

105-017-7857
MOTC-IOT-104-H2DB004a

港灣結構物受異常波浪影響 分析(2/3)



交通部運輸研究所

中華民國 105 年 3 月

105-017-7857
MOTC-IOT-104-H2DB004a

港灣結構物受異常波浪影響 分析(2/3)

著 者：蔡立宏、許弘莒、李孟學、許城榕

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港灣結構物受異常波浪影響分析. (2/3) / 蔡立宏等著.

-- 初版. -- 臺北市：交通部運輸研究所，民 105.03

面；公分

ISBN 978-986-04-8186-0(平裝)

1.海岸工程 2.防波堤

443.3

105003785

港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)

著者：蔡立宏、許弘芑、李孟學、許城榕

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04)26587176

出版年月：中華民國 105 年 3 月

印刷者：禾泰印刷設計有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1010500290

ISBN：978-986-04-8186-0 (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

出版品名稱：港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)			
國際標準書號 ISBN978-986-04-8186-0 (平裝)	政府出版品統一編號 1010500290	運輸研究所出版品編號 105-017-7857	計畫編號 104-H2DB004a
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：蔡立宏 研究人員： 聯絡電話：04-26587177 傳真號碼：04-26560661	合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：許弘莒 研究人員：李孟學、許城榕、郭平巧、江朕榮、劉珺貽 地址：701 臺南市東區大學路 1 號 聯絡電話：06-2371938 分機 702		研究期間 自 104 年 2 月 至 104 年 11 月
關鍵詞：非線性波、NearCoM、COBRAS、氣候變遷			
摘要： 本研究目的為配合交通部推動科學技術發展之目標，推動海岸災害防救科技發展，精進海岸與港灣的災害防救科技研發，並配合交通部運輸研究所港研中心之掌理事項：港灣及海岸工程技術研究，進行港灣結構物未來可能遭遇的極端海象條件作研究探討，以作為未來因應措施之參酌。 本研究探討港灣結構物在歷史大波以及未來可能因氣候變遷而發生的極端波浪(extreme waves)下的受力狀況。本研究於上年度已完成臺中港港域波流場(NearCoM 模式)及臺中港防波堤受力分析(COBRAS 模式)的建置與模擬，今年度針對 IPCC AR5(2013)提出的四種氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下臺中港域波流場變化情況，模擬所得之波浪資料應用 COBRAS 模式計算結構物時變受力及時變安全穩定等問題，並加入浮標軌跡模擬與現場量測資料驗證。 NearCoM 模式已完成臺中港附近海域波流場於不同氣候變遷情境下(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.0)不同波向之颱風波浪流場模擬，結果顯示不同的氣候變遷情境下北向的颱風波浪對於北防波堤的受力分析較其他方向的波浪重要，但波浪對於港內靜穩的影響則需考慮西向颱風波浪的影響，並完成於 NearCoM 模式中加入浮標軌跡模擬(考慮水平擴散)與現場量測資料驗證。應用 COBRAS 模式完成臺中港北防波堤波場與結構物計算模式建置，在颱風波浪條件下，依據天文潮最高高潮位的情況作為原始條件，模擬波浪場的水位、流速和結構物上的波壓分布，計算波浪場特性如渦度和紊流強度和結構物受力變化情形與安定性分析計算，並依照氣候變遷影響造成水位抬升的不同情境，討論防波堤受越波量影響的安定性分析。 藉由本研究的探討與分析案例之說明，可應用於未來修訂基準之參考，另外，藉由本研究之分析過程，能提供相關港灣工程從業人員了解波浪對不同結構物受力的影響，進而能依本研究之分析步驟與方法著手評估既有碼頭構造物之安定能力。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
105 年 3 月	236	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 (解密條件： ☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密) ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: The impact analysis of coastal and harbor structure on extreme waves (2/3)			
ISBN 978-986-04-8186-0 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010500290	IOT SERIAL NUMBER 105-017-7857	PROJECT NUMBER 104-H2DB004a
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Li-Hung Tsai PROJECT STAFF: PHONE: 886-4-26587177 FAX: 886-4-26560661			PROJECT PERIOD FROM February 2015 TO November 2015
RESEARCH AGENCY: NCKU Research and Development Foundation PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hung-Chu Hsu PROJECT STAFF: Meng-Syue Li, Cheng-Jung Hsu, Ping-Chiao Kuo, Chen-Jung Chiang, Chun-Yi Liu ADDRESS: NO.1 University Road Tainan Taiwan 701, ROC PHONE: 886-6-2371938 ext.702			
KEY WORDS: Nonlinear wave, NearCoM, COBRAS, Climate change			
ABSTRACT: In order to develop and promote scientific technologies for disaster prevention, disaster reduction, and coastal-harbor engineering, we will investigate, evaluate, and consult problems of coastal structures impacted by extreme sea states. The purpose of this study is to mitigate damage due to climate change in the future. Recently, frequent disasters caused by extreme weather have become more common, and future harbor structures may be threatened by more extreme weather conditions. Therefore, the present study was carried out to investigate the force situation of harbor structures under historical extreme waves and extreme waves that may occur in the near future with climate change. Last year, the wave-current around the Port of Taichung was simulated by NearCoM model, and the wave forces on the breakwater and the stability of the breakwater have been calculated by COBRAS model. In this year, we applied the NearCoM model to simulate the wave-current around the Port of Taichung under four kinds of climate change conditions, which are RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 defined by IPCC AR5(2013). Second, the temporal variation of wave forces on the breakwater and the stability of the breakwater will be obtained by COBRAS model. Additionally, the drift simulation will be verified by field data. Finally, we hope the results can be used in the decision making of the harbor companies when a breakwater will be built. Wave and current fields in the Taichung harbor area were simulated under four kinds of climate change conditions and different initial Typhoon waves. The simulation results showed that the Northern typhoon wave is more important than other directional typhoon waves for force analysis. The Western typhoon will cause instability in the Taichung harbor. We obtained validation results of current in calculation and observation by drifter simulation. The elevation, velocity, and pressure distribution to characterize wave field, analyze force variation on structure, and apply overtopping calculation under four kinds of climate change conditions have been calculated. The project is executed at the first year as follows: establishing the inspecting procedure and evaluating standard, drawing up an appropriate report, which contains wave-structure interaction on extreme waves. Finally the study achievements would provide ports and other authorities with an appropriate assessment and evaluating strategy of harbor stability analysis.			
DATE OF PUBLICATION March 2016	NUMBER OF PAGES 236	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)

目 錄

摘 要	I
目 錄	III
表 目 錄	V
圖 目 錄	VII
第一章 前言	1-1
1.1 研究動機及目的	1-1
1.2 前期計畫研究成果	1-7
1.3 研究範圍與對象	1-8
1.4 研究項目	1-9
第二章 基本資料蒐集與分析	2-1
2.1 臺中港區概況	2-1
2.2 氣象資料之統計分析	2-4
2.3 海象資料	2-9
2.3.1 風	2-9
2.3.2 海流	2-11
2.3.3 波浪	2-13
2.3.4 潮位	2-20
2.4 颱風資料	2-22
2.5 氣候變遷資料	2-27
第三章 平面波流場分析	3-1

3.1 模式範圍及參數設定.....	3-2
3.2 氣候變遷情境下臺中港區受颱風影響之波流場模擬	3-5
3.3 臺中港區未來氣候變遷情可能發生之波流場模擬	3-12
3.4 波流場模式校驗-臺中港附近海域浮標軌跡模擬	3-17
第四章 結構物受力分析	4-1
4.1 波場與結構物作用計算模式	4-1
4.2 模式建置.....	4-1
4.3 氣候變遷造成水位抬升之影響評估	4-13
4.4 安定性分析計算.....	4-21
4.5 越波量計算.....	4-31
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論.....	5-1
5.2 建議.....	5-4
5.3 成果效益與後續應用情形	5-4
參考文獻.....	參-1
附錄一 臺中港區之海氣象資料統計表.....	附錄 1-1
附錄二 模式介紹	附錄 2-1
附錄三 各種波浪條件下之滑動安全係數與傾倒安全係數.....	附錄 3-1
附錄四 符號說明表.....	附錄 4-1
附錄五 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 5-1
附錄六 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 6-1
附錄七 期末報告簡報資料.....	附錄 7-1

表 目 錄

表 1-1 花蓮港及蘇澳港 1951 年至 2012 年颱風侵襲次數趨勢	1-4
表 2-1 臺中港附近海域海氣象資料蒐集概況表	2-3
表 2-2 臺中氣象站 2004-2014 年之氣象觀測資料統計表	2-5
表 2-3 梧棲氣象站 2004-2014 年之氣象觀測資料統計表	2-5
表 2-4 臺中港 2002 年至 2014 年風之風速及風向統計表	2-9
表 2-5 臺中港 2004 年至 2014 年海流之流速及流向統計表	2-11
表 2-6 臺中港 2004 年至 2014 年示性波高、週期及波向資料統計表	2-14
表 2-7 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表	2-16
表 2-7(續 1) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表	2-17
表 2-7(續 2) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表	2-18
表 2-7(續 3) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表	2-19
表 2-8 臺中港外海颱風波迴歸分析統計表	2-19
表 2-9 臺中港 2003-2014 年潮位資料統計	2-21
表 2-10 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表	2-23
表 2-10(續 1) 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表	2-24
表 2-10(續 2) 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表	2-25
表 2-11 1998 年至 2015 年期間颱風路徑分類統計表	2-26
表 3-1 大區域海潮流模式之格網及計算條件	3-4
表 3-2 各迴歸期之颱風波浪條件	3-6

表 3-3 四種氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100 年).....	3-7
表 3-4 模式模擬在不同颱風波浪迴歸期下在各波向的最大示性 波高表.....	3-11
表 3-5 受氣候變遷之各迴歸期颱風波浪條件	3-12
表 3-6 模式模擬受未來氣候變遷不同颱風波浪迴歸期下在各波 向的最大示性波高表.....	3-16
表 3-7 每 10 分鐘風速風向平均資料	3-20
表 4-1 模式建置之網格設定	4-6
表 4-2 四種標準斷面之設計水深和胸牆頂高	4-14
表 4-3 防波堤前 100 公尺最大波浪發生斷面與波浪條件	4-15

圖 目 錄

圖 1.1 1992 年至 2013 年全球各海域平均海平面升降變化 (資料來源：AVISO， http://www.aviso.oceanobs.com)	1-2
圖 1.2 全球平均之海平面上升趨勢(資料來源：Shum and Kuo, 2011).....	1-3
圖 1.3 未來颱風可能發生個數與強度示意圖(日本防災科學研究所)	1-4
圖 1.4 臺中港附近海域.....	1-9
圖 2.1 臺中港原堤堤頭沉箱斷面圖 (朱等人，2002).....	2-2
圖 2.2 臺中港北防波堤延伸 850m 堤頭斷面圖 (朱等人，2002).....	2-2
圖 2.3 臺中港北防波堤延伸 480m 斷面圖 (宇泰工程顧問公司，1999)	2-2
圖 2.4 臺中港附近海域海氣象資料之觀測站位置圖	2-3
圖 2.5 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均氣溫、最高氣溫及最低氣溫之月統計圖	2-6
圖 2.6 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均風速、最多風向及瞬間最大風速之月統計圖.....	2-6
圖 2.7 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均氣壓之月統計圖	2-7
圖 2.8 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均氣溫、最高氣溫及最低氣溫之月統計圖.....	2-7
圖 2.9 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均風速、最多風向及瞬間最大風速之月統計圖.....	2-8
圖 2.10 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均氣壓之月統計圖	2-8

圖 2.11 臺中港 2002 年至 2014 年風速及最大風速之月統計圖.....	2-10
圖 2.12 臺中港 2002 年至 2014 年風速及風向之月統計分佈圖	2-10
圖 2.13 臺中港 2004 年至 2014 年海流流速及 最大流速之月統計圖	2-12
圖 2.14 臺中港 2004 年至 2014 年海流流速及流向之月統計分佈圖	2-12
圖 2.15 臺中港 2004 年至 2014 年平均示性波高、平均週期及 最大示性波高之月統計圖	2-15
圖 2.16 臺中港 2004 年至 2014 年平均示性波高、平均週期及 波向之月統計分佈圖	2-15
圖 2.17 臺中港 2003 年至 2014 年最大潮差、大潮平均潮差及 平均潮差之月統計圖	2-20
圖 2.18 颱風路徑分類圖	2-26
圖 2.19 RCPs 情境下全球海平面上升量	2-29
圖 3.1 研究方法流程圖	3-2
圖 3.2 計畫範圍	3-3
圖 3.3 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖	3-3
圖 3.4 臺中港海象測站示意圖	3-4
圖 3.5 NearCoM 模式參數率定圖	3-5
圖 3.6 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=7.2\text{m}$ ，示性週期 $T=11.3\text{s}$ ，波向 N)	3-7
圖 3.7 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=5.7\text{m}$ ，示性週期 $T=10.0\text{s}$ ，波向	

W).....	3-8
圖 3.8 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=4.7\text{m}$ ，示性週期 $T=9.1\text{s}$ ，波向 SW).....	3-8
圖 3.9 臺中港附近海域 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.7\text{s}$ ，波向 N).....	3-9
圖 3.10 臺中港附近海域 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=8.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.2\text{s}$ ，波向 N).....	3-9
圖 3.11 臺中港附近海域 250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=8.6\text{m}$ ，示性週期 $T=12.3\text{s}$ ，波向 N).....	3-10
圖 3.12 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=11.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.1\text{s}$ ，波向 N).....	3-13
圖 3.13 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=9.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.5\text{s}$ ，波向 W).....	3-13
圖 3.14 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.4\text{s}$ ，波向 SW).....	3-14
圖 3.15 臺中港附近海域受氣候變遷影響 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=12.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.6\text{s}$ ，波向 N).....	3-14
圖 3.16 臺中港附近海域受氣候變遷影響 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=13.9\text{m}$ ，示性週	

期 $T=15.3s$ ，波向 N)	3-15
圖 3.17 臺中港附近海域受氣候變遷影響 250 年迴歸期颱風波浪 波流場模擬圖(模擬條件：示性波高 $H=14.2m$ ，示性週 期 $T=15.4s$ ，波向 N)	3-15
圖 3.18 臺中港北防波堤漲潮(左)及退潮(右)時段風玫瑰圖。(引 自蔡、黃 2014)	3-17
圖 3.19 浮標軌跡模擬圖(平均風速: $1.26m/s$ ，實線: NearCoM 模 擬結果，點: 蔡與黃(2014)實測資料)	3-18
圖 3.20 浮標軌跡模擬圖(平均風速: $5.43m/s$ ，實線: NearCoM 模 擬，點: 蔡與黃(2014)實測)	3-18
圖 3.21 含水平擴散浮標軌跡模擬(平均風速: $1.26m/s$ ，實線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)	3-19
圖 3.22 含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖(平均風速: $5.43m/s$ ，實 線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)	3-19
圖 4.1 臺中港北防波堤擴建工程平面佈置圖(交通部運輸研究， 1999)	4-7
圖 4.2 波高計設置圖	4-7
圖 4.3 結構物設置圖	4-8
圖 4.4 臺中港北防波堤施工設計規範流程圖(交通部運輸研究， 1999)	4-8
圖 4.5 水平方向 2 公尺處(第一支波高計)之水位變化示意圖	4-9
圖 4.6 零上切法波高與週期變化示意圖	4-9
圖 4.7 堤前波高計之波高和週期分佈圖	4-9
圖 4.8 流速分布示意圖	4-10

圖 4.9 正規化紊流強度示意圖.....	4-11
圖 4.10 正規化渦度示意圖.....	4-12
圖 4.11 北外廓防波堤延伸段平面圖(交通部運輸研究，1999).....	4-16
圖 4.12 北防波堤延伸段 0~100 公尺斷面 I 之標準斷面圖(交通部 運輸研究，1999).....	4-16
圖 4.13 北防波堤延伸段 100~130 公尺斷面 II 之標準斷面圖(交 通部運輸研究，1999).....	4-17
圖 4.14 北防波堤延伸段 130~440 公尺斷面 III 之標準斷面圖(交 通部運輸研究，1999).....	4-17
圖 4.15 北防波堤延伸段 440~480 公尺斷面 IV 之標準斷面圖(交 通部運輸研究，1999).....	4-17
圖 4.16 斷面 I 數值模式地形與結構物建置	4-18
圖 4.17 斷面 IV 數值模式地形與結構物建置	4-19
圖 4.18 各種波浪條件之堤前水位波高圖.....	4-20
圖 4.19 各種波浪條件之堤前水位週期圖.....	4-20
圖 4.20 防波堤受力示意圖.....	4-25
圖 4.21 case1 各種作用力計算.....	4-26
圖 4.22 不同情境下波浪作用之水平合力計算方式比較圖	4-27
圖 4.23 case21 波浪作用之水平合力計算方式比較圖.....	4-27
圖 4.24 不同情境水平波浪作用力差異量比較圖	4-28
圖 4.25 不同情境下滑動安全係數時間序列圖.....	4-28
圖 4.26 不同情境下滑動安全係數比較圖.....	4-29

圖 4.27 不同情境下傾倒安全係數時間序列圖.....	4-29
圖 4.28 不同情境下傾倒安全係數比較圖.....	4-30
圖 4.29 水位分布和壓力分布圖 (時間 30、40、80 和 100 秒).....	4-30
圖 4.30 case1 之瞬時越波量圖.....	4-31
圖 4.31 case1 之逐時累積越波量圖.....	4-32
圖 4.32 不同情境之最大瞬時越波量圖.....	4-32
圖 4.33 不同情境之累積越波量.....	4-32

第一章 前言

1.1 研究動機及目的

近年來，氣候變遷所造成的極端海氣象現象已對全球造成嚴重之影響，臺灣亦不例外，如 104 年侵襲臺灣的蘇迪勒、天鵝、杜鵑之中度極強度颱風，臺灣處於西北太平洋地區颱風侵襲的主要路徑上，極易受到天然災害影響。雖然我國的應變救災工作近年來已有明顯的成效，然而在氣候及環境變遷的大環境下，災害風險可能更高。現有的減災規劃、工程設施及國土環境政策等也可能面臨更為嚴峻的挑戰，未來可能出現超乎現有經驗之大規模災害或新類型災害，政策規劃與決策者必須積極面對此一變化及趨勢。爰此，政府各部門已積極推動相關氣候變遷調適之政策規劃與擬定策略。極端的氣候現象不斷地在世界各地及臺灣造成嚴重的威脅與傷害，而且發生事件的頻率與侵襲強度有逐漸增加的趨勢。聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)集合全球頂尖氣候、海洋、經濟及各界專家，定期發表全球氣候變遷評估報告，為各國政府面對未來氣候變遷的衝擊，制定與推動相關政策的重要參考資訊。IPCC AR4(2007) 推估 21 世紀末之氣候暖化程度，推測未來全球平均海平面將會持續上升，如圖 1.1，且其海平面上升很可能會超過 1901 年至 2010 年間所觀測的 0.17~0.21 公尺。換算速率最大約每年 1.9 公釐，而在近 20 年間，全球平均海平面上升速率約為每年 3 公釐(Shun and Kuo, 2011)，如圖 1.2。在最新的 IPCC AR5 (2013) (第五次評估報告—第一工作小組報告) 報告中檢視許多以獨立科學分析為基礎的氣候變遷新證據，包括氣候係統的觀測、古氣候文獻、氣候過程的理論研究氣候模式的模擬。IPCC 指出已確定未來氣候系統會持續暖化。從 1950 年開始，許多被觀測到的變遷訊號是不尋常的或是在過去數十年到數千年都未曾發生過的。未來大氣和海洋暖化趨勢，冰雪的數量減少，導致海平面上升且溫室氣體的濃度也增加。而氣候變遷亦可能使得暴風雨強度增加 (Carter et al. 1988)。為因應氣候變遷可能帶來的危害，國際上曾進行模擬在氣候變

遷的趨勢變化下，近岸區域波浪場和海岸線可能的變化，探討地區性的海岸防護措施。Dreier et al. (2013)以波羅的海為範圍，計算在氣候變遷情境下可能產生的極端波浪條件與平均變化趨勢。Mori et al. (2013)以統計方法和降尺度法計算全球尺度的氣候變遷情況下，探討長期的海表面溫度，海平面上升與相關波浪特性，計算結果顯示未來一百年，海平面上升 0.27 公尺，未來有義波高的變化可能幅度最大達 $\pm 15\%$ 。Hogarth (2014)利用 PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) 的歷史水位資料預估水位上升趨勢，認為現階段的水位上升加速率須修正為 0.01 ± 0.008 公厘/年。Mase(2015) 考慮氣候變遷影響的水位抬升、波浪和暴潮情況下，利用可靠性分析研究海堤堤頂高度、堤趾深度和坡度的破壞可能性。

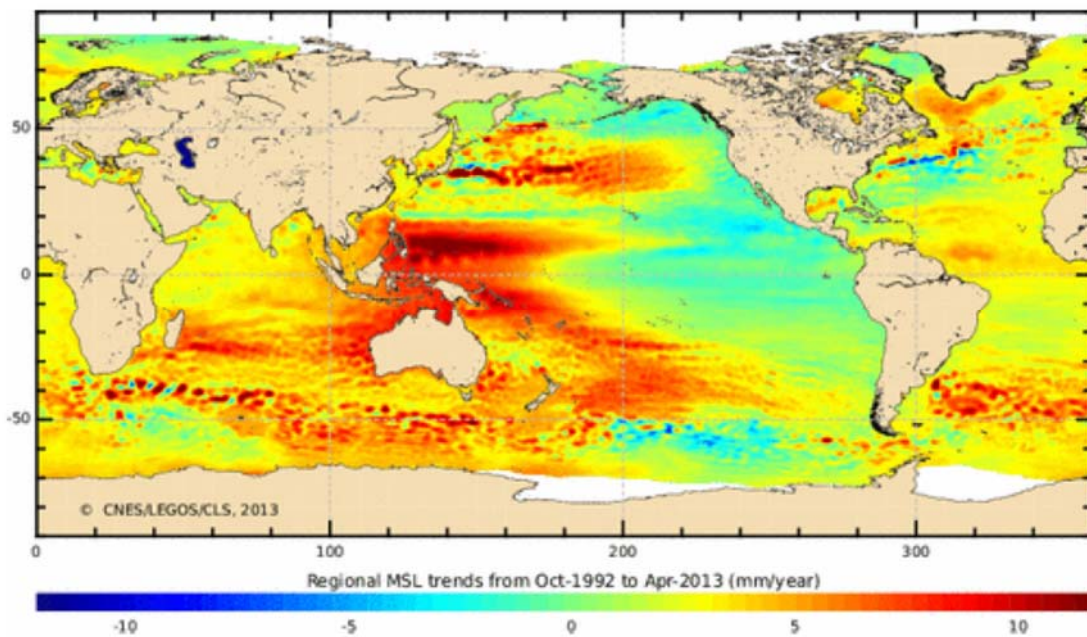


圖1.1 1992年至2013年全球各海域平均海平面升降變化
(資料來源：AVISO，<http://www.aviso.oceanobs.com>)

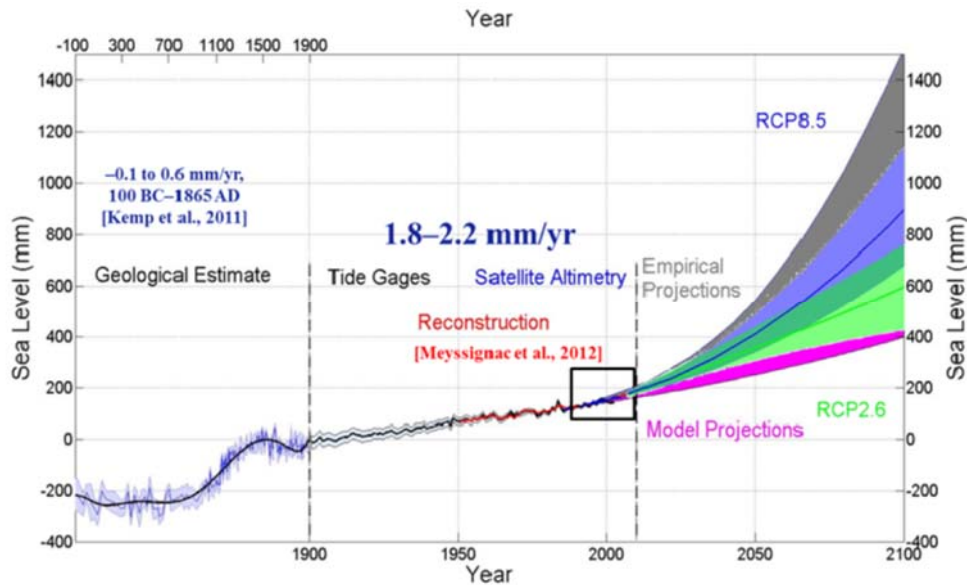


圖1.2 全球平均之海平面上升趨勢(資料來源：Shum and Kuo, 2011)

由許多文獻顯示，世界各地的海象條件愈來愈嚴峻，如 Allan 和 Komar (2001) 收集自 1978 至 2001 年美國臨太平洋西北岸地區的波浪浮標資料，發現波高以每年 0.032m 的速度增加。Sasaki 等人(2007) 發現西北太平洋夏季月平均的波高以每年 0.4m 速度增加。依據中央氣象局統計資料顯示侵臺的颱風由一百年平均 3.5 次，於近十年(1999~2008 年)增加為平均 6.7 次，颱風強度及路徑與現有模式預測的誤差值及誤差頻率均增加。黃(2011)以 SWAN 模式建立臺灣四周海域 60 年(1948~2008 年)的波候資料，以其資料分析極端海象發生頻率，顯示大波發生次數隨著時間越來越多。日本氣象廳的資料顯示，未來氣候變遷的影響之下，颱風的個數可能會減少，但是強度卻會增加，如圖 1.3 所示；日本防災科學研究所進行未來颱風災害的模擬，結果顯示於颱風眼周邊的風速將增加 20~30%，潮位也可能上升 50 公分左右 (徐與王，2009)。在臺灣氣候變遷相關研究中，葉(2012)發現全球溫室效應增強，氣候變遷現象風能潛勢，臺灣西部離岸未來整體風力可能因為氣候變遷影響造成東北季風減弱，趙(2012)發現由於氣候變遷下使全國水文循環系統遭到改變，臺灣因地理位置關係，洪水量增加、暴潮及海岸侵蝕等致災因子日益嚴重，上游集水區河川短促，陡坡急流及地質問題容易造成坍塌、土石流等土砂災害。江等人(2014)針對近 60 年內侵襲花蓮

港與蘇澳港颱風做相關統計與趨勢分析，發現只有中度颱風侵襲次數有隨著時間增加，輕度颱風與強烈颱風則沒有較明顯的增加或減少，如表 1-1 所示。許與黃(2012) 針對臺灣西北海域進行模擬研究，評估 2020 年至 2039 年海平面變遷量變動範圍約在 4.02 至 11.82 公分，颱風最大波高可能增加 50.3%，颱風最大潮位(暴潮+天文潮)可能增加 38%。

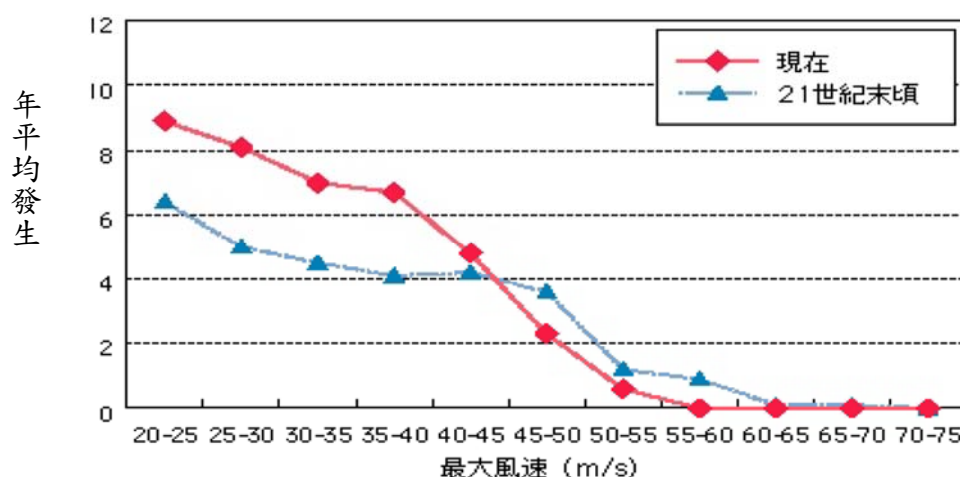


圖1.3 未來颱風可能發生個數與強度示意圖(日本防災科學研究所)

表1-1 花蓮港及蘇澳港1951年至2012年颱風侵襲次數趨勢

花蓮港	門檻值300km	門檻值500km	門檻值1000km
所有熱帶低壓	0.0141	0.0025	0.0180
強烈颱風	0.0067	-0.0071	-0.0024
輕度颱風	0.0035	0.0020	0.0061
中度颱風	0.0072	0.0215	0.0221

蘇澳港	門檻值300km	門檻值500km	門檻值1000km
所有熱帶低壓	0.0142	-0.0016	0.0171
強烈颱風	0.0028	-0.0033	-0.0028
輕度颱風	0.0001	-0.0008	-0.0005
中度颱風	0.0149	0.0172	0.0241

資料來源：許泰文、黃清哲，「強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(1/2)」，經濟部水利署，2012 年。

故氣候變遷的效應在 21 世紀仍會持續發酵，因此探討氣候變遷下的極端波浪以及其所產生之波力對於港灣結構物之影響即為本研究之目的。往昔針對港灣結構物的設計均利用駐波波壓公式來計算，然對於極端波浪與海嘯波以及其所產生之衝擊力對結構物之受力行為是與傳統利用駐波波壓計算所得之波力全然不同，因此，有必要針對極端波浪及其所產生之波力對結構物之受力行為進行深入研究。

