

105-068-7899

MOTC-IOT-104-H2DB004

港灣構造物與波流互制研究(3/4)



交通部運輸研究所

中華民國 105 年 6 月

105-068-7899

MOTC-IOT-104-H2DB004

港灣構造物與波流互制研究(3/4)

著者：蔡立宏、洪維屏、曾相茂

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 6 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. (3/4) / 蔡立宏, 洪維屏, 曾相茂著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 105.06

面 ; 公分

ISBN 978-986-04-8859-3(平裝)

1.海岸工程 2.防波堤

443.3

105009342

港灣構造物與波流互制研究(3/4)

著 者：蔡立宏、洪維屏、曾相茂

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 105 年 6 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：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1010500851

ISBN：978-986-04-8859-3 (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。

105

港灣構造物與波流互制研究
(3/4)

交通部運輸研究所

GPN : 1010500851

定價 200 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(3/4)			
國際標準書號 ISBN 978-986-04-8859-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1010500851	運輸研究所出版品編號 105-068-7899	計畫編號 104-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：洪維屏、曾相茂 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 104 年 01 月 至 104 年 12 月
關鍵詞：港灣結構物；防波堤；水理機制；異常波浪			
摘要： <p>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結構物互制之作用，並探討異常波浪與海流對於結構物安全穩定之影響。</p> <p>本研究為 4 年期之第 3 年，以臺中港為目標港區，在春季以船載海流儀、浮標追蹤與定點波流儀等儀器，在北防波堤附近海域同時進行觀測與分析，觀測項目包括波場、流場、風及潮位等。分析結果顯示北防波堤附近海流在縱水深各層之流速及方向存在差異，表層海流受風趨動以及潮流影響向北流，底層海流不受季節與潮汐影響有一股向北恆流，海流並受北防波堤影響而改變方向。本研究另外以波流數值模式模擬氣候變遷極端海氣象所造成的波流場，評估對港灣構造物的受力與安定性，結果顯示港灣結構物未來在極端海氣象作用下其滑動安全受到威脅。本研究成果可提供各港務相關單位如港務公司、航港局及規劃設計單位對於港灣長結構物附近水理機制的瞭解，亦可作為評估結構物安全與未來改善港灣結構物之參考。</p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
105 年 6 月	162	200 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： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 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 (3/4)			
ISBN 978-986-04-8859-3 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010500851	IOT SERIAL NUMBER 105-068-7899	PROJECT NUMBER 104-H2DB004
DIVISION: Harbor and Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Tsai Li-hung PROJECT STAFF: Hung Wei-ping, Tseng Hsiang-mao PHONE: +886-4-26587177 FAX: +886-4-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2015 TO December 2015
KEY WORDS: port structure, breakwater, water behavior, extreme waves			
ABSTRACT: <p>Most of the structures for a port must be built in the water, and will inevitably affect the behaviors of the surrounding water 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 wave and current behavior incredibly complicated. The changes of waves and currents that often occur scour around the head of breakwaters and could threaten the structure's safety. Moreover, many studies have revealed 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. To ensure that the port's structures can be safe and stable against extreme sea states, it is necessary to further investigate the interaction of waves and currents with the structures.</p> <p>The purpose of this study is to investigate the effects and interactions between the structures and the waves and currents, and the effects of the extreme weather conditions on the stability of the harbor structures. Site surveys, statistical analysis, and numerical models were respectively carried out in this project. The topics included in the present research are as follows: 1. Analyzing and gathering statistics on the marine and weather meteorology. 2. Site surveys of wind, wave, current, and tides of the nearby port structures. 3. Studying the interaction mechanisms of wave and current with structure. 4. Evaluating the force and safety of structure under the extreme weather condition. The results of field observation show that differences in current speed and direction at different depths and locations near the northern breakwater exist. The numerical models were set up and verified with field observation to calculus, and the models were used to study the force situation and the stability of port structures under extreme waves that may occur in the near future with climate change. This study will help increase our understanding of water behavior near port structures, as well as establish the inspecting procedure and evaluating standard. The results can be provided to government institutions and private sectors, including the Ministry of Transportation and Communication, Port authority, 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.</p>			
DATE OF PUBLICATION June 2016	NUMBER OF PAGES 162	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> 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(3/4)

目 錄

摘 要	I
目 錄	III
表目錄	VI
圖目錄	VIII
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	1-3
1.4 本研究組織	1-4
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	2-3
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	2-11
2.4 颱風資料	2-13
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.....	3-5
3.4 潮位分析.....	3-8
3.5 單點波流分析.....	3-9
3.6 浮標軌跡表面流分析.....	3-21
3.7 船碇觀測流場分析.....	3-24
第四章 波流場模擬分析.....	4-1
4.1 波流場數值模式.....	4-1
4.1.1 SHORECIRC 方程式.....	4-3
4.1.2 SWAN 方程式.....	4-6
4.2 模式範圍及參數設定.....	4-8
4.3 模式驗證.....	4-10
4.4 氣候變遷波流場模擬.....	4-12
4.5 氣候變遷影響分析.....	4-19
第五章 結構物受力安定分析.....	5-1
5.1 COBRAS 數值模式.....	5-2
5.1.1 控制方程式.....	5-2
5.1.2 $k-\varepsilon$ 紊流閉合模式.....	5-3
5.1.3 透水性控制流體方程式.....	5-7
5.2 模式建置.....	5-8
5.3 結構物受力分析.....	5-20
5.4 結構物安定性分析.....	5-28

第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-3
6.3 成果效益及後續應用情形.....	6-3
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 2014 年風統計表	2-3
表 2-3	臺中港歷年海流統計表	2-6
表 2-4	臺中港歷年示性波高、週期及波向資料統計表	2-9
表 2-5	臺中港歷年潮位資料統計表	2-12
表 2-6	1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表	2-14
表 2-6	1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表(續 1)	2-15
表 2-6	1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表(續 2)	2-16
表 2-6	1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表(續 3)	2-17
表 2-7	1998 年至 2015 年期間颱風路徑分類統計表	2-18
表 2-8	臺中港外海颱風波迴歸分析統計表	2-18
表 3-1	浮標軌跡不同時間平均流速表	3-21
表 3-2	表層半日潮潮流橢圓參數分析表	3-43
表 3-2	表層半日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-44
表 3-3	表層全日潮潮流橢圓參數分析表	3-45
表 3-3	表層全日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-46
表 3-4	中層半日潮潮流橢圓參數分析表	3-47
表 3-4	中層半日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-48
表 3-5	中層全日潮潮流橢圓參數分析表	3-49
表 3-5	中層全日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-50
表 3-6	底層半日潮潮流橢圓參數分析表	3-51
表 3-6	底層半日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-52

表 3-7	底層全日潮潮流橢圓參數分析表	3-53
表 3-7	底層全日潮潮流橢圓參數分析表(續).....	3-54
表 4-1	大區域海潮流模式之格網及計算條件	4-9
表 4-2	各迴歸期之颱風波浪條件	4-13
表 4-3	不同氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100 年).....	4-14
表 4-4	不同情境條件在不同防波堤位置之示性波高模擬結果	4-18
表 4-5	氣候變遷之各迴歸期颱風波浪條件	4-19
表 4-6	模式模擬氣候變遷不同颱風波浪迴歸期的最大示性波高 結果.....	4-23
表 5-1	模式之網格設定	5-11
表 5-2	符號說明表	5-14
表 5-3	四種防波堤之設計水深和胸牆頂高	5-21
表 5-4	不同情境防波堤前 100 公尺之波浪條件	5-24

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	臺中港歷年風速及風向之月統計圖	2-4
圖 2.3	臺中港歷年風速及風向之月統計比較圖	2-5
圖 2.4	臺中港歷年海流平均流速及最大流速之月統計比較圖	2-6
圖 2.5	臺中港歷年海流流速、流向及最大流速之月統計分佈圖	2-7
圖 2.6	臺中港歷年平均示性波高、平均週期及最大示性波高之月 統計比較圖	2-10
圖 2.7	臺中港歷年平均示性波高、平均週期及波向之月統計分佈 圖	2-10
圖 2.8	臺中港歷年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計 圖	2-11
圖 2.9	颱風路徑分類圖	2-17
圖 3.1	臺中港長期海氣象觀測站示意圖	3-1
圖 3.2	觀測範圍示意圖	3-3
圖 3.3	垂直剖面流速觀測測線規劃圖	3-4
圖 3.4	垂直剖面流速實際觀測軌跡圖	3-4
圖 3.5	北防波堤堤頭風速變化圖	3-6
圖 3.6	北防波堤堤頭風向變化圖	3-6
圖 3.7	北防風林處風速變化圖	3-6
圖 3.8	北防風林處風向變化圖	3-6
圖 3.9	北防波堤堤頭風玫瑰圖(3/29 00:00~3/31 23:00)	3-7
圖 3.10	北防波堤堤頭風玫瑰圖(3/30 00:00~3/31 23:00)	3-7

圖 3.11	北防風林處風玫瑰圖(3/29 00:00~3/31 23:00)	3-7
圖 3.12	北防風林處風玫瑰圖(3/30 00:00~3/31 23:00)	3-7
圖 3.13	潮位變化圖(以天文潮最低低潮位為基準)	3-8
圖 3.14	潮位變化圖(以平均潮位為基準)	3-8
圖 3.15	波高逐時變化圖	3-9
圖 3.16	週期逐時變化圖	3-9
圖 3.17	波向逐時變化圖	3-10
圖 3.18	波浪玫瑰圖 (3/29 00:00~3/31 23:00)	3-10
圖 3.19	波浪玫瑰圖 (3/30 00:00~3/31 23:00)	3-10
圖 3.20	表面海流流速逐時分佈圖	3-11
圖 3.21	表面海流流向逐時分佈圖	3-11
圖 3.22	平均海流玫瑰圖(水面下約 2~8 公尺)	3-12
圖 3.23	上層水深海流玫瑰圖(水面下約 2~4 公尺)	3-12
圖 3.24	中層水深海流玫瑰圖(水面下約 12~14 公尺)	3-12
圖 3.25	底層水深海流玫瑰圖(水面下約 20~22 公尺)	3-12
圖 3.26a	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-14
圖 3.26b	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-14
圖 3.26c	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-15
圖 3.26d	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-15
圖 3.26e	不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖	3-16
圖 3.27	漲潮上層海流玫瑰圖(水面下約 2~4 公尺)	3-18
圖 3.28	滿潮上層海流玫瑰圖(水面下約 2~4 公尺)	3-18
圖 3.29	退潮上層海流玫瑰圖(水面下約 2~4 公尺)	3-18

圖 3.30	乾潮上層海流玫瑰圖(水面下約 2~4 公尺).....	3-18
圖 3.31	漲潮中層海流玫瑰圖(水面下約 12~14 公尺).....	3-19
圖 3.32	滿潮中層海流玫瑰圖(水面下約 12~14 公尺).....	3-19
圖 3.33	退潮中層海流玫瑰圖(水面下約 12~14 公尺).....	3-19
圖 3.34	乾潮中層海流玫瑰圖(水面下約 12~14 公尺).....	3-19
圖 3.35	漲潮下層海流玫瑰圖(水面下約 20~22 公尺).....	3-20
圖 3.36	滿潮下層海流玫瑰圖(水面下約 20~22 公尺).....	3-20
圖 3.37	退潮下層海流玫瑰圖(水面下約 20~22 公尺).....	3-20
圖 3.38	乾潮下層海流玫瑰圖(水面下約 20~22 公尺).....	3-20
圖 3.39	退潮時段浮標軌跡圖.....	3-22
圖 3.40	退潮時段浮標流矢圖.....	3-22
圖 3.41	漲潮時段浮標軌跡圖.....	3-23
圖 3.42	漲潮時段浮標流矢圖.....	3-23
圖 3.43a	滿潮至退潮時段之表層海流分佈圖.....	3-25
圖 3.43b	退潮至乾潮時段之表層海流流速分佈圖.....	3-25
圖 3.43c	乾潮至漲潮時段之表層海流分佈圖.....	3-26
圖 3.43d	漲潮至滿潮時段之表層海流分佈圖.....	3-26
圖 3.43e	退潮時段之表層海流分佈圖.....	3-27
圖 3.43f	漲潮時段之表層海流分佈圖.....	3-27
圖 3.44a	滿潮至退潮時段之中層海流分佈圖.....	3-28
圖 3.44b	退潮至乾潮時段之中層海流分佈圖.....	3-29
圖 3.44c	乾潮至漲潮時段之中層海流分佈圖.....	3-29
圖 3.44d	漲潮至滿潮時段之中層海流分佈圖.....	3-30

圖 3.44e	退潮時段之中層海流分佈圖	3-30
圖 3.44f	漲潮時段之中層海流分佈圖	3-31
圖 3.45a	滿潮至退潮時段之底層海流分佈圖	3-32
圖 3.45b	退潮至乾潮時段之底層海流分佈圖	3-32
圖 3.45c	乾潮至漲潮時段之底層海流分佈圖	3-33
圖 3.45d	漲潮至滿潮時段之底層海流分佈圖	3-33
圖 3.45e	退潮時段之底層海流分佈圖	3-34
圖 3.45f	漲潮時段之底層海流分佈圖	3-34
圖 3.46	海流平均流速分佈圖	3-35
圖 3.47	橢圓分析格點位置圖	3-36
圖 3.48a	半日潮潮流橢圓(表層)軌跡圖	3-40
圖 3.48b	全日潮潮流橢圓(表層)軌跡圖	3-40
圖 3.48c	半日潮潮流橢圓(中層)圖	3-41
圖 3.48d	全日潮潮流橢圓(中層)圖	3-41
圖 3.48e	半日潮潮流橢圓(底層)圖	3-42
圖 3.48f	全日潮潮流橢圓(底層)圖	3-42
圖 4.1	研究方法流程圖	4-2
圖 4.2	模式模擬範圍示意圖	4-8
圖 4.3	座標轉換後之模式模擬範圍圖	4-9
圖 4.4	浮標軌跡模擬圖(平均風速: 1.26m/s, 實線: NearCoM, 點: 2013 年實測資料)	4-11
圖 4.5	浮標軌跡模擬圖(平均風速: 5.43m/s, 實線: NearCoM, 點: 2013 年實測資料)	4-11

圖 4.6	含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖(平均風速: 1.26m/s , 實線: NearCoM , 點: 實測資料).....	4-11
圖 4.7	含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖(平均風速: 5.43m/s , 實線: NearCoM , 點: 實測資料).....	4-12
圖 4.8	50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=7.2m , 示性週期 T=11.3s , 波向 N).....	4-14
圖 4.9	50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=5.7m , 示性週期 T=10.0s , 波向 W).....	4-15
圖 4.10	50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=4.7m , 示性週期 T=9.1s , 波向 SW).....	4-15
圖 4.11	100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=7.8m , 示性週期 T=11.7s , 波向 N).....	4-16
圖 4.12	200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=8.4m , 示性週期 T=12.2s , 波向 N).....	4-16
圖 4.13	250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=8.6m , 示性週期 T=12.3s , 波向 N).....	4-17
圖 4.14	受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=11.9m , 示性週期 T=14.1s , 波向 N).....	4-20
圖 4.15	受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=9.4m , 示性週期 T=12.5s , 波向 W).....	4-20
圖 4.16	受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=7.8m , 示性週期 T=11.4s , 波向 SW).....	4-21
圖 4.17	受氣候變遷影響 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 H=12.9m , 示性週期 T=14.6s , 波向 N).....	4-21
圖 4.18	受氣候變遷影響 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖	

	(示性波高 $H=13.9\text{m}$ ，示性週期 $T=15.3\text{s}$ ，波向 N).....	4-22
圖 4.19	受氣候變遷影響 250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (示性波高 $H=14.2\text{m}$ ，示性週期 $T=15.4\text{s}$ ，波向 N).....	4-22
圖 5.1	臺中港北防波堤擴建工程平面佈置圖.....	5-8
圖 5.2	模式結構物與波高計設置圖.....	5-10
圖 5.3	結構物設置圖.....	5-10
圖 5.4	臺中港北防波堤施工設計規範流程圖.....	5-13
圖 5.5	水平方向 2 公尺處(第一支波高計)之水位變化示意圖.....	5-15
圖 5.6	波高與週期變化示意圖.....	5-15
圖 5.7	堤前之波高和週期分佈圖.....	5-16
圖 5.8	自由液面的水位變化和流場分佈圖.....	5-17
圖 5.9	不同時段紊流強度示意圖.....	5-18
圖 5.10	不同時段渦度分布圖.....	5-19
圖 5.11	北防波堤延伸段平面圖.....	5-21
圖 5.12	北防波堤延伸段 0~100 公尺斷面 I 之標準斷面圖.....	5-21
圖 5.13	北防波堤延伸段 100~130 公尺斷面 II 之標準斷面圖.....	5-22
圖 5.14	北防波堤延伸段 130~440 公尺斷面 III 之標準斷面圖.....	5-22
圖 5.15	北防波堤延伸段 440~480 公尺斷面 IV 之標準斷面圖.....	5-22
圖 5.16	數值模式斷面 I 地形與結構物示意圖.....	5-25
圖 5.17	數值模式斷面 IV 地形與結構物示意圖.....	5-26
圖 5.18	各模擬條件之堤前波高圖.....	5-27
圖 5.19	各模擬條件之堤前週期圖.....	5-27

圖 5.20	數值模擬水位分布和壓力分布圖 (時間 30、40、80 和 100 秒)	5-28
圖 5.21	防波堤受力示意圖	5-30
圖 5.22	case 1 條件各作用力計算結果	5-30
圖 5.23	有無越波之水平合力比較圖(case1~case4)	5-32
圖 5.24	有無越波之水平合力比較圖(case21)	5-33
圖 5.25	不同情境水平波浪作用力差異量比較圖	5-33
圖 5.26	不同情境滑動安全係數時間序列圖	5-35
圖 5.27	不同情境滑動安全係數比較圖	5-35
圖 5.28	不同情境傾倒安全係數時間序列圖	5-37
圖 5.29	不同情境傾倒安全係數比較圖	5-37

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，以利船隻航行與停靠、岸上作業以及保護船隻人員安全。港灣結構物常需建造於海中，如防波堤需以較長結構物伸入海中，以達到遮蔽波浪的效果。大型結構物的設置，改變了原有未設置結構物的水理機制，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、麥寮港的西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，甚至造成堤頭嚴重沖刷或港池共振。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、防波堤堤面破損及消波胸牆毀損等，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。臺灣中部沿海一帶為白海豚常活動出沒地區，港灣結構物建造、水理機制改變及地形的沖刷改變對於白海豚以及附近生態環境是否造成影響，亦是未來值得研究的課題。

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：蘇迪勒 (2015)、莫拉克 (2009)、桃芝 (2004) 與敏督利 (2001) 等

颱風，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%。許(2013)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中，模擬在2020~2039年間臺灣西北及東北地區颱風波浪在不同颱風路徑下最大波高及週期變化，結果顯示不同地區最大波高平均增率介於59%~65%，週期平均增率介於20.8%~25%。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，港灣結構物改變波浪與水流，相對波浪與水流對於結構物以及地形影響不容忽視，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，並需探討未來在氣候變遷可能發生的極端海氣象，亦需加以考量，以作為未來港灣因應氣候變遷以及港灣結構物改善及災害損失減低的參考，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3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、風及潮位等項目，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.結構物附近波浪與海流現場調查(102-105年)。3.結構物附近波浪與海流特性分析(102-105年)。4.波流與結構物互制作用分析(103-105年)。5.異常波浪對結構物影響分析(104-105年)。6.研擬結構物保護方案(102年)。茲將本年度(104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

以單點底碇方式，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，另外以船載流速儀的方式，量測結構物附近三維空間的流速分佈並分析其特性，並以單點底碇儀器量測定點的流速剖面。

4. 結構物附近波浪與海流特性分析

分析並探討波浪與海流受到近岸地形及結構物影響之變形以及特性。

5. 異常波浪對結構物影響分析

以數值模式探討各種氣候變遷情境下，可能發生之海氣象條件，分析與探討結構物附近波流分布以及結構物受力與安定性。

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，包括歷年海象與氣象資料分析；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；第四章為波流場模擬分析，第五章為結構物受力安定分析；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

本研究以臺中港為目標港區探討波流與大型結構物互制作用，並作為臺中港以及其他港區結構物與波流互制分析之參考。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 91 年共延長北防波堤 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，如北防波堤西側產生一深坑，其比鄰近水深更深約 5 米直徑約 300 米，為更釐清港灣構造物附近波流互制機制以及未來受氣候變遷以及可能遭遇極端海氣象對構造物之影響，故本年度持續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，並利用不同儀器與觀測方式，進行現場潮波流的現場觀測，本章針對基本資料收集以及分析說明如下。

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。

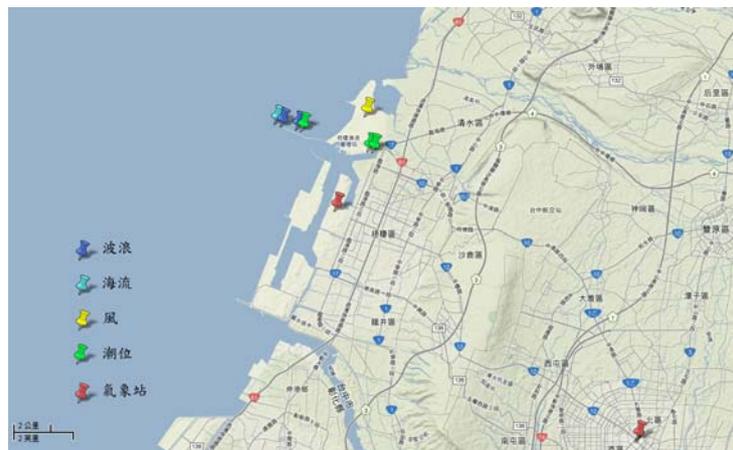
臺中港發展至今已興建之營運碼頭共 49 座，總長度 11,936 公尺，貨櫃 8 座、客運 1 座、穀類 2 座、煤炭 4 座、管道 8 座、水泥 3 座、散雜貨 21 座、LNG 1 座及廢鐵 1 座。碼頭後線儲轉區之倉棧設施有雜貨通棧 13 座，水泥筒倉 22 座，堆貨場 8 處，貨櫃場 3 處，液體貨儲槽 255 座，可提供業者良好的投資環境，棧埠裝卸及倉儲業務多開放民間投資經營，全港擁有許多自動化的裝卸倉儲設備，作業效率高。

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 2014 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 1998~2015 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(X0)	臺中港	24°17'54"N 120°29'39"E	1999/10-2000/08	港研中心	AWCP
波浪(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2004/01-2014/11	港研中心	AWCP
海流(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2004/01-2014/11	港研中心	AWCP
風(W1)	臺中港	24°17'59"N 120°29'12"E	2002/01-2014/11	港研中心	2009 年改成 Gill 二維超音波式 風速計
潮位(T)	臺中港	24°17'16"N 120°31'57"E	1999/10-1999/10 2001/04-2014/11	港研中心	Water Log
潮位(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2003/08-2014/11	港研中心	AWCP
潮位	臺中港	24°17'16"N 120°31'59"E	2003/01-2014/12	內政部	Aquatrak 音波式
氣象			1998/01-2015/12	中央氣象局	颱風



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 2014 年 11 月期間在臺中港北防波堤堤頭高程約 24m 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 61.3% 為最多；其次為西至南向，約佔歷年觀測的 20.8%。風速小於 5 m/sec 以下約佔歷年觀測的 45.5%；風速介於 5-10 m/sec 之間約佔 28.1%；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 11.9%。歷年之平均風速為 7.3 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 17% 以上除了 2009 年，另外，最大風速歷年為 NNE 向，僅 2011 年及 2013 年為 NE 以及 SSW 向。

表 2-2 臺中港 2001 年至 2014 年風統計表

年份	平均風速 m/sec	風速		靜風 <0.3m/sec (%)	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 (%)
		最大值 m/sec	風向									
2002	5.6	26.5	NNE	0.1	59.2	26.0	8.9	5.9	59.3	12.6	18.8	9.2
2003	5.1	17.8	NNE	0.1	60.0	26.7	12.5	0.8	62.6	10.0	18.7	8.7
2004	5.2	17.9	NNE	0.0	57.7	29.6	12.3	0.4	65.2	9.4	15.8	9.6
2005	5.3	27.3	NNE	0.0	60.2	25.2	13.2	1.4	62.1	9.4	19.6	8.9
2006	5.3	18.7	NNE	0.1	57.5	28.8	12.0	1.8	64.3	9.2	19.6	6.9
2007	5.3	23.3	NNE	0.2	59.6	26.2	12.5	1.7	60.6	12.2	19.3	7.7
2008	9.1	37.5	NNE	0.0	32.2	32.9	15.3	19.7	55.8	4.6	28.9	10.7
2009	5.6	26.2	NNE	0.2	60.6	21.2	11.6	6.4	65.2	7.6	14.3	13.0
2010	9.3	30.3	NNE	0.0	28.7	30.6	20.4	20.3	62.8	6.7	22.8	7.7
2011	10.5	32.4	NE	0.0	26.8	26.3	17.4	29.5	66.1	4.9	20.7	8.2
2012	10.1	28.9	NNE	0.3	24.5	29.9	19.2	26.3	54.6	6.7	22.3	16.4
2013	9.2	29.3	SSW	0.0	30.6	30.6	16.6	22.2	60.7	7.3	23.3	8.7
2014	8.7	28.6	NNE	0.2	33.6	31.8	16.7	17.9	57.7	6.4	26.6	9.3
統計值	7.3	37.5	NNE	0.1	45.5	28.1	14.5	11.9	61.3	8.2	20.8	9.6

以歷年逐月之平均風速及最大風速之統計值繪製如圖 2.2 所示，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 以上。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，平均風速約為夏季之 1.5~1.8 倍，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 2008、2010、2011、2012、2013 及 2014 年。

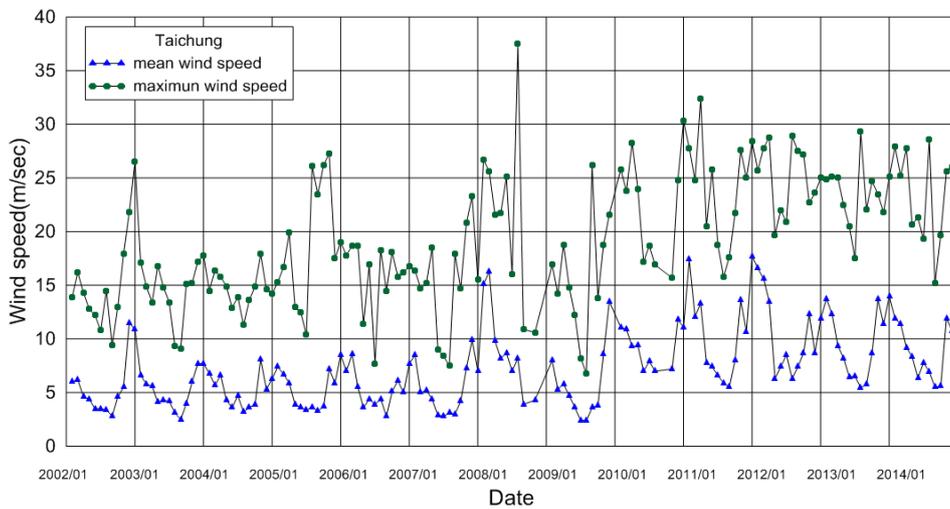
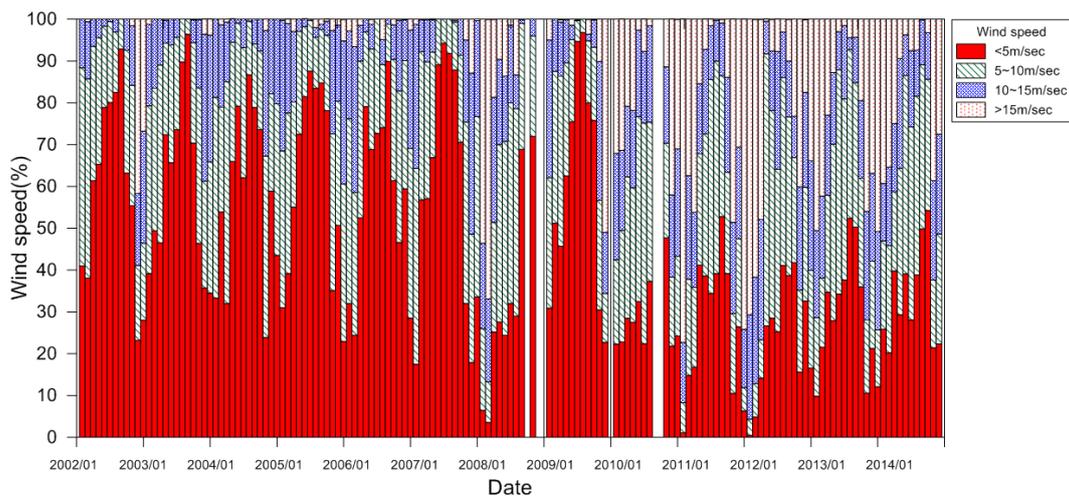


圖 2.2 臺中港歷年風速及風向之月統計圖



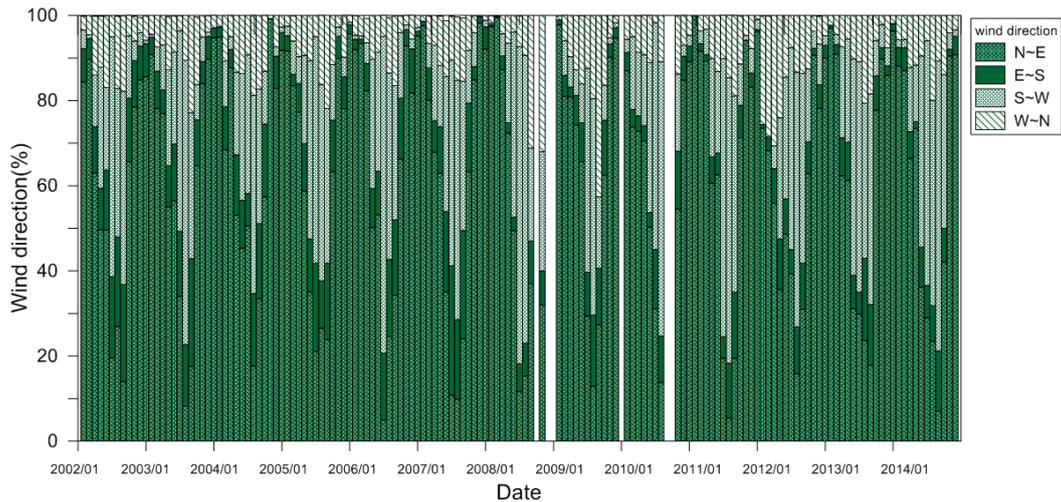


圖 2.3 臺中港歷年風速及風向之月統計比較圖

2.2.2 海流

臺中港區域位於台灣西部臺灣海峽之中間地區，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 2004 年 1 月至 2014 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。由表中顯示，港區附近主要流向為西至北向，約佔歷年觀測的 46.5%；其次為南至西向，約佔歷年觀測的 26.1%。流速介於 25~50 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 38.7%；流速介於 50~100 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 27.4%；流速大於 100 cm/sec 以上者，約佔歷年觀測的 3.3%。歷年之平均流速為 41.2 cm/sec；最大流速為 2005 年發生的 248.3 cm/sec，其流向為西向。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 移往外海距堤頭約 600m 處。

將歷年逐月之流速及流向值繪製如圖 2.4，圖中顯示歷年之月平均流速介於 15 至 80 cm/sec 之間，最大流速介於 53 至 250 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，流向介於西至北向所佔的比例較大。冬季以西南向為主主要原因可能受風趨流影響所致，而夏季以東北向為主，因夏季風力較弱流況主要由黑潮恆流以及潮流所主導。

表 2-3 臺中港歷年海流統計表

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 (°)								
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
2014	34.8	155.4	N	38.3	40.7	19.4	1.6	31.7	1.1	29.4	37.9
統計值	41.2	248.3	W	30.6	38.7	27.4	3.3	22.7	4.7	26.1	46.5

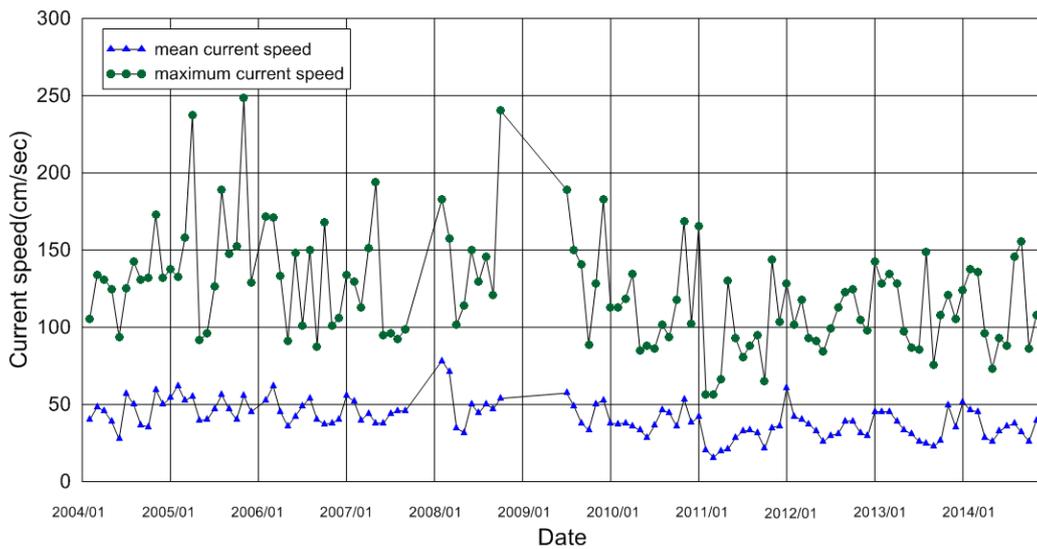


圖 2.4 臺中港歷年海流平均流速及最大流速之月分布圖

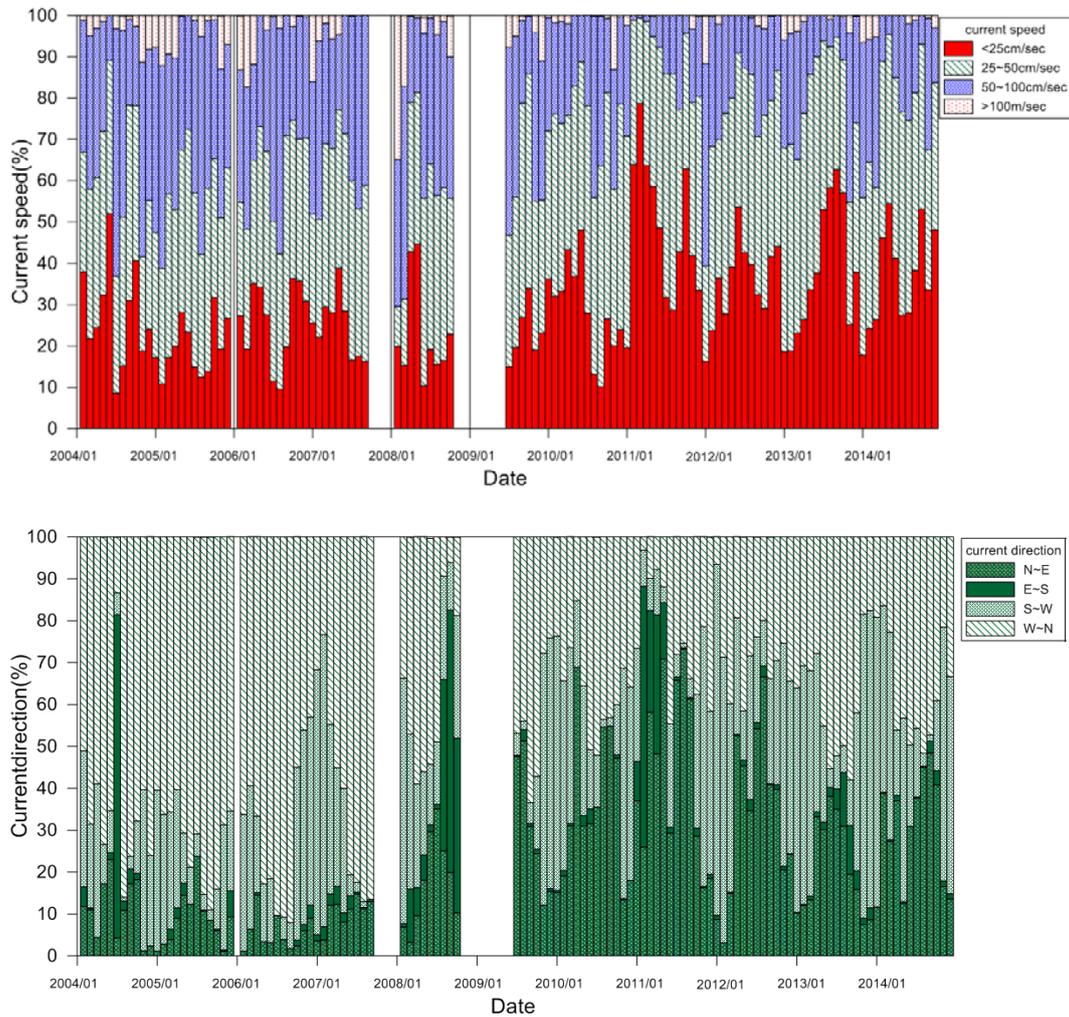


圖 2.5 臺中港歷年海流平均流速及流向之月統計分佈圖

2.2.3 波浪

本研究收集本所港灣技術研究中心自 2004 年 1 月至 2014 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 64.9%；其次為西至北向，約佔歷年觀測的 23.8%。 H_s 波高小於 0.5 m 以下者，約佔歷年觀測的 13.4%； H_s 波高介於 0.5 m 至 1 m 之間者，約佔歷年觀測的 29.3%； H_s 波高介於 1 m 至 5 m 之間者，約佔歷年觀測的 57.1%； H_s 波高大於 5 m 以上者，約佔歷年觀測的 0.2%。 T_s 週期集中在 8 秒以內，

小於 6 sec 以下者，約佔歷年觀測的 34.0%；介於 6 sec 至 8 sec 之間者，約佔歷年觀測的 53.4%。近年來（2008 年以後）， T_s 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_s 波高為 1.45 m；平均 T_s 週期為 6.5 sec；歷年最大 H_s 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_s 及 T_s 統計圖，由圖顯示歷年之月平均 H_s 小於 3 m 以下，月平均 T_s 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，冬季較大波高發生比例較夏季為高，相對冬季較長示性週期發生比例較夏季為多。此外，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 臺中港歷年示性波高、週期及波向資料統計表

年份	H_s 平均值 (m)	$T_{1/3}$ 平均值 (sec)	H_s			H_s <0.5m (%)	H_s 0.5~1m (%)	H_s 1~5m (%)	H_s >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												
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	N	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	N	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
2014	1.20	6.6	4.12	9.9	N	26.2	27.7	46.2	0.0	67.4	0.2	6.2	26.2	24.2	63.7	10.6	1.5
統計值	1.45	6.5	8.44	11.1	N	13.4	29.3	57.1	0.2	64.7	2.1	7.5	23.8	34.0	53.4	11.4	1.0

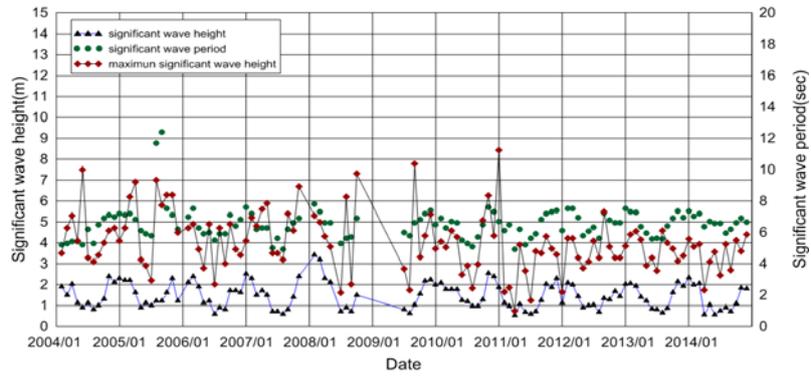


圖 2.6 臺中港歷年示性波高、平均週期及最大示性波高之月統計圖

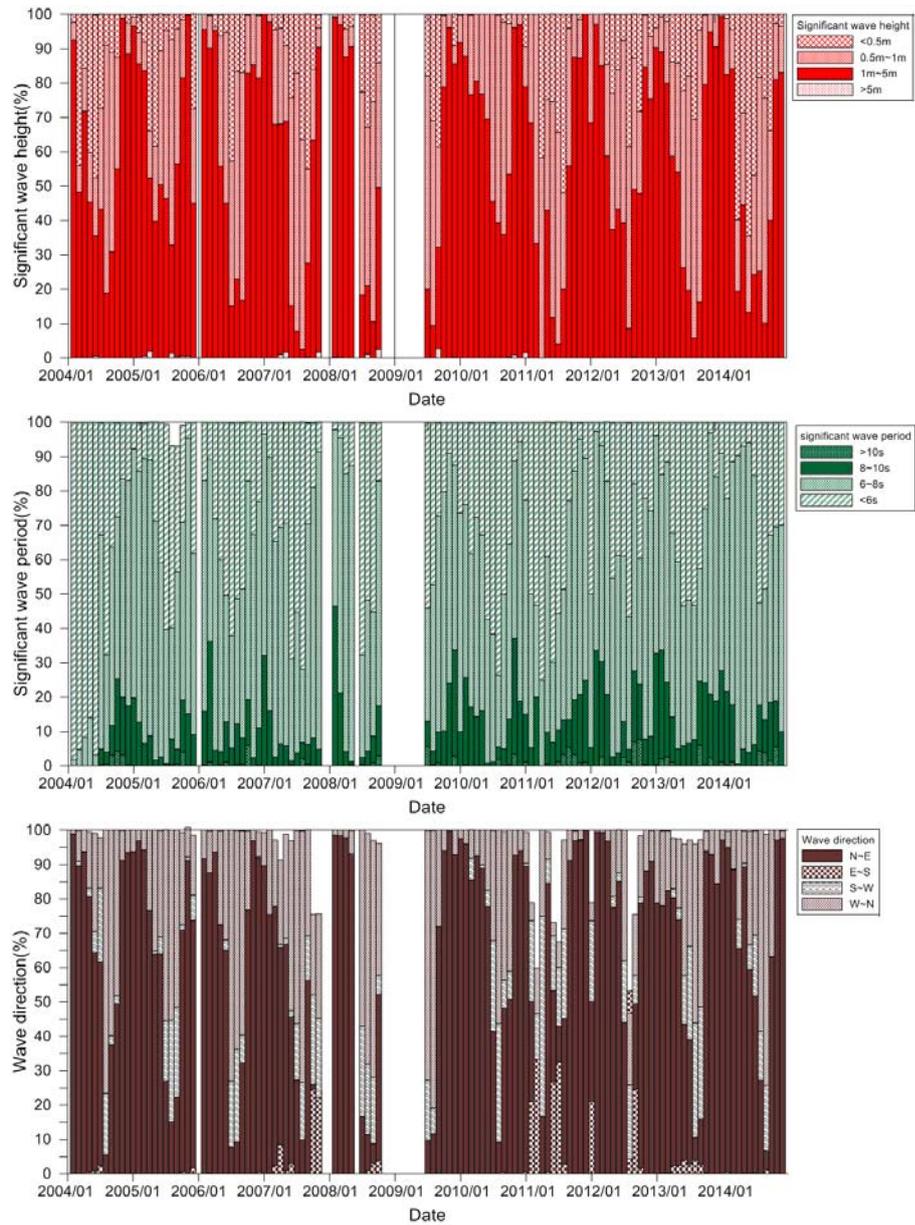


圖 2.7 臺中港歷年平均示性波高、平均週期及波向之月統計圖

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 2003 年 1 月至 2014 年 12 月期間的潮位觀測資料，繪製最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計分布如圖 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 2003 年 2014 年期間，其平均潮差為 378 公分，大潮平均潮差為 471 公分，最大潮差為 599 公分。

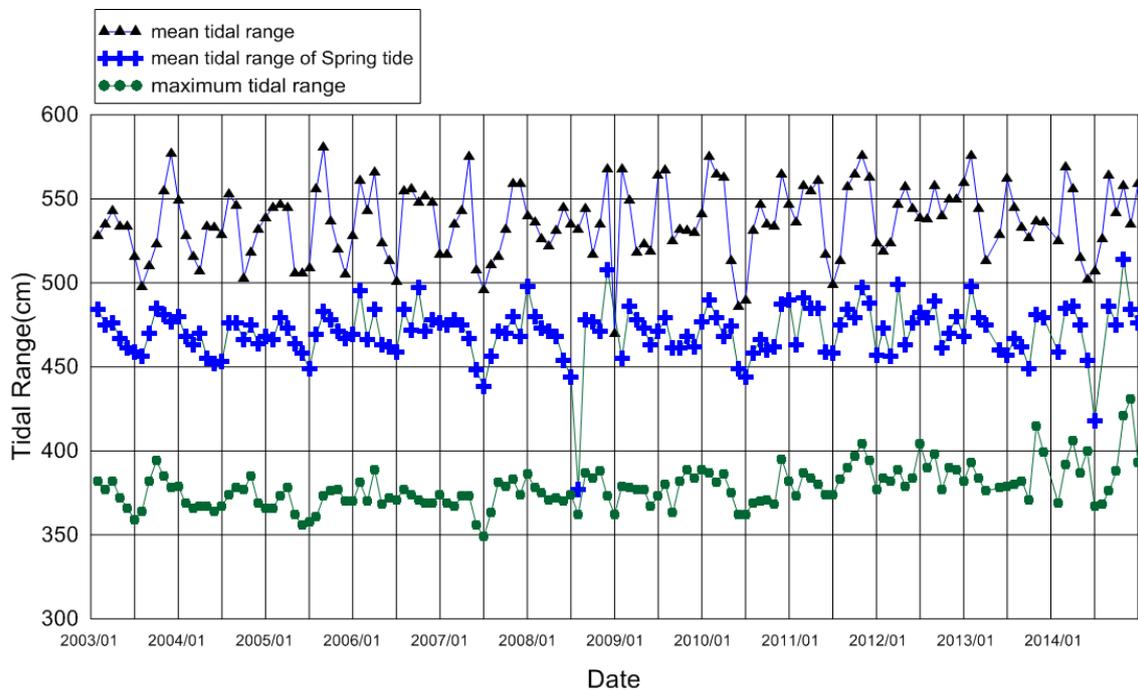


圖 2.8 臺中港歷年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計圖

表 2-5 臺中港歷年潮位資料統計

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			
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
2014	15.7	212	-179	244	-228	10月9日	316	12月24日	-302	391	472	618
統計值										378	471	599

