102-33-7682
MOTC-IOT-101-H3DB005d

港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究（2/4）

交通部運輸研究所

中華民國 102 年 2 月

102-33-7682
MOTC-IOT-101-H3DB005d

港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究（2/4）

著 者：李忠潘、陳陽益、薛憲文、曾以帆
邱永芳、蘇青和、李俊穎

交通部運輸研究所
中華民國 102 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究. (2/4) /
李忠潘等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所,
民 102.02
面 ; 公分
ISBN 978-986-03-6166-7(平裝)

1.防波堤 2.海岸工程

443 102003243

港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究（2/4）

著　　者：李忠潘、陳陽益、薛憲文、曾以帆、邱永芳、蘇青和、李俊穎
出版機關：交通部運輸研究所
地　　址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網　　址：www.ihmt.gov.tw (中文版＞中心出版品)
電　　話：(04)26587176
出版年月：中華民國 102 年 2 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 80 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： 300 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010200329　　ISBN：978-986-03-6166-7 (平裝)
著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)
本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部
運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究（2/4）</td></tr>
<tr><td>國際標準書號
ISBN978-986-03-6166-7 (平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010200329</td><td>運輸研究所出版品編號
102-33-7682</td><td>計畫編號
101-H3DB005d</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：港研中心
主管：邱永芳
計畫主持人：邱永芳
研究人員：蘇青和、李俊穎
參與人員：錢爾潔、馬維倫
陳正義，張麗瓊
聯絡電話：04-26587132
傳真號碼：04-26564415</td><td colspan="2">合作研究單位：國立中山大學
計畫主持人：李忠潘
研究人員：陳陽益、薛憲文、曾以帆、廖奕鈞
劉黃宗隆、莊曜陽、林義復
地址：80424 高雄市蓮海路 70 號
聯絡電話：07-5255067</td><td>研究期間
自 101 年 1 月
至 101 年12 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：防波堤堤頭、沖蝕、台中港、麥寮港、海象調查、Flow-3D</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

波浪或海流通過結構物時，可能在結構物臨近底床處造成沖蝕，導致結構的破壞甚或傾倒，港灣防波堤堤頭附近的海底地形，可能因為波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕。國內的港灣防波堤堤頭侵蝕實例有台中港及麥寮工業港，其中以麥寮工業港為例，其北防波堤堤頭原設計水深為 -22m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形有一處約 500m × 100m 的深坑，最深可達 -48m，沖刷深度達到 26m。由於防波堤堤頭的海底地形侵蝕，嚴重危及防波堤堤身及港灣船隻航行的安全，然而造成侵蝕的原因與機制仍然未知，因此急需進一步的觀察、研究、模擬、與驗證，以期提出有效的防制對策與工法。

本研究屬交通部運輸研究所「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃四年合作研究計畫之第二年。以上述兩個港口為主要研究對象，進行堤頭附近實際波流場及海底地形變化特性與機制的觀測、分析、模擬、與驗證。主要研究方法將透過數值方法與水工模型試驗 (第三、四年)，與實測的波流場及海底地形侵蝕特性進行比對與修正。研究主題為防波堤堤頭附近海底地形侵蝕的文獻收集與分析；臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析；麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場的現場觀測與分析；以及利用數值模式 Flow-3D 進行波、流場數值模擬，包括參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的建立與測試等。

本研究結果探討臺中港及麥寮工業港堤頭附近實際波流場對海底地形變化影響，可提供臺中港務分公司及麥寮工業區專用港管理股份有限公司參考並可作為後續堤頭侵蝕防制工法研擬的參考。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本出版品取得方式</td></tr>
<tr><td>102 年 2 月</td><td>364</td><td>300</td><td>凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。</td></tr>
<tr><td colspan="4">機密等級：
□密□機密 □極機密 □絕對機密
（解密條件：□ 年 月 日解密，□公布後解密，□附件抽存後解密，
□工作完成或會議終了時解密，□另行檢討後辦理解密）
■普通</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS

INSTITUTE OF TRANSPORTATION

MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Scouring Mechanism and Prevention Method for Breakwater Head (2/4)

ISBN	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-03-6166-7 (pbk)	1010200329	102-33-7682	101-H3DB005d

DIVISION: Harbor & Marine Technology Center
DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-Fang
PROJECT STAFF: Su Ching-Ho, Lee Chun-Ying
PARTICIPATOR; Chien Er-Jier, Ma Wei-Lun, Chen Cheng-Yi, Chang Lee-Chung
PHONE: 04-26587132
FAX: 04-26564415

PROJECT PERIOD
FROM January 2012
TO December 2012

RESEARCH AGENCY: National Sun Yat-sen University
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee Chung-Pan
PROJECT STAFF: Chen Y.Y., Shyue S.W., Tseng I.F., Liao Y.C., Liu-Huang Z.L., Chuang Y.Y., Lin I.F.
ADDRESS: No. 70, Lienhai Rd., Kaohsiung 80424, Taiwan, R.O.C.
PHONE: (07) 5255067

KEY WORDS:

BREAKWATER HEAD, SCOURING, TAICHUNG HARBOR, MAILIAO HARBOR, WAVE CLIMATE MONITORING, FLOW-3D

ABSTRACT:

The effect of wave-current and fluid-structure interaction on the offshore structures may erode around the seabed, which causes damage to or collapsing of the structures. Moreover, seabed topography near the end of the breakwater could be eroded by the contraction scour. In Taiwan, Taichung Harbor and Mailiao Harbor were cases concerning seabed erosion and scour near the breakwater head. As with the instance of Mailiao Harbor, the design depth in the entrance that closes to the north breakwater head was -22m. According to current sounding surveys of topography, there is a 500m x 100m deep pit with the maximum sounding of -48m near the breakwater head, which has been scoured approximately -26m. Although seabed erosion and scour near the breakwater head has become a serious threat to breakwater structures and the safety of navigation, the reasons and mechanisms that caused the erosion are still unknown. Therefore, there is an urgent need for further observation, research, simulation and verification in order to make effective prevention strategies and construction methods.

The main research objects in the second year of the four-year project regard Taichung Harbor and Mailiao Harbor, and the theme study contains the search and literature analysis on the erosion of the seabed topography, detection and measurement of the seabed scours, site observation and analysis of waves and currents of the breakwater heads of these two Harbors respectively, and also the establishment of a Flow-3D numerical model for both of them.

The results of this study are a major reference for scouring mechanism of breakwater head in Taichung Harbor and Mailiao Harbor.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
February 2013	364	300	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

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

目　錄

中文摘要.....I
英文摘要.....II
目錄.....III
圖目錄.....VI
表目錄.....XV
第一章　計畫背景分析.....1-1
1.1　計畫緣起.....1-1
1.2　研究目的.....1-1
1.3　研究範圍.....1-2
1.4　工作項目.....1-4
1.5　相關研究文獻.....1-5
第二章　基本資料蒐集與分析.....2-1
2.1　氣象資料.....2-2
2.2　海象資料.....2-4
2.2.1　波浪.....2-4
2.2.2　颱風波浪推算.....2-13
2.2.3　海流.....2-16
2.2.4　潮位.....2-22
2.3　海域地形變化.....2-23
2.4　防波堤興建過程.....2-43
2.4.1　斷面設計.....2-43
2.4.2　施工過程.....2-45
第三章　防波堤堤頭地形量測與分析.....3-1

3.1 測量作業事項.....3-1
3.1.1 監測範圍及頻率.....3-1
3.1.2 監測方式.....3-2
3.1.3 儀器介紹.....3-7
3.1.4 地形測量前置作業.....3-9
3.2 水深測量成果與分析.....3-13
3.2.1 臺中港北防波堤.....3-13
3.2.2 麥寮工業港北防波堤.....3-31
第四章 潮波流調查.....4-1
4.1 作業內容.....4-1
4.2 作業方式.....4-2
4.3 測區海域潮波流結果分析.....4-2
4.4 本年度與去年度資料比對分析.....4-12
第五章 防波堤堤頭沖蝕數值模擬.....5-1
5.1 FLOW-3D 模式介紹.....5-1
5.1.1 理論基礎.....5-2
5.1.2 邊界與網格處理方法.....5-8
5.2 防波堤鄰近海域流場數值模擬.....5-12
5.2.1 計算範圍.....5-12
5.2.2 模式參數設定.....5-13
5.2.3 潮位邊界流場模擬結果與分析.....5-16
5.3 防波堤鄰近海域造波數值模擬.....5-25
5.3.1 FLOW-3D 造波模式驗證.....5-25
5.3.2 防波堤堤頭波場計算範圍及水深地形.....5-33

5.3.3 輸入條件.....5-34
5.3.4 波場中自由水面變化.....5-35
5.3.5 波浪作用下引發的流況變化.....5-46
5.4 綜合結論.....5-78
第六章 防波堤堤頭沖蝕特性分析.....6-1
6.1 防波堤堤頭附近地形侵淤分析.....6-1
6.2 堤頭沖蝕特性分析.....6-6
6.3 六大港海流特性分析.....6-27
6.4 麥寮港堤頭沖蝕與海流的關係分析.....6-35
6.5 底床掏刷之臨界分析.....6-40
第七章 水工模型試驗規劃.....7-1
第八章 結論與建議.....8-1
8.1 結論.....8-1
8.2 建議.....8-4
參考文獻.....參-1
附錄一 年度現場觀測記錄情形.....附 1-1
附錄二 報告審查意見處理情形.....附 2-1
附錄三 期末簡報資料.....附 3-1

圖 目 錄

圖 1.1　臺中港北防波堤延伸歷程圖 1-3
圖 1.2　麥寮工業區各區段海堤位置圖 1-3
圖 1.3　局部沖刷變遷圖 1-9
圖 1.4　沖刷深度與沖刷時間及水流速度關係圖 1-9
圖 1.5　直立樁附近水流流況示意圖 1-9
圖 1.6　人工魚礁模型隨時間變化之沖刷等高線圖 1-11
圖 1.7　人工魚礁模型在不同水流攻角下局部沖刷坑俯視圖 1-11
圖 1.8　直立堤堤頭附近水流流況示意圖 1-15
圖 1.9　直立堤堤頭附近波流共生之掏深關係 1-15
圖 1.10 防波堤堤頭露水高與掏深深度寬度關係 1-16
圖 1.11 具護基保護工之直立堤堤頭附近 KC 值與掏深關係 1-17
圖 1.12 直立堤與斜坡拋石堤之堤前掏刷關係 1-17
圖 2.1　雲林縣離島工業區海氣象觀測站位置圖 2-1
圖 2.2　臺中港海氣象觀測站位置圖 2-2
圖 2.3　侵襲臺灣之颱風路徑統計圖 (1958～2011) 2-3
圖 2.4　雲林海域 THL1 測站 1997~2010 年間波浪玫瑰圖 2-5
圖 2.5　雲林海域 THL2B 測站 2001~2010 年間波浪玫瑰圖 2-5
圖 2.6　兩測站之月平均與月最大示性波高分佈 2-7
圖 2.7　臺中港 2003 至 2009 年平均示性波高、週期波向月統計分佈 ..2-9
圖 2.8　臺中港 2003 至 2009 年平均示性波高、週期之月統計 2-10
圖 2.9　雲林海域 YLCW 測站歷年之流速流向玫瑰圖 2-17
圖 2.10 雲林海域 YLCW 測站歷年之平均流速與流向變化圖 2-18

圖 2.11 雲林海域 YLCW 歷年之最大流速與對應流向圖 2-18
圖 2.12 雲林海域 YLCW 歷年之淨流流速與流向圖 2-19
圖 2.13 臺中港 2003 至 2009 年海流流速、流向及最大流速之月統計 2-21
圖 2.14 臺中港 2003 至 2009 年海流流速、流向之月統計分佈圖 2-21
圖 2.15 臺中港 1999 至 2009 年之潮位統計分佈圖 2-23
圖 2.16 雲嘉海域歷年海岸線變遷 2-24
圖 2.17 麥寮工業區各區段海堤位置圖 2-25
圖 2.18 雲林離島工業區海域 80~99 年實測地形水深圖 2-26
圖 2.19 雲林離島工業區海域 82-85 年間實測地形侵淤變化 2-28
圖 2.20 雲林離島工業區海域 85-89 年間實測地形侵淤變化 2-28
圖 2.21 雲林離島工業區海域 89-93 年間實測地形侵淤變化 2-29
圖 2.22 雲林離島工業區海域 93-96 年間實測地形侵淤變化 2-29
圖 2.23 雲林離島工業區海域 96-99 年間實測地形侵淤變化 2-30
圖 2.24 雲林離島工業區海域 82-99 年間實測地形侵淤變化 2-30
圖 2.25 麥寮工業區海域斷面位置圖 2-31
圖 2.26 雲林離島工業區海域 82~99 年間斷面地形變化 2-32
圖 2.27 臺中港海域斷面位置圖 2-34
圖 2.28 臺中港海域 85~95 年間斷面地形變化 2-34
圖 2.29 臺中港海域 85~95 年實測地形水深圖 2-37
圖 2.30 臺中港地形水深變遷計算分區圖 2-38
圖 2.31 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～87 年) 2-40
圖 2.32 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～89 年) 2-40
圖 2.33 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～92 年) 2-41
圖 2.34 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～95 年) 2-41

圖 2.35 臺中港原堤堤頭沉箱斷面圖 2-44
圖 2.36 臺中港北防波堤延伸 850m 堤頭斷面圖 2-44
圖 2.37 麥寮西防波堤堤頭沉箱斷面圖 2-45
圖 2.38 麥寮西防波堤堤頭補救措施斷面圖 2-46
圖 3.1 麥寮工業區專用港西防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖 3-1
圖 3.2 臺中港北防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖 3-2
圖 3.3 單音束水深測量作業流程圖 3-3
圖 3.4 海域地形測深系統整合作業示意圖 3-4
圖 3.5 多音束水深測量作業流程圖 3-4
圖 3.6 梧棲漁港水位時序列變化圖 3-11
圖 3.7 麥寮工業港水位時序列變化圖 3-11
圖 3.8 梧棲漁港與麥寮工業港聲速剖面變化圖 3-12
圖 3.9 臺中港北防波堤堤頭水深測量航跡點 3-13
圖 3.10 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖 3-14
圖 3.11 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖(局部放大) .. 3-15
圖 3.12 臺中港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖 3-16
圖 3.13 臺中港堤頭水深測量斷面位置圖 3-19
圖 3.14 臺中港堤頭地形測量斷面 W1 水深剖面變化圖 3-27
圖 3.15 臺中港堤頭地形測量斷面 W2 水深剖面變化圖 3-27
圖 3.16 臺中港堤頭地形測量斷面 W3 水深剖面變化圖 3-27
圖 3.17 臺中港堤頭地形測量斷面 W4 水深剖面變化圖 3-28
圖 3.18 臺中港堤頭地形測量斷面 W5 水深剖面變化圖 3-28
圖 3.19 臺中港堤頭地形測量斷面 W6 水深剖面變化圖 3-28
圖 3.20 臺中港堤頭地形測量斷面 W7 水深剖面變化圖 3-29

圖 3.21 臺中港堤頭地形測量斷面 W8 水深剖面變化圖 3-29
圖 3.22 臺中港堤頭地形測量斷面 W9 水深剖面變化圖 3-29
圖 3.23 臺中港堤頭地形測量 100/5~101/5 侵淤變化色階圖 3-30
圖 3.24 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量航跡點 3-31
圖 3.25 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖 3-32
圖 3.26 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖(放大) 3-33
圖 3.27 麥寮工業港北防波堤堤頭附近消波塊布置水深色階圖 3-34
圖 3.28 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖 3-35
圖 3.29 麥寮工業港堤頭水深測量斷面位置圖 3-38
圖 3.30 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M1 水深剖面變化圖 3-49
圖 3.31 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M2 水深剖面變化圖 3-49
圖 3.32 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M3 水深剖面變化圖 3-49
圖 3.33 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M4 水深剖面變化圖 3-50
圖 3.34 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M5 水深剖面變化圖 3-50
圖 3.35 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M6 水深剖面變化圖 3-50
圖 3.36 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M7 水深剖面變化圖 3-51
圖 3.37 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M8 水深剖面變化圖 3-51
圖 3.38 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M9 水深剖面變化圖 3-51
圖 3.39 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R1 水深剖面變化圖 3-52
圖 3.40 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R2 水深剖面變化圖 3-52
圖 3.41 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R3 水深剖面變化圖 3-52
圖 3.42 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R4 水深剖面變化圖 3-53
圖 3.43 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R5 水深剖面變化圖 3-53
圖 3.44 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R6 水深剖面變化圖 3-53

圖 3.45 麥寮工業港堤頭地形測量 100/6~101/5 侵淤變化色階圖 3-54
圖 4.1 測區海域自計式潮波流儀施放點位示意圖 4-1
圖 4.2 W 測站，2012 年 05/03～05/24 實測與預報水位變化圖 4-3
圖 4.3 W 測站，2012 年 05/03～05/24 漲退潮段流向玫瑰圖 4-3
圖 4.4 W 測站，2012 年 05/03～05/24 底層流速與流向變化圖 4-5
圖 4.5 W 測站，2012 年 05/03～05/24 表層流速與流向變化圖 4-5
圖 4.6 W 測站，底表層之海流玫瑰圖 4-5
圖 4.7 W 測站，底層 U、V 分量海流無因次化能譜圖 4-8
圖 4.8 W 測站，底層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖 4-8
圖 4.9 W 測站，表層 U、V 分量海流無因次化能譜圖 4-9
圖 4.10 W 測站，表層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖 4-9
圖 4.11 W 測站，波浪波高週期玫瑰圖 4-11
圖 4.12 W 測站，波高週期統計直方圖 4-11
圖 4.13 W 測站，波向波高週期時序列圖 4-12
圖 4.14 W 測站，2011 年 06/09～07/04 底層流速與流向變化圖 4-13
圖 4.15 W 測站，2011 年 06/09～07/04 表層流速與流向變化圖 4-13
圖 4.16 W 測站，2012 年 05/03～05/24 底層流速與流向變化圖 4-14
圖 4.17 W 測站，2012 年 05/03～05/24 表層流速與流向變化圖 4-14
圖 4.18 W 測站，2011 年之底表層之海流玫瑰圖 4-14
圖 4.19 W 測站，2012 年之底表層之海流玫瑰圖 4-15
圖 4.20 W 測站，2011 年 6 月波浪波高週期玫瑰圖 4-16
圖 4.21 W 測站，2012 年 5 月波浪波高週期玫瑰圖 4-16
圖 4.22 W 測站，2011 年 6 月波向波高週期時序列圖 4-17
圖 4.23 W 測站，2012 年 5 月波向波高週期時序列圖 4-17

圖 5.1　多區塊結構網格設定示意圖 5-10
圖 5.2　通度係數 FAVOR 流體界面與自由液面計算示意圖 5-11
圖 5.3　臺中港與麥寮港數值模擬海域範圍示意圖 5-12
圖 5.4　開放水域之時序列流速邊界條件 5-13
圖 5.5　基隆、蘇澳、高雄及馬公實測資料比較圖 5-14
圖 5.6　臺中港堤頭距離 8000m 之邊界潮位時序圖 5-15
圖 5.7　麥寮港堤頭距離 8000m 之邊界潮位時序圖 5-15
圖 5.8　2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈 5-18
圖 5.9　孤立波實驗佈置示意圖 5-26
圖 5.10 No.1、No.2 及 No.9 波高計自由液面波形分佈紀錄 5-27
圖 5.11 實驗 7 結果 5-27
圖 5.12 實驗 6 的波高計佈置圖 5-28
圖 5.13 實驗 6 結果 5-28
圖 5.14 實驗 8 的波高計佈置圖 5-29
圖 5.15 實驗 8 結果 5-29
圖 5.16 實驗 6 之數值模式計算結果波形與底床流速同步時序紀錄 5-30
圖 5.17 實驗 6 之數值模式計算結果波形時序紀錄 5-31
圖 5.18 實驗 8 之數值模式計算結果波形時序紀錄 5-32
圖 5.19 麥寮港波場數值模擬海域範圍及計算網格示意圖 5-33
圖 5.20 臺中港與麥寮港水深地形波流場數值計算領域模型圖 5-33
圖 5.21 北側海域入射波浪水面時序變化示意圖 5-36
圖 5.22 西側海域入射波浪水面時序變化示意圖 5-40
圖 5.23 南側海域入射波浪水面時序變化示意圖 5-43
圖 5.24 北側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖 5-47

圖 5.25 西側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖..... 5-50
圖 5.26 南側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖..... 5-53
圖 5.27 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖 5-56
圖 5.28 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖 5-59
圖 5.29 南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖 5-62
圖 5.30 北側海域入射波波場堤頭附近底床速度向量垂直變化圖 5-65
圖 5.31 西側海域入射波波場堤頭附近底床速度向量垂直變化圖 5-68
圖 5.32 南側海域入射波波場堤頭附近底床速度向量垂直變化圖 5-71
圖 5.33 北側入射波場底床最大水分子速度分佈圖..... 5-75
圖 5.34 北側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均分佈圖 5-75
圖 5.35 北側入射波場堤頭附近底床 Vmax、V1/10 等位圖..... 5-75
圖 5.36 西側入射波場底床最大水分子速度分佈圖..... 5-76
圖 5.37 西側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均分佈圖 5-76
圖 5.38 西側入射波場堤頭附近底床 Vmax、V1/10 等位圖..... 5-76
圖 5.39 南側入射波場底床最大水分子速度分佈圖..... 5-77
圖 5.40 南側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均分佈圖 5-77
圖 5.41 南側入射波場堤頭附近底床 Vmax 、 V1/10 等位圖..... 5-77
圖 6.1 臺中港北防波堤海域實測地形侵淤變化 (85~95 年)..... 6-2
圖 6.2 麥寮港西防波堤海域實測地形侵淤變化 (82~99 年)..... 6-4
圖 6.3 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)..... 6-7
圖 6.4 臺中港北防波堤堤頭-25m 沖刷洞地形變化圖 (85~95 年) 6-9
圖 6.5 堤頭-25m 沖刷洞心堤距、面積、體積變動圖 6-11
圖 6.6 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年)..... 6-13
圖 6.7 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖 (90~99 年)6-15

圖 6.8　堤頭-35m 沖刷洞心堤距、面積、體積變動圖 6-17
圖 6.9　臺中港北堤堤頭-25m 與麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量圖6-18
圖 6.10 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)... 6-20
圖 6.11 麥寮港西堤堤頭加密測量之-35m 與-40m 沖刷洞變化量化圖.. 6-25
圖 6.12 臺灣六大港海域歷年流速大於 50cm/sec 發生機率圖 6-27
圖 6.13 臺中港 2003~2009 年流速分佈發生機率圖 6-28
圖 6.14 麥寮港 2000~2010 年流速分佈發生機率圖 6-29
圖 6.15 麥寮港 YLCW 測站逐時流速與流矢分佈圖 (2007/05)..... 6-36
圖 6.16 麥寮港 YLCW 測站逐時流能量累積分佈圖 (2007/05)..... 6-36
圖 6.17 麥寮港 YLCW 測站逐月淨流能量累積分佈圖 (2000~2010 年)6-36
圖 6.18 麥寮港西防波堤堤頭地形夏季侵淤變化實例 (96/05~96/09) ... 6-38
圖 6.19 麥寮港 YLCW 測站夏季流能量累積分佈實例 (96/06、96/09) 6-38
圖 6.20 麥寮港西防波堤堤頭地形冬季侵淤變化實例 (98/10~99/01) ... 6-39
圖 6.21 麥寮港 YLCW 測站冬季流能量累積分佈實例 (98/11、98/12) 6-39
圖 6.22 麥寮港西堤堤頭加密測量之-35m 沖刷洞變化與流能量累積分佈之對應關係圖 6-40
圖 6.23 實測海流流速與波浪流速分佈及海流－總流速比分佈圖 6-41
圖 6.24 颱風波浪條件下，臨界水深與平均粒徑關係圖..... 6-42
圖 6.25 實測海流徐爾滋數與波浪徐爾滋數分佈圖..... 6-42
圖 7.1　試驗平面水槽設施實景..... 7-2
圖 7.2　造波機伺服馬達與造波板..... 7-2
圖 7.3　造波控制系統..... 7-2
圖 7.4　試驗用儀器設備..... 7-3
圖 7.5　麥寮工業港堤頭水深測量斷面位置圖..... 7-7

圖 7.6　麥寮港防波堤堤頭特徵內差三維地形圖..... 7-8
圖 7.7　平面水槽造流系統規劃圖..... 7-9
圖 7.8　試驗平面水槽佈置規劃圖..... 7-10
圖 7.9　防波堤堤頭水工模型實景..... 7-11

表 目 錄

表 2.1　各月份發生颱風之機率列表 2-4
表 2.2　THL1 測站歷年颱風波浪超過 4m 統計 2-7
表 2.3　THL2B 測站歷年颱風波浪超過 4m 統計 2-8
表 2.4　臺中港 2003 至 2009 年示性波高、週期及波向資料統計表 2-9
表 2.5　臺中港 2000 年至 2008 年逐月波浪資料統計表 2-11
表 2.6　麥寮港外海各重現期之颱風波浪推算 2-16
表 2.7　臺中港外海各重現期之颱風波浪推算 2-16
表 2.8　臺中港 2003 至 2009 年海流之流速及流向統計表 2-20
表 2.9　雲林海域各潮位站之潮位統計值 2-22
表 2.10 臺中港附近地形累積侵淤量 2-42
表 3.1　測量作業使用之儀器規格表 3-7
表 3.2　本計畫引用一等一級水準控制點之點位資料 3-9
表 3.3　梧棲漁港潮位站之點位資料 3-10
表 3.4　麥寮工業港潮位站之點位資料 3-10
表 3.5　臺中港斷面位置坐標 3-18
表 3.6　麥寮工業港斷面位置坐標 3-37
表 4.1　RD Instruments 底碇式都卜勒潮波流剖面儀規格特性表 4-2
表 4.2　W 測站，潮位調合分析主要分潮參數 4-4
表 4.3　W 測站，底層海流流速流向統計表 4-6
表 4.4　W 測站，表層海流流速流向統計表 4-6
表 4.5　W 測站，波高波向統計表 4-10
表 4.6　W 測站，波高週期聯合機率統計表 4-11

表 5.1　港灣工程領域適用的 FLOW-3D 計算模組 5-1
表 5.2　RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型系數值 5-8
表 5.3　實驗參數表 5-25
表 5.4　FLOW-3D 計算波浪條件 5-34
表 5.5　波場模擬之模型邊界設定 5-35
表 6.1　臺中港北堤堤頭-25m 沖刷洞變化量化表 (85~95 年) 6-11
表 6.2　麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量化表 (90~99 年) 6-17
表 6.3　麥寮港西堤加密測量-35m 沖刷洞變化量化表 (96~100 年) 6-26
表 6.4　臺中港北防波堤堤頭西側 TC 測站歷年海流統計表 6-30
表 6.5　麥寮港西防波堤堤頭南側 YLCW 測站歷年海流統計表 6-32
表 7.1　麥寮港外海 10~100 年重現期颱風波浪推算 7-4
表 7.2　各物理量之模型縮尺比 7-6

第一章　計畫背景分析

1.1 計畫緣起

本計畫配合交通部「交通政策白皮書-運輸」所揭櫫之「提供產業健全的物流環境」政策目標及「應用運輸科技，推動運輸智慧管理，加強資訊便民服務」與「檢討安全管理，加強運輸安全機制，全面維護運輸安全」之發展主軸及依據運輸資訊政策一：建置資訊蒐集系統，發展標準作業環境，加速運輸資訊基礎建設及運輸安全政策六：加強海上交通安全管理，進行法規與問題研究，促進海運安全等事項辦理。

波、海流通過海中結構物時，可能在結構物臨近底床造成沖蝕，導致結構的破壞甚或傾倒，如港灣防波堤堤頭附近的海底地形，可能因為波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕。國內的港灣防波堤堤頭侵蝕的實例中，以臺中港及雲林麥寮工業港最為明顯。以麥寮工業港為例，其北防波堤堤頭之原設計水深約為 -22m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形形成一個約 500m × 100m 的深坑，最深處達到 -48m，堤基被沖刷的深度可達 26m。由於防波堤堤頭的海底地形侵蝕，嚴重時將危及防波堤堤身及港灣船隻航行的安全。然而造成侵蝕的原因與機制仍未明確，因此急需進一步的觀察、模擬與研析，以期提出有效的防制對策與工法。

1.2 研究目的

本研究屬交通部運輸研究所「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃四年合作研究計畫之第二年，以臺中港及麥寮工業港為研究對象，進行堤頭附近波、流場及海底地形變化特性與機制的觀測、分析與模擬。主要研究方法將透過背景資料收集分析、數值模擬及水工模型試驗，並與實測波、流場及海底地形侵蝕特性進行比對與修正。本研究預期可以完成：(1) 防波堤堤頭附近海底地形侵蝕的文獻收集與分析，(2)臺中港及麥寮

工業港防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析，(3) 麥寮工業港防波堤堤頭附近波流場的現場觀測與分析，(4) 數值模式 Flow-3D 的測試，地形與結構物等邊界構件的建立，(5)水工模型試驗的初步規劃，(6)研擬防波堤堤頭侵蝕的防制工法，(7)完成防制工法的數值模擬與水工模型試驗的驗證。

1.3 研究範圍

本研究將以臺中港及麥寮工業港為主要研究範圍，針對防波堤堤頭附近海域之波、流場及海底地形變化進行觀測與分析。

一、臺中港

臺中港北鄰大甲溪以及大安溪，南鄰大肚溪，臺中港為因應淤積以及航行安全，而延伸北防波堤，2002 年以來受到河川輸沙暴增的因素，於 2002～2005 年之年平均淤沙量為 1994～2002 年 4.9 倍之多，由於漂沙已有部分繞過北防波堤堤頭進到航道，未來勢必影響船隻航行安全。臺中港於民國 65 年完成主體工程，民國 79～84 年先延長北防波堤 850 公尺，民國 89～91 年再延長北防波堤 480 公尺，相關工程施工位置如圖 1.1 所示。

二、麥寮工業港

雲林縣海岸北起濁水溪口南至北港溪口，涵蓋麥寮鄉、臺西鄉、四湖鄉及口湖鄉四鄉，海岸線全長約 58 公里。雲林離島工業區自民國 83 年麥寮區動工興建以來，麥寮區北側海堤受到濁水溪砂源的補注，已有淤積現象產生。圖 1.2 為麥寮工業區各區段海堤位置圖，其中西防波堤 I 約於民國 84 年期間完工，南防波堤 II 與西防波堤 II 分別於民國 85 年 6 月與 86 年 3 月完工，鄰近外航道之西防波堤 III 則於民國 87 年 3 月開始逐漸施工延伸至民國 89 年 9 月，外航道內側之南防波堤 I 則於民國 87 年底完工 (成大水工所，2002a)。麥寮工業港其西防波堤 III 堤頭之原設計水深約為 -22m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形形成一個約 500m × 100m 的深坑，最深處達到 -48m，堤基被沖刷的深度可達 26m。

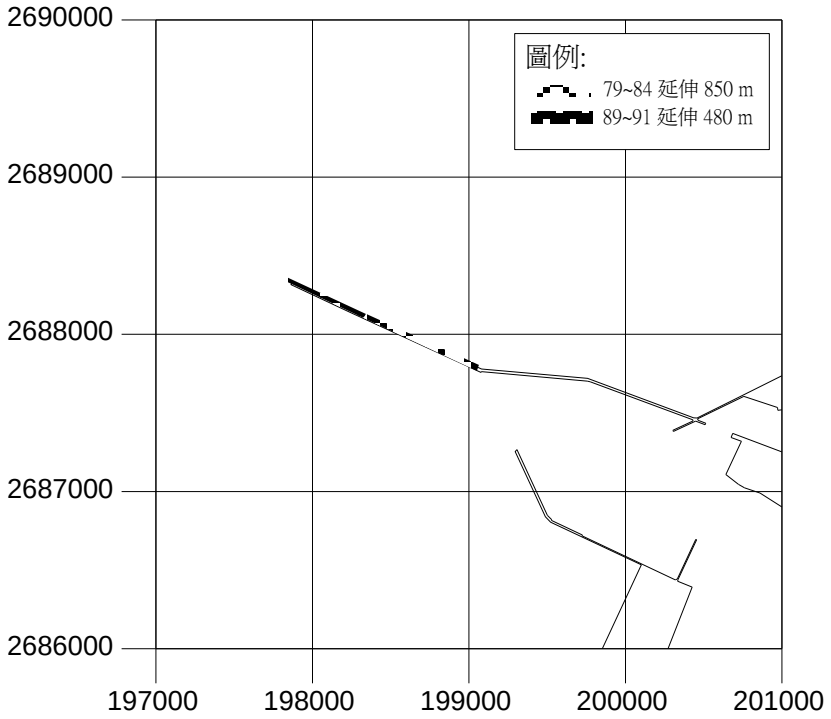


圖 1.1 臺中港北防波堤延伸歷程圖

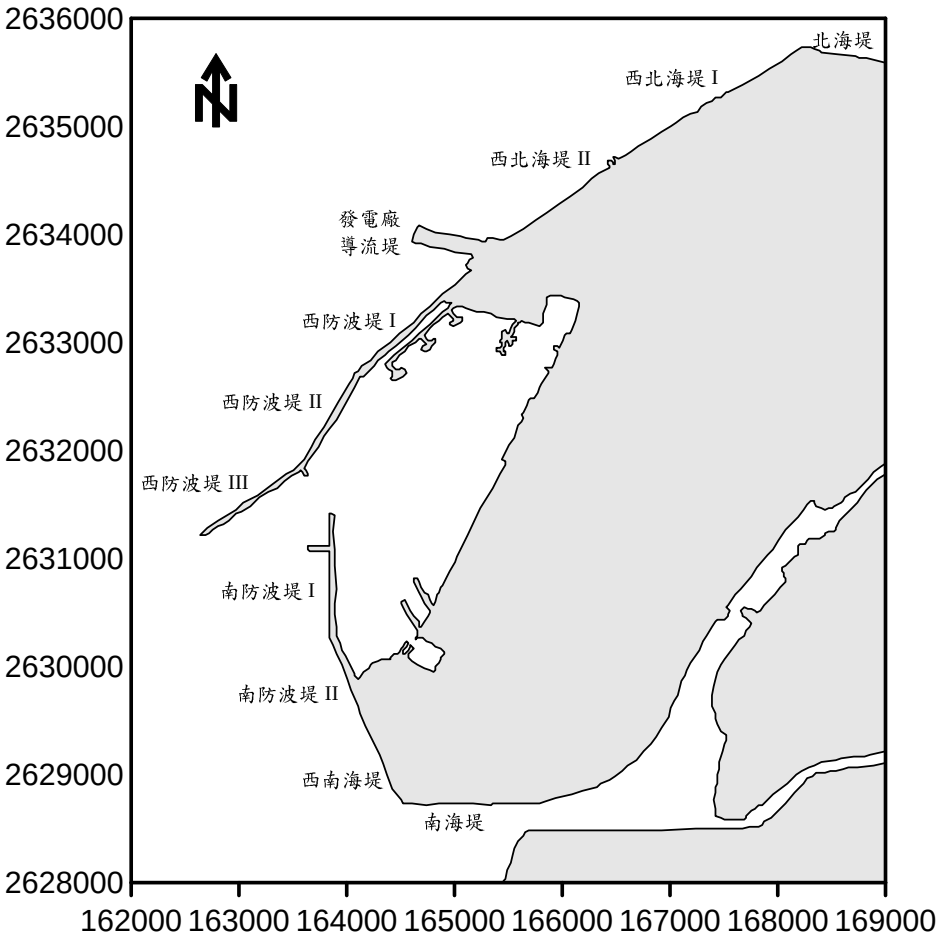


圖 1.2 麥寮工業區各區段海堤位置圖

1.4 工作項目

本研究全期共計四年，本年度為第 1 年。工作項目分年敘述如下：

一、第 1 年（100 年）之工作項目：

1. 防波堤堤頭附近海底地形侵蝕的文獻收集與分析。
2. 臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析。
3. 臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場現場觀測與分析。
4. 數值模式 Flow-3D 的測試，地形與結構物等邊界構件的建立。

二、第 2 年（101 年）之工作項目：

1. 臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析。
2. 臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場現場觀測與分析。
3. 波場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。
4. 流場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。
5. 水工模型試驗的規劃。

三、第 3 年（102 年）之工作項目：

1. 波場作用下防波堤堤頭附近地形變化的數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證。
2. 流場作用下防波堤堤頭附近地形變化的數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證。
3. 波場或流場作用下防波堤堤頭附近地形變化的水工模型試驗。
4. 防波堤堤頭侵蝕防制工法初步研擬。

四、第 4 年（103 年）之工作項目：

1. 堤頭侵蝕防制工法的數值模擬：Flow-3D 參數率定與驗證。

2. 堤頭侵蝕防制工法的水工模型試驗。

3. 堤頭侵蝕防制工法的數值模擬與水工模型試驗比對分析。

4. 防波堤堤頭侵蝕防制機制與適當工法。

1.5 相關研究文獻

海域砂質底床由於受波浪、海流之影響呈現持續變化之特性，而海流之組成複雜，其成份包括潮流、風吹流、密度流、波浪所造成的近岸流等，各海流成份之強度與方向又隨時間與空間而有所變化；再加上與風力或波浪的交互作用，以及與海岸結構物的互制作用等，使得海域底床變遷之研究益形困難。在實際應用上，大部份的海域地形變化研究集中在淺水區域，其主要考量為波浪因近岸地形與海工結構物之影響而發生折射、繞射與反射現象，進而導致海工結構物附近地形發生變化，例如海堤堤址沖刷或突堤效應所造成之海岸地形變遷等皆屬此類 (Silvester and Hsu, 1993)。

近年來由於經濟發展突飛猛進，政府為配合快速發展需求，積極推動港口開發，包括港口新建、改建及擴建等。無論商港或工業港之港域水深皆不斷加深，防波堤常延伸至 20 多公尺水深之海域。由於波浪對底層漂砂之影響會隨水深之加大而逐漸減弱，因此海流常成為主導深水海域底床侵淤變化之主要因子。

地形變化模式之發展過程，由早期應用於河川的一維或二維定量流模式 (Karim and Kennedy, 1982)，逐漸演變為變量流模式 (Chang and Hill, 1976；Yang, 1984；謝，1996)，在模擬近岸海域地形變化時，則再加入波浪對漂砂之影響 (Horikawa, 1988)，在潮流影響力較大的水域則需考慮非單一方向漂砂與延時問題 (Rijn, 1989)。惟無論在河川或海洋，地形變化模式的基本架構差異並不大，其皆主要包括水動力模式與底床沖淤模式兩部份，目前水動

力模式之發展已較為成熟，可由解析連續方程式與動量守恆方程式而得，至於底床沖淤模式則主要以根據質量守恆定律推導而得之泥砂連續方程式為主，其在數值解析部分較簡單，輸砂量的估算應是模式中較難處理的部份。

輸砂量的估算方法一般可分為兩類，其一為將底床載與懸浮載分開計算法，另一則為總輸砂量法，兩者之主要差異在於懸浮載的計算方式。前者適用於懸浮載佔多數之不平衡水域，Rijn (1987) 所發展之 SUTRENCH-2D 模式與 SUTRENCH-3D 模式均屬此類。然而由於懸浮質擴散傳輸模式在計算時需先估算懸浮載之沉降率與再懸浮率 (Teisson, 1992；謝，1996)，此在廣大海域中甚難準確計算，因此實際應用上有其困難性。而後者則應用較為廣泛 (Einstein, 1950；Bagnold, 1966；Bijker, 1971；Rijn, 1984a,b)，因為此法較為簡單，可應用於較大區域與較長時間之計算。劉 (2003) 之輸砂模式採用 Rijn (1984a,b) 之輸砂公式，加入考量底床坡度對臨界底床剪應力之影響，建立一水深平均二維海域地形變化模式，模擬分析麥寮港西防波堤堤前底床沖刷問題。

以下針對不同的水文環境下包含與結構物互制進行文獻分類，分別摘錄探討：

一、河川輸砂：

國內有許多針對河口、河川底床的數值模擬研究，王 (2002) 係運用數值方法模擬河口因潮汐作用下之流場運動特性及底床沖淤現象。即是以二維水深平均之控制方程式及沉滓輸運連續方程式，以及底床載輸運率公式、懸浮沉滓濃度對流擴散方程式，配合多層網格法（Mulitigrid Method）建立數值模式，進行模擬河口段附近之流場及底床高程沖淤計算。張 (2002) 研究中探討沈滓非均勻性與變量流特性對沖刷過程的影響。在試驗研究方面，針對變量流均勻沈滓與非均勻沈滓之橋墩沖刷過程進行量測工作，並根據試驗結果探討底床表面沈滓粒徑粗化現象以及變量流特性對沖刷深度的影響。在數值模擬方面，進一步改良張 (1998) 所發展之床形模式，根據非均勻沈滓

之遮蔽或暴露效應以及局部床形之重力效應來修正河床載輸送率，並考慮下向流沖刷所引致的懸浮載運移，以混合層概念模式來進行床形與床質的演算；而後以準變量流的方式 (梯段式變量流歷線) 來進行變量流非均勻沈滓之沖刷模擬，並以 Ettema (1980)、Kothyari (1989) 及研究之試驗量測結果對模式進行檢定與驗證，提升模式的實用性。

二、橋墩或垂直柱沖刷：

國內外在底床沖刷之研究上，多以橋墩沖刷為主，主要研究均集中於樁基礎沖刷或海底管線基礎的沖蝕等領域。目前有關沖刷作用在理論分析數學模式的建立上，多將沖刷區取一控制體，應用漂砂連續方程式，配合水流動量原理或對沖刷坑形狀作數學函數之指述，進而求得某流況下之最大沖刷深度之數學模型，相關特定係數則配合水工模型縮尺實驗來決定之，並以因次分析理論來分析實驗結果，進而得到具有工程實用性之經驗公式。

垂直柱體之沖刷機制，可分為束縮沖刷及局部沖刷二大部分：

1. 束縮沖刷

束縮沖刷的形成，是由於結構物存在引起通水斷面積的束挾作用而擠壓水流，致使局部水流流速增大而形成，其沖刷範圍及深度將因通水面積大小而受影響。

2. 局部沖刷 (圖 1.3、圖 1.4)

當水流通過結構物時，常因斷面束縮而使水流速度增加，水流流況產生變化，使底部剪應力增加而對底床產生沖刷效應。隨著沖刷時間增長，沖刷坑加大而造成通水面積加大，降低流速而使底床剪應力降低，沖淤率降低。沖刷時間逐漸增加，沖刷深度與沖刷範圍均會趨於一極限穩定值，達平衡狀態。Breusers and Raudkivi (1991) 由實驗研究發現，水流通過結構物時會因流通面積縮小，使流速加大且流況改變，會使水流表面產生四種流況 (圖 1.5)。其中，Melville (1975) 認為向下水流及馬蹄形渦流為結構物基礎沖刷

中最重要的兩種水流流況。下面將介紹局部沖刷重要的四種流況：

(1) 水表面渦流系統（Surface roller）：當水流流經結構物時，因通水面積縮減而使水流受阻，部份水流動能轉變為位能，由縱剖面水流形成一分界面。分界面以上的水流受阻後導向水面，造成進水面處湧波（Bow Wave），其後水流改變方向形成小型渦流水流，稱為水表面渦流。

(2) 向下水流系統（Down flow）：由水面向下逐漸遞減的流速分佈，使停滯點壓力（Stagnation Pressure）由水面下遞減，造成向下水流的形成。

(3) 馬蹄形渦流系統（horseshoe-vortex）：由向下水流與受結構物影響而形成的橫向三維性渦流，稱為馬蹄形渦流，從結構物迎水面分水線開始產生，沿結構物邊緣向下游傳遞。

(4) 尾跡渦流系統（Wake-vortex）：當水流流經結構體，則在壁面之下游側面產生分離點（separation），致使速度剖面產生不連續面，導致小渦流（cast-off vortex）的產生。在靠近底床處，此一小渦流與馬蹄形渦流交互作用而導致水流尾跡產生側向及垂向游移擺動。此渦流系統所產生的低壓中心將泥沙顆粒拾起帶至下游處放置。

由於局部沖刷作用，導致工程結構物之沖刷坑發生，使其基部遭到淘蝕，進而直接危及結構物之穩定性及安全性，最後產生掩埋之事實。整體而言，結構物沖刷坑的形成機制，可視為水流作用（水流攻角）、底床沉積物（顆粒間黏滯性）與結構物類型（尺寸）三者相互作用結果。其中，向下水流及馬蹄型渦流作用為影響結構物沖刷坑形成主要流況；沈積物承載力不足及結構物對沉積物壓密現象，為底床沉積物與結構物類型間相互作用，對其沖刷坑形成之主要影響；沉積物顆粒達臨界啟動速度所產生的漂砂現象，為水流作用於海床沉積物，對於結構物沖刷坑形成之主要影響。當流況平穩後，隨沖刷時間增長，若無足夠能量之海況沖擊下，沖刷坑沖刷深度及水平沖刷範圍將不再加深擴展，逐漸達平衡沖刷狀態。此外，堤腳保護工可能因沈積物回填沖刷坑的現象，造成保護工被掩埋的情形。

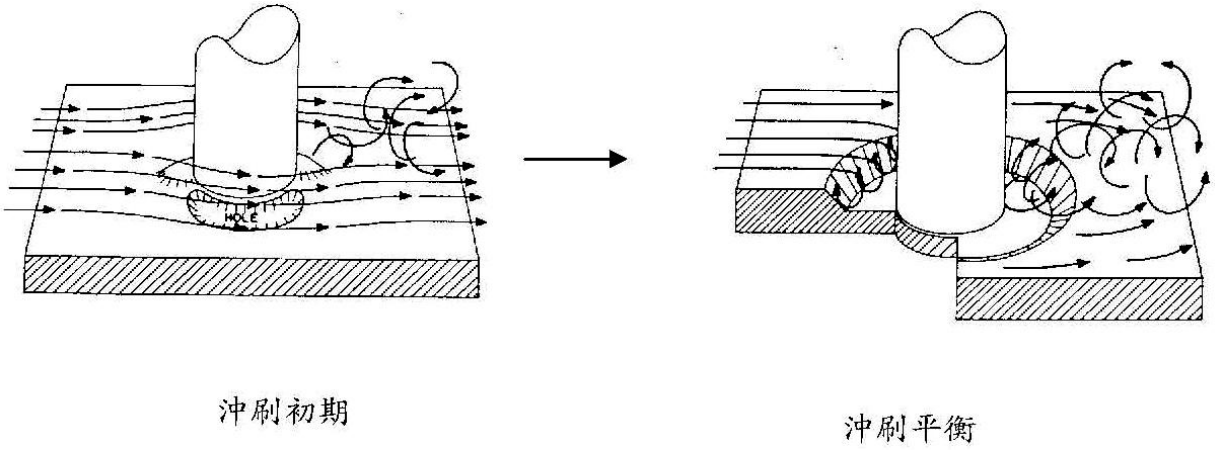


圖 1.3 局部沖刷變遷圖

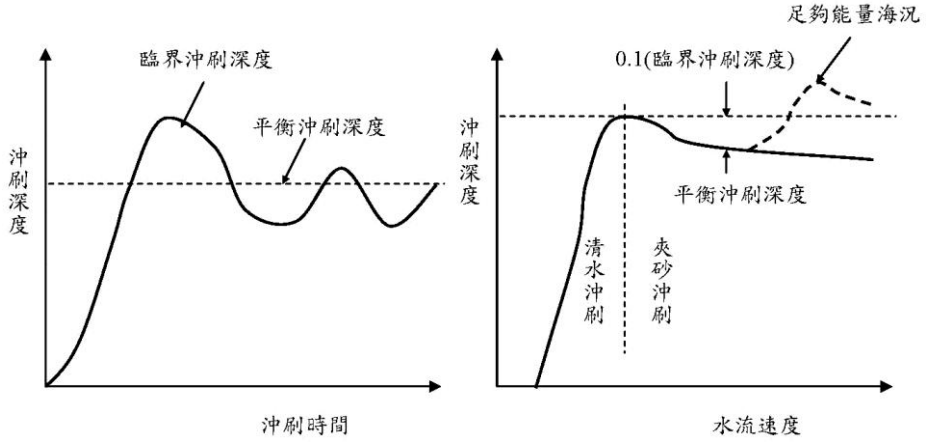


圖 1.4 沖刷深度與沖刷時間及水流速度關係圖 (Breusers, H.N.C. and A.J. Raudkivi, 1991)

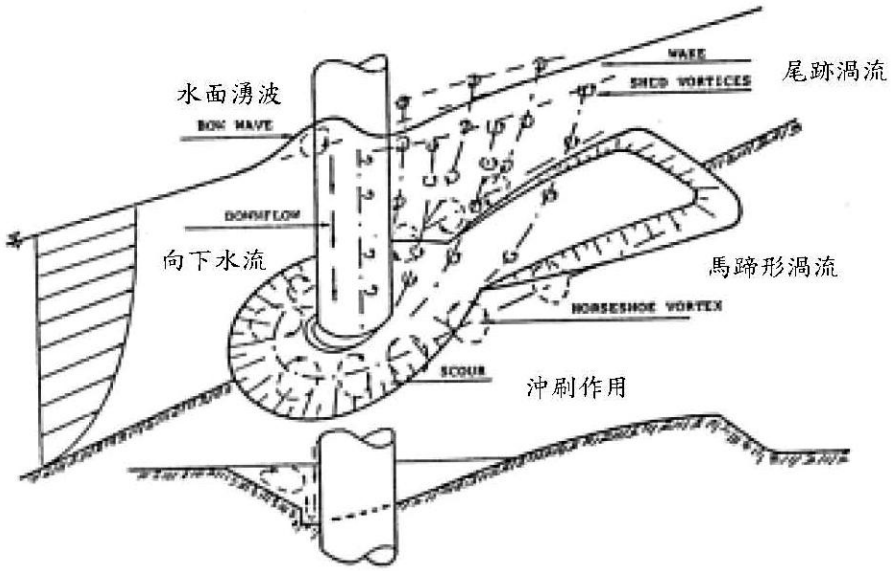


圖 1.5 直立樁附近水流流況示意圖 (Breusers, H.N.C. and A.J. Raudkivi, 1991)

Richardson and Panchang (1998) 使用非穩態之三維流場數值模式(FLOW-3D)，模擬平床與固定沖刷坑床形之橋墩周圍的水流流況；模擬結果顯示該模式對於平床與沖刷坑之墩前流場以及橋墩周圍底床剪力場均可作適當的模擬。Roulund et al. (1999) 使用非穩態之三維流場數值模式(EillipSys3D)，模擬平床橋墩周圍的底床剪力場，模擬結果與量測值比較相當一致。張 (2002) 利用變量流沖刷過程之疊加特性，發展一套簡易的變量流沖刷模式，能快速模擬變量流墩前沖刷深度的演進。陳等人 (2011) 進行橋墩基礎淘刷及保護工安定水工模型試驗，以探究波浪及海流作用下金門跨海大橋橋墩附近之地形變化與保護工安定評估。

三、人工魚礁沖刷：

王 (1990) 以水工模型試驗探討人工魚礁模型礁體在不同迎角及不同基本排列下，後流域流場變化情形。田 (1994) 提出在海床上之礁體沈陷與掩埋之主要機制，應與礁體之物理量（尺寸與重量）、沈積物性質、海況有密切關係。林等人 (1998) 以模型試驗方式，利用流場可視化法觀察人工魚礁在無水流攻角情況下，其周邊及尾流流場的特性 (如圖 1.6)。發現到魚礁前側兩端最先開始發生淘刷，進而由兩端掏刷至前側中心相連，產生馬蹄形之沖刷坑洞，並造成礁體底面及前端周圍的承載砂床逐漸流失，進而引起魚礁向前傾斜，隨著沖刷範圍及深度增加，礁體最終導致掩埋。賴 (2000) 針對林園魚礁區以泥砂顆粒起動理論，配合水工模型實驗，探討傳統型、改良型及巨型礁體在不同水流攻角下之沖刷機制 (如圖 1.7)。認為在夏季颱風浪作用下，林園礁區海流流速將大於泥砂起動流速，造成礁體四周沖刷掩埋及海床沉積物砂漣現象。

針對人工礁體之沖刷機制而言，也可分為束縮沖刷及局部沖刷二大部分，由觀測結果發現，單一礁體受局部沖刷影響較大，沖刷坑多形成於基腳週遭;群聚礁體受水流束縮而加速所引起沖刷坑較大，多形成於礁堆外緣處。

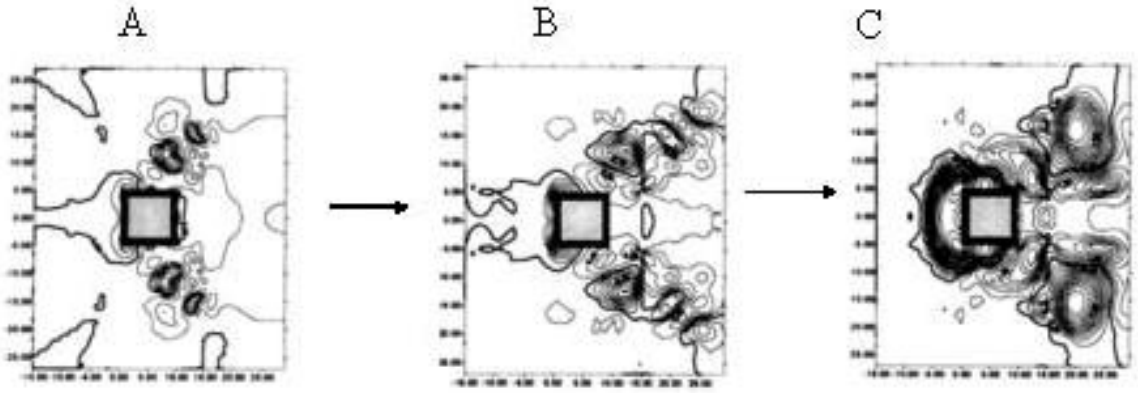


圖 1.6 人工魚礁模型隨時間變化之沖刷等高線圖 (林，1998)

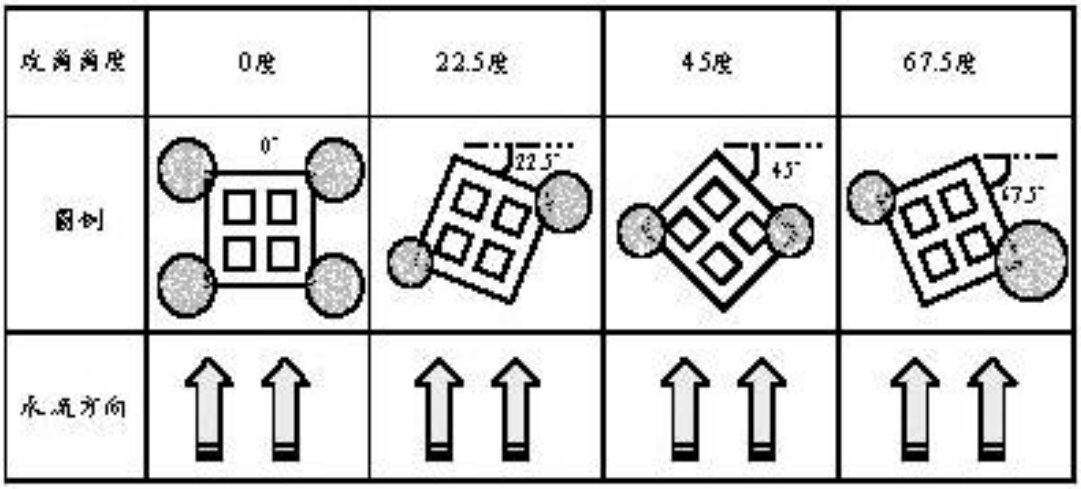


圖 1.7 人工魚礁模型在不同水流攻角下局部沖刷坑俯視圖 (賴，2000)

四、海堤沖刷：

Heribich and Ko (1967) 以理論及二維實驗研究結果，指出堤趾刷深深度為堤前波浪特性之函數。Sato et al. (1968) 以二維試驗研究結果發現海堤堤趾沖刷與堤前波浪特性、海堤反射係數與堤前波浪引致之流場變化有關。郭與黃 (1975) 以砂粒之臨界起動條件之觀點，認為底床之波浪水粒子水平速度為沖刷力量之來源。李 (1979) 研究認為堤趾沖刷之形成，乃溯上水體下沖堤腳及波浪於堤腳附近之運動效應所造成，並依此觀念按能量不滅定律推導出堤腳沖刷理論式。Hsu et al. (1979，1980) 指出堤趾沖刷與海堤產生之反射波有關，當入射波遇海堤阻擋時會形成反射波反射，而入射波與反射波所

合成之短峰波 (short-crest waves) 會在海堤方向有速度之傳遞分量，此速度所衍生之剪力，即為砂粒移動之成因。橋本等人 (1987) 模擬颱風波浪與季節風波浪兩種情況，討論不同堤面坡度條件下漂砂量與堤趾沖刷情形，研究指出當堤防設置在水深較淺處及海堤坡面較陡時，堤趾沖刷較激烈。豐島修 (1987) 研究緩坡斜堤的保護工法，由不同堤面坡度之溯上實驗結果顯示，堤面坡度緩者，由於溯上值較小，沖刷情況較和緩，海堤較安定。涂與邱 (1994) 研究結果得知減緩堤面坡度有助於降低堤趾沖刷之程度，且最安定之堤防坡度為 1V:4H。Tsai et al. (1998)以可視化實驗之觀察分析，認為波浪下刷作用所引致的下刷水流，會作用到堤趾而造成堤趾沖刷現象。黃 (2002) 以不規則波作用於斜坡海堤，探討堤趾地形之沖淤特性，顯示堤趾最大沖刷深度與堤趾波高之相關性較佳，與深海波高之相關性較差，另堤趾最大沖刷深度與超越機率 2% 溯上值 $Ru_{2\%}$ 之相關性較佳。並建議堤趾最大沖刷深度由徐爾茲數或流動勢能參數來推估分析時較具指標性。

五、防波堤沖刷：

在一般防波堤方面：Sato and Irie (1970) 根據 Koshima 港防波堤堤趾刷深與波浪關係調查之研究發現，波浪愈偏離正向入射角，則地形變化愈大，堤趾刷深值也愈大，另外，由試驗的結果指出，藉由增加防波堤堤面粗糙度來降低反射率，以達到減少堤趾沖刷深度之程度。Xie (1981)、Irie and Nadaoka (1984)、Sumer and Fredsøe (1997)、Fredsøe and Sumer (1997)、Sumer and Fredsøe (2000) 曾有一系列的實驗研究，然而僅為波浪全反射之駐波情況，沖刷剖面型態與駐波的節點及反節點位置的特性相符合；依照 Irie and Nadaoka (1984) 之定義，堤趾處之底床受侵蝕，其砂土被運送往堤外之反節點者，稱為 L 型沖刷；堤趾處有堆起之現象，而沖刷區域在堤前波浪節點至外海方向環點者，稱為 N 型沖刷。Xie (1981)、Sumer and Fredsøe (2000) 由實驗結果提出沖刷深度與堤前相對水深關係的迴歸經驗公式。林等人 (1984) 指出短峰波將使防波堤之堤前產生溝槽，而使防波堤基礎沈陷。至於斜面堤堤趾沖刷的情況，其與直立堤堤趾沖刷的最大差異，在於斜面堤前的波浪為

部分反射情況，入射波浪也有可能在堤面上碎波。在未碎波情況下，Herbich and Ko (1968) 及 Kuo and Huang (1975) 曾由砂粒受力的平衡觀點推導堤趾沖刷的理論式；Hales (1980) 則由現場實例，統計分析堤趾所需護坦的長度；Eckert (1983) 則結論出水體在堤面下刷時，有最大的水流力量作用於趾部，並據以設計最小的護坦長度，但其結果並不能適用於堤趾水深小於兩倍波高時，及堤前反射率大於 0.25，或堤面坡度大於 1/3 的情況；Sato et al. (1969) 則以實驗結果歸納出，堤前波浪特性及反射率為影響堤趾沖刷之主因，並且由現場資料發現，環繞於結構物之水流亦為影響沖刷之重要因素之一。Arneborg et al. (1995) 亦結論出波浪反射率為影響堤趾沖刷之重要因子。Sumer and Fredsøe (2000, 2001) 則修正 Xie (1981) 直立堤情況之經驗公式為斜面堤情況，其經驗公式仍以堤前相對水深為參數。但此等文獻均未考慮波浪在堤面可能因碎波而引致下刷水流之因素。Lin and Jeng (2004) 使用庫倫-阻尼 (Coulomb-damping) 孔隙底床解析波場下防波堤液化作用，發現影響最大區域為波長相對水深 0~0.3。Burcharth et al. (2005) 利用實驗探討不同防波堤護基材料對於結構安定性的影響，嘗試利用組合護基材的型式減緩防波堤的掏刷。Gislason et al. (2009) 使用 $k-\omega$ 剪應力 (SST) 模式計算波場退化至駐波條件下的防波堤侵淤現象，於波長相對水深小於 0.05 時，掏深、波高比會大於 1。

在直立防波堤方面：Gokce, T., Sumer, B.M., and Fredsøe J (1994)、Sumer and Fredsøe (1997)、Fredsøe and Sumer (1997)、Sumer and Fredsøe (2000)、Sumer, B.M., Richard J.S. Whitehouse, and Alf Tørum. (2001)、Myrhaug et al. (2004)、Sumer et al. (2005)、Lee and Mizutani (2008) 、Myrhaug and Ong (2009) 透過試驗研究，提出直立防波堤堤頭附近地形沖刷的特性與機制分析，包括有無堤頭護基保護工、波流交互作用等。然而探討的範圍並非深水域，但仍可提供本研究實質的參考。歸納上述研究成果彙整如下：

1. 波流作用於防波堤堤頭沖刷 (Sumer and Fredsøe, 1997; Sumer et al., 2005)：

如圖 1.8 所示，當波浪入射方向與防波堤堤體垂直時，堤側所形成的渦流 (Vortex) 是造成沖刷的主要機制。波浪特性 (或引發的底床流) 與堤體尺寸的關係，可以 KC 參數 ($=U_mT/B$) 表示。KC < 1 時，流場並無明顯渦流產生。1 < KC < 12 時，流場形成堤後尾跡渦流。KC > 12 時，除了形成堤後尾跡渦流，堤前亦伴隨馬蹄形渦流 (Horseshoe Vortex)。

如圖 1.9 所示，若波流同時(同向)作用時，掏刷深度與純海流除以波浪引發的底床流速有關聯。當徐爾斯數大於臨界值，底床相對掏刷深度 (掏深和堤寬比) 隨著 KC 數變大而加大；當只有純流速作用時，掏深程度更加劇烈。

圖 1.10 是彙整不同型式防波堤(含潛堤)的露出高 (F, freeboard; 當 F>0 時堤頂高於水面，屬於一般的防波堤，F<0 時，堤頂低於水面，則是潛堤) 波高 (H) 比於不同 KC 值下的最大深度 (S) 與最大寬度 (L_y) 關係圖。

2. 波浪作用於有護基保護之防波堤堤頭沖刷 (Gokce et al., 1994; Sumer and Fredsøe, 1997; Myrhaug et al., 2004; Myrhaug and Ong, 2009)：

當波浪入射方向與防波堤堤體垂直時，掏刷程度較嚴重；波浪引發的底床流或純海流平行防波堤流過時，沿著防波堤的堤址處可能產生沖蝕渠道。若底床加上護基保護工可以減少被沖刷的幅度，護基層越寬保護效果越好。如圖 1.11 所示，當堤頭處未設置護基設施時，護基寬度與堤體寬度比 $L_p/D = 0$，掏刷深度增加最顯著。當護基寬度與堤體寬度比 $L_p/D > 3.6$，堤頭處的掏深幅度可有效抑制。此類似的結果 Myrhaug et al (2004) 亦於不規則波的條件下得到驗證。

3. 波浪作用於直立堤與斜坡拋石堤之防波堤堤頭沖刷 (Sumer et al., 2001)：

波浪尖銳度、堤前水深、防波堤坡度是影響沖蝕變化的重要因子，斜坡拋石堤比直立堤更可減緩堤前沖蝕的幅度，如圖 1.12 所示。

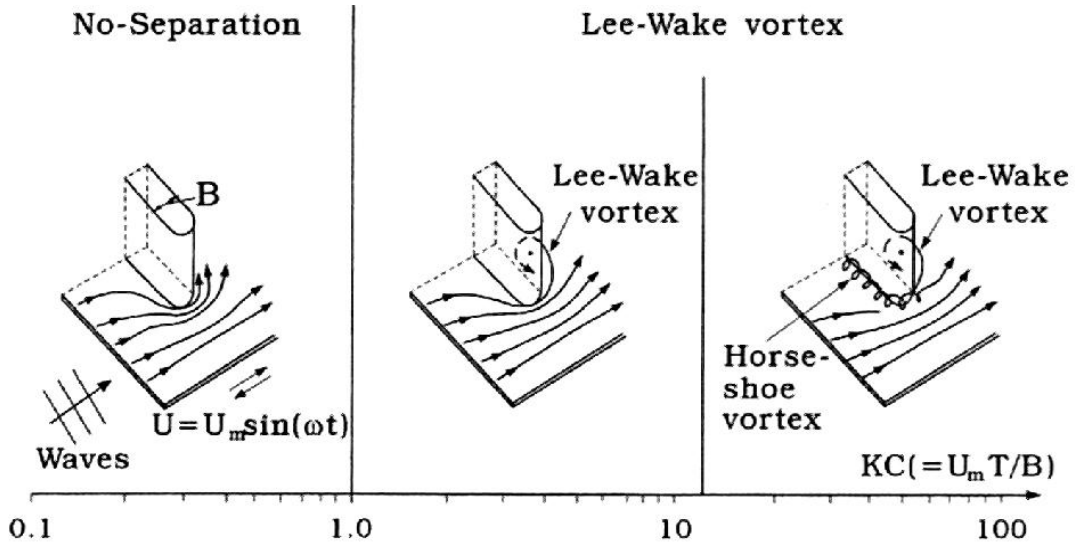


圖 1.8 直立堤堤頭附近水流流況示意圖 (Sumer and Fredsøe, 1997)

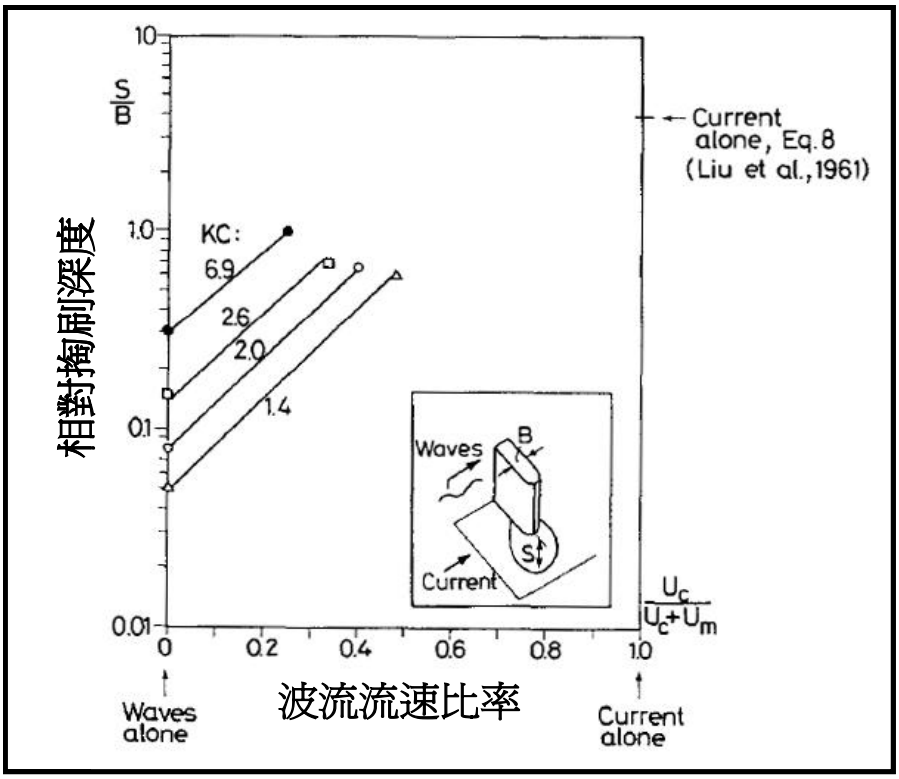


圖 1.9 直立堤堤頭附近波流共生之掏深關係 (Sumer and Fredsøe, 1997)

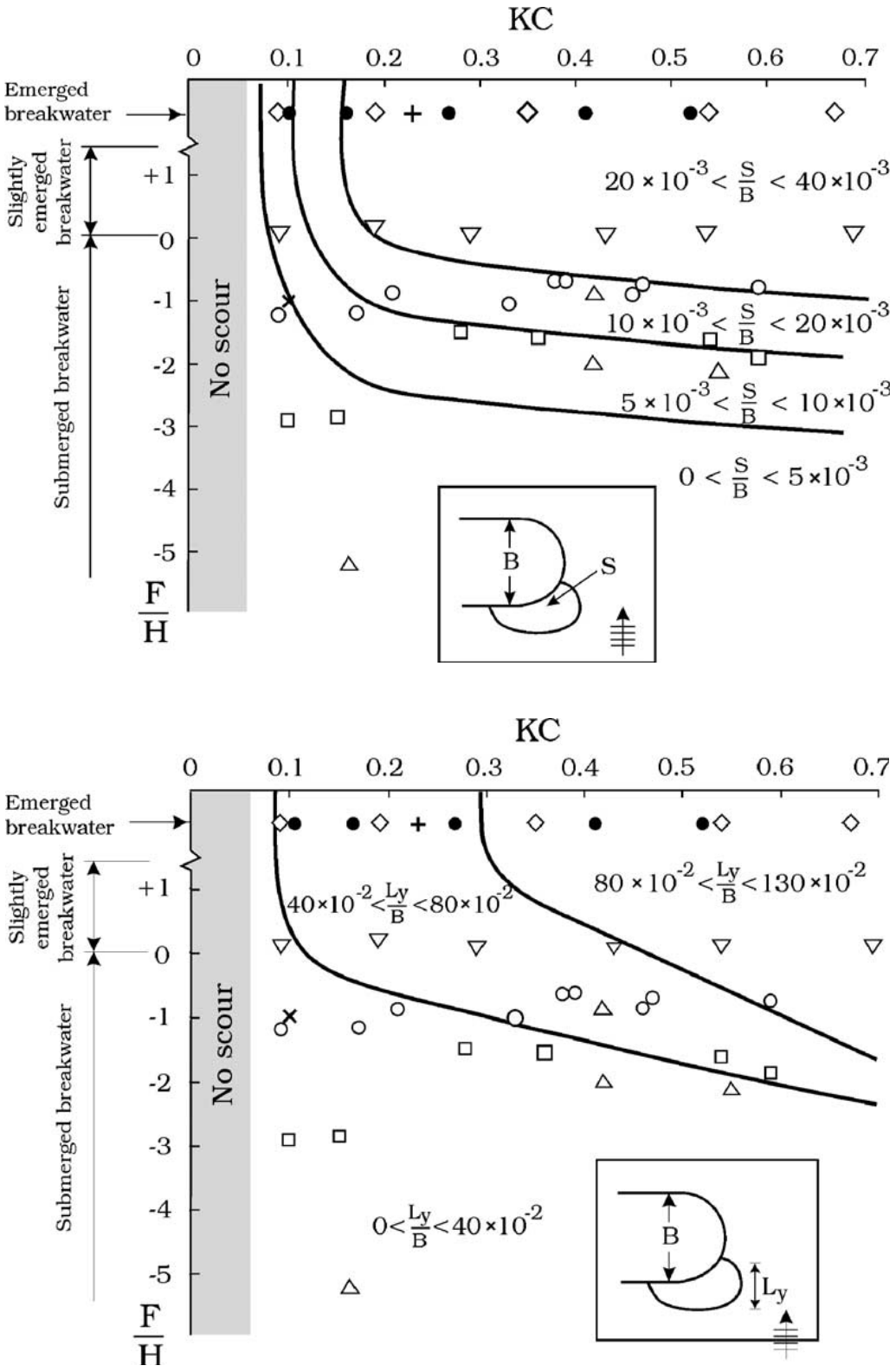


圖 1.10 防波堤堤頭露水高與掏深深度、寬度關係 (Sumer et al., 2005)

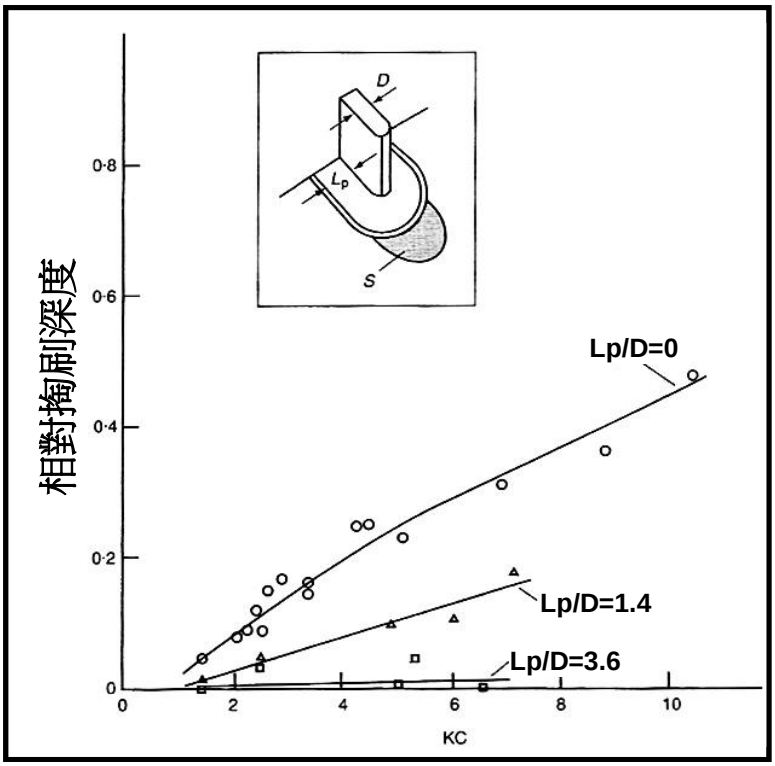


圖 1.11　具護基保護工之直立堤堤頭附近 KC 值與掏深關係 (Gokce et al., 1994、Sumer and Fredsøe, 1997)

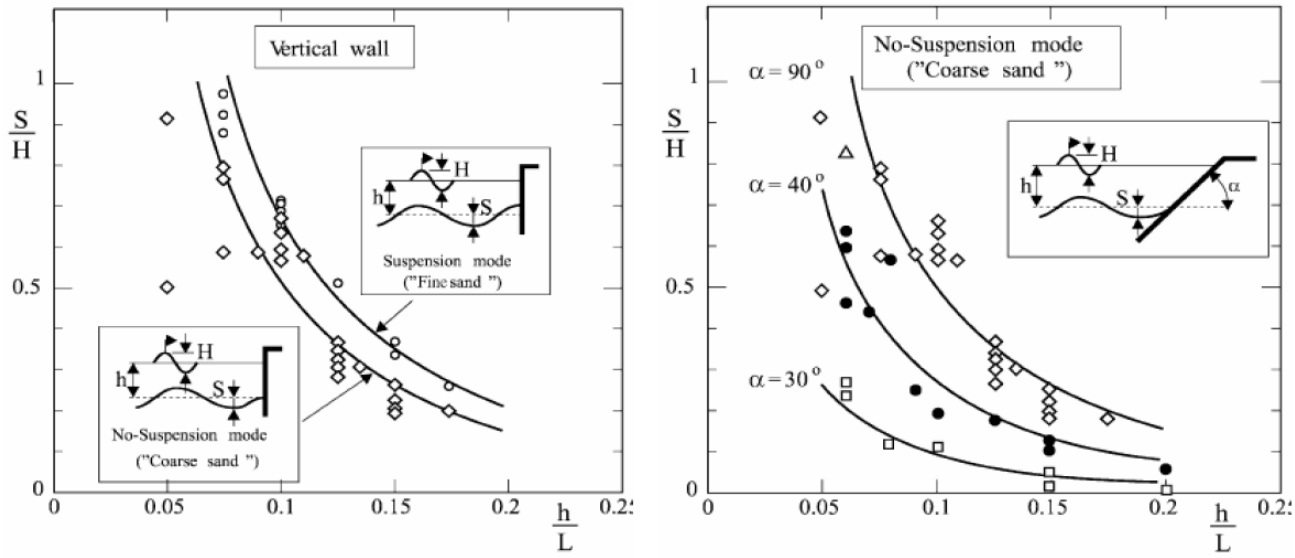


圖 1.12 直立堤與斜坡拋石堤之堤前掏刷關係 (Sumer et al., 2001)

國內針對麥寮港防波堤前海域地形變遷分析，多以海潮流水動力作用為底床主要沖刷因素進行數值模式模擬分析 (劉與黃，2000)，並未考慮波浪在堤前反射形成短峰波所產生之堤腳沖刷，此外在底床沖淤模式中使用穩態

(steady) 和均勻 (uniform) 之平衡狀態下之輸沙公式模擬非穩態之漂沙活動行為，與實際海域之輸沙現象不符。許等人 (2003) 建立適合分析港口防波堤前沖刷之海域地形變化模式，包括能反應出波浪於堤前反射及繞射效應之波浪場模式，水動力模式則包含波浪衍生之沿岸流、潮流以及海流等效應，底床侵淤模式則考慮波浪於堤前沖刷水流、沿岸流及海潮流輸沙量估算，據此模擬麥寮港西防波堤堤前沖刷現象，分析其動力機制及侵淤原因。

六、Flow-3D 應用於波、流場及地形變化計算

Dentale (2012) 根據水工模型試驗之佈置建構防坡堤保護工模型，利用 FLOW-3D 模擬三維石堆斜坡底床，分析波流對於消波設施的反射、透射、溯升、越波與碎波等現象，以及結構體基礎的穩定性。陳 (2009) 分析有限水深短峰波對海床處將形成波壓力，引起海床變形乃至液化。應用 FLOW-3D 模擬防波堤堤頭附近海床上的波壓力，最大波高與海床超靜孔隙水壓力最大值均位於距堤頭 0.5 倍波長附近，也是最易發生液化的地方。賴 (2009) 以 FLOW-3D 計算不透水和孔隙底床之波浪變形、流場及紊流特性。結果顯示孔隙底床對波浪發生碎波之型態產生影響，使得因捲波 (plunging) 而產生的迴流減弱消失。因孔隙層之摩擦及滲透作用，在碎波帶與沖刷帶之間波能消散、流場及紊流特性有很大的差異。Achartya (2011) 利用 FLOW-3D 的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模式模擬探討系列丁壩平面底床沖刷機制，定量剖析丁壩周圍縱向、橫向及垂直面紊流流場。馬 (2011) 利用 FLOW-3D 的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模式求解非定常雷諾平均方程式 (RANS) 之控制方程式，探討潛堤與直立堤間之波高水位變化及波流場狀態。結果顯示波浪通過潛堤後，受直立堤反射影響，重複波波峰位置因兩堤間距不同而變化，當兩堤間距為 0.25 倍和 0.75 倍波長時，波高與水位較高。侯等人 (2011) 以 FLOW-3D 模擬港池內外波浪繞射分佈特性，比較港池於外海為不等水深的條件下，港池內外 Kd 值之變化。

第二章　基本資料蒐集與分析

現場基本資料之調查、蒐集與分析，為瞭解計畫區海域水動力特性及海岸地形變遷之基礎。歷年海象、氣象及地象資料之統計分析結果，為建立波、流與海岸地形變化數值模式之校核參考，及水工模型試驗條件設定之依據。本研究以臺中港及麥寮工業港為主要研究區域，針對臺中與雲林海域之氣象、海象及地形變化進行統計分析。

雲林縣海岸北起濁水溪口南至北港溪口，雲林離島工業區自民國 83 年動工興建，麥寮港外廓防波堤則至民國 89 年 9 月完工。成大水工試驗所自民國 80 年起，於雲林縣離島工業區海域進行長期氣象、海象、水文及地形等各項調查工作，其海、氣象觀測站相關位置如圖 2.1 所示。

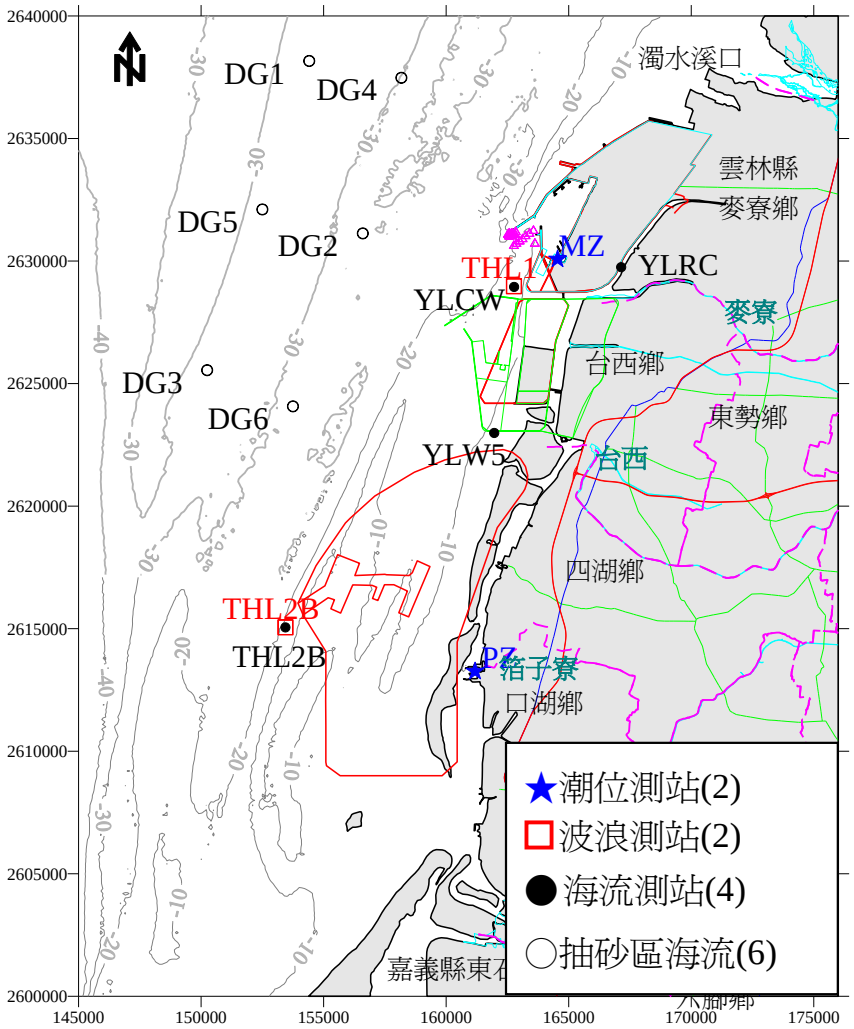


圖 2.1　雲林縣離島工業區海氣象觀測站位置圖 (成大水工所，2010)

臺中港北鄰大安溪及大甲溪，南鄰大肚溪，臺中港於民國 65 年完成主體工程，民國 79～84 年先延長北防波堤 850 公尺，民國 89～91 年再延長北防波堤 480 公尺。臺中港鄰近地區之海、氣、地象觀測調查資料，包括中央氣象局之梧棲氣象觀測站資料、港灣技術研究中心之臺中港海象分析資料、臺中港務分公司歷年地形水深觀測資料及水利署河川水文輸沙資料等，其海氣象觀測站相關位置如圖 2.2 所示。

資料來源：Google Map、港灣技術研究中心

圖 2.2　臺中港海氣象觀測站位置圖 (交通部運輸研究所，2011)

2.1 氣象資料

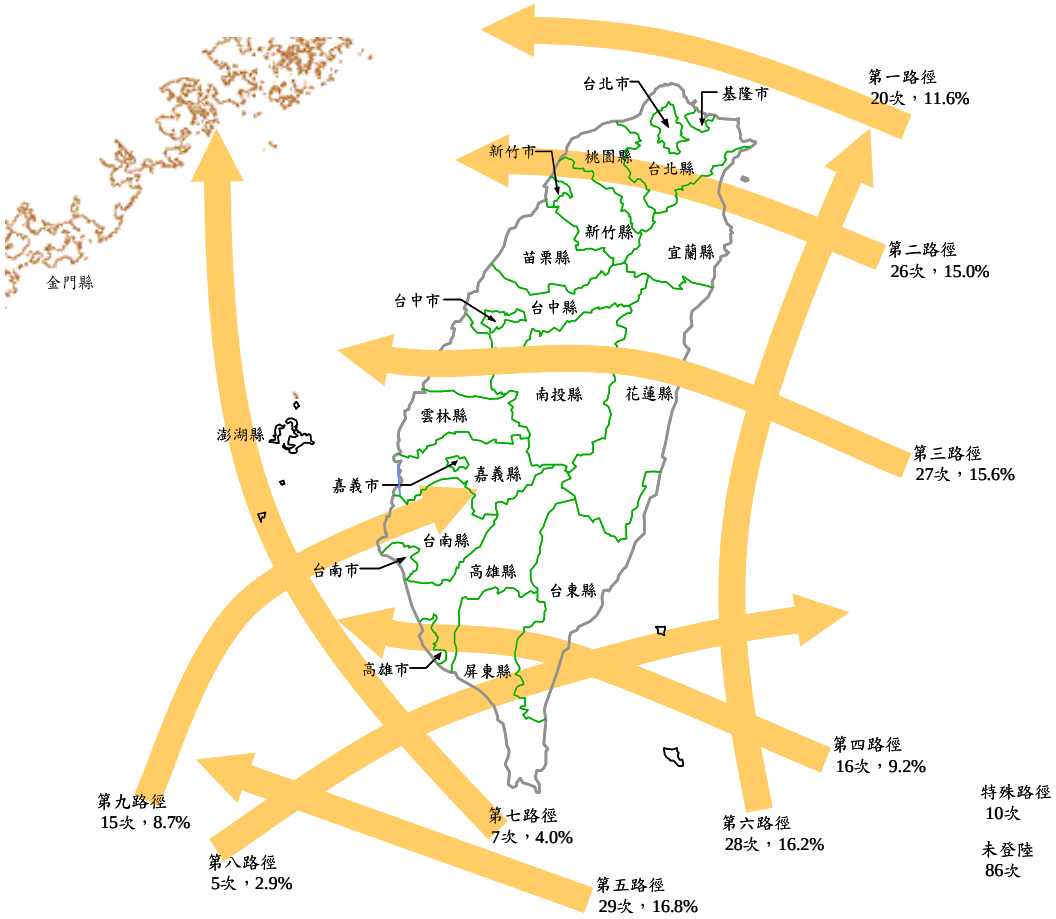
1. 風速與風向

根據經濟部水利署麥寮氣象站 2000~2006 年之分析資料，記錄期間平均風速為 5.7 m/sec，最大風速為九月時的 21.5 m/sec，發生於 2005 年 9 月 1 日強烈颱風泰利來襲時；冬季 (10 月至隔年 3 月) 平均風速為 6.24 m/sec，主要風向為 NNE 向；夏季 (4~9 月) 平均風速為 5.11 m/sec，其風向則較為紛紜，4、5 月時風向仍為 NNE 向，但 6、7 月則轉為 S~SW 向，8、9 月轉為 N~NNE 向。本區域全年風向主要為 NNE 向（約 42.24%），其次為 N 向（約 13.05%）及 NE 向（約 9.28%），三個主要風向群發生頻率合佔全年 64.57%以上，顯示麥寮區域之海岸風力以冬季的東北季風最為顯著。

根據中央氣象局梧棲氣象站 2001 年 1 月~2008 年 2 月之觀測資料分析，梧棲地區歷年主要風向為 N 向，約佔 36.6%。9 月至翌年 5 月主要風向為 N 向，而 7、8 月份受颱風影響造成風向分佈以 SSE 向為最多。梧棲地區冬季期間主要風向為 N 向，約佔 54.67%，風速小於 12 m/sec 之累積機率約佔 97.65%。夏季期間主要風向為 N 向，約佔 21.83%；其次為 SSE 向，約佔 11.45%，風速小於 12 m/sec 之累積機率約佔 99.21%。

2. 颱風

根據中央氣象局所發佈自 1958~2011 年間影響臺灣之颱風警報資料，其颱風路徑分類共分為九類，路徑分佈及影響比例如圖 2.3 所示。而影響臺中、雲林海域的颱風大致以第三、七、九路徑為主，發生機率各為 15.6%、4.0%、8.7 %。此外，若以颱風發生的月份進行分類，發生機率以 8 月份最多 (29.4%)，其次為 7 及 9 月份 (20.8 % 及 23.4 %)，各月份之機率如表 2.1 所示。由表 2.1 亦可得知，到目前止 1~3 月份並無颱風侵襲臺灣的紀錄。



資料來源：中央氣象局，本計畫繪製統計；統計期間：1958 年～2011 年。

圖 2.3　侵襲臺灣之颱風路徑統計圖 (1958～2011)

表 2.1 各月份發生颱風之機率列表

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
次 數	–	–	–	2	11	24	56	79	63	25	8	1
%	–	–	–	0.7	4.1	8.9	20.8	29.4	23.4	9.3	3.0	0.4

資料來源：中央氣象局，本計畫彙整統計；統計期間：1958 年～2011 年。

2.2 海象資料

2.2.1 波浪

1. 雲林海域

成大水工所自 1992 年起即於雲林離島工業區海域進行海象觀測，歷年監測位置配合實際需求已多次變更，其中大部分是短期測站，近年來較長期的波浪測站有 THL1 (1992 年至今) 與 THL2B (2001 年至今)，惟 THL1 測站未觀測波向 (多以風向輔助分析)，THL2B 僅有近期波向資料，各測站位置圖如圖 2.1 所示。

THL1 測站又稱臺西測站，位於麥寮工業港西防波堤西南方約 2km 處，水深約為-15m。本計畫根據成大水工所提供之 1997～2010 年度 THL1 測站海象觀測資料，進一步統計分析臺西海域夏季 (4 月至 9 月) 與冬季 (10 月至隔年 3 月) 的波浪特性，波高對應風向之波浪玫瑰圖，如圖 2.4 所示。結果顯示，夏季平均示性波高 1.0 m，平均示性週期 5.3 sec，對應風向多分佈在 NNW~SW 之間；冬季平均示性波高 1.3 m，平均示性週期 5.8 sec，對應風向集中在 NNW、NW；觀測期間測得最大波高為 5.4 m，對應尖峰週期為 8.3 sec，對應風向為 NNW，發生於 2005 年 9 月 1 日泰利颱風期間。

THL2B 測站又稱四湖測站，位於箔子寮外海 5km 處，水深約-18m。本計畫根據成大水工所提供之 2001～2010 年度 THL2B 站海象觀測資料，進一步統計分析四湖海域夏季 (4 月至 9 月) 與冬季 (10 月至隔年 3 月) 的波浪特性，波高對應波向之波浪玫瑰圖，如圖 2.5 所示。結果顯示，夏季平均示性波高 1.3 m，平均示性週期 5.8 sec，主要波向分佈在 N~NNW、W~WSW；冬季平均示性波高 2.4 m，平均示性週期 6.3 sec，主要波向集中在 N、

NNW；觀測期間測得最大波高為 6.4 m，對應尖峰週期為 11.2 sec，對應波向為 NNW，發生於 2010 年 12 月 16 日東北季風期間。

夏季 (4~9 月)　　冬季 (10~3 月)

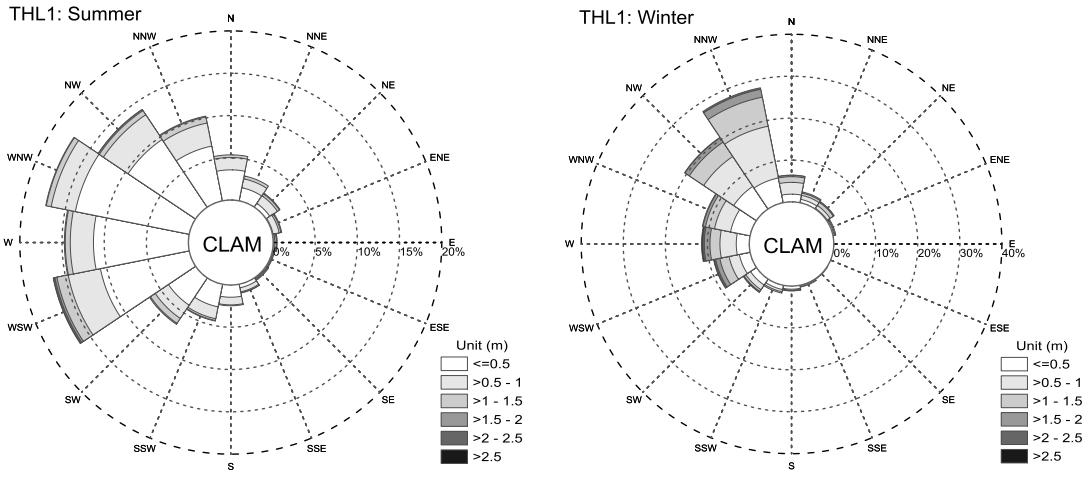


圖 2.4　雲林海域 THL1 測站 1997~2010 年間波浪玫瑰圖

夏季 (4~9 月)　　冬季 (10~3 月)

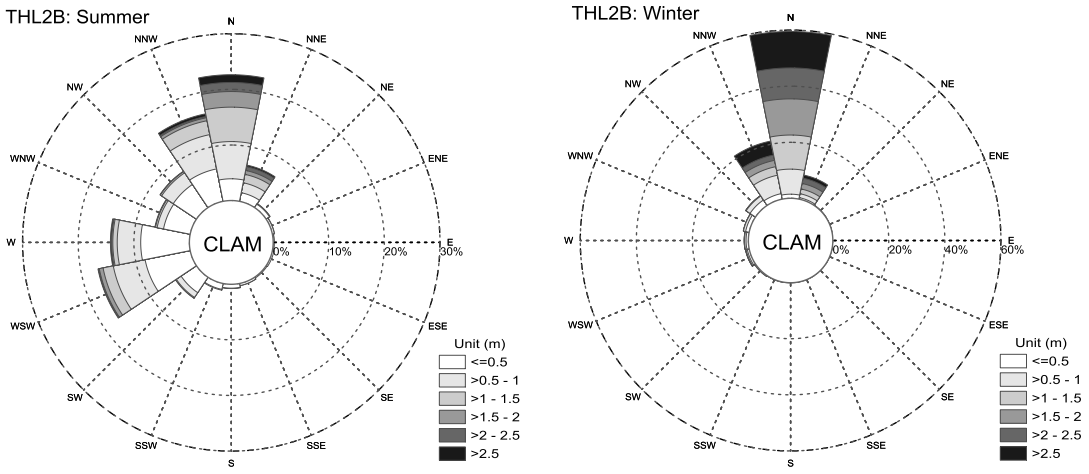


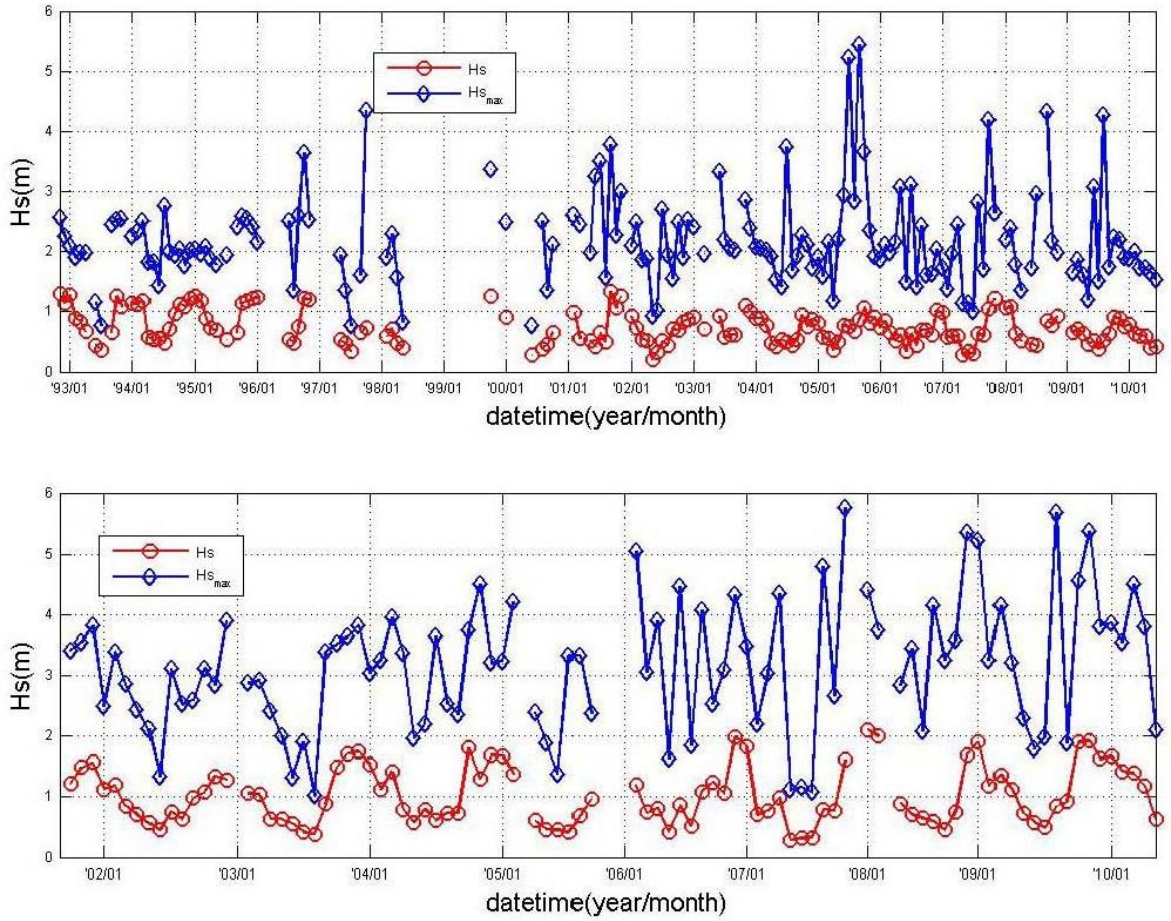
圖 2.5　雲林海域 THL2B 測站 2001~2010 年間波浪玫瑰圖

此外，賴等人 (成大水工所，2010) 針對雲林海域長期波浪變化趨勢，就平時情形與極端條件分別探討分析：雲林海域冬季受東北季風影響，風速大且吹風延時長，波浪之示性波高與週期較夏季一般時期為大，月平均示性波高介於 1.0m～ 2.0m。夏季浪小，大波高主要於颱風影響時期測得，由於作用時間較短，月平均波高僅約 0.5m。緊鄰麥寮港南側之臺西測樁(THL1)與箔仔寮外海測樁(THL2B)兩站夏季時期平均波高差異不大，東北季風時期

則以 THL2B 所測較大。THL1 測站近幾年於東北季風期間，波高明顯有較工業區開發初期為弱之趨勢，夏季期間則無明顯變化；THL2B 測站近幾年東北季風期間平均波高略有增大趨勢，夏季平均波高則與以往相同。

極端條件方面，根據圖 2.6 兩站歷年月平均與最大示性波高分佈顯示，夏秋季颱風與東北季風鋒面為主要測得時期。其中 THL1 測站近幾年於麥寮港築堤後，每年最大示性波高皆是於颱風影響下所測得，THL2B 測站年度極大值並不一定測得於颱風影響時期，東北季風冷鋒面所帶來之強風由於延時比颱風時期為長，更益於波浪之成長，因此屢次測得年度極值。另外值得注意的是發生於東北季風時期之颱風可能產生共伴效應，而於兩站同步測得年度最大示性波高，例如 2006 年柯羅莎颱風 (KROSA，警報期間 10/4~10/7，非共伴環流)。

為瞭解何種颱風路徑與強度對雲林海域造成較大影響，將歷年颱風時期測得局部最大示性波高排序選取超過 4 米波高之資料，列如表 2.2 與表 2.3。結果顯示強烈颱風其路徑如為 2 (向西行進路徑經過臺灣北部) 或 3 (向西行進路徑經過臺灣中部) 明顯比其他條件可測得較大波浪，例如 2005 年海棠 (07/16～07/20)、泰利 (08/30～09/01)、龍王 (09/30～10/03)；2007 年聖帕 (08/16～08/19)、柯羅莎 (10/04～10/07)；2008 年薔蜜 (09/26～09/29)；2009 年莫拉克 (08/05～08/10) 等路徑 2 或 3 之強烈颱風在兩測站可測得超過 4 米示性波高，其鄰近時刻平臺所測風速皆超過 20 m/s，風向北北西~西北西，最大示性波高主要測得於最大風速之後數小時，亦即颱風中心已離開本島在臺灣海峽時期測得，颱風時期波浪主頻率 THL1 為 0.1Hz~0.2Hz、THL2B 為 0.1Hz。



資料來源：賴等人，「雲林海岸長期海象環境變化分析」，海岸開發行為經濟與環保並重－雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集，99 年 10 月。

圖 2.6　兩測站之月平均與月最大示性波高分佈

表 2.2　THL1 測站歷年颱風波浪超過 4m 統計

編號	名稱	警報期間	強度	颱風路徑分類	Hs(m)	Ts(s)	鄰近時刻最大風速(m/s)	對應風向
200513	泰利	08/30~09/01	強烈	3	5.44	5.9	28.3(THL1)	NNW
200505	海棠	07/16~07/20	強烈	3	5.23	6.0	22.9(THL1)	WNW
200815	薔蜜	09/26~09/29	強烈	2	4.33	6.8	28.2(THL1)	NNW
200908	莫拉克	08/05~08/10	中度	--	4.27	7.2	20.6(THL1)	NNW

資料來源：賴等人，「雲林海岸長期海象環境變化分析」，海岸開發行為經濟與環保並重－雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集，99 年 10 月。

表 2.3 THL2B 測站歷年颱風波浪超過 4m 統計

編號	名稱	警報期間	強度	颱風路徑分類	Hs(m)	Ts(s)	波向	鄰近時刻最大風速(m/s)	對應風向
200715	柯羅莎	10/04~10/07	強烈	2	5.76	7.5	NNE	18.2(mz)	NW
200908	莫拉克	08/05~08/10	中度	--	5.67	7.4	WNW	20.4(mz)	N
200519	龍王	09/30~10/03	強烈	3	4.85	7.1	--	30.9(THL2B)	NNW
200708	聖帕	08/16~08/19	強烈	3	4.79	8.9	NNW	26.3(THL2B)	NNW
200917	芭瑪	10/03~10/06	中度	--	4.56	6.8	NNW	20.2(mz)	NNE
200604	碧利斯	07/12~07/15	輕度	2	4.46	7.2	NW	22.9(THL2B)	NW
200808	鳳凰	07/26~07/29	中度	3	4.15	6.8	ENE	14.6(mz)	NNE

資料來源：賴等人，「雲林海岸長期海象環境變化分析」，海岸開發行為經濟與環保並重－雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集，99 年 10 月。

2. 臺中海域

根據蔡及徐 (2011) 分析港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2009 年 12 月期間之波浪觀測成果：

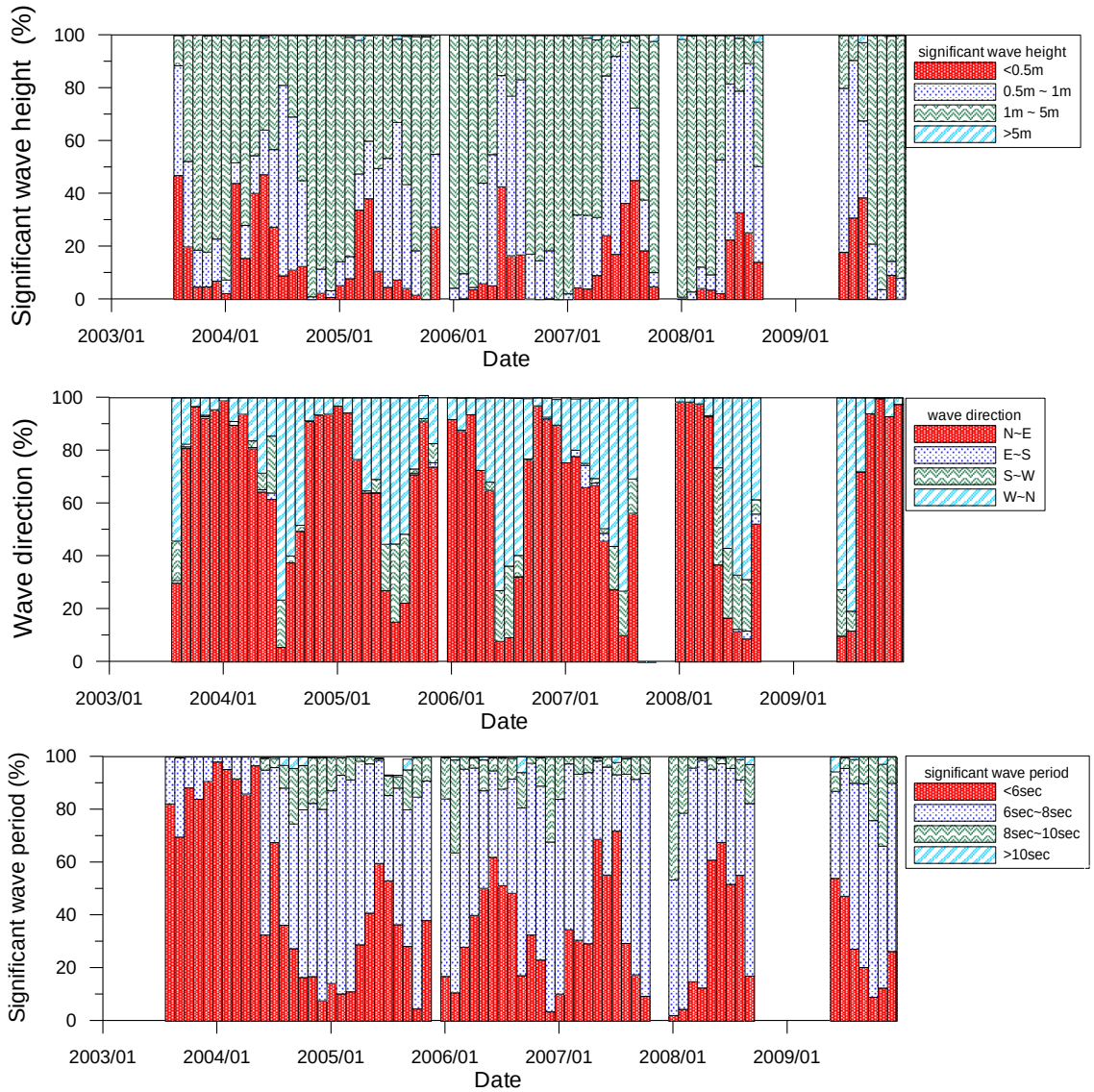
臺中港海域歷年之波高、週期及波向的統計結果，如圖 2.7 與表 2.4 所示。由圖 2.7 顯示，夏季波向介於西至北向所佔的比例較大，冬季波向介於北至東向所佔的比例較大。波向組成中由北至東向，約佔歷年觀測的 64.2%；其次為西至北向，約佔歷年觀測的 28.2%。由表 2.4 可知，$H_{1/3}$ 波高小於 1 m 以下者，約佔歷年觀測的 40.8%；$H_{1/3}$ 波高介於 1m 至 5 m 之間者，約佔歷年觀測的 58.8%；$H_{1/3}$ 波高大於 5 m 以上者，約佔歷年觀測的 0.3%。$T_{1/3}$ 週期集中在 8 秒以內，小於 6 sec 以下者，約佔歷年觀測的 42.3%；介於 6 sec 至 8 sec 之間者，約佔歷年觀測的 48.3%。歷年之平均 $H_{1/3}$ 波高為 1.54 m；平均 $T_{1/3}$ 週期為 6.4 sec；歷年最大 $H_{1/3}$ 波高為 7.78 m，其週期為 8.7 sec，發生於 2009 年 8 月 7 日莫拉克 (Morakot) 颱風期間。

在月統計部分，圖 2.8 為歷年逐月之 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 統計圖，由圖 2.8 可知，歷年之月平均 $H_{1/3}$ 小於 3 m 以下，月平均 $T_{1/3}$ 介於 4.9 sec 至 7.8 sec 之間，其中 2005 年 7 月及 8 月之 $T_{1/3}$ 大於 11 sec。

表 2.4 臺中港 2003 至 2009 年示性波高、週期及波向資料統計表

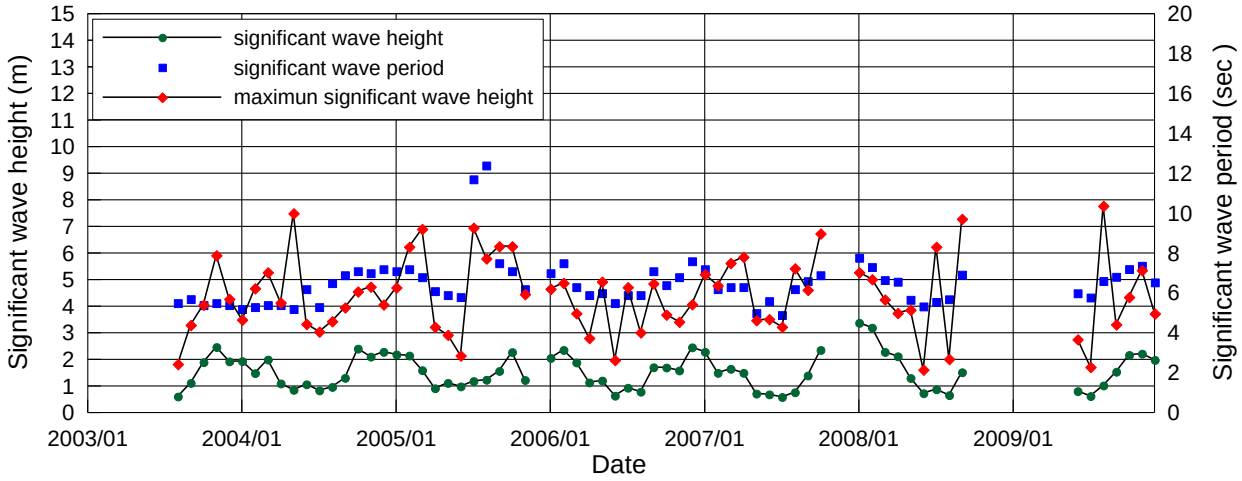
年份	$H_{1/3}$ 平均值 (m)	$T_{1/3}$ 平均值 (sec)	$H_{1/3}$ 最大值 (m)	$H_{1/3}$ 週期 (sec)	$H_{1/3}$ 波向	$H_{1/3}$ <0.5m (%)	$H_{1/3}$ 0.5~1m (%)	$H_{1/3}$ 1~5m (%)	$H_{1/3}$ >5m (%)	$T_{1/3}$ <6sec (%)	$T_{1/3}$ 6~8sec (%)	$T_{1/3}$ 8~10sec (%)	$T_{1/3}$ >10sec (%)
2003	1.61	5.5	5.92	5.6	NNE	16.7	23.4	59.9	0.0	83.0	17.0	0.0	0.0
2004	1.53	6.1	7.50	6.2	WSW	17.7	21.8	60.4	0.1	56.1	35.3	7.6	1.0
2005	1.50	7.6	6.96	8.9	N	12.8	25.8	60.8	0.5	29.6	60.9	7.6	0.5
2006	1.54	6.5	4.93	12.1	N	7.7	26.8	65.6	0.0	32.0	54.3	12.9	0.9
2007	1.35	6.1	6.74	9.8	-	16.4	32.8	50.3	0.6	35.7	57.9	6.1	0.0
2008	1.79	6.4	7.29	10.8	N	11.7	30.4	57.3	0.6	31.8	55.8	11.8	0.5
2009	1.48	6.6	7.78	8.7	-	13.8	27.0	58.8	0.4	28.1	56.8	13.7	1.4
統計值	1.54	6.4	7.78	8.7	-	13.8	26.8	59.0	0.3	42.3	48.3	8.5	0.6

資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 2.7 臺中港 2003 至 2009 年平均示性波高、週期及波向月統計分佈



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 2.8 臺中港 2003 至 2009 年平均示性波高、週期及最大示性波高之月統計

本計畫根據港灣技術研究中心所出版之 2000～2008 年度「港灣海氣地象觀測資料年報」之觀測數據，進一步統計分析臺中港海域逐月之平均示性波高、平均示性週期、主要波向、最大示性波高、其對應週期及發生日期，如表 2.5 所示。由表 2.5 可得知，臺中港海域夏季 (4~9 月) 平均示性波高 1.02 m，月平均示性週期 5.8 sec，波向以 N、NNE、W 為主；最大示性波高為 7.50 m，其對應週期為 6.0 sec，發生於 2004 年 5 月 28 日。冬季 (10~3 月) 平均示性波高 2.08 m，月平均示性週期 6.3 sec，波向集中在 NNE、N。最大示性波高為 6.91 m，其對應週期為 6.0 sec，發生於 2005 年 3 月 1 日。

表 2.5 臺中港 2000 年至 2008 年逐月波浪資料統計表

月份	月平均示性波高(公分)	月平均示性週期(秒)	主要波向		最大示性波高(公分)	對應週期(秒)	發生日期
2000/1/1	177	6.0	NW	NNW	452	8.0	1 月 7 日
2000/2/1	288	6.0	NW	WNW	479	7.0	2 月 1 日
2000/3/1	170	5.0	NW	NNW	376	6.0	3 月 16 日
2000/4/1	72	5.0	NNE	E	258	6.0	4 月 22 日
2000/5/1	62	5.0	NE	NNE	339	7.0	5 月 17 日
2000/6/1	46	5.0	NE	NNE	276	7.0	6 月 13 日
2000/7/1	86	6.0	W	NE	375	7.0	7 月 6 日
2003/8/1	60	5.0	W	NNE	183	5.0	8 月 17 日
2003/9/1	111	5.0	NNE	N	330	6.0	9 月 1 日
2003/10/1	189	5.0	NNE	N	406	6.0	10 月 4 日
2003/11/1	247	5.0	N	NNE	592	5.0	11 月 22 日
2003/12/1	192	5.0	N	NNE	428	6.0	12 月 7 日
2004/1/1	194	5.0	NNE	N	350	6.0	1 月 19 日
2004/2/1	149	5.0	NNE	N	468	5.0	2 月 3 日
2004/3/1	200	5.0	NNE	N	528	5.0	3 月 7 日
2004/4/1	110	5.0	NNE	N	414	6.0	4 月 8 日
2004/5/1	86	5.0	NNE	N	750	6.0	5 月 28 日
2004/6/1	107	6.0	ENE	W	334	7.0	6 月 9 日
2004/7/1	84	5.0	W	WNW	305	7.0	7 月 3 日
2004/8/1	97	7.0	N	NW	344	9.0	8 月 24 日
2004/9/1	131	7.0	N	NNW	396	10.0	9 月 11 日
2004/10/1	241	7.0	N	NNE	456	9.0	10 月 25 日
2004/11/1	211	7.0	N	NNE	474	9.0	11 月 27 日
2004/12/1	229	7.0	N	NNE	407	9.0	12 月 27 日
2005/1/1	219	7.0	N	NNE	471	8.0	1 月 8 日
2005/2/1	215	7.0	NNE	N	624	6.0	2 月 24 日
2005/3/1	160	7.0	N	NNE	691	6.0	3 月 1 日
2005/4/1	92	6.0	N	NNE	323	7.0	4 月 13 日
2005/5/1	112	6.0	NNE	N	293	6.0	5 月 26 日

表 2.5 (續) 臺中港 2000 年至 2008 年逐月波浪資料統計表

月份	月平均示性波高(公分)	月平均示性週期(秒)	主要波向		最大示性波高(公分)	對應週期(秒)	發生日期
2005/6/1	99	5.0	W	NNE	215	7.0	6 月 6 日
2005/7/1	119	5.0	W	WNW	696	9.0	7 月 18 日
2005/8/1	124	6.0	W	N	580	8.0	8 月 31 日
2005/9/1	157	7.0	N	NNE	626	9.0	9 月 1 日
2005/10/1	228	7.0	N	NNE	626	6.0	10 月 29 日
2005/11/1	123	6.0	N	NNE	446	6.0	11 月 15 日
2006/1/1	206	7.0	N	NNE	466	10.0	1 月 5 日
2006/2/1	236	7.0	N	NNE	488	10.0	2 月 4 日
2006/3/1	189	6.0	N	NNE	374	10.0	3 月 1 日
2006/4/1	114	6.0	NNE	N	281	8.0	4 月 20 日
2006/5/1	121	6.0	N	NNE	493	12	5 月 11 日
2006/6/1	64	5.0	W	WNW	198	6.0	6 月 9 日
2006/7/1	94	6.0	W	WNW	472	8.0	7 月 14 日
2006/8/1	79	6.0	N	NNW	302	8.0	8 月 9 日
2006/9/1	171	7.0	N	NNE	486	10.0	9 月 10 日
2006/10/1	170	6.0	NNE	N	369	8.0	10 月 30 日
2006/11/1	159	7.0	N	NNE	342	7.0	11 月 2 日
2006/12/1	246	8.0	N	NNE	408	9.0	12 月 21 日
2007/1/1	229	7.0	N	NNE	521	7.0	1 月 24 日
2007/2/1	105	6.0	N	NNE	479	8.0	2 月 1 日
2007/3/1	165	6.0	N	NNE	563	8.0	3 月 5 日
2007/4/1	150	6.0	N	NNE	586	9.0	4 月 2 日
2007/5/1	72	5.0	N	NNE	348	8.0	5 月 13 日
2007/6/1	69	6.0	W	N	352	6.0	6 月 12 日
2007/7/1	59	5.0	W	WNW	323	7.0	7 月 12 日
2007/8/1	77	6.0	N	W	543	9.0	8 月 18 日
2007/9/1	140	7.0	*	*	462	7.0	9 月 18 日
2007/10/1	236	7.0	*	*	674	10.0	10 月 6 日
2008/1/1	338	8.0	N	NNE	528	8.0	1 月 16 日
2008/2/1	320	7.0	NNE	N	502	9.0	2 月 9 日
2008/4/1	212	7.0	NNE	N	375	7.0	4 月 23 日
2008/5/1	131	6.0	W	N	387	8.0	5 月 5 日
2008/6/1	73	5.0	W	WNW	162	5.0	6 月 17 日
2008/7/1	88	6.0	WNW	W	624	8.0	7 月 28 日
2008/8/1	66	6.0	WNW	W	202	6.0	8 月 4 日
2008/9/1	152	7.0	NNE	N	729	11.0	9 月 28 日

2.2.2 颱風波浪推算

常見之半經驗颱風波浪推算模式為 Breteschneider 參數法 (1952)、湯 (1970) 之移動風域數值推算法、井島 (1972) 之追蹤法及梁 (1982) 之颱風湧浪預報法等。湯 (1970) 有鑑於 Wilson 之方法只能推算深海風浪，不能直接推算海岸前之波浪狀況，故綜合 Wilson 及 Breteschneider 等經驗公式，配合淺海中之風浪關係、海底摩擦之影響、湧浪之推算方式及碎波後波浪之計算，提出移動風域數值推算模式，而本計畫使用之定點颱風波浪推算半經驗模式即是依據上述原理建立並加以改善而成，其基本原理詳述如下：

(1) 波向與風向之關係

依據深海之波浪觀測結果發現，一般波浪進行之方向與海面上平均風向甚為接近，故就風浪而言，在其形成初期可認為波向與風向一致，但當波浪進行某一段距離後，若波浪週期保持不變，則因風向改變在新方向之波高 Hθ 將可寫成：

$$H_\theta = H\cos\theta \tag{2-1}$$

式中 H 為前一推算點之波高，θ 為新風向與原風向之夾角。

(2) 波浪之能量傳遞速度

當波浪隨風向進行或轉變成湧浪後，其能量傳遞速度均以波浪群速度表示之。

(3) 風與風浪之關係

(a) 深海波浪

在深海時根據 Wilson (1955)之方法推算深海風浪，即以下列近似公式推算波浪之波高與週期：

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha\tanh\left[k_1\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/2}\right] \tag{2-2}$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta\tanh\left[k_2\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/3}\right] \tag{2-3}$$

式中 H 為示性波波高，T 為示性波週期，F 為吹風距離，U 為風速，g 為重力加速度，α、β、k1 及 k2 為常數值，分別等於 0.26、1.40、0.01 及 0.0436。

(b) 淺海波浪

當波浪進入淺水區後，依風、浪、水深間之關係為 (湯，1968)：

$$\frac{gH}{U^2}=\alpha\tanh\left[k_3\left(\frac{gD}{U^2}\right)^{3/4}\right]\tanh\left\{\frac{k_1\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/2}}{\tanh\left[k_3\left(\frac{gD}{U^2}\right)^{3/4}\right]}\right\} \tag{2-4}$$

$$\frac{gT}{2\pi U}=\beta\tanh\left[k_4\left(\frac{gD}{U^2}\right)^{3/8}\right]\tanh\left\{\frac{k_2\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/3}}{\tanh\left[k_4\left(\frac{gD}{U^2}\right)^{3/8}\right]}\right\} \tag{2-5}$$

式中 D 表示水深，常數 k3=0.578，k4=0.520。當 D→∞時，式(2-4)及(2-5)可簡化為式(2-2)及(2-3)。

(4) 湧浪之計算

當風向改變角度 θ 大於 60°或風浪獲得能量較損失者為小時，均視為湧浪，其波高及週期與風浪之關係依據 Bretschneider 之湧浪研究結果可表示如式(2-6)和(2-7)所示：

$$\frac{H_f}{H_d}=\cosh\left\{0.66\left(\frac{F}{H_f}\right)^{0.06}\left(\frac{D}{F}\right)^{0.25}\tanh\left[3\left(\frac{D}{F}\right)^{0.3}\right]\right\} \tag{2-6}$$

$$\frac{T_d}{T_f}=\cosh\left\{1.74\left(\frac{2\pi F}{gT_f^2}\right)^{-0.05}\left(\frac{D}{F}\right)^{0.2}\tanh\left[1.02\left(\frac{2\pi F}{gT_f^2}\right)^{-0.04}\left(\frac{D}{F}\right)^{0.32}\right]\right\} \tag{2-7}$$

式中 H_f 與 T_f 及 H_d 與 T_d 分別為風浪及湧浪對應之波高與週期，F 表風浪成為湧浪前之風域長，D 為湧浪進行之減衰距離，當風浪一旦變成湧浪後，則假設其不再受風之影響。

(5) 氣象條件與風速之關係

颱風風速由兩種風速分量合成：

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 \tag{2-8}$$

其中，$\vec{u}_1$ 為低氣壓及地球自轉角速度所引起之風速，$\vec{u}_2$ 則為颱風移動時帶動其周圍氣流所產生之風速，$\vec{u}_1$ 及 $\vec{u}_2$ 之大小可由式(2-9)和(2-10)計算。

$$u_1 = c_1\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a}\frac{r_0}{r}e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2} - \frac{fr}{2} \tag{2-9}$$

$$u_2 = c_2\frac{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a}\frac{r_0}{r}e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2} - \frac{fr}{2}}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a}\frac{1}{e} + \left(\frac{fr_0}{2}\right)^2} - \frac{fr_0}{2}} \tag{2-10}$$

式中 ρ_a 為空氣密度；r_0 為最大風速半徑；r 為求風速位置點與颱風中心之距離；f 為 Coriollis 係數=$2\omega\sin\varphi$；ω 為地球自轉角速度；φ 為計算點之緯度；c_1 為地面風速與傾度風速之比值，在臺灣地區風向與等壓線約成 30°且反時針向內吹，一般 c_1=0.6~0.7；c_2 為 0.6；$\vec{u}_2$ 為方向同颱風之移動風向；ΔP 為氣壓深度或颱風中心氣壓 P_c 與外圍氣壓 P(r)之差值，可由氣象雷達觀測估計或由如下之 Myers 公式計算

$$P(r) = P_c + \Delta P e^{-\frac{r_0}{r}} \tag{2-11}$$

(6) 模擬範圍

颱風波浪之推算需有足夠之颱風資料，如颱風中心氣壓、颱風移動方向、進行速度以及最大風速半徑等，以做為颱風波浪模式之輸入條件。本研究以中央氣象局曾發佈之侵臺歷史颱風資料 (1940～2010 年)，篩選通過以麥寮港海域 (120.10°E，23.76°N) 為中心及臺中港海域 (120.42°E，24.30°N) 為中心，且颱風中心氣壓小於或等於 970 mb 者，共 114 組對計算區影響較大之颱風進行颱風波浪推算。再以推算所得之最大示性波高為樣本空間，利用迴歸分析的方式分別求得 10 年、20 年、25 年、50 年及 100 年重現期之颱風波浪，如表 2.6 與表 2.7 所示。

表 2.6　麥寮港外海各重現期之颱風波浪推算

重現期	100 年		50 年		25 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	6.4	10.6	5.9	10.2	5.3	9.7	5.1	9.5	4.5	8.9
NNW	5.6	9.9	5.1	9.5	4.6	9.0	4.4	8.8	3.8	8.2
NW	5.3	9.7	4.9	9.3	4.5	8.9	4.3	8.7	3.8	8.2
WNW	5.7	10.0	5.2	9.6	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
W	5.8	10.1	5.3	9.7	4.9	9.3	4.7	9.1	4.2	8.6
WSW	5.9	10.2	5.4	9.8	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
SW	6.3	10.5	5.6	9.9	4.9	9.3	4.7	9.1	3.9	8.3

單位：波高 (m)、週期 (sec)；本計畫推算。

表 2.7　臺中港外海各重現期之颱風波浪推算

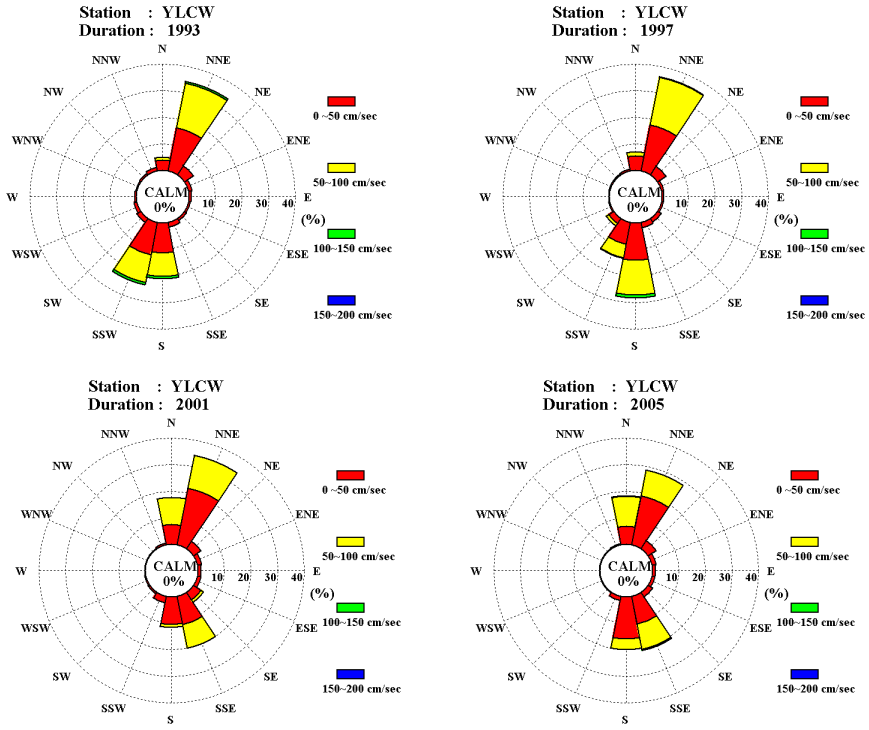
重現期	100 年		50 年		25 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	8.0	11.9	7.4	11.4	6.6	10.8	6.4	10.6	5.6	9.9
NNW	7.9	11.8	7.2	11.3	6.4	10.6	6.1	10.4	5.2	9.6
NW	7.2	11.3	6.6	10.8	5.9	10.2	5.7	10.0	4.9	9.3
WNW	6.6	10.8	6.1	10.4	5.5	9.8	5.4	9.8	4.7	9.1
W	6.3	10.5	5.8	10.1	5.3	9.7	5.2	9.6	4.6	9.0
WSW	6.2	10.5	5.8	10.1	5.2	9.6	5.1	9.5	4.5	8.9
SW	5.7	10.0	5.2	9.6	4.7	9.1	4.5	8.9	4.0	8.4

單位：波高 (m)、週期 (sec)；本計畫推算。

2.2.3 海流

1. 雲林海域

成大水工所自民國 80 年開始持續對離島工業區海域之海流流況進行調查與監測，由歷年之調查結果顯示離島工業區海域海流主要是由潮流、風驅流以及長期平均流三項成份組合而成 (成大水工所，1997)。離島工業區外海流況以潮流沿岸往復運動為主，平均振幅約為 60~100 cm/sec。流向則大致上平行海岸線。其中麥寮與海豐區以及麥寮西堤的影響，顯示漲潮流向仍以 NNE 居多，但退潮流向已受麥寮港西堤延伸的影響。圖 2.9 為 YLCW 測站自 1993～2006 年之海流玫瑰圖，由圖可知，麥寮港西南側之流速、流向受海岸線變化，漲潮流向以 NNE 居多，但退潮流向受麥寮西堤向西南延伸的影響，未築堤前原本 SSW 較多、S 向流次之的狀況，隨著築堤過程中，變成以 S 向為主，而目前築堤完成後再轉為以 SSE 為主的情況。

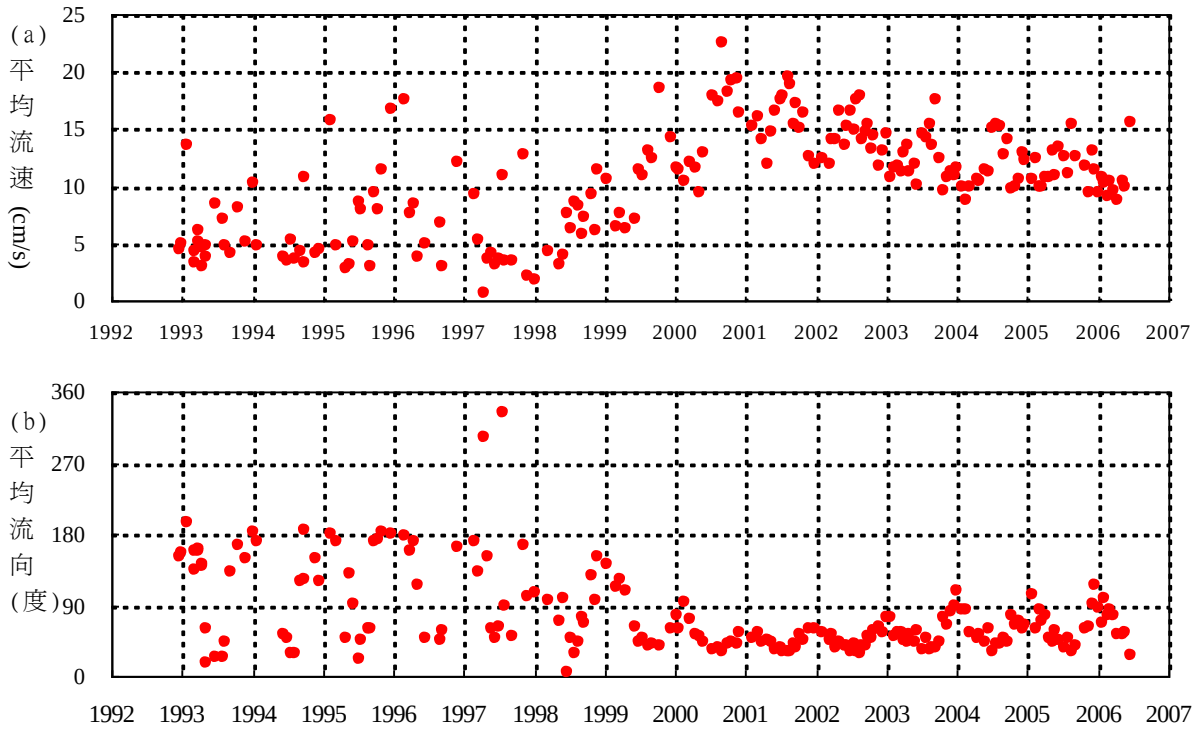


資料來源：「雲林離島式基礎工業區整體環境資源管理評估－96 年度(第 16 年)－(96 年 1 月～96 年 12 月)」第 1 部份第 1 冊，96 年 12 月。

圖 2.9　雲林海域 YLCW 測站歷年之流速流向玫瑰圖

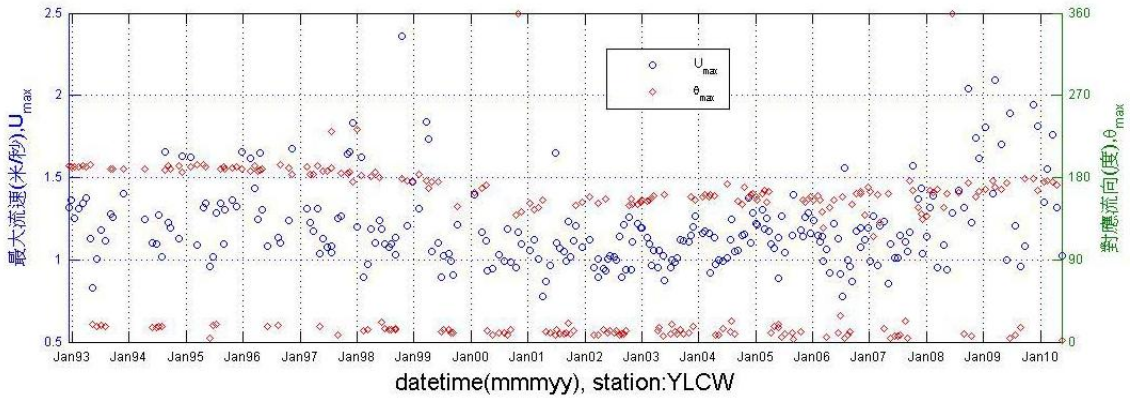
YLCW 測站歷年 (1993～2006 年) 之平均流速與流向變化圖，如圖 2.10 所示。由圖可知，YLCW 測站歷年平均流速之變化情形，自 1999 年後呈現逐年上升之趨勢，直到 2001 後趨於穩定，流速值約為 15 cm/sec；而且自 1999 年後海流之平均流向由東北季風期往南且非東北季風期往東北之趨勢，改變為長年往東北東方向。

圖 2.11 為 YLCW 歷年最大流速與對應流向 (賴等人，2010)，流速於 2000 年前變動範圍較廣，無明顯之變化週期，主要流向多為北北東或南南西~南向。2000 年之後流速集中於 30~50cm/s，大致以夏季時期有較大值，主流向則以北北東或北為主，部分東北季風時期為南南西向，2007 年後主流向改以南或北向為主。而由最大流速與對應流向來看，最大流速同樣於 2000 年前有較大之變動範圍，大致在 100~200cm/s，其對應流向以北北東或南南西為主，2000 年後最大流速有減弱之趨勢至 2007 年多為 100~150cm/s，對應流向變為北北東或南南東，2007 年之後最大流速有增大之趨勢同 2000 年前為 100~200 cm/s，但對應流向以北北東或南，其中東北季風期有較大值 (流向南)。



資料來源：「雲林離島式基礎工業區整體環境資源管理評估－96 年度(第 16 年)－(96 年 1 月～96 年 12 月)」第 1 部份第 1 冊，96 年 12 月。

圖 2.10　雲林海域 YLCW 測站歷年之平均流速與流向變化圖

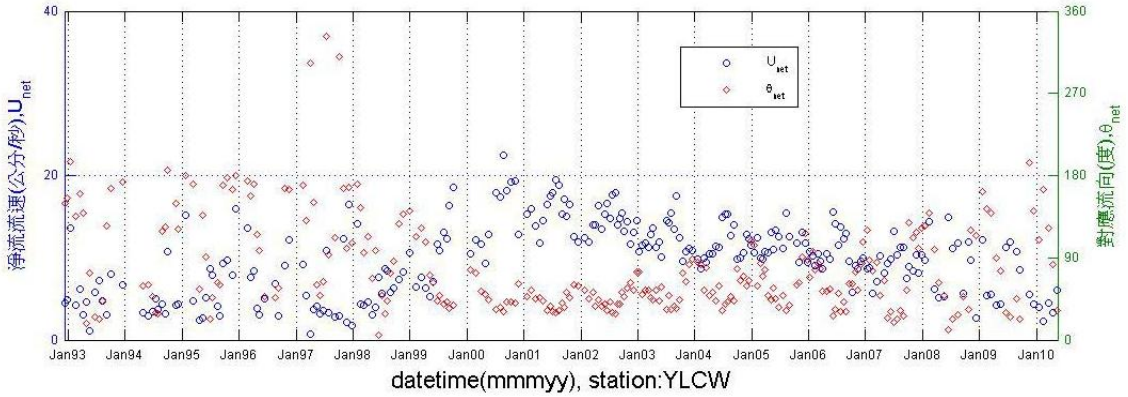


資料來源：賴等人，「雲林海岸長期海象環境變化分析」，海岸開發行為經濟與環保並重－雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集，99 年 10 月。

圖 2.11　雲林海域 YLCW 歷年之最大流速與對應流向圖

圖 2.12 為 YLCW 歷年之淨流流況變化情形 (賴等人，2010)，依麥寮工業港興建時間點，大致上可分為興建前、興建過程中及興建完成後等三個階段。1992~1999 年為興建前階段，流況尚未受影響，每年的 9 月中旬至隔年 3 月間為東北季風期，月淨流流速在 10～17cm/s 之間，流向大部份為南，4、5 月氣候轉型期時，平均流速降至 5 cm/s 以下，流向偏東；6、7 月西南風佔優勢，淨流流向以東北為主，流速約 5～8cm/s。1999 年冬季~2001 年為興

建過程中階段，海域之流況逐漸受麥寮工業港西防波堤興建影響，期間海流之淨流流向幾乎整年往東北東，變動範圍小，淨流流速也逐年增加。2002年興建完成後至今，其淨流流速有逐年遞減之趨勢，另外其淨流流向之變化範圍也逐年增加。



資料來源：賴等人，「雲林海岸長期海象環境變化分析」，海岸開發行為經濟與環保並重－雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集，99 年 10 月。

圖 2.12　雲林海域 YLCW 歷年之淨流流速與流向圖

綜合上述並根據雲林麥寮海域在 1998 年至 2002 年期間之地形水深資料顯示，海域 15m 等深線之走向約在 15 度左右，漲潮時海流沿岸北上，流向以北北東居多，並不受港口興建之影響，但退潮時段，海流由北而下，未築堤前原本南南西較多 (即沿海岸地形等深線而南下，與漲潮流對稱)，但在圍堤興建港口等海岸結構物後，變成以南向為主，築堤完成後轉為以南南東為主，由於漲退潮流向不對稱，形成殘差流，其平均流向指向東北 ~東北東之間。此外，西防波堤結構物自 2002 年興建完成後，至 2007 年之期間，麥寮港與新興區間之海域地形變化，其等深線也逐年向外移動，即該海域有淤積情形，在此一情況下，其漲退潮流況也隨之變化，其中漲潮流向較不受影響，流向仍以北北東居多，但退潮流向在 2006 年以後逐漸變成以南向為主，由於漲退潮流向之不對稱，也同樣形成殘差流，但其值因角度增加，使其淨流流速有逐年遞減之趨勢，因此推估淨流流況之變化，除受麥寮港防波堤結構物影響外，也與麥寮港與新興區間之海域地形歷年來之變化有關，也就是說西防波堤結構物的興建，為影響海域流場特性原因之一。此外流速於築堤後有趨於穩定之趨勢，然極端條件在近 3 年於東北季風期間仍可測得局部較大流速 (賴等人，2010)。

2. 臺中海域

根據蔡及徐 (2011) 分析港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2009 年 12 月期間之海流觀測成果：

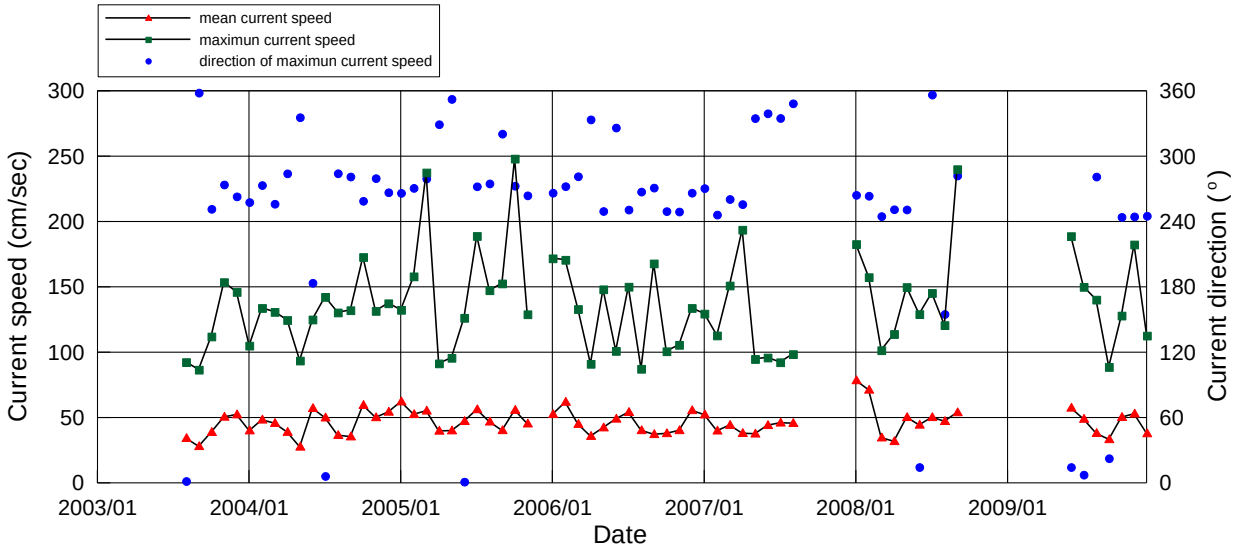
臺中港海岸流況主要由沿岸流、風驅流、潮流及黑潮所組成，根據本所港灣技術研究中心自 2003 年 8 月至 2009 年 12 月期間的海流觀測資料，歷年海流之流速及流向的統計結果如表 2.8 所示。由表 2.8 可知，港區附近主要流向為西至北向，約佔歷年觀測的 56.6%；其次為南至西向，約佔歷年觀測的 22.7%。流速小於 25 cm/sec 以下者，約佔歷年觀測的 25.7%；流速介於 25-50 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 36.2%；流速介於 50-100 cm/sec 之間，約佔歷年觀測的 33.2%；流速大於 100 cm/sec 以上者，約佔歷年觀測的 4.9%。歷年之平均流速為 45.9 cm/sec；最大流速為 248.3 cm/sec，其流向為西向。

表 2.8 臺中港 2003 至 2009 年海流之流速及流向統計表

年份	平均流速 (cm/s)	最大流速		流速 <25cm/s (%)	流速 25~50cm/s (%)	流速 50~100cm/s (%)	流速 >100cm/s (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
		流速 (cm/s)	流向 (°)								
2003	40.8	153.8	W	34.6	34.9	26.3	4.3	23.7	7.2	18.8	50.3
2004	45.3	173.0	W	27.0	34.3	34.7	4.0	10.2	7.6	19.1	63.1
2005	49.2	248.3	W	19.9	36.9	37.7	5.5	9.3	1.4	16.2	73.2
2006	45.9	171.9	W	26.1	35.4	32.8	5.7	5.4	0.7	26.8	67.1
2007	43.5	193.9	WSW	24.7	38.8	34.2	2.3	10.8	2.1	22.1	64.9
2008	51.3	240.2	WNW	23.0	33.8	35.0	8.1	17.5	19.4	26.1	37.0
2009	45.5	189.0	WNW	24.9	39.4	31.5	4.2	28.1	0.9	30.1	41.0
統計值	45.9	248.3	W	25.7	36.2	33.2	4.9	15.0	5.6	22.7	56.6

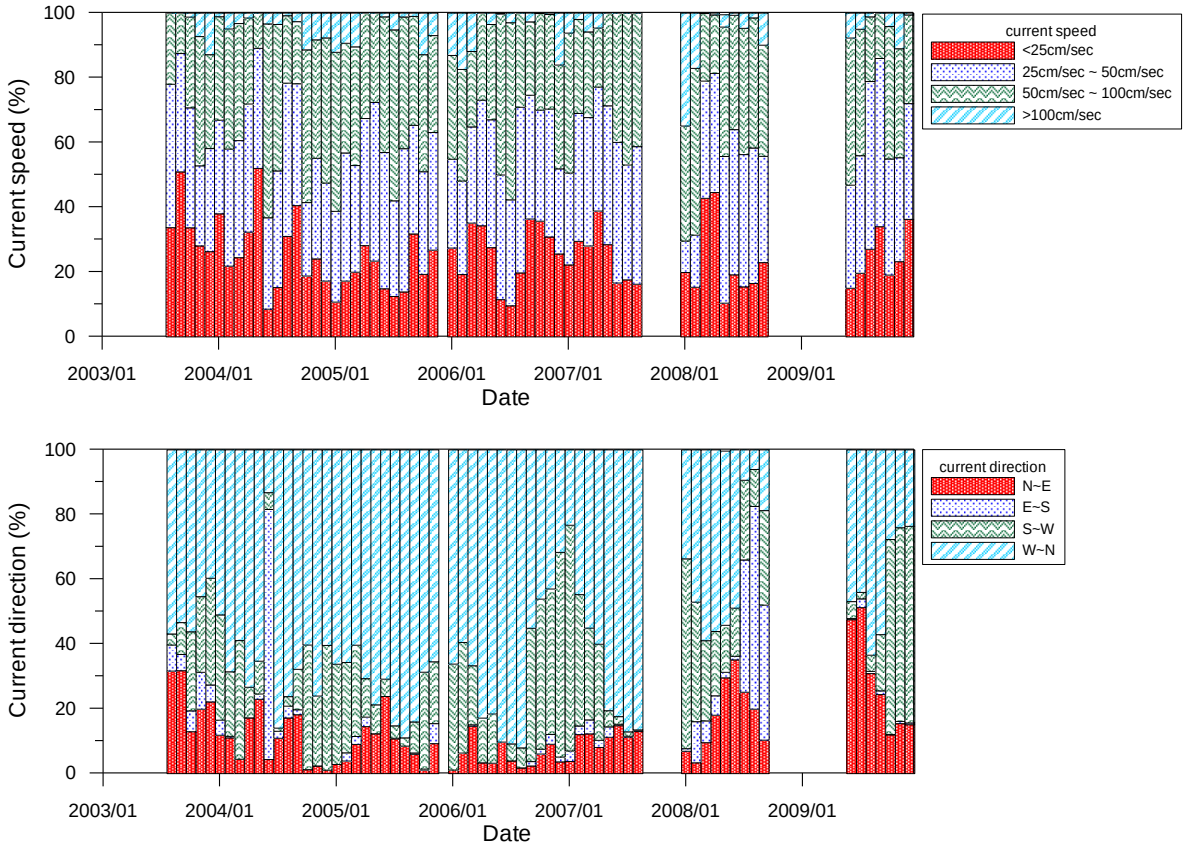
資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