針對防波堤設計方面，Oumeraci (1994) 以垂直防波堤實際的破壞經驗的基礎上，提出了一個綜合的設計方法。Takayama (1994) 和 Kobayashi and Demirbilek (1995) 描述了許多國家的防波堤開發設計，波力和動態影響。Burcharth (1998、2002) 針對沉箱結構安全提出整體穩定性失效模式的部分安全係數系統。Goda and Takahashi (2001)則提出新的設計概念，如性能、設計的穩定性及風險分析的新工具，以用於垂直防波堤設計。目前針對防波堤的性能設計，很少包括全球氣候變遷的影響，僅 Okayasu and Sakai (2006) 提出一種方法來計算沉箱考慮海平面上升的最佳截面，此方法已在垂直沉箱防波堤被廣泛使用，尤其在深水區域。

早期在堤防的越波研究主要是基於物理模型試驗，而試驗則被限制在只有波浪的情況，而目前估算堤防的越波的經驗公式則由 Pullen et al. (2007)所提出的。而最近數值模式(Boussinesq 和 Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)已經被成功應用至由波浪所造成非定常越流問題，甚至是波浪和暴潮所造成的越流問題，如 Reeve et al. (2008)、Losada et al. (2008) 和 Lynett et al. (2010)。而 van der Meer et al. (2006、2008) 則利用 Dutch Wave Overtopping Simulator 來探討有水草覆蓋的堤防的越波問題。

在近岸結構物受波浪作用力的交互作用問題上，Sollitt and Cross(1972)將線性波作用在透水性防波堤傳遞情形以線性的邊界值問題處理。Vidal 等人(1988)提出半經驗理論描述孤立波通過透水性防波堤。Liu and Wen(1997)推導出一組水深積分方程式，描述長波通過透水

性結構物。然而，水深積分方程式會損失波浪場內物理量的垂直分佈，但是波浪受地形及結構物交互作用的問題，如淺化、碎波和反射的過程都與波浪場內的速度與壓力分佈有顯著的關係，且實際工程問題面對複雜的幾何結構，增加解析方法研究的困難和應用範圍。因此在數值方法上，Sulisz(1985)根據 Sollitt and Cross(1972)的成果發展邊界元素法，研究波浪作用在不同形狀的複合式防波堤，由於引入勢能流理論的關係，因此無法適當的描述波浪碎波過程。Kobayashi and Wurjanto(1990)發展有限差分法研究波浪與結構物的交互作用。考慮波浪和結構物交互作用可能發生的碎波過程和結構物的透水性，Lin and Liu(1997)發展的 COBRAS 模式，Hsu et al.(2002)進一步以透水性複合式防波堤水工試驗數據比較得到良好的模擬結果，謝等人(2008)利用此模式研究波浪與透水結構物之互制作用，計算日本港灣技術研究所發展之半圓型防波堤結構物，而謝等人(2010)將此模式應用至波浪與近岸潛沒透水結構物之交互作用，討論波浪與三角型透水淺堤互制的波浪變型和流場。

波浪從深海傳遞至近岸碎波時，若是捲浪型碎波由於捲入大量空氣，捲舌過程中形成氣袋，作用於結構物時因而形成衝擊波，產生極大之作用力，因此是結構安定需要考慮的因素之一，在波浪作用力的研究，最早是 Stevenson(1874)和 Gaillard(1904)首次提出相關的觀測資料，引起後續有諸多文章討論近岸結構物設計時的波浪作用力評估，但是近岸波浪演化過程牽涉到可能的波浪碎波問題與衝擊波產生，而碎波的動力機制與衝擊波本身是一隨機過程造成研究上的困難，Oumeraci et al.(2001)集合相關研究提出準靜態(quasi-state)和衝擊波壓的研究方法。在過去的波力計算方法上 Hiroi(1920)提出無碎波情況下的波壓公式計算平均波壓，Sainflou(1928)發現非線性駐波理論和波壓現場實測結果的一致性，在不考慮碎波情況下提出其波壓公式，Bagnold(1939)發現衝擊波壓在相同條件下的重複性試驗時仍然有顯著的變化，而波壓對時間積分的結果則相對具重複性，同時指出波浪演化過程至結構物前碎波並衝擊結構物牆面時，波浪碎波捲入的氣袋大小對衝擊波壓量化的重要性，Minikin(1963)依照 Bagnold(1939)發展碎波情況下的衝擊波壓

公式，Goda(1974)發展適用於一般情況與碎波情況的合田波壓公式，有鑒於過去波壓公式適用範圍的限制，Takahashi et al.(1993)則以合田波壓公式(1974)為基礎，引入衝擊波相關係數應用在衝擊波力的計算上。Blackmore and Hewson(1984)在英格蘭海域西南方量測現場的衝擊波壓資料，發現現場實測的最大衝擊波壓往往低於水工模型試驗結果，其最主要的原因是氣袋的比例多寡，並以氣袋的比例多寡修正波壓公式，Kırkgöz (1995)執行水工模型試驗研究波浪碎波於結構物前產生的波浪作用力大小，其試驗區分不同碎波型態與碎波發生時間，並指出深水波情況波浪尖銳度對波壓影響的相對重要性與不同斜坡情況最大衝擊波壓產生的時間點，而淺水波時水深的些微變化對衝擊波壓會產生顯著的影響。經由聯合的大型水工模型試驗計畫與大尺度的現場觀測結果，Klammer et al.(1996)和 Kortenhaus et al.(1994)分別就水平方向的衝擊波力和垂直方向的上揚力提出修正公式，而 Allsop et al. (1996)根據坡度 0.02，發生機率 1/250，有義波高除以水深之相對水深值為 0.5 至 2 的衝擊波實驗數據提出直立壁衝擊波力預測，而 Oumeraci et al. (2001)推薦此公式作為工程應用前期設計的參考公式，直至 Cuomo et al.(2010)根據 VOWS 計畫(Violent Overtopping by Waves at Seawalls)架構下之 CIEM/LIM 大型水槽之實驗數據，分別就衝擊波造成的作用力與準靜態情況的波浪作用力提出更完備的衝擊波力公式。

1.2 前期計畫研究成果

前期計畫研究成果為本計畫之重要基礎，茲將相關成果摘要說明如下：

為配合交通部推動科學技術發展之目標，推動海岸災害防救科技發展，精進海岸與港灣的災害防救科技研發，並配合本所港研中心之掌理事項：港灣及海岸工程技術研究。將進行港灣結構物未來可能遭遇的極端海象條件作研究，探討臺中港結構物受異常波浪（歷年大波、未來受氣候變遷可能發生的極端波浪及海嘯波）之作用，及其受力變化的情形，以作為未來因應措施之參酌。

103年度(第一年)計畫成果如下:

(1)完成NearCoM模式臺中港附近海域波流場模式設置，模式參數率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為0.0035，渦動黏性係數為0.001。NearCoM模式模擬的潮位與流速與實測資料有不錯的吻合度，驗證本模式可適切模擬臺中港區域海潮流變化。

(2)完成COBRAS模式應用於波浪受結構物以及地形影響之波場數值模擬，並以臺中港模型縮尺1:36之水工模型試驗資料，驗證一般波浪條件和颱風波浪條件的水位與波壓，模式結果與試驗資料具高度的一致性。

(3)完成COBRAS模式以臺中港北防波堤原型建置數值模式，模擬颱風波浪條件下，模擬天文潮最高高潮位和天文潮最低低潮位的情況，波浪場的水位、流速、結構物上的波壓分布，結構物受力變化情形、越波量及滑動、傾倒安定性。

1.3 研究範圍與對象

本計畫主要針對臺中港附近海域環境進行分析，其工作範圍擬以圖 1.4 為主，北起大甲溪南岸，南至大肚溪口。



圖1.4 臺中港附近海域

1.4 研究項目

本研究為三年期計畫，擬探討結構物受異常波浪（歷年大波、未來受氣候變遷可能發生的極端波浪及海嘯波）之作用，及其受力變化的情形。第一年將收集目標港區內相關海氣象資料，並應用波流場數值模式，設置臺中港海域計算模式，並以現今海氣象條件進行模擬分析。第二年工作為蒐集並分析目標港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性，並利用第一年設置的水理模式，以歷年大波及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪，作為模擬條件，並進行結構物穩定度相關分析。第三年將針對目標港區設置海嘯波數值模式，並探討海嘯波對港灣結構物之影響。

103 年度（第一年）：

- 1.蒐集並分析目標港區波浪、海流、風、地形及防波堤等結構物設計斷面。
- 2.波浪受結構物以及地形影響之波場數值模式的建置與驗證。
- 3.探討不同波浪條件下與港灣結構物互制作用。
- 4.探討不同波浪條件下之溯升或越波與港灣結構物互制作用。
- 5.分析結構物受不同波浪條件作用下之受力情形。

104 年度（第二年）：

- 1.蒐集並分析目標港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性。
- 2.利用本所提供之目標港區附近現場調查資料校驗港灣結構物附近波、流場數值模式。
- 3.利用數值模式分析歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪作用下，對防波堤之受力情形。
- 4.利用防波堤受歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生之極端波浪作用受力下，分析其安全穩定。

第二章 基本資料蒐集與分析

2.1 臺中港區概況

臺中港位於臺中市西側之梧棲區，港區範圍北起大甲溪南岸，南至大肚溪北岸，東以臨港路為界，西臨臺灣海峽，南北長 12.5 公里，東西寬 2.5 至 4.5 公里，總面積約 3,793 公頃，其中陸域面積佔 2,820 公頃，水域面積佔 973 公頃，包括商港、工業港及漁港三部份。

臺中港於 1976 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，1990～1995 年先延長北防波堤 850 公尺，其原北防波堤堤頭及延伸 850 公尺之堤頭斷面，詳圖 2.1、2.2 所示，2000～2002 年再延長北防波堤 480 公尺，其防波堤斷面圖如圖 2.3 所示。

臺中港發展至今已興建之營運碼頭共 49 座，總長度 11,936 公尺，貨櫃 8 座、客運 1 座、穀類 2 座、煤炭 4 座、管道 8 座、水泥 3 座、散雜貨 21 座、LNG1 座及廢鐵 1 座。碼頭後線儲轉區之倉棧設施有雜貨通棧 13 座，水泥筒倉 22 座，堆貨場 8 處，貨櫃場 3 處，液體貨儲槽 255 座，可提供業者良好的投資環境，棧埠裝卸及倉儲業務多開放民間投資經營，全港擁有許多自動化的裝卸倉儲設備，作業效率高。其地處於臺灣南北交通的中心，有快速道路連接清泉崗國際機場，有利海空聯運；更位於上海到香港航運的中點，與大陸東南沿海各港呈輻射狀等距展開，距離最近，在未來兩岸直航具有最佳優勢。

本研究收集自 1999 年至 2014 年臺中港港區附近之海氣象觀測資料，觀測站計有中央氣象局之臺中及梧棲氣象站；本所港灣技術研究中心之臺中港海象資料，觀測項目包括：風、氣溫、氣壓、波浪、海流及潮位等項目，詳細內容請參考表 2-1，各觀測站位置請參考圖 2.4，歷年之統計結果請參考附錄一。

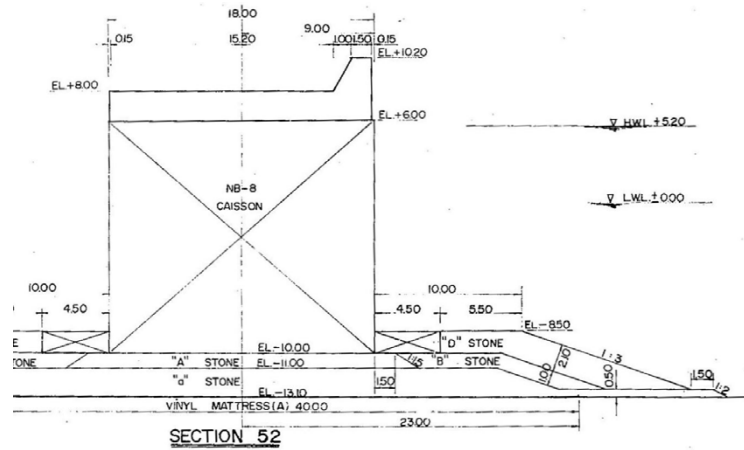


圖 2.1 臺中港原堤堤頭沉箱斷面圖 (朱等人，2002)

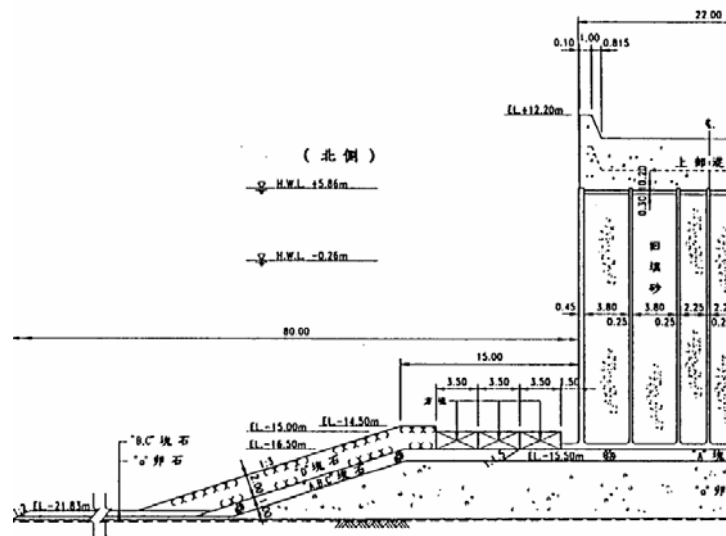


圖 2.2 臺中港北防波堤延伸 850m 堤頭斷面圖 (朱等人，2002)

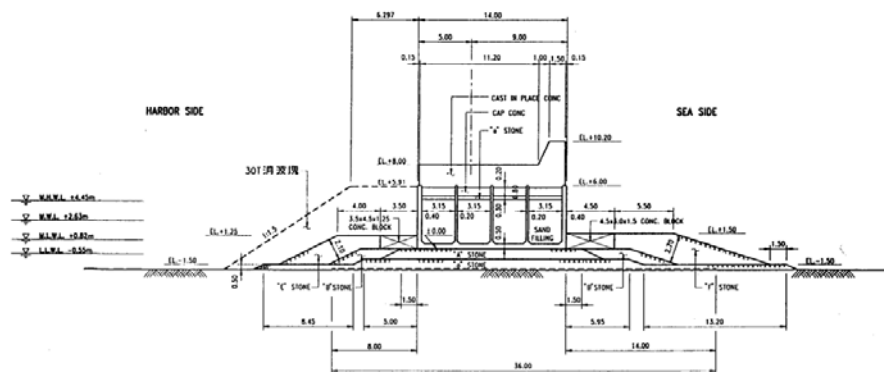
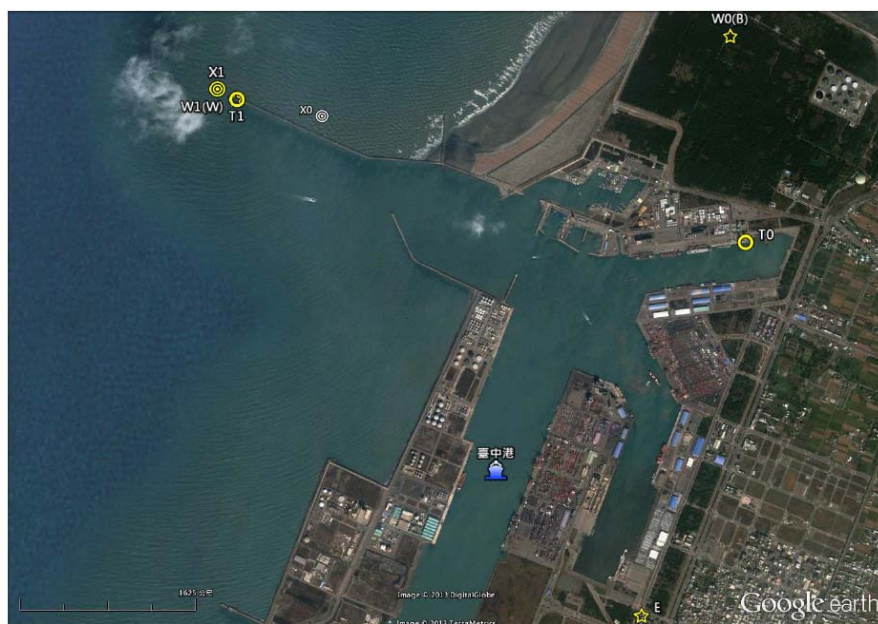


圖 2.3 臺中港北防波堤延伸 480m 斷面圖 (宇泰工程顧問公司，1999)

表 2-1 臺中港附近海域海氣象資料蒐集概況表

資料類別	測站	經度 / 緯度	觀測期間	觀測單位	備註(觀測儀器)
波浪(X0)	臺中港	24°17'54"N 120°29'39"E	1999/10-2000/08	港研中心	AWCP
波浪(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2004/01-2014/11	港研中心	AWCP
海流(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2004/01-2014/11	港研中心	AWCP
風(W1)	臺中港	24°17'59"N 120°29'12"E	2002/01-2014/11	港研中心	2009 年改成 Gill 二維超音波式 風速計
潮位(T)	臺中港	24°17'16"N 120°31'57"E	1999/10-1999/10 2001/04-2014/11	港研中心	Water Log
潮位(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2003/08-2014/11	港研中心	AWCP
潮位	臺中港	24°17'16"N 120°31'59"E	2003/01-2014/12	內政部	Aquatrak 音波式
氣象	臺中	24°08' 51"N 120°40'33"E	2004/01-2014/12	中央氣象局	
氣象	梧棲	24°15' 31"N 120°30'54"E	2004/01-2014/12	中央氣象局	

資料來源：本所港灣技術研究中心、交通部中央氣象局



☆風速計 ◎潮位計 ⊗波流儀

資料來源：蘇青和、黃茂信、李俊穎，「2012 年港灣海氣象觀測資料年報(臺中港)」，本所，2014 年。

圖 2.4 臺中港附近海域海氣象資料之觀測站位置圖

2.2 氣象資料之統計分析

臺中港區附近之氣象觀測站有兩站，分別為中央氣象局臺中氣象站及梧棲氣象站，本研究分析氣象觀測資料之期間為 2004 年至 2014 年。臺中氣象站之氣象觀測資料年統計值如表 2-2 所示，各觀測項目之月統計圖如圖 2.5 至圖 2.7 所示，各年度之氣象觀測資料統計值請參考附錄一。各觀測項目之統計分析如下：

1. 年平均氣溫在 23.3°C 至 23.8°C 之間，最高氣溫為 39.9°C ，發生在 2004 年 7 月 1 日，最低氣溫為 5.0°C ，發生在 2005 年 3 月 6 日。
2. 年平均風速在 1.4 m/sec 至 1.7 m/sec 之間，最多風向為 NNW，最大瞬間風速為 34 m/sec ，發生在 2005 年 7 月 18 日於海棠颱風期間。
3. 年平均氣壓介於 1001.7 hPa 至 1003.1 hPa 之間。

梧棲氣象站之氣象觀測資料年統計如表 2-3 所示，各觀測項目之月統計圖如圖 2.8 至圖 2.10 所示各年度之氣象觀測資料統計值請參考附錄一，各觀測項目之統計分析如下：

1. 年平均氣溫在 22.5°C 至 23.4°C 之間，最高氣溫為 36.9°C ，發生在 2004 年 7 月 1 日，最低氣溫為 7.0°C ，發生在 2005 年 12 月 23 日。
2. 年平均風速在 4.3 m/sec 至 4.9 m/sec 之間，最多風向為 N 向，最大瞬間風速為 48.6 m/sec ，發生在 2005 年 9 月 1 日於泰利颱風期間。
3. 年平均氣壓介於 1008.8 hPa 至 1010.1 hPa 之間。

表 2-2 臺中氣象站 2004-2014 年之氣象觀測資料統計表

年份	平均 溫度 (°C)	最高 溫度 (°C)	最高溫度 日期	最低 溫度 (°C)	最低溫度 日期	平均 風速 (m/sec)	最多 風向 (°)	最大 瞬間風速 (m/sec)	最大 瞬間風向 (°)	最大瞬間風速 日期	平均 相對溼度 (%)	最小 相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水 時數 (小時)	降水 日數 (日)	日照 時數 (小時)
2004	23.4	39.9	2004/7/1	6.5	2004/1/25	1.7	320	19.6	210	2004/7/3	72.5	27	1002.6	2260.7	501.5	94	2250.3
2005	23.3	35.4	2005/7/8	5.0	2005/3/6	1.7	350	34.0	350	2005/7/18	77.1	26	1002.8	2574.5	660.3	127	1804.9
2006	23.8	37.0	2006/8/2	8.7	2006/1/7	1.6	350	19.0	10	2006/7/13	76.9	25	1002.6	2171.9	673.6	132	1892.1
2007	23.8	35.6	2007/7/5	6.2	2007/1/29	1.7	330	27.7	340	2007/10/6	73.6	26	1002.4	2432.9	650.9	128	1963.4
2008	23.5	35.4	2008/9/22	8.7	2008/2/10	1.7	330	29.7	0	2008/9/28	74.9	22	1002.7	2477.8	569.9	126	1952.8
2009	23.8	36.1	2009/8/2	5.4	2009/1/14	1.6	330	26.9	310	2009/8/7	72.3	29	1002.3	1978.7	425.1	86	2094.0
2010	23.7	35.9	2010/7/18	6.8	2010/1/13	1.4	10	25.5	10	2010/9/19	74.7	22	1003.1	2054.4	554.6	131	1886.1
2011	23.5	35.7	2011/06/15	7.9	2011/01/1	-	-	16.4	200.0	2011/05/23	71.7	29	1002.7	1204.9	-	109.0	1842.1
2012	23.6	35.1	2012/08/23	9.0	2012/12/31	1.4	190	8.2	10	2012/08/01	73.3	40	1001.7	2202.5	522.0	141	1795.6
2013	23.6	35.1	2013/7/5	9.1	2013/12/28	1.4	10	25.2	230	2013/7/13	72.75	38	1002.7	2133	558.1	140	1899.4
2014	23.8	36.5	2014/09/15	6.7	2014/02/21	1.4	350	22.2	2014/07/23	2014/07/23	71.8	26	1003.0	1466.1	410.1	113	1962.9

資料來源：交通部中央氣象局

表 2-3 梧棲氣象站 2004-2014 年之氣象觀測資料統計表

年份	平均 溫度 (°C)	最高 溫度 (°C)	最高溫度 日期	最低 溫度 (°C)	最低溫度 日期	平均 風速 (m/sec)	最多 風向 (°)	最大 瞬間風速 (m/sec)	最大 瞬間風向 (°)	最大瞬間風速 日期	平均 相對溼度 (%)	最小 相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水 時數 (小時)	降水 日數 (日)	日照 時數 (小時)
2004	23.0	36.9	2004/7/1	7.4	2004/1/24	4.9	360	28.6	220	2004/7/3	77.1	37	1009.7	1325.1	424.8	79	2426.4
2005	22.8	33.2	2005/9/14	7.0	2005/12/23	4.8	350	48.6	320	2005/9/1	76.5	29	1009.9	1784.4	542.1	91	2125.4
2006	23.3	33.8	2006/7/31	9.2	2006/1/7	4.6	350	30.5	10	2006/3/12	77.1	26	1009.7	1372.6	501.7	91	2126.7
2007	23.2	34.7	2007/9/30	8.5	2007/1/29	4.6	350	46.4	320	2007/10/6	78.9	26	1009.4	2203.7	522.7	93	2263.8
2008	22.9	34.3	2008/8/22	8.9	2008/2/13	4.8	350	46.1	0	2008/9/28	77.9	29	1009.7	1613.5	451.4	90	2173.2
2009	23.4	35.4	2009/8/2	7.5	2009/1/11	4.6	10	41.3	360	2009/8/7	74.7	36	1009.3	997.3	308.4	79	2261.8
2010	23.0	34.2	2010/9/8	7.6	2010/1/14	4.5	10	37.5	360	2010/9/19	76.6	29	1010.1	1182.4	434.2	105	2055.6
2011	22.5	34.1	2011/08/25	7.9	2011/01/12	-	-	31.0	50	2011/12/9	77.3	39	1009.8	605.0	0.0	91	1964.7
2012	22.7	33.1	2012/07/20	8.4	2012/12/31	4.5	10	33.3	360	2012/8/2	80	42	1008.8	1660.8	522.0	124	1907.9
2013	22.8	33.7	2013/7/2	9.5	2013/11/30	4.5	360	31.9	310	2013/7/13	78.5	47	1009.8	1921.4	483.2	110	1987.2
2014	23.1	34.9	2014/09/15	7.7	2014/01/23	4.3	360	32.2	2014/07/23	2014/07/23	78.4	40	1010.0	1154.2	334.1	93	2242.8