潮高單位：公分

基準面：

2003年：+7.1937m 水準點標高(基隆 MSL)+3.5125m。

2004年：基準面相對 KP：-2.6812m。

2005年~2013年：基準面相對 KP：0m。

資料來源：交通部中央氣象局

2.4 颱風資料

港灣結構物設計所採用之設計波浪，均以颱風引起之颱風波浪統計分析推算而得，各港區由於地理環境以及颱風路徑不同，所推算得到之設計波高均不相同。由於颱風所引起之波浪受觀測技術、儀器限制、天候以及經費等限制，實際觀測資料並不完全齊全且時間並不長到足以來做回歸分析，故常需仰賴氣象之颱風資料佐以理論以及數值推算而得，因此對颱風資料的分析對於結構物設計波高推算非常重要。

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 2015 年期間共有 108 個颱風侵襲臺灣海域，平均每年約有 6.0 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 2015 年間中央氣象局有發佈颱風警報的颱風資訊，本研究彙整 108 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 45 次佔全部發生次數的比例為 41.6%；其次為第三類路徑的颱風，佔 12.0%；第九類路徑的颱風，佔 8.3%；以第七及第八類佔最少，均為 1.9%；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 1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表(續 1)

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 1998 年至 2015 年有發佈警報之颱風基本資訊表(續 2)

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
1407	哈吉貝	HAGIBIS	06/14~06/15	輕度	--	992	20	100	--
1410	麥德姆	MATMO	07/21~07/23	中度	3	960	38	200	80

表 2-6 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表(續 3)

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(km)	十級風暴風半徑(km)
1416	鳳凰	FUNG-WONG	09/19~09/22	輕度	特殊路徑	985	25	150	--
1506	紅霞	NOUL	05/10-05/11	強烈	--	925	51	200	80
1509	昌鴻	CHAN-HOM	07/09-07/11	中度	--	935	48	280	100
1510	蓮花	LINFA	07/06-07/09	輕度	--	975	30	120	24
1513	蘇迪勒	SOUDELOR	08/06-08/09	中度	3	930	48	300	24
1515	天鵝	GONI	08/20-08/23	強烈	--	925	51	200	26
1521	杜鵑	DUJUAN	09/27-09/29	強烈	2	925	51	220	20

資料來源：中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/> (2015.10.30)

--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 2015 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	6.5 %
2	8	7.4 %
3	13	12.0%
4	7	6.5%
5	6	5.6%
6	9	8.3 %
7	2	1.9 %
8	2	1.9 %
9	9	8.3 %
其他及特殊路徑	45	41.6 %
合計	108	100.0 %

本研究為探討極端波浪所產生之衝擊力對於港灣結構物之影響。根據 2013 年臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書」中，以 Wilson 或井島武士及湯麟武博士之數學模式推算臺中港颱風波浪。根據 1940 年至 2011 年間颱風中心氣壓小於或等於 970mb 之颱風資料，彙整篩選出 116 個颱風資料，進行颱風波浪推算並將各方向可能發生之最大示性波高，以極端值分佈法推算各迴歸期之波浪，如表 2-8 所示。由表可知，臺中港 50 年迴歸期颱風波浪以 N 向影響最大，波高約達 7.2m，對應週期約為 11.3 秒。

表 2-8 臺中港外海颱風波迴歸分析統計表

迴歸期 波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts										
NE	7.4	11.4	7.3	11.3	6.7	10.9	6.1	10.4	5.5	9.8	5.3	9.7	4.6	9.0
NNE	8.6	12.3	8.5	12.2	7.9	11.8	7.3	11.3	6.6	10.8	6.4	10.6	5.6	9.9
N	8.6	12.3	8.4	12.2	7.8	11.7	7.2	11.3	6.4	10.6	6.2	10.5	5.4	9.8
NNW	8.1	12.0	7.9	11.8	7.3	11.3	6.6	10.8	5.9	10.2	5.6	9.9	4.8	9.2
NW	7.5	11.5	7.3	11.3	6.7	10.9	6.2	10.5	5.5	9.8	5.3	9.7	4.6	9.0
WNW	6.8	11.0	6.7	10.9	6.2	10.5	5.7	10.0	5.2	9.6	5.0	9.4	4.4	8.8
W	6.7	10.9	6.6	10.8	6.1	10.4	5.7	10.0	5.2	9.6	5.0	9.4	4.4	8.8
WSW	6.5	10.7	6.4	10.6	6.0	10.3	5.5	9.8	5.0	9.4	4.8	9.2	4.3	8.7
SW	5.6	9.9	5.4	9.8	5.1	9.5	4.7	9.1	4.3	8.7	4.1	8.5	3.6	8.0

註：1.推算目標區為 120.39E，24.3N。2.水深為-31.0m。3. Hs：m，Ts：sec。

第三章 海氣象現場調查與分析

臺中港航道北側以一道長北防波堤來遮蔽波浪以及防止漂沙進入航道及港池，近岸波流受到北防波堤長結構物之影響，形成不同尺度之渦漩，波流機制的改變影響水流，進而影響漂沙傳輸造成底床地形的改變，影響操船並可能對港灣結構物之安全穩定造成影響。為瞭解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，本研究為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 2015 年 3 月 30 日至 3 月 31 日間，在臺中港北防波堤附近海域，進行包含漂流浮標追蹤及船碇都卜勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)等之三度空間海象觀測。此外，本所於北防波堤堤頭外 570 公尺處，設置有一定點底碇式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與北防風林處的風速觀測，本研究將本區域在上述期間的各觀測資料作一分析與綜合比較，探討其特性以及相關性。

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，觀測項目、儀器以及觀測方式說明如下：

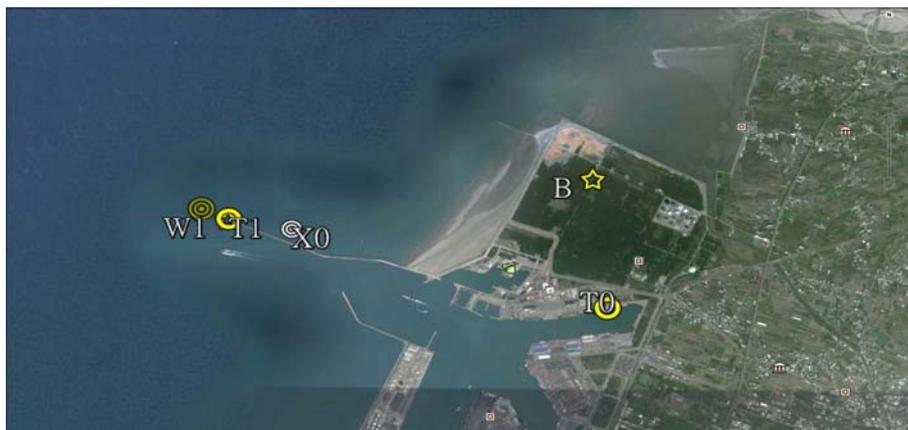


圖 3.1 臺中港長期海氣象觀測站示意圖
(W1：波流儀，T1 及 B：風速儀，T0：潮位計)

1. 風速風向觀測

本所在北防波堤堤頭白燈塔頂與北防風林處，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到之空間資訊不足的受限，本所於 2015 年 3 月 30 日至 3 月 31 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)之平面的海象觀測。觀測區域範圍(如圖 3.2)、儀器設備以及觀測方法說明如下。

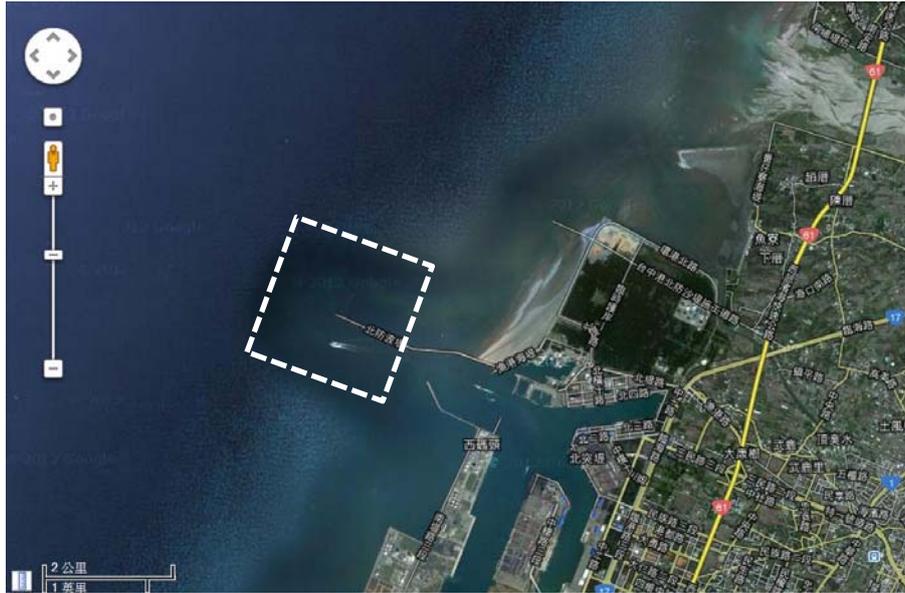


圖 3.2 觀測範圍示意圖

1. 表面流浮標軌跡追蹤

在本次的漂流調查中採用自行研發浮標球設備，配有 GARMIN 公司製造 eTrex 30 雙星系統衛星定位儀，主要記錄平面位置坐標資料，本設備航點記錄可達 2000 點、航跡可記錄 200 條、航跡取樣頻率可達每秒 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)，並可供最大紀錄時間 48 小時。觀測浮標之編號係依據退潮時段(S1、S2)、漲潮時段(S3、S4)及漂浮球施放水深(由東向西)由淺而深依序編為 Sn-R、Sn-G 及 Sn-B，並記錄漂浮球之觀測時間及坐標資料、運動軌跡資料。

2. 垂直剖面流速觀測

為測量海域垂直分層流速的情形，本研究使用都卜勒流剖儀 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 繫於船後進行流速測量，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。測線規劃以臺中港北防波堤為中心，南北各規劃平行北防波堤 4 條測線，加上臺中港北防波堤頭外側延伸之 1 條測線，共 9 條測線進行，如圖 3.3 所示。垂直剖面流速觀測之設定，每層間距為 0.2m，

水下最頂層約在水面下 1m 處；水下最深層最深可達水面下 60m，時間取樣間隔為 1 秒。本研究觀測於 2015 年 3 月 30 日~31 日期間連續不間斷進行，依據規劃航線共進行 6 測回 (S1~S6)，分別於 2015 年 3 月 30 日 11:30、14:30、18:00、21:30、31 日 02:00、08:00 各完成一趟 9 條測線，總計約 15 公里的垂直剖面流速觀測，實際監測軌跡如圖 3.4 所示。

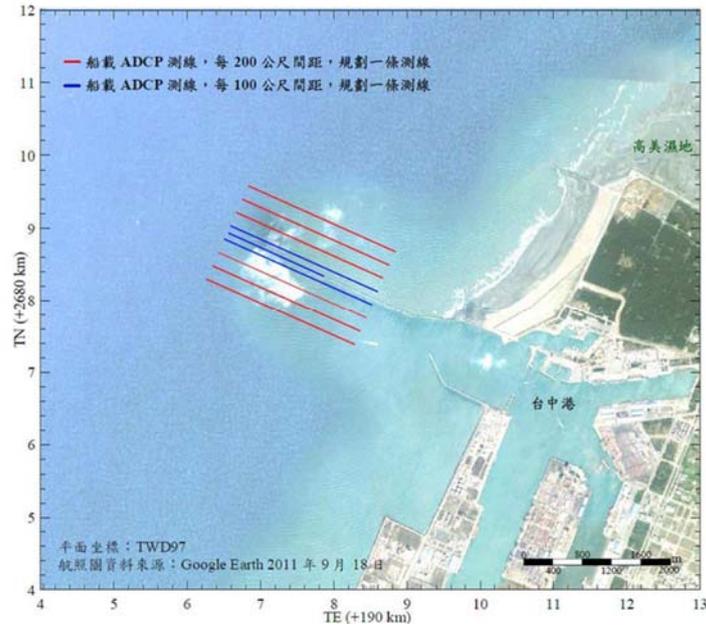


圖 3.3 垂直剖面流速觀測測線規劃圖

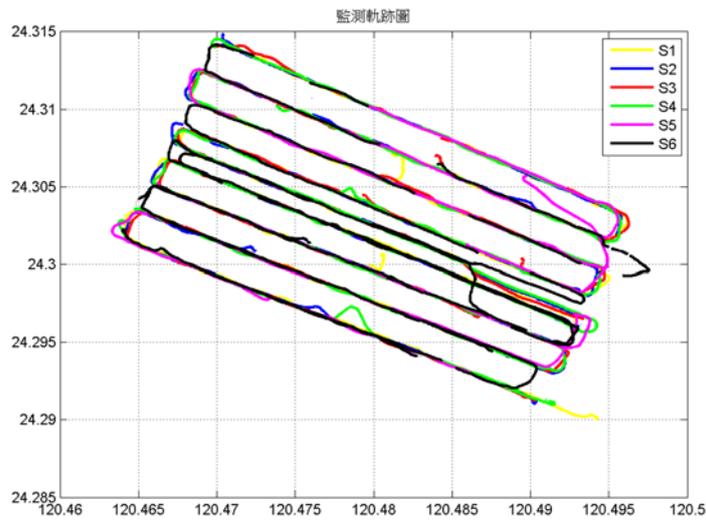


圖 3.4 垂直剖面流速實際觀測軌跡圖

3.3 風速與風向分析

以本所在北防波堤堤頭白燈塔頂及北防風林處長期觀測風速資料，分析在 2015 年 3 月 29 日至 3 月 31 日期間觀測之風速，其變化分別如圖 3.5 與圖 3.7 所示，風向變化如圖 3.6 與圖 3.8 所示。北防波堤堤頭白燈塔頂風速觀測結果（圖 3.5）顯示 3 天期間，平均風速介於 0~10 m/s 間，在夜間約 0 時左右平均風速最小約小於 2 m/sec，而日間下午約 15 時左右平均風速較大，達 8~10m/sec，最大風速達 10~12m/sec。圖 3.6 之風向分析顯示以 0 度為正北向，風向隨日夜間不同時間變化，日間以北風至東北風為主，至夜間凌晨轉為南風。北防風林處風速觀測結果（圖 3.7）顯示 3 天期間，平均風速介於 0~6 m/s 間，在夜間約 0 時左右平均風速最小約小於 2 m/sec，而日間下午 12~15 時平均風速較大，約 4~5m/sec，最大風速約 6~8m/sec。圖 3.8 顯示風向隨日夜間不同時間變化，日間以北風至東北風為主，至夜間凌晨轉為南風。以此兩處風速比較，在夜間北防波堤堤頭白燈塔頂比北防風林處大約 2m/s，由於北防波堤堤頭白燈塔頂不受遮蔽物影響且遠離陸地。

為與同時段之波流場作比較，故將上述平均風速風向資料以玫瑰圖分析以兩時段繪製顯示如圖 3.9~圖 3.12 所示。圖 3.9 為北防波堤堤頭白燈塔頂 3/29 00:00~3/31 23:00 之 3 天的風玫瑰圖，而圖 3.10 為 3/30 00:00~3/31 23:00 之 2 天的風玫瑰圖。由圖 3.9 之 3 天風速清楚看出風向介於東北向至北向間以及西南向為主，而圖 3.10 之 2 天風速顯示風向以西南向為主。圖 3.11 為北防風林處 3/29 00:00~3/31 23:00 之 3 天的風玫瑰圖，而圖 3.12 為 3/30 00:00~3/31 08:00 之 2 天的風玫瑰圖。由圖 3.11 之 3 天風速清楚看出風向介於東北向至北北西向間以及西南向為主，而圖 3.12 之 2 天風速顯示風向以西南向為主。北防波堤堤頭白燈塔頂及北防風林兩處風向分佈相近，而風速以北防波堤堤頭白燈塔頂較大。

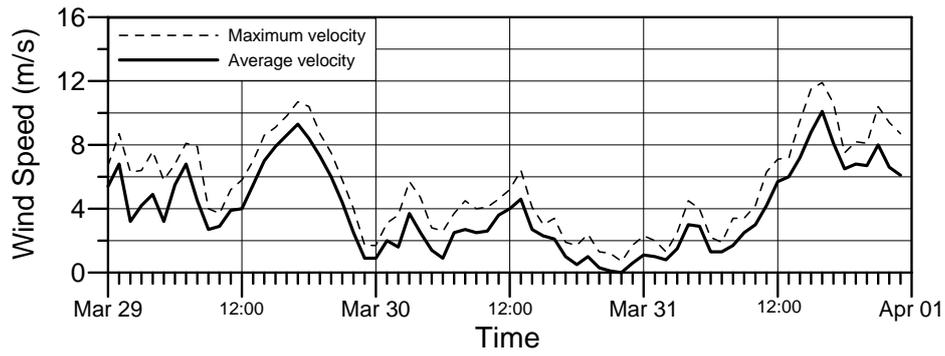


圖 3.5 北防波堤堤頭風速變化圖

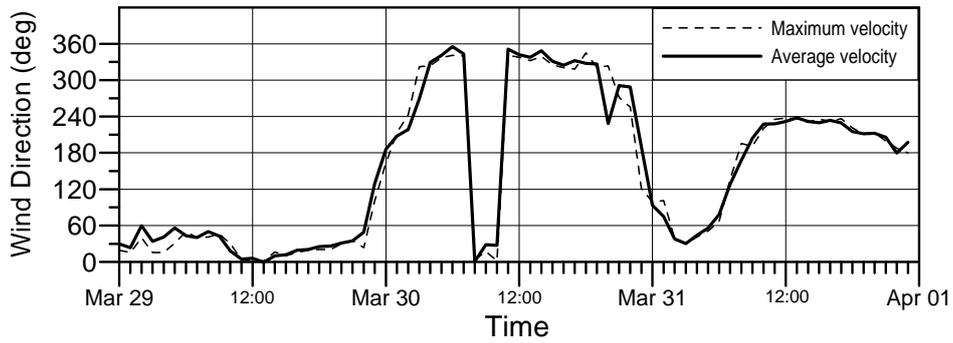


圖 3.6 北防波堤堤頭風向變化圖

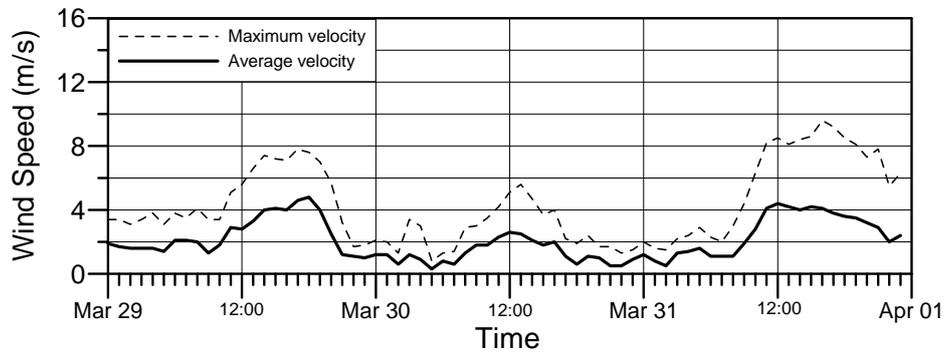


圖 3.7 北防風林處風速變化圖

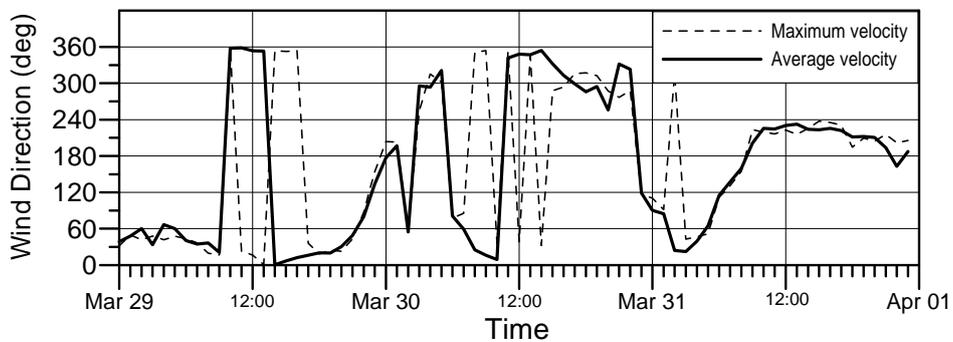


圖 3.8 北防風林處風向變化圖

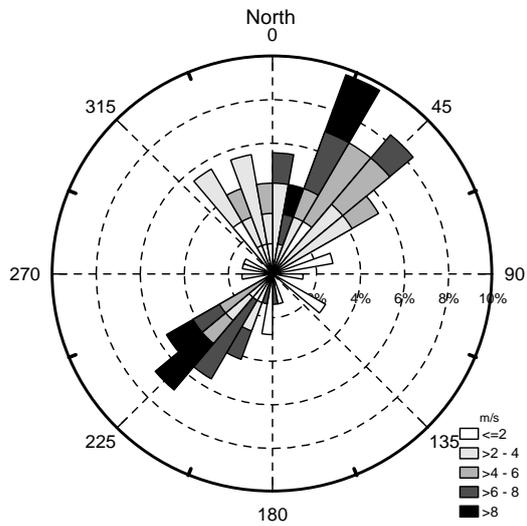


圖 3.9 北防波堤堤頭風玫瑰圖
(3/29 00:00~3/31 23:00)

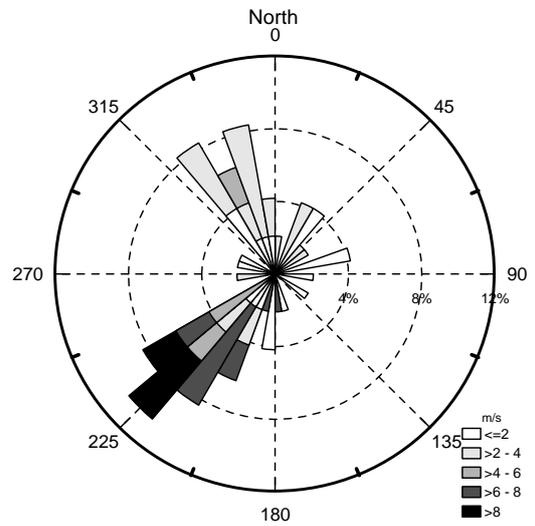


圖 3.10 北防波堤堤頭風玫瑰圖
(3/30 00:00~3/31 23:00)

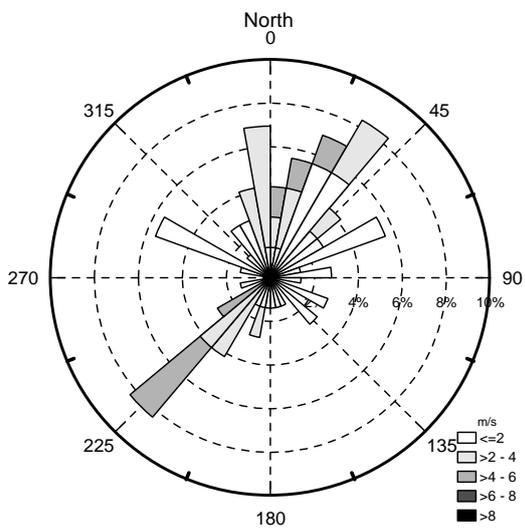


圖 3.11 北防風林處風玫瑰圖
(3/29 00:00~3/31 23:00)

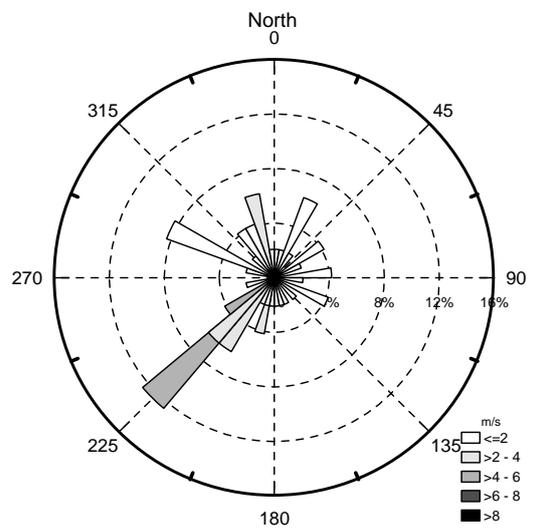


圖 3.12 北防風林處風玫瑰圖
(3/30 00:00~3/31 23:00)

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設置之潮位站潮位資料，選取資料時間為 2015 年 3/29 00:00~3/31 23:00 3 天，繪製逐時潮位變化如圖 3.13 及圖 3.14 所示。圖形顯示臺中港為半日潮，3 天之平均潮差為 2.89 公尺，最大潮差為 3.37 公尺，由於本次測量時間為農曆 11 日至 12 日為盈凸月時間，故潮差為小潮。

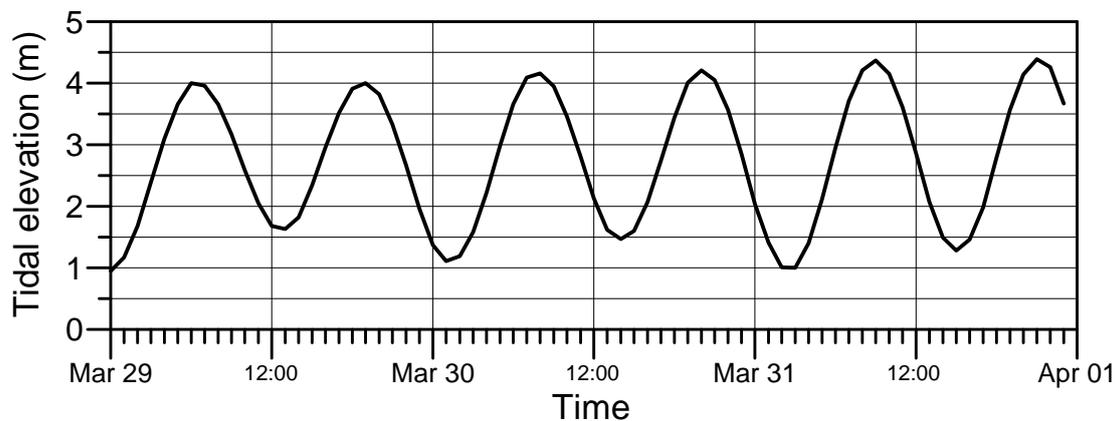


圖 3.13 潮位變化圖(以天文潮最低低潮位為基準)

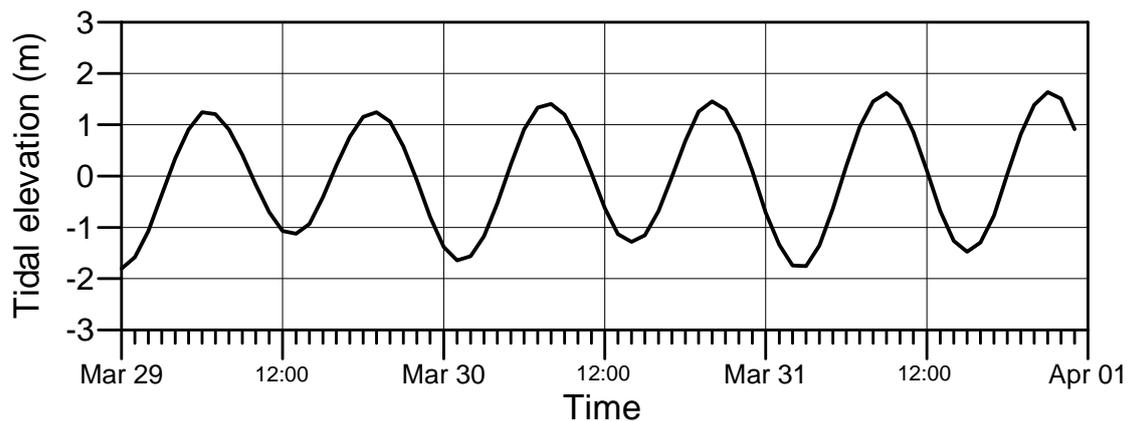


圖 3.14 潮位變化圖(以平均潮位為基準)

3.5 單點波流分析

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 2015 年 3 月 29 日至 3 月 31 日三天的波流資料作分析，波高逐時分佈如圖 3.15 所示，相對應之週期逐時分佈如圖 3.16 所示，而波向逐時分佈如圖 3.17 所示，圖形顯示三天的波高介於 0.3m 至 1.1m，平均為 0.62m，以 3 月 29 日波高較大，週期介於 2.8sec 至 7.9sec 間，平均為 5.8sec，波向介於 275° 至 32° 之間。另繪製二日及三日之波浪玫瑰圖如圖 3.18 及圖 3.19，圖形顯示波向以東北向為主，再與風的分析結果比較，很明顯受到風的影響。

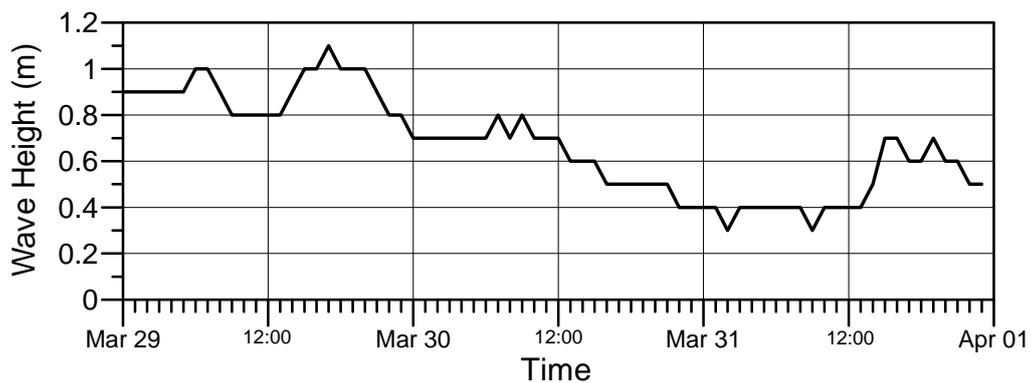


圖 3.15 波高逐時變化圖

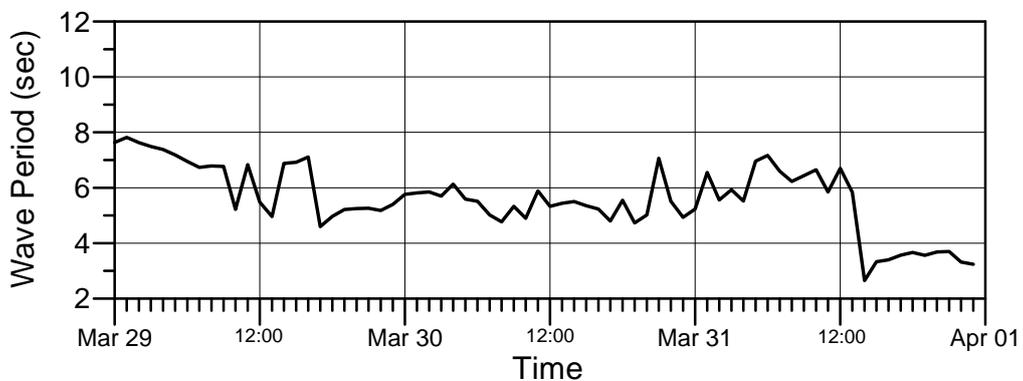


圖 3.16 週期逐時變化圖

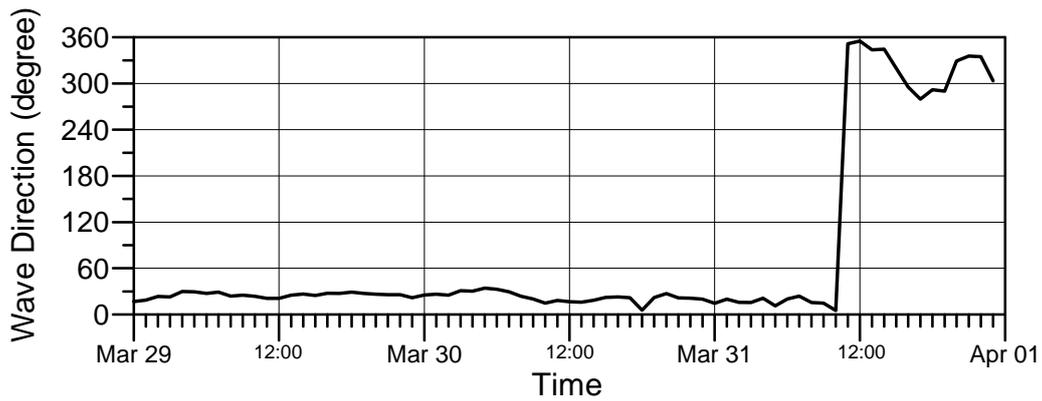


圖 3.17 波向逐時變化圖

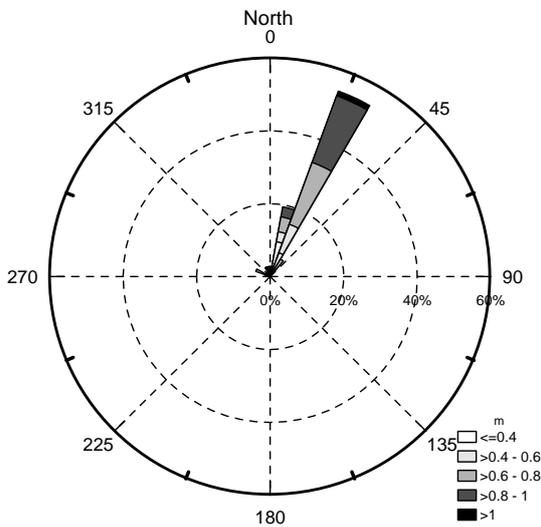


圖 3.18 波浪玫瑰圖
(3/29 00:00~3/31 23:00)

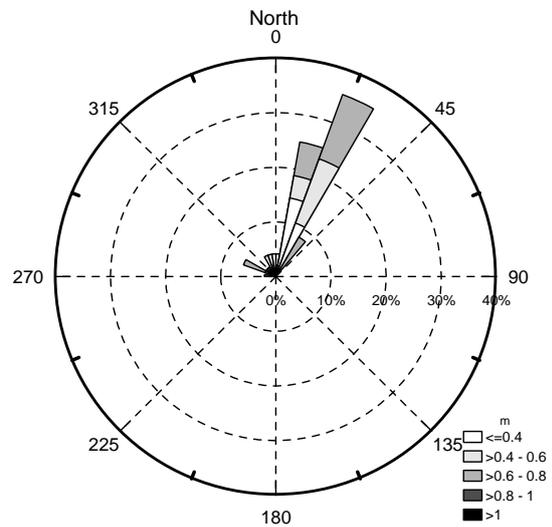


圖 3.19 波浪玫瑰圖
(3/30 00:00~3/31 23:00)

2. 海流

以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，選取 2015 年 3 月 29 日至 3 月 31 日三天的海流資料加以分析，以上部 7 層 6 公尺垂直水深之平均表面流速，繪製逐時分佈如圖 3.20 所示，而相對應的流向逐時分佈如圖 3.21 所示，圖形顯示三天的流速介於 0.02m/sec 至 0.62m/sec，平均為 0.23m/sec，流向以 260° 至 45° 間為主，亦即西至東北向之間，將其流速

流向以玫瑰繪製如圖 3.22，圖形顯示水面下 2~8m 平均流速介於 0.2m/sec~0.4m/sec 佔較多，大於 0.4m/sec 之較大流速其流向則以東北向為主。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 3.23 圖 3.25 所示，圖形顯示靠近表層之海流方向介於北北東至北向之間（圖 3.23），而在中間水深海流方向亦介於北至北北東向之間（圖 3.24），而底層海流則介於北北東至北北西向之間（圖 3.25）。以上顯示海流方向由接近海面的東北向，垂直往下而漸漸轉為北北西向，比較同時段風玫瑰圖（圖 3.9）顯示，在此時段雖為東北與西南風交替，但表面海流似乎受風驅動的影響不大，仍然以流向東北向為主。

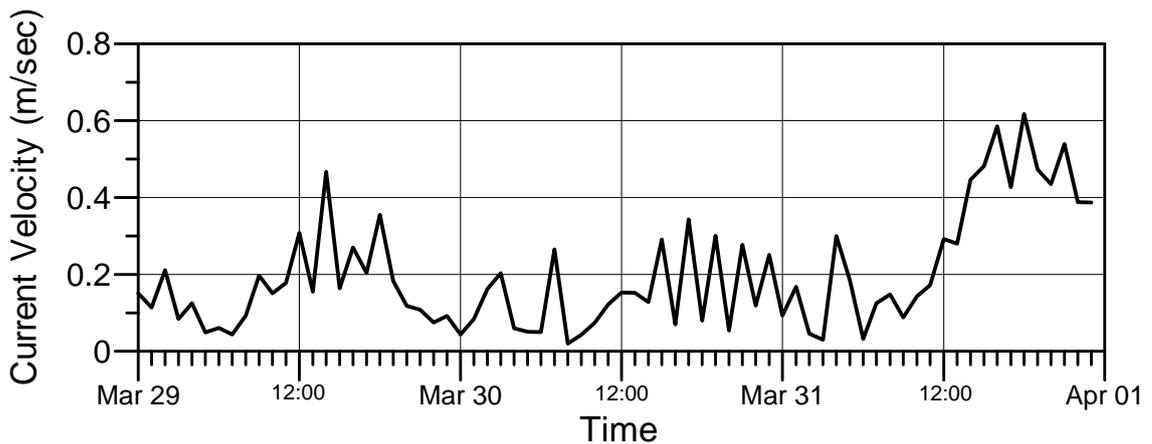


圖 3.20 表面海流流速逐時分佈圖

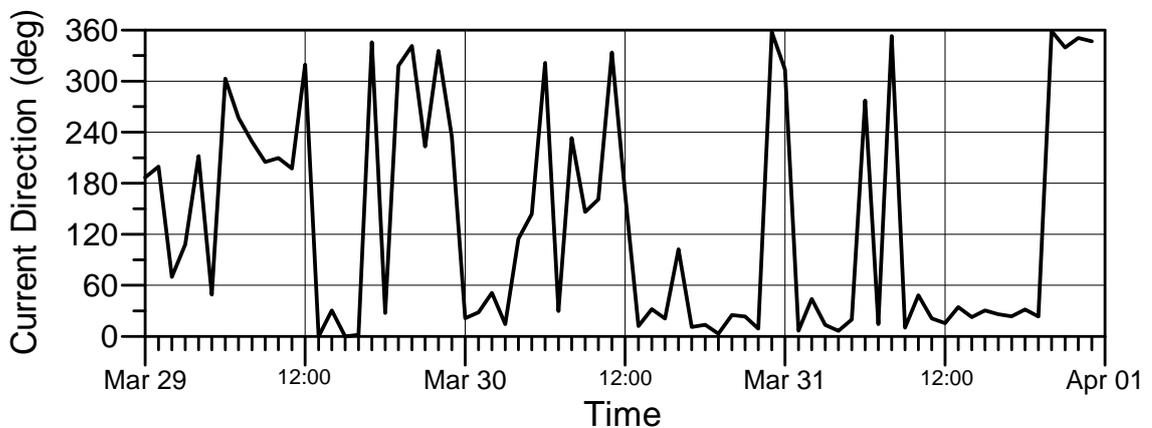


圖 3.21 表面海流流向逐時分佈圖

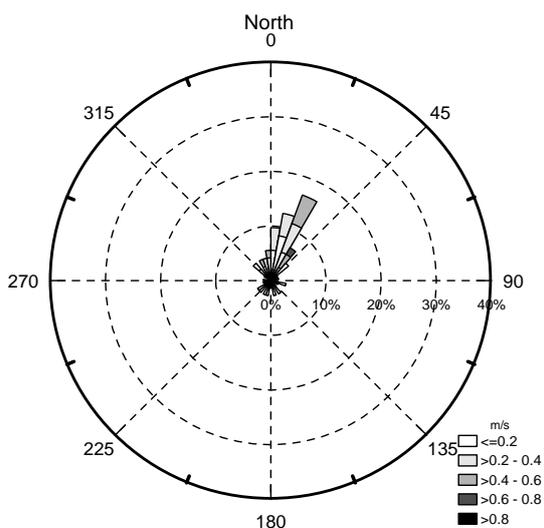


圖 3.22 平均海流玫瑰圖
(水面下約 2~8 公尺)

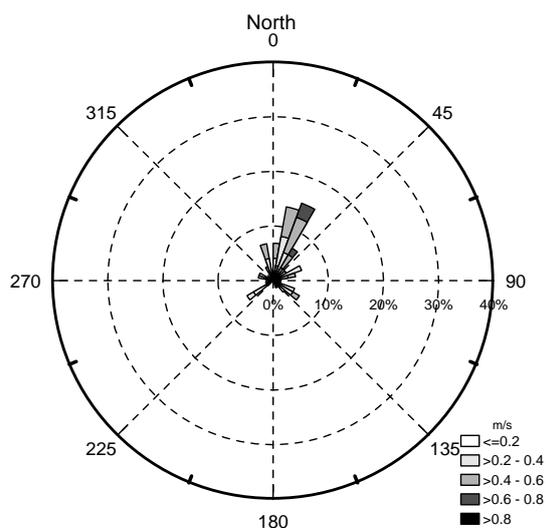


圖 3.23 上層水深海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

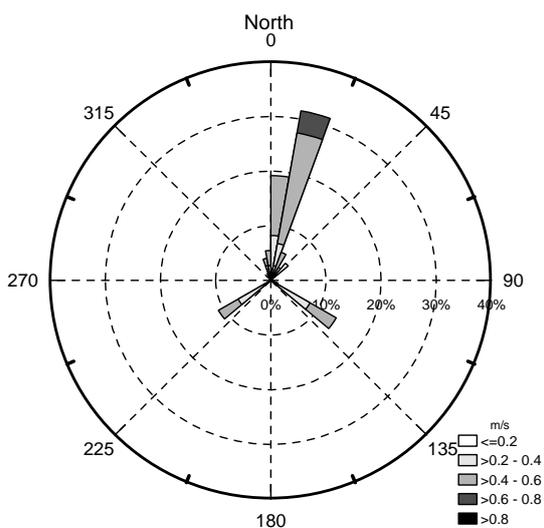


圖 3.24 中層水深海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

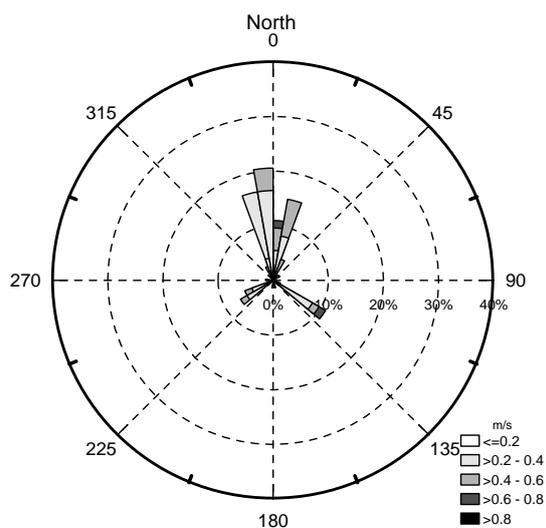


圖 3.25 底層水深海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

為進一步探討不同潮位時其縱水深剖面其海流流速與流向之特性，將其繪製分布比較如圖 3.26a~圖 3.26e 所示。圖形顯示不同時間潮位之流速垂直水深分佈均不相同。四個時段（退潮、乾潮、漲潮及滿潮）比較下，以漲潮時段（Flood）流速較大，除了圖 3.27d 稍小外。流速隨

水深變化並無明顯趨勢但在最底層處之流速均為最小。

圖 3.26a 的漲潮 (Flood) 與滿潮 (High) 時段，在最上層表面流速為最小，探究其原因為，此時刻 3 月 29 日 16~19 時風速漸增 (如圖 3.7)，而且其風向為東北向 (如圖 3.8)，造成與原北向的海流相抵觸，導致流速減小，甚至使往北之流向轉為往南，此為明顯風驅流影響表面流速的現象。另外由圖 3.26b 顯示，在退潮 (Edd) 時段表面流向為西至西北向，但至乾潮 (Low) 時段則轉變成北北東向且流速加大，對照此時刻 3 月 29 日 22 時~30 日 01 時之風速風向值 (圖 3.7 及圖 3.8)，此時段風向由東北轉為南再轉為西南向，造成與北北東向的海流相抵觸，導致流速減小，流向轉為往西，至 3 月 30 日 01 時風向再轉為南向，造成對北北東向的海流其表面流速再增加，流向則維持北北東向。圖 3.26c 顯示在退潮 (Edd) 以及乾潮 (Low) 時段表面水流方向為南南東向，與中層以及底層水流方向北向或北北東向不同，由圖 3.6 北防波堤堤頭風向時序列分析顯示，此時刻的風向為北北西風，因此造成表面與水深較深水流方向不同。另外圖 3.26e 顯示在退潮 (Edd)、乾潮 (Low) 及漲潮 (Flood) 時段，在最上層表面流速為最大，探究其原因為，此時刻 3 月 31 日 12~18 時風速漸增 (如圖 3.7)，而且其風向為東南向轉為北北西向 (如圖 3.8)，造成與原北向的海流加上北向風驅流，導致流速增加。以上均顯示風驅流增加表面流速或流向的現象。

值得注意的是，在最靠近底床的水流方向大致相同，均介於北北西向至北北東向之間，由此看出其流向似乎不受漲退潮的影響，與蔡等 (2015) 在 2014 年夏季 6 月量測結果相近，顯示流向並不受夏春季節影響，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，其流速介於 0.3~0.5m/sec。