在月統計部分，圖 2.13 為歷年逐月之流速及流向統計圖，由圖可知歷年之月平均流速介於 30~70 cm/sec 之間，最多流向多集中在西至北向。圖 2.14 為臺中港海流歷年逐月之流速及流向統計分佈圖，由圖顯示流速在個組距上的比例分佈互有消長，流向介於西至北向所佔的比例較大。



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 2.13 臺中港 2003 至 2009 年海流流速、流向及最大流速之月統計



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 2.14 臺中港 2003 至 2009 年海流流速、流向及最大流速之月統計分佈圖

2.2.4 潮位

1. 雲林海域

雲林海域屬於半日潮，雲林縣海岸共設有三潮位站，包括麥寮站、三條崙站 (目前已停測) 以及箔子寮站。其中麥寮及箔子寮潮位站隸屬經濟部工業局，委託成功大學水工所進行潮位監測，目前仍持續監測中，前者位於麥寮工業港之港勤船渠，後者位於箔子寮漁港內。三條崙潮位站則隸屬經濟部水利署，位於三條崙漁港內。箔子寮、三條崙及麥寮三個潮位站之歷年潮位統計結果，如表 2.9 所示 (以基隆中潮位系統為高程基準)。結果顯示，麥寮潮位站之平均潮差為 2.70 m，大潮平均潮差為 3.72 m，均為三站最大者。其次為三條崙潮位站，平均潮差為 2.22 m，大潮平均潮差為 3.27 m。

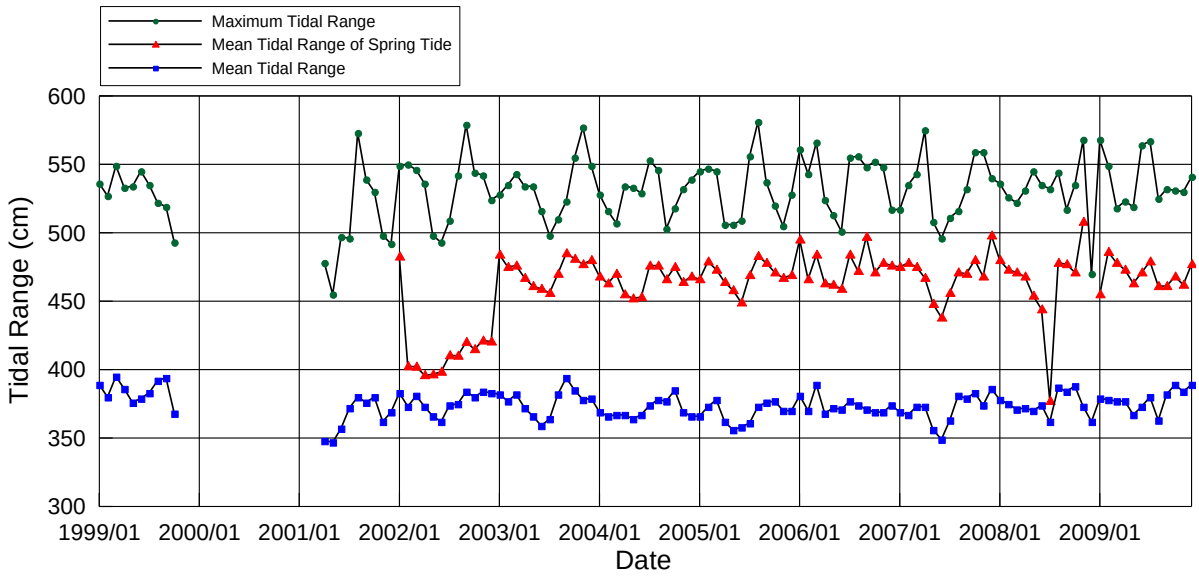
表 2.9 雲林海域各潮位站之潮位統計值

測站名稱	箔 子 寮	三 條 崙	麥 寮
潮 位	2002~2009 年	1983~1990 年	1998~2008 年
最高高潮位 (HHWL)	+2.34	+2.43	+2.56
大潮平均高潮位 (HWOST)	N/A	+1.79	+2.10
平均高潮位 (MHWL)	+1.51	+1.42	+1.74
平均潮位 (MWL)	+0.39	+0.30	+0.35
平均低潮位 (MLWL)	-0.63	-0.80	-0.96
大潮平均低潮位 (LWOST)	N/A	-1.48	-1.62
最低低潮位 (LLWL)	-2.84	-2.42	-2.09
平均潮差 (MR)	2.14	2.22	2.70
大潮平均潮差 (STR)	N/A	3.27	3.72

資料來源：三條崙－海岸水文氣象年報，麥寮、箔子寮－成大水工試驗所；潮位單位：米；以基隆中潮位系統為高程基準。

2. 臺中海域

臺中海域屬於半日潮，根據中央氣象局自 1999 年 1 月至 2009 年 12 月期間的潮位觀測資料，其中 1999 年 11 月至 2002 年 12 月因碼頭改建暫停潮位觀測，歷年潮位資料之統計結果得知，自 1999 年 2009 年期間，平均潮差為 3.75m，大潮平均潮差為 4.63m，最大潮差為 6.19m。最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計如圖 2.15 所示。



資料來源：「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」，交通部運輸研究所，100 年 1 月。

圖 2.15 臺中港 1999 至 2009 年之潮位統計分佈圖

2.3 海域地形變化

1. 雲林海域

雲林海岸北起濁水溪口南至北港溪口，早年濁水溪未整治前，分歧之西螺溪、虎尾溪及北港溪等支流供應豐富輸沙源，沖積形成平緩之海灘。同時海岸線曲折富變化，許多排水路河口形成之潮溝分隔沙灘，並有離岸沙洲露出或潛沒分佈於沿岸。1912 年時實施濁水溪整治計畫，林內一、二號堤防完成後，原濁水溪河系上游洪水已由隨機放流轉為全由北端之西螺溪 (今之濁水溪) 輸送入海，而南端之北港溪、新虎尾溪及舊虎尾溪等河川則成為內陸排水道，其流域面積及輸沙量均大幅減少。此造成濁水溪口南側沙洲逐漸侵蝕且向南移動。近年來雲林海岸已全被規劃興建為雲林離島工業區，圍堤內陸區無直接被波浪侵蝕之慮，但已嚴重阻攔南側外傘頂洲之漂沙來源。

圖 2.16 為雲嘉海域由濁水溪口至外傘頂洲間歷年海岸線變遷情形 (林等人，2003)，由圖可知 1900 年時濁水溪口以南海岸線在新虎尾溪口 (現址) 處，存在一向西延伸 3~5 公里之沙洲，此可能為初期之海豐島。往南至三條崙，外傘頂洲於此向南南西方向延伸出海，沙洲末端位於今鰲鼓西方約 9 公里處。1900 至 1947 年間，海豐島北側灘線侵蝕約 1 公里，沙洲末端向西南延伸約 5 公里，與陸側之間則形成一內海潟湖。1920 至 1947 年間，外傘頂洲外側灘線向陸側侵蝕約 800 公尺，平均每年後退約 30 公尺；沙洲末端則

向西延伸 1.4 公里。由以上海岸線變化結果顯示，在 1912 年實施濁水溪整治計畫後，對海豐島海岸變遷影響較為顯著，而對外傘頂洲則影響尚未劇烈。1947 至 1962 年間，海豐島及外傘頂洲均出現劇烈變化。濁水溪以南至新虎尾溪間海豐島之北側灘線向外淤積約 1~1.5 公里，新虎尾溪至臺西間灘線侵蝕約 1~1.2 公里，海豐島末端則向南延伸 5 公里。外傘頂洲在 1947 年以前於三條崙延伸出海，而 1962 年以後則南移至箔子寮附近，南移距離達 5 公里，延伸方向已由南南西轉為西南方向出海。1947 至 1962 年間，外傘頂洲外側 (西北側) 灘線則向陸側 (東南向) 侵蝕 2.5~3 公里，平均每年後退約 180 公尺，海岸線已由外突圓弧狀變為內凹彎曲狀；外傘頂洲末端則向西延伸 2.5 公里。1962 至 1980 年間，濁水溪口至新虎尾溪間海岸變化不大，海豐島則整體往南移動約 5 公里，逐漸萎縮貼近三條崙海岸。外傘頂洲外側 (西北側) 灘線則持續向陸側 (東南向) 侵蝕 0.8~1.2 公里，平均每年後退約 58 公尺。1980 至 2001 年間，外傘頂洲西北側灘線持續向東南方向侵蝕約 1.4 公里，平均每年約侵蝕 67 公尺。

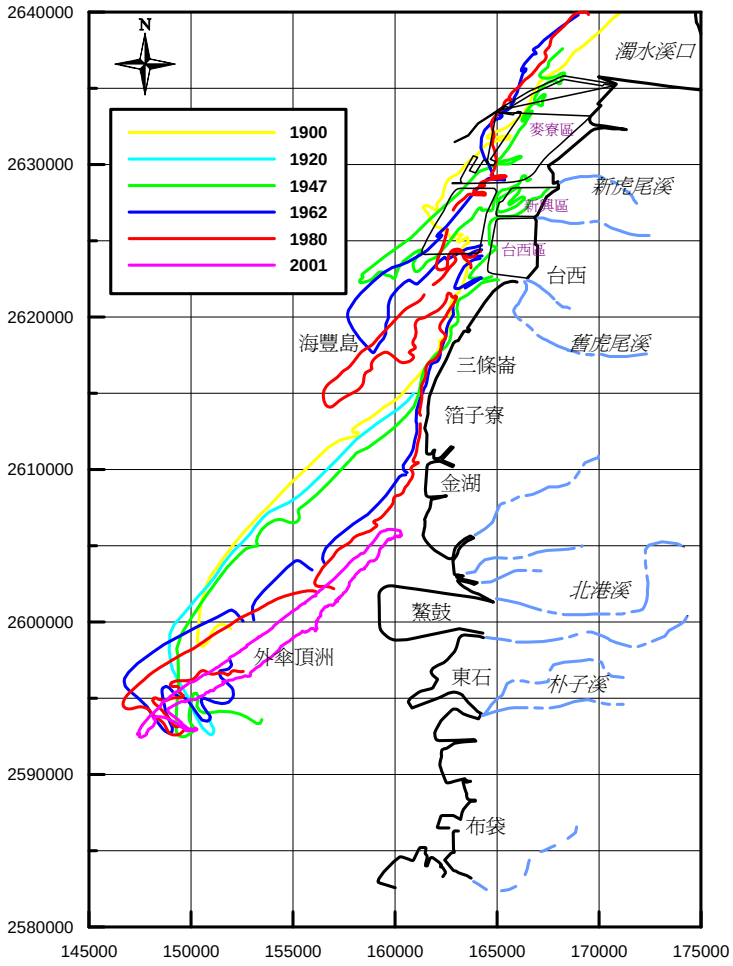


圖 2.16　雲嘉海域歷年海岸線變遷

雲林海埔地及離島工業區於民國 62 年起陸續開發興建，包括臺西區海埔地開發時期為民國 62~64 年 (共 770 公頃)，往後的新興區海埔地開發為民國 73~76 年 (共 550 公頃)、麥寮工業區開發為民國 80~ 86 年 (共 2,652 公頃)、新興工業區開發為民國 86 至今 (共 991 公頃) 等。此大面積之海岸開發阻擋濁水溪南向輸沙，助長外傘頂洲往陸側侵蝕萎縮。雲林離島工業區自民國 83 年麥寮區動工興建以來，麥寮區北側海堤受到濁水溪砂源的補注，已有淤積現象產生。圖 2.17 為麥寮工業區各區段海堤位置，其中西防波堤 I 約於民國 84 年期間完工，南防波堤 II 與西防波堤 II 分別於民國 85 年 6 月與 86 年 3 月完工，鄰近外航道之西防波堤 III 則於民國 87 年 3 月開始施工延伸至民國 89 年 9 月，外航道內側之南防波堤 I 則於民國 87 年底完工。

圖 2.18 為雲林離島工業區 80 年、87 年、90 年、93 年、96 年以及 99 年之實測地形水深圖，由圖中可知麥寮工業區自 85 年以後陸續興建發電廠導流堤、西防波堤 III、興建新興工業區及海岸現況地形等。

圖 2.19 為 82~85 年期間地形變化：濁水溪口、西北海堤 II 及西防波堤 I 北側為淤積狀態；西防波堤 II 正進行延伸工程，堤頭南北兩側明顯侵蝕；南防波堤 II 至西南海堤間之近岸區為淤積狀態，而外海地形則無明顯變化。

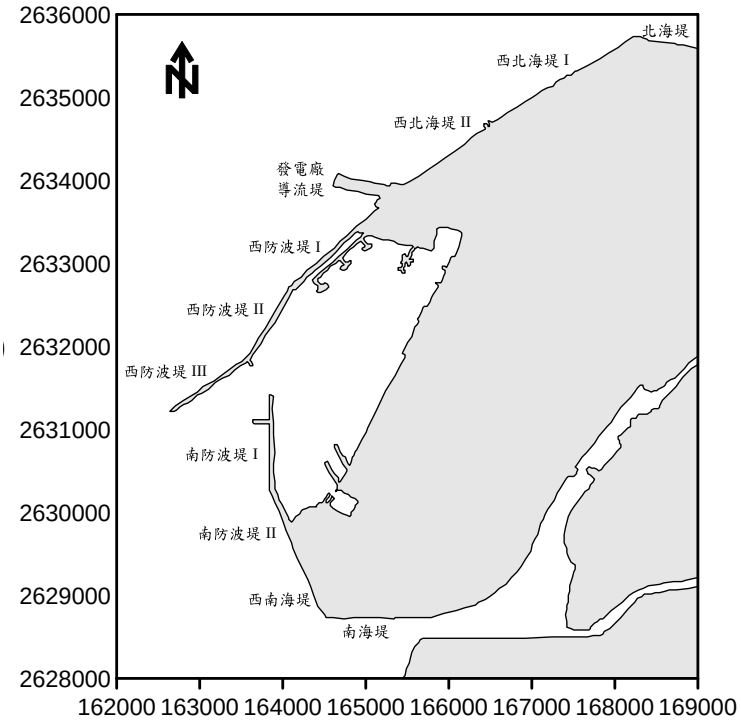


圖 2.17　麥寮工業區各區段海堤位置圖

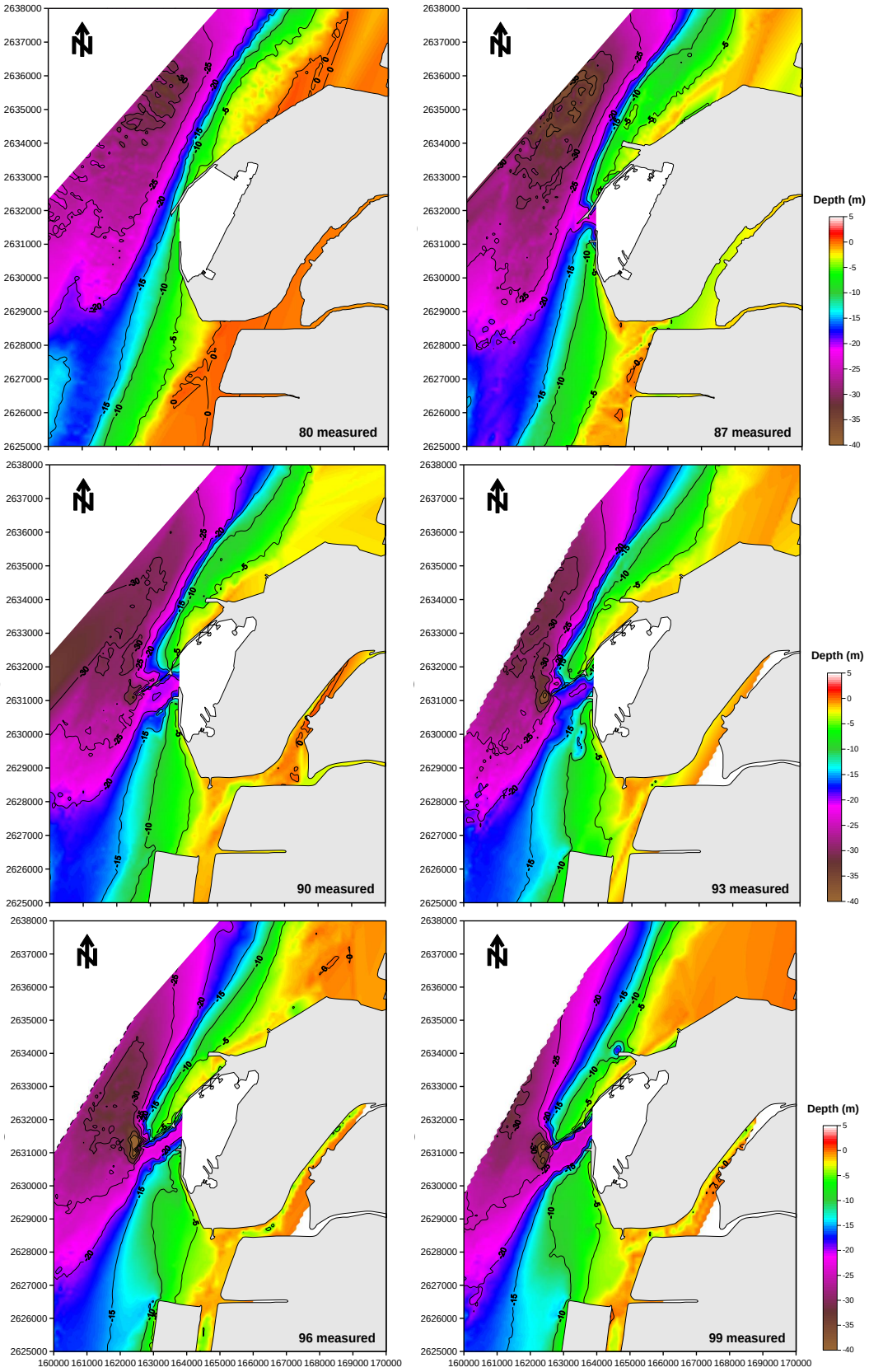


圖 2.18　雲林離島工業區海域 80~99 年實測地形水深圖

圖 2.20 為 85~89 年期間地形變化：濁水溪口以南至西北海堤 II 間為侵蝕狀態，發電廠導流堤興建後北側略微淤積，堤頭處呈現侵蝕；導流堤西側至西防波堤 II 間北側明顯淤積；西防波堤 III 由 87 年開始興建至 89 年完工期間造成堤身兩側侵蝕，至南防波堤 I 西側 (即港嘴處) 都呈現明顯侵蝕；南防波堤 II 至西南海堤間之近岸區為侵蝕狀態，而外海區地形則侵淤互現。

圖 2.21 為 89~93 年期間地形變化：濁水溪口以南至西北海堤 I 間為侵蝕狀態，由西北海堤 II 經導流堤至西防波堤 III 間均為淤積狀態，但西防波堤 III 堤頭西南端則侵蝕嚴重；港嘴處亦呈現明顯淤積狀態；南防波堤 I、II 之間西側外海則產生侵蝕，新興工業區海堤西北端呈現明顯侵蝕現象。

圖 2.22 為 93~96 年期間地形變化：由西北海堤 I 至西防波堤 I 間多呈現侵蝕狀態，尤其是導流堤堤頭附近明顯侵蝕；西防波堤 II 北側為淤積；原先 89~93 年期間西防波堤 III 堤頭西南端之侵蝕處略往北移動；港嘴處呈現侵蝕狀態，南防波堤 I 西側為淤積，南防波堤 II 則為侵蝕；新興工業區海堤西北端亦呈現微幅侵蝕現象，而北側則明顯淤積。

圖 2.23 為 96~99 年期間地形變化：濁水溪口以南至西北海堤 II 間北側明顯淤積，但導流堤堤頭附近明顯侵蝕；西防波堤 I、II 北側亦呈現侵蝕狀態；西防波堤 III 堤頭附近已不再侵蝕，而呈現明顯淤積現象，但堤頭西南側外海處仍有侵蝕；港嘴處呈現侵蝕狀態，南防波堤 II 則為淤積；新興工業區西側海堤略有侵蝕而北側地形則無明顯變化。

圖 2.24 為 82~99 年期間整體地形變化：麥寮港北側海域呈現明顯淤積狀態，淤積幅度約+8~+10 m；但導流堤堤頭處則明顯侵蝕，掏深幅度可達-10 m；西防波堤 III 堤頭處往西南側形成明顯的侵蝕洞，掏深幅度超過-15 m；港嘴處呈現明顯侵蝕，南防波堤 I、II 外海則明顯淤積；新興工業區西側海堤侵蝕名顯，掏深幅度約 -6~-8 m，而北側地形亦呈現侵蝕狀態。

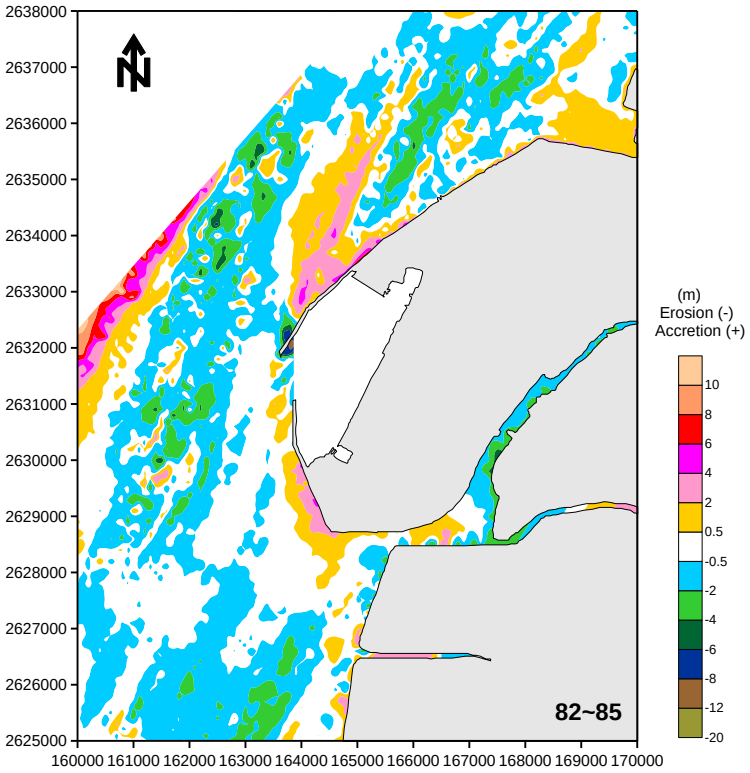


圖 2.19　雲林離島工業區海域 82-85 年間實測地形侵淤變化

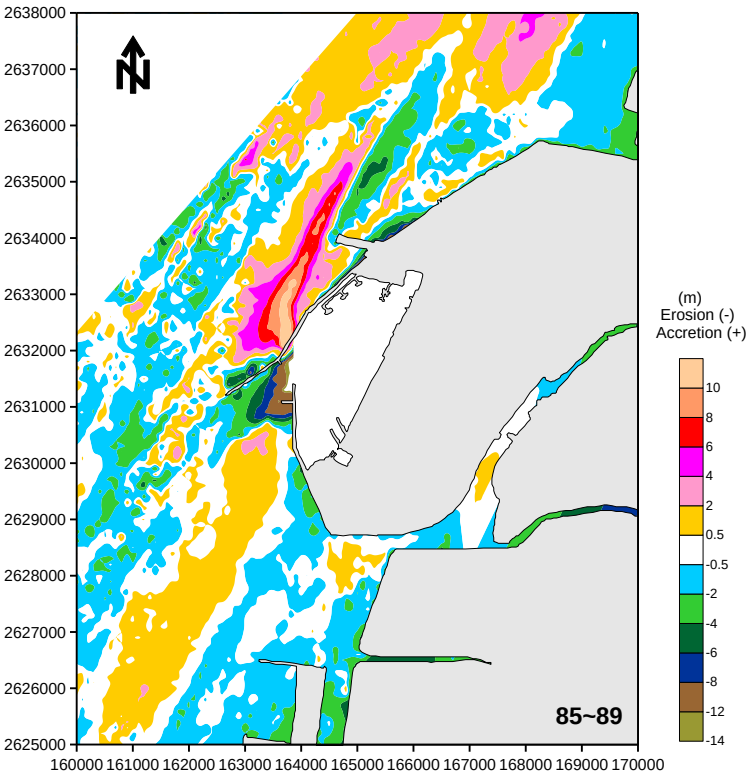


圖 2.20　雲林離島工業區海域 85-89 年間實測地形侵淤變化

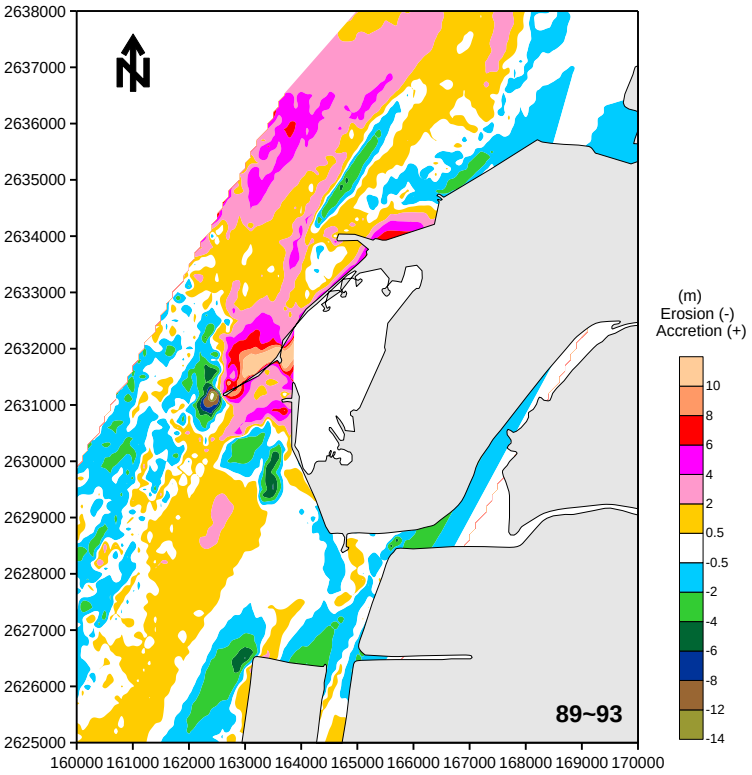


圖 2.21　雲林離島工業區海域 89-93 年間實測地形侵淤變化

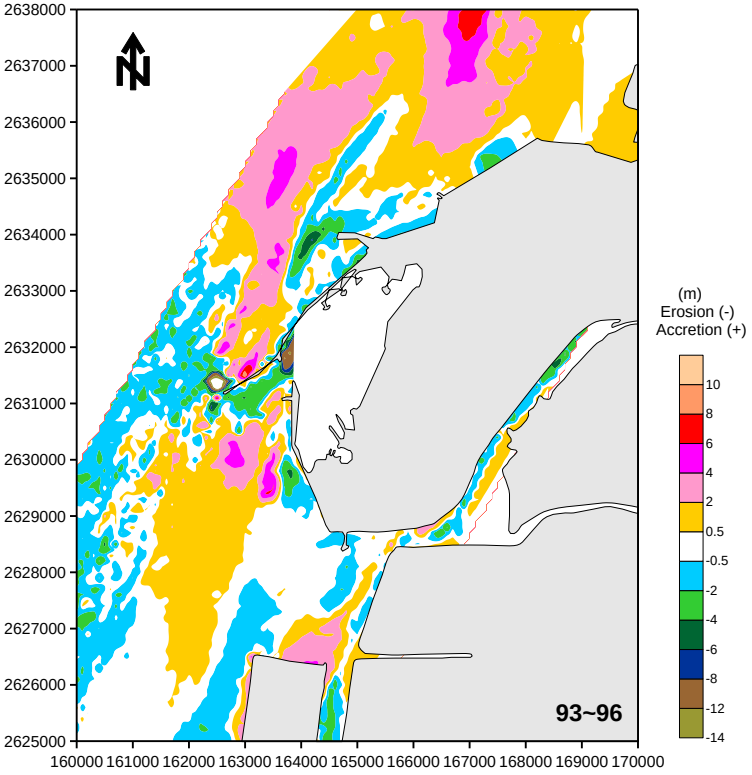


圖 2.22　雲林離島工業區海域 93-96 年間實測地形侵淤變化

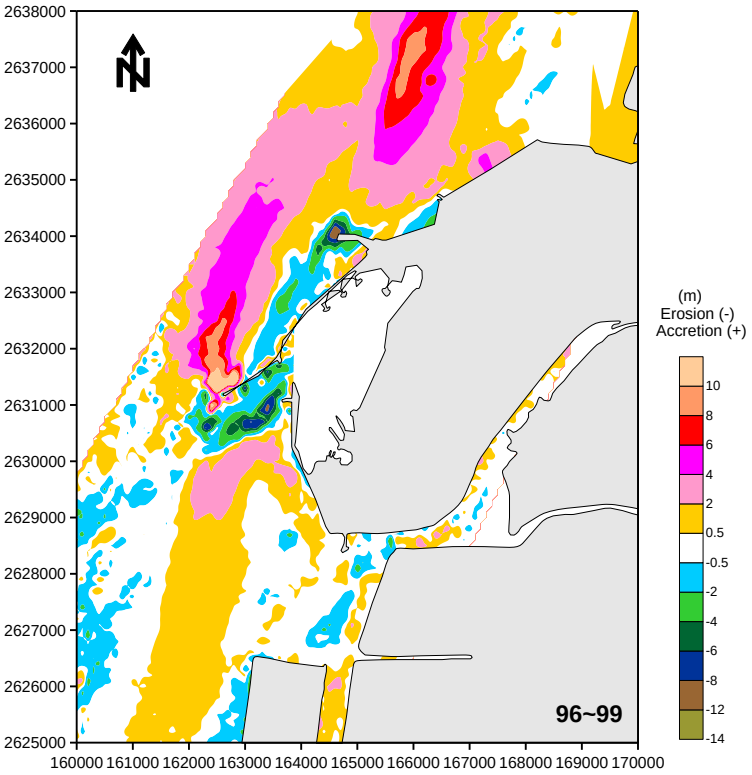


圖 2.23　雲林離島工業區海域 96-99 年間實測地形侵淤變化

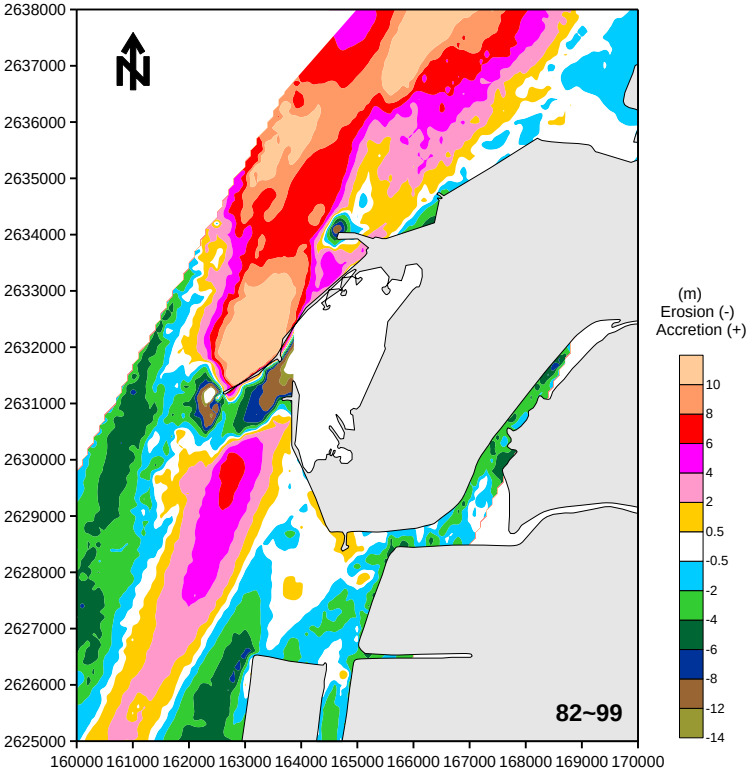


圖 2.24　雲林離島工業區海域 82-99 年間實測地形侵淤變化

根據歷年 (民國 82~99 年) 麥寮海域地形資料，進一步探討本區斷面地形變化。由北至南共選取六處斷面，各斷面位置如圖 2.25 所示。圖 2.26 為麥寮海域由 82 至 99 年間斷面變化情形，結果顯示 Sec.01 (近濁水溪口) 在離岸 1.5km 處地形呈現逐年侵蝕現象，而在離岸 2.5km 處則呈現逐年淤積；99 年斷面明顯淤積，應為 98 年 8 月莫拉克颱風造成河口大量沖積沙所致。Sec.02 (發電廠導流堤附近) 在離岸 0.5~0.7km 之間於 85 年導流堤興建完成後，地形呈現逐年侵蝕現象 (93 年例外)，98 年莫拉克颱風過後亦明顯造成導流堤堤頭嚴重侵蝕。Sec.03、04 (西防波堤 I、II 段) 在離岸 1.0km 以內，地形則呈現逐年淤積現象。Sec.05 (西防波堤 III 段) 在離岸 2.0~2.5km 之間堤頭附近，地形由 82 至 93 年逐年侵蝕幅度高達 18m，93 至 99 年間則變化較不明顯。Sec.05 (西南海堤段) 在離岸 3.0km 附近，地形則呈現逐年淤積現象。

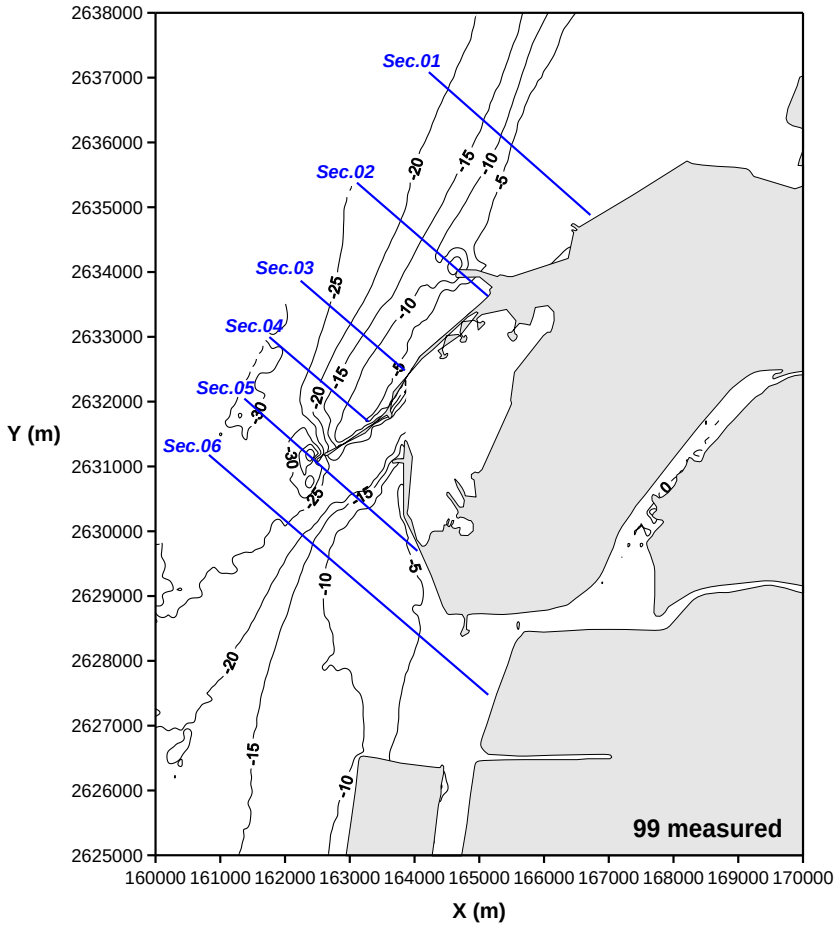


圖 2.25　麥寮工業區海域斷面位置圖

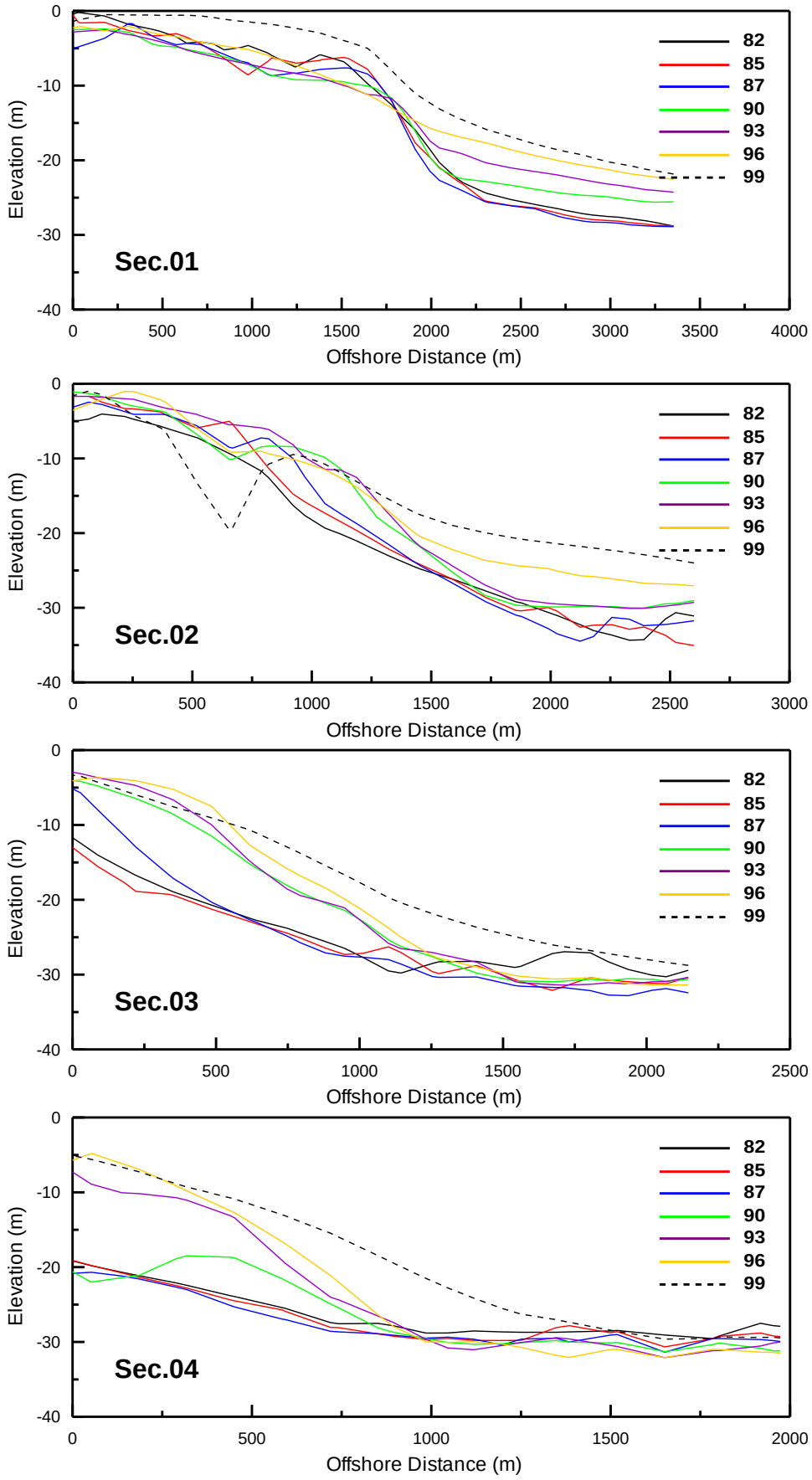


圖 2.26 雲林離島工業區海域 82~99 年間斷面地形變化

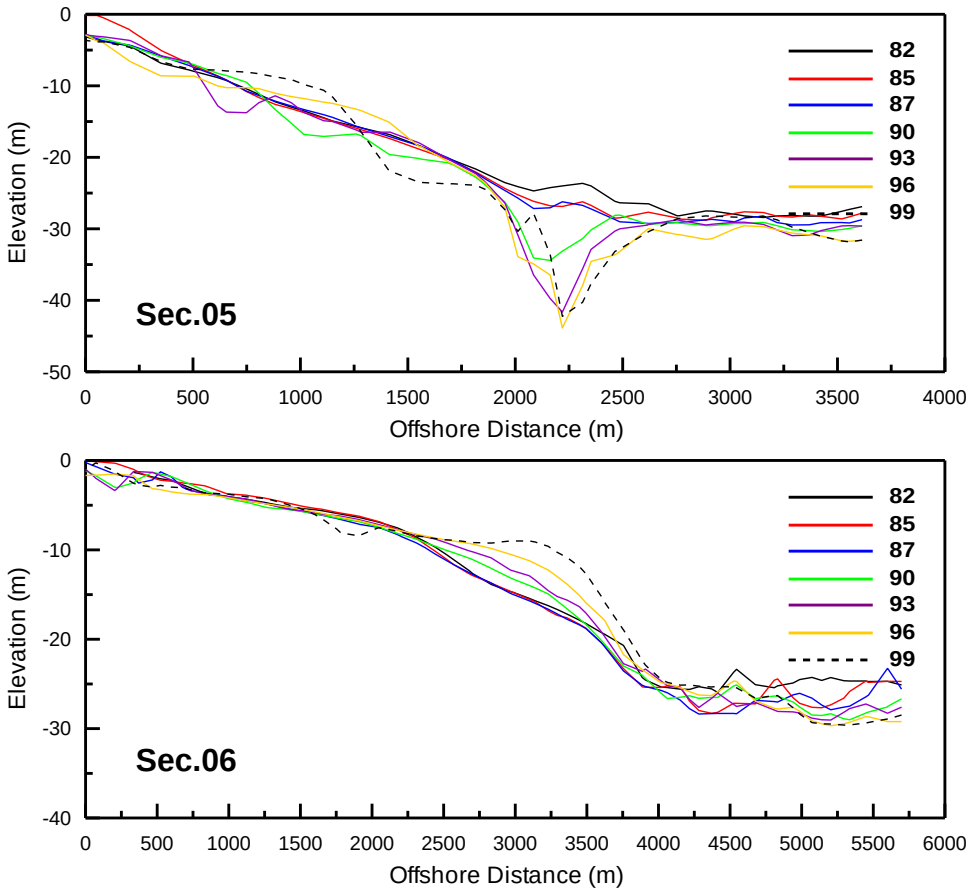


圖 2.26 (續) 雲林離島工業區海域 82~99 年間斷面地形變化

根據歷年 (民國 85~95 年) 臺中港海域地形資料，進一步探討本區斷面地形變化。由北至南共選取六處斷面，各斷面位置如圖 2.27 所示。圖 2.28 為臺中港海域由 85 至 95 年間斷面變化情形，結果顯示 Sec.01 ~ Sec.04 (大甲溪口至北防波堤之間) 整體地形呈現逐年淤積現象。Sec.05 (北防波堤段) 因防波堤陸續延伸，在堤頭附近明顯發現地形呈現逐年侵蝕現象。Sec.06 在離岸 0.5~1.2km 之間，地形呈現逐年淤積現象；離岸 1.5~1.7km 之間，地形則呈現先侵後淤的情形。Sec.07、08 在離岸 1.0m 以內地形變化不大；在離岸 1.5m 以外，地形則呈現逐年淤積現象。

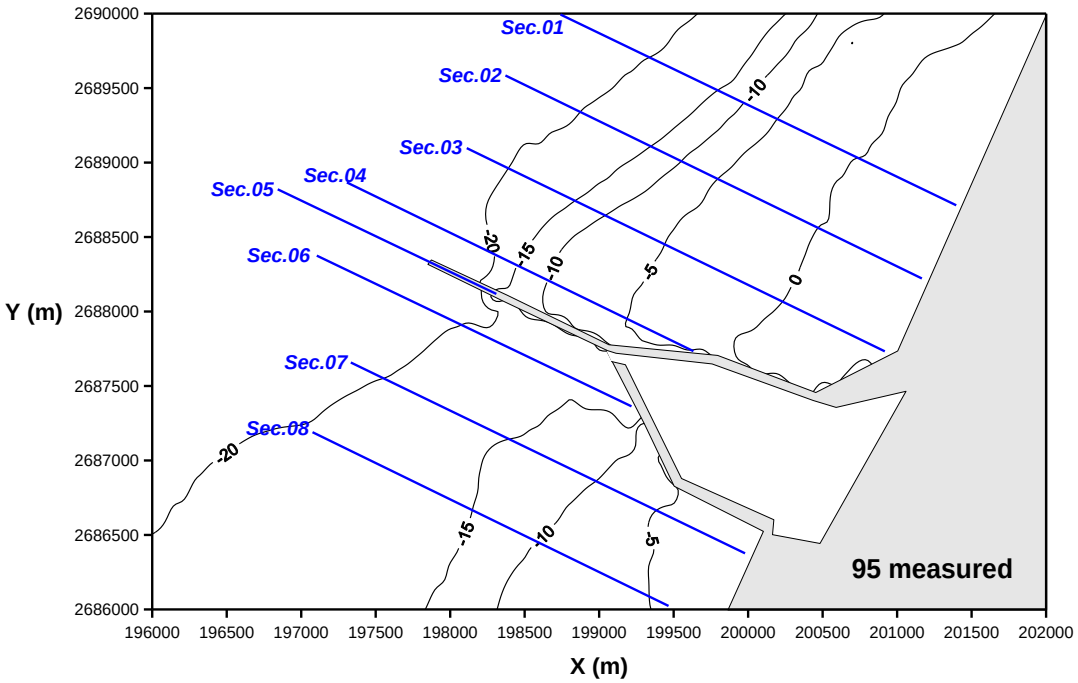


圖 2.27　臺中港海域斷面位置圖

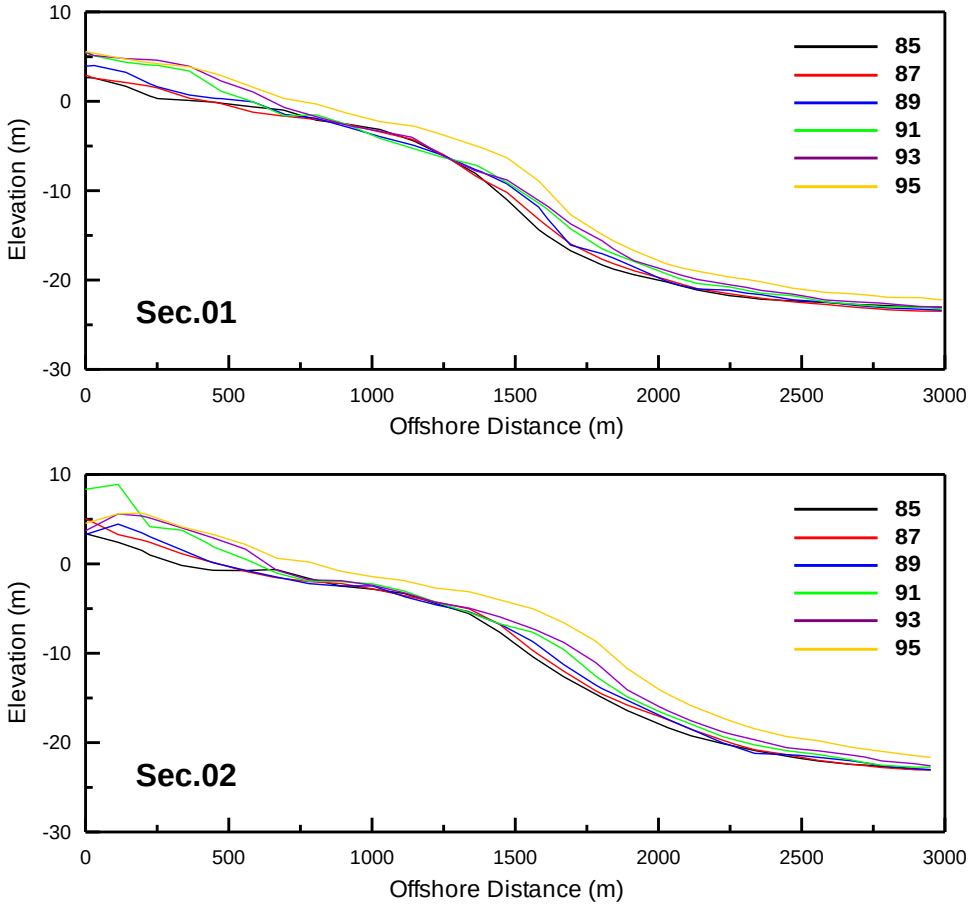


圖 2.28 臺中港海域 85~95 年間斷面地形變化

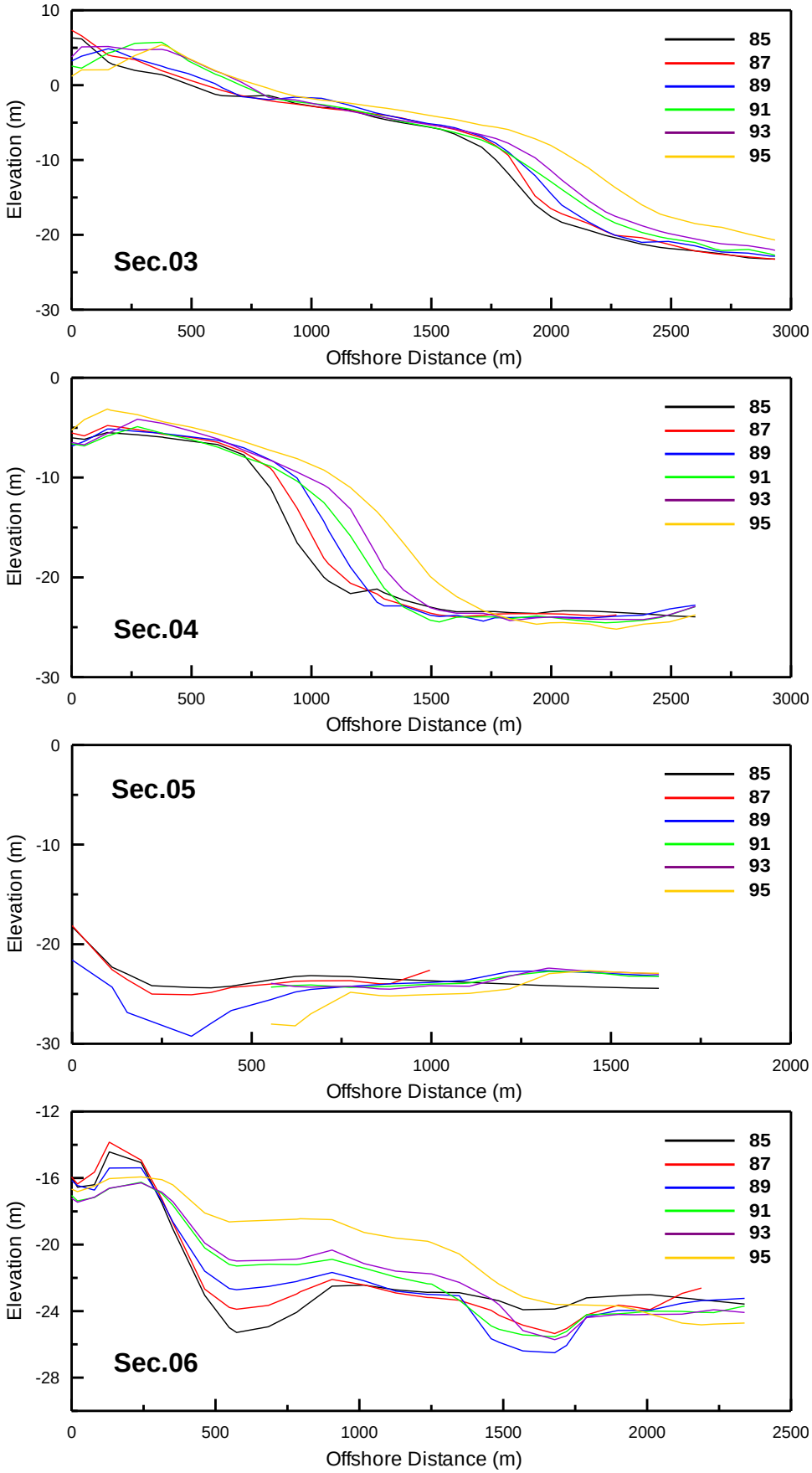


圖 2.28 (續) 臺中港海域 85~95 年間斷面地形變化

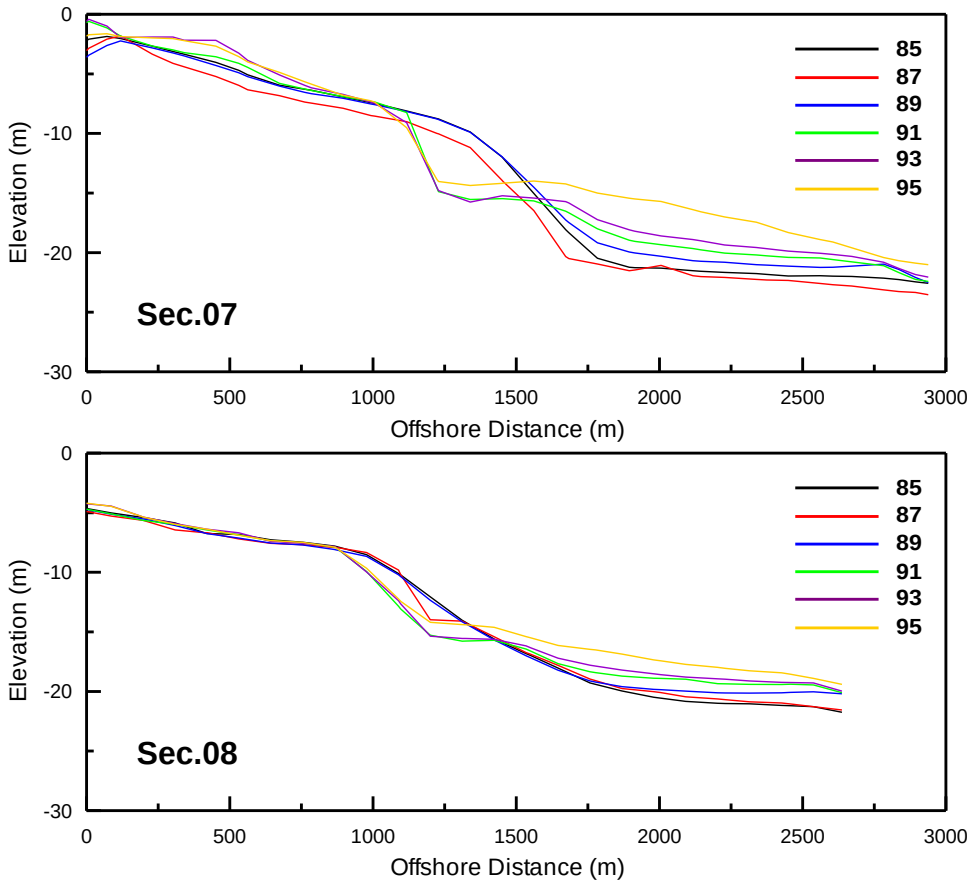


圖 2.28 (續) 臺中港海域 85~95 年間斷面地形變化

2. 臺中海域

臺中港北鄰大甲溪以及大安溪，南鄰大肚溪，臺中港於民國 65 年完成主體工程，為因應淤積以及航行安全，陸續延伸北防波堤。民國 79～84 年先延長北防波堤 850 公尺，民國 89～91 年再延長北防波堤 480 公尺。圖 2.29 為臺中港 85 年、87 年、90 年、91 年、93 年以及 95 年之實測地形水深圖，由圖中可發現北防波堤在延長過程中，於堤頭處所產生的掏深洞。

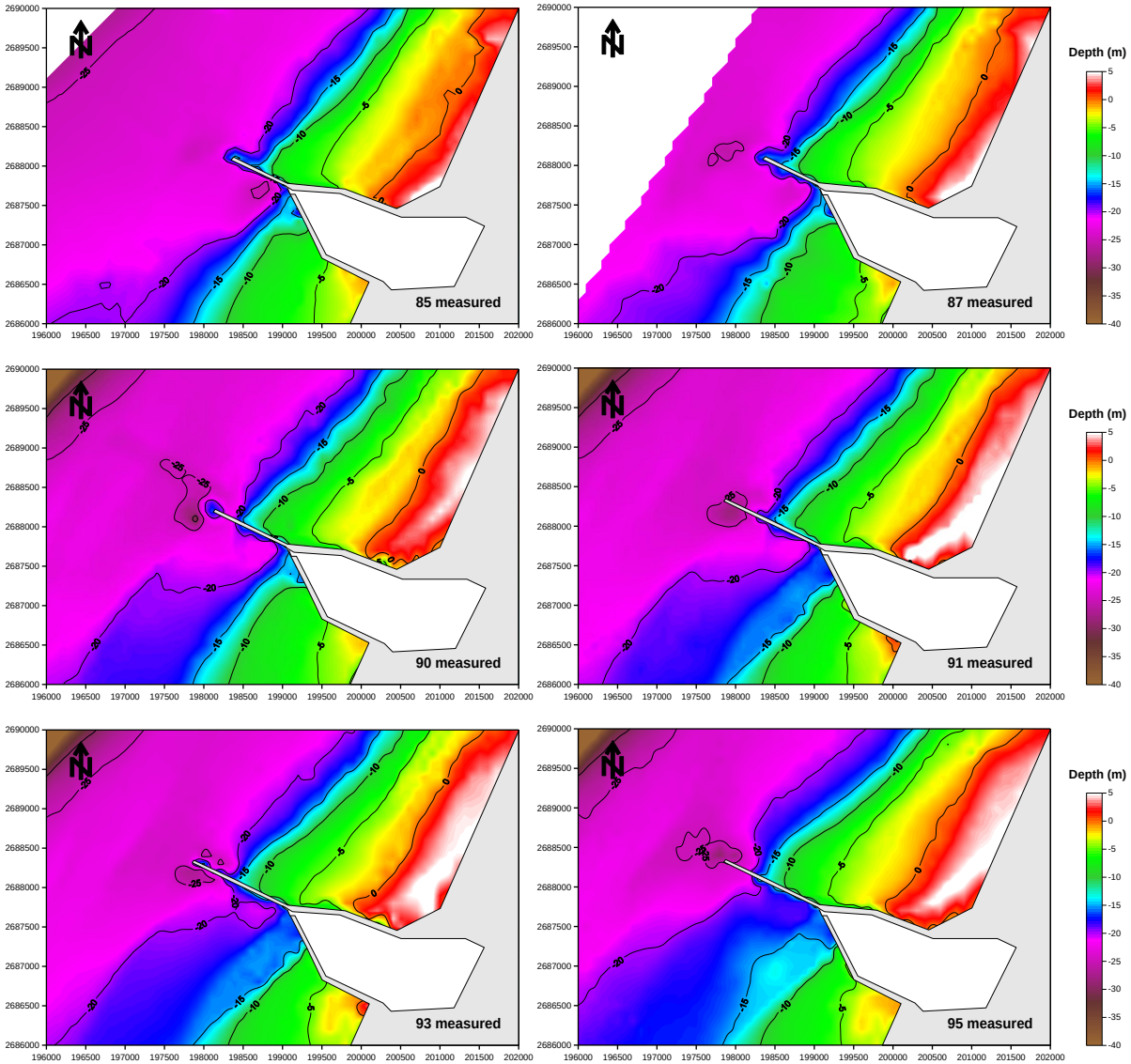
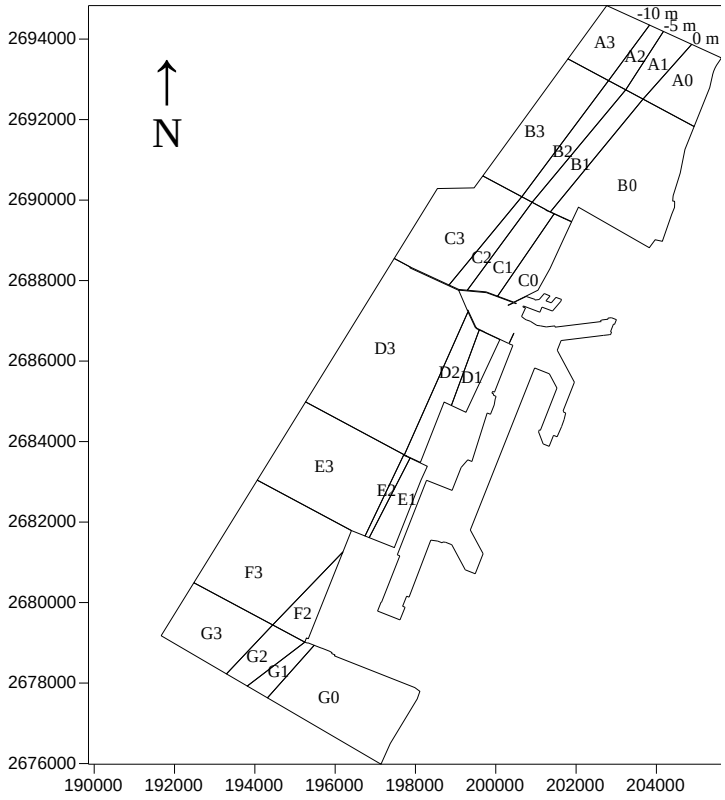


圖 2.29　臺中港海域 85~95 年實測地形水深圖

根據蔡等人 (2010) 蒐集臺中港之地形水深圖 (民國 85 年～95 年間)，進行相關之海岸地形變遷趨勢之分析成果：將本區分為 7 個區域，在考量漂沙移動界限水深下，將向離岸方向分為 4 區，分別為 0m 以上標示為第 0 區、0m 至-5m 之間標示為第 1 區、-5m 至-10m 間標示為第 2 區、-10m 以上標示為第 3 區，來詳細探討各分區的侵淤狀況，各分區代號詳圖 2.30 所示。由圖中可知，A、B 區為防沙堤以北區域；C 區為臺中港北防波堤至防沙堤之間的區域；D、E、F、G 區為臺中港北防波堤南側區域。



資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

圖 2.30 臺中港地形水深變遷計算分區圖

歷次測量之地形資料相對於 85 年地形資料之侵淤變化，如圖 2.31 至圖 2.34 所示。由圖 2.31 至圖 2.34 可知，臺中港北防波堤至北防沙堤間有部分淤積，在北防波堤堤頭附近亦有產生淤積，並擴及至港口南側，形成港口南側區域遠岸淤積近岸侵蝕的現象。由圖 2.32 可知，民國 89 年至 91 年間，北防波堤正在進行延長工程，造成北防波堤至北防沙堤間持續淤積，淤積深度最大可達 4m 以上，臺中港北側及南側遠岸區域亦快速淤積，尤其以北側遠岸區域淤積速度最快，淤積深度最大亦達 4m 以上，而在北防波堤堤頭附近及港口附近產生大量侵蝕，侵蝕深度最大可達-5m 以上。由圖 2.33 至圖 2.34 可知，臺中港整體擴建已完成，北防波堤至北防沙堤間不論是近岸還是遠岸，皆全面淤積，而擴及至港口南側的淤積面積亦有擴大並往南持續延伸，淤積深度則是逐年加深，港口南側近岸區則維持些微侵蝕的狀況，北防波堤堤頭附近及港口附近的侵蝕範圍則大致上維持穩定，並未持續刷深。

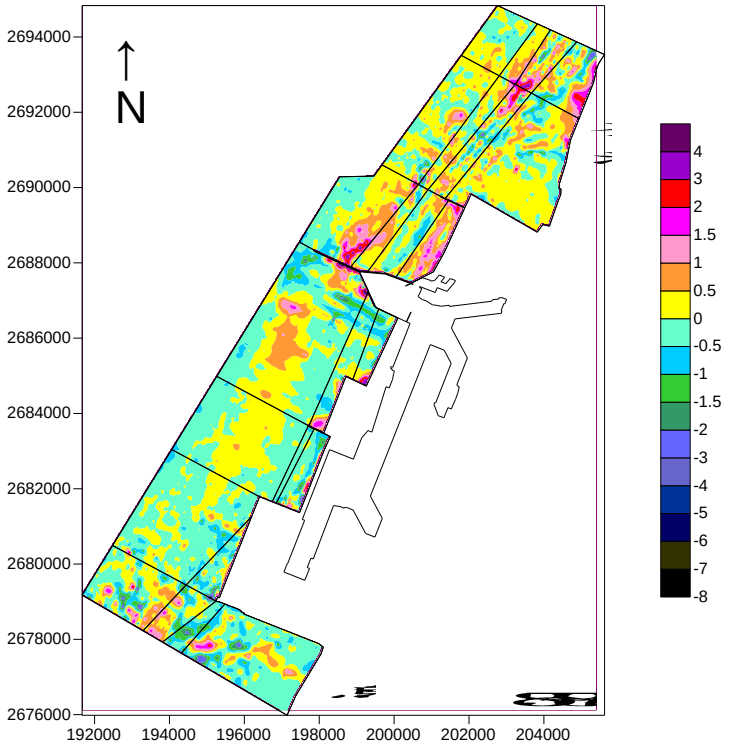
由歷年地形測量相對於 85 年地形之累積侵淤量分析：在防沙堤北側的 A、B 區中，遠岸的 A3 及 B3 區大致呈現淤積的現象，A3 區至 93 年達到最大累積淤積量約為 413 萬 m^3，B3 區則至 95 年達到最大累積淤積量約為 1040

萬 m^3。合計防沙堤以北的區域，自民國 85 年至 95 年皆呈現淤積的現象，並在民國 94 年達到最大累積淤積量約為 2631 萬 m^3，而民國 89 年～91 年由於正在進行防波堤延伸工程，因此淤積量較少，在民國 90 年達到最小累積淤積量約為 98 萬 m^3。

C 區為北防波堤至防沙堤間的北淤沙區，其中除了近岸的 C1 區在 85 年～89 年呈現略微侵蝕之情形，其累積侵蝕量於 86 年最大，約 23 萬 m^3，其餘區域所有年度皆呈現淤積之特性，合計北淤沙區自民國 85 年至 95 年間，累積淤積量持續成長，並於民國 95 年達到最大累積淤積量約為 2199 萬 m^3。

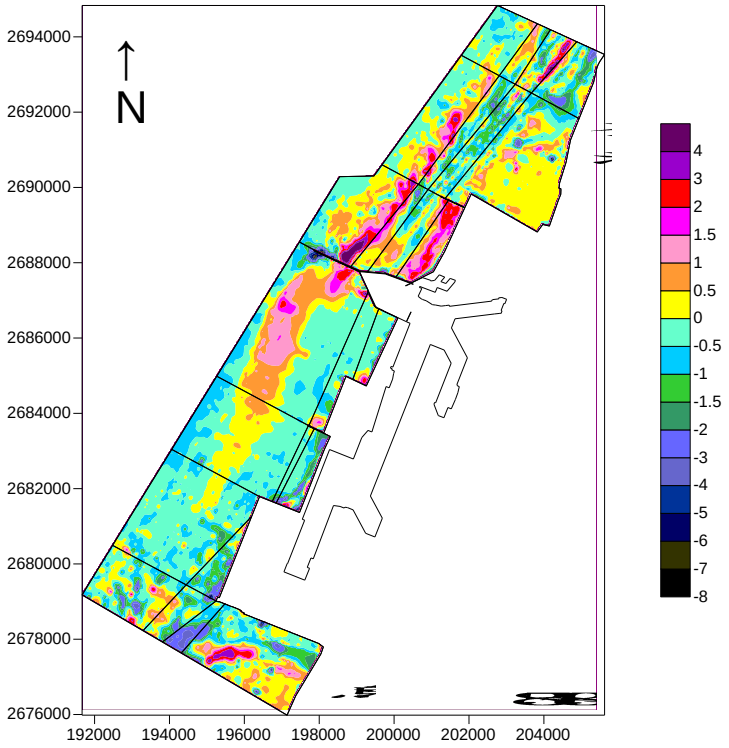
D、E、F、G 區為北防波堤以南區域，由表 2.10 的淨侵淤量可知，D3 區各年度皆呈現淤積情形，最大累積淤積量發生在 95 年，約 1509 萬 m^3；E1 區和 F2 區皆呈現侵蝕情形，E1 區在 89 年有最大累積侵蝕量，約 111 萬 m^3，F2 區在 90 年有最大累積侵蝕量，約 148.28 萬 m^3，合計北防波堤以南的區域，自民國 85 年至 93 年間皆為侵蝕情形，最大累積侵蝕量發生在 91 年，約 835 萬 m^3，至 94 年後由侵蝕轉為淤積，於 95 年產生最大累積淤積量為 3743 萬 m^3。

除了民國 89 年防波堤延長工程進行中有最大累積侵蝕量外，其餘年度皆呈現淤積現象，並於民國 95 年達到最大累積淤積量，約 7650 萬 m^3。綜言之，臺中港北防波堤以北之區域，因北防波堤及防沙堤攔阻季節性之沿岸漂沙呈現淤積現象，而北防波堤以南之區域，目前因漂沙越過臺中港，亦於 94 年後由侵蝕轉為淤積。



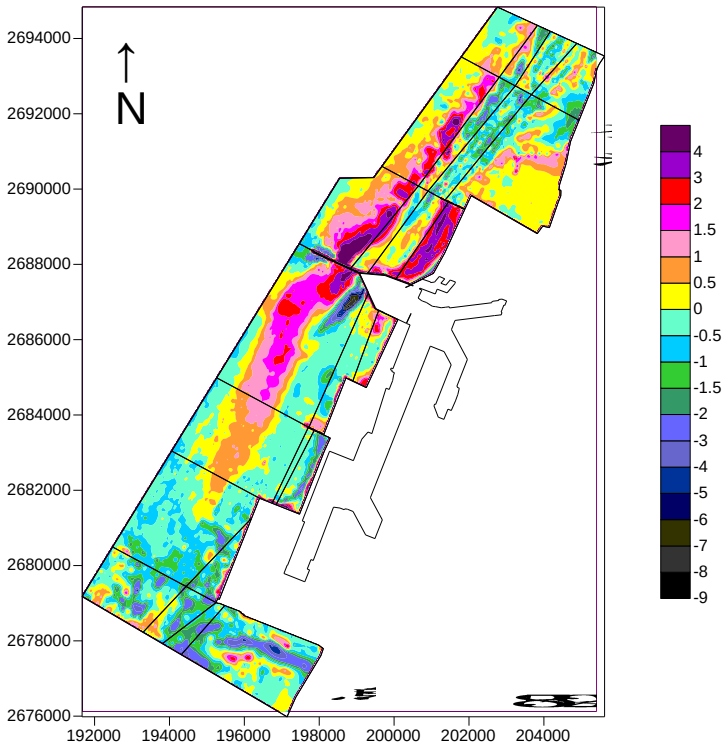
資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

圖 2.31 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～87 年)



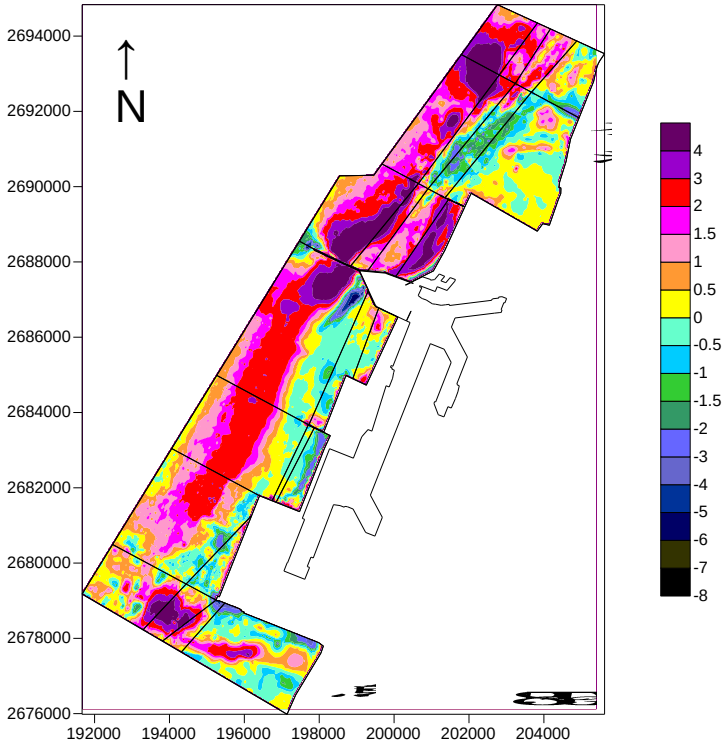
資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

圖 2.32 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～89 年)



資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

圖 2.33 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～92 年)



資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

圖 2.34 臺中港附近地形侵淤變化圖(民國 85～95 年)

表 2.10 臺中港附近地形累積侵淤量 (單位：$\times 10^4 m^3$)

分區	85～86	85～87	85～89	85～90	85～91	85～92	85～93	85～94	85～95
A0	**-1.60**	53.76	**-105.70**	**-7.48**	**-30.58**	**-40.90**	**-215.89**	545.90	599.66
A1	39.20	59.28	29.69	**-37.01**	**-31.55**	**-32.05**	113.59	225.83	**-10.14**
A2	23.23	25.79	6.29	**-42.86**	**-24.36**	**-15.11**	144.50	132.95	**-109.17**
A3	**-32.04**	3.31	**-34.54**	8.67	11.45	267.61	413.61	270.64	153.10
B0	12.10	64.05	17.09	62.29	29.11	62.24	**-258.61**	225.83	**-10.14**
B1	61.62	46.88	**-110.23**	**-161.00**	**-97.15**	**-123.99**	**-11.21**	132.95	**-109.17**
B2	26.50	22.51	**-34.13**	**-48.45**	**-34.21**	**-6.20**	76.06	270.64	153.10
B3	**-22.56**	33.46	124.17	324.02	306.05	363.47	587.32	827.24	1040.10
防沙堤以北	106.45	309.04	107.35	98.19	128.76	475.07	849.35	2631.98	1707.34
C0	75.19	115.94	192.09	261.85	492.53	397.54	424.28	375.39	446.51
C1	**-23.86**	**-1.87**	**-2.06**	13.99	37.24	66.01	101.21	159.52	248.43
C2	23.32	45.80	49.83	32.75	59.69	98.10	109.64	161.60	264.46
C3	27.69	108.82	217.93	429.75	433.46	624.69	684.93	883.20	1240.49
北淤沙區	102.34	268.69	457.80	738.34	1022.92	1186.35	1320.05	1579.71	2199.88
D1	3.55	**-15.27**	**-16.54**	**-22.67**	21.36	48.98	46.21	32.60	40.50
D2	17.34	**-12.96**	**-39.66**	**-48.86**	3.21	5.20	**-7.59**	**-34.38**	**-6.06**
D3	55.08	24.78	202.49	449.88	396.17	502.17	719.70	795.76	1509.76
E1	**-29.37**	**-38.12**	**-111.28**	**-100.36**	**-93.22**	**-59.96**	**-93.15**	**-103.12**	**-76.97**
E2	**-5.77**	**-6.98**	**-14.04**	**-12.59**	**-7.99**	**-2.17**	5.89	-8.37	1.98
E3	**-32.68**	**-18.10**	**-119.33**	43.77	42.25	121.35	493.97	474.52	881.16
F2	**-32.27**	**-36.81**	**-115.22**	**-148.28**	**-77.36**	**-73.39**	**-19.37**	**-0.79**	**-18.89**
F3	**-69.57**	**-103.13**	**-261.07**	**-305.14**	**-395.88**	**-355.52**	**-244.66**	326.43	666.24
G0	**-162.76**	**-99.22**	**-38.08**	**-244.33**	**-427.50**	**-424.22**	**-1046.63**	**-146.16**	51.91
G1	**-13.40**	**-43.99**	**-126.18**	**-57.10**	**-81.85**	**-95.98**	**-108.75**	42.53	71.37
G2	42.84	10.29	**-55.88**	**-64.34**	**-80.93**	**-104.24**	**-102.92**	257.62	314.29
G3	17.53	**-19.75**	**-103.92**	**-99.11**	**-133.94**	**-180.25**	**-159.71**	300.14	307.72
北防波堤以南	**-209.47**	**-359.25**	**-798.72**	**-609.11**	**-835.68**	**-618.02**	**-517.02**	1936.77	3743.00
全區	**-0.67**	218.48	**-448.27**	227.42	315.99	1043.39	1652.38	6148.45	7650.22

資料來源：「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」，交通部運輸研究所，99 年 4 月。

2.4 防波堤興建過程

有關臺中港北防波堤與麥寮港西防波堤之興建過程，包括斷面設計與施工過程對海底地形所造成的影響，詳述如下 (以下內容參考或部分節錄自朱等人，2002)：

2.4.1 斷面設計

防波堤堤頭之設計方式，依據國內外之規範要求包括堤腳保護工之重量及範圍估計，堤頭段保護工之重量建議為防波堤平直段之 1.5 倍以上，堤腳保護工之範圍，則建議為 1/4 波長以上之長度，然因堤頭可能面臨之淘刷情形，至今尚無完整之理論或經驗，建議由模型試驗決定之。以臺灣地區之颱風波浪而言，週期可達 10 秒以上，故一般保護工範圍皆達 50m 以上(約兩座沉箱長度)，保護工重量以波高考量時，可以谷本勝利或 SPM 之方式估計之，然於深水防波堤之堤腳受波浪影響較小，實際考量時可能以海流流速為主，以臺中、麥寮而言，海床流速約 5 節以下，故保護工之重量估計約 40kg 以上即可。

臺中港原北防波堤堤頭及延伸 850m 之堤頭斷面，詳圖 2.35、2.36 所示；麥寮港堤頭斷面，詳圖 2.37 所示。由圖可知，除早期臺中港之堤頭保護工程之範圍較短 (小於 50m) 外，近年來之堤腳保護範圍皆達 1/4 波長以上之標準。由臺中港原北堤刷深剖面圖中顯示距堤頭 100m 以內之海床坡度相當陡峭 (1:4 ~ 1:8)，但沉箱體尚未有發生傾斜破壞現象，若後續亦無進行加強保護之措施，則可顯示，堤頭保護長度約 30m 亦可發揮相當之功能。另由臺中港北堤延伸 850m 之刷深剖面圖中顯示，距堤頭 200m 以內之海床坡度卻相當平緩，此是否因其堤頭保護工長度達 80m 之功效，則無法確認。

若以現況麥寮港而言，100m 內之最大刷深水深為-46m，以 1：3.5 之坡度而言，至堤址水深-26m 約有 70m 之大量侵蝕範圍，由於臺中港原北堤之堤址保護工僅約 30m，可維持堤體之穩定，而麥寮西防堤於施工中之臨時堤址保護工亦僅 30m（設計堤頭保護工長度為 55m），其坑洞斜坡似乎已逼近沉箱，其安全性需深入評估。

由上之分析可知，堤頭保護長度在設計規範中以波場考量為主，而流場因素則未有詳實之建議，因此，有關深水防波堤之堤頭保護工所需之範圍，

實有進一步規範之必要。

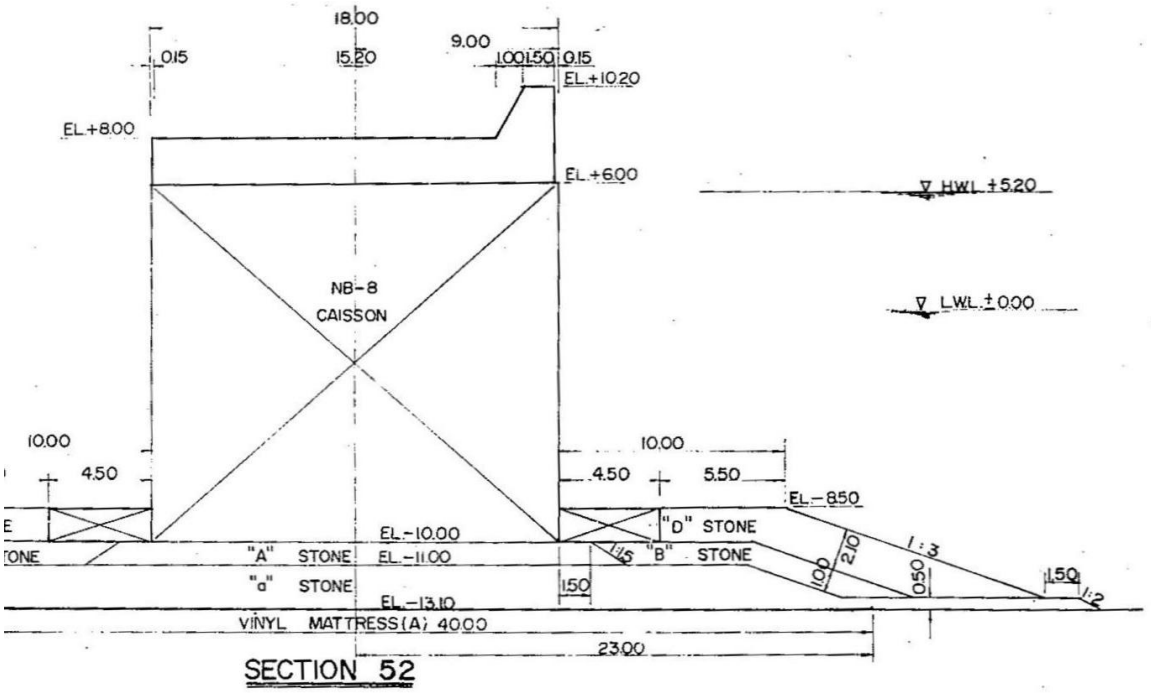


圖 2.35 臺中港原堤堤頭沉箱斷面圖 (朱等人，2002)

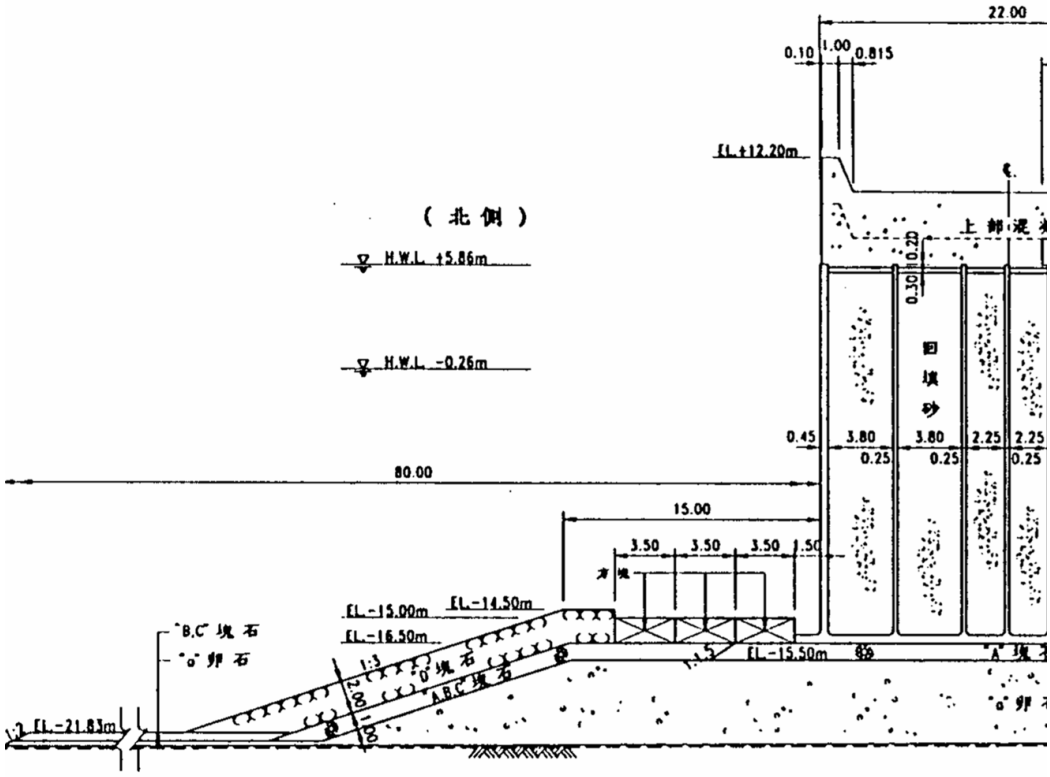


圖 2.36 臺中港北防波堤延伸 850m 堤頭斷面圖 (朱等人，2002)

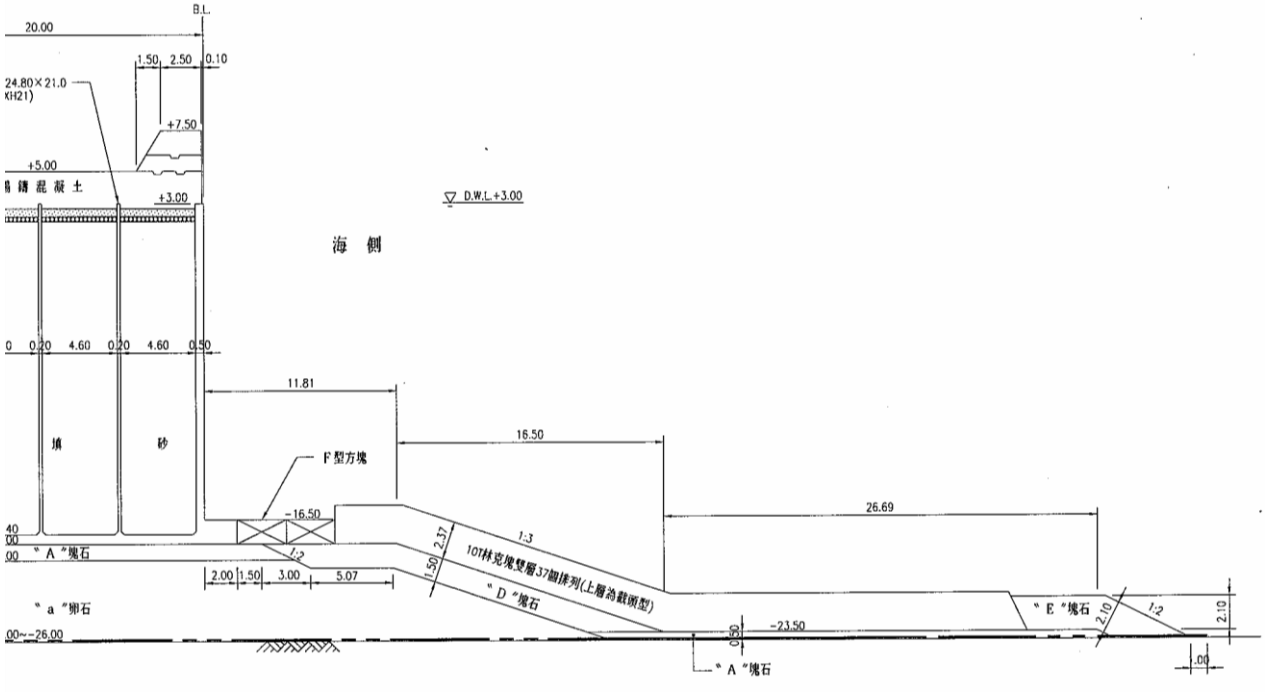


圖 2.37 麥寮西防波堤堤頭沉箱斷面圖 (朱等人，2002)

2.4.2 施工過程

堤頭刷深現象對工程影響最大者為增加大量之堤體拋石量，由於施工中永遠存在臨時堤頭，其前方在短時間內亦有刷深現象，而刷深位置則為未來堤線經過之區域，故刷深區域必須再拋放石料，方得以完成施工。尤其在東北季風期間必須長時間停工時，將造成更大之刷深，故如何減少深洞之影響，在臺中港施工已有經驗之傳承，其於防波堤施工時，建議堤心石拋放能較沉箱拖放長度多 150～200m (約 6～8 座沉箱)，因堤線海床在沉箱放置後，方會於其前方約 100m 區域發生大刷深情形，若於沉箱尚未放置前，將海床以堤心石保護當可減少堤線上之海床淘刷。

麥寮港於施工前即蒐集各港之施工經驗，希望減少施工上可能之困難，然防波堤堤頭保護工範圍甚大，無法一次完成，以致刷深坑洞有逼近沉箱之現象。麥寮工業區工業專用港西防波堤沉箱施工，自民國 84 年 5 月至民國 89 年 9 月間，共 5 年 4 個月，因每年東北季風期必須停工 5~7 個月，因而共有五次出現短暫性堤頭刷深狀況 (沉箱編號#17、#36、#50、#62、#80)，其深洞位置距堤頭約 100m，且多在防波堤沿線偏北 450 之方位上，其淘刷深度於半年中約 5~7m，其中淘刷深度達 5m 範圍。由於淘刷深洞直接影響設

計堤線上之堤址水深，故每年 4 月重新開工時，因底床地形大幅刷深對護基拋石等工作造成相當大之困擾，也延緩後續沉箱之拖放。民國 89 年 11 月安放堤頭第 90 號沉箱後，西防波堤全部完工，至今於堤頭處亦發生嚴重刷深現象。

在麥寮港堤頭施工時，由於堤頭保護工未能如期於沉箱放置前先行完成，而經過東北季風期間，原設計拋放堤腳保護之區域，已部份陷落於刷深之坑洞之中，現有補救措施詳圖 2.38 所示，而由於水深大，流速亦強，致使防止海床淘刷之地工織布已無法順利舖設，而坑洞則持續加深擴大，經考量採用地工織布縫製成為 2 方之砂袋進行拋放，以發揮防止淘刷之效，經模型試驗之驗核後，顯示拋放區域鄰近之海床刷深範圍有擴大之趨勢，但砂袋之穩定性則尚可，故目前以地工砂袋拋放之補救方式似乎不失為可行之方式。(註：沙袋回填作業已於民國 94 年施作)

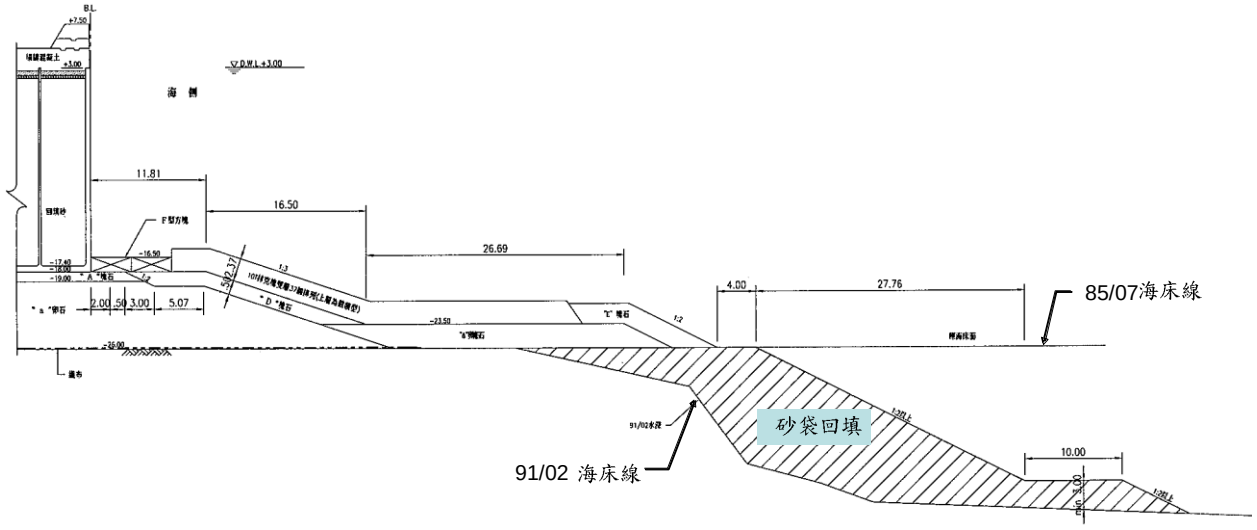


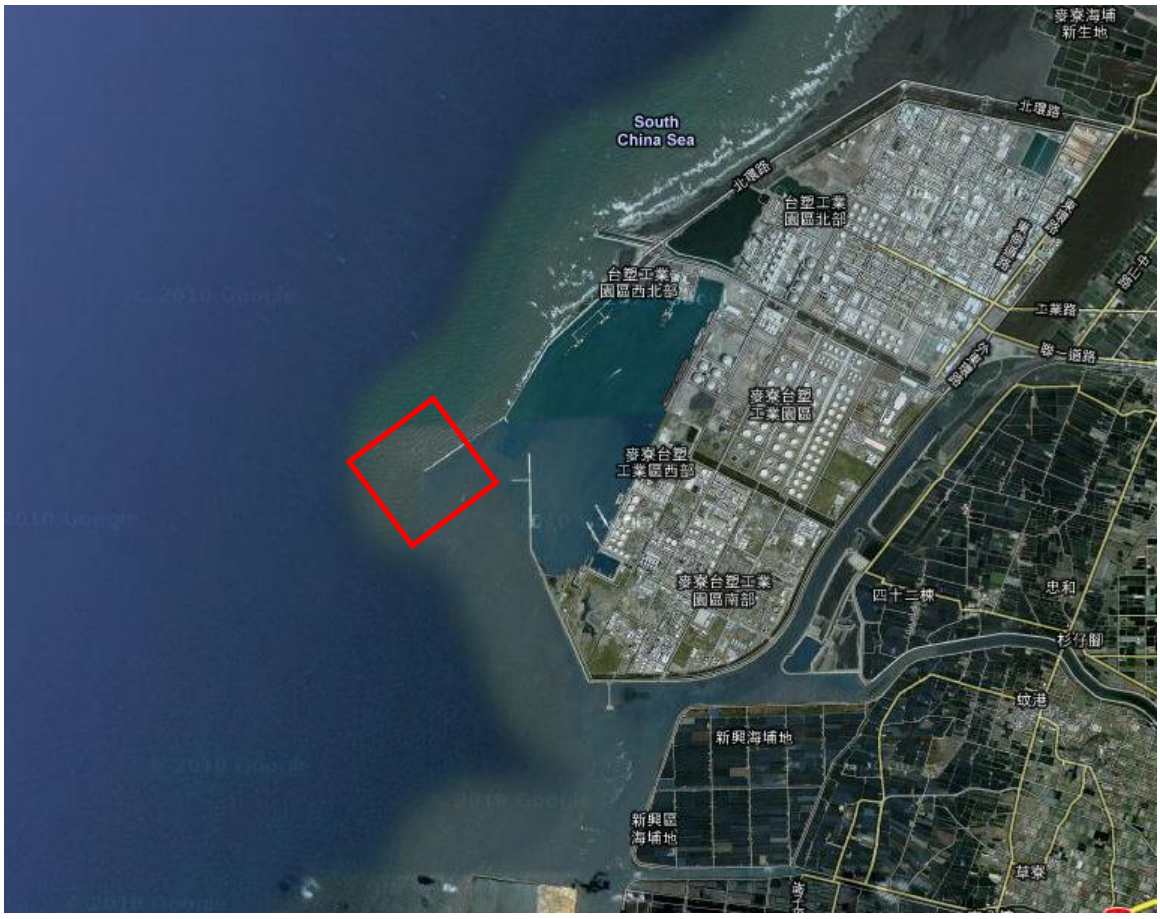
圖 2.38 麥寮西防波堤堤頭補救措施斷面圖 (朱等人，2002)

第三章　防波堤堤頭地形量測與分析

3.1 測量作業事項

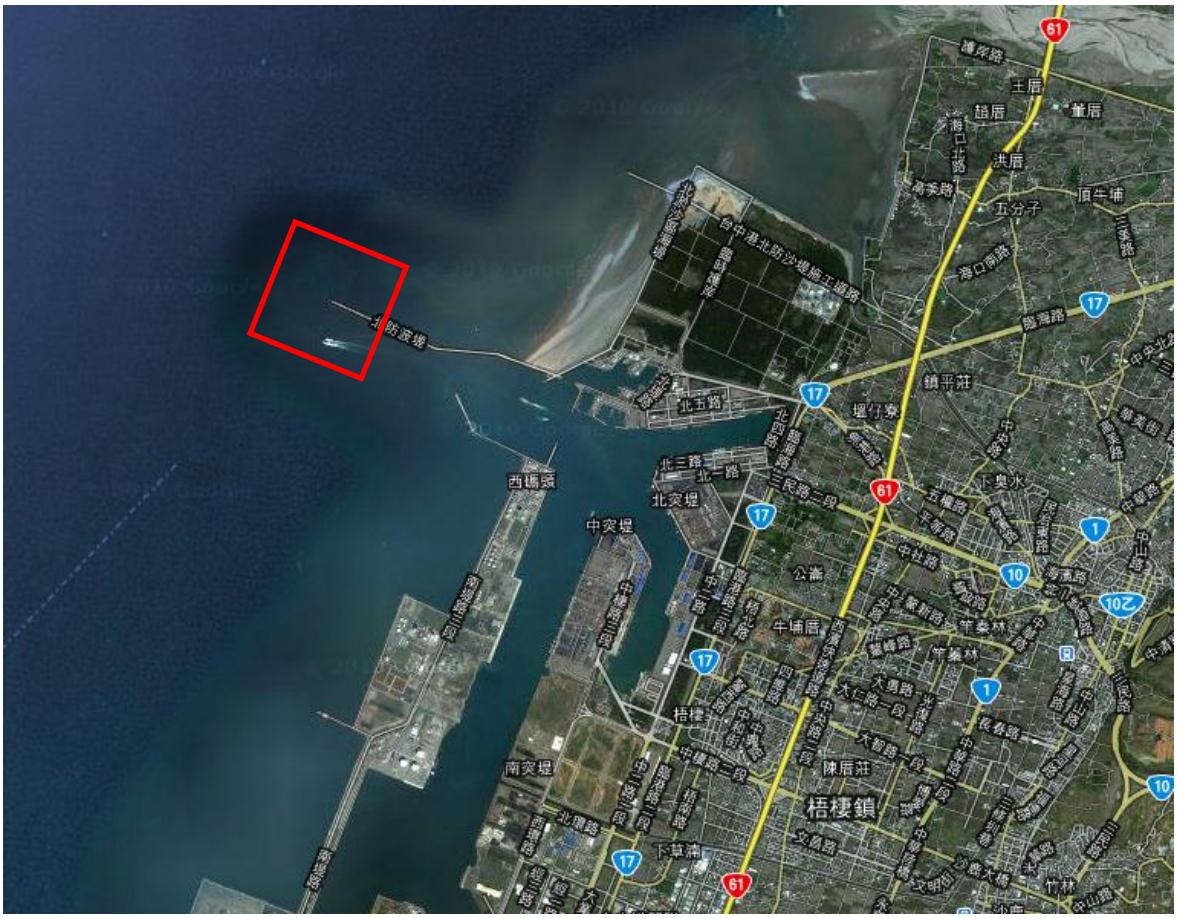
3.1.1 監測範圍及頻率

本計畫測量範圍為麥寮工業區專用港西防波堤堤頭及臺中港北防波堤堤頭約1公里見方之範圍，所涵蓋範圍包含海域地形刷深處為中心點，如圖 3.1 及圖 3.2 方框所示。



（底圖來源：Google Earth）

圖 3.1　麥寮工業區專用港西防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖



（底圖來源：Google Earth）

圖 3.2　臺中港北防波堤堤頭水深地形監測範圍示意圖

3.1.2 監測方式

平面控制系統採用臺灣二度分帶97坐標系統（TWD97），即橫麥卡脫TM坐標系統，經差二度分帶，中央子午線尺度比率為0.9999，坐標原點以東經121度為中央子午線與赤道之交點，橫坐標西移250,000m。高程控制採用基隆中潮一等水準系統。

海域水深測量採用單音束測深儀，測深成果須達到 IHO SP-44 第 4 版規範標準；利用精密之單音束聲納測深儀 (Single beam)，音鼓為 9degree-200 KHz，或同等級以上之測深儀。再利用導航軟體將 GPS 及測深儀連線，其一方面收集 DGPS 所得之精確座標並將所得航跡顯現於電腦螢幕上，以隨時與所規劃之測線比對並加以修正航向，並將測深資料隨同定位資料存檔於筆記型電腦中。若作業時之波高超過 50 cm，則於測量

作業時以船隻姿態收集校正船隻受波浪之起伏偏差。同時引測 (或收集) 施測水域附近之水準點以求出即時之水位修正值。於水深量測作業前，將於出發前進行現場檢核板 (Bar check) 校正，以確認測深儀之精度。所得資料經由潮汐水位修正後，同時以聲速剖面儀或 CTD 施測測區當時之聲速剖面進行聲速校正，如此即可正確量測出施測海域之三度空間資料。單音束水深測量作業流程如圖 3.3 所示，海域地形測深單音束系統整合作業示意圖如圖 3.4 所示。另因應麥寮港北堤堤頭海域地形之劇烈變化特性，該處水深地形特地以多音束測深系統進行測量，以取得更為精確之地形資料，多音束水深測量作業流程如圖 3.5 所示。

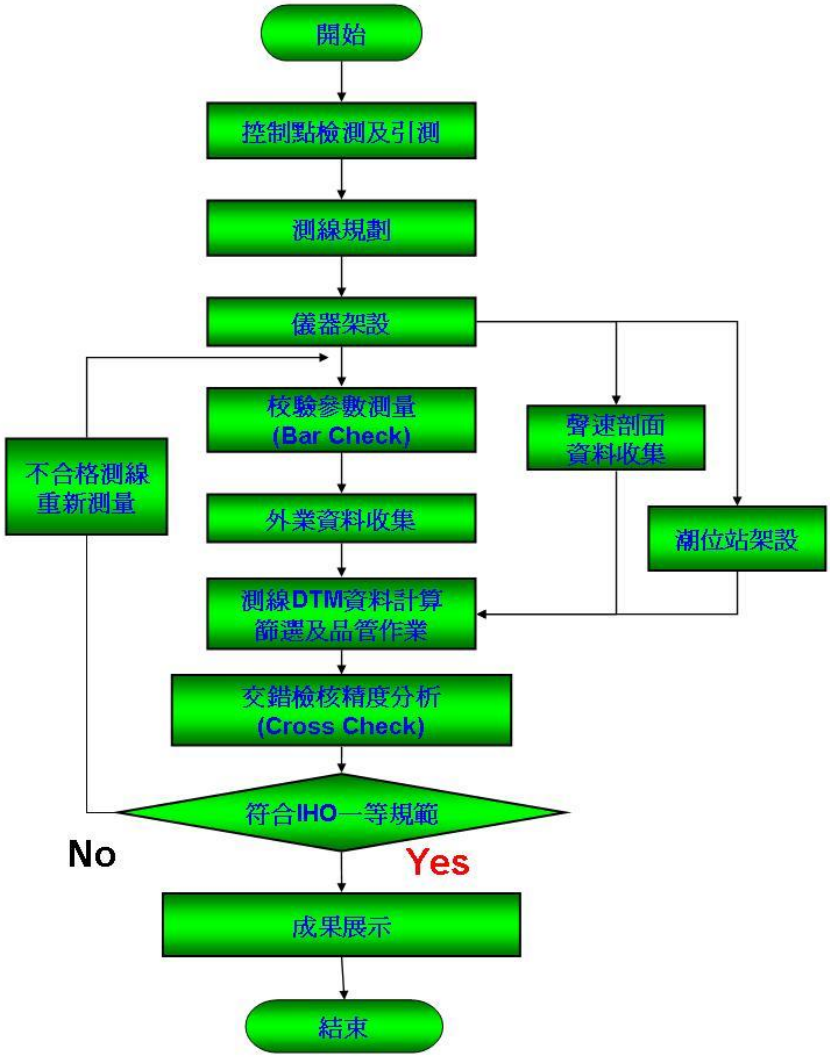


圖 3.3　單音束水深測量作業流程圖

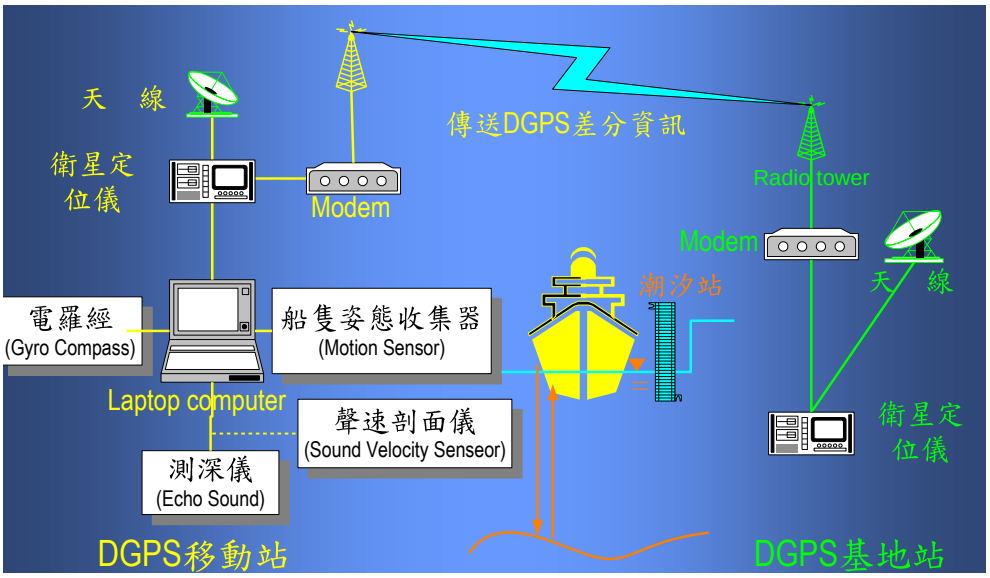


圖 3.4　海域地形測深系統整合作業示意圖

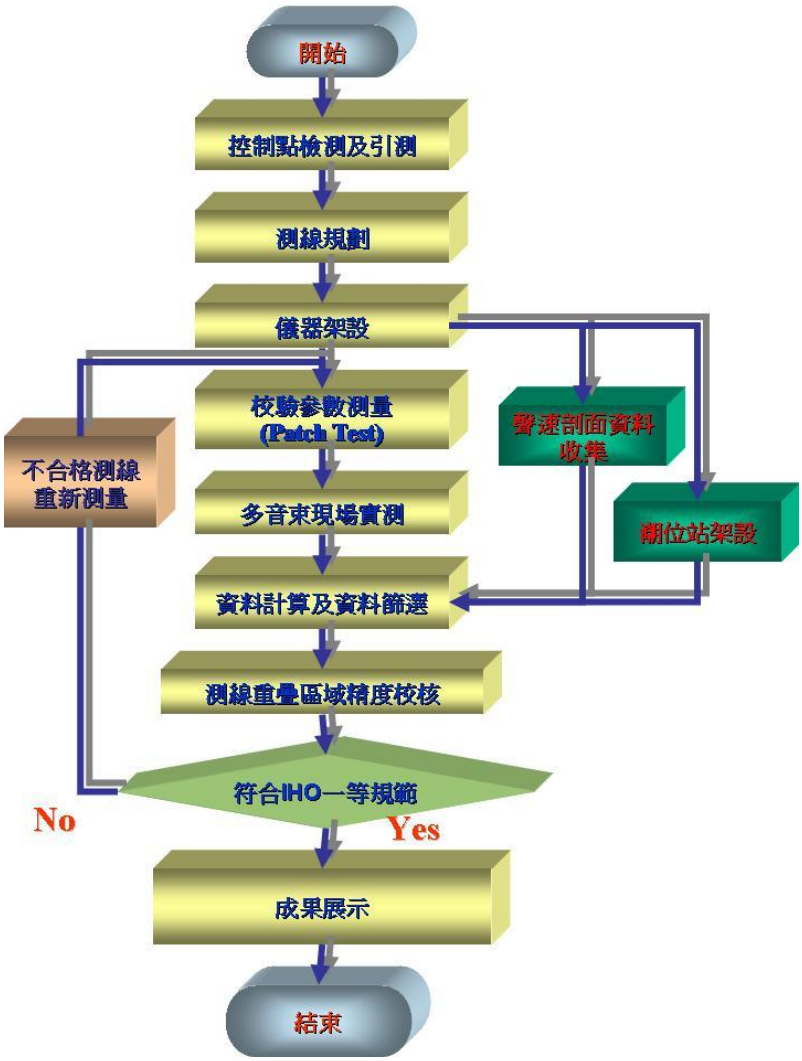


圖 3.5　多音束水深測量作業流程圖

各項作業項目分述如下：

1. 測線規劃：

海域單音束測量採斷面測量方式，針對招標規範書之計畫區內垂直海岸線方向，每間隔 50 公尺規劃一條斷面測線。

為進行水深測量之品管作業，需另外加入垂直於主要測線之交錯檢核測線 (cross check tracking line)，而交錯檢核測線之間距依據 IHO S-44 之水深測量最低標準，約為主要測線間距 (50 公尺) 之 15 倍，亦即為 750 公尺需加入一條交錯檢核測線。

2. 船隻姿態角觀測：

實施單音束水深測量配置湧浪補償儀記錄船隻上下起伏高度 (heave)，以作為當時浪高對測深資料影響之校正。

3. 船隻導航及定位：

採用 DGPS 差分式全球衛星定位測量或 RTK 即時動態衛星定位測量，定位精度需小於 1 公尺為原則。於陸上設一基站，配合船上移動站即時測定船隻位置，記錄測深時刻的位置坐標，並利用導航軟體作測線規劃及導航，導航時之船位需與測線之誤差低於 25 %。

4. 儀器架設偏移修正：

以船隻重心為相對坐標之中心，船隻重心至船首方向為基準方向，在安置測深系統的各項裝置時記錄並繪製各裝置的相對位置，其中包括音鼓至水面距離、音鼓架設於船隻上的相對位置、定位儀架設於船隻上的相對位置、定位儀至水面距離及姿態感測器架設於船上的相對位置。

5. 潮位觀測：

本計畫預計於麥寮港及臺中港各設置一處潮位站，並引測臺灣地

區之基隆中潮一等水準系統，或購買附近區域之中央氣象局之中潮系統潮位資料，作為潮位基準。在水深測量進行期間，以 24 小時連續記錄，每 6 分鐘觀測一筆潮位資料，做為水深量測潮位修正之依據。

6. 聲速量測：

在每日施行水深測量的作業範圍內，選取較深之位置作聲速量測，若於測量期間氣候變化遽烈導致水中溫差變化大，則再次量取水中聲速剖面，增加聲速量測次數以求正確測得水中聲速的變化，精確修正水深測量成果。所使用之聲速儀為直接量測式聲速儀，量測聲速之最小記錄單位可達 0.5 公尺/秒，記錄時視測區深度及聲速變化情況而定，取樣間隔在 1 公尺內。

7. 率定測試：

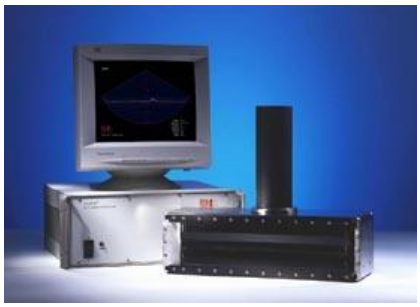
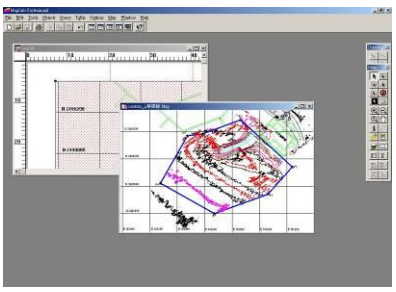
單音束水深測量在每次作業前後以水深校正板檢校（bar check），先以聲速儀量測深速並修正之，分別量測檢校板深度與測深儀讀數並記錄製作檢校表，檢視測深差異量是否在儀器精度的合理範圍內。

3.1.3 儀器介紹

水深調查作業所使用之儀器包含電腦、潮位計、衛星定位儀、單音束測深儀與多音束測深儀等。

表 3.1　測量作業使用之儀器規格表

系統	圖例	設備說明
GPS 系統		**Topcon Hyper Lite^{+}接收器** 1.可接收 GPS 及 GLONASS 等二種衛星。 2.水平精度可達 10mm+1ppm，垂直精度可達 15mm+1ppm。 3. RTK 測量精度在公分以內。
GPS 系統		**SOKKIA AXIS3 beacon GPS 接收器** 1. 使用全球 Beacon 基地站，單機即可作業。 2. DGPS 定位精度在 1 公尺。 3. GPS 天線與 Beacon 天線整合為一，簡單輕便。 4. 現場即時顯圖，不會發生漏測的情形。
潮位監測		Sea-Bird SBE39 壓力式潮位儀 1.溫度精確度為±0.002℃。 2.解析度則為 0.0001℃。 3.壓力範圍在水深 20 公尺以內。 4.精度 2 公分。 5.解析度 0.04 公分。
水深監測		**ODOM Hydrotrac 測深儀** 1. 頻率為 200 KHz。 2. 解析度 0.01 公尺，精確度為 0.01 公尺 ±0.1％ depth。 3. 功率在 20-600W。 4. 音束束寬為 3° 或 9。

水深監測		**TSS DMS-05 船隻姿態收集器** 1.左右搖擺(Roll)與前後傾斜(Pitch)之動態量測精度為±0.04 度，感應範圍為±60°。 2.上下起伏(Heave)量測之變化量精度為5cm，感應範圍為 ±10m。
導航系統		**Reson 8125 多音束測深儀** 1.音束數目：240 beams。 2.音束束寬：0.5° 。 3.聲波接收角：120° 。 4.頻率：455 KHz。
導航系統		**Octans 100 航向儀及船隻姿態收集器** 1.動態量測精度 Roll&Pitch 約為±0.01° 。 2.Heave 約為±5 公分或 5%(以較大者為準)。 3.Heading 約為 0.1 度乘 sec(緯度)。
導航系統		**HYPACK MAX 即時導航軟體** 1.可同步接收衛星定位與水深資料。 2.結合底圖做即時性之衛星導航。 3.做水深資料之品保與品管。
GIS 地理資訊系統		**MapInfo 6.5 版 GIS 地理資訊系統軟體** 1.提供地圖繪製、編輯、地理分析、網格影像等功能。 2.可查閱圖層物件之屬性資料。 3.可依需求做各種不同屬性之圖層套疊。 4.透過資料轉換格式功能可以與其他繪圖軟體做雙向格式轉換。

3.1.4 地形測量前置作業

本計畫分別於 100/5/31 完成第一次臺中港之潮位站引測與水深測量作業，101/5/7 完成第二次之水深測量作業；於 100/6/9 完成第一次麥寮港之潮位站引測與水深測量作業，101/5/8 完成第二次之水深測量作業。

一、潮位站選取與測量

本計畫潮位站之引測，乃先利用 Topcon GPS 二部以 GPS 靜態基線測量法(static baseline survey)引測潮位站至施測區域附近之衛星控制點或水準點，以求出潮位站之 TWD97 坐標。內政部地政司建立臺灣地區完整、統一、高精度之衛星控制點系統，以提供本國重大經濟、工程建設所需之高精度基本控制點，本計畫以內政部所完成之一等一級水準控制點為引測之基站，由於本研究案作業範圍廣泛，因此在每一測區各設置一個基站衛星控制點。臺中港引用之一等一級水準控制點點名為「港灣技術研究中心」，位於梧棲臺 17 線港灣技術研究中心圍牆內，點號為 K400 ，潮位站則引測至梧棲漁港鄰近安檢站岸側，於 100 年 5 月 31 日完成引測；麥寮工業港引用之一等一級水準控制點點名為「麥寮工作站」，位於麥寮臺 17 線雲林農田水利會麥寮工作站圍牆外，點號為 G037 ，潮位站則引測至麥寮工業港港勤船渠岸側，於 100 年 6 月 9 日完成引測。 K400 與 G037 內政部公告之控制點點位相關資料如表 3.2 所示。由 K400 引測至梧棲漁港潮位站的解算結果如表 3.3 所示；由 G037 引測至麥寮工業港潮位站的解算結果如表 3.4 所示。

表 3.2　本計畫引用一等一級水準控制點之點位資料

點名	編號	緯度			經度			橢球高程(m)	中潮系統正高(m)
		度	分	秒	度	分	秒		
港灣技術研究中心	K400	24	16	11.91644	120	31	44.16151	22.97	4.16109
麥寮工作站	G037	23	45	02.75995	120	15	45.91625	24.688	5.14623

表 3.3　梧棲漁港潮位站之點位資料

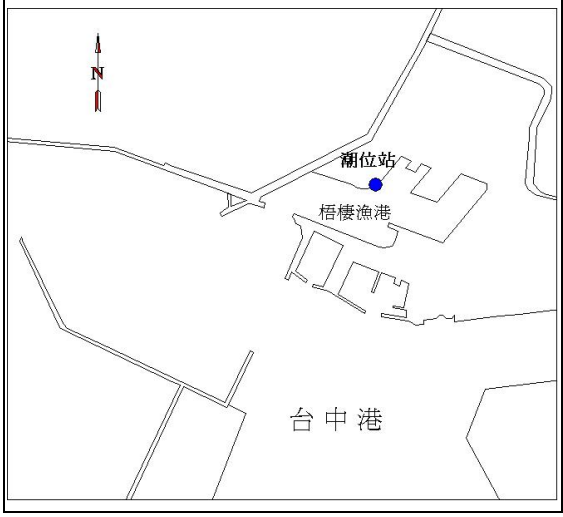
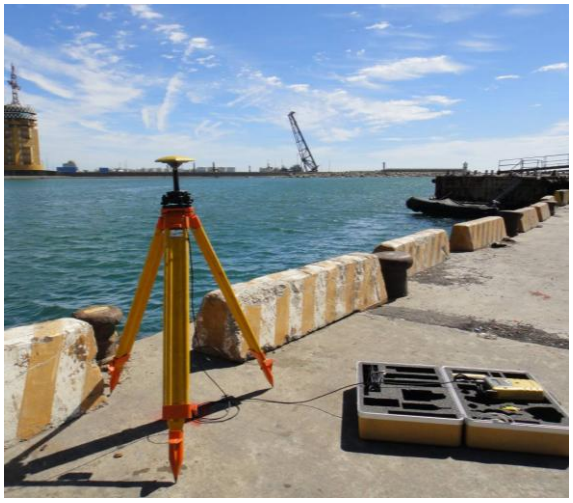
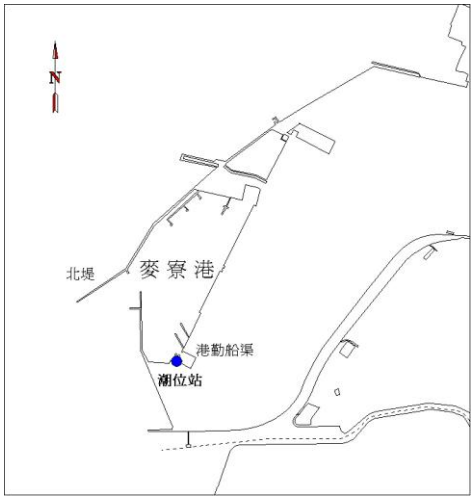
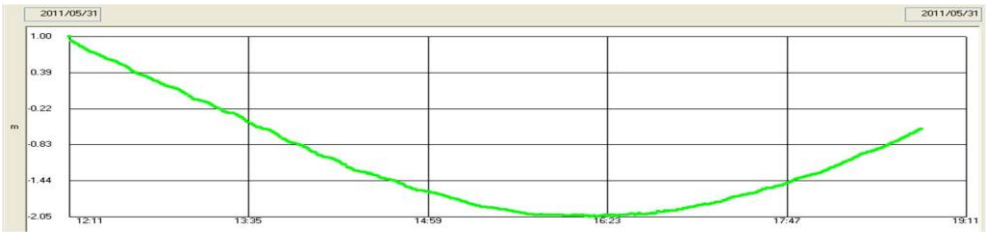
日期	100/5/31	坐標系統	TWD97
橫坐標(N,Y)	24° 17’ 33.95136”	縱坐標(E,X)	120° 31’ 04.99509”
橢球高程(m)	22.052	水準高程(m)	3.243
位置詳圖說明：梧棲漁港潮位站鄰近安檢站岸側。			
地理位置圖		現場照片	
			

表 3.4　麥寮工業港潮位站之點位資料

日期	100/5/8	坐標系統	TWD97
橫坐標(N,Y)	23° 46’ 14.47985”	縱坐標(E,X)	120° 10’ 11.08105”
橢球高程(m)	22.637	水準高程(m)	3.095
位置詳圖說明：麥寮工業港潮位站位於麥寮工業港港勤船渠岸側。			
地理位置圖		現場照片	
			

二、潮位觀測紀錄

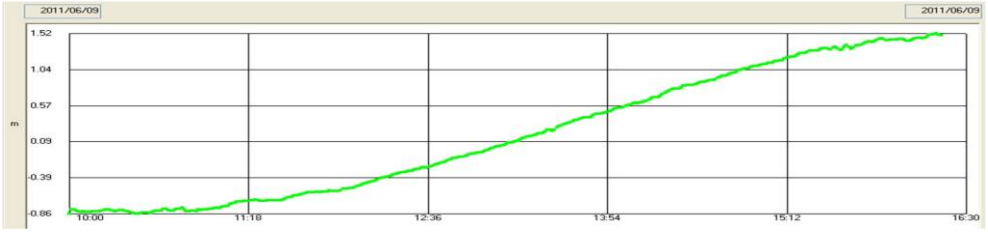
潮位修正部分，本計畫採用 Sea-Bird SBE-39 壓力式潮位計實測之潮汐資料，臺中港堤頭水深測量以置放於鄰近安檢所之潮位儀所記錄之潮位資料為修正依據，麥寮港堤頭水深測量則以港勤船渠之潮位儀所記錄之潮位資料為修正依據，因應當地較大之潮差變化，每 1 分鐘記錄一次水位。其中臺中港潮位站碼頭面高程為 3.243 公尺，麥寮港潮位站碼頭面高程為 3.095 公尺。各港之潮位記錄如附錄二所示，而其水位時序列變化曲線如圖 3.6 與圖 3.7 所示。



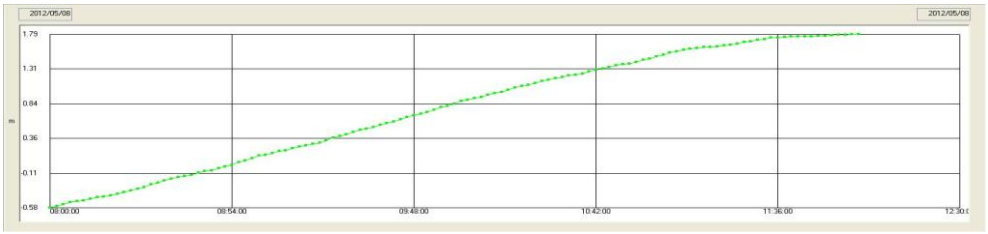
第一次 100/5/31 12:10~18:50

第二次 101/5/7 08:00~18:30

圖 3.6　梧棲漁港水位時序列變化圖



第一次 100/6/9 10:00~16:20

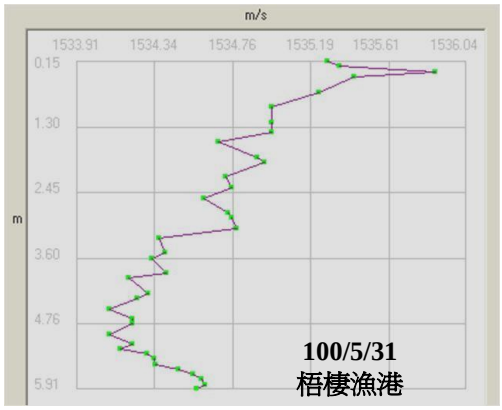


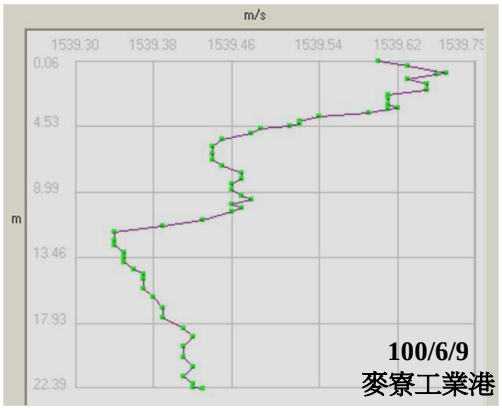
第二次 100/5/8 08:00~12:00

圖 3.7　麥寮工業港水位時序列變化圖

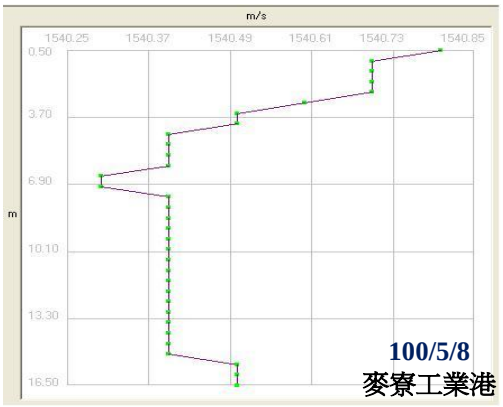
三、聲速剖面紀錄

本計畫於聲速修正部分，於水深測量當日採用 Seabird SBE-19 鹽溫深儀(CTD)測量出當地海域之溫度、鹽度、壓力，再經由程式(Chen 及 Millero)轉換成聲速剖面值進行修正，所量測解算得之聲速記錄資料如附錄三所示，各港之水中聲速變化曲線如圖 3.8 所示。作業相關照片，詳如附錄四。





100 年第一次



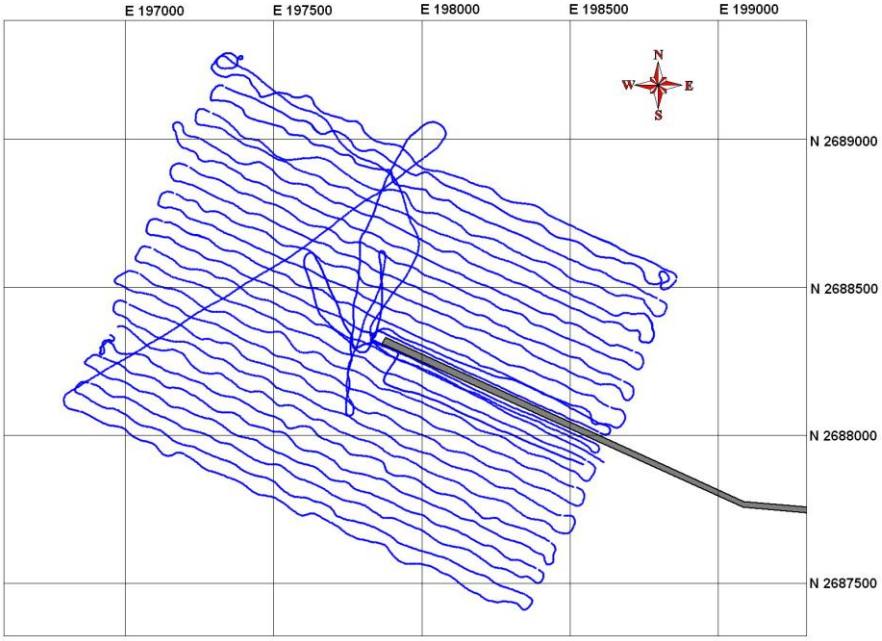
101 年第二次

圖 3.8　梧棲漁港與麥寮工業港聲速剖面變化圖

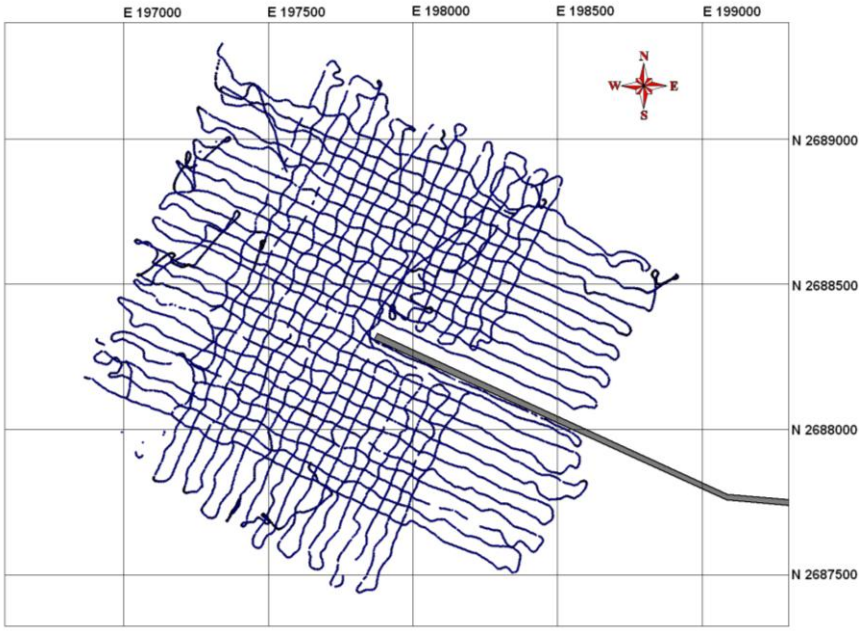
3.2 水深測量成果與分析

3.2.1 臺中港北防波堤

實測之軌跡路線圖如圖 3.9，取網格製成等深線及水深色階圖如圖 3.10 與圖 3.11 所示，海域地形三維立體圖如圖 3.12 所示。

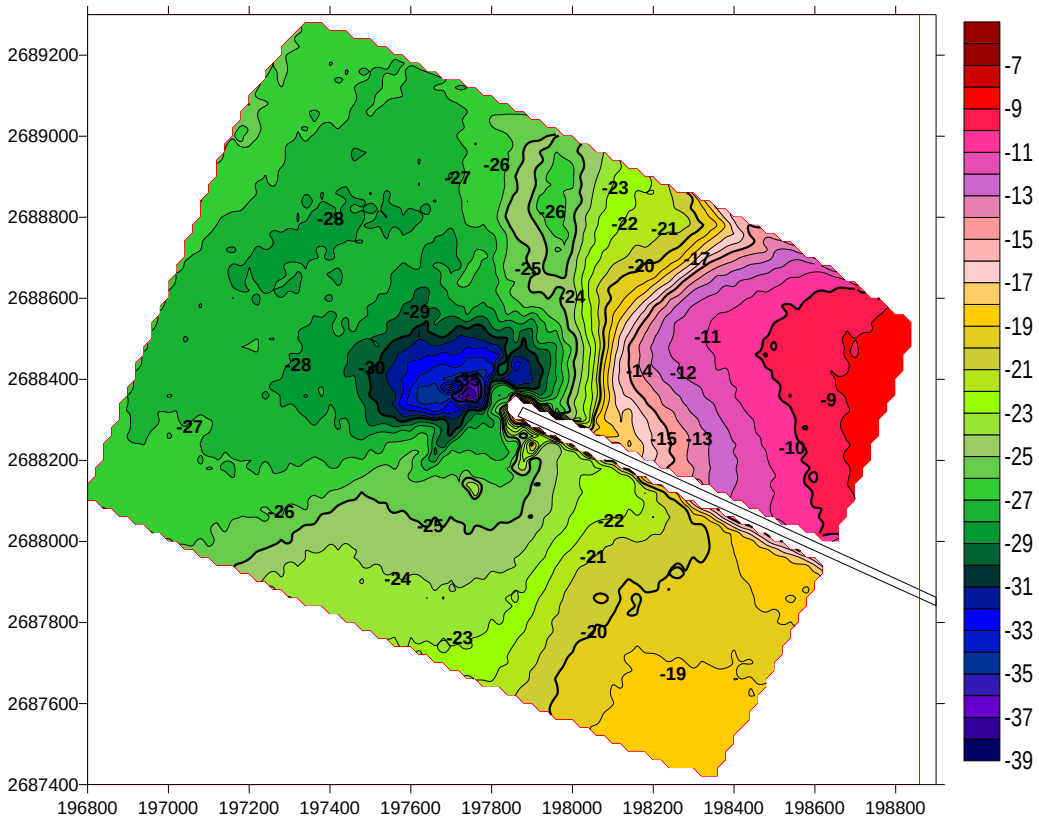


第一次 100/5/31

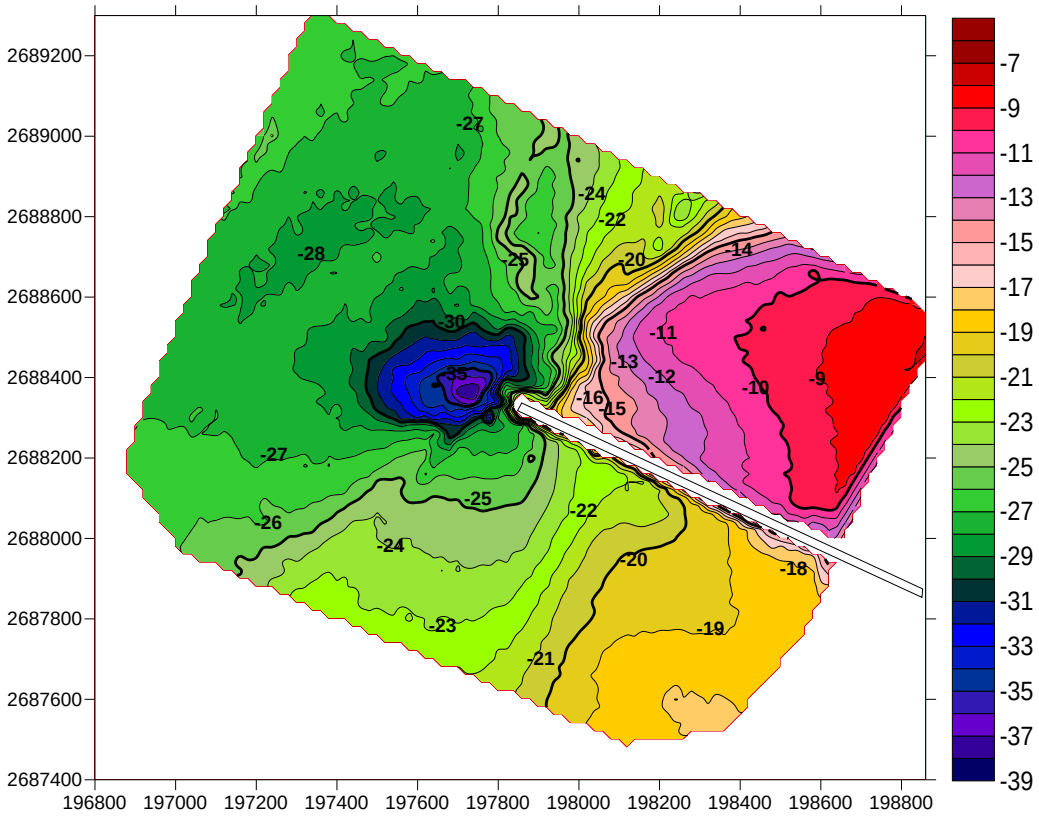


第二次 101/5/7

圖 3.9 臺中港北防波堤堤頭水深測量航跡點

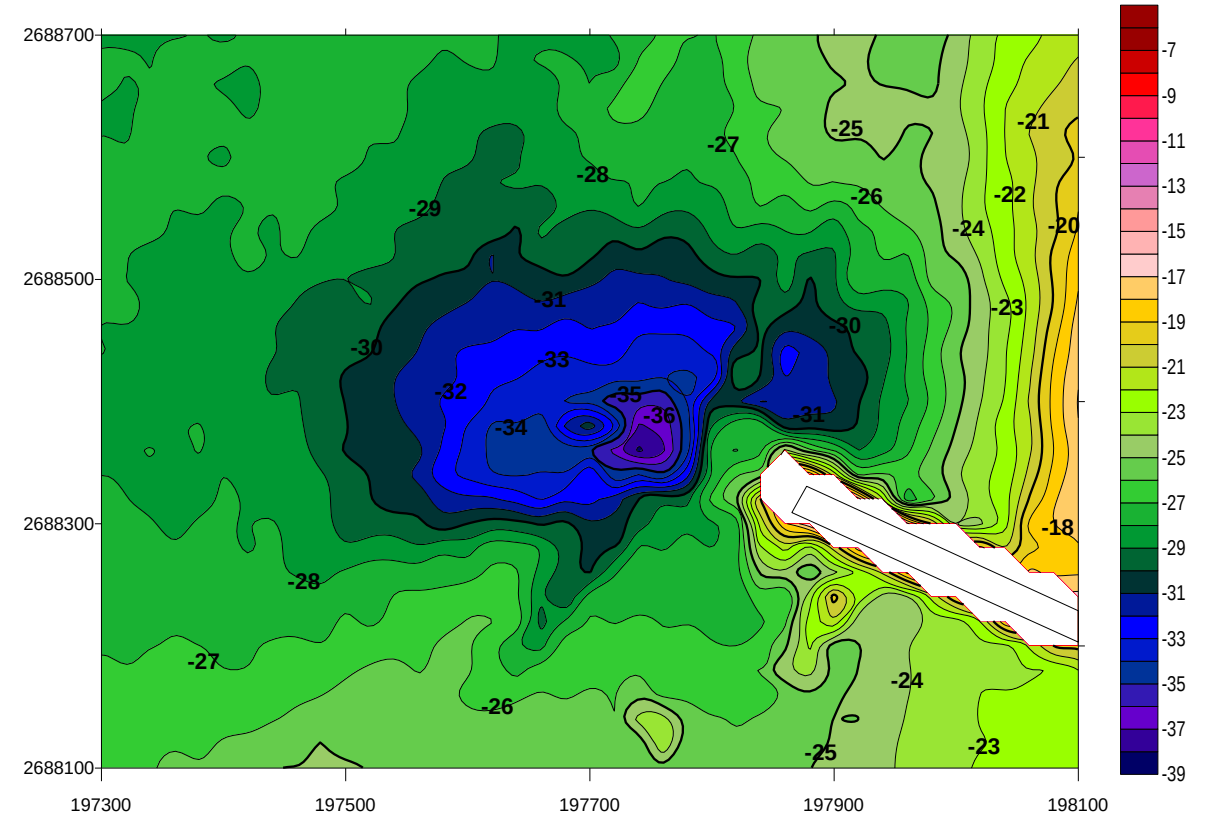


第一次 100/5/31

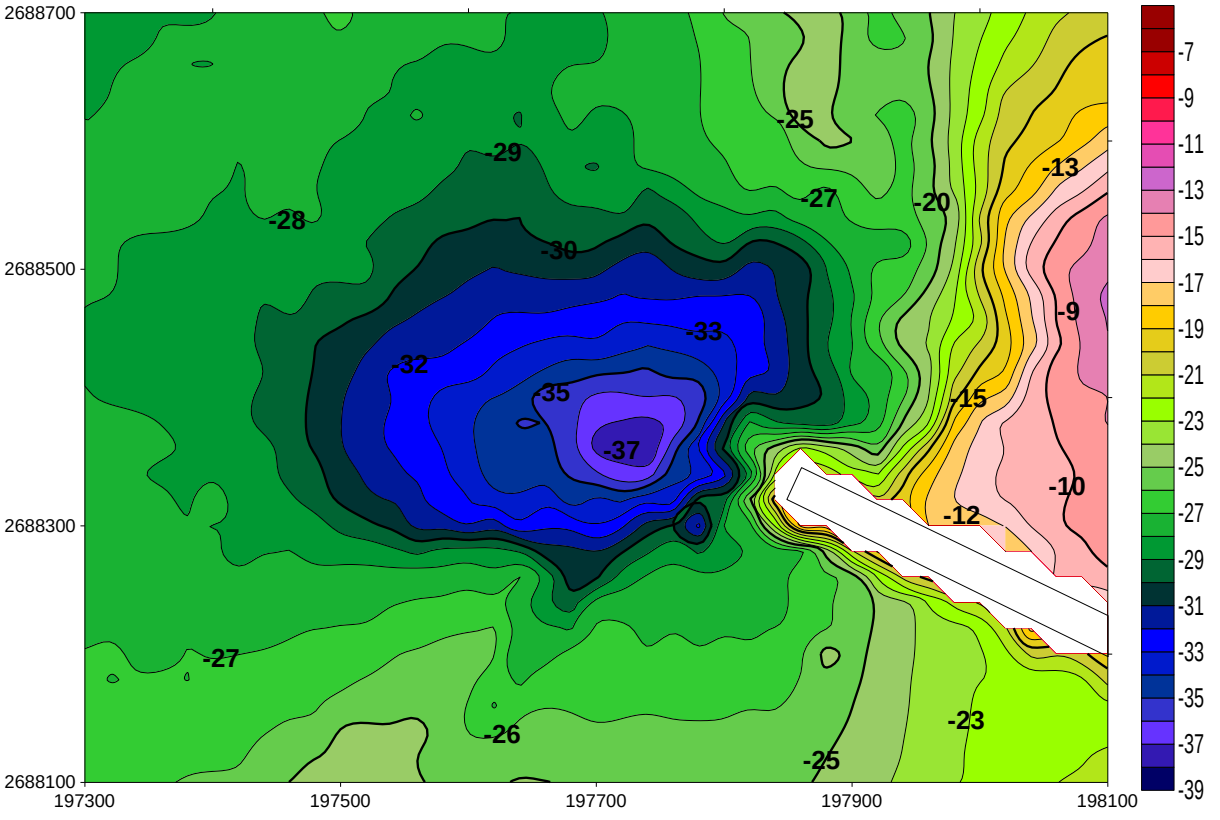


第二次 101/5/7

圖 3.10 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖

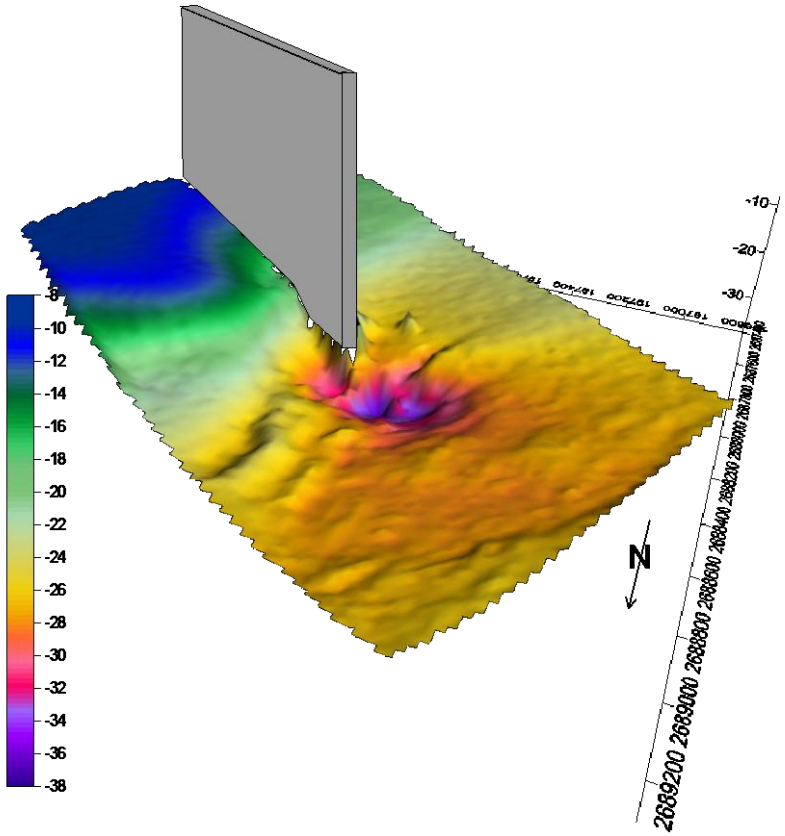


第一次 100/5/31

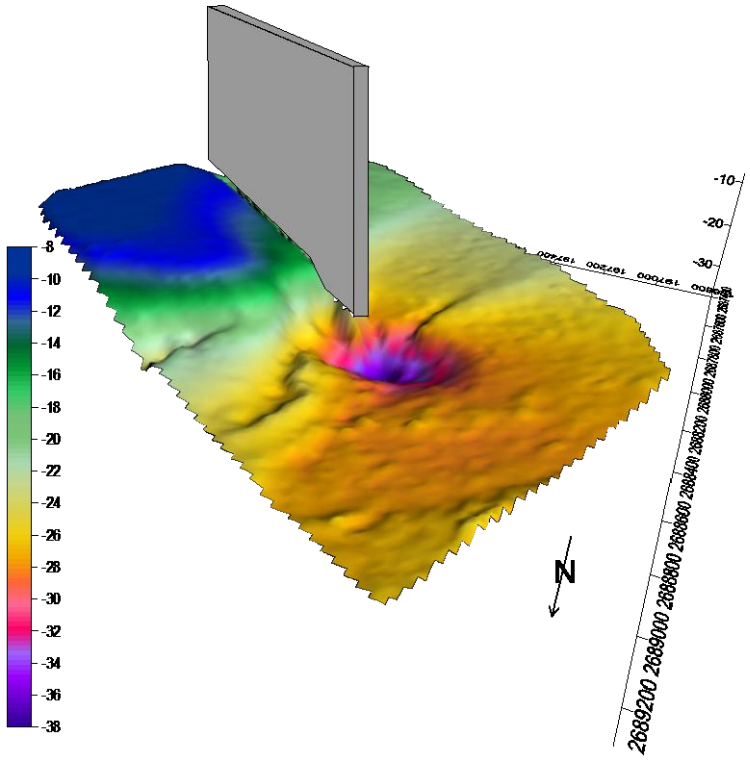


第二次 101/5/7

圖 3.11 臺中港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖(局部放大)