資料來源：交通部中央氣象局

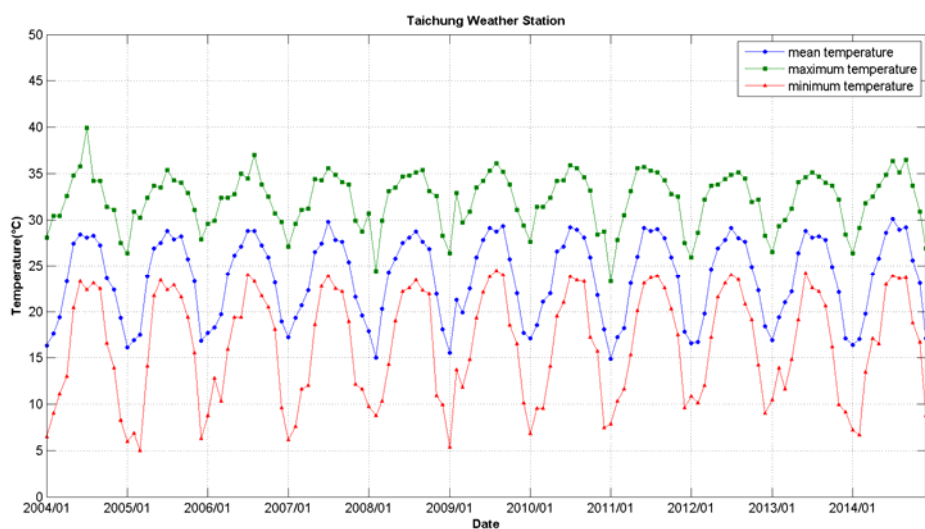


圖 2.5 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均氣溫、最高氣溫及最低氣溫之月統計圖

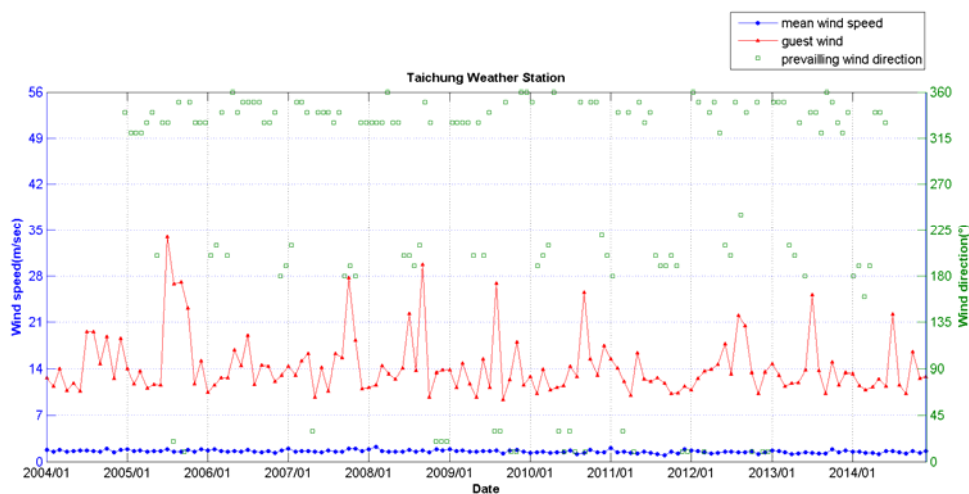


圖 2.6 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均風速、最多風向及瞬間最大風速之月統計圖

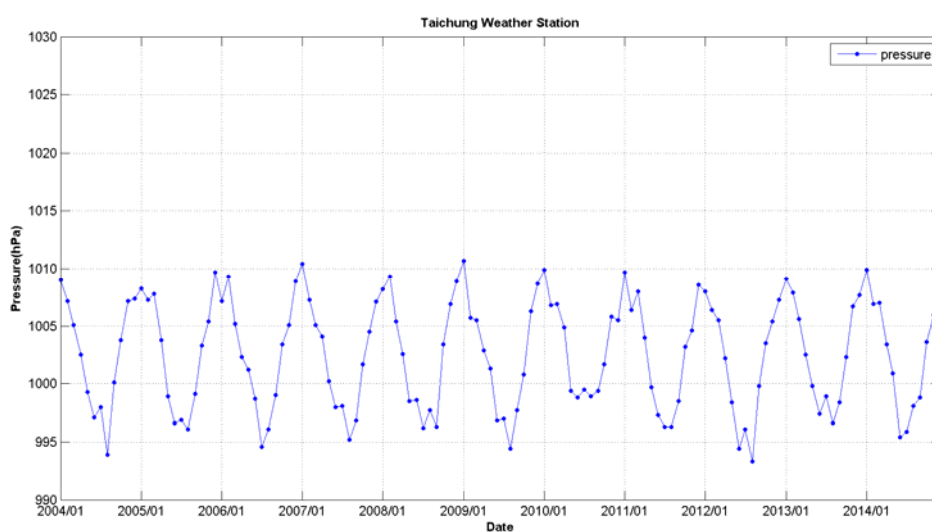


圖 2.7 臺中氣象站 2004 年至 2014 年平均氣壓之月統計圖

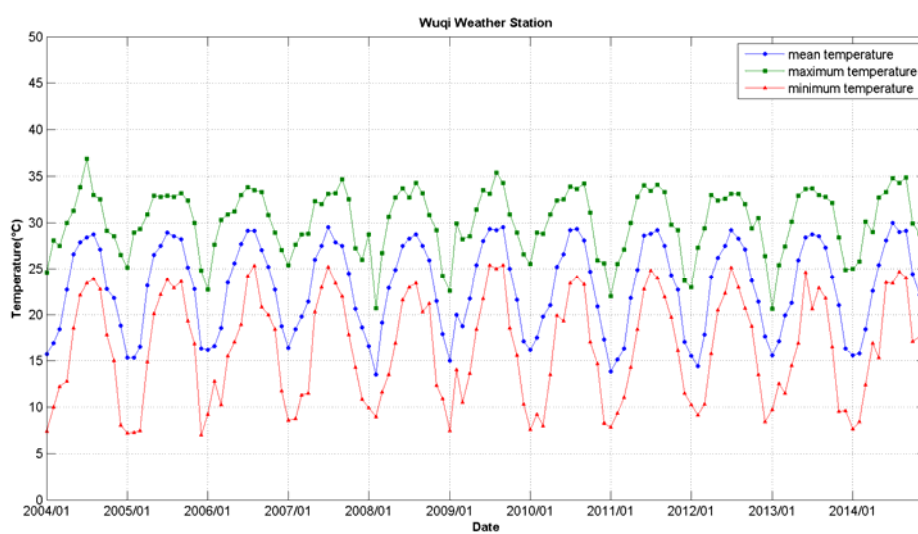


圖 2.8 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均氣溫、最高氣溫及最低氣溫之月統計圖

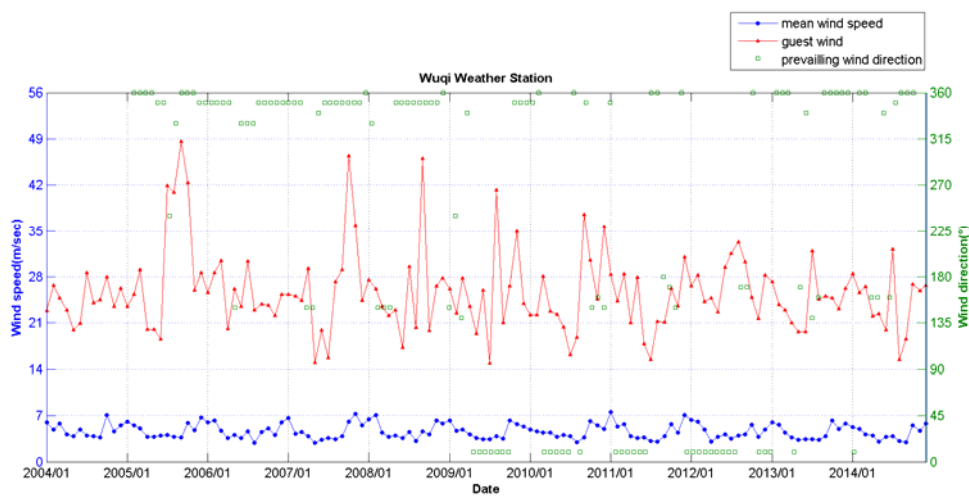


圖 2.9 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均風速、最多風向及瞬間最大風速之月統計圖

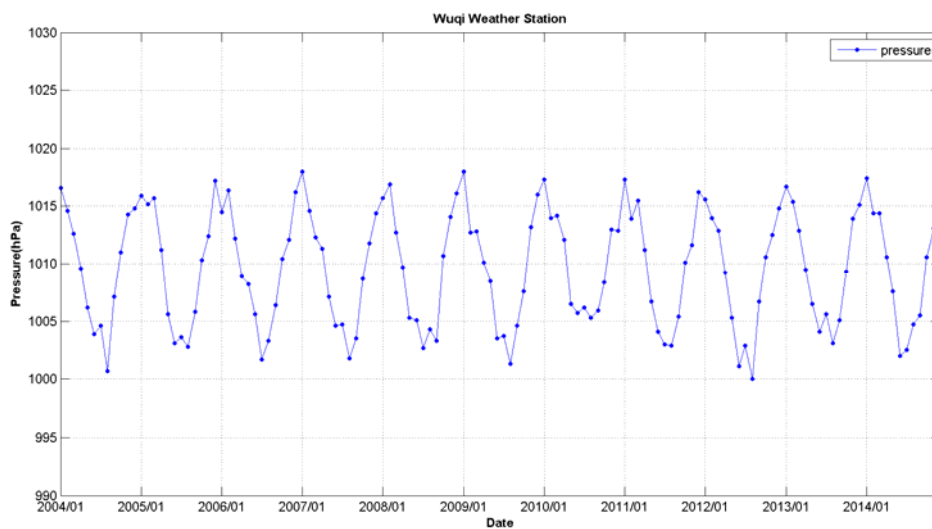


圖 2.10 梧棲氣象站 2004 年至 2014 年平均氣壓之月統計圖

2.3 海象資料

在海象方面，本所港灣技術研究中心在臺中港附近海域設有海象觀測站，觀測項目有：潮位、海流、風及波浪，以下就各觀測項目之統計結果分別說明。

2.3.1 風

本研究收集本所港灣技術研究中心自 2002 年 1 月至 2014 年 11 月期間的風觀測資料，2001~2005 年為北防風林觀測站，2006~2014 年為北防波堤堤測站資料，歷年風速及風向之統計結果如表 2-4 所示。由表 2-4 可知，港區附近主要風向為北北東向，約佔歷年觀測的 84.6%。風速小於 5 m/sec 以下者，約佔歷年觀測的 45.5%；風速介於 5-10 m/sec 之間者，約佔歷年觀測的 28.1%；風速介於 10-15 m/sec 之間者，約佔歷年觀測的 14.5%；風速大於 15 m/sec 以上者，約佔歷年觀測的 11.9%。歷年之平均風速為 7.3 m/sec；歷年最大風速為 37.5 m/sec，其風向為北北東向。

表 2-4 臺中港 2002 年至 2014 年風之風速及風向統計表

年份	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
		最大值 m/sec	風向									
2002	5.6	26.5	NNE	59.2	26.0	8.9	5.9	59.3	12.6	18.8	9.2	0.1
2003	5.1	17.8	NNE	60.0	26.7	12.5	0.8	62.6	10.0	18.7	8.7	0.1
2004	5.2	17.9	NNE	57.7	29.6	12.3	0.4	65.2	9.4	15.8	9.6	0.0
2005	5.3	27.3	NNE	60.2	25.2	13.2	1.4	62.1	9.4	19.6	8.9	0.0
2006	5.3	18.7	NNE	57.5	28.8	12.0	1.8	64.3	9.2	19.6	6.9	0.1
2007	5.3	23.3	NNE	59.6	26.2	12.5	1.7	60.6	12.2	19.3	7.7	0.2
2008	9.1	37.5	NNE	32.2	32.9	15.3	19.7	55.8	4.6	28.9	10.7	0.0
2009	5.6	26.2	NNE	60.6	21.2	11.6	6.4	65.2	7.6	14.3	13.0	0.2
2010	9.3	30.3	NNE	28.7	30.6	20.4	20.3	62.8	6.7	22.8	7.7	0.0
2011	10.5	32.4	NE	26.8	26.3	17.4	29.5	66.1	4.9	20.7	8.2	0.0
2012	10.1	28.9	NNE	24.5	29.9	19.2	26.3	54.6	6.7	22.3	16.4	0.3
2013	9.2	29.3	SSW	30.6	30.6	16.6	22.2	60.7	7.3	23.3	8.7	0.0
2014	8.7	28.6	NNE	33.6	31.8	16.7	17.9	57.7	6.4	26.6	9.3	0.2
統計值	7.3	37.5	NNE	45.5	28.1	14.5	11.9	61.3	8.2	20.8	9.6	0.1

資料來源：本所港灣技術研究中心

在月統計部分，圖 2.11 為歷年逐月之風速及最大風速分佈圖，由圖 2.11 可知，歷年之月平均風速介於 2.4 m/sec 至 17.7 m/sec 之間，月平均風速大於 10 m/sec 以上者皆發生在冬季，盛行風向多集中在北至東北向。圖 2.12 為臺中港歷年逐月之風速及風向統計分佈圖，由圖 2.12 顯示，夏季風速多小於 10 m/sec，風向介於南至西向所佔的比例較大；冬季風速多大於 10 m/sec，風向介於北至東向所佔的比例較大。

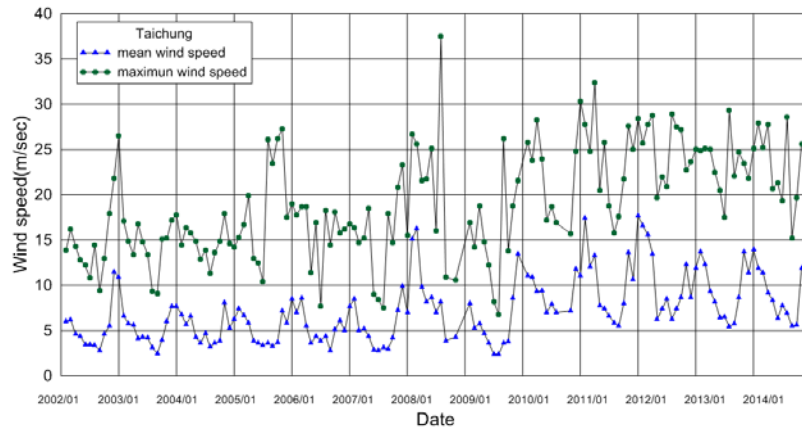


圖 2.11 臺中港 2002 年至 2014 年風速及最大風速之月統計圖

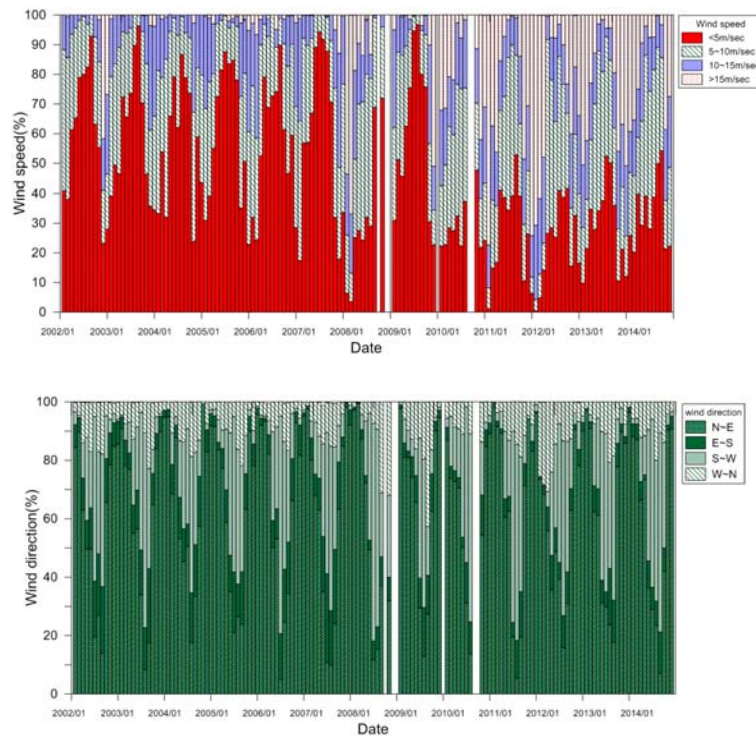


圖 2.12 臺中港 2002 年至 2014 年風速及風向之月統計分佈圖

2.3.2 海流

臺中港海岸流況主要由沿岸流、風驅流、潮流及黑潮所組成，本研究收集本所港灣技術研究中心自 2004 年 1 月至 2014 年 11 月期間的海流觀測資料，歷年海流之流速及流向的統計結果如表 2-5 所示。由表 2-5 可知，港區附近主要流向為西南西向，約佔歷年觀測的 36.3%。流速小於 0.25 m/sec 以下者，約佔歷年觀測的 30.6%；流速介於 0.25-0.5 m/sec 之間，約佔歷年觀測的 38.7%；流速介於 0.5-1 m/sec 之間，約佔歷年觀測的 27.4%；流速大於 1 m/sec 以上者，約佔歷年觀測的 3.3%。歷年之平均流速為 0.412 m/sec；最大流速為 2.48 m/sec，其流向為西向。

在月統計部分，圖 2.13 為歷年逐月之流速及最大流速統計圖，由圖 2.13 可知，歷年之月平均流速介於 0.15 m/sec 至 0.78 m/sec 之間，月最大流速介於 0.5 m/sec 至 2.50 m/sec 之間。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 2.14 顯示，流速在各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，歷年之統計結果請參考附錄一。

表 2-5 臺中港 2004 年至 2014 年海流之流速及流向統計表

年份	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
		流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2004	45.3	173.0	W	27.0	34.3	34.7	4.0	10.2	7.6	19.1	63.1
2005	49.2	248.3	W	19.9	36.9	37.7	5.5	9.3	1.4	16.2	73.2
2006	45.9	171.9	W	26.1	35.4	32.8	5.7	5.4	0.7	26.8	67.1
2007	43.5	193.9	WSW	24.7	38.8	34.2	2.3	10.8	2.1	22.1	64.9
2008	51.3	240.2	WNW	23.0	33.8	35.0	8.1	17.5	19.4	26.1	37.0
2009	45.5	189.0	WNW	24.9	39.4	31.5	4.2	28.1	0.9	30.1	41.0
2010	39.1	168.8	WSW	27.9	45.7	24.5	1.8	36.8	1.6	25.4	36.2
2011	29.7	143.6	WSW	47.6	38.0	13.1	1.3	42.1	11.7	23.6	22.7
2012	34.5	124.6	WSW	37.3	41.9	20.0	0.8	36.1	1.0	33.4	29.5
2013	34.5	148.6	SE	39.4	41.0	18.1	1.4	22.2	4.0	34.8	39.0
2014	34.8	155.4	N	38.3	40.7	19.4	1.6	31.7	1.1	29.4	37.9
統計值	41.2	248.3	W	30.6	38.7	27.4	3.3	22.7	4.7	26.1	46.5

資料來源：本所港灣技術研究中心

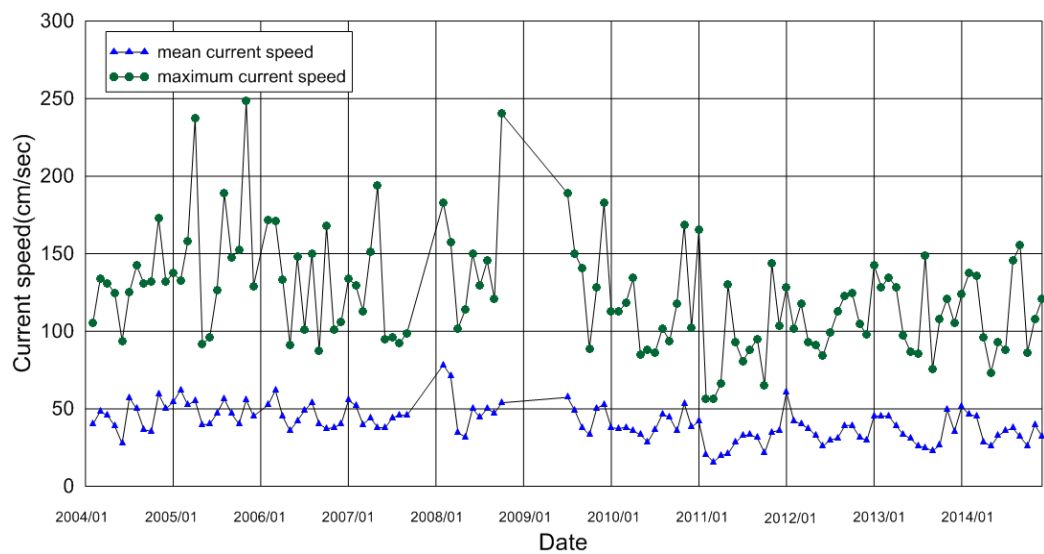


圖 2.13 臺中港 2004 年至 2014 年海流流速及最大流速之月統計圖

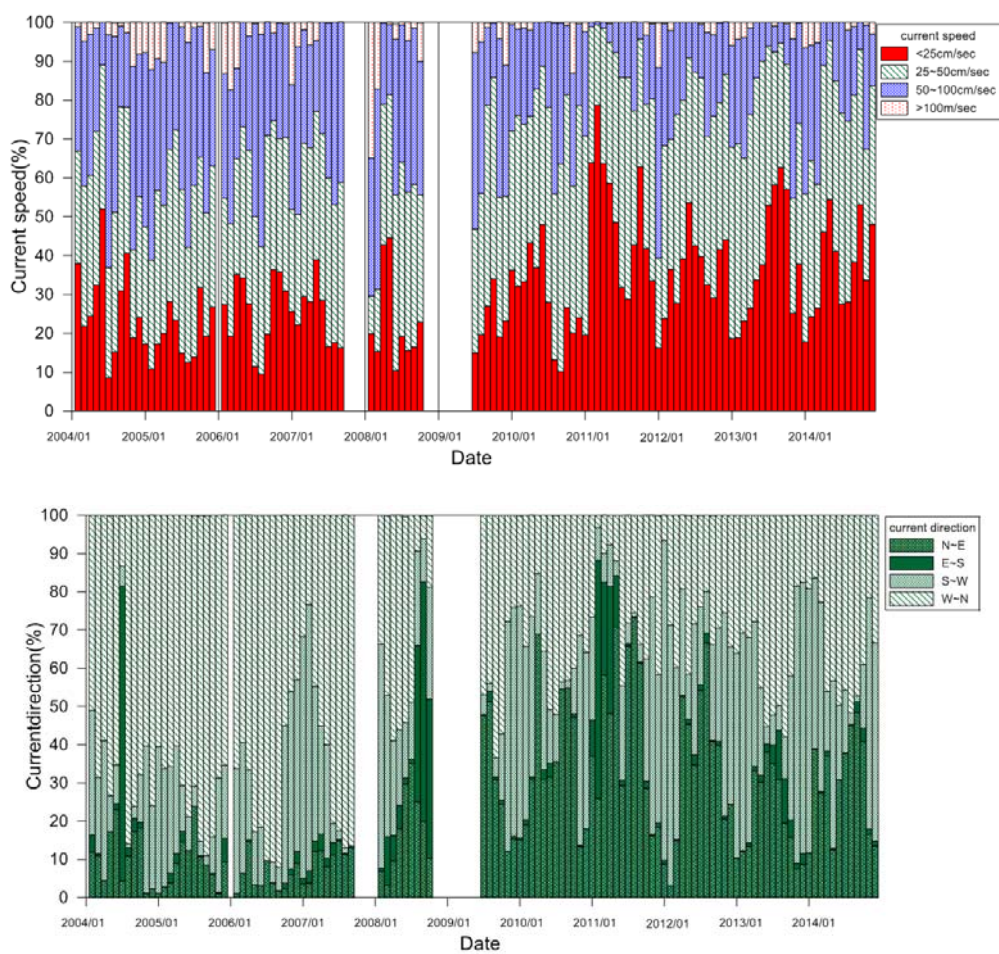


圖 2.14 臺中港 2004 年至 2014 年海流流速及流向之月統計分佈圖

2.3.3 波浪

本研究收集本所港灣技術研究中心自 2004 年 1 月至 2014 年 11 月期間的波浪觀測資料，歷年之波高、週期及波向的統計結果如表 2-6 所示。由表 2-6 可知，港區附近主要波向為北向，約佔歷年觀測的 54.5%。 $H_{1/3}$ 波高小於 0.5 m 以下者，約佔歷年觀測的 13.4%； $H_{1/3}$ 波高介於 0.5 m 至 1 m 之間者，約佔歷年觀測的 29.3%； $H_{1/3}$ 波高介於 1m 至 5m 之間者，約佔歷年觀測的 57.1%； $H_{1/3}$ 波高大於 5 m 以上者，約佔歷年觀測的 0.2%。 $T_{1/3}$ 週期小於 6 sec 以下者，約佔歷年觀測的 34%；介於 6 sec 至 8 sec 之間者，約佔歷年觀測的 53.4%。歷年之平均 $H_{1/3}$ 波高為 1.45 m；平均 $T_{1/3}$ 週期為 6.5sec；歷年最大 $H_{1/3}$ 波高為 8.44 m，其週期為 11.1 sec，發生於 2010 年 12 月 16 日。

在月統計部分，圖 2.15 為歷年逐月之 $H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 統計圖，由圖 2.15 可知，歷年之月平均 $H_{1/3}$ 小於 3.5m 以下，月平均 $T_{1/3}$ 介於 4.9 sec 至 12.4 sec 之間。圖 2.16 為臺中港歷年逐月之波高、週期及波向統計分佈圖，由圖 2.16 顯示，在夏季時波向介於西至北向所佔的比例較大；在冬季平均時波向介於北至東向所佔的比例較大。歷年之統計結果請參考附錄一。

表 2-6 臺中港 2004 年至 2014 年示性波高、週期及波向資料統計表

年份	H _{1/3} 平均值 (m)	T _{1/3} 平均值 (sec)	H _{1/3}			H _{1/3} <0.5m (%)	H _{1/3} 0.5~1m (%)	H _{1/3} 1~5m (%)	H _{1/3} >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T _{1/3} <6sec (%)	T _{1/3} 6~8sec (%)	T _{1/3} 8~10sec (%)	T _{1/3} >10sec (%)
			最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2004	1.53	6.1	7.50	6.2	WSW	17.7	21.8	60.4	0.1	71.7	0.3	4.6	23.4	56.1	35.3	7.6	1.0
2005	1.50	7.6	6.96	8.9	N	12.8	25.8	60.8	0.5	63.3	0.2	8.1	28.5	29.6	60.9	7.6	0.5
2006	1.54	6.5	4.93	12.1	N	7.7	26.8	65.6	0.0	67.9	0.1	4.8	27.0	32.0	54.3	12.9	0.9
2007	1.35	6.1	6.74	9.8	-	16.4	32.8	50.3	0.6	42.5	1.5	5.1	30.8	35.7	57.9	6.1	0.0
2008	1.79	6.4	7.29	10.8	N	11.7	30.4	57.3	0.6	57.0	0.9	12.1	30.0	31.8	55.8	11.8	0.5
2009	1.48	6.6	7.78	8.7	-	13.8	27.0	58.8	0.4	68.3	0.0	3.6	28.2	28.1	56.8	13.7	1.4
2010	1.65	6.4	8.44	11.1	N	1.2	28.9	69.6	0.2	72.2	0.1	7.6	20.2	36.7	49.1	13.6	0.6
2011	1.18	6.3	4.31	10.7	N	16.7	36.8	46.5	0.0	64.7	11.3	14.7	9.4	40.4	46.5	11.7	1.4
2012	1.35	6.6	5.5	8.9	S	13.4	29.7	57.0	0.0	74.0	7.2	5.1	13.7	28.3	55.6	14.1	2.0
2013	1.39	6.5	4.58	8.2	WNW	9.6	34.5	55.9	0.0	63.1	1.7	10.4	24.7	31.3	51.7	15.6	1.3
2014	1.20	6.6	4.12	9.9	N	26.2	27.7	46.2	0.0	67.4	0.2	6.2	26.2	24.2	63.7	10.6	1.5
統計值	1.45	6.5	8.44	11.1	N	13.4	29.3	57.1	0.2	64.7	2.1	7.5	23.8	34.0	53.4	11.4	1.0

資料來源：交通部運輸研究所臺灣技術研究中心

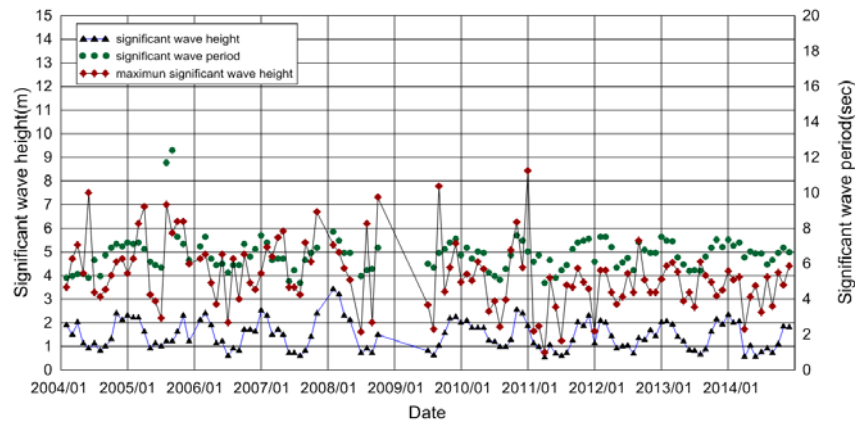


圖 2.15 臺中港 2004 年至 2014 年平均示性波高、平均週期及最大示性波高之月統計圖

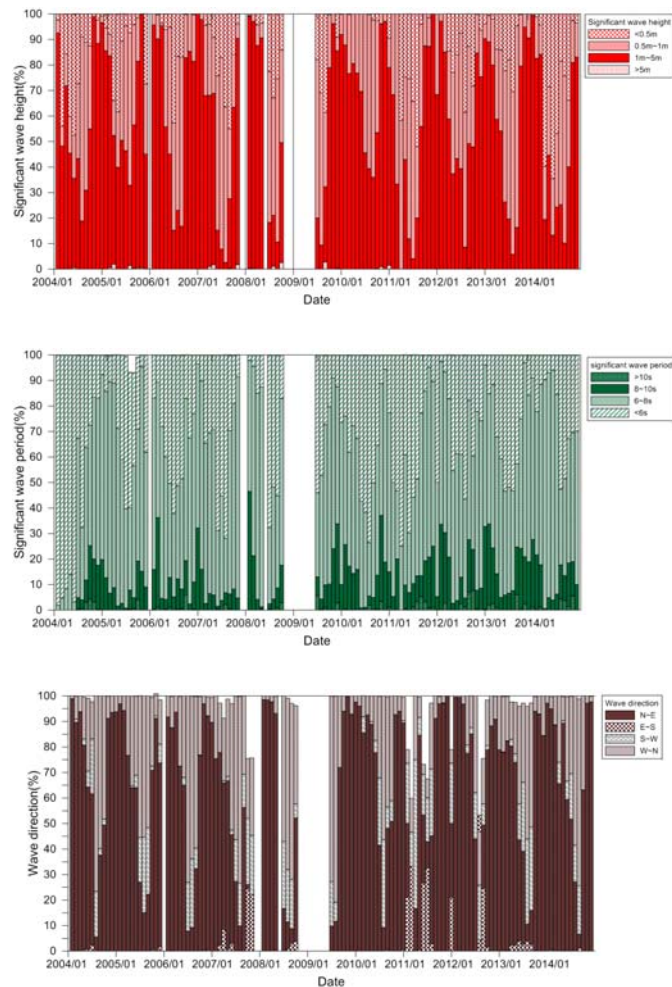


圖 2.16 臺中港 2004 年至 2014 年平均示性波高、平均週期及波向之月統計分佈圖

本研究為探討極端波浪以及其所產生之衝擊力對於港灣結構物之影響。根據 2013 年臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書」報告中，以 Wilson 或井島武士及湯麟武博士之數學模式推算臺中港颱風波浪，並了解臺中港受颱風波浪影響之狀況。根據 1940 年至 2011 年間颱風中心氣壓小於或等於 970mb 之颱風資料，彙整篩選出 116 個颱風資料，進行颱風波浪推算，其示性波高詳如表 2-7 所示，並將各方向可能發生之最大示性波高，以極端值分佈法推算各迴歸期之波浪，如表 2-8 所示。由表 2-8 可知，臺中港 50 年迴歸期颱風波浪以 N 向影響最大，波高約達 7.2m，對應週期約為 11.3 秒。

表 2-7 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表

颱風編號與名稱		波 向							
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
4023		4.76@	4.23	4.09	4.08	3.96	3.58	1.68@	1.37
4036		-	-	-	0.98	-	0.93@	0.78@	1.11
4309		-	-	-	1.84@	2.41@	2.48@	2.72@	2.50@
4311		5.37@	3.81@	1.94	3.01	3.22	3.43	2.19	2.37
4413		0.83	-	-	-	2.41@	2.56@	2.70	2.88
4515		-	-	-	2.33@	2.49@	2.83@	3.24@	3.75
4518		-	0.61@	3.68	3.91	4.80	4.56	2.62	1.93
4619		4.18	4.49	4.41	4.11	4.11	4.20	4.08	0.60
4708	INEZ	-	-	-	-	-	0.87@	0.76@	0.70@
4722		-	-	-	-	-	-	-	-
4806	PEARL	-	-	1.29	1.39	1.79	1.69	0.89	-
4822	JACKIE	4.78@	4.47@	3.96@	4.08	4.03	3.16	2.99	1.55@
4924	CAMILLA	-	-	-	-	-	-	-	-
5104	IRIS	-	-	-	-	-	-	-	-
5201	CHARLOTTE	-	-	-	-	-	0.51@	-	-
5221	BESS	-	-	-	4.18	4.14	3.91	3.54	1.05
5302	JUDY	-	-	-	-	-	-	-	-
5304	KIT	5.14	4.64	4.33	4.09	4.07	4.29	4.04	2.37
5519	IRIS	-	-	-	-	-	1.32@	1.82@	2.52
5603	THELMA	-	-	-	-	-	-	-	-
5611	DINAH	2.82@	2.65	2.61	2.65	2.68	2.88	2.90	1.47

註：@表示湧浪；單位：m

資料來源：台灣世曦工程顧問有限公司，「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書。」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2013 年。