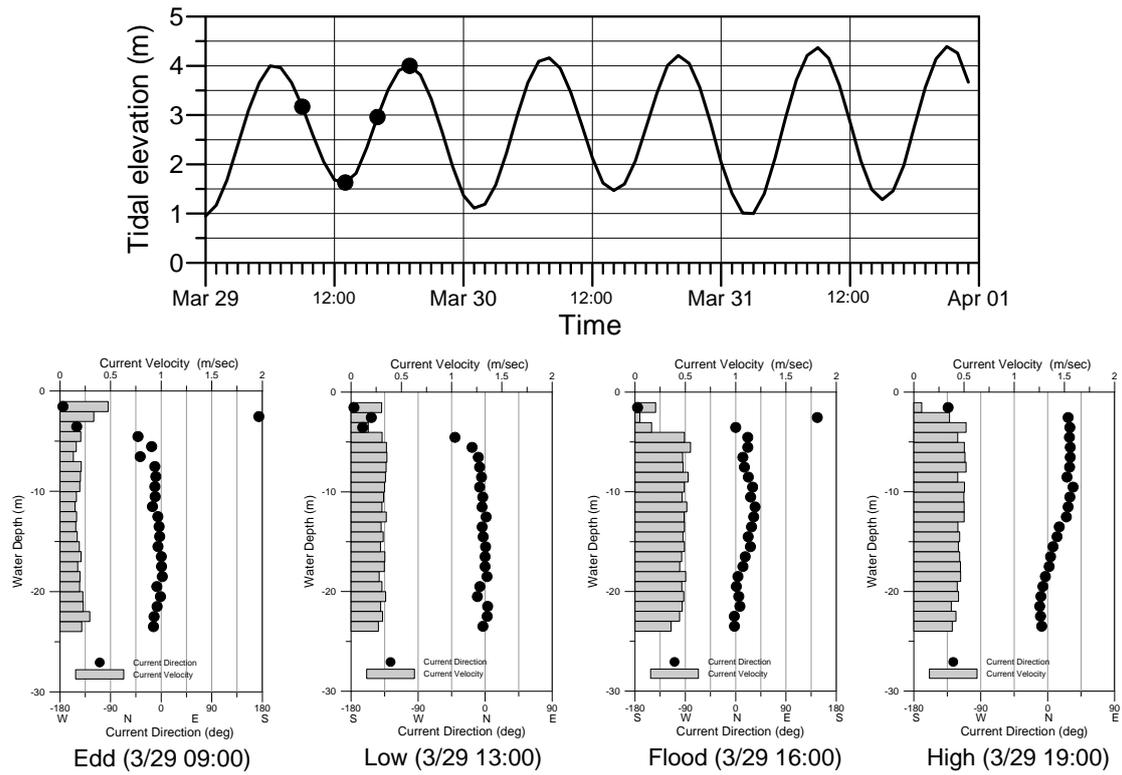


圖 3.26a 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

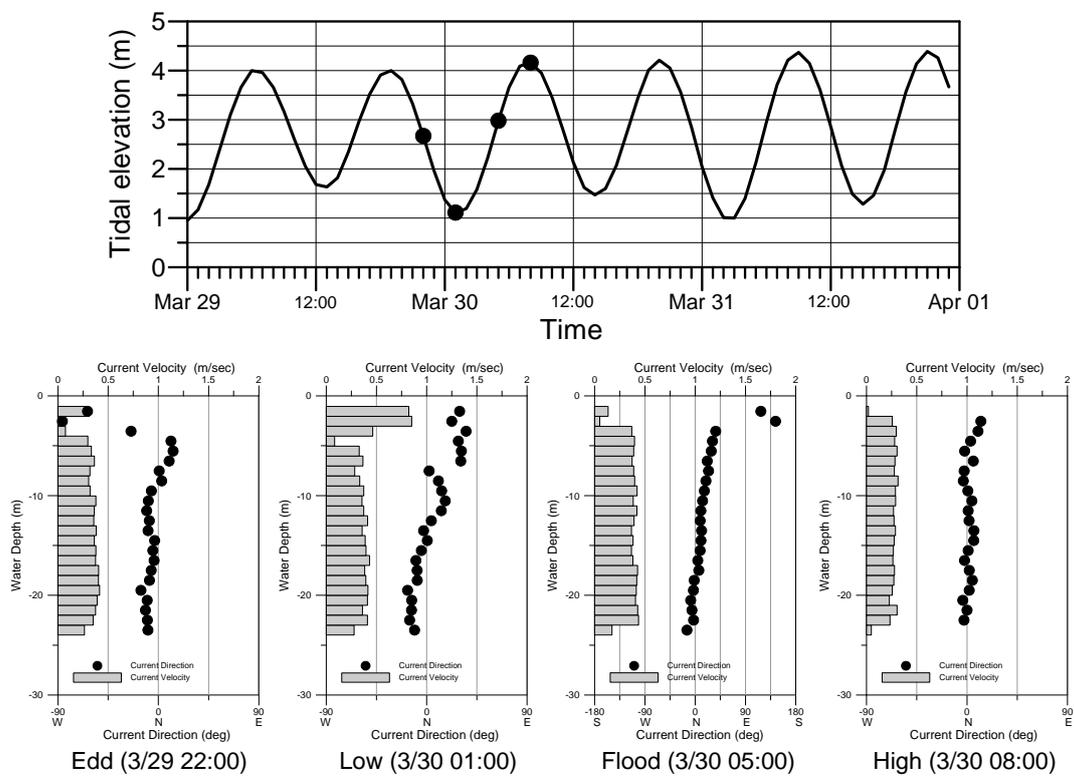


圖 3.26b 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

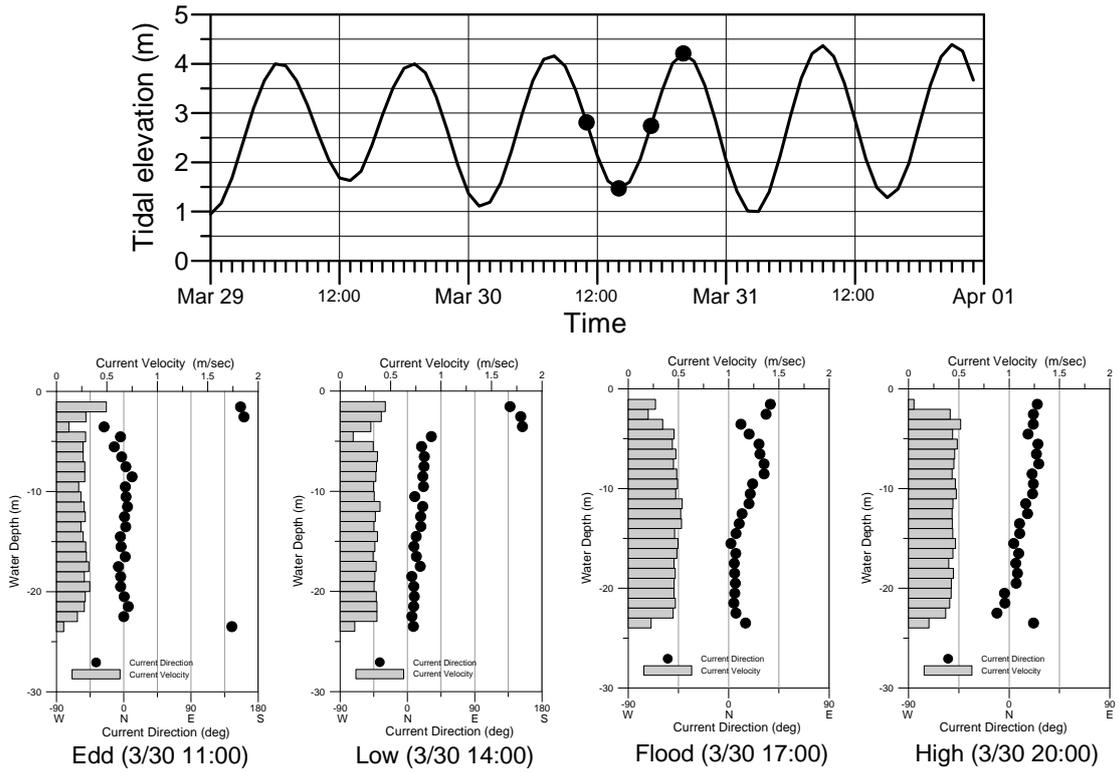


圖 3.26c 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

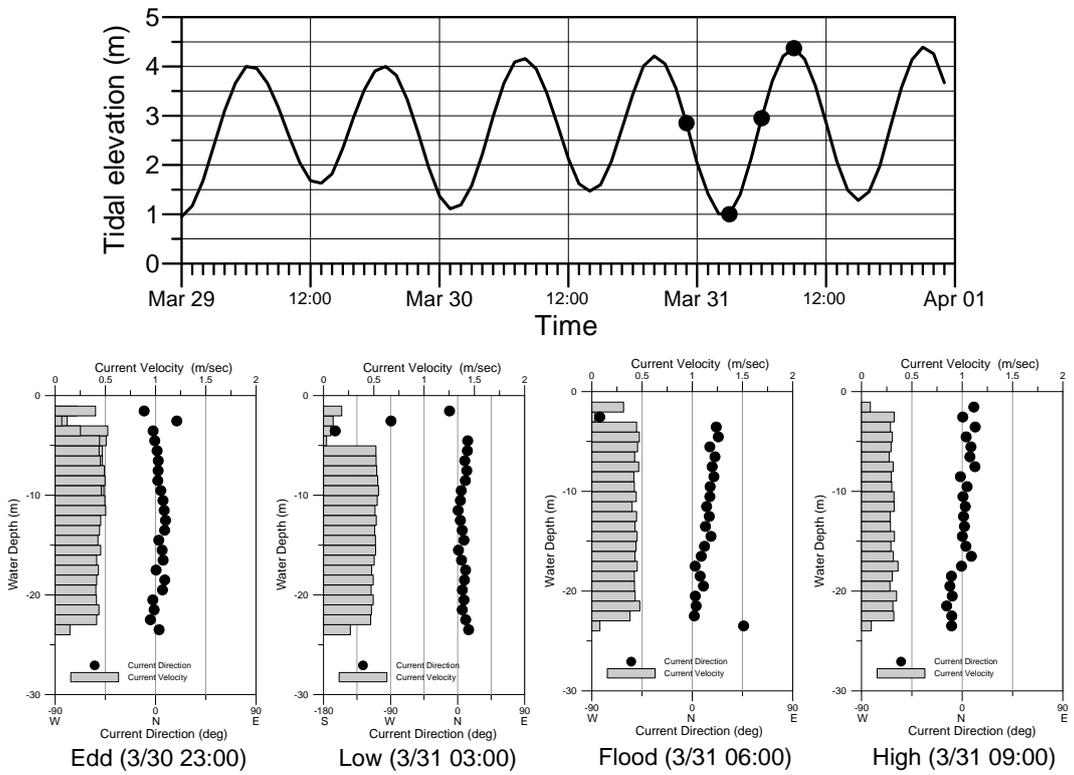


圖 3.26d 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

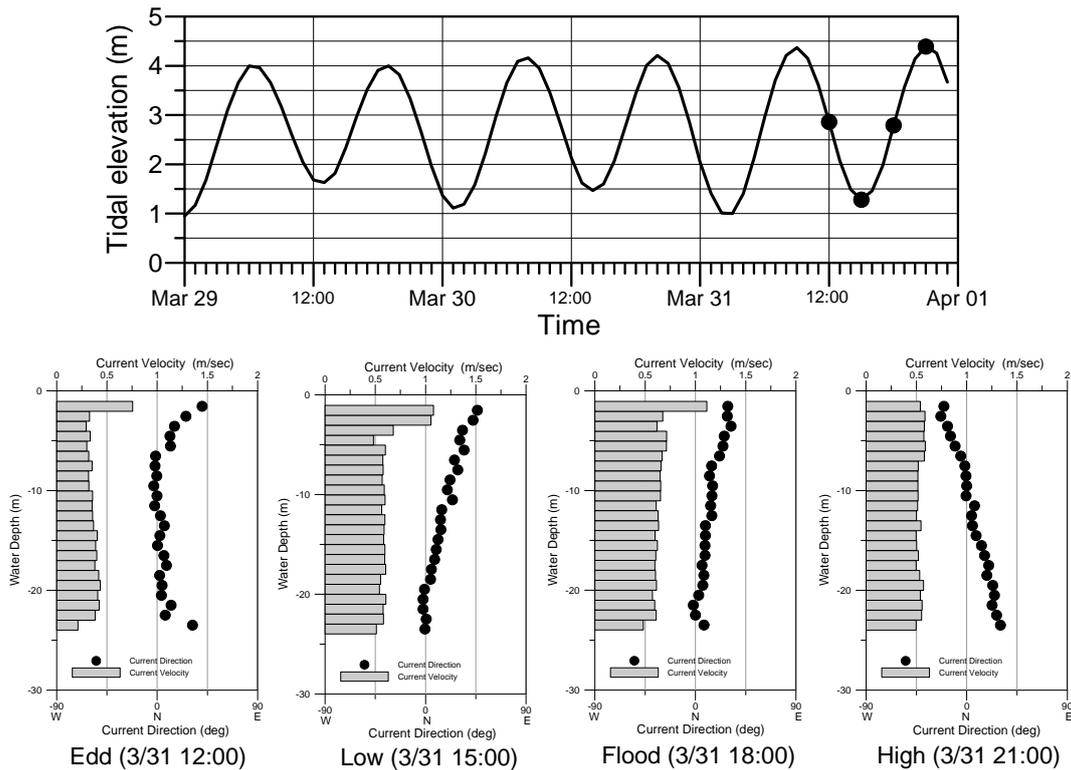


圖 3.26e 不同潮位在不同水深之海流流速流向分佈圖

本研究將 2015 年 3 月 29 日至 3 月 31 日三天不同潮時（漲潮、滿潮、退潮、乾潮）在不同水深（上層、中層、底層）之海流玫瑰圖分析繪製如圖 3.27～圖 3.38 所示。由上層（水面下約 2～4 公尺）海流玫瑰圖（圖 3.27～圖 3.30）顯示，在漲潮時海流方向主要為往東北向，流速可達 0.6m/sec 以上；在滿潮時海流方向介於東北～北向間，流速小於 0.6m/sec；在退潮時海流方向變化較大，介於北北西、北以及東南東向間，流速亦是小於 0.6m/sec；在乾潮時海流方向介於東北東及北北東向之間，流速比滿潮及退潮時大。

中層（水面下約 12～14 公尺）海流玫瑰圖（圖 3.31～圖 3.34）顯示，在漲潮時海流方向主要為往北北東向，流速可達 0.6m/sec 以上；在滿潮時海流方向介於東北東～北向間，流速小於 0.6m/sec；在退潮時海流方向主要為向北，流速小於 0.6m/sec，另有向東南東分量之海流但流速小於 0.4m/sec；在乾潮時海流方向主要為北北東向，流速可達

0.6m/sec 以上。

由下層（水面下約 20~22 公尺）海流玫瑰圖（圖 3.35~圖 3.38）顯示，在漲潮時海流方向以北向為主，流速介於 0.4~0.6m/sec 之間，另外有向東南東分量海流，流速介於 0.2~0.8m/sec 之間；在滿潮時海流方向主要為北北西向，流速小於 0.4m/sec；在退潮時海流方向介於北北東至北北西向之間，流速小於 0.6m/sec；在乾潮時海流方向主要為北向，流速可達 0.6m/sec 以上。

以不同水深分層比較，如漲潮時之上中下層之圖 3.27、圖 3.31 以及圖 3.35，海流方向由上層之東北向，至中層逆時鐘方向轉為北向，至下層時再逆時鐘方向轉為北北西向；而速度則隨著水深愈深水流速度愈小。滿潮時之上中下層水深之圖 3.28、圖 3.32 以及圖 3.36 比較顯示，海流方向由上層之北北東至北向間，至中層流向更明顯介於北北東至北向間，至下層時則逆時鐘方向轉為北北西向；而速度亦是隨著水深愈深水流速度愈小。退潮時之上中下層水深之圖 3.29、圖 3.33 以及圖 3.37 比較顯示，海流方向上層之方向範圍較大，介於東南東、北及西北西之間變化，至中層流向則分為兩個主方向，分別為北向以及東南向，至下層時則以向北的北北東至北北西向間為主，南向海流分量已幾乎消失，而速度則以中層速度較大。乾潮時之上中下層水深之圖 3.30、圖 3.34 以及圖 3.38 比較顯示，海流方向上層之介於東北東及北北東之間，至中層流向則逆時中方向轉為北北東為主要方向，至下層時則再逆時鐘方向轉為以向北為主，而速度上中下層變化不大。

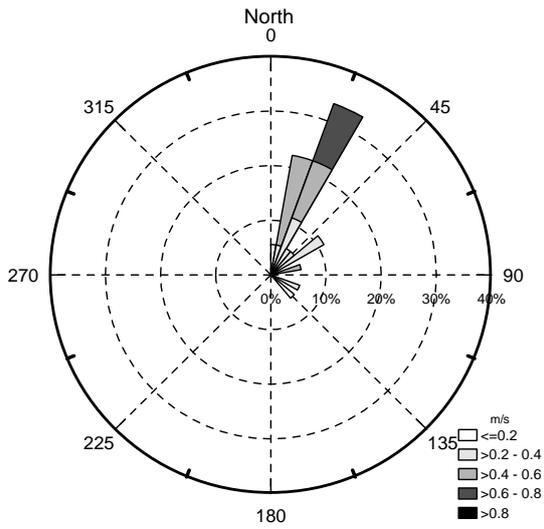


圖 3.27 漲潮上層海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

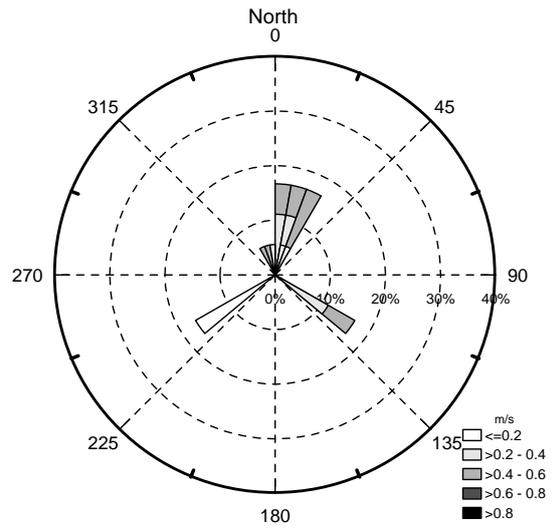


圖 3.28 滿潮上層海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

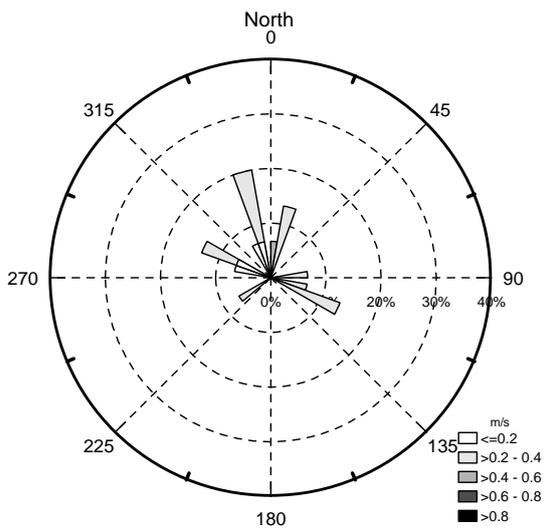


圖 3.29 退潮上層海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

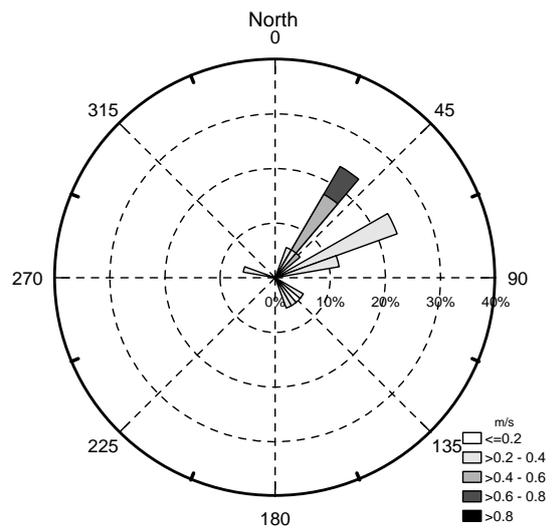


圖 3.30 乾潮上層海流玫瑰圖
(水面下約 2~4 公尺)

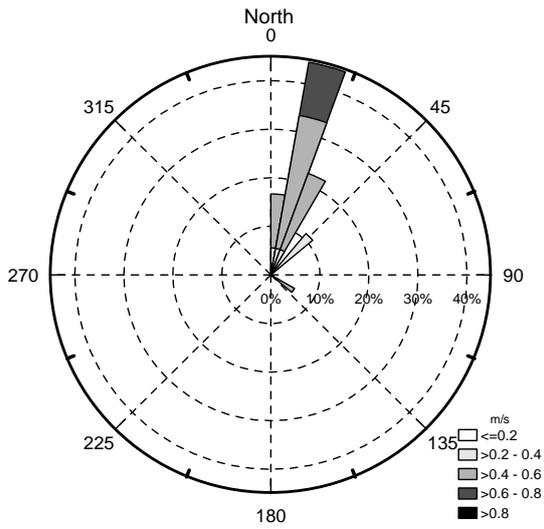


圖 3.31 漲潮中層海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

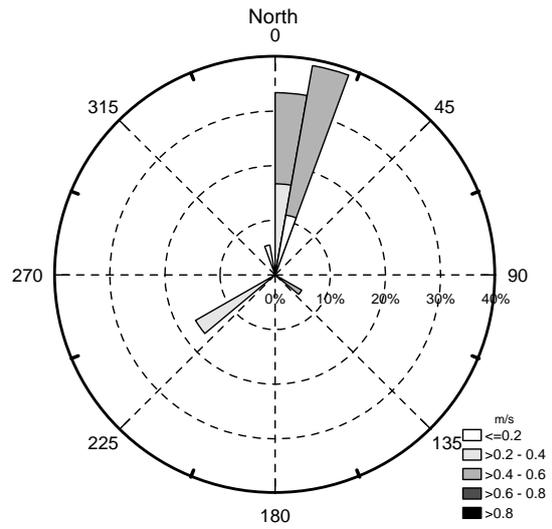


圖 3.32 滿潮中層海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

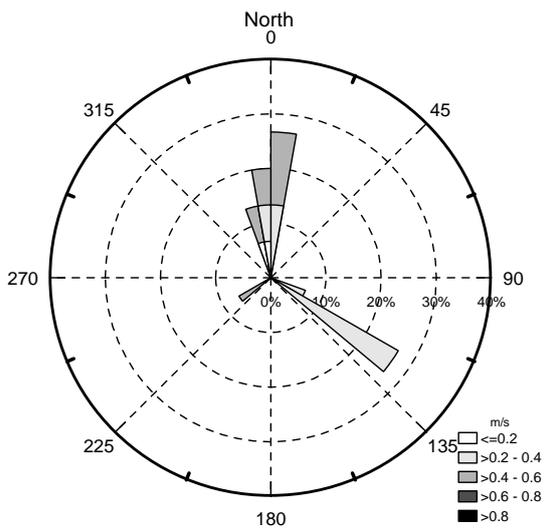


圖 3.33 退潮中層海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

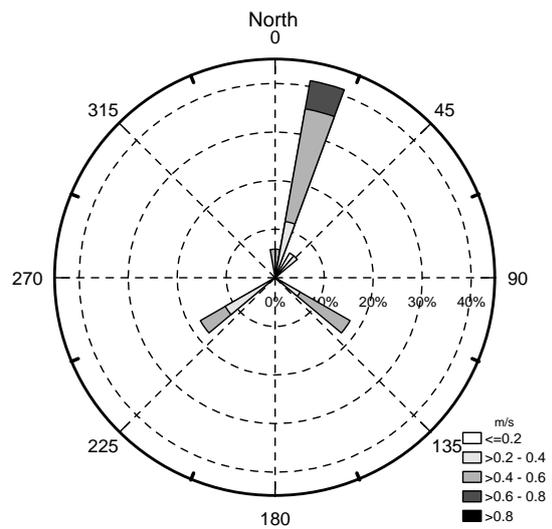


圖 3.34 乾潮中層海流玫瑰圖
(水面下約 12~14 公尺)

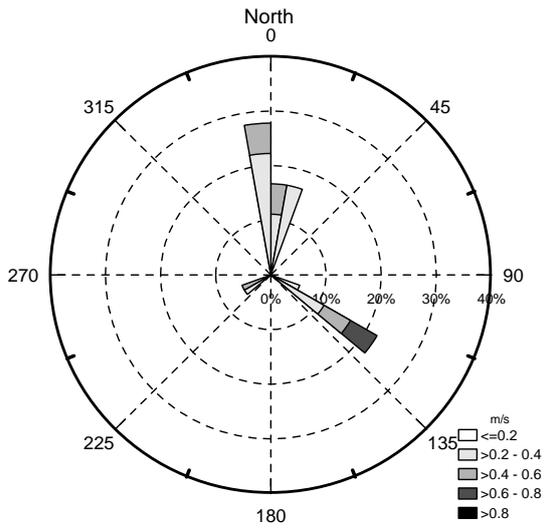


圖 3.35 漲潮下層海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

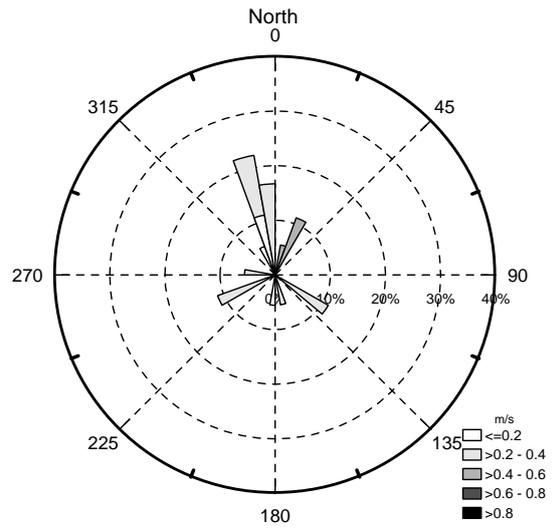


圖 3.36 滿潮下層海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

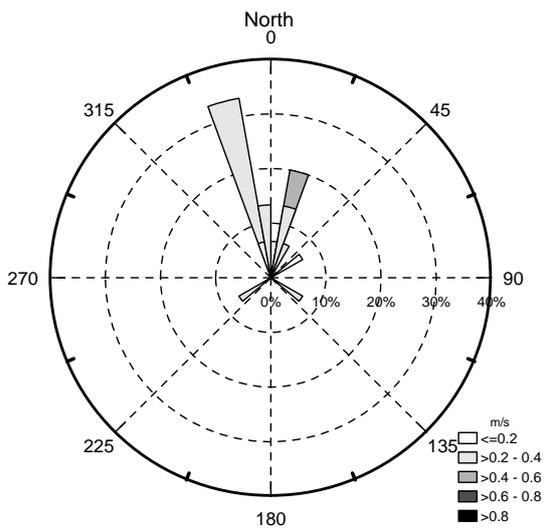


圖 3.37 退潮下層海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

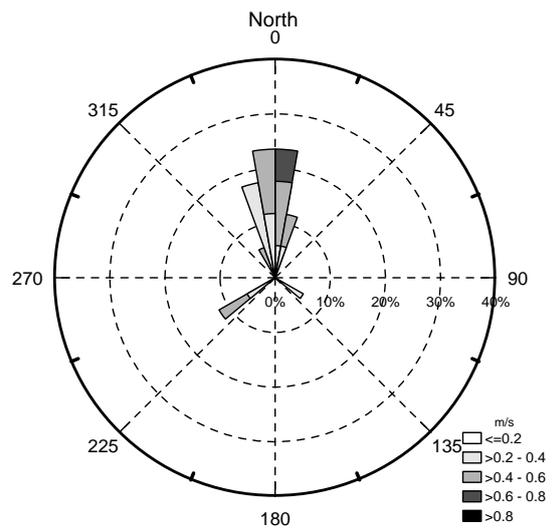


圖 3.38 乾潮下層海流玫瑰圖
(水面下約 20~22 公尺)

3.6 浮標軌跡表面流分析

平面流場軌跡追蹤作業於 2015 年 3 月 30 日進行，佈放地點以臺中港北防波堤至堤頭外側為主，共執行 4 個測次，漂流軌跡施放時間及平均流速紀錄分析如表 3-1 所示。第 1、2 測次屬退潮時段，第 3、4 測次屬漲潮十段，表中顯示第 3、4 測次平均流速皆大於第 1、2 測次的平均流速，此結果與前一節圖 3.27 及圖 3.29 上層海流在漲潮時流速較快趨勢相同。另外以平均流速及相對漂流軌跡繪製如圖 3.39 至圖 3.42，以利探討平面流場分佈特性。圖 3.39 及圖 3.40 顯示退潮時段 2 測次均朝西北方向前進，且流速有增大趨勢，由圖 3.29 退潮時上層流速方向介於西北西至東南東的趨勢相近。由各測次平均流速顯示，S1 平均流速介於 25.10~25.35 cm/sec；S2 平均流速介於 40.35~40.89 cm/sec。圖 3.41 及圖 3.42 顯示漲潮時段 S3 平均流速介於 52.84~53.14 cm/sec；S4 平均流速介於 54.91~55.51 cm/sec，往北北東方向前進，此趨勢由圖 3.27 分析結果相同；漲潮漂流比退潮時段的速度大此與前一節堤頭固定點底碇剖面流分析結果相同。

表 3-1 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)
S1	B	10:40-12:30	25.35	S3	B	15:00-16:30	53.14
	R	10:40-12:30	25.16		R	15:00-16:30	52.84
	G	10:40-12:30	25.10		G	15:00-16:30	52.66
S2	B	13:00-14:40	40.89	S4	B	16:30-18:00	55.51
	R	13:00-14:40	40.70		R	16:30-18:00	55.75
	G	13:00-14:40	40.35		G	16:30-18:00	54.91

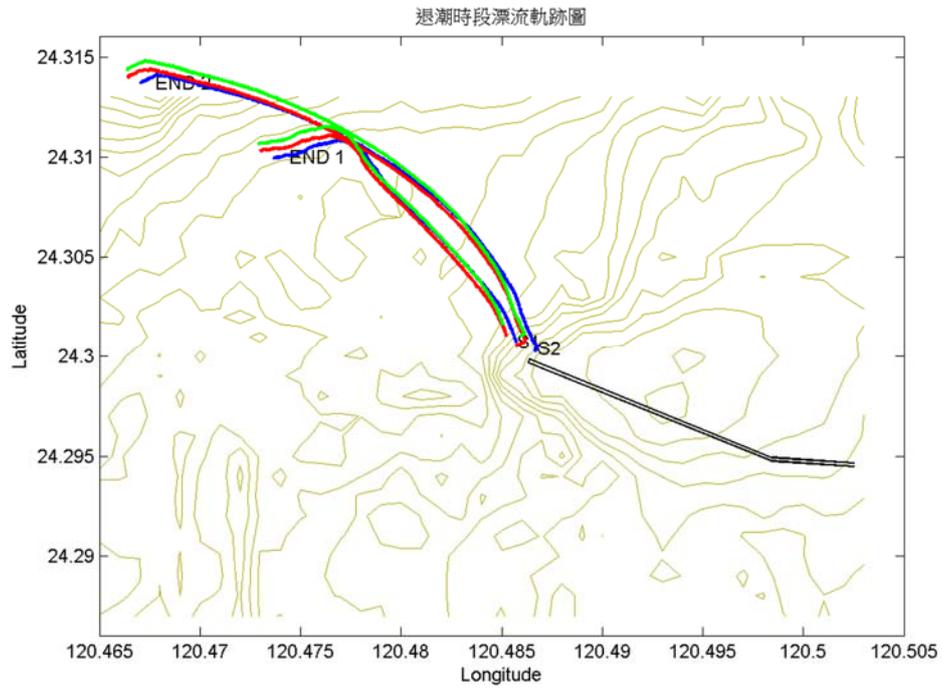


圖 3.39 退潮時段浮標軌跡圖

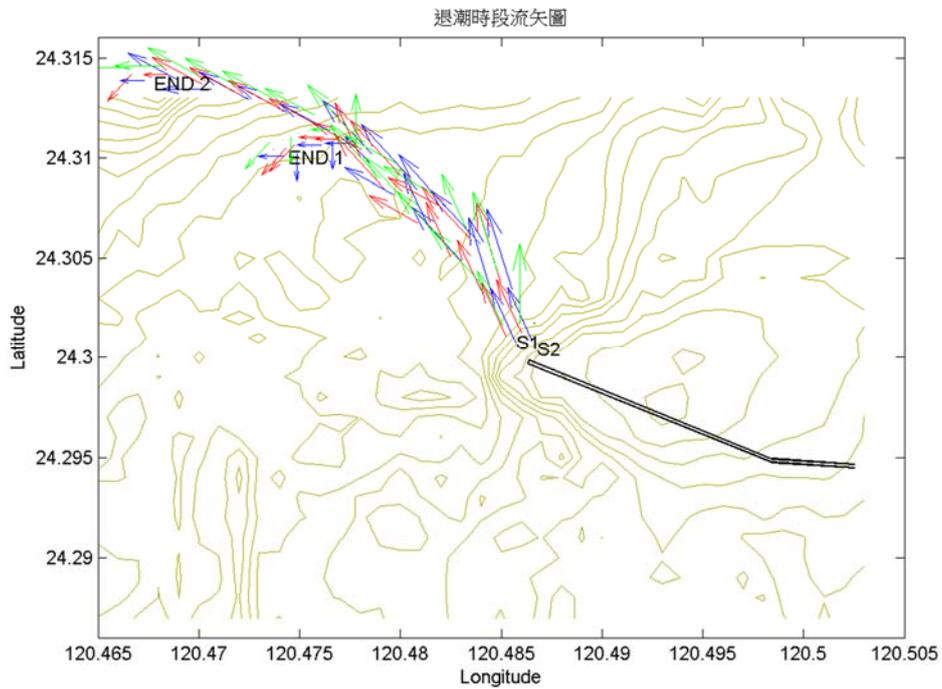


圖 3.40 退潮時段浮標流矢圖

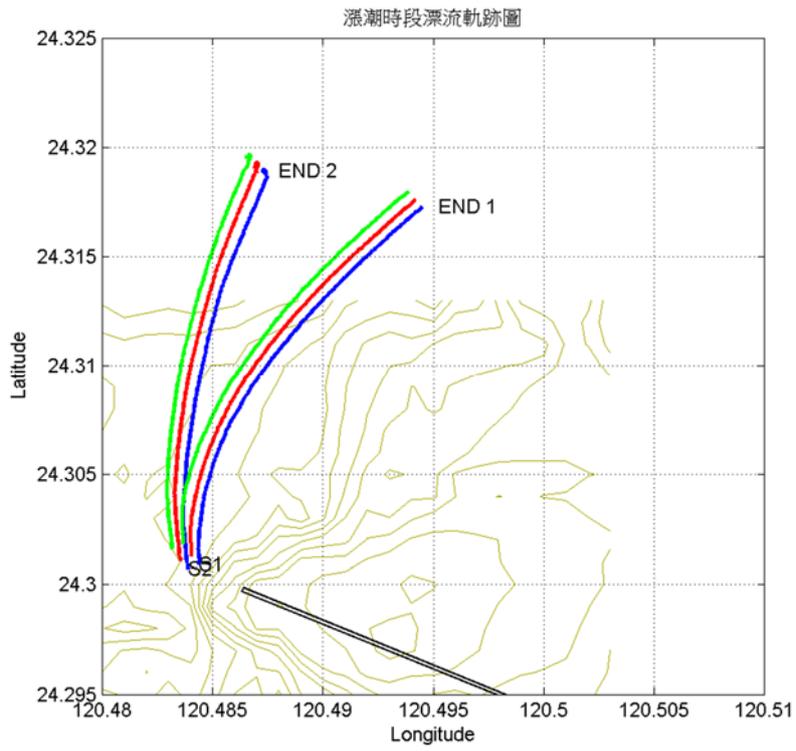


圖 3.41 漲潮時段浮標軌跡圖

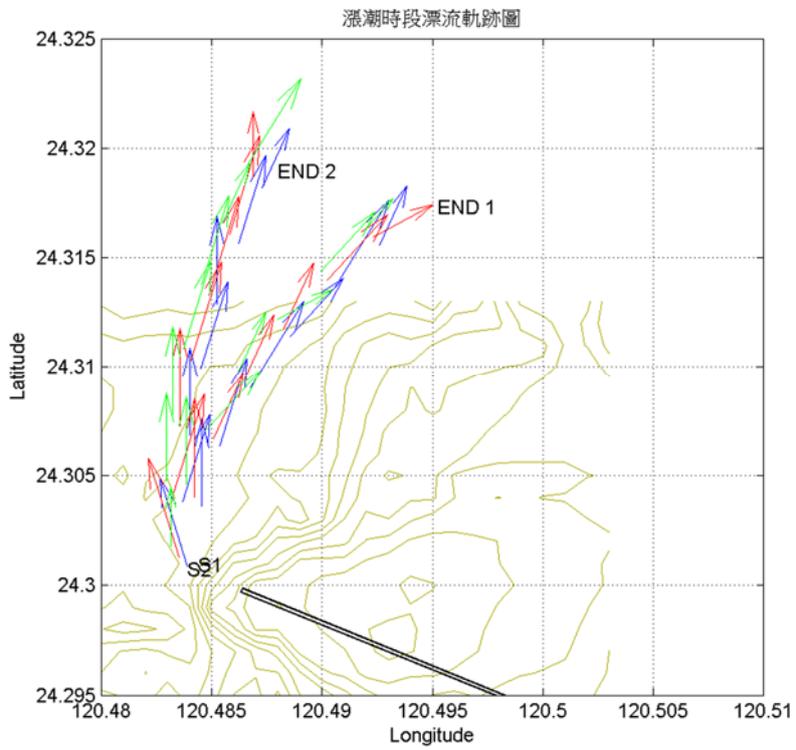


圖 3.42 漲潮時段浮標流矢圖

3.7 船碇觀測流場分析

為與其他觀測項目進行比較探討，本研究以 ADCP 監測到最接近海面水深 5m 流速向量之平均進行分析比較，其中船碇 ADCP 儀器沒水深度 1.0m，流速每層間距 20cm，故表層海流即為海水表面 1~6m 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。

1. 表層海流分析

各測回表層平均流速如圖 3.43a~圖 3.43f 所示。圖 3.43a 顯示在滿潮至退潮時段，表層海水往南西向流，但在北防波堤北側，受到北防波堤阻擋，由水深淺處順著堤體往深水處流，再繞過堤頭往西南向流。北防波堤南側，受退潮港池裡水體往外海流影響，水流方向約為往西北西向。此結果與圖 3.21 及圖 3.24c 堤頭定點觀測之在退潮時間海流流向約相同，而此時風向為東北風，加速其表面流往西南流。

圖 3.43b 顯示在退潮至乾潮前時段，水流方向在遠離堤頭西側區域大致多為往北，水流往北靠近堤頭後轉向東北，而北防波堤南側航道區域，因退潮港池水體順著堤體流出水流方向為西北西，流速在堤體南側接近堤體以及堤頭處最大。由底碇固定點量測結果圖 3.21 亦顯示堤頭外側水流方向為東北向。值得注意的是由風速資料分析結果（圖 3.5）顯示此時刻風向為北北東向，理應有向南風驅動的表面流，但因此時刻風速不大（約小於 4m/sec），無法克服向北海流，故表面流仍然以北向為主要方向。圖 3.29c 顯示在乾潮至漲潮時段，表面海水往東北向流的現象更明顯，水流速度更大，唯有北防波堤南側航道水流速度減小。至接近滿潮時刻（圖 3.43d）水流方向仍然以東北向為主，但流速比漲潮時刻小。圖 3-29e 顯示整個退潮段的水流趨勢為往西南向流，圖 3.43f 顯示在整個漲潮時段，主要水流方向為向東北，水流往北經過堤頭後轉往東北東方向，漲潮整體流速比退潮時段大。

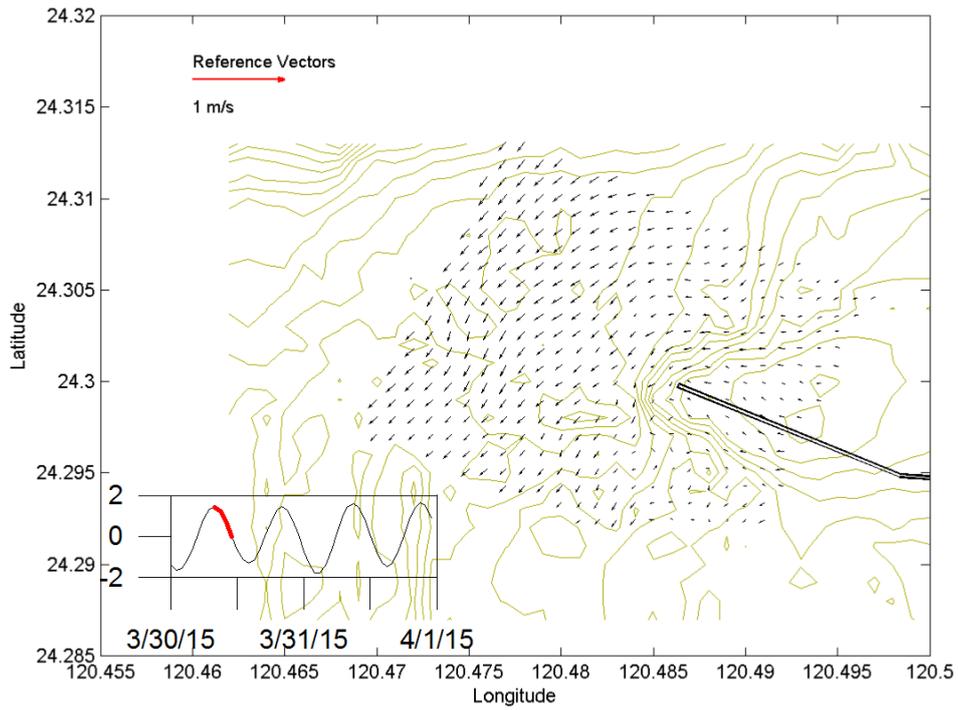


圖 3.43a 滿潮至退潮時段之表層海流分佈圖

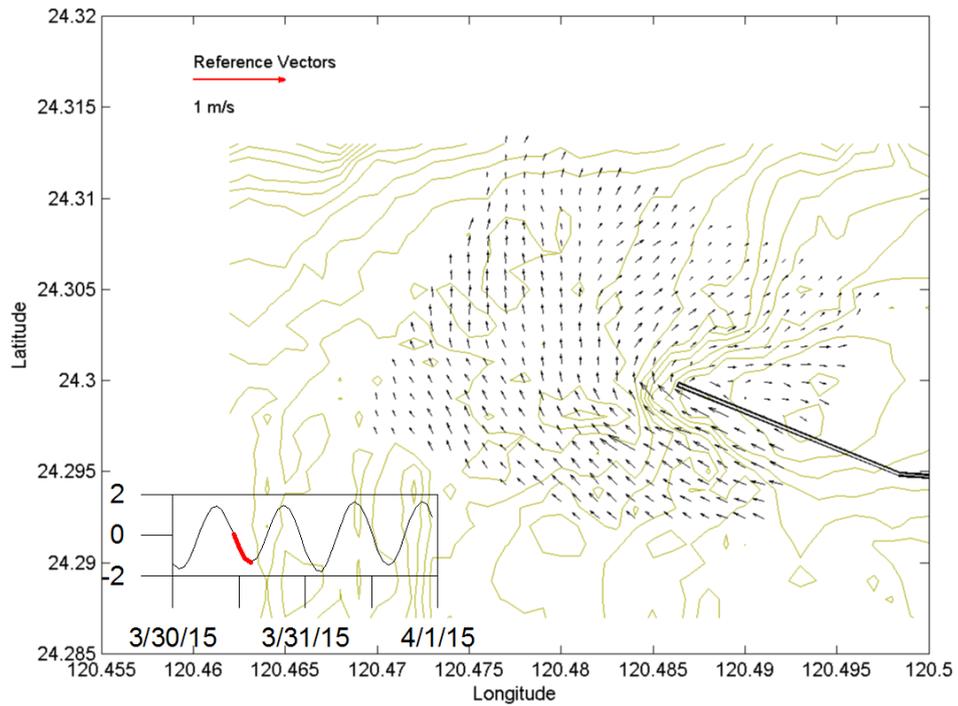


圖 3.43b 退潮至乾潮時段之表層海流流速分佈圖

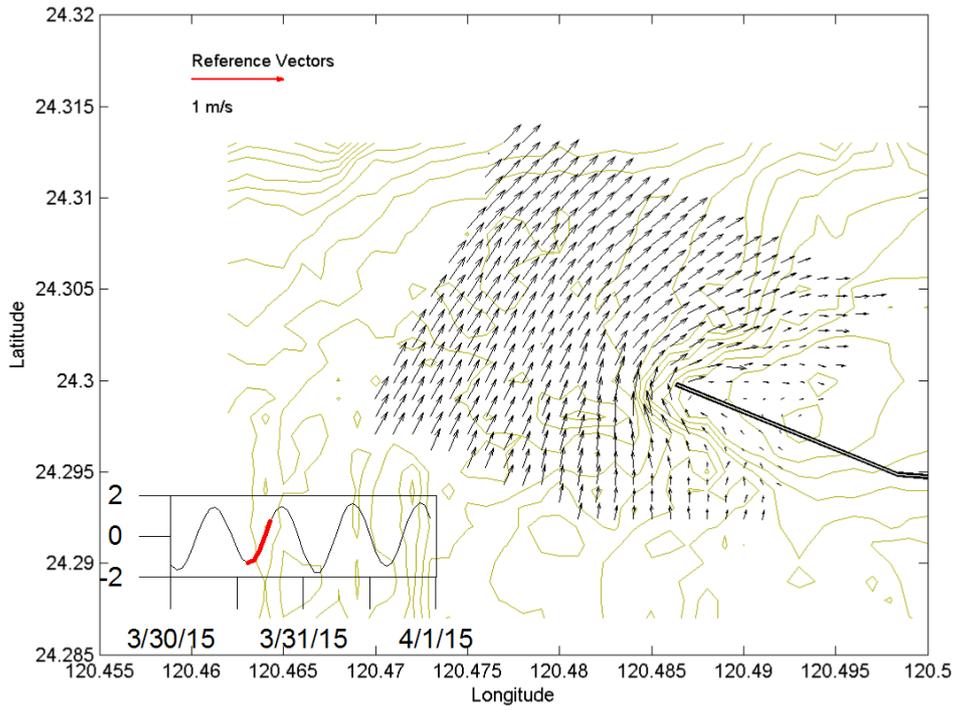


圖 3.43c 乾潮至漲潮時段之表層海流分佈圖

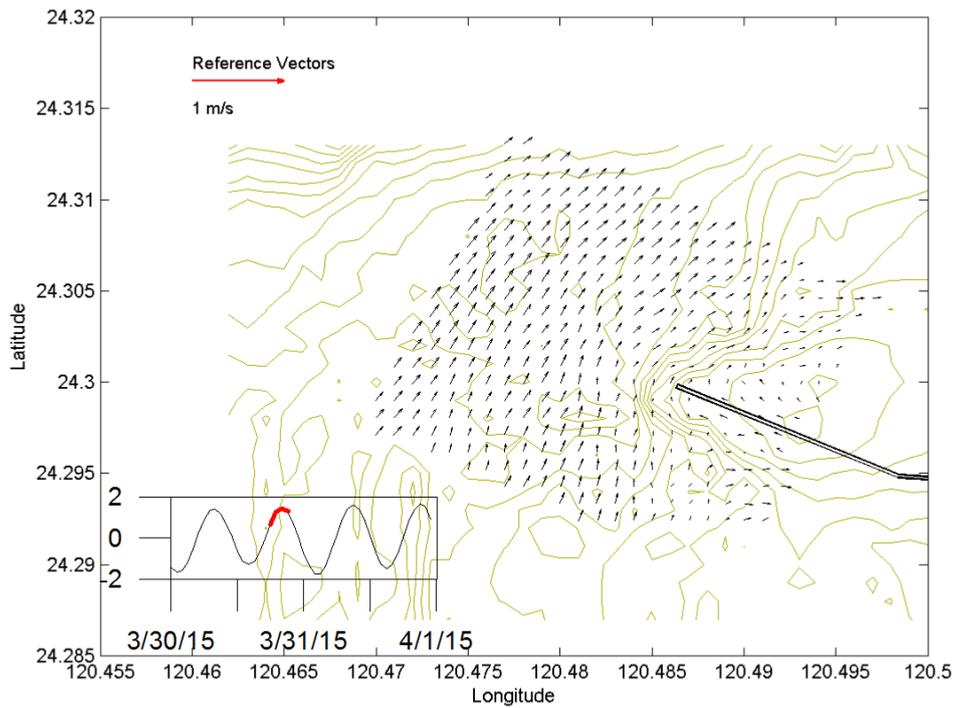


圖 3.43d 漲潮至滿潮時段之表層海流分佈圖

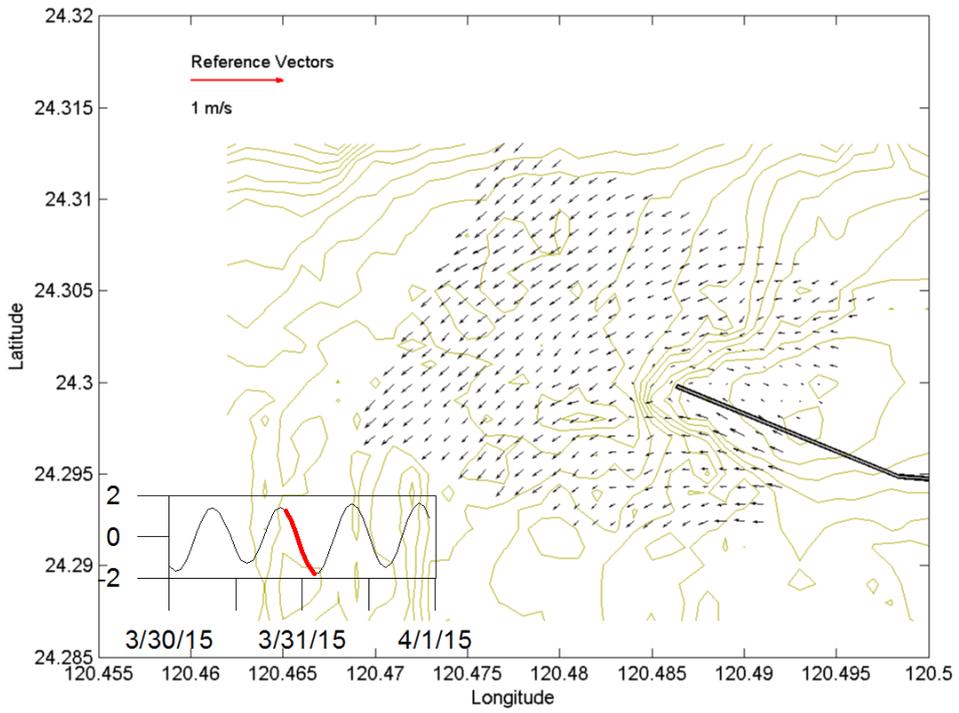


圖 3.43e 退潮時段之表層海流分佈圖

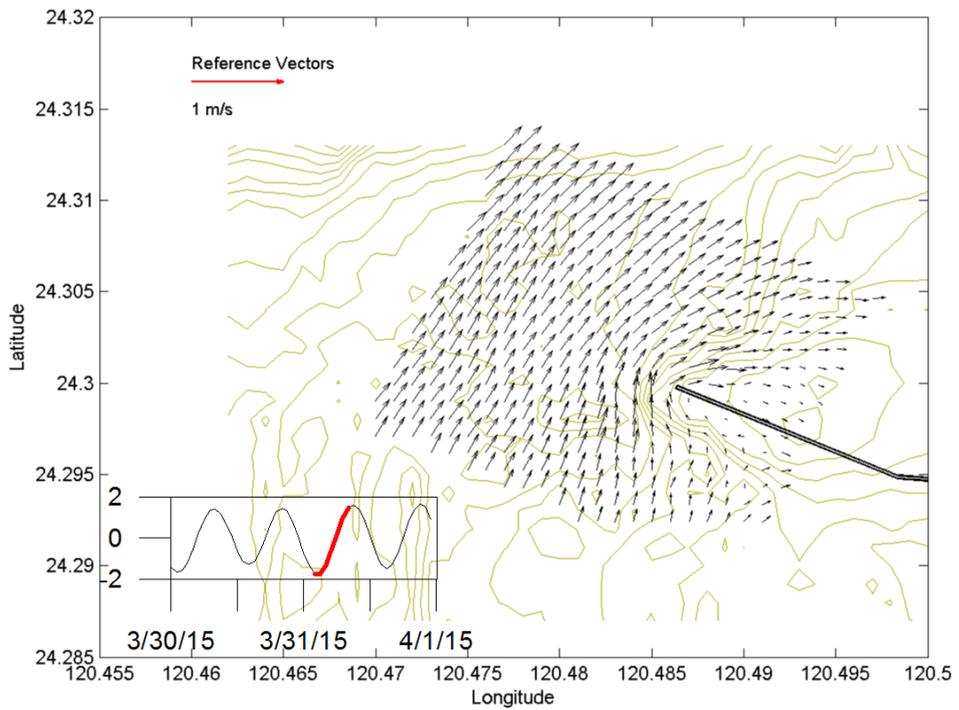


圖 3.43f 漲潮時段之表層海流分佈圖

2. 中層海流分析

各測回水深中層平均流速繪製如圖 3.44a~圖 3.44f 所示，與圖 3.43 比較，顯示中層水流速略大於表層流速，圖 3.44a 顯示滿潮至退潮時段，水流往西南方向，而圖 3.44b 顯示在退潮至乾潮前時段，流向則轉為向北，圖 3.44c 和圖 3.44d 顯示乾潮至滿潮時段流向為向東北。圖 3.44e 顯示滿潮後至乾潮前之整個退潮時段，整體水流為往西南向，除北防波堤北側堤體影響轉向西北西且流速變小，而北防波堤南側受港池水體流出而呈現西北西向。圖 3.44f 顯示整個漲潮時段，整體水流往東北方向流，且流速均較退潮時段大。由於中層水流較不受表面風驅流影響，由以上分析結果顯示，臺灣西部海域在 3 月 30 日附近時間，其漲退潮水流在臺中港北防波堤北側附近相遇，導致水流在防波堤附近漲潮為往北而退潮為往南。