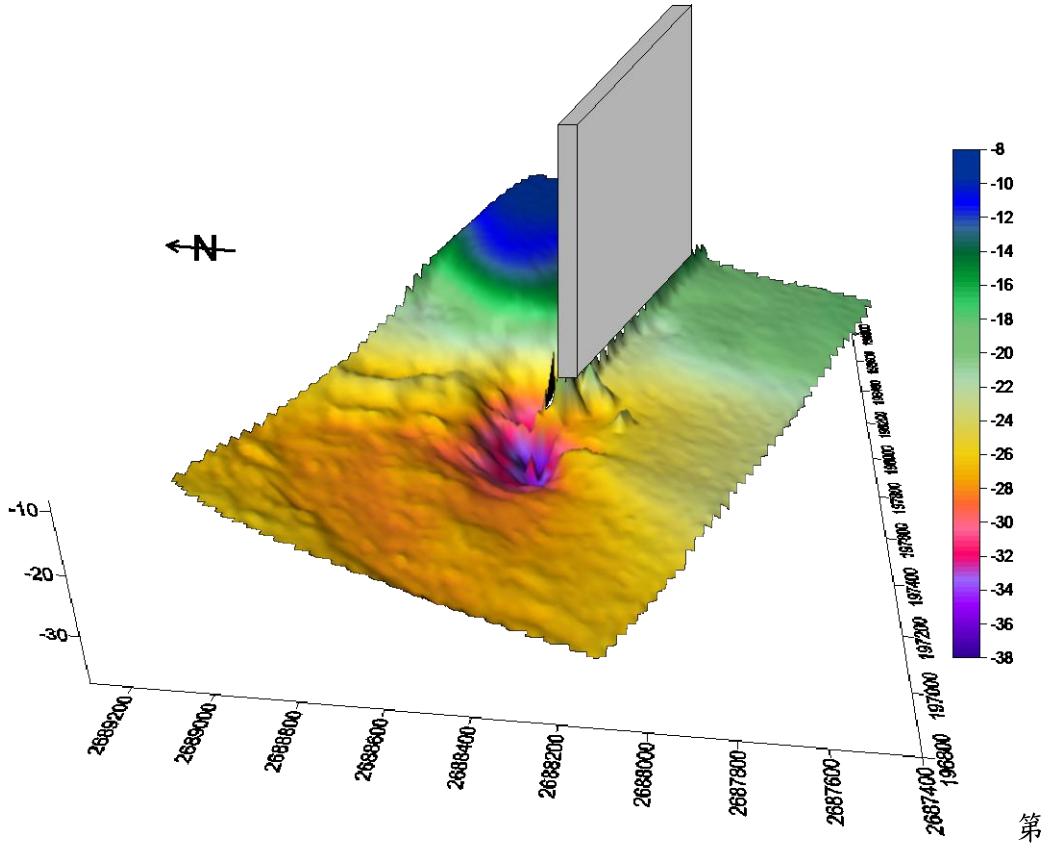


第一次 100/5/31

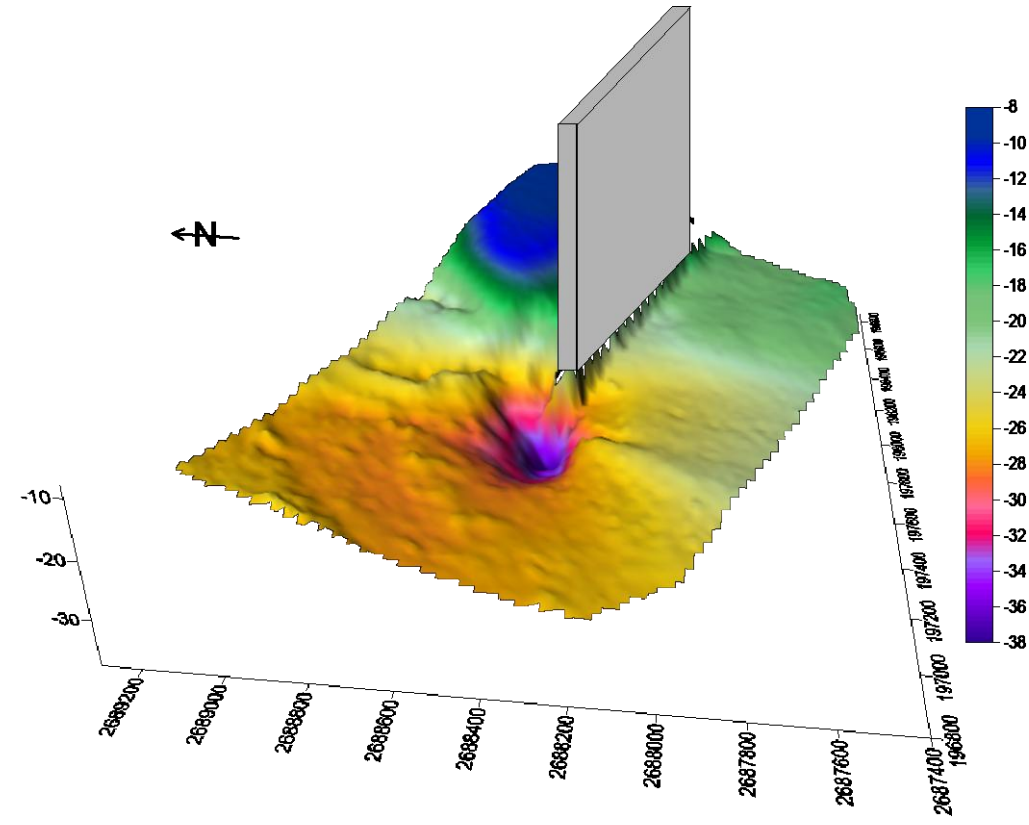


第二次 101/5/7

圖 3.12(a) 臺中港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖



第一次100/5/31



第二次 101/5/7

圖 3.12(b) 臺中港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖

依地形變化特性擷取測量海域計 9 條之斷面水深資料，各斷面位置資料如表 3.5 所示，其中 W1 至 W4 為垂直海堤之斷面，W5 至 W9 為平行海堤之斷面。斷面 W1 與 W2 主要在呈現臺中港北堤堤北外海區域與堤南港域之地形落差變化。斷面 W3 則呈現測區南北向經過掏刷最深區域之水深變化； W6 與 W8 為平行鄰近北堤北側與南測之斷面，主要呈現海堤側邊之水深變化；斷面 W7 為由堤頭開始經過掏刷最深區域之水深變化，斷面位置如圖 3.13 所示，各斷面歷次監測之水深變化比較如圖 3.14 至圖 3.22 所示。

表 3.5　臺中港斷面位置坐標

斷面編號	起點坐標(m)		終點坐標(m)		斷面距離(m)
	N	E	N	E	
W1	2688619	198753	2687448	198218	1300
W2	2688833	198315	2687662	197780	1300
W3	2688967	198017	2687796	197483	1300
W4	2689171	197570	2688000	197035	1300
W5	2688325	198772	2689068	197192	1750
W6	2688033	198638	2688777	197058	1750
W7	2688320	197868	2688723	197026	950
W8	2687924	198585	2688667	197005	1750
W9	2687582	198435	2688325	196855	1750

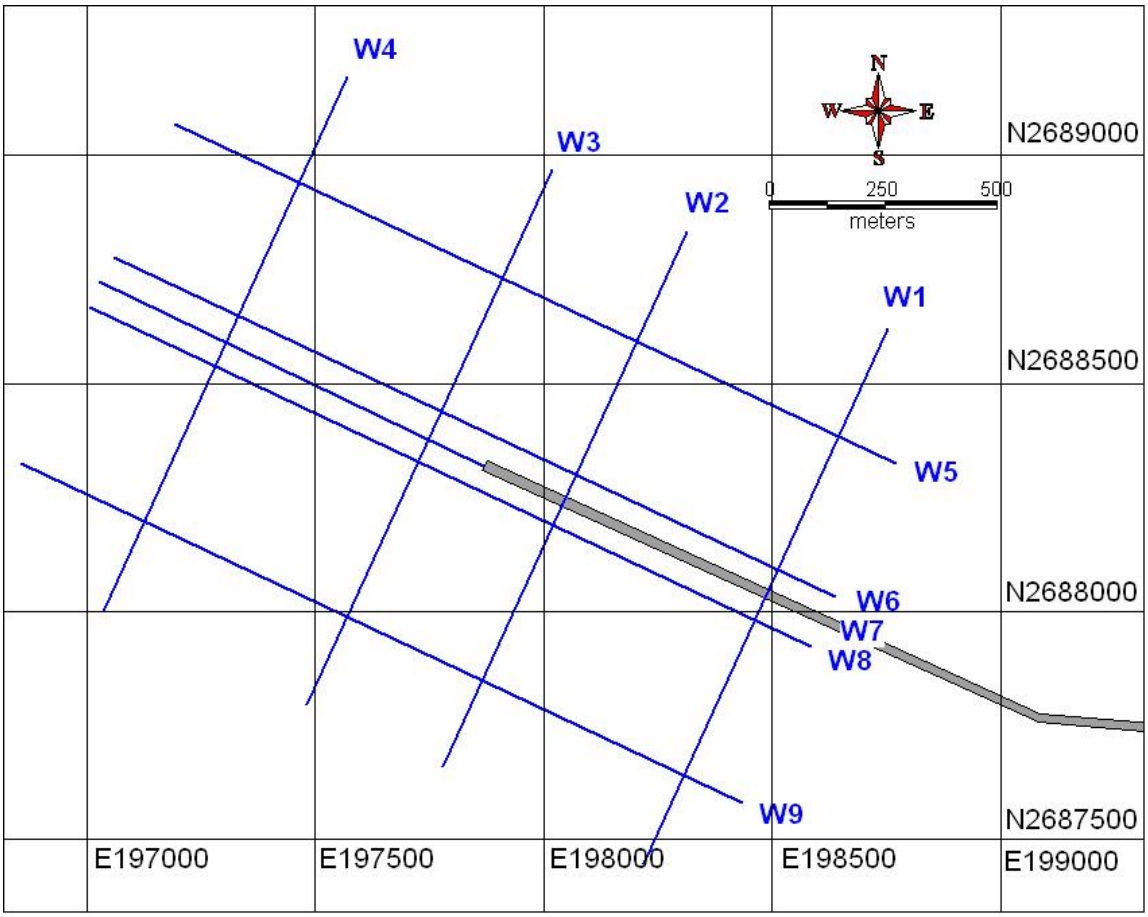


圖 3.13 臺中港堤頭水深測量斷面位置圖

1.第一次臺中港北堤水深測量

區域所測得水深最淺約為 -8m，堤頭附近掏刷最深處水深約 -39m，等深線於堤身附近大致呈現垂直海堤方向分布，堤頭附近因為波浪反射之掏刷而形成輻射狀之等深線分布，掏刷最深處位於堤頭向外海延伸方向約 140m 處；堤頭正北方約 100m 處亦有刷深現象，最深處約 -32m，如圖 3.10 與圖 3.11 所示。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 6~7m。透過三維影像，如圖 3.12 所示，可呈現本測量海域地形變化之特性，由於係以單音束測深系統進行水深測量，消波塊群成像並不明顯，但可由水深色階圖之分布，約略看出堤頭南側附近之消波塊群之可能分布。

斷面 W1：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 680m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -8.9m ~ -19.4m 之間；

港域外距斷面起點至 460m 處之高程約在 -9.1m～-10.1m 間，坡降約為 0.3/100；距斷面起點 460m～610m 接近堤址處則略有刷深之情形，地形較為陡降，坡降約為 0.6/100，堤址附近高程降至約 -11m， 掏刷深度約 1m；港域內距斷面起點 700m ~ 1280m 間之高程約在 -18.3m ~ -19.4m 間，中間略微刷深，堤址處水深約 -14.8m ，除堤址附近外，平均坡降約為 0.4/100。港域外地勢高於港域內，高差約 7.4m，本斷面除堤址附近外，堤內外海域地形無明顯變化。本斷面高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.14 所示。

斷面 W2：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 200m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -14.5m～-23.6m 之間；港域外距斷面起點 320m 處形成一離岸潛坵，高程約 -14.5m，起點 58m 處之高程最低約 -21m，本段坡降約為 0.3/100；起點 610m 接近堤址處則略有刷深之情形，高程約 -19m，離岸潛坵南北二側坡降約在 2/100~2.1/100 之間；港域內距斷面起點 700m ~ 1280m 間之高程約在 -23.3m 緩升至 -22.1m 間，堤址處水深約 -19.2m ，除堤址附近外，平均坡降約為 0.21/100。港域外地勢高於港域內，高差約 4.4m，本斷面在堤址附近地形有較明顯之變化，港域外海堤北側則有一差約 6.5m 之離岸潛坵存在，該潛坵可能為布置於堤頭附近之消波塊群。本斷面高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，堤防外堤趾處略有刷深，水深剖面變化如圖 3.15 所示。

斷面 W3：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 140m 處，展現垂直堤防方向斷面之堤頭掏刷水深高差變化，本斷面水深變化約在 -24.7m ~ -38.1m 之間；距斷面起點 670m 處為掏刷最深之處，高程約 -38.1m，該斷面於刷深點南北各約 300m 附近為刷深區域，坡降約在 4.6/100～6.5/100 間，其餘斷面水深值表現北側約在 -25m～-26m 之間，坡降約為 0.3/100；南側斷面水深值表現約在 -23m～-26m 之間，坡降約

為 0.7/100。本斷面除刷深區域外，坡降大至平緩。本斷面在掏刷區外南北水深高程差亦不大，坡度以北側斷面較具變化性，水深剖面變化如圖 3.16 所示。

斷面 W4：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 630m 處，主要作為與斷面 W3 之水深剖面變化比較，本斷面水深變化約在 -26.2m ~ -28.2m 之間，坡降平緩，高程差不明顯。水深剖面變化如圖 3.17 所示。

斷面 W5：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 380m 處，展現港域外平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -8.6m ~ -28m 之間；距斷面起點 550m 之高程約在 -8.6m ~ -12.2m 間，坡降約為 0.65/100；距斷面起點 550m ~ 900m 之高程約在 -12.2m ~ -25.7m 間，坡降約為 3.8/100 ，斷面變化略微陡峭；距斷面起點 900m ~ 1100m 處地形略微隆起約 1m；距斷面起點 1100m 之後，高程變化在 -26m ~ -28m 間，坡降平緩，高程差不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.18 所示。

斷面 W6：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域外堤身附近之水深高差變化，其斷面變化趨勢與 W5 相似，本斷面水深變化約在 -9.8m ~ -33.5m 之間；距斷面起點 500m 之高程約在 -9.8m ~ -16m 間，坡降約為 1.3/100；距斷面起點 600m ~ 860m 之高程約在 -17.9m ~ -31.9m 間，坡降約為 5.2/100 ，斷面變化陡峭，堤頭附近略微隆起；距斷面起點 900m 處附近地形隆起較為明顯高差約 2.5m；距斷面起點 1000m ~ 1300m ，高程變化在 -32m ~ -27.6m 間，坡降約為 1.5/100 ，之後斷面坡降平緩，高程變化在 -26.5m ~ -28.4m 間，高程差不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.19 所示。

斷面 W7：平行堤身，垂直堤頭往外海延伸方向，展現堤頭掏刷區域附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -23.7m ~ -37.1m 之間；堤頭附近水深約 -23.7m ，距斷面起點（堤頭） 140m 為本斷面最深處，高

程為 -37.1m，堤頭至掏刷區坡降約為 12.6/100，由圖 3.11 與圖 3.12 可明顯看出堤頭附近刷深之情形，高程落差約 13.4m；距斷面起點 200m ~ 450m 之高程約在 -33.7m ~ -28.1m 間，坡降約為 2.3/100 ，斷面變化較為平緩，之後斷面高程變化在 -26.9m ~ -28.2m 間，坡降平緩，高程變化不明顯。本斷面表現出正對堤頭掏刷區之地形變化，水深剖面變化如圖 3.20 所示。

斷面 W8：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域內堤身附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -18.1m ~ -34.5m 之間；距斷面起點 760m 與 820m 堤頭附近處有較為明顯之隆起地形，可能為布置於堤頭附近之消波塊群，高程由 -24.3m 上升至 -21m ，再下降至 -25.2m 後隆起至 -23.6m，由此消波塊群外海刷深至 -34.5m，高程落差達 13.5m，由圖 3.11 與圖 3.12 可明顯看出其存在，；距斷面起點至 710m 處，高程變化在 -18.3m ~ -24.5m 間，坡降約為 0.87/100；距斷面起點 850m ~ 1020m 處，高程變化在 -27.5m ~ -34.5m 間，坡降約為 3.9/100 ，距斷面起點 1200m 之後斷面坡降較為平緩，高程變化在 -29.2m ~ -27m 間，高程差較不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.21 所示。

斷面 W9：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 430m 處，展現港域內平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -18.6m ~ -27.3m 之間；距斷面起點 400m 之高程約在 -18.7m ~ -19.5m 間，坡降約為 0.2/100；距斷面起點 400m ~ 1080m 處，高程變化在 -19.8m ~ -24.3m 間，坡降約為 0.68/100 ，斷面變化略微陡峭；距斷面起點 1100m ~ 1700m 間之高程約在 -24.6m ~ -27.1m 間，坡降平緩，高程差不明顯。本斷面在堤防南側港域內由港內往港外逐漸變深，水深剖面變化如圖 3.22 所示。

2.第二次臺中港北堤水深測量

區域所測得水深最淺約為 -7.4m，堤頭附近掏刷最深處水深約 -39m，等深線於堤身附近大致呈現垂直海堤方向分布，堤頭附近因為波

浪反射之掏刷而形成輻射狀之等深線分布,掏刷最深處位於堤頭向外海延伸方向約 140m 處，如圖 3.10 與圖 3.11 所示。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 5-6m。透過三維影像，如圖 3.12 所示，可呈現本測量海域地形變化之特性，由於係以單音束測深系統進行水深測量，消波塊群成像並不明顯。

斷面 W1：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 680m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -8.6m ~ -19.1m 之間；港域外距斷面起點至 570m 處之高程約在 -9.0m ~ -10.1m 間，坡降約為 0.2/100；距斷面起點 570m ~ 610m 接近堤址處則有刷深之情形，地形較為陡降，坡降約為 4.3/100，堤址附近高程降至約 -12m， 掏刷深度約 1m；港域內距斷面起點 720m ~ 1230m 間之高程約在 -17.7m ~ -19.1m 間，中間略微刷深，堤址處水深約 -14.5m ，除堤址附近外，平均坡降約為 0.2/100。港域外地勢高於港域內，高差約 4.5m，本斷面除堤址附近外，堤內外海域地形無明顯變化。本斷面高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.14 所示。

斷面 W2：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 200m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -11.5m ~ -23.2m 之間；港域外距斷面起點 340m 處形成一離岸潛坵，高程約 -11.5m，起點處之高程最低約 -21.8m，離岸潛坵南北二側坡降約在 1.6/100~3/100 之間；起點 610m 接近堤址處則略有刷深之情形，高程約 -15.9m，；港域內距斷面起點 720m ~ 1290m 間之高程約在 -22.9m 緩升至 -21.8m 間，堤址處水深約 -18.6m ，除堤址附近外，平均坡降約為 0.19/100。港域外地勢高於港域內，高差約 2.7m，本斷面在堤址附近地形有較明顯之變化，港域外海堤北側則有一差約 6.5m 之離岸潛坵存在，該潛坵可能為布置於堤頭附近之消波塊群。本斷面高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，堤防外堤趾處略有刷深，水深剖面變化

如圖 3.15 所示。

斷面 W3：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 140m 處，展現垂直堤防方向斷面之堤頭掏刷水深高差變化，本斷面水深變化約在 -22.8m ~ -37.9m 之間；距斷面起點 670m 處為掏刷最深之處，高程約 -37.9m，該斷面於刷深點南北各約 300m 附近為刷深區域，坡降約在 4.5/100 ~ 4.7/100 間，斷面其餘水深值表現北側約在 -24.5m ~ -26.7m 之間，坡降約為 0.5/100；南側斷面水深值表現約在 -22.8m ~ -25.0m 之間，坡降約為 0.7/100。本斷面除刷深區域外，坡降大至平緩。本斷面在掏刷區外南北水深高程差亦不大，坡度以北側斷面較具變化性，水深剖面變化如圖 3.16 所示。

斷面 W4：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 630m 處，主要作為與斷面 W3 之水深剖面變化比較，本斷面水深變化約在 -25.9m ~ -28.3m 之間，坡降平緩，高程差不明顯。水深剖面變化如圖 3.17 所示。

斷面 W5：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 380m 處，展現港域外平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -8.3m ~ -27.9m 之間；距斷面起點 565m 之高程約在 -8.3m ~ -10.7m 間，坡降約為 0.44/100；距斷面起點 565m ~ 960m 之高程約在 -11.0m ~ -26.8m 間，坡降約為 4.0/100 ，斷面變化略為陡峭；距斷面起點 960m ~ 1050m 處地形略微隆起約 2m；距斷面起點 1200m 之後，高程變化在 -26.6m ~ -27.9m 間，坡降平緩，高程差不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.18 所示。

斷面 W6：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域外堤身附近之水深高差變化，其斷面變化趨勢與 W5 相似，本斷面水深變化約在 -10m ~ -33.5m 之間；距斷面起點 730m 之高程約在 -10.8m ~ -17.2m 間，坡降約為 1.0/100；距斷面起點 730m ~ 950m 之高程約在 -17.3m ~ -33.5m 間，坡降約為 7.3/100 ，斷面變化陡峭；距斷面起點 950m ~ 1300m ，高程變化在 -33.5m ~ -27.9m 間，坡降約為 1.7/100 ，

之後斷面坡降平緩，高程變化在 -27.2m ~ -28.1m 間，高程差不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.19 所示。

斷面 W7：平行堤身，垂直堤頭往外海延伸方向，展現堤頭掏刷區域附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -21.6m ~ -37.2m 之間；堤頭附近水深約 -21.6m ，距斷面起點（堤頭） 140m 為本斷面最深處，高程為 -37.2m，堤頭至掏刷區坡降約為 14.4/100，由圖 3.11 與圖 3.12 可明顯看出堤頭附近刷深之情形，高程落差約 15.6m；距斷面起點 140m ~ 410m 之高程約在 -28.9m ~ -37.2m 間，坡降約為 3.1/100，之後斷面高程變化在 -27.5m ~ -28.9m 間坡降平緩，高程變化不明顯。本斷面表現出正對堤頭掏刷區之地形變化，水深剖面變化如圖 3.20 所示。

斷面 W8：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域內堤身附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -17.1m ~ -35.8m 之間；距斷面起點 800m 至 880m 堤頭附近處有較為明顯之地形變化，可能為布置於堤頭附近之消波塊群，高程變化在 -26.7m 至 -31m 間，由此消波塊群外海刷深至 -35.8m，高程落差達 9.1m，由圖 3.11 與圖 3.12 可明顯看出其存在；距斷面起點至 670m 處，高程變化在 -17.5m ~ -23.3m 間，坡降約為 0.87/100；距斷面起點 980m ~ 1240m 處，高程變化在 -29.2m ~ -35.8m 間，坡降約為 0.67/100 ，距斷面起點 1240m 之後斷面坡降較為平緩，高程變化在 -27.5m ~ -29.2m 間，高程差較不明顯。本斷面平行堤防，可見堤頭附近之刷深情況，水深剖面變化如圖 3.21 所示。

斷面 W9：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 430m 處，展現港域內平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -18.1m ~ -27.0m 之間；距斷面起點 390m 之高程約在 -18.1m ~ -19.1m 間，坡降約為 0.3/100；距斷面起點 390m ~ 660m 處，高程變化在 -19.1m ~ -23.0m 間，坡降約為 1.5/100 ，斷面變化略微陡峭；距斷面起點 660m ~ 1100m 處坡降相當平緩；距斷面起點 1160m ~ 1670m 間之高程約在 -25.7m ~ -27.0m 間，坡降平緩，高程差不明顯。本斷面在堤防南側港域內由港內

往港外逐漸變深，水深剖面變化如圖 3.22 所示。

3.地形侵淤變化比較

100/5 第一次與 101/5 第二次之監測結果進行侵淤變化比較，在侵淤色階圖上搭配斷面位置如圖 3.23 所示，在堤頭北側有很明顯的淤積，高程淤積最大量約為 9.7m，在 W2 斷面圖 3.15 與 W6 斷面圖 3.19 亦可見其高程之變化；而在堤頭附近有明顯之侵蝕情形，高程侵蝕最大量約為 6.44m，在 W3 斷面圖 3.16 、W7 斷面圖 3.20 與 W8 斷面圖 3.21 亦可見其高程之變化。在堤頭附近有較明顯之侵淤趨勢外，其餘侵淤情形並不明顯，整體而言 101/5 較 100/5 淤積約 775,594m^3，平均淤積高程約為 32cm。

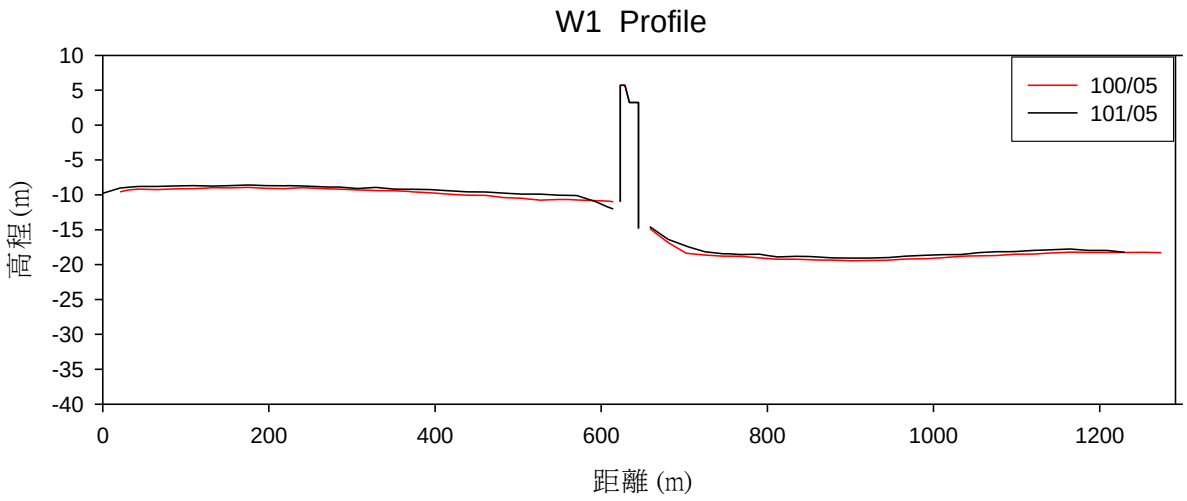


圖 3.14 臺中港堤頭地形測量斷面 W1 水深剖面變化圖

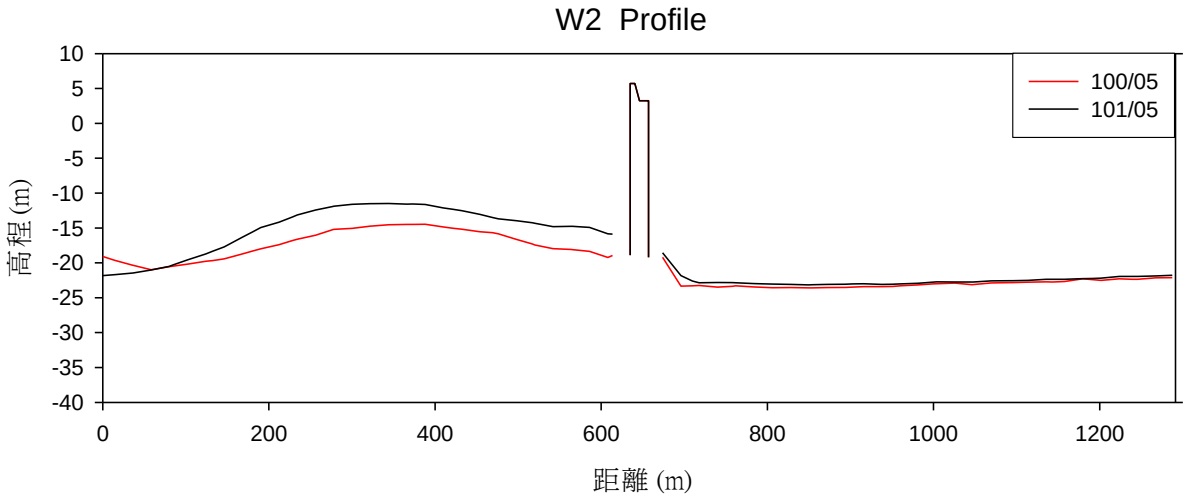


圖 3.15 臺中港堤頭地形測量斷面 W2 水深剖面變化圖

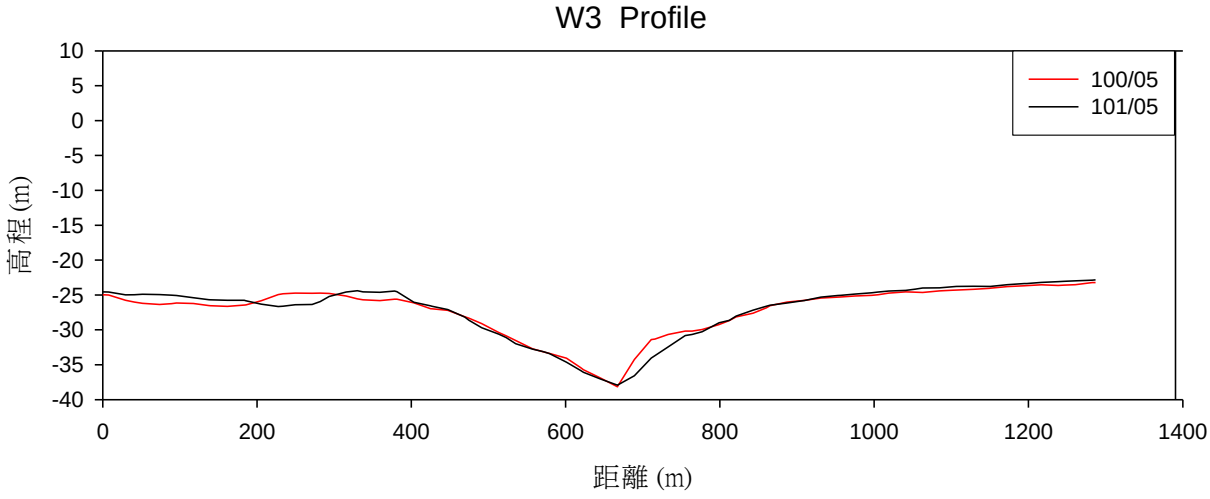


圖 3.16 臺中港堤頭地形測量斷面 W3 水深剖面變化圖

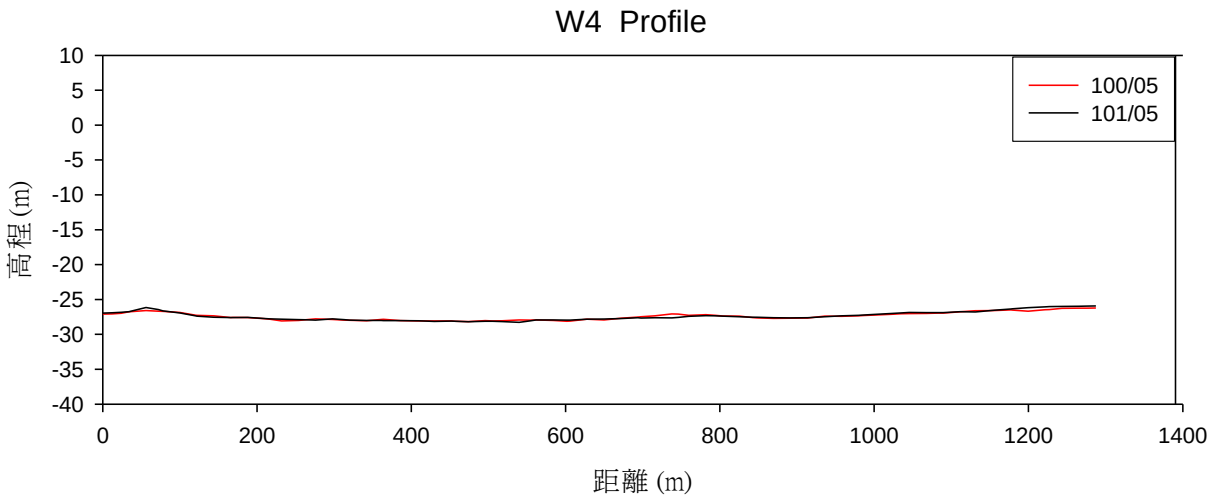


圖 3.17 臺中港堤頭地形測量斷面W4水深剖面變化圖

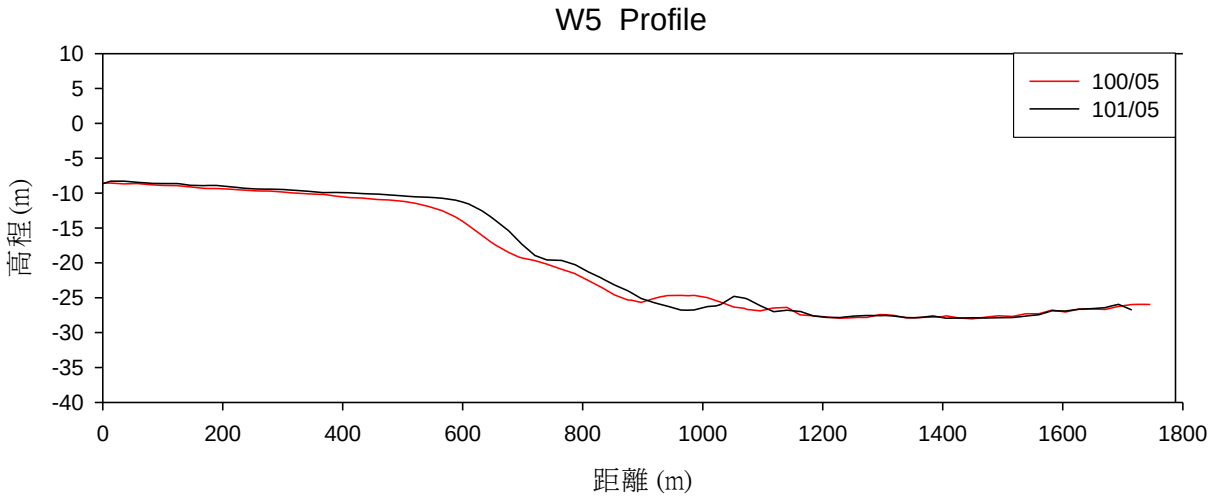


圖 3.18 臺中港堤頭地形測量斷面W5水深剖面變化圖

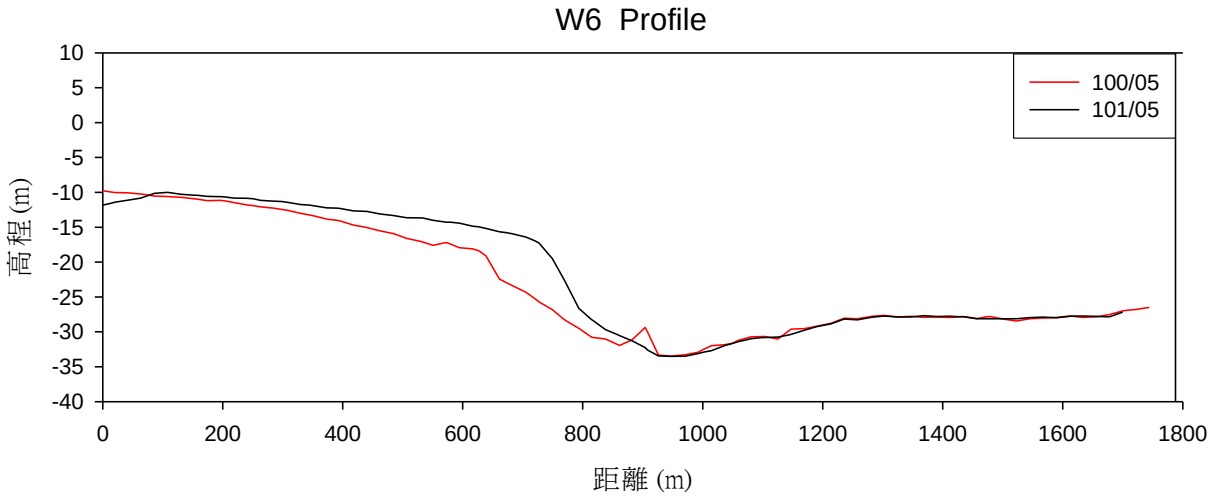


圖 3.19 臺中港堤頭地形測量斷面W6水深剖面變化圖

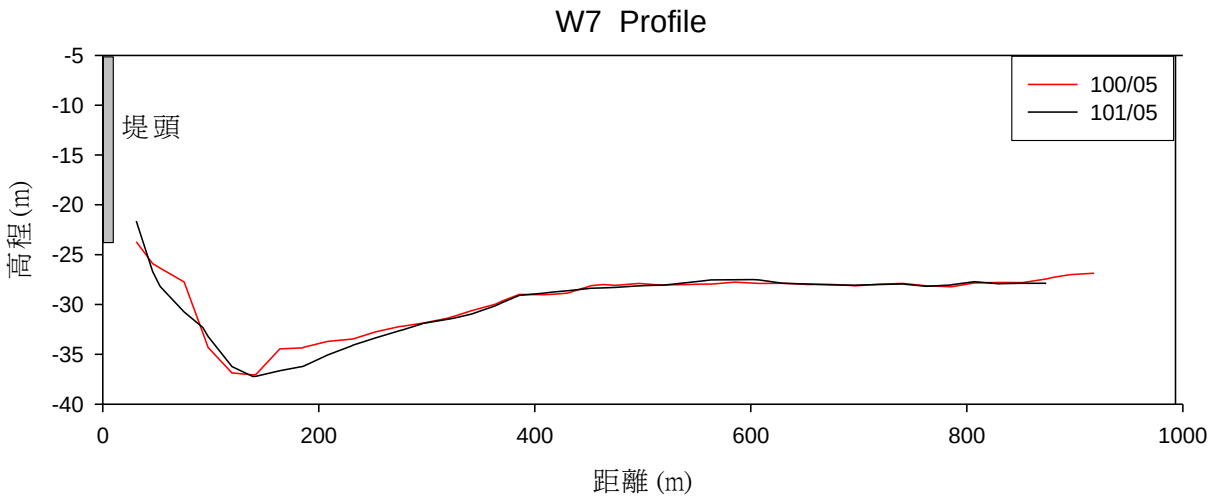


圖 3.20 臺中港堤頭地形測量斷面W7水深剖面變化圖

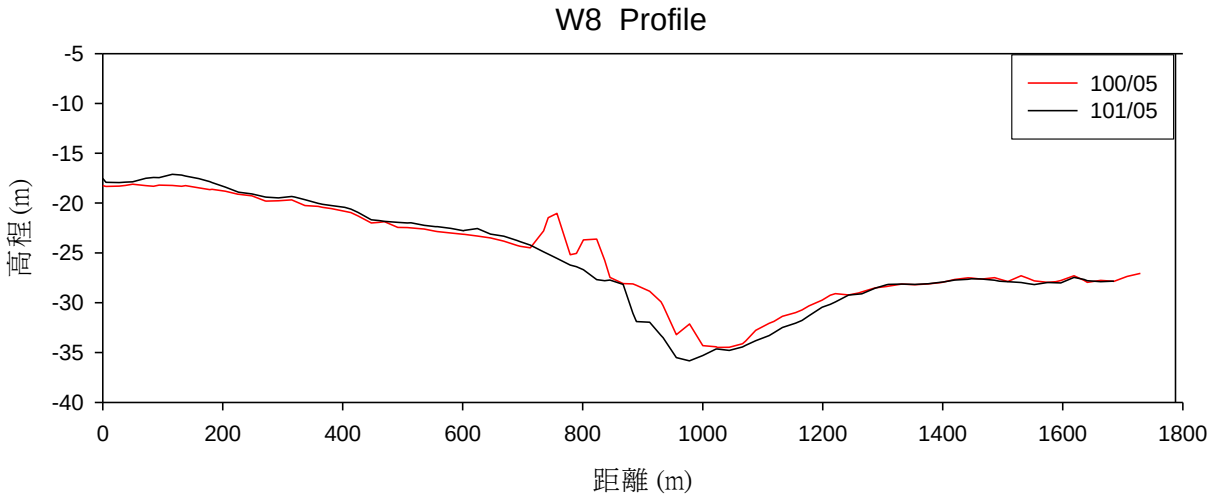


圖 3.21 臺中港堤頭地形測量斷面W8水深剖面變化圖

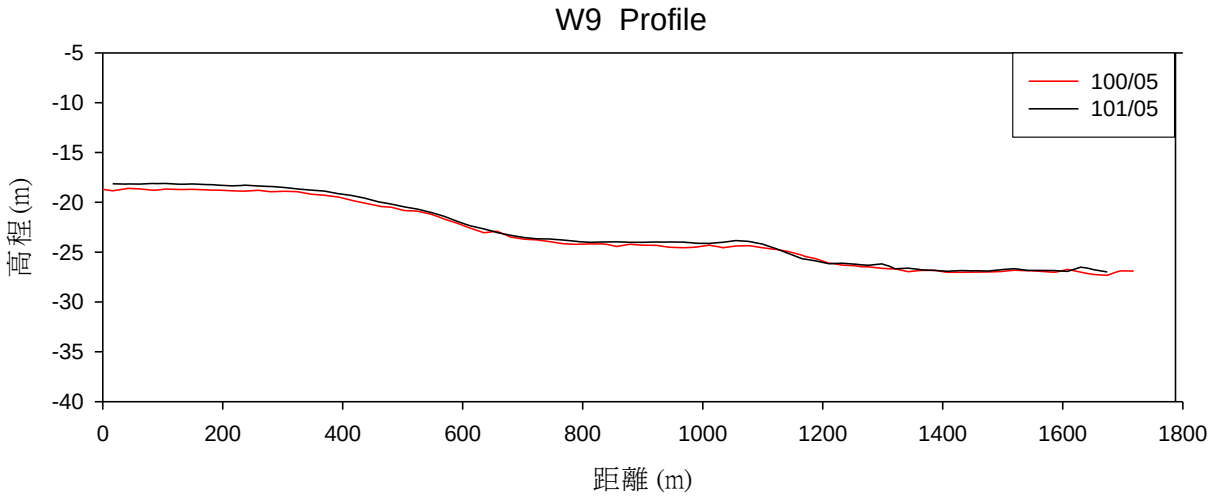


圖 3.22 臺中港堤頭地形測量斷面W9水深剖面變化圖

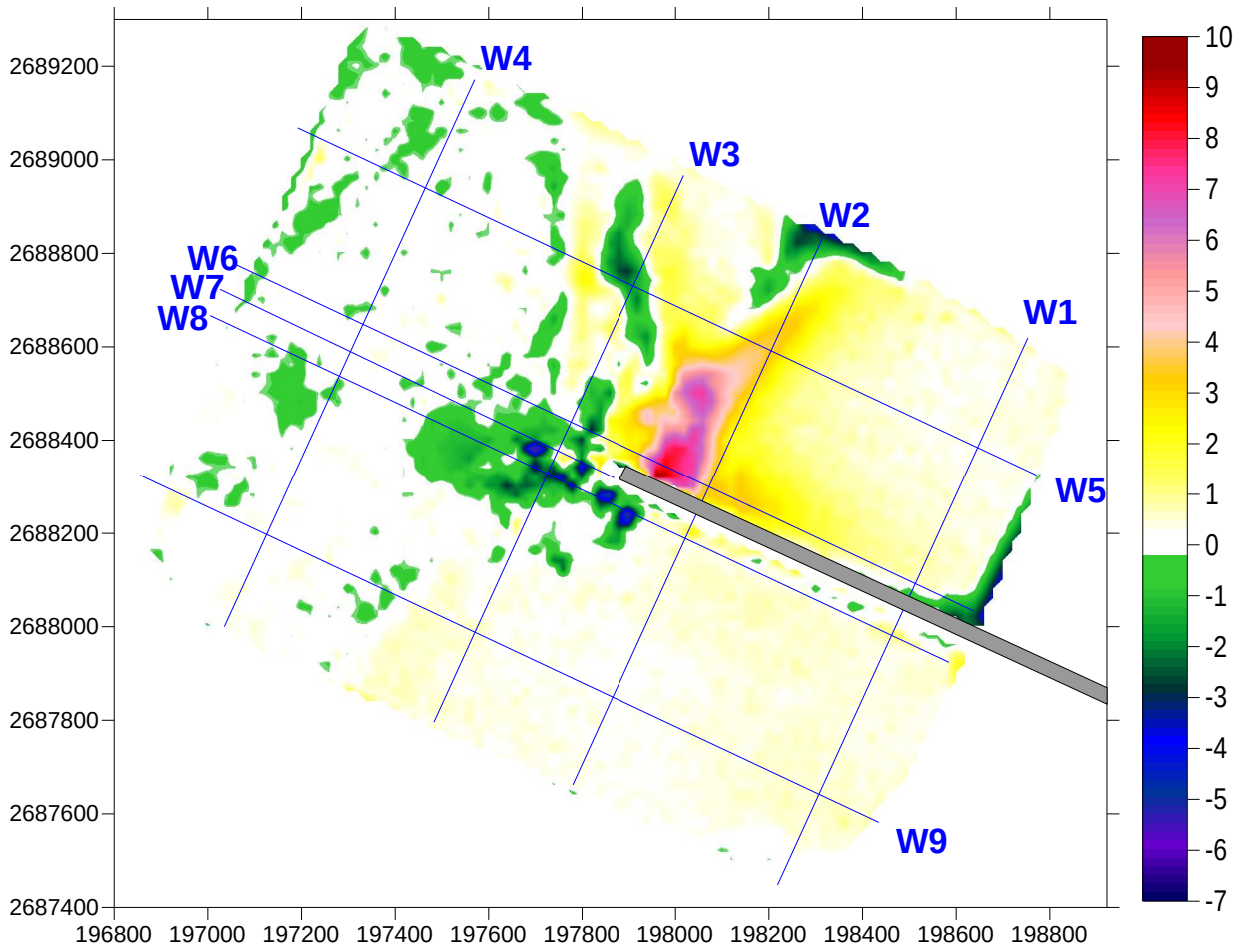
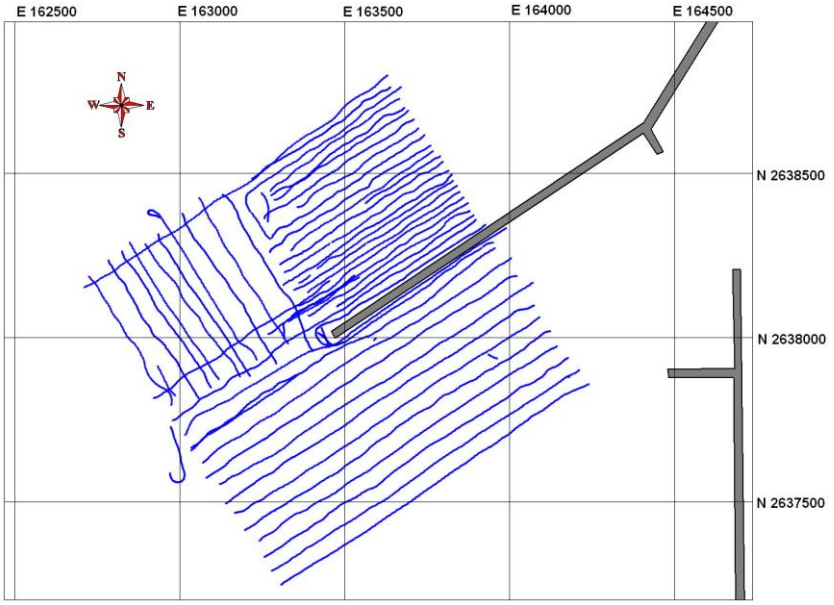


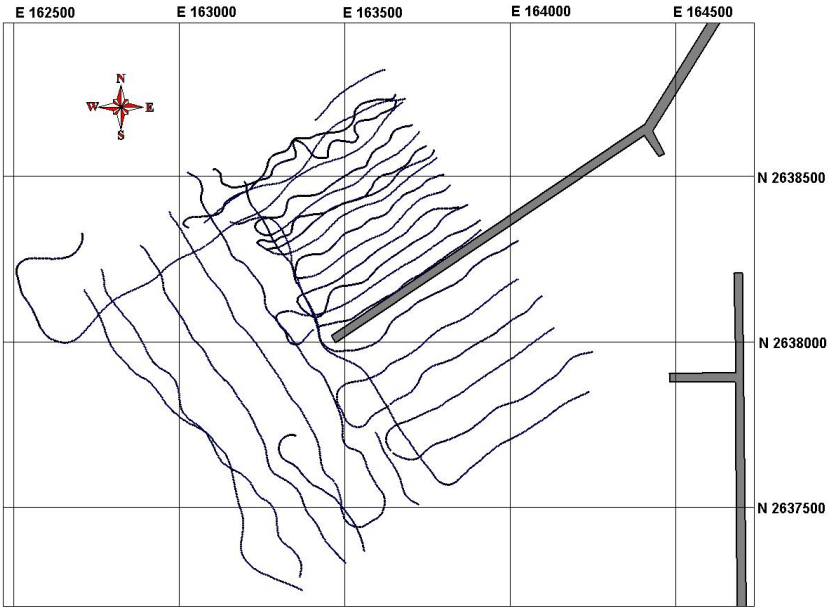
圖 3.23 臺中港堤頭地形測量 100/5~101/5 侵淤變化色階圖

3.2.2 麥寮工業港北防波堤

實測之軌跡路線圖如圖 3.24 ，取網格製成等深線及水深色階圖如圖 3.25 與圖 3.26 所示，本海域係以多音束測深儀進行測量，堤頭附近之消波塊成像相當明顯，消波塊成像如圖 3.27 所示，海域地形三維立體圖如圖 3.28 所示。

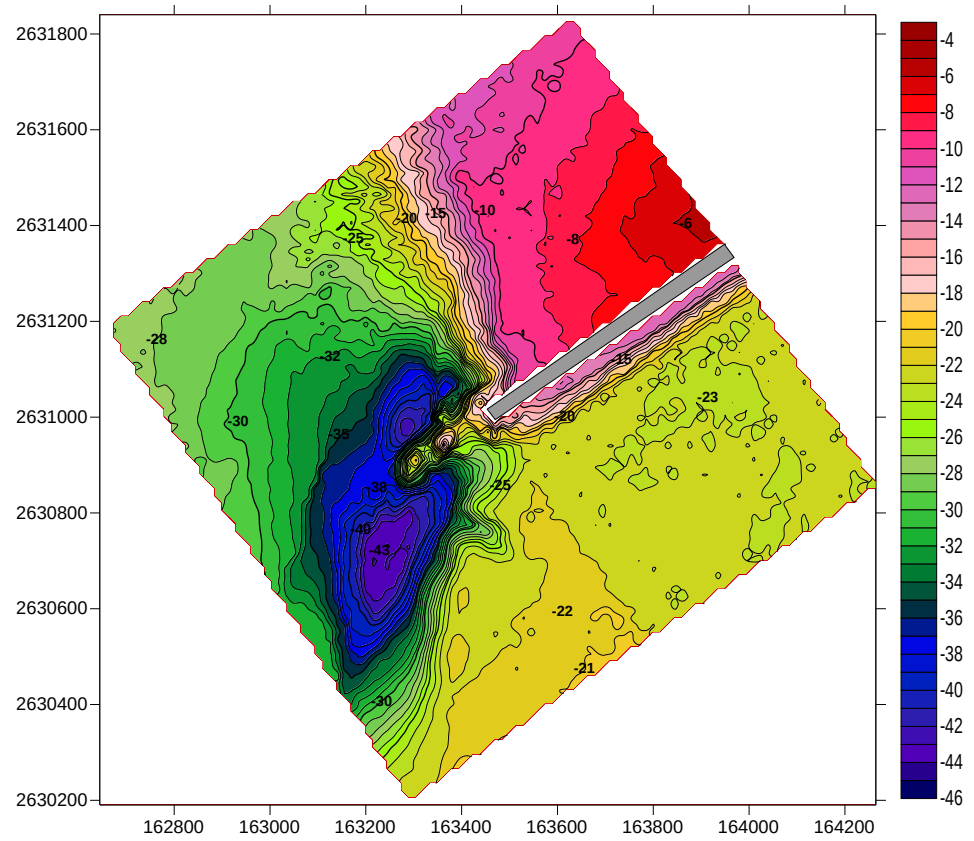


第一次 100/6/9

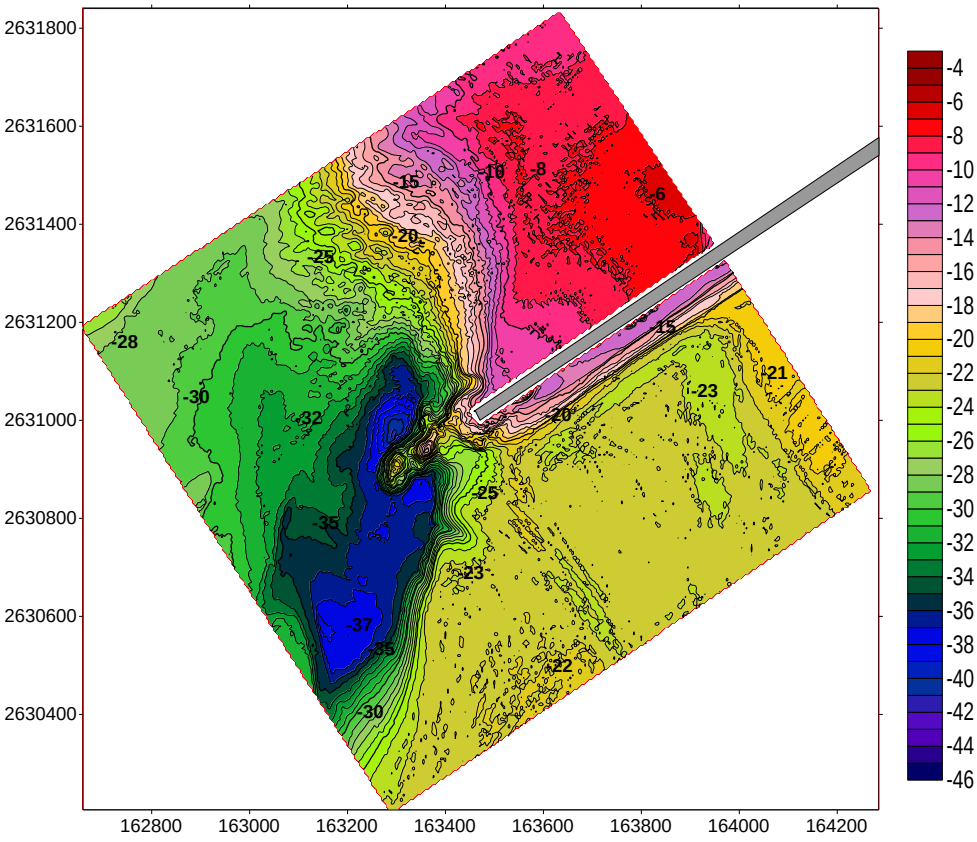


第二次 100/5/8

圖 3.24 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量航跡點

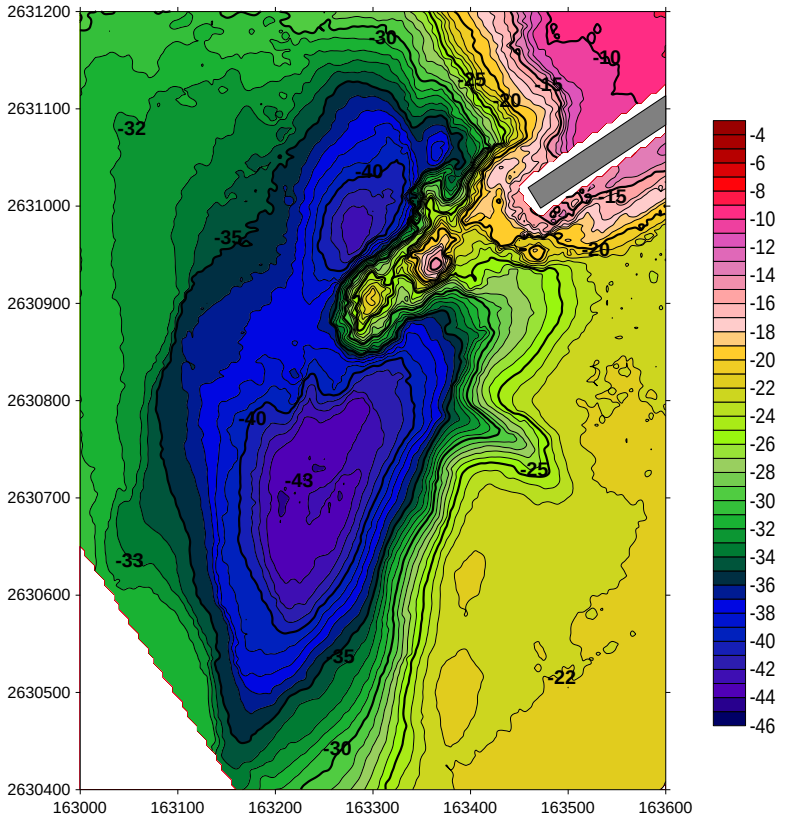


第一次 100/6/9

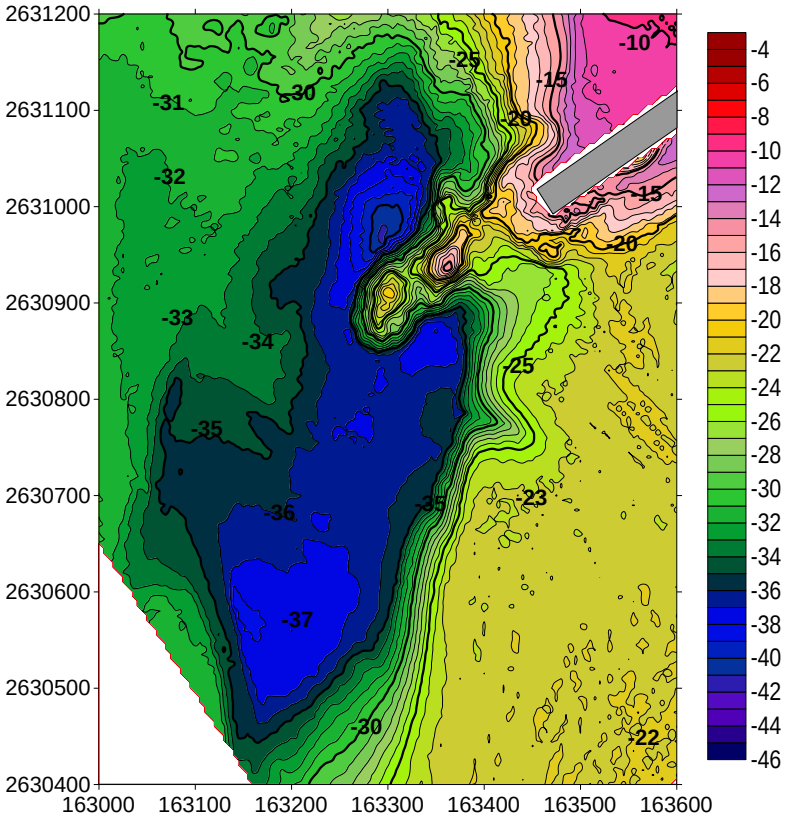


第二次 101/5/8

圖 3.25 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖

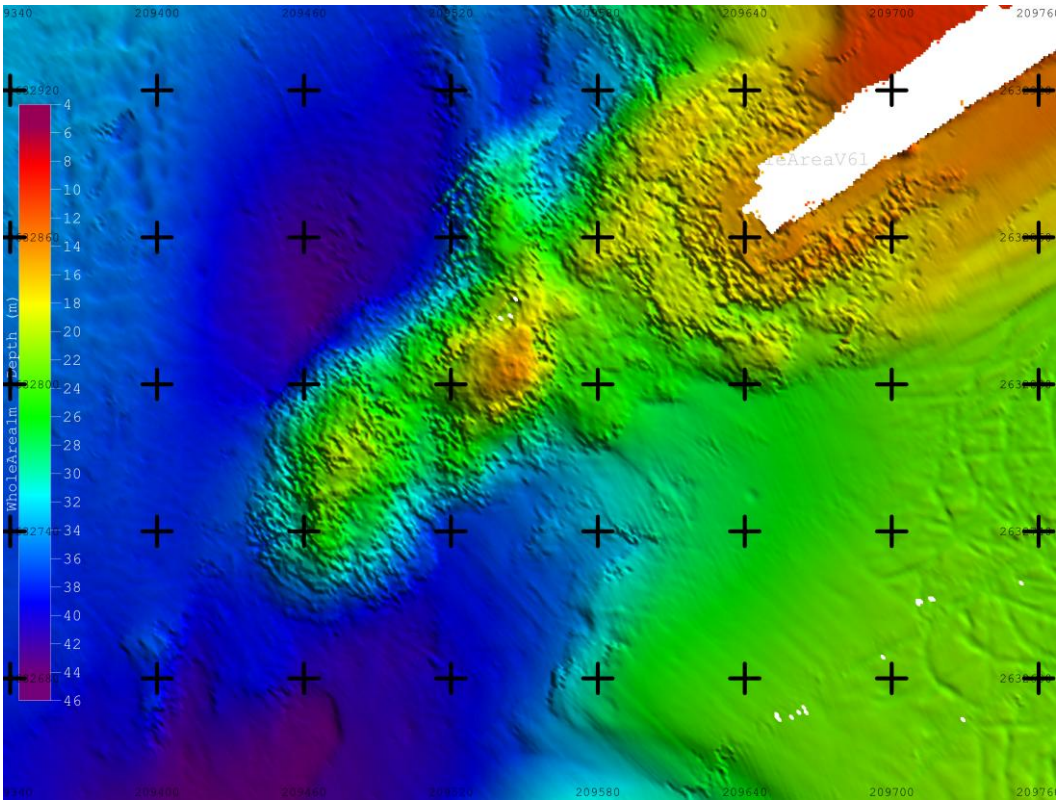


第一次 100/6/9

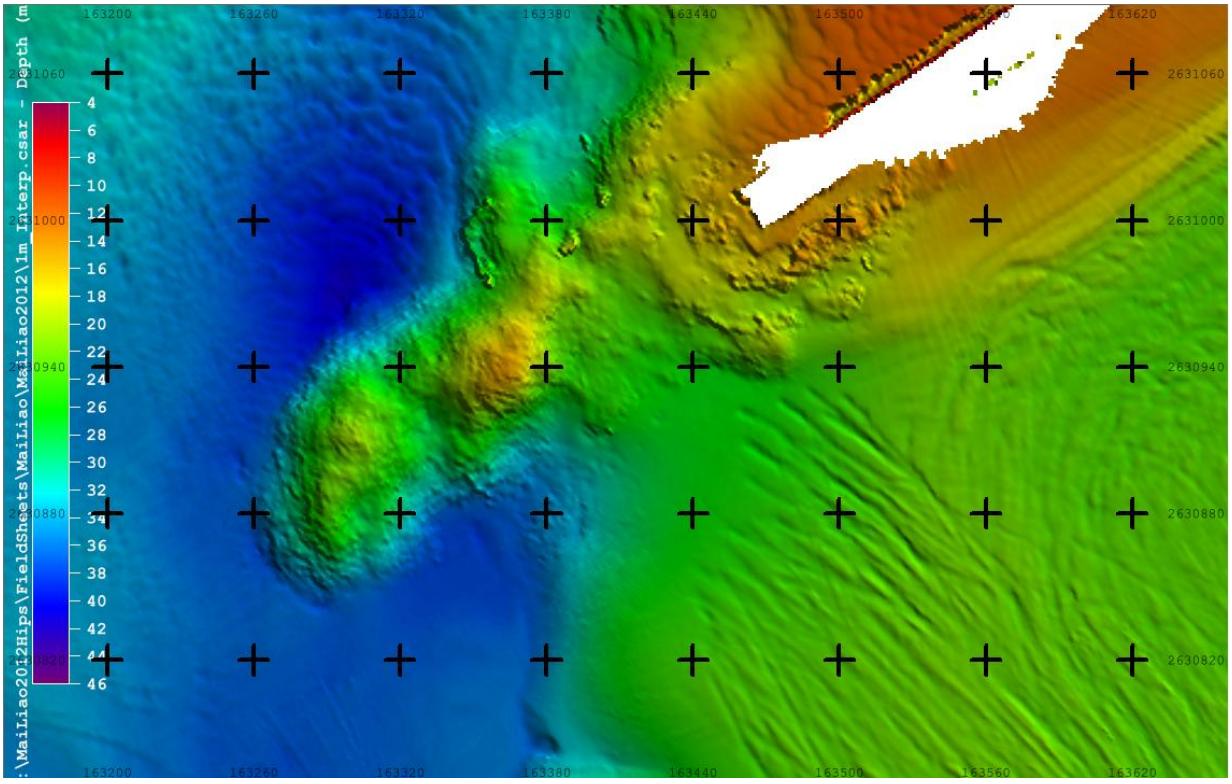


第二次 101/5/8

圖 3.26 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量等深線水深色階圖(局部放大)

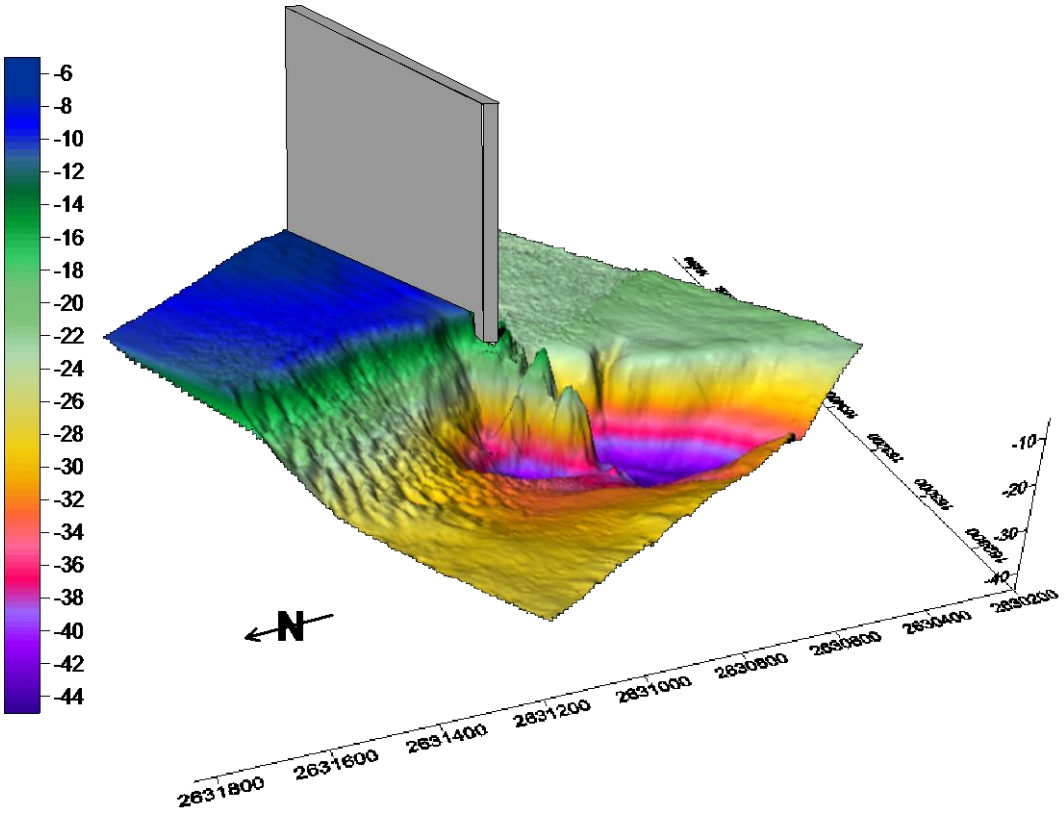


第一次 100/6/9

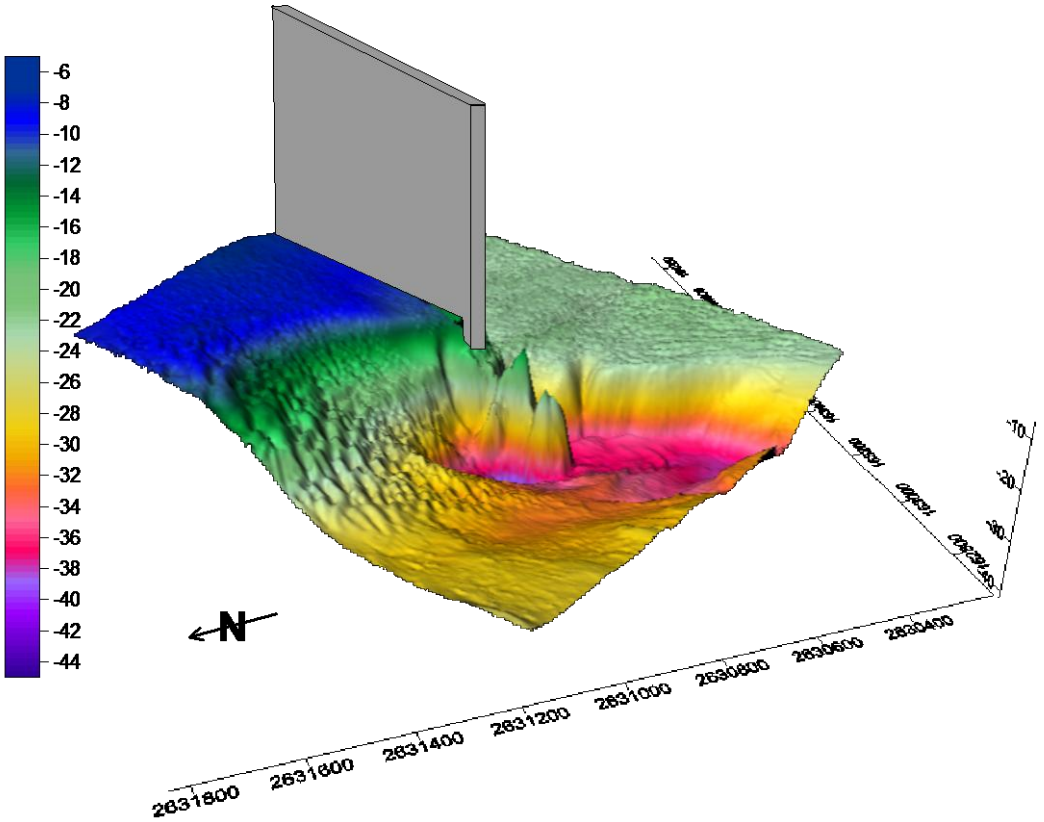


第二次 101/5/8

圖 3.27 麥寮工業港北防波堤堤頭附近消波塊布置水深色階圖(局部放大)

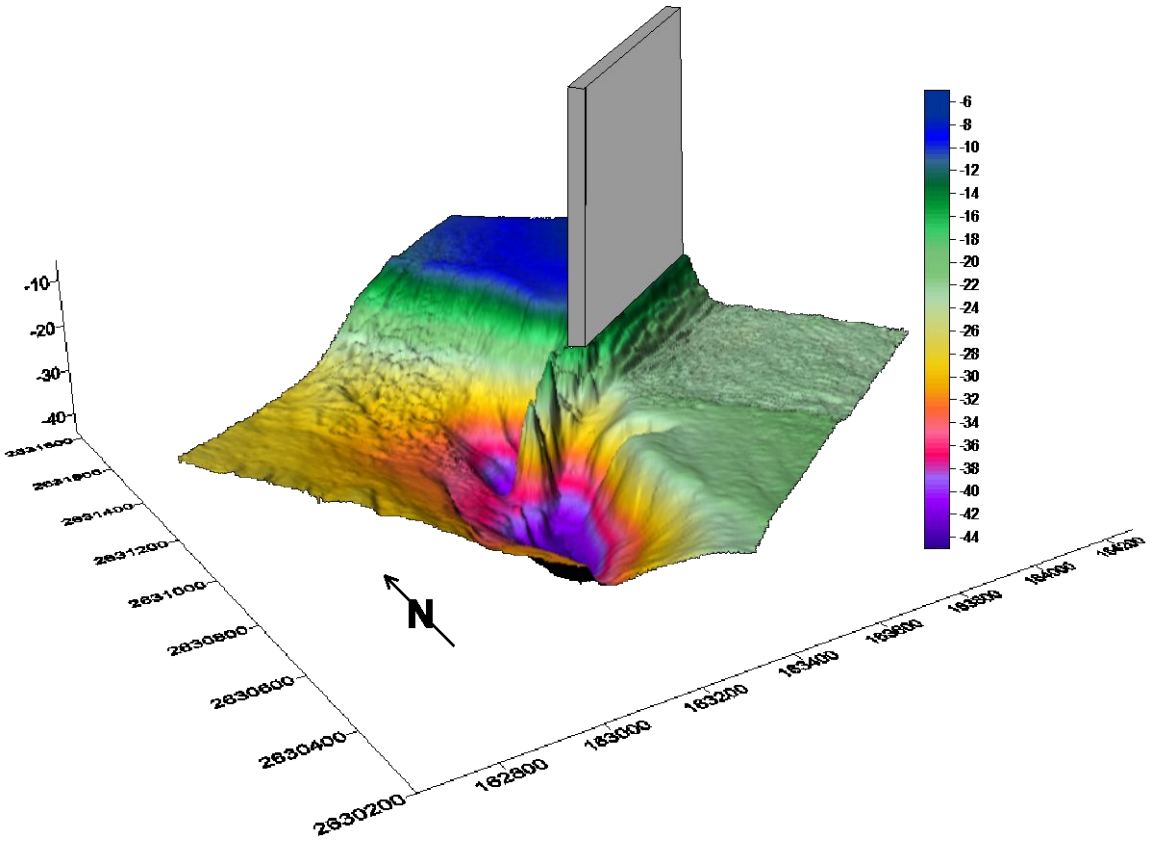


第一次 100/6/9

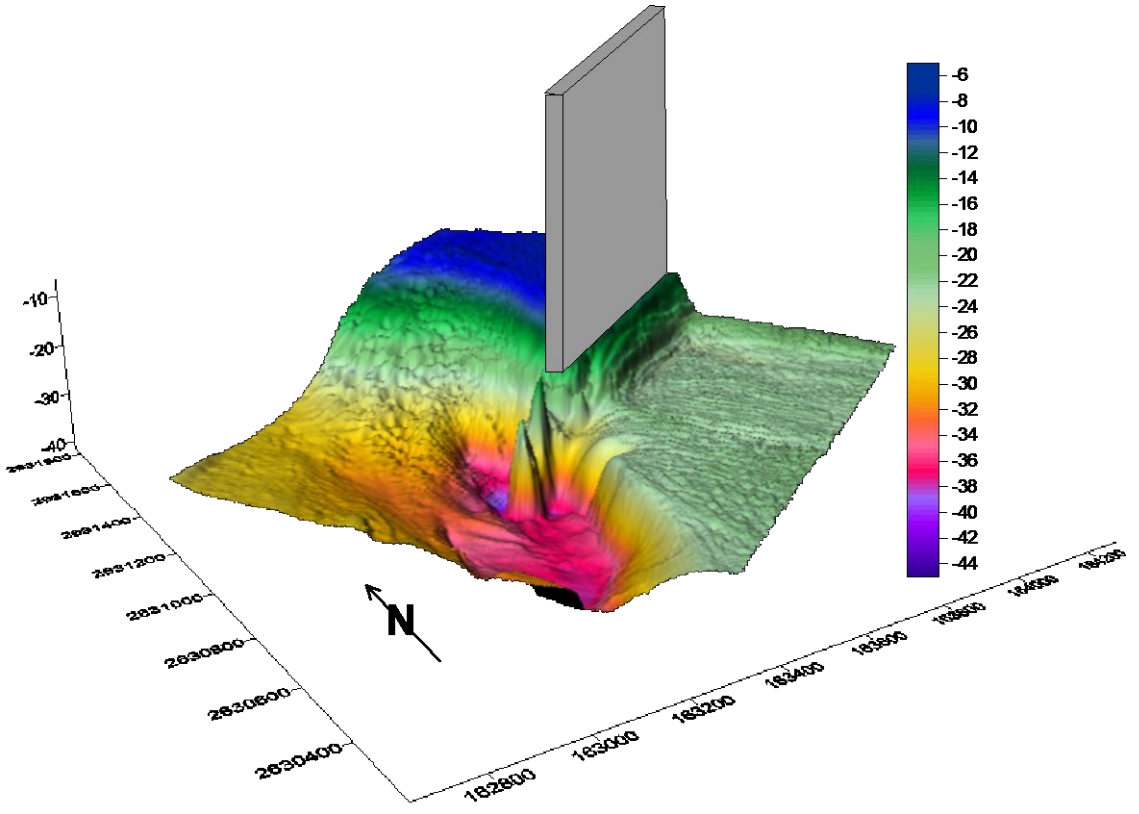


第二次 101/5/8

圖 3.28(a) 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖



第一次 100/6/9



第二次 101/5/8

圖 3.28(b) 麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量三維立體色階圖

依地形變化特性擷取測量海域計 9 條之斷面水深資料，其中 M1 至 M4 為垂直海堤之斷面， M5 至 M9 為平行海堤之斷面。斷面 M1 與 M2 主要在呈現麥寮工業港北堤堤北外海區域與堤南港域內之地形落差變化。斷面 M3 則呈現測區南北向經過掏刷最深區域之水深變化； M6 與 M8 為平行鄰近北堤北側與南測之斷面，主要呈現海堤側邊之水深變化；斷面 M7 為由堤頭開始經過掏刷最深區域之水深變化。另以堤頭為原點，再擷取 6 條測量海域向不同角度各方向散射之斷面水深資料，相鄰斷面夾角約為 45 度，斷面編號為 R1 ~ R6。

各斷面位置資料如表 3.6 所示，斷面位置如圖 3.29 所示，各斷面歷次監測之水深變化比較如圖 3.30 至圖 3.44 所示。。

表 3.6　麥寮工業港斷面位置坐標

斷面編號	起點坐標(m)		終點坐標(m)		斷面距離(m)
	N	E	N	E	
M1	2631675	163491	2630772	164110	1100
M2	2631524	163264	2630621	163883	1100
M3	2631376	163031	2630473	163650	1100
M4	2631240	162832	2630337	163451	1100
M5	2631520	163786	2630905	162878	1100
M6	2631362	163890	2630748	162982	1100
M7	2631005	163468	2630706	163007	550
M8	2631269	163948	2630655	163040	1100
M9	2631130	164041	2630515	163133	1100
R1	2631000	163450	2631070	162904	550
R2	2631000	163450	2631454	163138	550
R3	2631000	163450	2631456	163517	550
R4	2631000	163450	2630931	163994	550
R5	2631000	163450	2630546	163760	550
R6	2631000	163450	2630454	163380	550

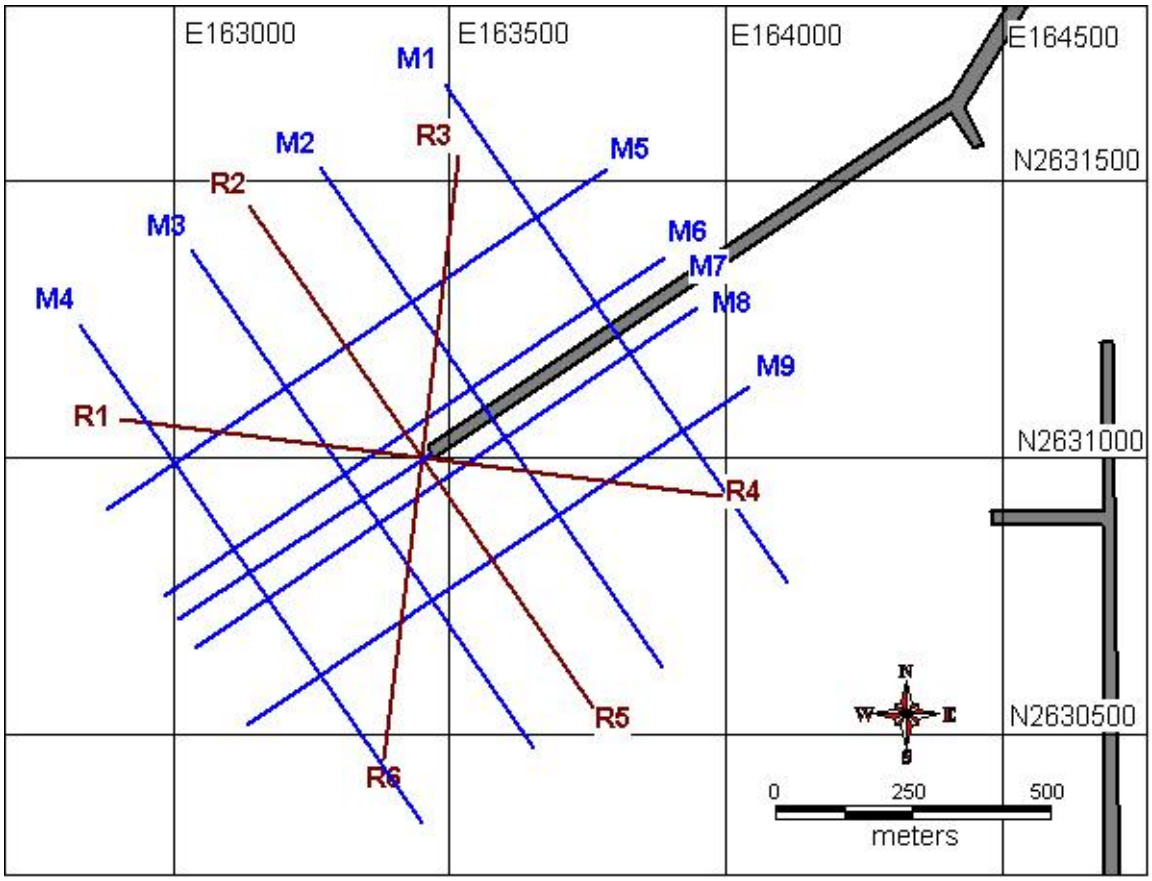


圖 3.29 麥寮工業港堤頭水深測量斷面位置圖

1.第一次麥寮工業港北堤水深測量

由於消波塊群最遠佈置位置離堤頭約 230m ，並形成約 100m 之帶寬，因此掏刷區受消波塊之分布影響，形成一 U 字形之刷深區域，消波塊群北側掏刷最深約 -42m，南側則約 -44m。

麥寮工業港北堤水深測量區域所測得水深最淺約為 -6m ，堤頭附近濤刷最深處水深約 -45m ，等深線於堤身北側港域外大致呈現垂直海堤方向分布，堤身南側港域內則以平行海堤方向分布為主，堤頭附近因為波浪反射之濤刷而形成輻射狀之等深線分布，濤刷最深處位於堤頭向外海西南方延伸約 400m 處；堤頭西方約 180m 處亦有刷深現象，最深處約 -42m，如圖 3.25 與圖 3.26 所示。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 8 ~ 10m 。透過三維影像，如圖 3.28 所示，呈現本測量海域地形變化之特性。

斷面 M1：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 400m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -7.1m ~ -23.8m 之間；港域外距斷面起點至 510m 處之高程約在 -10.8m ~ -7.3m 間，坡降約為 0.7/100，堤址附近高程較外海為高，坡降變化不明顯；港域內距斷面起點 590m ~ 640m 接近堤址處則有刷深之情形，地形較為陡降，高程約在 -14.2m ~ -22m 間，坡降約為 16.9/100；距斷面起點 650m 之後高程約在 -22.5m ~ -23.8m 間，除堤址附近外，港域內坡降平緩，高程落差不明顯。本斷面地形高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.30 所示。

斷面 M2：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 120m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -9.6m ~ -23.2m 之間；港域外距斷面起點至 360m 處，高程約在 -17.7m ~ -11.3m 間，坡降約為 1.8/100；斷面位置約 520m 鄰近堤址處有淤積情形，高程約 -10.1m；港域內堤址至斷面位置約 640m 間之高程約在 -13.1m ~ -22.1m 間，地形較為陡降，坡降約為 14.5/100；斷面位置約 640m 之後高程約在 -22.1m ~ -23.2m 間，除堤址附近外，港域內坡降平緩，高程落差不明顯。本斷面在堤防北側港域外地形高程高於堤防南側港域內區域，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.31 所示。

斷面 M3：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 150m 處，展現垂直堤防方向斷面之堤頭消波塊布置水深高差變化，本斷面水深變化約在 -22.7m ~ -42.3m 之間；距斷面起點 130m ~ 330m 處，高程約在 -29.1m ~ -33.2m 間，坡降約為 2.1/100；消波塊群約位於斷面 470m ~ 590m 之間，消波塊群高程最高處約為 -22.7m，北側掏刷最深處約為 -42.3m，期間坡降約為 7.3/100，高程差約 19.6m；於消波塊群南側斷面 700m 處形成潛坵，高程約 -25.5m；斷面起點 800m ~ 1100m 處，高程約在 -24.2m ~ -21.1m 間，坡降約為 1.1/100。本斷面在消波塊群北側刷深至 -42.3m，南側刷深至 -35.7m，以堤防港域內在潛坵之後坡降較為平

緩，形成掏刷區外北低南高之地形變化。水深剖面變化如圖 3.32 所示。

斷面 M4：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 400m 處，主要了解堤頭掏刷區域之水深剖面變化，本斷面水深變化約在 -21.4m ~ -44.1m 之間；距斷面起點 660m 處為掏刷最深之處，高程約 -44.1m，該斷面於刷深點北側約 200m 與南側約 220m 附近為明顯刷深區域，坡降約在 5.2/100 ~ 8.2/100 間；斷面起點至 460m 處，高程約在 -28.2m ~ -33.2m 間，坡降約為 1.1/100；南側斷面起點 900m ~ 1100m 處水深值表現約在 -23m ~ -21.4m 之間，坡降約為 0.9/100。本斷面除刷深區域外，坡降大至平緩，並形成掏刷區外北低南高之地形變化，水深剖面變化如圖 3.33 所示。

斷面 M5：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 250m 處，展現港域外平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -7.1m ~ -33.4m 之間；斷面起點至 380m 處之高程約在 -7.1m ~ -10.4m 間，坡降約為 0.87/100；距斷面起點 380m ~ 740m 之高程約在 -10.4m ~ -33.4m 間，坡降約為 6.4/100 ，斷面變化陡峭；距斷面起點 740m ~ 1100m 處之高程約在 -33.4m ~ -29m 間，坡降約為 1.3/100，斷面變化較為平緩。本斷面平行堤防，明顯刷深區域高差可達約 23m，水深剖面變化如圖 3.34 所示。

斷面 M6：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域外堤身附近之水深高差變化，其斷面變化趨勢與 M5 相似，本斷面水深變化約在 -6.1m ~ -41.7m 之間；距斷面起點至 460m 之高程約在 -6.1m ~ -11.1m 間，坡降約為 0.66/100；距斷面起點 460m ~ 860m 之高程約在 -11.6m ~ -41.7m 間，坡降約 10.9/100 ，斷面變化陡峭，其中消波塊群約位於斷面起點 610m ~ 700m 處，消波塊最高高程約為 -24.1m，近岸端高程差約 9.1m，與外海端刷深區高差則可達約 17.6m；距斷面起點 740m ~ 1100m ，高程變化在 -41.7m ~ -30.1m 間，坡降約為 3.3/100 ，坡降較近岸端陡峭。本斷面平行堤防，明顯刷深區域高差可達

約 30.6m，水深剖面變化如圖 3.35 所示。

斷面 M7：平行堤身，垂直堤頭往外海延伸方向，展現堤頭掏刷區域附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.1m ~ -38.2m 之間；堤頭附近水深約 -15.1m ，距斷面起點（堤頭） 280m 為本斷面最深處，高程為 -38.2m；由圖 3.25 至圖 3.28 可明顯看出堤頭附近消波塊群之分布情形，消波塊約略分為三群，堤頭附近至距外海 70m 處形成 U 字行塊群，第二塊群距離堤頭約 90m ~ 150m 處，第三塊群距離堤頭約 160m ~ 230m 處。第二塊群由堤頭起算自水深 -22.5m 處隆起至 -14.5m 高，再下降至 -27.3m，第三塊群則由水深 -27.3m 處隆起至 -21.4m 高，再下降至 -38.2m；距斷面起點 250m ~ 390m 間，高程約在 -36.9m ~ -38.1m 間，坡降約 0.86/100，靠外海處距斷面起點 400m ~ 550m 間，高程約在 -36.9m ~ -30.7m 間，坡降約 4.6/100，往外海方向高程逐漸增加。本斷面表現出消波塊於堤頭附近佈置之狀況，顯示在第三消波塊群外有刷深之情形，水深剖面變化如圖 3.36 所示。

斷面 M8：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 50m 處，展現港域內堤身附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -14.8m ~ -42.9m 之間；距斷面起點至 500m 處，高程變化在 -14.8m ~ -16.8m 間，坡降約為 0.3/100；距斷面起點 500m ~ 870m 處，高程變化在 -16.8m ~ -42.9m 間，坡降約為 7/100 ，掏刷區域最大高程落差約為 26.1m；距斷面起點 870m ~ 1100m 處，高程變化在 -42.9m ~ -33m 間，坡降約為 4.3/100。本斷面在堤防南側港域內水深變化不大，而於消波塊外有刷深之情形，水深剖面變化如圖 3.37 所示。

斷面 M9：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 220m 處，展現港域內平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -21.8m ~ -41.2m 之間，斷面表現與 M8 相似；距斷面起點至 660m 處，高程約在 -21.8m ~ -23.5m 間，坡降約為 0.2/100；距斷面起點 660m ~ 970m 處，高程變化在 -22.8m ~ -41.2m 間，坡降約為 9.1/100 ，斷面變化陡峭，掏刷區域

最大高程落差約為 18.4m；距斷面起點 970m ~ 1100m 間之高程約在 -41.2m ~ -32.9m 間，坡降約為 8.3/100。本斷面在堤防南側港域內水深變化不大，水深剖面變化如圖 3.38 所示。

斷面 R1：位於堤頭延伸外海方向順時針約 45 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.7m ~ -41.0m 之間；距斷面起點至 136m 處之高程約在 -15.9m ~ -41.0m 間，坡降約為 18.5/100，此斷面經過保護堤頭之消波塊群，外圍消波塊群自 -31.5m 處隆起至 -26.5m 高，再刷深至 -41.0m 深，而後海床坡度緩緩上升，坡降約為 2.8/100。本斷面地形高程由刷深處向外海(西)形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.39 所示。

斷面 R2：位於堤頭延伸外海方向順時針約 90 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.7m ~ -33.1m 之間；距斷面起點 44m 至 79m 處有刷深情形，高程由 -17.4m 下降至 -32.7m，坡降約為 44/100，而後海床坡度緩緩上升，坡降約為 1.6/100。本斷面地形高程由刷深處向外海(西北)形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.40 所示。

斷面 R3：位於堤頭延伸外海方向順時針約 135 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面方向為向近岸端，水深變化約在 -9.0m ~ -19.4m 之間；距斷面起點 80m 處略有刷深情形，最大坡降約為 11.1/100，高程由 -19.4m 上升至 -11.5m，而後海床坡度平緩，坡降約為 0.45/100。本斷面地形高程由刷深處向近岸端形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.41 所示。

斷面 R4：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 135 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -13.7m ~ -23.3m 之間；斷面坡降較為平緩，約在 1.1/100 ~ 2.3/100 之間。本斷面由堤頭約略向往東向南堤之方向，地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.42 所示。

斷面 R5：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 90 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.2m ~ -24.5m 之間；本斷面後段坡降表現與 R4 接近，距斷面起點 36m～80m 處略有刷深情形，高程約在 -15.2m～-24.5m 間，坡降約為 15.2/100，後段坡降則約為 0.3/100。本斷面由堤頭約略往東南方向，地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.43 所示。

斷面 R6：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 45 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.9m ~ -30.9m 之間；距斷面起點至 100m 處之高程約在 -15.9m ~ -28.1m 間，坡降約為 12.1/100，而後略有隆起至高程 -25.3m，坡降約為 3.0/100，由此處開始至距斷面起點 235m 處刷深至 -30.9m，再於距起點約 270m 處後海床坡度趨緩，後段坡降則約為 0.9/100。本斷面由堤頭約略往南方向，除堤頭附近與刷深區外地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.44 所示。

2.第二次麥寮工業港北堤水深測量

由於消波塊群最遠佈置位置離堤頭約 230m ，並形成約 100m 之帶寬，因此掏刷區受消波塊之分布影響，形成一 U 字形之刷深區域，消波塊群北側掏刷最深約 -44m，南側則約 -37m。

麥寮工業港北堤水深測量區域所測得水深最淺約為 -4m，堤頭附近濤刷最深處水深約 -44m ，等深線於堤身北側港域外大致呈現垂直海堤方向分布，堤身南側港域內則以平行海堤方向分布為主，堤頭附近因為波浪反射之濤刷而形成輻射狀之等深線分布，濤刷最深處位於堤頭向外海西方延伸約 170m 處；堤頭西方約 180m 處亦有刷深現象，最深處約 -37m，如圖 3.25 與圖 3.26 所示。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 8～10m 。透過三維影像，如圖 3.28 所示，呈現本測量海域地形變化之特性。

斷面 M1：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 400m 處，展現

堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -7.4m ~ -23.9m 之間；港域外距斷面起點至 510m 處之高程約在 -7.4m ~ -9m 間，坡降約為 0.3/100，堤址附近高程較外海略高，坡降變化不明顯；港域內距斷面起點 590m ~ 640m 接近堤址處則有刷深之情形，地形較為陡降，高程約在 -12.8m ~ -22.9m 間，坡降約為 21.3/100；距斷面起點 650m 之後高程約在 -22.2m ~ -23.9m 間，除堤址附近外，港域內坡降平緩，高程落差不明顯。本斷面地形高程堤防北側港域外高於堤防南側港域內，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.30 所示。

斷面 M2：於堤頭東側垂直堤身方向，距離堤頭約 120m 處，展現堤防內外之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -10.5m ~ -23.5m 之間；港域外距斷面起點至 200m 處，高程約在 -14.1m ~ -19.4m 間，坡降約為 3.1/100；距斷面起點至 200m ~ 420m 處，高程約在 -11.2m ~ -14.1m 間，坡降約為 1.3/100；斷面位置約 570m 鄰近堤址處有淤積情形，高程約 -12.7m；港域內堤址至斷面位置約 620m 間之高程約在 -12.7m ~ -17.7m 間，地形較為陡降，坡降約為 10.9/100；斷面位置約 650m 之後高程約在 -22.1m ~ -23.8m 間，除堤址附近外，港域內坡降平緩，高程落差不明顯。本斷面在堤防北側港域外地形高程高於堤防南側港域內區域，形成外(北)高內(南)低之地形變化，水深剖面變化如圖 3.31 所示。

斷面 M3：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 150m 處，展現垂直堤防方向斷面之堤頭消波塊布置水深高差變化，本斷面水深變化約在 -21.4m ~ -40.8m 之間；距斷面起點 310m 處，高程約在 -27.1m ~ -29.5m 間，坡降約為 0.8/100；消波塊群約位於斷面 470m ~ 590m 之間，消波塊群高程最高處約為 -23m，北側掏刷最深處約為 -40.8m，期間坡降約為 7.0/100，高程差約 17.8m；於消波塊群南側斷面 700m 處形成潛坵，高程約 -25.0m；斷面起點 810m ~ 1100m 處，高程約在 -22.7m ~ -21.4m 間，坡降相當平緩。本斷面在消波塊群北側刷深至 -40.8m，南側刷深至 -35.9m，以堤防港域內在潛坵之後坡降較為平緩，形成掏刷區外

北低南高之地形變化。水深剖面變化如圖 3.32 所示。

斷面 M4：於堤頭西側垂直堤身方向，距離堤頭外約 400m 處，主要了解堤頭掏刷區域之水深剖面變化，本斷面水深變化約在 -22.0m ~ -37.3m 之間；距斷面起點 720m 為最深之處，高程約 -37.3m，坡降約為 1.2/100 ；斷面 780m ~ 870m 處，高程約在 -27.5m ~ -37.0m 間，坡降約為 10/100；南側斷面起點 920m ~ 1100m 處水深值表現約在 -22.2m ~ -23.0m 之間，坡降約為 0.5/100。本斷面除刷深區域外，坡降大至平緩，並形成掏刷區外北低南高之地形變化，水深剖面變化如圖 3.33 所示。

斷面 M5：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 250m 處，展現港域外平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -7.1m ~ -32.3m 之間；斷面起點至 380m 處之高程約在 -7.1m ~ -10.4m 間，坡降約為 0.87/100；距斷面起點 290m ~ 580m 之高程約在 -8.9m ~ -29.7m 間，坡降約為 7.1/100 ，斷面變化陡峭；距斷面起點 600m ~ 1100m 處之高程約在 -29.4m ~ -32.3m 間，坡降約為 0.8/100 ~ 1.5/100 之間，斷面變化較為平緩。本斷面平行堤防，明顯刷深區域高差可達約 21m，水深剖面變化如圖 3.34 所示。

斷面 M6：於堤頭北側平行堤身方向，距離堤身約 60m 處，展現港域外堤身附近之水深高差變化，其斷面變化趨勢與 M5 相似，本斷面水深變化約在 -7.0m ~ -40.6m 之間；距斷面起點至 460m 之高程約在 -7.3m ~ -11.3m 間，坡降約為 0.9/100；距斷面起點 460m ~ 720m 之高程約在 -11.3m ~ -40.6m 間，坡降約 11.6/100 ，斷面變化陡峭，其中消波塊群約位於斷面起點 600m ~ 700m 處，消波塊最高高程約為 -24.3m，與近岸端高程差約 13m，與外海端刷深區高差則可達約 16m；距斷面起點 740m ~ 1100m ，高程變化在 -41.7m ~ -30.1m 間，坡降約為 2.4/100 ，坡降較近岸端陡峭。本斷面平行堤防，明顯刷深區域高差可達約 30.6m，水深剖面變化如圖 3.35 所示。

斷面 M7：平行堤身，垂直堤頭往外海延伸方向，展現堤頭掏刷區域

附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -14.4m ~ -37.3m 之間；堤頭附近水深約 -15.4m ，距斷面起點（堤頭） 250m 為本斷面最深處，高程為 -37.3m；由圖 3.25 至圖 3.28 可明顯看出堤頭附近消波塊群之分布情形，消波塊約略分為三群，堤頭附近至距外海 70m 處形成 U 字行塊群，第二塊群距離堤頭約 90m ~ 160m 處，第三塊群距離堤頭約 160m ~ 250m 處。第二塊群由堤頭起算自水深 -22.9m 處隆起至 -14.4m 高，再下降至 -28.1m，第三塊群則由水深 -28.1m 處隆起至 -21.6m 高，再下降至 -37.3m；距斷面起點 250m ~ 480m 間，高程約在 -33.6m ~ -35.8m 間，坡降約 1.08/100 ~ 3.1/100 之間，靠外海處距斷面起點 480m ~ 550m 間，高程約在 -31.4m ~ -34.9m 間，坡降約 5.1/100，往外海方向高程逐漸增加。本斷面表現出消波塊於堤頭附近佈置之狀況，顯示在第三消波塊群外有刷深之情形，水深剖面變化如圖 3.36 所示。

斷面 M8：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 50m 處，展現港域內堤身附近之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -14.0m ~ -37.9m 之間；距斷面起點至 460m 處，高程變化在 -14.0m ~ -15.2m 間，坡降約為 0.2/100；距斷面起點 470m ~ 720m 處，高程變化在 -15.0m ~ -37.9m 間，坡降約為 9/100 ，掏刷區域最大高程落差約為 22.9m；距斷面起點 720m ~ 1100m 處，高程變化在 -42.9m ~ -33m 間，坡降約為 1.1/100。本斷面在堤防南側港域內水深變化不大，而於消波塊外有刷深之情形，水深剖面變化如圖 3.37 所示。

斷面 M9：於堤頭南側平行堤身方向，距離堤身約 220m 處，展現港域內平行堤防之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -20.7m ~ -38.0m 之間，斷面表現與 M8 相似；距斷面起點至 770m 處，高程約在 -20.7m ~ -23.8m 間，坡降約為 0.1/100；距斷面起點 790m ~ 880m 處，高程變化在 -22.9m ~ -35.7m 間，坡降約為 13.3/100 ，斷面變化陡峭，掏刷區域最大高程落差約為 12.8m；距斷面起點 880m ~ 1100m 間之高程約在 -35.7m ~ -37.9m 間，坡降約為 1.2/100。本斷面在堤防南側港域內水深變

化不大，水深剖面變化如圖 3.38 所示。

斷面 R1：位於堤頭延伸外海方向順時針約 45 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -16.2m ~ -39.0m 之間；距斷面起點至 115m 處之高程約在 -16.2m ~ -37.3m 間，坡降約為 18.2/100，此斷面經過保護堤頭之消波塊群，外圍消波塊群自 -28.5m 處隆起至 -25.3m 高，再刷深至 -39.0m 深，而後海床坡度緩緩上升，坡降約為 2.2/100。本斷面地形高程由刷深處向外海(西)形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.39 所示。

斷面 R2：位於堤頭延伸外海方向順時針約 90 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -16.2m ~ -31.8m 之間；距斷面起點 42m 至 70m 處有刷深情形，高程由 -17.8m 下降至 -29.3m，坡降約為 21.7/100，而後海床坡度緩緩上升，坡降約為 1.7/100。本斷面地形高程由刷深處向外海(西北)形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.40 所示。

斷面 R3：位於堤頭延伸外海方向順時針約 135 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面方向為向近岸端，水深變化約在 -9.3m ~ -19.1m 之間；距斷面起點 75m 處略有刷深情形，最大坡降約為 12.4/100；距斷面起點 110m 處高程由 -15.4m 上升至 -9.3m，海床坡度平緩，坡降約為 1.7/100。本斷面地形高程由刷深處向近岸端形成緩坡之地形變化，水深剖面變化如圖 3.41 所示。

斷面 R4：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 135 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -13.7m ~ -23.6m 之間；斷面坡降較為平緩，約在 0.14/100 ~ 5.1/100 之間。本斷面由堤頭約略向往東向南堤之方向，地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.42 所示。

斷面 R5：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 90 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.9m ~ -24.2m 之

間；本斷面後段坡降表現與 R4 接近，距斷面起點 6m ~ 78m 處略有刷深情形，高程約在 -15.9m ~ -24.2m 間，坡降約為 11.5/100，後段坡降則約為 0.2/100。本斷面由堤頭約略往東南方向，地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.43 所示。

斷面 R6：位於堤頭延伸外海方向逆時針約 45 度角，展現由堤頭向外放射出去之水深高差變化，本斷面水深變化約在 -15.7m ~ -29.0m 之間；距斷面起點至 65m 處之高程約在 -15.7m ~ -26.5m 間，坡降約為 16/100，而後略有隆起至高程 -24.4m，坡降約為 1.8/100，由此處開始至距斷面起點 226m 處刷深至 -29.0m，再於距起點約 275m 處後海床坡度趨緩，後段坡降則約為 0.3/100。本斷面由堤頭約略往南方向，除堤頭附近與刷深區外地形高程變化平緩，水深剖面變化如圖 3.44 所示。

3.地形侵淤變化比較

100/6 第一次與 101/5 第二次之監測結果進行侵淤變化比較，在侵淤色階圖上搭配斷面位置如圖 3.45 所示，在堤頭西南側有很明顯的淤積，高程淤積最大量約為 8.1m，在 M4 斷面圖 3.33 、M7 斷面圖 3.36 與 M8 斷面圖 3.37 亦可見其高程之變化；而在堤頭北側有明顯之侵蝕情形，高程侵蝕最大量約為 8.33m，在 M2 斷面圖 3.31 、M5 斷面圖 3.34 與 R3 斷面圖 3.41 亦可見其高程之變化。在堤頭附近有較明顯之侵淤變化趨勢外，港內略有淤積情形，堤頭侵蝕區以外海域則略有侵蝕情形，原 100/6 堤頭西南方刷深區域，有很明顯之淤積情形，淤積最大高度可達約 7m，整體而言，101/6 較 100/5 淤積約 465,058m^3，平均淤積高程約為 34cm。

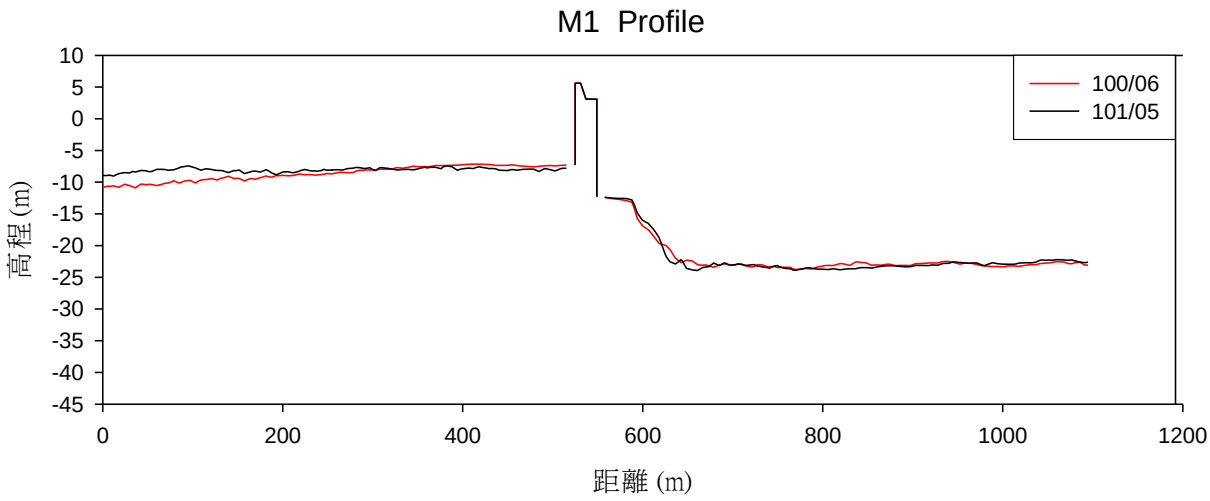


圖 3.30 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M1 水深剖面變化圖

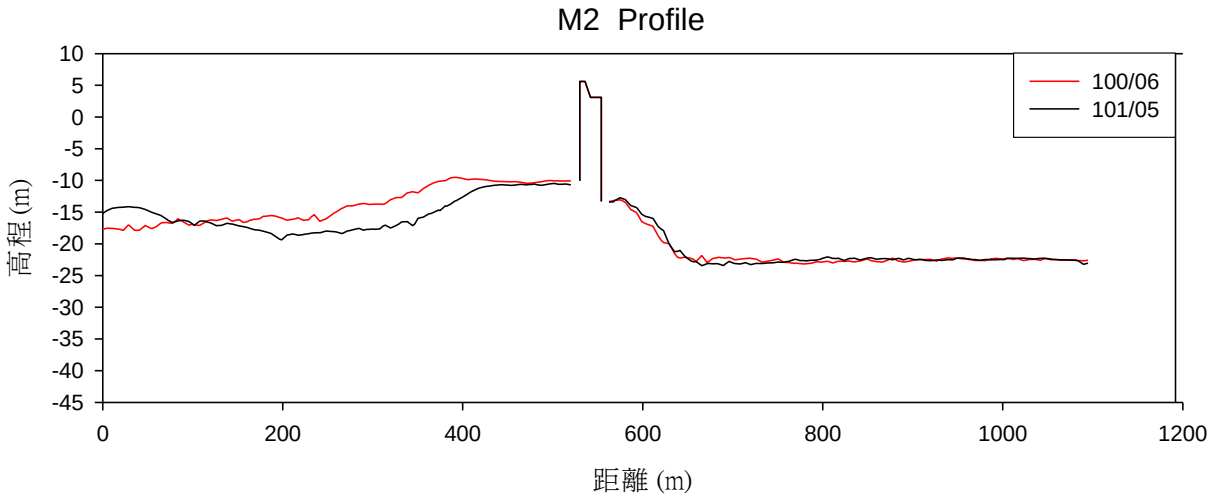


圖 3.31 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M2 水深剖面變化圖

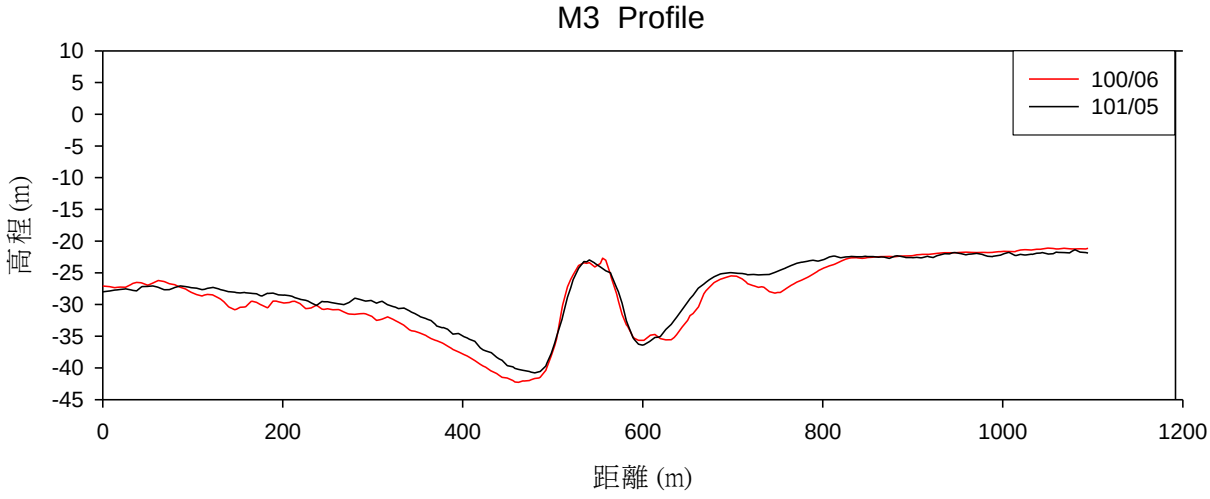


圖 3.32 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M3 水深剖面變化圖

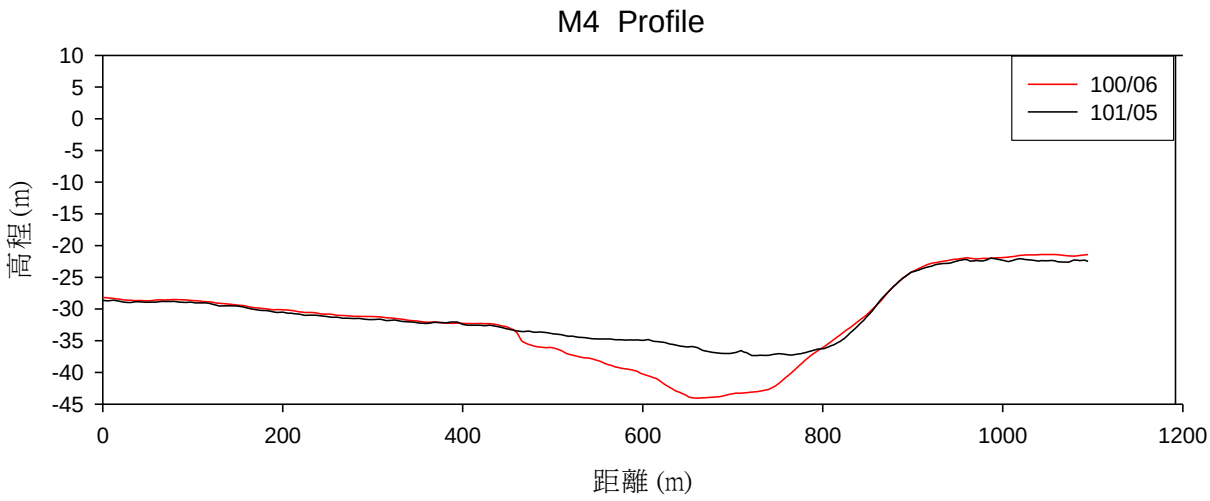


圖 3.33 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M4 水深剖面變化圖

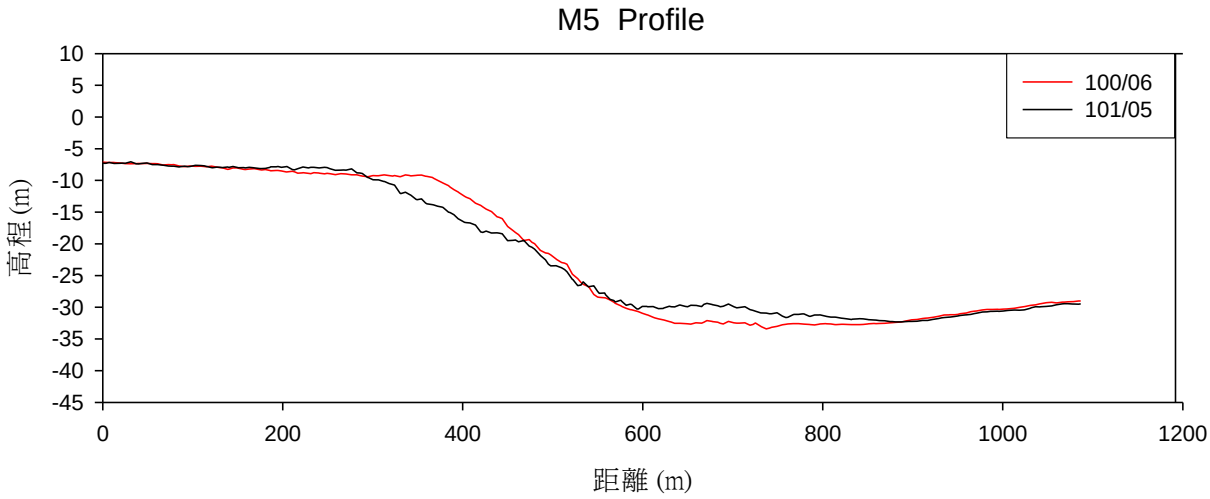


圖 3.34 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M5 水深剖面變化圖

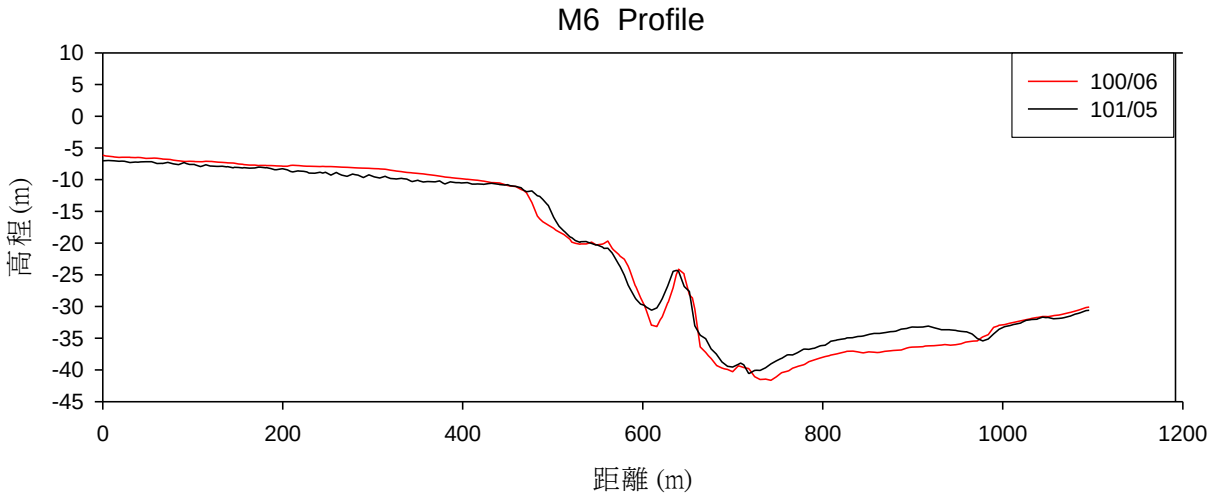


圖 3.35 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M6 水深剖面變化圖

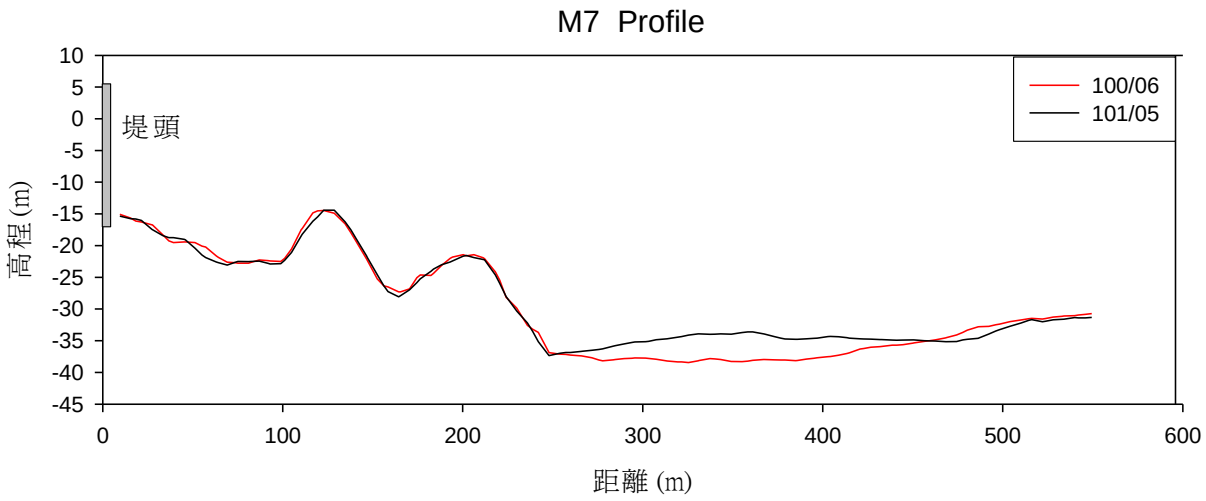


圖 3.36 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M7 水深剖面變化圖

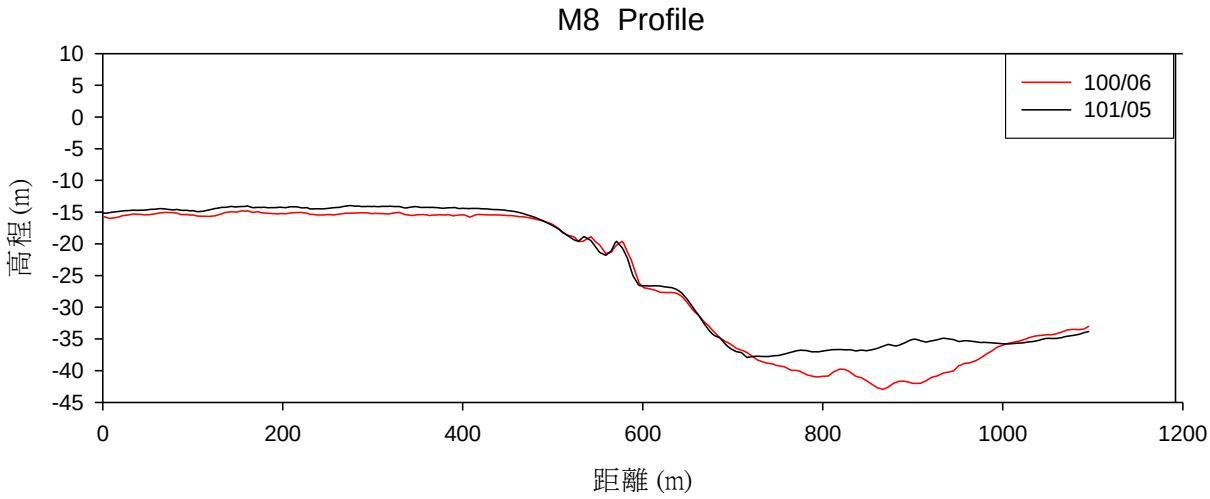


圖 3.37 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M8 水深剖面變化圖

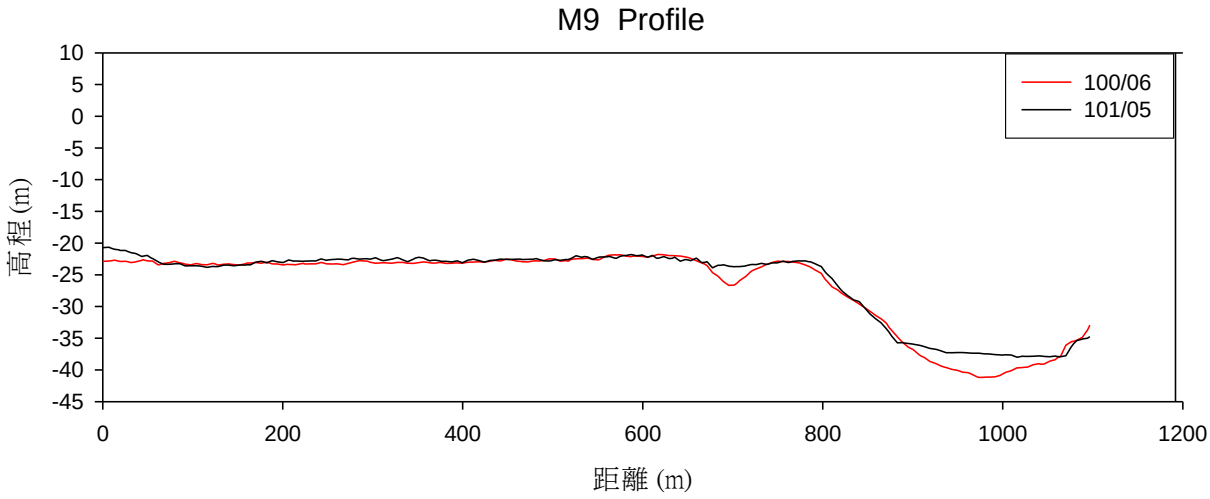


圖 3.38 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 M9 水深剖面變化圖

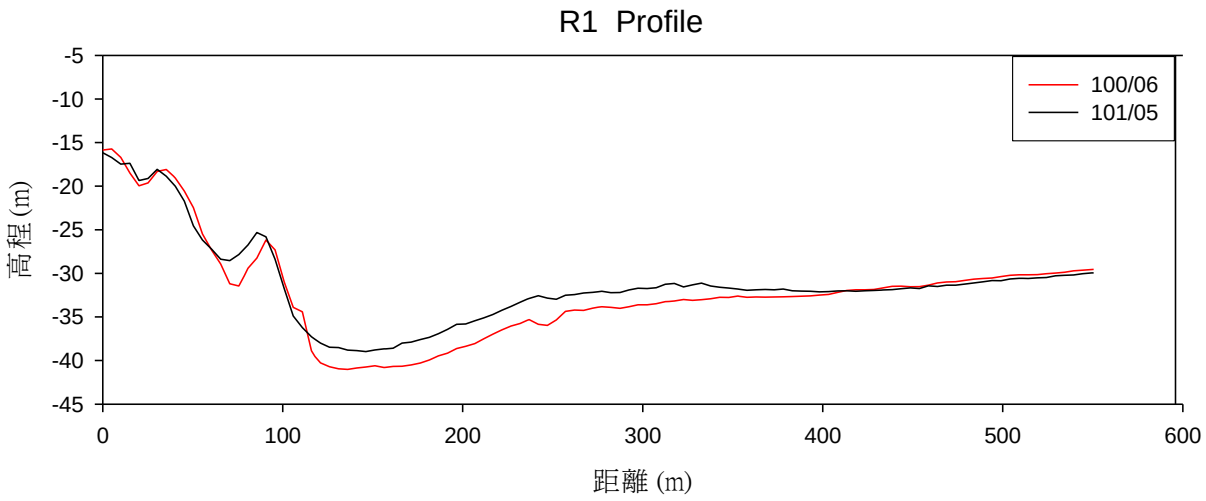


圖 3.39 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R1 水深剖面變化圖

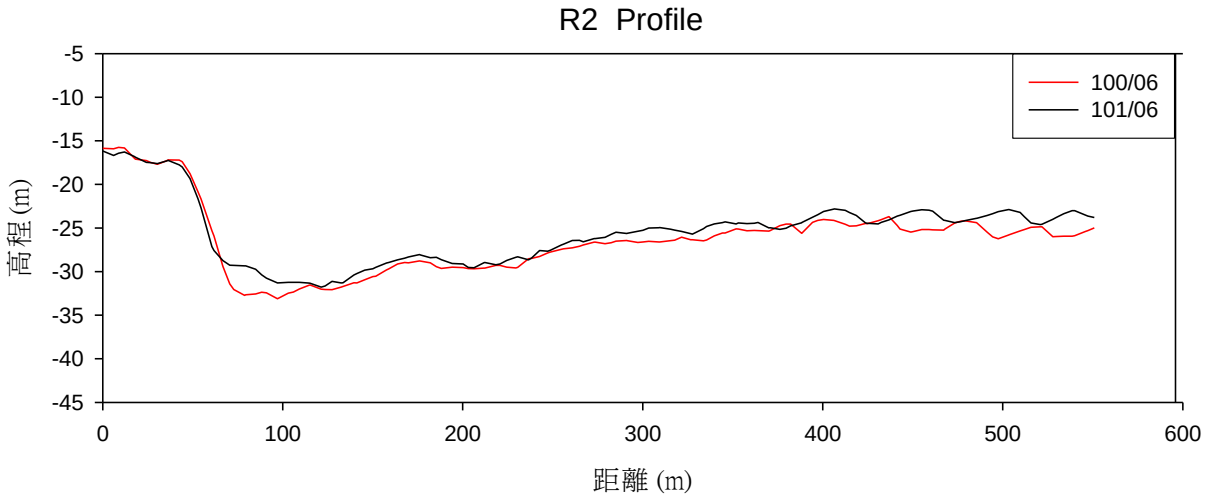


圖 3.40 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R2 水深剖面變化圖

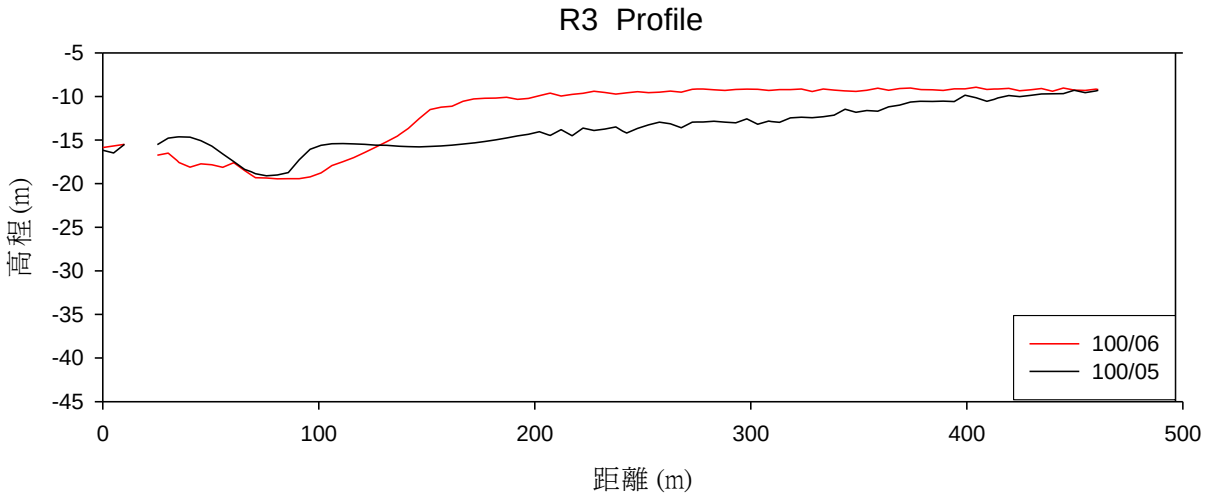


圖 3.41 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R3 水深剖面變化圖

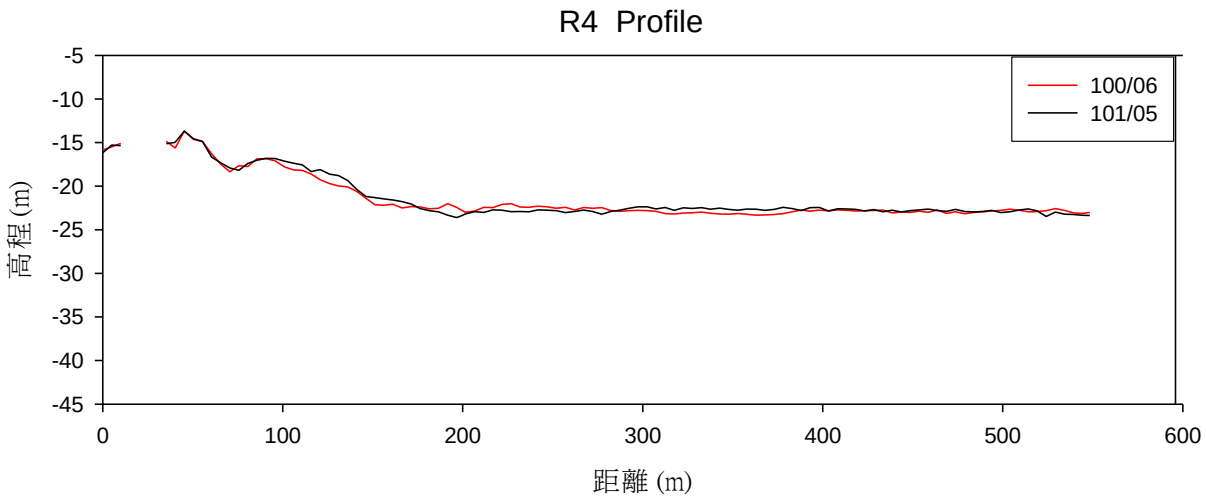


圖 3.42 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R4 水深剖面變化圖

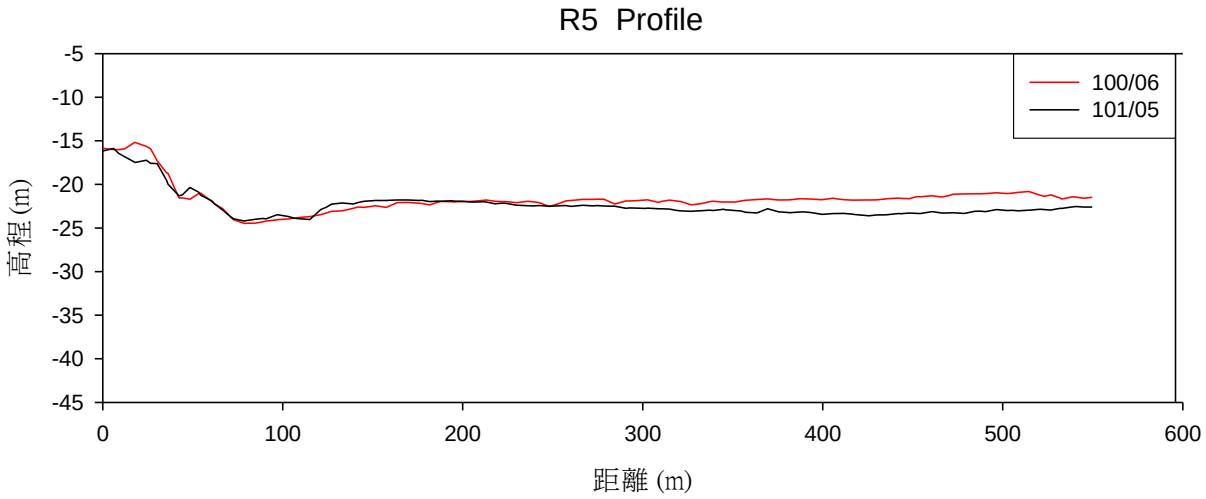


圖 3.43 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R5 水深剖面變化圖

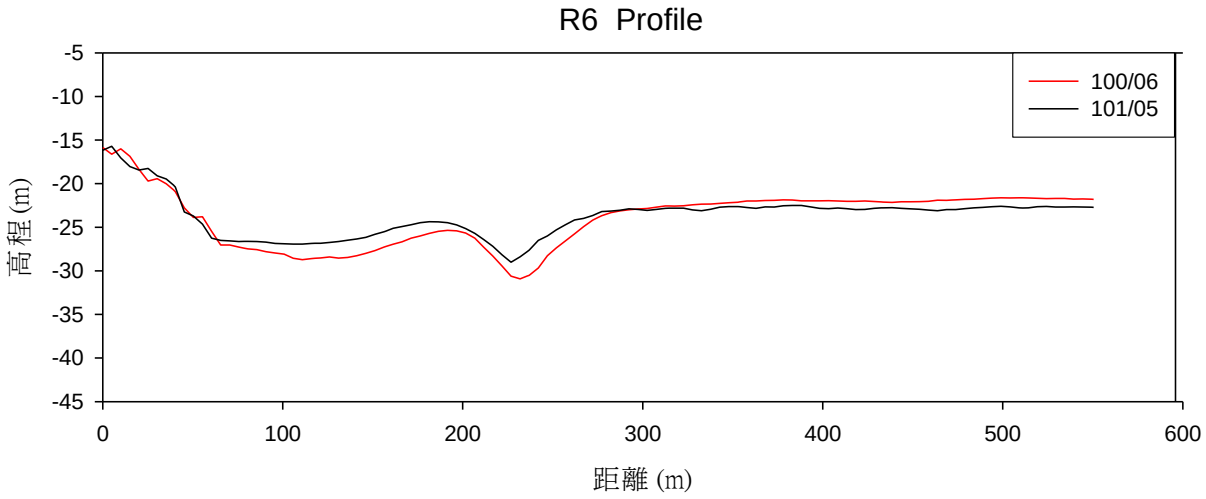


圖 3.44 麥寮工業港堤頭地形測量斷面 R6 水深剖面變化圖

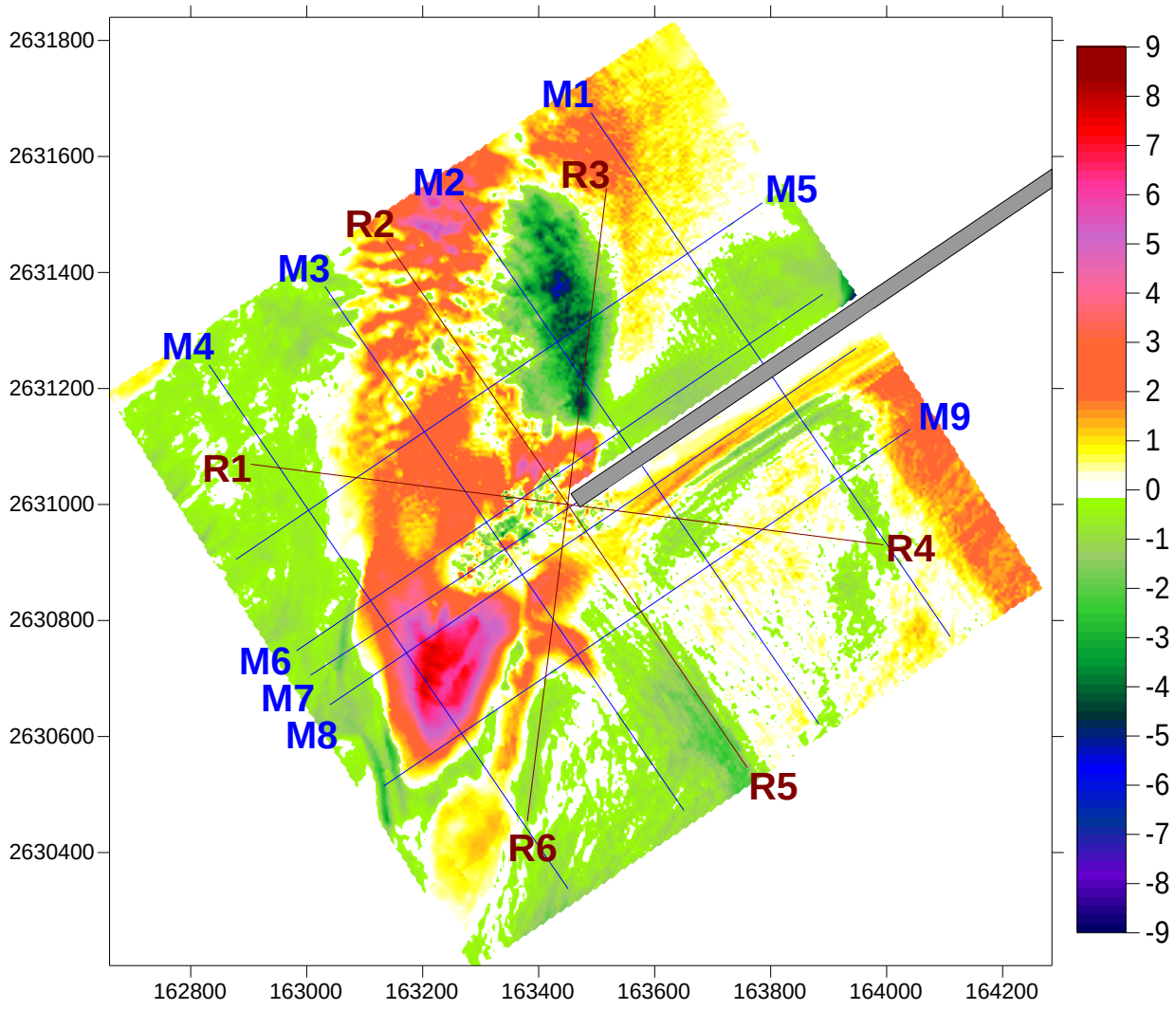


圖 3.45 麥寮工業港堤頭地形測量 100/6~101/5 侵淤變化色階圖

第四章　潮波流調查

海流及波浪為造成海域所有相關現象的主要物理因素，所收集的資料將可瞭解近岸流場模式，並可做為影響海域現象與環境之評估依據。另也將提供相關之工程設計規劃、海洋污染模式與預測、防治及水工模型試驗等之所需。港灣及近岸工程，如防波堤、填海圍堤等規劃設計與施工，須有詳細之潮波流資料做為參考。海水受天體影響而引發潮流，且因風、浪、海水密度及其他海氣象因素而改變流速及流向，而近岸附近之流況更因地形及附近結構物之影響而改變。為確實掌控區域的諸多環境控制因素，就必須對現地潮波流做一完整調查，如此能得到較準確的推算結果，做為相關研究的參考。

4.1 作業內容

於測區海域選擇一個測定點，於點號 W 處之點位坐標為 TWD97 E 120° 09’08.22”，N 23° 45’ 37.98”，水深約 10.0 公尺，施放之自記式潮波流儀，觀測海面表層及海床底層之流速、波浪及潮位，監測點位置如圖 4.1 所示。本次觀測日期自 101 年 05 月 03 日至 05 月 24 日止共 22 天。

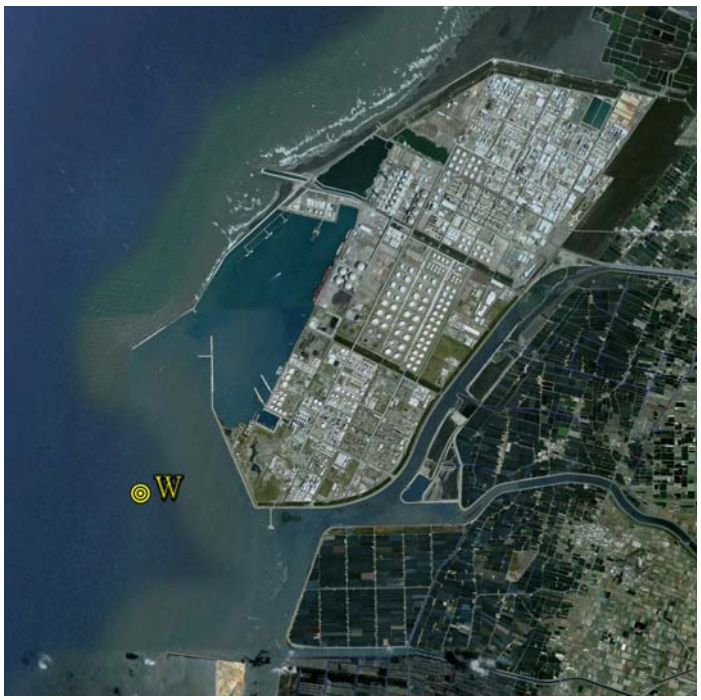


圖 4.1　測區海域自記式潮波流儀施放點位示意圖

4.2 作業方式

精確之定位可提供自記式潮波流儀所拋放位置之正確坐標，本計畫以差分定位方式（Beacon DGPS）進行，以得到海上精確之儀器定位坐標，其定位精度在±1公尺以內。

潮波流調查採用美國RD Instruments所製之WHSW-600底碇式都卜勒潮波流剖面儀（ADCP）進行海流監測，作業模式於現場儀器佈放前，於實驗室內以工業電腦設定自記式海流儀之參數；佈放儀器時以漁船作業，使用DGPS定位方式配合潛水人員進行。於儀器回收後再於實驗室內以工業電腦讀區資料。底碇式都卜勒海流剖面儀（ADCP）以平滑之不銹鋼外殼架底定於海床之上，並加錨鍊、重錘防止底拖漁船之破壞。

表 4.1　RD Instruments 底碇式都卜勒潮波流剖面儀規格特性表

RDI WHSW-600 ADCP Specification		
Velocity accuracy: •600: ± 0.25% of the water velocity relative to the ADCP ± 2.5mm/s Velocity resolution: 1mm/s Velocity range: ± 5m/s (default) ± 20m/s (maximum)	**Temperature** (mounted on transducer) • Range: -5° to 45°C • Precision: ± 0.4°C • Resolution: 0.01°	**Compass** (fluxgate type, includes built-in field calibration feature) • Accuracy: ± 2° • Precision: ± 0.5° • Resolution: 0.01° • Maximum tilt: ± 15°

4.3　測區海域潮波流結果分析

本次潮波流記錄期間自101年05月03日至05月24日完成，相關數據分析如下：

（1）潮汐

潮汐資料是由壓力式感應器轉換水位變化，而相對於儀器架設深度的水深起伏即為潮位變化。量測儀器安置於水深 10m 處。測站的水位時序變化繪圖如圖 4.2 所示。施測時間為 2012 年 05/03～05/24，共 21 日期間的平均水深為 8.356m。05 月 07 日 11 時，記錄最大水深 10.134m，05 月 08 日 18 時

記錄最小水深 6.132m，最大潮差 4.002m。由表 4.2 潮位調合分析顯示，主要分潮為 M2，振幅為 1.287m，次要分潮 S2，振幅 0.289m。以法國 (Defant, 1958)潮型因子(form factor，$F_f=(a_{K1}+a_{O1})/(a_{M2}+a_{S2})$)分析，$F_f$ 值為 0.28，屬於半日潮型。以美國 (Diertrich, 1980) 潮型因子 (form factor，$F_a=(a_{K1}+a_{O1})/(a_{M2})$)分析，$F_a$ 值為 0.35，屬於半日潮型。

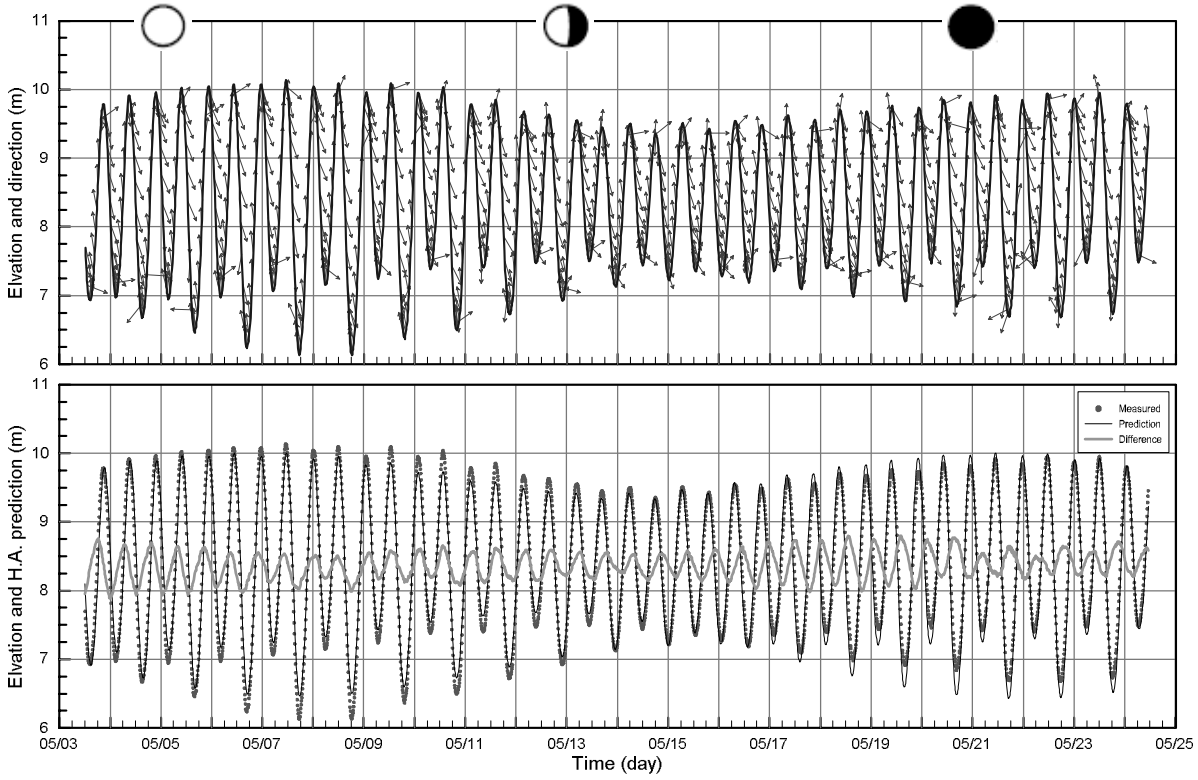


圖 4.2　W 測站，2012 年 05/03～05/24 實測與預報水位變化圖

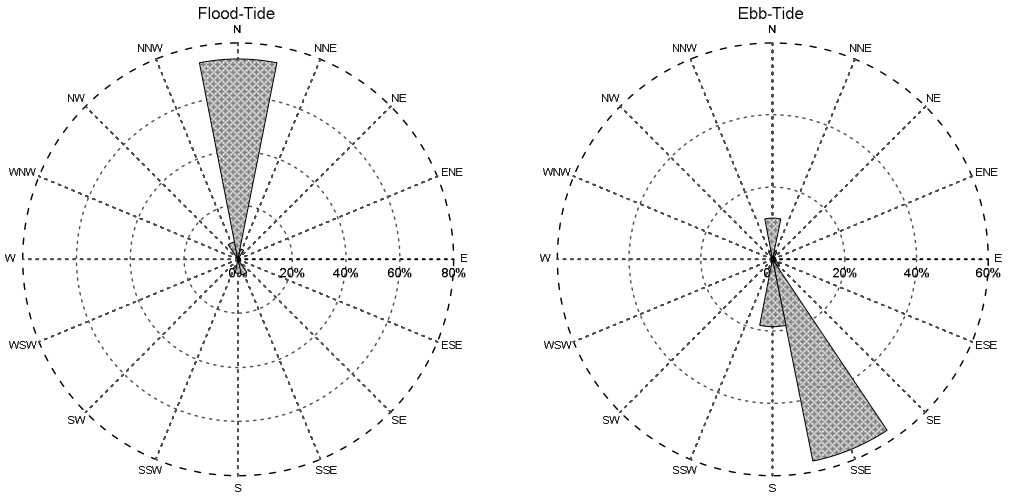


圖 4.3　W 測站，2012 年 05/03～05/24 漲、退潮段流向玫瑰圖

表 4.2　W 測站，潮位調合分析主要分潮參數

序別	分潮	角頻率(^{o}/hr)	振幅(m)	遲角(deg)
1	M2	28.9841042	1.2871480	317.4911923
2	S2	30.0000000	0.2892855	331.8069679
3	K1	15.0410686	0.2460168	248.4655876
4	O1	13.9430356	0.2027890	246.8004436
5	M4	57.9682085	0.0445587	300.8114384
6	MS4	58.9841042	0.0253539	321.5397861
7	M6	86.9523127	0.0175596	106.6879087
8	2MS6	87.9682085	0.0123999	131.5694637
9	SK3	45.0410686	0.0077827	213.3927363
10	M3	43.4761564	0.0066831	30.1747790
11	M8	115.9364170	0.0050689	74.7745662
12	MSF	1.0158958	0.0045834	291.1926245
13	S4	60.0000000	0.0038746	255.6556515
14	2SK5	75.0410686	0.0028954	209.6982380
15	2SM6	88.9841042	0.0025568	65.0503398

