CACR-97-02. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
25. Liu, P. L.-F., and Wen, J., 1997, “Nonlinear Diffusive Surface Waves in Porous Media”, *Journal of Fluid Mechanics*, 347, 119-139.
26. Liu, P. L. F., Lin, P., Chang, K. A. and Sakakiyama, T., 1999, “Numerical modeling of wave interaction with porous structure”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 125 (6), 322-320.
27. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1962, “Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’ ”, *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481–504.
28. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1964, “Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications”, *Deep Sea Research and Oceanographic*, 11(4), 529–562.
29. Newberger, P. A. and Allen, J. S., 2007, “Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive equation model for application in the surf zone: 1. Formulation”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
30. Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, “Three-dimensional dispersion of momentum in wave induced nearshore currents”, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 409-427.
31. Rodi, W., 1980, *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics—A state of the Art Review*, International Association for Hydraulic Research Publication, Delft, Netherlands.

32. Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H., 2010, "Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes", *Coastal Engineering*, 57, 407-423.
33. Shi, F. and Sun, W., 1995, "A variable boundary model of storm surge flooding in generalized curvilinear grids", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 (8), 641-651.
34. Shi, F., Sun, W. and Wei, G., 1998, "AWDM method on generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding", *Applied Ocean Research*, 19(4), 275-282.
35. Shi, F., Svendsen, I. A., Kirby, J. T. and Smith, J. M., 2003, "A curvilinear version of a Quasi-3D nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 49 (1-2), 99-124.
36. Shi, F., Kirby, J. T. and Hanes, D., 2007, "An efficient mode-splitting method for a curvilinear nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 54, 811-824.
37. Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B. and Harris, J. C., 2011a, "*FUNWAVE-TVD, users' manual and benchmark tests*", Center for Applied Coastal Research Report, CACR 2011-04, University of Delaware, Newark, Delaware.
38. Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D. and Grilli, S. T., 2011b, "A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation", *Ocean Modelling*, 43, 36-51.
39. Shi, F., Kirby, J. T., Hsu, T. J. and Chen J. L., 2012, "*NearCoM-TVD, documentation and users' manual*", Research Report, CACR, University of Delaware, Newark, Delaware.
40. Shiach, J. B. and Mingham, C. G., 2009, "A temporally second-order accurate Godunov-type scheme for solving the extended Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 32-45.

41. Shih, T.-H., Zhu, J. and Lumley, J.L., 1996, "Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23(11), 1133-1144
42. Shin, S., Cox, D., Kim, I. C. and Yim, S. 2006, "Wave Transformation, Impact, and OverTopping on a Rubble Mound Breakwater: Large Scale Measurements and Numerical Modeling", *Coastal Engineering*, 4580-4591.
43. Sollitt, C. K. and Cross, R. H., 1972 "Wave Transmission through Permeable Breakwaters", *Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1827-1846.
44. Sulisz, W., 1985, "Wave Reflection and Rransmission at Permeable Breakwaters of Arbitrary Aross-section", *Coastal Engineering*, 9, 371-386.
45. Svendsen, I. A. and Putrevu, U., 1990, "Nearshore circulation with 3-D profiles", *Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 241-254.
46. Svendsen, I. A., Haas, K. A. and Zhao, Q., 2003, *Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0, Research Report*, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
47. Tehranirad, B., Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C. and Grilli, S., 2011, *Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD, Version 1.0*, Research Report No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
48. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. and Mastin, C. W., 1985, "*Numerical grid generation: foundations and applications*", Amsterdam: North-hollan.
49. Thorne, P. D., Vincent, C. E., Hardcastle, P. J., Rehman, S., and Pearson, N., 1991. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 98: 7-16.

50. Tonelli, M. and Petti, M., 2009, “Hybrid finite volume - finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations”, *Coastal Engineering*, 56, 609-620.
51. Toro, E. F., 2009, *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction*, Third edition, Springer, New York.
52. Van Dorn, W.G., 1953, “Wind Stress on an Artificial Pond”, *Journal of Marine Research*, 12, 249-276.
53. Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R. and Rubio, J., 1988, “Solitary Wave Transmission through Porous Breakwaters”, *Proceedings of 21th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1073-1083.