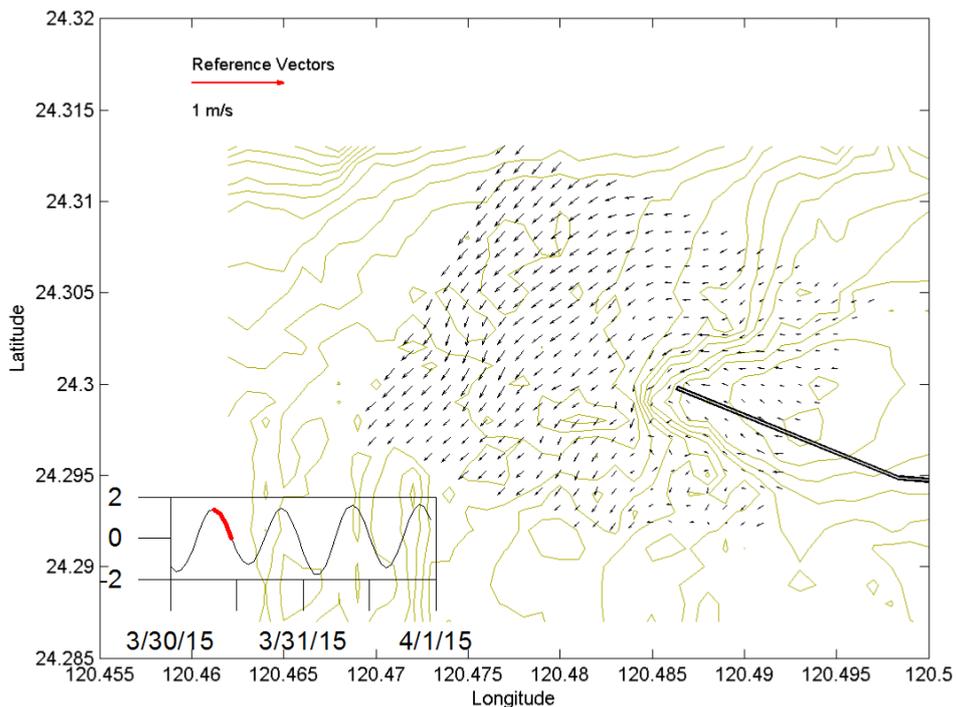


圖 3.44a 滿潮至退潮時段之中層海流分佈圖

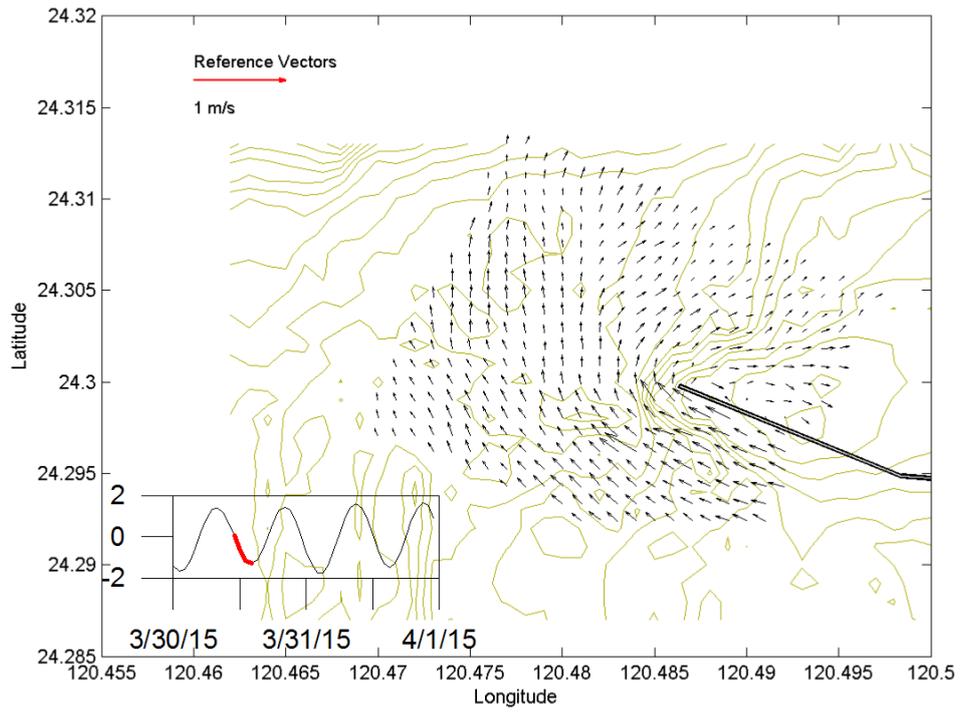


圖 3.44b 退潮至乾潮時段之中層海流分佈圖

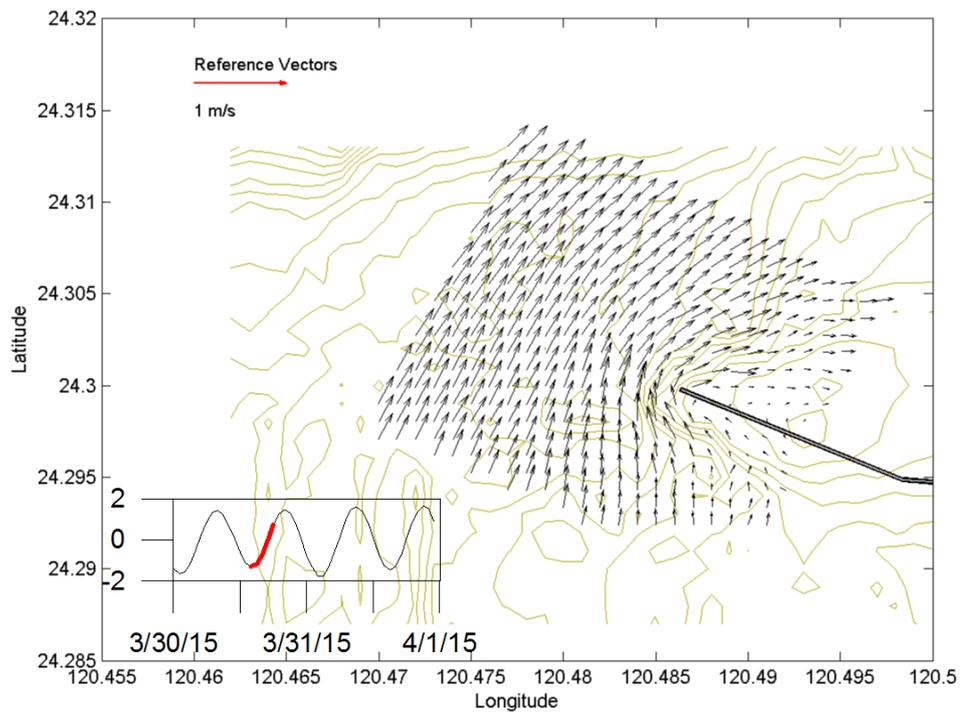


圖 3.44c 乾潮至漲潮時段之中層海流分佈圖

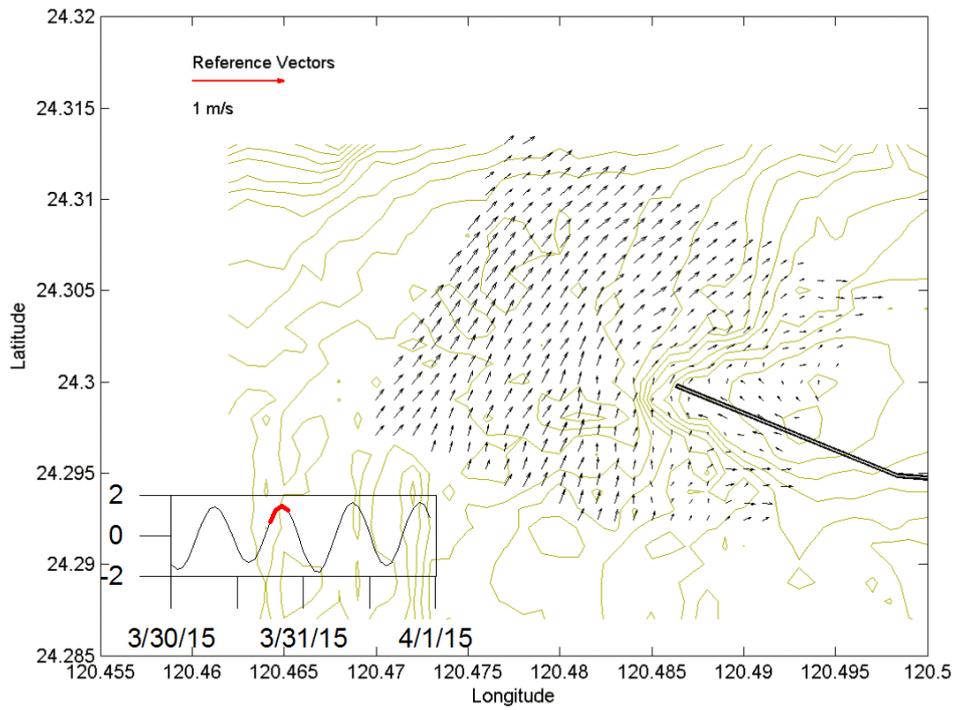


圖 3.44d 漲潮至滿潮時段之中層海流分佈圖

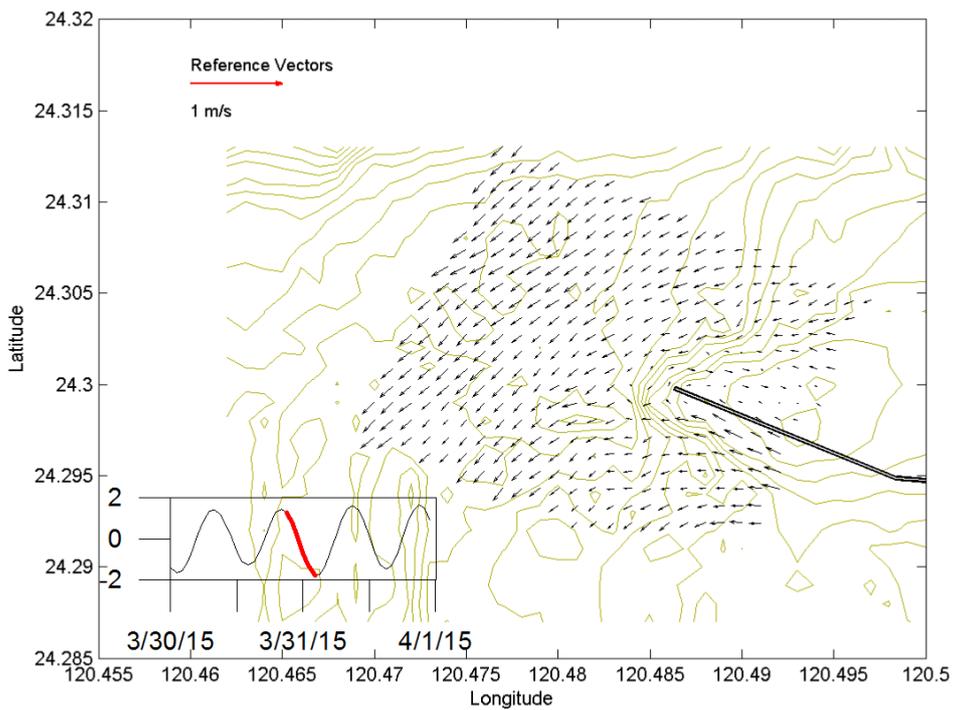


圖 3.44e 退潮時段之中層海流分佈圖

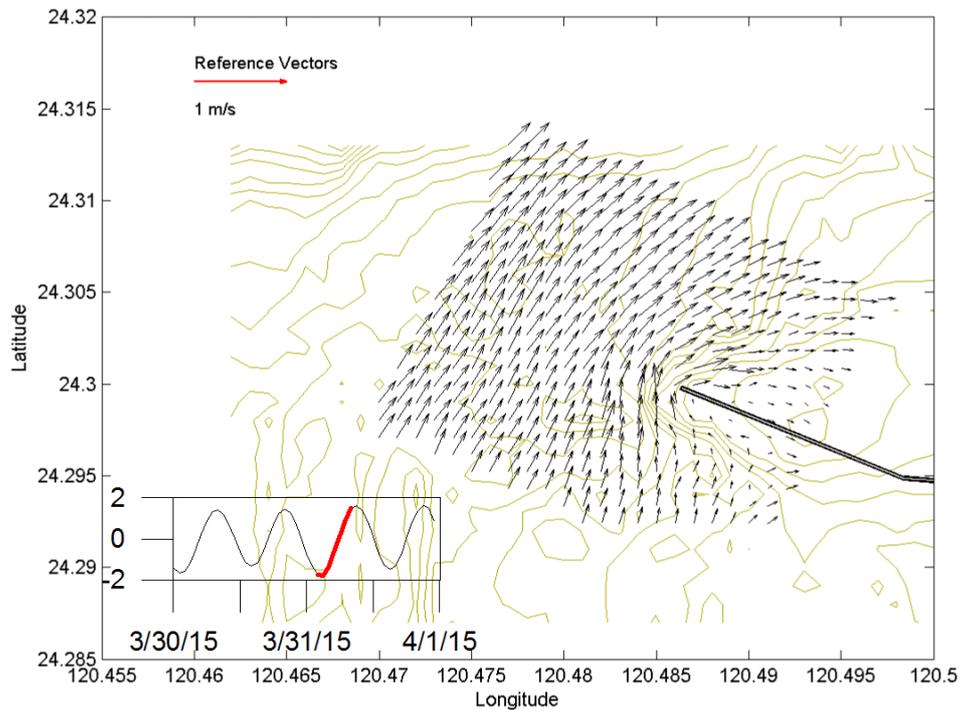


圖 3.44f 漲潮時段之中層海流分佈圖

3. 底層海流分析

各測次底層平面平均流速繪製如圖 3.45a~圖 3.45b 所示，與圖 3.43 與圖 3.44 之表層與中層分析結果比較，顯示底層水流速均小於表層與中層流速，在各潮時並無明顯的流速差異，流向大致多為往西北~東北方向。

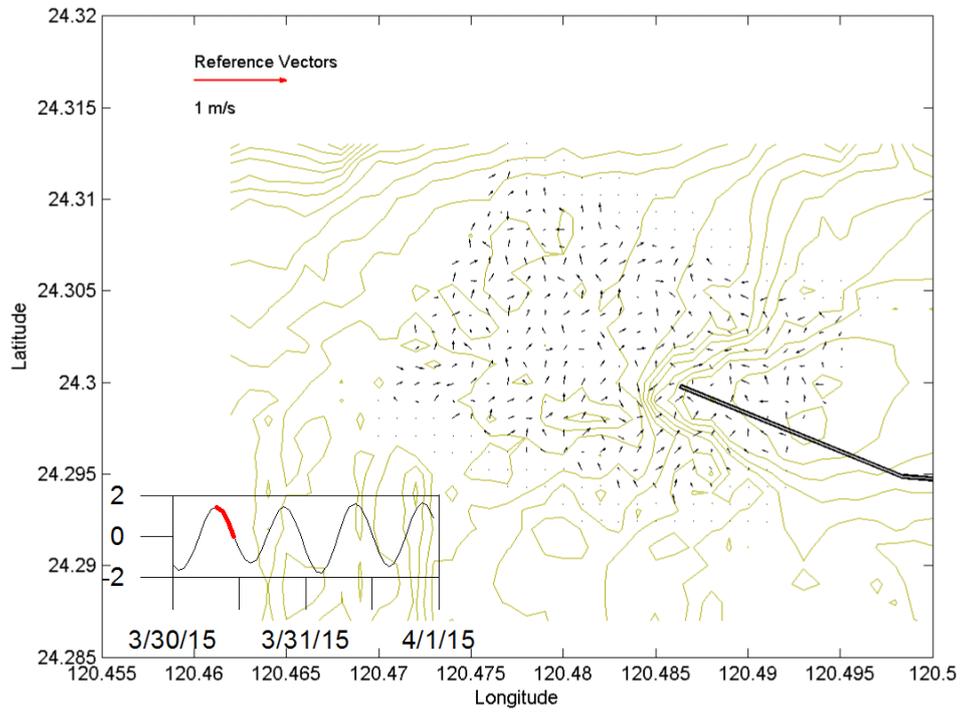


圖 3.45a 滿潮至退潮時段之底層海流分佈圖

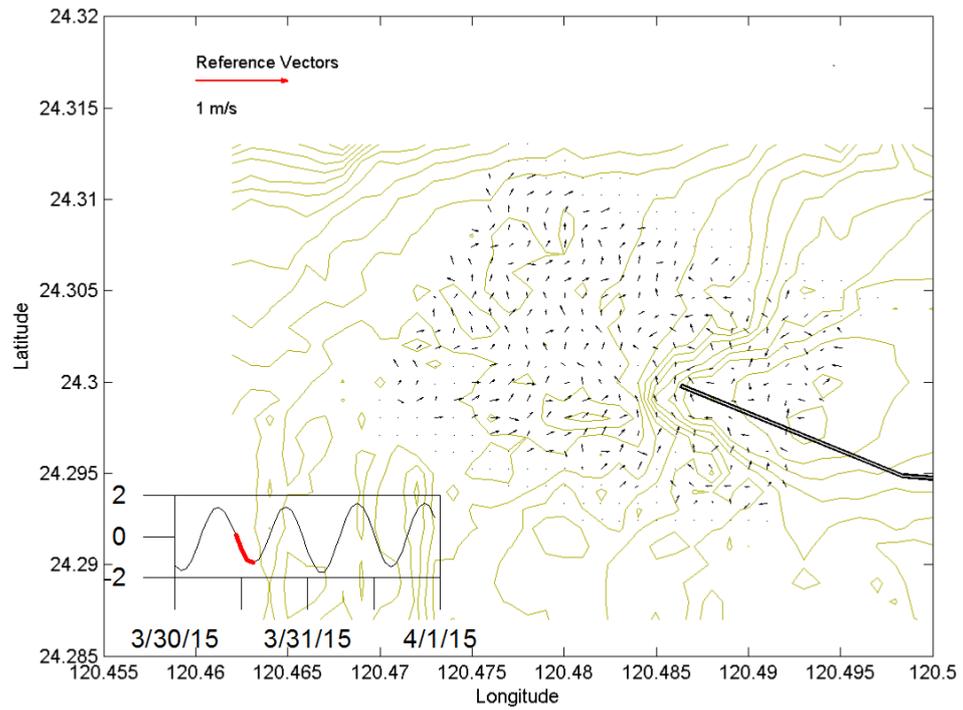


圖 3.45b 退潮至乾潮時段之底層海流分佈圖

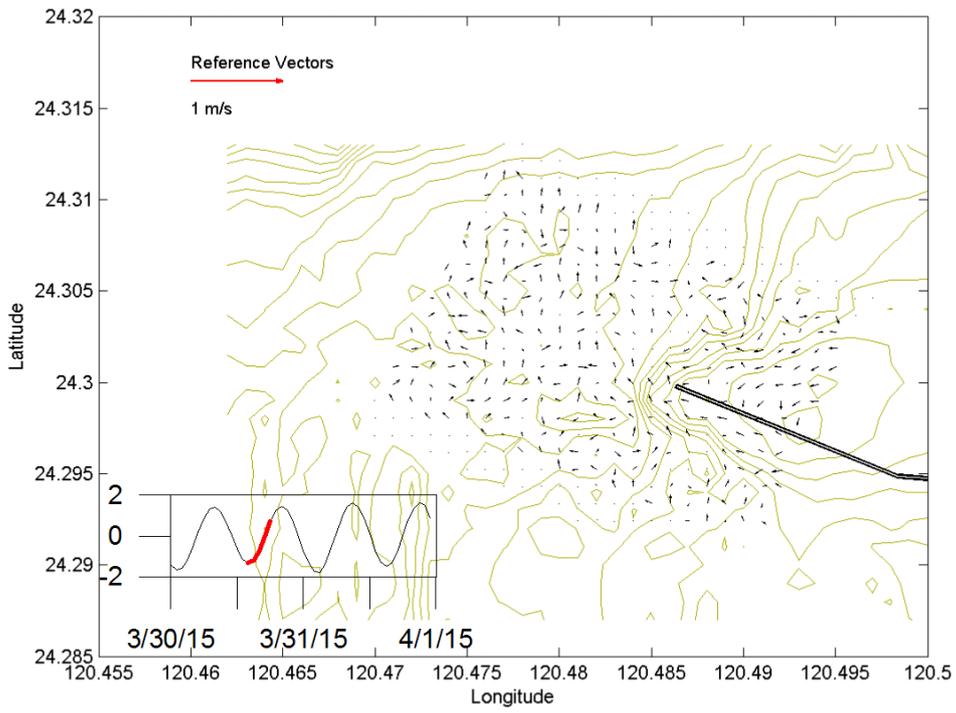


圖 3.45c 乾潮至漲潮時段之底層海流分佈圖

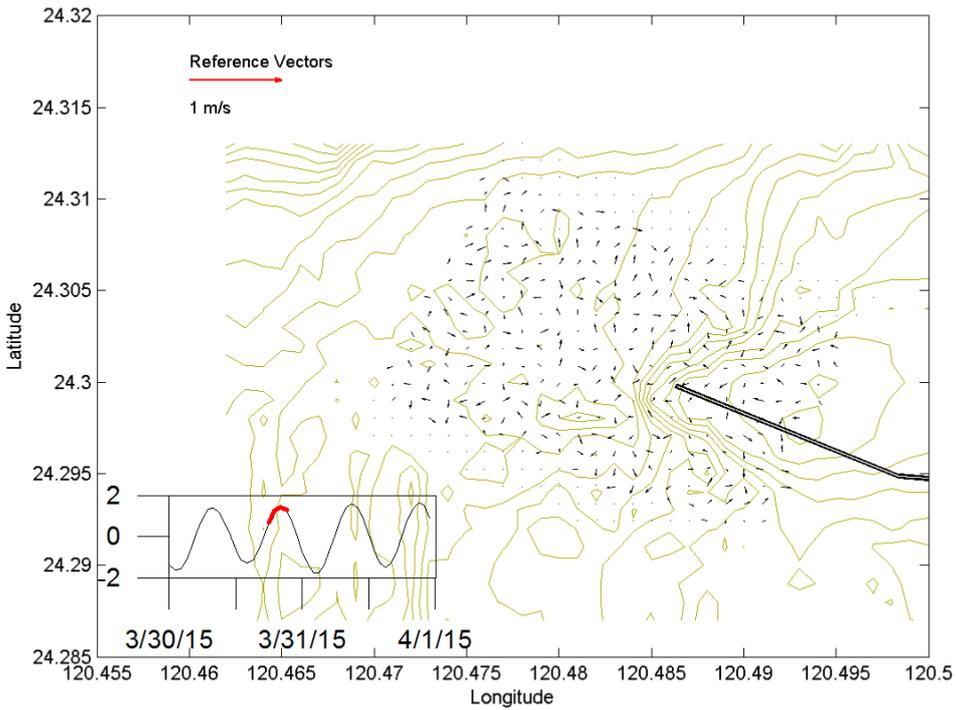


圖 3.45d 漲潮至滿潮時段之底層海流分佈圖

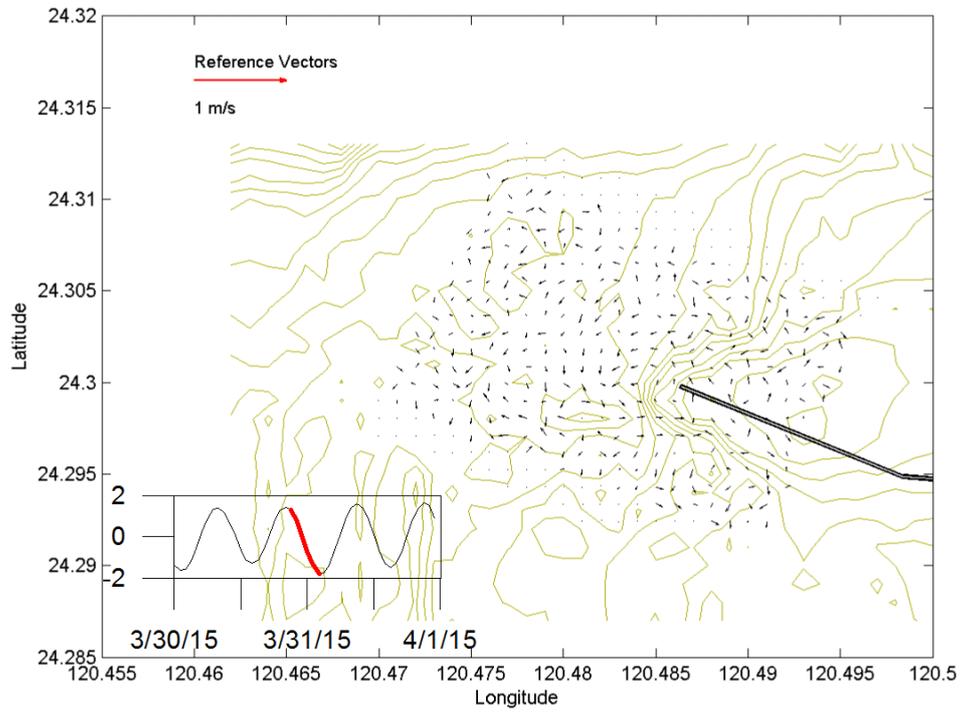


圖 3.45e 退潮時段之底層海流分佈圖

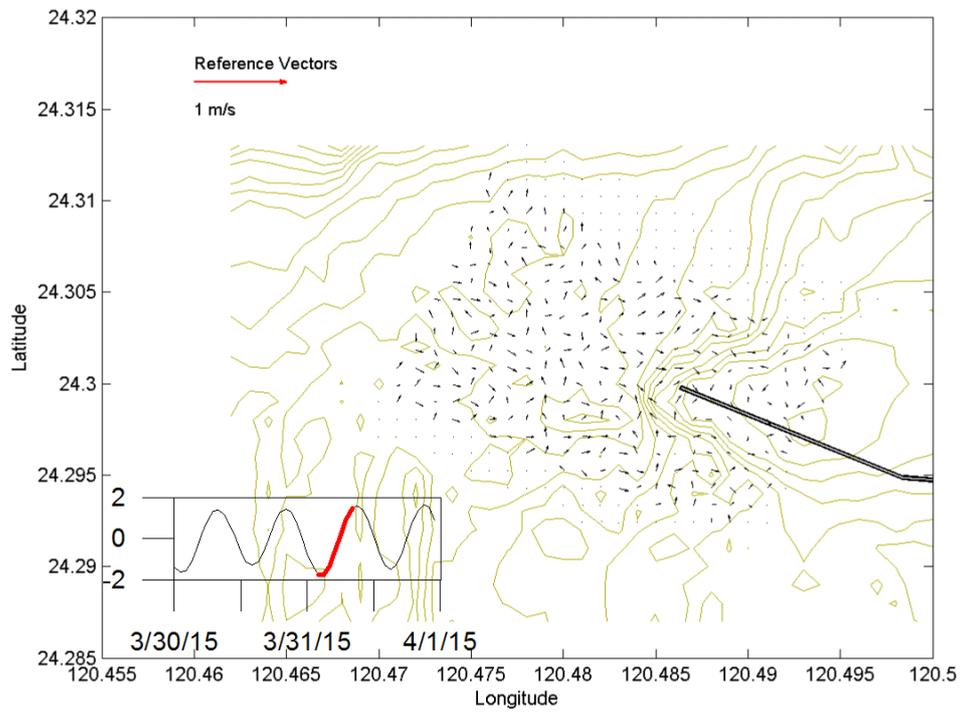


圖 3.45f 漲潮時段之底層海流分佈圖

3. 平均海流分析

依觀測期間(6 測回)之各層平均流速繪製如圖 3.46，圖形顯示在臺中港北防波堤以西之海域，其平均海流流速約在 0.2~0.3m/sec 間，愈北部流速愈大，流向為往北北東~東北之方向前進；而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.1~0.2m/sec，其流向為沿北防波堤往西方向前進；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。值得注意在堤頭延伸約 200 公尺處，流速較大，其可能是造成堤頭沖刷洞的原因。

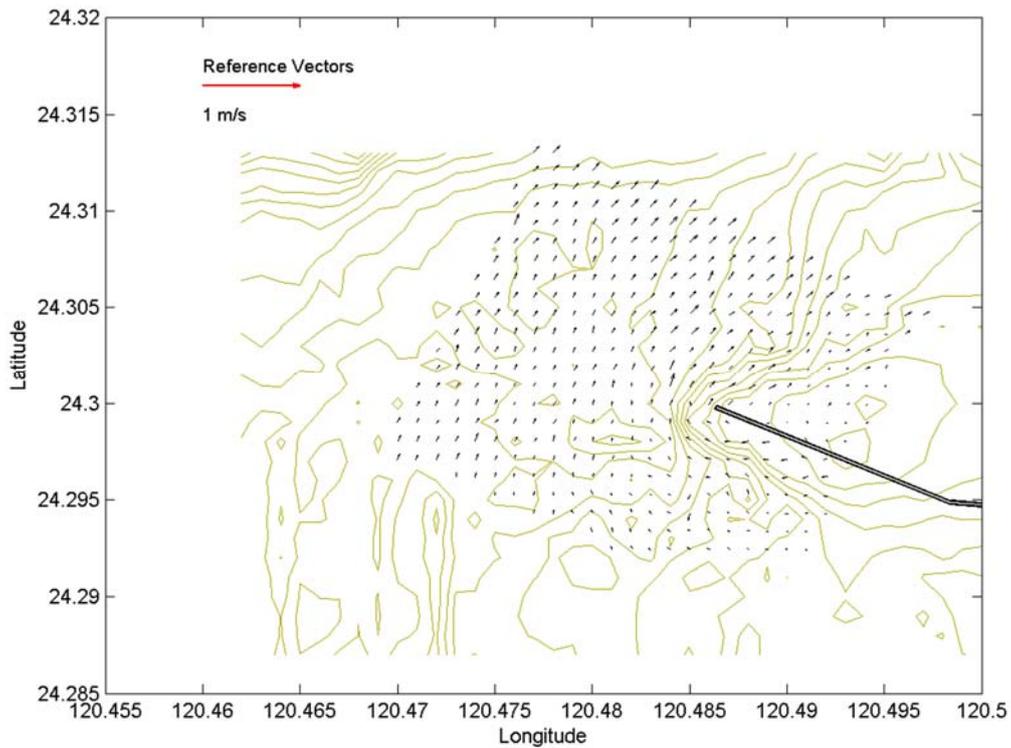


圖 3.46 海流平均流速分佈圖

4. 海流橢圓分析

為進行船碇 ADCP 海流潮流橢圓分析，以各測回海流分析之資料，依 200 公尺 × 200 公尺之格網（如圖 3.47），計算其東-西向與南-北向之平均流速後，再進行潮流調和分析。其中，全日潮與半日潮之潮流橢圓之分析方法，係採海流的複式迴歸調和分析法，其中海流之(U,V)分量可以式(3.1)表示。

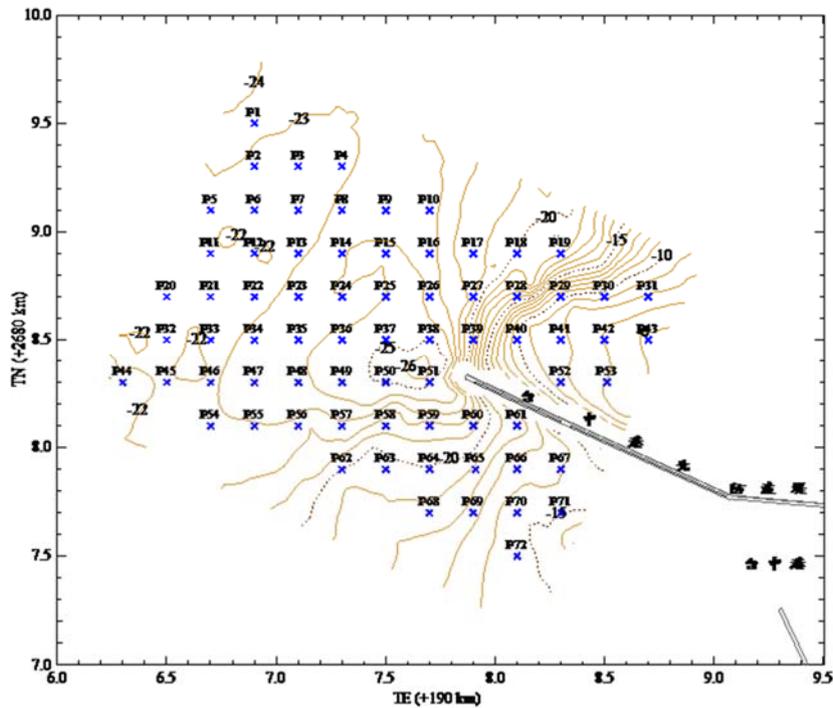


圖 3.47 橢圓分析格點位置圖

$$u = u_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_5 x_3 + b_6 x_4 + u_\varepsilon \quad (3.1a)$$

$$v = v_0 + b_3 x_1 + b_4 x_2 + b_7 x_3 + b_8 x_4 + v_\varepsilon \quad (3.1b)$$

式中 (u_0, v_0) 分別為東-西向與南-北向之平均流速， b_i 為海流天文分潮振幅係數， $(u_\varepsilon, v_\varepsilon)$ 分別為東-西向與南-北向之流速殘值， x_i 為海流天文分潮正弦與餘弦函數，分別以下式表示

$$x_1 = \cos(2\pi t/T_1) \quad (3.2a)$$

$$x_2 = \sin(2\pi t/T_1) \quad (3.2b)$$

$$x_3 = \cos(2\pi t/T_2) \quad (3.2c)$$

$$x_4 = \sin(2\pi t/T_2) \quad (3.2d)$$

式中 t 為時間， T_1 與 T_2 分別為全日潮與半日潮週期，本研究於海流空間流場分析時分別採 25 與 12.5 小時。另由最小二乘法可求解海流分潮振幅係數(b_i)後，全日潮與半日潮之潮流橢圓參數則可分別由式(3.3)與式(3.4)求解。

全日潮：

$$A_1 = \frac{1}{2}[(b_1 + b_4)^2 + (b_3 - b_2)^2]^{1/2} \quad (3.3a)$$

$$C_1 = \frac{1}{2}[(b_4 - b_1)^2 + (b_3 + b_2)^2]^{1/2} \quad (3.3b)$$

$$\tan \theta_1 = \left(\frac{b_3 + b_2}{b_4 - b_1}\right) \quad (3.3c)$$

$$\tan \phi_1 = \left(\frac{b_3 - b_2}{b_4 + b_1}\right) \quad (3.3d)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}(\phi_1 - \theta_1) \quad (3.3e)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{2}(\phi_1 + \theta_1) \quad (3.3f)$$

半日潮：

$$A_2 = \frac{1}{2}[(b_5 + b_8)^2 + (b_6 - b_7)^2]^{1/2} \quad (3.4a)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}[(b_8 - b_5)^2 + (b_7 + b_6)^2]^{1/2} \quad (3.4b)$$

$$\tan \theta_2 = \left(\frac{b_7 + b_6}{b_8 - b_5} \right) \quad (3.4c)$$

$$\tan \phi_2 = \left(\frac{b_7 - b_6}{b_8 + b_5} \right) \quad (3.4d)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}(\phi_2 - \theta_2) \quad (3.4e)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2}(\phi_2 + \theta_2) \quad (3.4f)$$

其中 $|A_1 + C_1|$ 、 $|A_2 + C_2|$ 分別為全日潮與半日潮潮流橢圓主軸半徑， $|A_1 - C_1|$ 、 $|A_2 - C_2|$ 為全日潮與半日潮潮流橢圓次軸半徑， α_1 、 α_2 為主軸方向， β_1 、 β_2 為相位角。

船碇 ADCP 表層、中層及底層的海流資料，分別經潮流橢圓分析後，將半日潮、全日潮潮流橢圓參數資料整理於表 3-2，並將半日潮、全日潮潮流橢圓軌跡繪製如圖 3.48a～圖 3.48f 所示。

由潮流橢圓分析結果顯示，在表層部分，觀測區域半日潮之長軸分佈在 0.054～0.223m/sec，平均約 0.153m/sec，短軸分佈在 0.001～0.063m/sec，平均約 0.024m/sec，其軌跡旋轉大致以順時針為主。全日潮之長軸分佈在 0.008～0.064m/sec，平均約 0.033m/sec，短軸分佈在 0.001～0.017m/sec，平均約 0.005m/sec，其旋轉軌跡以順時針為主。

在中層部分，半日潮之長軸分佈在 0.065～0.273m/sec，平均約 0.184m/sec，短軸分佈在 0.001～0.08m/sec，平均約 0.029m/sec，其軌跡旋轉大致以順時針為主。全日潮之長軸分佈在 0.01～0.079m/sec，平均約 0.04m/sec，短軸分佈在小於 0.001～0.027m/sec，平均約 0.007m/sec，旋轉軌跡亦以順時針為主。

而在底層部分，半日潮之長軸分佈在 0.014～0.109m/sec，平均

約 0.044m/sec，短軸分佈在 0.001~0.041m/sec，平均約 0.012m/sec，其軌跡旋轉大致以順時針為主。全日潮之長軸分佈在 0.014~0.082m/sec，平均約 0.051m/sec，短軸分佈在小於 0.001~0.046m/sec，平均約 0.015m/sec，其旋轉軌跡仍以順時針為主。

在表層及中層的分析結果中，由半日潮與全日潮之長軸比較顯示，半日潮長軸明顯大於全日潮，表示觀測區域之潮流特性以半日潮特徵為主。而在底層的結果中，因為海底地形的影響，沒有半日潮長軸明顯大於全日潮長軸的現象。

利用短軸相對於長軸比值可以瞭解潮流橢圓扁平程度，分析結果顯示，表層、中層及底層皆是半日潮潮流橢圓比全日潮潮流橢圓扁平。而表層及中層潮流橢圓扁平程度相當，且均較底層扁平。在潮流橢圓主軸向方面，整體而言，全日潮主軸向約呈東-西或東北東-西南西方向。半日潮主軸向多呈東北-西南方向的趨勢，M2 分潮軸向為東北-西南方向相似。表層、中層及底層的潮流橢圓，不論半日潮或全日潮，整體上呈現表層、中層較相似，而底層相對較獨特。主要原因可能因底層最接近海底，受海底地形變化影響，使得底層流速資料在海面下的深度是不統一的，因此底層的趨勢有時會與表層及中層較不一致。