（2）海流

W 測站的海流觀測每 10 分鐘紀錄 1 筆資料。每 1 筆資料共含有效剖面資料 10 筆，各剖面間距 0.5m，以所測資料之底層水深 5m 及表層水深 1m，分別繪製流速與流向時序列資料如圖 4.4、圖 4.5 所示。

W 測站底層平均流速為 39.8cm/s，主要流向為 N，此流向中測得流速最大值為 106.2cm/s，發生於 05 月 08 日 20 時。資料記錄中，流速最大值為 106.2cm/s，流向為 N，發生於 05 月 08 日 20 時。W 測站表層平均流速為 46.3cm/s，主要流向為 N，此流向中測得流速最大值為 115.4cm/s，發生於 05 月 08 日 20 時。資料紀錄中，流速最大值為 117.6cm/s，流向為 SSE，發生於 05 月 22 日 01 時。

海流點位實測資料之底、表層統計資料如表 4.3 與表 4.4，而統計資料玫瑰圖如圖 4.6 所示。W 測點的底層流向分佈集中於 N、SSE 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 54.26%。表層流向分佈集中於 N、SSE 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 62.40%。

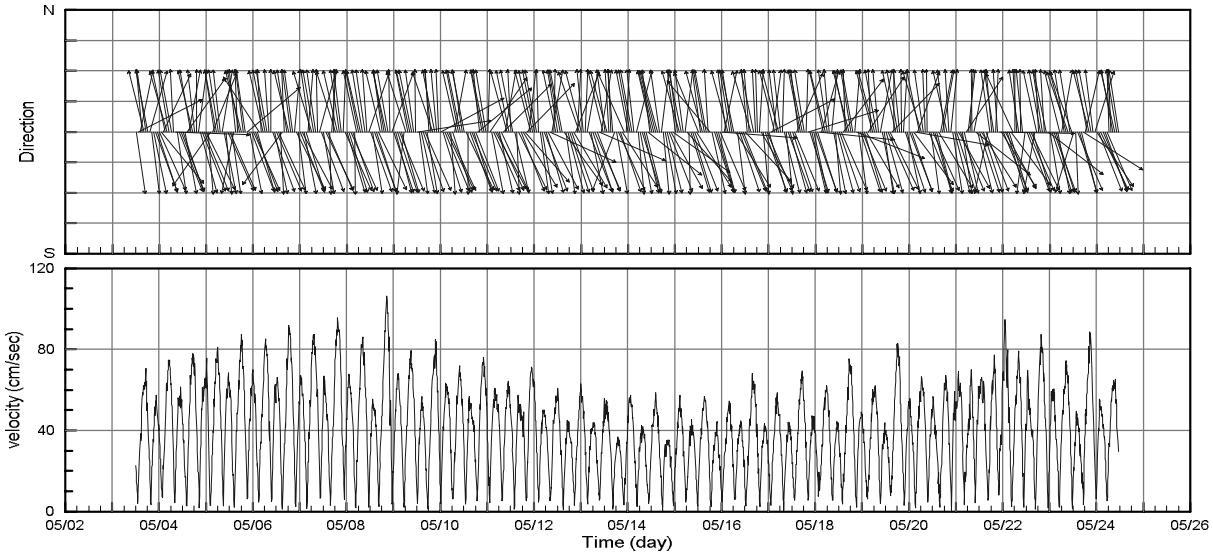


圖 4.4　W 測站，2012 年 05/03～05/24 底層流速與流向變化圖

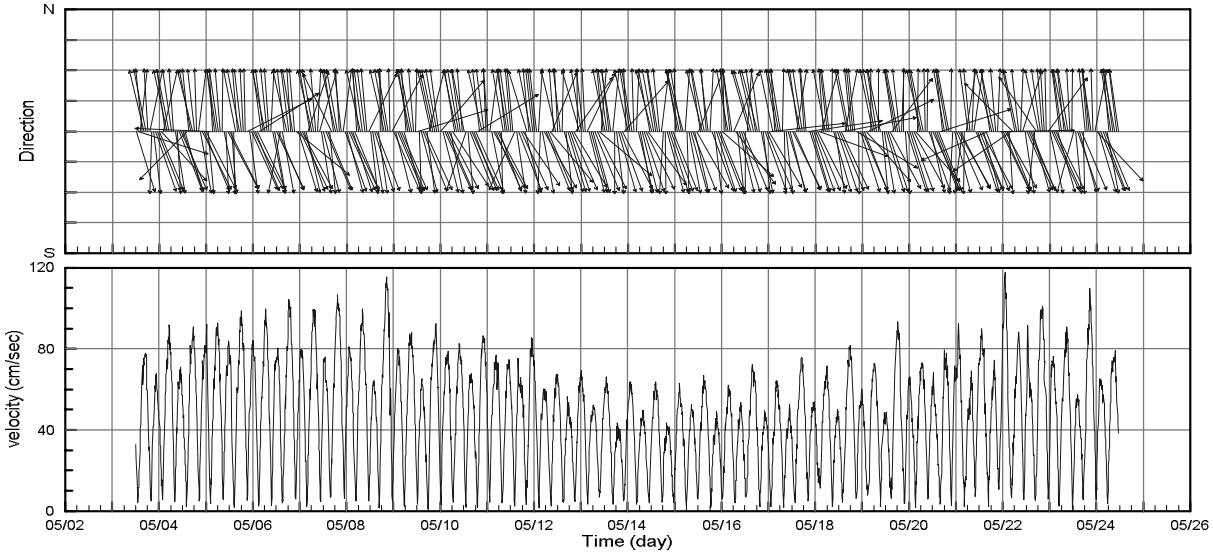


圖 4.5　W 測站，2012 年 05/03～05/24 表層流速與流向變化圖

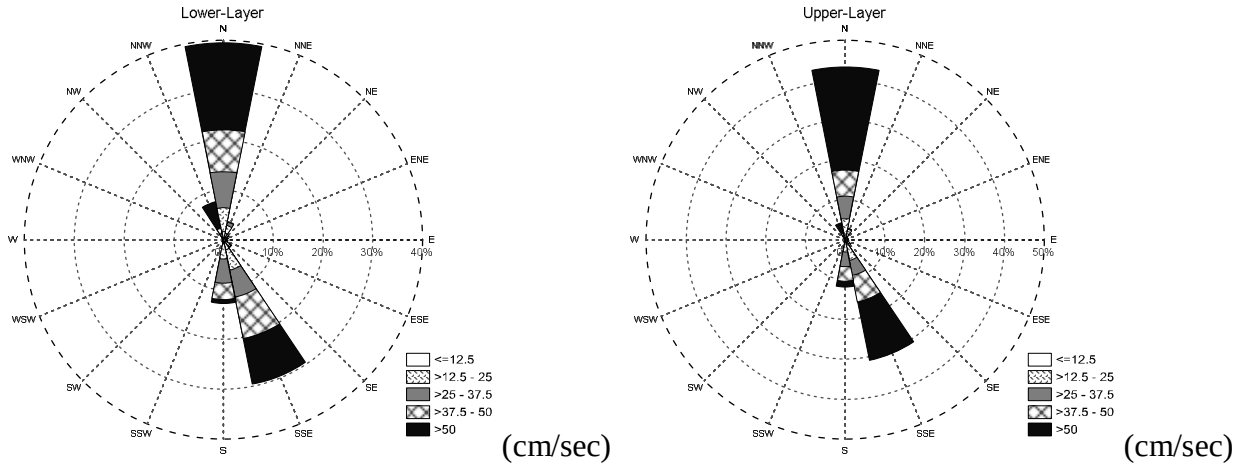


圖 4.6　W 測站，底、表層之海流玫瑰圖

表 4.3　W 測站，底層海流流速、流向統計表

流 向	流　速 （cm/s）					發生率(%)
	0.0-12.5	12.5-25.0	25.0-37.5	37.5-50.0	>50	
N	1.66	4.77	7.25	8.41	17.42	39.52
NNE	1.32	1.59	0.73	0.10	-	3.74
NE	1.03	0.30	-	-	-	1.32
ENE	0.89	0.07	-	-	-	0.96
E	0.66	0.07	-	-	-	0.73
ESE	0.83	0.03	-	-	-	0.86
SE	1.49	0.33	0.13	-	-	1.95
SSE	2.02	4.17	5.56	8.51	9.31	29.58
S	0.76	3.11	4.84	3.28	0.76	12.75
SSW	0.40	0.13	-	-	-	0.53
SW	0.07	-	-	-	-	0.07
WSW	0.03	-	-	-	-	0.03
W	0.07	-	-	-	-	0.07
WNW	-	-	-	-	-	0.00
NW	0.10	-	-	-	-	0.10
NNW	0.40	0.43	0.50	1.06	5.40	7.78
發生率(%)	11.73	15.00	19.01	21.36	32.89	100.00

表 4.4　W 測站，表層海流流速、流向統計表

流 向	流　速 （cm/s）					發生率(%)
	0.0-12.5	12.5-25.0	25.0-37.5	37.5-50.0	>50	
N	1.29	4.01	5.60	6.56	25.94	43.39
NNE	1.59	1.13	0.23	0.03	-	2.98
NE	0.66	0.07	-	-	-	0.73
ENE	0.73	0.03	-	-	-	0.76
E	0.76	0.07	-	-	-	0.83
ESE	0.79	0.13	-	-	-	0.93
SE	1.32	0.40	-	-	-	1.72
SSE	1.42	3.81	3.88	6.76	14.97	30.84
S	0.76	2.29	3.64	3.74	1.36	11.79
SSW	0.40	0.20	0.07	-	-	0.66
SW	0.23	0.03	-	-	-	0.26
WSW	0.03	0.03	-	-	-	0.07
W	0.23	-	-	-	-	0.23
WNW	0.20	0.03	-	-	-	0.23
NW	0.10	0.03	0.03	-	-	0.17
NNW	0.40	0.56	0.40	0.40	2.65	4.41
發生率(%)	10.93	12.82	13.85	17.49	44.92	100.00

若近岸區域的海底地形平緩、海岸線平直，海流主要驅動機制多為潮汐、鄰域大尺度海流及海面風切應力。在各種驅動機制間交互作用而衍生的流況改變量是微小的假設下，觀測到的海流可視為成份驅動機制的線性疊加(Csanady，1973)，即

$$u = \bar{u} + u_T + u_W + u' \tag{4.1}$$

其中 $\bar{u}$ 表示為平均流，u_T 表示為潮流，u_W 表示為風驅流，u' 代表高頻的流速擾動、紊流項及觀測過程的雜訊或誤差。要將 u' 從中分離，有相當的難度，因此分析方法將式(4.1)改寫為

$$u = \bar{u} + u_T + u'_W, \text{ where } u'_W = u_w + u' \tag{4.2}$$

即將高頻的成份納入風驅流之中，再依詹森等人(1997)所建議的方法，分解式(4.2)中的海流驅動機制成份。平均流的原定義為每月流速記錄的時間平均，但受限於資料長度不均等，某些月份的資料筆數過少，因此使用資料時間長度的平均值做為平均流，即

$$\bar{u} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} u_n \tag{4.2}$$

N 表示單一測點的資料總長度，u_n 表示對應的流速紀錄。詹森等人(1997)使用快速傅立葉轉換作為數值濾波器，剔除海流頻率小於 1/36 cph (cycle per hour)及大於 1/3 cph 的傅立葉常數項，再藉由反快速傅立葉轉換，將數值濾波後的頻域資料轉換回時間序列，視此結果為潮流的成份。進而計算剩餘的海流成份，並將其歸類為風驅流。將海流依其流速和流向拆成直角座標系統的分量，即

$$U = u \cdot \cos\theta \tag{4.4}$$

$$V = u \cdot \sin\theta \tag{4.5}$$

式(4.4)、(4.5)中 θ 代表海流流向與沿岸之夾角。以 FFT 方法計算 U、V 分量各頻率的傅立葉常數，並以最大能量無因次化繪製海流能譜。

依此處理程序，觀測期間 W 測站底、表層無因次化能譜分別如圖 4.7、圖 4.9 所示，而 U(沿岸方向)、V(向離岸方向)分量的潮流、風趨流成份時序圖則如圖 4.8 與圖 4.10 所示。

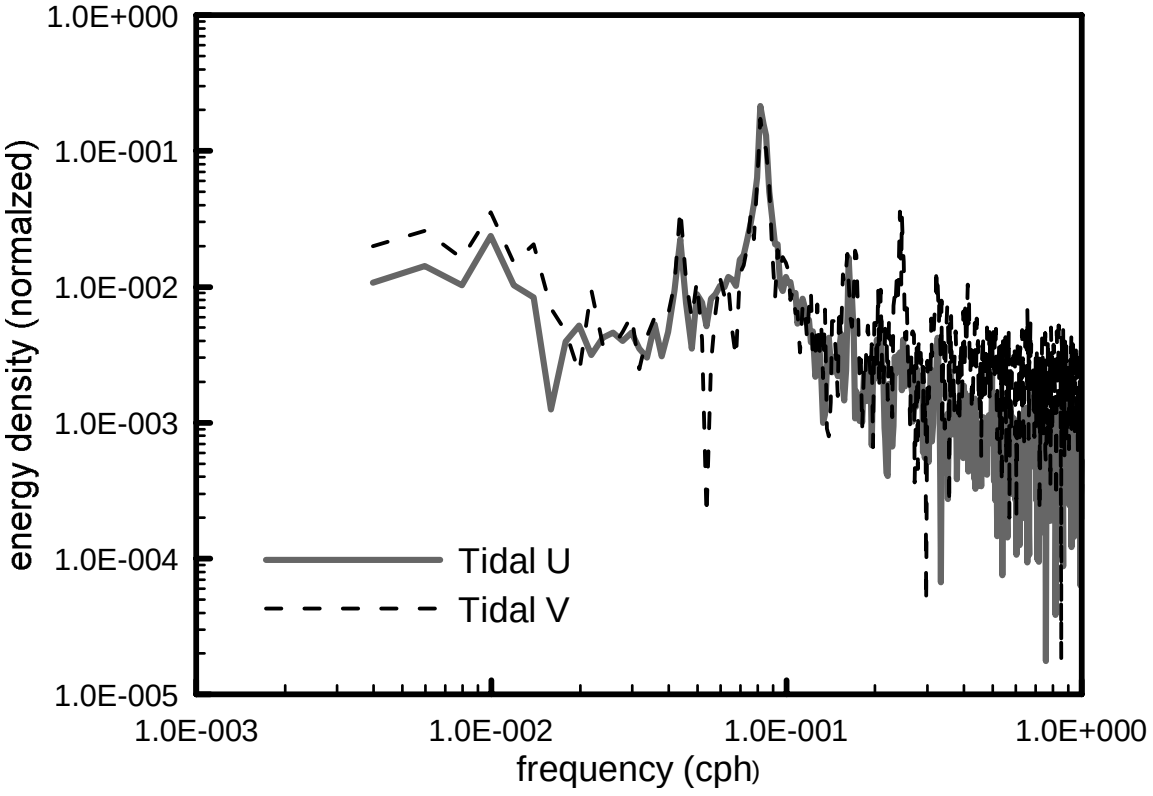


圖 4.7　W 測站，底層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

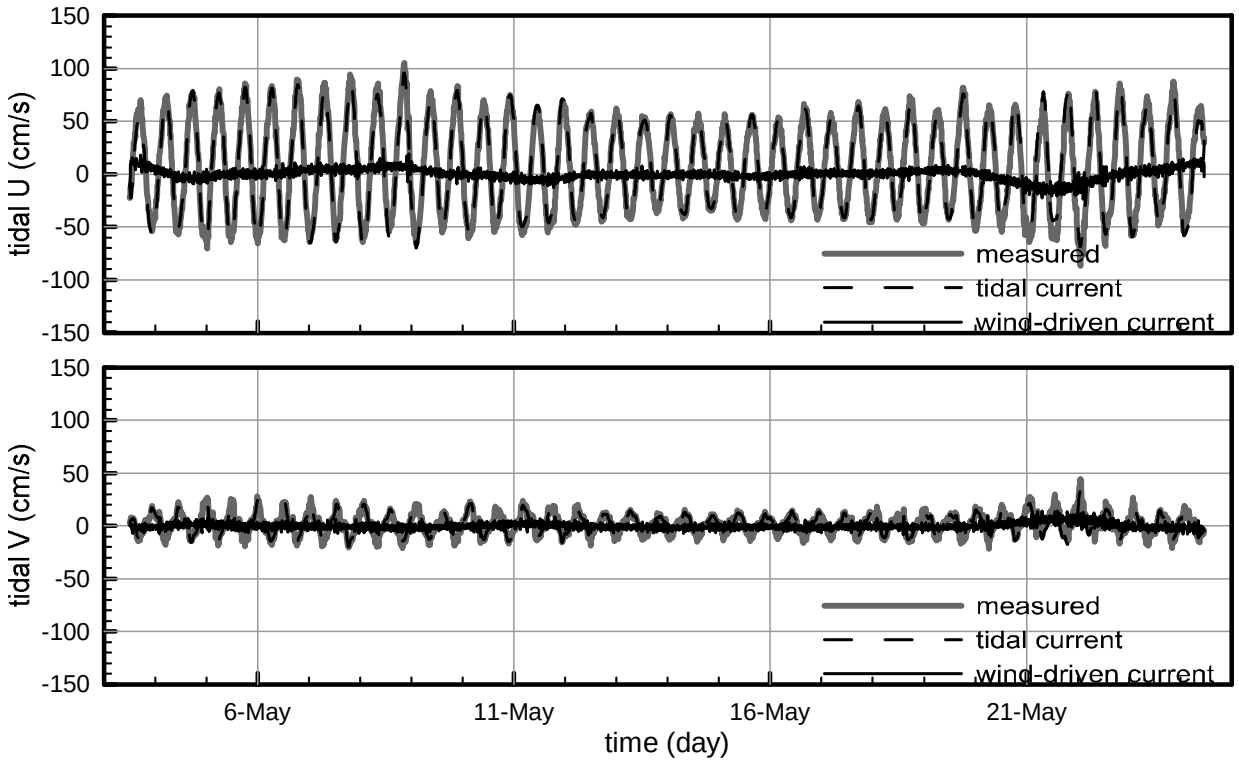


圖 4.8　W 測站，底層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

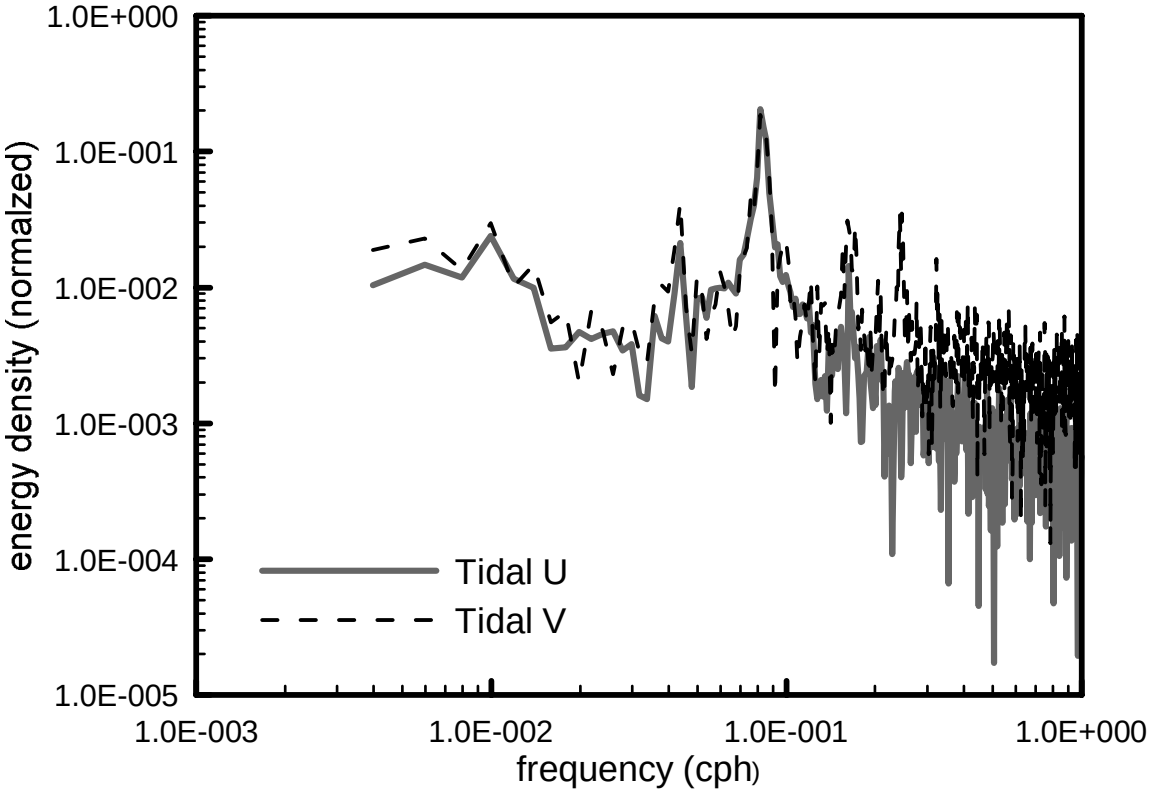


圖 4.9　W 測站，表層 U、V 分量海流無因次化能譜圖

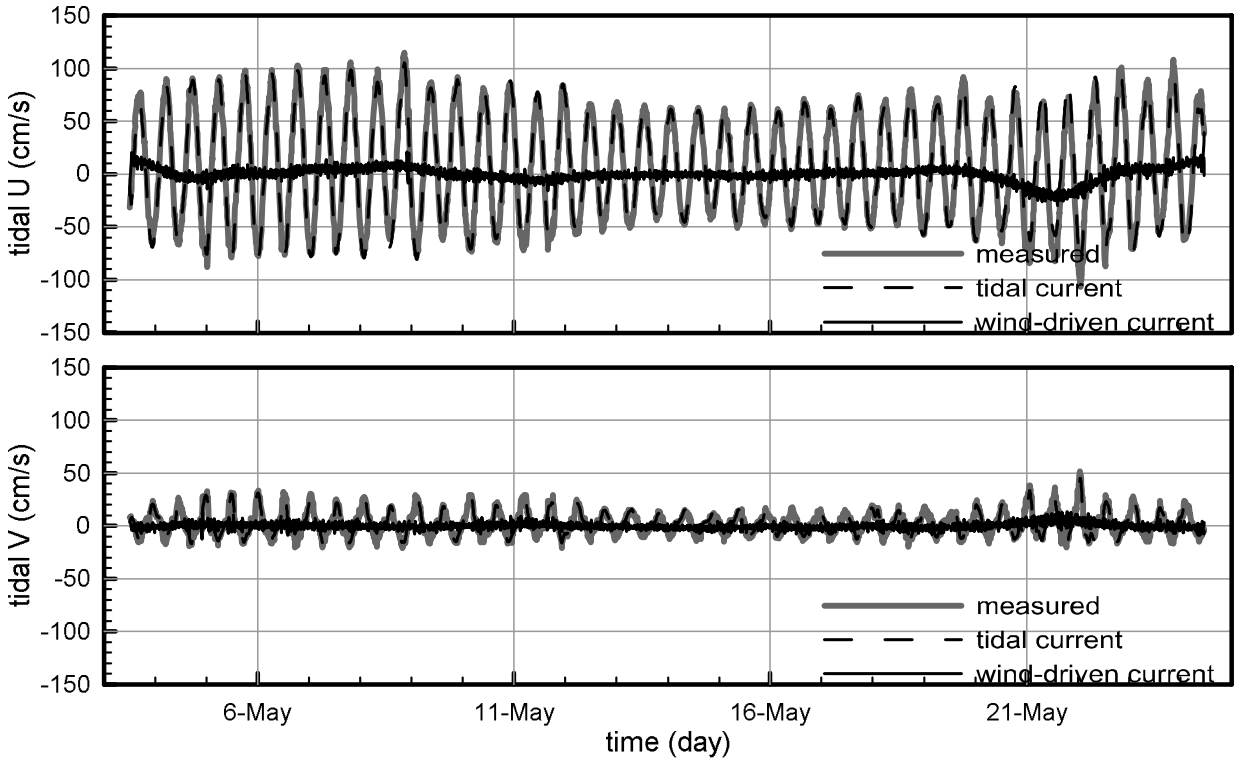


圖 4.10　W 測站，表層 U、V 分量之潮流、風驅流時序列圖

（3）波浪

W 測站的波浪波高與波向分佈統計如表 4.5 所示，依統計資料繪製的波浪玫瑰圖如圖 4.11 所示，波高及週期分佈直方圖如圖 4.12 所示，波高及週期時序圖如圖 4.13 所示。

分析結果顯示，主要波向為 NW、NNW，觀測期間內的示性波高($H_{1/3}$)為 79.5cm，對應的示性週期($T_{1/3}$)為 5.04sec。以每小時為統計區間，示性波高主要分佈於 25～75cm，佔約全體的 62.62%，示性週期則集中於 4～5sec 區間。平均波高(H_{mean})為 48.1cm，平均週期(T_{mean}) 4.65sec。最大波高(H_{max})162.0cm，週期(T_{max}) 6.40sec，對應波浪方向為 NW，此記錄發生的時間為 05 月 21 日 21 時。

表 4.5　W 測站，波高、波向統計表

波 向	波　高 （$H_{1/3}$, cm）					發生率(%)
	0-25	25-50	50-75	75-100	>100	
N	0.80	1.19	0.40	-	-	2.39
NNE	0.60	-	-	-	-	0.60
NE	0.40	-	-	-	-	0.40
ENE	0.20	-	-	-	-	0.20
E	-	-	-	-	-	0.00
ESE	0.20	-	-	-	-	0.20
SE	-	-	-	-	-	0.00
SSE	-	0.20	-	-	-	0.20
S	0.80	1.59	0.40	-	-	2.78
SSW	1.59	2.98	0.99	0.20	-	5.77
SW	2.19	2.39	0.80	0.60	-	5.96
WSW	3.58	2.39	0.40	0.40	-	6.76
W	3.18	3.18	0.20	-	-	6.56
WNW	4.17	5.17	2.58	1.79	0.40	14.12
NW	2.78	12.72	11.93	4.17	4.37	35.98
NNW	1.19	7.75	5.37	2.39	1.39	18.09
發生率(%)	21.67	39.56	23.06	9.54	6.16	100.00

表 4.6　W 測站，波高、週期聯合機率統計表

週期	波　高（$H_{1/3}$, cm）										機率
(sec)	16.6	32.0	47.3	62.5	77.8	93.2	108.4	123.8	139.1	154.3	(%)
3.5	0.99	1.99	0.20	-	-	-	-	-	-	-	21.07
3.8	2.19	2.98	2.19	0.60	0.20	-	-	-	-	-	22.07
4.1	3.38	1.19	2.19	1.79	0.40	-	-	-	-	-	23.66
4.4	8.35	6.76	4.17	1.19	0.60	0.20	-	-	-	-	14.71
4.7	4.37	6.56	7.95	2.98	1.59	0.40	-	-	-	-	7.75
5.0	1.19	2.39	6.16	5.57	2.58	1.59	0.20	-	-	-	4.57
5.3	0.60	0.20	0.60	1.59	1.59	1.79	1.79	0.20	-	-	4.17
5.6	-	-	0.20	0.99	0.60	0.40	1.99	0.20	0.20	-	0.99
5.9	-	-	-	-	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	-	0.40
6.2	-	-	-	-	-	-	-	0.40	-	0.60	0.60
機率 (%)	3.18	8.15	8.95	21.27	23.86	19.68	8.35	4.57	0.99	0.99	100

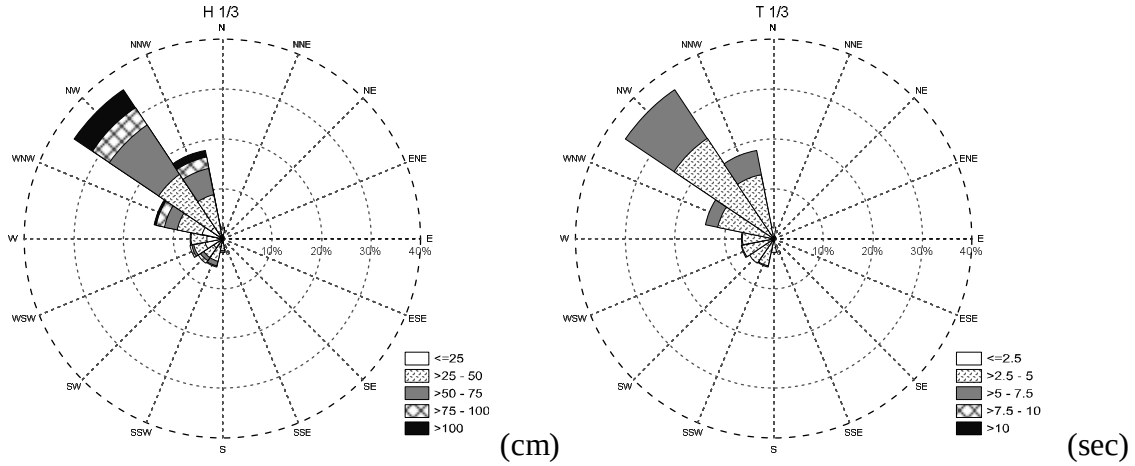


圖 4.11　W 測站，波浪波高、週期玫瑰圖

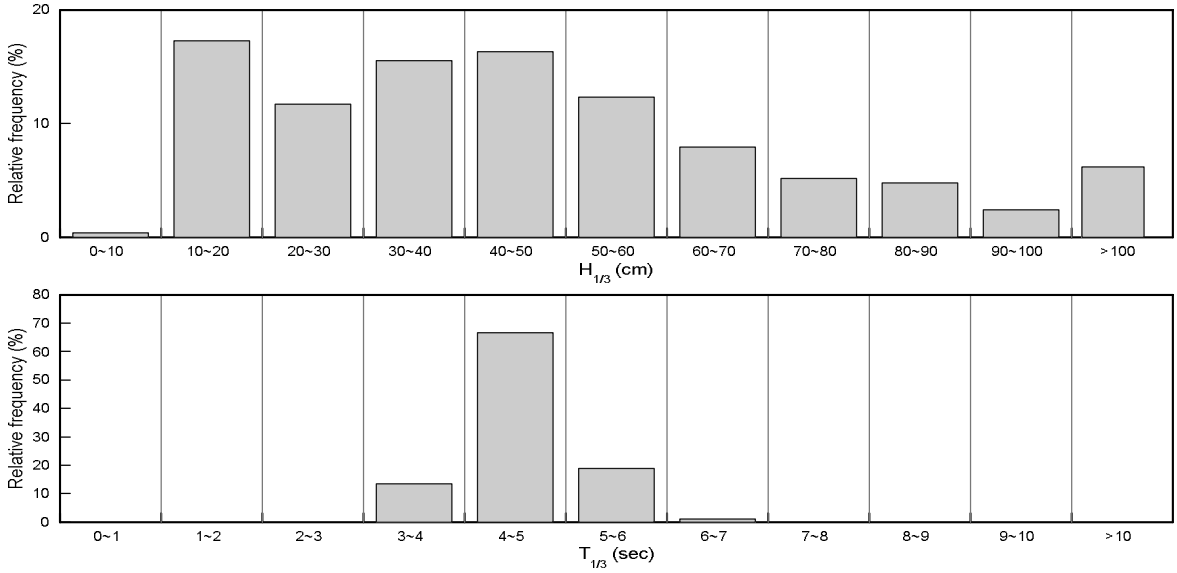


圖 4.12　W 測站，波高、週期統計直方圖

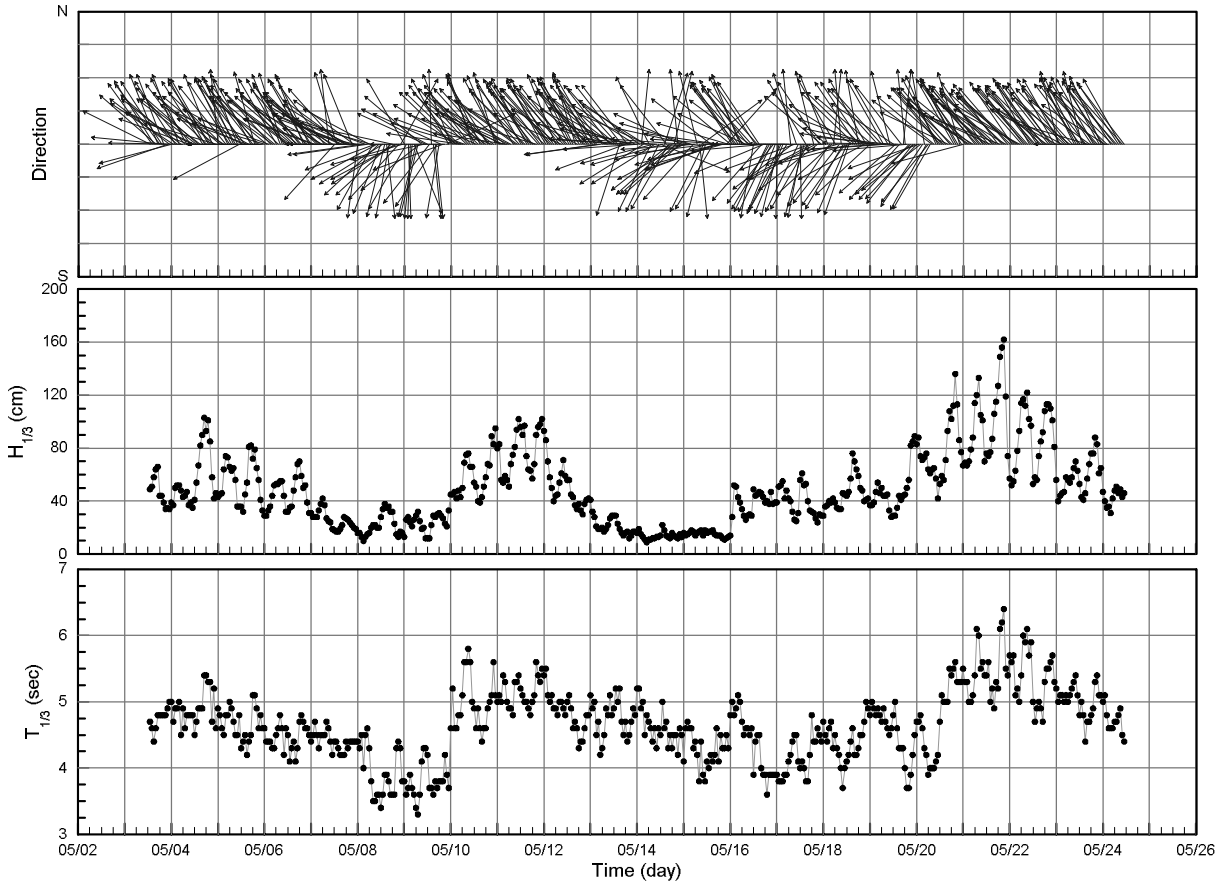


圖 4.13　W 測站，波向、波高、週期時序列圖

4.4　本年度與去年度資料比對分析

（1）海流

為比較去年度（2011 年）與今年度（2012 年）所測海流資料，於海流點位實測資料之底、表層分別繪製 2011 年之流速與流向時序列資料如圖 4.14、圖 4.15 所示與 2012 年之流速與流向時序列資料如圖 4.16、圖 4.17 所示，統計資料玫瑰圖 2011 年如圖 4.18 所示，統計資料玫瑰圖 2012 年如圖 4.19 所示。

去年度 W 測站底層平均流速為 39.4cm/s，主要流向為 N，此流向中測得流速最大值為 109.3cm/s，發生於 2011 年 06 月 11 日 15 時。資料記錄中，流速最大值為 109.3cm/s，流向為 N，發生於 2011 年 06 月 11 日 15 時。而於今年度底層平均流速為 39.8cm/s，主要流向亦為 N，此流向中測得流速最大值為 106.2cm/s，發生於 2012 年 05 月 08 日 20 時。去年度表層平均流速為 46.4cm/s，主要流向為 N，此流向中測得流速最大值為 120.0cm/s，發生於 2011

年 06 月 11 日 15 時。於今年度表層平均流速為 46.3cm/s，主要流向亦為 N，此流向中測得流速最大值為 115.4cm/s，發生於 2012 年 05 月 08 日 20 時。

綜合而言，去年度 W 測點的底層流向分佈集中於 N、S 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 52.62%。表層流向分佈集中於 N、S 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 62.30%。而今年度 W 測點的底層流向分佈集中於 N、SSE 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 54.26%。表層流向分佈集中於 N、SSE 方位，主要流速分佈區間為大於 37.5cm/sec，發生機率為 62.40%。

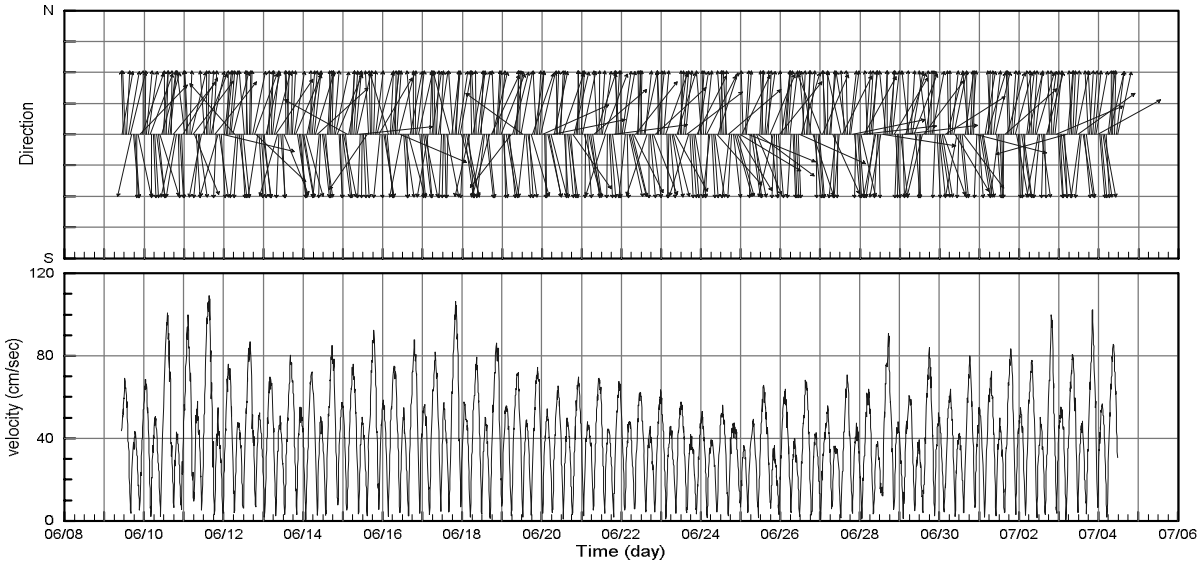


圖 4.14　W 測站，2011 年 06/09～07/04 底層流速與流向變化圖

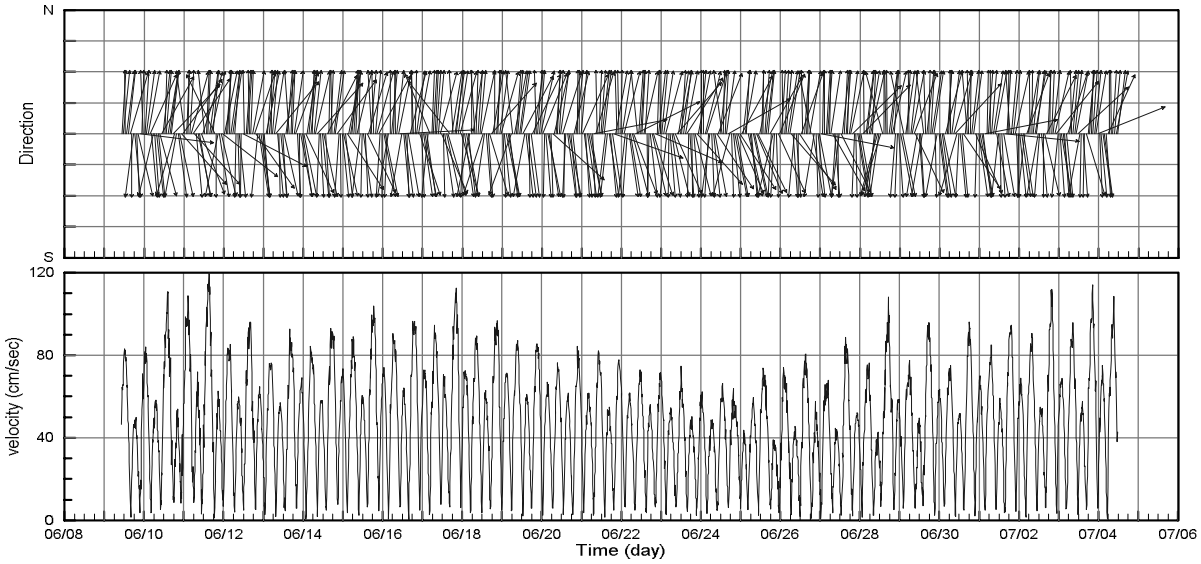


圖 4.15　W 測站，2011 年 06/09～07/04 表層流速與流向變化圖

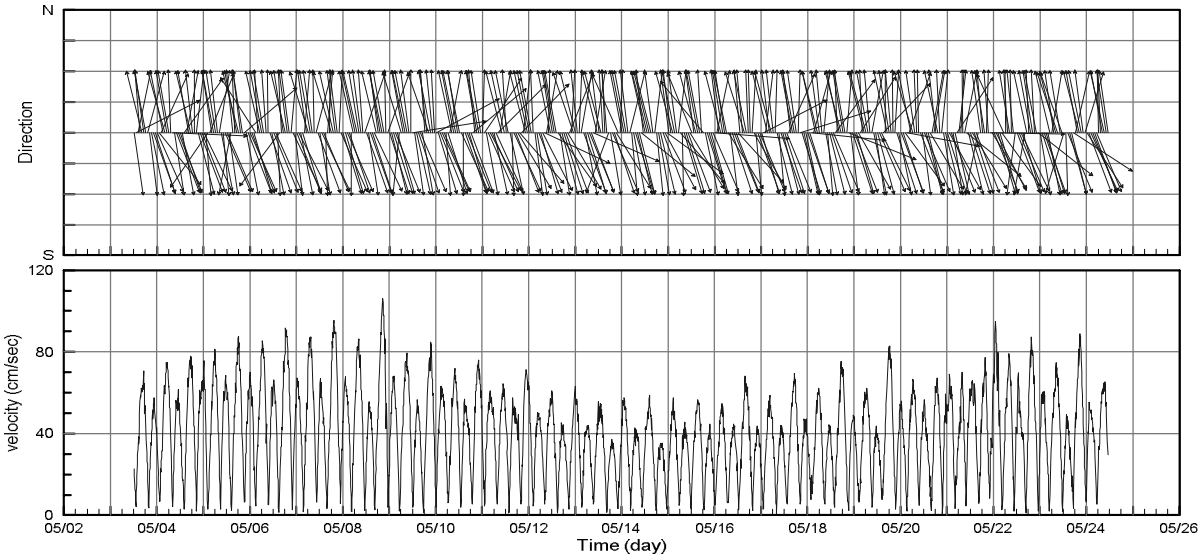


圖 4.16　W 測站，2012 年 05/03～05/24 底層流速與流向變化圖

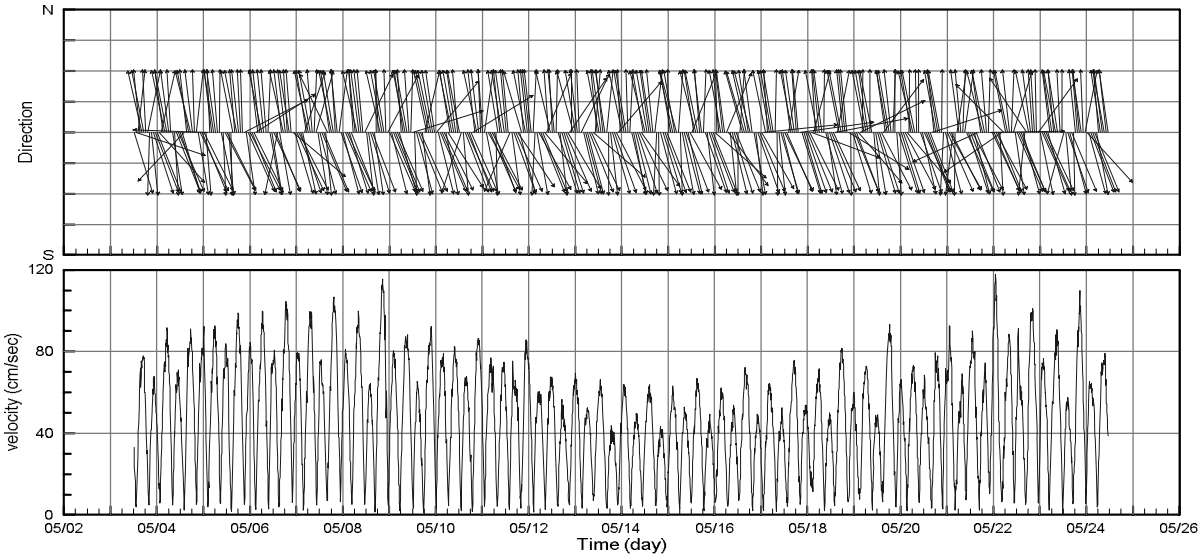


圖 4.17　W 測站，2012 年 05/03～05/24 表層流速與流向變化圖

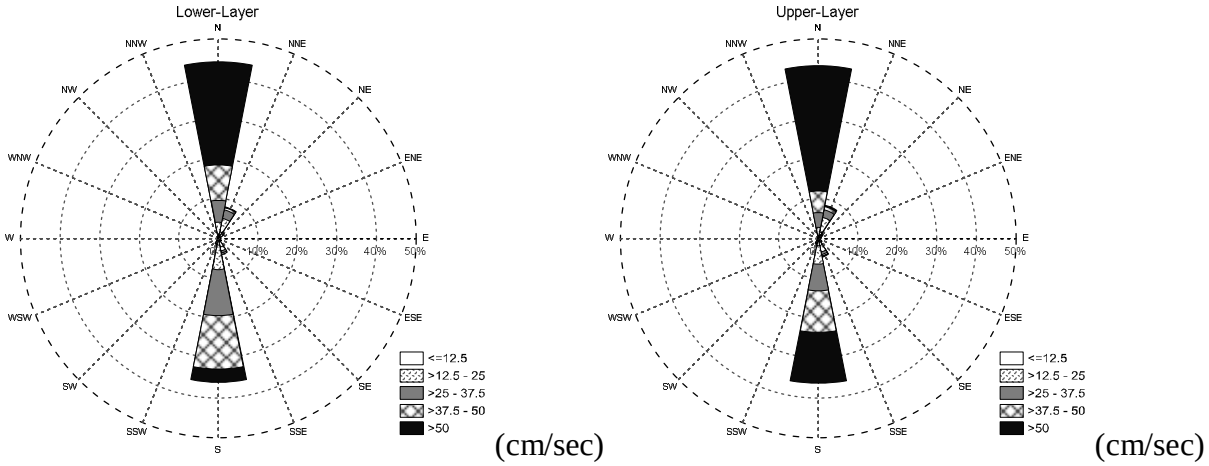


圖 4.18　W 測站，2011 年之底、表層之海流玫瑰圖

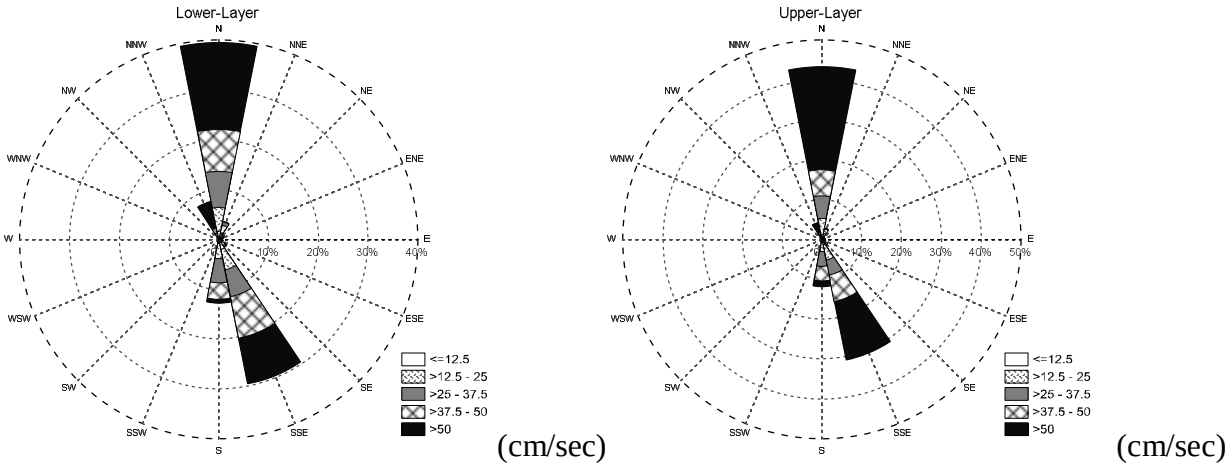


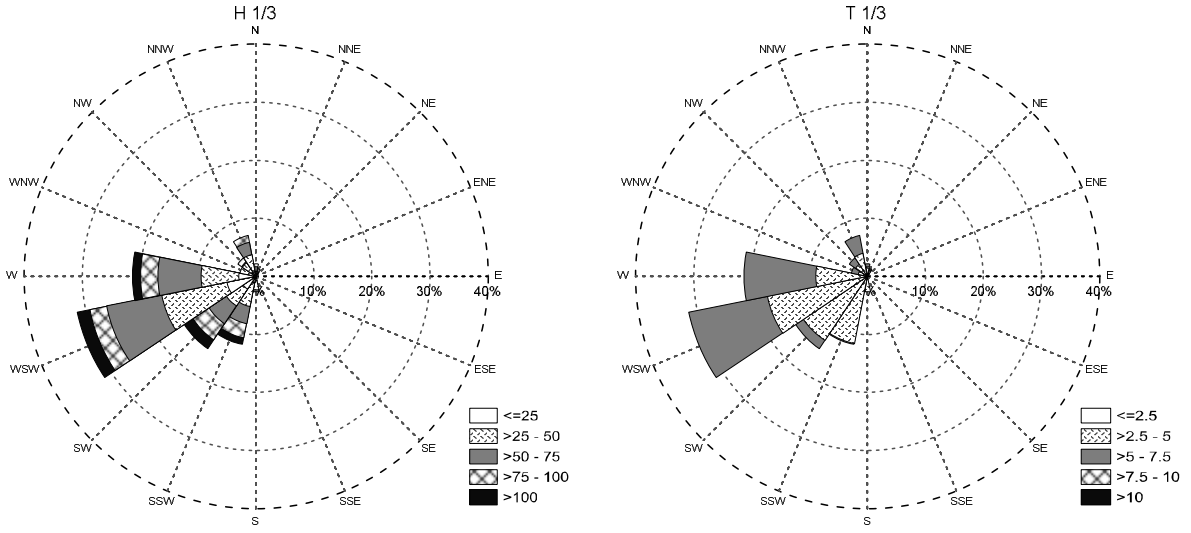
圖 4.19　W 測站，2012 年之底、表層之海流玫瑰圖

（2）波浪

為比較去年度（2011 年）與今年度（2012 年）所測波浪資料，分別繪製去年度 W 測站統計資料的波浪玫瑰圖如圖 4.20 及今年度統計資料的波浪玫瑰圖如圖 4.21，而去年度 W 測站波高及週期時序圖如圖 4.22，今年度之波高及週期時序圖如圖 4.23 所示。

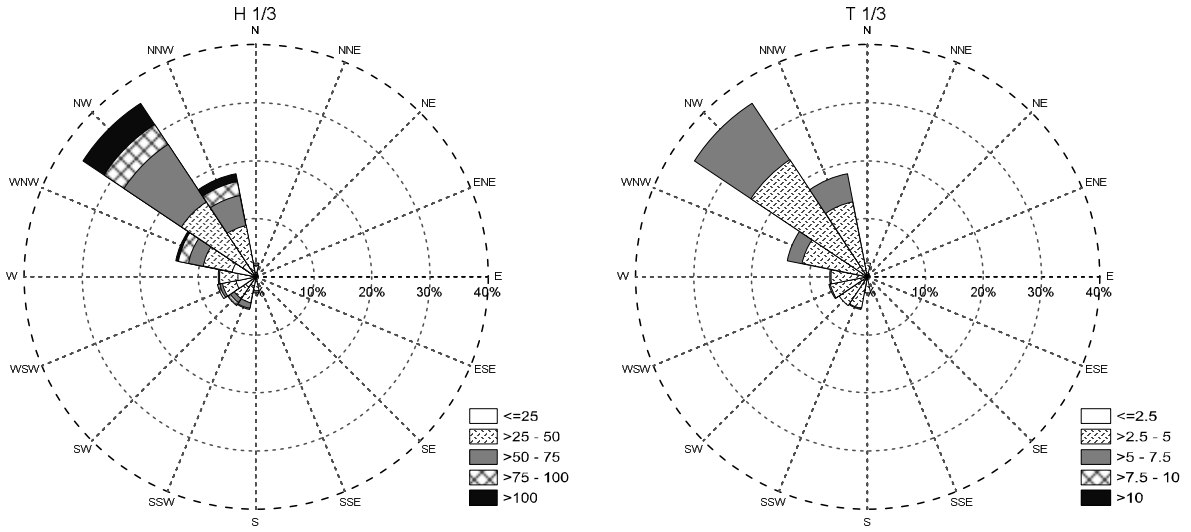
分析結果顯示，去年度主要波向為 WSW、W，觀測期間內的示性波高($H_{1/3}$)為 87.1cm，對應的示性週期($T_{1/3}$)為 5.08sec。以每小時為統計區間，示性波高主要分佈於 25～75cm，佔約全體的 63.06%，示性週期則集中於 4～5sec 區間。平均波高(H_{mean})為 54.1cm，平均週期(T_{mean}) 4.87sec。最大波高(H_{max})182.0cm，週期(T_{max}) 5.40sec，對應波浪方向為 WSW，此記錄發生的時間為 2011 年 06 月 11 日 12 時。

而今年度主要波向為 NW、NNW，觀測期間內的示性波高($H_{1/3}$)為 79.5cm，對應的示性週期($T_{1/3}$)為 5.04sec。以每小時為統計區間，示性波高主要分佈於 25～75cm，佔約全體的 62.62%，示性週期則集中於 4～5sec 區間。平均波高(H_{mean})為 48.1cm，平均週期(T_{mean}) 4.65sec。最大波高(H_{max})162.0cm，週期(T_{max}) 6.40sec，對應波浪方向為 NW，此記錄發生的時間為 2012 年 05 月 21 日 21 時。



(單位：cm) (單位：sec)

圖 4.20　W 測站，2011 年 6 月波浪波高、週期玫瑰圖



(單位：cm) (單位：sec)

圖 4.21　W 測站，2012 年 5 月波浪波高、週期玫瑰圖

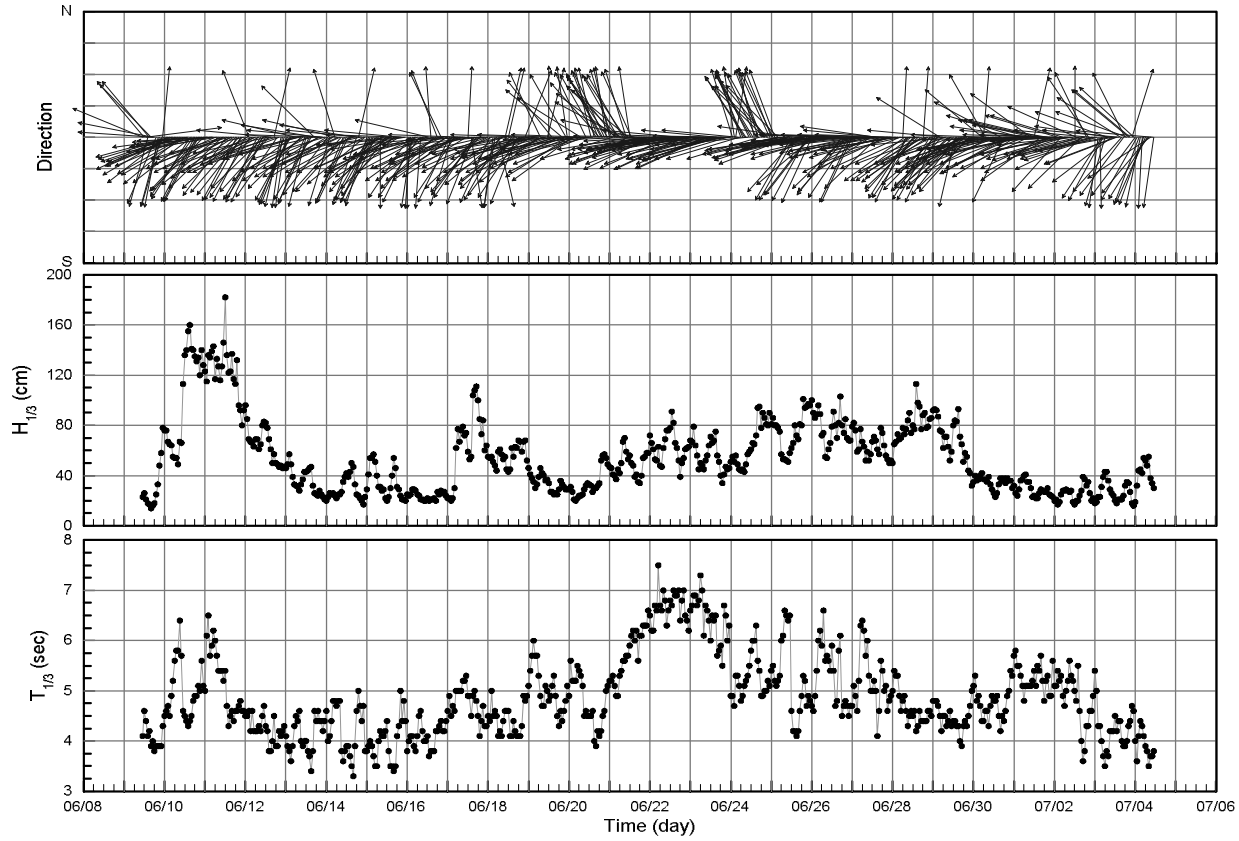


圖 4.22　W 測站，2011 年 6 月波向、波高、週期時序列圖

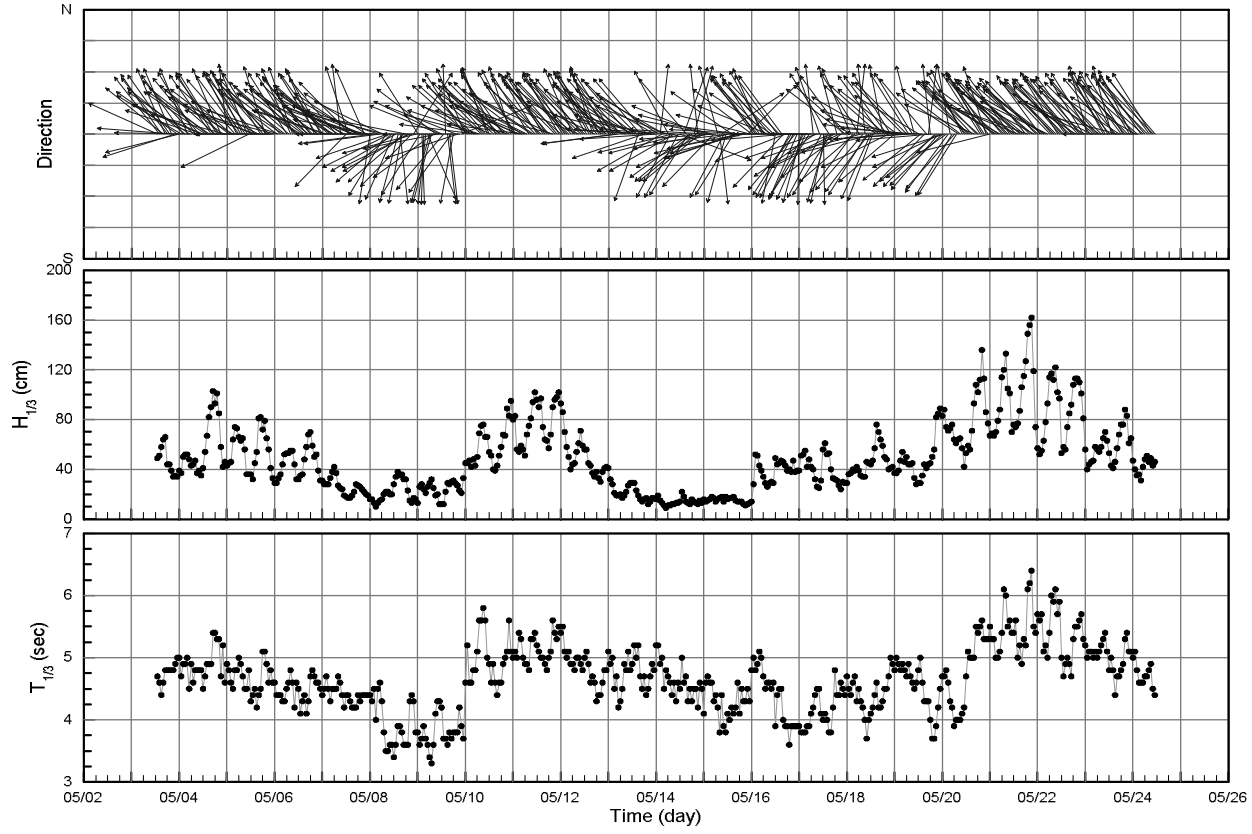


圖 4.23　W 測站，2012 年 5 月波向、波高、週期時序列圖

第五章　防波堤堤頭沖蝕數值模擬

5.1　FLOW-3D 模式介紹

1963 年 Dr. C.W. Hirt 於美國 Los Alamos 國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory，LANL) 提出 VOF (Volume of Fluid Method) 流體動力學數值計算方法，除提高計算流體力學模擬的穩定性之外，並能夠更加精準的描述自由液面變動狀態。1980 年 Flow Science 公司成立，以提供工業應用和科學領域的流體動力學模型分析軟體為其營運目標。在水利工程方面，已有相關研究使用 Flow Science 的軟體模擬明渠流的流況、河川潰壩的情況、土石流的傾瀉運動以及攔砂壩的受力狀態等案例。1985 年 Flow Science 公司推出 FLOW-3D® 商業版流體分析軟體，主要核心技術為：多重區塊網格 (Multi-Block Grids)、FAVOR 障礙物體積分率表示法、VOF 自由液面處理法，適合處理流體和固體耦合運動的模型模擬計算。藉由選擇適當之水動力、泥沙及波浪等計算模組，FLOW-3D 亦可適用於港灣工程之領域，相關模組如表 5.1 所示。本研究利用 FLOW-3D 進行防波堤堤頭附近之波、流場數值計算以及地形變化模擬，並配合現場調查資料與水工模型試驗結果，以期建立防波堤堤頭侵蝕機制。

表 5.1　港灣工程領域適用的 FLOW-3D 計算模組

模組名稱	適用性簡述
Moving and deforming objects	波浪與潮流對結構物之繞射與應力的耦合分析
Particles	波流場的分佈追蹤與分析
Porous media	海域孔隙結構物模型的建立與處理
Sediment scour	預測泥沙等的侵蝕漂浮沉降和沉積的過程
Shallow water	水深平均應用於三維垂直動量方程的處理
Viscosity and turbulence	流場粘性係數與紊流模型的處理
Wave boundary	邊界線性波與非線性波的產生與應用

5.1.1 理論基礎

FLOW-3D的理論基礎在於三維的質量守恆及動量守恆方程式等，針對本計畫所研究的物理現象，乃為水動力學問題，其運動方程式為Naiver-Stokes方程式，其數學模式的架構為：

1. Naiver-Stokes 控制方程式

在古典力學中，物質體系所遵循的物理法則是「質量守恆」及「動量守恆」，對於三維不可壓縮黏性流體，在直角座標系的形式下連續方程式為：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{5-1}$$

動量方程式，在X、Y和Z方向分別表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{5-2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{5-3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)-g \tag{5-4}$$

上式中(u, v, w)分別表示水平和垂直方向之瞬時速度分量，(x, y, z)分別為水平和垂直方向之座標，P為瞬時壓力，而ρ、ν分別為流體之密度和運動黏滯係數，在數值模擬過程中假設不受其他因素之影響而保持定值。

2. FLOW-3D 控制方程式

(1) 質量連續方程式(Mass Continuity Equation)

$$V_F\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z)=R_{DIF}+R_{SOR} \tag{5-5}$$

上式中 V_F 是流體體積比，ρ 是流體密度，R_{DIF} 是紊流擴散項，R_{SOR} 是質量源項，(u, v, w)是(x, y, z)座標方向的速度，A_x , A_y , A_z 分別是 X, Y, Z 方向流動

的通量面積比。

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\upsilon_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(\upsilon_\rho A_y R\frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\upsilon_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) + \xi\frac{\rho\upsilon_\rho A_x}{x} \tag{5-6}$$

上式中係數υ_ρ等於$c_p\mu/\rho$，μ是動量分佈的係數(例如黏度)，c_p是參照紊流施密特數(turbulent Schmidt number)倒數的常數項。

$$R_{SOR} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(vAy) + \frac{\partial}{\partial z}(wAz) + \xi\frac{uA_x}{x}\right) \tag{5-7}$$

(2) 動量方程式(Momentum Equations)

以直角座標的形式將 Navier-Stokes Equation 展開可得(*X, Y, Z*)三個方向的流體速度(*u, v, w*)：

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{1}{V_F}\left\{\mathrm{uA_x}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{vA_y}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{wA_z}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x}} + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(u - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{1}{V_F}\left\{\mathrm{uA_x}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{vA_y}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{wA_z}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{y}} + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(v - \delta v_s) \tag{5-8}$$

$$\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{1}{V_F}\left\{\mathrm{uA_x}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{vA_y}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{wA_z}\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{z}}\right\} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{z}} + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}(w - \delta w_s)$$

上式中(b_x,b_y,b_z)是通過多孔介質或閘板時減少的流量，U_s=(u_s, v_s, w_s)是流體表面速度，(f_x,f_y,f_z)為 *X*,*Y*,*Z* 三個方向的黏滯項即

$$\rho V_F f_x = wsx - \left\{\frac{\partial}{\partial x}(A_x\tau_{xx}) + R\frac{\partial}{\partial y}(A_y\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z\tau_{xz}) + \frac{\xi}{x}(A_x\tau_{xx} - A_y\tau_{yy})\right\} \tag{5-9}$$

$$\rho V_F f_y = wsy - \left\{\frac{\partial}{\partial x}(A_x\tau_{xy}) + R\frac{\partial}{\partial y}(A_y\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z\tau_{yz}) + \frac{\xi}{x}(A_x\tau_{xx} + A_y\tau_{xy})\right\} \tag{5-10}$$

$$\rho V_F f_z = wsz - \left\{\frac{\partial}{\partial x}(A_x\tau_{xz}) + R\frac{\partial}{\partial y}(A_y\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z\tau_{zz}) + \frac{\xi}{x}(A_x\tau_{xz})\right\} \tag{5-11}$$

上式中τ_{ij}代表液體剪應力，下標i為作用面，下標j為作用方向：

$$\tau_{xx} = -2\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + R\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{5-12}$$

$$\tau_{yy} = -2\mu\left\{R\frac{\partial v}{\partial y} + \xi\frac{u}{x} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + R\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{5-13}$$

$$\tau_{zz} = -2\mu\left\{\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + R\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x}\right)\right\} \tag{5-14}$$

$$\tau_{xy} = -\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial x} + R\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x}\right\},\ \tau_{xz} = -\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial z} + R\frac{\partial w}{\partial x}\right\},\ \tau_{yz} = -\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial z} + R\frac{\partial w}{\partial y}\right\} \tag{5-15}$$

FLOW-3D 以不可壓縮黏性流體之 N-S 方程作為控制方程式，加入 k-ε、RNG 及大渦模擬等多種紊流模式，配合 VOF 方法處理自由液面，利用 FAVOR 技術來描述網格中之結構物。

透水結構物部分以 FLOW-3D 內建孔隙介質模組中之雷諾數依存法處理，並以有限差分法將控制方程式離散，其連續方程式和動量方程式對於體積分數、面積分數、速度分量、物體重力加速度以及物體粘滯力加速度等，都以三個方向運算。

(3) FLOW-3D數值的方法

FLOW-3D 提供三種演算法對壓力速度式求解：SOR 反覆運算法、線性隱式 ADI 算法和 GMRES（Generalized Minimum RESidual）演算法。其中 GMRES 支援 CPU 平行處理，演算法收斂速度快、計算精度高、不易發散，特別在求解 N-S 方程時效率較高。為提高計算效率，避免同一時刻求解所有變數，FLOW-3D 採用目前應用較廣的流場數值解法，不直接求聯立方程組的解，而是有序地、逐一求解各個變數的代數方程組。在求解的過程中，FLOW-3D 中引入兩個量---中間速度和當前時刻的壓力修正值，中間速度是不考慮新時刻壓力場的影響。通過求解動量方程所獲得中間速度，然後將中

間速度和壓力修正值的關係式代入連續性方程，得到含有壓力修正值的壓力泊松方程，再應用 GMRES 演算法求解壓力泊松方程。求解步驟如下：

首先，將引入的中間速度$u^*_{i,j,k}$、$v^*_{i,j,k}$、$w^*_{i,j,k}$代到差分後的動量方程中。其 x 方向的動量方程將改寫成下面的形式（其他兩個方向類似）：

$$\frac{u^*_{i,j,k}-u^n_{i,j,k}}{\delta t}=fx^n_{i,j,k}-\left(FUX+FUY+FUZ\right)^n_{i,j,k}-\frac{1}{\rho}\frac{p^*_{i+1,j,k}-p^n_{i,j,k}}{\delta x}$$
$$-\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{u^n_{i+1,j,k}-2u^n_{i,j,k}+u^n_{i-1,j,k}}{\delta x^2}+\frac{u^n_{i,j+1,k}-2u^n_{i,j,k}+u^n_{i,j-1,k}}{\delta y^2}+\frac{u^n_{i,j,k+1}-2u^n_{i,j,k}+u^n_{i,j,k-1}}{\delta z^2}\right) \tag{5-16}$$

$$\frac{u^{n+1}_{i,j,k}-u^*_{i,j,k}}{\delta t}=-\frac{1}{\rho}\frac{p'_{i+1,j,k}-p'_{i,j,k}}{\delta x} \tag{5-17}$$

其中，p'為當前時刻 n 的壓力修正值，則下一時刻的壓力為 $p^{n+1}=p^n+p'$，通過解方程(5-16)可獲得中間速度$u^*_{i,j,k}$。其次，將方程(5-17)代入到離散後的連續性方程(5-18)

$$\frac{AFR^{n+1}_{i,j,k}u^{n+1}_{i,j,k}-AFR^{n+1}_{i-1,j,k}u^{n+1}_{i-1,j,k}}{\delta x}+\frac{AFB^{n+1}_{i,j,k}v^{n+1}_{i,j,k}-AFB^{n+1}_{i,j-1,k}v^{n+1}_{i,j-1,k}}{\delta y}+\frac{AFT^{n+1}_{i,j,k}w^{n+1}_{i,j,k}-AFT^{n+1}_{i,j,k-1}w^{n+1}_{i,j,k-1}}{\delta z}=0 \tag{5-18}$$

得到含有壓力修正值的壓力泊松方程 (式 5-19)。

$$\nabla\cdot u^*-\frac{\delta t}{\rho}\nabla^2 p'=0 \tag{5-19}$$

求解方程(5-19)得到修正後的壓力值 p'，則 n+1 時刻的壓力值 p^{n+1} 也可求出，並將得到 p' 代入到方程(5-17)中求得 n+1 時刻的速度場。然後檢驗計算出來速度場是否收斂，若不收斂，程式自動調整時間步長，直到獲得收斂的速度場。最後，在求得新時刻速度場和壓力場後，再應用 Hirt-Nichols 的 donor-acceptor 交替共軛方法計算出各個單元體 n+1 時刻的的流體體積函數 F 值，並重構新時刻的自由表面和位置，同時更新其他的變數。

(4) 底質掏刷模式 (Sediment Scour Model)

a. 模型概述

FLOW-3D 的泥沙沖刷模組主要來預測泥沙的輸沙侵淤過程，這個模型可以同時模擬不同屬性之沙礫、淤泥以及非黏性沉積物等於任何流場的流動，雖然 FLOW-3D 設計的泥沙運動必須發生在單相流中，但也適用於兩相流，只是兩相流中泥沙不會與第二流體對流或互動。FLOW-3D 的底質掏刷模式的物理特性：

(a) 非線性固定床面(Packed bed)的滲透膨脹(Expanded bed)至沙層懸浮(Suspended bed)的過程。

(b) 底移質(Bed load)因重力因素的漂移搬運與沉積。

其漂沙模式之連續方程式與動量方程式各表示為：

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{5-20}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{s,i}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u}_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla P + \bar{F} - \frac{K_i}{f_{s,i}\rho_{s,i}} \bar{u}_{r,i} \tag{5-21}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + \bar{F} \tag{5-22}$$

$\bar{u}_{s,i}$：沉積物 i 的速度，$\bar{u}$：平均流速，$\rho_{s,i}$：沉積物 i 的密度，K_i：沉積物 i 的拖曳函數 (Drag funtion)。

掏刷模式的假設及流體固體介面變化需引用相關的經驗公式，至於掏刷的速率則可藉由水工模型試驗予以調整。

b. 紊流模型與選擇

紊流模型的好壞決定了沖刷模組的成敗，FLOW-3D 中包含五種紊流模型，分別是混合長度模型、一方程模型、標準 $k-\varepsilon$ 模型、雷諾平均 ($RNG\, k-\varepsilon$) 模型和大渦模擬（Large eddy simulation）。前四種模型需要設置紊流參數，大渦模擬模型雖然不需要設置紊流參數，但是它主要適用於三維數學模型，而且對網格尺寸的要求非常高。FLOW-3D 泥沙沖刷模組

適用所有的紊流模型，但一般建議使用RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型，因為RNG $k-\varepsilon$ 紊流模適合模擬劇烈變形的底層邊界。

RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型方程式：

$$\frac{\partial k_T}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial k_T}{\partial x}+uA_y\frac{\partial k_T}{\partial y}+uA_z\frac{\partial k_T}{\partial z}\right\}=P_T+G_T+Diff_{k_T}-\varepsilon_T \tag{5-23}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x}+uA_y\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y}+uA_z\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z}\right\}=\frac{CDIS\cdot\varepsilon_T}{k_T}\left(P_T+CDIS3\cdot G_T\right)+Diff_\varepsilon-CDIS2\frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \tag{5-24}$$

其中，P_T 為速度梯度引起的紊流動能 k 的產生項，G_T 為浮力引起的紊流動能產生項，對於不可壓縮流體，G_T=0，ε_T 為紊流動能耗散率。P_T 和 G_T 的運算式如下：

$$P_T=CSPRO\left(\frac{u}{\rho V_F}\right)\left\{\begin{array}{l}2A_x\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+2A_y\left(\frac{\partial v}{\partial y}+\xi\frac{u}{x}\right)^2+2A_z\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial x}+R\frac{\partial u}{\partial y}-\xi\frac{v}{x}\right)\\ \left[A_x\frac{\partial v}{\partial y}+A_y\left(R\frac{\partial u}{\partial y}-\xi\frac{v}{x}\right)\right]+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\left(A_z\frac{\partial u}{\partial z}+A_x\frac{\partial w}{\partial x}\right)\\ \qquad+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+R\frac{\partial w}{\partial y}\right)\left(A_z\frac{\partial v}{\partial z}+A_yR\frac{\partial w}{\partial y}\right)\end{array}\right\} \tag{5-25}$$

$$Diff_{k_T}=\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_kA_x\frac{\partial k_T}{\partial x}\right)+R\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_kA_y\frac{\partial k_T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_kA_z\frac{\partial k_T}{\partial z}\right)+\xi\frac{\nu_kA_xk_T}{x}\right\} \tag{5-26}$$

$$Diff_\varepsilon=\frac{1}{V_F}\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_\varepsilon A_x\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x}\right)+R\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_\varepsilon A_y\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_\varepsilon A_z\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z}\right)+\xi\frac{\nu_\varepsilon A_x\varepsilon_T}{x}\right\} \tag{5-27}$$

$$\nu_T=CNU\frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \tag{5-28}$$

$$\mu=\rho\left(\nu+\nu_T\right) \tag{5-29}$$

其中，ν_T 為運動粘滯係數，μ 為動力粘滯係數。在直角坐標系中，R = 1，ξ = 0。CSPRO 為紊流參數，預設值為 0。

選擇紊流模型（one equation, two equation, 或 RNG $k-\varepsilon$ model），不建議使用 dynamically computed maximum turbulent mixing length model，因為該模型顯示，接近底床載介面時計算結果不是很理想，可能是自動縮小了紊流的長度。因此，最好直接給定最大的紊流混合長度(maximum turbulent mixing length)。因為在RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型中為了控制紊流能耗散率(式 5-30)，ε_T 模型中引入了紊流特徵長度參數 TLEN。TLEN 長度設置太小將高估能量耗散，底床載邊界上幾乎沒有動靜；太大則能量耗散值偏小從而導致不能準確模擬紊流。經過大量的數值模擬，FLOW-3D 預設 TLEN 取計算域三個方向最小長度的 7%倍。進行底床沖刷預測數值模擬時，計算域通常在垂直方向最小，如果從 Z_{min} 至 Z_{max} 是 50m，則 TLEN 的輸入值等於 $50\times0.07=3.5$ 。

$$\varepsilon_T = CNU\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \tag{5-30}$$

CNU 紊流黏度預估係數，預設值為 0.09。

在RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型求解式（5-24）中的 ε_T 值時，如果小於式（5-30）的計算值，則程式將式（5-24）的計算值作為 ε_T 的值。RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型中引入的各個參數 CNU、v_k 、v_ε 、CDIS1 和 CDIS2 均為常數，其值見表 5.2。

表 5.2 RNG $k-\varepsilon$ **紊流模型系數值**

係數項	CNU	v_k	v_ε	CDIS1	CDIS2
數值	0.085	1.39	1.39	1.42	1.92

5.1.2 邊界與網格處理方法

1. VOF 自由液面處理方法

FLOW-3D 的自由液面追蹤法使用 VOF 計算，可以精確的模擬流體介

面結合與分離狀態，FAVOR 定義矩形網格內一般幾何形狀的區域，利用矩形立方體所構成的網格定義複雜的幾何形體，定義每一個矩形立方體六個面的流通面積比與自由出入的體積。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中，例如，在二個元素的公共面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數，若沒有可讓流體自由通過的面積，則不可能有對流的通量。FAVOR 的優越之處在於它提供建立模型時的彈性。對於不可壓縮、黏性流而言，FAVOR 以下列方程組表示：

$$\nabla \cdot \left(\vec{A}\vec{u}\right) = 0 \tag{5-31}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{V}\left(\vec{A}\vec{u} \cdot \nabla\right)\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{1}{\rho V}\left(\nabla \vec{A}\right) \cdot (\mu \nabla)\vec{u} + g \tag{5-32}$$

其中

$$\vec{A}\vec{u} = \left(A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z\right) \tag{5-33}$$

$$\left(\nabla \vec{A}\right) = \left(\frac{\partial}{\partial x}A_x, \frac{\partial}{\partial y}A_y, \frac{\partial}{\partial z}A_z\right) \tag{5-34}$$

上式中 $\bar{A}$ 是相關於流體可自由通過的部分面積，V表示可自由進出的部分體積，ρ是密度， P是壓力，$\bar{u}$ 表示速度，μ是流體的黏滯係數，g表重力。

FLOW-3D除了能夠計算單一流體的運動，亦可計算液/氣界面(不可壓縮流體/可壓縮流體)，甚至模擬多相流體界面。

定義一 VOF 函數F (X, Y, Z) 代表控制體積內不同特性流體所佔體積分率，以液/氣體混合界面為例，F=0代表控制體積內充滿氣體，F=1則表示控制體積內皆為液體，而0<F<1時存在自由液面。F函數亦應滿足直角坐標下的控制方程式：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(FA_x u\right) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(FA_y v\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(FA_z w\right) + \xi\frac{FA_x u}{x}\right] = F_{DIF} + F_{SOR} \tag{5-35}$$

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}\right) + R\frac{\partial}{\partial y}\left(v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}\right) + \xi \frac{v_F A_x F}{x}\right] \quad (5\text{-}36)$$

其中，$v_F = c_F \mu/\rho$ 代表擴散常數，c_F 為參照紊流施密特數，F_{DIF} 是紊流擴散項，藉以計算兩種流體發生紊流混合時的分佈狀況。F_{SOR} 與 R_{SOR} 具相關性，表示體積分率的時間變化率。

2. 網格處理方法－多區塊結構網格

多區塊結構網格 (Multi-block Grids)，能減少網格數目，網格與幾何現狀自動耦合，精確、穩定、可以加快運算的收斂性。

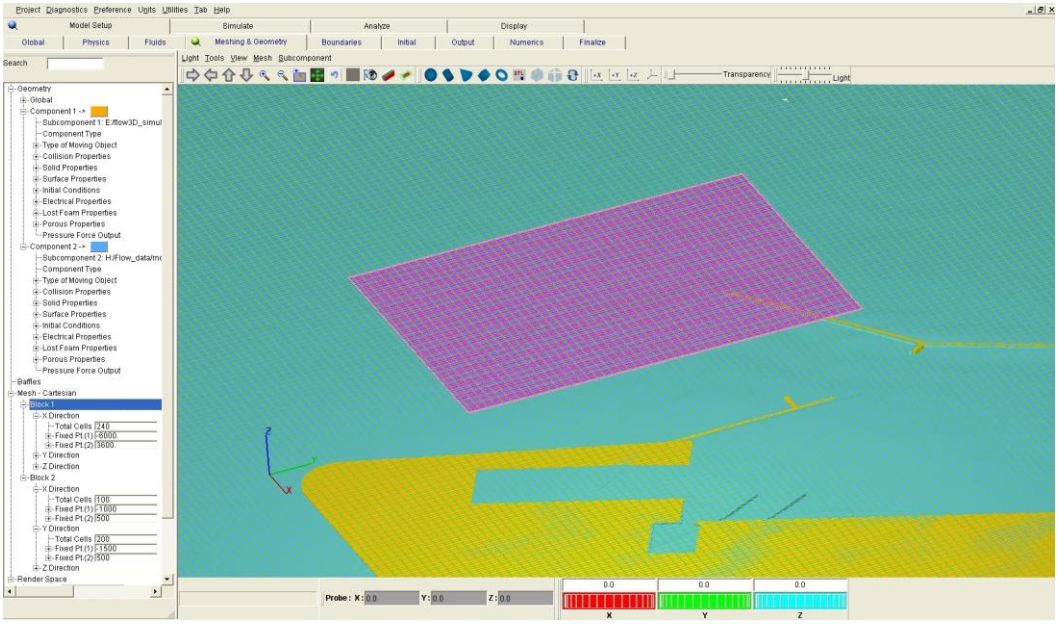


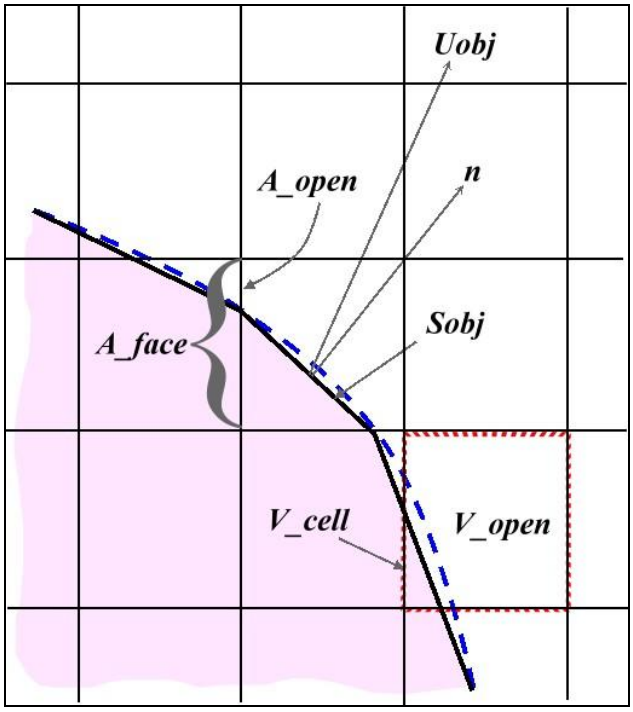
圖 5.1 多區塊結構網格設定示意圖

3. FAVOR障礙物體積分率表示法

FLOW 3D 數值方法採用FAVOR表示法(Fractional Area/Volume Obstacle Representation）及控制體積（Control Volume）的觀念，使網格與幾何形狀完全獨立。這種方法比變形網格（Deformation Mesh）的方法還要簡單，避開了冗長的網格整理工作，即使模型非常複雜，也能夠精確的描述外型。利用矩形立方體所構成的網格，能夠定義每一個矩形立方體六個面的流通面積比與自由出入的體積，如圖 5.2。這些部分面積與體積將會結合到有限體積

的運動方程式中，例如，在自由液面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數，若沒有可讓流體自由通過的面積，則不可能有對流的通量。

對於防波堤堤頭地形沖刷的模擬，FLOW-3D可以波場或流場分別進行模擬，或是當造波邊界導入流場時，FLOW-3D的求解器可同時混合流場與波場的數值計算。



體積比：

$$Vf = \frac{V_open}{V_cell}$$

面積比：

$$Af = \frac{A_open}{A_face}$$

來源項：

$$-\frac{\partial Vf}{\partial t} = \frac{\vec{U}_{obj} \cdot \vec{n} S_{obj}}{V_{cell}}$$

圖 5.2　通度係數 FAVOR 流體界面與自由液面計算示意圖

5.2 防波堤鄰近海域流場數值模擬

數值模擬流程概略分為前處理、數值求解及後處理三個階段。前處理階段：選定適當的控制模組，確立初始條件及邊界條件，劃分計算網格與生成計算節點。數值求解階段：導入離散方程，設定求解控制參數，求解離散方程，判斷求解是否收斂，若還未收斂，調整控制參數再導入離散方程；若已收斂，則以後處理展示和輸出計算結果。

5.2.1 計算範圍

本年度之數值模擬以臺中港和麥寮港附近海域為計算範圍，如圖 5.3 所示。臺中港計算範圍為13km × 17km，平均垂直深度20m，北防堤堤頭約於計算領域的中心點偏東1.5km處；麥寮港計算範圍則是7km × 7km的區域，平均垂直深度20m，西防波堤堤頭約在計算領域中心點偏北0.5km處。X、Y水平方向之網格距離50m，垂直方向之網格距離則為1m。

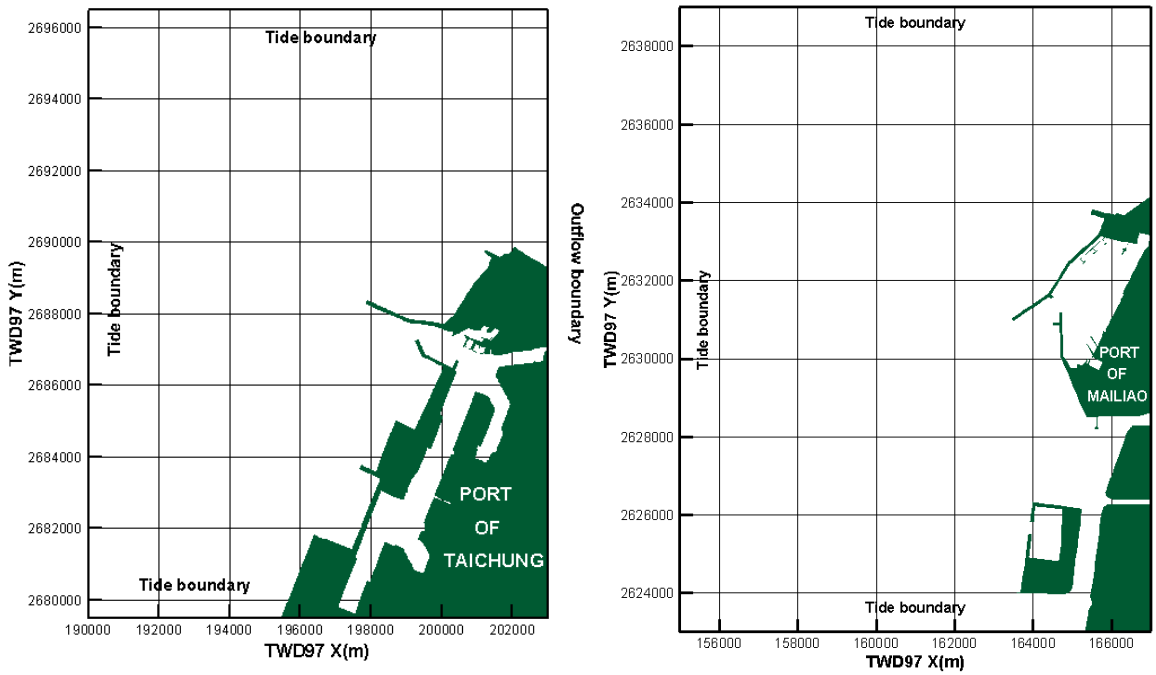


圖 5.3　臺中港與麥寮港數值模擬海域範圍示意圖

5.2.2 模式參數設定

第一年度計畫已經完成網格最佳化、防波堤結構物與邊界距離等的初步測試，簡易、快速地驗證FLOW-3D數值模式的計算成效，邊界輸入條件則選定週期性變化流速資料。網格與計算領域以及結構物的精細程度互為相依，因為FLOW-3D計算網格為結構性網格，可以根據數值計算個案的不同需求採取全域均勻網格、連結網格或巢狀網格等方式。

本年度在數值計算領域的開放水域採用潮位邊界，模擬時間由24小時潮汐資料開始，如圖5.4所示，爾後將逐步擴展時間週期。

因為臺灣沿岸海域利用定點浮標式或固定式潮位站的潮位資料為數值模式的邊界條件尚有困難，因此現階段潮位邊界引用海洋大學海洋環境資訊系海岸模式應用研究室網站所公布的臺灣附近海域潮汐水位，其潮位數值計算採用DHI所研發之MIKE 21 HD水動力模式，小區域網格解析度達 50m × 50m，每一網格潮汐調和常數包括M2、S2、K1、O1、N2、P1六個分潮，其結果與臺灣沿岸各驗潮站現有之調和常數比較，發現整體來說兩者差異不大，與實測資料驗證結果，如圖5.5所示。

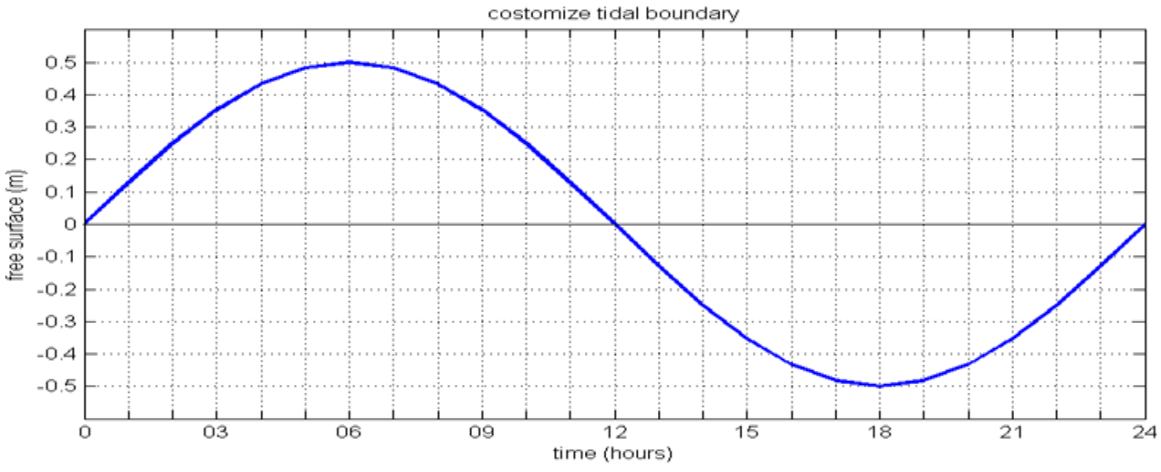
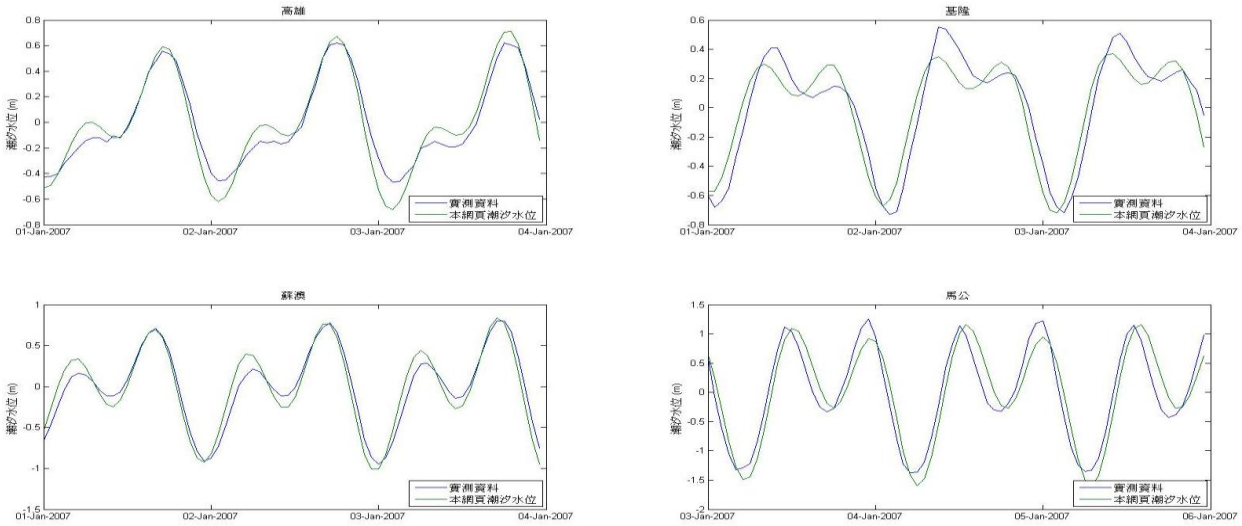


圖 5.4　開放水域之時序列流速邊界條件



資料來源：海洋大學海洋環境資訊系海岸模式應用研究室

圖 5.5　基隆、蘇澳、高雄及馬公模式與實測資料潮位比較圖

1. 建立潮位邊界

以臺中港防波堤堤頭為原點，開放水域距離約8000m處設定計算領域的潮位邊界；北側邊界潮位座標(24°22'08.68"N、120°28'21.53"E) (TWD 2696000N、196500E)，西側邊界潮位座標(24°17'47.80"N、120°24'32.09"E) (TWD 2685000N、190000E)，南側邊界潮位座標(24°13'12.37"N、120°28'21.53"E) (TWD 2679500N、196500E)。數值模擬範圍如圖5.3所示，計算所得之邊界潮位時序圖如5.6所示。

以麥寮港防波堤堤頭為原點，開放水域距離約8000m處設定計算領域的潮位邊界；北側邊界潮位座標(23°51'10.22"N、120°07'34.5"E) (TWD 2639000N、161000E)，西側邊界潮位座標(23°46'48.95"N、120°04'04.32"E) (TWD 2631000N、155000E)，南側邊界潮位座標(23°42'30.16"N、120°07'34.5"E) (TWD 2623000N、161000E)。數值模擬範圍如圖5.3所示，計算所得之邊界潮位時序圖如5.7所示。

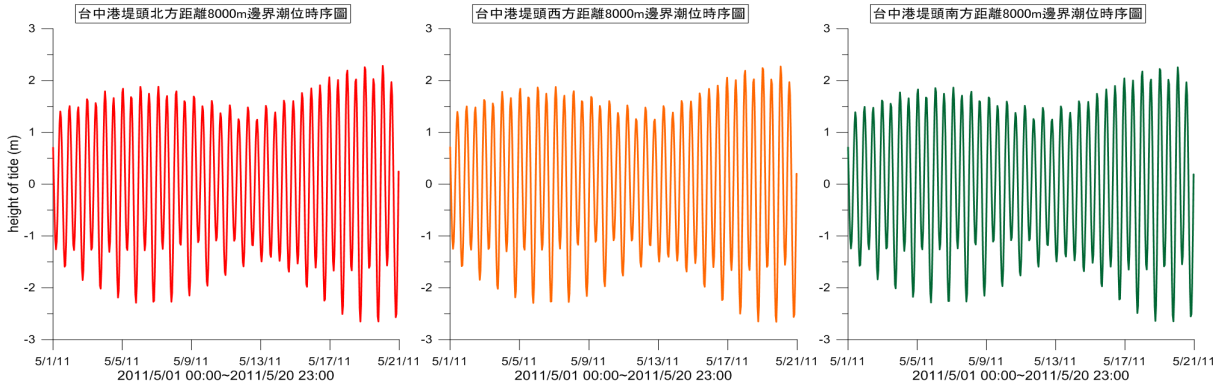


圖 5.6　臺中港堤頭距離 8000m 之邊界潮位時序圖

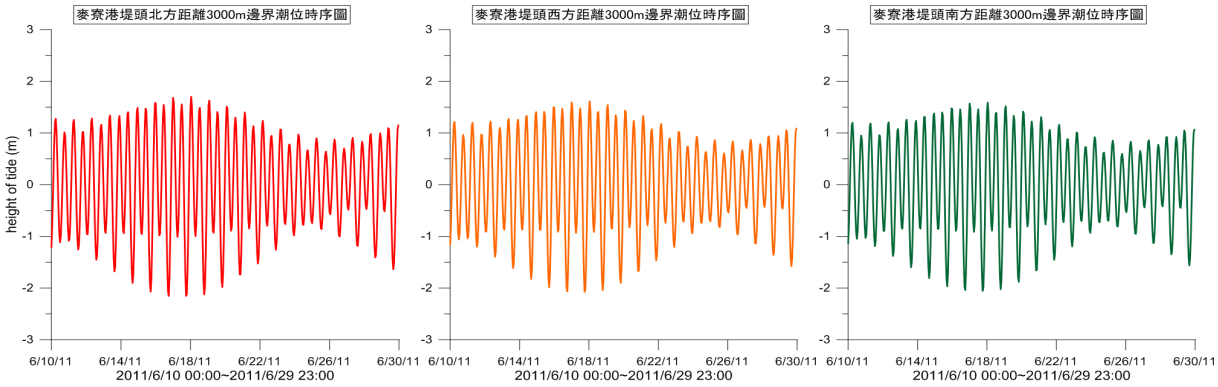


圖 5.7　麥寮港堤頭距離 8000m 之邊界潮位時序圖

2. 細部參數設定值：

(1) Global Tab (指定模擬時間、指定單位、流體性質等)

- Interface tracking：Free surface (自由表面追蹤)。
- Number of fluids：One fluid (單相流)。
- Finish condition：Finish time (86400sec)。
- Flow mode：Incompressible (不可壓縮)。

(2) Physics Tab (指定物理量)

- Gravity：Gravity component in the z-direction (-9.81) (重力指向z方向)。
- Viscosity & Turbulence：選擇 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型。

(3) Fluid Tab (載入設定流體)

- Fresh water at 20^{o}C。

(4) Meshing & Geometry (網格及物件基本設定)

- 載入港口結構物圖檔。
- 設定計算領域網格尺寸(40m × 40m × 1m)。

(5) Boundaries Tab (指定邊界條件)

- 開放水域：設定潮位時序變化，在北側(Ymax)、南側(Ymin)及西側(Xmin)設定潮位邊界，如圖 5.3 所示。
- 封閉水域(Xmax)：港域設施與陸地外廓邊界內的範圍。

(6) Initial Tab (初始條件設定，可以指定初始流體狀態，包含壓力等)

- Hydrostatic pressure in z-direction (設定 z 方向靜水壓)。
- Initial fluid：邊界潮位。

5.2.3 潮位邊界流場模擬結果與分析

以2011年6月10日至6月15日間模擬所得之潮位資料為邊界水位條件，輸入建置的數值模型，其中模型為等深-20m的平坦底床，用以模擬麥寮港附近海域漲退潮的流況，擷選部分計算結果如圖 5.8所示。模擬過程共經歷10次漲潮與9次的退潮，分就各潮段的流場情況討論如下。

1. 麥寮港漲潮階段

此海域的漲潮段主要潮流流向為北向，囿於模式啟動時間，第一次漲潮時的流場流速較為偏小且形式較為不同，自第二次漲潮段之後的情況已趨於相似。除了靠近北方邊界的區域流速較大外 (與北邊界給定條件有關)，以麥寮港西防波堤堤頭為起點，向北形成高流速的帶狀區域，此區域流速多超過1.25m/sec，南北長幅約 3~4km、東西寬幅 1.5~2km，受防波堤外形作用，堤頭處流向為西北至北北西之間，向北則漸向東向偏轉，因此於西防波堤北側產生順時鐘旋轉型渦流。比較歷次高速區帶的發展規模與潮位關係，當漲潮段起始低潮位越低，則高流速的發展範圍越大，如6月12日的低潮位是記

錄中最高的低潮位，則其高速帶的尺度是最小的，而記錄中的最低低潮位是6月14日，此次漲潮段的高速區域甚至與北邊界的高速區相連。另外，鄰接此高速區帶的西南海域，則形成扇狀低流速帶，平均流速小於 0.25m/sec。

2. 麥寮港高潮階段

高潮時水頭差縮小形成停潮期，模擬區域內的流速迅速減小，而潮位的傳遞具有延遲性，當南方邊界流速已降低趨近於靜止，北方海域仍有南北幅長超過 5km 的高速流域。初抵高潮位時，大部分海流流向仍維持北向，尚未偏轉成退潮流向。西防波堤北側，由於堤頭引發的渦流，仍存在有平均0.5m/sec 的流速，此流向西南方，保持與防波堤延伸方向平行。原本麥寮港外西南海域的低流速區域變化不大，但在其鄰接的正北方，亦同時形成圓形的低速流域。

3. 麥寮港退潮階段

邊界的水位變化時序進入退潮段後，整體流向由北轉為南向，高流速的區域自北方邊界向南移動，大約穩定於麥寮港外西方至西北西方海域。靠近西防波堤側，以堤頭為起點存在向南延伸的帶狀高流速系統，流向為南至南南東之間，流速多超過 1.25m/sec，東側並伴隨一逆時鐘旋轉的渦流系統。此區域會隨著退潮起始的高潮位大小有所變化，如資料中的6月14日退潮段起始高潮位最大，則此堤頭產生的高速流域與西方的高速區相互交連，使縱坐標 2628~2636km 間的平均流速高達 1.5m/sec。

4. 麥寮港低潮階段

低潮位的流場在麥寮港西北至北方海域形成低流速區域，在西南側存在流速趨近於 0.75m/sec的海域。其中在麥寮港的正南方海域，受原先逆旋渦流的影響，海流流向為北，並保持相對高於周遭的流速。在低潮潮位大幅偏低時，麥寮港港口會生成西南流向的退流，如6月13日的低潮最為明顯，而6月14日的低潮亦有相同的徵兆。

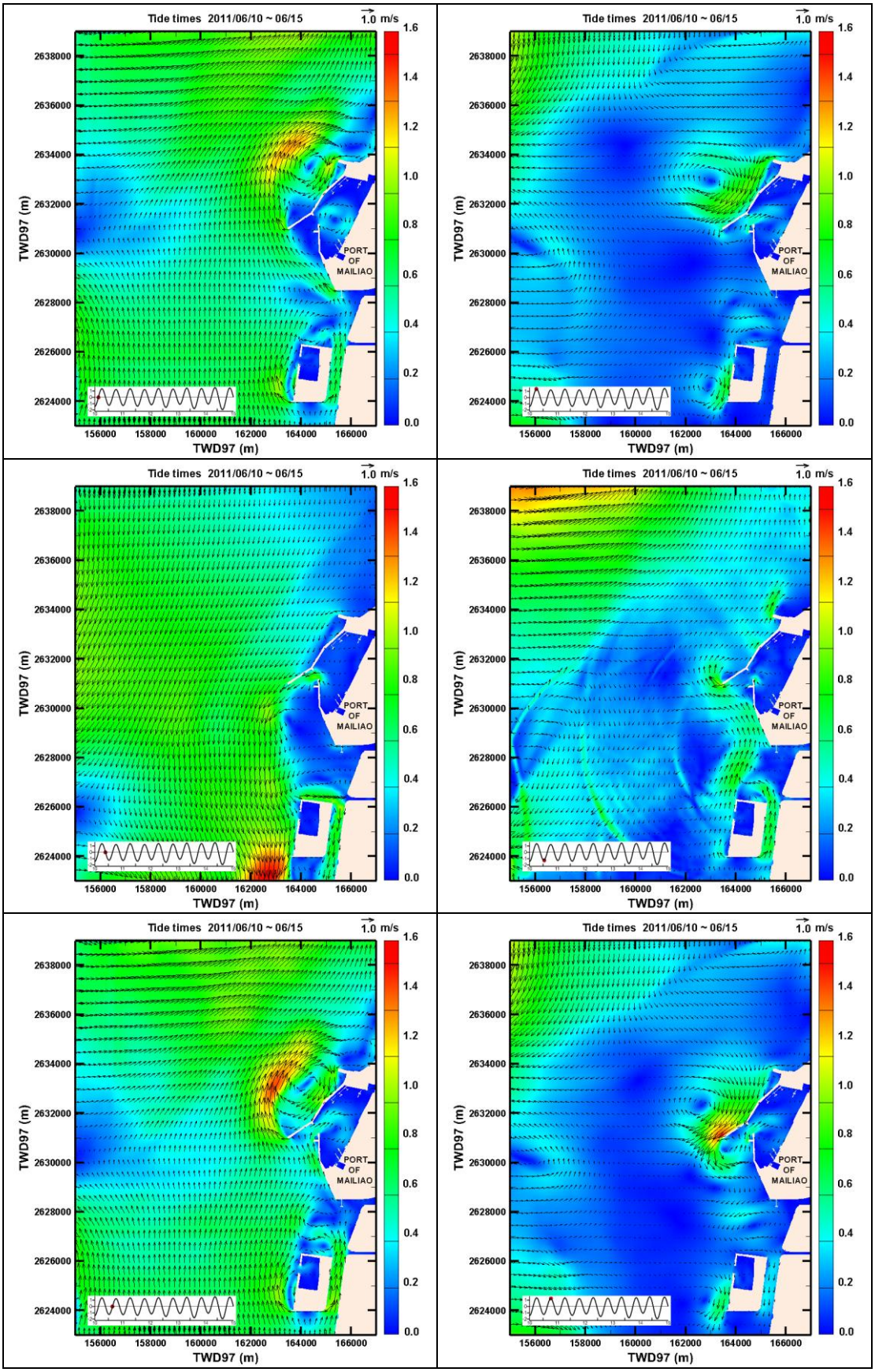


圖 5.8　2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

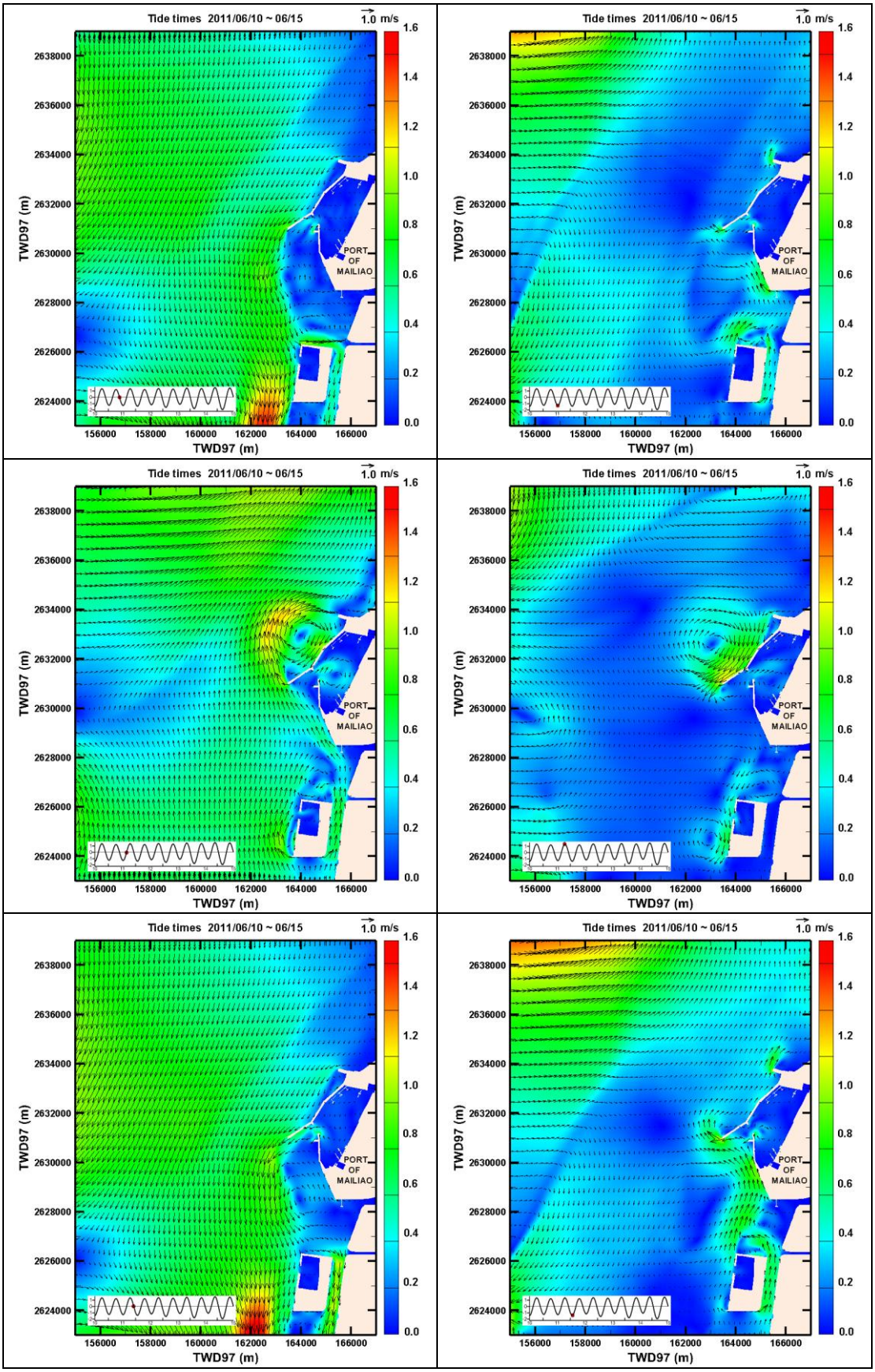


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

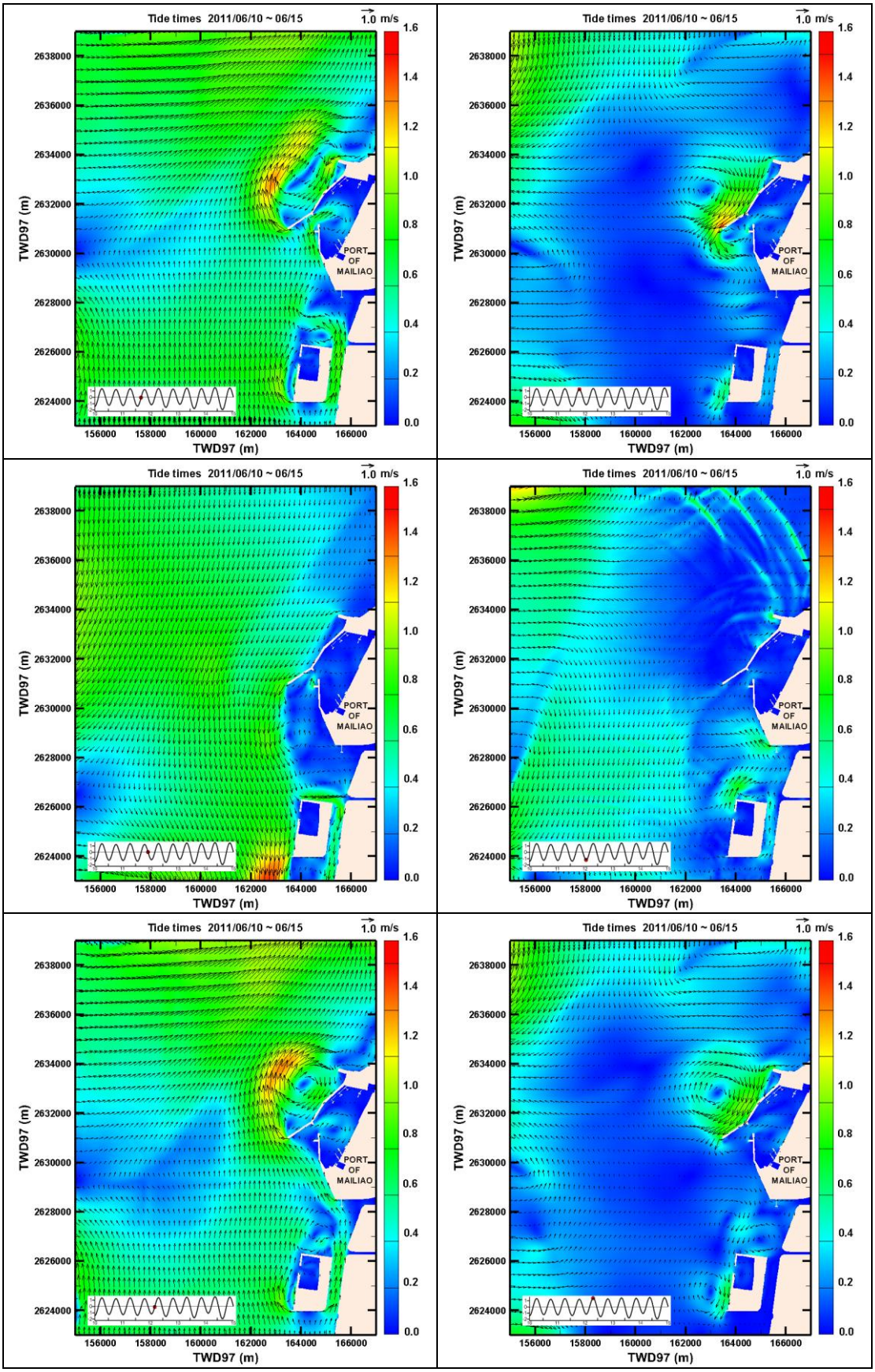


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

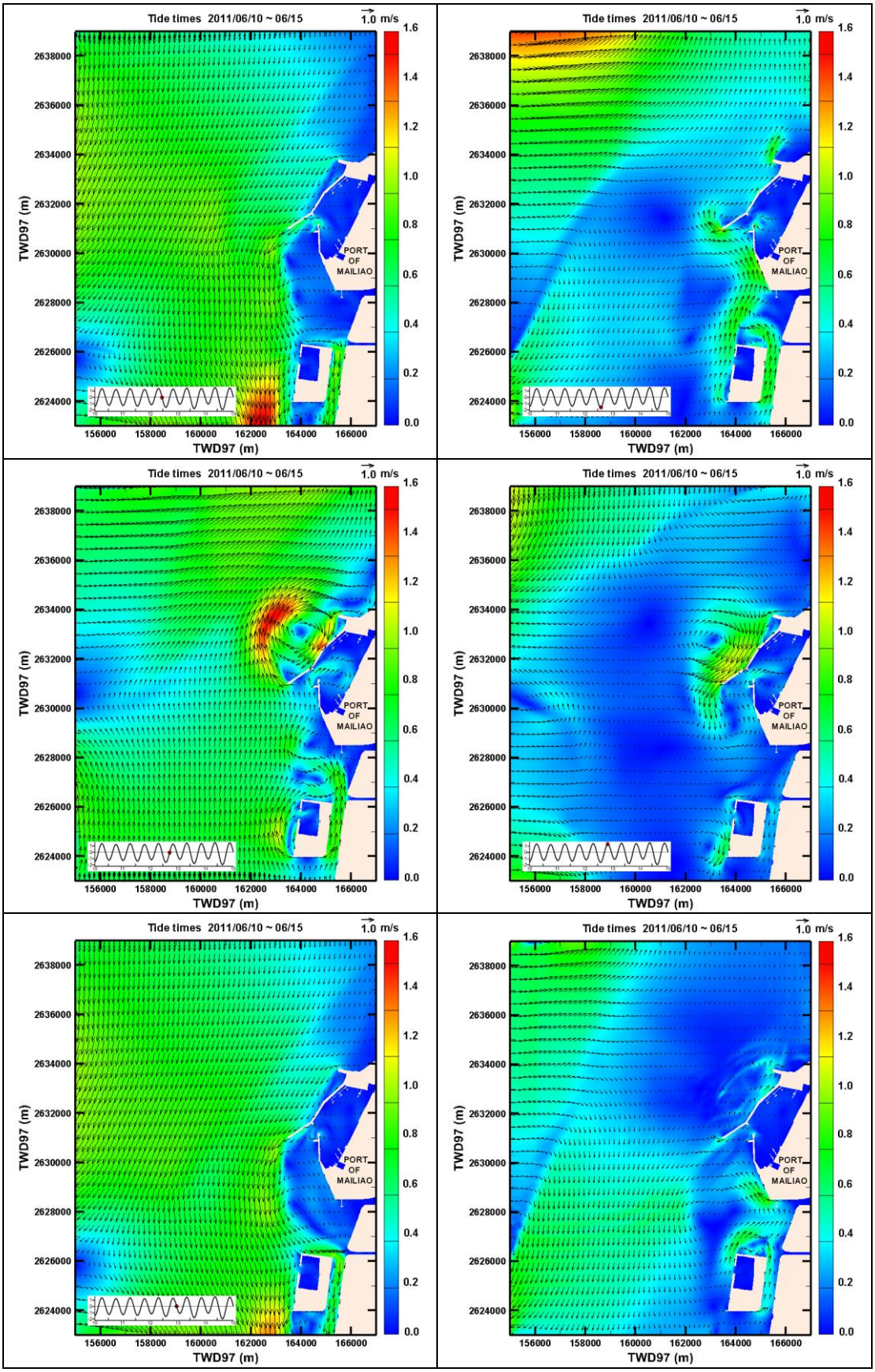


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

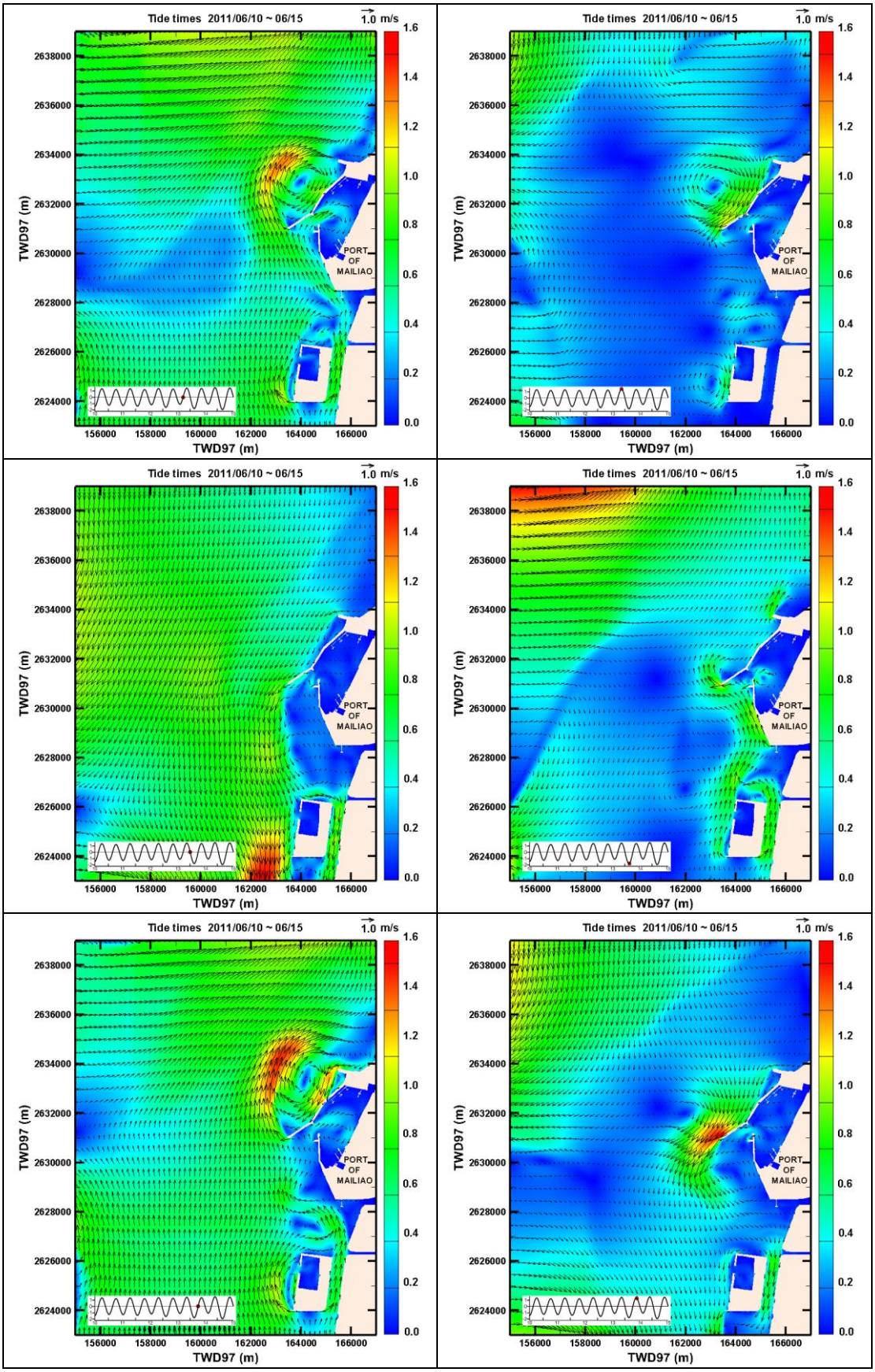


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

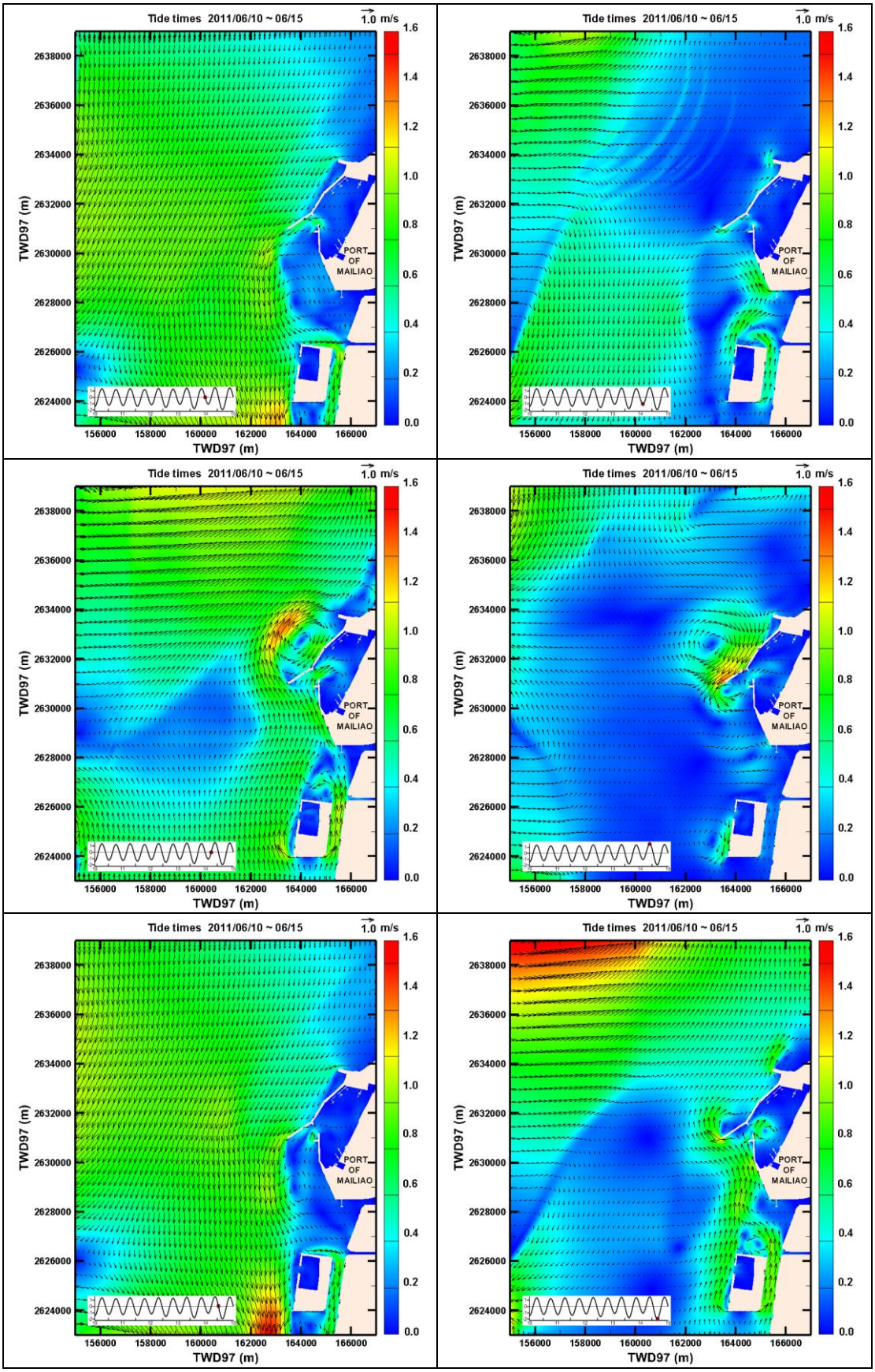


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

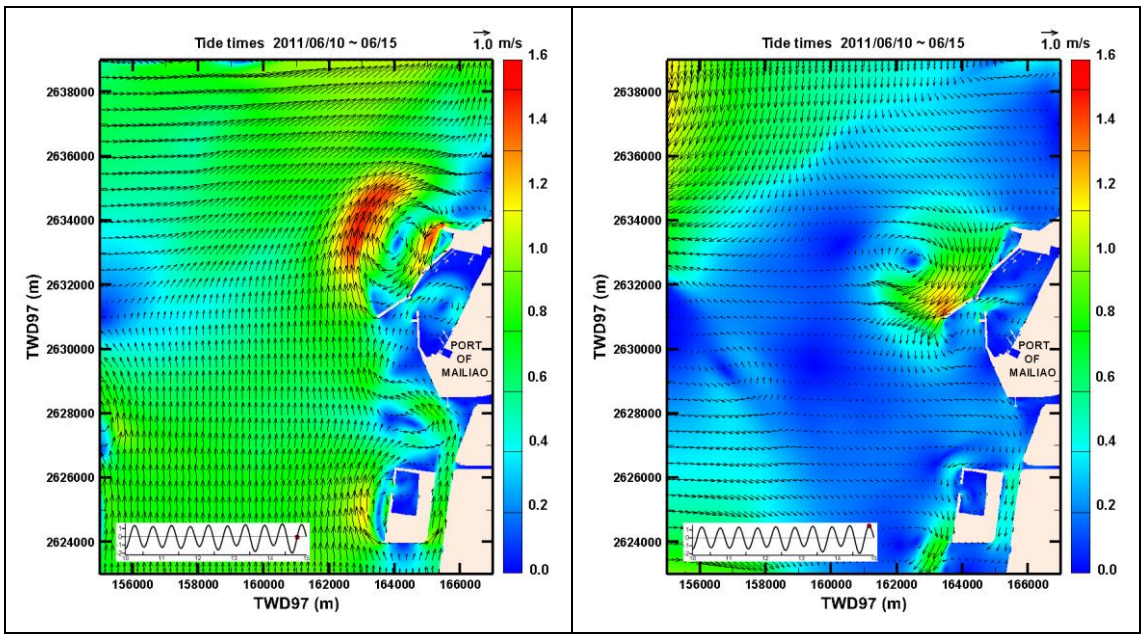


圖 5.8(續) 2011/06/10 至 2011/06/15 麥寮港附近海域漲退潮流況分佈

5.3 防波堤鄰近海域造波數值模擬

數值模擬流程概略分為前處理、數值求解及後處理三個階段。前處理階段：選定適當的控制模組，確立初始條件及邊界條件，劃分計算網格與生成計算節點。數值求解階段：導入離散方程，設定求解控制參數，求解離散方程，判斷求解是否收斂，若還未收斂，調整控制參數再導入離散方程；若已收斂，則以後處理展示和輸出計算結果。

5.3.1 FLOW-3D 造波模式驗證

本數值模式以孤立波通過半無限長直立堤之結果與Liu(1984)之實驗結果比較。比較數值與實驗資料及理論值後證明了本模式可以準確的模擬波浪與三維結構物之交互作用。

實驗是在一座9m × 4m的平面水槽進行，長度0.98m的鋁片固定在水槽側邊的垂直鋼管，藉由鋼管的轉動可以調整該鋁片與入射波的夾角。水槽上游為造波邊界，設置一直推往復式造波機，該造波機安裝一3.5m之鋁製浪板，因為配合兩側的消波設施，因此浪板略窄於水槽之寬度，靠近造波機浪板兩端與消波設施之間布設直立短牆防漏。實驗7的波高計佈置圖，入射波與半無限長直立堤夾角80度，No.9波高計位於波浪　入射區，其量測之波高值作為實驗7波高參照之用，No.1、No.3、及No.5波高計位於波浪反射區，No.2、No.4、No.6及No.8位於反射與繞射過渡區，No.7波高計位於隔板遮蔽之繞射區，孤立波入射角度與半無限長直立堤的相對角度如圖5.9所示。

表 5.3　實驗參數表

experime	h(cm)	a/h	a(cm)	Angel in degrees
1	5.22	0.42	2.1924	90
2	5.17	0.38	1.9646	90
3	5.07	0.13	0.6591	90
4	5.07	0.36	1.8252	90
5	5.04	0.26	1.3104	90
6	5.04	0.3	1.512	90
7	5.33	0.29	1.5457	80
8	5.28	0.28	1.4784	95.85

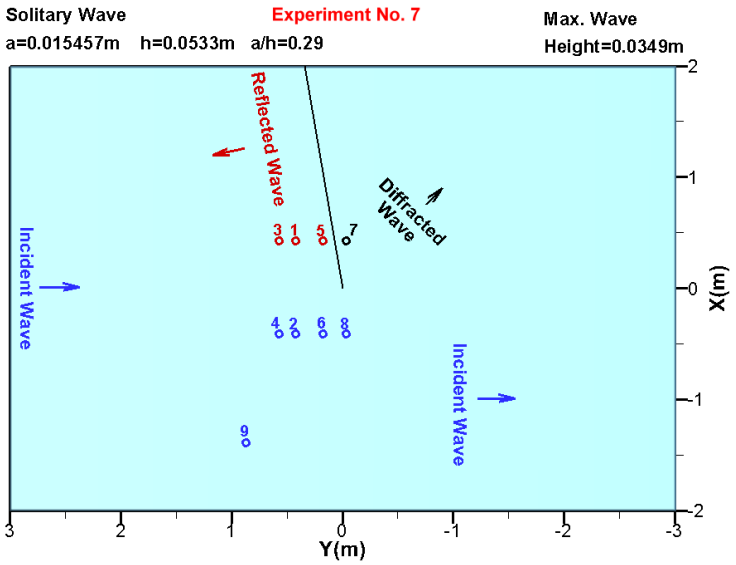


圖 5.9 孤立波實驗佈置示意圖

實驗參數如表5.3，以實驗7之結果為例，入射波與隔板的夾角為80度，位於入射區的No.9波高計(如圖5.9)所量取之入射波高為基本參考值。圖5.10顯示No.9波高計紀錄了合理的孤立波形，其尾跡則呈現微小負值。因為No.1波高計位於波浪反射區，造波3與4秒之間為入射波，4秒與5秒之間為反射波，反射波之高度低於入射波，是因為摩擦損耗。No.2波高計雖然位於反射區之外，卻是繞射反射過渡區，因此也出現較低之第二個波形。

圖5.11所示為實驗7波高計波形紀錄與理論值及數值計算結果比較，垂直軸比值的a為No.9波高計之波高，其中No.5波高計因為相對較貼近半無長限直立堤，因此最大波幅超過No.9波高計之波高。No.7波高計位於直立堤遮蔽區，所以波形相對較低，又因為直立堤而產生之渦流，因此也顯示漣漪現象。

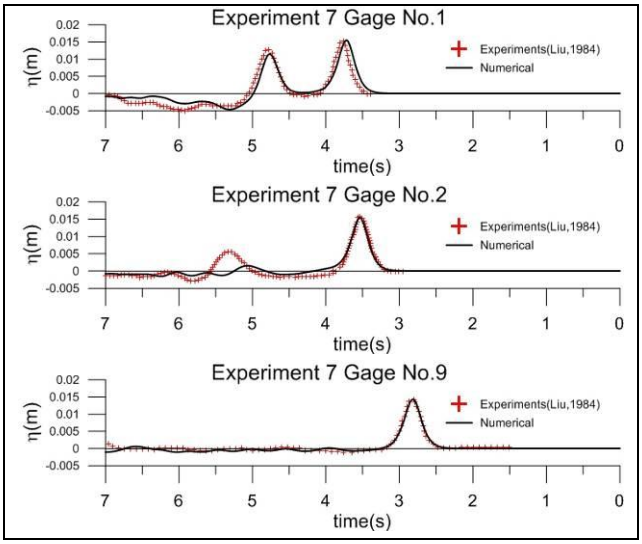


圖5.10　No.1、No.2及No.9波高計自由液面波形分佈紀錄

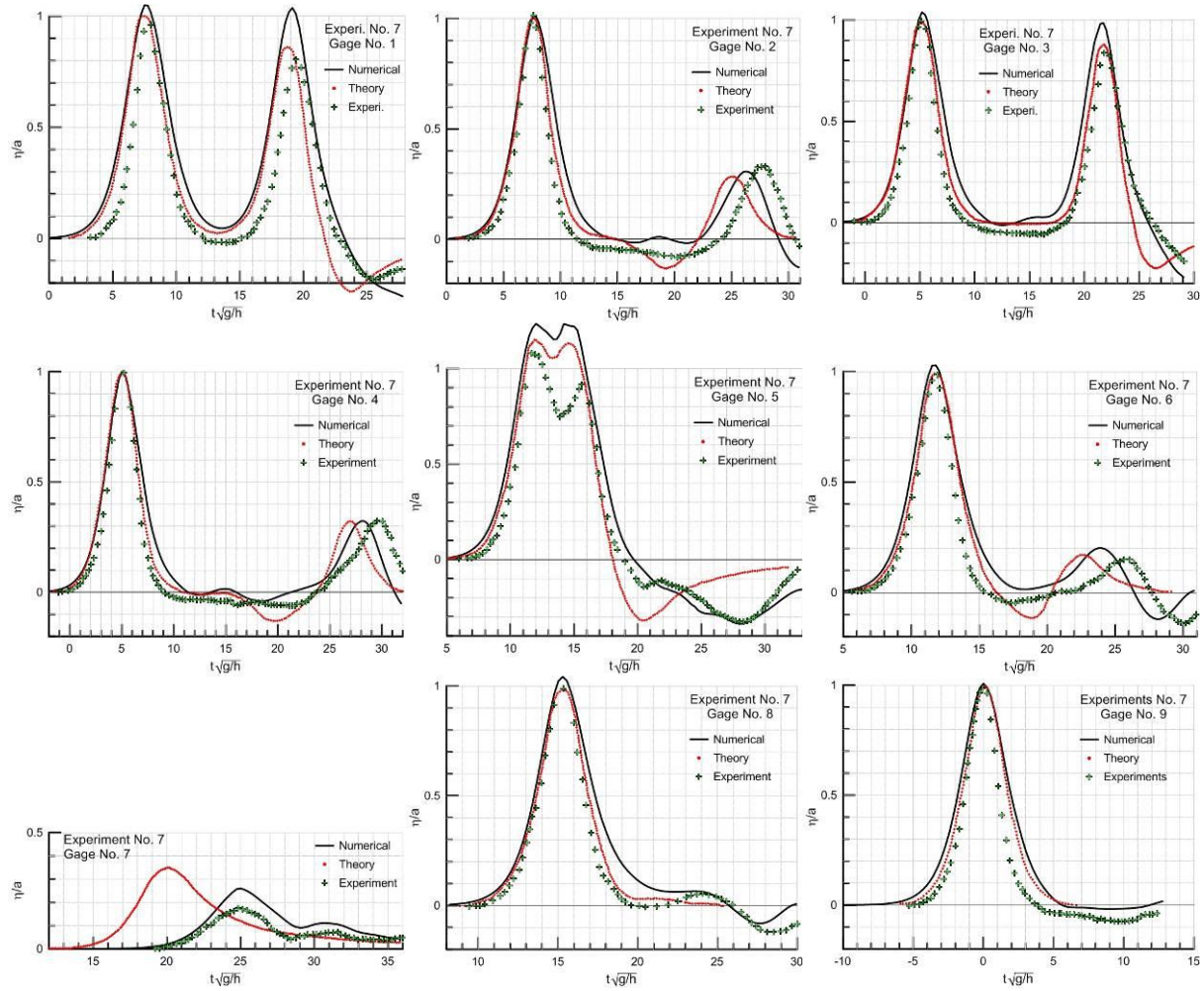


圖5.11　實驗7結果，當孤立波波高為a/h=0.29通過半無限長直立堤時，分別於入射區，反射區及繞射區所量測到之波形之時序列變化。(+)實驗資料(Liu, 1984)，(·)孤立波理論波形及(—)本數值模式之結果。

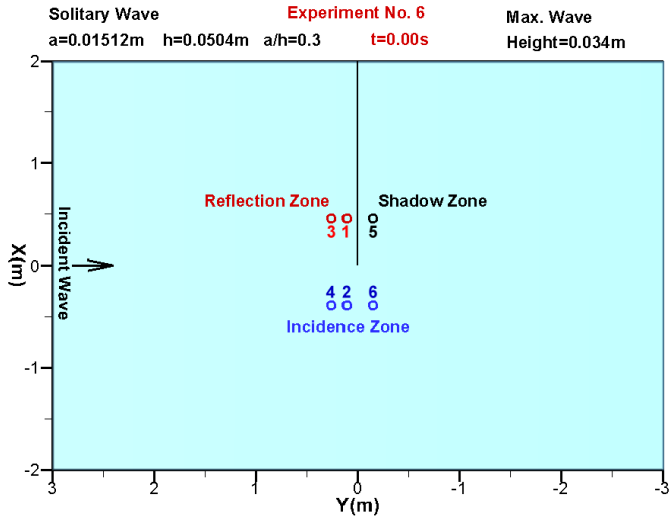


圖5.12　實驗6的波高計佈置圖，入射波與半無限長直立堤夾角90度， No.1、No.3波高計位於波浪反射區，No.2、No.4及No.6位於反射與繞射過渡區，No.5波高計位於繞射區。

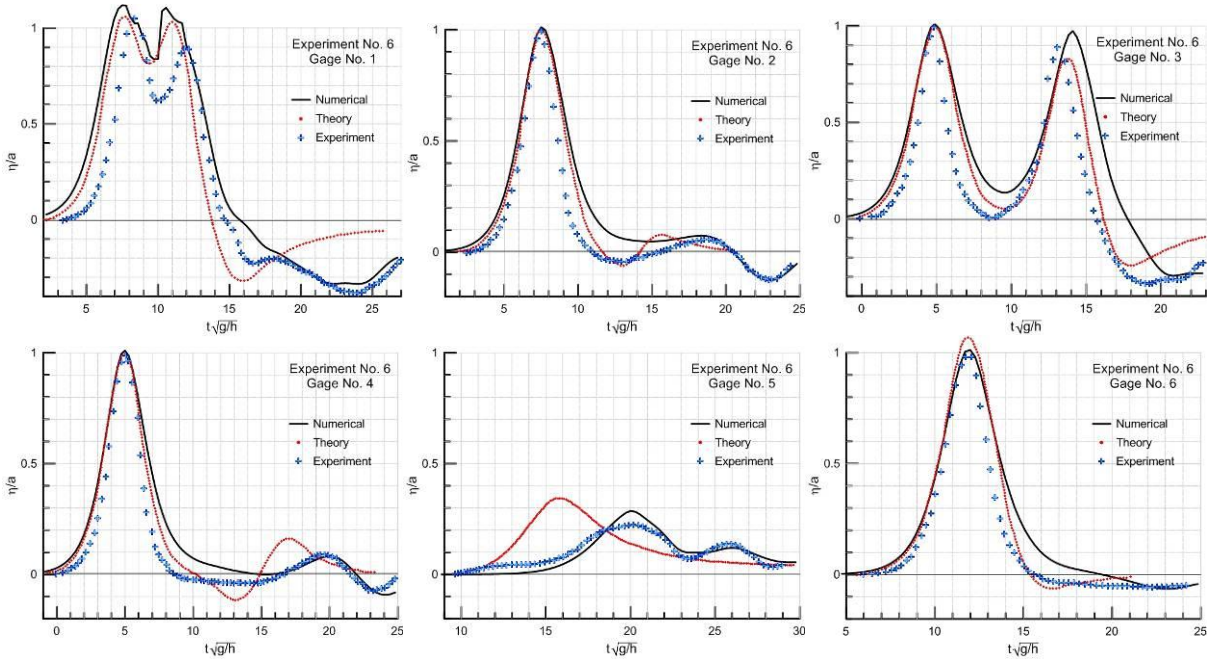


圖5.13　實驗6結果，當孤立波波高為a/h=0.30通過半無限長直立堤時，分別於入射區，反射區及繞射區所量測到之自由液面之時序列變化，垂直軸比值的a為No.9波高計之波高，(+)實驗資料(Liu, 1984)，(·)孤立波理論波形及(—)本數值模式之結果。

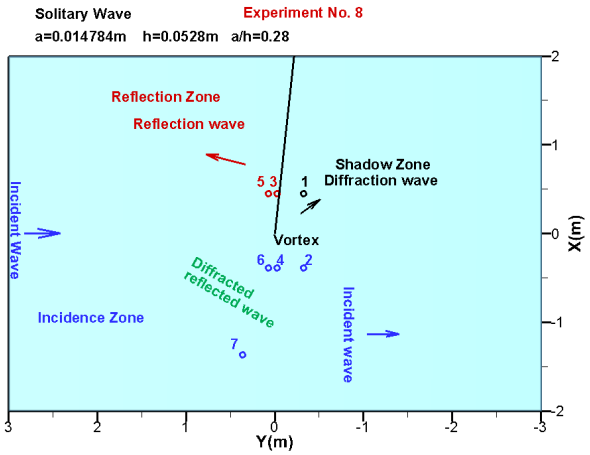


圖5.14　實驗8的波高計佈置圖，入射波與半無限長直立堤夾角95.85度，No.7波高計位於波浪入射區，其量測之波高值作為實驗8波高參照之用，No.3、及No.5波高計位於波浪反射區，No.2、No.4及No.6波高計位於反射與繞射過渡區，No.1波高計位於繞射區。