表 2-7(續 1) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表

颱風編號與名稱		波 向							
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
5614	GILDA	-	-	-	-	-	1.03@	2.35@	2.74@
5705	VIRGINIA	2.57	2.74	2.79	2.66	2.27	-	-	-
5711	CARMEN	-	-	-	-	-	1.31@	0.79@	0.90@
5810	WINNIE	0.76	-	-	-	0.75@	1.95@	1.72@	2.60@
5819	GRACE	4.35@	2.28	2.84	3.10	3.50	3.26	2.79	-
5905	BILLIE	1.40@	-	1.02	1.12	1.32	1.36	-	-
5909	JOAN	-	-	-	1.75@	2.60@	3.27@	3.27@	2.88@
5911	LOUISE	3.32@	3.03	2.99	3.07	3.14	3.04	1.95	-
5921	FREDA	-	-	-	-	-	-	-	-
6008	SHIRLEY	5.68@	5.54@	5.59	5.35	4.93	4.31	3.01	0.65
6009	TRIX	4.03@	3.45@	2.45	3.00	2.91	2.80	2.63	2.61
6104	BETTY	2.00	1.95	-	0.98@	3.56	3.55	0.57	-
6116	LORNA	-	-	-	-	-	0.79@	1.94@	3.02@
6120	PAMELA	4.51	-	-	1.70@	1.59@	3.10@	3.63@	3.83
6206	KATE	1.86@	1.87	2.01	2.14	2.21	1.75	-	-
6210	OPAL	4.52@	4.11@	4.41	4.14	4.25	4.12	3.24	1.23@
6217	AMY	4.56@	3.98@	4.27	4.36	4.41	4.27	3.42	1.45
6307	WENDY	4.87@	3.59@	4.23	4.33	3.91	3.68	1.64@	-
6314	GLORIA	4.28@	2.96	3.80	3.47	2.94	2.92	2.17	1.12
6509	DINAH	-	-	-	1.29	1.54	-	-	-
6518	MARY	3.83@	3.83	3.98	3.82	3.53	3.60	2.55	1.72
6618	CORA	3.77@	-	1.72	2.17	2.10	1.92	1.48	-
6621	ELSIE	-	-	-	-	-	-	-	3.24@
6708	CLARA	3.69	3.68	3.74	3.76	3.56	2.70	-	-
6737	GILDA	3.47	3.49	3.40	3.32	3.19	2.71	-	-
6805	NADINE	-	-	-	-	-	-	-	4.24@
6908	BETTY	2.61@	1.25@	1.29	1.87	1.85	1.68	1.77	1.05
6911	ELSIE	5.49	0.98	-	2.81@	4.05	3.81	3.52	2.49@
6912	FLOSSIE	1.61	1.62	-	-	-	-	-	-
7118	NADINE	-	-	-	-	-	2.31@	1.75@	2.68@
7127	BESS	3.94@	3.29@	3.46	3.53	3.24	2.94	1.84@	2.05
7213	BETTY	2.84@	-	2.17	3.00	3.17	2.20	2.13	-
7315	NORA	-	-	-	-	-	1.48@	2.12@	2.23@
7503	NINA	4.99	0.74	-	1.78@	3.09	2.84@	2.90	3.06
7512	BETTY	-	-	-	-	-	-	-	0.70@
7613	BILLIE	5.07@	3.73@	3.46	3.61	3.63	2.80	3.08	1.35@
7704	THELMA	0.62	0.55	-	1.50@	1.58@	2.18@	3.03	2.76
7705	VERA	6.80@	5.84@	5.01@	4.93	5.00	4.49	3.57	3.11
7817	IRMA	-	-	-	-	-	-	-	-
7907	GORDON	-	-	-	-	-	-	-	-

註：@表示湧浪；單位：m

資料來源：台灣世曦工程顧問有限公司，「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書。」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2013 年。

表 2-7(續 2) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表

颱風編號與名稱		波 向							
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
8012	NORRIS	3.65@	4.08	4.68	3.62	3.43	3.34	2.25	2.49
8104	IKE	-	1.47	1.43	-	-	-	3.17@	3.90@
8105	JUNE	1.45	1.75	2.07	1.99	1.82	-	-	-
8210	ANDY	-	-	-	-	-	-	-	-
8304	WAYNE	-	-	-	-	-	0.54@	0.61@	2.01@
8510	NELSON	3.58@	2.04@	1.59	2.36	2.75	3.17	2.47	1.83
8605	NANCY	1.38@	-	-	-	1.21	-	-	-
8612	WAYNE	3.31	4.16	1.38	-	-	3.11@	3.41@	4.66@
8613	ABBY	5.23	4.51	4.26	4.27	4.36	4.20	-	-
8708	ALEX	2.10@	0.92	1.49	1.61	2.00	1.85	-	-
8714	GERALD	-	-	-	-	-	1.03@	1.97@	2.94@
8802	SUSAN	-	0.61@	-	-	-	-	-	3.69@
8919	SARAH	2.89	2.57	2.24	2.16	1.62	-	-	-
9003	MARIAN	-	-	-	-	-	-	3.89@	4.08@
9017	DOT	-	-	-	-	-	-	1.75@	2.40@
9005	OFELIA	2.72@	2.81@	2.90	2.70	2.72	2.47	-	-
9012	YANCY	3.96@	3.60@	4.64	3.92	3.76	3.09	1.99	2.02
9120	NAT	-	-	-	-	-	-	-	0.86@
9215	OMAR	-	-	-	-	-	1.77@	1.76@	1.64@
9405	TIM	-	-	-	2.01@	-	2.09@	2.86@	3.28
9413	DOUG	-	1.80	2.66	2.94	2.86	1.90	-	-
9416	GLADYS	3.10@	2.29	2.13	2.77	2.24	2.53	1.96@	1.90
9515	RYAN	1.00	-	-	-	-	-	2.01@	3.74@
9607	GLORIA	-	-	-	-	-	1.60@	1.55@	2.71@
9608	HERB	6.28@	2.93	4.80	5.15	5.10	4.29	2.17@	1.91
9717	AMBER	5.59	5.49	5.10	4.70	4.54	4.51	-	-
9810	ZEB	-	2.12	2.21	1.49	-	-	-	-
9812	BABS	-	-	-	-	-	1.86@	2.41@	2.34@
9906	MAGGIE	-	-	-	-	-	-	-	1.22@
0004	KAI-TAK	0.92@	1.51	1.63	1.76	1.89	-	-	0.95@
0010	BILIS	-	-	-	-	-	2.19@	2.19@	2.93@
0020	XANGSANE	1.30	1.29	1.54	1.68	-	-	-	-
0102	CHEBI	-	-	-	-	-	2.61@	3.08	4.33@
0108	TORAJI	3.16@	3.00	3.05	3.07	3.07	3.07	2.80	-
0110	NARI	4.02	4.16	3.06	-	-	-	-	-
0119	LEKIMA	-	-	-	-	-	-	-	-
0407	MINDULLE	2.03	2.44	2.18	2.35	2.32	-	-	-
0417	AERE	3.99@	3.29@	1.75	3.03	2.99	3.19	2.03@	1.73@
0424	NOCK-TEN	2.26	2.69	2.54	3.06	2.88	-	-	-
0427	NANMADOL	-	-	-	-	-	-	-	4.28@
0505	HAITANG	6.35@	6.79	5.90	4.78	4.98	5.34	4.86	1.35

註：@表示湧浪；單位：m

資料來源：台灣世曦工程顧問有限公司，「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書。」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2013 年。

表 2-7(續 3) 歷年侵襲臺中地區之颱風波浪示性波高推算表

颱風編號與名稱		波 向							
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
0513	TALIM	4.23	0.92	1.45@	1.92@	2.42@	3.23@	3.47	3.94
0519	LONGWANG	2.95	-	-	-	1.38@	2.73@	2.78@	3.36@
0601	CHANCHU	-	-	-	-	-	2.13@	2.57@	2.81@
0605	KAEMI	-	-	-	-	-	1.76@	-	2.92@
0703	SEPAT	-	-	-	-	-	3.58@	0.63@	3.48@
0704	WIPHA	3.72@	1.42	1.90	2.29	2.57	2.51	-	-
0705	KROSA	4.29@	4.58	4.12	3.75	3.72	2.88	-	-
0808	FUNGWONG	-	-	-	-	-	-	-	-
0813	SINLAKU	3.61@	4.32	4.12	2.56	2.70	0.56	-	-
0815	JANGMI	4.22@	4.78	4.41	4.21	4.11	0.81	-	-
0908	MORAOT	3.71@	3.47	3.29	3.24	3.21	2.77	2.07	-
1011	FANAPI	3.08	0.60	-	-	-	1.15@	1.43@	1.51@
1013	MEGI	-	-	-	-	-	1.11@	1.34@	1.42@
1111	NANMADOL	-	-	-	-	-	2.61@	1.43@	2.35@

註：@表示湧浪；單位：m

資料來源：台灣世曦工程顧問有限公司，「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2013 年。

表 2-8 臺中港外海颱風波迴歸分析統計表

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

註：1.依據 1940~2011 年間之颱風資料推算。

2.推算目標區為 120.39E，24.3N。

3.目標區水深為-31.0m。

4.Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

資料來源：台灣世曦工程顧問有限公司，「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，2013 年。

2.3.4 潮位

臺中港之潮汐每日漲落 2 次，臺中港目前本所港灣技術研究中心有兩個測站(測站 T 與測站 X)以及內政部於四號碼頭設置的測站。測站 T 在臺中港四號碼頭地方並安裝 Water Log 公司之潮位計，另在臺中港北防波堤堤頭外約 600 公尺、水深約 25 公尺處(測站 X)安置之 AWCP 即時傳送監測系統。而本研究收集內政部委託中央氣象局自 2003 年至 2014 年 12 月期間的潮位觀測資料，2002 年至 2013 年歷年潮位資料之統計結果如表 2-9 所示。由表 2-9 之統計結果可知，自 2003 年 2014 年期間，其平均潮差為 3.78 公尺，大潮平均潮差為 4.71 公尺，最大潮差為 5.99 公尺，最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計如圖 2.17。

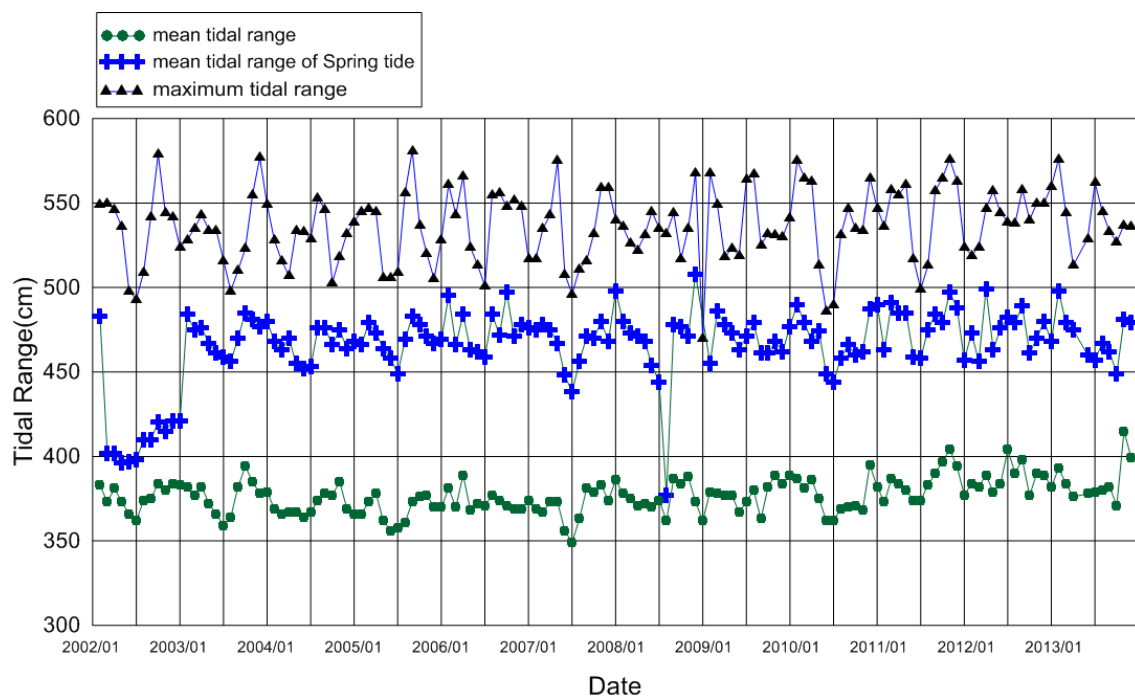


圖 2.17 臺中港 2003 年至 2014 年最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計圖

表 2-9 臺中港 2003-2014 年潮位資料統計

年份	平均 潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮 平均 高潮位 HWOSt	大潮 平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL		最低低潮位 LLWL		平均 潮差 MR	大潮 平均潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生時間	潮高	發生時間	潮高			
2003	299	486	109	519	46	9 月 27 日	573	12 月 24 日	-13	377	473	586
2004	305	490	119	521	55	8 月 30 日	580	1 月 23 日	-10	371	466	590
2005	13	197	-172	232	-237	8 月 21 日	291	1 月 12 日	-305	369	469	596
2006	15	201	-172	237	-239	7 月 14 日	298	1 月 2 日	-297	373	476	595
2007	5	189	-182	223	-246	4 月 17 日	274	12 月 26 日	-302	371	469	576
2008	8	193	-181	225	-239	9 月 1 日	276	1 月 23 日	-299	374	464	575
2009	13	201	-177	232	-237	9 月 19 日	300	1 月 13 日	-319	378	469	619
2010	19	205	-171	240	-229	9 月 9 日	305	1 月 2 日	-307	376	469	612
2011	17	208	-177	241	-236	8 月 30 日	312	11 月 27 日	-295	385	477	607
2012	22	215	-172	248	-226	8 月 02 日	321	12 月 15 日	-294	387	474	615
2013	18.3	211	-174	248	-233	9 月 22 日	307	1 月 12 日	-297	385	471	604
2014	15.7	212	-179	244	-228	10 月 9 日	316	12 月 24 日	-302	391	472	618
統計值										378	471	599

潮高單位：公分

基準面：

2003 年：+7.1937m 水準點標高(基隆 MSL)+3.5125m。

2004 年：基準面相對 KP：-2.6812m。

2005 年~2013 年：基準面相對 KP：0m。

資料來源：交通部中央氣象局

2.4 颱風資料

臺灣位處熱帶與亞熱帶的之間，於颱風移動路徑區域內，經常受到颱風的侵襲而造成災害，造成的災害包括風災、水災、海水倒灌，其伴隨之大雨常造成土石坍方及土石流等。當颱風在海上行進時所形成之暴潮主要由強風及低氣壓所引起，容易使岸邊出現長浪，颱風所引起的巨浪容易使海上作業的船隻顛覆沉沒或停靠船隻斷纜及碰撞受損，並造成海岸地形劇烈變化，也易淘空地基造成岸邊建物受損，港口裝卸設備亦曾為之損害。如果颱風期間適逢大潮（tide），加上河川之出海口與風向正好相反，致使河水無法順利排至大海，將導致海水倒灌，摧毀農作物以及養殖漁業，並使低窪地區淹水，造成嚴重災害。因此收集與分析颱風資料將對海域水質環境、海岸防災預警及海岸管理極為重要。

本研究根據 1998 至 2015 年中央氣象局曾發布颱風警報的颱風資訊，彙整 108 個颱風資料，彙整項目包括：颱風警報發佈期間、颱風路徑與強度、近中心最大風速、中心最低氣壓等等相關資訊，詳細內容請參閱表 2-10。本研究彙整的 108 個颱風案例中，依圖 2.18 之分類法將颱風路徑分為 9 類，各類颱風路徑之發生次數統計，如表 2-11 所示。由表 2-11 顯示，平均每年約有 6 次颱風侵襲臺灣海域，在侵臺的九類颱風路徑中，其他及特殊路徑發生的次數最多，共發生 45 次佔全部發生次數的比例為 41.6%；其次為第三類路徑的颱風，佔 12%；第六、九類路徑的颱風，佔 8.3%；其他各類的颱風路徑之發生次數及所佔的百分比，詳請參閱表 2-11。

表 2-10 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表

颱風編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風路徑(九類)	近中心最低氣壓(hPa)	近中心最大風速(m/sec)	七級風暴風半徑(km)	十級風暴風半徑(km)
9801	妮蔻兒	NICHOLE	07/09~07/10	輕度	9	998	18	100	--
9802	奧托	OTTO	08/03~08/05	輕度	3	985	30	150	--
9809	楊妮	YANNI	09/27~09/29	輕度	6	975	25	100	--
9810	瑞伯	ZEB	10/13~10/17	強烈	6	920	55	350	150
9812	芭比絲	BABS	10/25~10/27	中度	9	950	35	250	100
9906	瑪姬	MAGGIE	06/04~06/06	中度	5	965	38	250	100
9911	山姆	SAM	08/19~08/21	輕度	--	970	30	200	--
9920	丹恩	DAN	10/04~10/09	中度	7	968	38	250	80
0004	啟德	KAI-TAK	07/06~07/10	中度	6	965	35	150	50
0010	碧利斯	BILIS	08/21~08/23	強烈	3	930	53	300	120
0012	巴比倫	PRAPIROON	08/27~08/30	輕度	6	965	33	250	--
0015	寶發	BOPHA	09/08~09/10	輕度	特殊路徑	990	23	180	--
0019	雅吉	YAGI	10/23~10/26	中度	--	970	33	180	50
0020	象神	XANGSANE	10/30~11/01	中度	6	960	38	250	100
0021	貝碧佳	BEBINCA	11/06~11/07	輕度	--	970	28	200	--
0101	西馬隆	CIMARON	05/11~05/13	輕度	8	990	23	150	--
0102	奇比	CHEBI	06/22~06/24	中度	7	965	35	200	80
0104	尤特	UTOR	07/03~07/05	中度	5	960	38	350	120
0105	潭美	TRAMI	07/10~07/11	輕度	4	995	20	80	--
0107	玉兔	YUTU	07/23~07/24	輕度	--	962	30	150	--
0108	桃芝	TORAJI	07/28~07/31	中度	3	962	38	250	100
0116	納莉	NARI	09/08~09/10	中度	特殊路徑	960	40	150	50
0119	利奇馬	LEKIMA	09/23~09/28	中度	4	965	35	180	50
0121	海燕	HAIYAN	10/15~10/16	中度	--	965	35	250	100
0205	雷馬遜	RAMMASUN	07/02~07/04	中度	--	950	45	300	100
0208	娜克莉	NAKRI	07/09~07/10	輕度	9	987	18	80	--
0216	辛樂克	SINLAKU	09/04~09/08	中度	1	950	40	300	100
0302	柯吉拉	KUJIRA	04/21~04/24	中度	--	925	43	250	100
0305	南卡	NANGKA	06/01~06/03	輕度	--	990	23	100	--
0306	蘇迪勒	SOUDELOR	06/16~06/18	中度	--	960	38	200	50
0307	尹布都	IMBUDO	07/21~07/23	中度	--	935	48	300	120
0309	莫拉克	MORAKOT	08/02~08/04	輕度	4	990	23	100	--
0311	梵高	VAMCO	08/19~08/20	輕度	--	998	18	100	--
0312	柯羅旺	KROVANH	08/22~08/23	中度	--	970	33	250	100
0313	杜鵬	DUJUAN	08/31~09/02	中度	5	950	43	250	100

表 2-10(續 1) 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表

颱風編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風路徑(九類)	近中心最低氣壓(hPa)	近中心最大風速(m/sec)	七級風暴風半徑(km)	十級風暴風半徑(km)
0319	米勒	MELOR	11/02~11/03	輕度	8	975	25	150	--
0404	康森	CONSON	06/07~06/09	中度	--	970	33	150	50
0407	敏督利	MINDULLE	06/28~07/03	中度	6	942	45	250	100
0409	康柏斯	KOMPASU	07/14~07/15	輕度	--	995	20	100	--
0413	蘭寧	RANANIM	08/10~08/13	中度	--	955	40	250	100
0417	艾利	AERE	08/23~08/26	中度	1	960	38	200	50
0420	海馬	HAIMA	09/11~09/13	輕度	6	998	18	100	--
0421	米雷	MEARI	09/26~09/27	中度	--	940	40	200	80
0424	納坦	NOCK-TEN	10/23~10/26	中度	6	945	43	250	100
0427	南瑪都	NANMADOL	12/03~12/04	中度	9	940	38	250	80
0505	海棠	HAITANG	07/16~07/20	強烈	3	912	55	280	120
0509	馬莎	MATSA	08/03~08/06	中度	1	955	40	250	80
0510	珊瑚	SANVU	08/11~08/13	輕度	--	985	25	200	--
0513	泰利	TALIM	08/30~09/01	強烈	3	920	53	250	100
0515	卡努	KHANUN	09/09~09/11	中度	--	950	43	200	80
0518	丹瑞	DAMREY	09/21~09/23	中度	--	955	25	200	--
0519	龍王	LONGWANG	09/30~10/03	強烈	3	925	51	200	80
0601	珍珠	CHANCHU	05/16~05/18	中度	9	943	45	300	100
0603	艾維尼	EWINIAR	07/07~07/09	中度	--	925	43	300	80
0604	碧利斯	BILIS	07/12~07/15	輕度	2	978	25	300	--
0605	凱米	KAEMI	07/23~07/26	中度	3	960	38	200	80
0608	桑美	SAOMAI	08/09~08/10	中度	--	935	48	180	80
0609	寶發	BOPHA	08/07~08/09	輕度	4	985	23	120	--
0613	珊珊	SHANSHAN	09/14~09/16	中度	--	945	48	200	80
0706	帕布	PABUK	08/06~08/08	輕度	4	980	28	150	--
0707	梧提	WUTIP	08/08~08/09	輕度	3	992	18	100	--
0708	聖帕	SEPAT	08/16~08/19	強烈	3	920	53	250	100
0712	韋帕	WIPHA	09/17~09/19	中度	1	935	48	200	80
0715	柯羅莎	KROSA	10/04~10/07	強烈	2	925	51	300	120
0723	米塔	MITAG	11/26~11/27	中度	--	955	35	200	80
0807	卡玫基	KALMAEGI	07/16~07/18	中度	2	970	33	120	50
0808	鳳凰	FUNG-WONG	07/26~07/29	中度	3	948	43	220	80

表 2-10(續 2) 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表

颱風 編號	中文 名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風 路徑 (九類)	近中心 最低氣壓 (hPa)	近中心 最大風速 (m/sec)	七級風 暴風半 徑(km)	十級風 暴風半 徑(km)
0812	如麗	NURI	08/19~08/21	中度	--	955	40	220	80
0813	辛樂克	SINLAKU	09/11~09/16	強烈	2	925	51	250	100
0814	哈格比	HAGUPIT	09/21~09/23	中度	--	940	45	280	100
0815	薔蜜	JANGMI	09/26~09/29	強烈	2	925	53	280	100
0903	蓮花	LINFA	06/19~06/22	輕度	9	980	28	150	--
0906	莫拉菲	MOLAVE	07/16~07/18	輕度	--	980	28	100	--
0908	莫拉克	MORAKOT	08/05~08/10	中度	3	955	40	250	100
0917	芭瑪	PARMA	10/03~10/06	中度	特殊路徑	945	43	250	80
1006	萊羅克	LIONROCK	08/31~09/02	輕度	9	990	23	100	--
1008	南修	NAMTHEUN	08/30~08/31	輕度	--	995	18	80	--
1010	莫蘭蒂	MERANTI	09/09~09/10	輕度	--	990	23	100	--
1011	凡那比	FANAPI	09/17~09/20	中度	4	940	45	200	80
1013	梅姬	MEGI	10/21~10/23	中度	9	935	48	250	100
1101	艾利	AERE	05/09~05/10	輕度	--	990	23	150	--
1102	桑達	SONGDA	05/27~05/28	強烈	--	920	55	220	100
1105	米雷	MEARI	06/23~06/25	輕度	--	982	28	200	--
1109	梅花	MUIFA	08/04~08/06	中度	--	945	43	280	--
1111	南瑪都	NANMADOL	08/27~08/31	強烈	4	920	53	180	50
1205	泰利	TALIM	06/19~06/21	輕度	9	985	25	150	--
1206	杜蘇芮	DOKSURI	06/28~06/29	輕度	5	995	23	120	--
1209	蘇拉	SAOLA	07/30~08/03	中度	2	960	38	220	80
1211	海葵	HAIKUI	08/06~08/07	中度	1	960	35	180	50
1213	啟德	KAI-TAK	08/14~08/15	輕度	5	995	20	150	--
1214	天秤	TEMBIN	08/21~08/25	中度	特殊路徑	945	45	180	50
1214	天秤	TEMBIN	08/26~08/28	中度	特殊路徑	965	35	180	50
1217	杰拉華	JELAWAT	09/27~09/28	強烈	--	910	55	250	100
1307	蘇力	SOULIK	07/11~07/13	強烈	2	925	51	280	100
1308	西馬隆	CIMARON	07/17~07/18	輕度	--	998	18	100	--
1312	潭美	TRAMI	08/20~08/22	輕度	1	970	30	180	50
1315	康芮	KONG-REY	08/27~08/29	輕度	6	985	25	120	--
1319	天兔	USAGI	09/19~09/22	強烈	5	910	55	280	120
1323	菲特	FITOW	10/04~10/07	中度	1	960	38	250	80
1407	哈吉貝	HAGIBIS	06/14~06/15	輕度	--	992	20	100	--
1410	麥德姆	MATMO	07/21~07/23	中度	3	960	38	200	80
1416	鳳凰	FUNG-WONG	09/19~09/22	輕度	特殊路徑	985	25	150	--
1506	紅霞	NOUL	05/10-05/11	強烈	--	925	51	200	80
1509	昌鴻	CHAN-HOM	07/09-07/11	中度	--	935	48	280	100

表 2-10(續 3) 1998 年至 2015 年侵臺颱風基本資訊一覽表

颱風編號	中文名稱	英文名稱	警報期間	強度	侵臺颱風路徑(九類)	近中心最低氣壓(hPa)	近中心最大風速(m/sec)	七級風暴風半徑(km)	十級風暴風半徑(km)
1510	蓮花	LINFA	07/06-07/09	輕度	--	975	30	120	24
1513	蘇迪勒	SOUDELOR	08/06-08/09	中度	3	930	48	300	24
1515	天鵝	GONI	08/20-08/23	強烈	--	925	51	200	26
1521	杜鵑	DUJUAN	09/27-09/29	強烈	2	925	51	220	20

資料來源：交通部中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/>



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

圖 2.18 颱風路徑分類圖

表 2-11 1998 年至 2015 年期間颱風路徑分類統計表

颱風路徑分類	發生次數	發生百分比
1	7	6.5 %
2	8	7.4 %
3	13	12.0%
4	7	6.5%
5	6	5.6%
6	9	8.3 %
7	2	1.9 %
8	2	1.9 %
9	9	8.3 %
其他及特殊路徑	45	41.6 %
合計	108	100.0 %

資料來源：交通部中央氣象局，<http://www.cwb.gov.tw/>

2.5 氣候變遷資料

聯合國政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告—第一工作小組報告(AR5)中指出氣候系統觀測來自直接測量以及透過衛星和其他平臺的遙測。全球尺度的觀測開始於十九世紀中期對於氣溫和其他變數的量測。從1950年起，更全面而多樣的展開觀測。聯合國政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告—第一工作小組報告(AR5)中指出透過古氣候的重建，資料可回溯到數百年至數百萬年前。檢視這些對於大氣、海洋、冰雪圈及地表的變異與長期變遷的資料，氣候系統已確定是逐漸暖化的。從1950 年開始，大氣和海洋變暖，造成冰雪量減少，海平面上升，氣候的變化是在過去數十年到數千年間都未曾發生過。

AR5報告中指出在1971至2009年間，世界各地平均的冰川冰量損失速率，約為226 [91-361] Gt/yr，在1993年至2009年間達到275 [140-410] Gt/yr。2002至2011年間，格陵蘭冰層的冰量損失平均速率從1992至2001年間的34 [-6 - 74] Gt/yr增加為215 [157-274] Gt/yr。南極冰層的冰量損失可能已經從1992-2001年間的30 [-37 - 97] Gt/yr增加至2002-2011年間的147 [72-221] Gt/yr，而這些損失可能主要來自北南極半島和南極洲西部的阿蒙森海區域。在1979至2012年間，北極海冰覆蓋範圍的年平均量持續減少，其速率為每十年3.5%至4.1%之間（即每十年0.45-0.51百萬平方公里），夏季海冰極低值（常年海冰）的減少速率則為每十年9.4%到13.6%，而100 Gt/yr的冰損失量約相當於全球平均海平面上升0.28 mm/yr。由於氣候暖化所導致的冰川質量損失和海洋熱膨脹造成了全球平均海平面上升，在1901年至2010年間，全球海平面的平均上升速率約為1.7 [1.5-1.9] mm/yr，在1971至2010年間則為2.0 [1.7-2.3] mm /yr，在1993年至2010年間更是已達3.2[2.8-3.6] mm/yr。

氣候系統變遷的推估是根據各類不同結構層級的氣候模式模擬所

得到的結果，從簡單的模式、中等複雜度的模式、詳盡的模式一直到全球系統模式。這些模式是根據假設情境的設定來模擬氣候的變遷。在世界氣候研究計畫的《第5期耦合模式對比計畫》(CMIP5) 架構下，採用了一組新的情境--代表濃度途徑(Representative Concentration Pathways, RCPs)，RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0及RCP8.5表示在2100年時輻射作用力較工業化前分別增加 $+2.6 \text{ W/m}^2$ 、 $+4.5 \text{ W/m}^2$ 、 $+6.0 \text{ W/m}^2$ 及 $+8.5 \text{ W/m}^2$ 。RCP2.6說明輻射作用力在2100年呈減少趨勢，意即暖化減緩的情境；RCP4.5與RCP6.0是屬於暖化速率穩定的情境，輻射作用力的變化呈較穩定狀態；RCP8.5則表示未來溫室氣體高度排放的情境，預估輻射作用力在2100年呈持續增加趨勢，暖化情況加劇，情況趨於惡劣。

在二十一世紀，全球平均海平面將持續上升，在所有RCP情境下，海平面上升的速度將非常可能超過1971年至2010年間的上升速率，其原因仍是海洋暖化現象加劇，以及冰川和冰層質量的持續消失所造成的。自AR4評估報告以來，全球平均海平面上升程度的推估已具有更高的可信度，乃因為對於影響海平面的各物理過程考慮更完整、過程(process-based)模式的模擬結果與觀測值的一致性更佳、並且已將冰層的動力變化納入考量。與1986-2005年數據相比，2081-2100年全球平均海平面的上升可能落在以下範圍：RCP2.6情境為0.26-0.55公尺、RCP4.5情境為0.32-0.63公尺、RCP6.0情境為0.33-0.63公尺、RCP8.5情境則為0.45-0.82公尺如圖2.19，在情境RCP8.5在2081-2100年間的上升速度為8-16 mm/yr。由CMIP5氣候推估結合過程模式的模擬以及對冰川和冰層作用的文獻記載評估可所得這些情境的預估範圍。