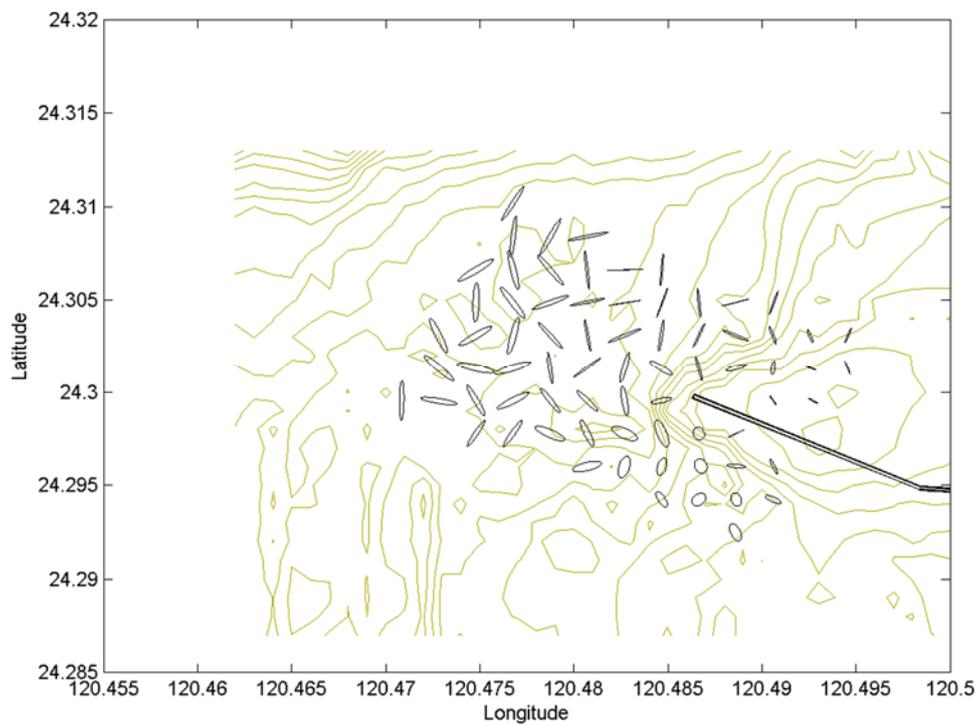


圖 3.48a 半日潮潮流橢圓(表層)軌跡圖

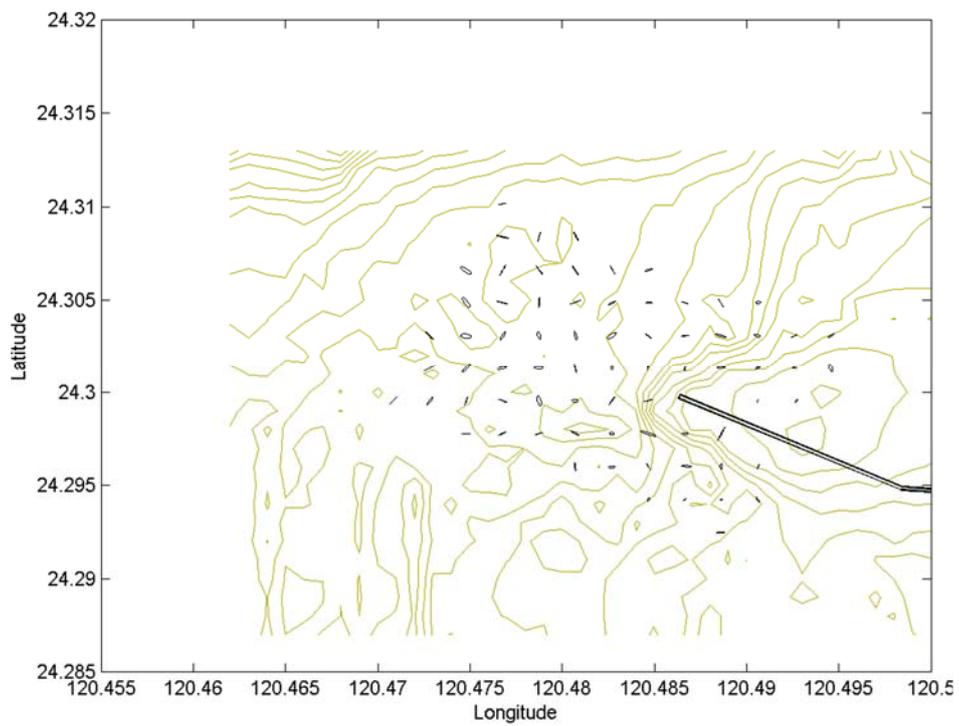


圖 3.48b 全日潮潮流橢圓(表層)軌跡圖

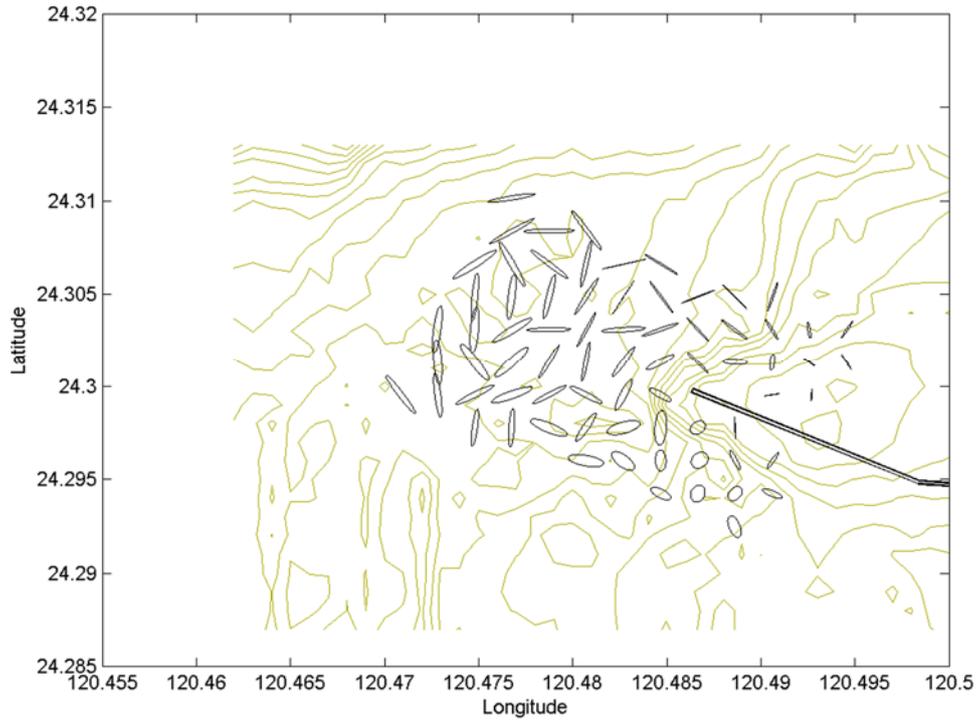


圖 3.48c 半日潮潮流橢圓(中層)圖

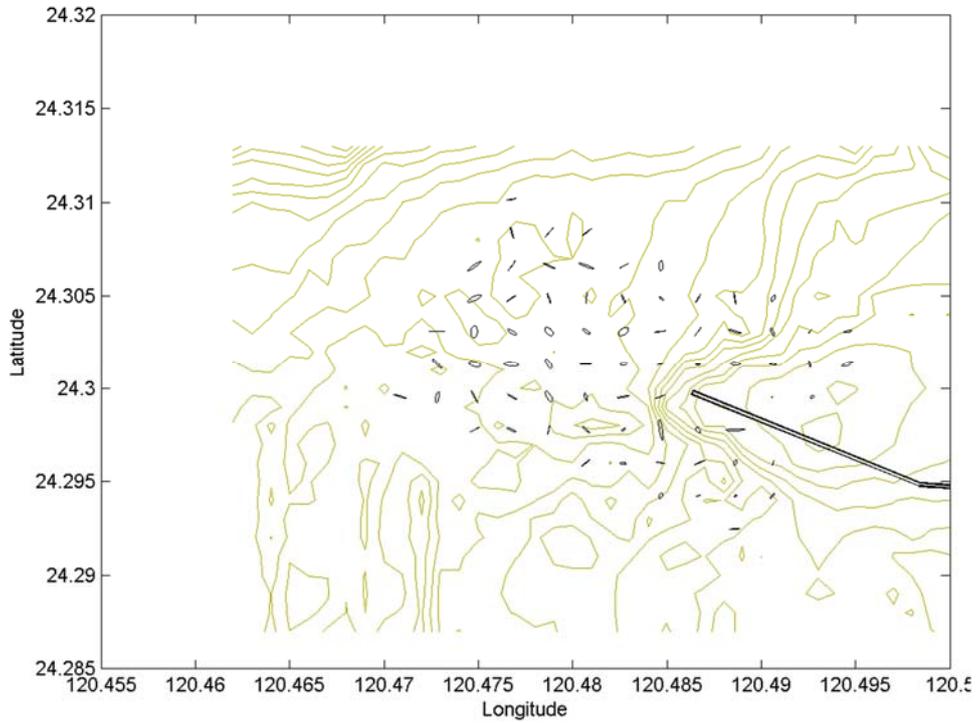


圖 3.48d 全日潮潮流橢圓(中層)圖

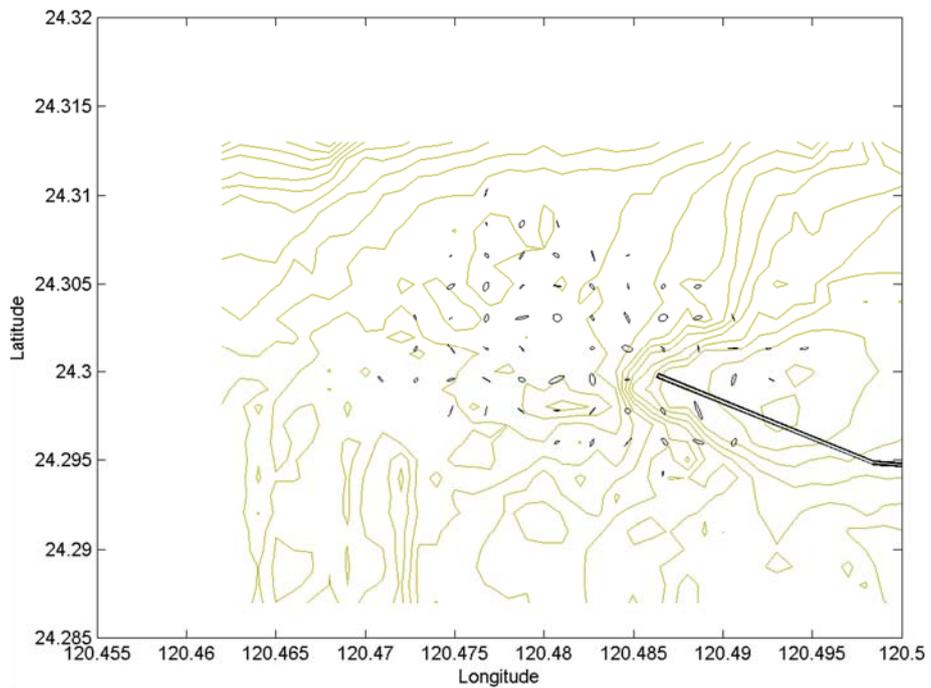


圖 3.48e 半日潮潮流橢圓(底層)圖

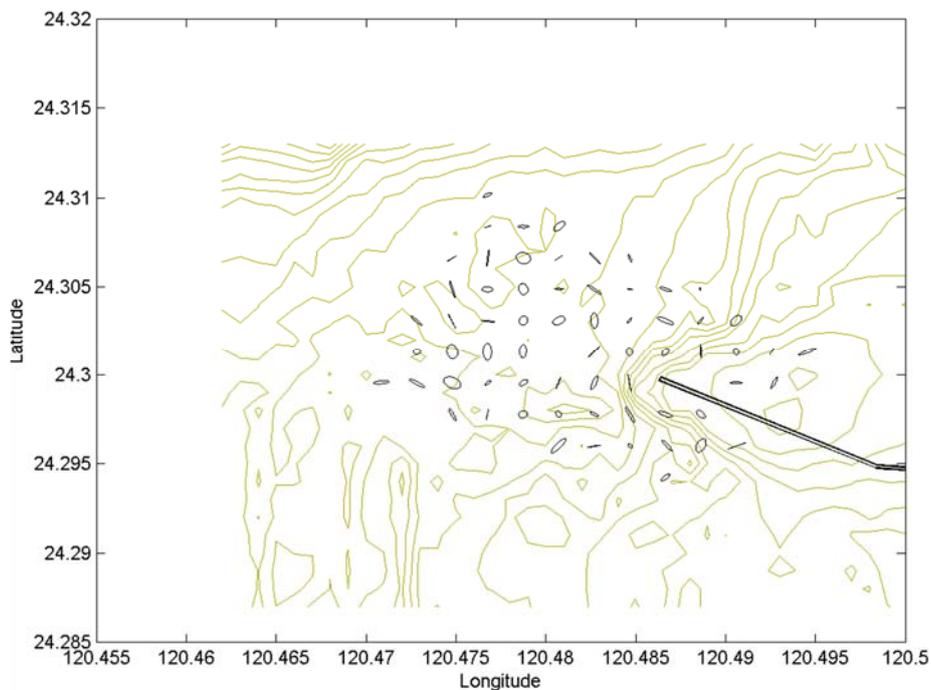


圖 3.48f 全日潮潮流橢圓(底層)圖

表 3-2 表層半日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.217	0.020	136.1	145.3	順時針
P2	0.223	0.022	136.5	142.7	順時針
P3	0.220	0.023	136.1	140.2	順時針
P4	0.218	0.015	132.1	137.8	順時針
P5	0.223	0.033	135.6	139.7	順時針
P6	0.219	0.028	136.9	141.3	順時針
P7	0.211	0.023	137.4	140.6	順時針
P8	0.204	0.011	133.6	138.7	順時針
P9	0.188	0.002	132.0	142.7	逆時針
P10	0.169	0.008	130.3	142.5	逆時針
P11	0.209	0.032	-39.3	320.0	順時針
P12	0.209	0.030	140.5	141.3	順時針
P13	0.204	0.024	138.6	141.2	順時針
P14	0.189	0.013	135.3	141.9	順時針
P15	0.169	0.002	135.2	149.0	順時針
P16	0.165	0.005	126.9	146.3	順時針
P17	0.155	0.009	121.1	133.6	逆時針
P18	0.145	0.000	113.4	139.7	順時針
P19	0.134	0.008	114.3	146.3	逆時針
P20	0.207	0.033	-38.8	318.6	順時針
P21	0.200	0.034	-34.0	320.2	順時針
P22	0.204	0.033	-36.4	320.9	順時針
P23	0.187	0.017	140.5	144.3	順時針
P24	0.170	0.010	140.0	147.5	順時針
P25	0.191	0.015	135.5	146.0	順時針
P26	0.168	0.014	130.2	146.3	順時針
P27	0.139	0.009	114.2	151.3	逆時針
P28	0.145	0.010	109.6	149.2	逆時針
P29	0.105	0.010	115.0	149.9	逆時針
P30	0.073	0.011	102.5	144.0	順時針
P31	0.086	0.008	89.1	145.6	順時針
P32	0.209	0.031	-38.4	319.2	順時針
P33	0.203	0.033	-34.8	320.0	順時針
P34	0.199	0.034	-34.3	322.0	順時針
P35	0.173	0.016	143.1	144.8	順時針
P36	0.176	0.013	-37.1	321.9	順時針

表 3-2 表層半日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.169	0.024	139.5	142.6	順時針
P38	0.140	0.026	134.5	152.1	順時針
P39	0.133	0.010	118.1	153.3	順時針
P40	0.111	0.023	91.4	173.5	逆時針
P41	0.075	0.019	89.4	171.4	逆時針
P42	0.056	0.002	84.4	153.7	順時針
P43	0.079	0.002	80.5	163.0	逆時針
P44	0.212	0.024	-39.3	320.7	順時針
P45	0.194	0.026	141.2	142.6	順時針
P46	0.188	0.027	-35.6	324.1	順時針
P47	0.189	0.034	-34.1	320.2	順時針
P48	0.166	0.023	-35.4	321.8	順時針
P49	0.158	0.022	-38.5	321.3	順時針
P50	0.159	0.028	-20.3	334.4	順時針
P51	0.110	0.026	169.8	170.8	順時針
P52	0.063	0.003	65.0	212.9	逆時針
P53	0.054	0.003	59.2	219.2	逆時針
P54	0.169	0.022	142.4	146.6	順時針
P55	0.173	0.025	-36.7	320.1	順時針
P56	0.172	0.041	-35.0	316.2	順時針
P57	0.156	0.032	-32.5	318.8	順時針
P58	0.148	0.051	-22.4	325.0	順時針
P59	0.154	0.049	-4.3	342.3	順時針
P60	0.073	0.056	-98.5	229.9	順時針
P61	0.093	0.003	60.1	77.1	順時針
P62	0.159	0.045	-28.1	316.0	順時針
P63	0.120	0.056	-23.9	326.2	順時針
P64	0.097	0.047	-39.6	301.3	順時針
P65	0.082	0.063	-107.9	245.7	順時針
P66	0.098	0.018	-97.5	254.9	順時針
P67	0.088	0.014	80.6	93.2	順時針
P68	0.097	0.036	-29.2	320.2	順時針
P69	0.079	0.060	-65.3	287.9	順時針
P70	0.075	0.053	-89.1	265.0	順時針
P71	0.092	0.025	-88.4	264.0	順時針
P72	0.101	0.050	-60.8	289.0	順時針

表 3-3 表層全日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.217	0.020	136.1	145.3	順時針
P2	0.223	0.022	136.5	142.7	順時針
P3	0.220	0.023	136.1	140.2	順時針
P4	0.218	0.015	132.1	137.8	順時針
P5	0.223	0.033	135.6	139.7	順時針
P6	0.219	0.028	136.9	141.3	順時針
P7	0.211	0.023	137.4	140.6	順時針
P8	0.204	0.011	133.6	138.7	順時針
P9	0.188	0.002	132.0	142.7	逆時針
P10	0.169	0.008	130.3	142.5	逆時針
P11	0.209	0.032	-39.3	320.0	順時針
P12	0.209	0.030	140.5	141.3	順時針
P13	0.204	0.024	138.6	141.2	順時針
P14	0.189	0.013	135.3	141.9	順時針
P15	0.169	0.002	135.2	149.0	順時針
P16	0.165	0.005	126.9	146.3	順時針
P17	0.155	0.009	121.1	133.6	逆時針
P18	0.145	0.000	113.4	139.7	順時針
P19	0.134	0.008	114.3	146.3	逆時針
P20	0.207	0.033	-38.8	318.6	順時針
P21	0.200	0.034	-34.0	320.2	順時針
P22	0.204	0.033	-36.4	320.9	順時針
P23	0.187	0.017	140.5	144.3	順時針
P24	0.170	0.010	140.0	147.5	順時針
P25	0.191	0.015	135.5	146.0	順時針
P26	0.168	0.014	130.2	146.3	順時針
P27	0.139	0.009	114.2	151.3	逆時針
P28	0.145	0.010	109.6	149.2	逆時針
P29	0.105	0.010	115.0	149.9	逆時針
P30	0.073	0.011	102.5	144.0	順時針
P31	0.086	0.008	89.1	145.6	順時針
P32	0.209	0.031	-38.4	319.2	順時針
P33	0.203	0.033	-34.8	320.0	順時針
P34	0.199	0.034	-34.3	322.0	順時針
P35	0.173	0.016	143.1	144.8	順時針
P36	0.176	0.013	-37.1	321.9	順時針

表 3-3 表層全日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.169	0.024	139.5	142.6	順時針
P38	0.140	0.026	134.5	152.1	順時針
P39	0.133	0.010	118.1	153.3	順時針
P40	0.111	0.023	91.4	173.5	逆時針
P41	0.075	0.019	89.4	171.4	逆時針
P42	0.056	0.002	84.4	153.7	順時針
P43	0.079	0.002	80.5	163.0	逆時針
P44	0.212	0.024	-39.3	320.7	順時針
P45	0.194	0.026	141.2	142.6	順時針
P46	0.188	0.027	-35.6	324.1	順時針
P47	0.189	0.034	-34.1	320.2	順時針
P48	0.166	0.023	-35.4	321.8	順時針
P49	0.158	0.022	-38.5	321.3	順時針
P50	0.159	0.028	-20.3	334.4	順時針
P51	0.110	0.026	169.8	170.8	順時針
P52	0.063	0.003	65.0	212.9	逆時針
P53	0.054	0.003	59.2	219.2	逆時針
P54	0.169	0.022	142.4	146.6	順時針
P55	0.173	0.025	-36.7	320.1	順時針
P56	0.172	0.041	-35.0	316.2	順時針
P57	0.156	0.032	-32.5	318.8	順時針
P58	0.148	0.051	-22.4	325.0	順時針
P59	0.154	0.049	-4.3	342.3	順時針
P60	0.073	0.056	-98.5	229.9	順時針
P61	0.093	0.003	60.1	77.1	順時針
P62	0.159	0.045	-28.1	316.0	順時針
P63	0.120	0.056	-23.9	326.2	順時針
P64	0.097	0.047	-39.6	301.3	順時針
P65	0.082	0.063	-107.9	245.7	順時針
P66	0.098	0.018	-97.5	254.9	順時針
P67	0.088	0.014	80.6	93.2	順時針
P68	0.097	0.036	-29.2	320.2	順時針
P69	0.079	0.060	-65.3	287.9	順時針
P70	0.075	0.053	-89.1	265.0	順時針
P71	0.092	0.025	-88.4	264.0	順時針
P72	0.101	0.050	-60.8	289.0	順時針

表 3-4 中層半日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.254	0.022	135.2	144.6	順時針
P2	0.269	0.023	135.6	144.8	順時針
P3	0.267	0.024	135.1	141.3	順時針
P4	0.265	0.022	134.2	136.4	順時針
P5	0.273	0.037	135.7	140.1	順時針
P6	0.270	0.031	137.2	140.8	順時針
P7	0.246	0.022	137.6	140.5	順時針
P8	0.256	0.022	133.3	139.5	順時針
P9	0.230	0.002	132.2	142.4	順時針
P10	0.206	0.007	131.4	143.6	逆時針
P11	0.254	0.031	-39.4	320.1	順時針
P12	0.245	0.037	139.7	141.0	順時針
P13	0.243	0.030	136.4	139.0	順時針
P14	0.228	0.020	136.1	143.1	順時針
P15	0.207	0.000	136.1	149.1	逆時針
P16	0.204	0.009	127.9	146.5	順時針
P17	0.186	0.006	119.8	132.7	逆時針
P18	0.181	0.000	112.3	140.0	順時針
P19	0.157	0.011	114.3	146.7	逆時針
P20	0.256	0.040	-39.4	318.9	順時針
P21	0.248	0.044	-33.1	320.9	順時針
P22	0.240	0.038	-37.2	321.6	順時針
P23	0.232	0.021	141.4	145.9	順時針
P24	0.207	0.013	139.3	146.9	順時針
P25	0.234	0.025	135.1	145.8	順時針
P26	0.206	0.017	129.1	145.4	順時針
P27	0.168	0.007	115.4	150.1	逆時針
P28	0.172	0.010	109.3	150.0	逆時針
P29	0.126	0.012	115.2	151.6	逆時針
P30	0.086	0.013	102.3	143.7	順時針
P31	0.106	0.009	89.0	145.2	順時針
P32	0.243	0.042	-39.2	318.6	順時針
P33	0.244	0.044	-35.5	319.1	順時針
P34	0.234	0.046	-33.8	322.5	順時針
P35	0.211	0.019	-33.5	324.9	順時針
P36	0.215	0.019	-36.3	321.7	順時針

表 3-4 中層半日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.199	0.026	139.2	140.6	順時針
P38	0.164	0.032	135.6	151.9	順時針
P39	0.160	0.009	118.6	153.4	順時針
P40	0.129	0.029	91.0	176.2	逆時針
P41	0.086	0.024	89.4	171.1	逆時針
P42	0.067	0.002	84.2	152.2	順時針
P43	0.095	0.003	80.7	164.0	逆時針
P44	0.259	0.029	-38.6	320.5	順時針
P45	0.241	0.032	143.1	143.8	順時針
P46	0.225	0.031	-34.1	323.1	順時針
P47	0.233	0.042	-34.2	319.3	順時針
P48	0.204	0.026	-34.1	320.3	順時針
P49	0.193	0.028	-38.2	320.9	順時針
P50	0.189	0.036	-20.9	334.8	順時針
P51	0.134	0.030	169.1	169.6	順時針
P52	0.076	0.003	66.1	213.5	逆時針
P53	0.065	0.004	58.1	218.5	逆時針
P54	0.201	0.028	142.8	145.8	順時針
P55	0.205	0.029	-39.3	319.9	順時針
P56	0.209	0.050	-35.0	317.6	順時針
P57	0.185	0.034	-33.6	319.3	順時針
P58	0.180	0.063	-21.7	325.0	順時針
P59	0.188	0.063	-4.8	342.6	順時針
P60	0.086	0.065	-103.0	224.0	順時針
P61	0.116	0.003	61.3	76.7	順時針
P62	0.192	0.056	-28.5	316.2	順時針
P63	0.147	0.062	-22.6	325.4	順時針
P64	0.115	0.056	-39.2	301.3	順時針
P65	0.096	0.080	-115.5	239.4	順時針
P66	0.118	0.021	-98.5	254.5	順時針
P67	0.104	0.017	79.5	93.0	順時針
P68	0.117	0.045	-28.8	322.2	順時針
P69	0.093	0.074	-58.4	294.5	順時針
P70	0.084	0.064	-90.2	264.5	順時針
P71	0.113	0.029	-88.4	264.3	順時針
P72	0.124	0.057	-64.0	286.0	順時針

表 3-5 中層全日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.037	0.004	-34.4	220.7	順時針
P2	0.047	0.003	-51.5	211.8	順時針
P3	0.050	0.001	-33.7	215.7	順時針
P4	0.045	0.005	-30.8	230.8	順時針
P5	0.064	0.011	-33.9	224.4	順時針
P6	0.048	0.002	-43.0	217.4	順時針
P7	0.051	0.004	-47.6	217.4	順時針
P8	0.063	0.007	-44.3	225.6	順時針
P9	0.037	0.002	-40.4	227.1	順時針
P10	0.040	0.014	-64.4	247.2	逆時針
P11	0.058	0.018	-18.4	218.0	順時針
P12	0.040	0.005	-37.1	226.4	順時針
P13	0.044	0.003	-32.6	221.5	順時針
P14	0.046	0.001	-20.5	230.0	順時針
P15	0.042	0.005	-35.7	224.6	逆時針
P16	0.023	0.004	-47.8	220.4	順時針
P17	0.040	0.003	-58.7	247.1	逆時針
P18	0.047	0.002	-61.1	258.2	順時針
P19	0.029	0.011	-46.0	240.3	逆時針
P20	0.062	0.001	-22.0	219.9	順時針
P21	0.047	0.025	-26.8	234.3	順時針
P22	0.043	0.010	-28.8	217.4	順時針
P23	0.043	0.020	-29.1	212.0	順時針
P24	0.036	0.008	-6.9	232.8	順時針
P25	0.043	0.027	-18.3	217.8	順時針
P26	0.042	0.002	-47.0	248.9	順時針
P27	0.042	0.001	-58.8	248.8	逆時針
P28	0.050	0.005	-66.3	244.8	逆時針
P29	0.036	0.009	-45.2	225.5	逆時針
P30	0.025	0.000	-55.6	258.2	順時針
P31	0.034	0.007	-78.4	265.0	順時針
P32	0.057	0.005	-22.8	222.0	順時針
P33	0.049	0.018	-25.5	224.6	順時針
P34	0.058	0.016	-12.7	210.9	順時針
P35	0.046	0.014	-16.7	207.9	順時針
P36	0.048	0.004	-6.3	225.2	順時針

表 3-5 中層全日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.030	0.013	-50.3	257.5	順時針
P38	0.025	0.003	-59.5	196.8	順時針
P39	0.015	0.004	81.7	168.1	順時針
P40	0.038	0.012	-100.7	119.5	逆時針
P41	0.025	0.006	-56.8	196.1	逆時針
P42	0.024	0.004	-70.5	222.4	順時針
P43	0.043	0.013	69.5	90.3	逆時針
P44	0.052	0.004	-19.2	227.2	順時針
P45	0.046	0.012	-8.0	216.6	順時針
P46	0.055	0.003	-4.2	219.9	順時針
P47	0.041	0.003	-22.5	229.3	順時針
P48	0.050	0.017	-10.4	218.9	順時針
P49	0.037	0.008	-64.1	260.8	順時針
P50	0.048	0.005	-31.2	251.3	順時針
P51	0.040	0.003	-5.9	194.7	順時針
P52	0.011	0.002	41.6	241.2	逆時針
P53	0.015	0.011	-75.2	157.0	逆時針
P54	0.042	0.000	19.3	230.4	順時針
P55	0.038	0.005	5.8	240.9	順時針
P56	0.037	0.001	-14.3	230.0	順時針
P57	0.039	0.003	-7.0	200.1	順時針
P58	0.015	0.010	-2.6	255.0	順時針
P59	0.079	0.013	11.2	201.2	順時針
P60	0.029	0.012	17.9	238.9	順時針
P61	0.075	0.007	72.3	183.0	順時針
P62	0.044	0.005	3.8	219.6	順時針
P63	0.028	0.009	68.9	226.2	順時針
P64	0.033	0.001	-12.8	275.6	順時針
P65	0.046	0.003	41.3	229.4	順時針
P66	0.025	0.010	4.5	289.6	順時針
P67	0.022	0.002	104.9	173.0	順時針
P68	0.021	0.015	82.9	164.7	順時針
P69	0.016	0.000	60.0	207.7	順時針
P70	0.010	0.007	63.1	205.6	順時針
P71	0.025	0.007	-2.1	242.2	順時針
P72	0.040	0.005	103.7	140.7	順時針

表 3-6 底層半日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.046	0.004	1.2	291.4	順時針
P2	0.022	0.001	45.8	205.1	順時針
P3	0.043	0.024	92.3	167.8	順時針
P4	0.044	0.000	23.9	47.4	順時針
P5	0.014	0.004	92.1	152.8	順時針
P6	0.031	0.013	-51.0	288.3	順時針
P7	0.051	0.008	67.1	263.9	順時針
P8	0.042	0.015	103.1	113.5	順時針
P9	0.061	0.004	-79.8	242.7	逆時針
P10	0.017	0.002	15.8	33.0	逆時針
P11	0.046	0.021	-90.6	260.2	順時針
P12	0.052	0.026	-71.1	285.1	順時針
P13	0.027	0.011	94.9	114.2	順時針
P14	0.045	0.005	106.7	112.8	順時針
P15	0.042	0.012	90.3	96.3	順時針
P16	0.032	0.002	96.0	148.9	順時針
P17	0.026	0.019	54.4	160.6	逆時針
P18	0.037	0.019	-40.8	165.1	順時針
P19	0.038	0.010	-44.5	176.9	逆時針
P20	0.033	0.008	8.2	335.0	順時針
P21	0.015	0.002	-46.5	149.3	順時針
P22	0.043	0.021	73.7	145.4	順時針
P23	0.076	0.013	107.0	223.5	順時針
P24	0.048	0.041	90.5	97.4	順時針
P25	0.035	0.012	42.9	137.1	順時針
P26	0.064	0.010	-60.8	295.3	順時針
P27	0.049	0.038	94.6	189.1	逆時針
P28	0.047	0.019	78.8	151.7	逆時針
P29	0.040	0.001	-48.3	188.7	逆時針
P30	0.036	0.006	-13.1	192.6	順時針
P31	0.042	0.010	48.5	161.8	順時針
P32	0.034	0.013	64.1	291.8	順時針
P33	0.064	0.002	24.2	248.8	順時針
P34	0.041	0.004	-3.8	236.0	順時針
P35	0.048	0.004	131.0	140.3	順時針
P36	0.052	0.023	32.6	179.9	順時針

表 3-6 底層半日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.027	0.019	-110.2	223.2	順時針
P38	0.063	0.035	90.6	101.6	順時針
P39	0.043	0.009	-4.1	164.6	順時針
P40	0.046	0.004	83.4	180.7	逆時針
P41	0.056	0.004	-94.2	243.8	逆時針
P42	0.032	0.011	22.1	196.4	順時針
P43	0.048	0.014	110.2	131.0	逆時針
P44	0.041	0.006	115.4	130.3	順時針
P45	0.028	0.014	20.1	72.0	順時針
P46	0.045	0.012	107.1	159.4	順時針
P47	0.054	0.000	68.6	166.3	順時針
P48	0.043	0.020	106.4	235.4	順時針
P49	0.087	0.029	19.3	258.8	順時針
P50	0.067	0.030	-67.3	286.9	順時針
P51	0.026	0.008	122.5	170.0	順時針
P52	0.066	0.018	67.3	138.9	逆時針
P53	0.034	0.001	65.5	232.4	逆時針
P54	0.060	0.000	20.0	269.1	順時針
P55	0.051	0.001	76.8	86.0	順時針
P56	0.043	0.000	68.4	198.8	順時針
P57	0.036	0.001	22.0	166.6	順時針
P58	0.046	0.008	48.1	302.5	順時針
P59	0.035	0.027	-76.2	144.0	順時針
P60	0.045	0.014	-76.4	247.5	順時針
P61	0.109	0.014	-67.2	236.9	順時針
P62	0.031	0.017	82.0	111.8	順時針
P63	0.045	0.013	-8.3	28.9	順時針
P64	0.057	0.003	51.1	64.5	順時針
P65	0.050	0.018	-85.7	225.3	順時針
P66	0.064	0.016	31.1	47.7	順時針
P67	0.044	0.022	-99.3	158.0	順時針
P68	0.041	0.004	82.8	154.5	順時針
P69	0.025	0.006	114.5	244.5	順時針
P70	0.044	0.011	72.8	146.1	順時針
P71	0.044	0.016	-13.3	152.0	順時針
P72	0.039	0.011	61.7	172.2	順時針

表 3-7 底層全日潮潮流橢圓參數分析表

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P1	0.040	0.013	-24.9	287.4	順時針
P2	0.028	0.001	141.7	145.7	順時針
P3	0.045	0.011	72.2	80.0	順時針
P4	0.053	0.029	-96.7	202.5	順時針
P5	0.041	0.001	-2.6	268.5	順時針
P6	0.069	0.005	-17.4	294.0	順時針
P7	0.061	0.046	-19.1	243.7	順時針
P8	0.036	0.003	-46.5	287.1	順時針
P9	0.063	0.003	84.0	100.9	逆時針
P10	0.033	0.006	-92.2	241.7	逆時針
P11	0.074	0.005	-20.1	253.6	順時針
P12	0.047	0.021	-3.3	249.2	順時針
P13	0.048	0.037	121.3	121.7	順時針
P14	0.039	0.005	-15.7	326.2	順時針
P15	0.072	0.007	-41.4	291.9	順時針
P16	0.022	0.002	106.6	177.0	順時針
P17	0.053	0.010	-19.2	127.2	逆時針
P18	0.014	0.006	83.8	158.0	順時針
P19	0.034	0.020	80.0	173.2	逆時針
P20	0.063	0.007	8.7	311.7	順時針
P21	0.064	0.001	77.4	224.7	順時針
P22	0.054	0.004	50.1	184.8	順時針
P23	0.038	0.035	70.5	223.2	順時針
P24	0.053	0.032	-15.3	228.6	順時針
P25	0.064	0.029	133.6	149.8	順時針
P26	0.026	0.008	107.7	189.8	順時針
P27	0.077	0.015	-138.6	139.3	逆時針
P28	0.037	0.008	66.9	215.0	逆時針
P29	0.054	0.034	76.1	188.4	逆時針
P30	0.041	0.018	13.4	128.2	順時針
P31	0.058	0.015	65.0	154.6	順時針
P32	0.031	0.023	-12.7	285.1	順時針
P33	0.063	0.044	11.3	223.4	順時針
P34	0.074	0.035	108.4	158.0	順時針
P35	0.058	0.028	-39.3	311.5	順時針
P36	0.057	0.016	-15.5	295.7	順時針

表 3-7 底層全日潮潮流橢圓參數分析表(續)

點位編號	長軸振幅(m/s)	短軸振幅(m/s)	主軸向	位相	橢圓流向
P37	0.068	0.000	-5.5	320.1	順時針
P38	0.036	0.026	36.5	198.5	順時針
P39	0.037	0.023	135.9	145.8	順時針
P40	0.057	0.005	-61.2	111.2	逆時針
P41	0.031	0.022	8.4	191.2	逆時針
P42	0.028	0.002	-49.3	68.0	順時針
P43	0.076	0.012	116.6	180.9	逆時針
P44	0.064	0.013	-50.2	283.7	順時針
P45	0.072	0.011	100.0	172.7	順時針
P46	0.076	0.043	71.8	132.7	順時針
P47	0.032	0.013	0.5	253.0	順時針
P48	0.037	0.021	-21.5	307.1	順時針
P49	0.050	0.003	-2.0	322.5	順時針
P50	0.061	0.018	45.1	174.8	順時針
P51	0.071	0.000	96.0	212.3	順時針
P52	0.052	0.008	-15.7	25.2	逆時針
P53	0.057	0.011	-27.2	51.2	逆時針
P54	0.058	0.011	-26.2	294.1	順時針
P55	0.044	0.001	92.5	92.9	順時針
P56	0.036	0.031	110.2	119.1	順時針
P57	0.032	0.018	36.7	173.1	順時針
P58	0.044	0.009	103.2	155.6	順時針
P59	0.073	0.012	112.0	190.3	順時針
P60	0.063	0.014	115.9	168.9	順時針
P61	0.045	0.021	118.7	179.4	順時針
P62	0.082	0.023	-30.6	316.5	順時針
P63	0.054	0.003	-40.7	310.5	順時針
P64	0.026	0.012	118.8	146.3	順時針
P65	0.061	0.010	-35.4	295.9	順時針
P66	0.062	0.036	-24.0	306.4	順時針
P67	0.076	0.001	56.9	301.3	順時針
P68	0.035	0.014	143.0	161.5	順時針
P69	0.043	0.017	167.2	176.7	順時針
P70	0.052	0.026	71.6	241.5	順時針
P71	0.064	0.014	64.2	271.4	順時針
P72	0.053	0.021	93.6	232.8	順時針

第四章 波流場模擬分析

本研究應用NearCoM模式(近岸波流場模式)建置臺中港附近之近岸波流模式，以其波流場分析結果再利用COBRAS模式進行波浪受結構物以及地形影響之波場數值模擬。本年度為探討臺中港在各種極端海象條件以及氣象變遷條件作用下，結構物與波流互制作用。首先透過資料收集所得的海氣象資料包含IPCC AR5架構下，依照代表濃度途徑情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下所推估的海氣象資料與過去歷史大波的資料，作為NearCoM模式的輸入條件其中包含50年、100年、200年與250年迴歸週期颱風波浪及受氣候變遷影響之50年、100年、200年與250年迴歸週期颱風波浪，以進行臺中港海域之波流場模擬。IPCC AR5(2013)提出代表濃度途徑來定義受不同情境下之氣候變遷，代表濃度途徑是以輻射作用力在2100年與1750年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。在四種情境中，RCP2.6的情境意味著每平方公尺的輻射作用力在2100年增加了2.6瓦，而RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5則代表每平方公尺的輻射作用力分別增加了4.5、6.0與8.5瓦。最後，依據NearCoM模式模擬結果，選定衝擊影響最大之防波堤結構物，作為COBRAS模式的輸入條件，並進行不同條件狀況下防波堤受力模擬，藉此探討氣候變遷下，臺中港防波堤之受力情形及安全穩定性，研究方法流程圖如圖4.1所示。

4.1 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 et al., 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 and Dalrymple, 1992)、SHORECIRC 近岸流模式(Svendsen, et al., 2003) 和 HH 漂沙模式(Haas et al., 2003)。

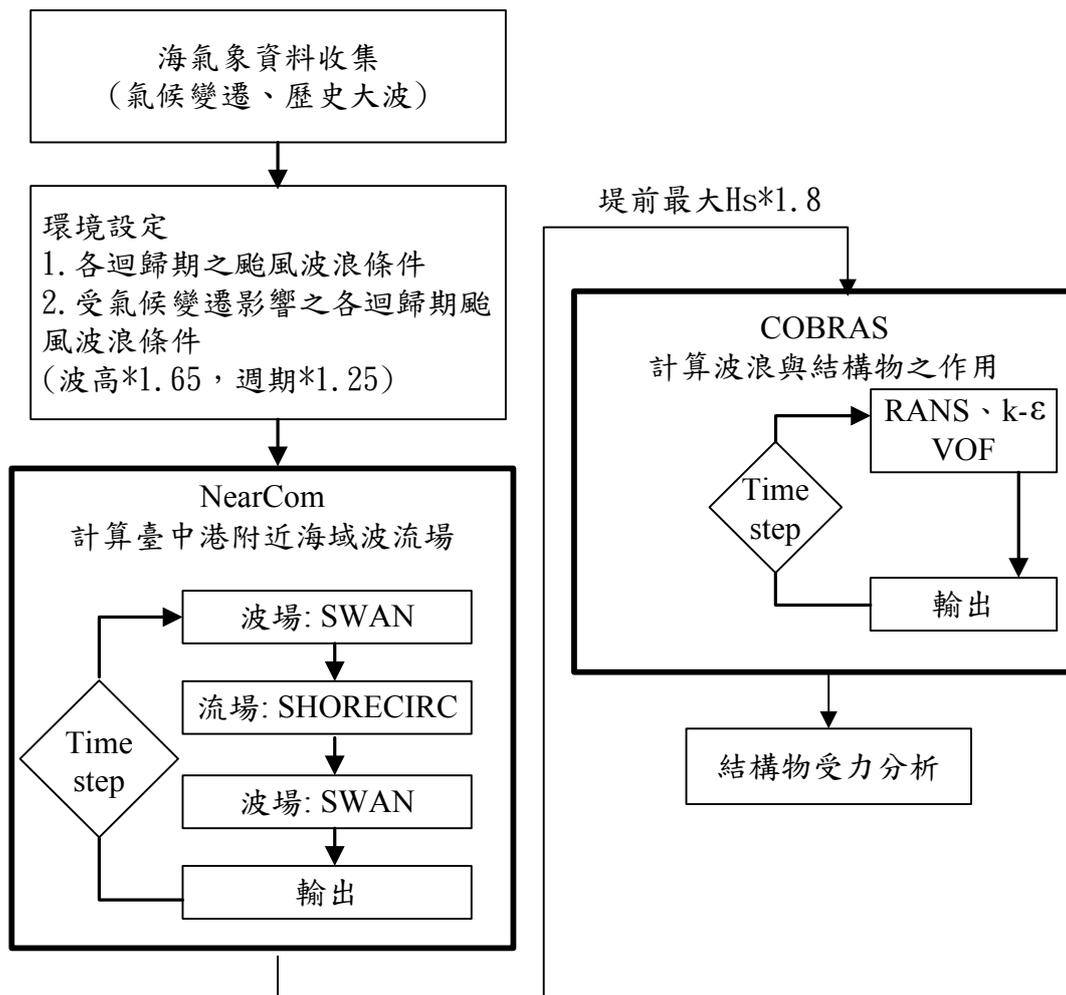


圖 4.1 研究方法流程圖

NearCoM 為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。最近，Shi et al. (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。

在數值計算方面，原始的 SHORECIRC 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。另外發展的曲線座標版 SHORECIRC 則將卡式坐標變換到廣義曲線網格系統(Shi et al., 2003)，並使用 CFL-free 的數值方法提高其計算效率(Shi et al., 2007)。

近年 NearCoM 被廣泛應用於各種沿岸系統，例如河口的波流互制作用、暴潮引起的沿岸溢淹、沙灘和沙丘侵蝕等。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 and Cheng, 1992)。

本研究使用的 SHORECIRC 模式為新版模式，該模式結合有限體積及有限差分的 TVD 法(Toro, 2009) 使用。完全非線性 Boussinesq 模式以 TVD 法求解，在計算碎波與海岸線變遷問題上，已證明 TVD 是一個穩定及有效率的數值方法(Shi et al., 2011a; 2011b; Tehranirad et al., 2011; Kirby et al., 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 and Petti, 2009; Roeber et al., 2010; Shiach and Mingham, 2009; Erduran et al., 2005)。

4.1.1 SHORECIRC 方程式

SHORECIRC 為似三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu and 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(4.1.1)：

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

在廣義曲線座標， $()^{\alpha}$ 代表向量的逆變分量 (contravariant component)，上標代表逆變分量，下標代表笛卡爾分量(以下上下標均同)，而水深及短波平均速度 u^{α} 依 Lagrangian 平均定義如下：

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

其中 ζ 代表瞬時自由表面高程。依 Lagrangian 平均法假設：

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

式中 Q_{ω}^{α} 或 $Q_{\omega\alpha}$ (Cartesian expression) 為短波通量， 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：

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

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

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 $g^{\alpha\beta}$ 為逆變度量張量， $S^{\alpha\beta}$ 為輻射應力 (Longuet-Higgins and Stewart, 1962; 1964)。 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，可表示為：

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

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

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

其中 κ 為馮卡曼常數 ($k \sim 0.4$)， u_0 為波浪模式中短波的粒子速度振幅， D 單位面積之能量消散。 $C_1 \sim 0.2$ 和 $M = 0.08$ (Svendsen et al., 2003)。常數 ν_{t0} 乃由實驗所得的背景渦黏滯度，若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 and Dalrymple, 1991)， ρ_a 代表空氣密度。

在 SHORECIRC 中之底床應力採用 Svendsen and 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_ω 為在底床處的短波水粒子速度振幅， 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 為流和波動的權重係數(Svendsen and Putrevu, 1990)，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 et al., 2003)。

所結合的有限體積法和有限差分法，並不適合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 and Sun, 1995; Shi et al., 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，其中

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

在直角坐標中的導數可由式(4.1.12)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，

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

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

其中 $P^\alpha = Hu^\alpha$ ，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，式(4.1.14)的推導需使用度量公制法(metric identity law, Thompson et al., 1985)，如：

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

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

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：

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

使用式(4.1.12)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)，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 and Svendsen (1999)所定義。在離岸區域無波力時，式(4.1.19)可簡化為

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

式(4.1.18)的解可依 Putrevu and 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方程式

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 et al., 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，式(4.1.22)是張量不變形式，如 Booij et al. (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 為波浪作用力，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：

1. 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。

2. 相對頻率的改變

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

3. 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

4.2 模式範圍及參數設定

模式在計算前須先將所欲模擬之區域網格化，選取適當網格大小，以達到解析度要求以及記憶容量與速度限制。本研究模擬區域(如圖 4.2 方框所示) 由臺中港北側海域至彰濱工業區崙尾區海域，其沿岸直線長度約 41 公里，向離岸範圍則延伸至水深約-50 公尺處，長度約為 15 公里。圖 4.3 則為經座標轉換後之波潮流模擬範圍及地形水深分佈圖，模式區域在水平方向劃分為 408×148 個正方網格，每一網格之為 100 公尺，表 4-1 為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，以預測水位做為調合分析取得邊界上 M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2 分潮係數之用，而開放邊界資料以 8 個分潮計算。



圖 4.2 模式模擬範圍示意圖

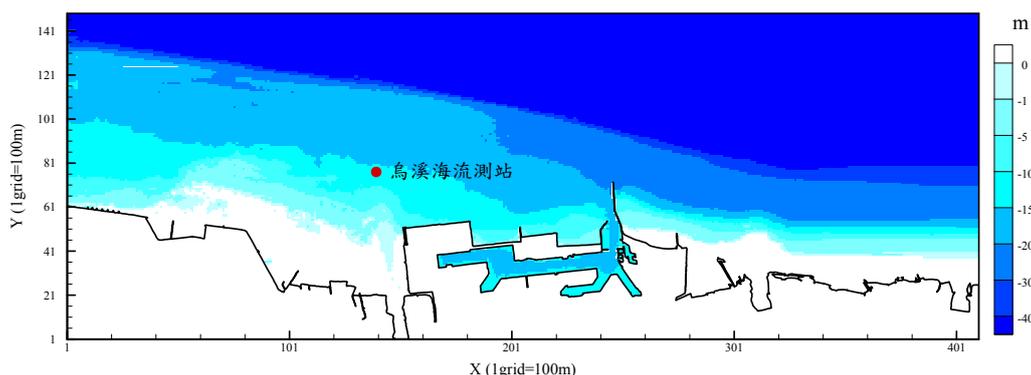


圖 4.3 座標轉換後之模式模擬範圍圖

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 (順時針)	62°

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，而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，利用設置於北防波堤堤頭外側 600m 水深 25m 處以 AWCP 儀器量測海流資料 (24°18'04"N 120°28'59"E)，以及本所港灣技術研究中心在 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。

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。利用測站資料進行參數值率定，依前一年度研究率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。