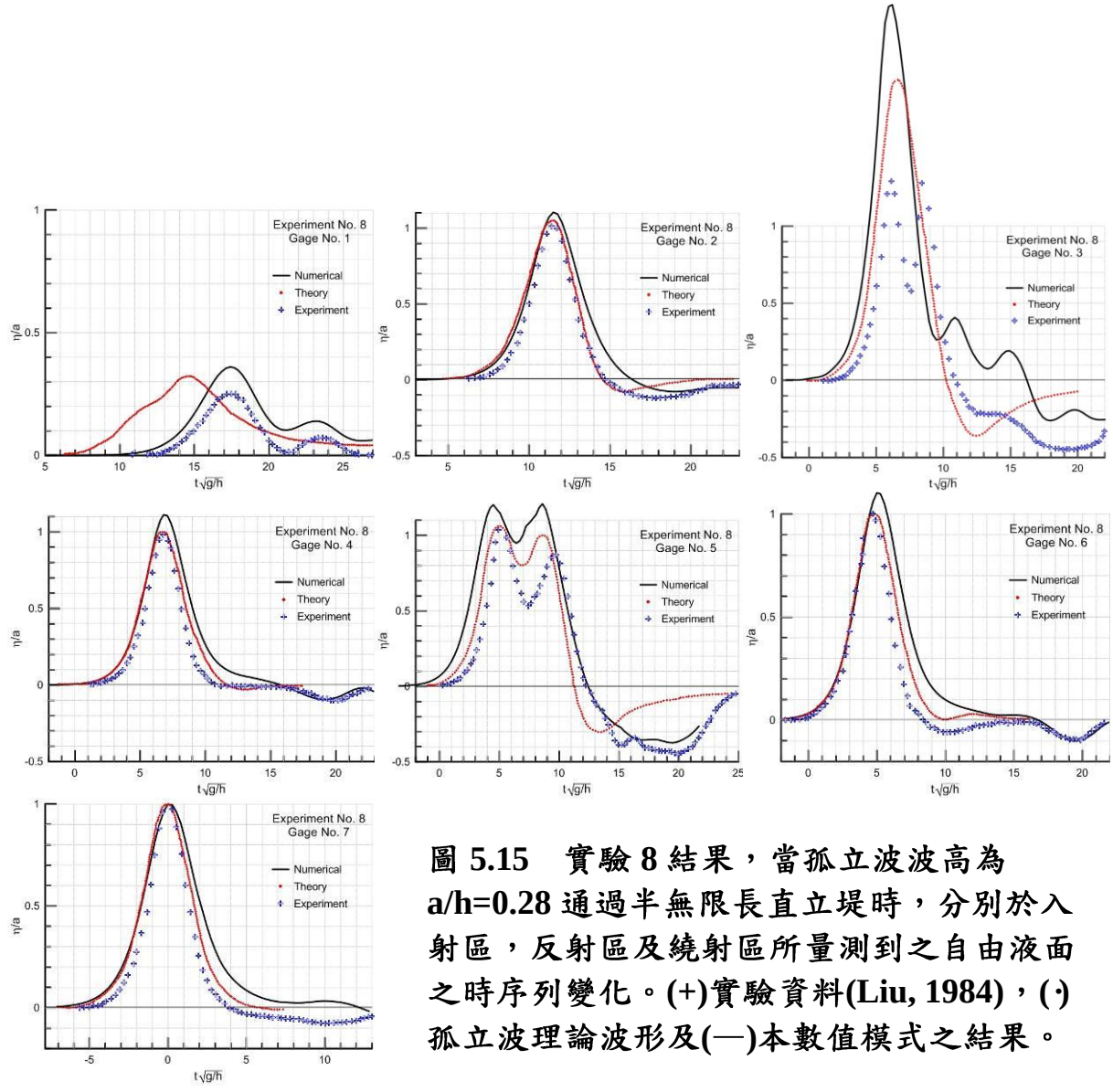


圖 5.15　實驗 8 結果，當孤立波波高為 a/h=0.28 通過半無限長直立堤時，分別於入射區，反射區及繞射區所量測到之自由液面之時序列變化。(+)實驗資料(Liu, 1984)，(·)孤立波理論波形及(—)本數值模式之結果。

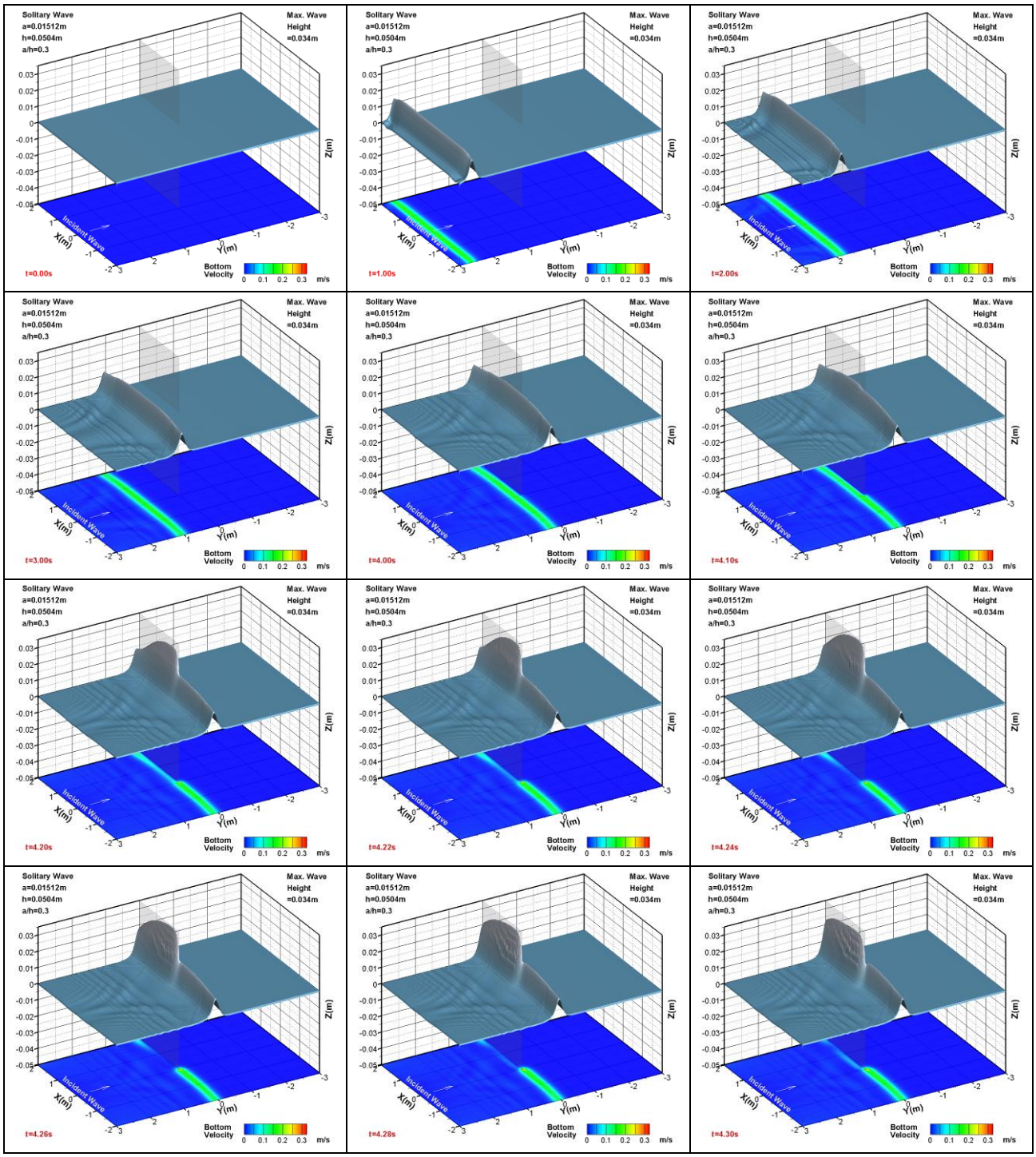


圖5.16　實驗6之數值模式計算結果波形與底床流速同步時序紀錄

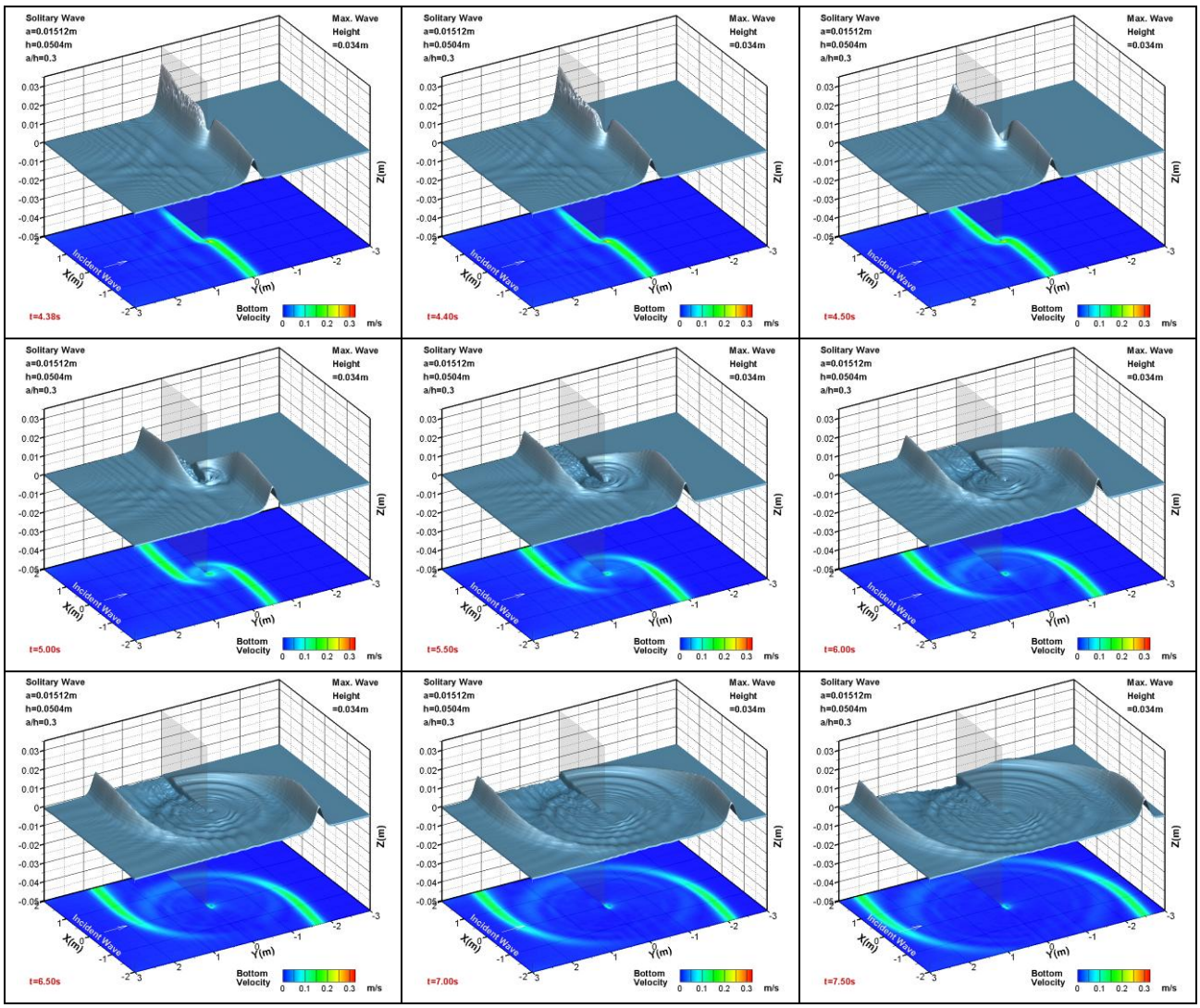


圖5.16(續)　實驗6之數值模式計算結果波形與底床同步波速時序紀錄

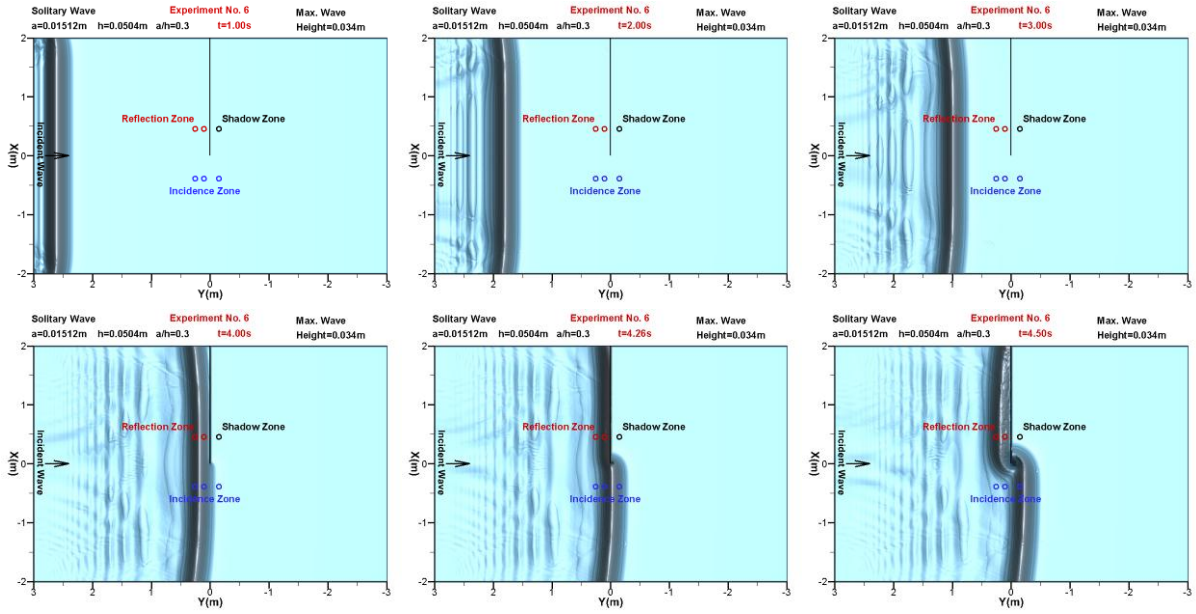


圖5.17　實驗6之數值模式計算結果波形時序紀錄

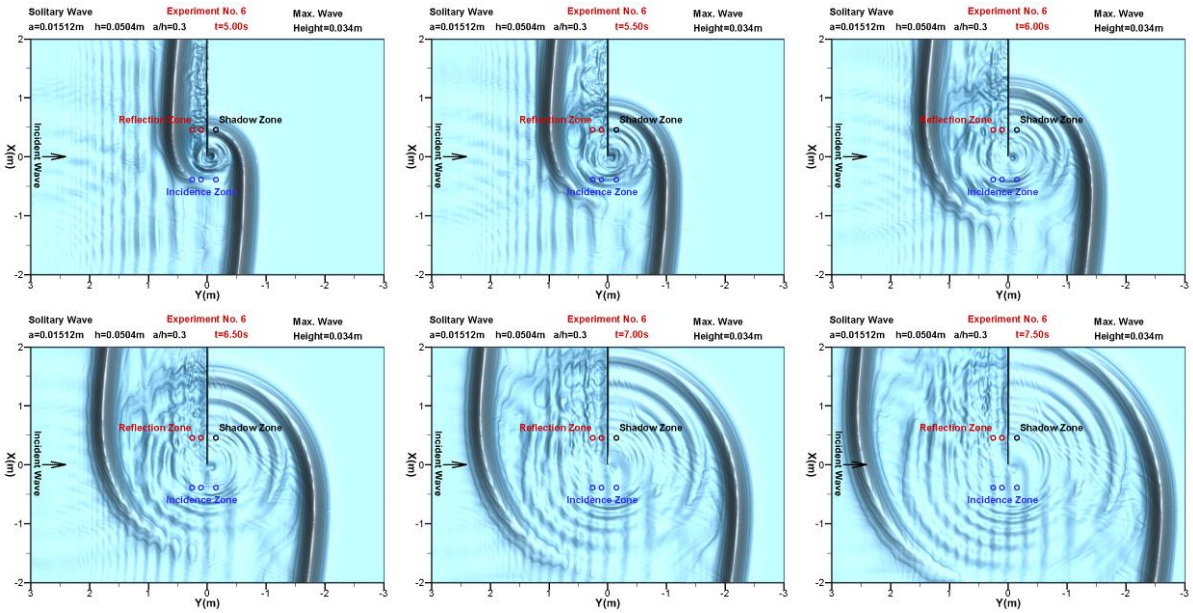


圖5.17(續)　實驗6之數值模式計算結果波形時序紀錄

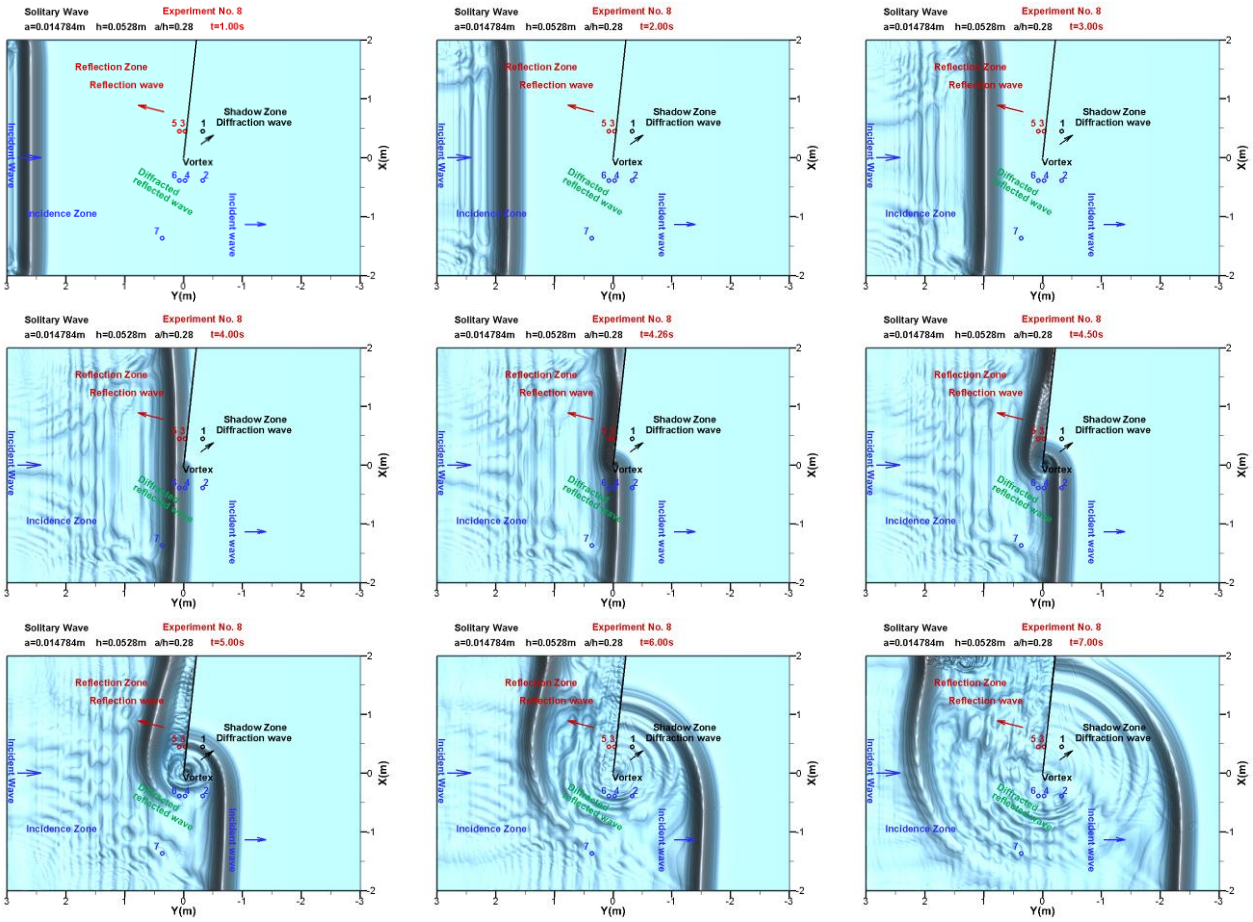


圖5.18　實驗8之數值模式計算結果波形時序紀錄

利用FLOW-3D的造波模式進行孤立波通過半無限長直立堤的數值計算，模擬結果之波形演變及流場特性與Liu(1984)之實驗結果比較相當一致。由於線性淺水波理論忽略了摩擦損失和流體邊界層的分離，因此在堤後遮蔽的繞射區差異顯著。

5.3.2 防波堤堤頭波場計算範圍及水深地形

波場數值模擬以麥寮港西防波堤堤頭附近海域並包含東防波堤為計算範圍，如圖 5.19 所示 (綠色粗框線內)。防波堤堤頭附近計算範圍為 2.3 km × 2 km，數值模型邊界採用附近海域實測地形資料，如圖 5.20 所示。為兼顧自由水面的準確與電腦運算的效率，垂直入射波向網格設定4 m ，平行入射波向網格設定10 m，例如西側海域入射波，其x=4m，y=10m，而垂直水層網格則設定1m，計算網格的佈置示意圖，如圖5.19所示。

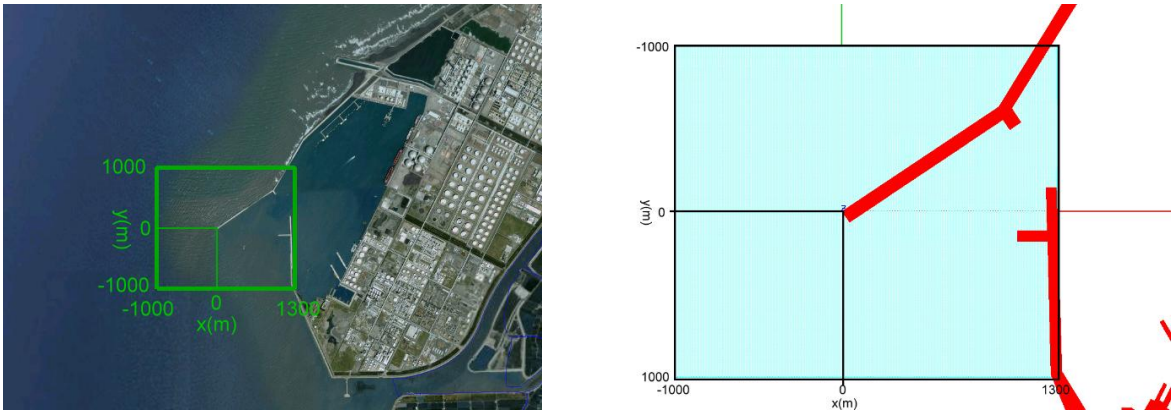


圖 5.19　麥寮港波場數值模擬海域範圍及計算網格示意圖

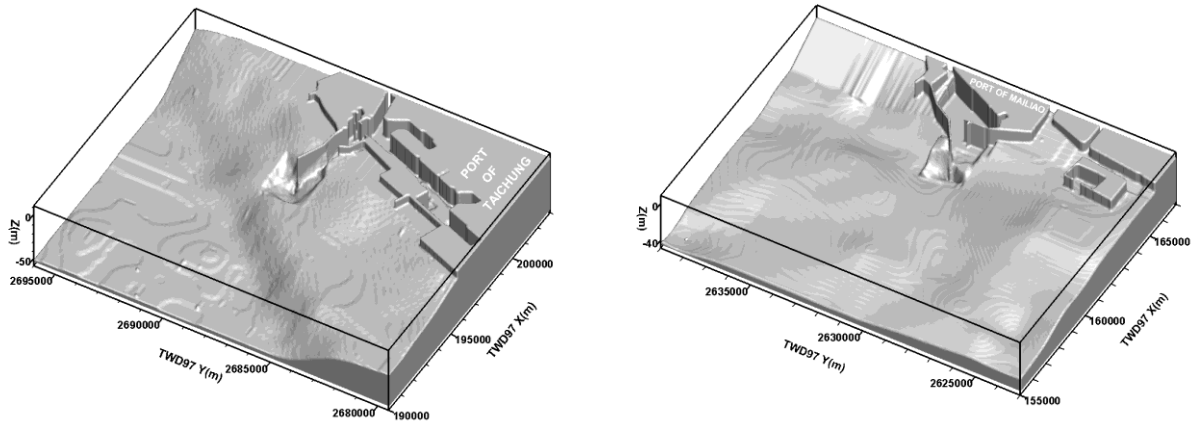


圖 5.20　臺中港與麥寮港水深地形波流場數值計算領域模型圖

5.3.3 輸入條件

為瞭解堤頭附近因波浪所引發的波場與流場分佈，將縮小計算範圍，加密堤頭處的網格分佈，專注於堤頭附近的解析；總模擬時間為240s，邊界輸入條件則以不同的波浪方向、週期及波高資料作為條件。在麥寮港西防波堤堤頭海域模型邊界上，初步給定波高6m、週期12sec的颱風波浪條件，以西防波堤為原點，包含北、西北、西、西南與南等五個方向的入射波，計算案例如表5.4所示。為精簡篇幅，本報告僅展示北、西與南等三個方向的結果。

表 5.4 FLOW-3D 計算波浪條件

計算案例	H(波高)	T(週期)	波向	模擬時間
1	6m	12s	N	240s
2	6m	12s	S	240s
3	6m	12s	NW	240s
4	6m	12s	SW	240s
5	6m	12s	W	240s

以下為執行 FLOW3D 時輸入的細部參數設定值：

(1) Global Tab (指定模擬時間、指定單位、流體性質等)

- Interface tracking：Free surface (自由表面追蹤)
- Number of fluids：One fluid (單相流)
- Finish condition：Finish time (求解時間根據設定的模擬時間判斷)
- Flow mode：Incompressible (不可壓縮流體)

(2) Physics Tab (指定物理量)

- Gravity：Gravity component in the z-direction (-9.81) (負z重力方向)
- Viscosity & Turbulence：Renormalized group model
- Maximum turbulent mixing length：紊流長度調整

(3) Fluid Tab (載入設定流體)

- Water at 20^{o}C
- 密度1000kg/m^{3}

- Dynamic Viscosity (動力黏性係數)：0.001

(4) Meshing & Geometry (網格及物件基本設定)

- 載入港口地形及結構物圖檔
- 設定計算領域網格尺寸及網格數量

(5) Boundaries Tab (指定邊界條件，如表5.5)

- 開放水域：設定波浪條件的變化，在南、北、西三側網格邊界設定颱風、季風時，不同波向的波浪條件。
- 封閉水域：港域設施與陸地外廓邊界內的範圍為封閉水域。

(6) Initial Tab (初始條件設定，可以指定初始流體狀態，包含壓力等)

- Hydrostatic pressure in z-direction (設定 z 方向淨水壓)
- Initial fluid：數值模擬水域初始水位

表 5.5　波場模擬之模型邊界設定

波向	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
N	O	O	O	Wv	S	O
NW	O	O	O	Wv	S	O
W	Wv	O	O	O	S	O
SW	O	O	Wv	O	S	O
S	O	O	Wv	O	S	O

5.3.4 波場中自由水面變化

數值模擬的自由液面變化是檢視結果合理性最直接的現象，以每 12sec 間隔擷取模擬結果繪製水面變化如圖5.21 至圖5.23 所示，波浪入射方向依序為北向、西向及南向。

北向入射波浪的水面變化如圖5.21 所示,在此模型中西防坡堤由邊界的東北角分成兩段向西南方延伸，因此北向入射波浪進入之後即受西防波堤阻擋而產生反射波，其波向約為東至東北方向之間，模擬時間經過 60sec 後，

入射波浪逐漸受第二段西防波堤影響而致發東至東北向的反射波，並與北向入射波、東北向反射波及東北向二次反射波交互疊合形成水面變化情況複雜的短峰波場。需注意的是，為便於觀察小振幅的變化，圖中水位尺度色標設定的限制值為 ±5m 幅度，當計算結果超過 ±5m 時仍以上、下限顏色表示，入、反射波浪疊合後的水位變化已超過此範圍，並非水位變化最大僅達 ±5m 之程度。約於 96sec 時波浪已傳播抵達堤頭，並隨著模擬時間的增加，繞射波浪逐漸進入西防波堤南側的遮蔽區域，而波浪繞射現象於堤頭處所形成點波源的波動，亦可於 120sec 後清楚地觀察到。比較 180sec 至 240sec 間變化，除西防波堤南側繞射波浪持續向東傳遞之外，各波峰線與短峰波峰點所在位置與水位高程已接近穩定。

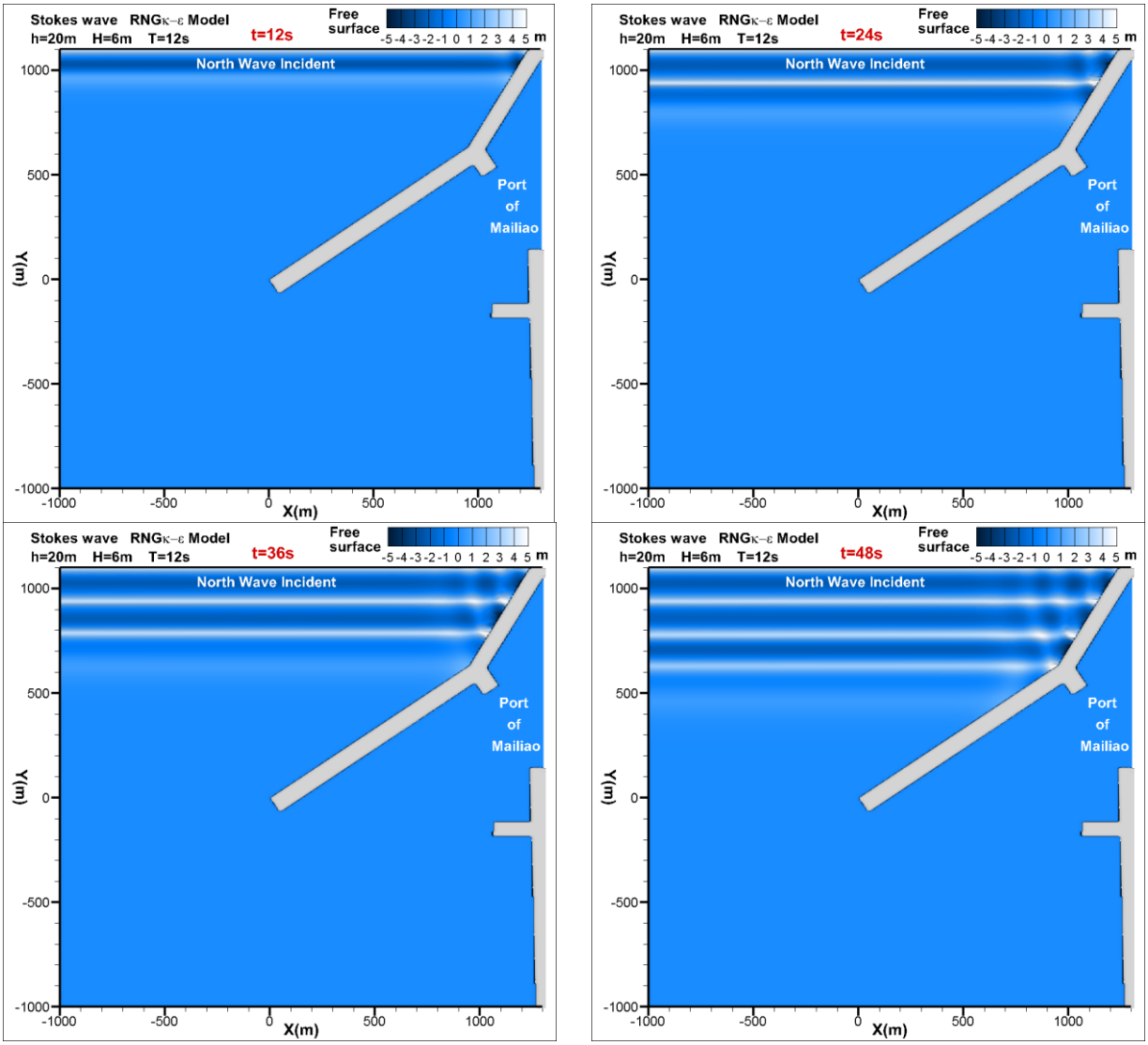


圖 5.21 北側海域入射波浪水面時序變化示意圖

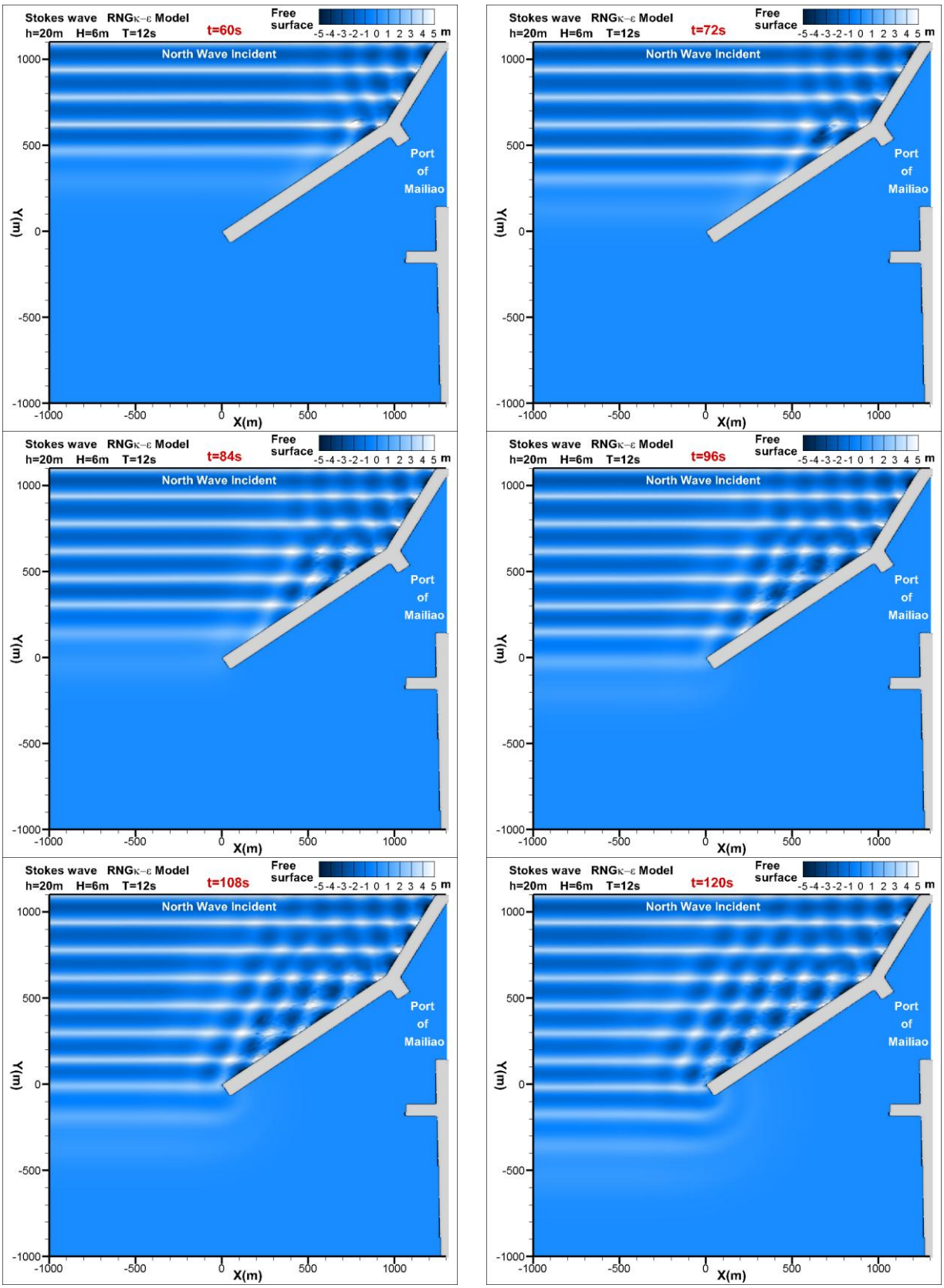


圖 5.21(續) 北側海域入射波浪水面時序變化示意圖

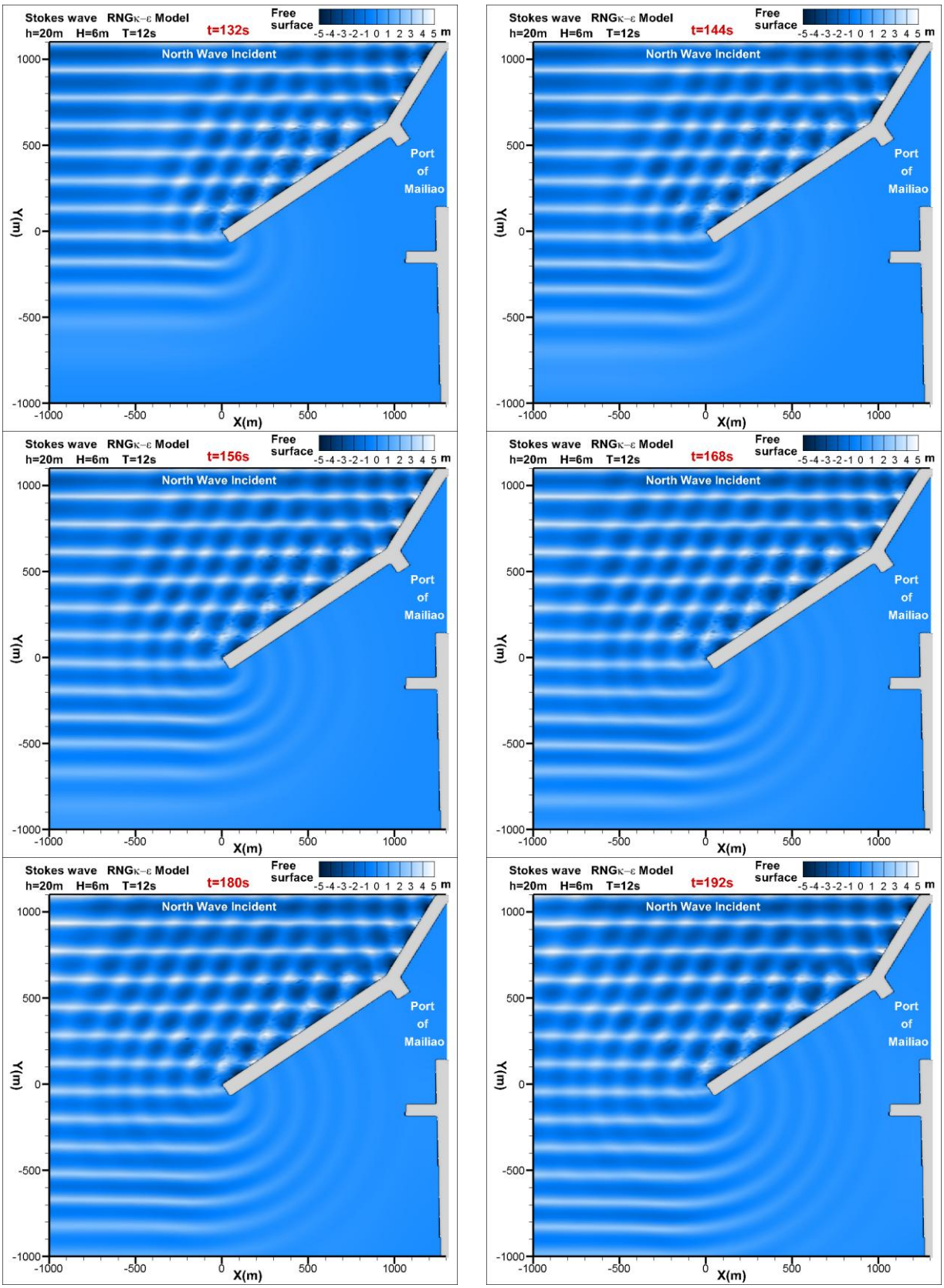


圖 5.21(續) 北側海域入射波浪水面時序變化示意圖

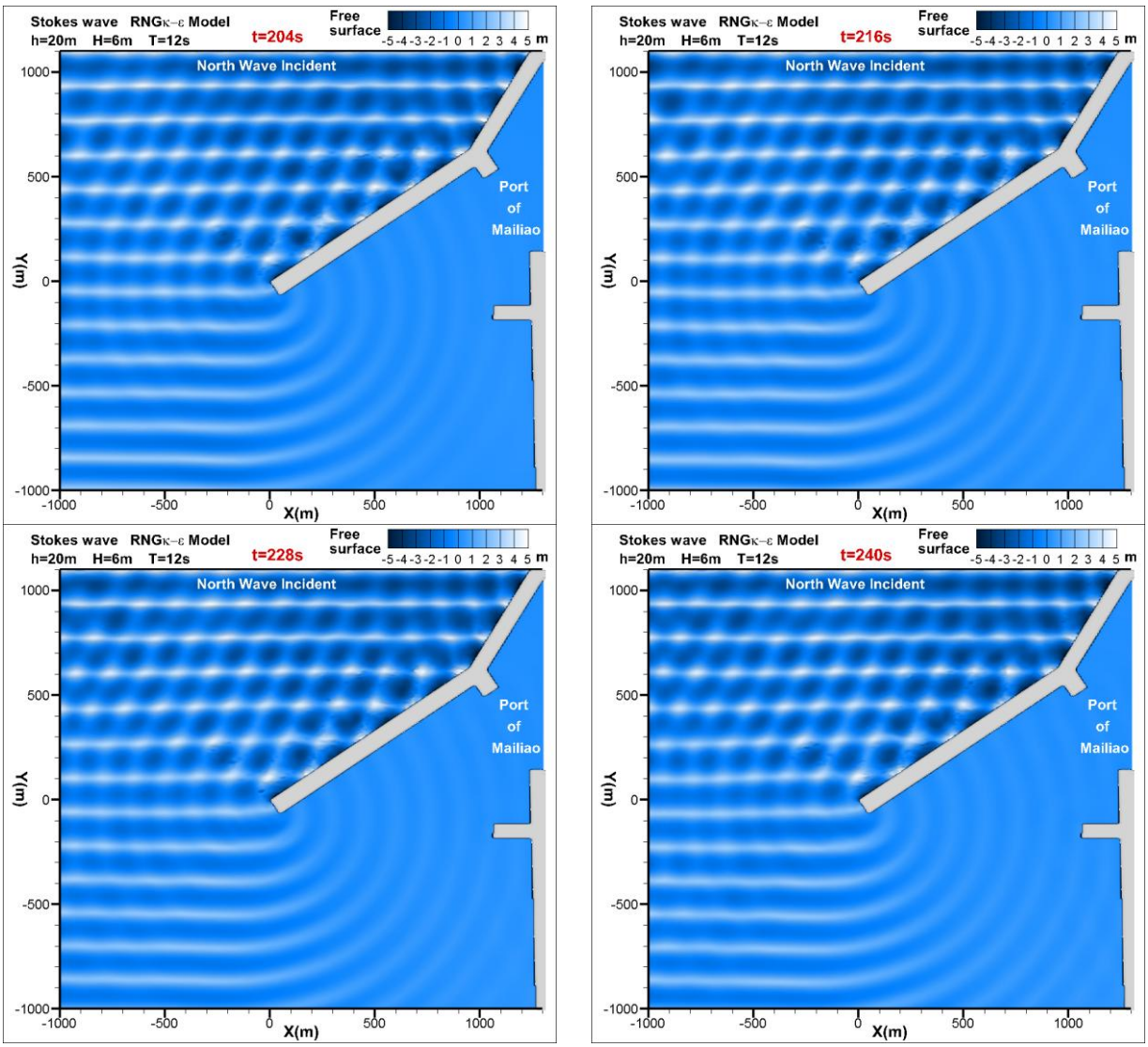


圖 5.21(續) 北側海域入射波浪水面時序變化示意圖

西向入射波浪的水位變化結果如圖5.22所示。西防波堤與入射波峰線約有45度交角，東防波堤則與入射波浪呈平行。首道入射波波峰線約於 72sec 時到達西防波堤堤頭處，堤北側為反射區，南側則為繞射區，堤頭與波浪作用寬度較小，初始的波浪反射不明顯，而波浪繞射亦不明顯。模擬時間 120sec 之後的西防波堤南、北兩側水位變化開始呈現較大的差別，北側的波浪受堤身阻擋形成西南波向的反射波，而南側則因繞射的影響，波浪相位約落後北側波浪 180度。約在 168sec 時波浪抵達東防波堤處，並於 204sec 時產生較為明顯的反射波。此模型中除了西防波堤堤頭有明顯點波源水位變動向外傳遞，在東防波堤的短堤頭亦有規模較小的點波源波動。

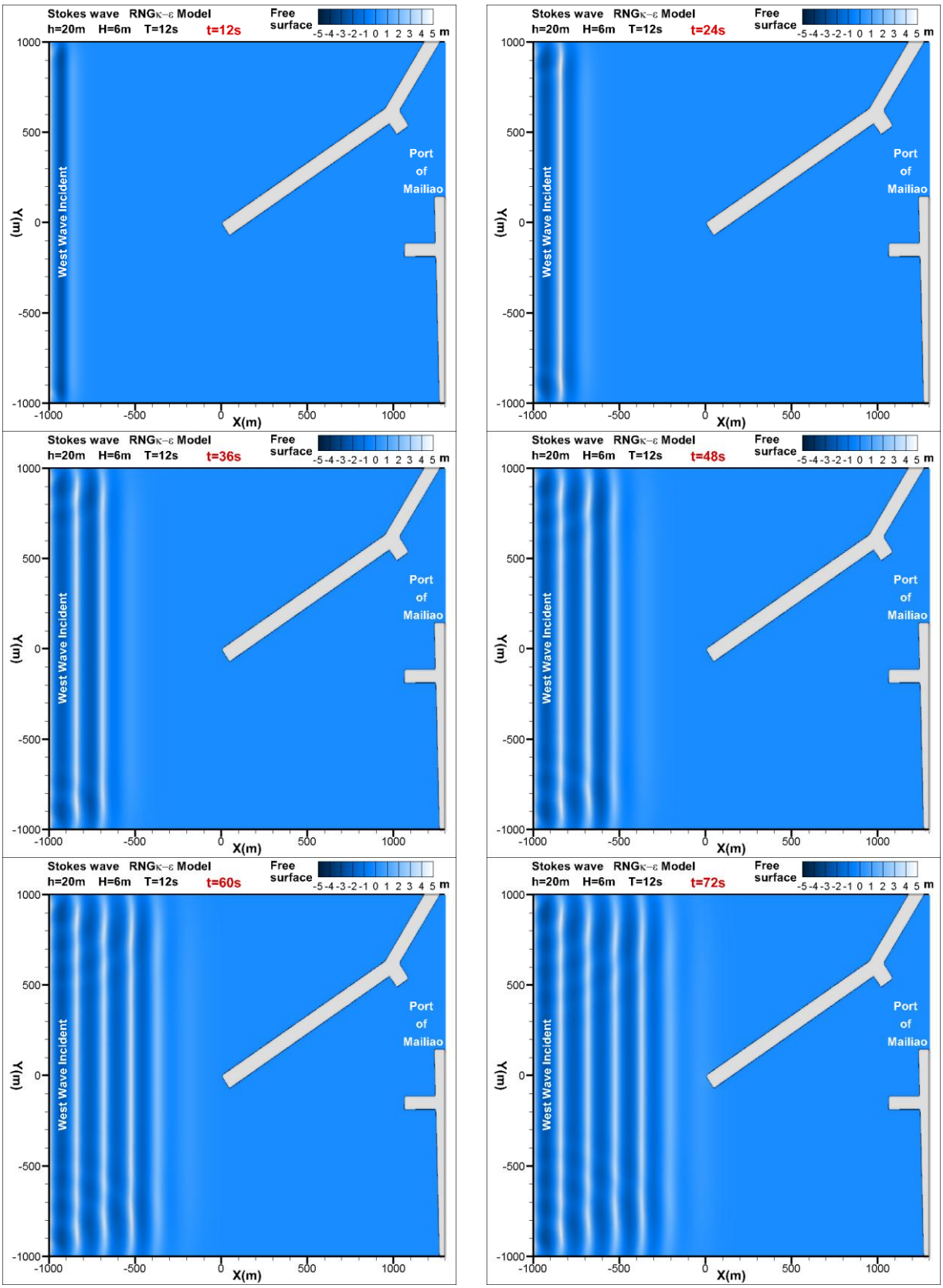


圖 5.22　西側海域入射波浪水面時序變化示意圖

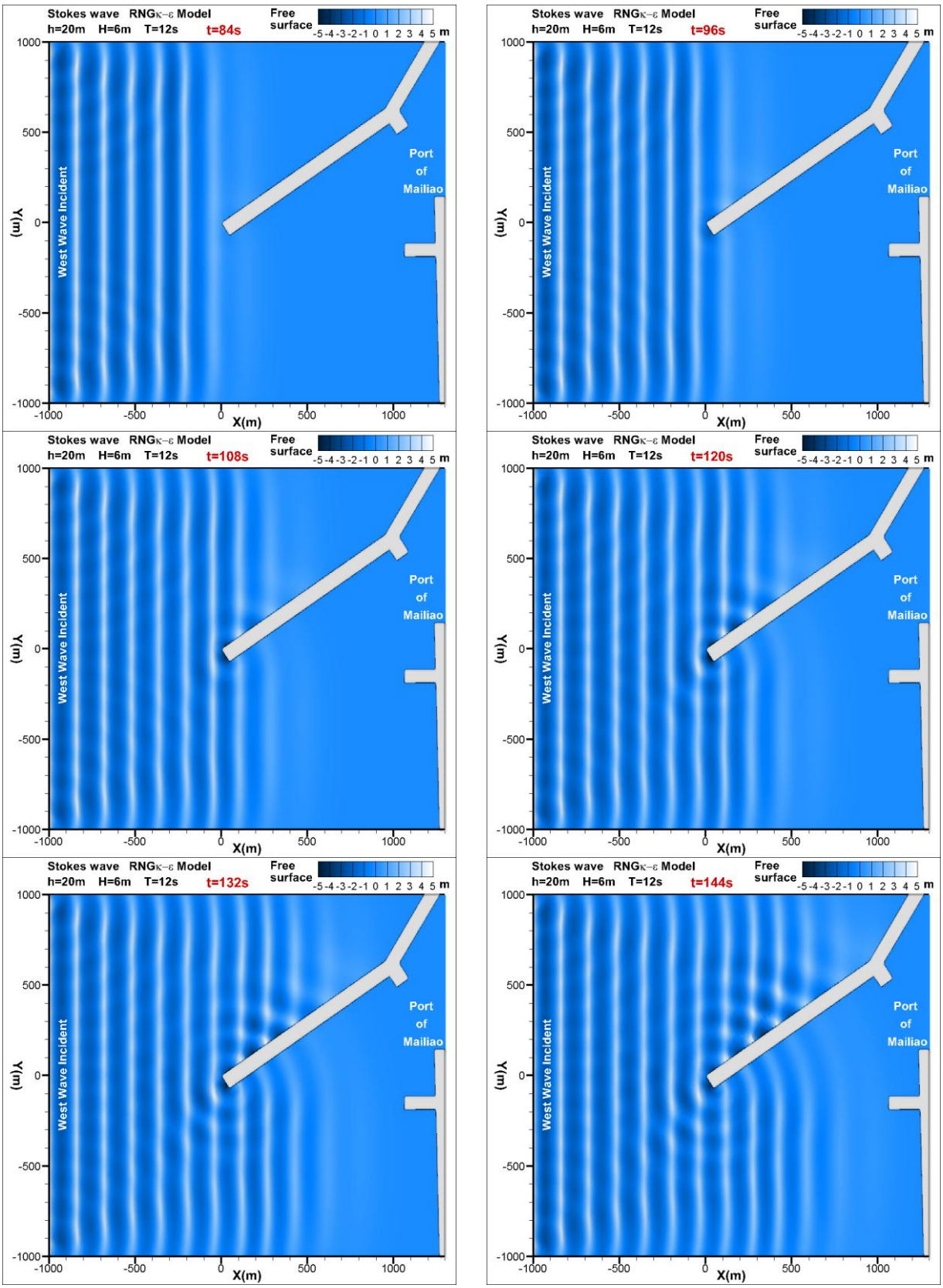


圖 5.22(續) 西側海域入射波浪水面時序變化示意圖

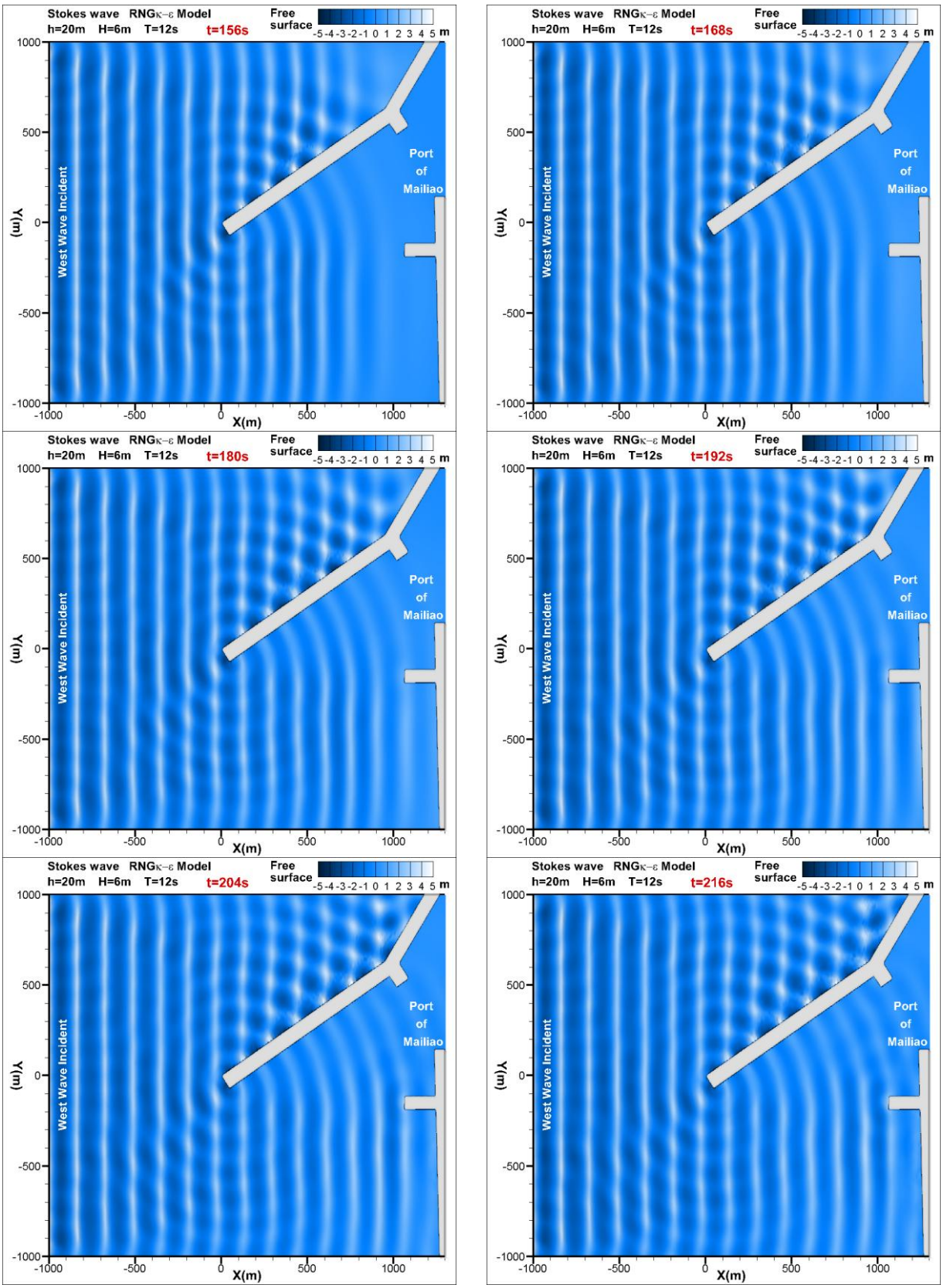


圖 5.22(續) 西側海域入射波浪水面時序變化示意圖

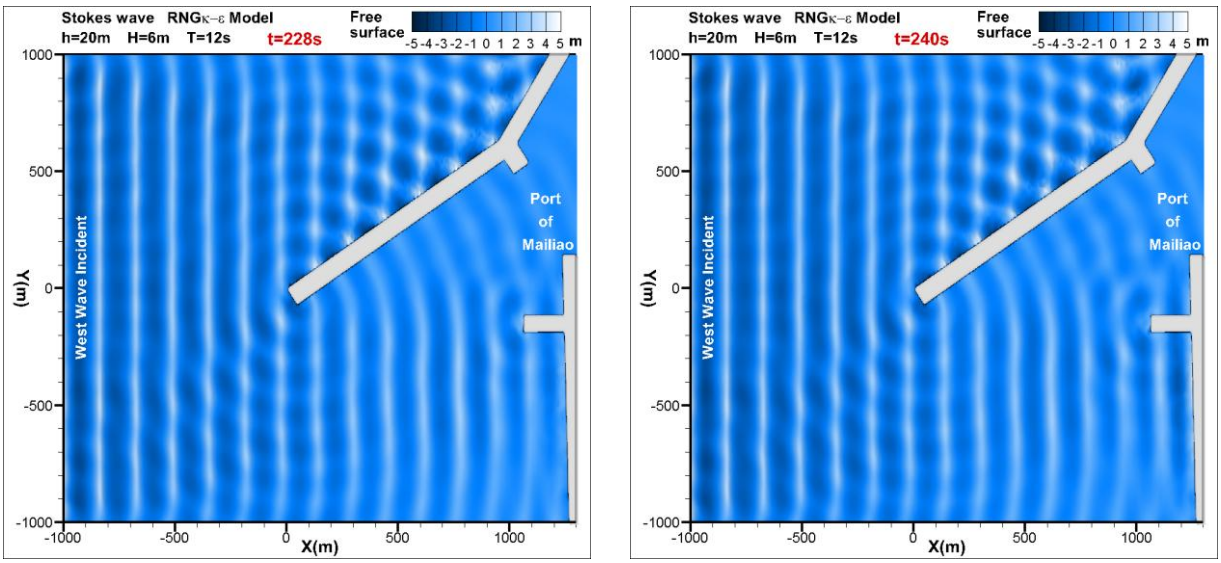


圖 5.22(續) 西側海域入射波浪水面時序變化示意圖

南向入射波浪條件的模擬結果，水位變化如圖5.23所示。雖東防波堤緊鄰邊界的東側，但延伸方向與入射波向保持垂直，於模擬的初期並無明顯效應產生。直到 72sec 時遭遇東防波堤的短突堤與西防波堤堤頭，於突堤前產生接近正向反射波，並於突堤後有顯著的繞射效應。而西防波堤的東側為反射區，東側則是繞射區。與西南入射波浪條件的模擬結果類似，在東、西防波堤間的區域，波浪入射與多次反射波浪的疊合，產生極端的水位變動，於 180sec 至192sec 間，可觀察到部分的短峰波峰點呈現不規則結果，估計是波浪尖銳度過大，業已發生了碎波。

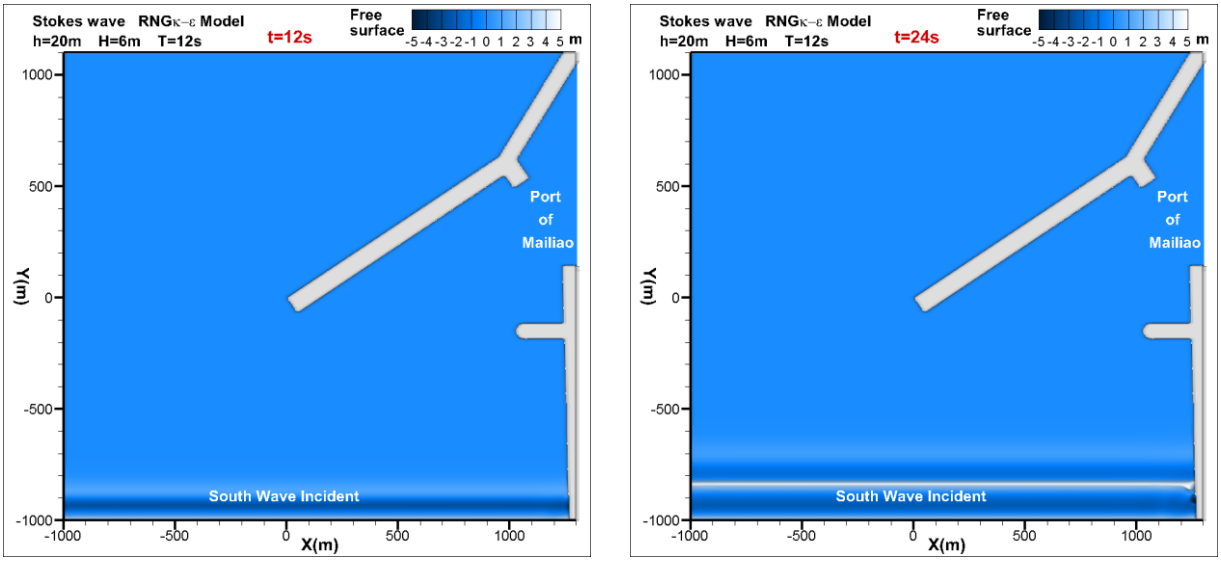


圖 5.23 南側海域入射波浪水面時序變化示意圖

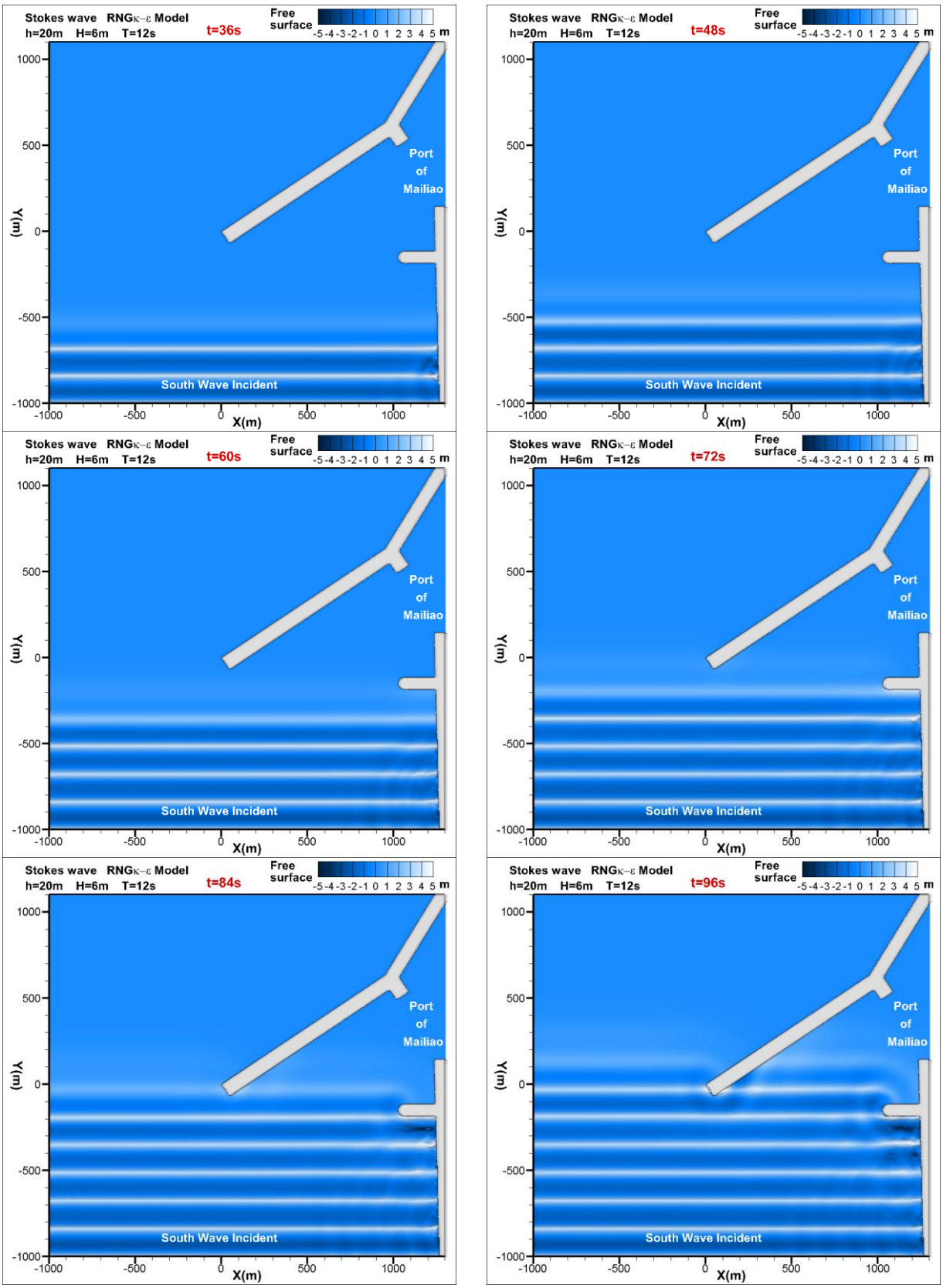


圖 5.23(續) 南側海域入射波浪水面時序變化示意圖

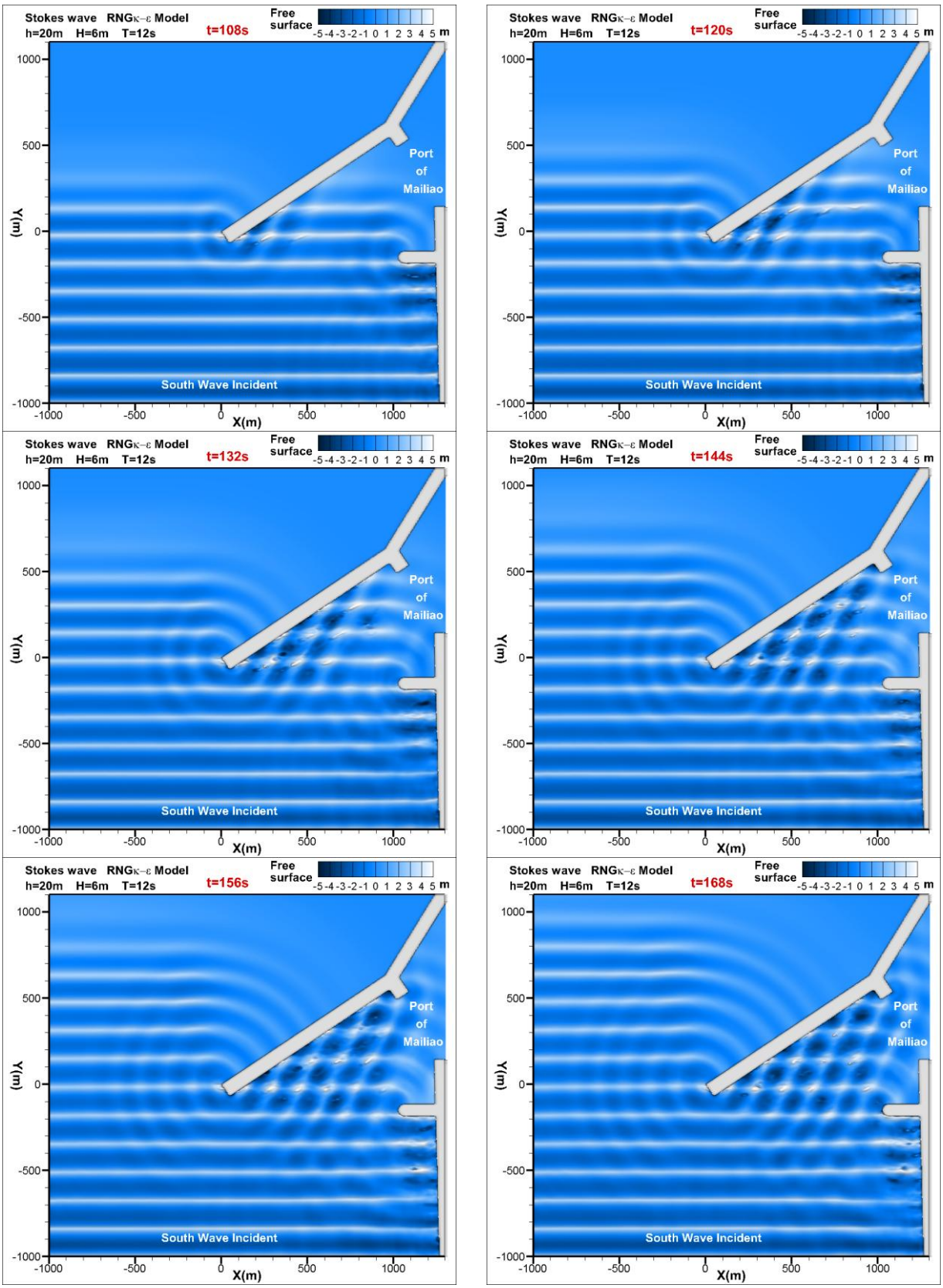


圖 5.23(續) 南側海域入射波浪水面時序變化示意圖

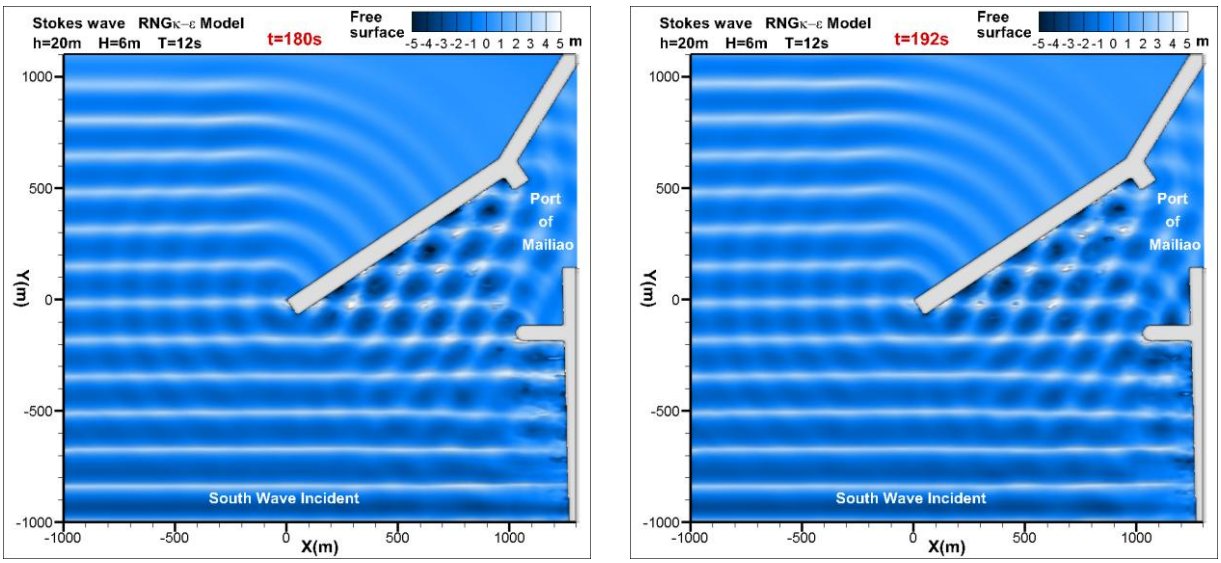


圖 5.23(續) 南側海域入射波浪水面時序變化示意圖

5.3.5 波浪作用下引發的流況變化

為了瞭解極端波浪通過防波堤時的水動力行為，是否導致堤頭附近海域底床大幅侵淤變化，因此必須進一步對波場數值計算結果的底床水分子速度向量加以分析，從波場全域海床層流向水分子速度變化的了解，如圖5.24至圖5.26所示；近端堤頭附近底床水分子速度的探討，如圖5.27至圖5.29所示；進而分析貼近堤頭最近網格流固耦合運動產生的流場的垂直變化，如圖5.30至圖5.32所示；最後統計防坡堤頭附近海域於240sec造波期間內最大的底床水分子速度(V_{max})以及前10分之1最大底床水分子速度平均值($V_{1/10}$)的分佈情況，如圖5.33至圖5.41所示。

一、海床層之水分子速度向量變化

入射方向為北向、西向及南向的波浪於海床表層引起的水分子速度(Bottom Velocity Magnitude)及向量變化如圖5.24至圖5.26所示，取造波週期12sec為時序繪圖間隔時間，圖中尺標velocity magnitude表示波場底床表層網格節點三個方向水分子速度平方和再開根號($\sqrt{u^2+v^2+w^2}$)。經統計，全模擬條件下的波場，造波240sec後的水分子速度最大值為3.6m/s。

北向入射波場的水分子速度分佈如圖5.24所示，同時參考堤頭的水分子速度分佈放大圖5.27，水分子速度值大於 2m/sec 發生的位置多為於西防波

堤堤身北側，而波浪傳播於 96sec 後於南側產生繞射，但其速度明顯小於入、反射波場的疊合結果。此波向下的流場，在堤頭處經常性存在高水分子速度節點，最大值超過 2m/sec 且向西延伸。同於此波向下，西防波堤的堤身模型中段，多處產生小區域性極值，水分子速度 3.6m/sec 是所有模擬結果的最大值，且各極值發生位置並未隨時間改變而有大幅度的變動。

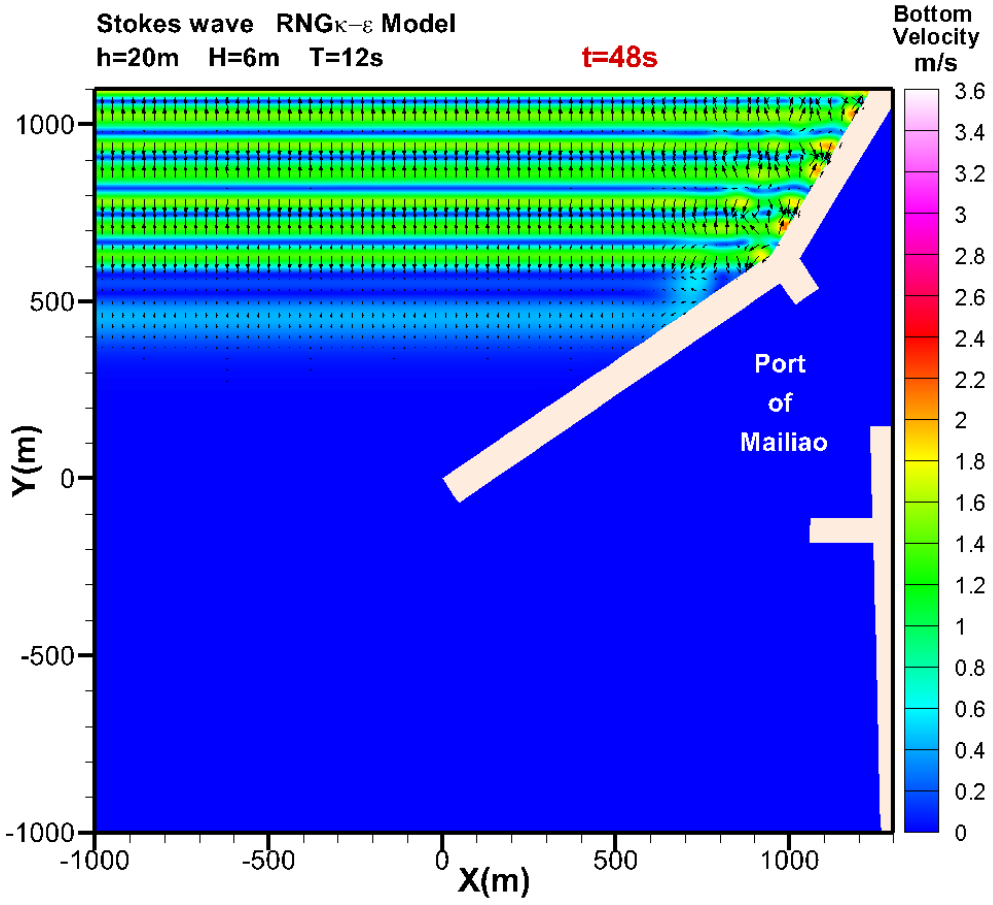


圖 5.24　北側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

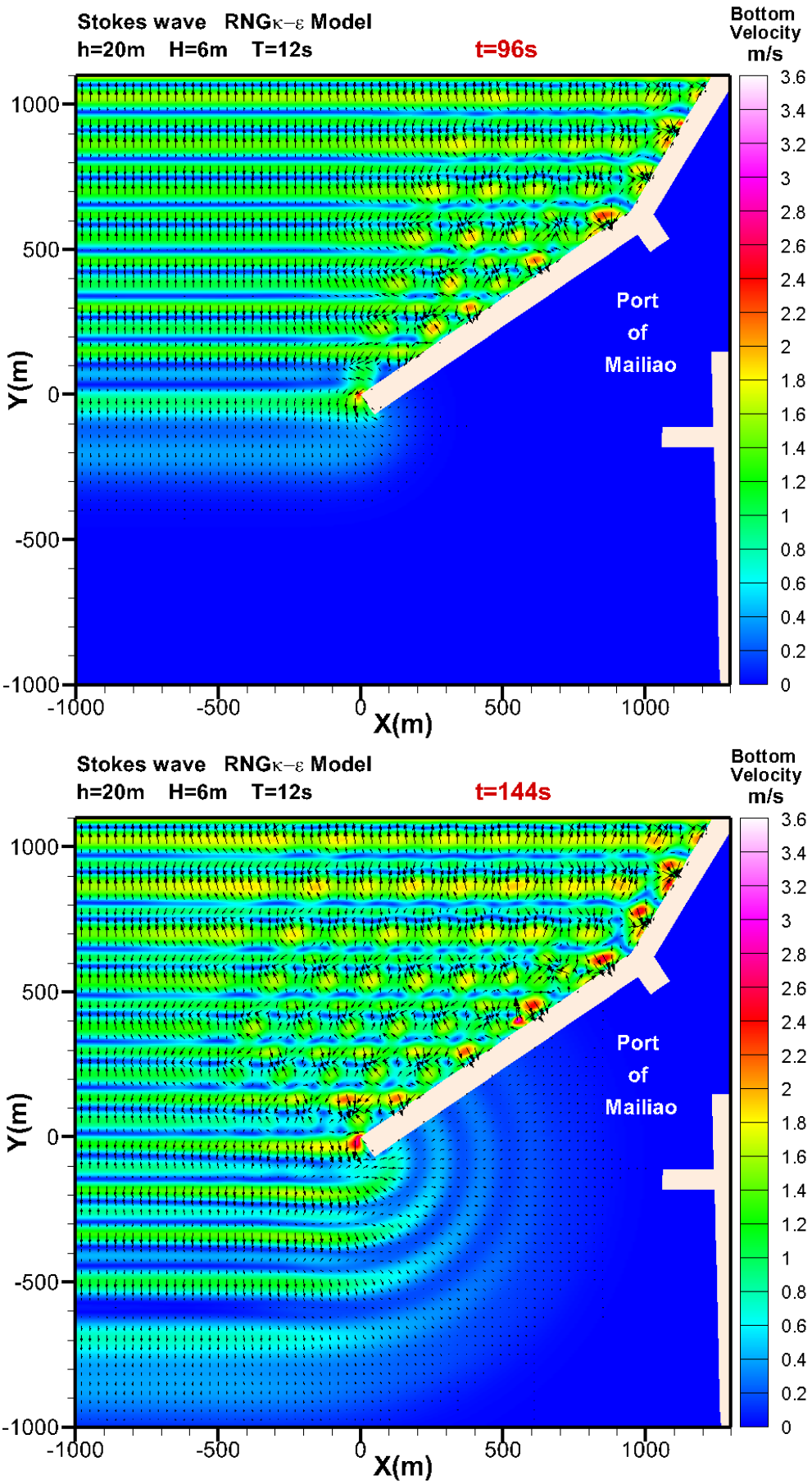


圖 5.24(續) 北側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

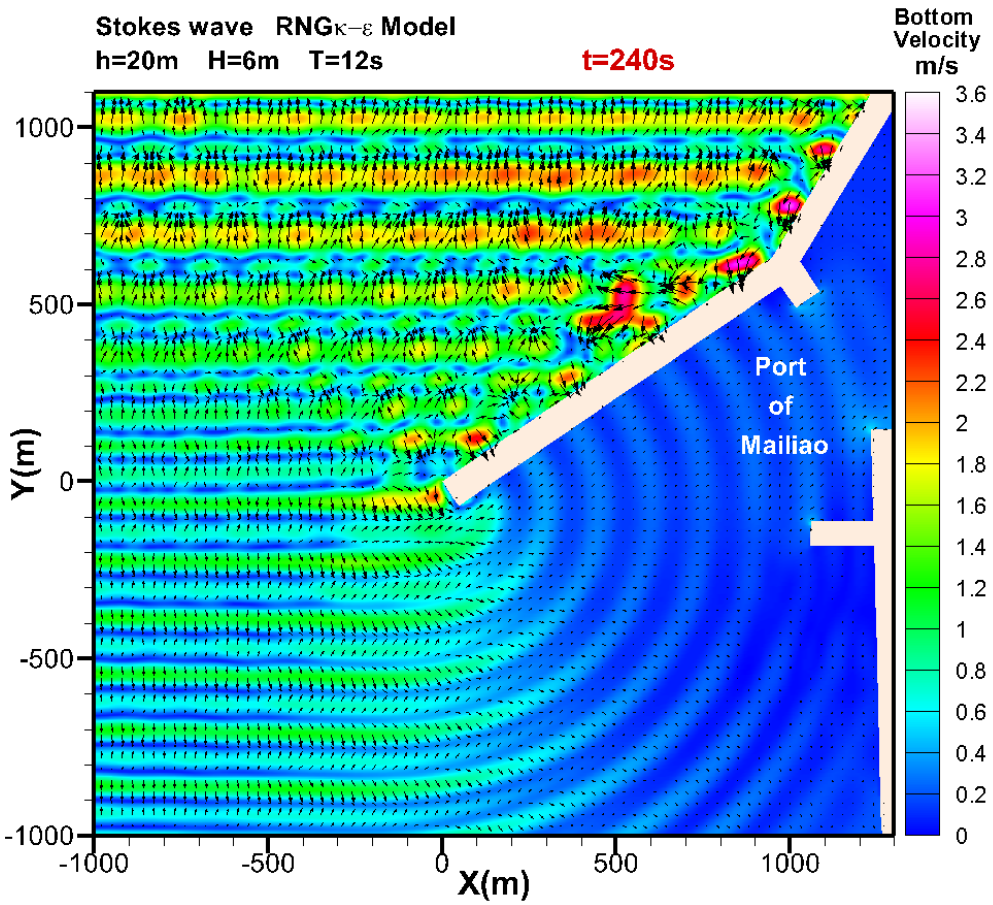
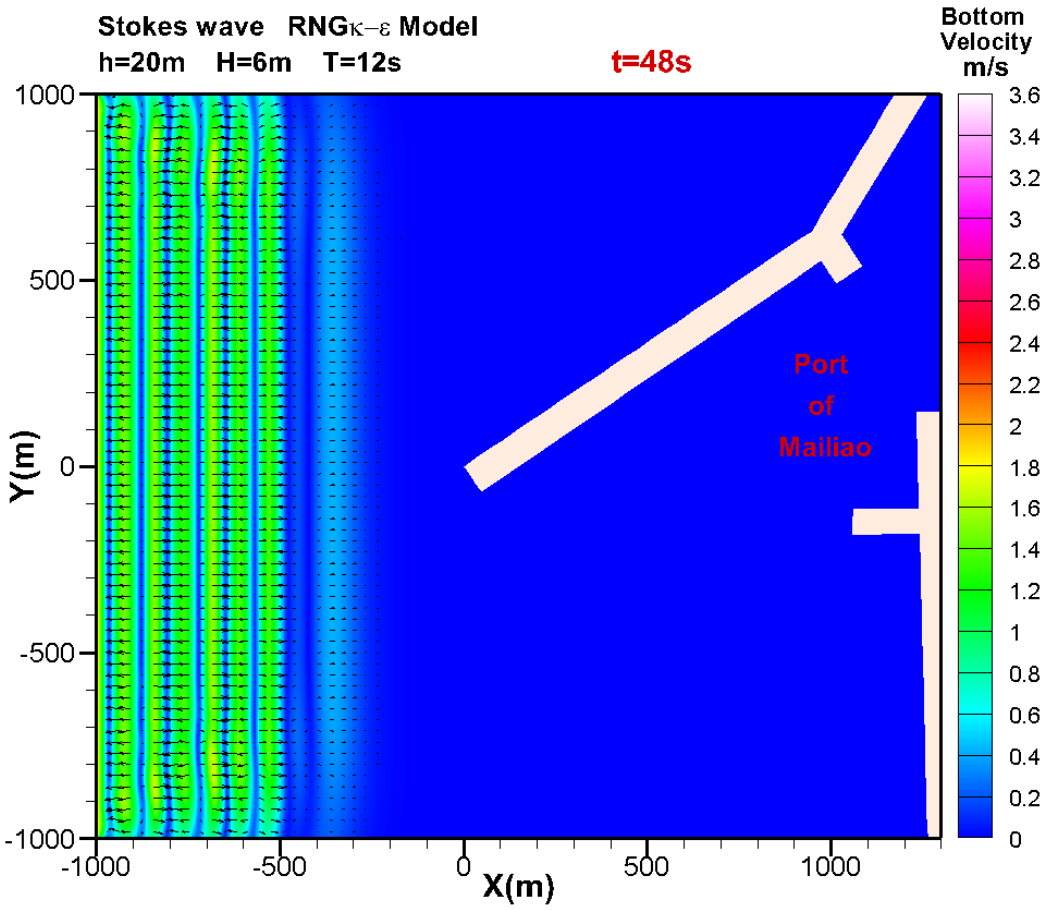


圖 5.24(續) 北側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

西向入射波場的水分子速度分佈如圖5.25所示，並參考堤頭的水分子速度分佈放大圖5.28，此條件下並未有水分子速度受到結構物影響而大範圍地增長。雖防波堤旁的水分子速度，在西防波堤北側網格的數值較大，水分子速度上限值接近 2m/sec，但與入射邊界的水分子速度比較，其計算結果最大值多有達到 2m/sec，說明防波堤附近的水分子速度明顯下降。西防波堤堤頭處的流場並無如北向入射波浪條件般，產生高速的水分子速度值，平均值約在 1.2m/sec 的程度。



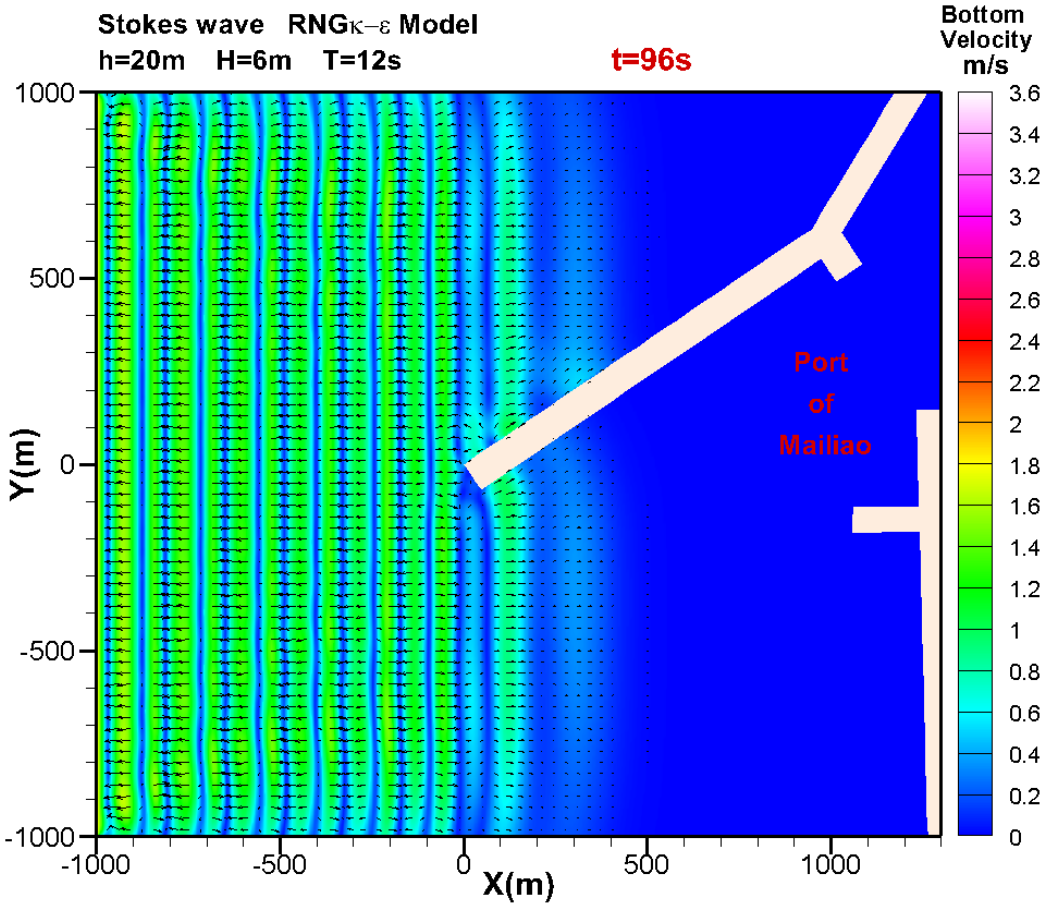


圖 5.25 西側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

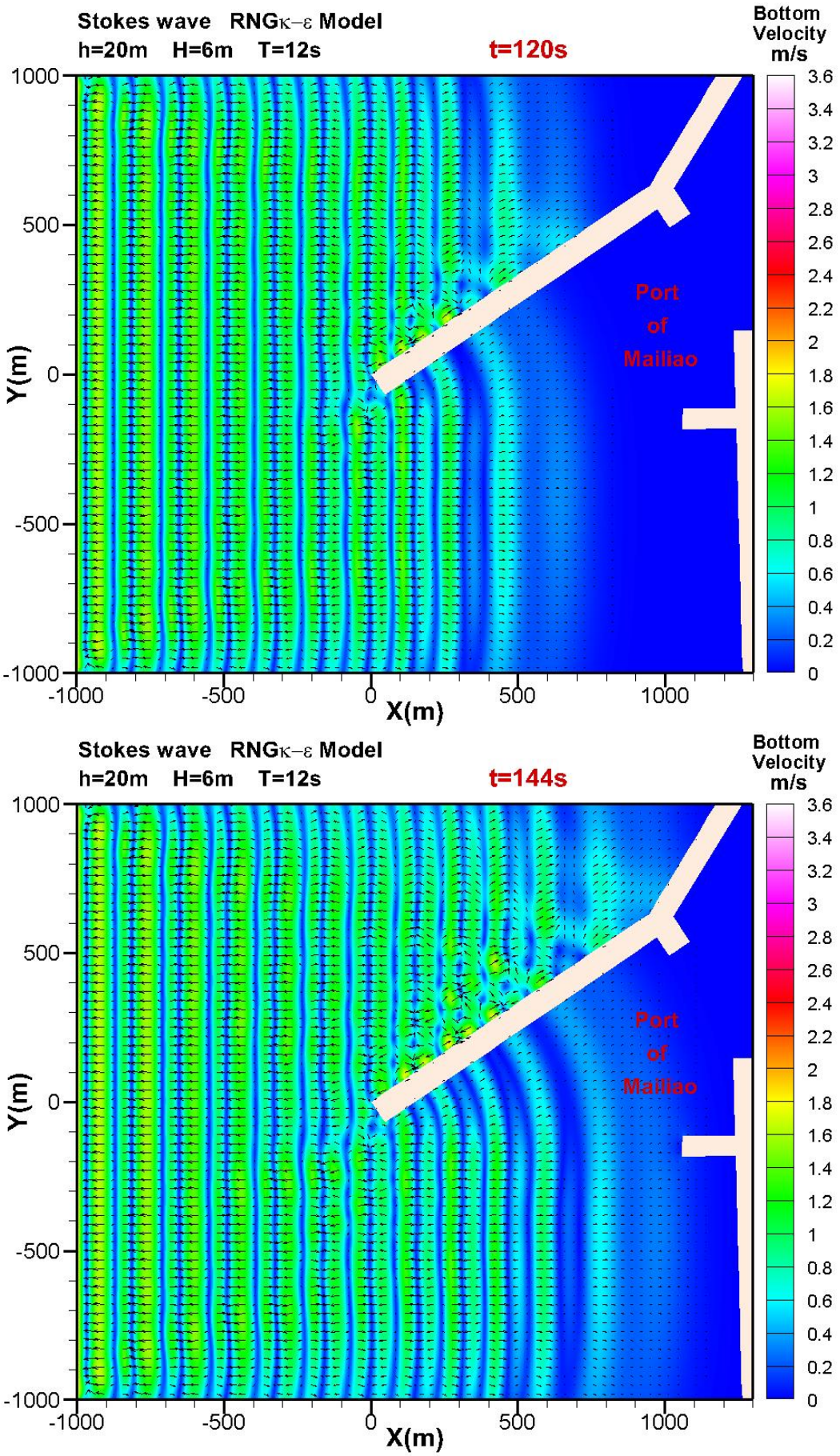


圖 5.25(續) 西側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

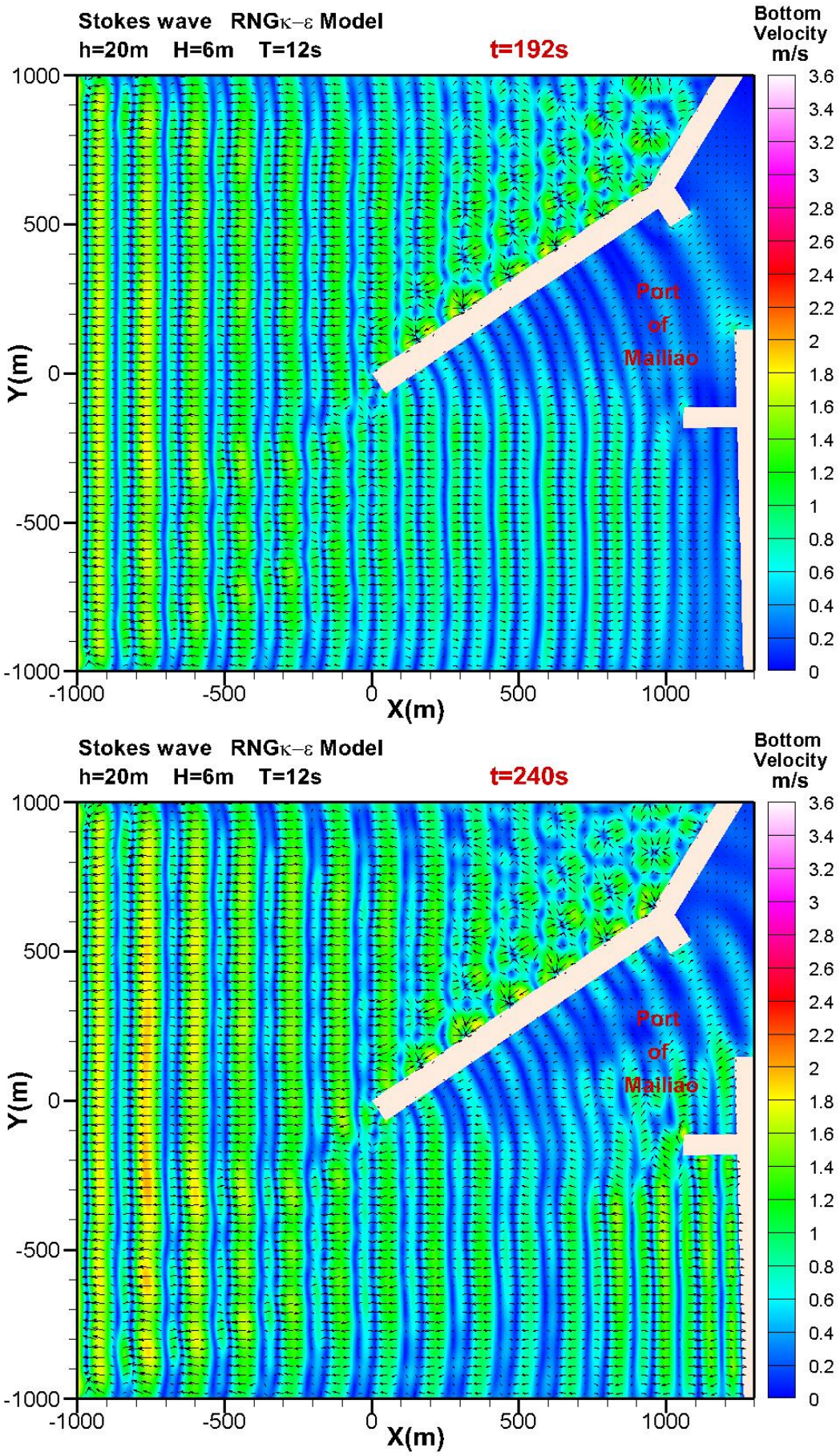


圖 5.25(續) 西側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

南向入射波場的水分子速度分佈如圖5.26所示，結果顯示流場於 96sec 時在西防波堤堤頭處逐漸加快，同時向西側小幅延伸。自 108sec 後在堤身的南側受入、反射波浪疊合，水分子速度亦漸漸增加。東防波堤的南端亦有平行與波峰方向的水分子速度增長，至 180sec 後部分網格發展超過 3m/sec 的速度。堤頭處的水分子速度增長相當明顯，尤其集中於堤頭的南端點，聚積水分子速度亦是達到3m/sec。對照圖5.29，可發現一開始的高速區是在提頭的北端點處，至 144sec 後南側的高速區才開始成形，此條件下模擬結果的水分子速度最大值為 3.6m/sec。

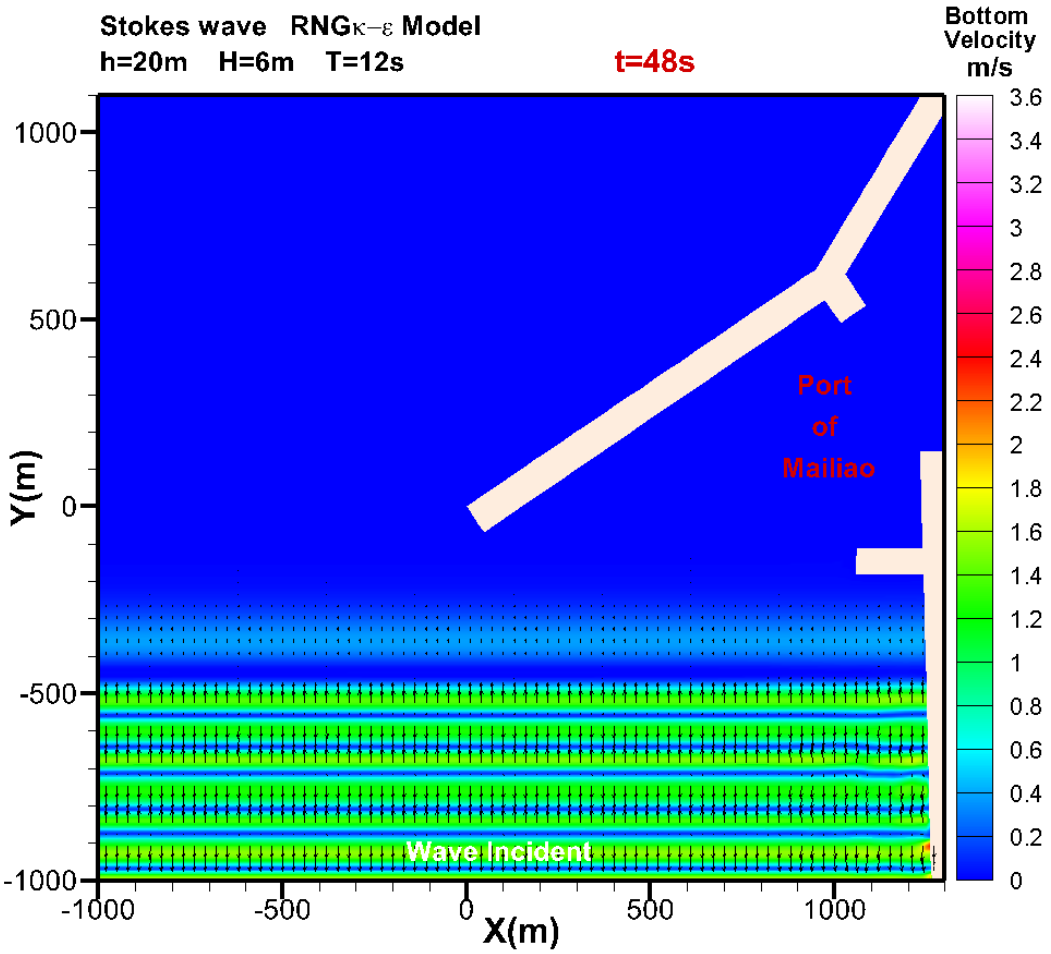
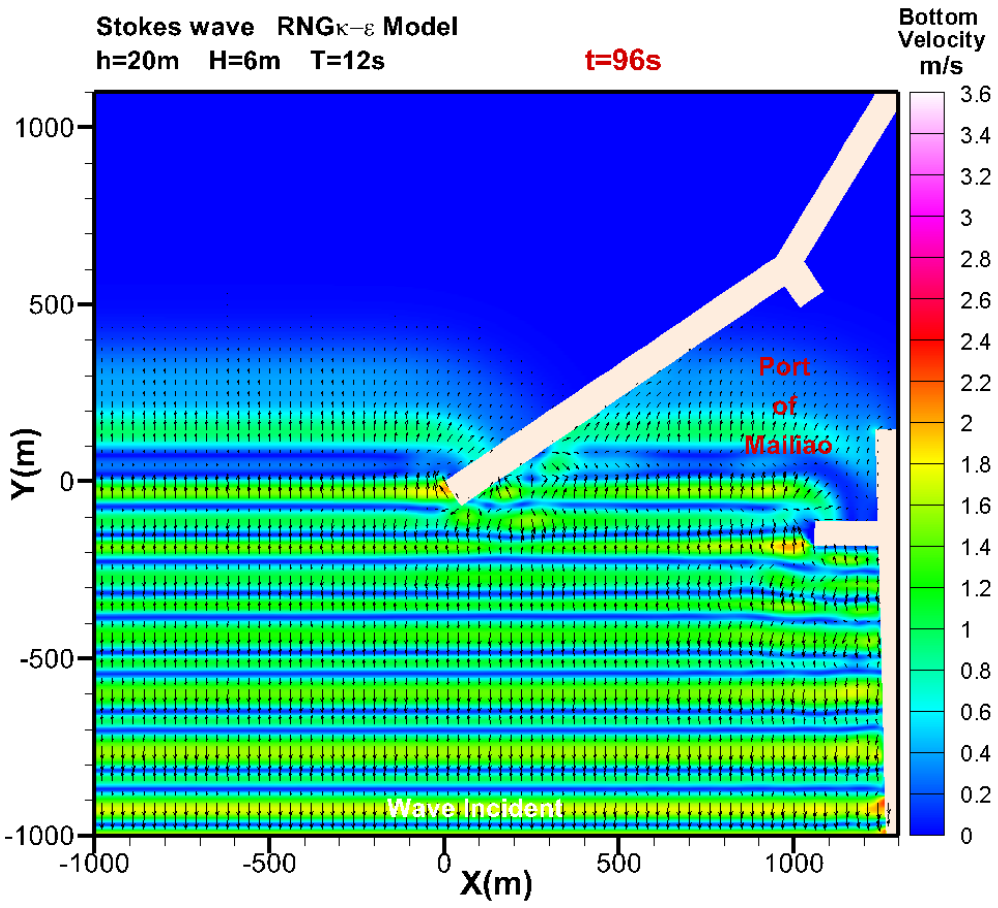


圖 5.26 南側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖



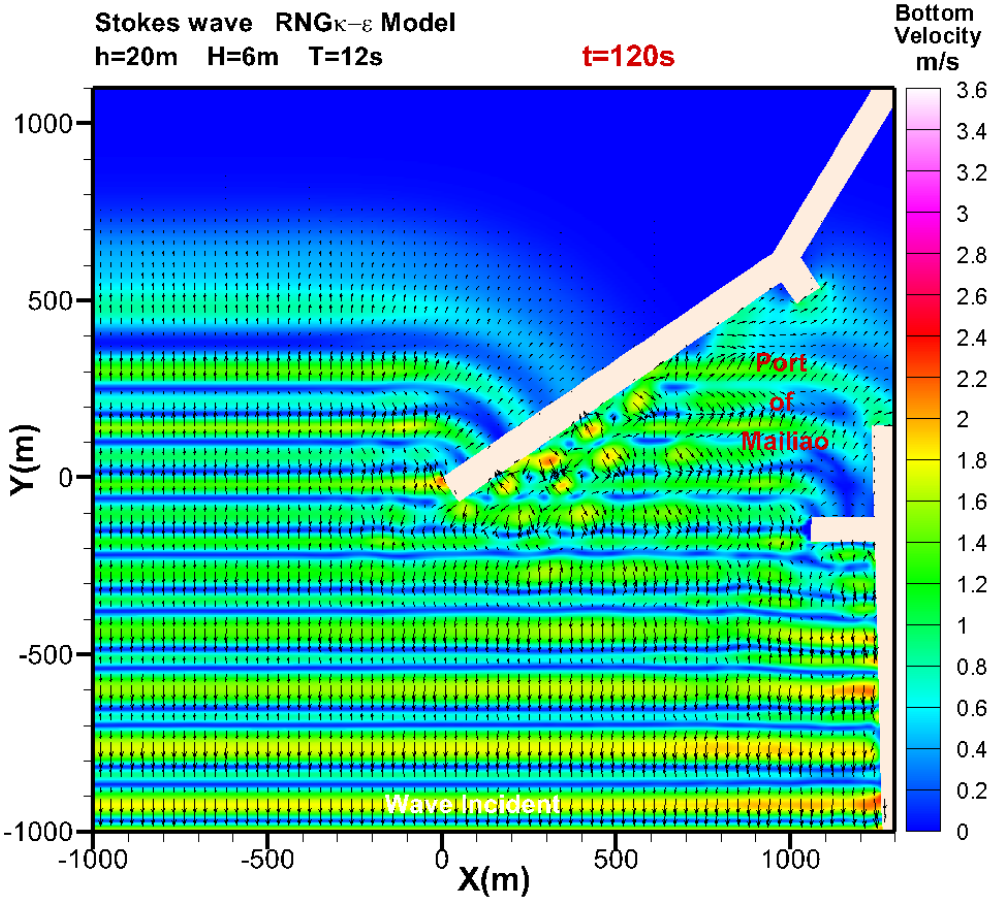
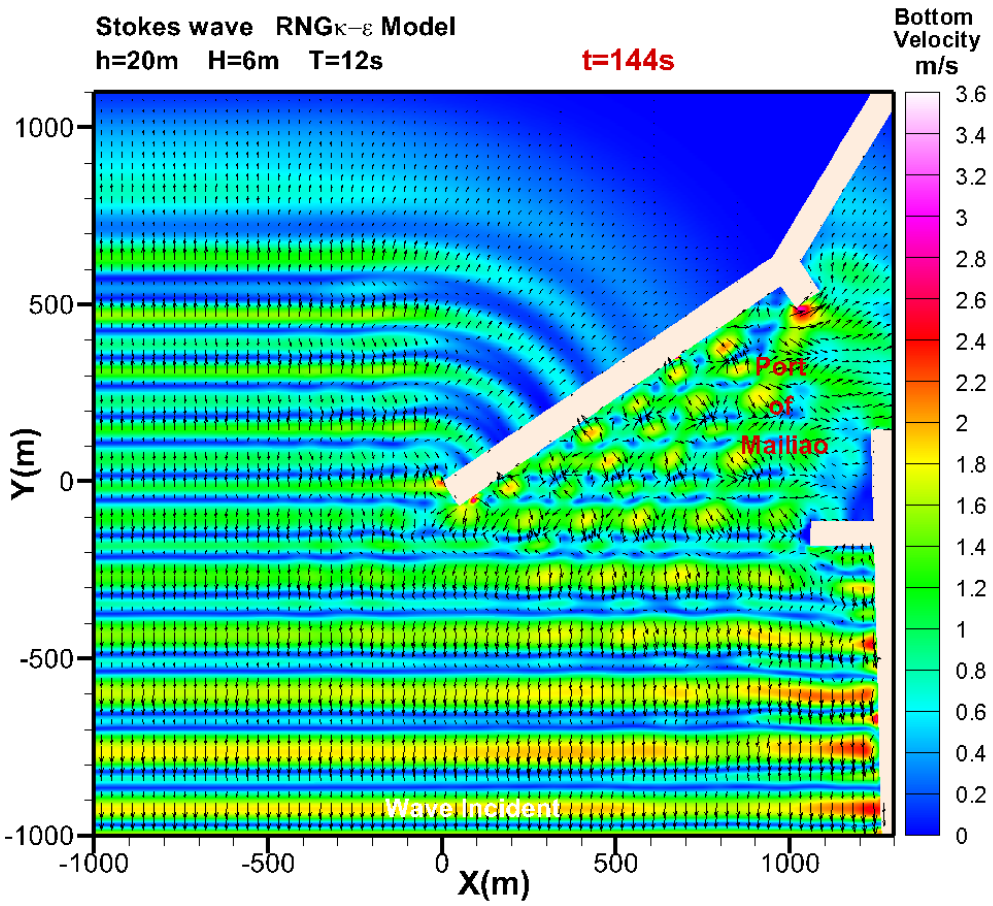


圖 5.26 (續) 南側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖



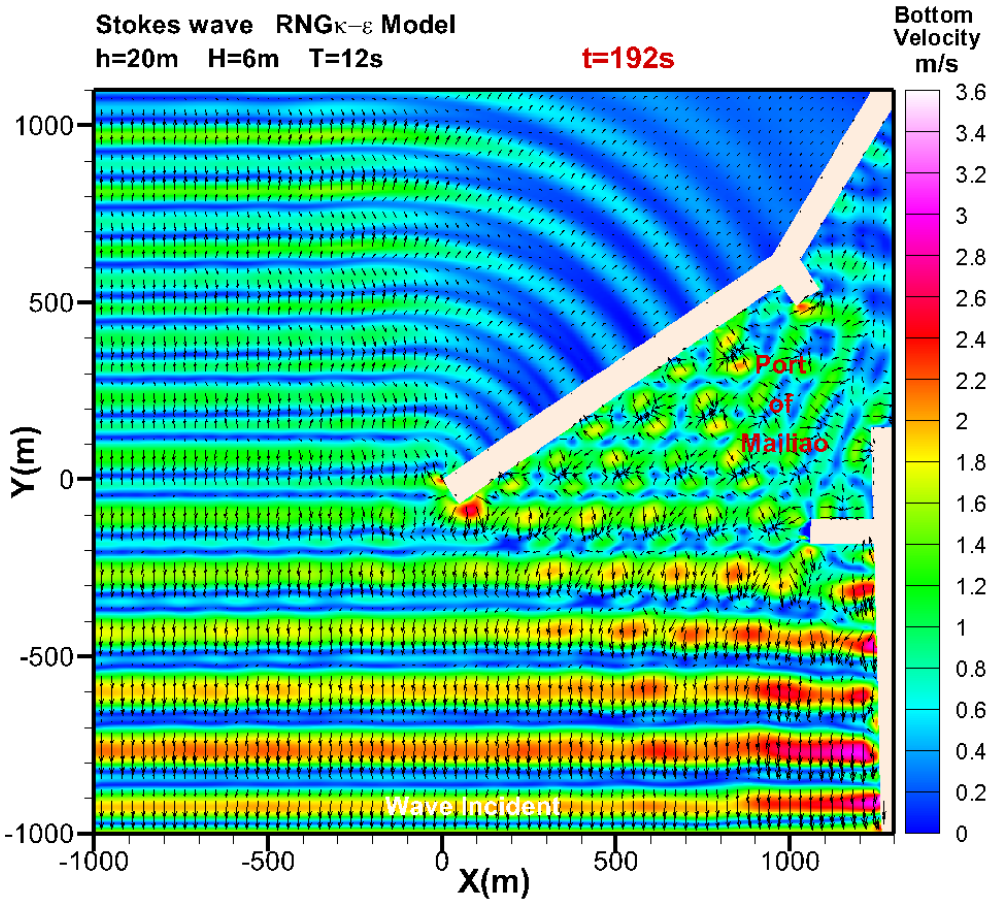


圖 5.26 (續)　南側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

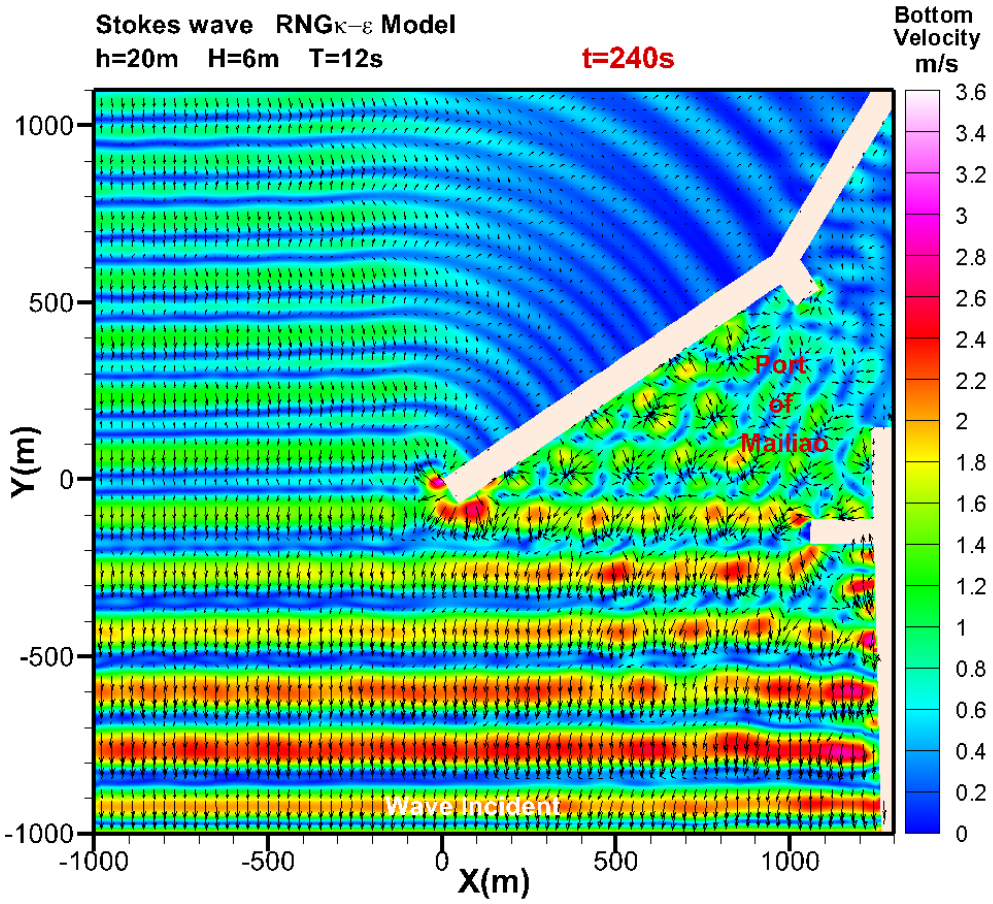


圖 5.26 (續)　南側海域入射波海床層水分子速度向量時序圖

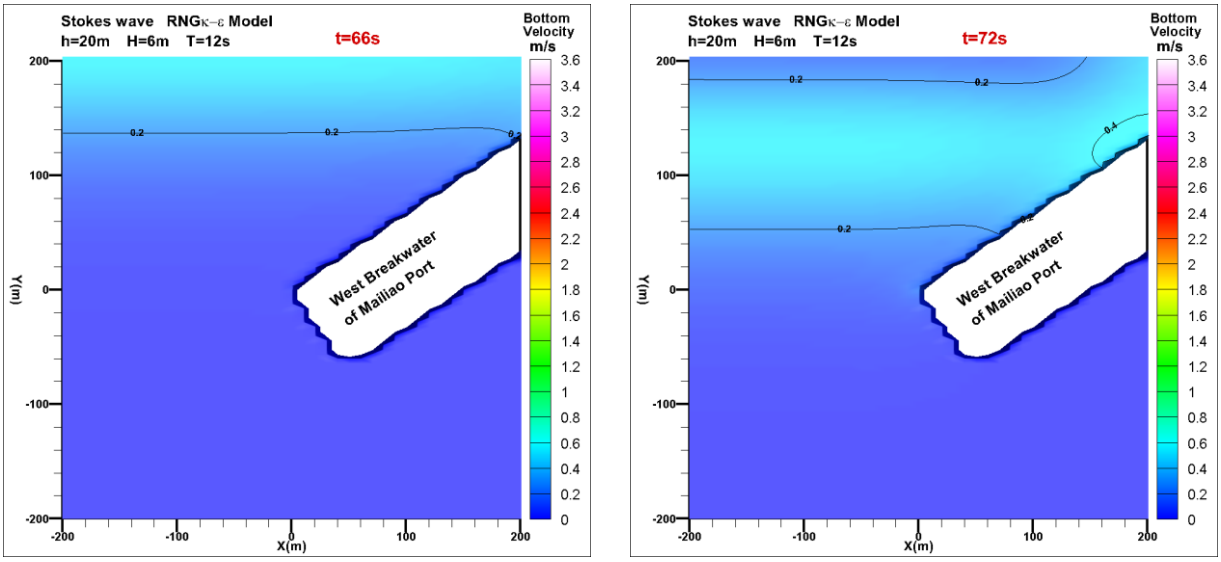


圖　5.27　北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

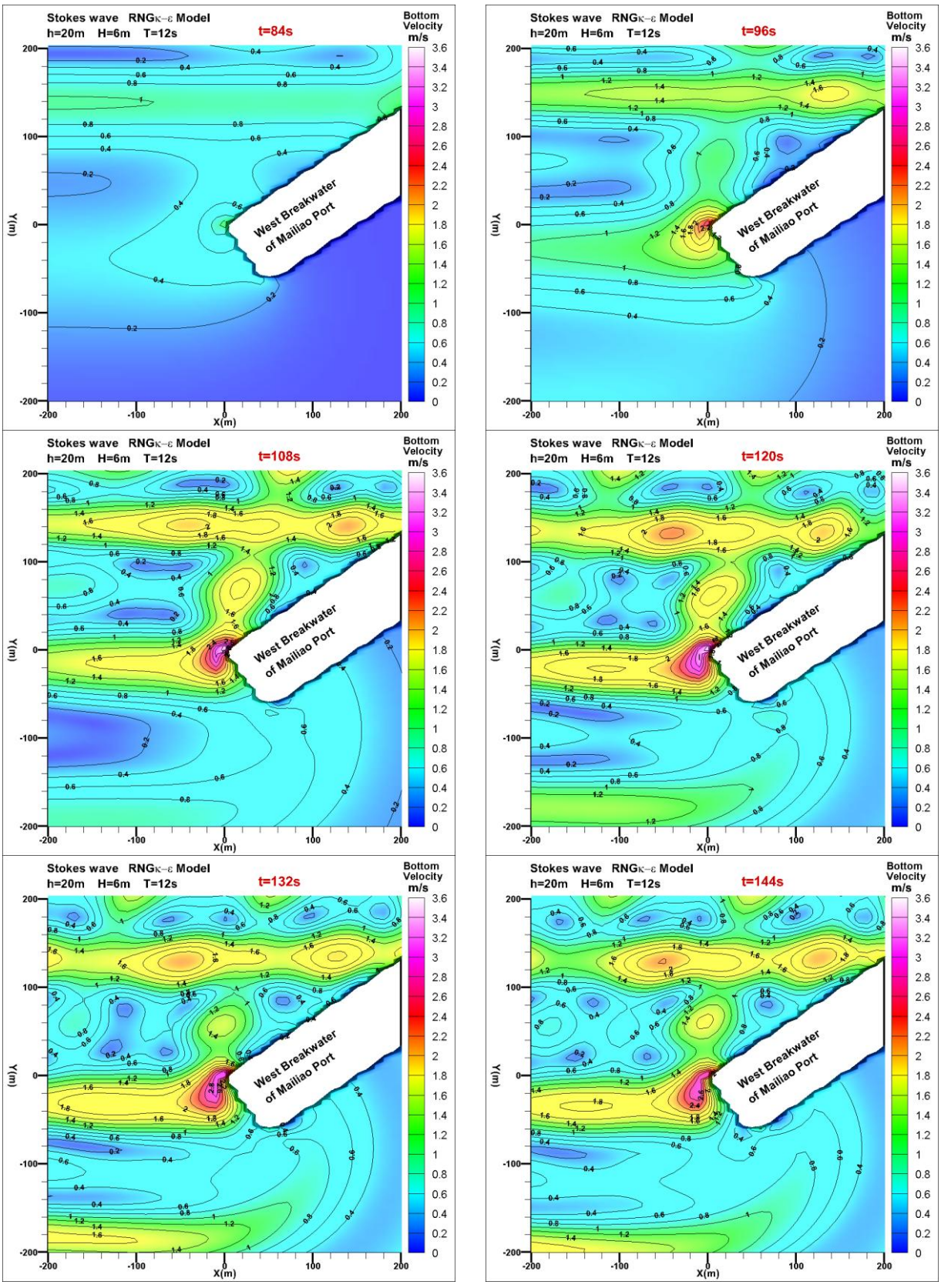


圖 5.27(續) 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

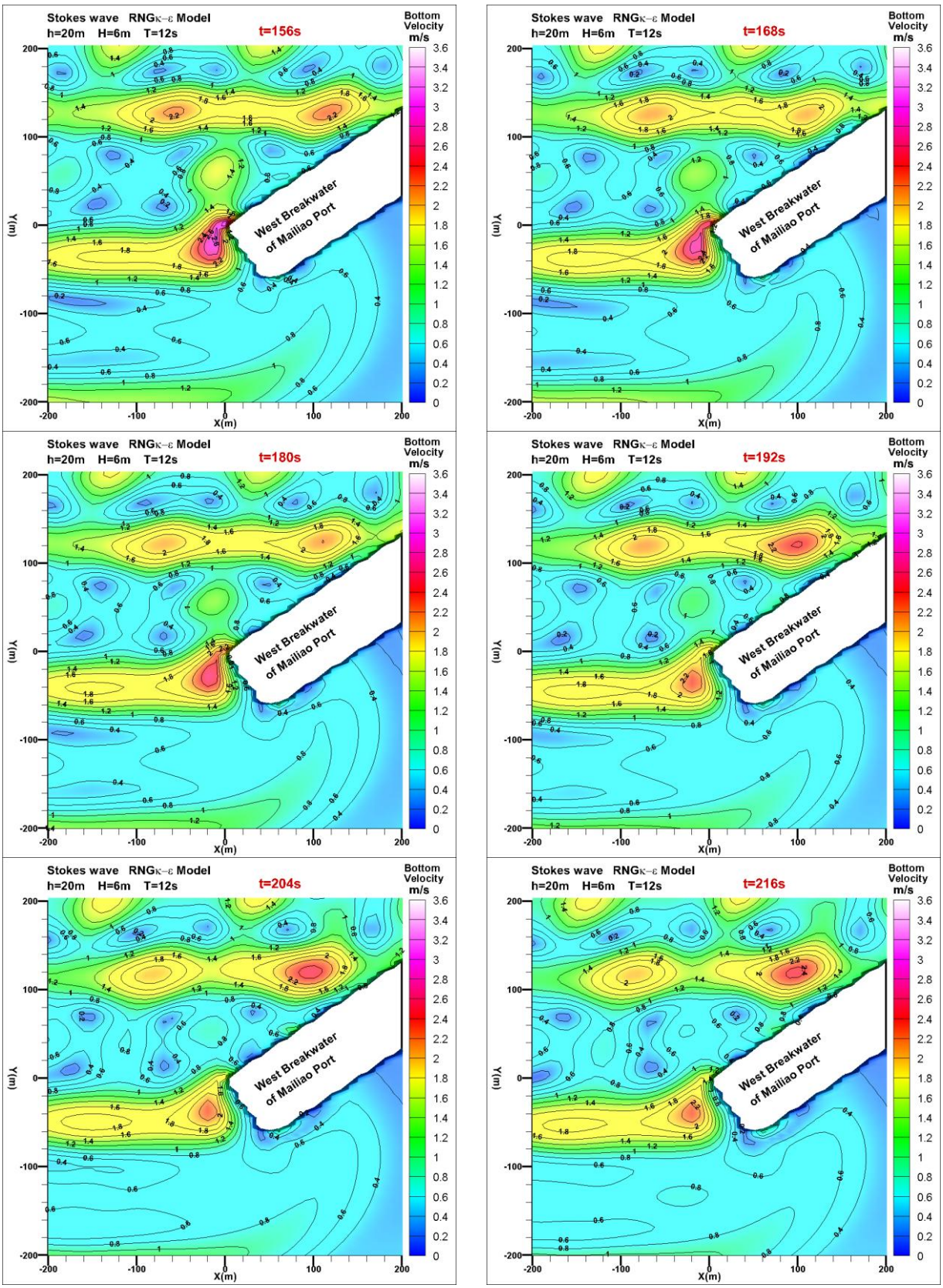


圖 5.27(續) 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

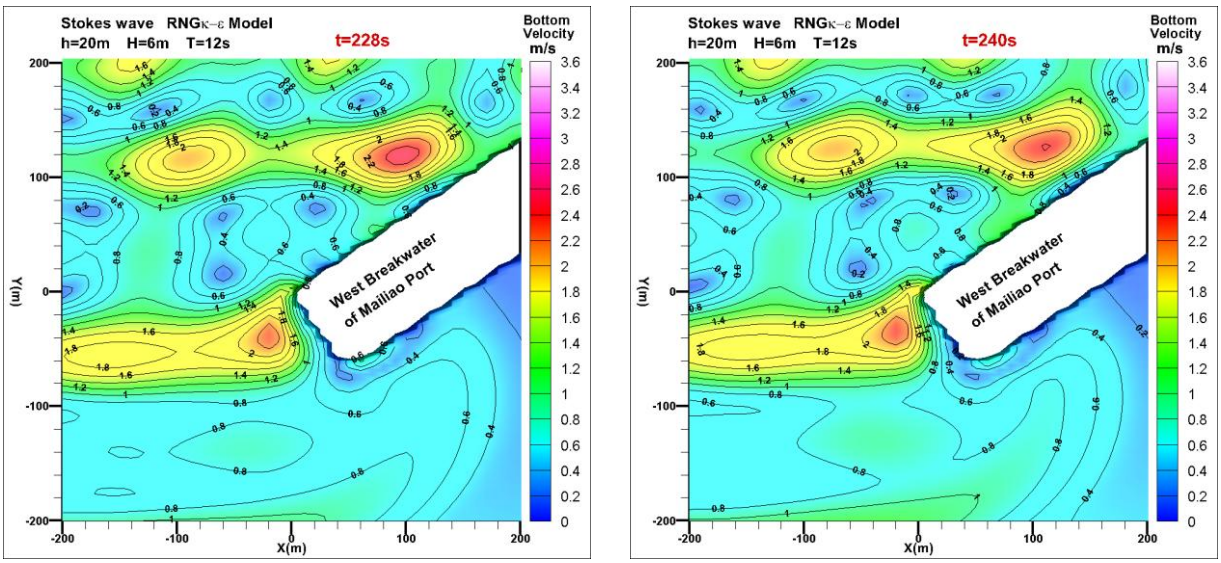


圖 5.27(續) 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

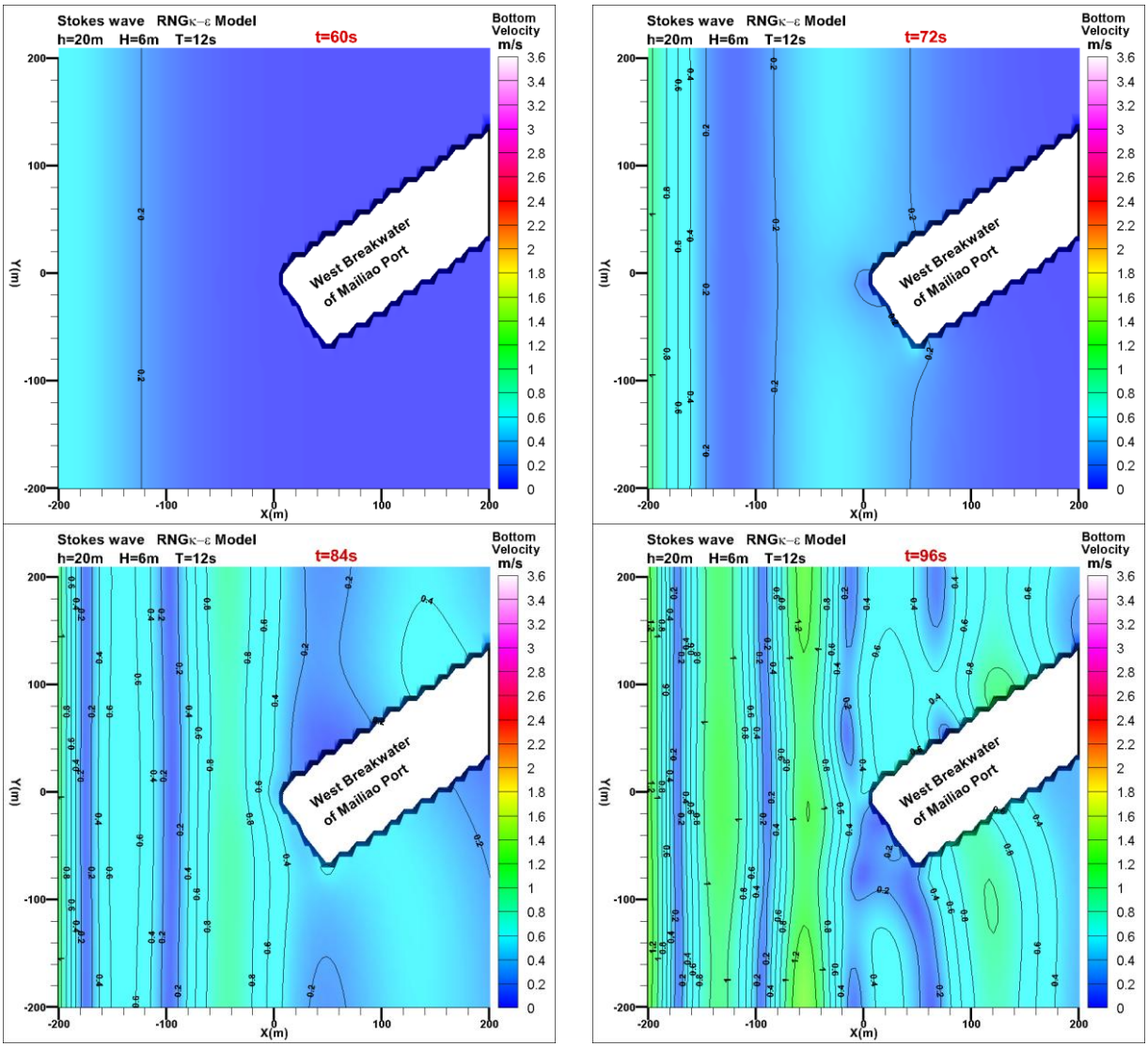


圖 5.28 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

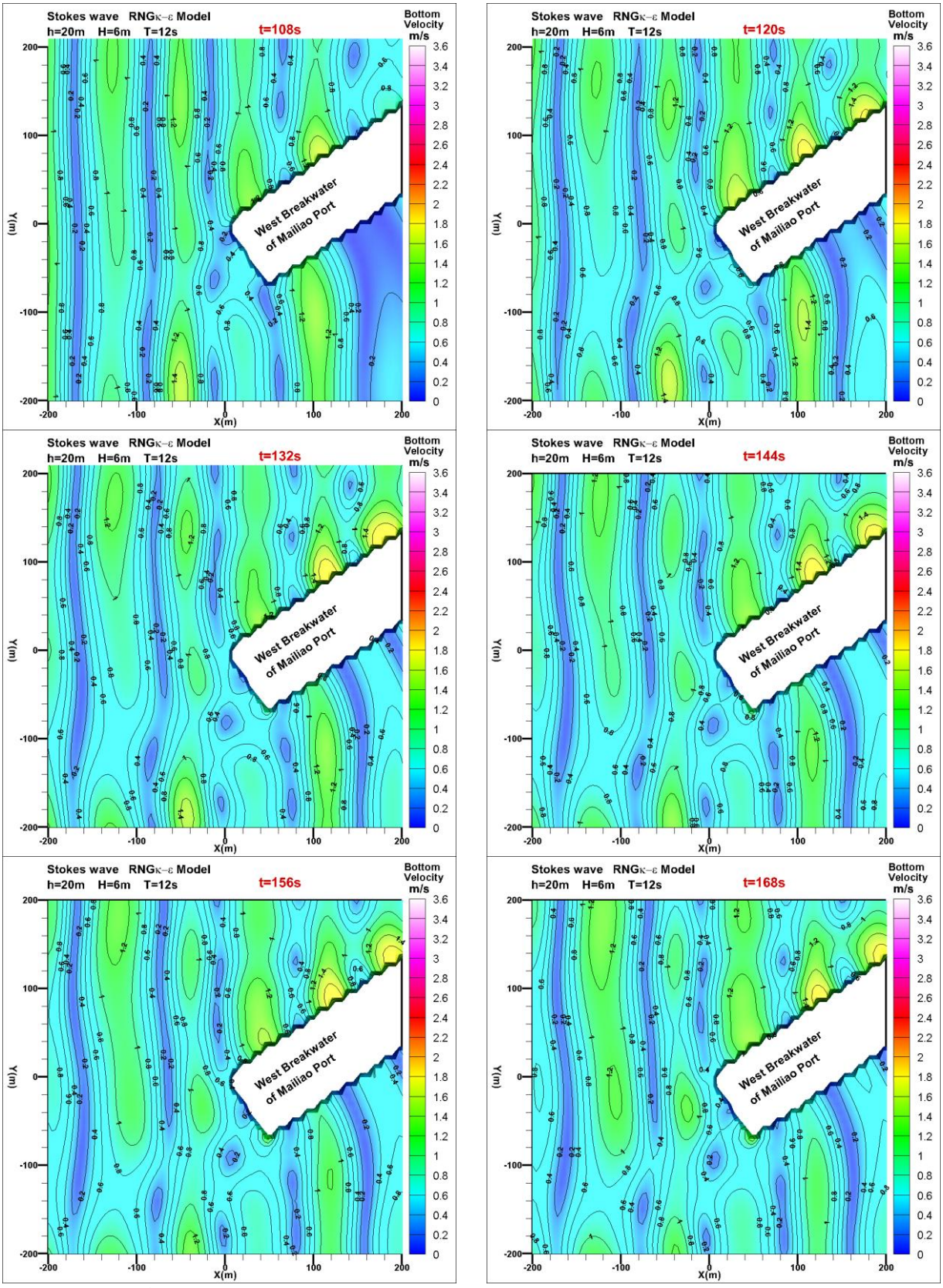


圖 5.28(續) 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

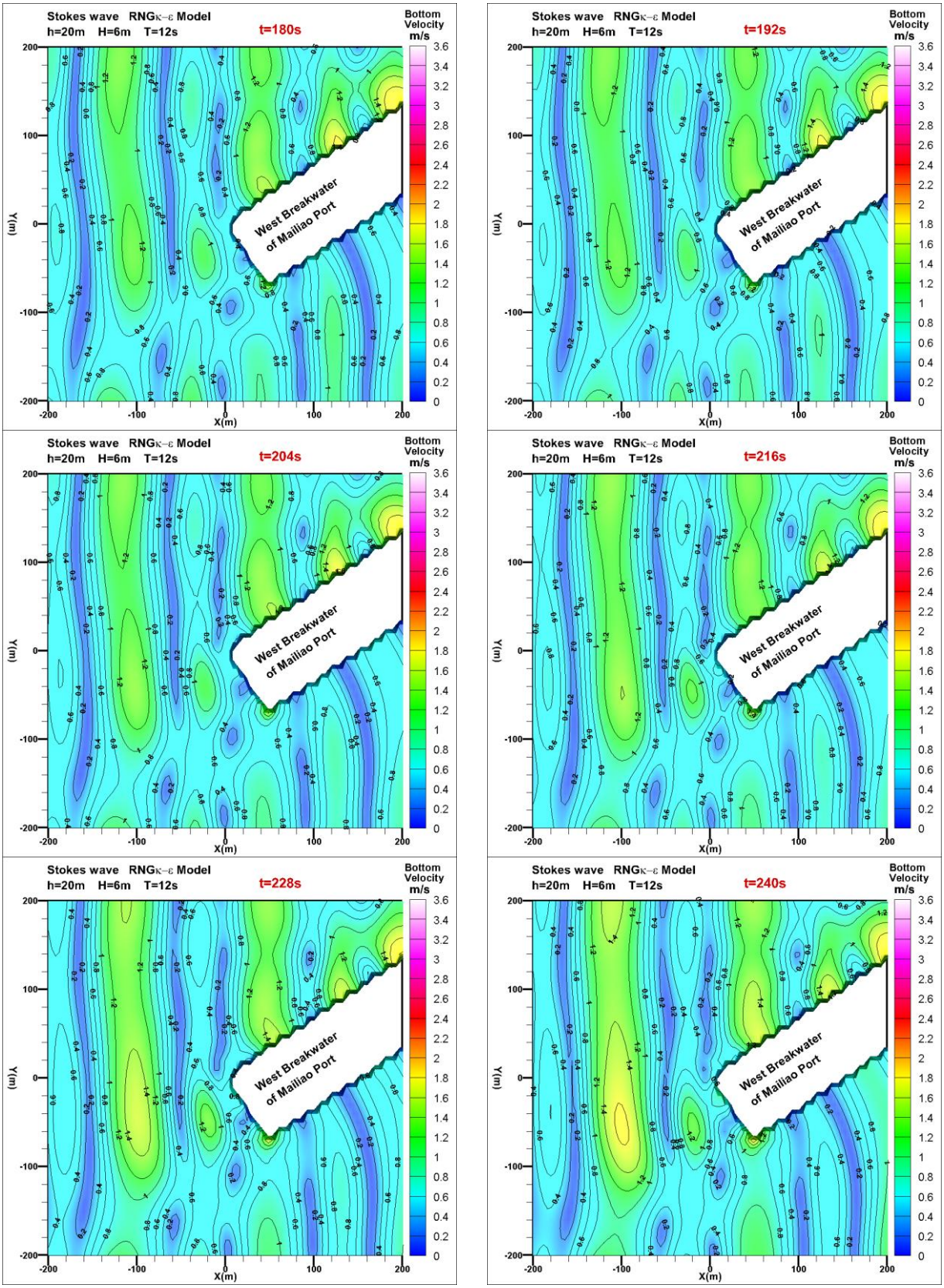


圖 5.28(續) 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

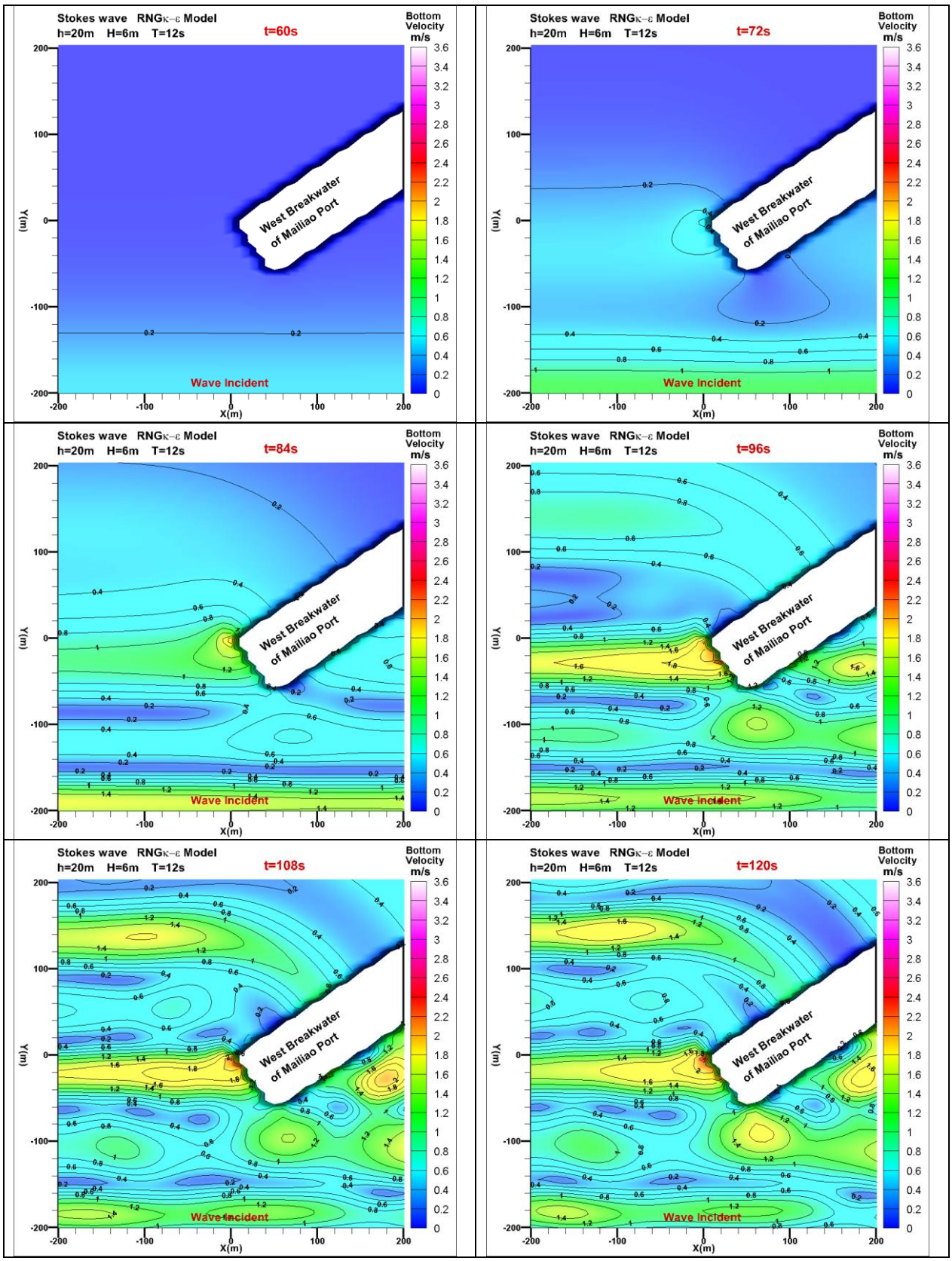


圖 5.29　南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

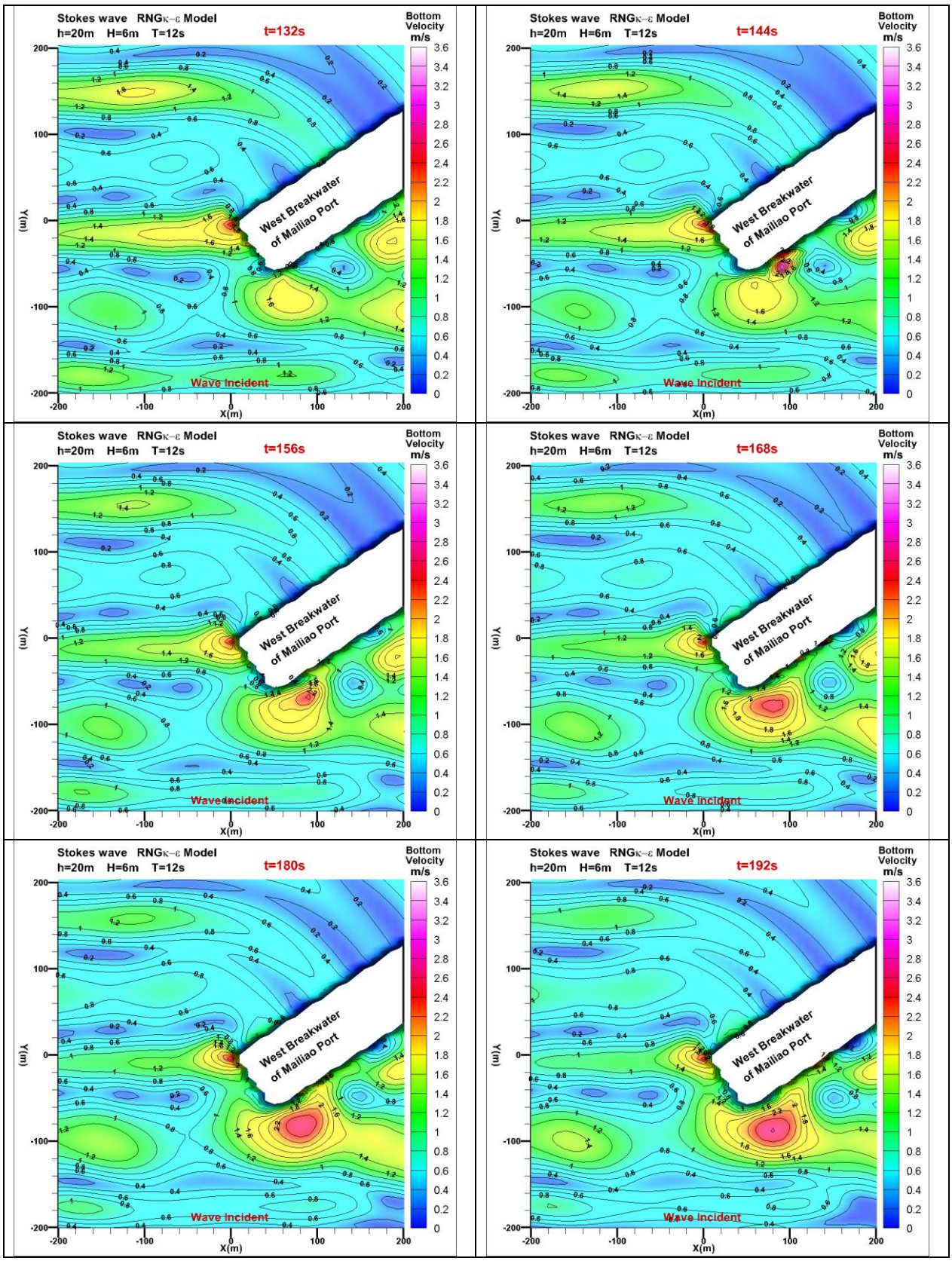


圖 5.29(續) 南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

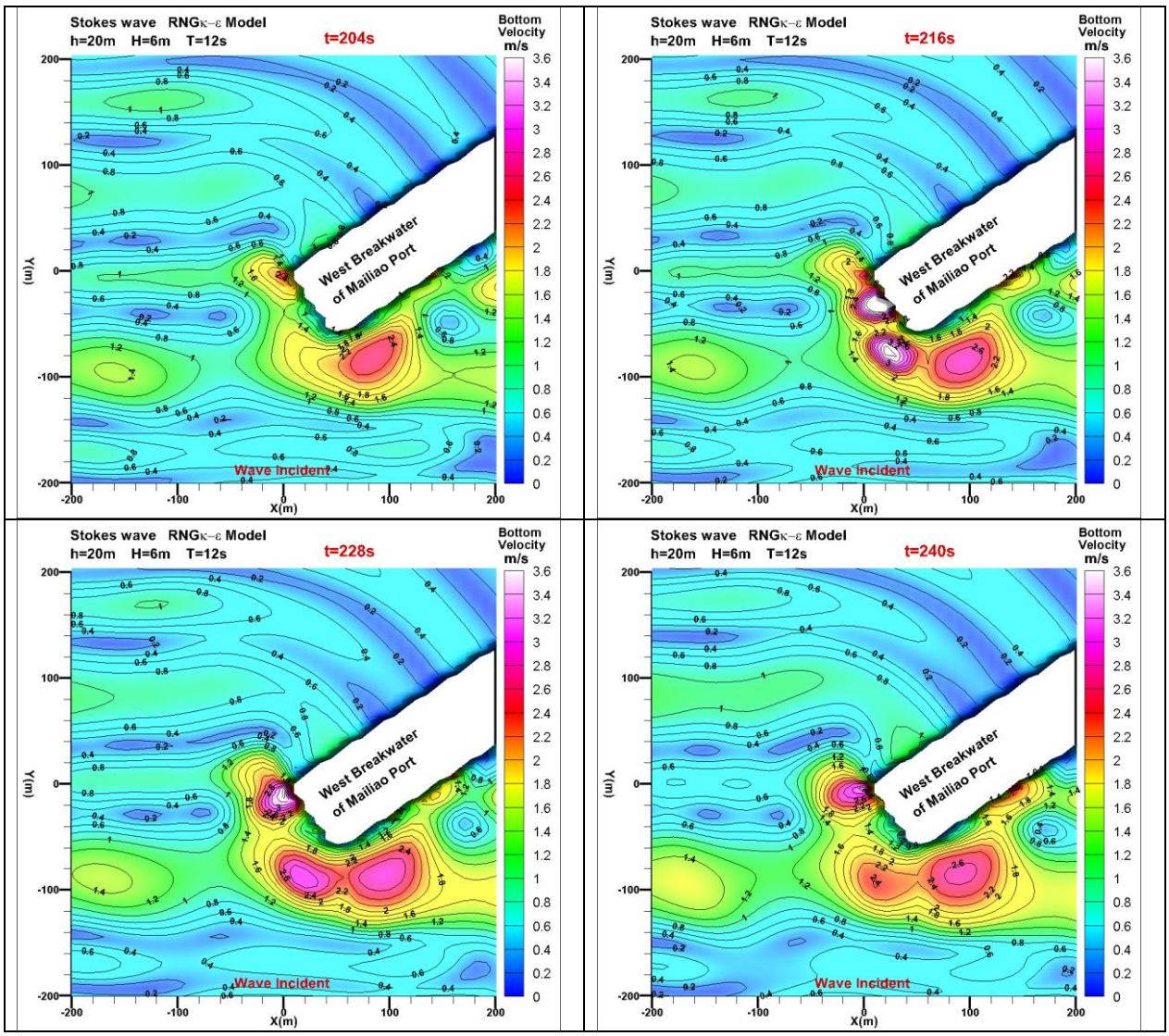


圖 5.29(續) 南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度等位時序圖

二、堤頭前之垂直流況變化

依不同波浪入射方向繪製通過緊鄰西防波堤堤頭的流況垂直剖面，結果如圖5.30至圖5.32所示。其中北向入射波場的水分子速度分佈如圖5.30所示，模擬時間 108sec 之後，在坐標原點附近的水分子速度垂直分佈，保持運動方向向下且超過 2m/sec 的水分子速度，尤其在 108sec 與 120sec 時水分子速度最大值達到 4m/sec，評估此波浪條件下所引發的流場，應造成底床相當程度的影響。堤頭的下游面，受到結構物的遮蔽，垂直流場則仍有 1m/sec 左右、運動方向向上的流動。