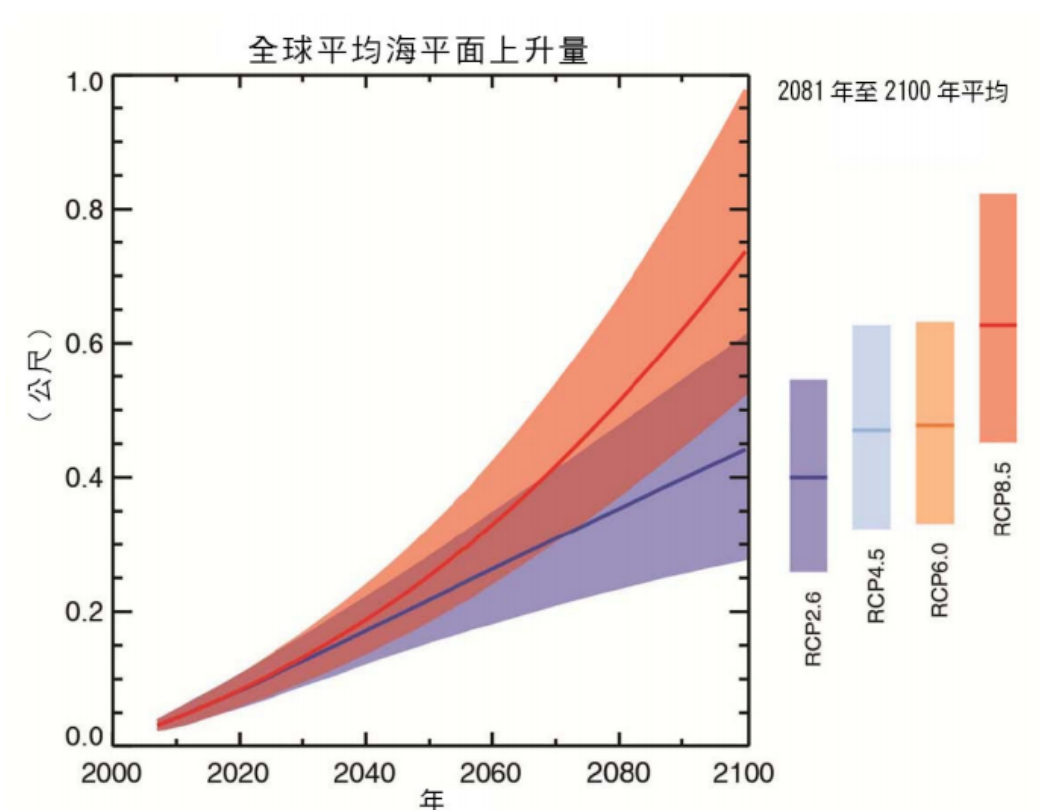


圖 2.19 RCPs 情境下全球海平面上升量

第三章 平面波流場分析

本研究應用 NearCoM 模式(近岸波流場模式)模擬臺中港週邊海域的波流場，以及應用 COBRAS 模式進行波浪受結構物以及地形影響之波場數值模擬。首先透過資料收集所得的海氣象資料包含 IPCC AR5 架構下，依照代表濃度途徑情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下所推估的海氣象資料與過去歷史大波的資料，作為 NearCoM 模式的輸入條件其中包含 50 年、100 年、200 與 250 年迴歸週期颱風波浪及受氣候變遷影響之 50 年、100 年、200 與 250 年迴歸週期颱風波浪，以進行臺中港海域之波流場模擬。IPCC AR5(2013)提出代表濃度途徑來定義受不同情境下之氣候變遷，代表濃度途徑是以輻射作用力在 2100 年與 1750 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之。在四種情境中，RCP2.6 的情境意味著每平方公尺的輻射作用力在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 則代表每平方公尺的輻射作用力分別增加了 4.5、6.0 與 8.5 瓦。相較於第三次評估報告與第四次評估報告所考慮的情境，這四種情境所能涵蓋層面更廣。最後，依據 NearCoM 模式模擬結果，選定具代表性的防波堤斷面，並決定波浪條件，以作為 COBRAS 模式的輸入條件，並進行不同條件狀況下防波堤受力模擬，藉此探討氣候變遷下，臺中港防波堤之受力情形及安全穩定性。相關之研究方法流程圖如圖 3.1 所示，NearCoM 及 COBRAS 模式介紹如附錄二。

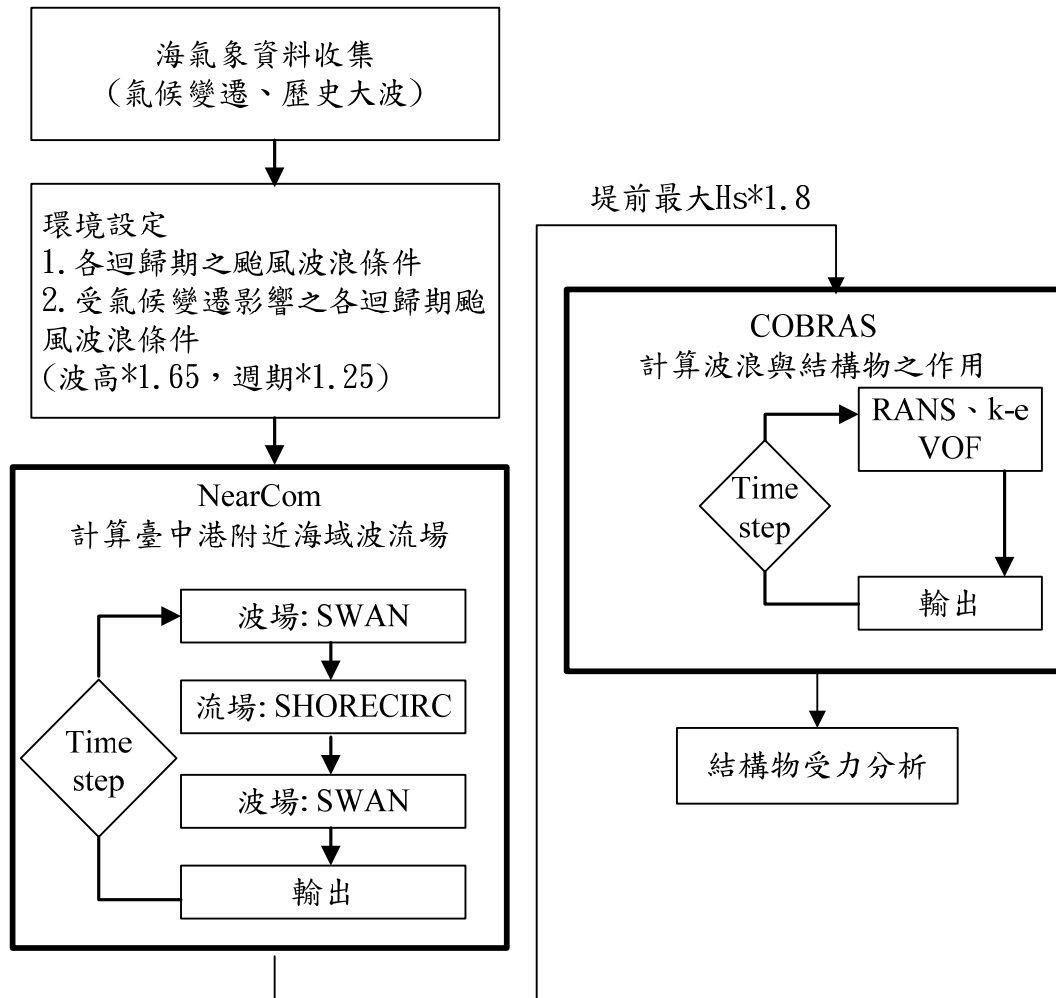


圖 3.1 研究方法流程圖

3.1 模式範圍及參數設定

模式在計算前須先將所欲模擬之區域網格化，網格大小之選取，一方面希望愈小愈好以增加解析度，另一方面又希望愈大愈好以減小所需的電腦記憶容量以及加快電腦運算速度。本研究模擬區域(如圖 3.2 方框所示) 由北涵蓋臺中港海域至彰濱工業區崙尾區海域，其沿岸長度約為 41 公里，向離岸範圍則延伸至水深-50 公尺處，長度約為 15 公里。圖 3.2 則為經座標轉換後之海潮流模擬範圍及地形水深分佈圖，模式領域在水平方向劃分為 408x148 個正方網格，每一網格之邊長為 100 公尺。表 3-1 則詳列模式所運用之計算時間間距及地理座標之轉換參數。

模式開放邊界資料，採用臺灣近岸海象預報系統（TaiCOM Model）所提供的逐時預測水位，以預測水位做為調合分析取得邊界上 M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2 分潮係數之用。開放邊界資料以 8 個分潮計算。



圖 3.2 計畫範圍

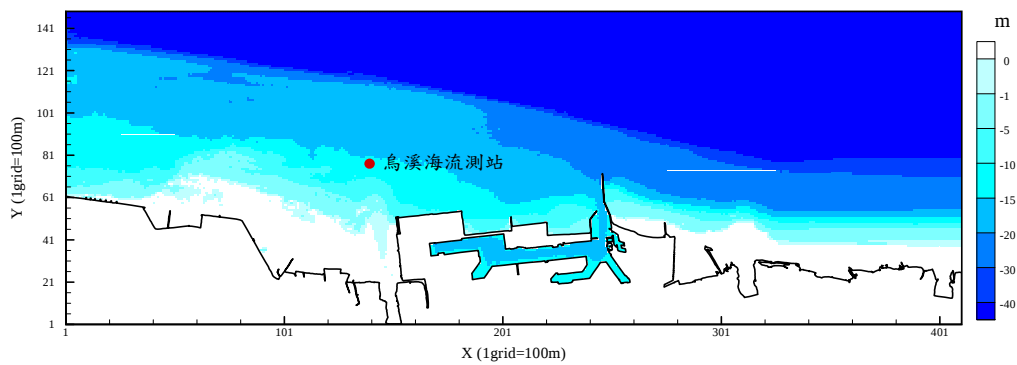


圖 3.3 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖

表 3-1 大區域海潮流模式之格網及計算條件

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

水動力模式之主要參數包括渦動粘性係數及底床磨擦係數，這些參數值的選取將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。一般來說，模式使用之參數值必須經由模式之率定來決定。本研究在流場模式之率定方面，則利用設置於北防波堤堤頭外側 600m 水深 25m 處以 AWCP 儀器量測海流資料(24°18'04"N 120°28'59"E)，以及本所港灣技術研究中心在 2011 年於臺中港南側，烏溪（又稱大肚溪）外海(24°13'6.8"N 120°25'30.3"E) 之海流測站實測海流資料來進行模式檢核與驗證。並與臺中港內 (24°17'16"N, 120°31'57"E) 及北防坡堤外 AWCP 測站的水位資料進行比對，測站位置如圖 3.4。



圖 3.4 臺中港海象測站示意圖

SHORECIRC 模式之主要參數為底床磨擦係數與渦動黏性係數，其值將影響模式的穩定性及計算結果的準確確性。本研究利用測站資料進行參數值率定，測站實測資料與模擬結果的均方根誤差(RMSE) 如圖 3.5 所示，率定所得到底床磨擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。

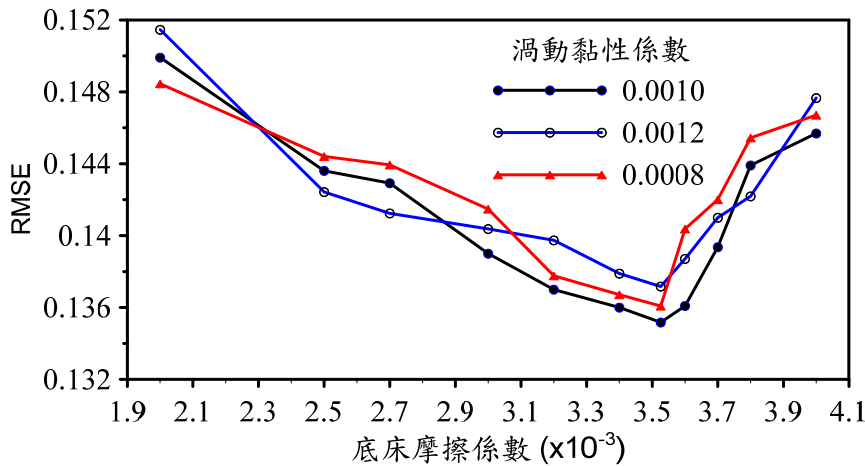


圖 3.5 NearCoM 模式參數率定圖

3.2 氣候變遷情境下臺中港區受颱風影響之波流場模擬

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

圖 3.6~圖 3.8 為不同波向下 50 年迴歸期颱風波浪之波流場圖，圖中示性波高值以色階表示，流速以箭頭表示。圖 3.6 為北向之颱風波浪，圖 3.7 為西向之颱風波浪，圖 3.8 為西南向之颱風波浪。圖中顯示，在北向之颱風波浪作用下，北防波堤中段至堤頭附近的示性波高最大，50 年迴歸期最大值約為 4.3 公尺。在西向之颱風波浪作用下，北

防波堤最大示性波高，50 年迴歸期約 3.2 公尺。在西南向之颱風波浪作用下，北防波堤最大示性波高 1.1 公尺。因此，在研究北防波堤的受力分析與安定性分析時，應以北向波浪做為主要波浪條件。另外，西向之颱風波浪於港內之示性波高較另兩個波向大，表示西向颱風波會傳遞至港內較其他波向明顯。西南向之颱風波浪作用下，臺中港北側波浪則受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

圖 3.9～圖 3.11 為滿潮時不同迴歸期下北向颱風波浪之波流場圖，分別為 100 年、200 年與 250 年迴歸期之颱風波浪。比較圖 3.6 與圖 3.9～圖 3.11 可以發現北防波堤之最大波高發生位置並不會隨著起始波浪條件改變，由表 3-4 可發現相同結果，北向颱風波浪最大示性波高發生於斷面 I 的位置，西向及西南向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面 IV 的位置(北防波堤各斷面說明請參閱 4-3 節)。

整體上，50 年、100 年、200 年及 250 年迴歸期北向的颱風波浪示性波高最大，滿潮時在不同的氣候變遷情境下，臺中港北防波堤北側波高皆有增加的趨勢，故臺中港北防波堤的受力將有可能增加。因此，北向的颱風波對於北防波堤的安定影響較其他波向重要。不同的氣候變遷情境下，北向颱風波浪對於北防波堤的受力及安定性於第四章分析討論。雖然西向的颱風波浪示性波高較北向的小，但西向的波會有傳播入港的情況產生，對於港內的靜穩則需考慮南向波浪的影響，至於西南向之波浪對於臺中港的影響較小。

表 3-2 各迴歸期之颱風波浪條件

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

表 3-3 四種氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100 年)

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

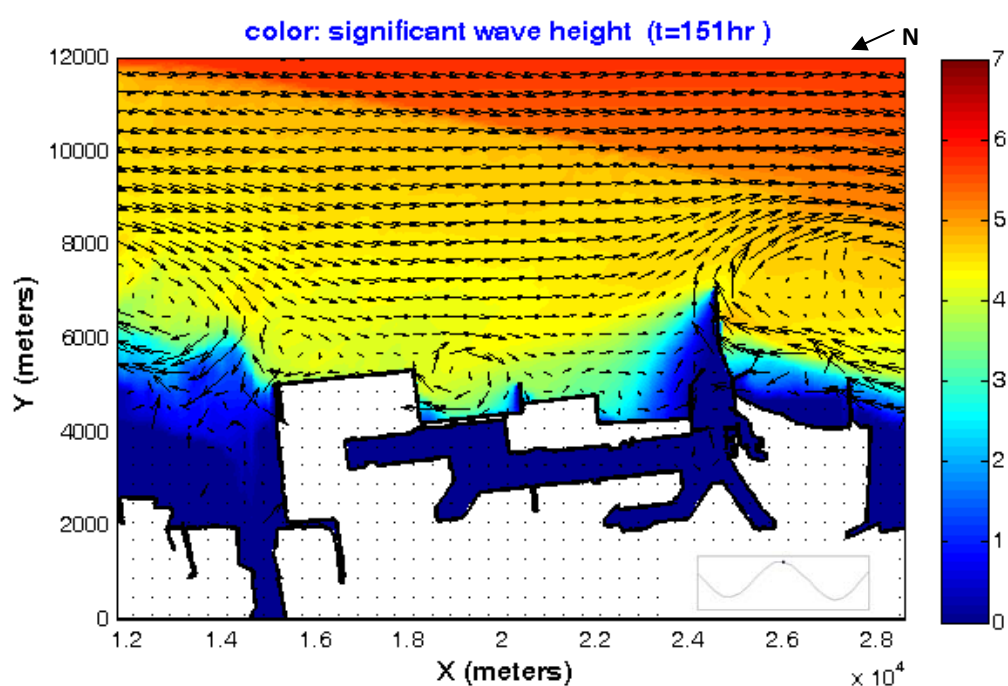


圖 3.6 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=7.2\text{m}$ ，示性週期 $T=11.3\text{s}$ ，波向 N)

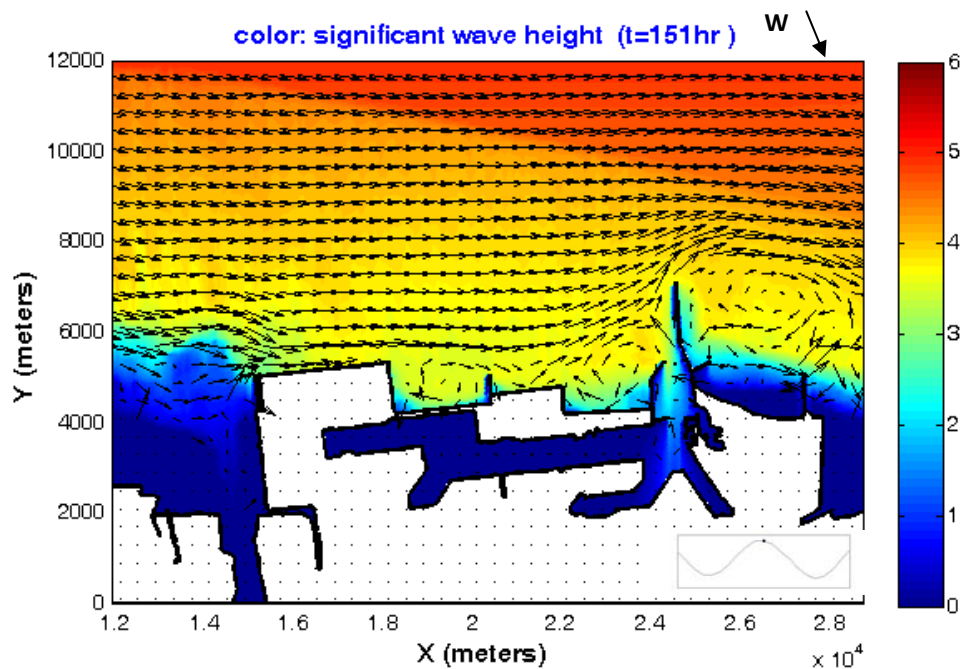


圖 3.7 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=5.7\text{m}$ ，示性週期 $T=10.0\text{s}$ ，波向 W)

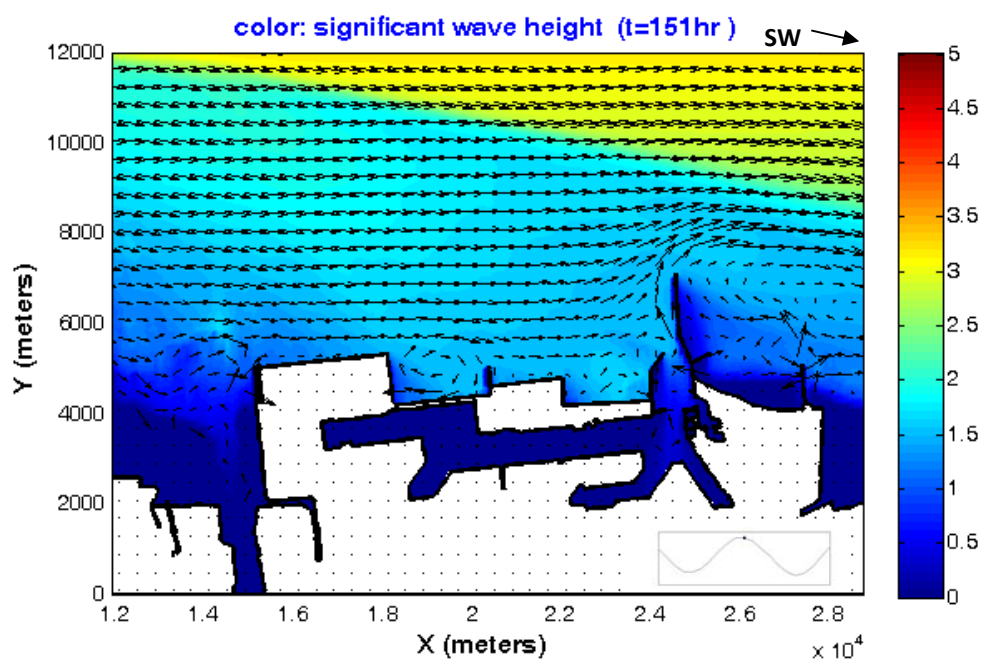


圖 3.8 臺中港附近海域 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=4.7\text{m}$ ，示性週期 $T=9.1\text{s}$ ，波向 SW)

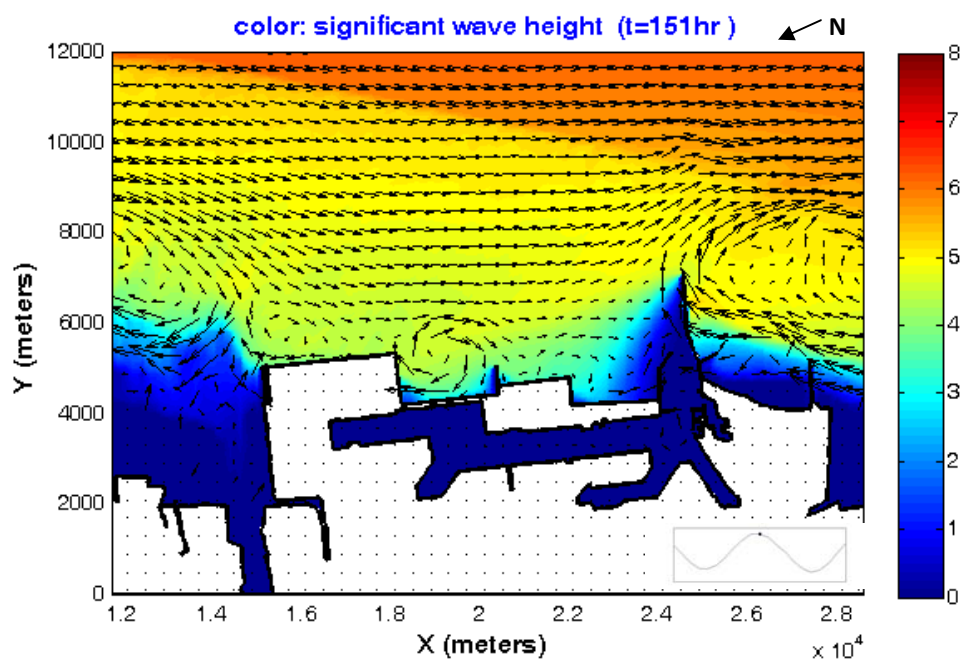


圖 3.9 臺中港附近海域 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.7\text{s}$ ，波向 N)

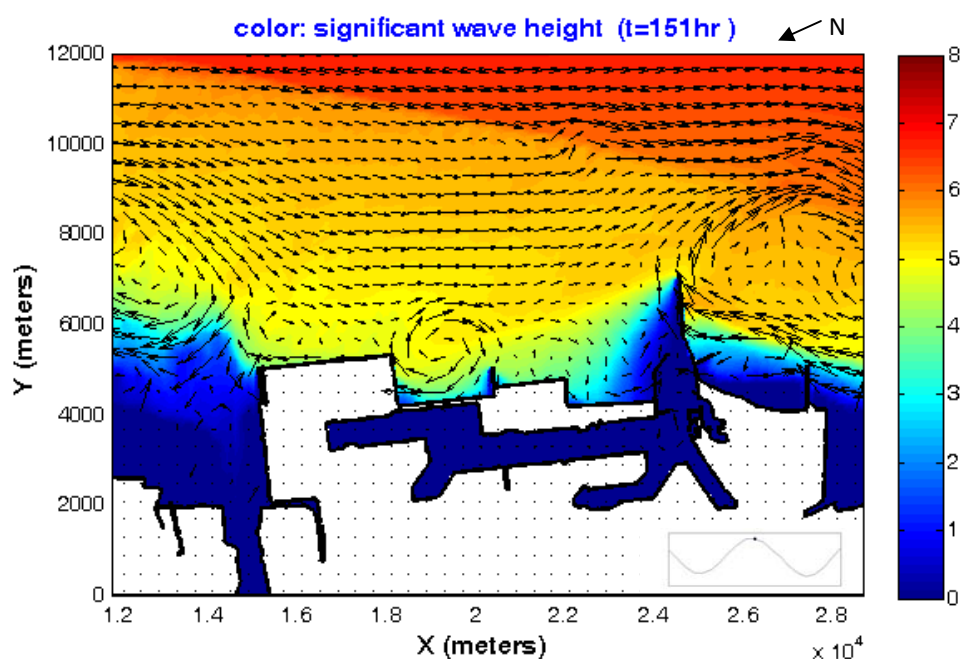


圖 3.10 臺中港附近海域 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=8.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.2\text{s}$ ，波向 N)

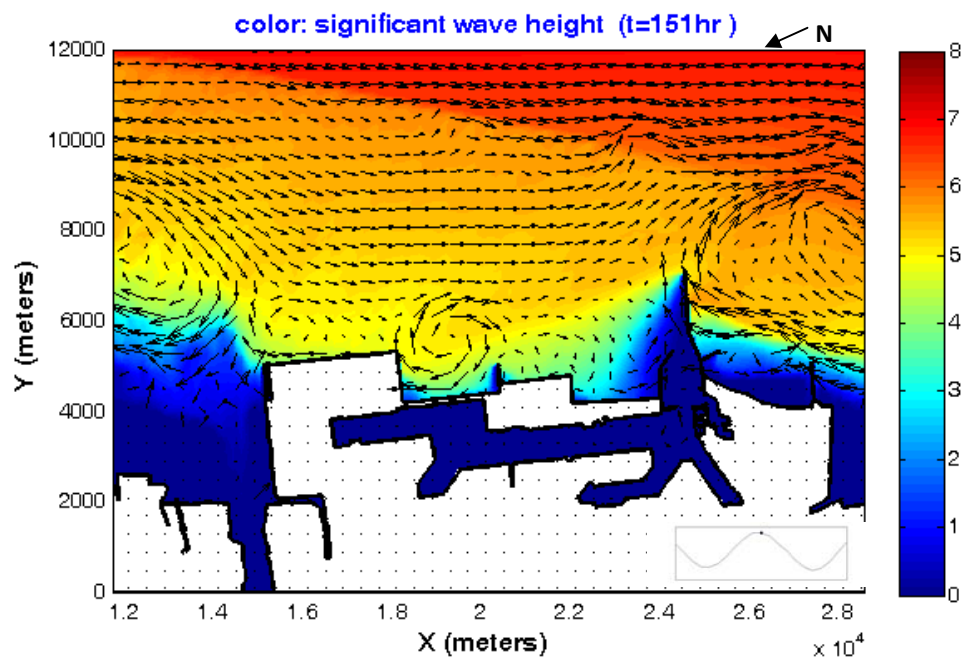


圖 3.11 臺中港附近海域 250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=8.6\text{m}$ ，示性週期 $T=12.3\text{s}$ ，波向 N)

表 3-4 模式模擬在不同颱風波浪迴歸期下在各波向的最大示性波高表

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

3.3 臺中港區未來氣候變遷情可能發生之波流場模擬

本節探討氣候變遷下臺中港區未來可能遭受之颱風波浪作用影響，許(2013)強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫報告中模擬在 2020~2039 年間臺灣西北及東北地區颱風波浪在不同颱風路徑下最大波高及週期變化統計，其結果顯示不同地區最大波高平均增率介於 59%~65%，週期平均增率介於 20.8%~25%。因此本節以表 2-8 臺中港外海颱風波迴歸分析資料，分別取其 50、100、200 與 250 年迴歸週期之颱風波浪波高再乘上最大倍數 1.65、週期乘上 1.25 作為 NearCoM 模式波浪資料輸入條件，模擬之波浪條件如表 3-5 所示。以 IPCC AR5 報告中不同氣候變情境(RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5)下所預估 2100 年海平面上升高度如表 3-3 所示，作為 NearCoM 模式背景輸入條件。

模式模擬之北防波堤各斷面處之最大示性波高如表 3-6。由表 3-6 可發現，北向颱風波浪最大示性波高發生於斷面 I 的位置，250 年迴歸期示性波高可達 8.13 公尺；西向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面 IV 的位置，250 年迴歸期示性波高達 6.49 公尺；西南向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面 IV 的位置，250 年迴歸期示性波高達 2.11 公尺。比較表 3-4 與表 3-6 可知各波向(北向,西向,西南向)最大波高變化趨勢是一致的，僅西向最大波高反而小於基準年(RCP 0.0)之波高，故氣候變遷所造成的海平面上升會導致西向入射颱風波浪在北防波堤處波高降低；而北向及西南向入射颱風波浪在北防波堤處波高增加。另外，比較圖 3-6 與圖 3-12、圖 3-9 與圖 3-15、圖 3-10 與圖 3-16 及圖 3-11 與圖 3-17 亦可明顯發現受氣候變遷影響之北向波浪，其波高增大時，並未影響最大波高發生位置，無論是 50 年迴歸期、100 年迴歸期、200 年迴歸期或 250 年迴歸期之受氣候變遷影響的颱風波浪最大示性波高皆發生在斷面 I。由圖 3-7 與圖 3-13 可發現受氣候變遷影響之西向波浪，當其波高增，傳遞至港內的波高愈大，這表示港內靜穩愈差。