4.3 模式驗證

本所於 2013 年 7 月 23 日，在臺中港北防波堤附近海域海面漂流浮標軌跡與風速之量測，以瞭解當地海域之表面流場變化情況。依當時北防波堤之實測風速介於 0~10.3m/s 間。本研究應用 NearCoM 模式模擬臺中港北防波堤附近海域之浮標漂流，並與實測資料進行驗證。

描述流體運動之方式通常可分為 Eulerian 方式與 Lagrangian 方式兩種。1. Eulerian 方式是針對流場中通過固定位置點處之流體質點的運動特性；2. Lagrangian 方式則為描述流場中特定流體質點之運動軌跡與特性。因此，若將浮標視為流體質點以數值模式所模擬計算出之 Eulerian 方式之流速，將可轉換成特定流體質點之 Lagrangian 流速。浮標追蹤模組中模擬浮標軌跡的路徑 \bar{X}_m 之方程式如下

$$\bar{X}_m(t) = \bar{X}_m(t=0) + \int_0^t [\bar{u}_{L,m}(\bar{X}_m(t'), t')] dt', \quad (4.3.1)$$

其中 $\bar{u}_{L,m}$ 為 Lagrangian 方式下之質點速度，在 NearCoM 模式中可計算各個位置之 $\bar{u}_{L,m}$ 隨時間變化所有情形。因此，各時間點的浮標位置 \bar{X}_m 即可被求得，應用(4.3.1)式模擬浮標漂移結果如圖 4.4 與圖 4.5。圖中分別為不同時間點實測資料與數值模擬比較，其中實線為 NearCoM 模擬結果，而點為 2013 年實測資料。圖 4.4 與圖 4.5 顯示於北防波堤附近模擬的浮標軌跡實測則尚屬合理，但圖 4.4 點位 1、2 比對結果並不理想。因此，根據 Thorpe et al.(2004)方式加入水平擴散修正項，如(4.3.2)式所示

$$\bar{X}_m(t) = \bar{X}_m(t=0) + \int_0^t \{[\bar{u}_{L,m}(\bar{X}_m(t'), t')] + w(t')\} dt', \quad (4.3.2)$$

其中 $w(t') = (\sqrt{12\kappa \Delta t R_1} \cos(2\pi R_2), \sqrt{12\kappa \Delta t R_1} \sin(2\pi R_2))$ 為二維水平擴散項， R_1 、 R_2 為隨機變數， κ 水平擴散係數，並參考 Spydell et al. (2015)之建議及實測資料率定得到 $\kappa = 0.1m^2s^{-1}$ 。圖4.6與圖4.7為應用式(4.3.2)之浮標漂流模擬結果。圖4.4中點位1、2與圖4.7中點位1模擬結果不理想的部份於圖4.6與圖4.7皆有改善。

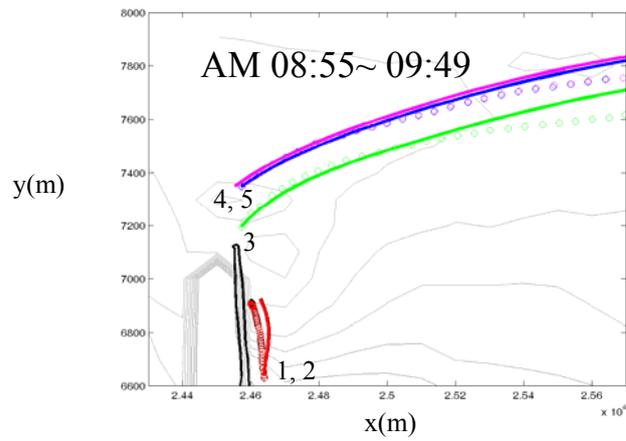


圖 4.4 浮標軌跡模擬圖
(平均風速: 1.26m/s, 實線: NearCoM, 點: 實測資料)

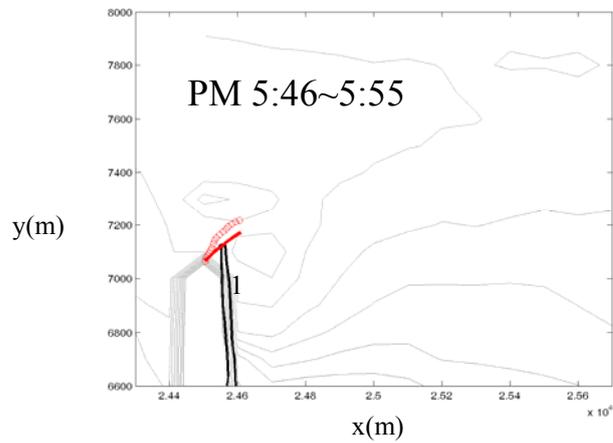


圖 4.5 浮標軌跡模擬圖
(平均風速: 5.43m/s, 實線: NearCoM, 點: 實測資料)

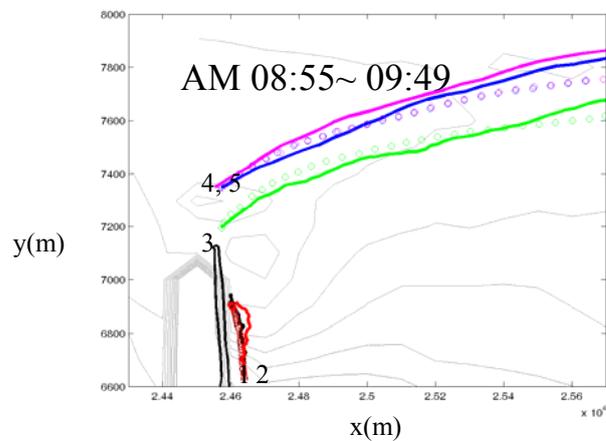


圖 4.6 含水平擴散浮標軌跡模擬
(平均風速: 1.26m/s, 實線: NearCoM, 點: 實測資料)

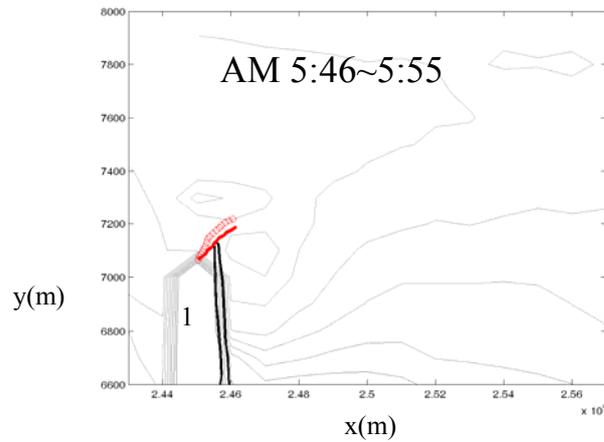


圖 4.7 含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖
(平均風速: 5.43m/s, 實線: NearCoM, 點: 實測資料)

4.4 氣候變遷波流場模擬

為探討氣候變遷情境下臺中港附近海域受颱風波浪作用之影響，本研究由臺中港外海颱風迴歸分析統計資料，由表 2-8 選取 50、100、200 與 250 年迴歸週期之颱風波浪作為 NearCoM 模式波浪資料輸入條件，模擬之波浪條件如表 4-2 所示。以 IPCC AR5 報告中不同氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5)下所預估 2100 年海平面上升高度如表 4-3 所示，作為 NearCoM 模式背景輸入條件，模式模擬之北防波堤各斷面處之最大示性波高如表 4-4。

圖 4.8~圖 4.10 為不同入射波浪方向下 50 年迴歸期颱風波浪滿潮位時之波流場分布圖，圖中示性波高值以色階表示，流速以箭頭表示。圖 4.8 為北向之颱風波浪，圖 4.9 為西向之颱風波浪，圖 4.10 為西南向之颱風波浪。圖中顯示，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，50 年迴歸期最大值約為 4.3 公尺。在西向之颱風波浪作用下，北防波堤最大示性波高，50 年迴歸期約 3.2 公尺。在西南向之颱風波浪作用下，北防波堤最大示性波高 1.1 公尺。因此，在研究北防波堤的受力分析與安定性分析時，應以北向波浪做為主要波浪條件。另外，西向之颱風波浪於港內之示性波高較另兩個波向大，表示西向颱風波會傳遞至港內較其他波向明顯。西南向之颱風波浪作

用下，臺中港北側波浪則受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

圖 4.11~圖 4.13 為滿潮時不同迴歸期下北向颱風波浪之波流場圖，分別為 100 年、200 年與 250 年迴歸期之颱風波浪。比較圖 4.8 與圖 4.11~圖 4.13 可以發現北防波堤之最大波高發生位置並不會隨著起始波浪條件改變。考慮臺中港北防波堤最後延伸的 480m 其斷面設計隨不同水深而不同，波高分布及受力亦不同，其分為 4 段(I、II、III、IV)，堤線里程 0 至 100m 為 I，堤線里程 100 至 130m 為 II，堤線里程 130 至 440m 為 III，堤線里程 440 至 480m 為 IV。由表 4-4 可發現，北向颱風波浪最大示性波高發生於斷面 I 的位置，西向及西南向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面 IV 的位置。氣候變遷引起的海平面上升 50 年 RCP0.0、RCP2.6、RCP4.5 及 RCP8.5 條件，對波浪的分布影響不大。

整體而言，50 年、100 年、200 年及 250 年迴歸期北向的颱風波浪示性波高最大，滿潮時在不同的氣候變遷情境下，臺中港北防波堤北側波高皆有增加的趨勢，故臺中港北防波堤的受力將會增加。因此，北向的颱風波對於北防波堤的安定影響較其他波向重要。此外，西向的颱風波浪示性波高較北向的小，但西向的波浪因為沒有防波堤的阻擋，波浪會傳播進入港池，對於港內的靜穩亦需考慮南向波浪的影響，至於西南向之波浪對於臺中港的影響則較小。

表 4-2 各迴歸期之颱風波浪條件

迴歸期 波向	250		200		100		50	
	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)
N	8.6	12.3	8.4	12.2	7.8	11.7	7.2	11.3
W	6.7	10.9	6.6	10.8	6.1	10.4	5.7	10.0
SW	5.6	9.9	5.4	9.8	5.1	9.5	4.7	9.1

表 4-3 不同氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100 年)

RCP2.6	0.55m
RCP4.5/RCP6.0	0.63m
RCP8.5	0.82m

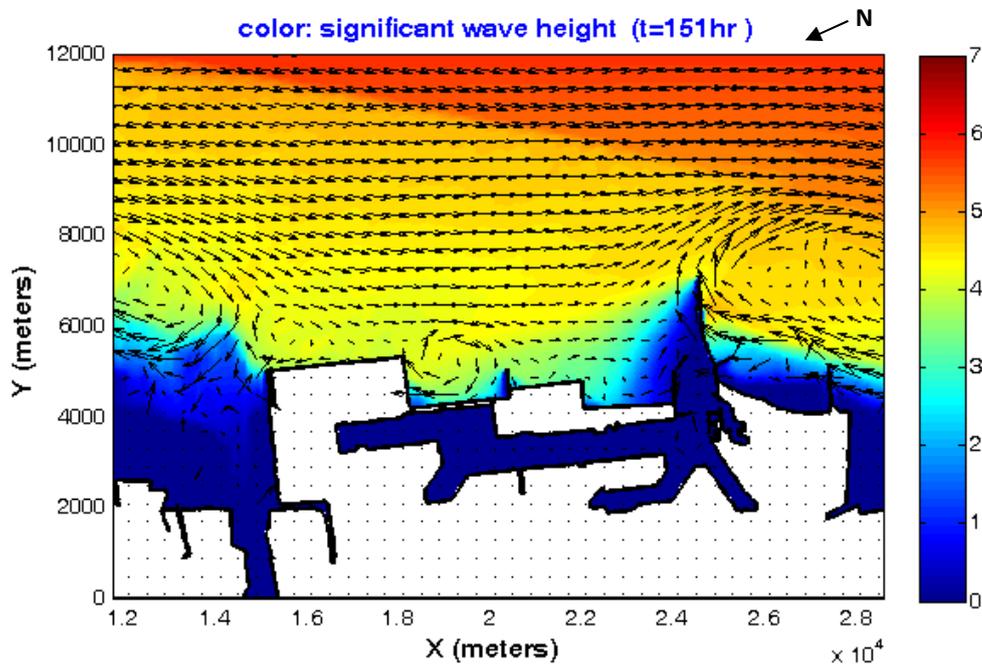


圖 4.8 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=7.2\text{m}$ ，示性週期 $T=11.3\text{s}$ ，波向 N)

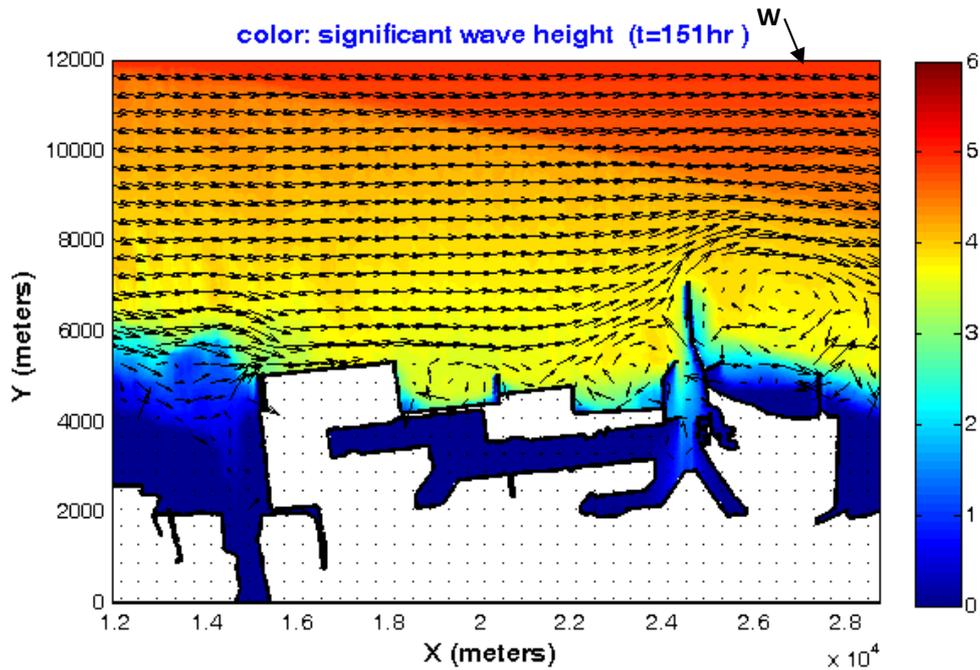


圖 4.9 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=5.7\text{m}$ ，示性週期 $T=10.0\text{s}$ ，波向 W)

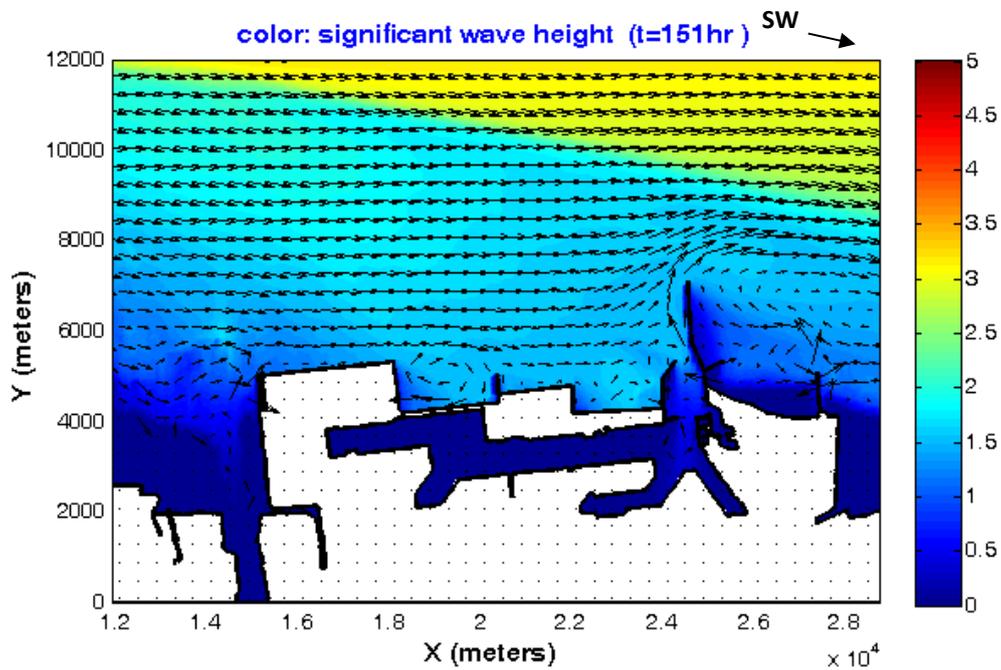


圖 4.10 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=4.7\text{m}$ ，示性週期 $T=9.1\text{s}$ ，波向 SW)

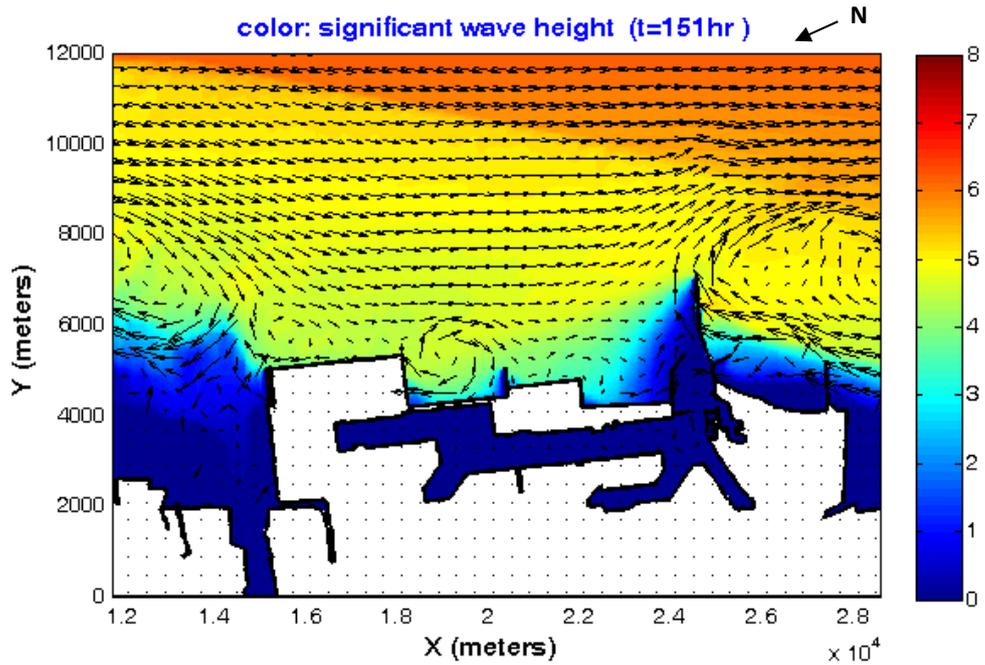


圖 4.11 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.7\text{s}$ ，波向 N)

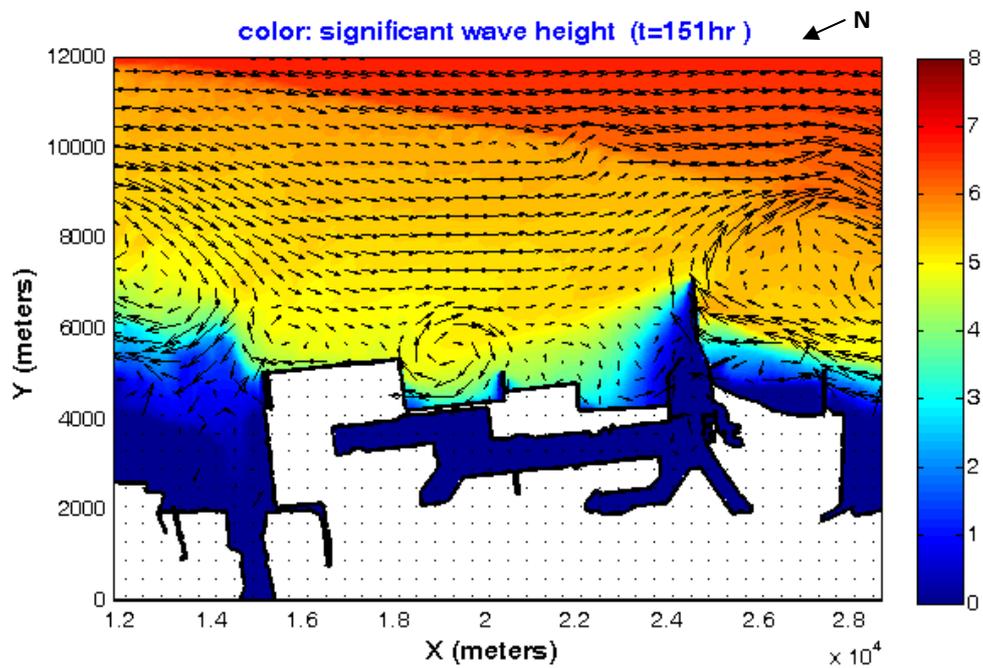


圖 4.12 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=8.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.2\text{s}$ ，波向 N)

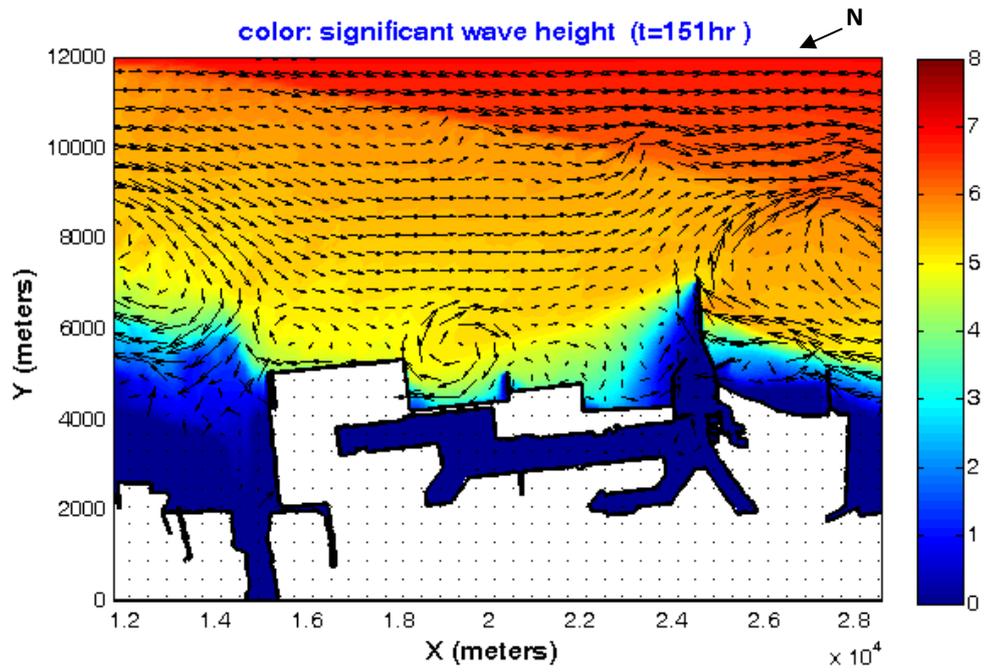


圖 4.13 臺中港附近海域 250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(示性波高 $H=8.6\text{m}$ ，示性週期 $T=12.3\text{s}$ ，波向 N)

表 4-4 不同情境條件在不同防波堤位置之示性波高模擬結果

波向	N				W				SW			
斷面最大示性波高(m) 模擬情境	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
50年RCP0.0	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP2.6	4.32	4.20	4.19	4.20	2.76	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP4.5	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP8.5	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.86	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
100年RCP0.0	4.70	4.55	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP2.6	4.70	4.56	4.54	4.55	3.06	2.87	3.11	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP4.5	4.70	4.55	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP8.5	4.70	4.56	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
200年RCP0.0	5.13	4.95	4.93	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP2.6	5.13	4.96	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP4.5	5.13	4.96	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP8.5	5.13	4.95	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
250年RCP0.0	5.25	5.06	5.04	5.05	3.48	3.22	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27
250年RCP2.6	5.25	5.06	5.04	5.05	3.48	3.22	3.48	3.86	0.66	0.76	0.95	1.27
250年RCP4.5	5.25	5.06	5.04	5.05	3.47	3.22	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27
250年RCP8.5	5.24	5.06	5.04	5.05	3.48	3.21	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27

4.5 氣候變遷影響分析

為探討氣候變遷下臺中港區未來可能遭受之颱風波浪作用影響，許(2013)在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中，模擬2020~2039年間臺灣西北及東北地區颱風波浪在不同颱風路徑下最大波高及週期變化統計，結果顯示不同地區最大波高平均增率介於59%~65%，週期平均增率介於20.8%~25%。因此本研究以表4-2臺中港外海颱風波迴歸分析資料，分別取其50、100、200與250年迴歸週期之颱風波浪波高再乘上最大倍數1.65、週期乘上1.25作為NearCoM模式波浪資料輸入條件，模擬之波浪條件如表4-5所示。以IPCC AR5報告中不同氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5)下所預估2100年海平面上升高度如表4-3所示，作為NearCoM模式背景輸入條件。

模式模擬之北防波堤各斷面處之最大示性波高如表4-6，由表顯示北向颱風波浪最大示性波高發生於斷面I的位置，250年迴歸期示性波高可達8.13公尺；西向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面IV的位置，250年迴歸期示性波高達6.49公尺；西南向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面IV的位置，250年迴歸期示性波高達2.11公尺。比較表4-4與表4-6可知各波向(北向、西向、西南向)最大波高變化趨勢是一致的，僅西向最大波高反而小於基準年(RCP 0.0)之波高，故氣候變遷所造成的海平面上升會導致西向入射颱風波浪在北防波堤處波高降低，而北向及西南向入射颱風波浪在北防波堤處波高增加。另外，比較圖4.8與圖4.14、圖4.11與圖4.17、圖4.11與圖4.18及圖4.13與圖4.19可明顯發現受氣候變遷影響之北向波浪，無論是50年、100年、200年或250年迴歸期之受氣候變遷影響的颱風波浪，最大示性波高皆發生在斷面I，可見其波高增大時，並未影響最大波高發生位置。由圖4.9與圖4.15可發現受氣候變遷影響之西向波浪，當其波高增加，傳遞至港內的波高愈大，表示港內靜穩度愈差。

表 4-5 氣候變遷之各迴歸期颱風波浪條件

迴歸期 波向	250		200		100		50	
	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)
N	14.2	15.4	13.9	15.3	12.9	14.6	11.9	14.1
W	11.1	13.6	10.9	13.5	10.1	13	9.4	12.5
SW	9.2	12.4	8.9	12.3	8.4	11.9	7.8	11.4

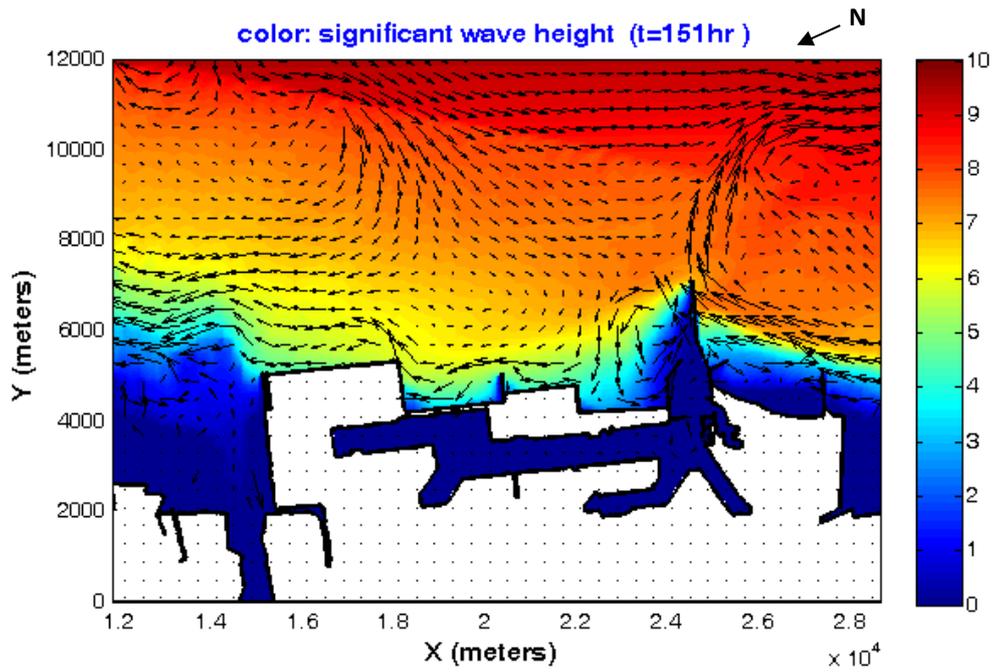


圖 4.14 受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=11.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.1\text{s}$ ，波向 N)

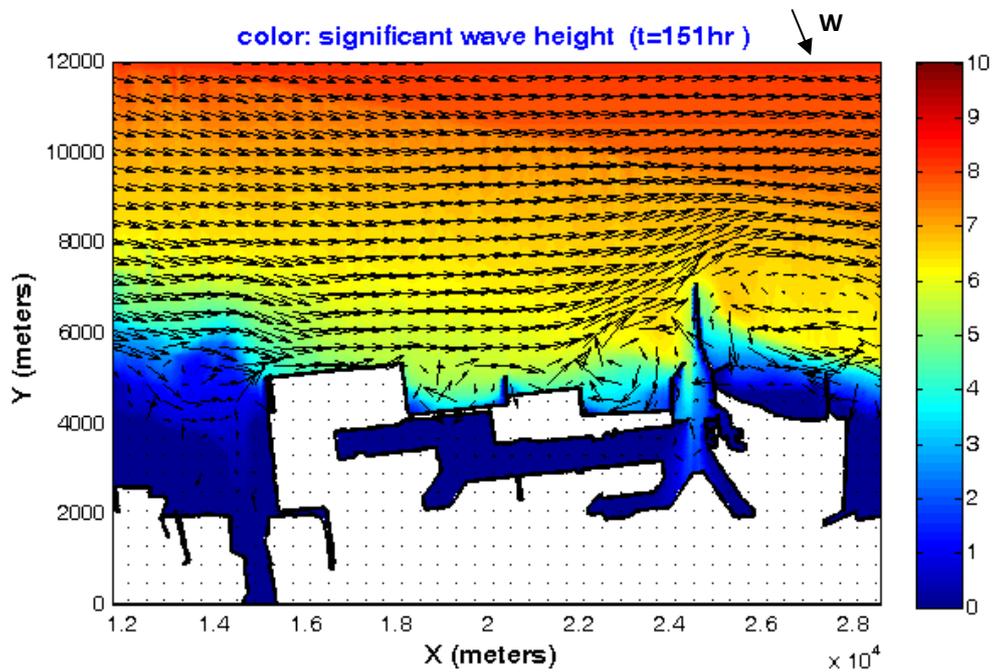


圖 4.15 受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=9.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.5\text{s}$ ，波向 W)

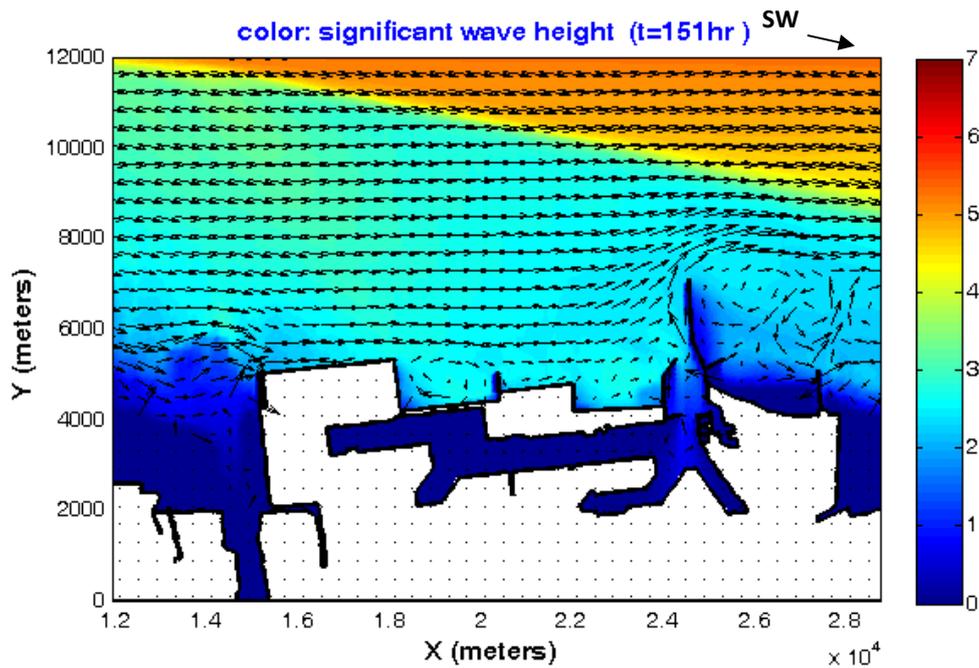


圖 4.16 受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.4\text{s}$ ，波向 SW)

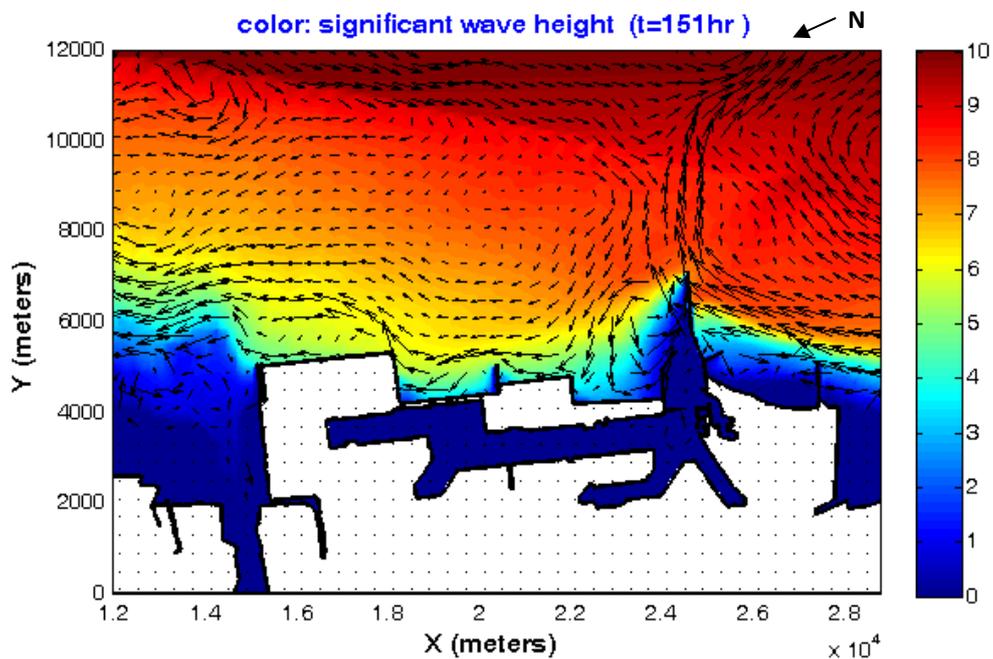


圖 4.17 受氣候變遷影響 100 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=12.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.6\text{s}$ ，波向 N)

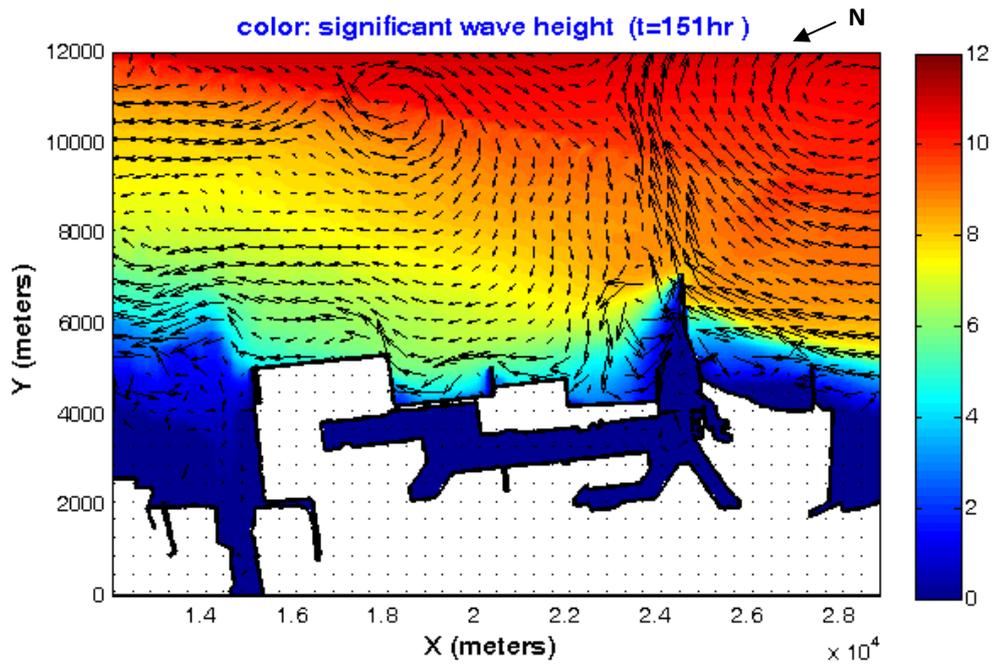


圖 4.18 受氣候變遷影響 200 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=13.9\text{m}$ ，示性週期 $T=15.3\text{s}$ ，波向 N)

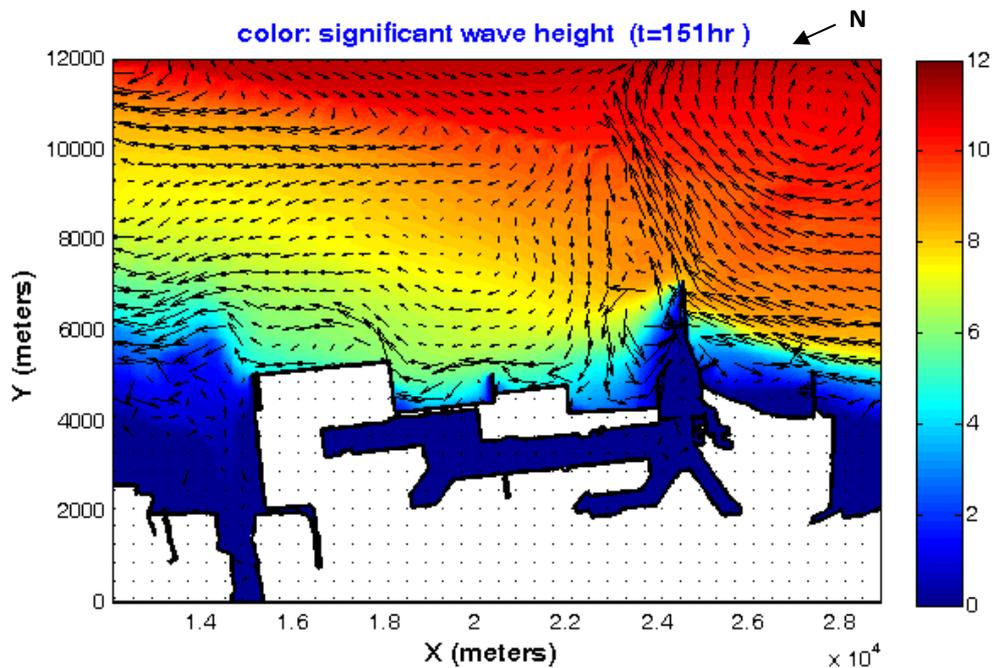


圖 4.19 受氣候變遷影響 250 年迴歸期颱風波浪流場模擬圖
(示性波高 $H=14.2\text{m}$ ，示性週期 $T=15.4\text{s}$ ，波向 N)

表 4-6 模式模擬氣候變遷不同颱風波浪迴歸期的最大示性波高結果

波向	N				W				SW			
斷面最大示性波高(m) 模擬情境	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
50年RCP0.0	7.15	6.91	6.87	6.89	5.15	4.65	4.96	5.45	1.06	1.14	1.37	1.75
50年RCP2.6	7.15	6.91	6.88	6.90	5.15	4.65	4.96	5.45	1.06	1.14	1.38	1.75
50年RCP4.5	7.15	6.91	6.88	6.90	5.15	4.65	4.96	5.45	1.06	1.14	1.37	1.75
50年RCP8.5	7.15	6.91	6.88	6.89	5.15	4.65	4.96	5.45	1.06	1.14	1.38	1.75
100年RCP0.0	7.61	7.40	7.38	7.41	5.56	5.03	5.36	5.89	1.19	1.26	1.52	1.91
100年RCP2.6	7.61	7.41	7.38	7.41	5.56	5.03	5.36	5.89	1.19	1.26	1.52	1.91
100年RCP4.5	7.61	7.41	7.38	7.41	5.56	5.03	5.36	5.89	1.19	1.27	1.52	1.91
100年RCP8.5	7.61	7.41	7.38	7.41	5.56	5.02	5.36	5.89	1.19	1.26	1.52	1.91
200年RCP0.0	8.04	7.88	7.86	7.91	5.95	5.43	5.83	6.39	1.30	1.37	1.63	2.04
200年RCP2.6	8.04	7.88	7.86	7.91	5.95	5.43	5.83	6.39	1.30	1.37	1.63	2.04
200年RCP4.5	8.04	7.88	7.86	7.91	5.95	5.43	5.83	6.39	1.30	1.36	1.63	2.04
200年RCP8.5	8.04	7.88	7.86	7.91	5.95	5.43	5.83	6.39	1.29	1.36	1.63	2.04
250年RCP0.0	8.13	7.99	7.98	8.03	6.04	5.52	5.93	6.49	1.35	1.42	1.68	2.11
250年RCP2.6	8.13	8.00	7.98	8.03	6.03	5.52	5.93	6.49	1.35	1.42	1.68	2.11
250年RCP4.5	8.13	7.99	7.98	8.03	6.03	5.52	5.93	6.49	1.35	1.42	1.68	2.11
250年RCP8.5	8.13	7.99	7.98	8.03	6.03	5.52	5.93	6.49	1.35	1.41	1.68	2.11

第五章 結構物受力安定分析

臺灣港口的防波堤或碼頭結構物常見以基礎拋石底座和沉箱組合的直立式形式以抵抗波浪作用，並保護港埠內部的航行安全與結構物安定。往昔有許多波浪場和透水結構物的水工模型試驗研究，但由於需要較多的試驗研究經費且對透水材質的孔隙大小作比例縮尺時會遭遇相當程度問題。近年來由於電腦科技的發展，計算機的運算速度與記憶容量快速地成長，而且硬體成本相對越來越低，波場與結構物作用計算模式有顯著的發展。

COBRAS 模式可適當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，藉由給定孔隙率(Porosity)和中值粒徑(D_{50})等透水係數，Shih et al. (1996) 將 VARANS 中雷諾應力項引入非線性渦度黏滯性的假設，體積平均的渦度黏滯性以 $k-\epsilon$ 紊流閉合方程式計算流場的波壓、波速和相關紊流特性。

過去相關的研究，Hsu et al.(2002)應用COBRAS模式模擬透水性複合式防波堤在兩種波浪條件(無碎波與碎波條件)的作用情形，比較碎波情況在透水性近岸結構物的作用情形，並以Sakakiyama and Liu(2001)水工模型試驗資料驗證，進而模擬波場與結構交互作用下紊流強度和黏滯性變化情形。Losada et al.(2008) 和 Guanche et al.(2009) 將COBRAS模式改進，計算防波堤受規則波與不規則波的波浪作用情形，分析並討論越波量和安定性問題，都獲得合理且一致的結果。

本章將依據前章NearCoM模式模擬出臺中港週邊波、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)模式加以模擬計算分析。

5.1 COBRAS數值模式

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 et al., 1991)，由 Liu and 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 et al., 1999) 和計算波浪與近岸複合結構物交互作用問題 (Hsu et al., 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 $k-\varepsilon$ 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，水平和垂直方向的流速和越波量等資訊。

5.1.1 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：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_i}{\partial x_j} \quad (5.1.2)$$

式(5.1.1)及式(5.1.2)為 Navier-Stokes 方程式(NSE)。其中 $i, j=1,2$ 分別表示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。 t_{ij} 為牛頓流體假設下的分子剪應力張量可表示為：

$$\tau_{ij} = 2\mu\sigma_{ij} \quad (5.1.3)$$

上式(5.1.3)中 μ 表示為動力黏滯系數以及 τ_{ij} 為剪應變率張量可表示如下：

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.1.4)$$

由於現今的計算機的限制，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以時間平均量與瞬時擾動量表示之：

$$u_i = \langle u_i \rangle + u'_i \quad (5.1.5)$$

$$p_i = \langle p_i \rangle + p'_i \quad (5.1.6)$$

上兩式(5.1.5)、式(5.1.6)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：

$$\langle u'_i \rangle = \langle p'_i \rangle \quad (5.1.7)$$

上兩式(5.1.5)、式(5.1.6)代入式(5.1.1)、式(5.1.2)中，並取時間平均，可得到時間平均條件下的流場控制方程式：

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1.8)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (5.1.9)$$

上式(5.1.9)同乘 ρ ：

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (5.1.10)$$

而式(5.1.8)與式(5.1.9)或式(5.1.10)即為 RANS 方程式。其中式(5.1.10)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。

5.1.2 k - ε 紊流閉合模式

由控制方程式中式(5.1.1)、式(5.1.2)的 NSE 比較取時間平均之式(5.1.8)與式(5.1.10)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。

為解決超靜定系統的問題，本研究加入 $k-\varepsilon$ 紊流閉合模式求解 RANS 方程式中的雷諾應力項。 $k-\varepsilon$ 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。

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(5.1.10)中的雷諾應力張量(Reynolds stress)表示如下:

$$\langle u'_i u'_j \rangle = -2\nu_t \langle \sigma_{ij} \rangle + \frac{2}{3} \kappa \sigma_{ij} \quad (5.1.11)$$

上式(5.1.11)中 σ_{ij} 為 Kronecker delta 函數，而 ν_t 為渦動滯度可表示如下:

$$\nu_t = C_d \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (5.1.12)$$

上式(5.1.12)中的 C_d 為經驗參數，根據 Rodi (1980) 建議 $C_d = 0.09$ ，而上式(5.1.12)中紊流動能 k 與紊流消散率 ε 可定義如下:

$$k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle \quad (5.1.13)$$

$$\varepsilon = \nu \left\langle \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle \quad (5.1.14)$$

式(5.1.14)中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 為分子運動黏滯係數(molecular kinematic viscosity)。

Shih et al. (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。本研究之模式採用 Shih et al. (1996) 所提出的閉合模式，表示如下:

$$\rho \langle u'_i u'_j \rangle = -C_d \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \kappa \sigma_{ij} \\ - \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[\begin{aligned} & C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \\ & + C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \\ & + C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \end{aligned} \right] \quad (5.1.15)$$