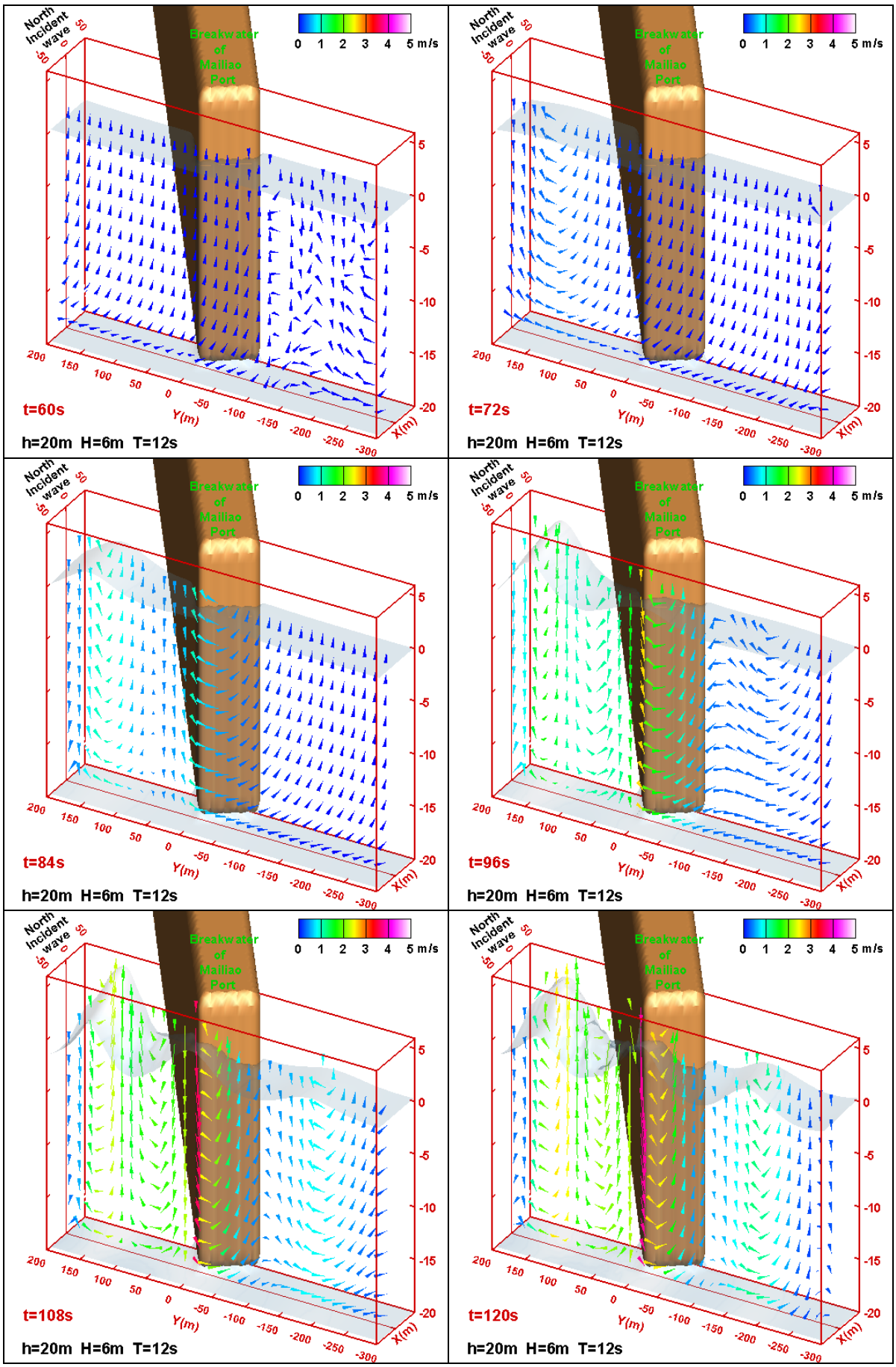


圖 5.30　北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

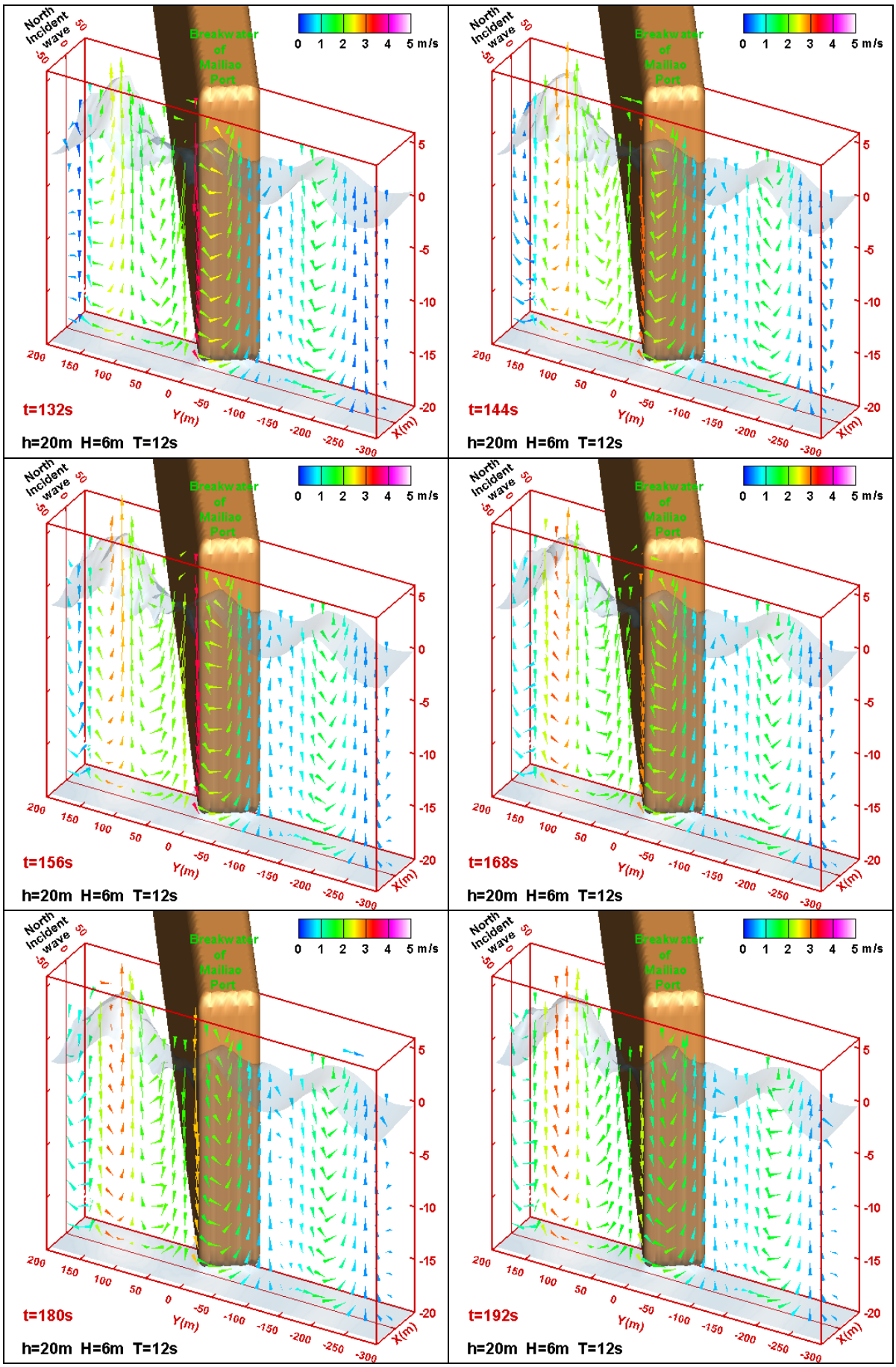


圖 5.30(續) 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

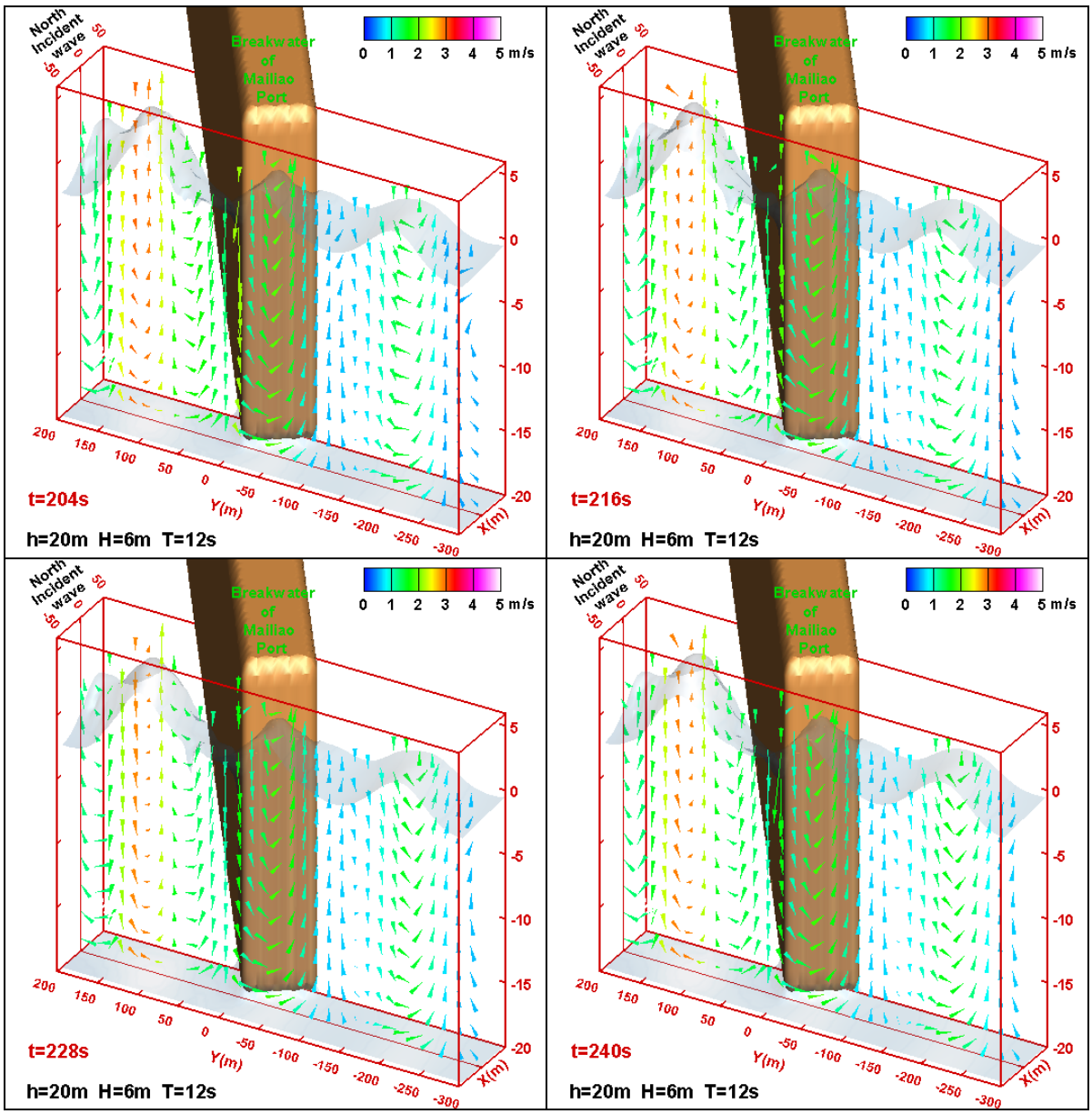


圖 5.30(續) 北側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

西向入射波場的水分子速度分佈如圖5.31所示，處於坐標原點的堤頭垂直流況，受到結構物的影響，於取樣的結果皆是呈現向上流動、水分子速度在 1m/sec 附近。模擬時間經過 204sec 後，防波堤南北兩側的流況漸漸產生差異，北側水分子速度增加至 2m/sec，南側則維持於 1m/sec 左右。上至下層的水分子速度變化並無明顯的減小，只是受到底床邊界限制，促使最下層的流向平行於底床平面。

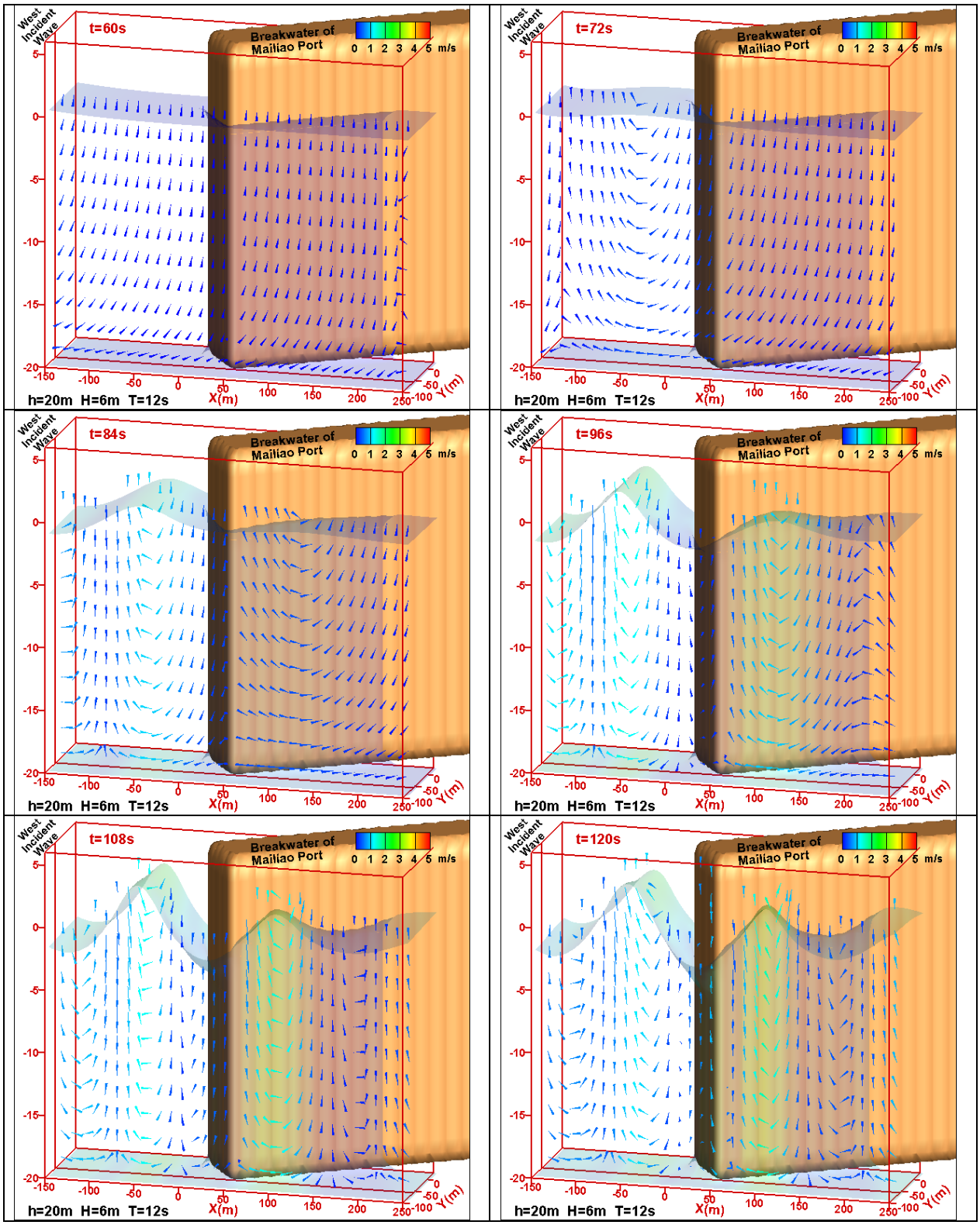


圖 5.31　西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

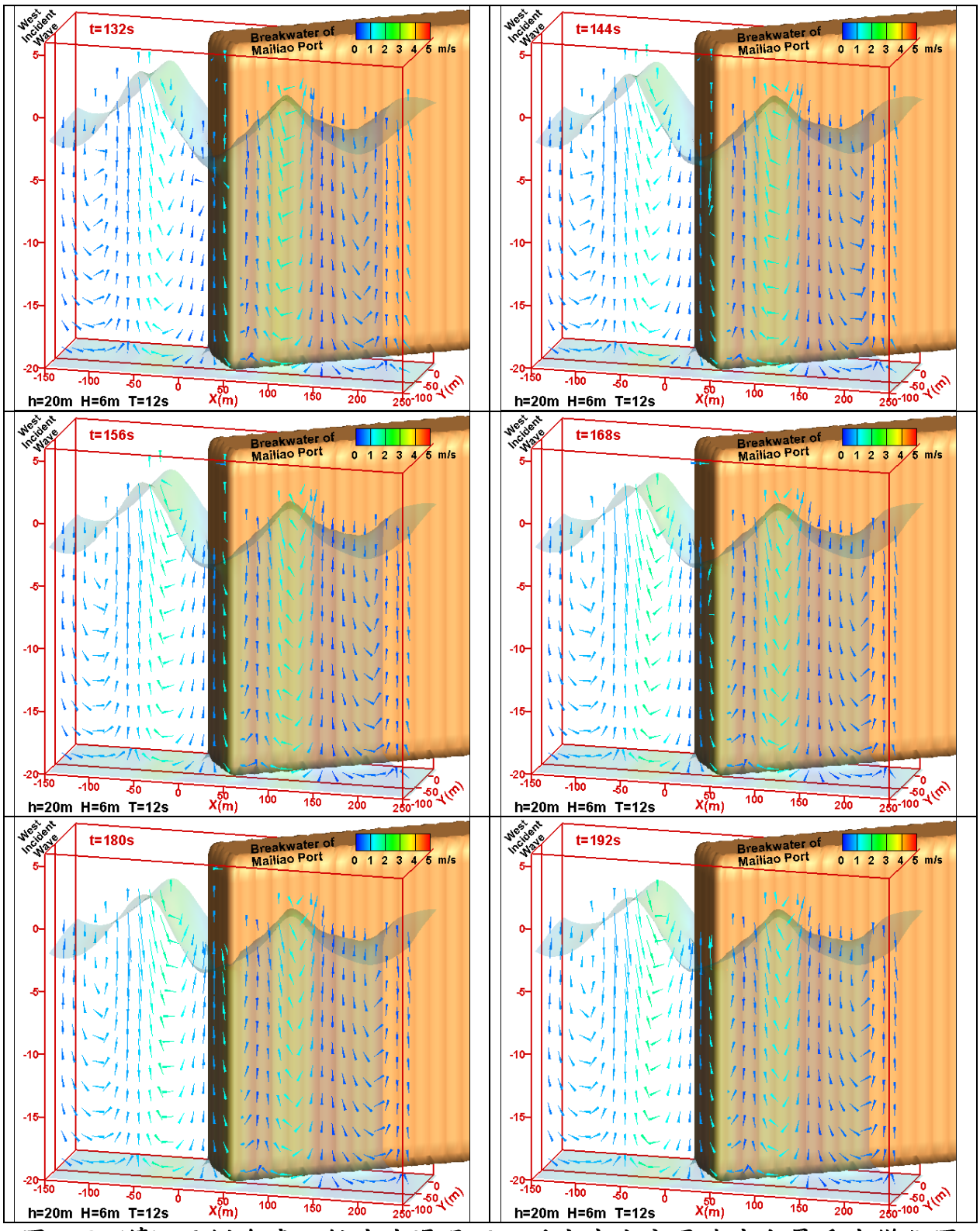


圖 5.31(續) 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

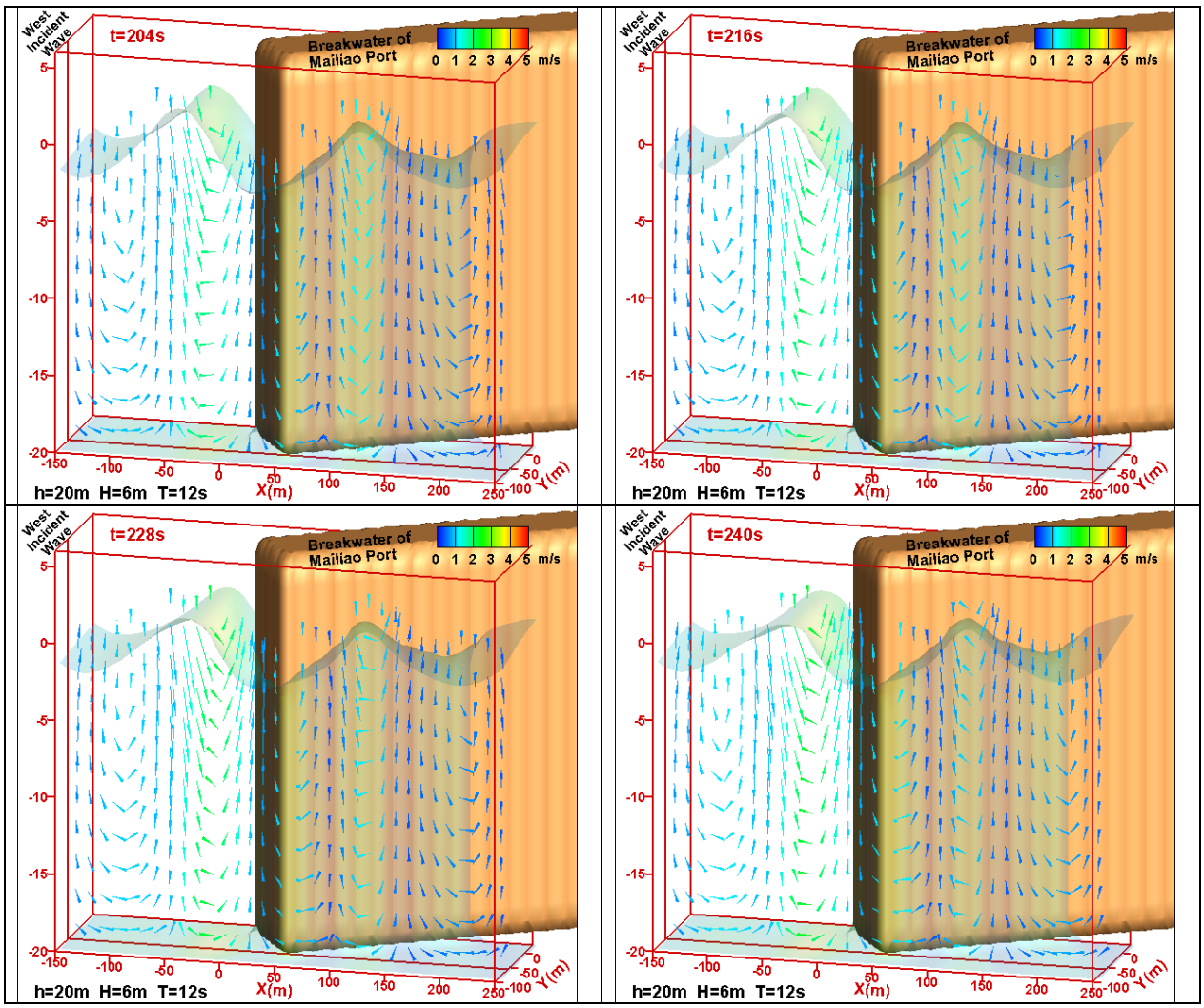


圖 5.31(續) 西側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

南向入射波場的垂直水分子速度分佈如圖5.32所示，經過 84sec 後，平面坐標原點處，產生水分子速度約 2m/sec 的向北水平流動，並隨著模擬時間的增加，速度值逐漸攀升。時間經過 204sec 後，此水分子速度已達到3m/sec，流向亦轉向西至西南方。底床上較於水面水分子速度略有下降，但並非相當明顯。另外於堤頭南側的垂直水分子速度分佈 (Y=-150~-200m)，可觀察到一處入、反射波疊合而造成水分子速度與水位皆增大的現象。但此處的水分子速度最大值約是 2m/sec 左右，相較之下，原點處的水分子速度增加的情況相對地劇烈。

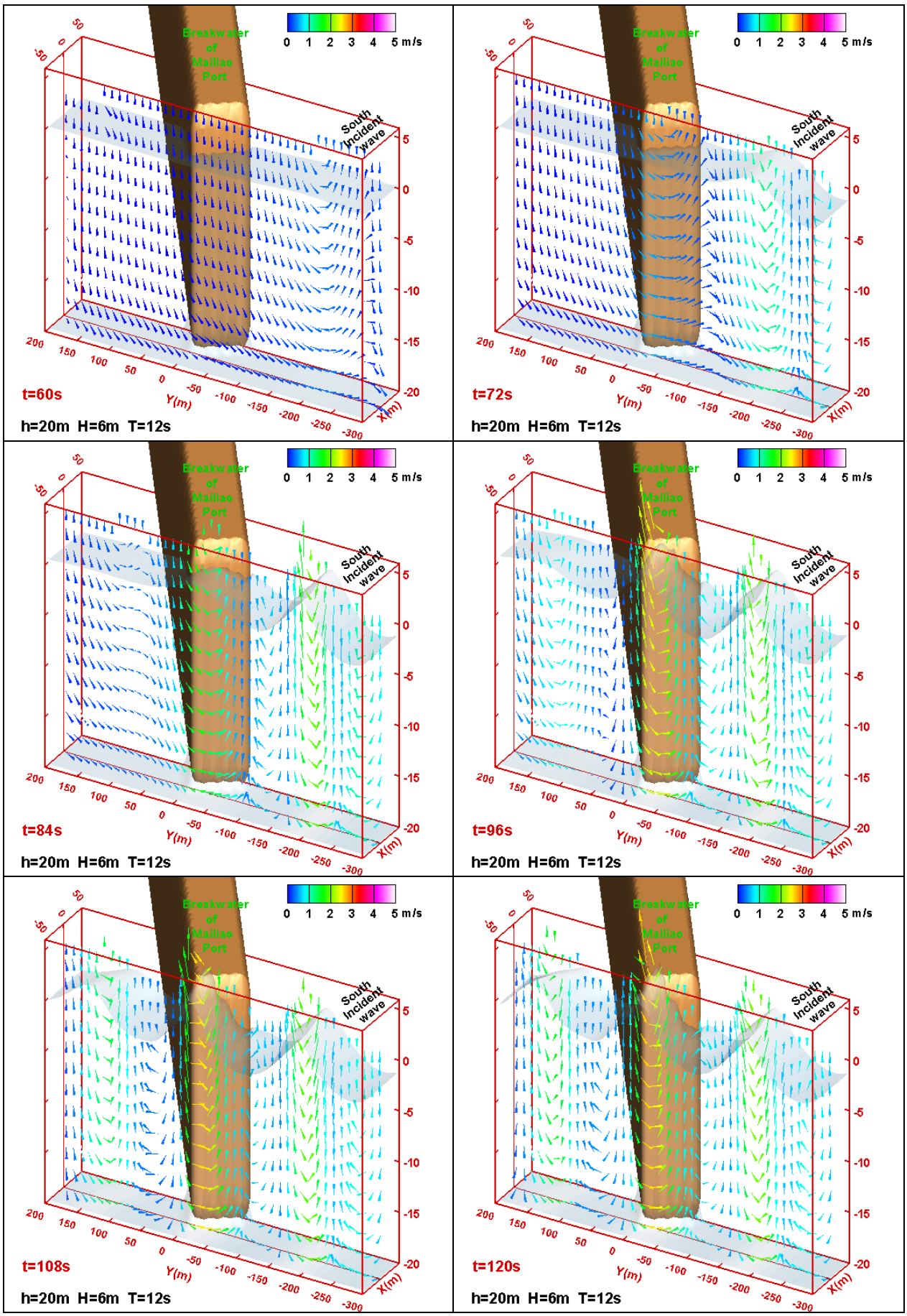


圖 5.32　南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

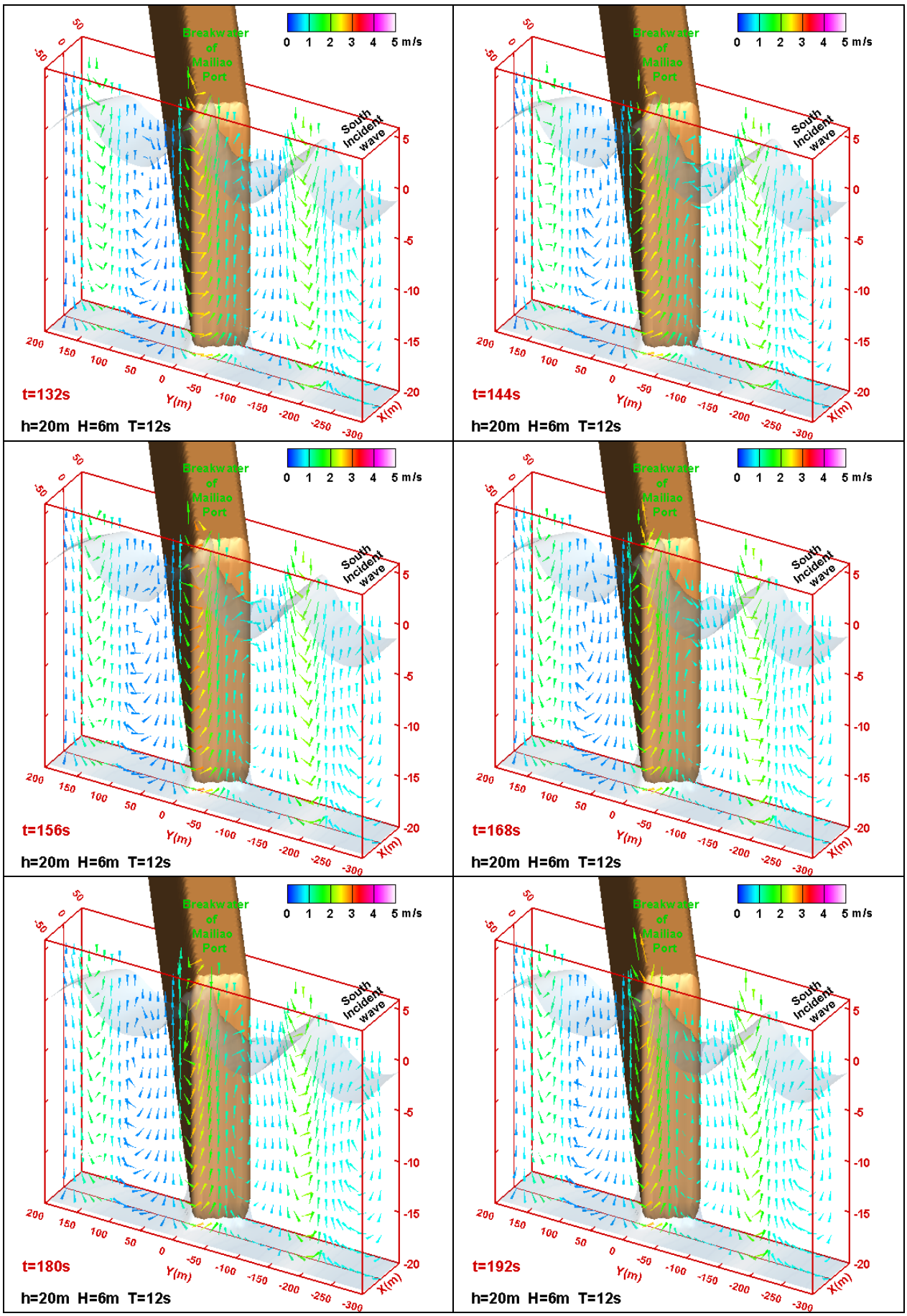


圖 5.32(續) 南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

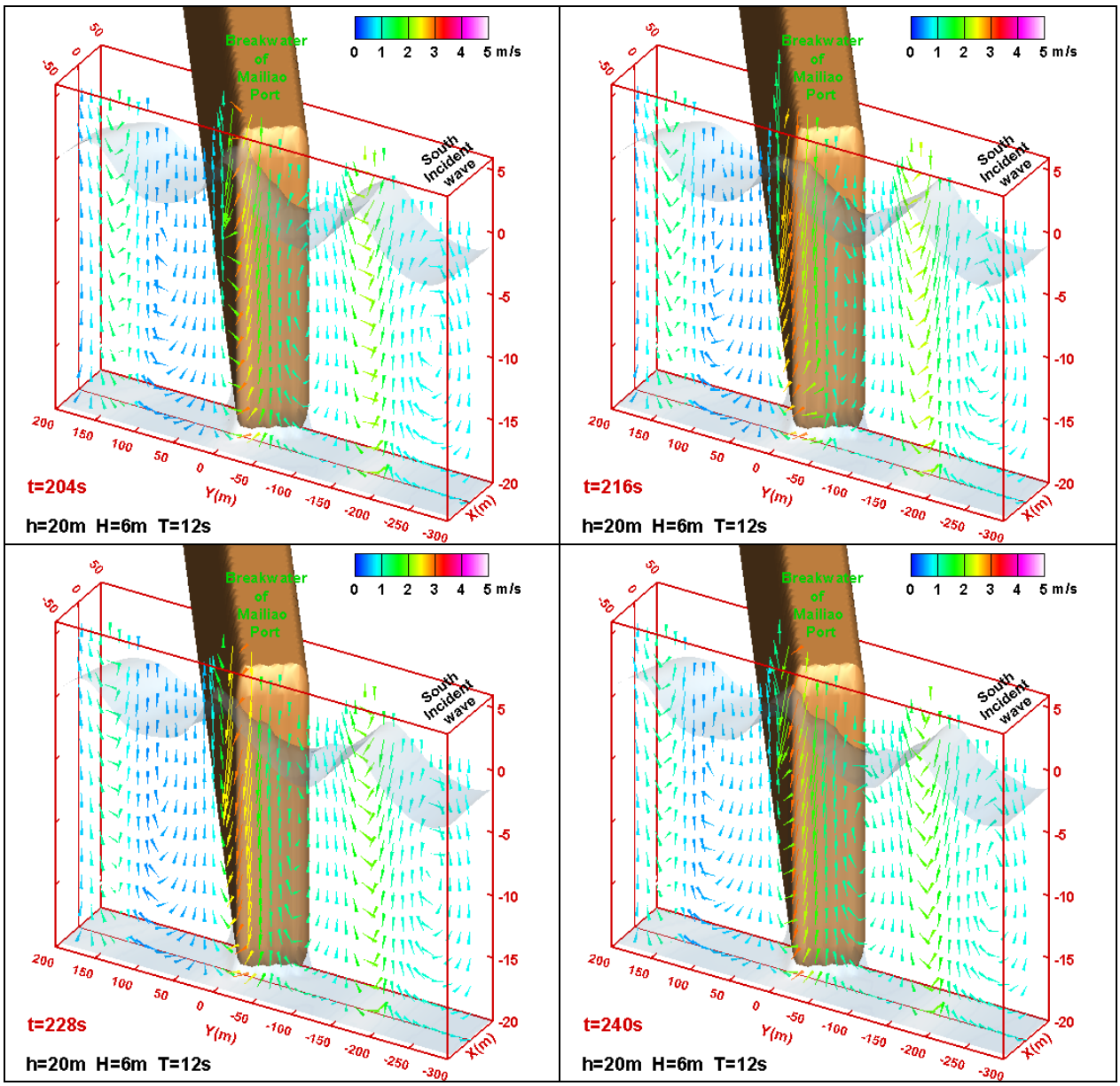


圖 5.32(續) 南側海域入射波波場堤頭附近底床水分子速度向量垂直變化圖

三、防波堤頭附近最大底床水分子速度分佈分析

為了進一步瞭解數值模型波場內的流況，並提供更易於理解的資訊，對數值的時序列計算結果，進行統計與分析。所採用的方法是將網格以每 40m 間距取樣，用以代表此40×40m^{2}的小區域的流場，因此 X、Y 方向各分隔成12個小區域，對該小區域內所有模擬時間步階的水分子速度由大至小進行排序，其第一筆資料即為最大值 (V_{max})，並計算其總資料量的前十分之一的水分子速度平均值 ($V_{1/10}$)。

北向入射波浪模擬結果的水分子速度最大值統計如圖5.33所示，極值排序前十分之一的平均值則如圖5.34所示。兩圖速度分佈的形式並無過大的差別，在同樣區域，北側領域的 $V_{1/10}$ 約為V_{max} 的90%，南側則$V_{1/10}$ 約為V_{max} 的80%，推測北方區域的水分子速度分佈較為集中。單就水分子速度最大值而言，模擬過程中產生的最大水分子速度為 3.63m/sec，位於西防波堤堤頭的北端點小區域，其北方緊鄰的區域，亦產生有 2.82m/sec 的水分子速度最大值。對照 $V_{1/10}$ 堤頭北端點處，平均值為 3.15m/sec。比對西防波堤南北兩側的統計值，南側海域的 $V_{1/10}$ 皆小於1.5m/sec，北側則皆大於 1.5m/sec。將統計結果繪製水分子速度等值線，結果如圖5.35所示。不管是水分子速度極大值或是前十分之一平均值的結果顯示，等水分子速度線繞著防波堤變化，由堤身南側開始，呈現順時鐘方向漸增的現象，並且在堤頭北端點則形成水分子速度梯度變化劇烈的區域。

西向入射波浪模擬結果水分子速度最大值統計如圖5.36所示，極值排序前十分之一平均值則如圖5.37所示。比較 $V_{1/10}$ 與 V_{max}，雖各小區域並非完全一致，但所有區域的 $V_{1/10}$ 約為 V_{max} 的90%，即兩者速度分佈的統計結果相當接近。所求得的速度最大值發生於西防波堤堤頭的西方頂點區域，V_{max} 值為 2.15m/sec，周圍的區域並無超過 2m/sec 的水分子速度，整個計算範圍內最大水分子速度多在 1~1.5m/sec 間變動。$V_{1/10}$ 與 V_{max} 的水分子速度等值線如圖5.38所示。結果顯示等水分子速度區域在西防波堤的西南外海分割成兩區域，而堤頭的端點則是水分子速度梯度變化較為明顯的封閉區。

南向入射波浪模擬結果水分子速度最大值統計如圖5.39所示，極值排序前十分之一的平均值則如圖5.40所示。此入射波向的最大水分子速度值也是發生在西防波堤堤頭北端點的小區域，最大的極值達到 3.27m/sec，$V_{1/10}$ 則是 2.87m/sec。最大水分子速度值除了西防波堤北方海域與接近港口處小於1m/sec，整體皆是超過 2m/sec。$V_{1/10}$ 與 V_{max} 的水分子速度等值線如圖5.41所示，圖中在堤頭的端點與堤身的南側都有著緊密的等速度變化曲線。雖該波向下的流場水分子速度極值較高，除了此二處外，計算範圍內的速度極值變化幅度呈現平緩。

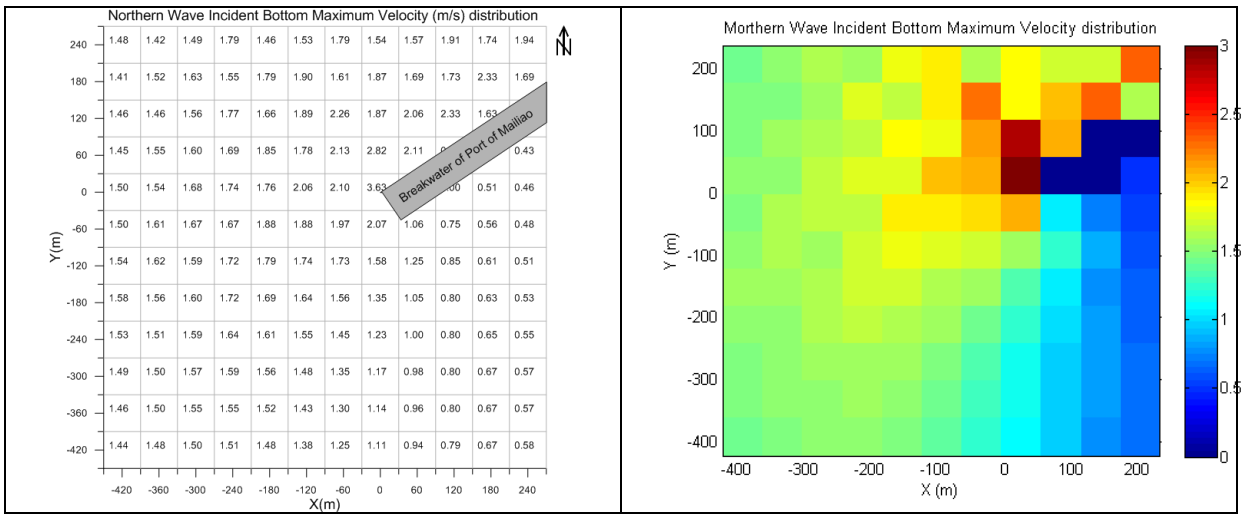


圖 5.33 北側入射波場底床最大水分子速度(V_{max})分佈圖

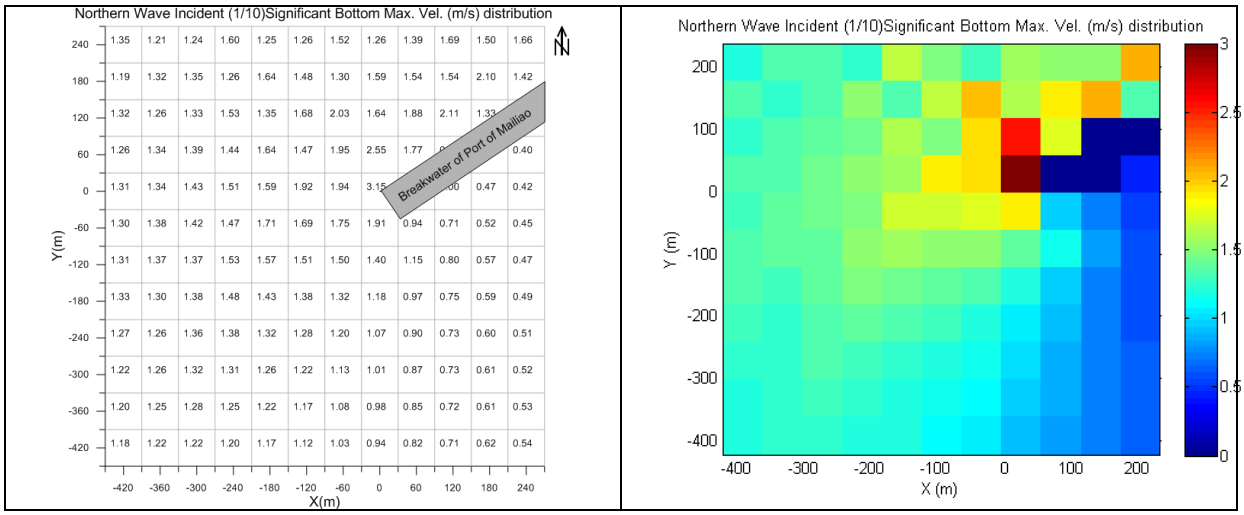


圖 5.34 北側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均($V_{1/10}$)分佈圖

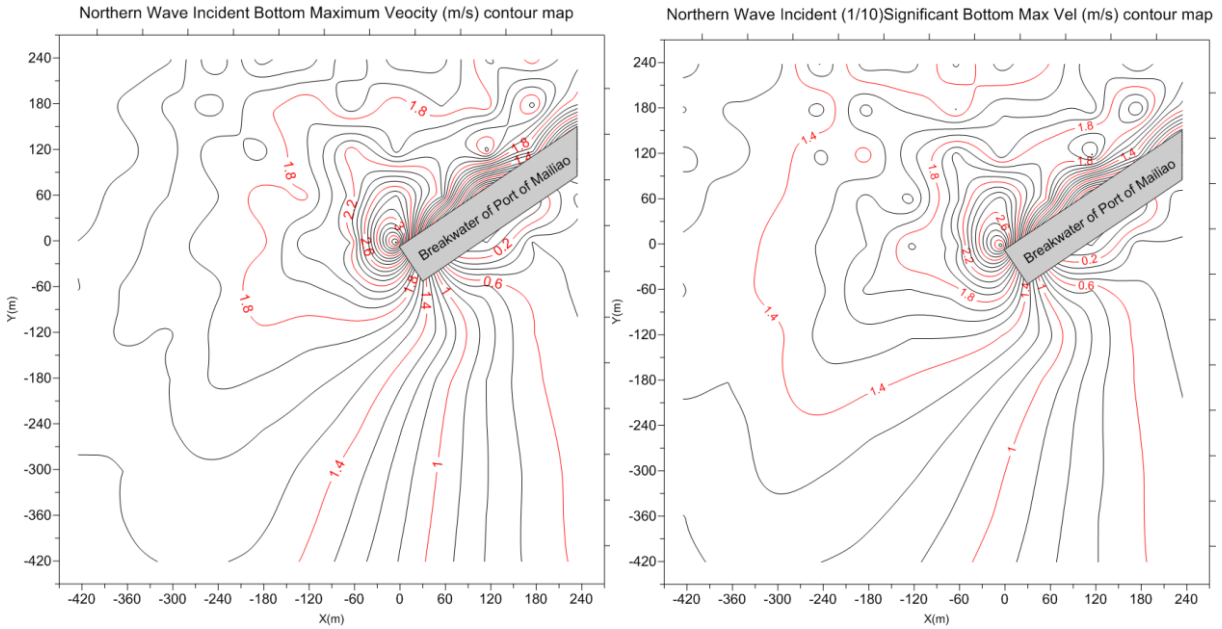


圖 5.35 北側入射波場堤頭附近底床 V_{max}、$V_{1/10}$ 等位圖

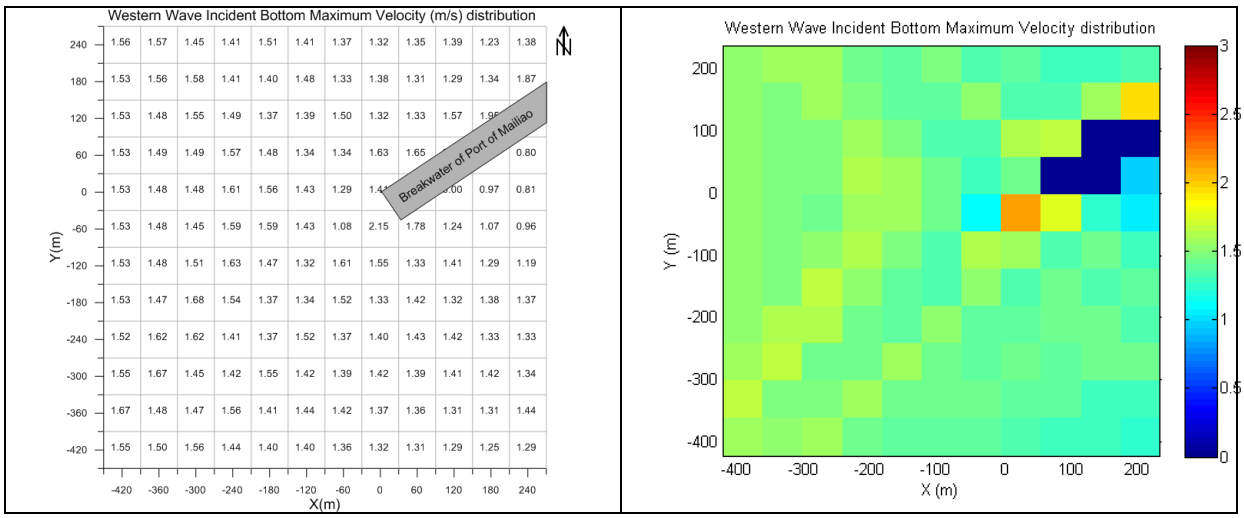


圖 5.36　西側入射波場底床最大水分子速度(V_{max})分佈圖

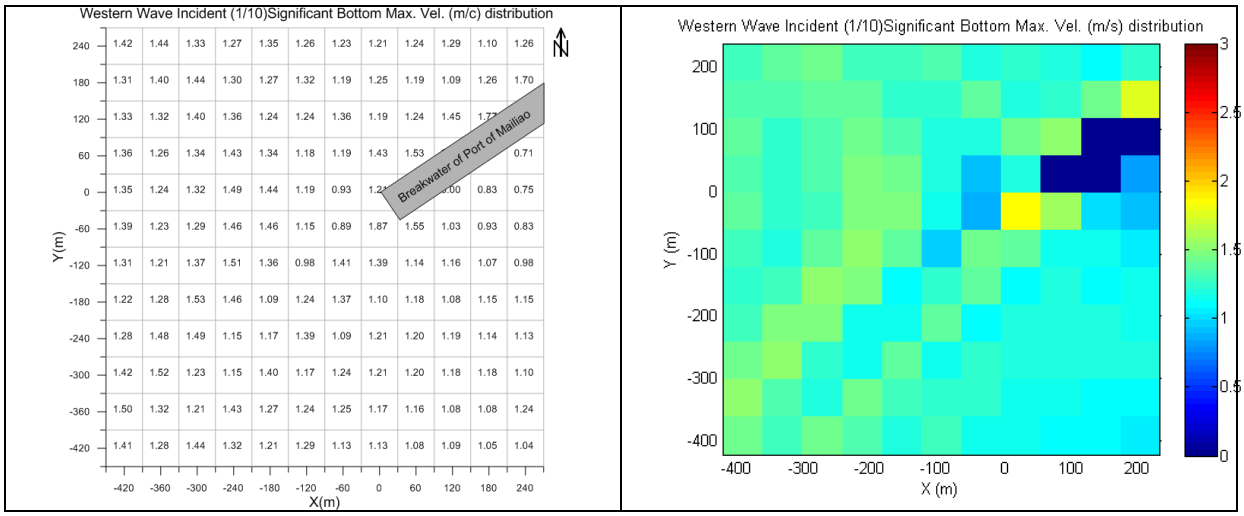


圖 5.37　西側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均($V_{1/10}$)分佈圖

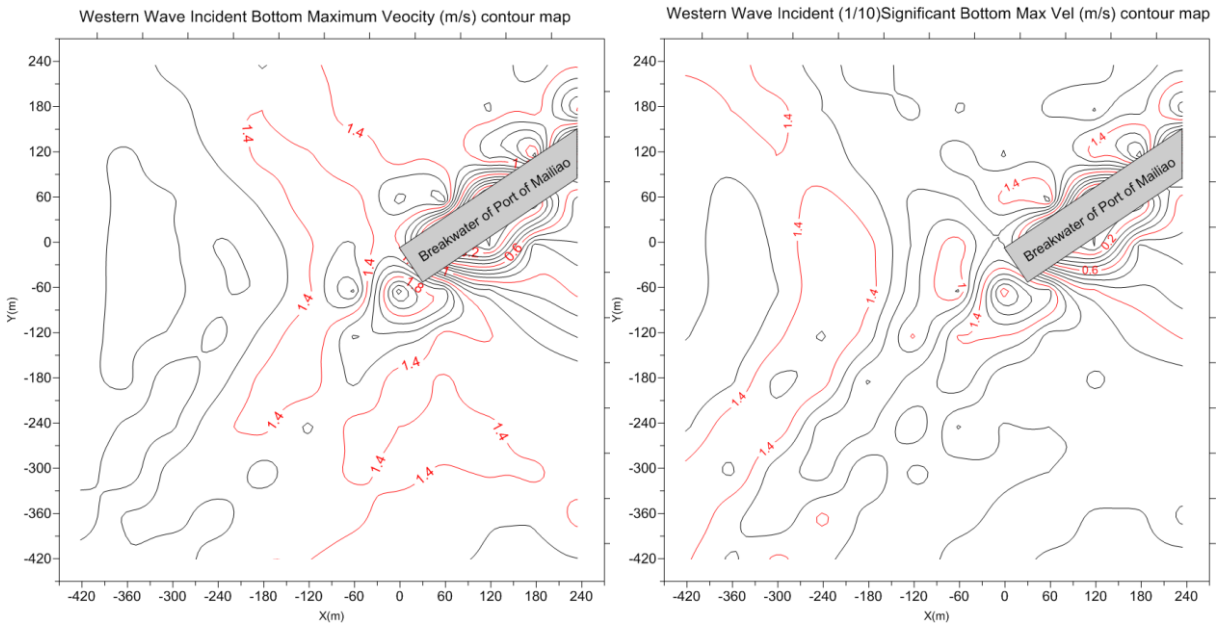


圖 5.38　西側入射波場堤頭附近底床 V_{max}、$V_{1/10}$ 等位圖

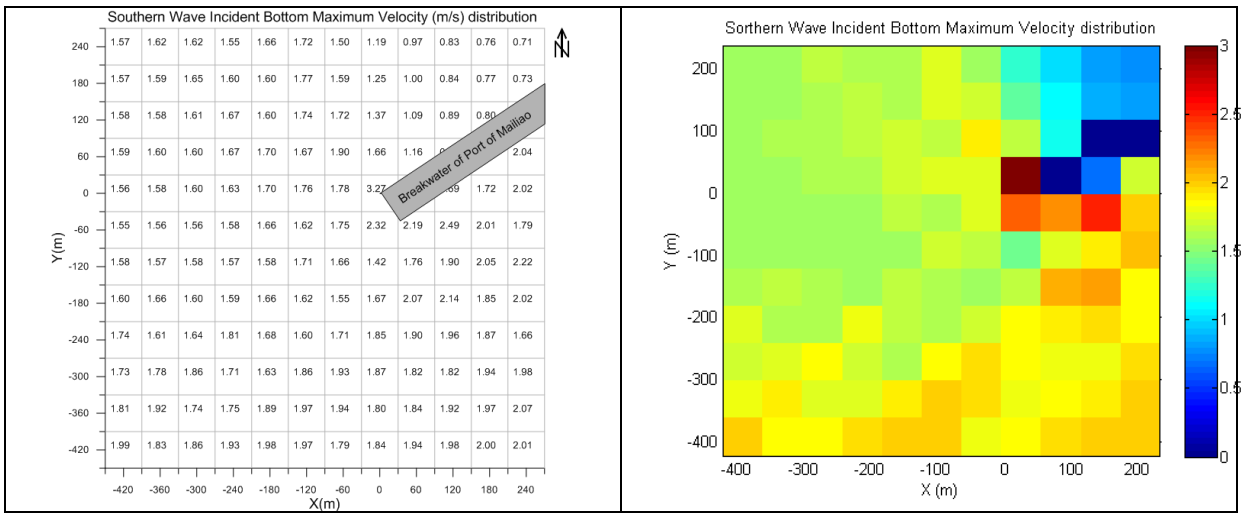


圖 5.39　南側入射波場底床最大水分子速度(V_{max})分佈圖

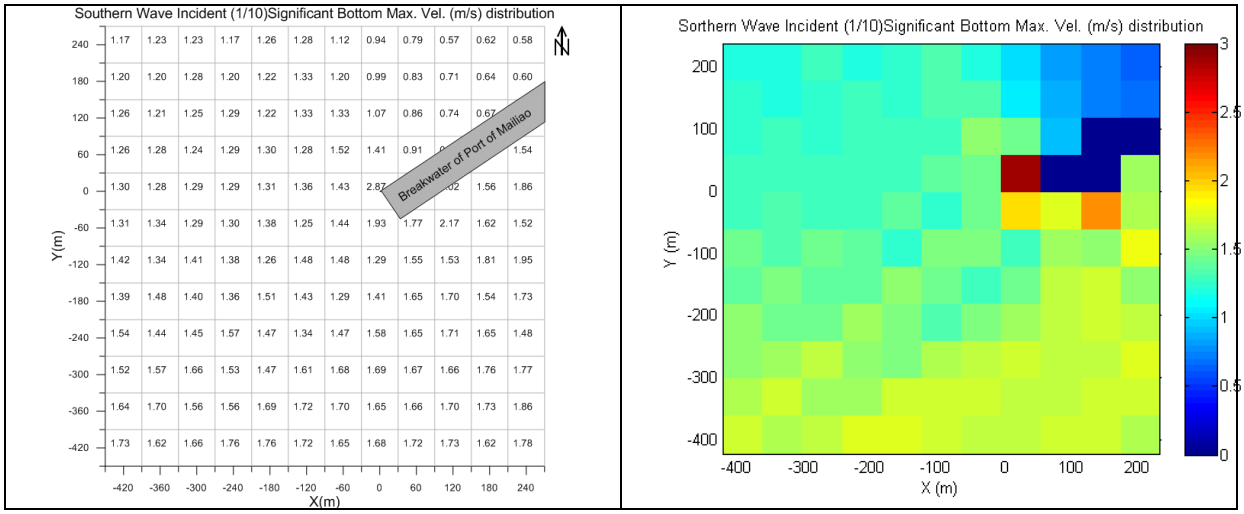


圖 5.40　南側入射波場底床最大水分子速度前十分之一平均($V_{1/10}$)分佈圖

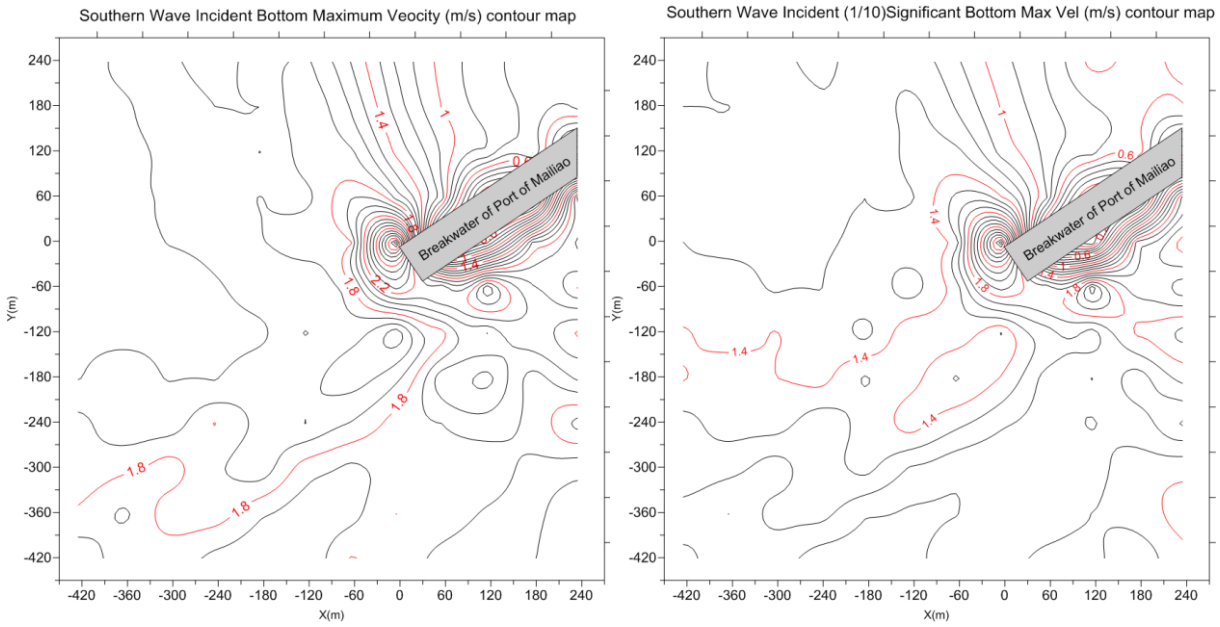


圖 5.41　南側入射波場堤頭附近底床 V_{max} 、 $V_{1/10}$ 等位圖

5.4 綜合結論

利用 FLOW-3D 對臺中港與麥寮港防波堤海域進行數值模擬，臺中港範圍 13km × 17km、平均深度 20m，麥寮港計算範圍 12km × 16km、平均深度 20m。數值模式分別使用邊界潮位驅動潮流模擬研究區域內的流場，以及使用設計條件的颱風波浪，模擬從不同入射波向的波場。為了驗證模式的特性，以 Liu(1984) 半無限長直立堤與孤立波作用之實驗資料進行比較。驗證成果顯示，FLOW-3D 建立的數值模型與文獻記載結果具相當程度的穩合。

引用 2011 年 6 月 10 日至 6 月 15 日間實測潮位資料，模擬麥寮港附近海域漲退潮的流況。漲潮時自西防波堤堤頭，向北形成流速大於 1.25m/sec 的帶狀區，至高潮時流速迅速減小，但堤頭北側渦流的流速仍有 0.5m/sec；退潮時，超過 1.25m/sec 的高速流場以堤頭為起點向南延伸，至低潮之時麥寮港的西南側有大範圍流速趨近於 0.75m/sec。另分析波高 6m、週期 12sec 的極端颱風波浪條件，計算作用時間 240sec 的波場以及波浪引發的流場變化。以西防波堤堤頭為原點，波浪自北、西與南等三個方向進入模型的邊界。以北向入射波而言，波浪受西防波堤北側阻擋形成反射波，大幅增長了此海域的波高，亦提高了波場下的水分子速度，而西防波堤南側海域受到堤體的遮蔽，波高變化與水分子速度變化皆小於北側。統計最大水分子速度發生於堤頭北端點，最大水分子速度為 3.63m/sec。西向入射波浪條件下，受西防波堤延伸方向影響，北側為波浪反射區，南側則是繞射區。西防波堤的阻擋面積 (反射面積) 較小，波高與水分子速度的增長不若北向入射波場明顯，但是統計的最大水分子速度仍有 2.15m/sec。而南向入射波場則在東防波堤與西防波堤之間產生波浪反射區，在模型邊界無設置消能設施情況下 (現場防波堤側佈置有消波護基)，多次反射的波浪疊加造成水分子速度大幅度提升。統計最大的水分子速度值達到 3.27m/sec，發生位置同樣位於西防波堤堤頭的北端點。

藉由分開模擬潮流、波場、波浪引發的流場，至今對堤頭近域的流體動力狀態已有初步認識，未來進一步的數值模擬，將朝向波流交會與臨界漂砂特性等領域持續測試，以協助釐清與理解堤頭沖蝕的機制與變化。

第六章　防波堤堤頭沖蝕特性分析

6.1 防波堤堤頭附近地形侵淤分析

（1）臺中海域

臺中港區北側緊鄰大甲溪口，南向豐沛的砂源補注造成北防波堤以北易產生淤積。根據臺中港務分公司所提供的海域地形資料，北防波堤堤頭附近海域 85~95 年間地形侵淤變化，如圖 6.1 所示。85~86 年期間主要的地形變化，在於緊鄰北防波堤的堤頭北側形成-2~-4m 的掏蝕區塊，而於北防波堤的北側與南防波堤的西側產生+4m 的堆積，其餘地方的地形變化並不顯著。86~87 年期間，原本前年度北防波堤的侵蝕區域已回填淤積+4~+6m 的高度，抵消原本的沖刷損失。即 85~87 年期間，堤頭鄰域的侵淤變化近於平衡。

87~89 年期間，北防波堤逐漸延伸堤體的長度，堤頭西北側大量的底質遭到掏移，形成約 500m×400m 的橢形侵蝕區域，最大掏深超過-4m，緊鄰堤頭端的沖蝕範圍亦有 200m×250m。除此之外，北防波堤堤身處亦有大小不等深約-2m 的掏蝕。於北防波堤北側垂直堤體方向則形成長條型堆積帶，最大高度超越+5m，約增加 6.2 萬 m^3 的體積量。

89~91 年期間，北防波堤已向西北方外海延伸了 300m，堤頭附近的地形產生回淤現象，最大堆積高度在+2m 幅度，然尚未完全抵消 87~89 年的侵蝕深度。南防波堤西側則產生大範圍的地形掏深，侵蝕最大的幅度可達到-8m，總侵蝕量約 26 萬 m^3。91~93 年期間，北防波堤附近幾乎呈現全面淤積的現象。在 93~94 年與 94~95 年期間，北防波堤的堤頭處則持續侵蝕，掏深幅度介於-1~-8m 之間。

綜合歷年的侵淤變化結果，除了緊鄰南、北防波堤的海域地形變化較大，大多數區域則保持逐年淤積的狀態，而處大部分時間是呈現侵蝕的狀態。85~95 年期間，北防波堤堤頭累積最大掏深幅度可達-6m；北防波堤北側累積最大淤積幅度則可達+10m。

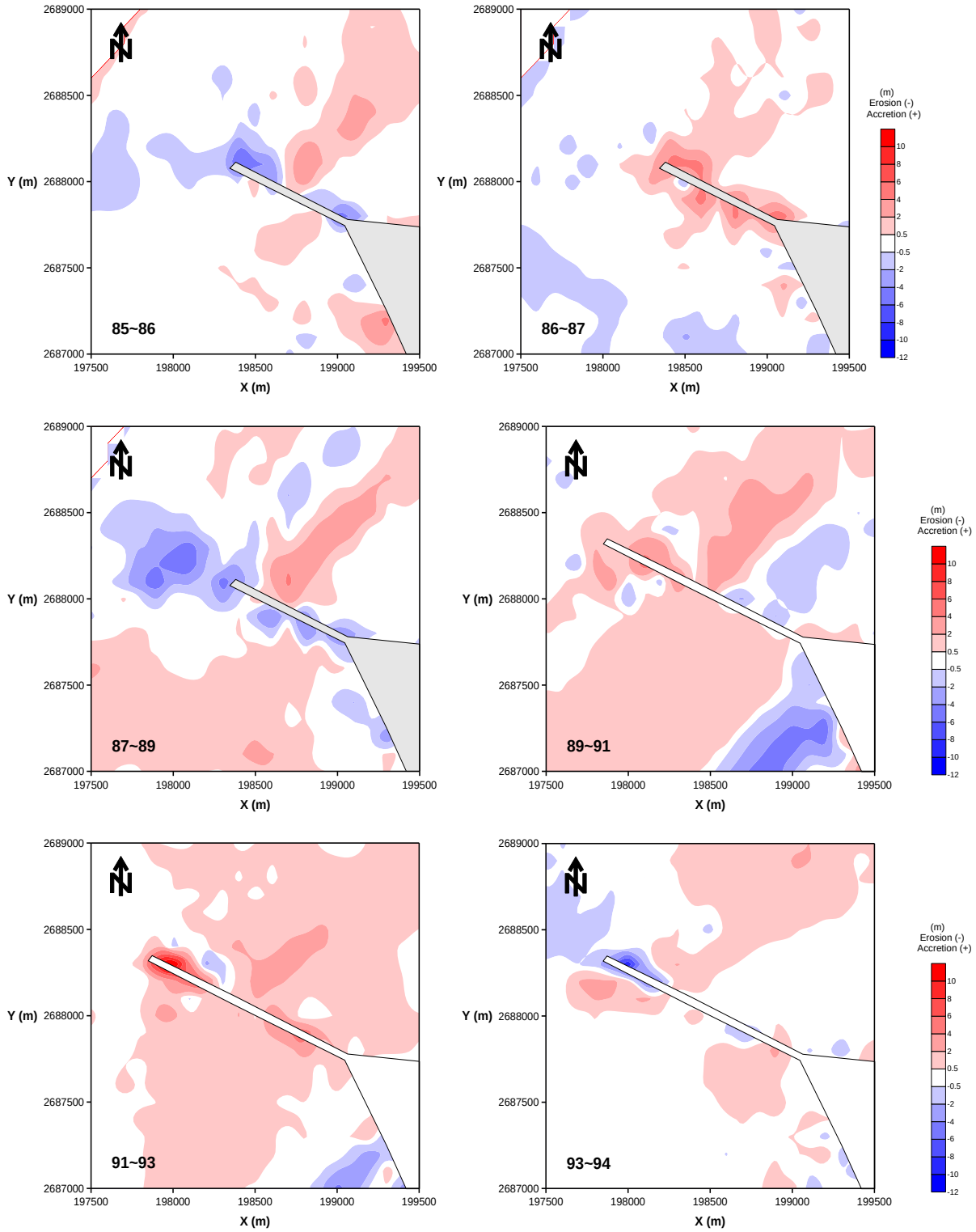


圖 6.1 臺中港北防波堤海域實測地形侵淤變化 (85~95 年)

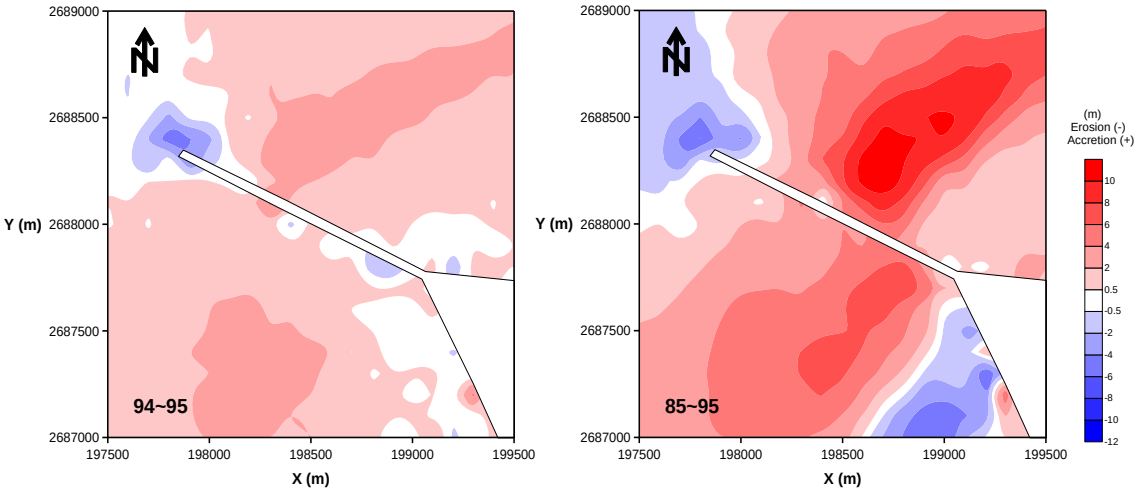


圖 6.1(續) 臺中港北防波堤海域實測地形侵淤變化(85~95 年)

（2）雲林海域 (大範圍水深測量)

雲林麥寮港區北側緊鄰濁水溪口，南向豐沛的砂源補注造成西防波堤以北易產生淤積現象，而港區南方海域的漂砂受到防波堤阻擋，大幅減小淤積地形的生成。根據成大水工所與中興工程顧問公司所提供雲嘉海域之大範圍地形測量資料，82~99 年間雲林麥寮港西防波堤鄰近海域的地形侵淤狀態變化，如圖 6.2 所示。

由圖 6.2 可知，82~85 年期間，當西防波堤 II、III 尚未興建，外海的侵淤狀況變化的幅度約在-2m~+2m 區間變動。在西防波堤 I 的南半段已可發現將近-8m 的侵蝕深度，而西防波堤北側則有+4m 的淤積幅度，說明了西防波堤造成一定的砂源阻斷。85~87 年期間，地形侵淤特性與前兩年度相似，只是隨著西防波堤 II 的增長，北淤南侵的狀況更為顯著，85~87 年間西防波堤 II 北側堆積的高度超越了+10m，西防波堤 II 堤頭附近侵蝕的深度可達到-12m。

87~89 年度期間，西防波堤 III 持續向西南側外海延伸，更多的漂砂堆積在西防波堤 II 的北方海域，範圍廣達 1.25km×2.3km、高程+2~ +10m 之間。港口的出入口因西防波堤的攔砂效應 (或航道疏浚) 的影響，侵蝕幅度最大約-12m。緊鄰西防波堤 III 北側持續侵蝕，最深之處亦有-12m。此掏深洞在 89~91 年期間，南移到西防波堤 III 的西側，即堤頭位置，而沖刷洞的深度更增加-14m；此期間，西防波堤北側呈現全面堆積情形。

91~93 年間，地形侵淤特性與前兩年度相似，堤頭掏深洞再往西南側移

動。93~94 年期間，堤頭處的-12m 掏深範圍大幅擴增，而堤身處的淤積幅度縮小至+2~+4m。

93~94 年、94~95 年、95~96 年及 96~97 年間，呈現往復式的侵淤變化。原本堤頭處保持-12m 的掏深，到下一年度又回淤+12m 的高度。堤頭區域的水深在此段期間，保持侵淤互現的狀態。

97~98 年期間，侵淤現象停止了先前描述的週期性變化，而是保持約與 96~97 年間相同的侵淤狀態，讓原本即已處於堆積的堤頭又增高了+2~+12m 的幅度，而原本處於侵蝕的區域，又向下掏深了-0.5~-4m。

在 98~99 年期間，此海域的侵淤狀況恢復成類似 87~89 年間的分佈，西防波堤以北的區域有大範圍的堆積現象，防波堤以南則近乎全部發生侵蝕。但堤頭處反而是北側產生侵蝕，南端發生淤積。

綜合歷年的侵淤變化結果，於 87~99 年期間，西防波堤以北呈現全面淤積現象，最大幅度可達+20m；西防波堤 III 堤頭西側與西南側則形成兩個沖刷洞，最大掏深幅度可達-20m。

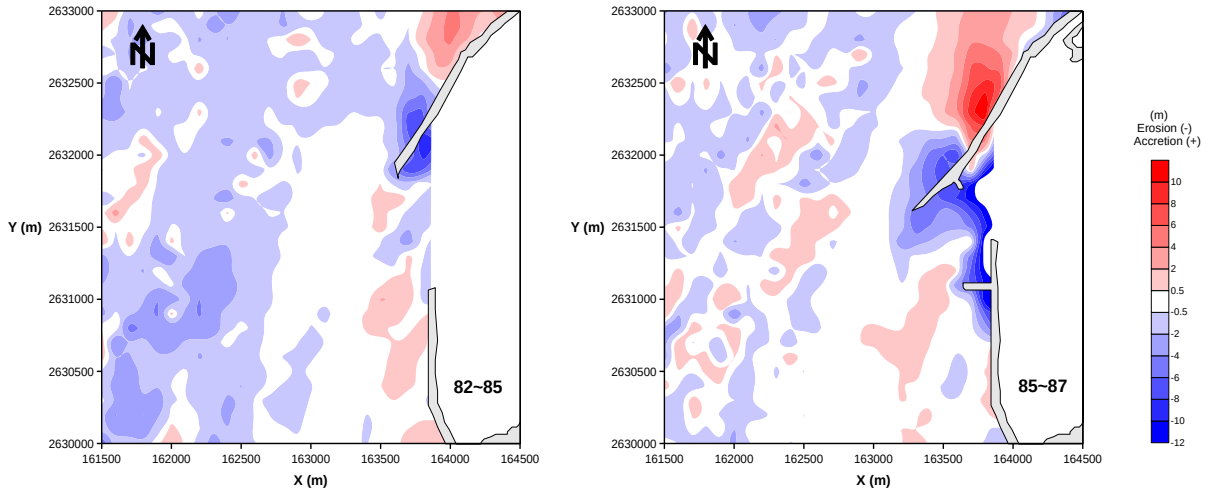


圖 6.2 麥寮港西防波堤海域實測地形侵淤變化 (82~99 年)

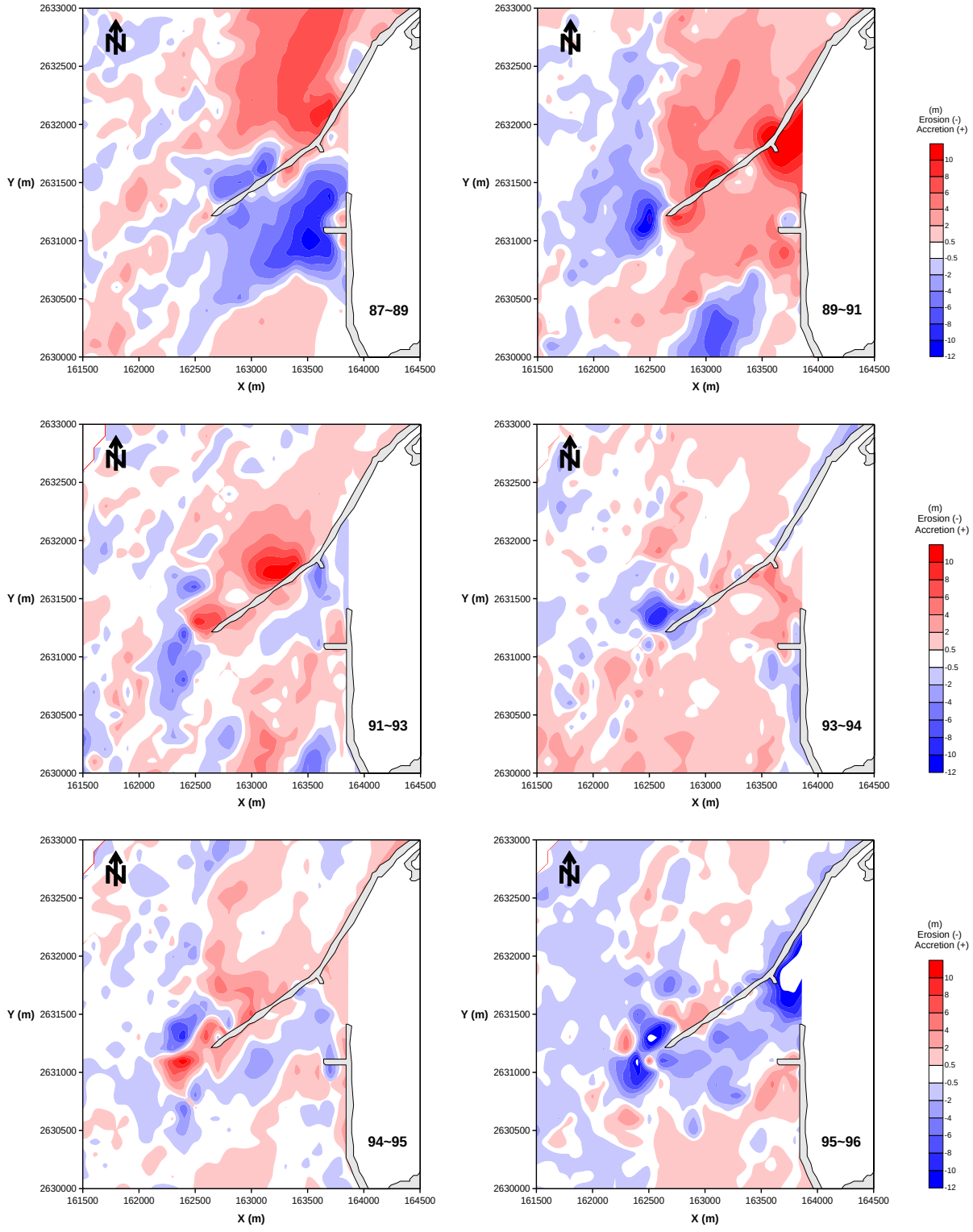


圖 6.2(續) 麥寮港西防波堤海域實測地形侵淤變化 (82~99 年)

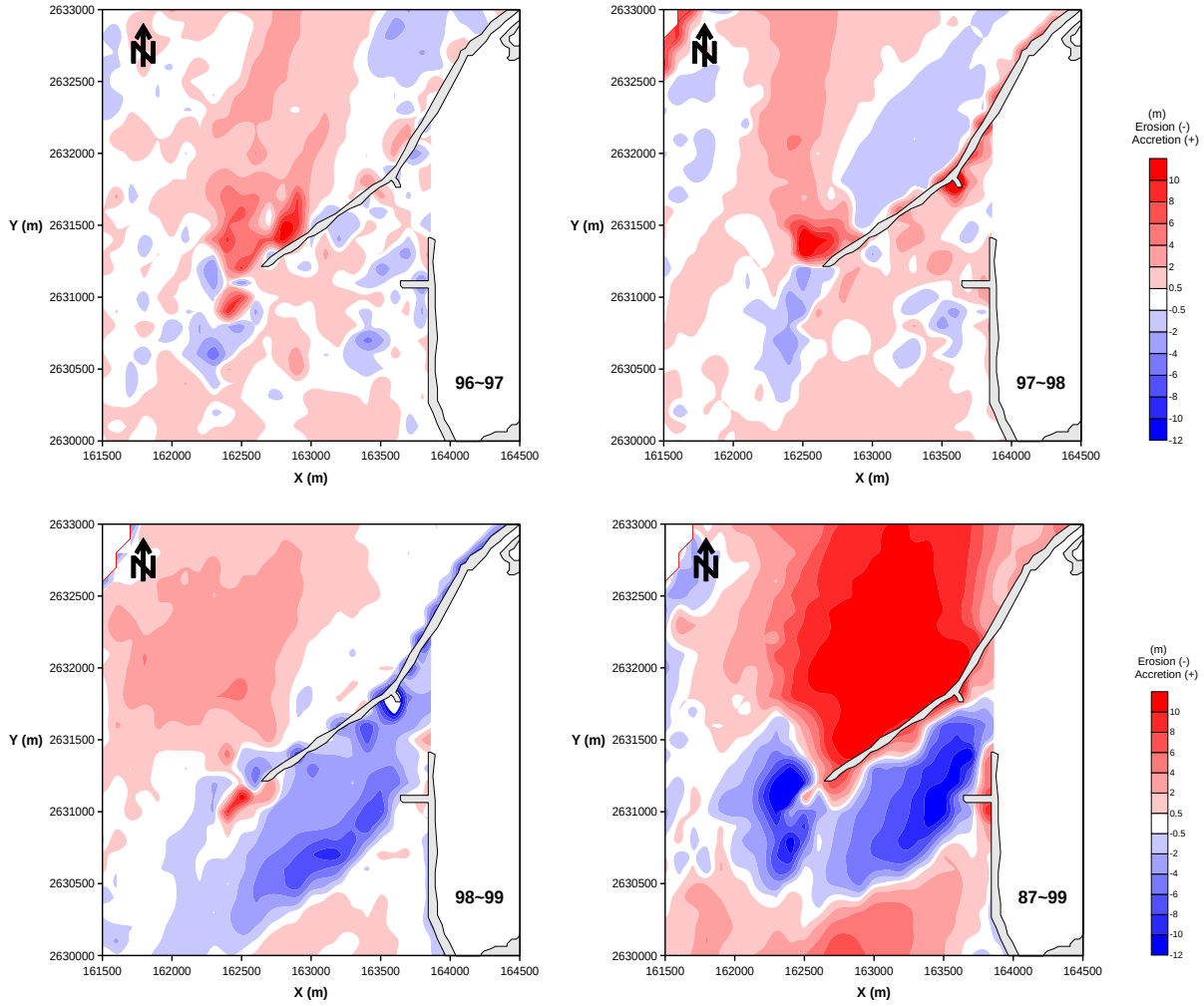


圖 6.2(續) 麥寮港西防波堤海域實測地形侵淤變化 (82~99 年)

6.2 堤頭沖蝕特性分析

（1）臺中海域

臺中港於民國 65 年即已完成主體工程，為符合港區營運與安全的需求，繼續延長了北防波堤至外海水深約 -22m 的海域。本文進一步分析臺中港北防波堤堤頭處的沖蝕特性，選取可明顯量化的沖刷洞進行探討。圖 6.3 為民國 85~87 年與 89~95 年間臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖，包括 -15m、-20m 與-25m 等深線。其中，-25m 等深線範圍內為一封閉區域，可用以代表水深大於 -25m 的沖刷洞 (以下簡稱 -25m 沖刷洞)。

如圖 6.3 所示，民國 85 年時，北防波堤堤頭處附近並無明顯的沖刷洞，而港口存在一處 -25m 沖刷洞。自民國 86 年開始，-25m 沖刷洞在北防波堤堤頭西側形成，隨著時間的增加，至民國 89 年時，沖刷的區域逐漸變廣加

深，且向堤頭的位置遷移。民國 90 年時北防波堤向西北側延伸，在堤頭西方至西北方形成二處 -25m 沖刷洞，涵蓋範圍略大於民國 89 年之沖刷洞。民國 91 年時，北防波堤再延長，此時 -25m 沖刷洞移動至堤頭周圍。而民國 92 年、93 年時，-25m 沖刷洞則在堤頭兩側形成。民國 94 年時，三處 -25m 沖刷洞在堤頭北側形成，沖刷區域縮小。至民國 95 年時沖刷範圍擴大，形成二處 -25m 沖刷洞。

另將各年度 -25m 沖刷洞以三維網格繪製，包括 -25m 等深線、沖刷洞的重心在 -25m 等深線截面的投影點 (以下簡稱形心) 與防波堤堤頭位置等，歷年沖刷洞之立體圖如圖 6.4 所示。各年度之形心與堤頭距離 (心堤距)、-25m 沖刷洞體積、-25m 等深線截面積、最大沖刷深度與平均沖刷 (沖刷洞體積除以截面積)，如表 6.1 與圖 6.5 所示。

由表 6.1 與圖 6.5 可知，臺中港北防波堤堤頭附近地形自民國 85 年開始，-25m 沖刷洞的截面積、沖刷體積與、最大沖刷深度逐年加大 (雖民國 85~57 年資料為防波堤延長之前所測，但已有沖刷洞的存在)，侵蝕量至民國 90 年時到達最大；民國 90 年至 94 年期間，沖刷洞的截面積、沖刷體積與、最大沖刷深度逐年減小，亦即沖刷洞又逐漸回淤。然而民國 95 年時，沖刷洞又發生嚴重侵蝕現象。最大沖刷截面積為民國 90 年的 226,200m^2，同時也造成最大沖刷體積為 5,903,893m^3 與最大沖刷深度 31.57m；心堤距在民國 90 年之後縮小為 158~379m；平均沖刷則介於 25~27m 之間。

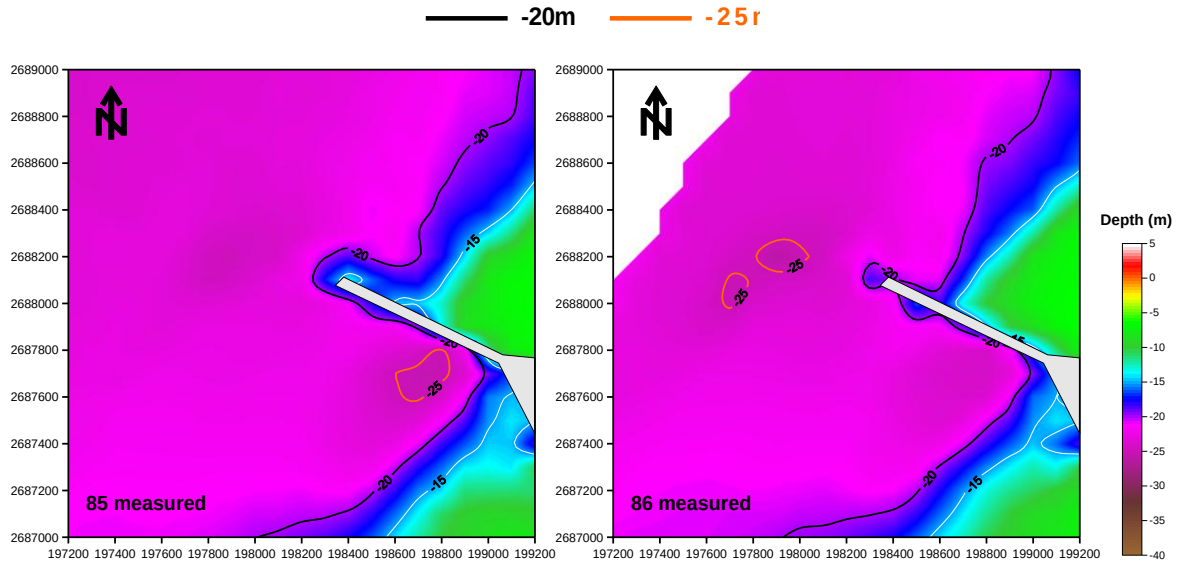


圖 6.3 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)

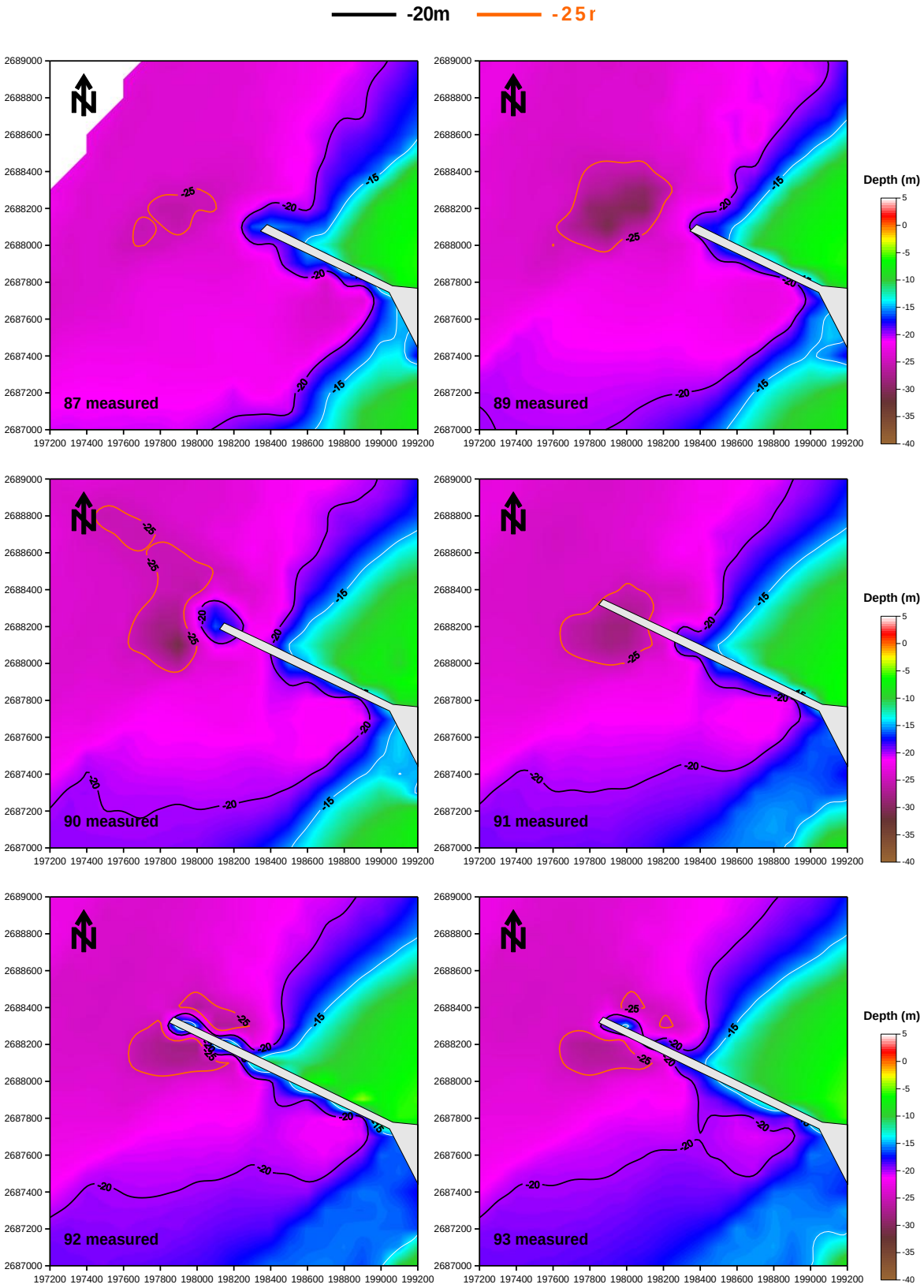


圖 6.3(續) 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)

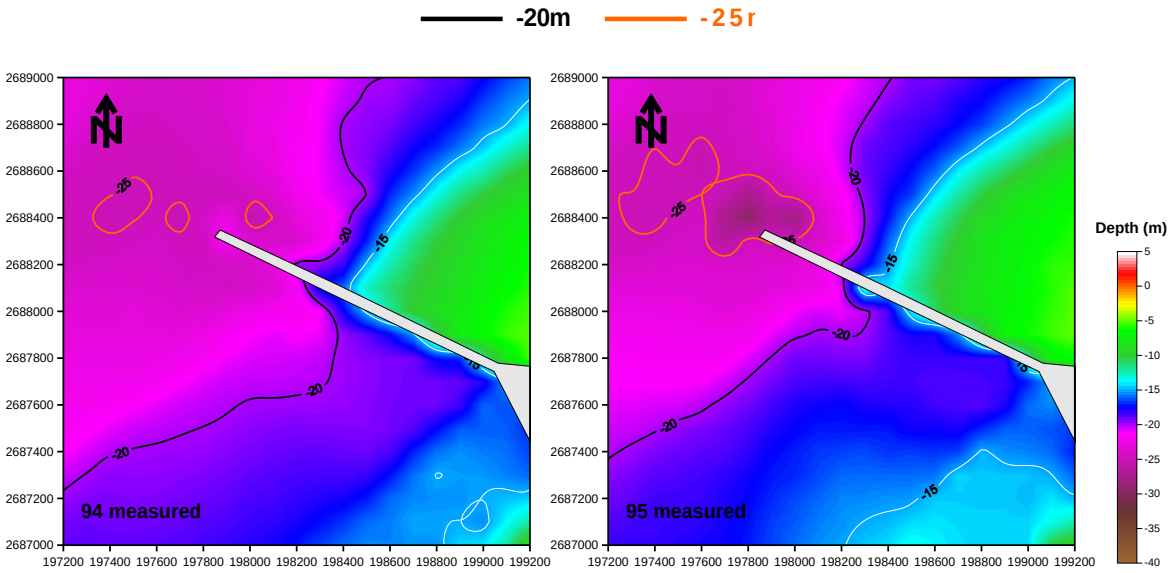


圖 6.3(續) 臺中港北防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (85~95 年)

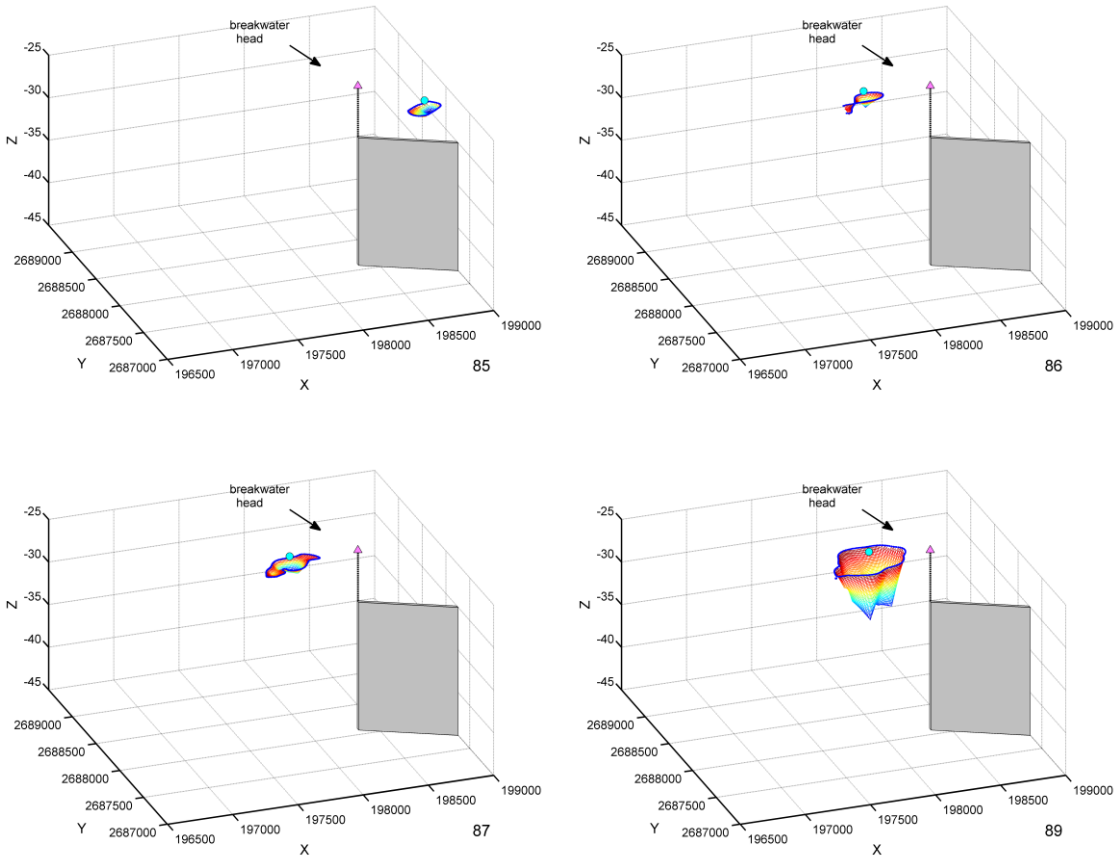


圖 6.4 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖 (85~95 年)

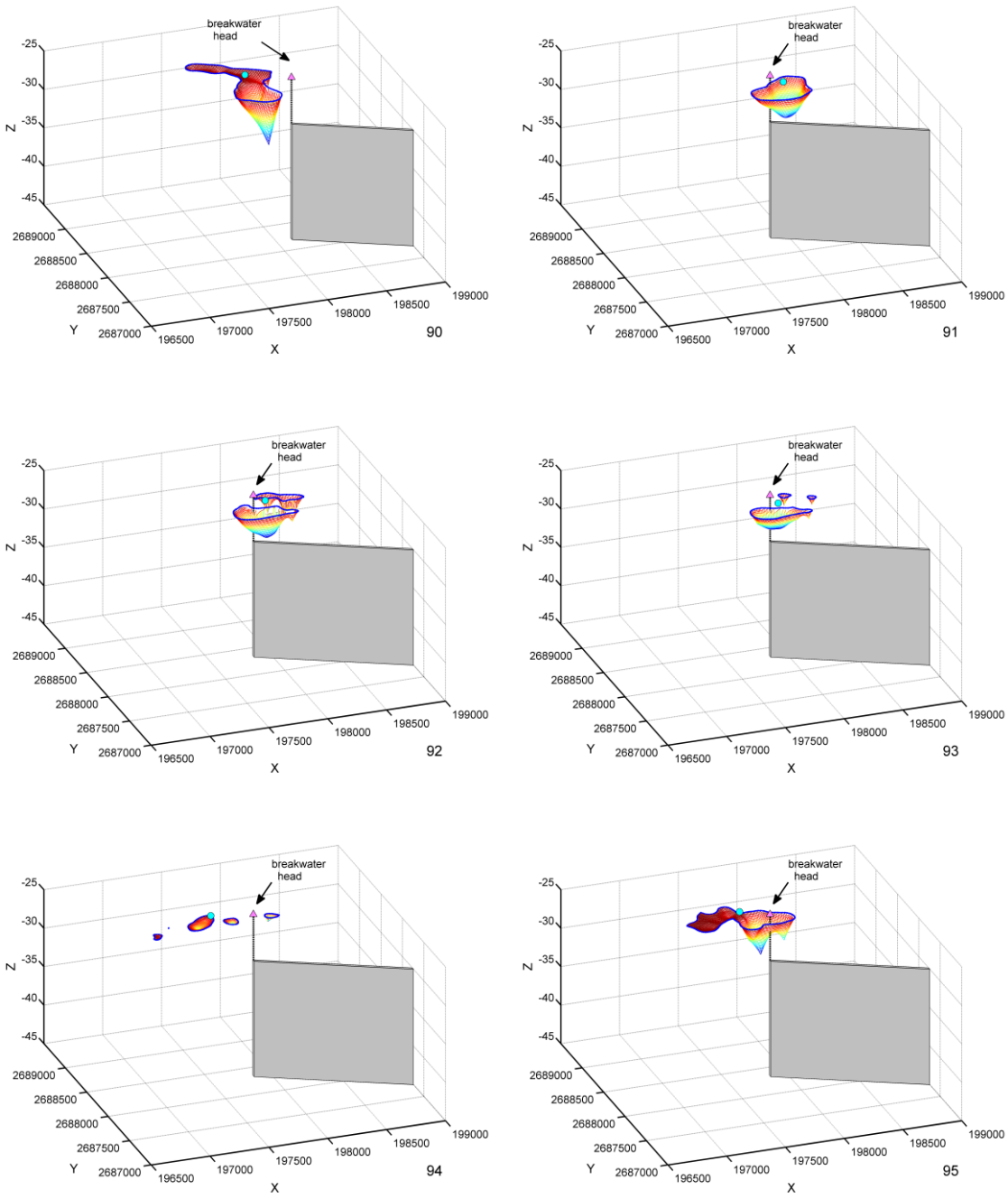


圖 6.4(續) 臺中港北防波堤堤頭海域-25m 沖刷洞地形變化圖 (85~95 年)

表 6.1　臺中港北堤堤頭-25m 沖刷洞變化量化表 (85~95 年)

年度	堤頭位置 (X , Y)	形心位置 (X , Y)	心堤距 (m)	沖刷截面積 (m^2)	沖刷體積 (m^3)	最大沖刷深度 (m)	平均沖刷 (m)
85	198365, 2688099	198722, 2687691	542	37100	941345	25.86	25
86	198365, 2688099	197875, 2688171	495	33800	854299	26.16	25
87	198365, 2688099	197859, 2688161	510	75100	1902325	26.05	25
89	198365, 2688099	197933, 2688217	448	206900	5671288	31.19	27
90	198136, 2688207	197798, 2688378	379	226200	5903893	31.57	26
91	197863, 2688339	197916, 2688190	158	153800	4070127	28.48	27
92	197863, 2688339	197911, 2688211	137	123300	3233921	28.47	26
93	197863, 2688339	197865, 2688171	168	83200	2160492	27.25	26
94	197863, 2688339	197528, 2688431	347	63500	1593984	25.63	25
95	197863, 2688339	197646, 2688469	253	217800	5607723	29.40	26

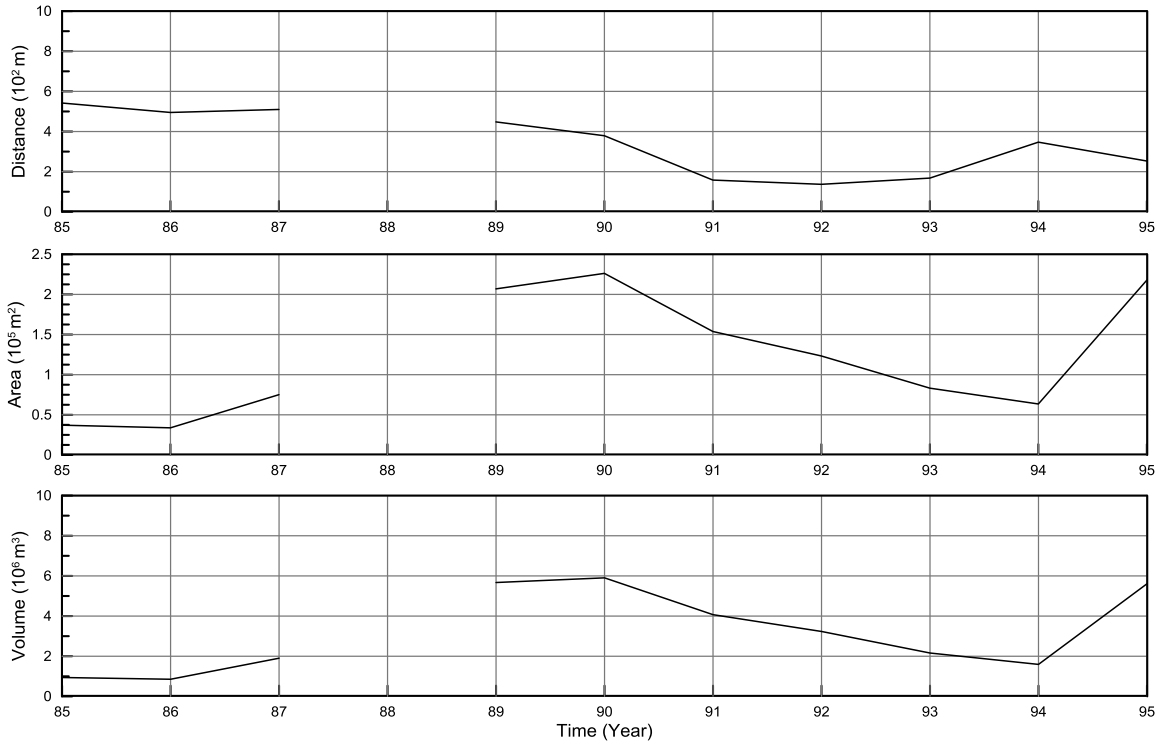


圖 6.5 堤頭-25m 沖刷洞心堤距、面積、體積變動圖

（2）雲林海域 (大範圍水深測量資料)

麥寮工業區的開發，於民國 84 至 89 年間分階段逐步增建了西防波堤與南防波堤。在防波堤興建過程中，於堤頭處都發現淘刷的現象。圖 6.6 為民國 80~99 年麥寮港海域西防波堤 I~III 堤頭附近地形等深線變化圖，包括 -25m、-30m、-35m 與-40m 等深線。其中，-35m 等深線範圍內為一封閉區域，可用以代表水深大於 -35m 的沖刷洞 (以下簡稱 -35m 沖刷洞)。

如圖 6.6 所示，民國 80~85 年間，西防波堤尚未延伸到目前規模，-20m 等深線仍保持平行於海岸。民國 87 年時，西防坡堤 II 的興建，已造成堤頭地形由原來的水深 -15m 沖刷至 -25m。民國 89 年時，西防坡堤 III 的延伸，造成一小塊-30m 沖刷洞在堤頭北方形成。民國 90 年時，堤頭前 -30m 沖刷洞明顯變大，-35m 沖刷洞也出現在堤頭西南側。因沖刷現象的持續作用，民國 92 年以後，堤頭前的最大沖刷洞已超過 -40m。

另將各年度 -35m 沖刷洞以三維網格繪製，包括 -35m 等深線、沖刷洞的重心在 -35m 等深線截面的投影點 (以下簡稱形心) 與防波堤堤頭位置等，歷年沖刷洞之立體圖如圖 6.7 所示。圖 6.7 中的圓點為沖刷洞之形心位置，堤頭位置以三角形標示。各年度的堤頭地形資料解算後，所得的 -35m 沖刷洞之形心與堤頭距離 (心堤距)、-35m 沖刷洞體積、-35m 等深線截面積、最大沖刷深度與平均沖刷幅度 (沖刷洞體積除以截面積) 等，如表 6.2 與圖 6.8 所示。

由表 6.2 與圖 6.8 可知，自民國 90 年開始 -35m 沖刷洞的截面積、沖刷體積與、最大沖刷深度逐年加大，都在民國 96 年時達到最大，各為 197,300m^2、7,868,464m^3 與 47.45m。民國 96 年以後沖刷區域已有縮小，但仍是維持相當大的範圍：*X* 軸方向約 264~293m、*Y* 軸在 669~742m 的跨距間變動；平均沖刷則介於 36~40m 之間。由圖 6.6 可看出，民國 91~96 年期間，堤頭北側 300m 範圍內的 -20m 等深線均呈現向岸凹陷的侵蝕狀態；民國 97 年以後， -20m 等深線已向外海側回淤，此現象即是有來自濁水溪口南向的砂源注入。由表 6.2 可知，堤頭在民國 96~97 年期間，沖刷洞大量淤積；民國 97 年以後，沖刷洞的面積與體積呈現逐年略微回淤的情形。

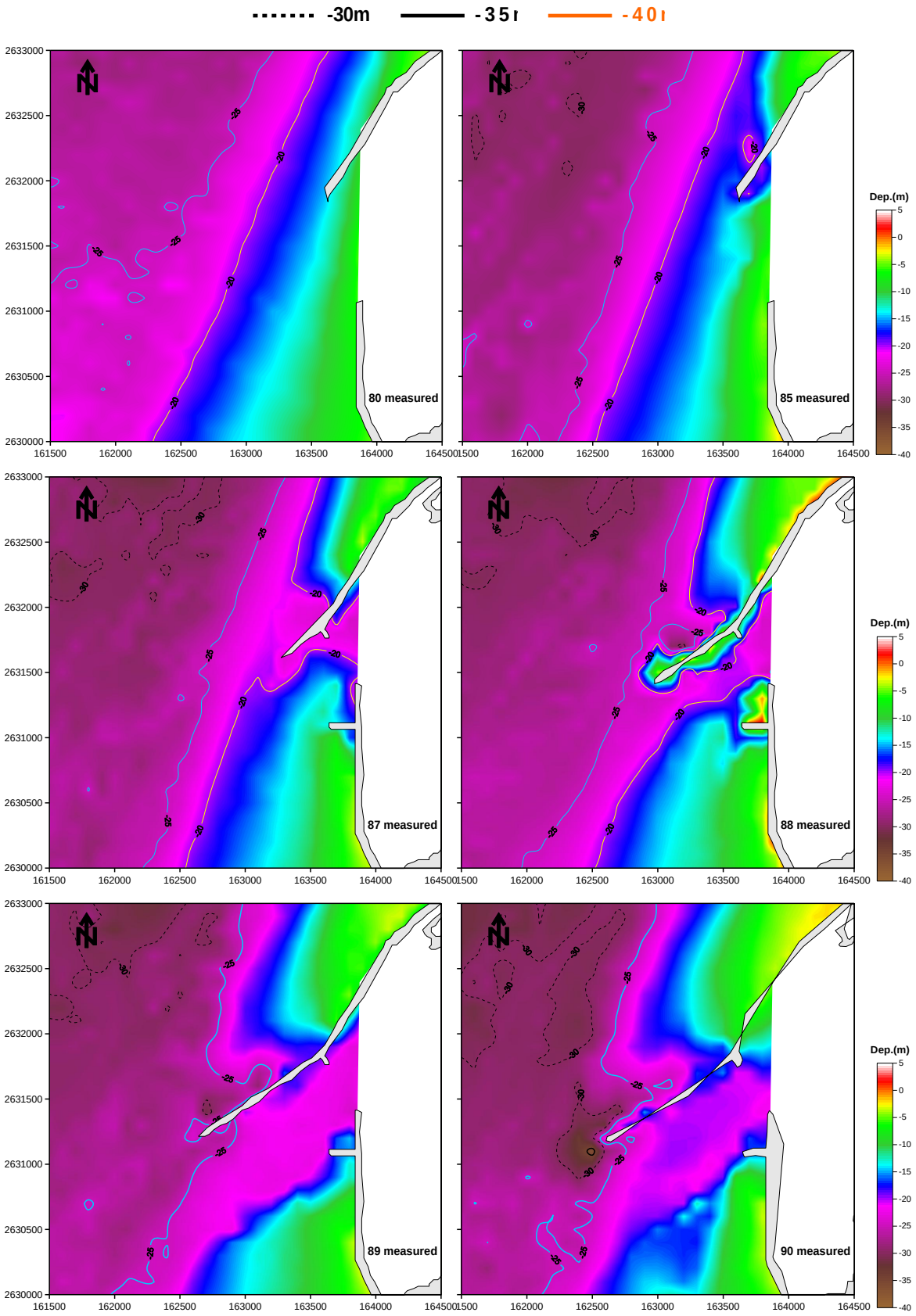


圖 6.6 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年)

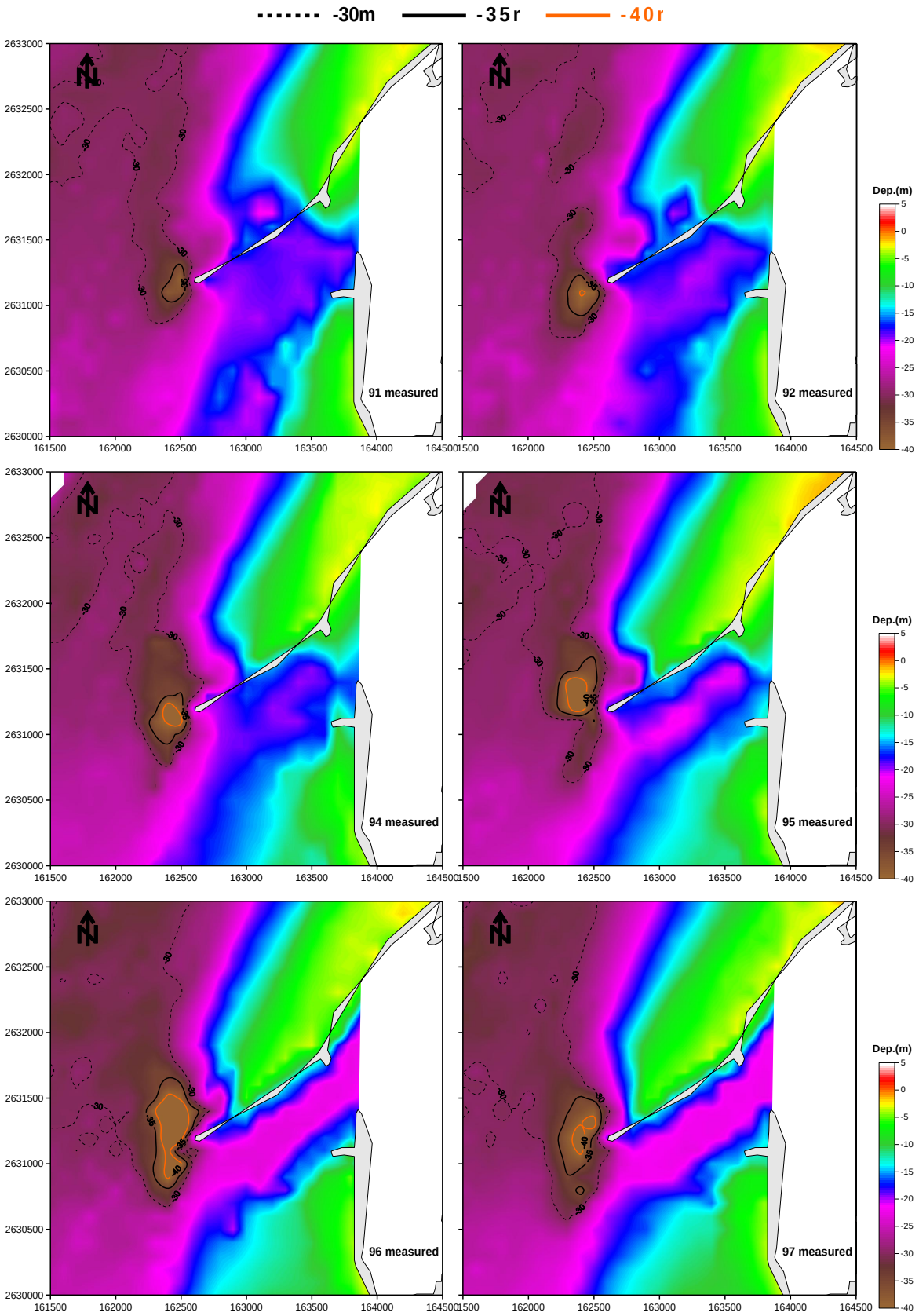


圖 6.6(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年)

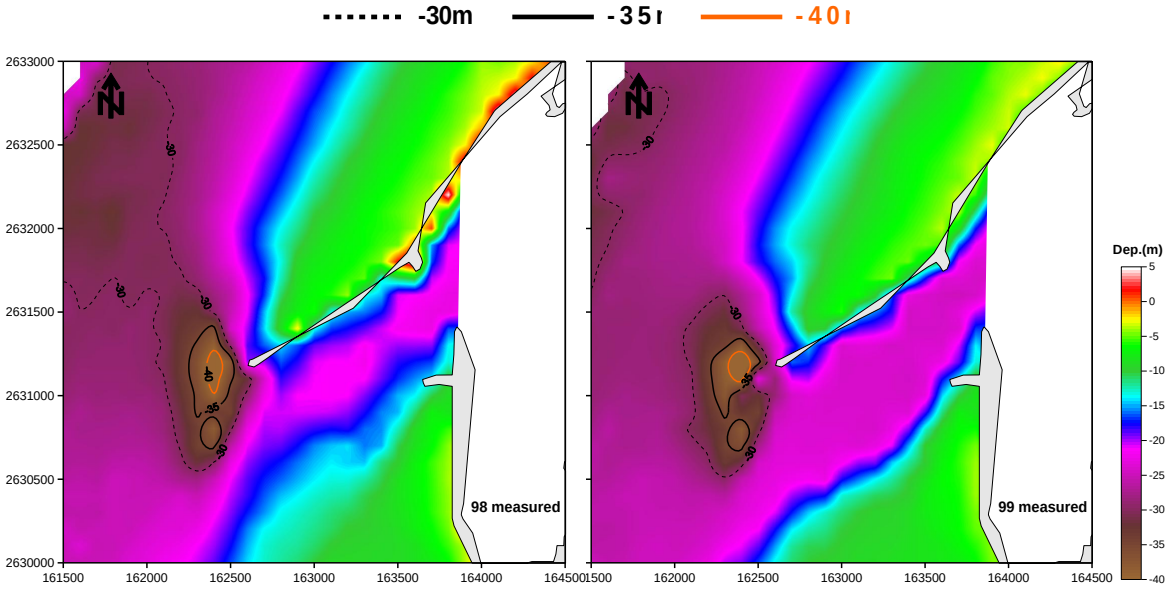


圖 6.6(續) 麥寮港西防波堤堤頭附近地形等深線變化圖 (80~99 年)

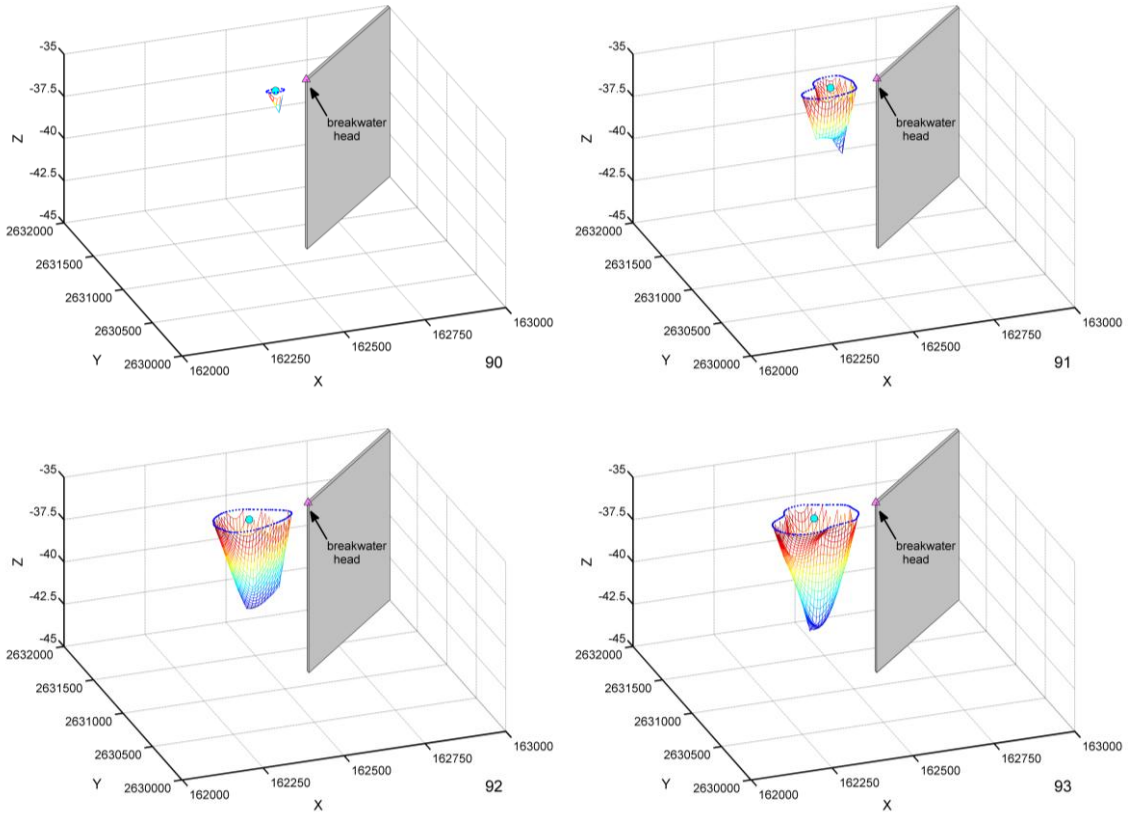


圖 6.7 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖 (90~99 年)

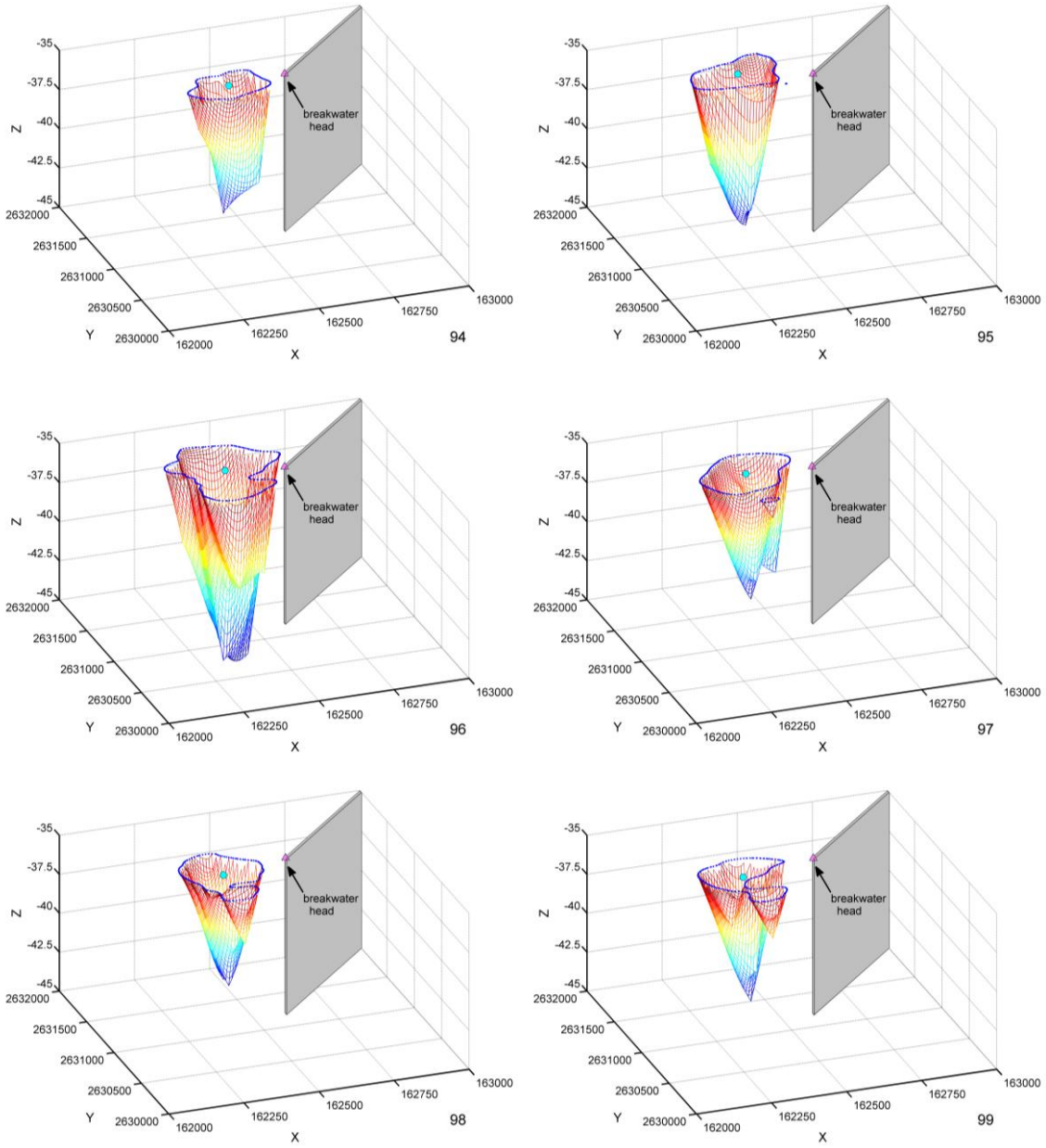


圖 6.7(續) 麥寮港西防波堤堤頭海域-35m 沖刷洞地形變化圖 (90~99 年)

表 6.2　麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量化表 (90~99 年)

年度	堤頭位置 (X , Y)	形心位置 (X , Y)	心堤距 (m)	沖刷截面積 (m^2)	沖刷體積 (m^3)	最大沖刷深度 (m)	平均沖刷 (m)
90	162601, 2631186	162488, 2631095	145	1800	63944	36.36	36
91	162601, 2631186	162456, 2631163	147	33900	1240470	39.16	37
92	162601, 2631186	162403, 2631073	228	52900	1979967	40.36	37
93	162601, 2631186	162395, 2631097	224	75200	2832137	42.08	38
94	162601, 2631186	162406, 2631135	202	75200	2869033	43.38	38
95	162601, 2631186	162381, 2631339	268	100900	3914629	44.53	39
96	162601, 2631186	162417, 2631259	198	197300	7868464	47.45	40
97	162601, 2631186	162388, 2631225	217	128400	4863288	42.94	38
98	162601, 2631186	162378, 2631080	247	125100	4686380	42.25	37
99	162601, 2631186	162349, 2631065	280	101000	3788176	43.64	38

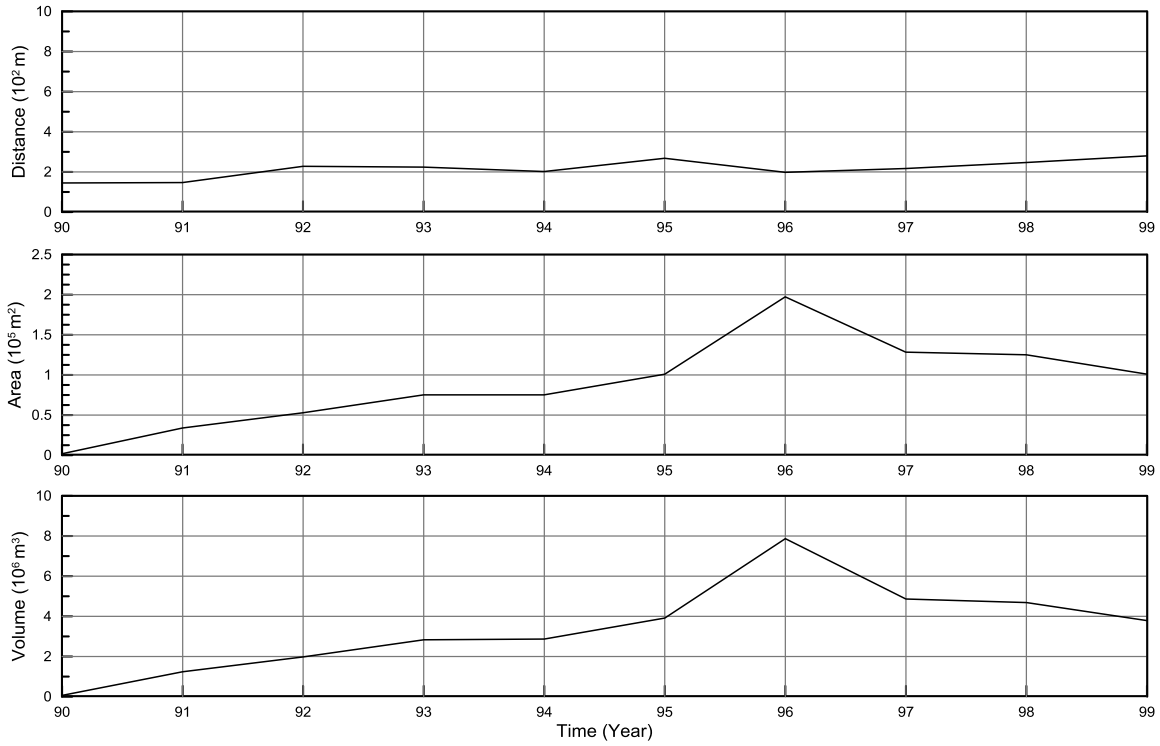


圖 6.8 堤頭-35m 沖刷洞心堤距、面積、體積變動圖

以下彙整臺中港北防波堤堤頭附近-25m 沖刷洞與麥寮港西防波堤堤頭附近-35m 沖刷洞歷年沖刷截面積與沖刷體積，如圖 6.9 所示。由圖 6.9 可知，臺中港自民國 86 年開始 -25m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 90 年時到達最大；民國 90 年至 94 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，亦即沖刷洞又逐漸回淤。然而民國 95 年時，沖刷洞又發生嚴重侵蝕現象。麥寮港自民國 90 年開始 -35m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 96 年時到達最大；民國 96 年至 99 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，沖刷洞逐漸回淤。

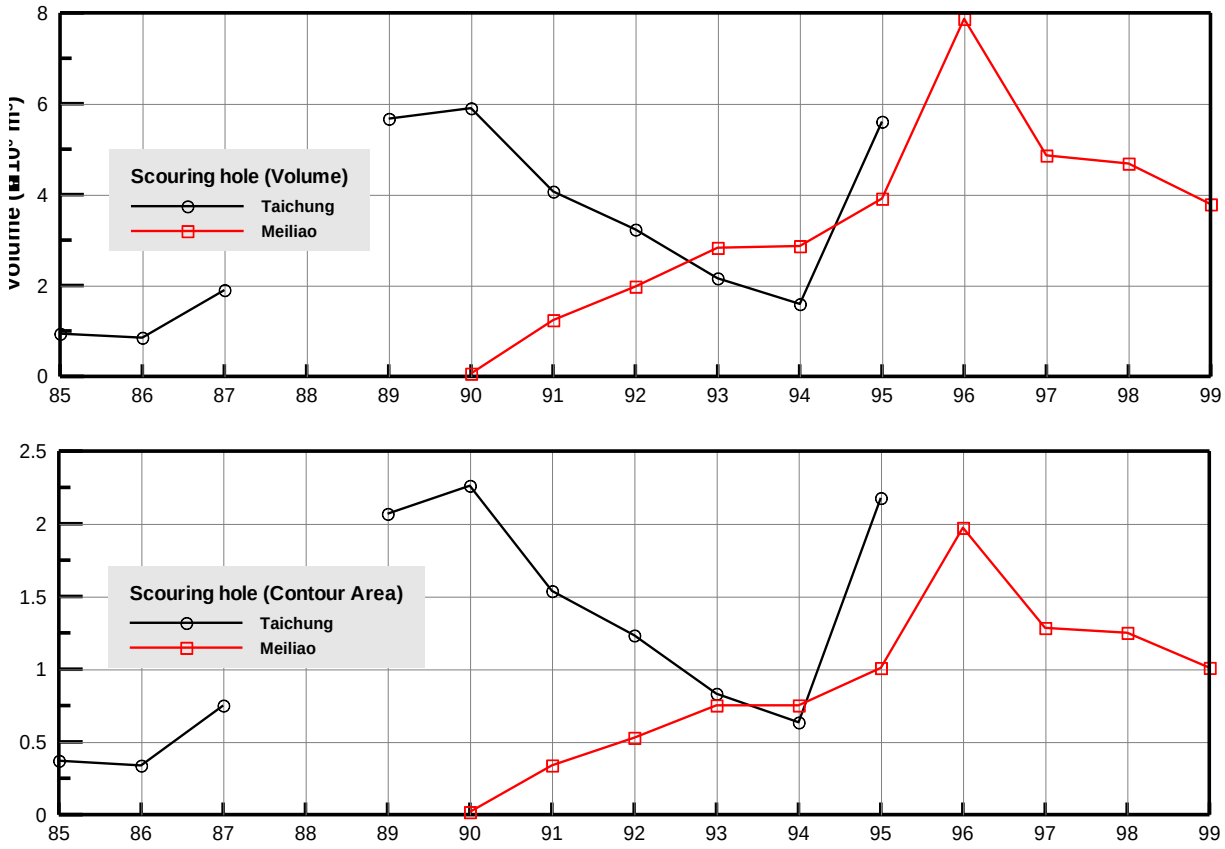


圖 6.9 臺中港北堤堤頭-25m 與麥寮港西堤堤頭-35m 沖刷洞變化量化圖

（3）麥寮港海域 (堤頭附近加密水深測量資料)

前一個單元所分析麥寮港堤頭地形資料，是擷取自雲、嘉海域大範圍地形資料，測量時間間隔約是一年以上，而且測線間距較寬。因一年期間內可能發生許多極端的波流事件，而堤頭又屬於敏感區域，在一年內侵淤現象可能已經重複發生，故堤頭沖刷特性與機制並不易以年份作綜合分析。

本研究另收集麥寮工業區專用港管理公司所提供自 96/04 至 100/09 五年期間共進行 30 次堤頭與航道的地形測量資料，進一步探討麥寮港西防波堤堤頭附近地形的季節性侵淤變化。麥寮港西防波堤堤頭附近地形加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)，包括 -30m、-35m 與-40m 等深線，如圖 6.10 所示。其中，-35m 等深線範圍內為一封閉區域，可用以代表水深大於 -35m 的沖刷洞 (以下簡稱 -35m 沖刷洞)。

如圖 6.10 可看出，民國 96~100 年期間，西防波堤堤頭附近不同月份之 -35m 沖刷洞 (或 -40m 沖刷洞) 變化並不劇烈，此情形與表 6.2 與圖 6.9 所呈現的量值不同，主要還是因為大範圍海域測量其測線密度較大，在局部範圍的精度上較差所致。

根據麥寮工業區專用港管理公司所提供完整的水深觀測資料，共有 6 次測量期間正逢中央氣象局發佈颱風警報，分別為 2007 年 9 月的韋帕颱風、10 月的柯羅莎颱風、11 月的米塔颱風、2009 年 6 月的蓮花颱風、7 月的莫拉菲颱風以及 10 月的芭瑪颱風。以颱風的路徑而言，韋帕與柯羅莎皆從臺灣東北角通過，並有跨越臺灣海峽。米塔在臺灣的南方並消失於巴士海峽。蓮花則自菲律賓西側海域沿著臺灣海峽一路北上至中國的福建省。莫拉菲與芭瑪則是自臺灣的南方海域通過。參考圖 6.10，颱風通過後並非所有地形呈現侵蝕或是掏蝕洞加大的現象。如芭瑪颱風通過後，地形變化呈現淤積，而掏蝕洞亦受到填補而變小。若以蓮花颱風為例，則其並未造成明顯的影響，不論是地形的變化亦或是掏蝕洞的尺寸。但韋帕颱風即造成大範圍的侵蝕，並增加掏蝕洞的深度與體積。此結果顯示，個別颱風對於麥寮港西防波堤鄰近海域地形並不一定造成侵蝕或淤積，其所形成的效應仍需考慮區域的地形、地貌與海象特性再深入考量。

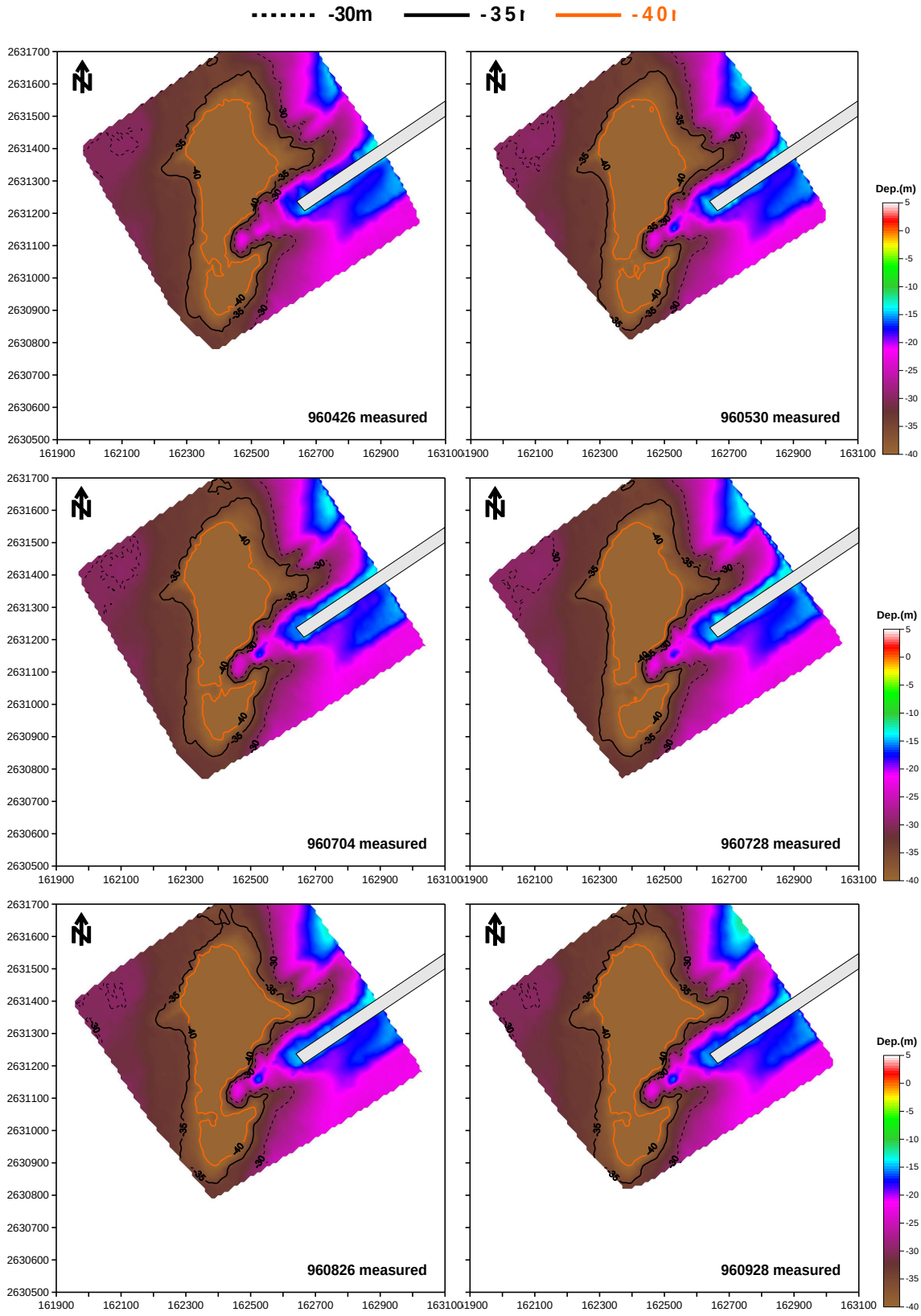


圖 6.10 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)

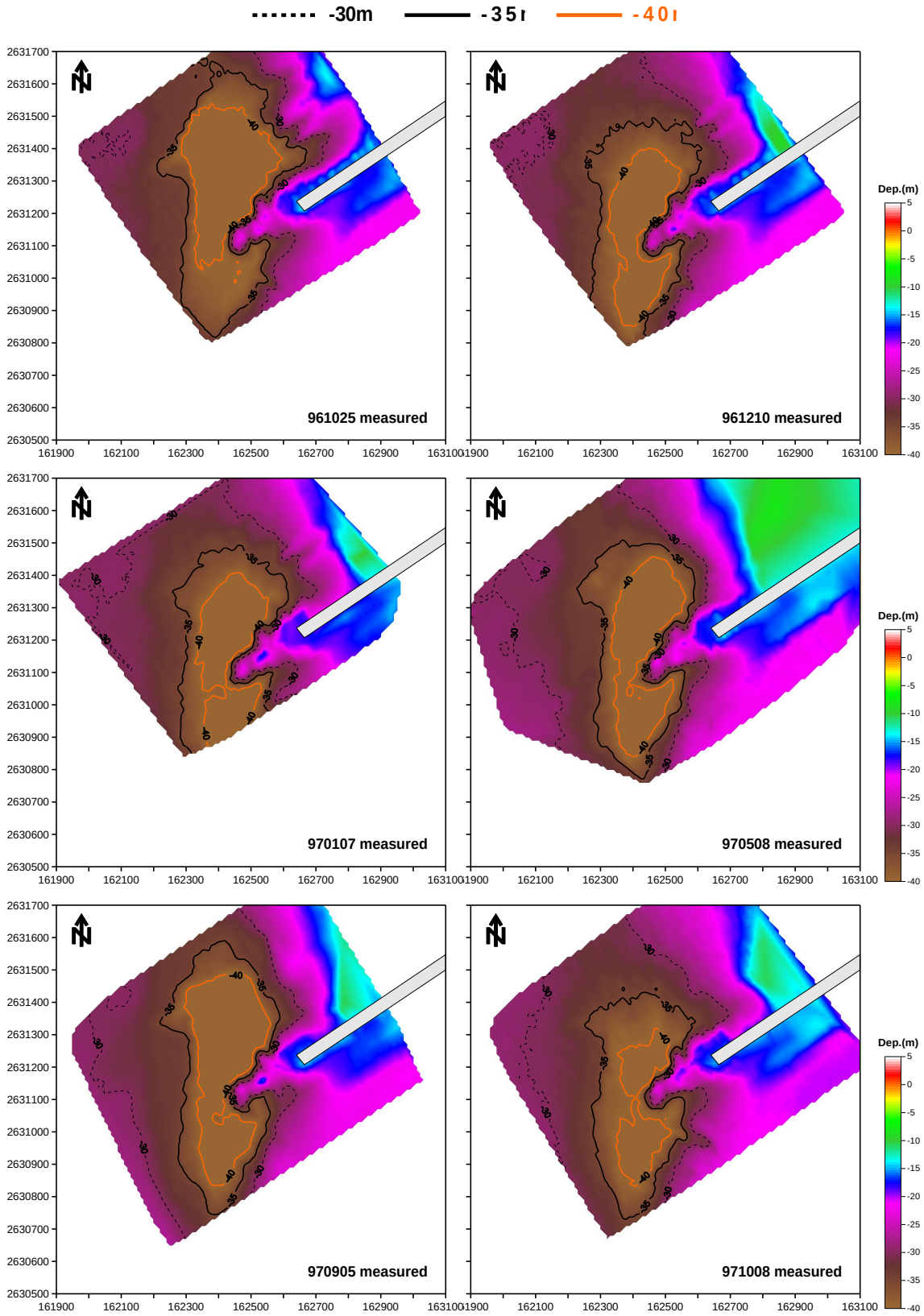


圖 6.10(續) 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)