表 3-5 受氣候變遷之各迴歸期颱風波浪條件

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

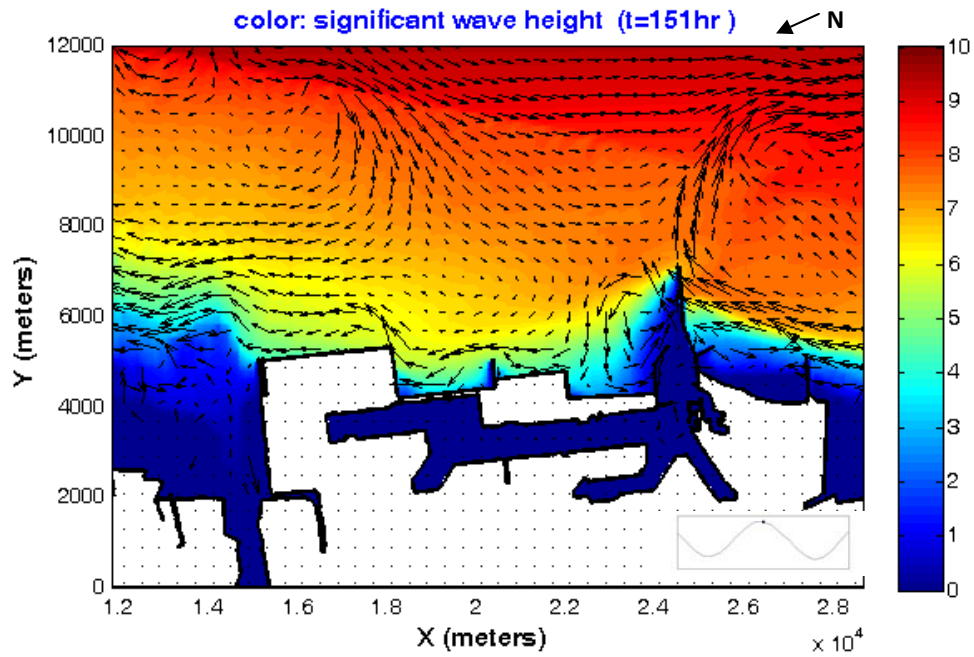


圖 3.12 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=11.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.1\text{s}$ ，波向 N)

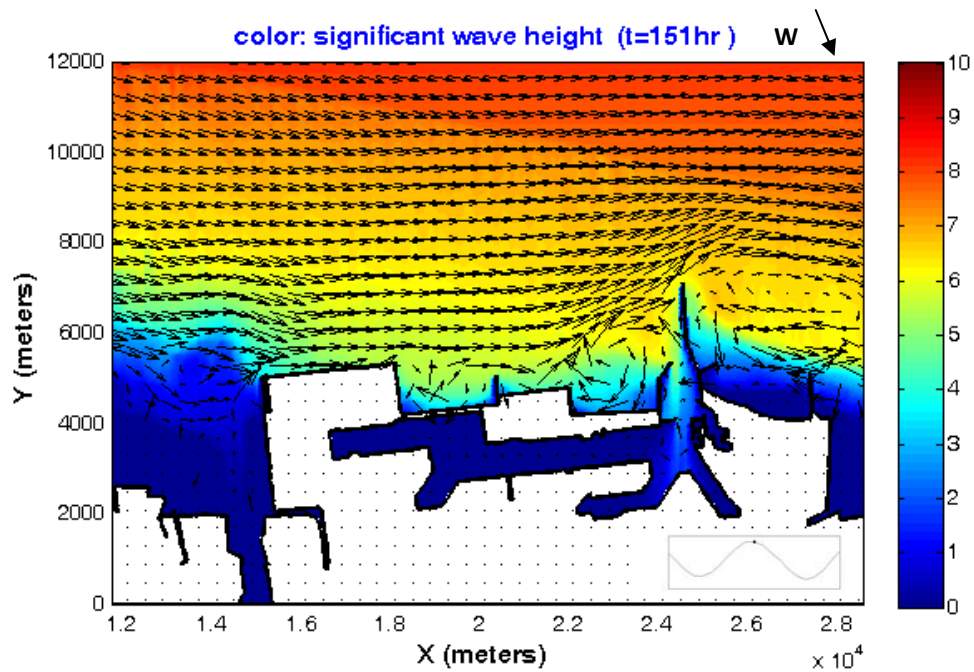


圖 3.13 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=9.4\text{m}$ ，示性週期 $T=12.5\text{s}$ ，波向 W)

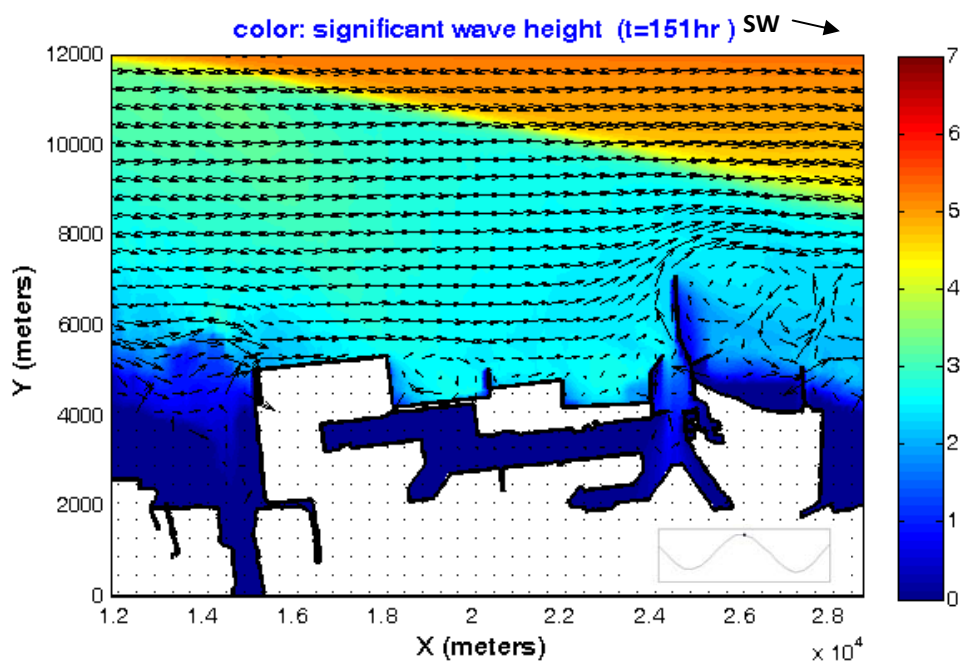


圖 3.14 臺中港附近海域受氣候變遷影響 50 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=7.8\text{m}$ ，示性週期 $T=11.4\text{s}$ ，波向 SW)

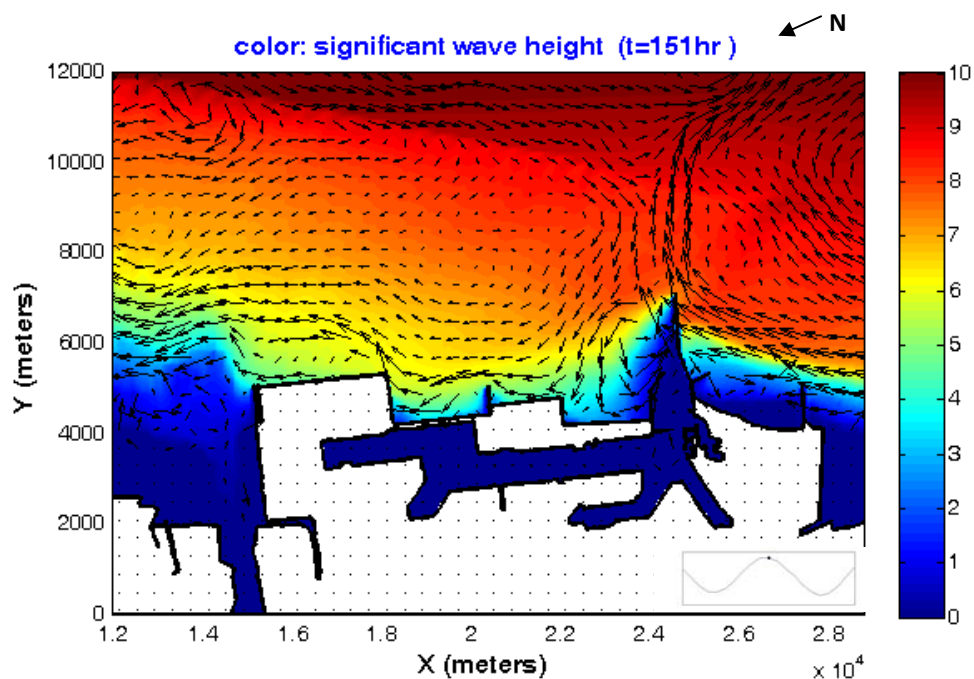


圖 3.15 臺中港附近海域受氣候變遷影響 100 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=12.9\text{m}$ ，示性週期 $T=14.6\text{s}$ ，波向 N)

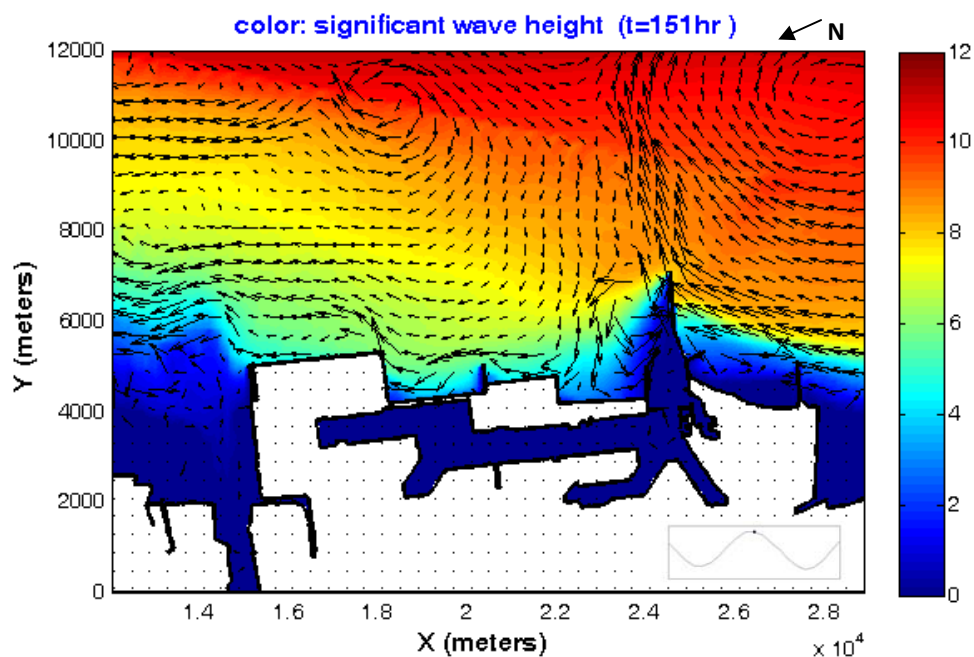


圖 3.16 臺中港附近海域受氣候變遷影響 200 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=13.9\text{m}$ ，示性週期 $T=15.3\text{s}$ ，波向 N)

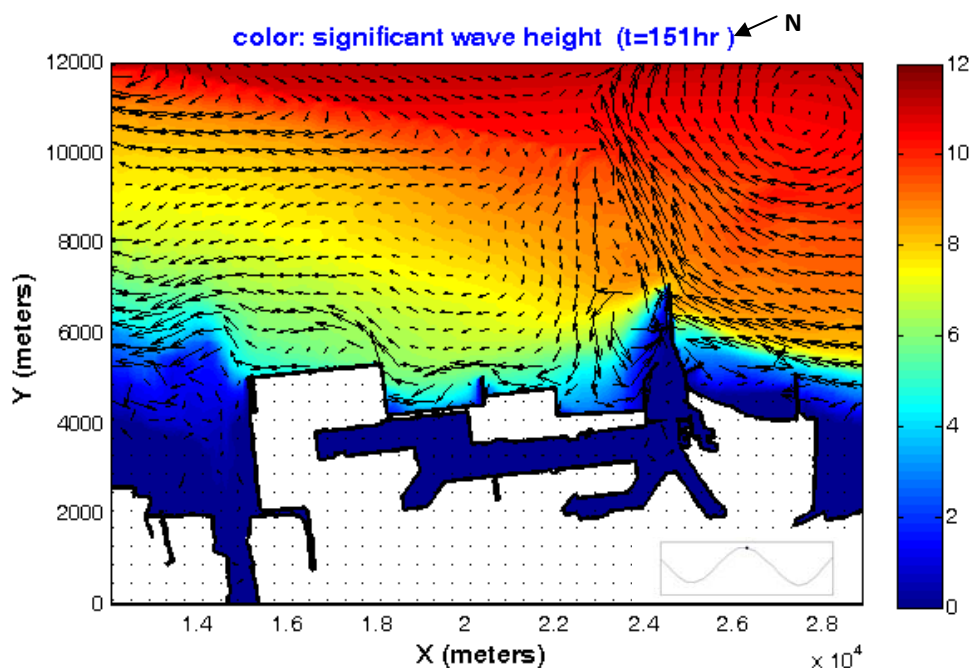


圖 3.17 臺中港附近海域受氣候變遷影響 250 年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖
(模擬條件：示性波高 $H=14.2\text{m}$ ，示性週期 $T=15.4\text{s}$ ，波向 N)

表 3-6 模式模擬受未來氣候變遷不同颱風波浪迴歸期下在各波向的最大示性波高表

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

3.4 波流場模式校驗-臺中港附近海域浮標軌跡模擬

本所港灣技術研究中心於 2013 年 7 月 23 日，於臺中港北防坡堤附近海域海面漂流浮標軌跡與風速之量測，以瞭解當地海域之表面流場變化情況。圖 3.18 與表 3-7 為北防坡的實測風速資料，量測所得之風速介於 0~10.3m/s 間。本節將應用 NearCoM 模式中之浮標軌跡追蹤模組進行驗證比較。

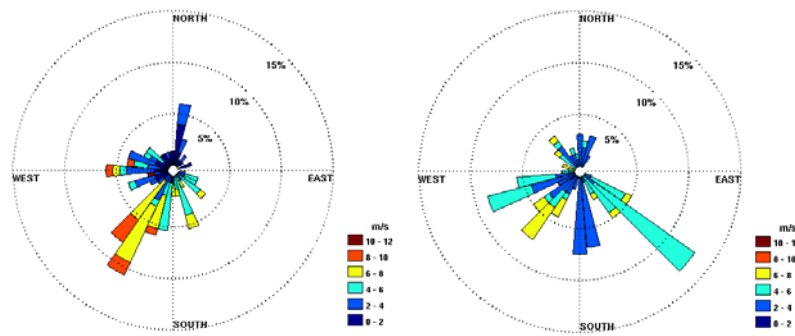


圖 3.18 臺中港北防波堤漲潮(左)及退潮(右)時段風玫瑰圖。
(引自蔡、黃 2014)

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

$$\bar{X}_m(t) = \bar{X}_m(t=0) + \int_0^t [\bar{u}_{L,m}(\bar{X}_m(t'), t')] dt', \quad (3.4.1)$$

其中 $\bar{u}_{L,m}$ 為 Lagrangian 方式下之質點速度，在 NearCoM 模式中可計算各個位置之 $\bar{u}_{L,m}$ 隨時間變化所有情形。因此，各時間點的浮標位置 $\bar{X}_m$ 即可被求得。圖 3.19~圖 3.20 分別為不同時間點實測資料與數值模擬比較，其中實線為 NearCoM 模擬結果，而點為蔡與黃(2014)實測資料。

圖 3.19 與圖 3.20 顯示於北防波堤附近的浮標軌跡實測則尚屬合理，但圖 3.19 點位 1、2 與圖 3.20 點位 1 比對結果並不理想。因此，根據 Thorpe et al.(2004)方式加入擴散修正項，如(3.4.2)式示所

$$\vec{X}_m(t) = \vec{X}_m(t=0) + \int_0^t \{[\vec{u}_{L,m}(\vec{X}_m(t'), t')] + w(t')\} dt', \quad (3.4.2)$$

其中 $w(t') = (\sqrt{12\kappa\Delta t}R_1 \cos(2\pi R_2), \sqrt{12\kappa\Delta t}R_1 \sin(2\pi R_2))$ 為二維水平擴散項， R_1 、 R_2 為隨機變數， κ 水平擴散係數 $\kappa = 0.1m^2s^{-1}$ (Spydell et al. 2015)。圖3.21與圖3.22為加入水平擴散項的模擬結果。圖3.19點位1、2與圖3.20點位1模擬結果不佳的部份於圖3.21與圖3.22有改善。

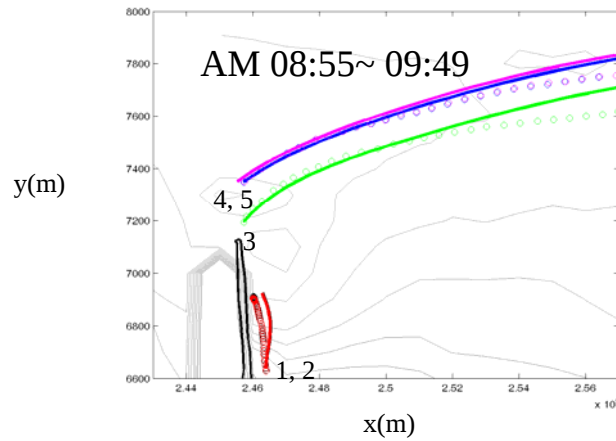


圖 3.19 浮標軌跡模擬圖

(平均風速: 1.26m/s，實線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)

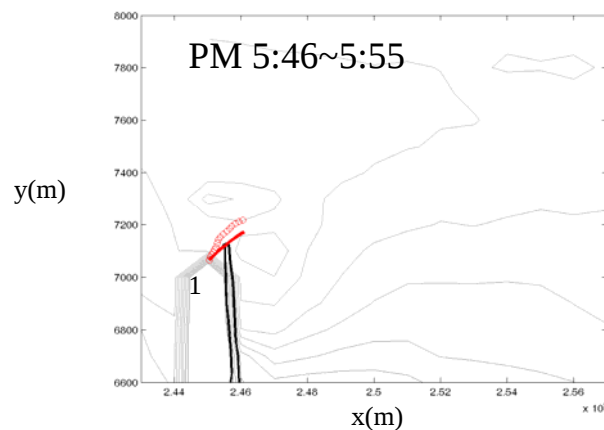


圖 3.20 浮標軌跡模擬圖

(平均風速: 5.43m/s，實線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)

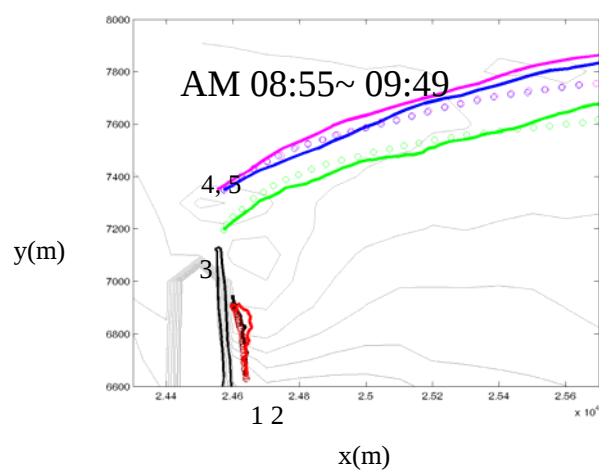


圖 3.21 含水平擴散浮標軌跡模擬

(平均風速: 1.26m/s，實線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)

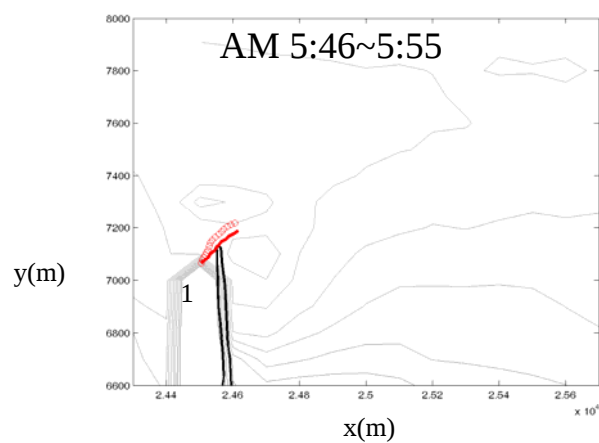


圖 3.22 含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖

(平均風速: 5.43m/s，實線: NearCoM 模擬，點: 蔡與黃(2014)實測)

表 3-7 每 10 分鐘風速風向平均資料

年月日時分	風速(m/s)	風向(度)	年月日時分	風速(m/s)	風向(度)	年月日時分	風速(m/s)	風向(度)
201307240540	2.9	231	201307241120	1.5	82	201307241700	6.8	160
201307240550	2.7	243	201307241130	2.3	81	201307241710	6.9	156
201307240600	2.8	236	201307241140	2.2	65	201307241720	6.8	137
201307240610	3.1	237	201307241150	2.5	75	201307241730	5.6	137
201307240620	3	233	201307241200	2.5	56	201307241740	6	132
201307240630	2.6	241	201307241210	2.8	65	201307241750	5.2	133
201307240640	2.7	248	201307241220	3.5	61	201307241800	5.1	143
201307240650	2.3	236	201307241230	3.3	72	201307241810	5.3	138
201307240700	2.2	217	201307241240	3.2	72	201307241820	4.2	142
201307240710	2.1	210	201307241250	3.5	69	201307241830	4.9	154
201307240720	1.2	205	201307241300	2.9	72	201307241840	5	184
201307240730	1	191	201307241310	3.5	78	201307241850	5.8	263
201307240740	1.3	182	201307241320	3.1	79	201307241900	5.8	264
201307240750	0	224	201307241330	3.5	79	201307241910	5.6	289
201307240800	0.9	133	201307241340	3.7	92	201307241920	6.1	289
201307240810	1	103	201307241350	3.9	91	201307241930	5.9	260
201307240820	1.9	117	201307241400	4.4	84	201307241940	5.8	246
201307240830	1.6	100	201307241410	3.7	91	201307241950	4.9	247
201307240840	2	106	201307241420	3.5	87	201307242000	5.4	261
201307240850	1.2	85	201307241430	4.1	97	201307242010	8.1	254
201307240900	0.4	71	201307241440	3.2	99	201307242020	7.7	236
201307240910	0.9	91	201307241450	3.3	94	201307242030	8.4	226
201307240920	0.9	76	201307241500	3.5	126	201307242040	6.4	183
201307240930	1.9	80	201307241510	3.9	115	201307242050	10.3	189
201307240940	1.9	76	201307241520	4.9	111	201307242100	9.2	182
201307240950	1.6	77	201307241530	2.6	127	201307242110	8.2	169
201307241000	1.9	76	201307241540	3.9	108	201307242120	-	-
201307241010	2.1	75	201307241550	3.6	129	201307242130	-	-
201307241020	2	65	201307241600	2.9	109	201307242140	-	-
201307241030	2	61	201307241610	2.3	120	201307242150	-	-
201307241040	1.5	67	201307241620	3.6	130	201307242200	3.8	329
201307241050	1.9	39	201307241630	4.2	141	201307242210	2.7	347
201307241100	2.7	47	201307241640	5.3	142	201307242220	3.9	339
201307241110	1.3	50	201307241650	5.8	169	201307242230	4.6	336

第四章 結構物受力分析

4.1 波場與結構物作用計算模式

臺灣的港口或岸壁常見以基礎拋石底座和沉箱組合的直立式防波堤抵抗波浪作用以保護港埠內部的航行安全與結構物安定。

過去不乏相關於波浪場和透水結構物的水工模型試驗研究，但是成本昂貴且對透水材質的孔隙大小作比例縮尺時會遭遇相當程度問題難以克服。近年來由於電腦科技的發展，計算機的運算速度與記憶容量快速地成長，而且硬體成本相對越來越低，波場與結構作用計算模式有長足的發展。

COBRAS 模式描述與近岸結構物交互作用的二維波浪場，模式中的近岸結構物可為一般不透水材質或具有孔隙的透水材質，給定孔隙率(Porosity)和中值粒徑(D_{50})等透水係數，Shih et al. (1996)將 VARANS 中雷諾應力項引入非線性渦度黏滯性的假設，體積平均的渦度黏滯性以 $k-\varepsilon$ 紊流閉合方程式計算流場的波壓、波速和相關紊流特性，COBRAS 模式理論請參閱附錄二。

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

4.2 模式建置

在「臺中港港口第二期擴建工程規劃—工程初步設計報告書」(交通部運輸研究，1999)中，臺中港為既有港口設施進行局部擴建工作，依據領港登輪及操船安全要求北防波堤延伸長度與方向，經過波浪繞

射計算，海流數值計算和平面遮蔽水工模型試驗綜合評量後提出可行方案，民國 89 年臺中港港口第二期擴建工程完工，其平面佈置圖參考圖 4.1，將北防波堤延伸 480 公尺，主要目的為提供廣闊水域腹地，浪、流靜穩之遮蔽區域，以利大型船可在安全的操船環境下進出港。

防波堤斷面形式種類甚多，傳統上堤形分類可從外觀概分為斜坡堤、直立堤、合成堤三大類，斜坡堤是以砂石料、塊石或混凝土消波塊堆成者，堤身兩側成斜面，使波浪衝擊斜坡時以斜坡、粗糙表面及堤身孔隙使波能減衰，阻其侵入海堤後線，維護海堤後線設施或水面靜穩。直立堤顧名思義以壁面垂直安放於海底之結構物，最主要為反射波浪之動能，此種形式稱為直立堤，根據直立堤的堤體材料和形狀不同，一般常見有沉箱式直立堤，方塊式直立堤，空心方塊直立堤，混凝土單塊直立堤，鋼板圓筒直立堤等。將基座以斜坡堤拋石形式鋪層，直立堤部分放置於斜坡堤堤頂部，下部斜坡堤，上部直立堤即為合成堤，與波高相比，斜坡拋石面較淺時，類似斜坡堤之功能，反之，水較深而波高較小則如同直立堤之功能，因兼具斜坡堤消散能量和直立堤反射能量的優點，適用於水深波力較大處。在前述各類堤形中，國內既有各港口及海岸開發所採用之外廓堤形式均以選用沉箱合成堤及拋石堤構造為主，其原因主要是防波堤結構必須能抵擋颱風季節之強浪，以及以往國內對卵塊石之取得相當容易。近年來，生態保育意識抬頭，生態環境保護問題已被視為水利工程學之重要課題；為了恢復海洋環境的生命力，維護海岸景觀，提升國民生活品質，促進環境共存與永續利用，在工程開發和國土保育間尋求與自然和平相處的思維下，考慮拋石斜坡堤設計雖較具有消波效果，但所需卵塊石數量相當多、不甚經濟；至於國外較常採用之鋼板圓筒直立堤，在國內施作之工程費偏高，施工上所可能遭遇之問題與沉箱堤類似，故採用沉箱式合成堤斷面。圖 4.2 是整個計算區域的地形與結構物示意圖，圖中方塊標示表示波高計位置。依照原比例臺中港北防坡堤建置 COBRAS 數值模式，位於水平位置 953 公尺處有一直立式防波堤結構物，於防波堤前後 100m 處加實際坡度變化，堤前坡度 0.05，堤後坡度 0.15，此結構物簡化為兩個部分，第一部分為一具透水性的梯型拋石基座，下底 72 公尺，上底 48 公尺，高為 6 公尺，欲模擬此拋石基座為一透水材質，假定的參數作計算，將平均粒徑設為

0.1 公尺，將其孔隙率設定為 0.49。第二部分為一不透水的直立式沉箱，直立壁位置在水平距離 978 公尺處，寬度為 22 公尺，胸牆的寬度為 3 公尺，高為 27 公尺，結構物的尺寸設置可參考圖 4.3，圖中黑色正方形標示為波高計位置，其數值表示水平方向位置，共設置 10 支波高計，9 支波高計位於堤前，1 支波高計位於堤後。

考量計算時間效益建置數值模式，將模式的計算範圍定為水平方向 $0 \leq x \leq 1125$ 公尺，垂直方向 $0 \leq y \leq 80$ 公尺，採用變動網格，靠近防波堤結構物，水平方向網格加密，水平方向有 6 個子網格，垂直方向僅 1 個子網格，範圍 $0 \leq y \leq 80$ 公尺，總計共有 527,000 網格點，詳細模式建置之網格設定請參考表 4-1，計算時間從波浪通過計算範圍起點開始，模擬時間長度 240 秒。

過去臺中港港口第二期擴建工程規劃延建北防波堤 480 公尺，設計波高分析流程主要分為三個階段，首先是深海設計波的推算，再來根據地形折繞射情形研定等值深海設計波，最後再依據合田良實之堤前波高計算法(以下稱合田設計波公式)計算最大波高，取最大波高為設計波高，代入合田設計波公式計算堤前壁面與底部波壓分布，其分析流程可如圖 4.4 所示(交通部運輸研究,1999)。合田設計波公式如下式(4.2.1)， $h/L_0 \geq 0.2$ 表示堤址位置在碎波帶外側， $h/L_0 \leq 0.2$ 表示堤址位置在碎波帶內側， h_b 為防波堤壁面至 5 倍有義波高距離的水深，有義波高 $H_{1/3}$ 的水深值，取防波堤設置處水深 h 。 $\tan \theta$ 為海底坡度， K_s 表示淺化係數， $H'_{1/3}$ 為外海有義波高。