上式(5.1.15)中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_d 為經驗參數，其中 C_1 、 C_2 、 C_3 可由 Couette shear flow 實驗中所量測而得，根據 Lin and 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(5.1.15)可還原成線性且等向性之模型如式(5.1.12)，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，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(5.1.15)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 et al. (1996)給定 C_d 為 $(k/\varepsilon)\left(\frac{\partial\langle u_i \rangle}{\partial x_i}\right)$ 的反函數，Lin and 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：

$$C_d = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + D_{\max}^2} \quad (5.1.16)$$

$$C_2 = \frac{1}{58.5 + D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + D_{\max}^2}$$

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(5.1.16)中的 S_{\max} 與 D_{\max} 分別表示如下：

$$S_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} \right| \right] = 0 \quad (5.1.17)$$

$$D_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right| \right] = 0 \quad (5.1.18)$$

式(5.1.17)、式(5.1.18) 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：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{x_j} - \varepsilon \quad (5.1.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left[\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} \right) \right] \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \\ &\quad - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5.1.20)$$

式(5.1.19)與式(5.1.20)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(5.1.19)中各項物理意義表示如下：

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

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

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

$$\text{紊流動能消散項: } -\varepsilon$$

紊流消散 ε 控制方程(5.1.20)中各項物理意義表示如下：

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

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

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

5.1.3 透水性控制流體方程式

將孔隙流體之對流慣性力項及黏滯力項加入Solitt and Cross (1972)所推導出的孔隙介質流體運動方程式如式(5.1.21)、式(5.1.22)：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1.21)$$

$$\frac{1+C_A}{n} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{U_j}{n^2} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (5.1.22)$$

其中U為流速，n為孔隙率，CA是附加質量係數，Van Gent (1995)提出以下形式：

$$C_A = \gamma_p \frac{1-n}{n} \quad (5.1.23)$$

其中 $\gamma_p = 0.34$ ，當 $n=1$ 時，就回復為RANS的控制方程式。式(5.1.22)右邊第三項可表示如下：

$$\frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} = -a_p U_i - b_p \sqrt{U_j U_j} U_i \quad (5.1.24)$$

式(5.1.24)右邊第一項代表摩擦項，由黏滯力所造成；右邊第二項，是由於紊流效應所造成。當在低雷諾數時，由第一項所主導、高雷諾數時則由第二項所主導。

Liu et al. (1999) 採用Van Gent (1995)的經驗式處理 a_p 和 b_p 如下(5.1.25)、(5.1.26)：

$$a_p = a \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{D_{50}^2} \quad (5.1.25)$$

$$b_p = \beta_p \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{D_{50}} \quad (5.1.26)$$

式中 $\alpha=1000$ 和 $\beta_p=1.1$ ，KC為Keulegan-Carpenter數，代表流體質點運動特徵長度和透水性材質孔隙大小之比值， D_{50} 為透水性區域的中值粒徑。因此模式中給定透水性結構物的孔隙率 n 和中值粒徑 D_{50} ，便可以依照其孔隙流體之特性模擬孔隙流體的情形。

5.2 模式建置

在「臺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, 1999)中, 臺中港為既有港口設施進行局部擴建工作, 依據領港登輪及操船安全要求北防波堤延伸長度與方向, 經過波浪繞射計算, 海流數值計算和平面遮蔽水工模型試驗綜合評量後提出可行方案, 民國 89 年臺中港港口第二期擴建工程完工, 其平面佈置圖參考圖 5.1, 將北防波堤延伸 480 公尺, 主要目的為提供廣闊水域腹地, 浪、流靜穩之遮蔽區域, 以利大型船可在安全的操船環境下進出港。

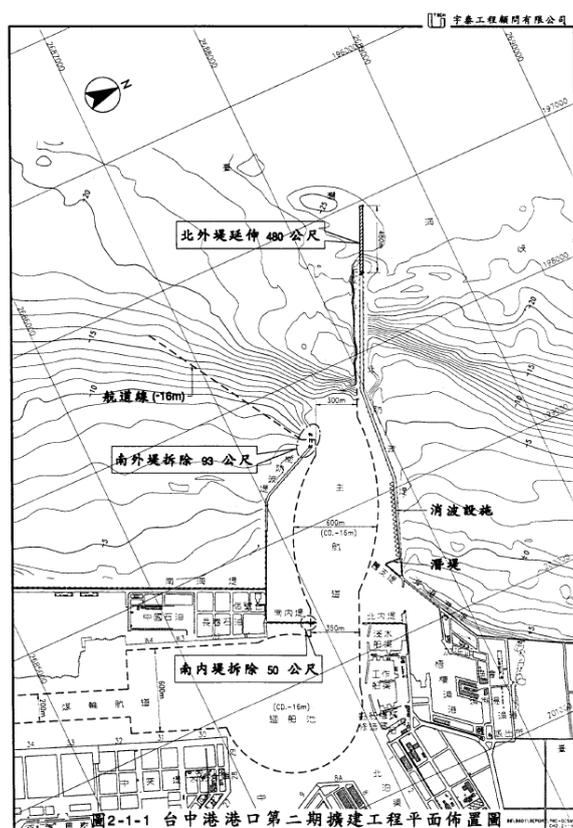


圖5.1 臺中港北防波堤擴建工程平面佈置圖(交通部運輸研究, 1999)

防波堤斷面型式有很多種類, 傳統上可從外觀概分為斜坡堤、直立堤、合成堤三大類, 斜坡堤是以砂石料、塊石或混凝土消波塊堆成者, 堤身兩側成斜面, 使波浪衝擊斜坡時經過斜坡、粗糙表面及堤身孔隙使波能減衰, 阻止其侵入海堤後線, 維護海堤後線設施或水面靜穩。直立堤顧名思義以壁面垂直安放於海底之結構物, 最主要為反射波浪之動能, 此種形式稱為直立堤, 根據直立堤的堤體材料和形狀不

同，一般常見有沉箱式直立堤、方塊式直立堤、空心方塊直立堤、混凝土單塊直立堤以及鋼板圓筒直立堤等。將基座以斜坡堤拋石形式鋪層，直立堤部分放置於斜坡堤頂部，下部斜坡堤，上部直立堤即為合成堤，因兼具斜坡堤消散能量和直立堤反射能量的優點，適用於水深波力較大處。在前述各類堤型中，國內既有各港口及海岸開發所採用之外廓堤形式均以選用沉箱合成堤及拋石堤構造為主，其原因主要是防波堤結構必須能抵擋颱風季節之強浪，以及以往國內對卵塊石之取得相當容易。

近年來，生態環境保護被視為水利工程學之重要課題；為了恢復海洋環境的生命力，維護海岸景觀，在工程開發和國土保育間尋求與自然和平相處的思維下，考慮拋石斜坡堤設計雖較具有消波效果，但所需卵塊石數量相當多、不甚經濟；至於國外較常採用之鋼板圓筒直立堤，在國內施作之工程費偏高，施工上所可能遭遇之問題與沉箱堤類似，故多採用沉箱式合成堤斷面。

圖 5.2 為本研究計算區域的地形與結構物示意圖，圖中方塊標示表示波高計位置。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 953 公尺處有一直立式防波堤結構物，圖中黑色正方形標示為波高計位置，其數值表示水平方向位置，共設置 10 支波高計，9 支波高計位於堤前，1 支波高計位於堤後。於防波堤前後 100m 處加實際坡度變化，堤前坡度 0.05，堤後坡度 0.15，此結構物簡化為兩個部分，第一部分為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，將平均粒徑設為 0.1 公尺，孔隙率設定為 0.49。第二部分為不透水的直立式沉箱，直立壁位置在水平距離 978 公尺處，寬度為 22 公尺，胸牆的寬度為 3 公尺，高為 27 公尺，結構物的尺寸設置如圖 5.3 所示。

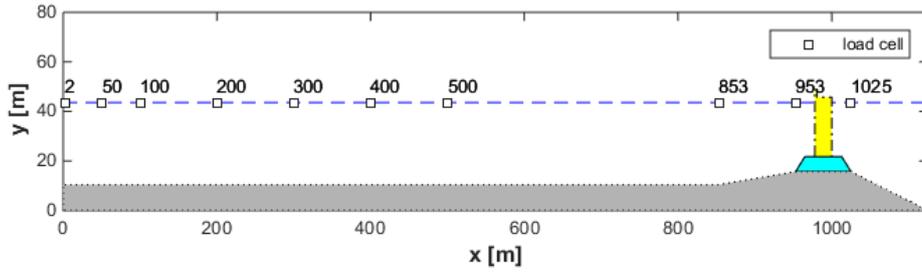


圖5.2 模式結構物與波高計設置圖

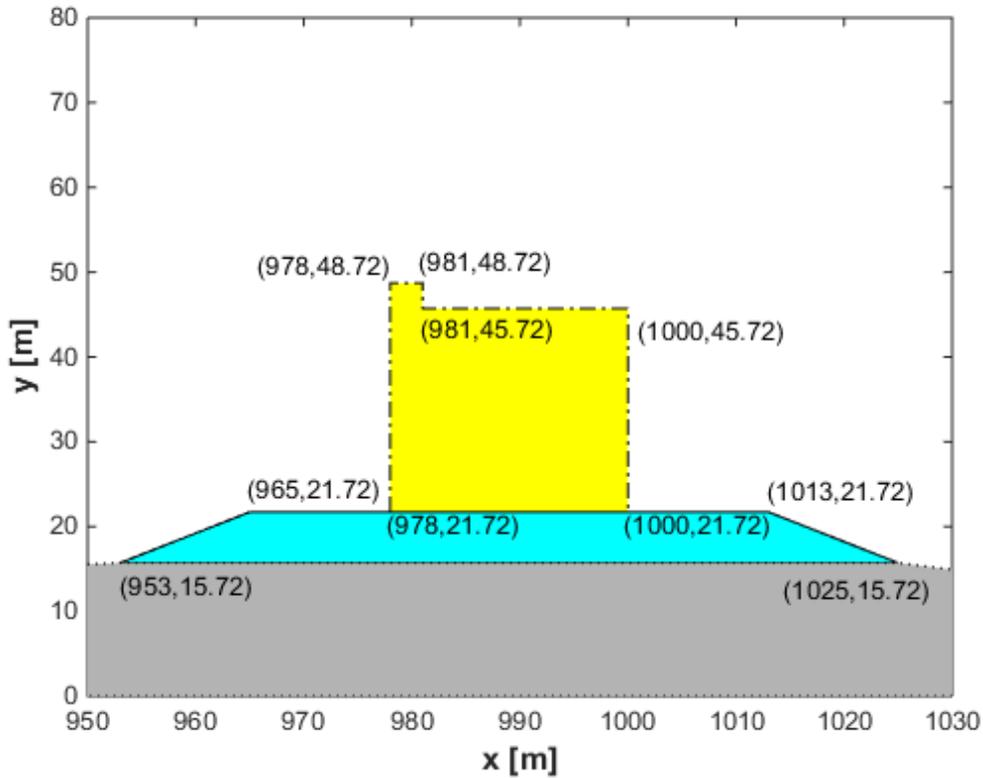


圖5.3 結構物設置圖

考量計算時間效益建置數值模式，將模式的計算範圍定為水平方向 $0 \leq x \leq 1125$ 公尺，垂直方向 $0 \leq y \leq 80$ 公尺，採用變動網格，靠近防波堤結構物，水平方向網格加密，水平方向有 6 個子網格，垂直方向僅 1 個子網格，範圍 $0 \leq y \leq 80$ 公尺，總計共有 527,000 網格點，詳細模式建置之網格設定如表 5-1 所示，計算時間從波浪通過計算範圍起點開始，模擬時間長度 240 秒。

表 5-1 模式之網格設定

水平方向網格設定(採用變動網格，範圍 0~1125 公尺)		
網格編號	範圍(公尺)	網格大小(公尺)
1	0~100	0.5
2	100~653	0.5
3	653~853	0.2
4	853~953	0.2
5	953~1025	0.2
6	1025~1125	0.5
垂直方向網格設定(採用單一網格，範圍 0~80 公尺)		
網格編號	範圍(公尺)	網格大小(公尺)
1	0~80	0.2

過去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(以下稱合田設計波公式)計算最大波高，取最大波高為設計波高，代入合田設計波公式計算堤前壁面與底部波壓分布，其分析流程如圖 5.4 所示(交通部運輸研究，1999)。合田設計波公式如下式(5.2.1)， $h/L_0 \geq 0.2$ 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 倍有義波高距離的水深，有義波高 $H_{1/3}$ 的水深值，取防波堤設置處水深 h ， $\tan\theta$ 為海底坡度， K_s 表示淺化係數， $H'_{1/3}$ 為外海有義波高。

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

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

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

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

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

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

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

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

合田波壓公式乃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，建議用最大波高作為設計波高，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。 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 倍有義波高距離的水深， 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，以上公式之相關符號說明如表 5-2 所示。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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，計算出等值深海波高，再依據合田堤前波高計算法計算堤前波高(取等值深海波高的 1.8 倍，統計上為波浪前 1/250 個最大波高之平均)，以此最大波波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒為模式的入射波條件。

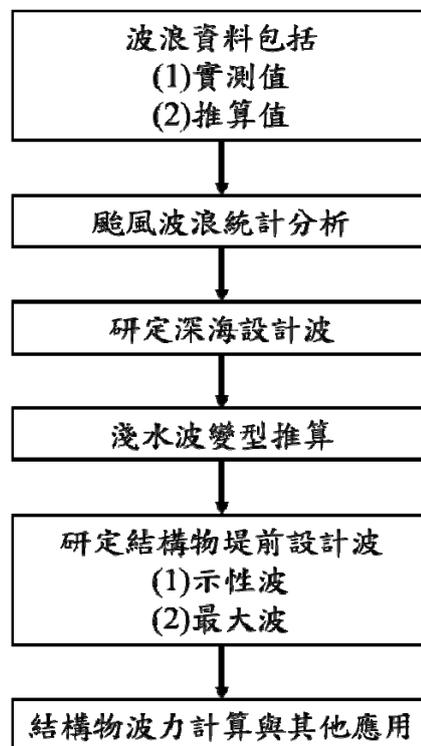


圖5.4 臺中港北防波堤施工設計規範流程圖(交通部運輸研究，1999)

表 5-2 符號說明表

符號	說明
h	堤址水深
h_b	碎波水深
h'	堤前水深
L_0	深海設計波長
$L(h_s)$	堤址處波長
$H_{1/3}$	有義波高
$H'_{1/3}$	外海有義波高
H_{mo}	碎波波高
K_s	淺化係數
η^*	波壓作用頂部的高度
d	拋石基礎以上的水深
f_s	不考慮越波情況之滑動安全係數
f_o	不考慮越波情況之滑動安全係數
f_s^+	考慮越波情況之滑動安全係數 (與波浪方向同向)
f_s^-	考慮越波情況之滑動安全係數 (與波浪方向反向)
f_o^1	考慮越波情況之傾倒安全係數 (以 s1 為之點)
f_o^2	考慮越波情況之傾倒安全係數 (以 s1 為之點)
F_{imp}	Oumeraci et al.(2001)公式之衝擊波力
$F_{imp(1/250)}$	Cuomo et al.(2010)公式之衝擊波力

數值模式之造波條件為連續 STOKES 五階規則波，入射波波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒，屬於颱風波浪。邊界條件之左邊界為造波邊

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，天文潮最高高潮位為水深條件，其值為 27.86 公尺，波長為 161.3 公尺，以上設定作為後續比較之原始條件。

本研究在探討波場與結構物作用問題上，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，對模擬結果均有影響。去年度計畫參考李(2006)海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究，建置 COBRAS 模式模擬規則波前進在斜坡底床上，受淺化效應的自由表面變化情形和波浪通過斜坡衝擊直立式防波堤時，驗證結構物上的壓力變化，此部分之驗證工作已於去年度計畫完成。

根據以上設定建置數值模式，計算水位變化、流場速度、壓力分佈等物理量，首先輸出水平方向 2 公尺處的水位(第一支波高計)變化示意如圖 5.5，並以零上切法計算波高和週期如圖 5.6。從開始造波至 100 秒時，此處的水位變化穩定，待第 9 個波浪通過時，波浪開始受到反射波影響，將堤前 9 支波高計之波高和週期分散圖繪於圖 5.7，圖中的波高和週期分佈集中在波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒，第 6 支波高計受反射波合成的影響，產生最大將近 20 公尺之波高。

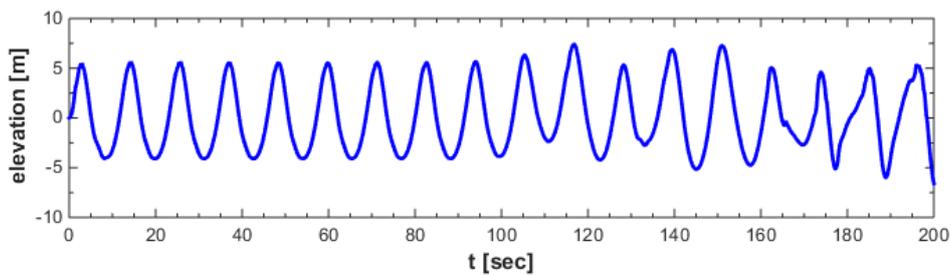


圖5.5 水平方向2公尺處(第一支波高計)之水位變化示意圖

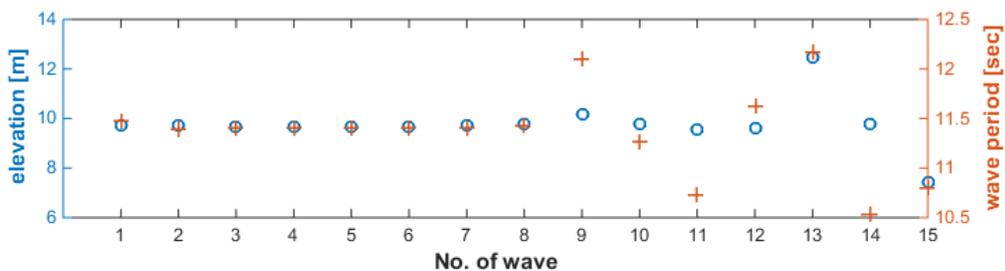


圖5.6 波高與週期變化示意圖

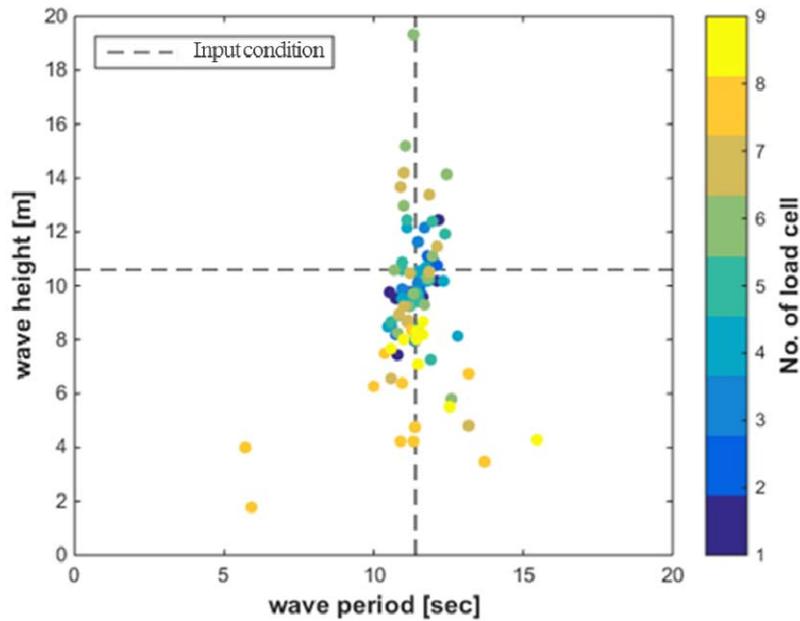


圖5.7 堤前之波高和週期分佈圖

模擬一個波浪週期時間，自由液面的水位變化和流場中流速的空間分佈如圖 5.8 所示，圖中流速大小隨深度遞減，且流速方向的輻合與輻散與水位變化趨勢一致，若注意堤前水位變化，時間 206.6 秒時，水位從靜水位開始下降至波谷後回升，時間 211.7 秒，水位回升至接近靜水位開始向上抬升，時間 215.1 秒時，發生越波。COBRAS 模式計算雷諾平均方程式並以 $k-\varepsilon$ 紊流模式計算紊流動能 k 和紊流消散率 ε ，將模式中計算之紊流動能轉繪製空間分佈之正規化紊流強度如圖 5.9 所示，其水位變化如同圖 5.8，可見於堤趾和斜坡上有兩處明顯的紊流產生，而堤前的紊流強度變化與水位有關，當水位抬升並越波時，在胸牆後方以及防波堤後方會產生較大的紊流。利用流場空間分布情形作正規化渦度分析如圖 5.10 所示，主要產生明顯渦度的位置於斜坡，堤前和發生越波的堤後部分，當水粒子流速越大渦度越強。

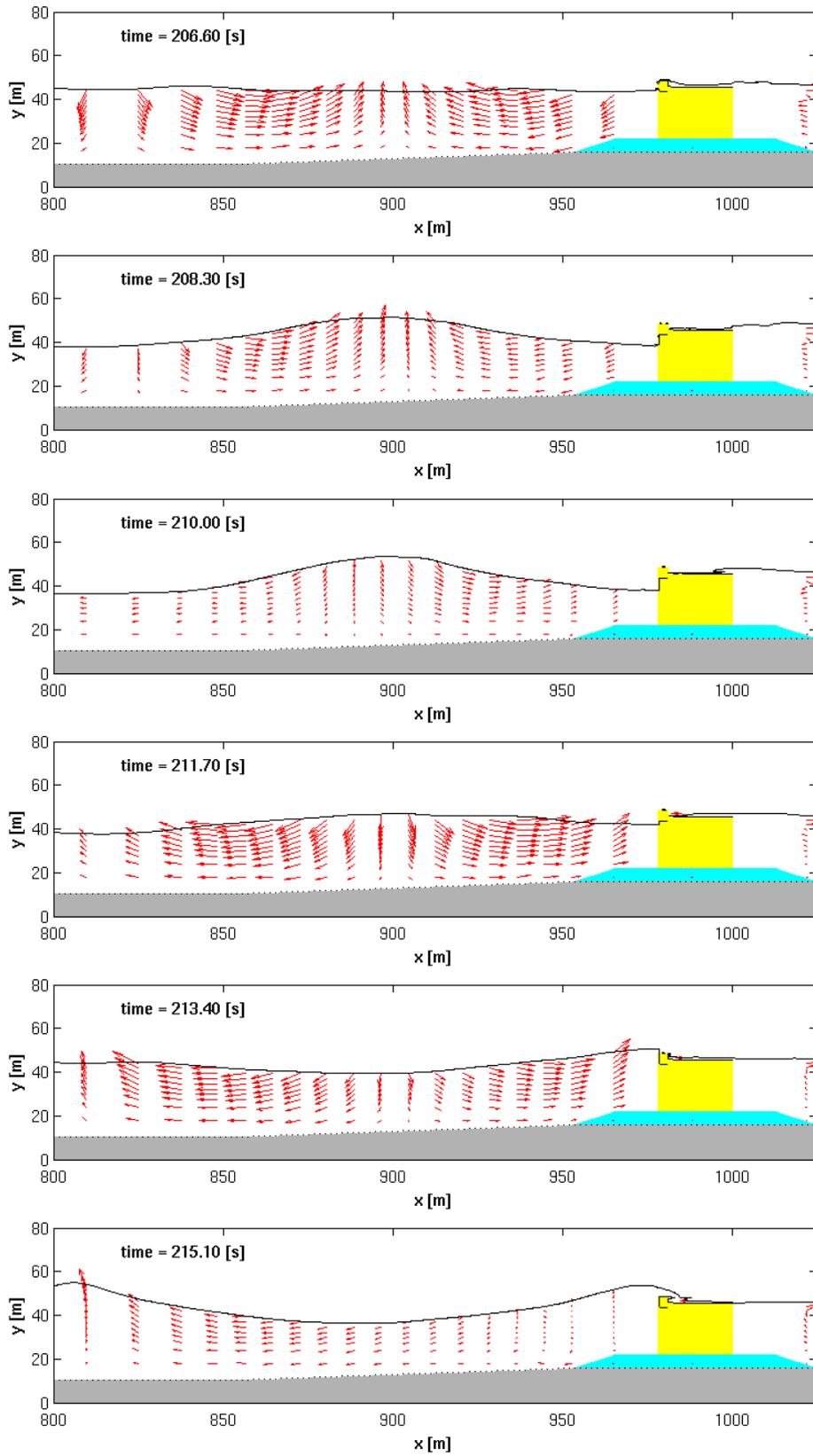


圖5.8 自由液面的水位變化和流場分佈圖

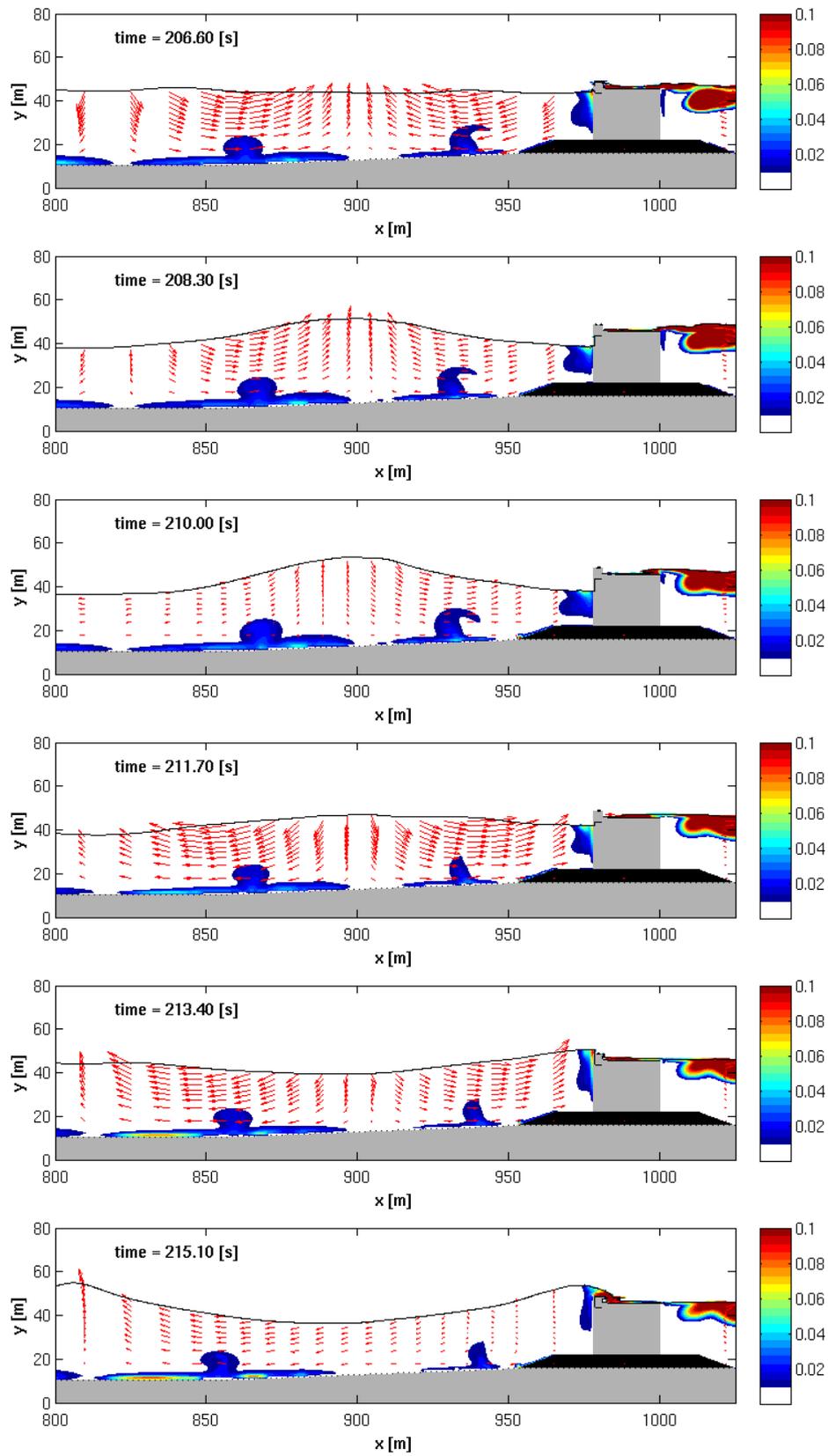


圖5.9 不同時段紊流強度示意圖

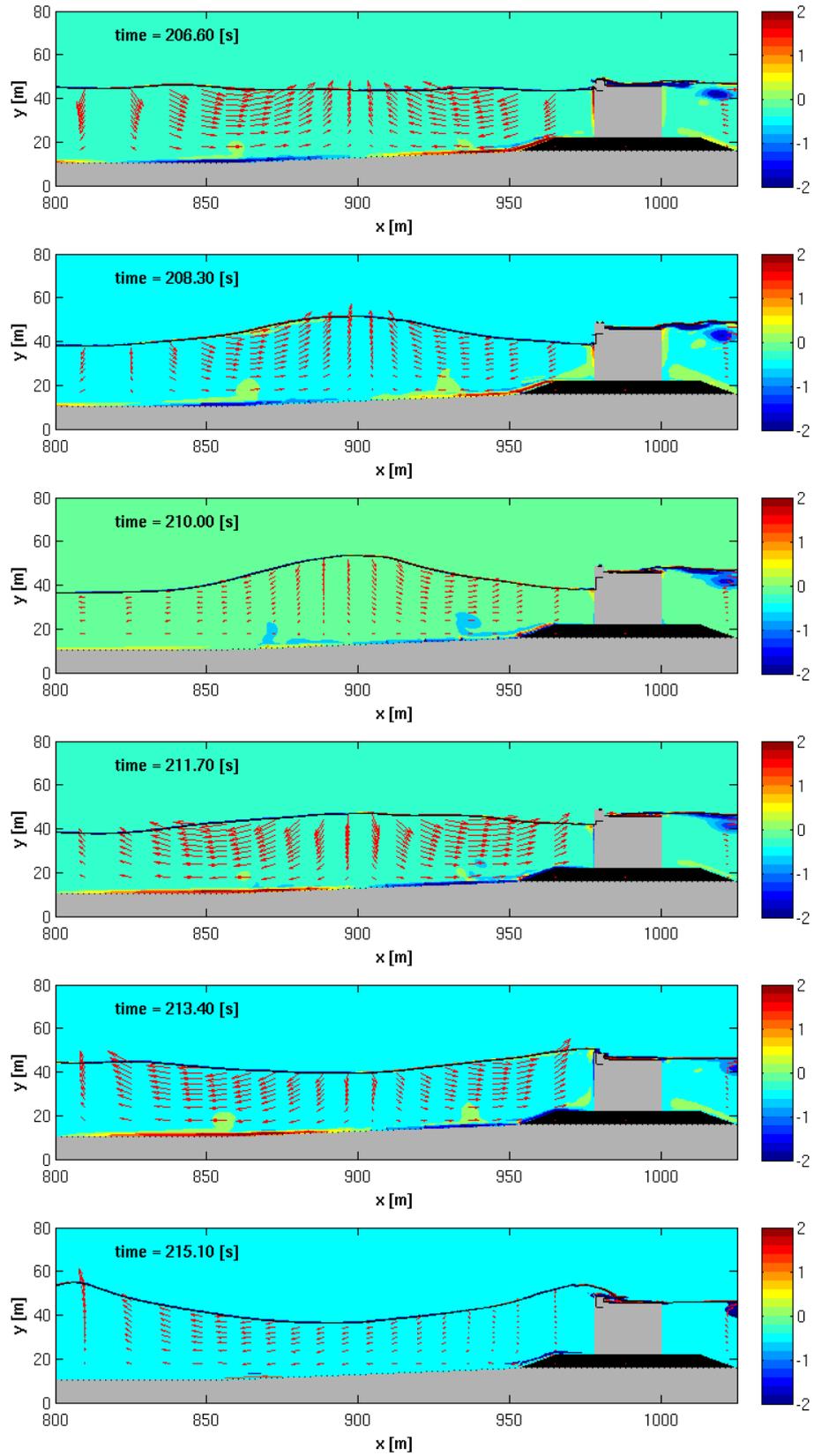


圖5.10 不同時段渦度分布圖

5.3 結構物受力分析

本研究考慮氣候變遷影響下可能造成之水位抬升和波浪增大情況之近岸結構物受力分析，在氣候變遷造成之水位抬升參考 IPCC AR5(2013)資料，氣候變遷造成之波浪增大情形則參考許 (2013)之「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(2/2)」。

考慮臺中港北防波堤延伸段堤址水深位於 20 公尺至 24 公尺處，其延伸段平面圖示意如圖 5.11 所示，將延伸段依照防波堤胸牆頂高度和設計水深不同區分四種標準斷面如表 5-3，堤線里程 0 公尺至 100 公尺為編號 I，其標準斷面圖如圖 5.12 所示，堤線里程 100 公尺至 130 公尺為編號 II，其標準斷面圖如圖 5.13 所示，堤線里程 130 公尺至 440 公尺為編號 III，其標準斷面圖如圖 5.14 所示，堤線里程 440 公尺至 480 公尺為編號 IV，其標準斷面圖如圖 5.15 所示。以各斷面之標準斷面圖建置模式，考慮數值計算耗費時間，計算合理性和反應不同斷面不同情境的波浪條件對結構物的受力影響，建置適當的 COBRAS 數值模式。

斷面 I 之結構物堤面位於水平位置 622 公尺處，而斷面 IV 之結構物位於水平位置 630 公尺處，於防波堤前 100m 反應實際坡度變化，堤前坡度 0.01，此結構物主要分為兩部分，第一部分為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，將此分為兩層，外層為塊石披覆，中值粒徑 1.18 公分，孔隙率 0.49，內層為卵石堤心，中值粒徑 3.87 公分，孔隙率 0.53。第二部分為不透水的直立壁，寬度為 22 公尺，胸牆頂高度根據表 5-3。黑色十字標誌為物理量測量點，其數值表示水平方向位置，共設置 16 支波高計，取 5 支波高計平均分佈於直立壁水平方向位置，間隔為 5.5 公尺，量測直立壁的壁前和壁後之壁面波壓，與直立壁底部的波壓。將模式的計算範圍定為水平方向 $0 \leq x \leq 1000$ 公尺，垂直方向 $0 \leq y \leq 60$ 公尺，採用均質網格，水平方向網格大小 $dx=0.5$ 公尺，垂直方向網格大小 $dy=0.5$ 公尺，總計共有 240,000 網格點，計算時間從波浪通過計算範圍起點開始，模擬時間長度 200 秒。

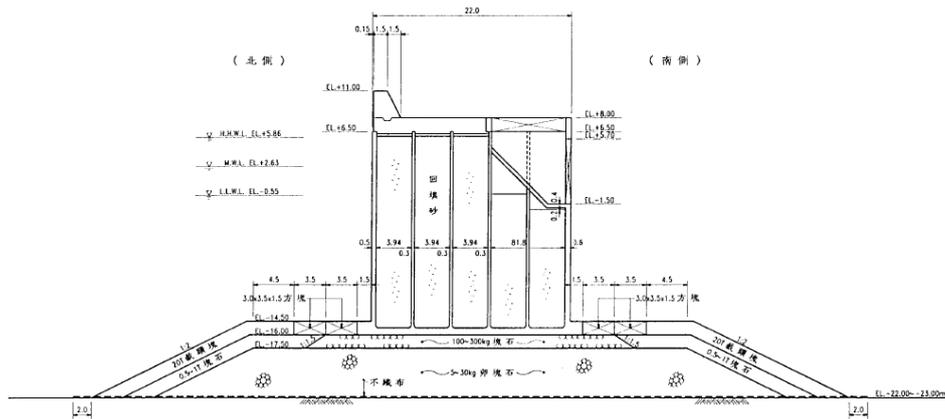


圖5.13 北防波堤延伸段100~130公尺斷面II之標準斷面圖
(交通部運輸研究，1999)

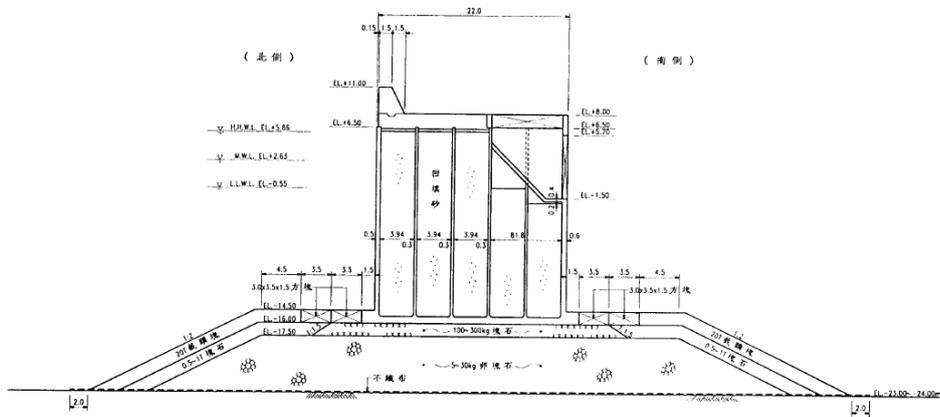


圖5.14 北防波堤延伸段130~440公尺斷面III之標準斷面圖
(交通部運輸研究，1999)

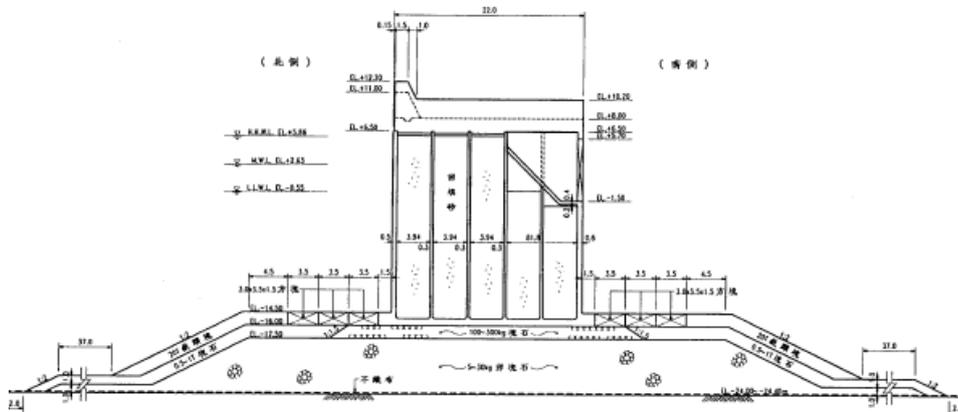


圖5.15 北防波堤延伸段440~480公尺斷面IV之標準斷面圖
(交通部運輸研究，1999)

根據前章分析結果北向颱風波浪對於北防波堤的受力及安定性較為重要，此外根據蔡等人(2015)「港灣結構物受異常波浪影響分析(1/3)」研究結果顯示防波堤受力於最高高潮位時較最低低潮位時為大，考量本研究主要討論氣候變遷影響臺中港北防波堤延伸段之安定性，因此選定臺中港之最高高潮位+5.86m 作為極端條件之潮位資料，並以 NearCoM 模擬臺中港外海北向颱風波浪的不同迴歸期(50 年、100 年、200 年和 250 年)波浪條件，計算到延伸段防波堤前 100 公尺，選擇發生最大波高的斷面區域做為 COBRAS 模式的計算範圍，並以 NearCoM 計算的最大波高做為入射波浪條件，考慮不同颱風波浪迴歸期、氣候變遷影響和發生最大波浪情況，本研究入射波浪條件如表 5-4 所示。由表中的最大波高發生區域(斷面)可以知道北向入射波浪影響最明顯的區域為斷面 I 和 IV，因此分別依照實際之標準斷面圖和地形資料建立臺中港北防波堤近岸結構物數值模式，斷面 I 數值模式建置如圖 5.16，斷面 IV 數值模式建置如圖 5.17，圖中“+”表示物理量測量點，記錄包括波高、波壓、流速等物理量。表 5-4 中分別考慮單獨水位抬升 IPCC AR5(2013)的一般情況與許泰文(2013)報告中提出氣候變遷影響可能造成波高成長 65%及週期成長 25%的改變因子，另外就歷史大波的波浪條件模擬斷面 I 和斷面 IV 兩種情況。

將表 5-4 中各種波浪條件之入射波(以水平方向 100 公尺處未受反射波影響之水位變化)和防波堤堤面波浪以零下切波浪分析法計算入射波和堤面波浪水位之波高和週期繪於圖 5.18、圖 5.19，圖中藍色標誌表示水平方向 100 公尺處之實際波高和週期，綠色標誌表示堤面水位受反射波影響之波高和週期。圖 5.18 顯示水平方向 100 公尺(藍色標誌)在僅水位抬升條件波高變化不大，在入射波高增幅 65%條件下堤前波高比入射波高約增加 10%。而堤前水位(綠色標誌)的波高受反射波影響，增加約為 2 倍。圖 5.19 顯示僅水位抬升條件波浪在水平方向 100 公尺和堤前位置週期變化不大，考慮入射波週期增加 25%條件下，則堤前的波浪週期則略為減小。

表 5-4 不同情境防波堤前 100 公尺之波浪條件

case	迴歸期(年)	RCP	週期(秒)	斷面	水位(公尺)	最大波高(公尺)	說明
1	50	--	11.300	I	28.86	7.77	○
2	50	2.6	11.300	I	29.41	7.77	○
3	50	4.5	11.300	I	29.49	7.77	○
4	50	8.5	11.300	I	29.68	7.77	○
5	50	--	14.125	I	28.86	12.87	■
6	50	2.6	14.125	I	29.41	12.87	■
7	50	4.5	14.125	I	29.49	12.87	■
8	50	8.5	14.125	I	29.68	12.87	■
9	100	--	11.700	I	28.86	8.46	○
10	100	2.6	11.700	I	29.41	8.46	○
11	100	4.5	11.700	I	29.49	8.46	○
12	100	8.5	11.700	I	29.68	8.46	○
13	100	--	14.625	I	28.86	13.70	■
14	100	2.6	14.625	I	29.41	13.70	■
15	100	4.5	14.625	I	29.49	13.70	■
16	100	8.5	14.625	I	29.68	13.70	■
17	200	--	12.200	I	28.86	9.24	○
18	200	2.6	12.200	I	29.41	9.24	○
19	200	4.5	12.200	I	29.49	9.24	○
20	200	8.5	12.200	I	29.68	9.23	○
21	200	--	15.250	I	28.86	14.47	■
22	200	2.6	15.250	I	29.41	14.47	■
23	200	4.5	15.250	I	29.49	14.47	■
24	200	8.5	15.250	I	29.68	14.47	■
25	250	--	12.300	I	28.86	9.45	○
26	250	2.6	12.300	I	29.41	9.45	○
27	250	4.5	12.300	I	29.49	9.45	○
28	250	8.5	12.300	I	29.68	9.45	○
29	250	--	15.375	I	28.86	14.63	■
30	250	2.6	15.375	I	29.41	14.63	■
31	250	4.5	15.375	I	29.49	14.63	■
32	250	8.5	15.375	I	29.68	14.63	■
33	--	--	11.100	I	28.86	8.44	◎
34	--	--	11.100	IV	30.86	8.44	◎

■根據表4-5，代表受氣候變遷影響之波浪條件增益情況，參考許泰文(2013)