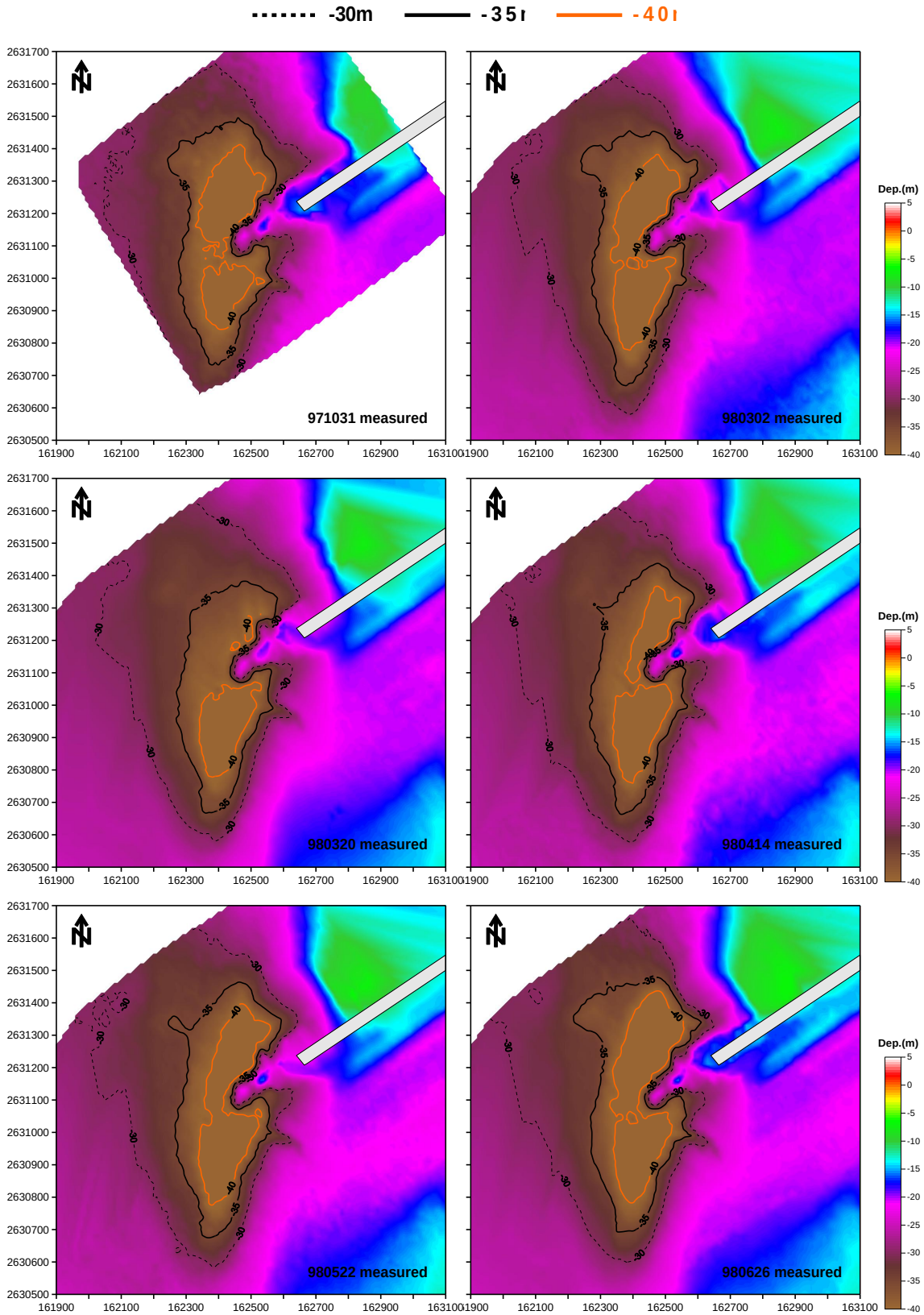


圖 6.10(續) 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)

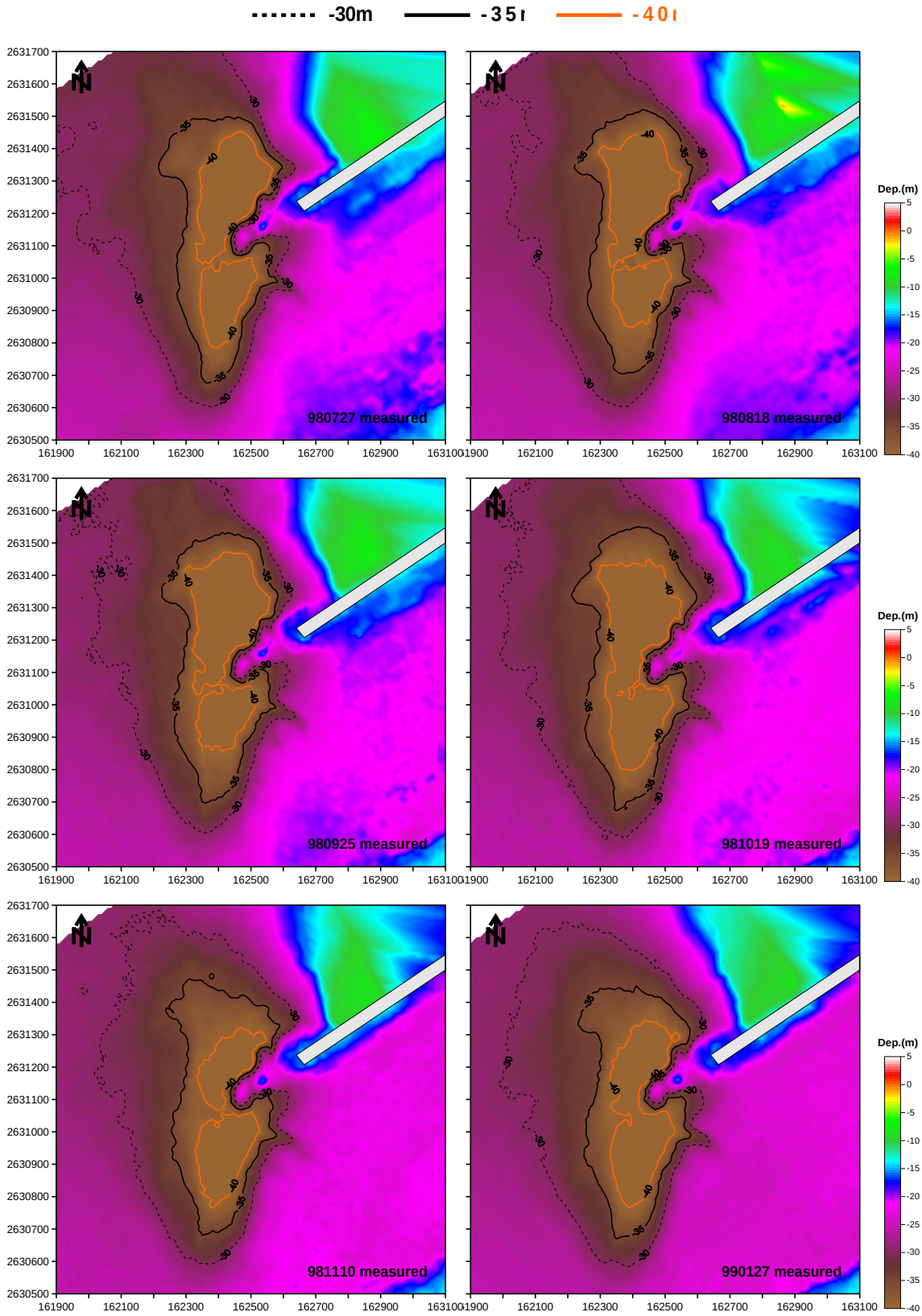


圖 6.10(續) 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)

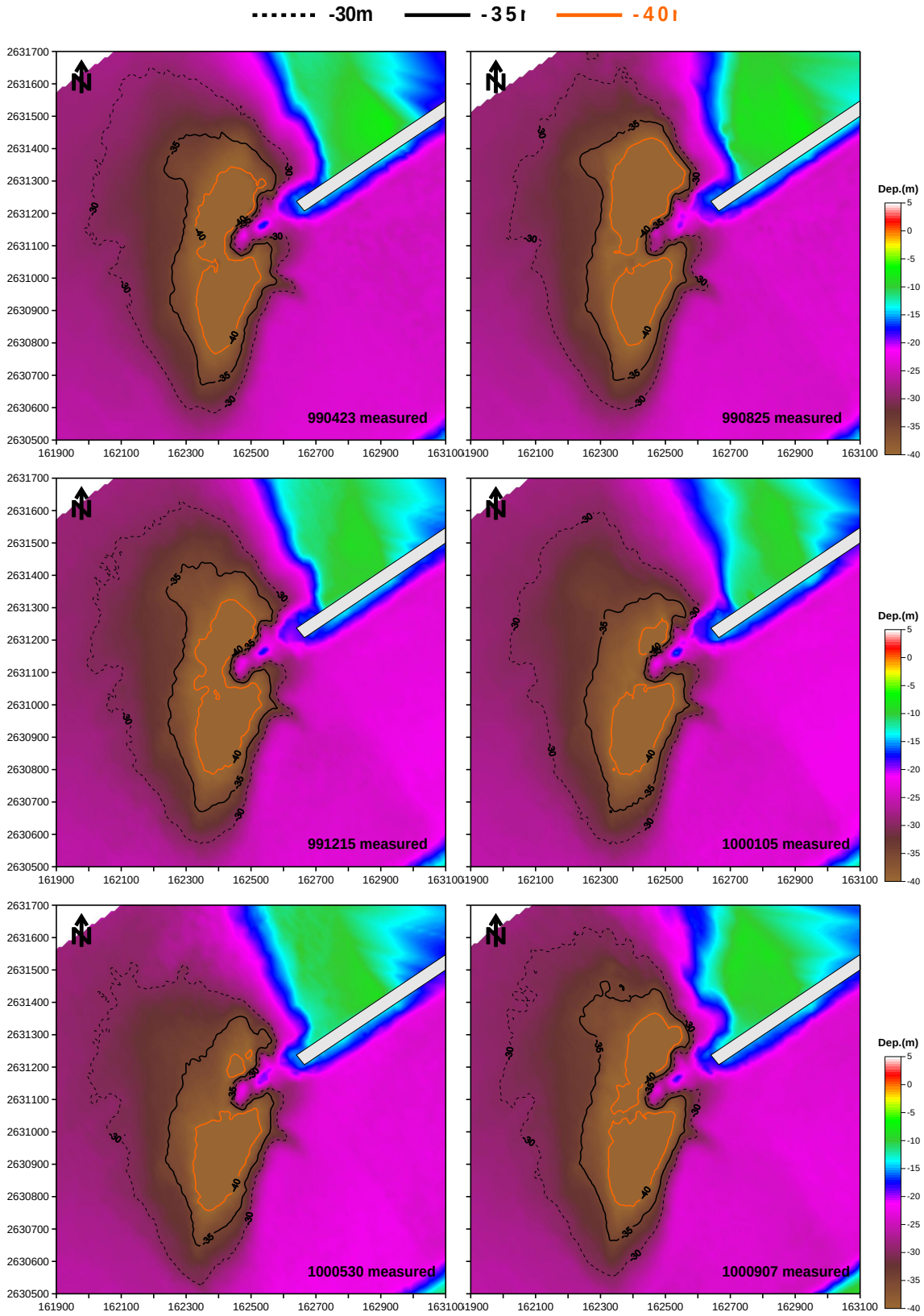


圖 6.10(續) 麥寮港西防波堤堤頭加密測量之等深線變化圖 (96~100 年)

將不同月份的堤頭地形資料解算後，所得的 -35m 沖刷洞之形心與堤頭距離 (心堤距)、-35m 沖刷洞體積、-35m 等深線截面積、最大沖刷深度與平均沖刷幅度 (沖刷洞體積除以截面積) 等，詳列於圖 6.11 與表 6.3；-40m 沖刷洞體積與-40m 等深線截面積，亦列於圖 6.11 中。

由圖 6.11 與表 6.3 可觀察到一明顯的現象，在夏季期間 (約 4~9 月)，-35m 與 -40m 沖刷洞的面積與體積均逐漸加大 (即侵蝕加劇)；而冬季期間 (約 10~3 月)，沖刷洞的面積與體積則逐漸減小 (即逐漸回淤)。此回淤的現象應來自於濁水溪口南向的砂源注入，下一小節將配合現場海流統計資料進一步評估探討。

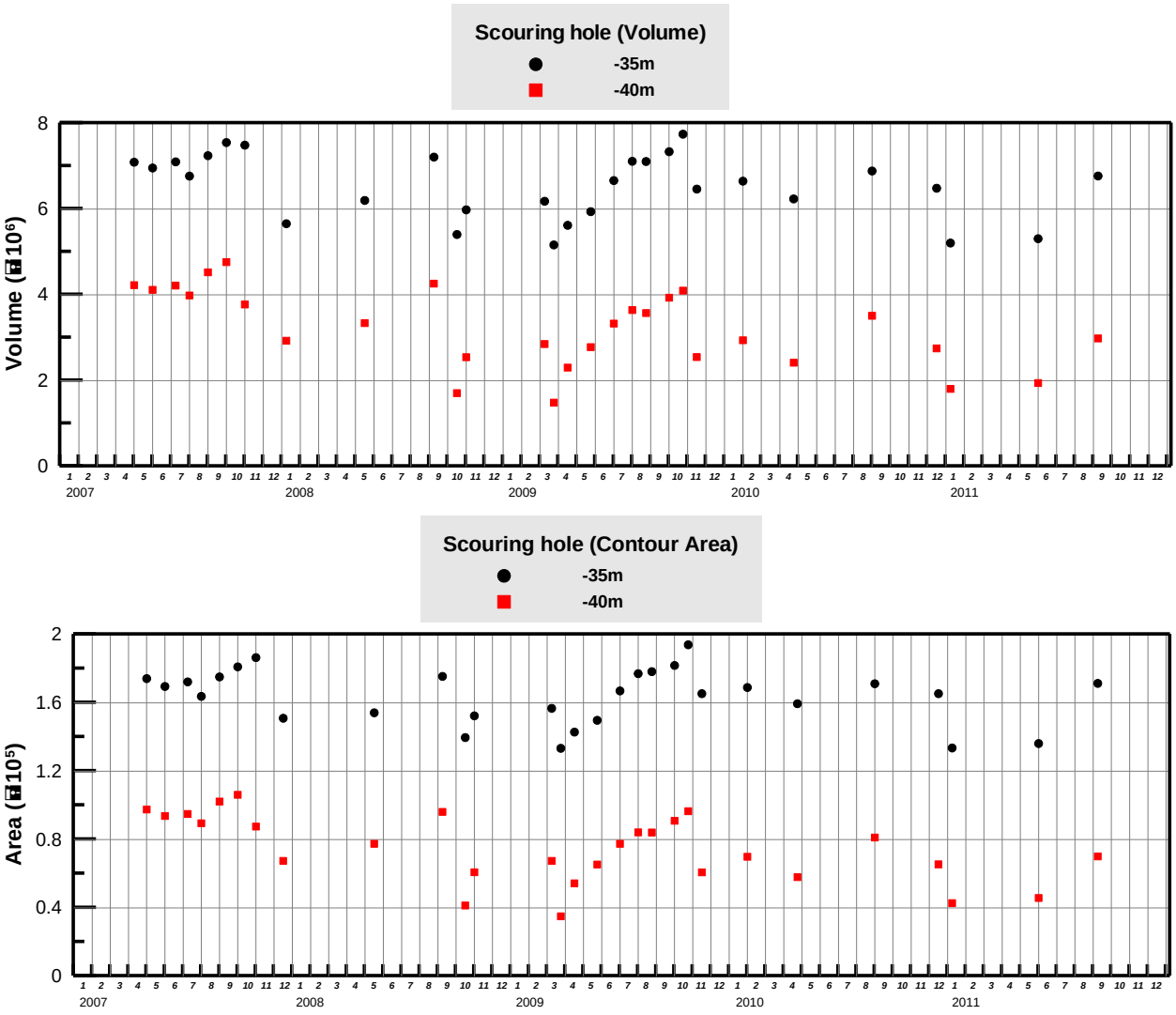


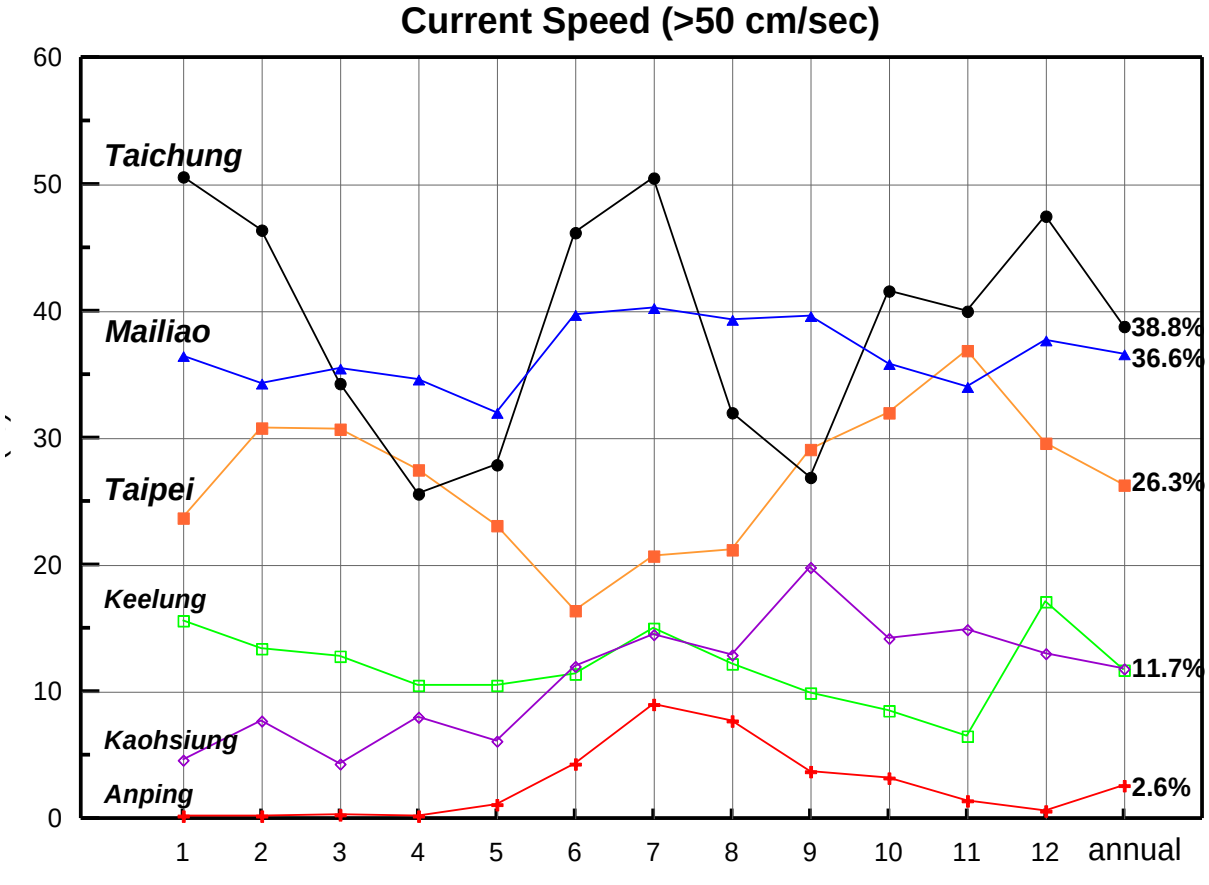
圖 6.11 麥寮港西堤堤頭加密測量之-35m 與-40m 沖刷洞變化量化圖

表 6.3　麥寮港西堤加密測量堤頭-35m 沖刷洞變化量化表 (96~100 年)

日期	堤頭位置 (X , Y)	形心位置 (X , Y)	心堤距 (m)	沖刷截面積 (m^2)	沖刷體積 (m^3)	最大沖刷深度 (m)	平均沖刷 (m)
960426	162601, 2631186	162432, 2631265	226	174200	7092162	49.13	41
960530	162601, 2631186	162428, 2631268	230	169600	6957173	51.41	41
960704	162601, 2631186	162424, 2631268	234	172300	7100376	51.68	41
960728	162601, 2631186	162424, 2631268	234	163800	6767751	50.93	41
960826	162601, 2631186	162420, 2631273	240	175200	7244358	50.48	41
960928	162601, 2631186	162417, 2631275	243	181100	7550382	51.89	42
961025	162601, 2631186	162419, 2631264	238	186500	7489763	47.25	40
961210	162601, 2631186	162413, 2631172	245	151000	5966028	46.00	40
970107	162601, 2631186	162419, 2631184	237	141900	5657946	45.79	40
970508	162601, 2631186	162413, 2631184	243	154200	6201111	49.14	40
970905	162601, 2631186	162408, 2631199	246	175500	7211237	50.88	41
971008	162601, 2631186	162409, 2631110	267	139700	5406748	43.88	39
971031	162601, 2631186	162410, 2631143	255	152400	5981821	46.36	39
980302	162601, 2631186	162408, 2631107	270	156800	6181458	45.53	39
980320	162601, 2631186	162412, 2631048	297	133400	5163883	45.49	39
980414	162601, 2631186	162414, 2631070	282	142900	5620852	45.76	39
980522	162601, 2631186	162412, 2631093	273	149800	5939969	46.68	40
980626	162601, 2631186	162408, 2631128	262	167000	6663965	49.84	40
980727	162601, 2631186	162405, 2631145	259	177100	7113313	48.87	40
980818	162601, 2631186	162405, 2631147	259	178300	7108445	48.79	40
980925	162601, 2631186	162405, 2631160	256	181900	7337210	50.70	40
981019	162601, 2631186	162402, 2631154	260	194000	7745400	46.64	40
981110	162601, 2631186	162402, 2631097	280	165400	6465426	44.66	39
990127	162601, 2631186	162400, 2631091	284	169000	6650347	45.05	39
990423	162601, 2631186	162404, 2631078	287	159500	6236126	43.86	39
990825	162601, 2631186	162405, 2631116	270	171200	6887158	50.83	40
991215	162601, 2631186	162396, 2631075	295	165400	6485458	45.45	39
1000105	162601, 2631186	162401, 2631017	323	133600	5207864	45.12	39
1000530	162601, 2631186	162399, 2631004	334	136200	5308712	45.37	39
1000907	162601, 2631186	162394, 2631082	294	171400	6770072	49.74	40

6.3 六大港海流特性分析

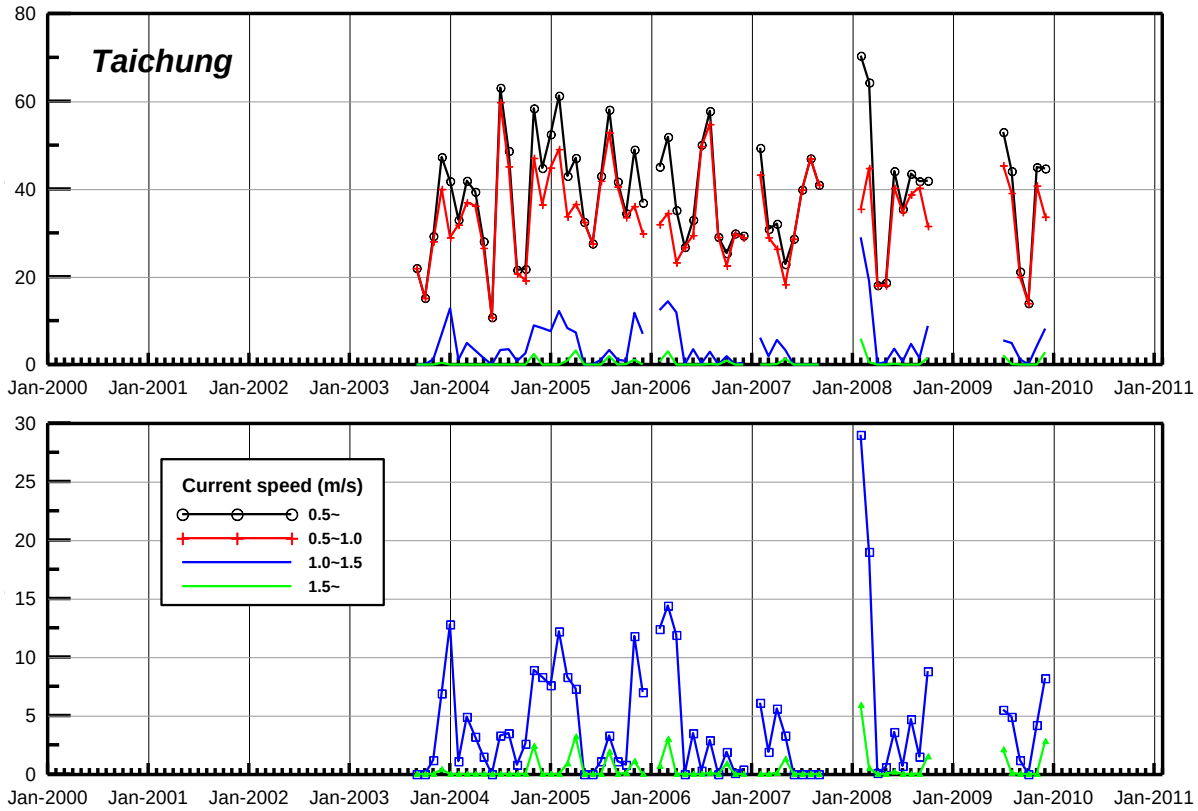
臺灣環島海域受到潮汐、風力、波浪與地形特性影響，北、中、南各商港附近海域的海流特性多有差異，本文收集基隆、臺北、臺中、麥寮、安平與高雄等六個港口歷年 (至 2008 年為止) 海流資料，統計分析各月份和全年的海流速度記錄超過 50cm/sec (約一節) 的發生機率，如圖 6.12 所示。由全年 (annual) 統計結果可知，臺中港和麥寮港的海流流速超過一節的發生機率各為 38.8%、36.6%，明顯大於其他港口；而臺中港在 1、7 月份流速超過一節的發生機率更超過 50%，麥寮港則在 6~9 月發生機率均接近 40%。在此種高速流況的深海域環境下，可說明臺中港和麥寮港防波堤之堤頭地形沖蝕的主要原因，應為海潮流經常性的作用所致。



數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

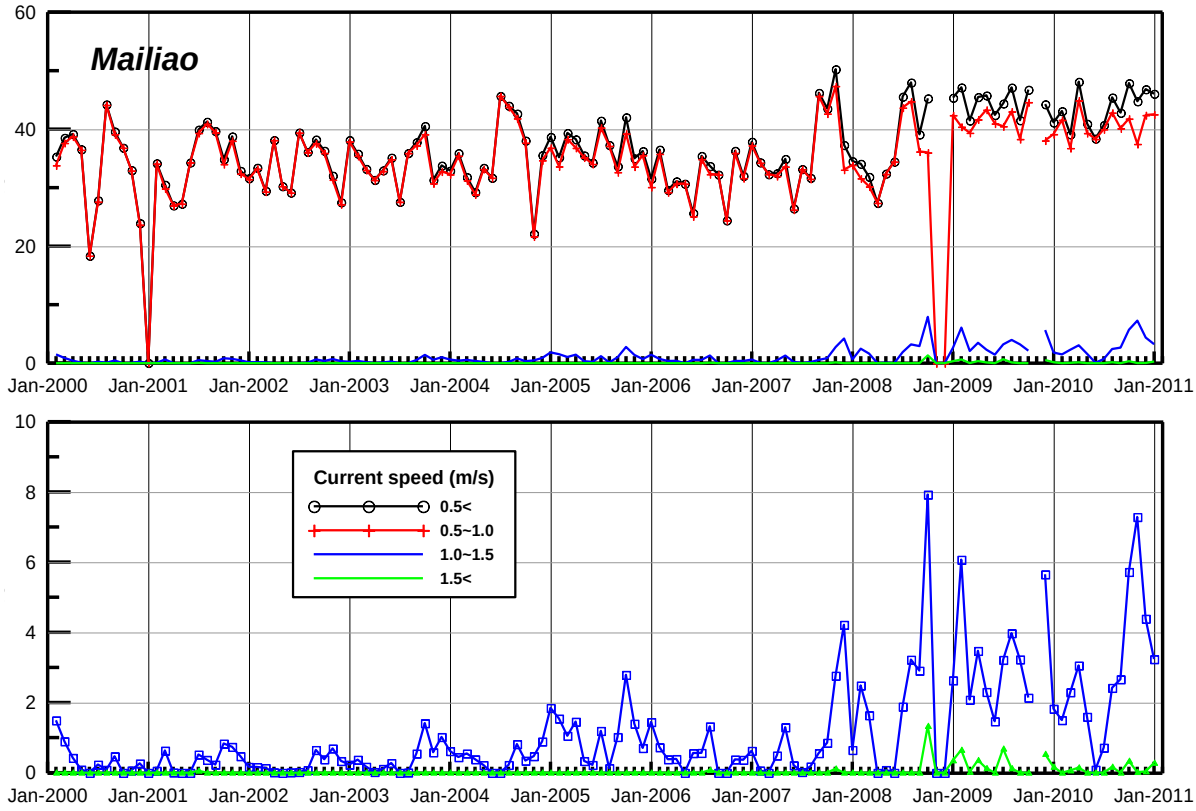
圖 6.12 臺灣六大港海域歷年流速大於 50cm/sec 發生機率圖

本研究進一步統計臺中、麥寮兩港口於民國 89 年至 99 年期間，較大流速的分佈機率，包括流速大於 0.5m/sec、0.5~1.0m/sec、1.0~1.5m/sec、流速大於 1.5m/sec 等發生機率，如圖 6.13 及圖 6.14 所示。由圖 6.13 (下圖) 可看出，臺中港海域冬季期間流速超過 1.0m/sec (約二節) 的發生機率可達 10%，夏季期間流速超過 1.0m/sec 的發生機率亦多介於 2~5%。由圖 6.14 (下圖) 可看出，麥寮港海域於 2000~2007 年期間流速超過 1.0m/sec 的發生機率小於 2%，但是 2007 年底以後流速超過 1.0m/sec 的發生機率則增加到 2~8 %。



數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

圖 6.13 臺中港 2003~2009 年流速分佈發生機率圖



數據來源：港灣技術研究中心；本計畫統計分析、繪製。

圖 6.14 麥寮港 2000~2010 年流速分佈發生機率圖

一般而言，近岸的漂沙行為，波浪多是扮演著啟動底質的角色；底質傳輸的行為，則是海流、潮流、風驅流或波浪引發的近岸流所造成的。然而，隨著水深增大，底床受波浪影響變小，此時潮流則為深水域漂砂傳輸主要驅動力。臺中港北防波堤堤頭西側 TC 測站與麥寮港西防波堤堤頭南側 YLCW 測站歷年的海流統計，各如表 6.4、6.5 所示。由圖 6.12 至圖 6.14 與表 6.4、6.5 可知，臺中與麥寮港海流經常性保持高流速狀態，致此二港區堤址水深雖達-20m 以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。此現象反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，主要是潮流所致。

表 6.4　臺中港北防波堤堤頭西側 TC 測站歷年海流統計表

日期\項目	月平均流速 (cm/s)	主要流向		最大流速 (cm/s)	流向	發生日期	颱風事件	農曆
Aug-2003	33	NNW	N	92	N	8 月 4 日	莫拉克	農曆 7 月 7 日
Sep-2003	27	W	NNW	86	N	9 月 6 日		農曆 8 月 10 日
Oct-2003	38	W	WNW	112	WSW	10 月 15 日		農曆 9 月 20 日
Nov-2003	49	W	NNW	153	W	11 月 22 日		農曆 10 月 29 日
Dec-2003	51	W	E	146	W	12 月 7 日		農曆 11 月 14 日
Jan-2004	39	W	WNW	105	WSW	1 月 21 日		農曆 12 月 30 日
Feb-2004	47	NNW	W	134	W	2 月 5 日		農曆 1 月 15 日
Mar-2004	45	W	NNW	131	WSW	3 月 7 日		農曆 2 月 17 日
Apr-2004	38	NNW	W	124	WNW	4 月 8 日		農曆 2 月 19 日
May-2004	27	NNW	N	93	NNW	5 月 8 日		農曆 3 月 20 日
Jun-2004	56	SE	SSE	125	S	6 月 3 日		農曆 4 月 16 日
Jul-2004	49	NNW	N	142	N	7 月 2 日	敏督利	農曆 5 月 15 日
Aug-2004	35	NNW	N	130	WNW	8 月 24 日	艾利	農曆 7 月 9 日
Sep-2004	34	N	NNW	132	WNW	9 月 11 日	海馬	農曆 7 月 27 日
Oct-2004	58	W	WNW	173	W	10 月 2 日		農曆 8 月 19 日
Nov-2004	49	W	NNW	131	W	11 月 27 日		農曆 10 月 16 日
Dec-2004	53	W	NNW	137	W	12 月 31 日		農曆 11 月 20 日
Jan-2005	61	W	WNW	132	W	1 月 8 日		農曆 11 月 28 日
Feb-2005	51	W	NNW	158	W	2 月 20 日		農曆 1 月 12 日
Mar-2005	54	W	NNW	237	W	3 月 12 日		農曆 2 月 3 日
Apr-2005	39	NNW	N	91	NNW	4 月 29 日		農曆 3 月 21 日
May-2005	39	NNW	N	95	N	5 月 22 日		農曆 4 月 15 日
Jun-2005	46	N	NNW	126	N	6 月 21 日		農曆 5 月 15 日
Jul-2005	55	NNW	N	189	W	7 月 18 日	海棠	農曆 6 月 13 日
Aug-2005	46	NNW	N	147	W	8 月 31 日	泰利	農曆 7 月 27 日
Sep-2005	39	NNW	NW	152	NW	9 月 1 日		農曆 7 月 28 日
Oct-2005	55	W	NNW	248	W	10 月 2 日	龍王	農曆 8 月 29 日
Nov-2005	44	NNW	N	129	W	11 月 16 日		農曆 10 月 15 日
Dec-2005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		N.D.
Jan-2006	52	W	NNW	172	W	1 月 5 日		農曆 12 月 6 日
Feb-2006	62	W	NNW	171	W	2 月 4 日		農曆 1 月 7 日
Mar-2006	45	W	NNW	133	WNW	3 月 1 日		農曆 2 月 2 日
Apr-2006	36	NNW	N	91	NNW	4 月 30 日		農曆 4 月 3 日
May-2006	42	NNW	W	148	WSW	5 月 13 日		農曆 4 月 16 日
Jun-2006	49	NNW	N	101	NNW	6 月 23 日		農曆 5 月 28 日
Jul-2006	54	NNW	N	150	WSW	7 月 13 日	碧利斯	農曆 6 月 18 日
Aug-2006	40	NNW	NW	88	W	8 月 9 日	桑美	農曆 7 月 16 日
Sep-2006	37	W	NNW	168	W	9 月 10 日		農曆 7 月 18 日
Oct-2006	38	W	WSW	101	WSW	10 月 30 日		農曆 9 月 9 日
Nov-2006	40	W	WSW	106	WSW	11 月 2 日		農曆 9 月 12 日
Dec-2006	56	W	WSW	134	W	12 月 28 日		農曆 11 月 9 日
Jan-2007	52	W	WSW	130	W	1 月 24 日		農曆 12 月 6 日
Feb-2007	40	WSW	W	113	WSW	2 月 2 日		農曆 12 月 15 日

表 6.4 (續)　臺中港北防波堤堤頭西側 TC 測站歷年海流統計表

日期\項目	月平均流速 (cm/s)	主要流向		最大流速 (cm/s)	流向	發生日期	颱風事件	農曆
Mar-2007	44	NNW	W	151	W	3 月 5 日		農曆 1 月 16 日
Apr-2007	38	NNW	W	194	WSW	4 月 2 日		農曆 2 月 15 日
May-2007	38	NNW	N	95	NNW	5 月 16 日		農曆 3 月 30 日
Jun-2007	44	NNW	N	96	NNW	6 月 30 日		農曆 5 月 16 日
Jul-2007	46	NNW	N	92	NNW	7 月 4 日		農曆 5 月 20 日
Aug-2007	46	NNW	N	99	NNW	8 月 12 日		農曆 6 月 30 日
Sep-2007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Oct-2007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Nov-2007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Dec-2007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Jan-2008	78	W	WSW	183	W	1 月 16 日		農曆 12 月 9 日
Feb-2008	67	W	NNW	158	W	2 月 12 日		農曆 1 月 6 日
Mar-2008	32	NNW	W	102	WSW	3 月 31 日		農曆 2 月 24 日
Apr-2008	32	NNW	N	114	WSW	4 月 24 日		農曆 3 月 19 日
May-2008	50	NNW	N	150	WSW	5 月 11 日		農曆 4 月 7 日
Jun-2008	44	N	NNW	129	NNE	6 月 4 日		農曆 5 月 1 日
Jul-2008	50	SSE	S	145	N	7 月 19 日	卡玫基	農曆 6 月 17 日
Aug-2008	47	SSE	S	121	SSE	8 月 6 日		農曆 7 月 6 日
Sep-2008	52	S	SSE	240	WNW	9 月 28 日	薔蜜	農曆 8 月 29 日
Oct-2008	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		N.D.
Nov-2008	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		N.D.
Dec-2008	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		N.D.
Jan-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Feb-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Mar-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Apr-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
May-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Jun-2009	57	N	NNW	189	NNE	6 月 22 日	蓮花	農曆 5 月 30 日
Jul-2009	49	N	NNE	150	N	7 月 24 日		農曆 6 月 3 日
Aug-2009	38	N	NNW	140	WNW	8 月 7 日	莫拉克	農曆 6 月 17 日
Sep-2009	33	N	W	89	NNE	9 月 29 日		農曆 8 月 11 日
Oct-2009	50	WSW	W	128	WSW	10 月 4 日		農曆 8 月 16 日
Nov-2009	53	WSW	N	183	WSW	11 月 2 日		農曆 9 月 16 日
Dec-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

表 6.5　麥寮港西防波堤堤頭南側 YLCW 測站歷年海流統計表

日期\項目	月平均流速 (cm/s)	主要流向		最大流速 (cm/s)	流向	發生日期	颱風事件	農曆
May-2000	24.27	NNE	SSE	94.6	N	2000/5/18		農曆四月十五日
Jun-2000	26.75	N	SSE	103.4	N	2000/6/30		農曆五月廿九日
Jul-2000	43.64	NNE	N	101	N	2000/7/2		農曆六月初一日
Aug-2000	41.75	NNE	SSE	118.8	N	2000/8/23	碧利斯	農曆七月廿四日
Sep-2000	39.86	NNE	SSE	98.8	NNE	2000/9/14		農曆八月十七日
Oct-2000	37.84	NNE	SSE	106.6	SE	2000/10/29		農曆十月初三日
Nov-2000	34.17	NNE	SSE	116.6	N	2000/11/1	象神	農曆十月初六日
Dec-2000	1.33	NNE	SE	54	SE	2000/12/1		農曆十一月初六日
Jan-2001	38.57	NNE	SSE	106	SSE	2001/1/14		農曆臘月二十日
Feb-2001	36.74	NNE	SSE	112.2	SE	2001/2/10		農曆正月十八日
Mar-2001	35.19	NNE	N	100.4	SSE	2001/3/12		農曆二月十八日
Apr-2001	34.86	NNE	N	87.1	NNE	2001/4/23		農曆四月初一日
May-2001	37.46	NNE	N	96.5	N	2001/5/23		農曆潤四月初一日
Jun-2001	40.61	NNE	N	165.2	N	2001/6/23	奇比	農曆五月初三日
Jul-2001	42.60	N	NNE	110.4	NNE	2001/7/6	尤特	農曆五月十六日
Aug-2001	40.88	NNE	N	104.8	N	2001/8/20		農曆七月初二日
Sep-2001	39.43	NNE	SSE	123.1	NNE	2001/9/18	納莉	農曆八月初二日
Oct-2001	42.02	NNE	SSE	111.8	NNE	2001/10/19		農曆九月初三日
Nov-2001	38.66	NNE	SSE	120.7	SSE	2001/11/6		農曆九月廿一日
Dec-2001	37.32	NNE	SSE	107.4	SSE	2001/12/13		農曆十月廿九日
Jan-2002	37.81	NNE	SSE	106.9	SSE	2002/1/29		農曆臘月十七日
Feb-2002	36.71	NNE	SSE	112.5	SSE	2002/2/2		農曆臘月廿一日
Mar-2002	40.55	NNE	SSE	100.5	N	2002/3/29		農曆二月十六日
Apr-2002	37.07	NNE	SSE	94.7	NNE	2002/4/29		農曆三月十七日
May-2002	36.15	NNE	N	100.7	N	2002/5/27		農曆四月十六日
Jun-2002	40.54	NNE	N	102.3	NNE	2002/6/12		農曆五月初二日
Jul-2002	39.94	NNE	SSE	101.9	N	2002/7/9	娜克莉	農曆五月廿九日
Aug-2002	40.31	N	SSE	114.3	N	2002/8/9		農曆七月初一日
Sep-2002	39.79	NNE	SSE	121.3	N	2002/9/7	辛樂克	農曆八月初一日
Oct-2002	38.78	NNE	SSE	126	SSE	2002/10/8		農曆九月初三日
Nov-2002	37.28	NNE	SSE	110.6	SSE	2002/11/1		農曆九月廿七日
Dec-2002	41.08	NNE	SSE	122.31	SSE	2002/12/8		農曆十一月初五日
Jan-2003	42.06	NNE	SSE	119.7	SSE	2003/1/4		農曆臘月初二日
Feb-2003	40.05	NNE	SSE	113.7	SSE	2003/2/2		農曆正月初二日
Mar-2003	38.52	NNE	N	106	SSE	2003/3/18		農曆二月十六日
Apr-2003	38.94	NNE	SSE	105.7	NNE	2003/4/19		農曆三月十八日
May-2003	40.07	N	NNE	102.5	N	2003/5/16		農曆四月十六日
Jun-2003	36.55	NNE	SSE	94.6	N	2003/6/29		農曆五月三十日
Jul-2003	39.96	NNE	SSE	100.1	NNE	2003/7/13		農曆六月十四日
Aug-2003	41.54	N	NNE	106.9	NNE	2003/8/29		農曆八月初二日
Sep-2003	43.71	NNE	N	112	NNE	2003/9/2	杜鵑	農曆八月初六日
Oct-2003	37.67	NNE	SSE	110.8	N	2003/10/27		農曆十月初三日
Nov-2003	39.45	NNE	SSE	120	NNE	2003/11/23		農曆十月三十日

表 6.5 (續)　麥寮港西防波堤堤頭南側 YLCW 測站歷年海流統計表

日期\項目	月平均流速 (cm/s)	主要流向		最大流速 (cm/s)	流向	發生日期	颱風事件	農曆
Dec-2003	39.94	NNE	SSE	126.8	SSE	2003/12/7		農曆十一月十四日
Jan-2004	41.13	NNE	SSE	115.9	SSE	2004/1/24		農曆正月初三日
Feb-2004	38.46	N	SSE	117.2	SSE	2004/2/7		農曆正月十七日
Mar-2004	36.82	NNE	SSE	116.4	SSE	2004/3/7		農曆二月十七日
Apr-2004	39.53	N	SSE	113.8	SSE	2004/4/8		農曆潤二月十九日
May-2004	38.83	N	NNE	99.9	N	2004/5/8		農曆三月二十日
Jun-2004	44.60	NNE	S	99.2	NNE	2004/6/6	康森	農曆四月十九日
Jul-2004	44.53	NNE	N	112.3	N	2004/7/19		農曆六月初三日
Aug-2004	43.97	NNE	S	124.6	NNE	2004/8/1		農曆六月十六日
Sep-2004	42.06	NNE	SSE	106.7	SSE	2004/9/24		農曆八月十一日
Oct-2004	36.09	SSE	N	115.35	S	2004/10/18		農曆九月初五日
Nov-2004	41.53	NNE	SSE	137.7	SSE	2004/11/15		農曆十月初四日
Dec-2004	43.38	NNE	SSE	128.6	SSE	2004/12/13		農曆十一月初二日
Jan-2005	41.22	NNE	SSE	121.3	SSE	2005/1/12		農曆臘月初三日
Feb-2005	42.69	SSE	NNE	130.72	SSE	2005/2/11		農曆正月初三日
Mar-2005	42.69	NNE	S	125.1	SSE	2005/3/13		農曆二月初四日
Apr-2005	41.16	NNE	S	109.7	N	2005/4/9		農曆三月初一日
May-2005	39.21	NNE	S	113.3	NNE	2005/5/26		農曆四月十九日
Jun-2005	43.64	NNE	S	126.3	N	2005/6/15		農曆五月初九日
Jul-2005	40.95	N	SSE	104.56	N	2005/7/7		農曆六月初二日
Aug-2005	39.98	N	SSE	123	SSE	2005/8/31	泰利	農曆七月廿七日
Sep-2005	43.24	N	NNE	139.5	N	2005/9/1	泰利	農曆七月廿八日
Oct-2005	41.53	NNE	SSE	118.2	NNE	2005/10/19		農曆九月十七日
Nov-2005	40.59	NNE	SSE	126	SSE	2005/11/15		農曆十月十四日
Dec-2005	39.70	NNE	SSE	128.5	SSE	2005/12/4		農曆十一月初四日
Jan-2006	40.37	NNE	SSE	123.9	SSE	2006/1/5		農曆臘月初六日
Feb-2006	37.29	NNE	SSE	114.6	SSE	2006/2/3		農曆正月初六日
Mar-2006	39.03	NNE	SSE	114.1	SE	2006/3/1		農曆二月初二日
Apr-2006	37.88	NNE	N	92.2	N	2006/4/1		農曆三月初四日
May-2006	36.91	NNE	N	122.34	SSE	2006/5/14	珍珠	農曆四月十七日
Jun-2006	40.95	NNE	S	113	N	2006/6/14		農曆五月十九日
Jul-2006	40.54	NNE	S	156.1	N	2006/7/25	凱米	農曆七月初一日
Aug-2006	39.34	NNE	N	99.6	N	2006/8/10	桑美 寶發	農曆七月十七日
Sep-2006	34.41	NNE	S	92.09	N	2006/9/5		農曆潤七月十三日
Oct-2006	41.31	N	S	117.7	SSE	2006/10/4		農曆八月十三日
Nov-2006	38.55	NNE	S	119.3	SSE	2006/11/2		農曆九月十二日
Dec-2006	40.83	NNE	SSE	120.8	SE	2006/12/28		農曆十一月初九日
Jan-2007	39.10	S	NNE	126.5	ESE	2007/1/24		農曆臘月初六日
Feb-2007	38.26	S	NNE	96.6	SSE	2007/2/19		農曆正月初二日
Mar-2007	38.63	S	NNE	120.7	SE	2007/3/5		農曆正月十六日
Apr-2007	40.72	NNE	S	123.4	NNE	2007/4/4		農曆二月十七日
May-2007	35.74	N	S	109.7	N	2007/5/16		農曆三月三十日
Jun-2007	39.48	N	S	101.2	N	2007/6/12		農曆四月廿七日
Jul-2007	39.07	N	S	115	N	2007/7/15		農曆六月初二日

表 6.5 (續)　麥寮港西防波堤堤頭南側 YLCW 測站歷年海流統計表

日期\項目	月平均流速 (cm/s)	主要流向		最大流速 (cm/s)	流向	發生日期	颱風事件	農曆
Aug-2007	46.27	N	S	110.6	NNE	2007/8/18	聖帕	農曆七月初六日
Sep-2007	45.54	N	S	117	S	2007/9/18	韋帕	農曆八月初八日
Oct-2007	50.30	N	S	157	SSE	2007/10/5		農曆八月廿五日
Nov-2007	43.26	S	NNE	143.3	SE	2007/11/27	米塔	農曆十月十八日
Dec-2007	39.74	N	S	114.2	SE	2007/12/31		農曆十一月廿二日
Jan-2008	35.07	NNE	S	132	SSE	2008/1/24		農曆臘月十七日
Feb-2008	39.50	S	SSE	138.6	SSE	2008/2/9		農曆正月初三日
Mar-2008	36.47	S	N	95.3	SSE	2008/3/8		農曆二月初一日
Apr-2008	39.56	S	N	109	SE	2008/4/24		農曆三月十九日
May-2008	38.62	S	N	93.9	SSE	2008/5/11		農曆四月初七日
Jun-2008	44.47	N	S	128.7	N	2008/6/17		農曆五月十四日
Jul-2008	47.88	N	S	142.54	SSE	2008/7/27	鳳凰	農曆六月廿五日
Aug-2008	44.79	N	S	131.5	N	2008/8/31		農曆八月初一日
Sep-2008	51.71	N	S	204.01	S	2008/9/28	薔蜜	農曆八月廿九日
Oct-2008	50.38	NNE	S	171.5	N	2008/10/18		農曆九月二十日
Nov-08	44.64	S	NNE	181.5	SSE	2008/11/10		農曆十月十三日
Dec-08	47.20	N	S	177.6	SSE	2008/12/5		農曆十一月初八日
Jan-09	50.67	S	SSW	187.3	SSE	2009/1/14		農曆臘月十九日
Feb-09	45.06	S	SSW	152.8	S	2009/2/17		農曆正月廿三日
Mar-09	50.25	S	SSW	222.5	S	2009/3/14		農曆二月十八日
Apr-09	48.32	S	N	189.4	S	2009/4/26		農曆四月初二日
May-09	45.46	S	N	134.9	NNE	2008/5/3		農曆三月廿八日
Jun-09	47.35	S	N	212.5	N	2009/6/21	蓮花	農曆五月廿九日
Jul-09	48.61	S	N	163.2	NNE	2009/7/23		農曆六月初二日
Aug-09	46.02	NNE	N	142.1	NNE	2009/8/22		農曆七月初三日
Sep-09	48.49	S	NNE	129	NNW	2009/9/20		農曆八月初二日
Oct-2009	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.		N.D.
Nov-09	48.94	S	N	200.6	S	2009/11/17		農曆十月初一日
Dec-09	45.19	S	N	178.1	SSE	2009/12/16		農曆十一月初一日
Jan-10	45.79	S	N	136.3	S	2010/1/26		農曆臘月十二日
Feb-10	44.42	S	N	160.24	S	2010/2/12		農曆臘月廿九日
Mar-10	48.72	S	N	192.25	S	2010/3/16		農曆二月初一日
Apr-201	44.41	N	S	148.7	S	2010/4/14		農曆三月初一日
May-10	41.47	N	SSE	108.99	N	2010/5/23		農曆四月初十日
Jun-10	43.57	NNE	S	126.56	NNE	2010/6/14		農曆五月初三日
Jul-10	47.06	N	S	173.94	N	2010/7/27		農曆六月十六日
Aug-10	45.65	N	S	138.61	N	2010/8/10		農曆七月初一日
Sep-10	50.62	N	S	177.96	SSE	2010/9/19	凡那比	農曆八月十二日
Oct-2010	49.26	S	N	151.79	SSE	2010/10/20	梅姬	農曆九月十三日
Nov-10	48.34	S	NNE	155.87	S	2010/11/25		農曆十月二十日
Dec-10	47.39	S	N	227.43	S	2010/12/16		農曆十一月十一日

6.4 麥寮港堤頭沖蝕與海流的關係分析

不同的海流方向會引發不同的漂砂方向，長期的淨漂砂量則決定此處海域的侵淤特性。因麥寮港西防波堤附近海域並無長期的漂砂觀測資料，本研究另收集分析麥寮海域 YLCW 測站的海流歷時特性，累計各月份的海流淨能量，與麥寮工業區專用港管理公司於 96/04~ 100/09 期間所施測的 30 筆堤頭地形資料進行關聯性比對分析。

（1）流能量估算

各月份的海流淨能量的計算方式：以麥寮港 YLCW 測站 2007 年 5 月份的逐時海流資料為例，首先繪製逐時流速與流矢分佈圖，如圖 6.15 所示。YLCW 測站的海流大部分呈現南、北流向，圖 6.15 中第一欄為所有的海流成分的時序列資料，第二欄為流速大於 0.5m/sec 的部分，第三欄則為流速大於 1.0m/sec 的部分。因流速小於 0.5m/sec 的成分流對於堤頭地形沖蝕影響不大，本研究後續僅選取流速大於 0.5m/sec 的部分進行探討。其次，將流速大於 0.5m/sec 的成分流，分成沿岸方向與向、離岸方向分量。以各方向流速分量的平方表示為該方向的單位流能量 (以下簡稱流能量，即 $E_i \approx V_i^2$)。

將圖 6.15 中第二欄的歷時流速成分，轉換為南、北方向與東、西方向的流能量分量，各如圖 6.16 之第一欄 (N 向為正) 與第二欄 (E 向為正) 的箭頭大小。再逐時累計沿岸方向與向、離岸方向的流能量，各如圖 6.16 之第一欄與第二欄的黑色實線，最後可得 2007 年 5 月份於沿岸方向與向、離岸方向的淨流能量。圖 6.16 中第一、二欄之月累計淨流能量，計算如下：

沿岸方向：$E_{N\sim S} \approx \sum_{i}^{31}[(V_i)_N^2 - (V_i)_S^2] = +535.17$ (+表示向北)

向、離岸方向：$E_{E\sim W} \approx \sum_{i}^{31}[(V_i)_E^2 - (V_i)_W^2] = +20.93$ (+表示向東)

依據上述分析流程，將麥寮港 YLCW 測站由 2000 至 2010 年間之逐時海流資料計算出月淨流能量分佈，如圖 6.17 所示 (藍線為南、北方向，紅線為東、西方向)。由圖 6.17 可看出，逐月淨流能量呈現規律性，夏季期間北向的流能量逐漸增加；冬季期間相反，南向的流能量逐漸增加。其中，東、

西方向的月淨流能量相對很小，故不予討論。

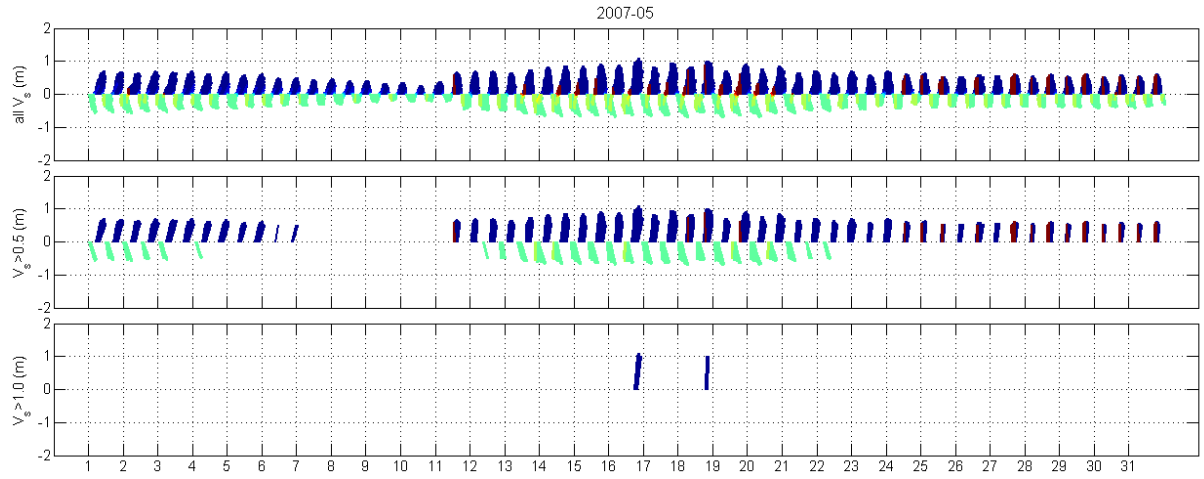


圖 6.15 麥寮港 YLCW 測站逐時流速與流矢分佈圖 (2007/05)

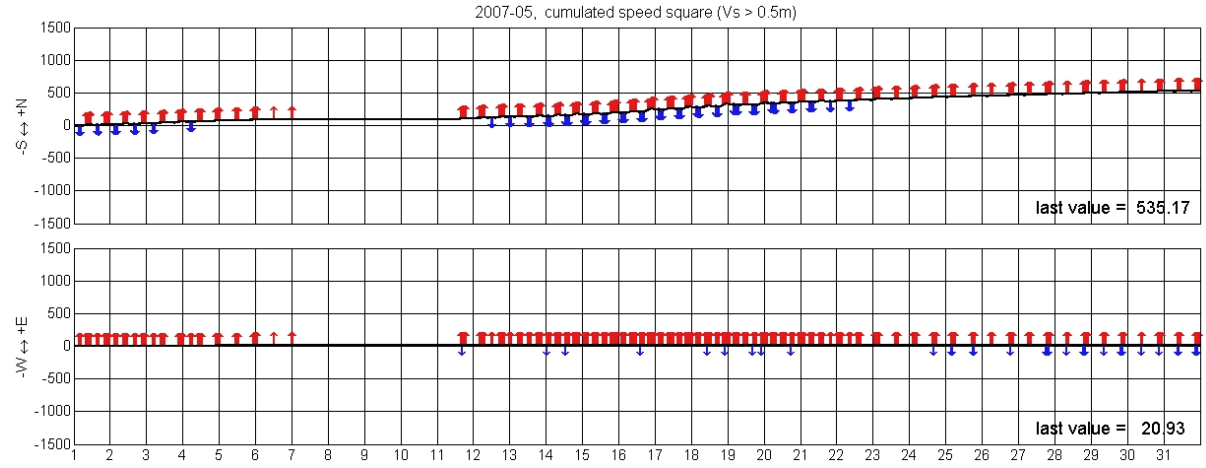


圖 6.16 麥寮港 YLCW 測站逐時流能量累積分佈圖 (2007/05)

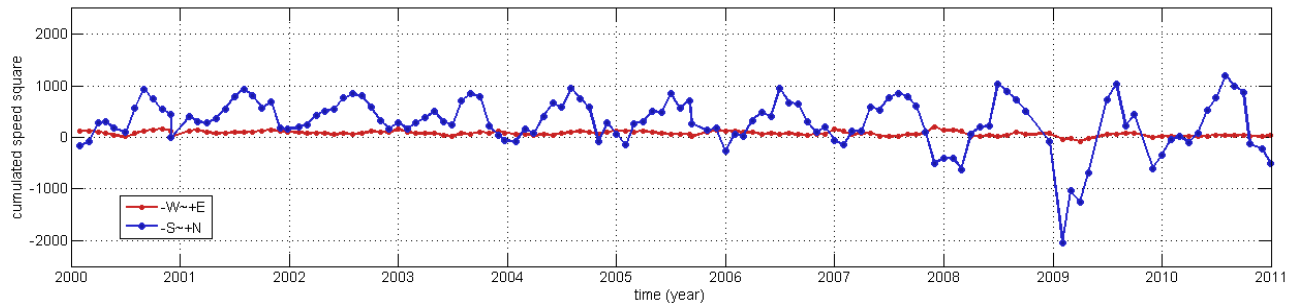


圖 6.17 麥寮港 YLCW 測站逐月淨流能量累積分佈圖 (2000~2010 年)

（2）流能量與堤頭沖蝕的關係

由上述分析流程可得麥寮海域不同月份或季節之淨流能量，配合麥寮工

業區專用港管理公司於 96/04～100/09 期間所施測的堤頭地形資料，挑選同期間的海流與堤頭地形資料進行關聯比對。

圖 6.18 為西防波堤二筆夏季堤頭地形 (96/05~96/07、96/08~96/09) 之侵淤變化實例，配合這二筆地形變化的主要作用力 96/06 與 96/09 的海流流能量累積分佈 (如圖 6.19 所示)，可看出夏季淨流能量向北，當北向海流通過堤頭時，在堤頭周圍產生渦流 (可參考圖 5.8)，使得堤頭之西側與西北側流速增大，造成堤頭下游側 (堤頭北側侵蝕)。

圖 6.20 為西防波堤二筆冬季堤頭地形 (98/10~98/11、98/11~99/01) 之侵淤變化實例，配合這二筆地形變化的主要作用力 98/11 與 98/12 的海流流能量累積分佈 (如圖 6.21 所示)，可看出冬季淨流能量向南，當南向海流通過堤頭時，在堤頭周圍產生渦流 (可參考圖 5.8)，使得堤頭之西側與東南側流速增大，造成堤頭下游側 (堤頭南側侵蝕)。同時，南向的海流亦將濁水溪口的淤沙向南推移，因西防波堤的阻攔而淤積在西堤堤頭的北側。

由上述夏季與冬季兩組實例可初步歸納出，堤頭地形的沖蝕現象與海流的季節性變化直接相關。本研究再進一步將 96/04~100/09 期間所有的堤頭 -35m 沖刷洞資料 (如圖 6.11)，與同期間的流能量累積分佈 (如圖 6.17 所示) 進行比較，如圖 6.22 所示。結果可再次證實，夏季淨流能量向北 (主要流況向北)，沖刷洞在堤頭北側，但堤頭南側為較深的水域 (如航道)，並無漂砂向北補注沖刷洞，造成堤頭 -35m 沖刷洞持續侵蝕。冬季淨流能量向南 (主要流況向南)，沖刷洞在堤頭南側形成，但堤頭北側有來自濁水溪口的沖積沙，南向漂砂會先將原北側沖刷洞逐漸回填。如此週而復始，形成一個循環的現象。

因堤頭沖刷洞會受到來自上游河川輸砂的影響，或是港口航道疏浚行為影響潮流流場，此等現象都增加本計畫區堤頭沖蝕分析的困難度，後續仍需藉由數值模擬與水工模型試驗更深入分析探討。

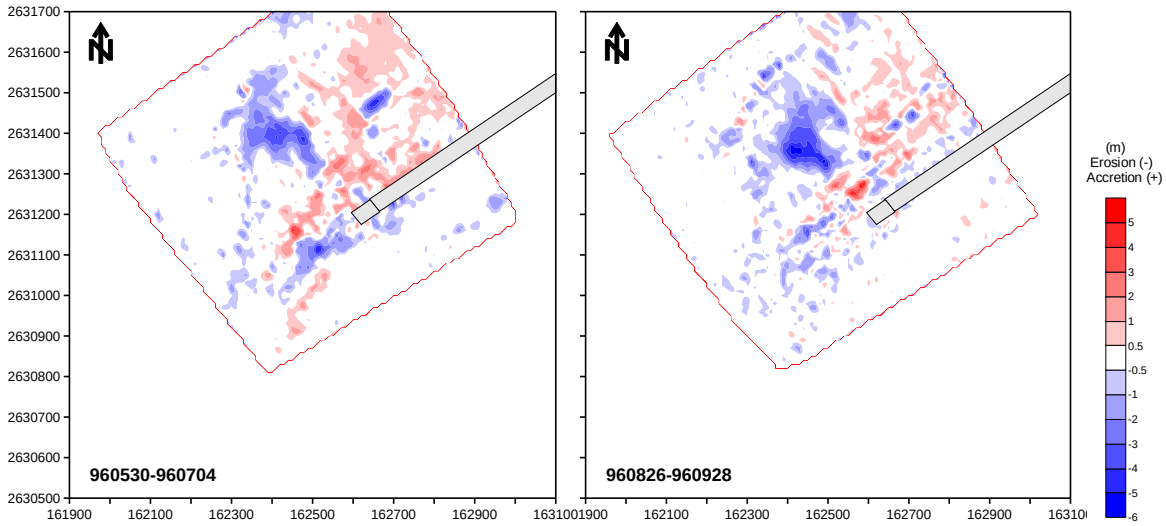


圖 6.18 麥寮港西防波堤堤頭地形夏季侵淤變化實例 (96/05~96/09)

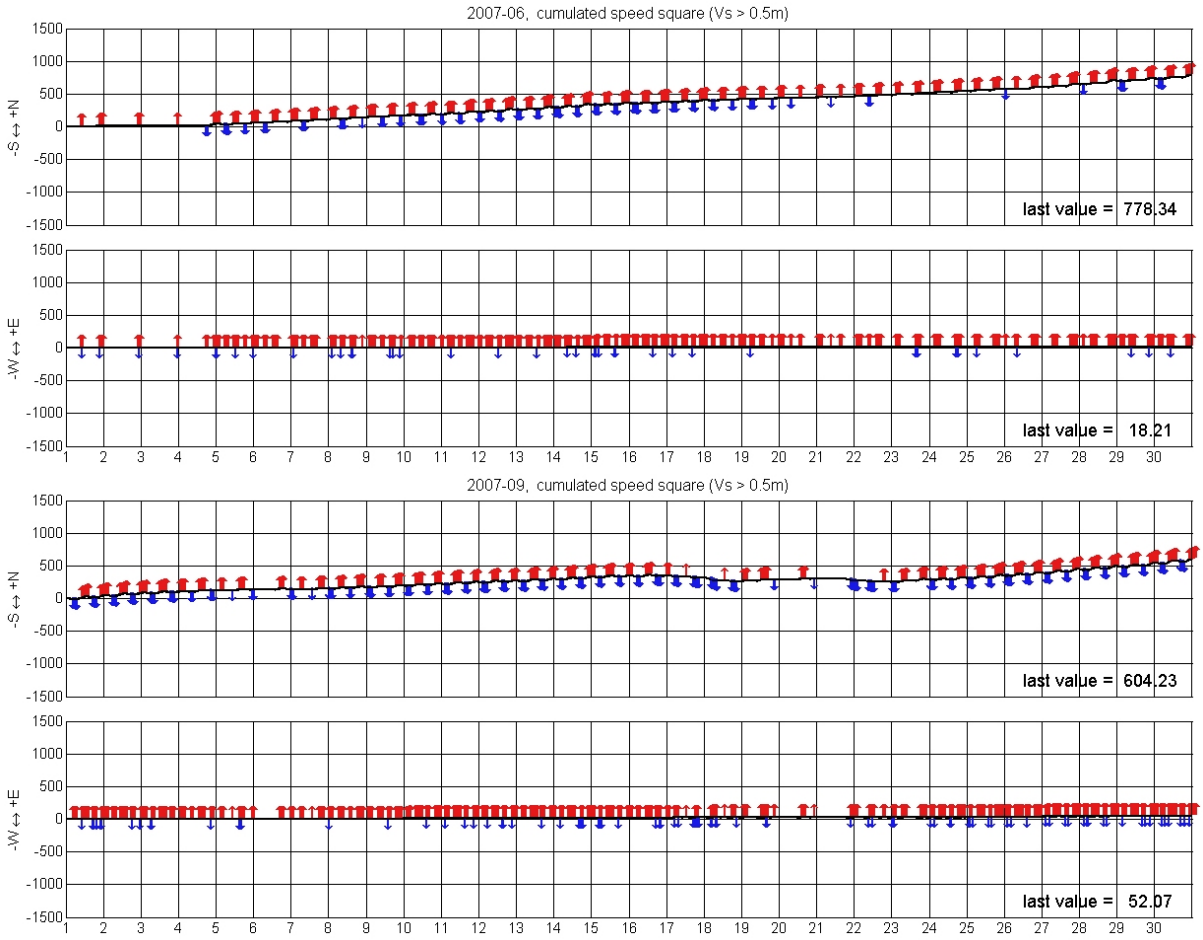


圖 6.19 麥寮港 YLCW 測站夏季流能量累積分佈實例 (96/06、96/09)

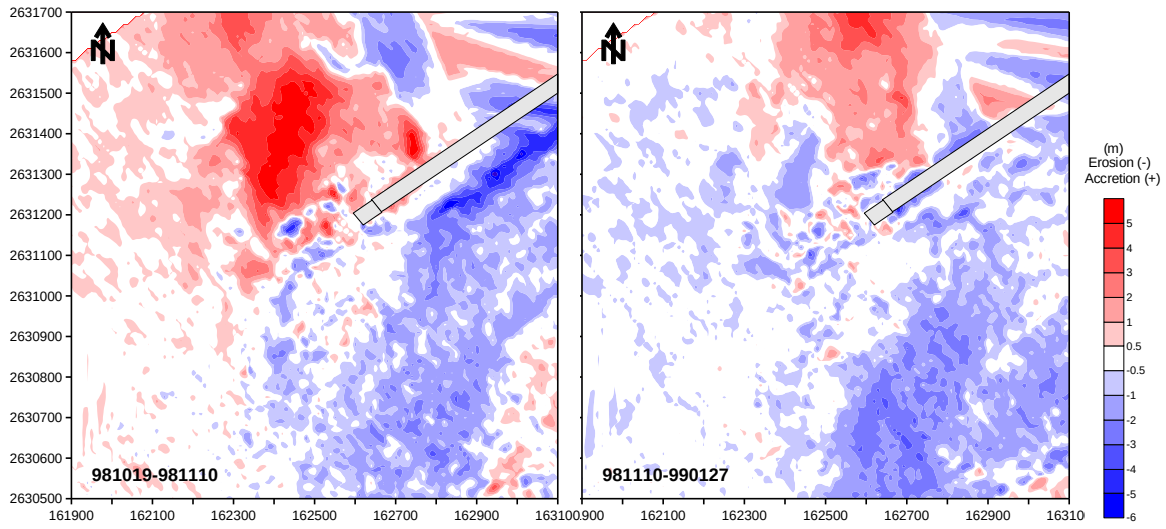


圖 6.20 麥寮港西防波堤堤頭地形冬季侵淤變化實例 (98/10~99/01)

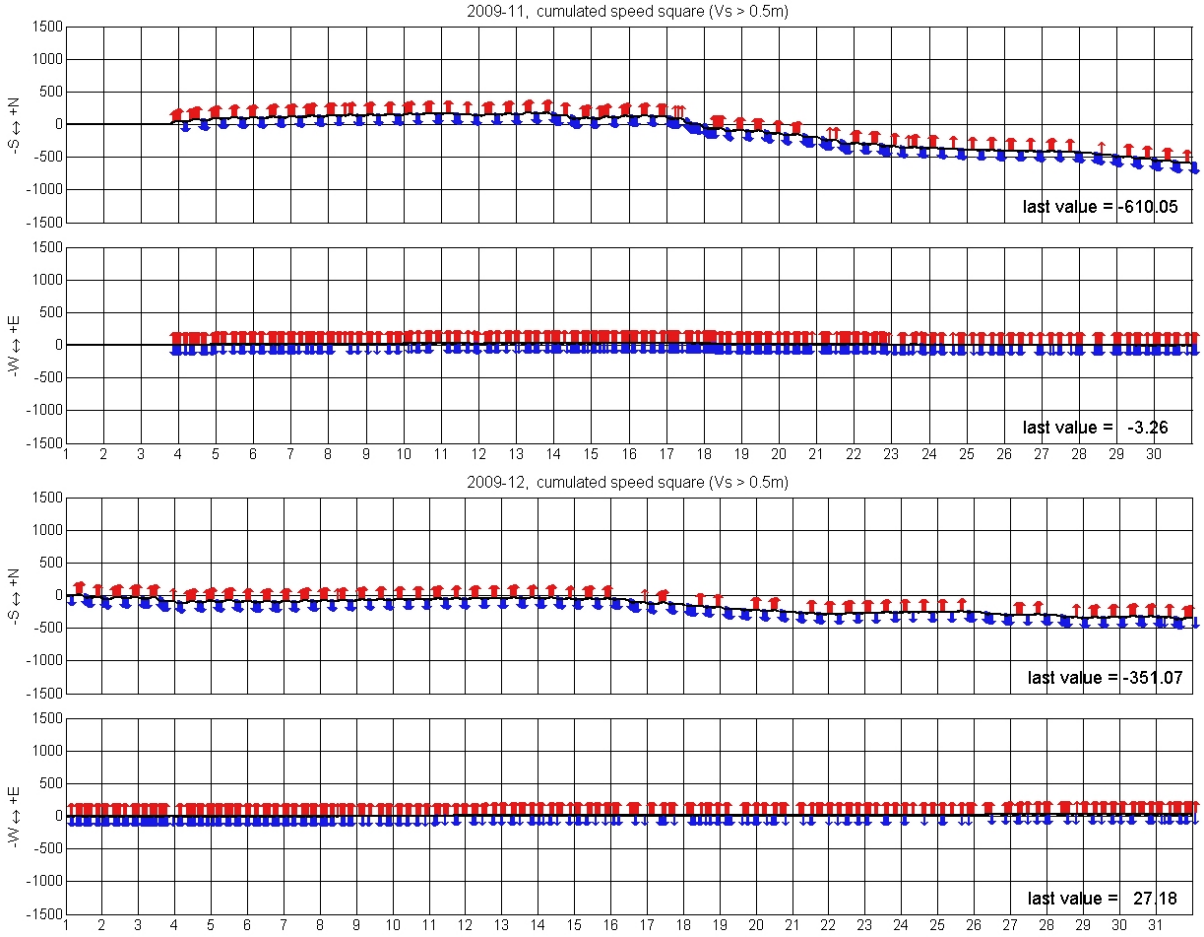


圖 6.21 麥寮港 YLCW 測站冬季流能量累積分佈實例 (98/11、98/12)

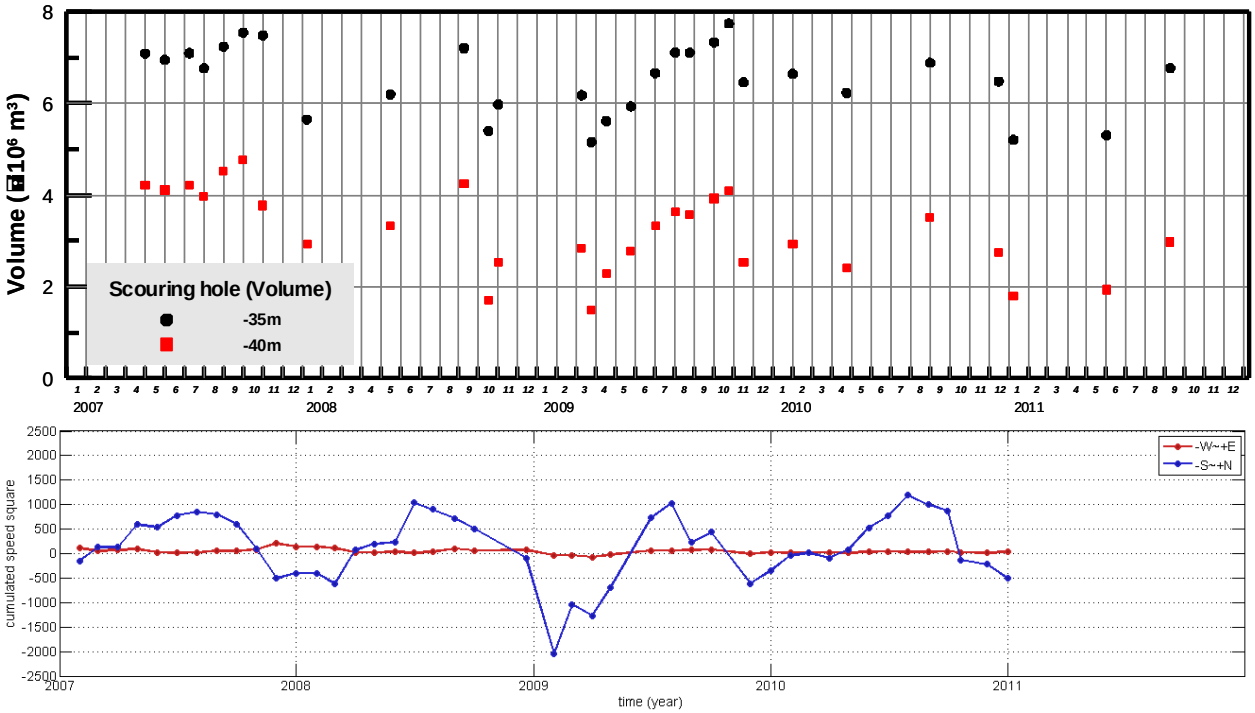


圖 6.22 麥寮港西堤堤頭加密測量之-35m 沖刷洞變化與流能量累積分佈之對應關係圖

6.5 底床掏刷之臨界分析

以今年度實測海流與波浪資料進行分析，以架設水深 10m 處的儀器觀測 5m 水層的海流，取 12 小時移動平均之一半值視為底床表面流速(Uc)，即是假設平均 5m 水深的海流於海底處流速衰減一半，而波浪則以線性波公式計算底床最大水平速度(Uw)，則觀測期間內同時間的海流流速振幅與波浪流速振幅結果如圖 6.23 所示，圖中並同時計算海流所佔兩種流速振幅的比例量($Uc/(Uc+Uw)$，稱之為海流/總流速比)。此結果中，該海域海流貢獻於流速振幅上，常時超過 50%，而測期內的平均比例更達 81.31%，顯示一般時期(非颱風期間)海流驅動力於底床處屬於主導成分，比波浪提供更多的能量。Sumer and Fredsøe (1997)之研究成果顯示，當海堤寬度與 KC 值固定時，堤頭處的掏刷深度將隨著海流/總流速比的增加而增大，但因文獻中並未記載海流/總流速比大於 0.5 的試驗結果，因而無法藉由經驗式而取得較為確定的掏刷深－堤寬比。

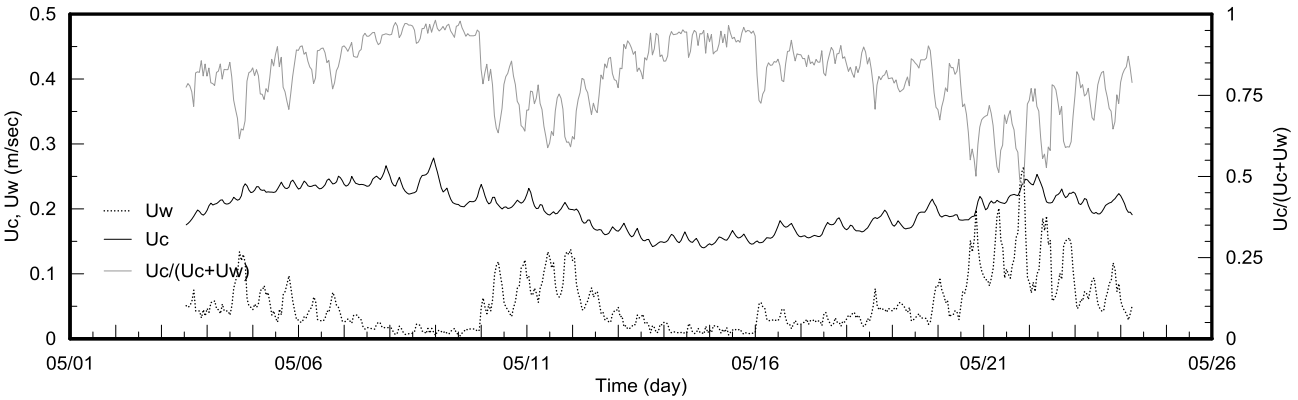


圖 6.23　實測海流流速與波浪流速分佈及海流－總流速比分佈圖

本計畫現階段所蒐集的相關資料，尚未能取得研究區內的底質參數，因此需藉由相關經驗公式推估本海域的漂砂特性。依據 Sato and Tanaka (1962) 以線性波浪條件解析海床底質的移動臨界條件，其建立的經驗式為

$$\frac{H}{L_o} = m\left(\frac{D'}{L_o}\right)^n \sinh kh_t$$

其中，D' 為底質平均粒徑，h_t 則是臨界水深，k、L_o、H 為對應的波浪條件，而 m 與 n 則是經驗係數，當 $m=2.4$、$n=1/3$ 時，底質呈完全移動的狀態。

參考第二章中由統計方法所推算之颱風波浪條件 (波高 6 m、週期 12 sec)，不同水深在颱風作用下，完全啟動的底質粒徑分佈如圖 6.24 所示。當平均底床深度為 20 m 時，粒徑小於 0.40 mm 的顆粒即會受到波浪的影響，而產生移動，此粒徑是極端條件下的推論，若颱風浪無法帶動此種粒徑的顆粒，則平時的波浪條件亦不可能驅動之。使用此平均粒徑以徐爾滋數(Ψ_m，Shields number)計算實測海流、波浪資料對於底質的影響量。

$$\Psi_m = \frac{\tau_m}{SgD_{50}} = \frac{U_{fm}^2}{SgD_{50}} = \frac{\left(\sqrt{f_w/2}U_{bm}\right)^2}{SgD_{50}} = \frac{\left(\sqrt{f_w/2}Uw\right)^2}{SgD'}$$

其中 $S=(\rho_s/\rho-1)$，f_w 為摩擦係數，U_{bm} 為底床最大流速，於波浪場中即相當於先前所求得的 Uw。使用今年度實測資料進行計算，其中海流的底床摩擦剪力(τ_b)，Horikawa (1978) 建議使用半經驗式推算

$$\tau_b = \rho f_b^2 Uc^2$$

$$f_b^2 = 0.214\left(\frac{z_o}{h}\right)^{1/6}$$

其中，f_b 為摩擦係數經驗式，使用底床粗糙長度(z_o)計算。

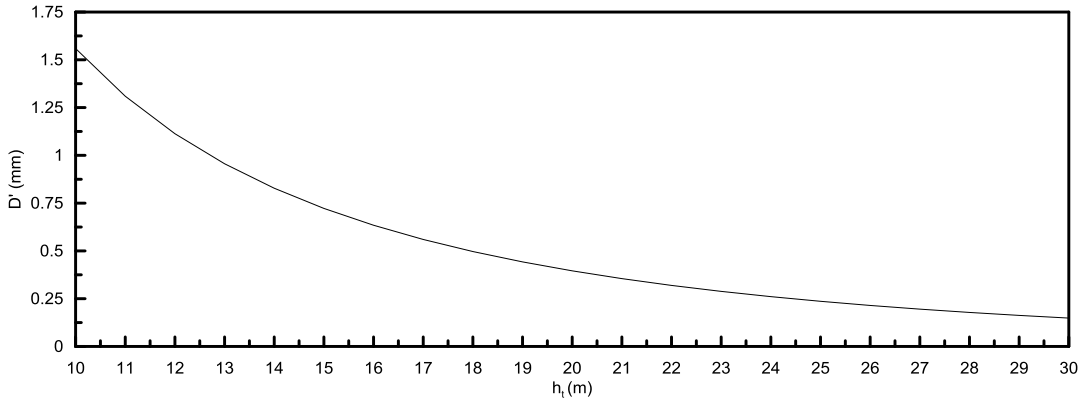


圖 6.24　颱風波浪條件(H=6m, T=12sec)下，臨界水深與平均粒徑關係圖

繪整海流(Ψ*c*)與波浪(Ψ*w*)的徐爾滋數計算結果如圖 6-25 所示。當徐爾滋數偏大時，代表底質較易受到驅動力的影響而產生移動，圖 3 結果顯示波浪的徐爾滋數最大時約大於海流 10 倍，但最小的數值則約為 1/100 倍。比較同一時間下的比例(Ψ*c*/(Ψ*c*+Ψ*w*)，稱之為海流徐爾滋數/總徐爾滋數比)，則可發現雖然兩者的隨時間變化的倍數差異大，但所佔比率並無如流速振幅般偏向單一成分，觀測期間內海流徐爾滋數/總徐爾滋數比所佔平均值為 40.14%。

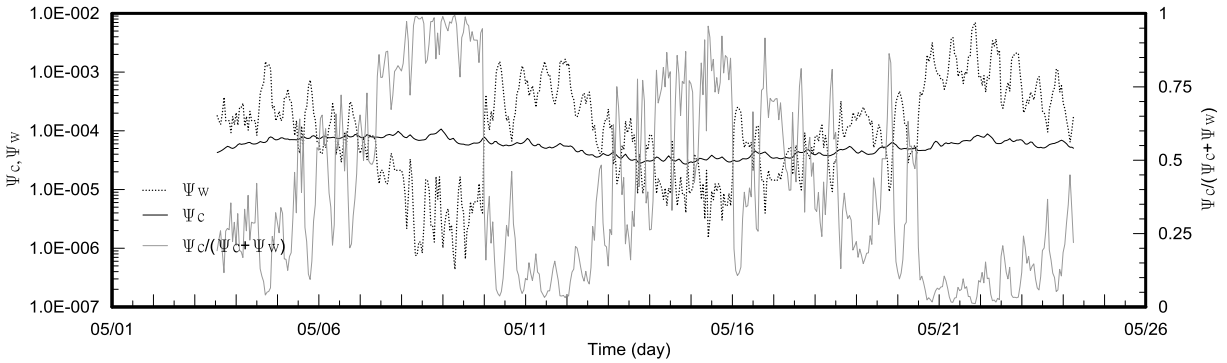


圖 6.25　實測海流徐爾滋數與波浪徐爾滋數分佈圖

第七章　水工模型試驗規劃

水工模型試驗工作在今年度 (101 年度) 先進行試驗規劃，而於下年度 (102 年度) 才開始執行造波試驗。依照本計畫取得之麥寮港西防波堤外廓工程設計圖與實測地形資料，佈置平面水工模型試驗。採用夏季、冬季季風波浪及颱風波浪等條件分別造波，同步量測與分析各造波條件下之波浪分佈與防波堤堤頭流速變化。分析探討在極端波浪條件與海流作用防波堤堤頭下，引發的流場特性，及其對堤頭地形沖蝕的影響。

一、試驗設備與儀器

1. 試驗水槽與造波機

試驗定於國立中山大學海洋環境與工程學系三維水工模型實驗室之平面試驗水池進行，平面造波水槽長 40 公尺、寬 20 公尺、深 1.4 公尺 (如圖 7.1 所示)。造波系統由兩部丹麥水試所 (DHI) 設計之電驅 Hinge 式造波機所構成，每部機組之造波板長 5 公尺、高 1.4 公尺 (如圖 7.2 所示)，造波機組可單獨運作亦可同步操作，並可依需求變更造波方向等。造波控制系統包含電腦軟硬體、致動軸位置訊號收發單元、造波馬達驅動器等 (如圖 7.3 所示)。此造波機於水深 1 公尺時，可造出週期 2 秒、波高 0.2 公尺之波浪。波浪週期愈短，可造波高愈大；水深愈大，可造波浪愈大。

2. 波高計

水位變化之測定乃採用電容式波高計 (如圖 7.4(a))，每組波高計含感測線、電容計及訊號產生器三部份，感測線是由鐵氟龍電線（PTFE）及電極形成一電容迴路，並隨水位面的起伏變化，感應產生電壓變化，藉由電容計檢測電容之變動，轉換成線性類比式訊號。波高量測精度可達額定輸出的 0.3 % 以內。藉由 12bit ADC 轉換數位化訊，最小刻度可達 0.15 公釐。儀器主要架設於深海區與防波堤堤頭鄰近區域。

圖 7.1　試驗平面水槽設施實景

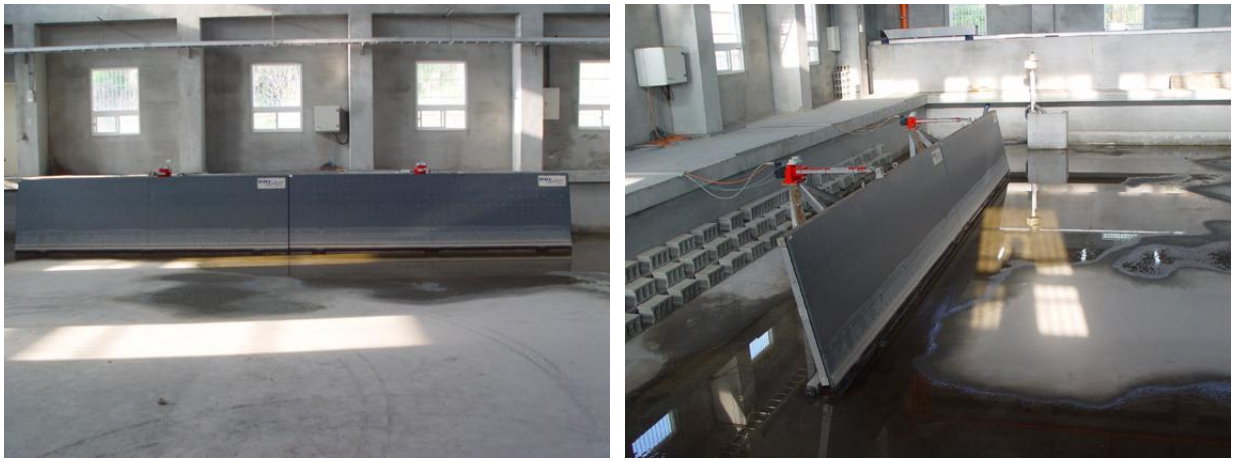


圖 7.2　造波機伺服馬達與造波板

圖 7.3　造波控制系統 (伺服馬達驅動器與位置訊號收發單元)

3. 訊號資料擷取系統

訊號記錄系統之 ADC 採研華科技公司(Advantech)生產之PCI-1713類比／數位轉換卡，能提供 12 bit 解析度、32 通道達 100 kHz 的取樣率（sampling rate），分析軟體採用本團隊所研發之訊號收集程式。考量符合取樣定理，並可觀測到高頻訊號變化的峰值，本次試驗系統皆以 100 Hz 之取樣率記錄各測計之訊號。訊號擷取設備，如圖 7.4(b) 所示。

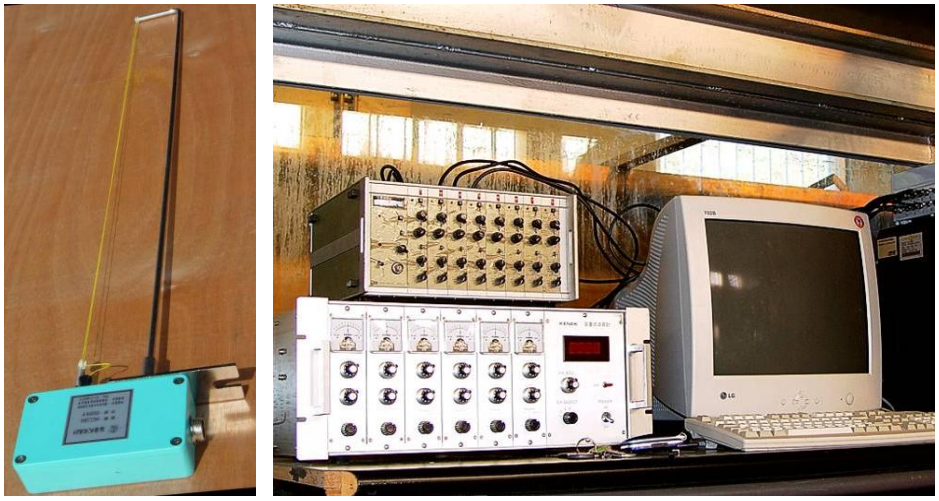


圖 7.4　試驗用儀器設備，(a)波高計，(b)訊號擷取系統

4. 電磁式流速計

流速計為日本 ALEC 公司製造之 ACM250-A 型流速計，可量測二維方向，量測流速範圍為±250cm/sec (可分三段選擇為±25cm/sec、±50cm/sec、±250cm/sec)，精確度為所選定量測範圍之±2%，反應頻率可選擇為 0.05sec、1.0sec、5.0sec，於水深下 10 公尺內皆可進行量測。於動床試驗進行時，使用海流儀測量防波堤堤頭的流速變化狀態。儀器能夠觀測固定位置的流速變化，用以比對波浪衍生流場對於底床的影響量。

二、試驗條件與試驗比尺

1. 波浪條件

本計畫所推算之試驗區域颱風波浪條件，如表 7.1 所列。其中，最大波高條件發生於重現期 100 年的 N 向及 SW 向入射颱風浪。另外由 THL2B 測站 2007 年風玫瑰圖資料可知，季風期間波向以 NW 至 NNE 以及 WNW 至 SW 方向為主。考量入射波向的影響，試驗設計可選擇兩組堤頭設置，分別以北向及西南向入射波浪為主要鋪設方位。最大颱風波浪條件為波高 6.4m，週期 10.6sec，經淺化公式推算於水深 56.25m 時波高為 6.1m。第二大颱風浪條件為波高 6.3m，週期 10.5sec，推算於水深 56.25m 時波高為 6.0m。

表 7.1　麥寮港外海 10~100 年重現期颱風波浪推算

重現期	100 年		50 年		25 年		20 年		10 年	
波向	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)	波高 (m)	週期 (sec)
N	6.4	10.6	5.9	10.2	5.3	9.7	5.1	9.5	4.5	8.9
NNW	5.6	9.9	5.1	9.5	4.6	9.0	4.4	8.8	3.8	8.2
NW	5.3	9.7	4.9	9.3	4.5	8.9	4.3	8.7	3.8	8.2
WNW	5.7	10.0	5.2	9.6	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
W	5.8	10.1	5.3	9.7	4.9	9.3	4.7	9.1	4.2	8.6
WSW	5.9	10.2	5.4	9.8	4.8	9.2	4.6	9.0	4.0	8.4
SW	6.3	10.5	5.6	9.9	4.9	9.3	4.7	9.1	3.9	8.3

2. 水位條件

季風浪造波時，試驗設計水位採用平均潮位；颱風浪造波時，試驗設計水位採用大潮平均高潮位為基準。

3. 海流條件

試驗規劃區域附近的歷年海流紀錄顯示，主要流向呈南北向流動，尤以北北東、南南西與南向發生機率最大，此海流流向約與波浪入射方向保持垂直。15 年間月平均流速變動範圍為 5~25 cm/s，最大流速變動範圍則是 100~150 cm/sec 間。

3. 試驗比尺

模型試驗乃是指於適當條件下，依循相似準則（simulated criteria）考慮比例縮尺，作成可代表原型物理機制之模型體，而後再行利用試驗模擬原型之現象，比例推算原型之動力機制與運動狀態，並建構成物理分析預測模式。因水工模型試驗之模擬複雜而繁瑣，為使模型試驗結果能與實際現象相符，試驗過程中，須符合與原型相同之物理準則，同時亦須儘量使模型易於控制及觀測。一般而言，可代表原型物理機制之模型試驗必須滿足：幾何相似性、運動相似性及動力相似性。

地形變化主要外力來自於波浪，而波浪的傳遞與運動是受重力所主導，可知原型與模型之間所必需相符合的比例參數是福祿數（Froude number），其兩者之關係如下：

$$\left[\frac{v}{\sqrt{gL}}\right]_p = \left[\frac{v}{\sqrt{gL}}\right]_m \tag{7-1}$$

上式之下標 p 與 m 分別代原型與模型之物理量，v 為特性速度，L 為特性長度，g 為重力加速度，若兩者所在高度與地球緯度相近，則原型與模型之重力加速度可視為相同。因此，簡化式 (7-1) 可得：

$$\left[\frac{v}{\sqrt{L}}\right]_p = \left[\frac{v}{\sqrt{L}}\right]_m \tag{7-2}$$

依照現況需求與實驗室設備規模決定了幾何縮尺（$\lambda_\ell = L_m / L_p$）之後，代入式 (7-2) 可得速度縮尺

$$\lambda_v = \frac{v_m}{v_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = \sqrt{\lambda_\ell} \tag{7-3}$$

同理可求得重量及時間縮尺

$$\lambda_w = \frac{[\rho g L^3]_m}{[\rho g L^3]_p} = \left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right)\left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 = \lambda_\rho \lambda_\ell^3 \tag{7-4}$$

$$\lambda_t = \frac{T_m}{T_p} = \frac{(L/v)_m}{(L/v)_p} = \lambda_\ell^{\frac{1}{2}} \tag{7-5}$$

本試驗模型比尺之選定，在同時考量現場海岸地形、波浪條件、海流條件及試驗設備容許範圍內，模型比尺初步採用等比縮尺 1/100，即水平縮尺與垂直縮尺相同。依據 1/100 等比縮尺之模型率，換算各物理量之模型縮尺比，如表 7.2 所示。

表 7.2　各物理量之模型縮尺比

物 理 量	縮　尺　比
長　　度	$\lambda_\ell = 1/100$
時　　間	$\lambda_t = 1/\sqrt{100} = 1/10$
速　　度	$\lambda_v = 1/\sqrt{100} = 1/10$
密　　度	$\lambda_\rho = 1/1$
重　　量	$\lambda_w = 1/100^3 = 1/1000000$

三、造波試驗下防波堤堤頭流場觀測與地形變化

1. 試驗地形規劃

為了重現麥寮港西防波堤興建前的地形特性，使得試驗結果可與現場觀測結果及數值模擬結果相互比較驗證，本試驗的初始地形設計，初步以麥寮港西防波堤堤頭附近實測地形予以平滑化處理。

試驗以麥寮港作為防波堤堤頭流場特性觀察區域，圖 7.5 為現有測深斷面位置標示圖，依照 M1~M9 測深剖面線，可將堤頭附近水深劃分成三大區塊。第一區塊為 M1、M2 與 M5 測線交會處，此區域平均水深為 10m。第二區塊為 M1、M2 與 M9 測線交會處，此區間內平均水深為 20m。第

三區塊為堤頭西側，即 M4 與 M5 測線交會處，平均水深則是 25~30m。將此三組區域重整並內插為三維地形資料，結果如圖 7.6 所示。在圖 7.6 中分別以標號標示區域代號。描繪的內插地形去除了堤頭外消波塊群南、北側最大掏刷深度 42~44m，以簡化試驗模型的複雜程度。

因而依照此三區塊水深規劃三組不同底床條件：(一) 所有底床的初始深度皆是 10m、(二) 堤頭北側水深為 10m，堤頭南側水深為 20m，堤頭西南端則採用漸變型式的水深、(三) 底床地形按照圖 7.6 所示進行佈置。由造試驗比尺而取決主要模擬與觀測的區域，其結果如圖 7.5 中紅色需線所圈圍的方框所示，此區域的南北向跨幅約為 500m、東西方向寬度亦是約為 500m。

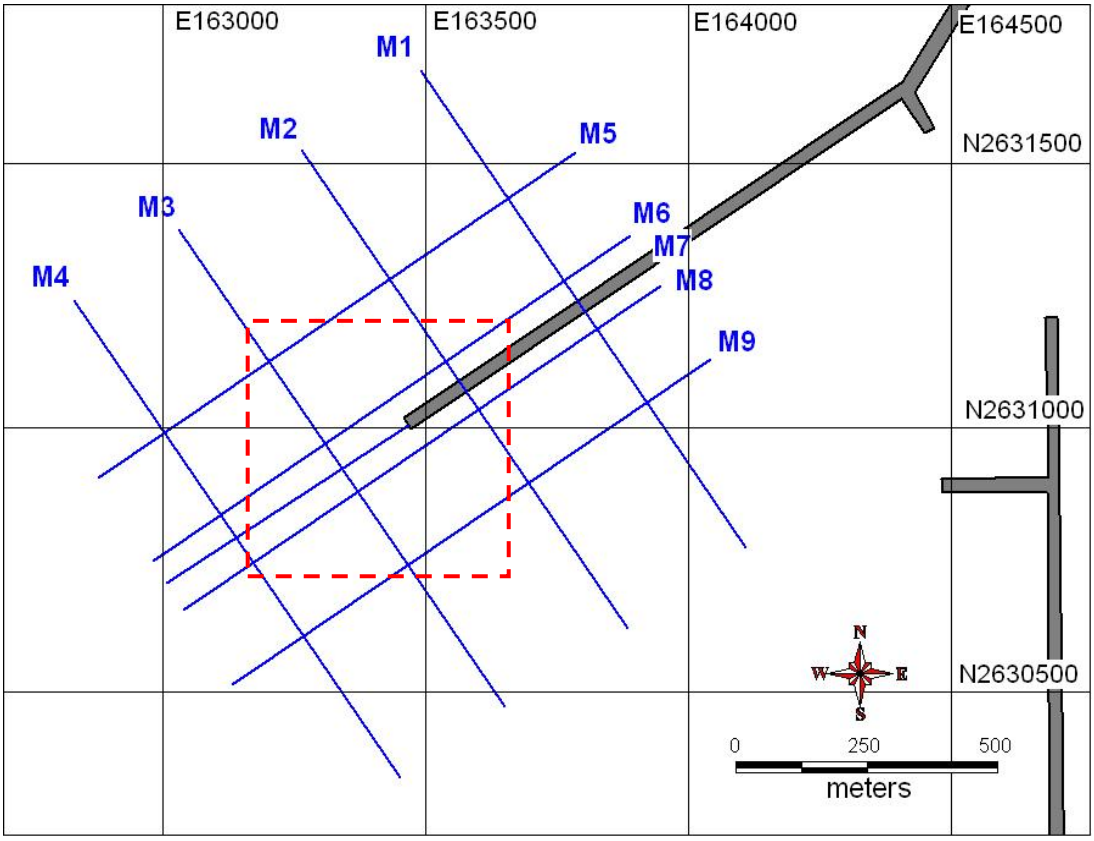


圖 7.5 麥寮工業港堤頭水深測量斷面位置圖

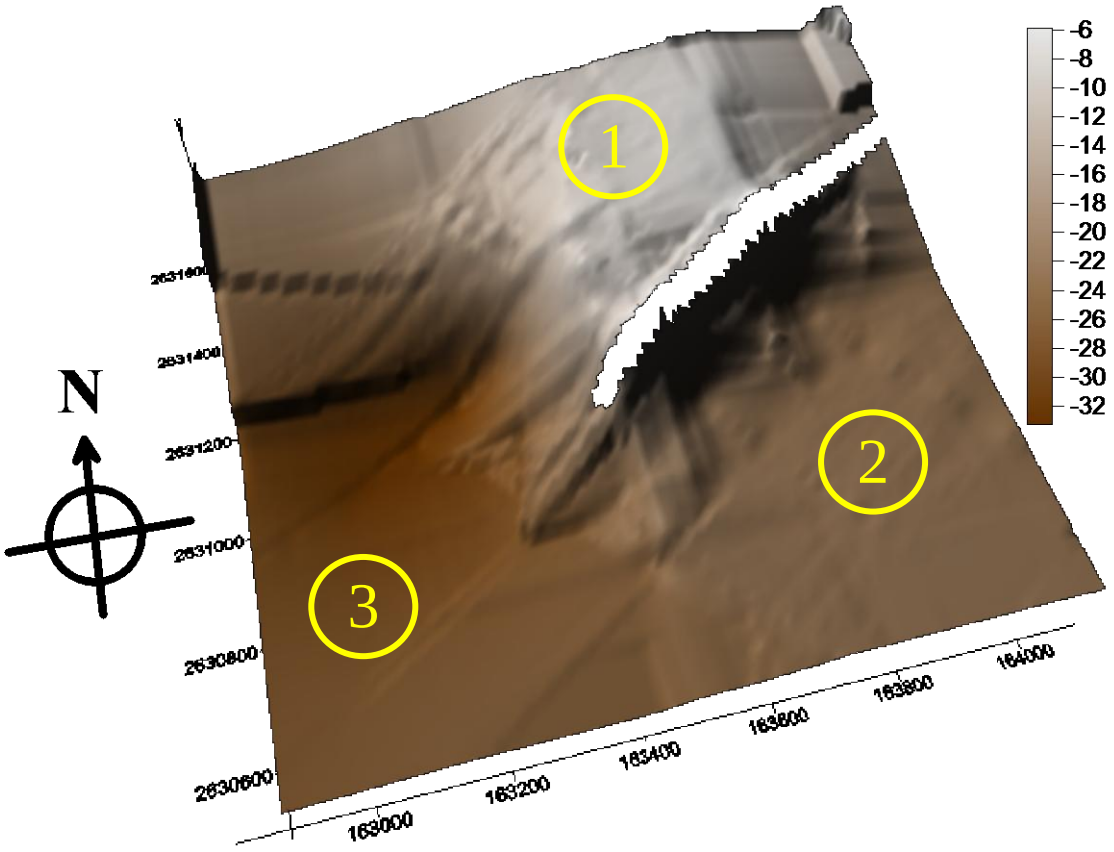


圖 7.6 麥寮港防波堤堤頭特徵內插三維地形圖

2. 試驗規劃

根據本計畫所收集歷年波浪觀測資料，以實測季風波浪及颱風波浪推算值作為造波條件，佈置不同的底床地形，探討單純波場下的防波堤堤頭掏刷現象。根據第一年研究成果，潮流是造成深海域堤頭地形沖蝕的主要成因。然而，颱風波浪所引發的底床流場分佈，其規模是否接近於較大潮流的量值仍需要進一步觀察探討。另外為使試驗的條件接近現場狀態，規劃添設造流系統，系統的佈置規劃如圖 7.7 所示。現場海流方向約與波浪入射方向保持垂直，規劃造流方向亦比照如此，在導波板尾段設置寬幅 5m 的試驗區間生成強制流場，用以擺設防波堤堤頭模型。造流系統動力預計採用沉水式軸流馬達，並於其上下游處設計束縮段，以加強流速驅動能力。當試驗區最大水深 0.35 m，且模場流速 0.15 m/sec (原型 1.5 m/sec)，需驅動力為流量 0.26CMS 的軸流泵，而為方便調動流速，軸流泵採用並

聯式架構，減小加速區段截面積以提高馬達的工作效率。試驗區間的上下游，設置導流板與擾流篩網，用以穩定流況。其中擾流篩網為格子狀箱型結構，並於進出口處包覆不同網目的篩網，預期流體通過時致發渦流，藉由紊流混合達到均勻流場的目的。造流系統以動床模型進行試驗時，當流速偏大，恐會有漂砂從下游外流損失，因此需進一步考量，是否需要於上游側設置添補砂源的機構，以維持試驗區間內的砂量平衡，亦或檢驗上游供砂率變化對於掏蝕現象之影響。

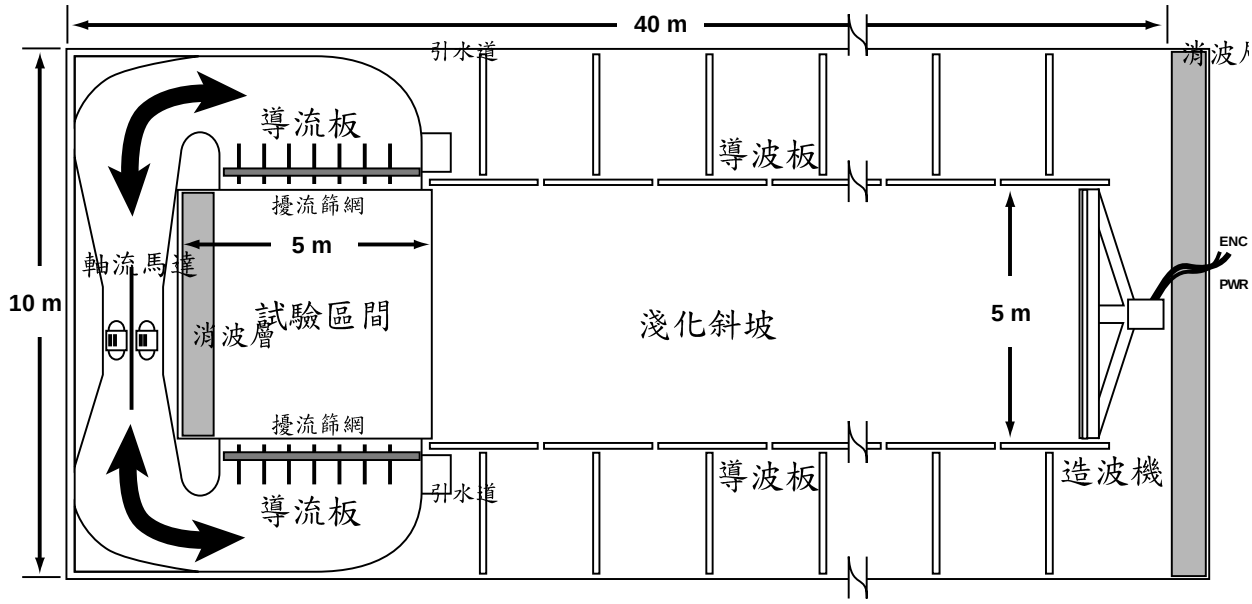


圖 7.7　平面水槽造流系統規劃圖

試驗模型底床規劃佈置如圖 7.7 所示，當外海水深條件為 1m 時，可藉由淺化斜坡引導波浪至防波堤模型佈置區域，該處水深為 0.2 m，換算現場深度可達 20 m。沿岸方向的模型寬度 10 m，造波板寬度 5 m，使用導波板可小角度適當調整入射波浪方向。依照模型長度與時間比尺，換算選定的颱風波浪和季風波浪條件，使用規則波或 JONSWAP 不規則波造波模式在不同的入射波向條件下進行試驗。使用規則波作為入射波浪，可於防波堤模型中觀察不同水深處，波浪衍生流場的變化，進而研判現場受波浪作用的影響量。使用不規則波作為入射波浪，可觀察複合多種波浪作用

下防波堤流場是否產生非線性的增長，在相同位置處與規則波造波之結果相互比較，流速的變化狀態與波場的分佈提供研判的資訊。

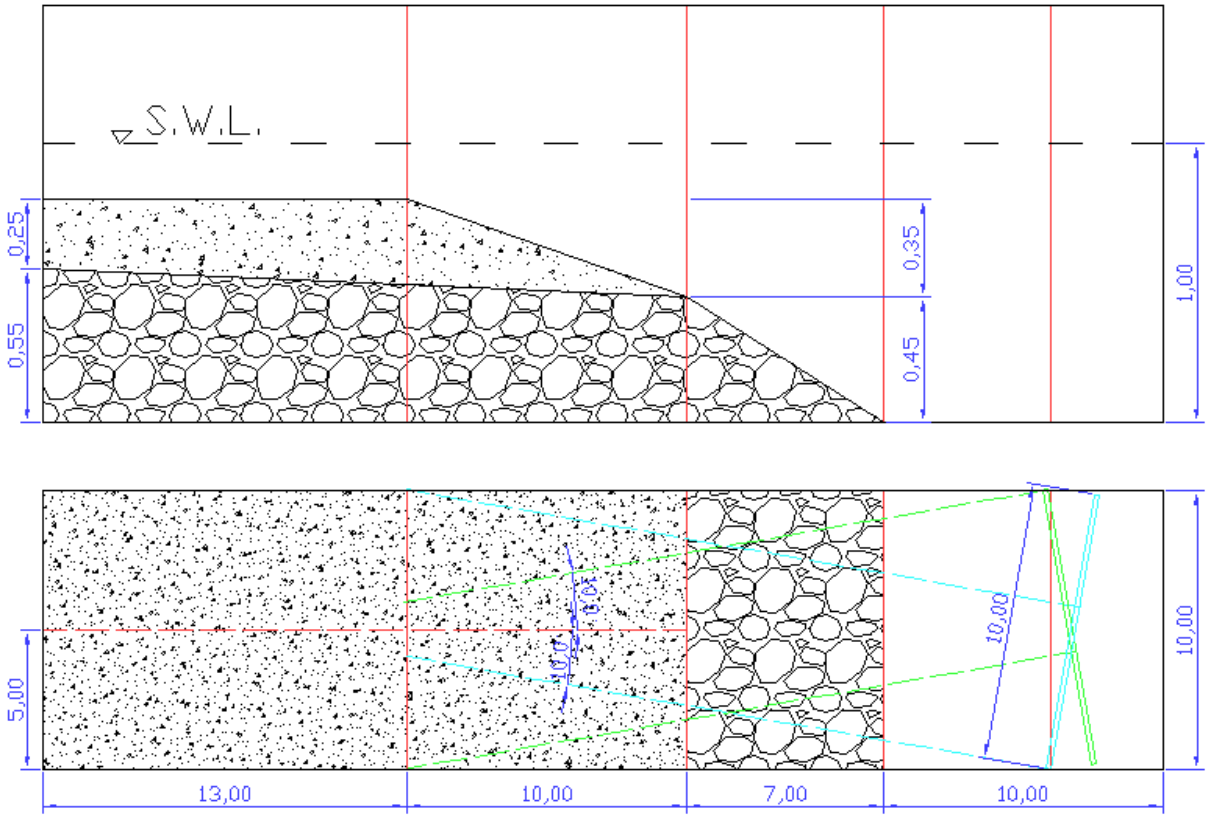


圖 7.8　試驗平面水槽佈置規劃圖

於試驗施行前進一步評估試驗規劃的執行性，如圖 7.8 規格進行水工模型佈置，初步鋪設結果如圖 7.9 所示。底床以中值粒徑 0.14mm 試驗砂鋪設，等深地形換算現場水深為 20m，模型防波堤採用混凝土磚建置，圖 7.9 中防波堤方位與入射波峰線交角 45 度，於現場條件下屬於西方入射波浪的狀態。模型防波堤的佈置相當方便，受惠與此，能夠迅速地改變堤體延伸的方向，配合造波機的擺置方向，試驗可以模擬多組不同波浪入射方向的條件。

圖 7.9　防波堤堤頭水工模型實景

四、試驗量測分析

1. 波浪分佈

於模型之試驗區域內設置波高計，以分析海域之波高分佈。堤頭附近區域為觀測重點區，將加密設置波高計，以利觀察不同入射波浪與防波堤互制下之變形結果。

2. 防波堤堤頭附近流速變化

在試驗區內架設流速計，觀測防波堤堤頭處之流場分佈。探討深水防波堤附近水域，在不同入射波浪與防波堤互制下，觀測波浪所引發之水下流況特性。

3. 防波堤堤頭附近地形變化

傳統的動床水工試驗地形量測使用水線等深繪測、網格點三角交會測量或是以移動載臺配置測距儀、砂面測定儀等方法。在有效提高底床地形

變化解析程度的考量下，規劃導入同步多視角影像測高法，藉由影像處理方法計算防波堤堤頭附近的地形變化。除了能求得精確的地形資料外，更能夠大幅度提昇量測的效率，節省記錄所需的工時。

五、後續試驗規劃

因本實驗室試驗設施的限制，目前無法執行單純造流的試驗環境，或是波流交會條件。然而，本計畫擬定於明年度 (102 年度) 開始執行造波試驗，本研究團隊已積極討論改善研究設備，以盡量符合防波堤堤頭地形沖蝕以潮流為主要驅動力的水工模型試驗。

第八章　結論與建議

波、海流通過海中結構物時，可能在結構物臨近底床造成沖蝕，導致結構的破壞甚或傾倒，如港灣防波堤堤頭附近的海底地形，可能因為波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕。國內的港灣防波堤堤頭侵蝕的實例中，以臺中港及雲林麥寮工業港最為明顯。本年度計畫主要完成(1)臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭海底地形侵蝕現況的量測與分析。(2)臺中港及麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場現場觀測與分析。(3)波場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。(4)流場數值模擬：Flow-3D 的參數率定與驗證，地形與結構物等邊界構件的更新。(5)水工模型試驗的規劃等項目。

依本研究指出臺中港與麥寮港防波堤鄰近海域的地形侵於狀態，隨著防波堤長度延伸、海潮流作用與上游河川砂源補注而有明顯的變化。臺中港與麥寮港海域流況明顯大於臺灣其他港域 (波浪並無此現象)，致此二港區堤址水深雖達負 20 公尺以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。

8.1 結論

1. 海域地形測量結果：本年度測量麥寮工業港西防波堤堤頭附近地形，係以多音束測深儀進行測量，堤頭附近之護基消波塊成像相當明顯，距離堤頭約 90m ~ 150m 以及 160m ~ 230m 兩處隆起地形，可能是民國 94 年拋放於西防波堤堤頭前之地工砂袋。西防波堤北側區域所測得水深最淺處約為 -4m，堤頭向外海西方延伸約 170m 處，測得水深最深處約 -44m。堤頭西方約 180m 處亦有明顯刷深洞，最深處約 -37m。等深線於堤身北側港域外大致呈現垂直海堤方向分布，堤身南側港域內則以平行海堤方向分布為主，堤頭附近則形成輻射狀之等深線分布。西防波堤北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深則較深，防波堤內、外之海域地形高低差約可達 8 ~ 10m。臺中港海域北防波堤堤頭附近地形，係以單音束測深系統進行水深測量，消波塊群成像並不明顯，但可由水深色階圖之分布，約略看出堤頭南側附近之消波塊群分布。去年與今年度結果相比，堤頭西南方明顯淤積，最大高度達 7m，全測區總淤積約 465,058m^3，平均淤積高程約為

34cm。。臺中港本年度測量北堤區域測得水深最淺約為 -7.4m，堤頭附近沖刷最深處水深約 -39m，等深線於堤身附近大致呈現垂直海堤方向分布，沖刷最深處位於堤頭向外海延伸方向約 140m 處。北堤堤外北側海域淤積現象明顯，堤內港域水深較深，海堤內外之海域地形高低差約可達 3~6m。100 年與本次測量比較下，堤頭北側淤積最大量約 9.7m，總淤積約 775,594m^3，平均淤積高程約為 32cm。

2. 潮汐調查結果：雲林麥寮港使用底碇式都卜勒潮波流儀量測，潮型屬於半日潮型，主要分潮為 M2，次要成份是 S2，觀測期間最大潮差為 4.0m。

3. 海流調查結果：麥寮港測站底層和表層的主要流向皆為 N，逐時流速最大值分別為 106.2cm/s 及 117.6cm/s。將海流分離出潮流與風驅流的成份，頻譜分析顯示麥寮港潮流主頻為 0.08 cph，潮流平均振幅 72cm/s，風驅流平均振幅約為 13~8cm/s。

4. 波浪調查結果：麥寮港測站主要波向 NW、NNW，$H_{1/3}$ 介於 25~75cm 間者佔全體 63%，$T_{1/3}$ 集中於 4~5sec 間。H_{mean}=48.1cm，T_{mean}=4.65sec，H_{max}=1.62m，$T_{對應}$=6.40sec。

5. 堤頭沖蝕特性分析：臺中港自民國 86 年開始 -25m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 90 年時到達最大；民國 90 年至 94 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，亦即沖刷洞又逐漸回淤。然而民國 95 年時，沖刷洞又發生嚴重侵蝕現象。麥寮港自民國 90 年開始 -35m 沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年加大，侵蝕量至民國 96 年時到達最大；民國 96 年至 99 年期間，沖刷洞的沖刷截面積與沖刷體積逐年減小，沖刷洞逐漸回淤。另由 96/04 至 100/09 五年期間麥寮港西防波堤堤頭附近 30 次加密測量之地形資料得知，在夏季期間 (約 4~9 月)，-35m 沖刷洞的面積與體積逐漸加大 (即侵蝕加劇)；而冬季期間 (約 10~3 月)，沖刷洞的面積與體積則逐漸減小 (即逐漸回淤)。

6. 由全年海流統計結果可知，臺中港和麥寮港的海流流速超過一節的發生機率各為 38.8%、36.6%，明顯大於臺灣其他港口 (波浪並無此現象)；而臺中港在 1、7 月份流速超過一節的發生機率更超過 50%，麥寮港則在 6~9 月發生機率均接近 40%。

7. 堤頭附近地形侵蝕原因探討:臺中港與麥寮港防波堤鄰近海域的地形侵淤狀態，隨著防波堤長度延伸、海潮流作用與上游河川砂源補注而有明顯的變化。臺中港與麥寮港海域流況明顯大於臺灣其他港域 (波浪並無此現象)，致此二港區堤址水深雖達-20m 以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。防波堤堤頭附近之漲退潮流速與流向不對稱形成淨流，水流經堤頭後轉向造成速度梯度，此等現象均引起之漂砂不平衡，導致堤頭發生沖刷。由麥寮港現場流況與沖蝕分析得知，夏季主要流況向北，沖刷洞在堤頭北側，但堤頭南側為較深的水域 (如航道)，無漂砂向北補注沖刷洞，以致沖蝕加劇。冬季主要流況向南，沖刷洞在堤頭南側形成，但堤頭北側有來自濁水溪口的沖積沙補注，南向漂砂會逐漸將北側沖刷洞回填。如此週而復始，形成季節性的循環現象。又根據當時麥寮港西防波堤施工紀錄，每年東北季風期必須停工 5~7 個月，當重新開工時都發現堤頭地形大幅刷深現象。興建初期堤頭沖刷已形成，因北側濁水溪口向南的淤沙仍不明顯，無法大量填入堤頭沖刷洞中。西防波堤延伸完成後，北側的淤沙逐漸明顯，在潮流優勢方向為冬季向南、夏季向北的情形下，就形成上述麥寮港西防波堤堤頭附近季節性的變化。此等現象反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，主要是海潮流所致。

8. 因堤頭沖刷洞會受到來自上游河川輸砂的影響，或是港口航道疏浚行為影響潮流流場，此等現象都增加本計畫區堤頭沖蝕分析的困難度，後續仍需藉由數值模擬與水工模型試驗更深入分析探討。

9. 數值模擬部分 (平面流況)：本研究以 Flow-3D 模組進行堤頭附近之水動力模擬，以 Liu(1984) 半無限長直立堤與孤立波作用之實驗資料進行驗證。並分別使用邊界潮位驅動潮流模擬研究區域內的流場，以及採用設計條件的颱風波浪 (波高 6m、週期 12sec)，模擬從不同入射波向的波場與底床水分子速度分佈。漲潮時，自西防波堤堤頭向北形成流速 1.25m/sec 帶狀流場，高潮位時流速迅速減小，堤頭北側的流速仍有 0.5m/sec；退潮時，以堤頭為起點向南延伸成帶狀 1.25m/sec 流場，低潮位時西南側流速趨近於 0.75m/sec。波高 6m、週期 12sec 的颱風波浪，自北方傳入時最大流速發生於堤頭北端點，流速為 3.63m/sec。自西方傳入時有最大流速 2.15m/sec。當波浪自南方而來，統計最大的流速值達到 3.27m/sec，發生位置同樣位於西防波堤堤頭的北端點。

10.數值模擬部分 (垂直流況)：在堤頭前垂直流況模擬部分，本研究模擬颱風波浪 (波高 6m、週期 12sec、北向) 通過西防波堤堤頭的流況垂直分佈。結果顯示，北向入射波場的水分子速度分佈，當模擬時間在 108sec 以後，緊鄰堤頭處可發現水分子速度最大可達 4m/sec，評估此波浪條件下所引發的流場，可造成堤頭底床相當程度的影響。而堤頭的下游面，受到結構物的遮蔽，垂直流場則仍有 1m/sec 左右、運動方向向上的流動。

8.2 建議

1. 堤頭附近的潮波流觀測，基於執行經費與儀器保全的綜合考量下，目前仍無法將觀測儀器緊鄰於堤頭處佈放。建議後續能提高現場潮波流觀測的經費或與貴中心以合作的方式，增加堤頭觀測點佈設，增進本計畫防波堤堤頭處之流況分析與沖蝕特性研究之準確性。

2. 模式建置與測試部分：經由分別模擬潮流、波場、波浪引發的流場，至今對堤頭近域的流體水動力狀態已有初步認識。後續的數值模擬，將朝向波流交互作用與漂砂動床試驗等課題持續測試，幫助釐清與理解堤頭沖蝕的機制與變化。

3. 深水域的結構物，在颱風波浪與強勁海流作用下對堤前海床之淘刷影響幅度，因其條件特殊，仍屬尚未深入探討的領域。須藉由數值模擬與水工模型試驗結果深入分析，諸如入射波浪條件、海床水深、波浪衝擊防波堤所引發下刷的水流、波流交互作用、堤前淘刷幅度等變量的關係性，甚至尋找經驗式或特徵參數。

參考文獻

1 .湯麟武 (1970),「淺灘海岸上波浪推算方法之研究」,成功大學土木水利學術彙刊，第 1 期，第 105~164 頁。

2. 井島武士 (1972),「台中港設計波浪計算報告書」,日本港灣顧問公司。

3. 李兆芳 (1979),「堤腳沖刷理論與試驗之研究」,*國立成功大學水利暨海洋工程學系碩士論文*。

4. 梁乃匡 (1982),「颱風湧浪的預報方法」,第 6 屆海洋工程研討會論文集，第 5-1~5-19 頁。

5. 林銘崇、盧衍琪、梁乃匡、吳啟東 (1984),「短峰波對防波堤基礎沖刷影響之研究」,第七屆海洋工程研討會論文集，pp44-1~44-21。

6. 王啟銘 (1990),「人工魚礁配置之基礎研究」,*國立臺灣海洋大學漁業研究所碩士論文*。

7. 田文敏 (1994),「由大地工程觀點探討人工魚礁的掩埋機制」,*第十六屆海洋工程研討會論文集*，高雄，D-79。

8. 涂盛文、邱惠萍 (1994),「海堤最佳面坡之二維試驗研究」,第十六屆海洋工程研討會論文集，C-17~C-30。

9. 賴昱彰 (1994),「變量流況下橋墩局部沖刷之研究」,*私立逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文*。

10.曾明性 (1994),「橋墩周圍流場與底床沖刷之模擬研究」,*國立台灣大學土木工程學研究所博士論文*。

11.謝惠民 (1996),「網路型河川擬似二維沖淤行為之數值模擬」,*國立台灣大學土木工程學研究所博士論文*。

12.詹森、黃煌煇、張璠 (1997),「台西近海流況特性與海流推測模式之建立」,*第十九屆海洋工程研討會論文集*，台中，pp.423-430。

13.成大水工試驗所 (1997),「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分

析」，第一部份第二冊海流調查，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 202 號*，經濟部工業局主辦。

14.林呈、顏光輝、陳謹偉、黃文彥 (1998)，「人工魚礁周邊之流場特性與沖刷機制之實驗研究」，*第二十屆海洋工程研討會論文集*，基隆，pp.305-312。

15.張文鎰 (1998)，「橋墩沖刷模式之改良與驗證」，*國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文*。

16.成大水工試驗所 (1999)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析」，摘要，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 226 號*，經濟部工業局主辦。

17.劉景毅、洪逸銘、許明雄、高瑞琪 (1999)，「麥寮工業區專用港西防波堤 III 流況預測與地形變化原因探討分析」，*國立成功大學水工試驗所研究試驗報告第 224 號*。

18.賴明賢 (2000)，「台灣西南海域人工魚礁礁體工程行為分析」，*國立中山大學海洋環境及工程研究所碩士論文*。

19.劉景毅、黃煌煇 (2000)，「直立防波堤前海流造成之底床沖刷預測」，*第二屆國際海洋大氣會議論文彙編*，第 331-336 頁。

20.交通部運輸研究所 (2001~2009)，「港灣海氣地象觀測資料年報」，2000～2008 年度。

21.王建忠 (2002)，「多重網格法於河口沖淤模式之數值模擬」，*國立中興大學土木工程學系碩士論文*。

22.朱志誠、杜振宗、廖學瑞 (2002)，「防波堤堤頭刷深現象之分析探討」，*第二十四屆海洋工程研討會論文集*，pp.219-231。

23.張文鎰 (2002)，「圓形橋墩局部沖刷之模擬與試驗驗證」，*國立臺灣大學土木工程學研究所博士論文*。

24.黃俊維 (2002)，「不規則波作用下海堤堤趾沖淤特性之初步研究」，*國立成功大學水利及海洋工程學系碩博士班論文*。

25.成大水工試驗所 (2002a)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查

分析」，第二部份數值模擬第二冊工業區開發期間海岸地形變化數值模擬，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 287 號*。

26.成大水工試驗所 (2002b)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析」，第一部份第一冊波浪調查，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 287 號*，經濟部工業局主辦。

27.劉景毅 (2003)，「直立防波堤前海流導致底床沖刷之數值模擬」，*海洋工程學刊*，第 3 卷，第 1 期，第 15-33 頁。

28.許泰文、黃清哲、藍元志、蔡金晏、曾以帆、謝志敏、林俊遠 (2003)，「防波堤堤前沖刷問題數值模擬研究」，財團法人中華顧問工程司主辦，中華民國 92 年 12 月。

29.林宏仁、許泰文、曾以帆 (2003)，「外傘頂洲海岸變遷機制之研究」，第二十五屆海洋工程研討會，第 735 頁-742 頁。

30.成大水工試驗所 (2007)，「雲林離島式基礎工業區整體環境資源管理評估－96 年度(第 16 年)－(96 年 1 月～96 年 12 月)」第 1 部份第 1 冊波浪調查、海流調查、潮汐調查，經濟部工業局主辦。

31.成大水工試驗所 (2008)，「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析」，*國立成功大學水工試驗所研究報告第 422 號*，經濟部工業局主辦。

32.財團法人成大水利海洋研究發展文教基金會 (2009)，「麥寮附近沿岸漂沙運動調查計畫 (期中報告)」，中華民國 98 年 11 月。

33.賴堅戊 (2009)，「波浪於粗粒徑斜坡底床傳遞之試驗與數值研究」，*國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文*。

34.陳海鋒 (2009)，「波浪作用下的三維海床回應及液化分析」，*天津大學建築工程學院碩士論文*。

35.中興工程顧問公司 (2010)，「雲林海岸環境營造改善及海堤改善可行性檢討」，經濟部水利署第五河川局主辦，中華民國 99 年 4 月。

36.中興工程顧問公司 (2010)，「麥寮港西堤堤頭沖刷暨航道淤積海域地形變遷研究」，麥寮工業區專用港管理公司主辦，中華民國 99 年 2 月。

37.成大水工試驗所、中興工程顧問公司 (2010),「雲林縣離島式基礎工業區整體開發規劃調查分析－第十年(摘要)」,*國立成功大學水工試驗所研究試驗報告第 261 號*,經濟部工業局主辦,中華民國 90 年 12 月。

38.成大水工試驗所、中興工程顧問公司 (2010),「雲林離島式基礎工業區開發計畫施工期間環境監測九十九年度第一季報告」,經濟部工業局主辦,中華民國 99 年 4 月。

39.蔡立宏、溫志中、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋 (2010),「近岸漂沙機制與防治研究 (1/4)」,交通部運輸研究所主辦,中華民國 99 年 4 月。

40.賴志峰、江文山、葉柏志 (2010),「雲林海岸長期海象環境變化分析」,*海岸開發行為經濟與環保並重-- 雲林離島式基礎工業區環境監測成果研討會論文集*,成大水工試驗所主辦,中華民國 99 年 10 月。

41.蔡立宏、徐如娟 (2011),「臺灣近岸港域地形變遷與環境調查研究 (2/4)」,交通部運輸研究所主辦,中華民國 100 年 1 月。

42.侯逸瑞、莊世璿、岳景雲 (2011),「應用 FLOW-3D 模擬港內水面波動之研究」,*第 33 屆海洋工程研討會論文集*,高雄,pp.335-340。

43.馬煒倫 (2011),「潛堤與海堤間波流場特性之數值模擬」,*國立中興大學土木工程學系碩士論文*。

44.陳信宏、楊瑞源、黃煌煇、尤上林、張欽森、郭少谷、呂介斌、陳國隆 (2011),「金門跨海大橋橋墩地形沖刷之研究」,*第 33 屆海洋工程研討會論文集*,高雄,pp.359-364。

45.橋本宏、田中茂信、筒井保博 (1987),「緩傾斜堤の局所洗掘と岸沖漂砂への影響」,*第 30 回海岸工學講演會論文集*,pp.249~253。

46.豐島修 (1987),「緩傾斜岸工法」,*第 34 回海岸工學講演會論文集*,pp.447-451。

47.ACHARYA ANU, 2011, *Experimental Study and Numerical Simulation of Flow and Sediment Transport around a Series of Spur Dikes*, Ph.D. thesis, Univ. of Arizona.

48.Arneborg, L., Hansen, E.A., and Juhl, J., 1995, Numerical modeling of local

scour at partially reflective structures, Final Proceedings of the project Rubble-Mound Breakwater Failure Models, MAST Contract No. MAS2-CT92-0047, Vol. 2. Commission of the European Communities, Directorate General for Science, Research and Development.

49. Bagnold, R.A., 1966, An approach to the sediment transport problem from general physics, *Geological Survey Prof. Paper,* 422-I, Washington.

50. Bijker, E.W., 1971, Longshore transport computations, *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division,* Vol. 97, No. WW4.

51. Bretschneider, C.L., 1952, The generation and decay of wind waves in deep water, Transaction American Geophysical Union, Vol. 33, No. 3, pp. 381-389.

52. Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J., 1991, *Scouring*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

53. Burcharth, H.F., Morten Kramer, Alberto Lamberti, and Barbara Zanuttigh, 2006, Structural stability of detached low crested breakwaters, *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 381-394.

54. Chang, H.H., and Hill, J.C., 1976, Computer modeling of erodible flood channels and deltas, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 102, No. HY10, pp. 132-140.

55. Csanady, G.T., 1973, *Turbulence Diffusion in the Environment*, D. Reidel Publ., Boston, 248p.

56. Dentale1 F., G. Donnarumma1, and E. Pugliese Carratelli, Wave Run Up and Reflection on Tridimensional Virtual Breakwater, *Journal of Hydrogeology & Hydrologic Engineerin*g, 2012, 1:1.

57. Eckert, J.W., 1983, Design of toe protection for coastal structures, In Coastal Structures 83. A Specialty Conference on the Design, Construction Maintenance and Performance of Port and Coastal Structures, Proceedings, Arlington, VA. pp. 331-341.

58. Fabio Dentale, E. Pugliese Carratelli, S.D. Russo, and Stefano Mascetti, 2009, Advanced Numerical Simulations on the Interaction between Waves and Rubble Mound Breakwaters, *Journal of the Engineering Association for Offshore and Marine in Italy* (translation from the Italian).

59.Einstein, H.A., 1950, The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flow, *Technical Bulletin,* No. 1026, U. S. Dep. of Agriculture, Washington, D.C..

60.Ettema, R., 1980, Scour at bridge piers, *Rep. No. 216*, Univ. of Auckland, Auckland.

61.Fredsøe, J., and Sumer, B.M., 1997. Scour at the round head of a rubble-mound breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 29, pp. 231-262.

62.Gao, X., and Inouchi, K., 1998, The characteristics of scouring and depositing in front of vertical breakwaters by broken clapotis, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 40, pp. 99-113.

63.Goda, Y., and Suzuki, Y., 1976, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Proceedings of 15th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 828-845.

64.Gokce, T., Sumer, B.M., and Fredsøe J., 1994, Scour around the head of a vertical wall breakwater, *Proc. International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction*, Hydro-Port' 94, Yokosuka, Japan, Vol. 2, pp. 1097-1116.

65.Gislason Kjartan, Jørgen Fredsøe, and B. Mutlu Sumer, 2009, Flow under standing waves: Part 2. Scour and deposition in front of breakwaters, Coastal Engineering, Vol.56,pp. 363-370.

66.Hales, L.Z., 1980, "Erosion control of scour during construction: Report 2. Literature survey of theoretical, experimental and prototype investigations, Technical Report HL-80-3. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

67.Heribich, J.B. and S.C. Ko, 1967, Scour of sand beaches in front of seawall, Proc. 11th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 622-643.

68.Herbich, J.B., 1991, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering,* Vol.2, Gulf Polishing Company, Houston, Texas, Ch. 1 & Ch. 8 & Ch.18.

69.Hirt, C.W. and B.D. Nichols, 1981, Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. J. comput. phys., Vol. 39, pp. 201–225.

70.Horikawa, K., 1988, *Nearshore Dynamics and Coastal Process*, University of

Tokyo Press.

71.Hsu, J.R.C., Y. Tsuchiya, and R. Silvester, 1979, Third-order approximation to short-crested waves, J. Fluid Mech., Vol. 90, part 1, pp. 179-196.

72.Hsu, J.R.C., Silvester, R., and Y. Tsuchiya, 1980, Boundary-layer Velocities and Mass Transport in Short-crested Waves J. Fluid Mech., Vol. 99, pp. 321-342.

73.Irie, I., and Nadaoka, K., 1984, Laboratory reproduction of seabed scour in front of breakwaters, In Proceedings of 19th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vol. 2 pp. 1715-1731, Chap. 116.

74.John W. Miles, 1977, Diffraction of Solitary Waves, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 28.

75.Karim, M.F., and Kenndy, J.F., 1982, IALLUVIAL: A Computer-based Flow and Sediment Routing for Alluvial Streams and Its Application to the Missouri River, *Iowa Institute of Hydraulic Research, Report*, No.250, The University of Iowa, Iowa, USA.

76.Kothyari, U.C., 1989, Scour around bridge piers, *PhD thesis*, Univ. of Roorkee, Roorkee.

77.Kuo Ching-Ton, and Hwung-Hweng Hwung, Study on the scouring of seawall, Proc.16th.Conf. IAHR DELFT, Netherlands, pp17-1~17-10.

78.Lee Kwang-Ho, and Norimi Mizutani, 2008, Experimental study on scour occurring at a vertical impermeable submerged breakwater, *Applied Ocean Research*, Vol.30, pp. 92-99.

79.Lin M., and D.S. Jeng, 2004, A 3-Dmodel for ocean waves over a Columb-damping poroelastic seabed, *Ocean Engineering*, Vol.31, pp. 561–585.

80.Liu L.F., Philip. 1984, Diffraction of Solitary Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, *Ocean Engineering*, Vol.110(2), pp.201-214.

81.Melville, B.W., 1975, Local scour at bridge sites, Report No. 117, Department of Civil Engineering, University of Auckland, New Zealand.

82.Myrhaug Dag, Havard Rue, and Alf Tbrum, 2004, Tentative engineering approach to scour around breakwaters in random waves, *Coastal Engineering*,

Vol.51, pp. 1051-1065.

83.Myrhaug Dag, and Muk Chen Ong, 2009, Random wave-induced scour at the trunk section of a breakwater, *Coastal Engineering*, Vol.56, pp.688-692.

84.Raudkivi A.J., 1991, Scour at bridge piers, *Hydraulic Structures Design Manual*, pp. 61-99.

85.Richardson, J.E., and Panchang, V.G., 1998, Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers, *J. Hydraulic Eng.*, 124(5), pp. 530-540.

86.Rijn, L.C. van, 1984a, Sediment transport, part I: bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.110, No.10, pp. 1431-1456.

87.Rijn, L.C. van, 1984b, Sediment transport, part II: suspended lo ad transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.110, No.11, pp. 1613-1641.

88.Rijn, L.C. van, 1987, Mathematical modeling of Morphological Processes in the Case of Suspended Sediment Transport, *Delft Hydraulics Communication*, No.382.

89.Rijn, L.C. van, 1989, *Handbook Sediment Transport by Currents and Waves*, Delft Hydraulics.

90.Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsoe, J., and Michelsen, J., 1999, 3D mathematical modelling of scour around a circular pile in current, *Proc. 7th Int. Symposium on River Sedimentation and 2nd Int. Symposium on Environmental Hydraulics'98*, Hong Kong.

91.Sato, S. Tanaka, N., and Irie, I., 1968, Study on scouring at the foot of coastal structures, Proceeding of 11th ICCE.pp579-598.

92.Sato, S., and Irie, I., 1968, Variation of topography of sea-bed caused by the construction of breakwaters, *Coastal Engineering* in Japan, Vol. B, pp141-152.

93.Sato, S., Tanaka, N., and Irie, I., 1969, Study on scouring at the foot of coastal structures, *Coastal Engineering* in Japan, Vol. 37, pp. 579-598.

94.Sato, S. and Irie, I., 1970, Variation of topography of sea-bed caused by the construction of breakwaters, Proc. 12th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, V. 2, 1301-1319.

95.Silvester, R., and Hsu, J.R.C., 1993, *Coastal Stabilization*.

96.Sumer, B.M., and Fredsøe, J., 1997, Scour at the head of a vertical-wall breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 29, pp. 201-230.

97.Sumer, B.M., and Fredsøe, J., 2000, Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater, *Coastal Engineering*, Vol. 40, pp. 59-87.

98.Sumer, B.M., Richard J.S. Whitehouse, and Alf Tørum, 2001, Review Scour around coastal structures: a summary of recent research, *Coastal Engineering*, Vol. 44, Issue 2, December 2001, pp. 153-190.

99.Sumer, B.M., Jørgen Fredsøe, Alberto Lamberti, Barbara Zanuttigh, Martin Dixen, Kjartan Gislason, and Antonio F. Di Penta, 2005, Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures, *Coastal Engineering*, Vol.52, pp. 995-1025.

100.Teisson, C., 1992, Cohesive suspended sediment transport: feasibility and limitations of numerical modeling, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.29, No.6.

101.Tsai Ching-Piao, Jiann-Shyang Wang, and Chang Lin, 1998, Downrush flow from waves on sloping seawalls, *Ocean Engng*,Vol.25Nos4-5,pp.295-308.

102.Xie, S.L., 1981, *Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influence on the stability of the foundations of the breakwaters Report*, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, pp. 61.

103.Yang, C.T., 1984, Unit stream power equation for gravel, *Journal of the Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.12, pp. 1679-1704.