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H'_{1/3}; h/L \geq 0.2 \\ \min((\beta_0^* H'_{1/3} + \beta_1^* h_b), \beta_{\max}^* H'_{1/3}, 1.8K_s H'_{1/3}); h/L \leq 0.2 \end{cases} \quad (4.2.1)$$

$$\beta_0^* = 0.052(H'_{1/3}/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \quad (4.2.2)$$

$$\beta_1^* = 0.063 \exp(3.8 \tan \theta) \quad (4.2.3)$$

$$\beta_{\max}^* = \max(1.65, 0.53(H'_{1/3}/L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)) \quad (4.2.4)$$

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H'_{1/3}; h/L \geq 0.2 \\ \min((\beta_0 H'_{1/3} + \beta_1 h_b), \beta_{\max} H'_{1/3}, K_s H'_{1/3}); h/L \leq 0.2 \end{cases} \quad (4.2.5)$$

$$\beta_0 = 0.028(H'_{1/3} / L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta) \quad (4.2.6)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta) \quad (4.2.7)$$

$$\beta_{\max} = \max(0.92, 0.32(H'_{1/3} / L_0)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta)) \quad (4.2.8)$$

合田波壓公式乃根據規則波波壓試驗及參照日本港灣實測波壓資料。該公式可應用於碎波前甚至碎波後之波浪，使波浪作用範圍之波壓得以連續，建議用最大波高作為設計波高，及引入不規則波之概念，解決使用規則波波壓公式推算不規則波波壓時應使用何種波高作為設計波高之困擾。波壓公式同時適用於直立堤及合成堤，當波浪正向入射時，合田波壓公式計算如下。 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 表示波壓修正係數， $\min(a,b)$ 表示取 a 或 b 兩者間值小者， d 為基礎上水深， h' 為直立部底面至靜水面間高度， h_b 為防波堤壁面至 5 倍有義波高距離的水深， β 是入射波與垂直於壁面法線間夾腳， η^* 是波壓作用頂部的高度，以上公式之相關符號說明請參考附錄四。

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) \omega_o H_d \quad (4.2.9)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh 2\pi h / L} \quad (4.2.10)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4.2.11)$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1 \quad (4.2.12)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \omega_o H_d \quad (4.2.13)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi h / L}{\sinh 4\pi h / L} \right)^2 \quad (4.2.14)$$

$$\alpha_2 = \min \left(\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_d}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_d} \right) \quad (4.2.15)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh 2\pi h / L} \right) \quad (4.2.16)$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{h_c}{\eta^*} \quad (4.2.17)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_d \quad (4.2.18)$$

颱風波浪統計分析，以 50 年迴歸期選定深海設計波，水深為 22 公尺，平均潮位面是 +2.63 公尺，選擇天文潮最高高潮位 +5.86 公尺，計算出等值深海波高，再依據合田堤前波高計算法計算堤前波高(取等值深海波高的 1.8 倍，統計上為波浪前 1/250 個最大波高之平均)，以此最大波波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒為模式的入射波條件。

數值模式之造波條件為連續 STOKES 五階規則波，入射波波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒，屬於颱風波浪。邊界條件左邊界為造波邊界條件，右邊界、上邊界和下邊界為自由滑動條件，初始條件為靜止水面，天文潮最高高潮位情況作為水深條件，其值是 27.86 公尺，波長是 161.3 公尺，以上設定作為後續比較之原始條件。

本計畫研究波場與結構物作用問題，考慮波場受地形與結構物影響的水位變化與結構物受波場交互作用產生的壓力分佈，對模擬結果有決定性的影響，去年度計畫參考李(2006)海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究，建置 COBRAS 模式模擬規則波前進在斜坡底床上，受淺化效應的自由表面變化情形和波浪通過斜坡衝擊直立式防波堤時，驗證結構物上的壓力變化，此部分之驗證工作已於去年度計畫完成。

根據以上設定建置數值模式，計算水位變化、流場速度、壓力分佈等物理量，首先輸出水平方向 2 公尺處的水位(第一支波高計)變化示意如圖 4.5，並以零上切法計算波高和週期示意如圖 4.6，從開始造波至 100 秒時，此處的水位變化穩定，待第 9 個波浪通過時，波浪開始受到反射波影響，將堤前 9 支波高計之波高和週期分散圖繪於圖 4.7，圖中的波高和週期分佈集中在波高 10.6 公尺，週期 11.4 秒，第 6 支波高計受反射波合成的影響，產生最大將近 20 公尺之波高。

模擬一個波浪週期時間，自由液面的水位變化和流場中流速的空間分佈連續圖示意如圖 4.8，圖中流速大小隨深度遞減，且流速方向的輻合與輻散與水位變化趨勢一致，若注意堤前水位變化，時間 206.6 秒

時，水位從靜水位開始下降至波谷後回升，時間 211.7 秒，水位回升至接近靜水位開始向上抬升，時間 215.1 秒時，發生越波。COBRAS 模式計算雷諾平均方程式並以 $k-\varepsilon$ 紊流模式計算紊流動能 k 和紊流消散率 ε ，將模式中計算之紊流動能轉繪製空間分佈之正規化紊流強度示意圖 4.9，其水位變化如同圖 4.8，可見於堤趾和斜坡上有兩處明顯的紊流產生，而堤前的紊流強度變化與水位有關，當水位抬升並越波時，產生較大的紊流強度。利用流場空間分布情形作正規化渦度示意圖於圖 4.10，主要產生明顯渦度的位置於斜坡，堤前和發生越波的堤後部分。

表 4-1 模式建置之網格設定

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

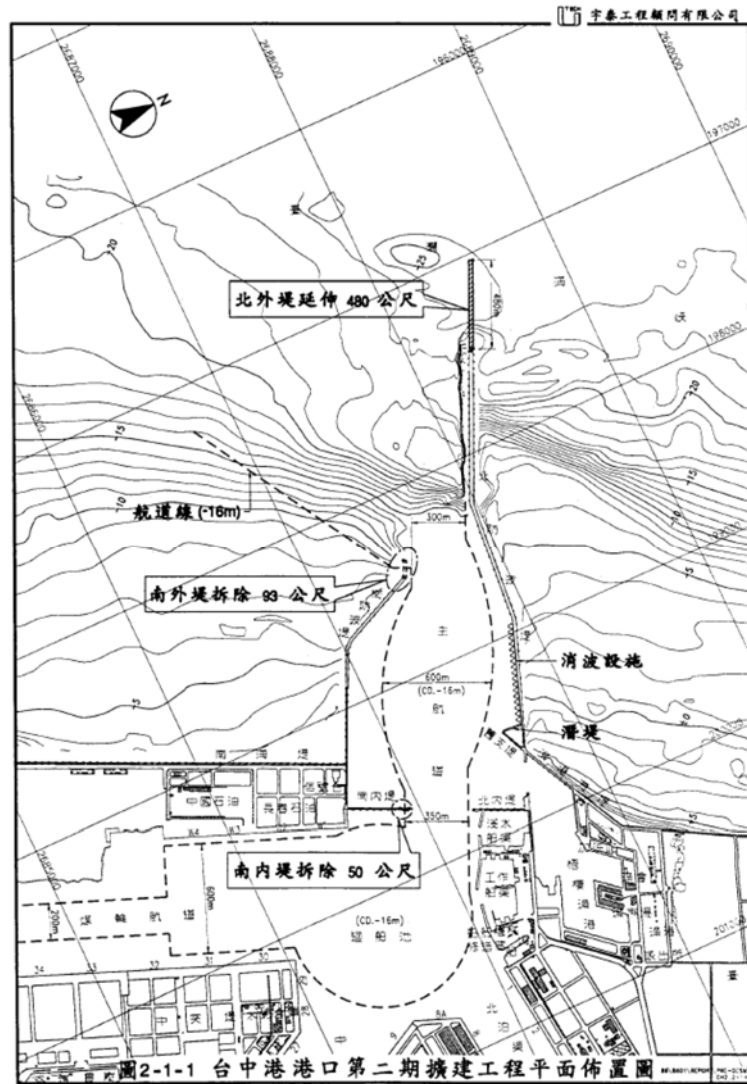


圖4.1 臺中港北防波堤擴建工程平面佈置圖(交通部運輸研究，1999)

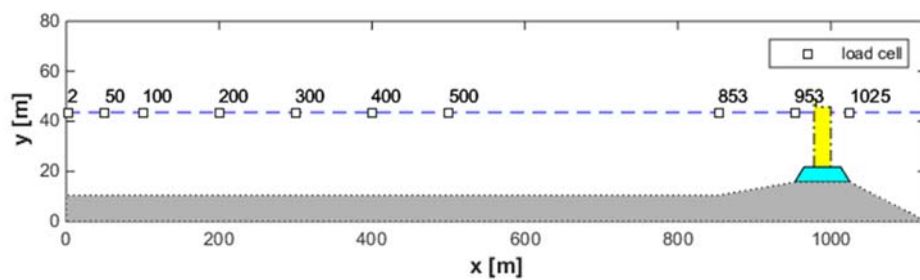


圖4.2 波高計設置圖

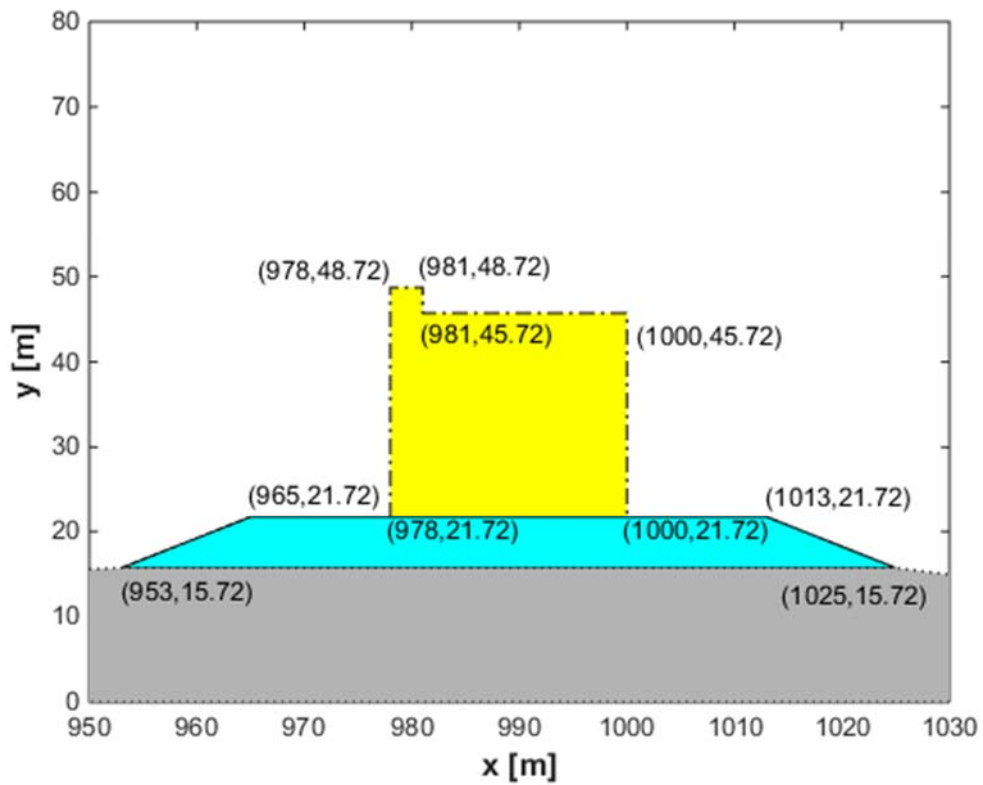


圖4.3 結構物設置圖

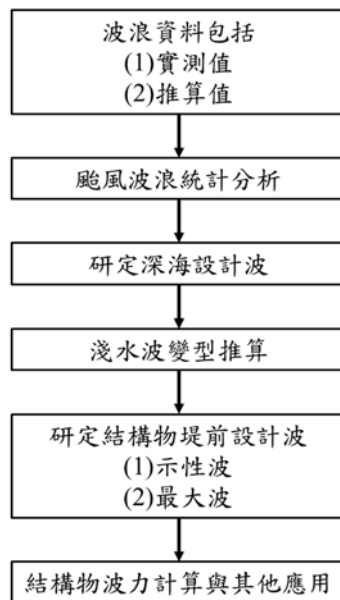


圖4.4 臺中港北防波堤施工設計規範流程圖(交通部運輸研究，1999)

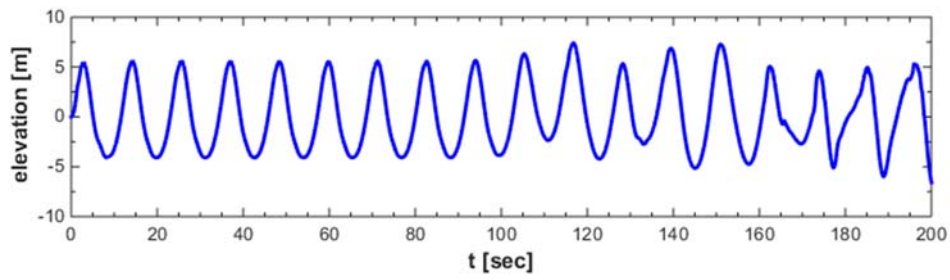


圖4.5 水平方向2公尺處(第一支波高計)之水位變化示意圖

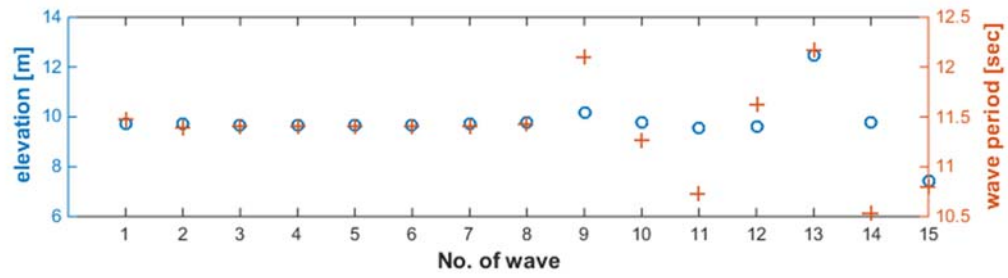


圖4.6 零上切法波高與週期變化示意圖

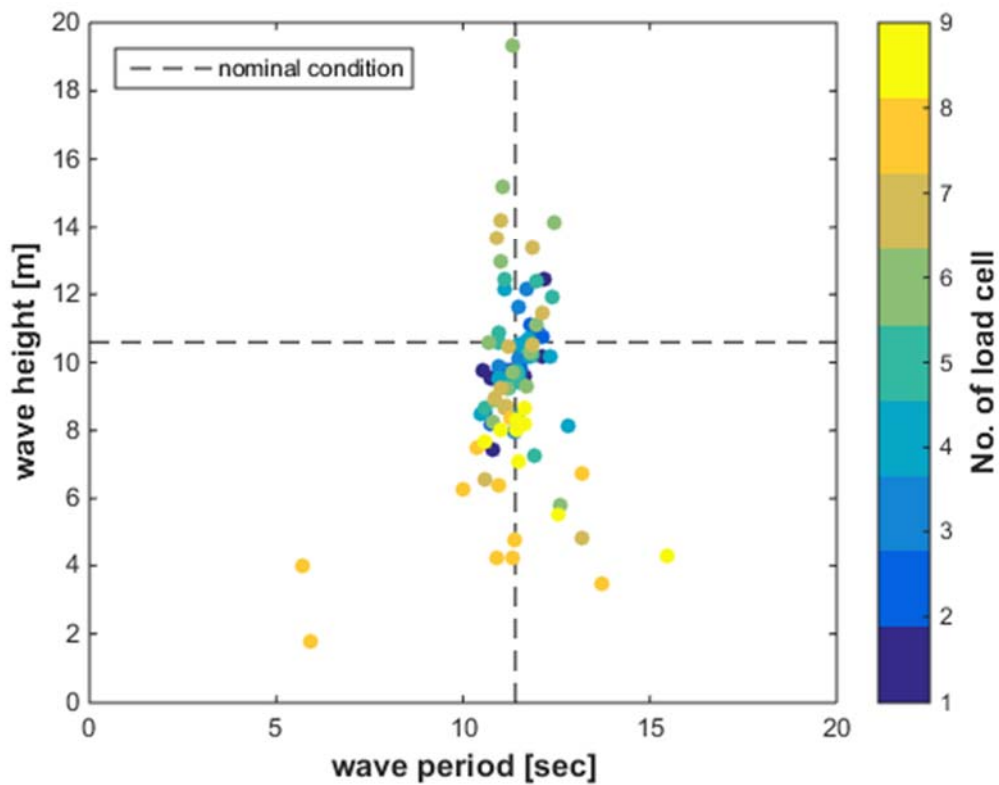


圖4.7 堤前波高計之波高和週期分佈圖

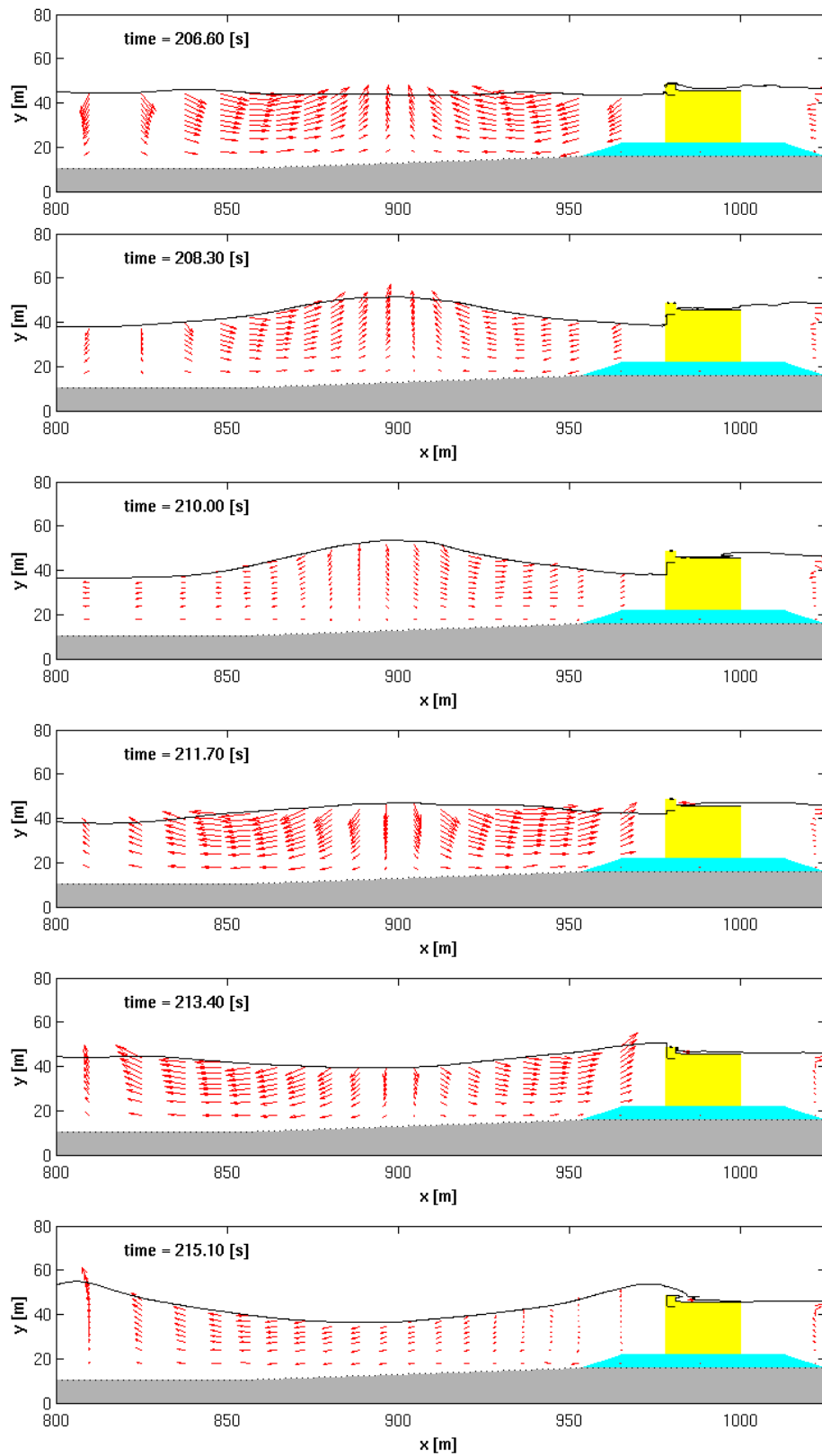


圖4.8 流速分布示意圖

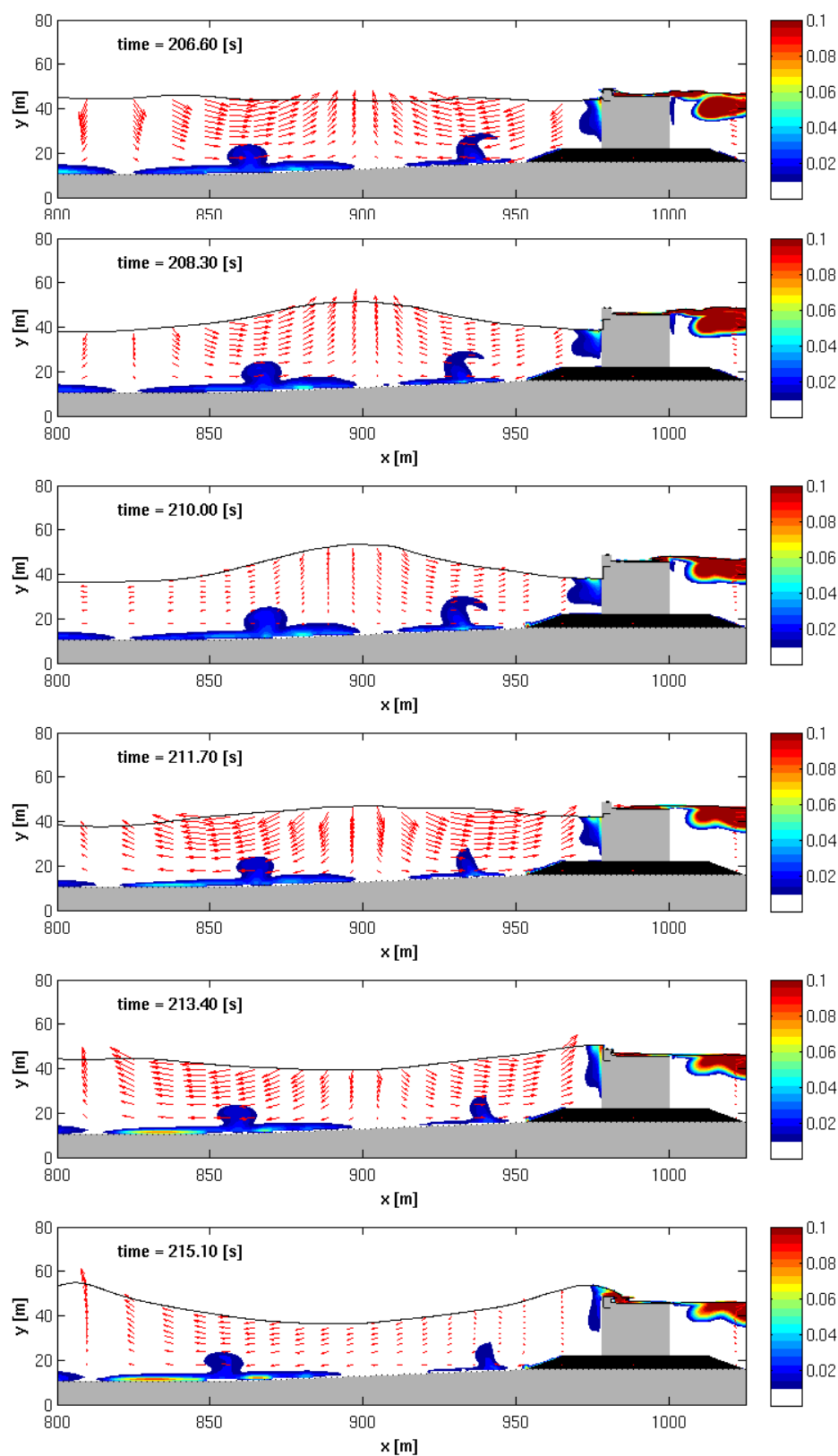


圖4.9 正規化紊流強度示意圖

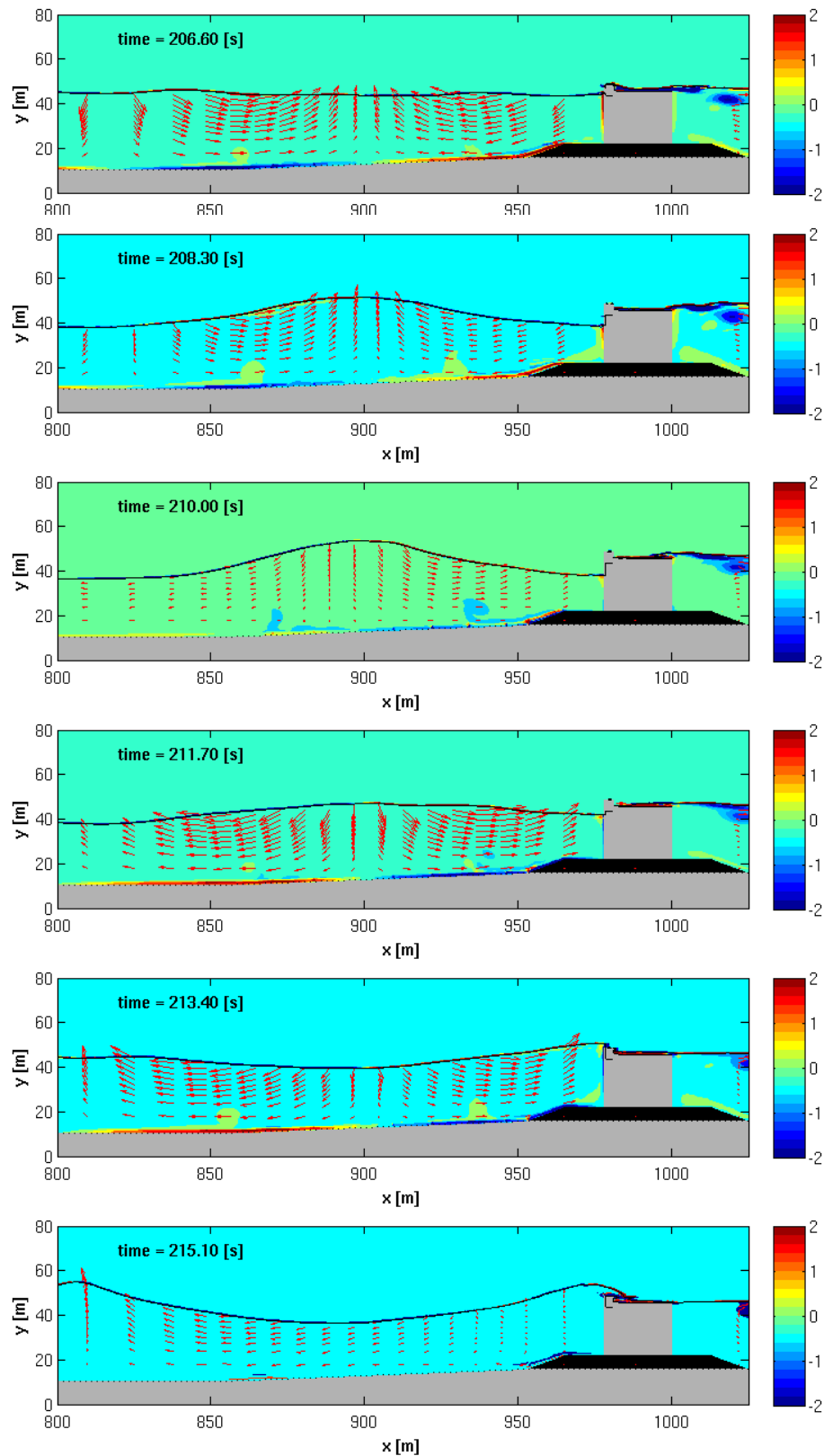


圖4.10 正規化渦度示意圖

4.3 氣候變遷造成水位抬升之影響評估

本節以臺中港為例，考慮氣候變遷影響下可能造成之水位抬升和波浪增大情況之近岸結構物受力及安定性分析，其中氣候變遷造成之水位抬升參考 IPCC AR5(2013)資料，氣候變遷造成之波浪增大情形參考許 (2013)之「強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(2/2)」報告。

考慮臺中港北防波堤延伸段堤址水深位於 20 公尺至 24 公尺處，其延伸段平面圖參考圖 4.11，將延伸段依照防波堤胸牆頂高度和設計水深不同區分四種標準斷面如表 4-2，堤線里程 0 公尺至 100 公尺為編號 I，其標準斷面圖參考圖 4.12，堤線里程 100 公尺至 130 公尺為編號 II，其標準斷面圖參考圖 4.13，堤線里程 130 公尺至 440 公尺為編號 III，其標準斷面圖參考圖 4.14，堤線里程 440 公尺至 480 公尺為編號 IV，其標準斷面圖參考圖 4.15。參考各斷面之標準斷面圖建置模式，考慮數值計算耗費時間，計算合理性和反應不同斷面不同情境的波浪條件對結構物的受力影響，調整上一節之 COBRAS 數值模式，斷面 I 之結構物堤面位於水平位置 622 公尺處，而斷面 IV 之結構物位於水平位置 630 公尺處，於防波堤前 100m 反應實際坡度變化，堤前坡度 0.01，此結構物簡化為兩個部分，第一部分為一具透水性的梯型拋石基座，下底 72 公尺，上底 48 公尺，高為 6 公尺，欲模擬此拋石基座為一透水材質，將此分為兩層，外層為塊石披覆，中值粒徑 1.18 公分，孔隙率 0.49，內層為卵石堤心，中值粒徑 3.87 公分，孔隙率 0.53。第二部分為一不透水的直立壁，寬度為 22 公尺，胸牆頂高度根據表 4-2，黑色十字標誌為物理量測量點，其數值表示水平方向位置，共設置 16 支波高計，取 5 支波高計平均分佈於直立壁水平方向位置，間隔 5.5 公尺，量測直立壁的壁前和壁後之壁面波壓，與直立壁底部的波壓。將模式的計算範圍定為水平方向 $0 \leq x \leq 1000$ 公尺，垂直方向 $0 \leq y \leq 60$ 公尺，採用均質網格，水平方向網格大小 $dx=0.5$ 公尺，垂直方向網格大小 $dy=0.5$ 公尺，總計共有 240,000 網格點，計算時間從波浪通過計算範圍起點開始，模擬時間長度 200 秒。