◎根據表2-4，代表臺中港實際量測到之歷史大波情況

○根據表4-2，代表一般情況之波浪條件

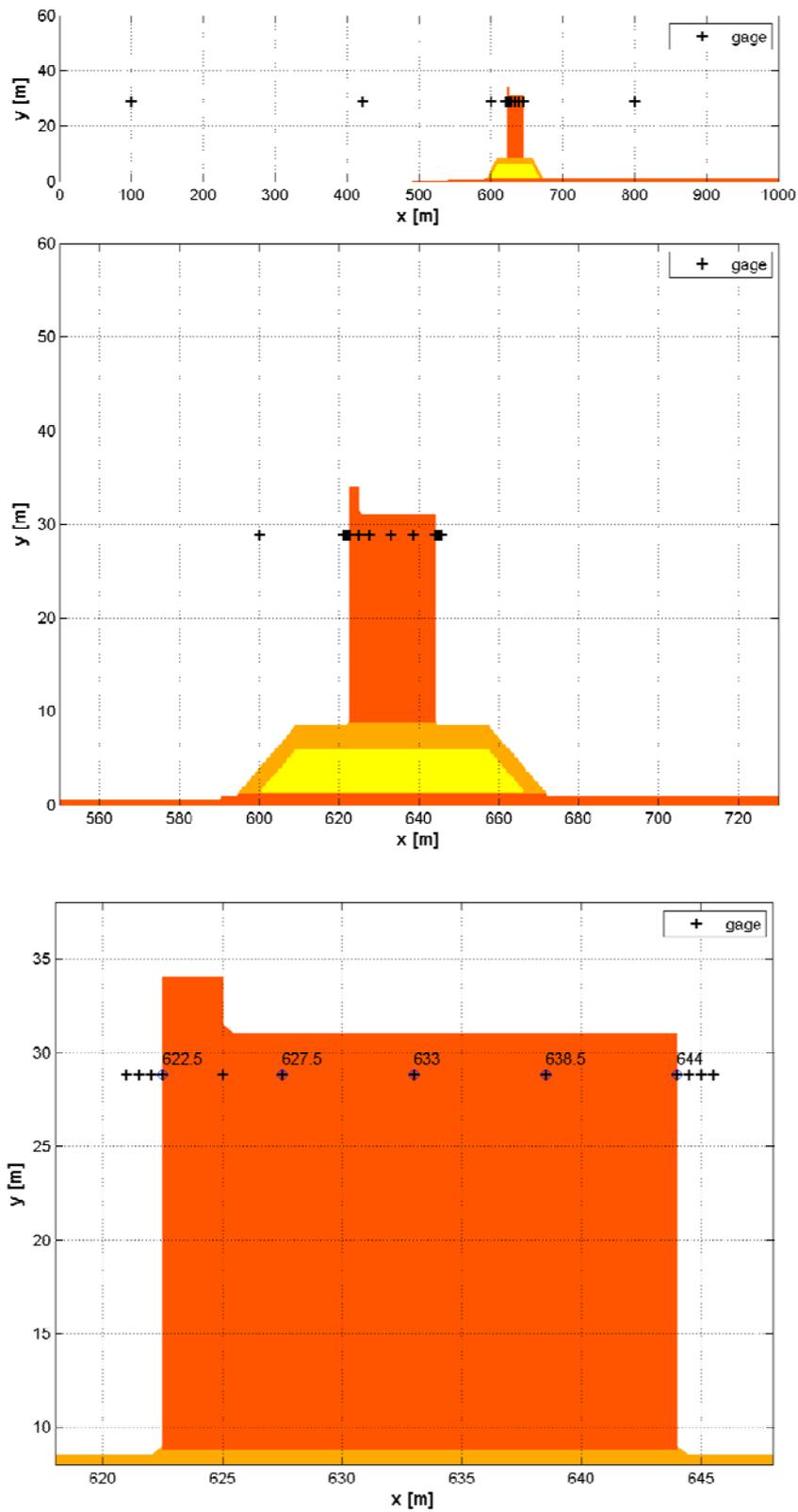


圖5.16 數值模式斷面I地形與結構物示意圖

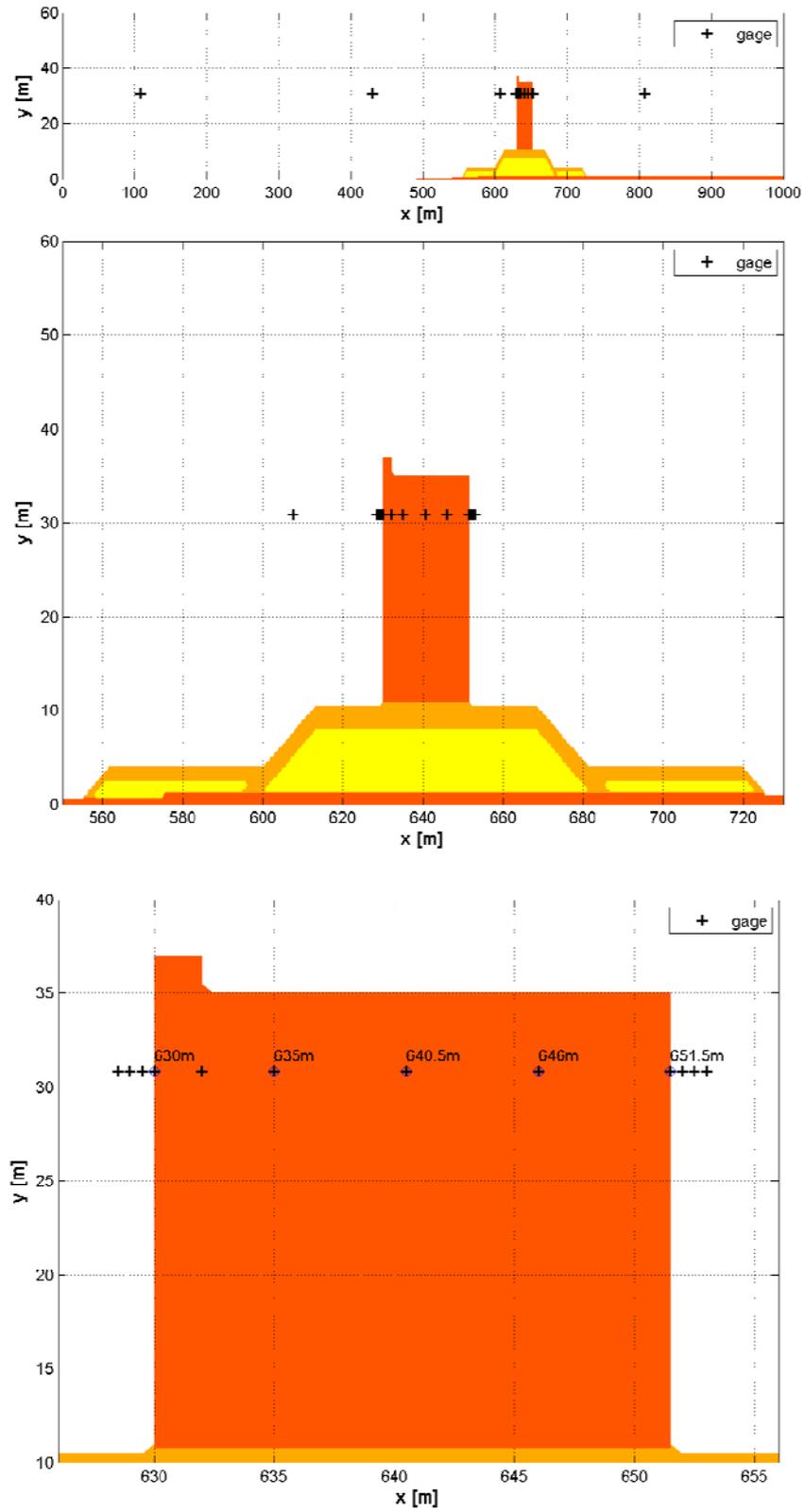


圖5.17 數值模式斷面IV地形與結構物示意圖

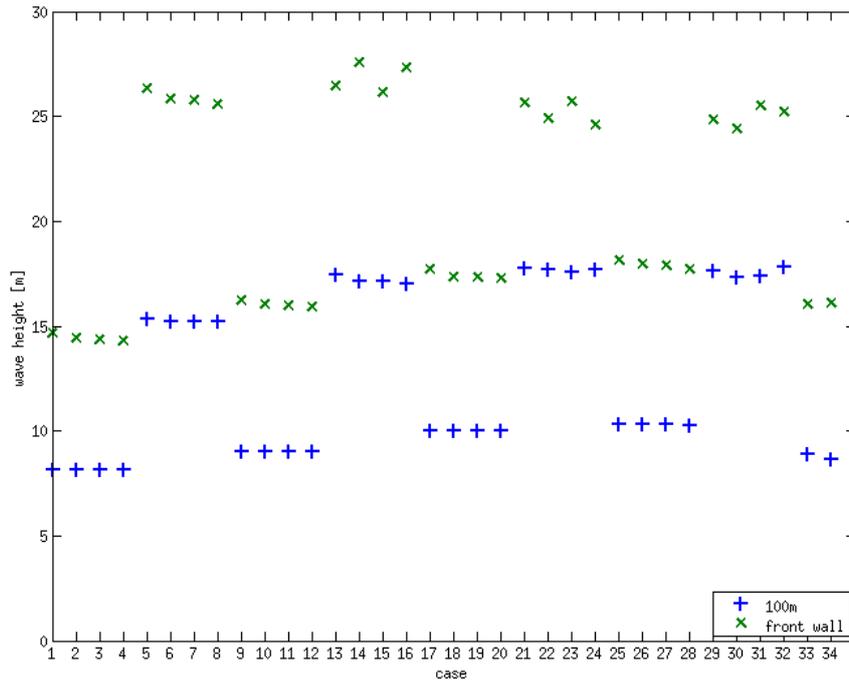


圖5.18 各模擬條件之堤前波高圖

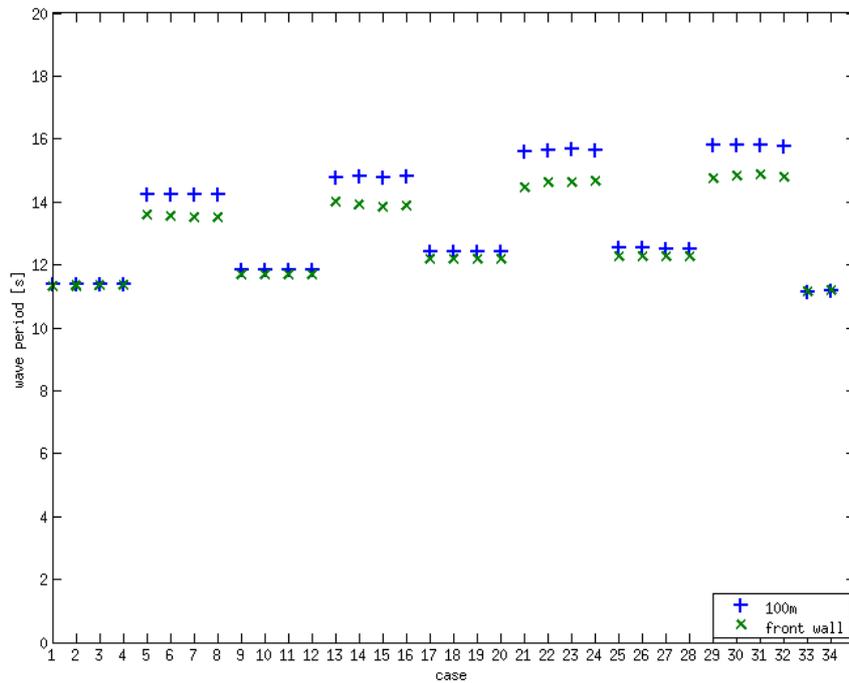


圖5.19 各模擬條件之堤前週期圖

5.4 結構物安定性分析

本研究計算波浪入射防波堤結構物時，其壓力分佈再進一步探討其結構物之安定性。以 case 1 條件在不同時間之壓力分佈計算結果繪製如圖 4.20。圖形顯示在 30 秒時，波浪還沒傳遞到堤前，堤體周圍水位靜止，堤前和堤後屬靜水壓分佈，堤體底部之波壓均勻分布。40 秒時，波浪傳到堤前造成水位抬升，因此堤前波壓高於堤後波壓，堤體底部之波壓分布與水平方向一致。80 秒時，波浪高於堤頂，產生越波。100 秒時，越波造成堤後水位震盪，堤前之波浪於波谷位置，因此其堤後之波壓大於堤前之波壓，堤體底部之波壓分佈和水平方向一致。

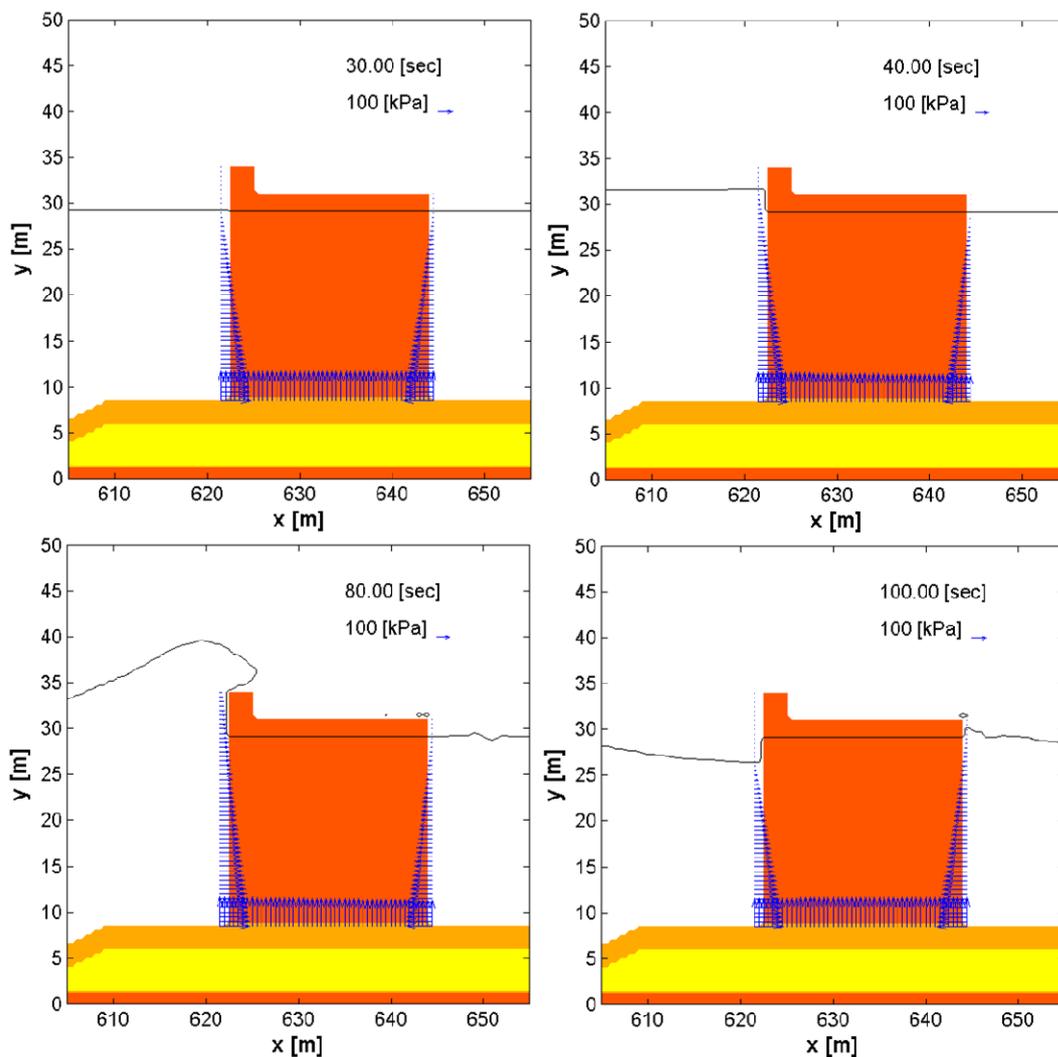


圖5.20 數值模擬水位分布和壓力分布圖 (時間30、40、80和100秒)

防波堤結構物受波力作用後，若作用力太大則可能發生滑動或傾倒，本研究以上節受氣 wj6 候變遷影響的各入射波浪條件，進行結構物之安定性分析。安定性分析需檢討直立壁結構物的滑動與傾倒，工程應用在安定性分析多以安全係數作為參考，滑動與傾倒的安全係數至少需大於 1.2，安全係數計算說明如下。

直立壁部分的滑動安定性需滿足下式：

$$f_s \leq fW/p \quad (5.4.1)$$

式中 f_s 是滑動安全係數，以 1.2 以上為標準， f 是直立壁部分與拋石底床部分的摩擦係數，混凝土對拋石材料間的摩擦係數一般以 0.6 計算， 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：

$$f_o \leq Wt/ph \quad (5.4.2)$$

式中 f_o 是傾倒安全係數，以 1.2 以上為標準， 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。

依據運輸研究所（1999）之「臺中港港口第二期擴建工程規劃—工程初步設計報告」，圖 5.21 為防波堤結構物受波浪作用受力的示意圖，防波堤直立壁於外海側的垂直面稱為堤前直立壁，反之港內的稱為堤後直立壁。直立壁底部和透水拋石基座的接觸面為直立壁底面，堤前直立壁受波浪作用之力為 f_1 ， f_1 對 s_1 支點所作力矩同為 m_1 ，堤後直立壁受波浪作用之力為 f_2 ， f_2 對 s_2 支點所作力矩同為 m_2 ，直立壁底部受波浪作用產生的抬升力為 f_3 ， f_3 對支點 s_1 所作力矩為 m_3 ， f_3 對支點 s_2 所作力矩為 m_4 ，將表 5-4 的各種 case 的條件依據圖 5.21 之各作用力加以計算，其結果如圖 5.22 為以 case 1 分析的結果。圖形顯示直立壁外港側比內港側受力較大，而以堤體底部的受力最大，所造成的力矩隨作用力大小而變化， f_3 對 s_1 力矩 m_3 較對 s_2 力矩 m_4 大。

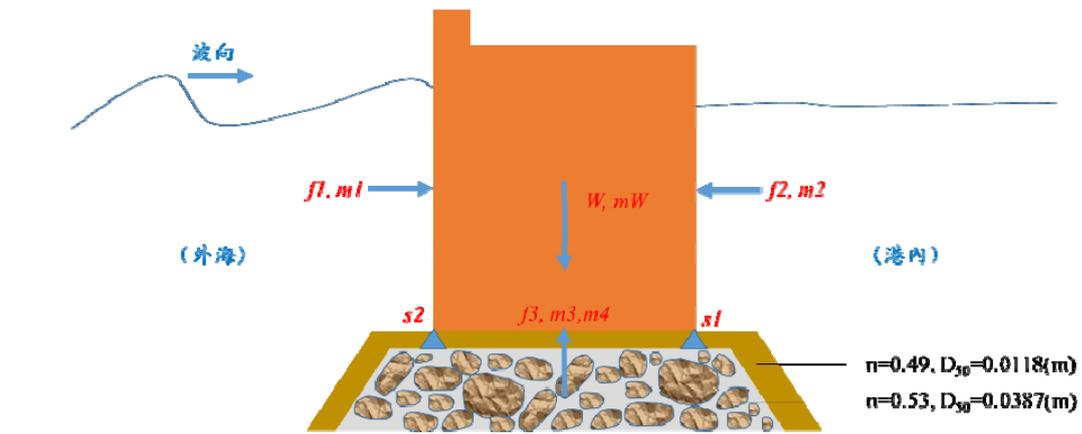


圖5.21 防波堤受力示意圖

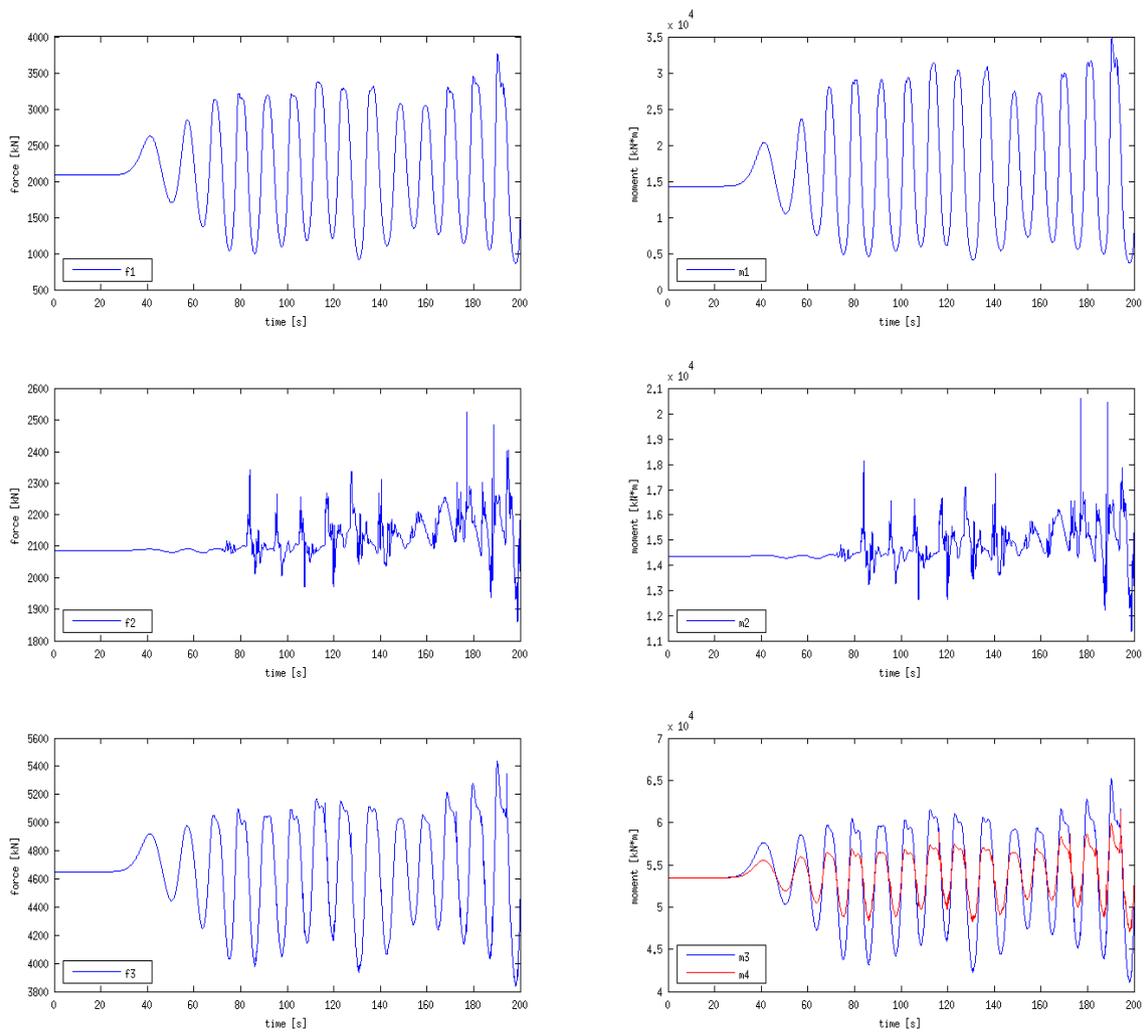


圖5.22 case 1條件各作用力計算結果

假設此直立壁之重量為 W ，其所作力矩為 mW ，而靜水位時，波浪作用力為靜水壓力產生的波力 $f_1=f_2=f_0$ ，堤前和堤後直立壁水平作用力對支點 s_1 的力矩大小 $m_1=m_2=m_0$ 。於設計報告書中僅考慮堤前直立壁所受到的波浪作用力之動壓，因此假設堤後為靜穩狀態，保持靜水位狀態，故滑動安全係數公式如式(5.4.3)，傾倒安全係數僅需考慮 s_1 支點所受的力矩，公式如式(5.4.4)，而本次研究討論氣候變遷造成水位抬升之影響評估，若考慮未來水位抬升可能造成越波量增加的影響，勢必須修正上述之安全係數的計算。因為當波浪於堤前碎波、衝擊壁面、而發生越波後，將造成堤後水位的變化，影響堤後直立壁的受力情形。為了討論越波影響的防波堤安定性，由於堤後的水位變動，因此需考慮相位差導致堤前和堤後的相位差異，其修正之滑動安全係數需分為波浪作用力之水平合力同波向方向如式(5.4.5)，和水平合力反波向方向如式(5.4.6)，考慮波浪作用力反向的情形，以 s_1 為支點之傾倒安全係數如式(5.4.7)，而以 s_2 為支點之傾倒安全係數如式(5.4.8)。

$$f_s \leq -fW/(f_1-f_0) \quad (5.4.3)$$

$$f_o \leq Wt/(m_1+m_3-m_0) \quad (5.4.4)$$

$$f_s^+ \leq fW/(f_1-f_2) \quad (5.4.5)$$

$$f_s^- \leq -fW/(f_1-f_2) \quad (5.4.6)$$

$$f_o^1 \leq Wt/(m_1+m_3-m_2) \quad (5.4.7)$$

$$f_o^2 \leq Wt/(m_2+m_4-m_1) \quad (5.4.8)$$

以 50 年迴歸週期一般情況條件，計算不同情境下波浪作用之水平合力計算方式比較於圖 5.23，各情境之波浪條件設定如表 5-4，case 1 為原始條件，case 2 為 RCP 2.6 的情境，case 3 為 RCP 4.5 的情境，case 4 為 RCP 8.5 的情境，圖中紅色實線是考慮無越波產生之情況，即堤後水位恆不改變的情況，波浪作用之水平合力計算方式為 $f=f_1-f_0$ ，藍色實線是考慮越波產生之情況，堤後水位隨越波情況的發生而變動，波浪作用之水平合力計算方式為 $f=f_1-f_2$

圖 5.23 中之 case1~case4 條件，因為越波發生較少，所以考慮越波和不考慮越波的水平作用力差異較小。但是當波浪條件之波高加大，造成越波發生增加後，如考慮氣候變遷影響造成波高增大的 case21 條件，水平作用力計算結果如圖 5.24 所示，圖形顯示較大的波浪造成越波發生機會增加，因此考慮堤後越波的作用力(藍色實線)與不考慮堤後越波的作用力(紅色實線)差異明顯增加，尤其以反作用力增加最為明顯，如圖中 163sec 與 200sec 時刻。以上顯示波浪作用力受堤後水位變動修正後，反向作用力增大，因此反向作用力影響不應忽視，本研究後續探討波浪作用力水平方向合力，均考慮堤後水位變化的水平方向合力。

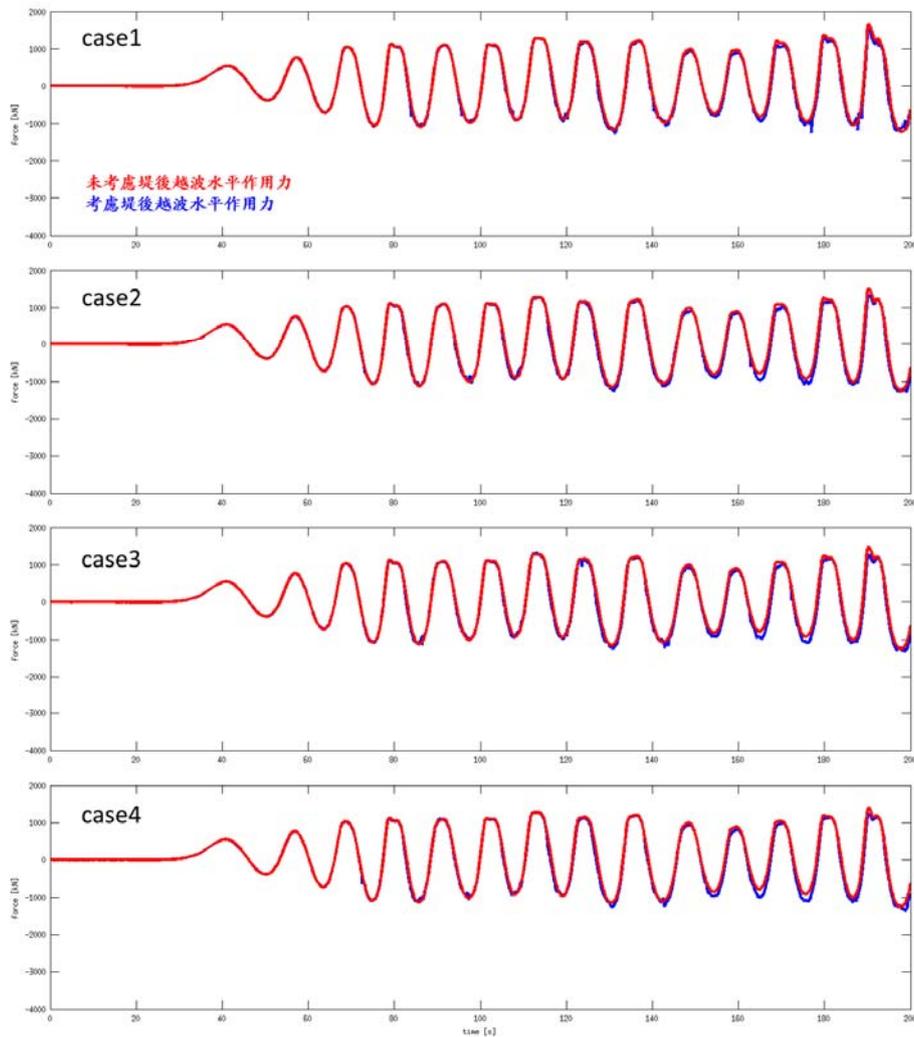


圖5.23 有無越波之水平合力比較圖(case1~case4)

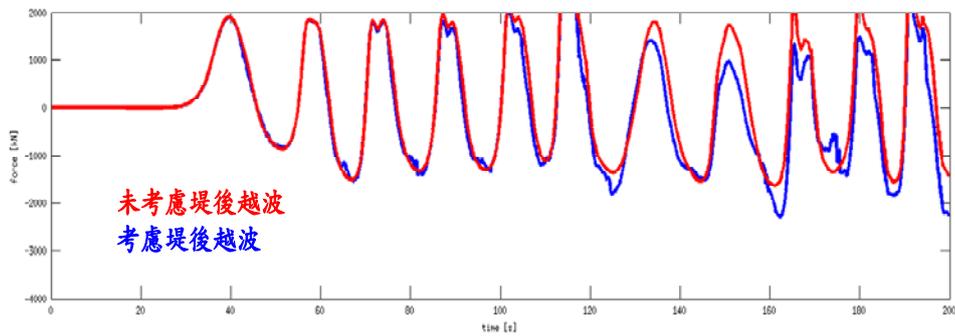


圖5.24 有無越波之水平合力比較圖(case21)

為了比較不同情境的波浪作用力水平方向合力差異，將不同氣候變遷影響情境減去原始條件之水平方向作用力繪製如圖 5.25 所示，藍色實線是 RCP 2.6 情境的作用力差異量，綠色實線是 RCP 4.5 的情境，而紅色實線是 RCP 8.5 的情境，由圖可看出於 RCP8.5 情境下時，其水平作用力的差異量較其他情境大，而 RCP2.6 的差異量為最小，而 RCP2.6 情境差異量之標準差為 114.73 kN/m ，RCP8.5 情境之標準差為 164.63 kN/m ，可見水平作用力之變動情況隨不同水位抬升情形而增大，說明氣候變遷影響下，近岸結構物如防波堤所受的波浪作用力也將加大，因此探討結構物安定必須考量氣候變遷造成水位抬升的影響。

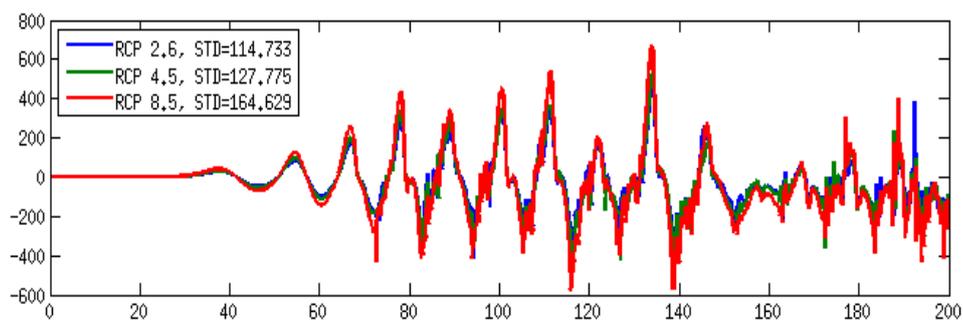


圖5.25 不同情境水平波浪作用力差異量比較圖

以 COBRAS 模式計算各網格點逐時的壓力物理量，並計算不同情境下的滑動安全係數，圖 5.26 為 case1~case4 條件下計算分析的結果，圖中藍色標誌為水平合力同波向方向的滑動安全係數 fs^+ ，其公式參考 5.4.5 式，紅色標誌為水平合力反波向方向的滑動安全係數 fs^- ，如式

(5.4.6)所示，黑色虛線表示不考慮越波的最小滑動安全係數 f_s ，如式 (5.4.3)所示。將表 5-4 中各種波浪條件考慮堤後越波之 f_s^+ 和 f_s^- 集合之最小值和不考慮越波情況之 f_s 繪於圖 5.27 中，圖中藍色標誌是考慮堤後越波之動態最小滑動安全係數，綠色標誌是不考慮越波情況之滑動安全係數，紅色標誌是合田波壓公式計算結果，虛線為安全係數 1.2 之臨界線。圖形顯示合田波壓公式計算的結果明顯高估於考慮越波情況和不考慮越波情況之數值計算結果，其中 case9~case12、case18~case20、case23、case25~case31、case33 之考慮越波之滑動安全係數小於不考慮越波情況之滑動安全係數，說明考慮越波情況的堤後水位變化對滑動安定性分析的重要性。此外，case13~case16、case21~case24 和 case29~32 其合田波壓公式計算的結果滑動安全係數均小於臨界值 1.2，表示為安全的，但在考慮越波情況之動態滑動安全係數卻小於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析具有一定的影響。上述的 case 條件為迴歸期 100 年以上條件，因此，目前以 50 年迴歸週期為設計基準，在 50 年迴歸期之波浪條件受氣候變遷影響的情境下仍然屬安定，但是在工程設計的角度，隨著氣候變遷的影響變化，在港灣工程選擇設計迴歸期是否需要調整至更長迴歸期時間，這部分仍須進一步研究。

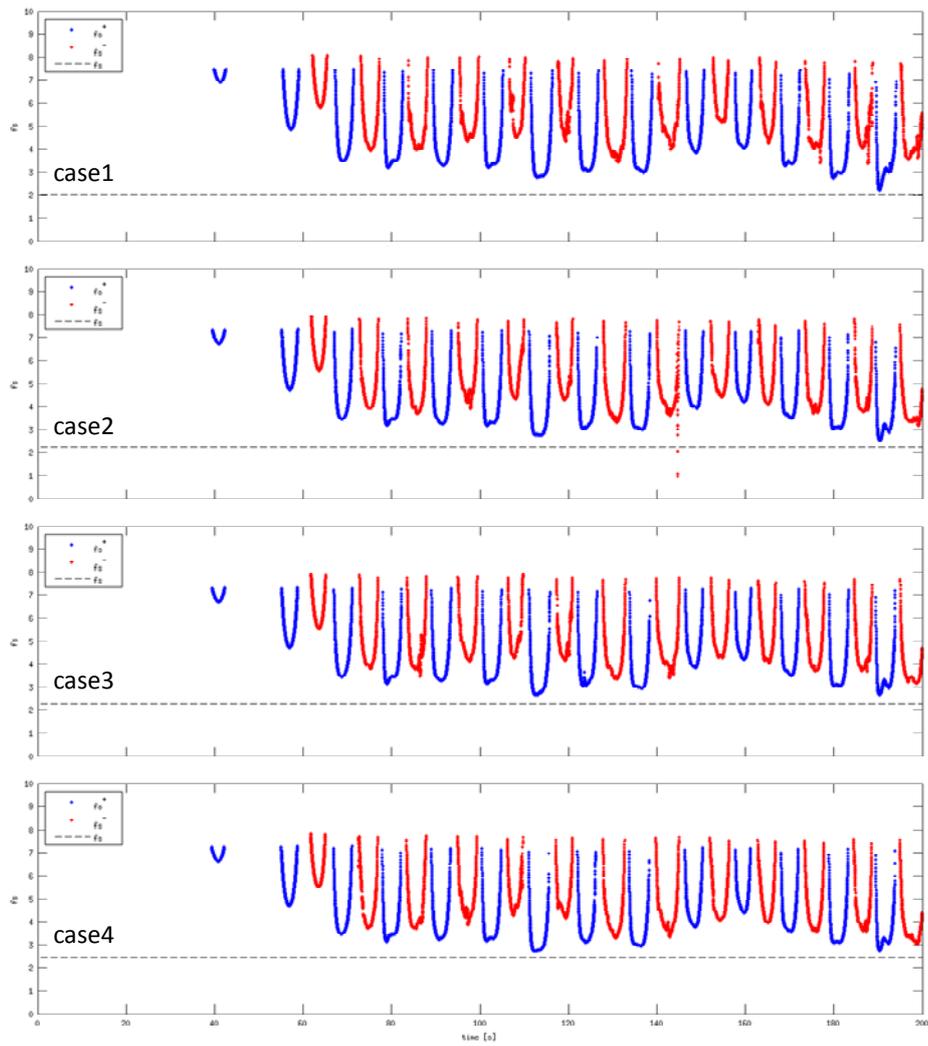


圖5.26 不同情境滑動安全係數時間序列圖

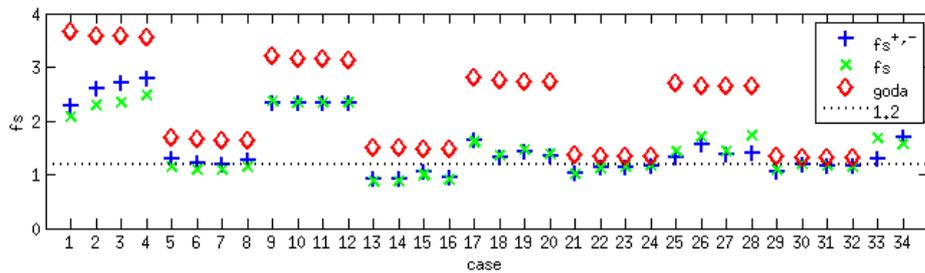


圖5.27 不同情境滑動安全係數比較圖

圖 5.28 為 case1~case4 的傾倒安全係數逐時分布圖，圖中藍色標誌為水平合力同波向方向的傾倒安全係數 fo^1 (式 5.4.7)，紅色標誌為水平合力反波向方向的傾倒安全係數 fo^2 (式 5.4.8)，黑色虛線表示不考慮越波情況的最小傾倒安全係數(式 5.4.4)，以此最小值作基準值。圖形顯示同波向方向的傾倒安全係數小於反波向方向的傾倒安全係數，顯示結構物的傾倒受到正波向威脅較大。

將表 5-4 中各種波浪條件考慮堤後越波之 fo^1 和 fo^2 集合之最小值和不考慮越波情況之 fo 計算其傾倒安全係數分析如圖 5.29 所示。圖中藍色標誌是考慮堤後越波之動態最小傾倒安全係數，綠色標誌是不考慮越波情況之傾倒安全係數，紅色標誌是合田公式計算的結果，虛線為安全係數 1.2 之臨界線，圖中合田波壓公式計算結果明顯高估於考慮越波情況和不考慮越波情況之數值計算結果，而 case7、case9、case10~case12、case17~case21、case23~case27、case29、case30 和 case33 之考慮越波情況之動態傾倒安全係數小於不考慮越波情況之傾倒安全係數，因此，考慮越波情況的堤後水位變化對傾倒安定性分析是必要的。

圖形顯示所有的計算條件，在考慮越波情況下，傾倒安全係數皆大於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析而言，傾倒的安定性在設計迴歸期或者更長之迴歸期都是安定的。

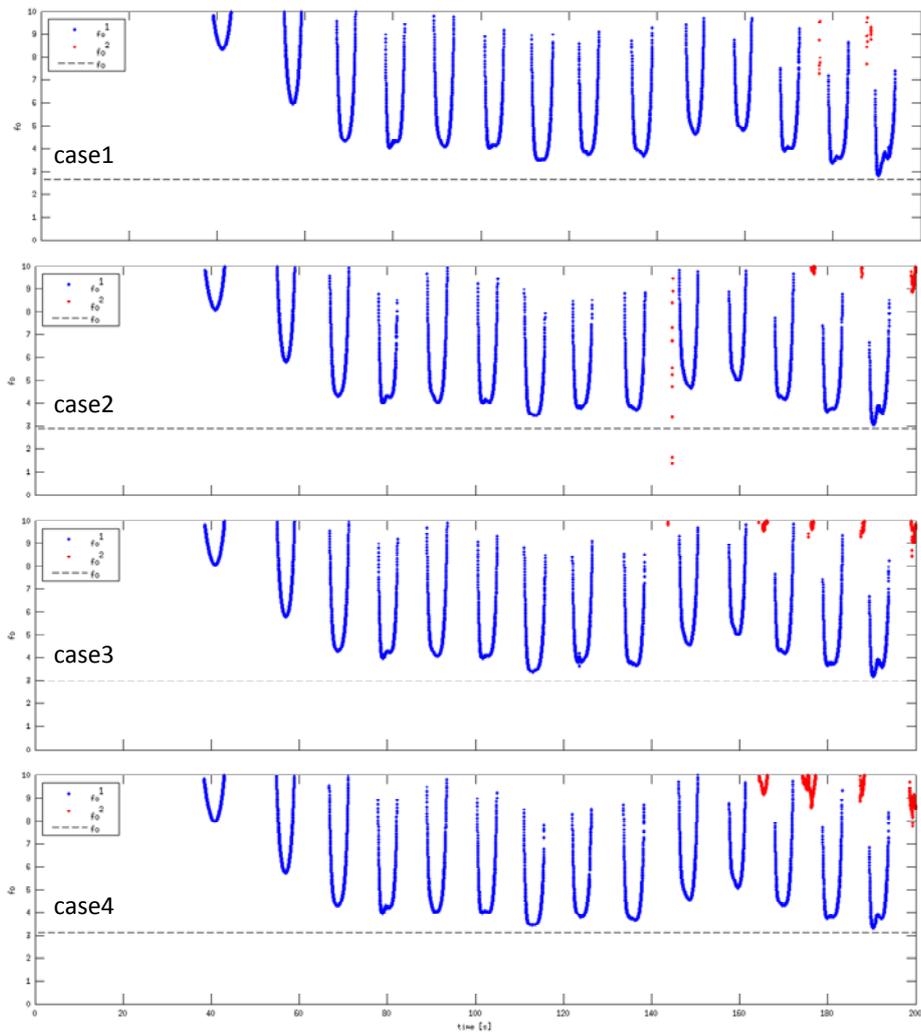


圖5.28 不同情境傾倒安全係數時間序列圖

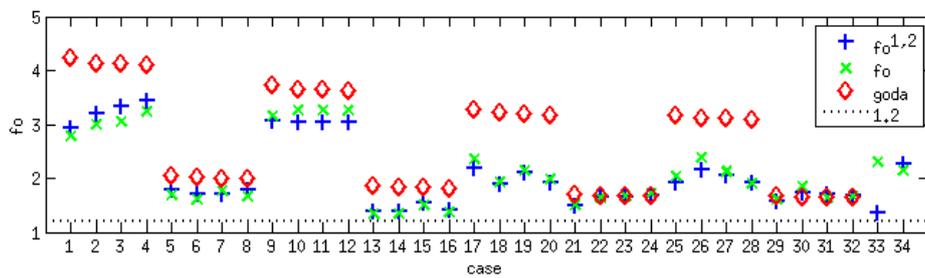


圖5.29 不同情境傾倒安全係數比較圖

第六章 結論與建議

港灣構造物常需建造長結構物如防波堤，以遮蔽波浪達到航道與港池穩靜的效果。當波浪及海流經過大型結構物再加上近岸的水深變化，相互間發生複雜的影響作用，而水流以及波浪場的改變，常會威脅船隻航行安全，亦容易造成底床沖刷而威脅堤體的穩定安全。此外，近年來全球極端的氣候事件頻傳，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。本研究為 4 年期之第 3 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，於港灣構造物附近同時進行多項海氣象現場觀測調查與分析，探討波浪和水流與港灣結構物之互制作用；在極端波浪影響方面，以本研究前一年度所建置之數值模式，計算並分析探討極端波浪對港灣結構物的影響。本研究成果期能提供施政、設計、施工以及學術相關單位之參酌，並提昇國內港灣海岸工程之研究技術水準。茲將本研究結論與建議敘述如下：

6.1 結論

1. 以定點海流儀及浮標追蹤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）於堤頭觀測站附近，以漲潮時段流速最大，流向介於北北東至北北西之間，流向由上層之北北東向，往較深之下層逆時針轉為北北西向，較深之底層處流向不受漲退潮影響亦不受風趨動影響，流速以中層較大而底層最小，在此區域有一股恆流流向北方，流速約 0.3~0.5m/sec，此春季恆流現象與去年度在夏季 6 月所觀測結果相近。

2. 以船碇海流儀觀測北防波堤附近之三維空間流場分析結果，漲潮時水流為往東北向流，退潮時為往西南向流，顯示漲潮水體由臺灣西側南北端往臺灣海峽臺灣中部流，而在臺中港北防波堤北側相遇，退潮時則往臺灣南北兩端回退；潮流引起的水流在較深底層處則不明顯亦即在中層以及上層水深處潮流會主導水流方向。此外，海流方向受到大型港灣結構物的影響，海流前進至結構物附近會順著結構物往外海處流。平均海流流向為北北東至東北間，受北防波堤影響，流向會呈順時針旋轉，在堤頭以西約 200m 處流速較大，其可能是造成堤頭形成沖刷洞的原因。
3. 以船碇海流儀觀測分析之表層、中層與底層作橢圓分析結果顯示，表層與中層之半日潮長軸明顯大於全日潮，故本區域之潮流特性以半日潮為主；底層海流因受海底地形的影響，半日潮與全日潮長軸相差不多。此外，表層、中層及底層皆是半日潮潮流橢圓比全日潮潮流橢圓扁平，而表層及中層潮流橢圓扁平程度相當，且均較底層扁平。在潮流橢圓主軸向上，全日潮主軸向約呈東-西或東北東-西南西方向，半日潮主軸向多呈東北-西南方向的趨勢，與 M2 分潮軸向相似。半日潮或全日潮，呈現表層與中層相似，而與底層不同，主要原因可能底層，受海底地形變化影響。
4. 以本研究建置之模式，進行時序列波壓以安定計算分析，在滑動安全係數及傾倒安定係數上，比傳統以 Goda 公式僅考慮定水位計算的值低，故未來在設計港灣結構物時，應考慮以時序列波動方式分析其結構物受力與安定性。考慮越波之滑動安全係數小於不考慮越波情況之滑動安全係數，顯示考慮越波情況的堤後水位變化對滑動安定性分析的重要性。
5. 考慮未來因氣候變遷造可能發生的極端海象條件，在颱風波浪回歸週期 100 年以上條件下，對於港灣結構物的滑動安全係數會小於安全值 1.2，堤體安全受威脅。在未來極端海象發生頻率可能增加情

況下，目前結構物設計波高用 50 年波浪迴歸週期作設計是否需要修正，值得進一步研究探討。

6.2 建議

1. 極端海象條件應包括地震引起海嘯，其對港灣結構物的影響極大，臺灣港灣結構物是否能承受不同程度的海嘯波，應深入研究以提供港務單位針對海嘯可能造成的災損有所瞭解，並可提供防範及減災之參考，建議未來選擇臺灣可能受海嘯侵襲之港區，進行港灣結構物對於海嘯波之安定性作研究探討。
2. 本研究目前已於夏季與春季在臺中港北防波堤附近海域，以多種觀測儀器同時監測海象，希望未來能夠在冬秋季同時執行上述多項海象觀測作業，以得到本研究區域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並整理分析、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與波流場互制影響及結構物受異常波浪作用之安全穩定分析，成果可提供各港務單位及工程設計單位對於港灣結構物附近的水理機制、造成地形沖刷以及安全穩定更加瞭解，並可作為未來港灣擴建、改善結構物穩定、堤頭沖刷問題及防災之參考。

參考文獻

1. 宇泰工程顧問有限公司，1999，台中港港口第二期擴建工程規劃，交通部運輸研究所。
2. 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。
3. 交通部中央氣象局，1999~2014，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. 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。
6. 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。
7. 許泰文，2013，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(2/2)，經濟部水利署。
8. 蔡立宏、曾相茂、黃茂信，2015，港灣構造物與波流互制研究(2/4)，2015,5，交通部運輸研究所。
9. 蔡立宏、楊炳達、許弘莒、李孟學，2015，港灣結構物受異常波浪影響分析 (1/3)，交通部運輸研究所。
10. 交通部中央氣象局網站，<http://www.cwb.gov.tw/>
11. 臺灣氣候變遷與資訊平臺計畫網站，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>
12. 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

13. 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.
14. 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.
15. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, WorldScientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
16. 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.
17. Guancho, R., I.J. Losada and J.L. Lara. (2009). Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability, *Coastal Engineering*, 56, 543-558
18. 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.
19. 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.
20. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
21. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen,

- J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
22. 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. 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
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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.
 29. 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.

30. Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R, and Gonzalez-Ondina, J. M. 2008. “Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters”, *Coastal Engineering*, 55, 47-62.
31. 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.
32. Rodi, W., 1980, Turbulence Models and Their Application in Hydraulics—A state of the Art Review, *International Association for Hydraulic Research Publication*, Delft, Netherlands.
33. Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H., 2010, “Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes”, *Coastal Engineering*, 57, 407-423.
34. Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F., 2001, “Laboratory Experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater”, *Coastal Engineering*, 44, 117-139.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.

40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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
44. 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.
45. Spydell, M. S., Feddersen, F., Olabarrieta, M., and Chen, J. L., 2015, “Observed and modeled drifters at a tidal inlet”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI 10.1002/2014JC010541.
46. Svendsen, I. A. and Putrevu, U., 1990, “Nearshore circulation with 3-D profiles”, *Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 241-254.
47. 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.
48. 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.

49. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. and Mastin, C. W., 1985, “*Numerical grid generation: foundations and applications*”, Amsterdam: North-hollan.
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. Van Gent, M. R. A., 1995, “Wave interaction with permeable coastal structures,” PhD thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.