附錄一　年度現場觀測記錄情形

1. 潮位觀測記錄表

潮位觀測記錄表

工作名稱: 港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究(1/4)								
觀測日期: 101/05/07			天候狀況: 晴			觀測人員: 劉黃宗隆		
觀測地點: 台中港			自動驗潮儀:壓力式潮位計			檔案名稱: 20120507TaiChung		
感測器施放深度(m): 6.193			驗潮站高程(m): 3.243			高程系統: 基隆中潮系統		
時間	觀測值(m)	水位高(m)	時間	觀測值(m)	水位高(m)	時間	觀測值(m)	水位高(m)
7:36	2.383	-0.567	11:08	5.639	2.689	14:40	2.921	-0.029
7:38	2.426	-0.524	11:10	5.638	2.688	14:42	2.862	-0.088
7:40	2.453	-0.497	11:12	5.626	2.676	14:44	2.805	-0.145
7:42	2.483	-0.467	11:14	5.619	2.669	14:46	2.777	-0.173
7:44	2.503	-0.447	11:16	5.624	2.674	14:48	2.748	-0.202
7:46	2.529	-0.421	11:18	5.647	2.697	14:50	2.709	-0.241
7:48	2.550	-0.400	11:20	5.653	2.703	14:52	2.662	-0.288
7:50	2.585	-0.365	11:22	5.640	2.690	14:54	2.600	-0.350
7:52	2.617	-0.333	11:24	5.610	2.660	14:56	2.529	-0.421
7:54	2.650	-0.300	11:26	5.594	2.644	14:58	2.468	-0.482
7:56	2.685	-0.265	11:28	5.605	2.655	15:00	2.424	-0.526
7:58	2.737	-0.213	11:30	5.621	2.671	15:02	2.416	-0.534
8:00	2.778	-0.172	11:32	5.635	2.685	15:04	2.369	-0.581
8:02	2.835	-0.115	11:34	5.629	2.679	15:06	2.324	-0.626
8:04	2.875	-0.075	11:36	5.614	2.664	15:08	2.261	-0.689
8:06	2.923	-0.027	11:38	5.603	2.653	15:10	2.219	-0.731
8:08	2.958	0.008	11:40	5.591	2.641	15:12	2.166	-0.784
8:10	2.992	0.042	11:42	5.584	2.634	15:14	2.132	-0.818
8:12	3.018	0.068	11:44	5.582	2.632	15:16	2.100	-0.850
8:14	3.050	0.100	11:46	5.572	2.622	15:18	2.066	-0.884
8:16	3.079	0.129	11:48	5.551	2.601	15:20	2.027	-0.923
8:18	3.139	0.189	11:50	5.537	2.587	15:22	1.976	-0.974
8:20	3.169	0.219	11:52	5.518	2.568	15:24	1.921	-1.029
8:22	3.213	0.263	11:54	5.517	2.567	15:26	1.869	-1.081
8:24	3.250	0.300	11:56	5.532	2.582	15:28	1.820	-1.130
8:26	3.294	0.344	11:58	5.523	2.573	15:30	1.783	-1.167
8:28	3.338	0.388	12:00	5.498	2.548	15:32	1.750	-1.200
8:30	3.396	0.446	12:02	5.470	2.520	15:34	1.717	-1.233
8:32	3.447	0.497	12:04	5.451	2.501	15:36	1.691	-1.259
8:34	3.490	0.540	12:06	5.449	2.499	15:38	1.649	-1.301
8:36	3.512	0.562	12:08	5.440	2.490	15:40	1.602	-1.348
8:38	3.542	0.592	12:10	5.423	2.473	15:42	1.556	-1.394
8:40	3.575	0.625	12:12	5.392	2.442	15:44	1.511	-1.439
8:42	3.623	0.673	12:14	5.364	2.414	15:46	1.476	-1.474
8:44	3.673	0.723	12:16	5.355	2.405	15:48	1.445	-1.505
8:46	3.714	0.764	12:18	5.354	2.404	15:50	1.416	-1.534
8:48	3.757	0.807	12:20	5.343	2.393	15:52	1.383	-1.567
8:50	3.785	0.835	12:22	5.320	2.370	15:54	1.338	-1.612
8:52	3.823	0.873	12:24	5.284	2.334	15:56	1.297	-1.653
8:54	3.860	0.910	12:26	5.263	2.313	15:58	1.245	-1.705
8:56	3.905	0.955	12:28	5.239	2.289	16:00	1.203	-1.747
8:58	3.946	0.996	12:30	5.231	2.281	16:02	1.169	-1.781
9:00	3.984	1.034	12:32	5.209	2.259	16:04	1.145	-1.805
9:02	4.017	1.067	12:34	5.177	2.227	16:06	1.120	-1.830
9:04	4.045	1.095	12:36	5.150	2.200	16:08	1.092	-1.858
9:06	4.087	1.137	12:38	5.128	2.178	16:10	1.062	-1.888
9:08	4.128	1.178	12:40	5.111	2.161	16:12	1.013	-1.937
9:10	4.165	1.215	12:42	5.095	2.145	16:14	0.990	-1.960
9:12	4.206	1.256	12:44	5.075	2.125	16:16	0.946	-2.004
9:14	4.249	1.299	12:46	5.045	2.095	16:18	0.929	-2.021
9:16	4.290	1.340	12:48	5.002	2.052	16:20	0.884	-2.066

9:18	4.326	1.376	12:50	4.965	2.015	16:22	0.860	-2.090
9:20	4.355	1.405	12:52	4.946	1.996	16:24	0.842	-2.108
9:22	4.388	1.438	12:54	4.928	1.978	16:26	0.813	-2.137
9:24	4.418	1.468	12:56	4.905	1.955	16:28	0.778	-2.172
9:26	4.453	1.503	12:58	4.870	1.920	16:30	0.741	-2.209
9:28	4.500	1.550	13:00	4.831	1.881	16:32	0.705	-2.245
9:30	4.541	1.591	13:02	4.805	1.855	16:34	0.679	-2.271
9:32	4.578	1.628	13:04	4.788	1.838	16:36	0.656	-2.294
9:34	4.607	1.657	13:06	4.771	1.821	16:38	0.638	-2.312
9:36	4.643	1.693	13:08	4.743	1.793	16:40	0.632	-2.318
9:38	4.695	1.745	13:10	4.710	1.760	16:42	0.613	-2.337
9:40	4.742	1.792	13:12	4.669	1.719	16:44	0.592	-2.358
9:42	4.767	1.817	13:14	4.622	1.672	16:46	0.565	-2.385
9:44	4.786	1.836	13:16	4.583	1.633	16:48	0.532	-2.418
9:46	4.809	1.859	13:18	4.562	1.612	16:50	0.539	-2.411
9:48	4.840	1.890	13:20	4.540	1.590	16:52	0.514	-2.436
9:50	4.875	1.925	13:22	4.507	1.557	16:54	0.476	-2.474
9:52	4.910	1.960	13:24	4.467	1.517	16:56	0.458	-2.492
9:54	4.943	1.993	13:26	4.427	1.477	16:58	0.439	-2.511
9:56	4.965	2.015	13:28	4.392	1.442	17:00	0.426	-2.524
9:58	4.990	2.040	13:30	4.361	1.411	17:02	0.413	-2.537
10:00	5.026	2.076	13:32	4.335	1.385	17:04	0.392	-2.558
10:02	5.070	2.120	13:34	4.302	1.352	17:06	0.390	-2.560
10:04	5.102	2.152	13:36	4.261	1.311	17:08	0.364	-2.586
10:06	5.125	2.175	13:38	4.214	1.264	17:10	0.341	-2.609
10:08	5.146	2.196	13:40	4.171	1.221	17:12	0.348	-2.602
10:10	5.167	2.217	13:42	4.129	1.179	17:14	0.332	-2.618
10:12	5.184	2.234	13:44	4.095	1.145	17:16	0.330	-2.620
10:14	5.199	2.249	13:46	4.060	1.110	17:18	0.316	-2.634
10:16	5.226	2.276	13:48	4.024	1.074	17:20	0.314	-2.636
10:18	5.246	2.296	13:50	3.987	1.037	17:22	0.309	-2.641
10:20	5.270	2.320	13:52	3.949	0.999	17:24	0.288	-2.662
10:22	5.302	2.352	13:54	3.902	0.952	17:26	0.273	-2.677
10:24	5.331	2.381	13:56	3.862	0.912	17:28	0.261	-2.689
10:26	5.364	2.414	13:58	3.820	0.870	17:30	0.248	-2.702
10:28	5.381	2.431	14:00	3.777	0.827	17:32	0.243	-2.707
10:30	5.393	2.443	14:02	3.734	0.784	17:34	0.242	-2.708
10:32	5.410	2.460	14:04	3.694	0.744	17:36	0.242	-2.708
10:34	5.427	2.477	14:06	3.653	0.703	17:38	0.257	-2.693
10:36	5.441	2.491	14:08	3.611	0.661	17:40	0.254	-2.696
10:38	5.453	2.503	14:10	3.569	0.619	17:42	0.258	-2.692
10:40	5.464	2.514	14:12	3.526	0.576	17:44	0.251	-2.699
10:42	5.487	2.537	14:14	3.483	0.533	17:46	0.249	-2.701
10:44	5.497	2.547	14:16	3.455	0.505	17:48	0.250	-2.700
10:46	5.508	2.558	14:18	3.408	0.458	17:50	0.244	-2.706
10:48	5.533	2.583	14:20	3.357	0.407	17:52	0.249	-2.701
10:50	5.574	2.624	14:22	3.329	0.379	17:54	0.253	-2.697
10:52	5.589	2.639	14:24	3.295	0.345	17:56	0.261	-2.689
10:54	5.577	2.627	14:26	3.248	0.298	17:58	0.267	-2.683
10:56	5.582	2.632	14:28	3.183	0.233	18:00	0.265	-2.685
10:58	5.600	2.650	14:30	3.126	0.176	18:02	0.268	-2.682
11:00	5.607	2.657	14:32	3.088	0.138	18:04	0.266	-2.684
11:02	5.580	2.630	14:34	3.056	0.106	18:06	0.271	-2.679
11:04	5.575	2.625	14:36	3.017	0.067	18:08	0.277	-2.673
11:06	5.610	2.660	14:38	2.979	0.029	18:10	0.289	-2.661
記錄： 劉黃宗隆					校核： 莊曜陽			

潮位觀測記錄表

工作名稱: 港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究(2/4)								
觀測日期: 101/05/08			天候狀況: 晴			觀測人員: 王聖瀚		
觀測地點: 麥寮港			自動驗潮儀:壓力式潮位計			檔案名稱: 20120508MaiLiao		
感測器施放深度(m): 8.263			驗潮站高程(m): 3.09			高程系統: 基隆中潮系統		
時間	觀測值(m)	水位高(m)	時間	觀測值(m)	水位高(m)	時間	觀測值(m)	水位高(m)
8:00	4.586	-0.587	9:22	5.508	0.335	10:44	6.493	1.320
8:02	4.612	-0.561	9:24	5.548	0.375	10:46	6.516	1.343
8:04	4.632	-0.541	9:26	5.572	0.399	10:48	6.538	1.365
8:06	4.659	-0.514	9:28	5.594	0.421	10:50	6.551	1.378
8:08	4.679	-0.494	9:30	5.621	0.448	10:52	6.564	1.391
8:10	4.687	-0.486	9:32	5.652	0.479	10:54	6.584	1.411
8:12	4.706	-0.467	9:34	5.668	0.495	10:56	6.614	1.441
8:14	4.729	-0.444	9:36	5.693	0.520	10:58	6.631	1.458
8:16	4.738	-0.435	9:38	5.724	0.551	11:00	6.657	1.484
8:18	4.754	-0.419	9:40	5.745	0.572	11:02	6.684	1.511
8:20	4.775	-0.398	9:42	5.769	0.596	11:04	6.710	1.537
8:22	4.803	-0.370	9:44	5.797	0.624	11:06	6.728	1.555
8:24	4.826	-0.347	9:46	5.829	0.656	11:08	6.749	1.576
8:26	4.842	-0.331	9:48	5.853	0.680	11:10	6.769	1.596
8:28	4.870	-0.303	9:50	5.873	0.700	11:12	6.777	1.604
8:30	4.906	-0.267	9:52	5.898	0.725	11:14	6.786	1.613
8:32	4.927	-0.246	9:54	5.931	0.758	11:16	6.789	1.616
8:34	4.956	-0.217	9:56	5.966	0.793	11:18	6.798	1.625
8:36	4.984	-0.189	9:58	5.984	0.811	11:20	6.814	1.641
8:38	5.004	-0.169	10:00	6.014	0.841	11:22	6.821	1.648
8:40	5.020	-0.153	10:02	6.048	0.875	11:24	6.834	1.661
8:42	5.036	-0.137	10:04	6.066	0.893	11:26	6.856	1.683
8:44	5.063	-0.110	10:06	6.085	0.912	11:28	6.869	1.696
8:46	5.086	-0.087	10:08	6.107	0.934	11:30	6.886	1.713
8:48	5.099	-0.074	10:10	6.130	0.957	11:32	6.897	1.724
8:50	5.125	-0.048	10:12	6.153	0.980	11:34	6.917	1.744
8:52	5.148	-0.025	10:14	6.172	0.999	11:36	6.921	1.748
8:54	5.176	0.003	10:16	6.201	1.028	11:38	6.925	1.752
8:56	5.208	0.035	10:18	6.230	1.057	11:40	6.931	1.758
8:58	5.237	0.064	10:20	6.253	1.080	11:42	6.932	1.759
9:00	5.265	0.092	10:22	6.269	1.096	11:44	6.931	1.758
9:02	5.299	0.126	10:24	6.296	1.123	11:46	6.935	1.762
9:04	5.307	0.134	10:26	6.322	1.149	11:48	6.940	1.767
9:06	5.333	0.160	10:28	6.339	1.166	11:50	6.941	1.768
9:08	5.364	0.191	10:30	6.361	1.188	11:52	6.946	1.773
9:10	5.375	0.202	10:32	6.379	1.206	11:54	6.960	1.787
9:12	5.402	0.229	10:34	6.398	1.225	11:56	6.960	1.787
9:14	5.422	0.249	10:36	6.405	1.232	11:58	6.965	1.792
9:16	5.439	0.266	10:38	6.426	1.253	12:00	6.965	1.792
9:18	5.462	0.289	10:40	6.453	1.280			
9:20	5.479	0.306	10:42	6.477	1.304			
記錄: 王聖瀚					校核: 莊曜陽			

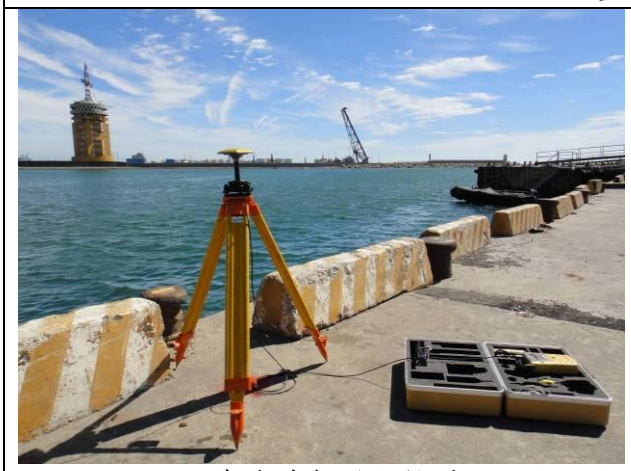
2. 聲速剖面記錄表

聲速剖面記錄表

量測日期:	2012/05/07	量測日期:	2012/05/08
量測時間:	16:28:02 PM	量測時間:	12:28:21
量測儀器:	Sea-Bird SBE19	量測儀器:	Sea-Bird SBE19
量測人員	莊曜陽	量測人員	吳泓毅
水深 (m)	**聲速 (m/sec)**	**水深 (m)**	**聲速 (m/sec)**
0.029	1539.01	0.500	1540.80
0.505	1538.86	1.000	1540.70
1.034	1538.11	1.500	1540.70
1.503	1538.14	2.000	1540.70
2.015	1538.14	2.500	1540.70
2.514	1538.22	3.000	1540.60
2.703	1538.31	3.500	1540.50
3.332	1538.18	4.000	1540.50
3.797	1537.80	4.500	1540.40
4.262	1537.92	5.000	1540.40
4.727	1537.56	5.500	1540.40
5.192	1537.44	6.000	1540.40
		6.500	1540.30
		7.000	1540.30
		7.500	1540.40
		8.000	1540.40
		8.500	1540.40
		9.000	1540.40
		9.500	1540.40
		10.000	1540.40
		10.500	1540.40
		11.000	1540.40
		11.500	1540.40
		12.000	1540.40
		12.500	1540.40
		13.000	1540.40
		13.500	1540.40
		14.000	1540.40
		14.500	1540.40
		15.000	1540.40
		15.500	1540.50
		16.000	1540.50
		16.500	1540.50
		17.000	1540.50
平均聲速：	**1538.14**	**平均聲速：**	**1540.46**

3.臺中港與麥寮港水深測量作業與海流儀施放相關照片

<table>
<tr>
<td>
100/5/31 於梧棲港灣技術研究中心之一等一級水準點為控制點 K400 進行水準與定位測量</td>
<td>

「港研技術研究中心」K400 水準點</td>
</tr>
<tr>
<td> 
100/5/31 於梧棲漁港鄰近安檢鎖碼頭側進行潮位站之引測</td>
<td>
單音束測深系統水深測量儀器架設</td>
</tr>
<tr>
<td>

於水深測量時進行聲速剖面資料收集</td>
<td>
100/6/9 麥寮工業港潮位計施放</td>
</tr>
</table>

 麥寮工業港沿北堤方向進行水深測量之情形	 多音束測深系統儀器架設配置與資料收集
 多音束測深儀測量到麥寮工業港堤防堤址之回波影像	 100/6/9 於農田水利會麥寮工作站之一等一級水準點為控制點 G037 進行水準與定位測量
 100/6/9 於麥寮工業港工作船渠碼頭面進行潮位站之引測	 100/6/9 於麥寮工業港進行海流儀佈放作業

 海流儀吊放入海底，再由潛水人員於水底固定	 聲速剖面資料收集

附錄二 報告審查意見處理情形表

1.期中報告審查意見處理情形表

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
(一) 蔡委員清標		
1.期中報告內容充實豐富。	1.感謝委員的肯定。	1.同意合作單位說明
2.波、流計算結果，建議加強與實際資料比較驗證。並據以檢討數值網格之適切性。	2.感謝委員的建議，期末報告將會盡量將模擬結果與實測資料比對驗證之成效。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.波浪數值模擬，防波堤之反射率如何考量？圖 5-15～5-17，入射波高為 6 公尺，但模擬結果水面高程為±5 公尺，結果是否符合所設定的全反射情況。	3.本年度所採用的防波堤數值模型，設定為直立式不透水結構物，沒有佈置消波設施，無計算反射率。為了成果展示之效果，圖 5-15~5-17 中，將水位色階的極限值設定為±5 公尺。在防波堤附近因為波浪與結構體互制之故，水面高程模擬結果在部分區域已超過±5 公尺。	3.同意合作單位說明
4.堤頭地形沖刷究竟是以潮流或波浪為主要驅動力，建議再以相關學理探討之，如 shield 參數等，而模擬區之波浪是否引起下刷水流？對沖刷之影響為何？	4.依現今研究成果顯示，堤頭地形的沖刷現象與海流變化的關係極為密切。期末報告中已加入 Shield 參數的探討。在颱風浪條件下的流況模擬，於結構物附近，可發現較明顯的下刷水流，評估此分量將造成堤基的沖蝕。	4.同意合作單位說明及處理情形
5.英文參考文獻部分，均為 2001 年以前的研究，近岸有關堤頭及堤址之沖刷研究應加強蒐集說明。而文獻與內文應對應。	5.參考文獻資料會儘量更新(現已收集文獻至 2009 年)，並增加文獻的重點內容說明，詳細內容將於期末報告中增補。	5.同意合作單位說明及處理情形
(二) 黃委員國書		
1.圖 4-3 顯示之漲、退潮主要流向似乎與第 2-16 頁所收集 YLCW 漲、退潮流向出入很大，尤其在退潮時，圖 4-3 顯示多為向北流動，與此處一般在退潮時所知之像南流動完全相反。	1.感謝委員的指正，原圖 4-3 中漲、退潮標示有誤，已在期末報告中修正與重新繪製。	1.同意合作單位說明及處理情形

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
2.海流資料每 10 分鐘所紀錄之一筆資料是 10 分鐘平均？擷取頻率為何？表層 1 公尺之流速受波浪之影響程度為何？	2.海流儀器設定每 10 分鐘內有 60 次掃描結果，平均取樣頻率為 0.1Hz。原始資料以儀器廠分析軟體計算平均值，以代表每 10 分鐘的海流資料。本次現場觀測的波高最大值 1.62 公尺，若僅取短時距的資料，海流會受波浪影響，而 10 分鐘平均值可濾除波浪造成的往復性海流，降低波浪造成的影響。	2. 同意合作單位說明及處理情形
3.波場模擬時東防波堤剛好在邊界外，如何於模式中考慮其影響？	3.期中報告階段之波場模擬上，東側邊界條件設定為不透水固定邊界，與現場存在東防波堤的環境特性一致。由模擬結果可發現靠近東側邊界海域因入、反射波的加成效應產生重複波，近似現場的水動力特性。期末報告已將東防波堤放入計算領域內，重新模擬。	3.同意合作單位說明及處理情形
(三) 林委員意楨		
1.本計畫未來將利用數值模式 FLOW-3D，因此如何實測模型實驗之資料，相比對數值模式之網格應有合宜之規劃，希能掌握比對之意義。	1.感謝委員的意見，下年度水工模型試驗會確實參考數值模式模擬結果，進一步探討與規劃試驗的設置與方法，作為比較與驗證的基礎。	1.同意合作單位說明及處理情形
2.雲林地區之地形變化實測資料為何分段展示是不同單位量測？	2.麥寮港地形資料來源包含本計畫施測 (100/5、101/5)、成大水工試驗所之雲嘉海域大範圍測量(80~90 年)以及麥寮工業區專用港管理公司之堤頭區小範圍測量(96/4~100/9)。因地形資料頗多，選擇侵淤變化較多的年份進行分段比較。	2.同意合作單位說明及處理情形

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
3.麥寮地區報導有地層下陷情形，測量資料應酌予考量該因素。	3.感謝委員的建議，本計畫會盡量收集有關麥寮地區地層下陷資料，在測量時列入考量。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.文獻回顧中有關KC數之B已何尺寸來表示？	4.KC 數中的 B 值為防波堤堤體寬度。	4.同意合作單位說明
5.簡報檔內第 49 頁，海流特性能否說明為何07年後海流流速明顯增加的原因？	5.有關 07 年後海流流速明顯增加原因，經查驗原始觀測資料比對，都發生東北季風期間，故與東北季風增強有關。	5.同意合作單位說明及處理情形
6.海流特性分析頗佳但圖形展示應說明清楚。	6.海流特性分析會於期末報告中補上詳細說明。	6.同意合作單位說明及處理情形
(四) 翁委員文凱		
1.資料豐富詳細。	1.感謝委員肯定。	1.同意合作單位說明
2.建議增加說明此兩處堤頭的實際沖刷深度，或討論其是否已達臨界最大沖刷深度。	2.感謝委員的建議，實際沖刷深度以及臨界最大沖刷深度的說明，後續將補述於期末報告中。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.表 6-1 沖刷深度建議以實際沖刷深度來說明。	3.感謝委員的建議，沖刷洞實際(相對)沖刷深度，後續將補述於期末報告中。	3.同意合作單位說明及處理情形
(五) 蘇委員青和		
1.期中報告第 6 章第 6-17 頁第 8 行「……台中港及麥寮港防波堤之堤頭沖蝕之主要原因，應為海潮流……」及 6-19 頁第 8 行之[……主要為潮流所致。]，等甚為具體之重要結論根據為何?是否可排除波浪或其他外力直接或間接之影響?	1.臺中港與麥寮港海域流況明顯大於台灣其他港域，而波浪並無此現象，導致此二港區堤址水深雖達-20m 以上，仍然發生嚴重沖蝕現象，尤其堤頭之處更是明顯。又根據當時麥寮港西防波堤施工紀錄，在東北季風期必須停工 5~7 個月，當重新開工時都發現堤頭地形大幅刷深現象。此等現象反應出二處防波堤之堤頭沖蝕現象，主要是海潮流所致。後續會再透過水工模型試驗解析麥寮海域之波浪、潮流與沖刷洞相關性。	1.同意合作單位說明及處理情形
2.流場影響地形變化主要外力，建	2.感謝委員的建議，將於期末	2.同意合作單位說明

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
議增加說明臺中港及麥寮港附近海流各成份流，包括潮流、風驅流、波浪引起沿岸流及長期平均流等之概略比重及大小，這些為後續數值計算模擬或模型試驗重要資訊。	報告中增加對於海流的成份研析。	及處理情形
3.歷年海域地形變化資料蒐集及分析甚完整，分析內容也甚為重要，除長期季節因素造成之地形變遷外，建議增加作重點颱風前後之侵淤變化，以作為後續模試推算或模型試驗之比對驗證。	3.感謝委員的肯定。後續會盡量依據麥寮港域現有的地形資料，分析颱風前、後之侵淤的變化特性，並增補於期末報告中。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.地形調查分析部份，建議考量臺中港及麥寮港每年是否有作海拋或填砂土等之外在因素。	4.遵照辦理，後續研究會儘量蒐集海拋或填砂土等相關資料，作為判斷的依據。	4.同意合作單位說明及處理情形
5.第6章第3節分析臺中港及麥寮港附近海流特性，發現臺中港12月、1月、6月及7月流速大於50cm/s發生機率特多，而麥寮港全年差異不大，但2008年以後麥寮港發生機率又突然增大，其原因為何？	5.此原因可能因該年實測資料筆數較少而致，在儀器故障期間，資料筆數不足，易造成發生機率偏移平均值的現象。	5.同意合作單位說明及處理情形
(六)簡委員仲璟		
1.依圖 3.23 所示台中港堤頭地形清淤變化呈現持續侵蝕中，其原因為何？北防波堤延長 480 公尺已有近10年，然堤頭水深仍加大中，此對堤頭安全有影響否？	1.圖 3.23 為 100/5~101/5 期間的地形侵淤變化，僅兩次的測量數據尚無法評斷現況是否仍持續侵蝕中。若有明確證據顯示北堤頭水深仍加大中，則此現象會對堤頭的安全造成疑慮，應研擬適當的防護對策。	1.同意合作單位說明及處理情形
2.圖 3.27 之色階圖示請一致以便利於判別。該顯示第 1 次	2.遵照辦理，將於期末報告中予以修正。第1次 (100/6/9)	2.同意合作單位說明及處理情形

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
(100/6/9)與第 2 次(100/5/8)地形水深有差異其原因為何？水深資料格點化處理及測量軌跡點不同是否造成影響？	與第 2 次 (101/5/8)地形水深測量時間已經過 11 個月，由初步分析成果顯示，該處海域的地形變化具有季節性遷移特性，因此兩測次的地形水深有差異，應屬合理。本計畫在麥寮港堤頭區是使用多音束測深儀量測地形，水深測點密度較佳，格點化處理及測量軌跡點不同所造成影響相對較小。	

2.期末報告審查意見處理情形表

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
(一)蔡委員清標		
1.期末報告內容充實豐富。	1.感謝委員的肯定。	1.同意合作單位說明
2.本研究分別模擬潮流及波浪引發之流場，前者流場速度稱流速，而波浪之速度建議稱為水分子速度，避免混淆。而海流未來是否會加入模擬，請進一步於建議中述明。	2.遵照辦理，已於期末報告修正稿中修正用詞。而期末報告中已包含潮流的模擬，請參考第 5-2 節。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.臺中港北防波堤平面圖有誤，請更正。	3.防波堤與港域已分開標示，以避免造成誤解。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.圖 5.8，漲退潮流流況，速度向量太小，不易判讀。而臺中港有實測資料，建議可用以比較驗證。（第五章其他有關之流速向量表示均太小，建議一併改善，並加列向量大小之尺標。）	4.感謝委員的意見。向量符標會盡量調整至易於判讀的大小，並提高圖形的解析度。	4.同意合作單位說明及處理情形
5.本研究並非以孤立波為評估對象，但第 5.3.1 節卻以孤立波為驗證，請進一步說明之。	5.本研究主要在評估波浪與深海結構物之互制現象，因現階段孤立波資料較為完整，故先以之驗證。後續將持續蒐集相關資料，進一步驗證。	5.同意合作單位說明及處理情形
6.圖 5.24~圖 5.29，尺標既為 velocity，則應有正負值，請檢核。	6.感謝委員的指正，圖中尺標為波場底部格點三維水分子速度方均根，說明詳見期末報告第 5-46 頁。	6.同意合作單位說明及處理情形
7.數值模擬，地形為等水深情況，非現場情形，請於文中補充說明。	7.遵照辦理，已於期末報告修正稿中補充說明。	7.同意合作單位說明及處理情形
8.圖 6.2，色階幅度為 10 公尺，但第 6-4 頁說明 87-99 年期間可達 20 公尺，建議使用適當的色階幅度表示。	8.感謝委員的建議。歷年變動深度在 10 公尺以內的區域，佔絕對性的大範圍。為突顯大多數深度變化趨勢範圍，選用色階幅度為 10 公尺。	8.同意合作單位說明及處理情形
9.未來之試驗比尺以 Froude 定律，則使用之砂質將如何決定，籲請注意。	9.感謝委員的意見。現階段試驗模型僅就颱風波浪與海	9.同意合作單位說明及處理情形

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	流條件初步規劃，故使用福祿數相似率評估。後續取得底質調查資料，會進一步考慮碎波可動參數、波浪尖銳度、粒徑波高比等相似率等，並決定漂砂時間比尺、模型歪比等參數。	
(二) 陳教授炫杉 1.參考資料及文獻豐碩，收集及量測現場觀測資料豐碩。	1.感謝委員的肯定。	1.同意合作單位說明及處理情形
2.FLOW 3D 的驗證，如圖 5.10~5.18，不僅要有水位及速度的驗證，而且要有定性及定量的驗證。	2.本研究目前並沒有圖 5.10~5.18 的試驗數據，後續若收集到會進行相關驗證比對。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.圖 5.21~5.22，須要定量的驗證。	3.圖 5.21~5.22 之模型邊界為三維等深底床，現階段的模擬結果尚無法與實測資料進行定性、定量驗證。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.漂沙須慎重考慮，是否可以 Froude Law 來做。	4.感謝委員意見，現在之試驗規劃僅考慮波、流場，而未考慮漂砂。往後的動床試驗規劃將會更審慎地評估。	4.同意合作單位說明
(三) 林委員意楨 1.本計畫在極少經費下能做出這些結果值得肯定。臺中麥寮實測資料頗多有許多機制值得繼續研究。	1.感謝委員的肯定。本團隊會繼續針對堤頭沖蝕機制的解析而努力。	1.同意合作單位說明
2.100 年 5 月與 101 年 5 月地形變化分析，其水深資料應剔除潮水位之影響。	2.水深地形測量皆已經過潮汐水位修正，地形變化分析應無潮水位之影響。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.麥寮港之退潮流向之改變的觀察頗值得肯定與持續關注，有無可能進一步確認是西防波之興建影響所致。	3.由西堤堤頭附近海域可發現較大流場分佈可確認。後續會以實際地形進行模擬，比對大範圍相同水深下的流速值，即可得知是否為西防波堤之影響。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.依實測資料，95 年累積淤量最大，原因可否探討。再者，第 6-10 頁，為何臺中北堤之沖蝕	4.推估可能的原因為，台中海流資料顯示 94 年度流速統計值較於其他年分為大。較	4.同意合作單位說明

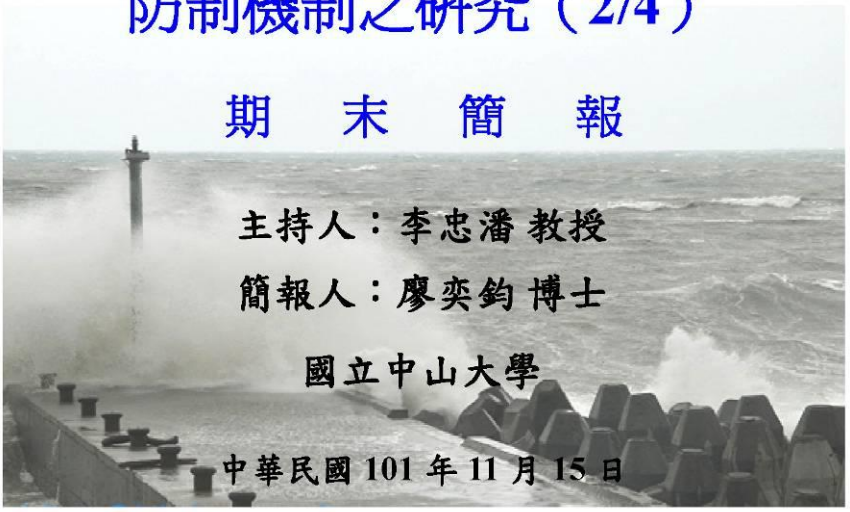
參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
洞 95 年較 94 年反擴大？	大的流速所輸送的砂量較多，亦會造成較大的掏深。經過整年度累積作用，即表現於 95 年的結果。	
5.Flow 3D 沖刷模式中，懸浮質如何算？模式中之經驗公式是使用那個公式，請說明。	5.今年度尚未進行漂砂數值模擬，後續年度會針對 Flow 3D 沖刷模式之相關理論基礎詳細說明。	5.同意合作單位說明
6.逐月之玫瑰圖很好，但請註明 THL1、THL2B 之站址水深應註明。	6.已在期末報告修正稿中增加站址註明。依 2012 資料，THL1 平均水深約 15 公尺，THL2B 水深約 18 公尺。	6.同意合作單位說明及處理情形
7.FLOW3D 模擬與模型實驗之比對及其與實測值之驗證期待能有較佳之結果與說明。	7.將來執行水工模型試驗時，會與數值模擬的結果相互驗證比對。	7.同意合作單位說明及處理情形
(四) 蘇委員青和		
1.第 2 章風、浪、潮及流基本資料蒐集甚為完整，流場直接影響地形變化，圖 2.10~圖 2.12 及表 2.8 顯示臺中港淨流向西南，麥寮港向北，原因為何?建議增加說明包括潮流、風驅流、波浪引起沿岸流及長期平均流等之概略比重，這些為後續數值計算模擬及模型試驗重要資訊。	1.感謝委員的意見。麥寮港測站位於南堤西側，台中港測站則位於北堤堤頭西北側(防波堤向海延伸處)，因麥寮港與台中港海流的主要成分均為潮流，受到防波堤結構邊界的影響，造成麥寮港與台中港的流況明顯呈現地形流，如麥寮港淨流向向北、台中港向西北。另本研究已於期末報告第四章中將海流成分解析為潮流與風驅流。	1.同意合作單位說明及處理情形
2.第 2 章海域地形變化資料蒐集甚完整，圖 2.26 及圖 2.28 分析顯示臺中港堤頭北上方侵蝕，南下方淤積，但麥寮港堤頭北上方淤積，南下方侵蝕，原因為何?	2.由圖 2.34 可看出，台中港位於大甲溪與烏溪之間，受到兩條河川豐沛輸砂補注與潮流往復推送的影響，除了北堤堤頭附近發生侵蝕以外，北堤南北兩側都呈現明顯淤積狀態。由圖 2.23 可看出，麥寮港西堤北側受到濁水溪輸砂補注呈現明顯淤積，南向漂砂甚至越過港	2.同意合作單位說明及處理情形

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
	口堆積於南堤西側 2 公里的範圍內；而港口航道區域因港公司定期濬深，故呈現侵蝕現象。	
3.第 5 章堤頭沖蝕數值模式邊界條件之輸入，包括潮位及波浪，考量海岸及防波堤之地形效應等，計算區域應作必要之擴大。	3.因受網格數與計算效率的影響，後續會朝向二層計算領域進行模擬，即以海域大範圍計算結果當作堤頭區小範圍的計算邊界條件。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.第 5 章堤頭沖蝕特性數值模擬部份，也建議針對簡易配置，作一深入分析。	4.後續年度進行堤頭沖蝕數值模擬時，會盡可能依實際的結構配置予以設置邊界，深入分析模擬。	4.同意合作單位說明及處理情形
5.第 6 章水工模型試驗部份，計算邊界條件是否與數值模式邊界條件作相關之整合，未來如何驗證及比對也需慎重考量。	5.感謝委員的意見，此亦是本團隊進行數值計算與水工模型試驗規劃考量的方向。	5.同意合作單位說明及處理情形
(五)簡委員仲璟		
1.在 8.1 節結論第 7 點，有關每年「東北季風……大幅刷深現象」此點與部分文章內容有關冬季期間逐漸回淤結果矛盾，建議對沖刷洞回淤之原因再作深入探討。	1.感謝委員的建議，麥寮港西防波堤興建初期，堤頭沖刷已形成，但北側的淤沙仍不明顯，無法大量填入堤頭沖刷洞中。西防波堤延伸完成後，北側的淤沙逐漸明顯，在潮流優勢方向為冬向南夏向北的情形下，就形成結論第 7 點所描述的內容。期末報告修正稿會補述探討。	1.同意合作單位說明
2.麥寮港地形量測資料在颱風前後有如莫拉菲、莫拉克等建議增加分析。	2.遵照辦理，討論與分析已增補於期末報告第 6-19 頁。	2.同意合作單位說明及處理情形
3.簡報內臺中港北防波堤延伸歷線圖內 89~91 年再延長北防波堤 450m 與文字不合請修改。	3.感謝委員的指正，正確值為延長 480m，期末報告修正稿會予以修正。	3.同意合作單位說明及處理情形
4.臺中港北防波堤延伸沖刷洞位置隨歷次北防波堤延伸工程也不同，宜再詳細說明。	4.感謝委員的意見，為避免誤導，防波堤與沖刷洞的逐年變化將會特別註明。	4.同意合作單位說明及處理情形

附錄三　期末簡報資料

港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究（2/4）

期　末　簡　報



主持人：李忠潘 教授
簡報人：廖奕鈞 博士
國立中山大學

中華民國 101 年 11 月 15 日

簡　報　大　綱

期中報告審查意見答覆
一、前　言
二、基本資料收集與分析
三、防波堤堤頭地形量測與分析
四、潮波流調查
五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬
六、防波堤堤頭沖蝕特性分析
七、水工模型試驗規劃

1

期中報告審查意見答覆

蔡委員清標：	意見答覆：
1.波浪數值模擬，防波堤之反射率如何考量？入射波高為6公尺，但模擬結果水面高程為±5公尺，結果是否符合全反射情況。	1.模型為直立不透水結構物，無消波設施，雖水位色階繪圖範圍為±5公尺。防波堤附近部分水面高程變動已超過±5公尺。
2.建議探討堤頭沖刷是以流或波為主要驅動力，模擬區波浪是否引起下刷水流？影響為何？	2.研究成果顯示堤頭地形的沖刷與海流變化的關係密切。以颱風浪模擬流況，結構物附近有明顯下刷水流，可能造成堤基的沖蝕。
3.英文參考文獻均為2001年以前的研究，應加強蒐集說明頭及堤址之沖刷研究。	3.參考文獻資料現已收集文獻至2009年。

黃委員國書：	意見答覆：
1.漲、退潮流向似與YLCW資料出入很大，尤其退潮時與此處一般所知之流向完全相反。	1.感謝委員的指正，原圖4-3中漲、退潮標示有誤，已在期末報告中修正與重新繪製。
2.海流一筆資料紀錄是10分鐘平均？擷取頻率為何？表層1公尺流速受波浪影響程度為何？	2.儀器每10分鐘掃描60次，取樣頻率0.1Hz。並以10分鐘平均值濾除波浪的往復性海流。
3.波場模擬時東防波堤剛好在邊界外，如何於模式中考慮其影響？	3.東邊設為不透水固定邊界，與東防波堤特性一致。東邊界的模擬結果，與現場水動力特性相近。期末報告已將東防波堤放入計算領域內，重新模擬。

期中報告審查意見答覆

林委員意楨：	意見答覆：
1. 模型實驗應合宜規劃，比對數值模式之網格希能掌握比對之意義。	1.模型試驗會確實參考數值模式模擬結果，作為比較與驗證的基礎。
2.雲林地區之地形變化實測資料為何分段展示是不同單位量測？	2.因地形資料頗多，選擇侵淤變化較多的年份進行分段比較。
3.麥寮地區報導有地層下陷情形，測量資料應酌予考量該因素。	3.會盡量收集有關麥寮地區地層下陷資料，在測量時列入考量。
4.簡報檔內第49頁，海流特性能否說明為何07年後海流流速明顯增加的原因？	4.海流流速明顯增加原因，經查驗原始觀測資料比對，都發生東北季風期間，故與東北季風增強有關。
5.海流特性分析圖形展示應說明清楚。	5.已於期末報告中補上詳細說明。

翁委員文凱：	意見答覆：
1.建議增加說明此兩處堤頭的實際沖刷深度，或討論其是否已達臨界最大沖刷深度。	1.實際沖刷深度以及臨界最大沖刷深度的說明，後續將補述於期末報告中。
2.表6-1沖刷深度建議以實際沖刷深度來說明。	2.沖刷洞實際(相對)沖刷深度，已補述於期末報告中。

期中報告審查意見答覆

蘇委員青和： 1.期中報告第6-17頁第8行及6-19頁第8行，之根據為何? 可否排除波浪或其他外力之影響? 2. 建議考量臺中港及麥寮港每年是否有作海拋或填砂土等影響因素。 3.臺中港12、1、6及7月流速大於1節發生機率特多，而麥寮港全年差異不大，但2008年後麥寮港機率又突然增大，原因為何？	意見答覆： 1.二港區堤址水深大於-20m，仍有嚴重沖蝕現象，僅流況大於其他港域，與防波堤施工紀錄，皆反應海流主致堤頭沖蝕。 2.會儘量蒐集海拋或填砂土等相關資料。 3.可能因該年實測資料筆數較少而致，在儀器故障期間，資料筆數不足，易造成發生機率偏移平均值的現象。
簡委員仲璟： 1.圖3.23所示台中港堤頭地形清淤變化呈現持續侵蝕中，其原因為何？北防波堤延長已有近10年，然堤頭水深仍加大中，此對堤頭安全有影響否？ 2.圖3.27之色階圖示請一致以便利於判別。該顯示第1次(100/6/9)與第2次(100/5/8)地形水深有差異其原因為何？水深資料格點化處理及測量軌跡點不同是否造成影響？	意見答覆： 1.圖資為100/5~101/5間地形變化，僅兩次測量無法評斷現況是否仍持續侵蝕中。若有北堤頭水深持續加大之明確證據，堤頭的安全應有疑慮，宜進一步研擬適當的防護對策。 2.色階圖已遵照委員意見修改。該海域地形變化具季節性，兩測次之差異應屬合理。麥寮港採多音束測深儀，測點密度較佳，格點化處理及測量軌跡點不同的影響相對較小。

4

一、前　言

1. 計畫緣起與目的

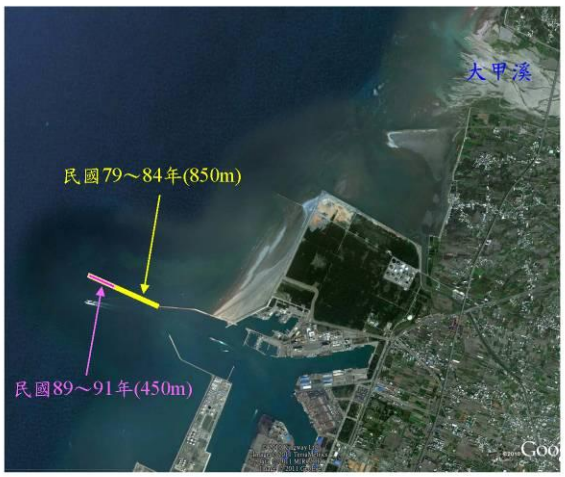
- 波浪或海流通過防波堤堤頭時，因波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕，導致結構基礎的破壞或傾倒。以麥寮港為例，北防波堤堤頭原設計水深為 -22m，目前堤基被沖刷的深度可達 26m。造成防波堤堤頭沖蝕的原因與機制未明確，需進一步的觀察與研究，以提出有效的防制對策。
- 本研究以台中港及麥寮港為對象，分年進行堤頭附近波、流場及地形變化特性與機制的觀測與模擬。透過背景資料收集分析、數值模擬、海象及海底地形觀測及水工模型試驗等，探討防波堤堤頭附近流況、水動力及沖刷機制，進而研擬適當對策。

5

一、前　言

2. 研究範圍

- 地理位置：臺中港北鄰大甲溪以及大安溪，南鄰大肚溪，為因應淤積以及航行安全，而延伸北防波堤。
- 臺中港於民國65年完成主體工程，民國75～84年先延長北防波堤 850 公尺，民國 89～91年再延長北防波堤 480 公尺 。



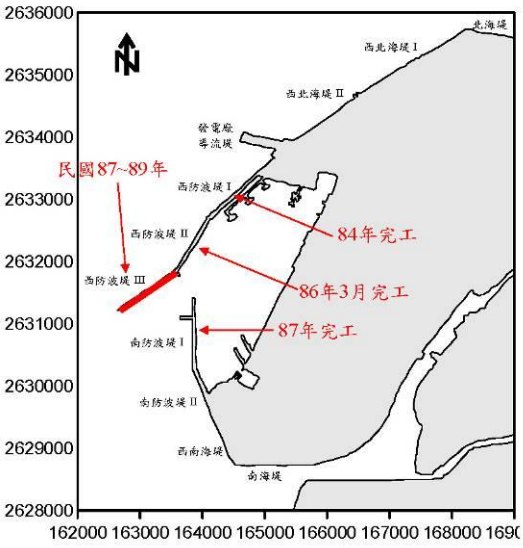
臺中港北防波堤延伸歷程圖

6

一、前　言

2. 研究範圍

- 地理位置：雲林離島工業區位於濁水溪口南岸，參寮區自民國83年動工興建以來，北側海堤受到濁水溪砂源的補注，已有淤積現象產生。
- 鄰近外航道之西防波堤III 則於民國87年3月開始逐漸施工延伸至民國89年9月，外航道內側之南防波堤II 則於民國87年底完工 。



參寮工業區各區段海堤位置圖

7

一、前　言

3. 工作項目

第一年度 (100年)：

1. 文獻收集與分析
2. 堤頭地形的量測分析
3. 堤頭波流場觀測分析
4. 數值模式初步建置

第二年度 (101年) 工作項目：

1. 防波堤堤頭附近海底地形侵蝕的文獻收集、更新與分析
2. 台中港及麥寮工業港，防波堤堤頭地形量測與分析
3. 麥寮工業港，防波堤堤頭附近波流場的現場觀測與分析
4. 波、流場數值模擬
5. 水工模型試驗的規劃

第三年度 (102年)：

1. 波場作用下地形變化數值模擬
2. 流場作用下地形變化數值模擬
3. 波或流場作用下水工模型試驗
4. 堤頭侵蝕防制工法初步研擬

第四年度 (103年)：

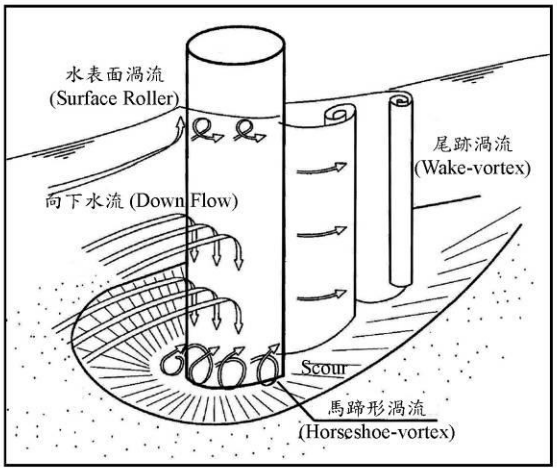
1. 防制工法數值模擬
2. 防制工法水工模型試驗
3. 數值模擬與水工模型試驗比對分析
4. 堤頭侵蝕防制機制與適當工法

8

一、前　言

4. 相關研究文獻

- 橋墩或垂直柱沖刷：
  - ✓ 目前有關沖刷機制分析在數學模式的建立上，多將沖刷區取一控制體，應用漂砂連續方程式，配合水流動量原理或對沖刷坑形狀作數學函數探討，求得某流況下之最大沖刷深度。
  - ✓ 相關特定係數多以水工模型試驗來決定，得到具有工程實用性之經驗公式。



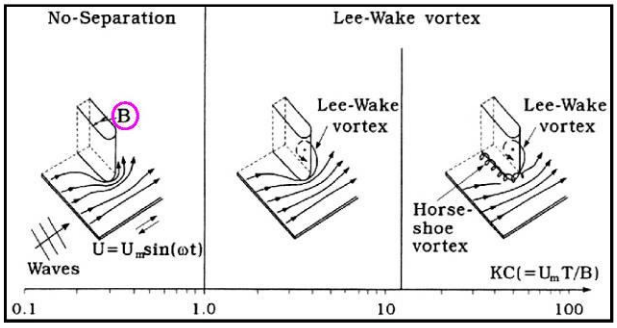
垂直柱附近水流流況示意圖 (Melville，1988)

9

一、前　言

4. 相關研究文獻

- 波浪作用下防波堤堤頭流況：
  - ✓ 波浪入射方向與防波堤堤體垂直時，堤側所形成的渦流是造成沖刷的主要機制。
  - ✓ 波浪特性(或引發的底床流)與堤體尺寸的關係，可以KC參數(=U_mT/B)表示。KC<1時，流場並無明顯渦流產生。1<KC<12時，流場形成堤後尾跡渦流。KC>12時，除了形成堤後尾跡渦流，堤前亦伴隨馬蹄形渦流(Horseshoe Vortex)。
  - ✓ 實驗結果顯示，波浪作用下堤頭底床剪應力為未受堤頭擾動處的10~15倍。

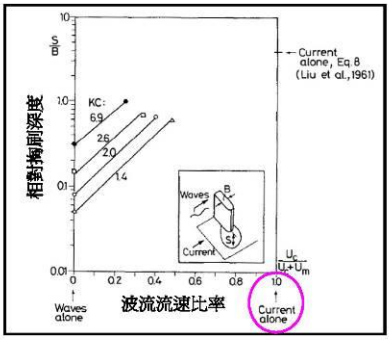


(Sumer and Fredsøe, 1997)

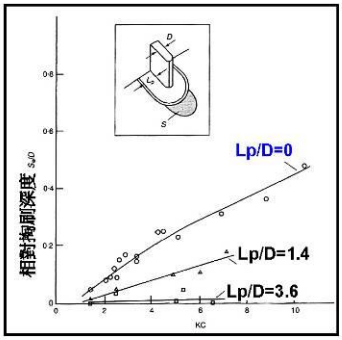
一、前　言

4. 相關研究文獻

- 波(流)作用下防波堤堤頭沖刷：
  - ✓ 波流同時(同向)，相對掏刷深度(S/B)與Uc/(Uc+Um)有關。相對掏刷深度隨著KC變大而加大；當只有純流速作用時(Um=0)，掏深程度更加劇烈。
  - ✓ 堤頭處未設置護基設施時(Lp=0)，掏刷深度增加最顯著。護基寬度與堤體寬度比(Lp/D)超過3.6之後，堤頭處的掏深可有效抑制。



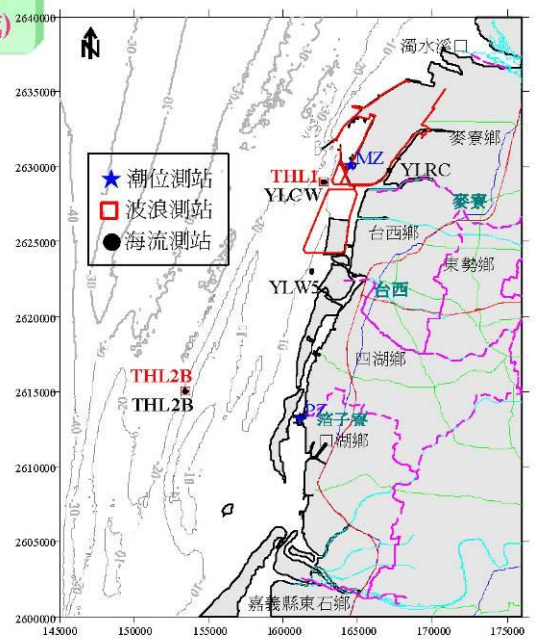
波流交會最大掏深關係(Sumer and Fredsoe, 1997)



KC與最大掏深關係(Gokce et al.，1994)

二、基本資料收集與分析

1. 波浪 (雲林海域)



麥寮港海氣象觀測站位置圖 (成大水工所，2010)

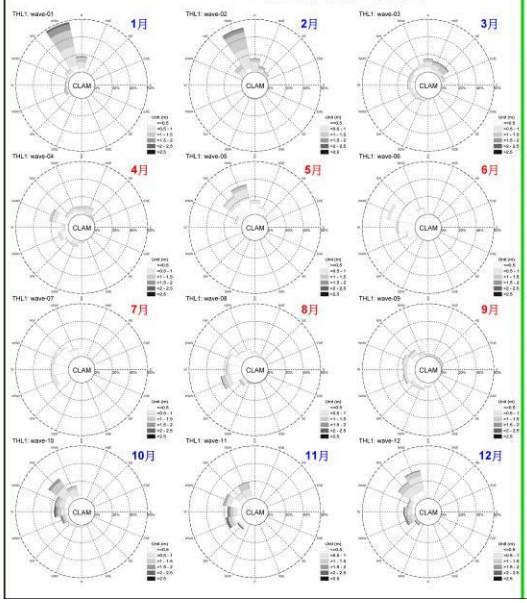
THL1 (1992年至今)

THL2B (2001年至今)

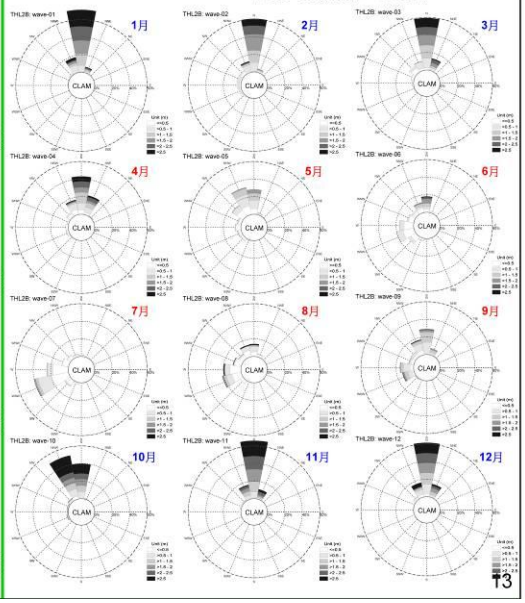
二、基本資料收集與分析

1. 波浪 (雲林海域)

THL1：1997~2010年度逐月波浪玫瑰圖



THL2B：2001~2010年度逐月波浪玫瑰圖



二、基本資料收集與分析

1. 波浪 (雲林海域)

- THL1 (1997~2010年)：

✓ 夏季：示性波高 1.0 m，週期 5.3 sec，主要波向 NNW~SW。

✓ 冬季：示性波高1.3 m，週期 5.8 sec，主要波向 NNW、NW。

✓ 最大波高 5.4 m，尖峰週期 8.3 sec，(2005/9/1，泰利颱風)

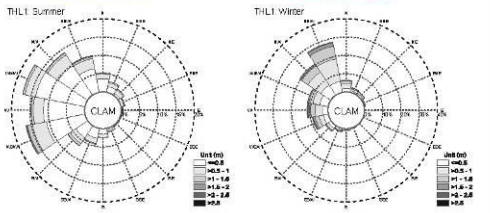
- THL2B (2001~2010年)：

✓ 夏季：示性波高 1.3 m，週期 5.8 sec，主要波向 N~NNW、W~WSW。

✓ 冬季：示性波高 2.4 m，週期 6.3 sec，主要波向 N、NNW。

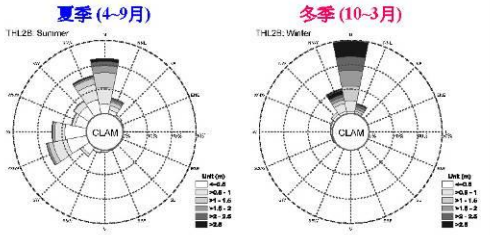
✓ 最大波高 6.4 m，尖峰週期 11.2 sec，波向NNW (2010/12/16，季風波浪)

夏季 (4~9月)　冬季 (10~3月)



THL1：1997~2010年度波浪玫瑰圖

夏季 (4~9月)　冬季 (10~3月)

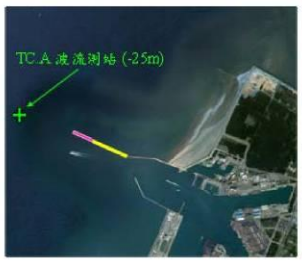


THL2B：2001~2010年度波浪玫瑰圖

14

二、基本資料收集與分析

1. 波浪 (台中海域)



臺中港海象觀測站位置圖

- 本計畫根據港灣技術研究中心所出版之2000～2008年度「港灣海氣地象觀測資料年報」之觀測數據，統計分析台中港海域逐月之平均示性波高、週期、主要波向、最大示性波高、其對應週期及發生日期：

✓ 夏季 (4~9月)：平均示性波高 1.02 m，月平均示性週期 5.8 sec，波向以 N、NNE、W 為主；最大示性波高為7.50 m，其對應週期為6.0 sec，發生於2004年5月28日。

✓ 冬季 (10~3月)：平均示性波高 2.08 m，月平均示性週期 6.3 sec，波向集中在 NNE、N。最大示性波高為6.91 m，其對應週期為6.0 sec，發生於2005年3月1日 。

✓ 歷年最大波高為7.78 m，其週期為8.7 sec，發生於2009年8月7日莫拉克颱風期間。

15

二、基本資料收集與分析

2. 颱風波浪推算

- 本研究以中央氣象局發佈之歷史颱風資料 (1940～2010年)，篩選通過麥寮港及台中港海域共114組資料，利用迴歸分析的方式求得 10年、20年、25年、50年及100年重現期之颱風波浪：

麥寮港外海各重現期之颱風波浪推算

重現期	50 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	5.9	10.2	5.1	9.5	4.5	8.9
NNW	5.1	9.5	4.4	8.8	3.8	8.2
NW	4.9	9.3	4.3	8.7	3.8	8.2
WNW	5.2	9.6	4.6	9.0	4.0	8.4
W	5.3	9.7	4.7	9.1	4.2	8.6
WSW	5.4	9.8	4.6	9.0	4.0	8.4
SW	5.6	9.9	4.7	9.1	3.9	8.3

台中港外海各重現期之颱風波浪推算

重現期	50 年		20 年		10 年	
波向	波高	週期	波高	週期	波高	週期
N	7.4	11.4	6.4	10.6	5.6	9.9
NNW	7.2	11.3	6.1	10.4	5.2	9.6
NW	6.6	10.8	5.7	10.0	4.9	9.3
WNW	6.1	10.4	5.4	9.8	4.7	9.1
W	5.8	10.1	5.2	9.6	4.6	9.0
WSW	5.8	10.1	5.1	9.5	4.5	8.9
SW	5.2	9.6	4.5	8.9	4.0	8.4

16

二、基本資料收集與分析

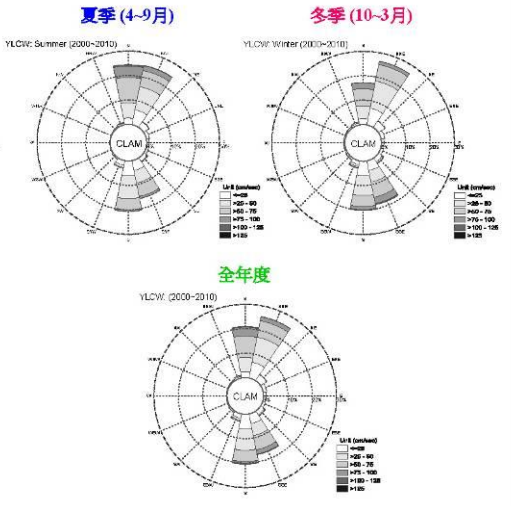
3. 海流 (雲林海域)

- YLCW (2000~2010年)：

✓ 夏季：平均流速41.48cm/sec，主要流向NNE~N、S~SSE ；最大流速 212.50 cm/sec，流向 N (2009/6/21，蓮花颱風) 。

✓ 冬季：平均流速40.60cm/sec，主要流向NNE~N、S~SSE；最大流速 227.43 cm/sec，流向 S (2010/12/16)。

✓ 全年度：平均流速41.05cm/sec，主要流向NNE~N、S~SSE；最大流速為 227.43 cm/sec，流向 S (2010/12/16) 。



YLCW：2000~2010年度海流玫瑰圖

17

二、基本資料收集與分析

3. 海流 (台中海域)

- 根據蔡及徐 (2011) 分析港灣技術研究中心自2003年8月至2009年12月之海流資料：臺中港區附近主要流向為西至北向，約佔歷年觀測的56.6%；其次為南至西向，約佔歷年觀測的22.7%。歷年平均流速為45.9 cm/sec；最大流速為248.3 cm/sec，流向為西向。

臺中港2003至2009年海流之流速及流向統計表

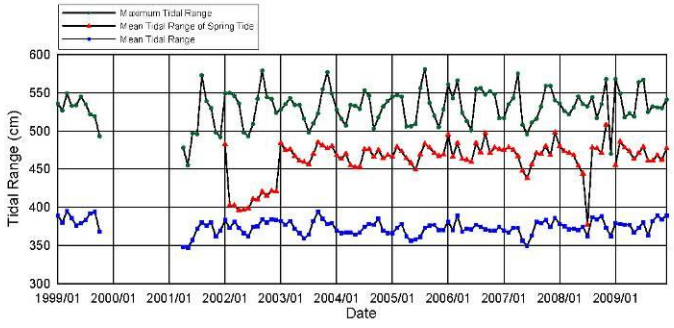
年份	平均流速(cm/s)	最大流速	
		流速(cm/s)	流向(°)
2003	40.8	153.8	W
2004	45.3	173.0	W
2005	49.2	248.3	W
2006	45.9	171.9	W
2007	43.5	193.9	WSW
2008	51.3	240.2	WNW
2009	45.5	189.0	WNW
統計值	45.9	248.3	W

18

二、基本資料收集與分析

4. 潮位 (雲林、台中)

- 雲林海域屬於半日潮，雲林海岸共設有三潮位站，包括麥寮站、三條崙站 (目前已停測) 及箔子寮站。麥寮潮位站之平均潮差為2.70 m，大潮平均潮差為3.72 m，為三站最大者。其次為三條崙潮位站，平均潮差為2.22 m，大潮平均潮差為3.27 m。
- 臺中海域屬於半日潮，自1999年2009年期間，平均潮差為3.75m，大潮平均潮差為4.63m，最大潮差為6.19m。

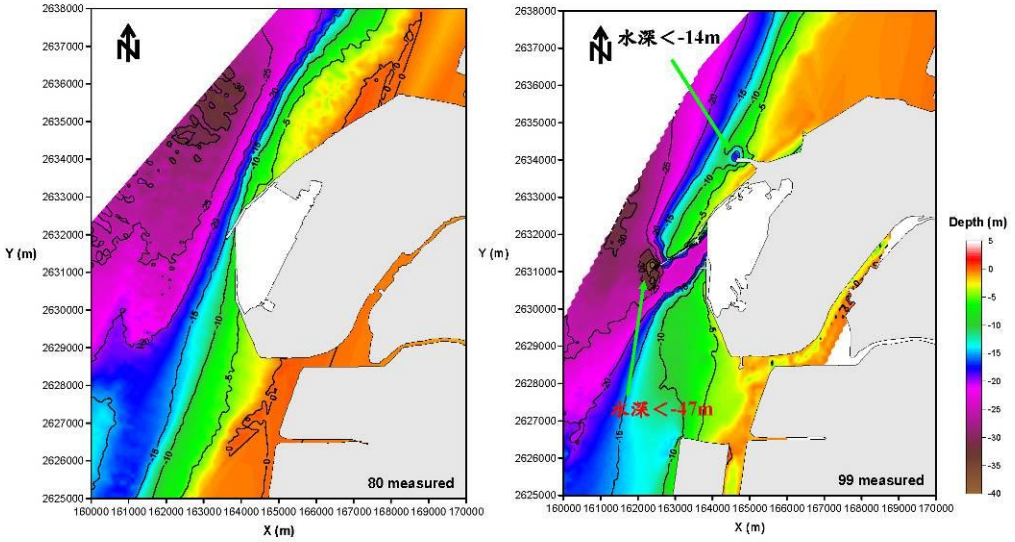


臺中港1999至2009年之潮位統計分佈圖

19

二、基本資料收集與分析

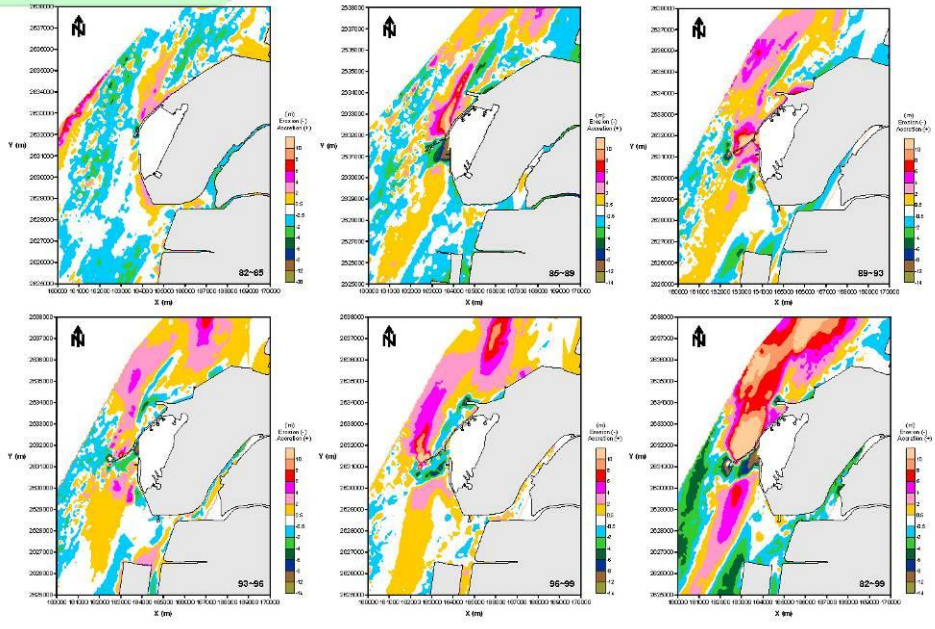
5. 地形 (雲林海域)



離島工業區海域實測地形圖(民國80年)　　離島工業區海域實測地形圖(民國99年)

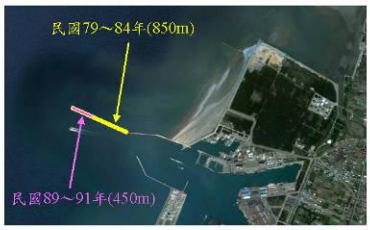
二、基本資料收集與分析

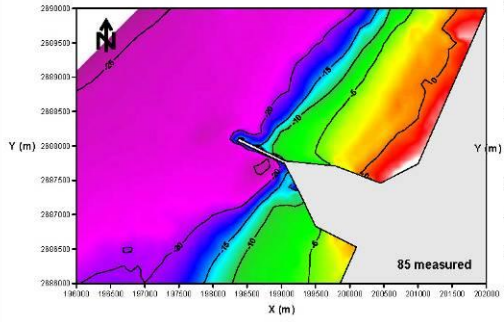
5. 地形 (雲林海域)



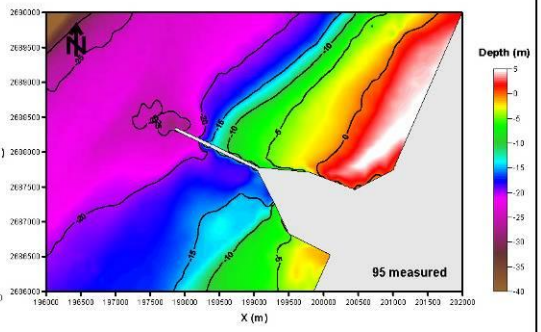
二、基本資料收集與分析

5. 地形 (台中海域)





臺中港海域實測地形圖 (民國85年)

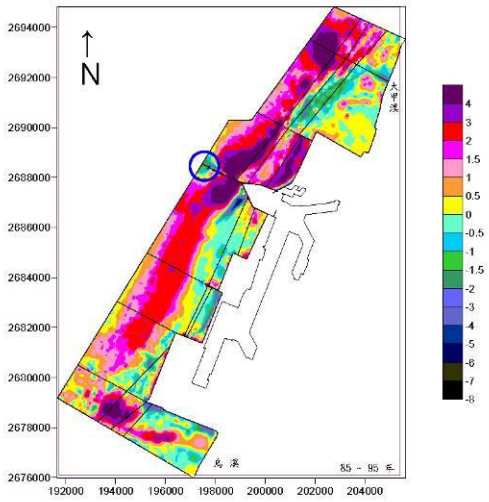


臺中港海域實測地形圖 (民國95年)

二、基本資料收集與分析

5. 地形 (台中海域)

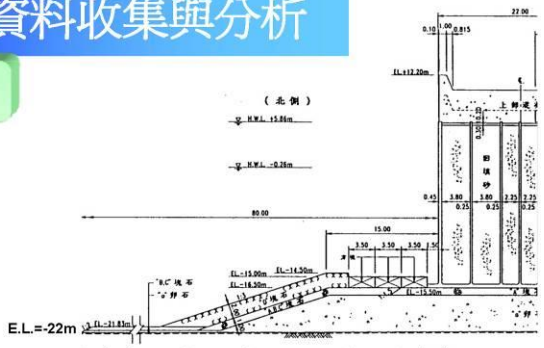
- 地形變化特性 (蔡等人，2011)：民國85至95年，北防波堤以北全面淤積，最大可達4m以上，並往港口南側延伸，港口南側近岸則維持些微侵蝕。北防波堤堤頭附近明顯侵蝕，侵蝕深度最大可達 5m 以上，目前侵蝕範圍大致維持穩定，並未持續刷深。



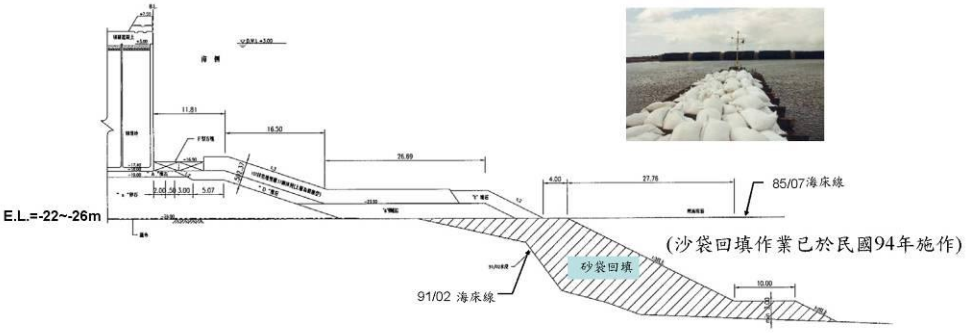
臺中港地形侵淤變化圖(民國85～95年)

二、基本資料收集與分析

6. 防波堤興建



台中港北防波堤延伸850m堤頭斷面圖 (朱等人，2002)

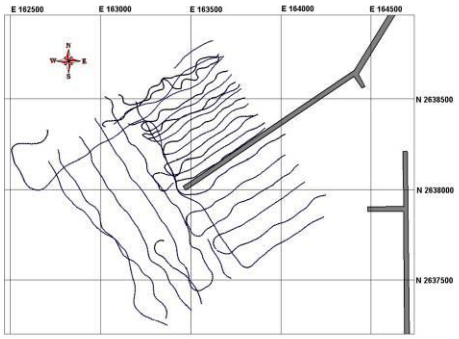


麥寮西防波堤堤頭補救措施斷面圖 (朱等人，2002)

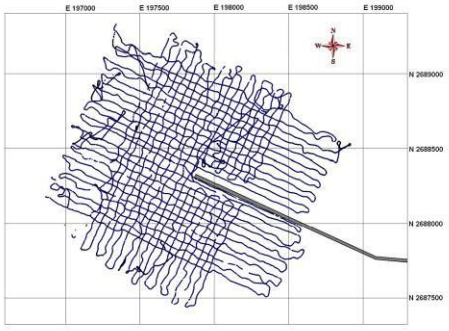
24

三、防波堤堤頭地形量測

- 測量範圍：麥寮工業區專用港西防波堤堤頭及台中港北防波堤堤頭約1公里平方之範圍，所涵蓋範圍約以堤頭刷深處為中心點。
- 測量頻率 (施測一次)：水深地形測量每間隔 50 公尺規劃一條斷面測線。
- 測量控制系統：平面控制系統採用台灣二度分帶97坐標系統 (TWD97)，高程控制採用基隆中潮一等水準系統。



麥寮工業港北防波堤堤頭水深測量航跡點

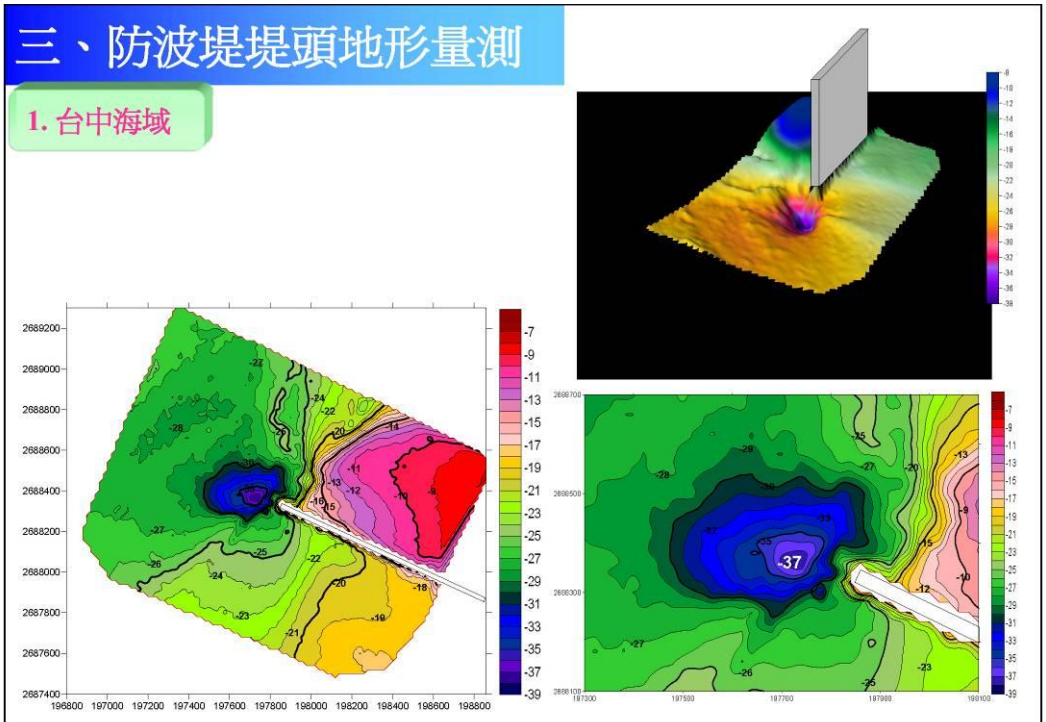


臺中港北防波堤堤頭水深測量航跡點

25

三、防波堤堤頭地形量測

1. 台中海域

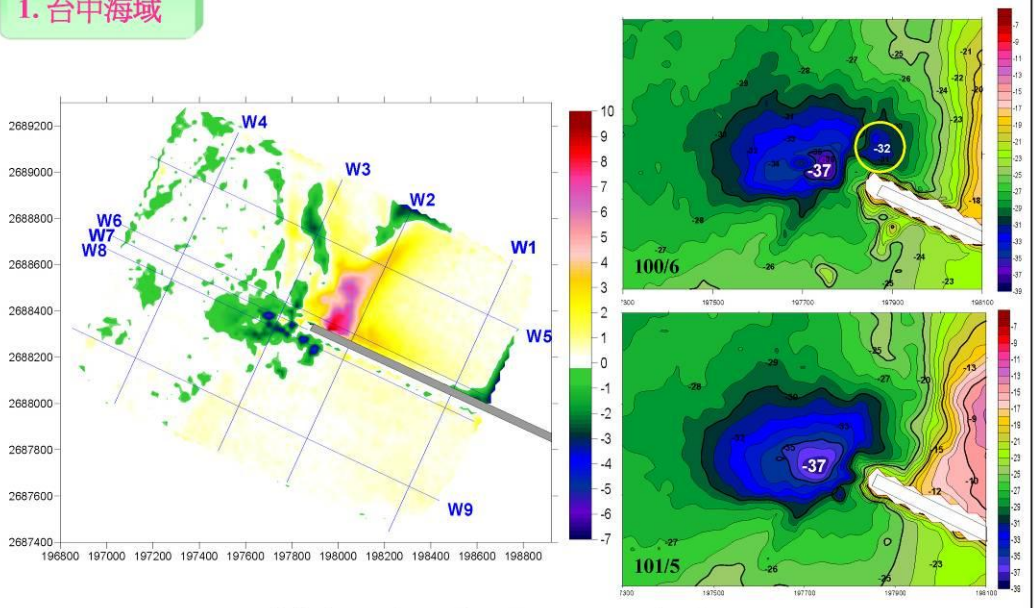


臺中港北防波堤堤頭二、三維水深色階圖 (101/5/7)

26

三、防波堤堤頭地形量測

1. 台中海域

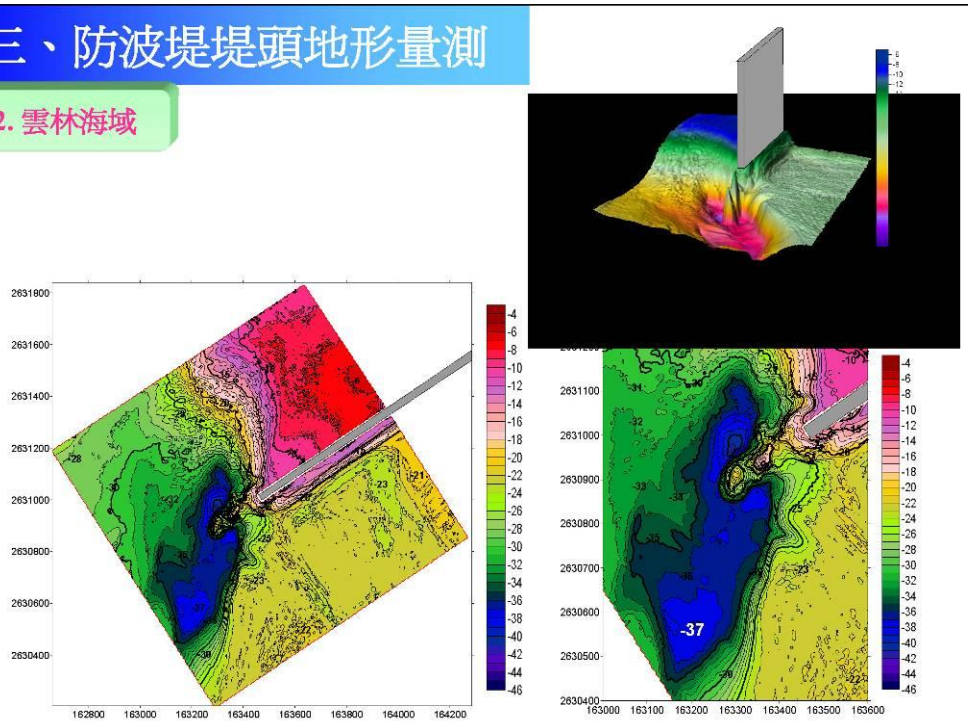


臺中港堤頭地形測量100/5~101/5 侵淤變化色階圖

27

三、防波堤堤頭地形量測

2. 雲林海域

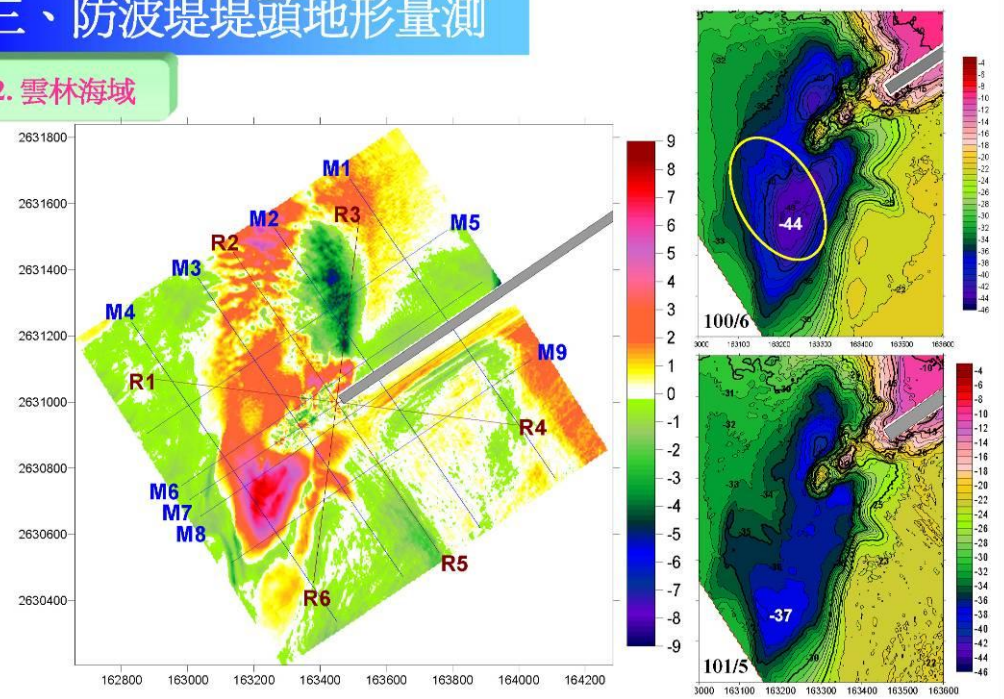


麥寮港西防波堤堤頭二、三維水深色階圖 (101/5/8)

28

三、防波堤堤頭地形量測

2. 雲林海域



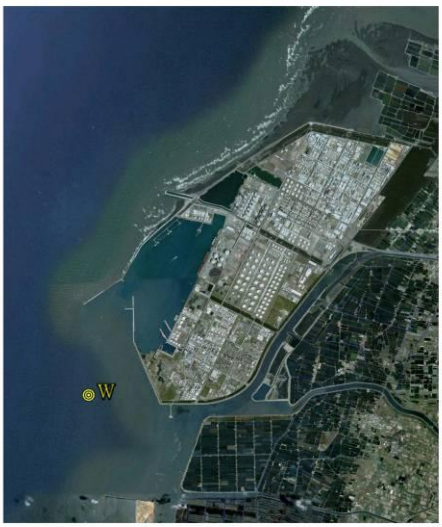
麥寮工業港堤頭地形測量100/6~101/5侵淤變化色階圖

29

四、潮波流調查

1. 作業方式

- 測量範圍與內容：於麥寮港西防波堤堤頭處(W)，設置1個定點潮波流觀測點，水深約10m，同步觀測波浪、水位、流速與流向。
- 測量頻率：共施測一次，觀測日期自5/3至5/24止，定點觀測站連續觀測達22日。
- 測量方式：採自記式潮波流儀 RDI ADCP，佈放時以DGPS作定位，以底錠方式安置。



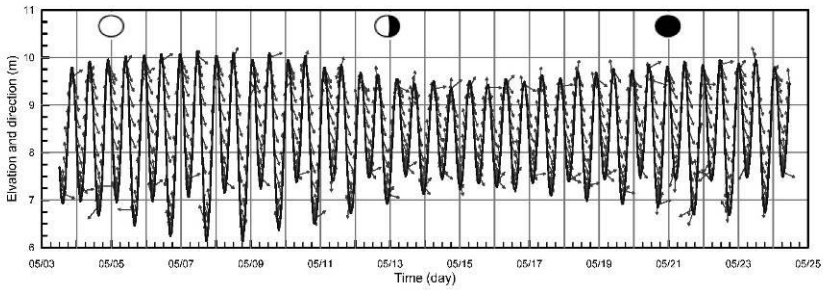
麥寮港西防波堤堤頭潮波流監測位置示意圖

30

四、潮波流調查

2. 調查結果

- 潮汐 (2012年05/03~05/24)：
  - 麥寮港海域潮汐屬於半日潮潮型。
  - 實測潮位統計(以當地平均潮位為基準)：最大水深為10.13m (最大水位+1.77m, 5/7, 11:00)，平均水深為8.36m (平均水位0.00m)，最小水深為6.13m (最小水位-2.23m, 5/8, 18:10)；測得最大潮差為+4.00m。



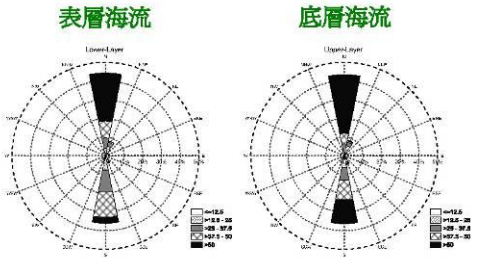
W測站實測潮汐水位變化圖 (2012年05/03~05/24)

31

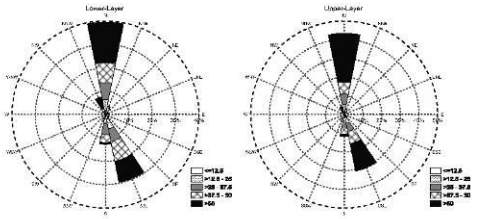
四、潮波流調查

2. 調查結果

- 海流去年觀測 (100年6/09~7/04)：
  - 表層：平均流速 46.4cm/s，主要流向 N，最大值為 120.0cm/s。
  - 底層： 平均流速 39.4cm/s，主要流向 N，最大值為 109.3cm/s。
- 海流今年觀測 (101年5/03~5/24)：
  - 表層：平均流速 46.3cm/s，主要流向 N，最大值為 115.4cm/s。
  - 底層： 平均流速 39.8cm/s，主要流向 N，最大值為 106.2cm/s。
  - 主要流向為N、SSE方向，表層與底層主要流速大於 37.5cm/s發生機率各為 62.40% 與 54.26%。



100年6/9~7/4 (單位：cm/sec)



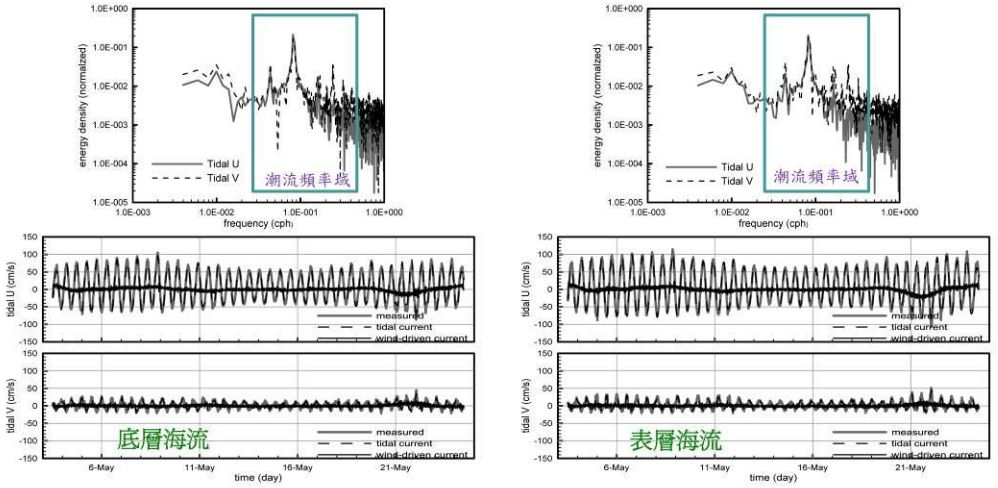
101年5/3~5/24 (單位：cm/sec)

麥寮港海域流速流向玫瑰圖

四、潮波流調查

2. 調查結果

- 海流成份： U分量主要頻率0.08cph (~12hr)，V分量主頻為0.16cph (~6hr) 。
  U與V分量主要成分皆為潮流，風驅流成份振幅平均約13cm/sec。

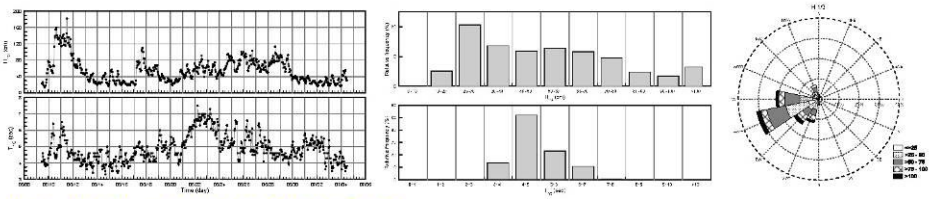


麥寮港海域海流成份頻譜、時序圖

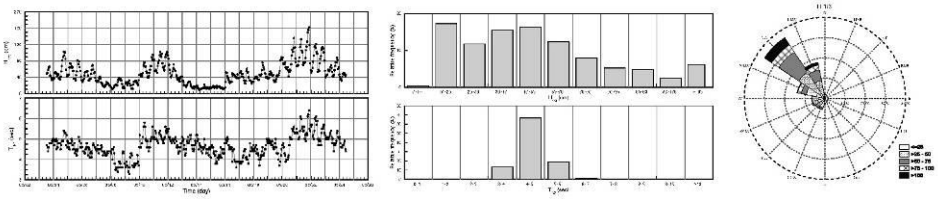
四、潮波流調查

2. 調查結果

- 波浪去年觀測(100年06/09~07/04)：
  - 示性波高以25~75cm為主(約佔63.0%)；週期多集中在4~5sec，波向以 WSW、W 為主。最大示性波高182cm，波向WSW。



- 波浪今年觀測(101年05/03~05/24)：
  - 示性波高以25~75cm為主(約佔62.6%)；週期多集中在4~5sec，波向以NW、NNW為主。最大示性波高162cm，波向NW。



34

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

1. 模式介紹

- 模式介紹：1985 年 Flow-3D® 商業版流體分析軟體正式推出，主要核心技術：多重區塊網格 (Multi-Block Grids)、FAVOR 障礙物體積分率表示法、VOF自由液面處理法，適合處理流體和固體耦合運動的模型模擬計算。基於 Navier-Stokes Equation之連續方程式、動量方程式等完整的理論基礎及數值結構，已廣泛應用於不同領域，如航太工業、水利與環境工程等。
- 藉由選擇適當之水動力、泥沙及波浪等計算模組，FLOW-3D 亦適用於海岸、港灣工程領域之模擬。
- 今年度主要工作內容：模擬防波堤堤頭鄰近海域波、流場的時空分佈和演變。

35

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

2. 潮流數值模擬

- 模擬流程：

(1) 前處理，選定控制方程模式，確立初始條件及邊界條件，劃分計算網格。

(2) 數值求解，設定控制參數，求解離散方程，判斷求解是否收斂，若還未收斂，再導入離散方程的程式。

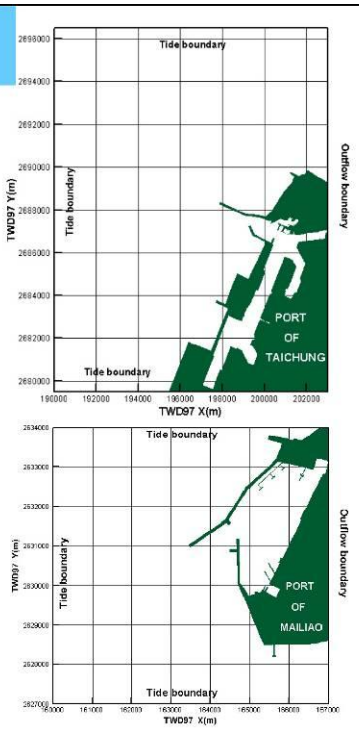
(3) 後處理，顯示和輸出結果。

- 計算範圍：

(1) 台中港：13 x 17km，平均深度20m。

(2) 麥寮港：7 x 7km，平均深度20m。

(3) 水平網格大小50m，垂直網格為1m。



台中港與麥寮港數值模擬範圍

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

2. 潮流數值模擬

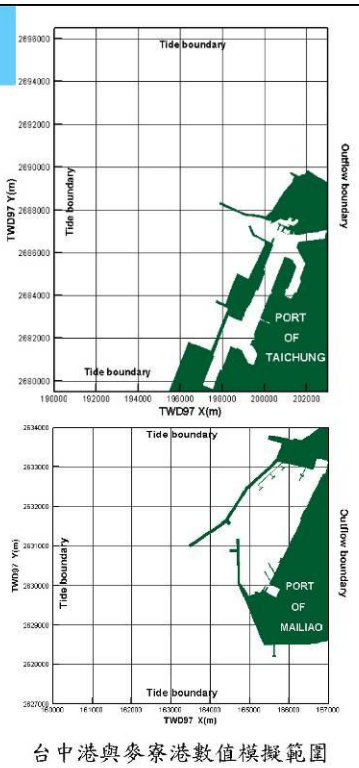
- 模式設定：

(1) 邊界條件：開放水域設定潮位時序變化，以本計畫2011年6月10日至6月15日間所施測，麥寮港海域自計式潮波流儀ML測站之潮位紀錄為邊界水位條件；封閉水域設定港域設施與陸地外廓邊界。

(2) 初始條件：設定 z 方向靜水壓與邊界初始潮位。

(3) 其他參數設定。

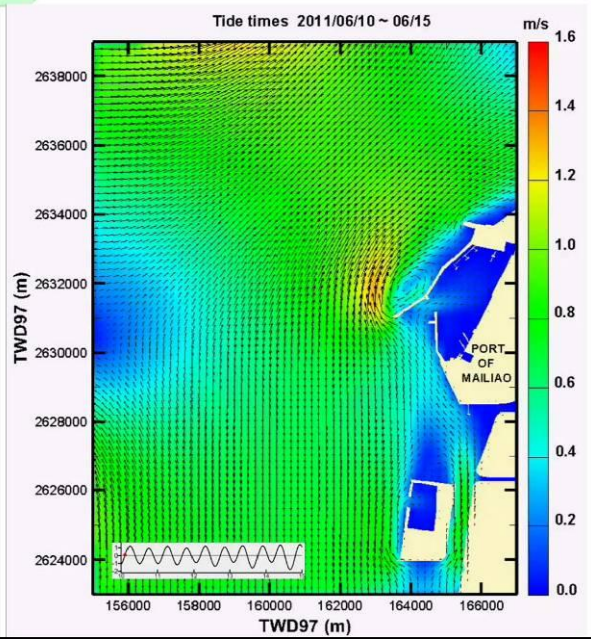
(4) 模擬時間 144小時。



台中港與麥寮港數值模擬範圍

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

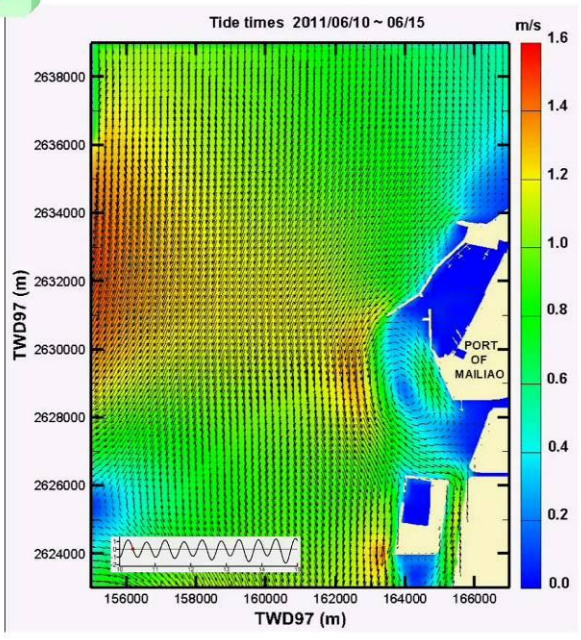
2. 潮流數值模擬



38

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

2. 潮流數值模擬



39

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

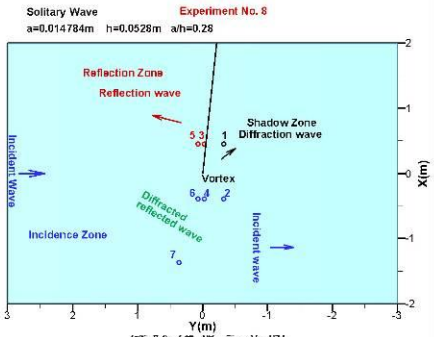
3. 造波數值模擬

- 模試驗證：

(1) 以孤立波通過半無限長直立堤之結果與Liu(1984)之實驗結果比較。

(2) 9m x 4m平面水槽，長0.98m鋁片固定在側邊，並可調整該鋁片與入射波的夾角。

No.	h(cm)	a/h	a(cm)	Angel in degrees
1	5.22	0.42	2.1924	90
2	5.17	0.38	1.9646	90
3	5.07	0.13	0.6591	90
4	5.07	0.36	1.8252	90
5	5.04	0.26	1.3104	90
6	5.04	0.3	1.512	90
7	5.33	0.29	1.5457	80
8	5.28	0.28	1.4784	95.85

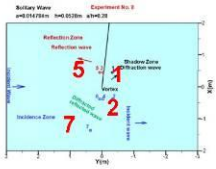


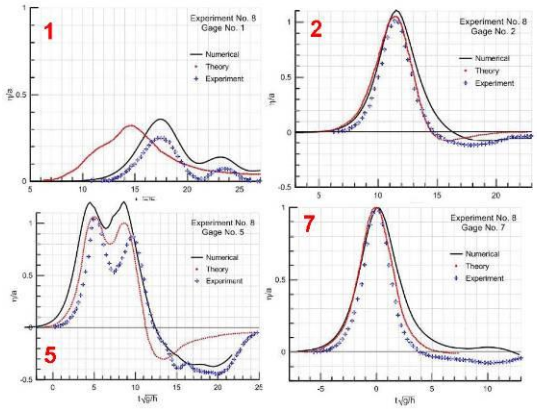
實驗佈置示意圖

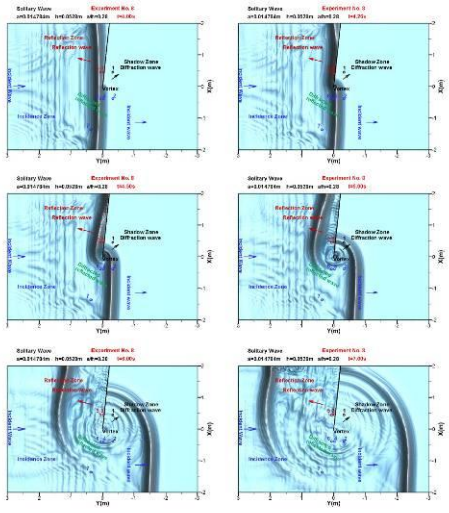
五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 模試驗證：實驗8為例。







數值模擬結果水位時序圖

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 計算範圍：

(1) 麥寮港：2 x 2km，平均深度50m。

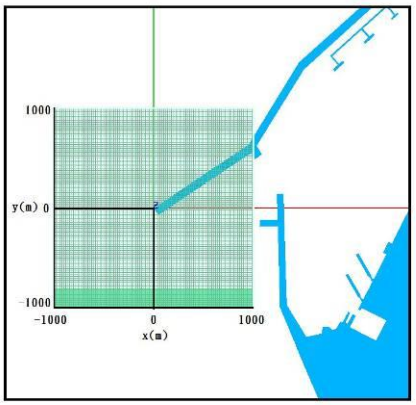
(3) 水平網格大小20m，垂直網格為1m。

- 模式設定：

(1) 邊界條件：開放水域，上游邊界設定造波條件(H=6m, T=12s)、下游邊界設定Outflow、側邊界暫設定Symmetry。封閉水域，港域設施與陸地外廓邊界內的範圍，分別使用 Symmetry及Outflow。

(2) 初始條件：設定 z 方向靜水壓與邊界初始水位。

(3) 模擬時間 240 秒。



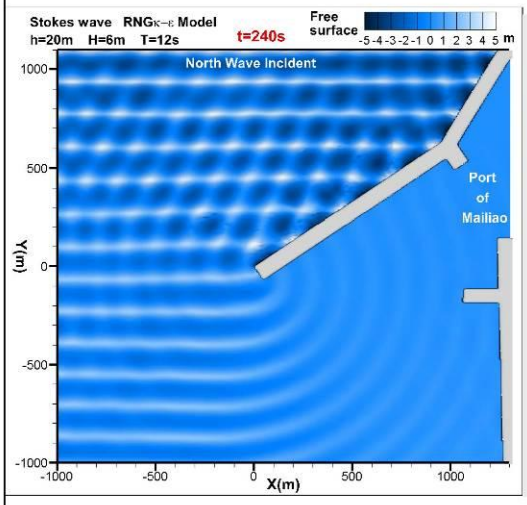
麥寮港數值模擬計算網格示意圖

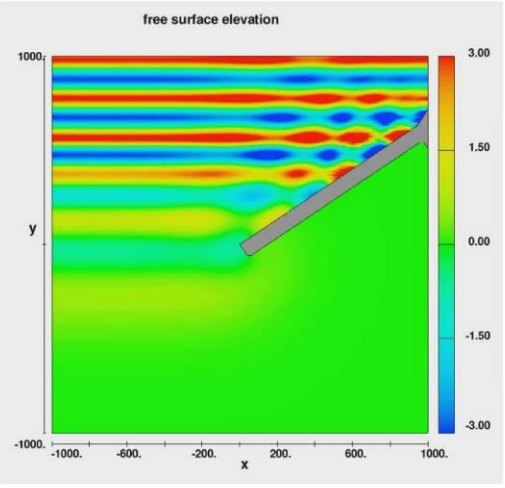
42

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風波場 (H=6m, T=12s, N)



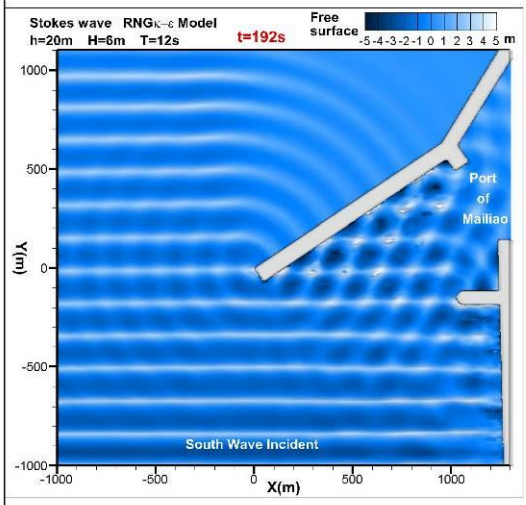


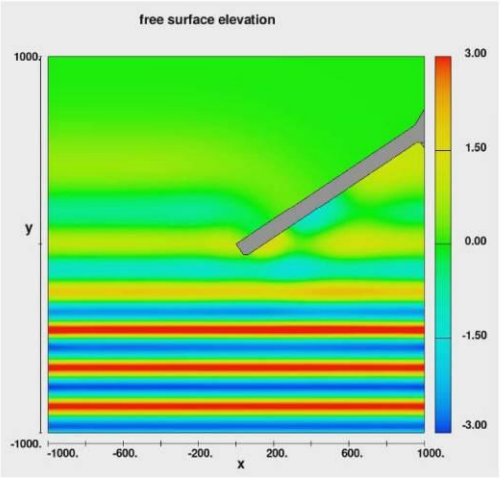
43

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風波場 (H=6m, T=12s, S)



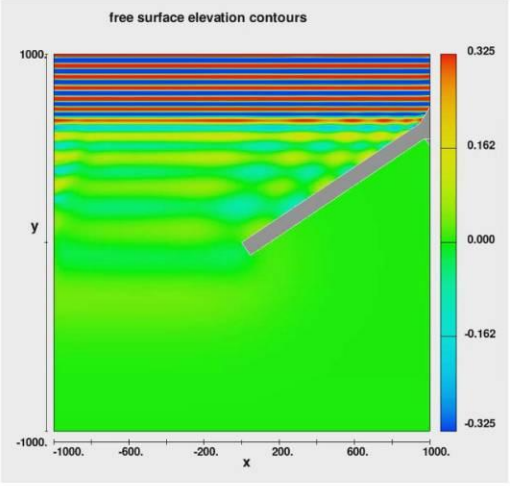


44

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 季風波場 (H=1.5m, T=6.0s, N)

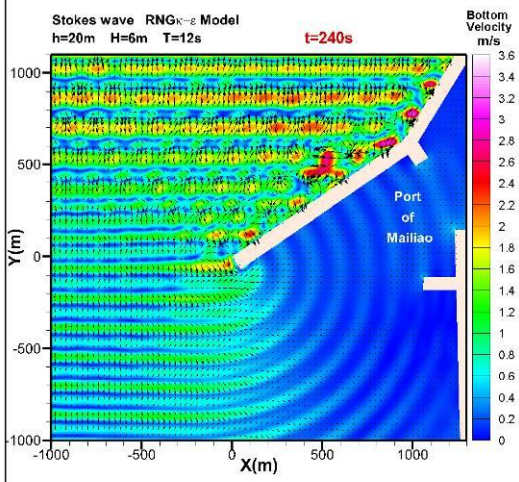


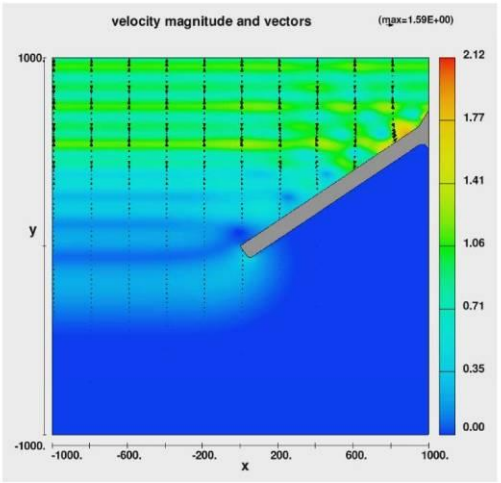
45

五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風流場 (H=6m, T=12s, N)

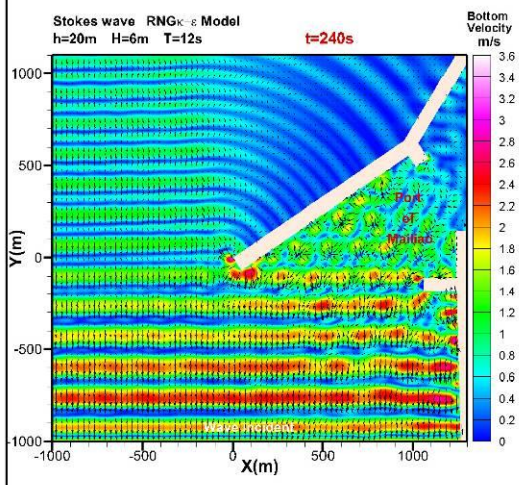


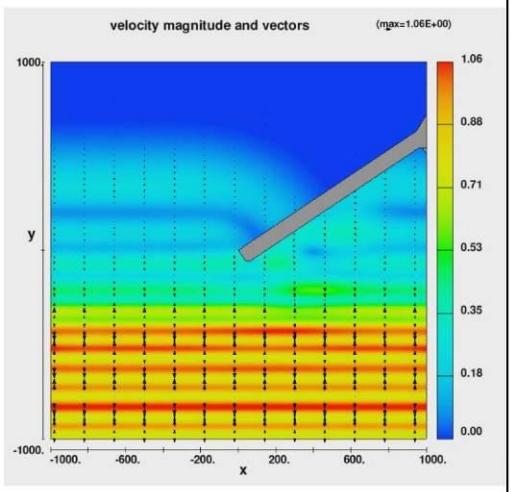


五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風流場 (H=6m, T=12s, S)

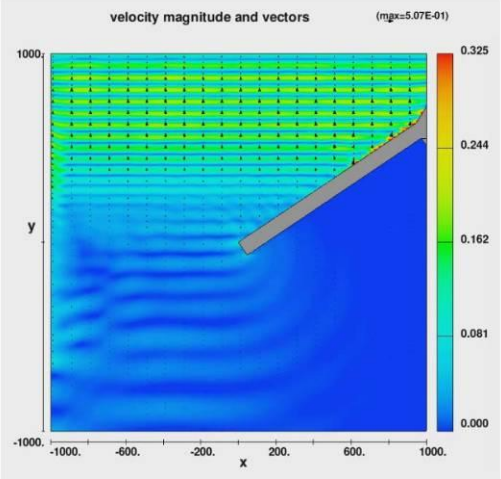




五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

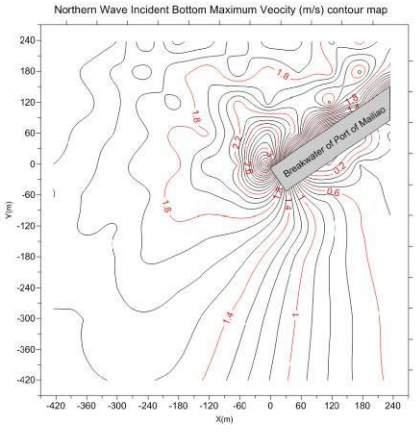
- 季風流場 (H=1.5m, T=6.0s, N)



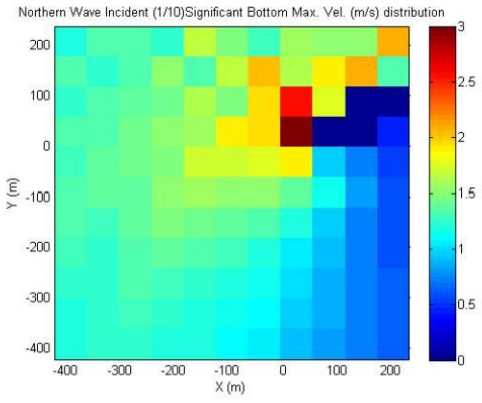
五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風浪流速統計 (H=6m, T=12s, N)



波場底床最大流速最大流速(Vmax)分佈圖

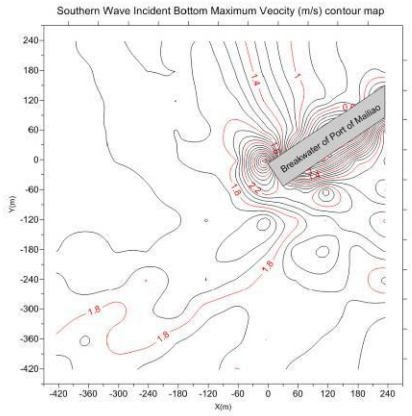


波場底床最大流速前十分之一平均(V1/10)分佈圖

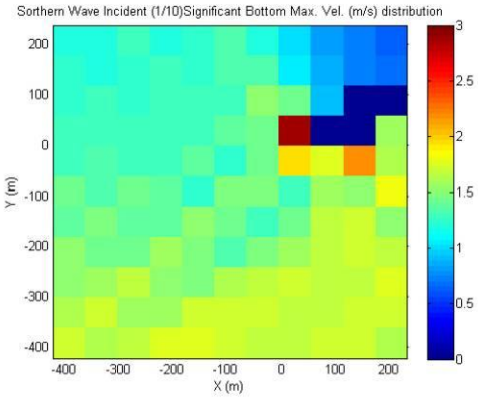
五、防波堤堤頭沖蝕數值模擬

3. 造波數值模擬

- 颱風浪流速統計 (H=6m, T=12s, S)



波場底床最大流速最大流速(Vmax)分佈圖



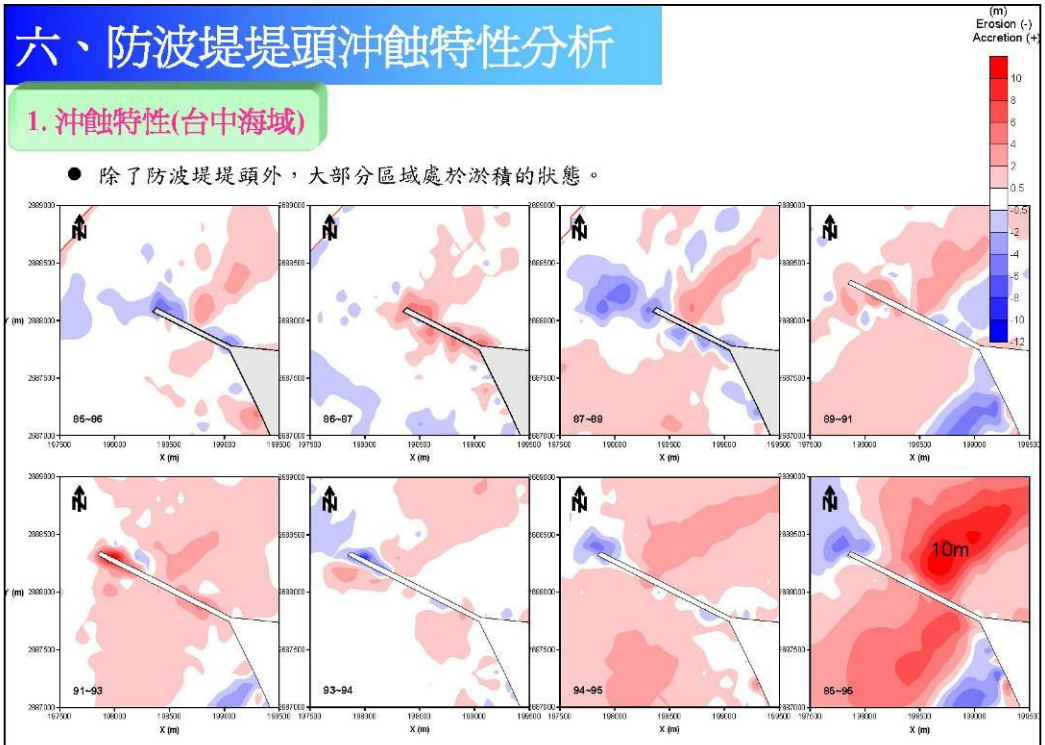
波場底床最大流速前十分之一平均(V1/10)分佈圖

50

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(台中海域)

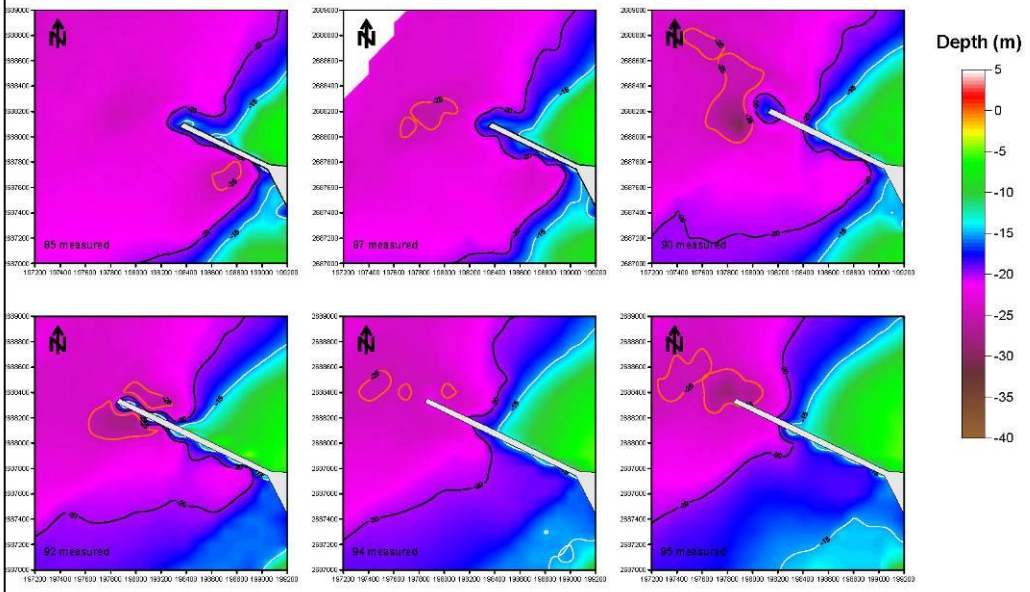
- 除了防波堤堤頭外，大部分區域處於淤積的狀態。



51

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

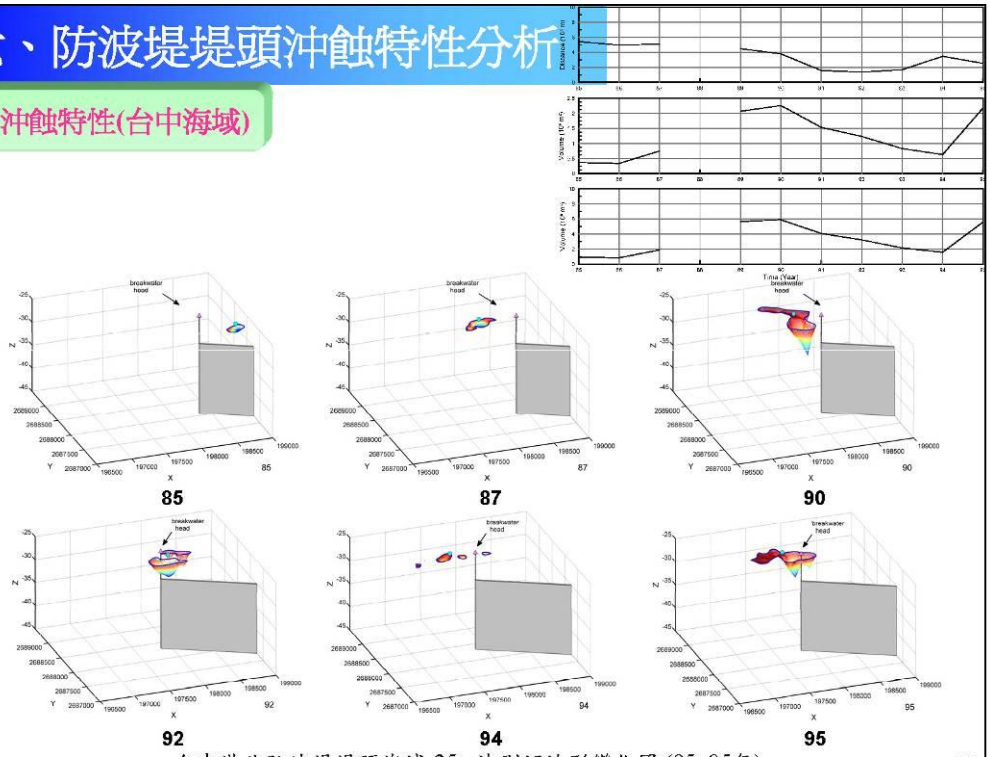
1. 沖蝕特性(台中海域)



52

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(台中海域)



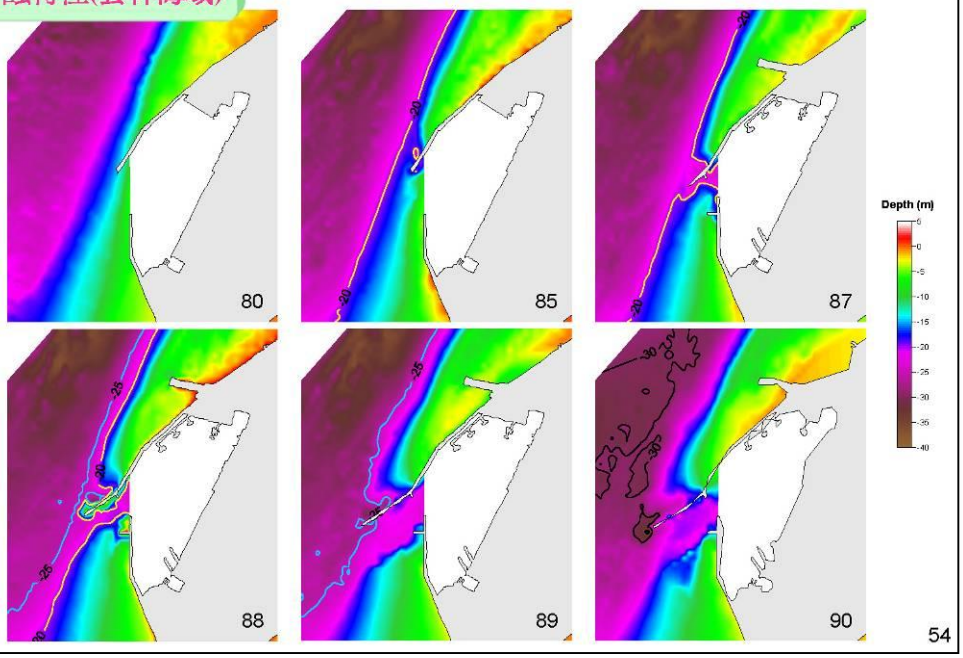
台中港北防波堤堤頭海域-25m沖刷洞地形變化圖 (85~95年)

53

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(雲林海域)

● 成大水工所與中興工程顧問公司於雲嘉海域之大範圍地形測量。

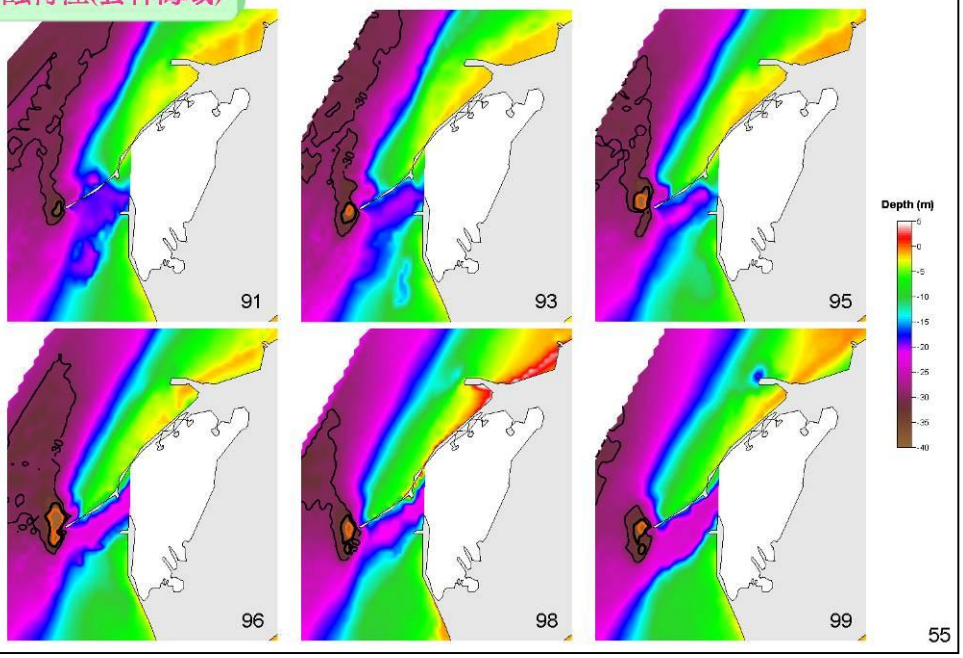


54

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(雲林海域)

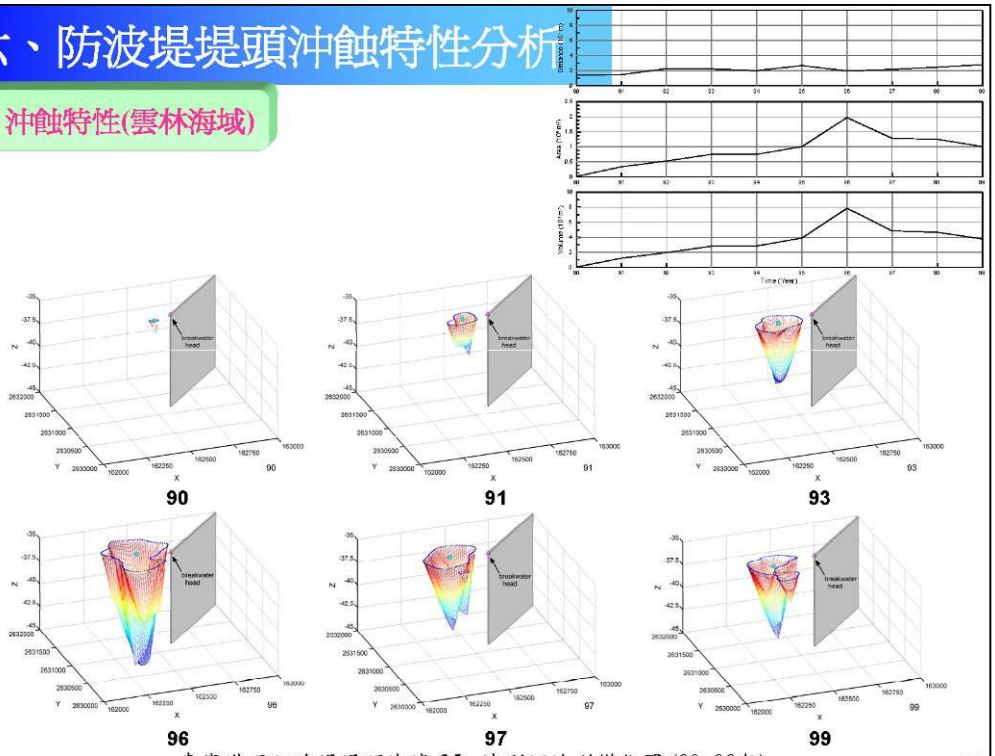
-30m　-35m　-40m



55

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(雲林海域)



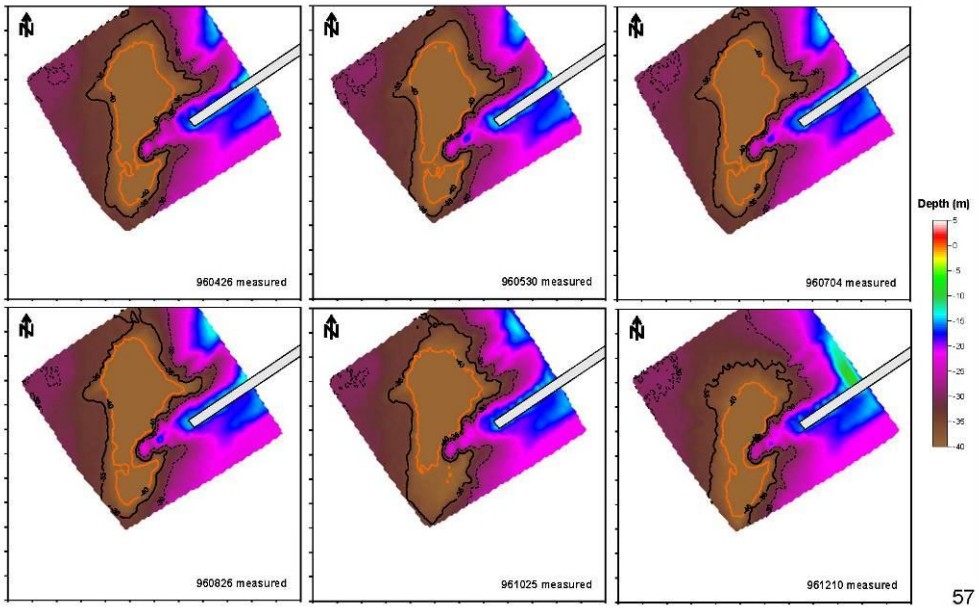
麥寮港西防波堤堤頭海域-35m沖刷洞地形變化圖 (90~99年)

56

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(麥寮海域)

- 麥寮工業區專用港管理公司自 96/04至100/09 五年期間共進行30次堤頭或航道地形測量。



57

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

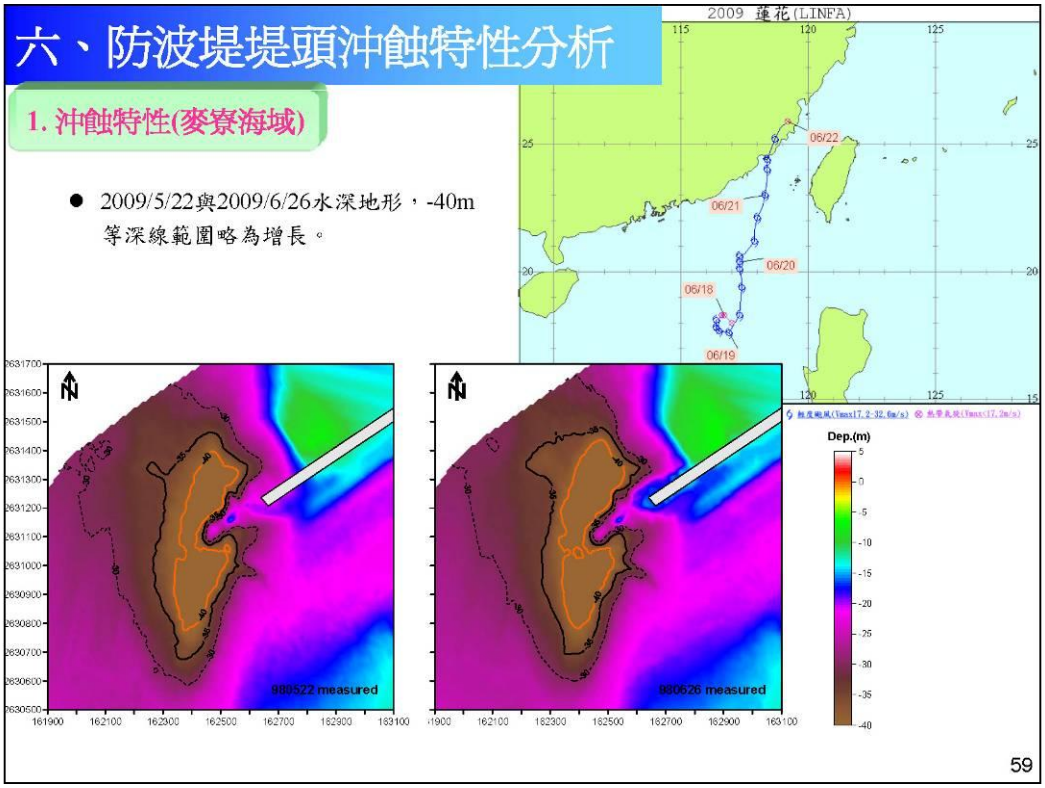
1. 沖蝕特性(麥寮海域)

- 麥寮工業區專用港管理公司30次堤頭或航道地形測量與颱風警報期關係表。

2007	20070728	帕布	梧提	聖帕		韋帕		柯羅莎		米塔	
		20070806	20070808	20070816	20070826	20070917	20070928	20071004	20071025	20071126	20071210
		20070808	20070809	20070819		20070919		20071007		20071127	
2008	20080508	卡玫基	鳳凰	如麗		辛樂克	哈格比	蓮蜜			
		20080716	20080726	20080819	20080905	20080911	20080921	20080926	20081008		
		20080718	20080729	20080821		20080916	20080923	20080929			
2009	20090522	蓮花		莫拉菲		莫拉克			芭瑪		
		20090619	20090626	20090716	20090727	20090805	20090818	20090925	20091003	20091019	
		20090622		20090718		20090810			20091006		
2010	20100825	萊羅克	南修	莫蘭蒂	凡那比	梅姬					
		20100831	20100830	20100909	20100917	20101021	20101215				
		20100902	20100831	20100910	20100920	20101023					

- 2009年5月22日與2009年6月26日間，恰獨蓮花颱風通過。

58

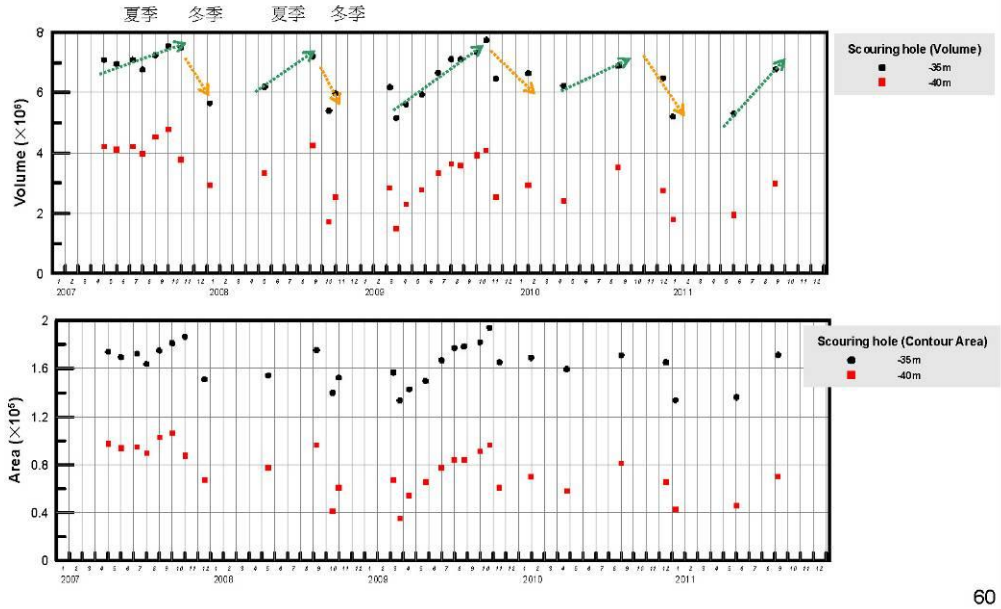


59

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

1. 沖蝕特性(麥寮海域)

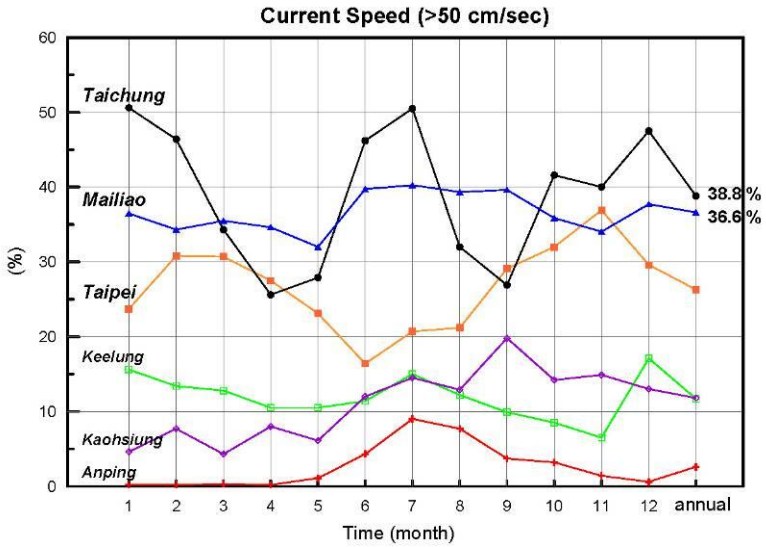
- 參察工業區專用港管理公司自 96/04至100/09 五年期間共進行30次堤頭或航道地形測量。



60

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

2. 海流特性



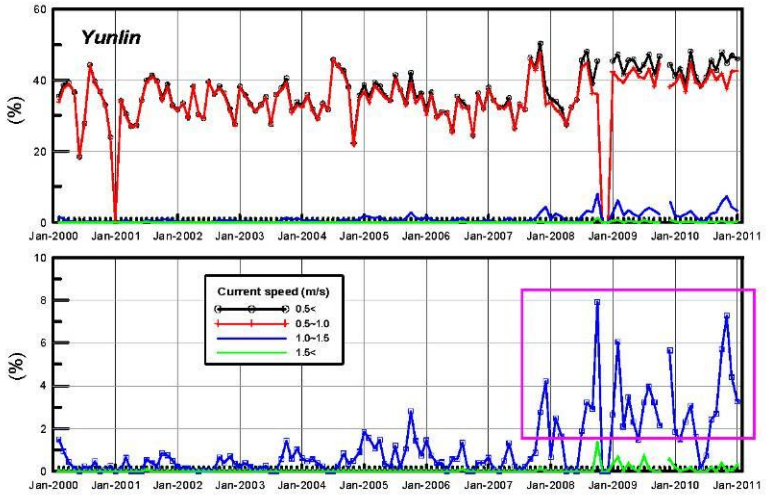
六大港海域歷年流速大於50cm/sec發生機率圖

61

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

2. 海流特性

- 麥寮港於2000~2007年間流速超過二節的發生機率小於2%，2007年底以後流速超過二節發生機率增加到2~8 %。

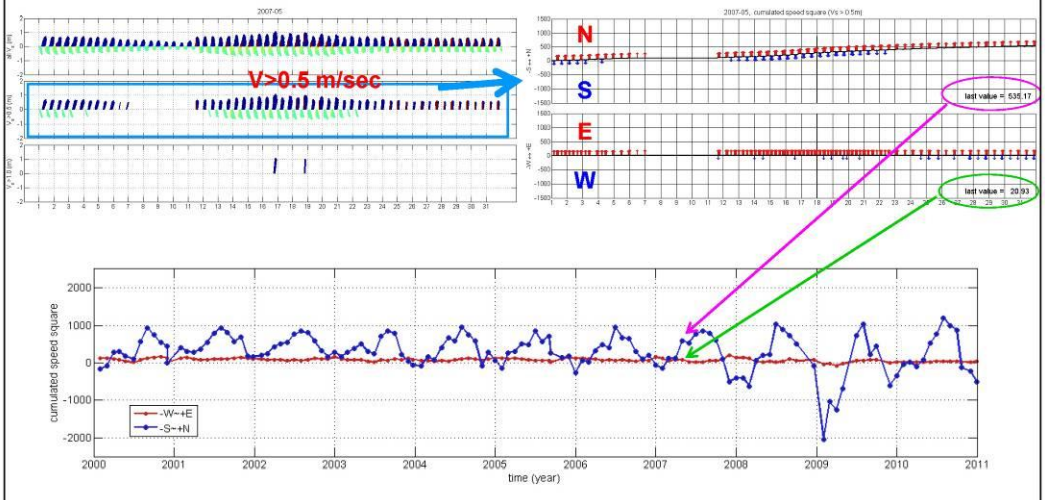


麥寮港2000~2010年流速分佈發生機率圖

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

2. 海流特性

- 選取流速大於 50cm/sec 的成分。
- 流能量以流速分量的平方表示，分別計算各月份之沿岸分量與向岸分量。

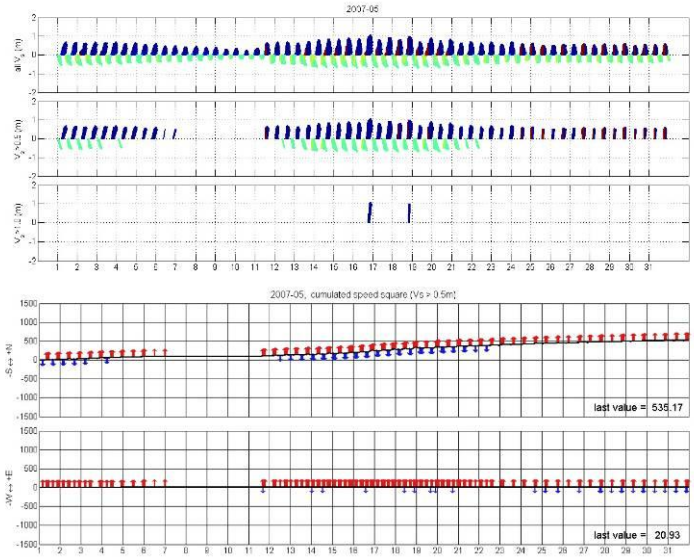


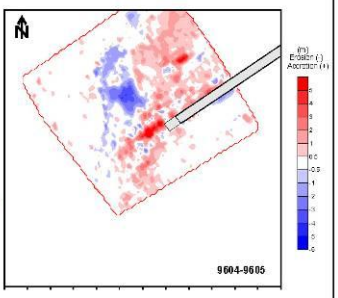
麥寮港逐月淨流能量分佈圖 (2000~2010年)

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

3. 沖蝕與海流關係

- 以參察工業區專用港管理公司 96/04～100/09 期間30筆堤頭地形資料，與同期間參察港海流資料進行關聯比對。



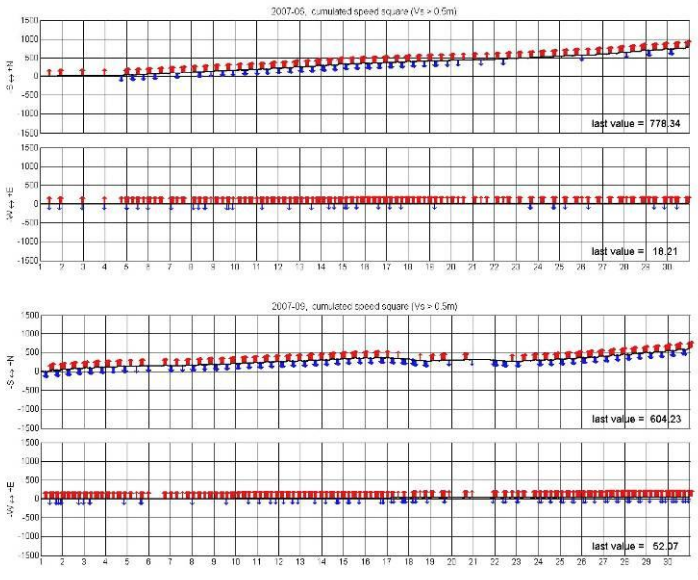


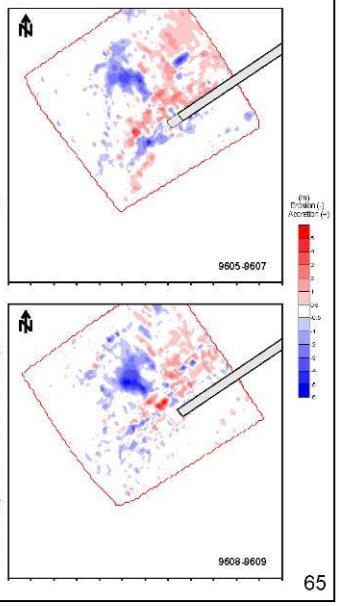
64

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

3. 沖蝕與海流關係

- 夏季期間：



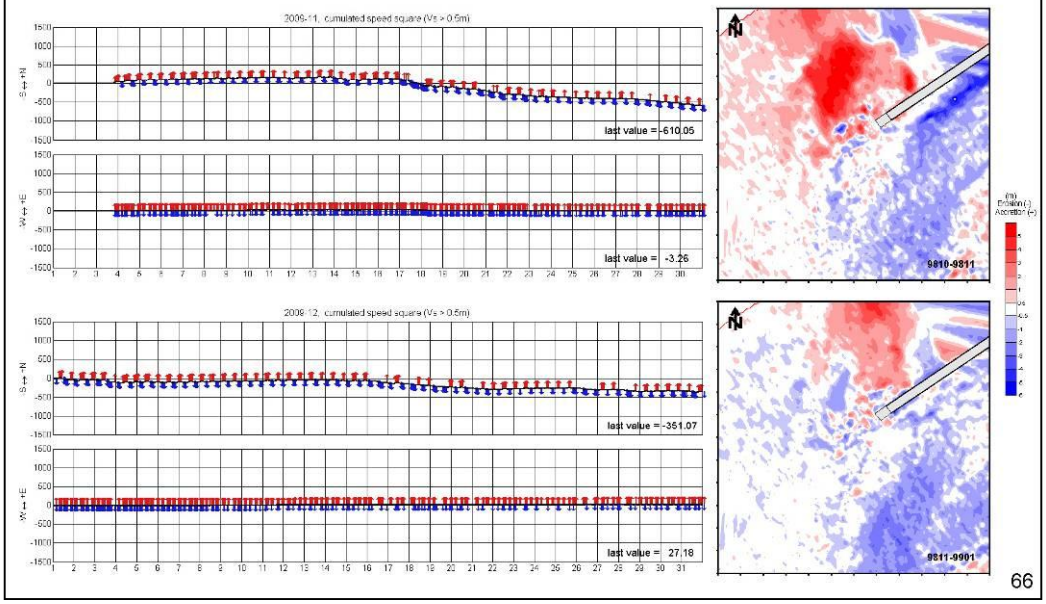


65

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

3. 沖蝕與海流關係

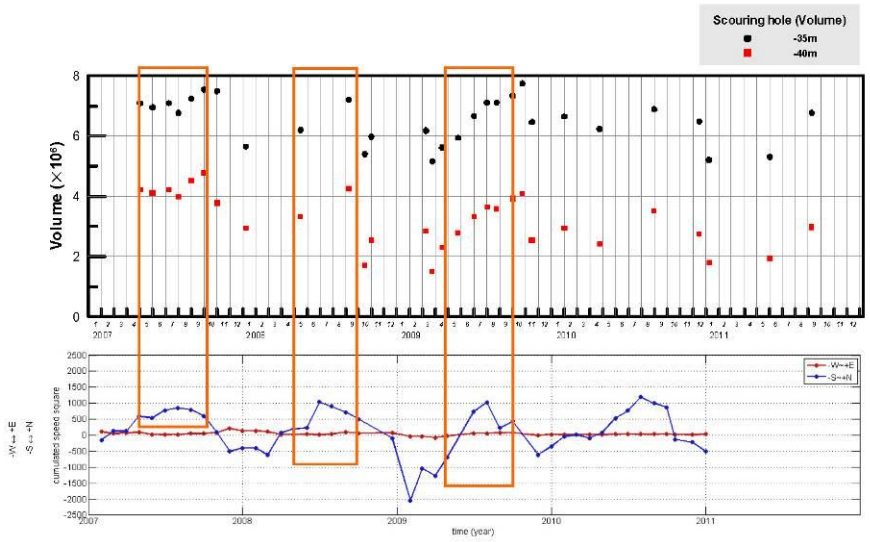
- 冬季期間：



六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

3. 沖蝕與海流關係

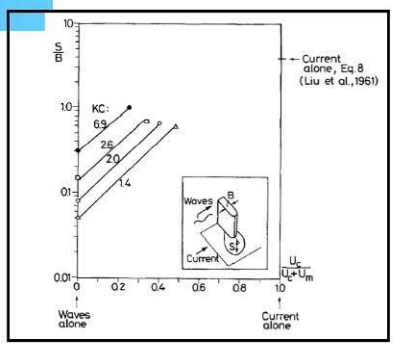
- 以麥寮工業區專用港管理公司 96/04～100/09 期間30筆堤頭地形資料，與同期間麥寮港淨流能量進行關聯比對。



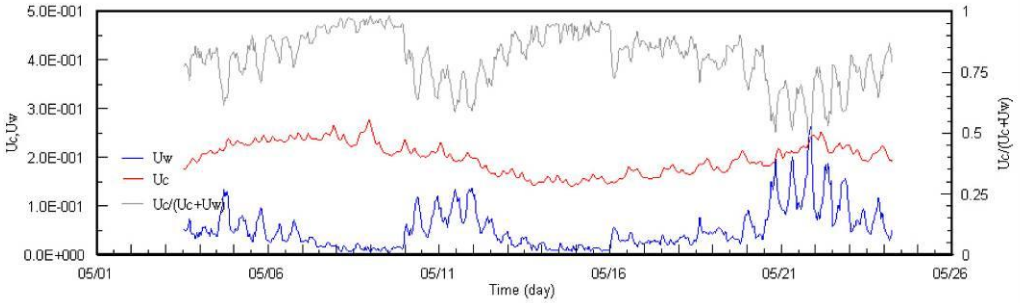
六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

4. 掏刷臨界參數

- 計算接近底床上的波浪與海流流速分佈比。
- 海流速度所佔比例平均達81%。
- Sumer and Fredsøe (1997) 成果顯示，於堤寬條件固定下，掏深程度隨海流所佔比例增加而加深。



波流交會最大掏深關係(Sumer and Fredsøe, 1997)



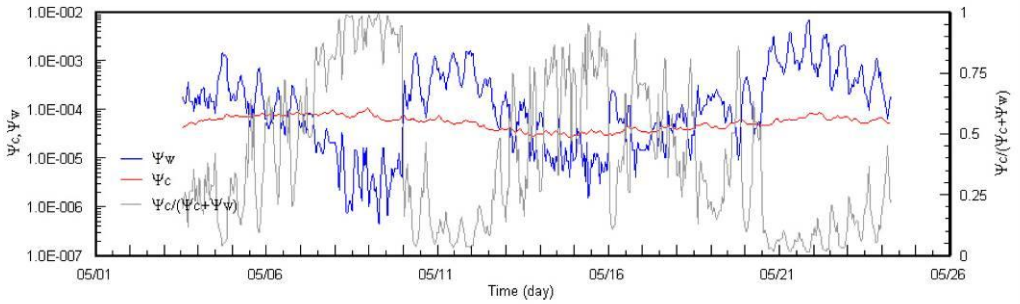
海流流速與波浪流速分佈

六、防波堤堤頭沖蝕特性分析

4. 掏刷臨界參數

- 以颱風波浪條件推估最大可動底質平均粒徑為0.4mm。
- 引入徐爾滋數(Shields number)評估海流與波浪的漂砂驅動狀態。

$$\Psi_m = \frac{\tau_m}{SgD_{50}} = \frac{U_{fm}^2}{SgD_{50}}$$



海流徐爾滋數與波浪徐爾滋數分佈

七、水工模型試驗規劃

- 今年度 (101年度) 先進行試驗規劃，而於下年度 (102年度) 才開始執行造波試驗。
- 採用夏季、冬季季風波浪及颱風波浪等條件分別造波，同步量測與分析各造波條件下之波浪分佈與防波堤堤頭流速變化。
- 分析探討在極端波浪條件作用防波堤堤頭下，波浪引發的海流特性，及其對堤頭地形沖蝕的影響。
- 規畫設計循環造流系統，評估海流條件下的模型試驗佈置。

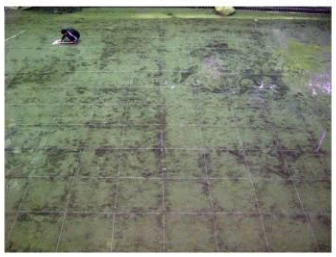
70

七、水工模型試驗規劃

1. 試驗設備儀器

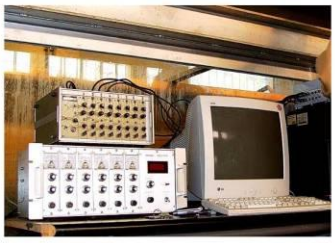
平面試驗水池 (20m×40m)

DHI 設計造波機組(5m×1.4m×2)



試驗地形描繪方式

造波控制系統



造波主機與訊號處理器

試驗地形描繪方式

71

七、水工模型試驗規劃

2. 試驗條件與比尺

1. 波浪條件

(1) 季風浪。(2) 颱風波浪：50 年重現期。

2. 水位條件

(1) 季風浪：設計水位使用平均潮位進行試驗。

(2) 颱風浪：設計水位以大潮平均高潮位進行試驗。

3. 海流條件

與波浪入射方向約呈垂直，最大流速為2~3節。

4. 試驗比尺 (初擬)

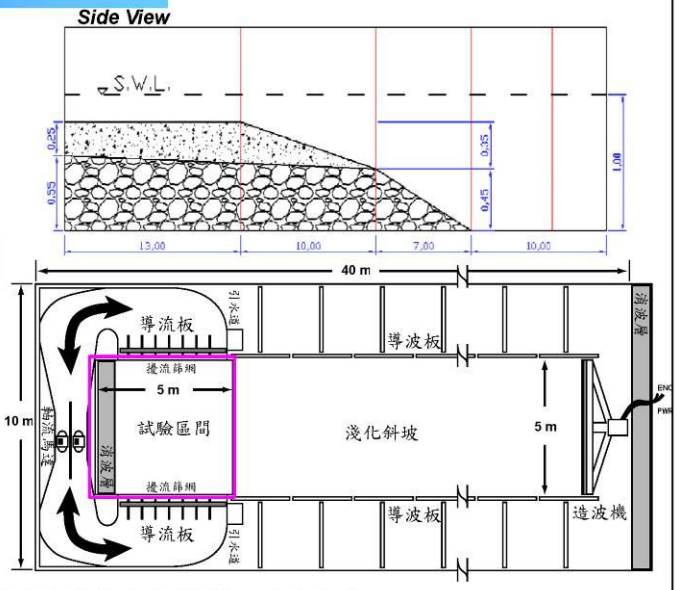
(1) 模型比尺：水平比尺 λ=1/100、垂直比尺 μ=1/100。

(2) 波浪比尺：波高比尺 $N_H = \mu$、週期比尺 $N_T = \mu^{1/2}$。

72

七、水工模型試驗規劃

3. 初步規劃佈置



- 依現有設備，另行規畫原型海流最大速度3節之造流系統。

73

簡報完畢
敬請指正

74