根據 3-2 節分析結果北向颱風波浪對於北防波堤的受力及安定性較為重要。再者，根據港灣結構物受異常波浪影響分析(1/3)報告顯示防波堤受力於最高高潮位時較最低低潮位時為大，考量本研究主要討論

氣候變遷影響臺中港北防波堤延伸段之安定性，因此選定臺中港之最高高潮位+5.86 作為極端條件之潮位資料，並以 NearCoM 模擬臺中港外海北向波浪的不同迴歸期(50 年、100 年、200 年和 250 年)波浪條件，計算到延伸段防波堤前 100 公尺，選擇發生最大波高的斷面區域做為 COBRAS 模式的計算範圍並以 NearCoM 計算的最大波高做為入射波浪條件，考慮不同颱風波浪迴歸期、氣候變遷影響和發生最大波浪情況，將入射波浪條件整理如表 4-3，由表中的最大波高發生區域(斷面)可以知道北向入射波浪影響最明顯的區域是斷面 I 和斷面 IV，因此分別依照實際之標準斷面圖和地形資料建立臺中港北防波堤近岸結構物，斷面 I 數值模式建置如圖 4.16，斷面 IV 數值模式建置如圖 4.17。圖中十字標誌表示物理量測量點，紀錄包括波高、波壓、流速等物理量。表 4-3 中分別考慮單獨水位抬升 IPCC AR5(2013)的一般情況，與許泰文(2013)報告中提出氣候變遷影響可能造成波高成長 65%，週期成長 25% 的改變因子，另外就歷史大波的波浪條件模擬斷面 I 和斷面 IV 兩種情況。

將表 4-3 中各種波浪條件之入射波(以水平方向 100 公尺處未受反射波影響之水位變化)和防波堤堤面波浪以零下切波浪分析法計算入射波和堤面波浪水位之波高和週期繪於圖 4.18、圖 4.19，圖中藍色標誌表示水平方向 100 公尺之實際波高和週期，綠色標誌表示堤面水位受反射波影響之波高和週期。

表 4-2 四種標準斷面之設計水深和胸牆頂高

堤線里程(公尺)	設計水深(公尺)	胸牆頂高(公尺)	編號
0~100	28.86	34	I
100~130	29.86	35	II
130~440	30.86	36	III
440~480	30.86	37	IV

表 4-3 防波堤前 100 公尺最大波浪發生斷面與波浪條件

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

■根據表3-6，代表受氣候變遷影響之波浪條件增益情況，參考許泰文(2013)

◎根據表2-6，代表臺中港實際量測到之歷史大波情況

○根據表3-4，代表一般情況之波浪條件

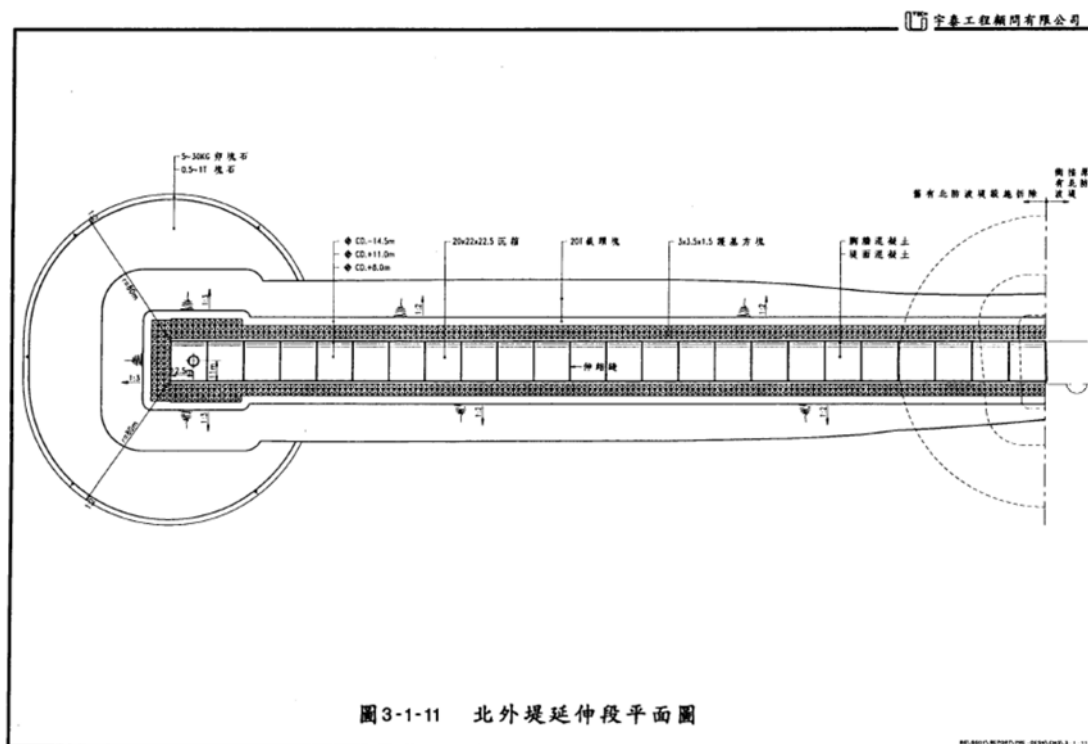


圖4.11 北外廓防波堤延伸段平面圖(交通部運輸研究，1999)

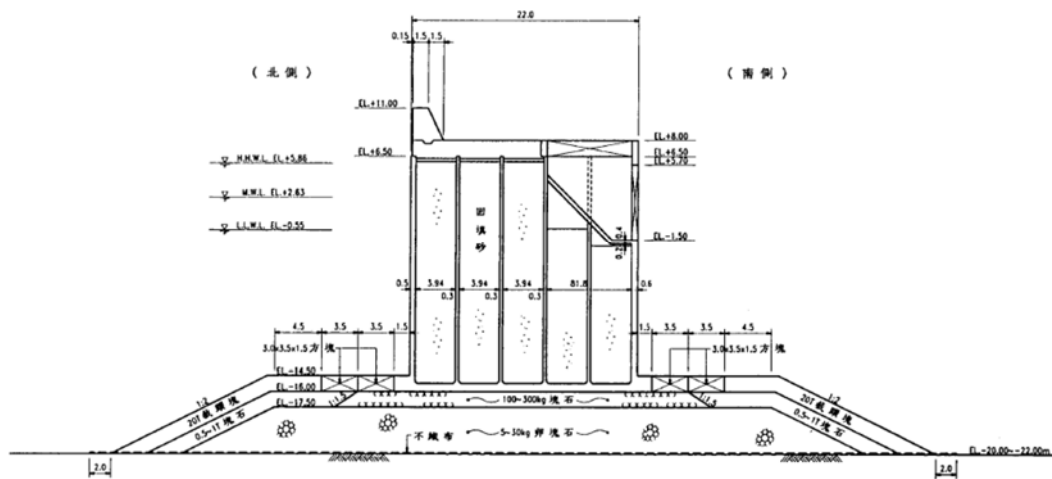


圖4.12 北防波堤延伸段0~100公尺斷面I之標準斷面圖(交通部運輸研究，1999)

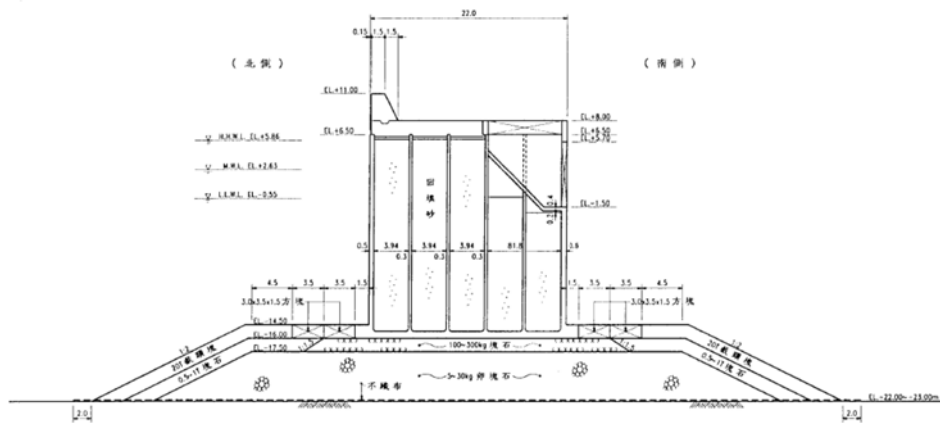


圖4.13 北防波堤延伸段100~130公尺斷面II之標準斷面圖(交通部運輸研究，1999)

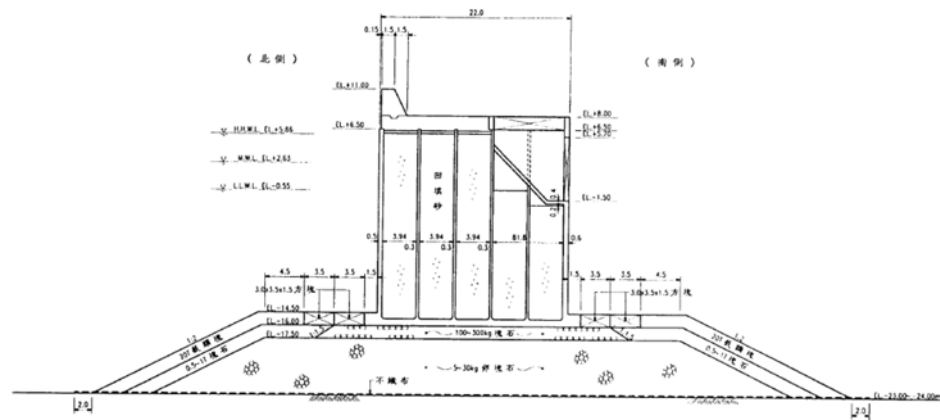


圖4.14 北防波堤延伸段130~440公尺斷面III之標準斷面圖(交通部運輸研究，1999)

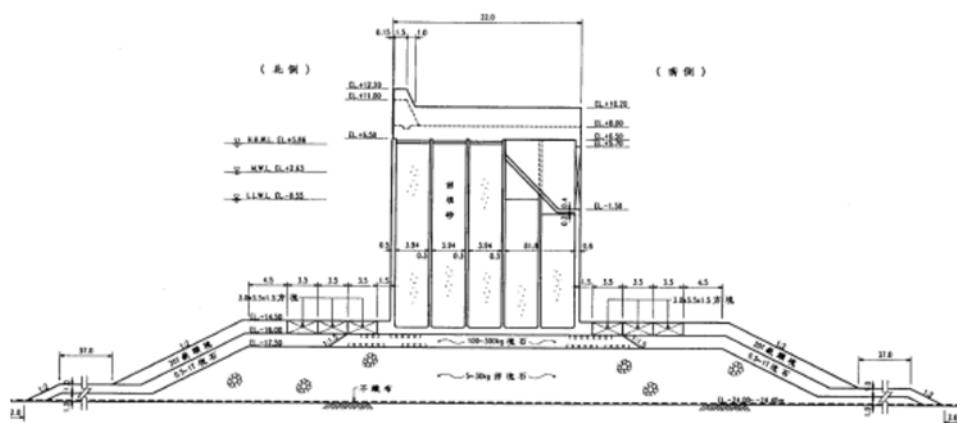


圖4.15 北防波堤延伸段440~480公尺斷面IV之標準斷面圖(交通部運輸研究，1999)

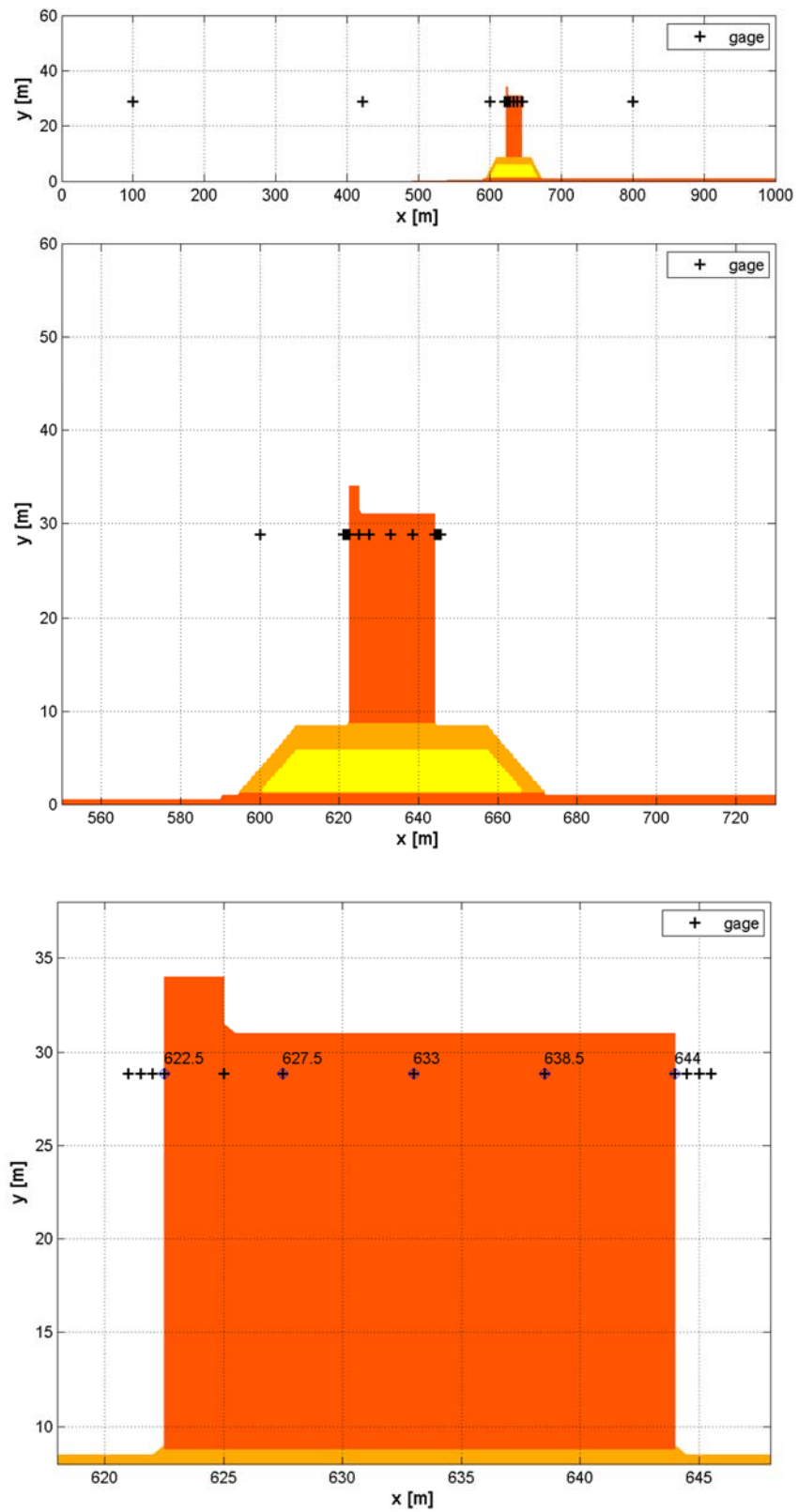


圖4.16 斷面I數值模式地形與結構物建置

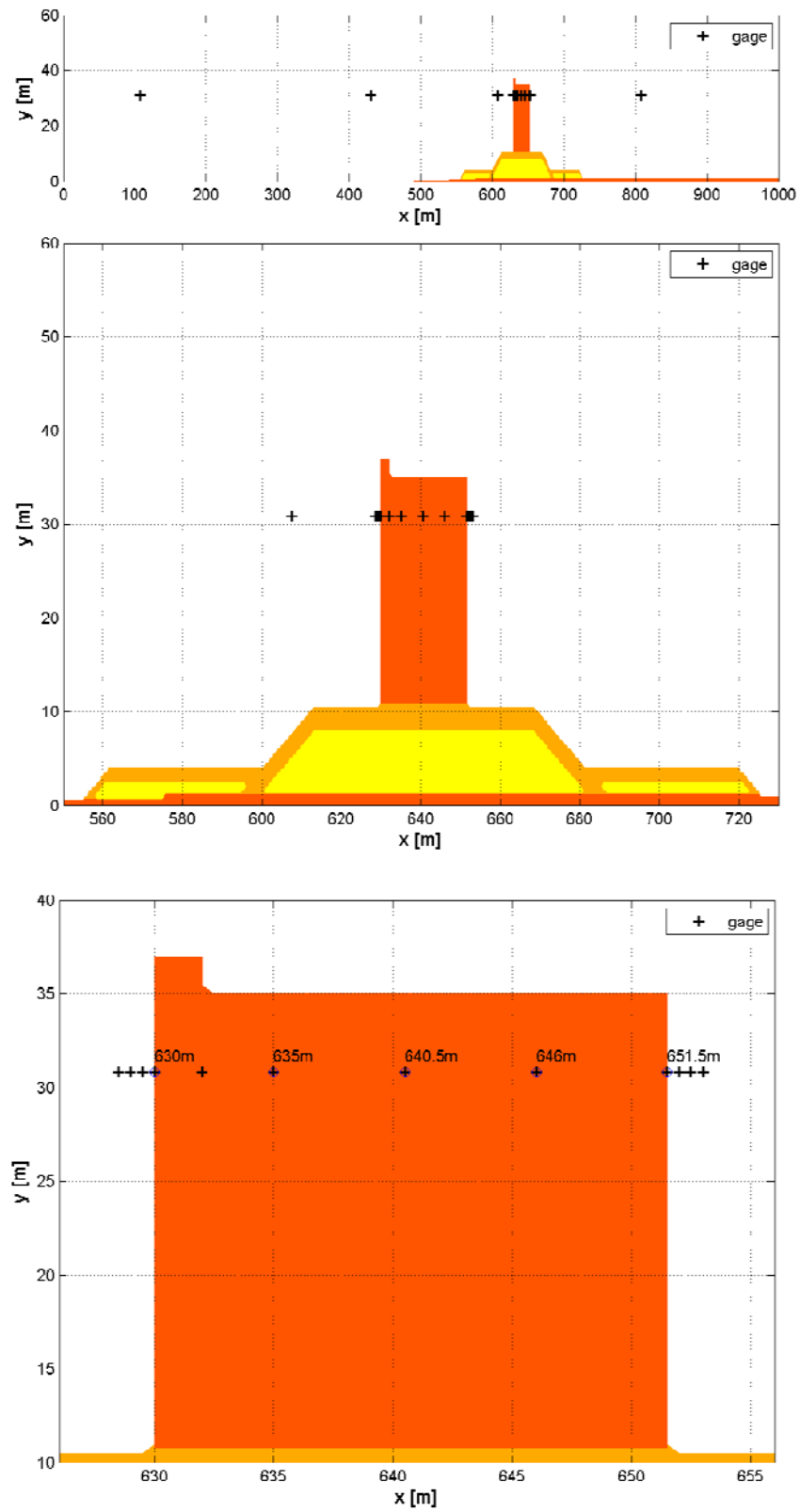


圖4.17 斷面IV數值模式地形與結構物建置

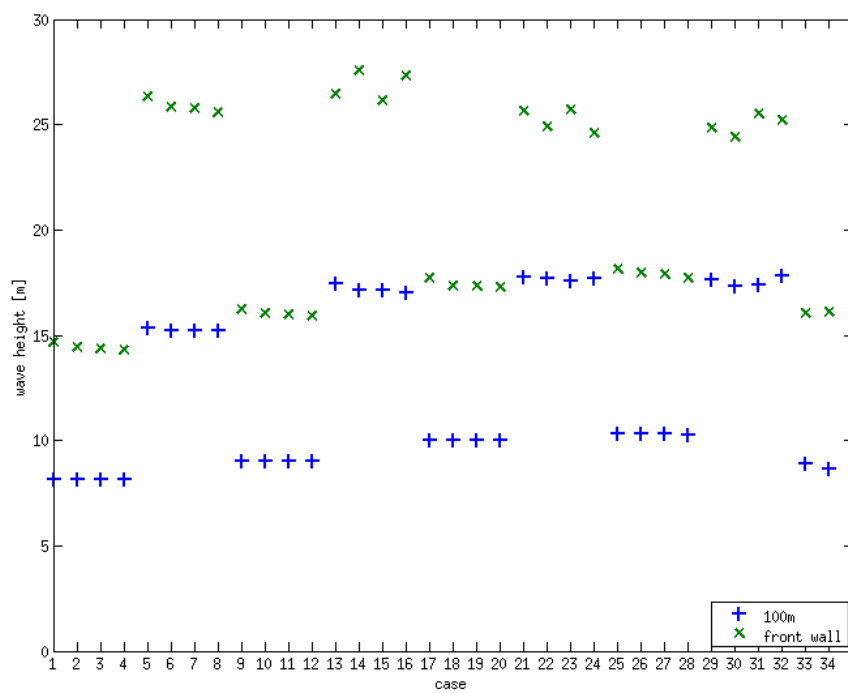


圖4.18 各種波浪條件之堤前水位波高圖

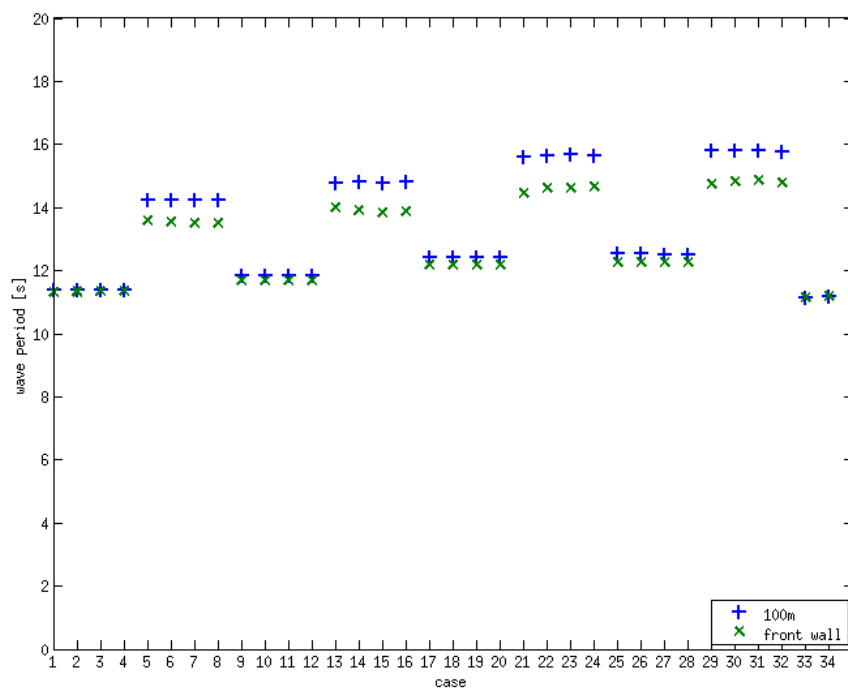


圖4.19 各種波浪條件之堤前水位週期圖

4.4 安定性分析計算

本節討論防波堤結構物受氣候變遷影響之安定性分析，直立式防波堤的安定性分析需檢討於颱風或地震時直立壁部分的滑動與傾倒，將其作為設計規劃的考量之一，工程應用在安定性分析計算時多以安全係數為參考，滑動與傾倒的安全係數至少需大於 1.2，滑動與傾倒之安全係數計算說明如下。

直立壁部分的滑動安定性需滿足下式：

$$f_s \leq fW/p \quad (4.4.1)$$

式中 f_s 是滑動安全係數，以 1.2 以上為標準，唯以模型試驗能確認直立壁部分安定時，方可小於 1.2。 f 是直立壁部分與拋石底床部分的摩擦係數，混凝土對拋石材料間的摩擦係數一般以 0.6 計算， W 是作用在直立壁部分的垂直合力， p 是作用在直立壁的水平合力。

直立壁部分的傾倒安定性需滿足下式：

$$f_o \leq Wt/ph \quad (4.4.2)$$

式中 f_o 是傾倒安全係數，以 1.2 以上為標準。 W 是作用在直立壁部分的垂直合力， p 是作用在直立壁的水平合力， t 是垂直合力作用力的力矩長， h 是水平合力作用力的力矩長。

參考本所(1999)之臺中港港口第二期擴建工程規劃—工程初步設計報告書，若考慮防波堤的受力示意圖 4.20，防波堤直立壁於外海側的垂直面稱為堤前直立壁，反之港內的稱為堤後直立壁，直立壁底部和透水拋石基座的接觸面稱為直立壁底面，堤前直立壁受波浪作用之力為 f_1 ， f_1 對 s_1 支點所作力矩同為 m_1 ，堤後直立壁受波浪作用之力為 f_2 ， f_2 對 s_2 支點所作力矩同為 m_2 ，直立壁底部受波浪作用產生的抬升力為 f_3 ， f_3 對支點 s_1 所作力矩為 m_3 ， f_3 對支點 s_2 所作力矩為 m_4 ，將表 4-3 的各種 case 之波壓分布計算圖 4.20 之作用力，以 case1 為例繪於圖 4.21。

假設此直立壁之重量為 W ，其所作力矩為 mW ，而靜水位時，波浪作用力為靜水壓力產生的波力 $f_1=f_2=f_0$ ，堤前和堤後直立壁水平作用力對支點 s_1 的力矩大小 $m_1=m_2=m_0$ 。於設計報告書(1999)中僅考慮堤前直立壁所受到的波浪作用力之動壓，因此假設堤後為靜穩狀態，保持靜水位狀態，故滑動安全係數公式如 4.4.3 式，傾倒安全係數僅需考慮 s_1 支點所受的力矩，公式如 4.4.4 式，而本次研究討論氣候變遷造成水位抬升之影響評估，若考慮未來水位抬升可能造成越波量增加的影響，勢必須修正上述之安全係數的計算。因為當波浪於堤前碎波、衝擊壁面、而發生越波後，將造成堤後水位的變化，影響堤後直立壁的受力情形。為了討論越波影響的防波堤安定性，由於堤後的水位變動，因此需考慮位相差導致堤前和堤後的位相差異，其修正之滑動安全係數需分為波浪作用力之水平合力同波向方向如 4.4.5 式，和水平合力反波向方向如 4.4.6 式，考慮波浪作用力反向的情形，以 s_1 為支點之傾倒安全係數如 4.4.7 式，而以 s_2 為支點之傾倒安全係數如 4.4.8 式，以上公式之相關符號說明請參考附錄四。

$$fs \leq -fW/(f_1-f_0) \quad (4.4.3)$$

$$fo \leq Wt/(m_1+m_3-m_0) \quad (4.4.4)$$

$$fs^+ \leq fW/(f_1-f_2) \quad (4.4.5)$$

$$fs^- \leq -fW/(f_1-f_2) \quad (4.4.6)$$

$$fo^1 \leq Wt/(m_1+m_3-m_2) \quad (4.4.7)$$

$$fo^2 \leq Wt/(m_2+m_4-m_1) \quad (4.4.8)$$

以 50 年迴歸週期一般情況下的情況為例，計算不同情境下波浪作用之水平合力計算方式比較於圖 4.22，各情境之波浪條件設定參考表 4-3，case 1 為原始條件，case 2 為 RCP 2.6 的情境，case 3 為 RCP 4.5 的情境，case 4 為 RCP 8.5 的情境，圖中紅色實線是考慮無越波產生之情況，堤後水位恆不改變的情況，波浪作用之水平合力計算方式為 $f=f_1-f_0$ ，藍色實線是考慮越波產生之情況，堤後水位隨越波情況的發生而變

動，波浪作用之水平合力計算方式為 $f=f_1-f_2$ ，由圖可見此波浪作用力受堤後水位變動修正後，反向作用力增大，因此有討論反向作用力影響的必要，本研究後續述及之波浪作用力水平方向合力，若非特別說明，則表示已考慮堤後水位變化的水平方向合力，即圖 4.22 的藍色實線數值資料，上圖中因為越波發生較少，所以考慮越波和不考慮越波的水平作用力差異較小，但是當波浪條件之波高加大，造成越波發生增加後，例如考慮氣候變遷影響造成波高增大的 case21 為例，將其水平作用力繪於圖 4.23，可明顯比較出波浪條件不同，較大的波浪可能造成越波發生機會增加，因此考慮堤後越波的作用力(藍色實線)與不考慮堤後越波的作用力(紅色實線)差異明顯增加。

為了比較不同情境的波浪作用力水平方向合力差異，將不同氣候變遷影響情境之水平方向作用力減去原始條件之水平方向作用力作圖如圖 4.24，藍色實線是 RCP 2.6 情境的作用力差異量，綠色實線是 RCP 4.5 的情境，而紅色實線是 RCP 8.5 的情境，由圖中的差異量變化情形，可以看出於 RCP8.5 情境下時，其水平作用力的差異量與其他情境相比較為最大，而 RCP2.6 的差異量相較為最小，計算其差異量之標準差量化不同情境與原始條件的差異情形，於 RCP2.6 情境之標準差為 114.73 kN/m，RCP8.5 情境之標準差為 164.63 kN/m，可見水平作用力之變動情況隨不同水位抬升情形而增大，說明氣候變遷影響下，近岸結構物如防波堤所受的波浪作用力也將加大，因此有討論結構物在不同氣候變遷情境之安定性分析的必要。

COBRAS 模式逐時產出計算區域中各網格點的壓力物理量，將不同情境下的滑動安全係數計算，以 case1~case4 為例繪於圖 4.25，其餘之滑動安全係數計算於附錄三中，各情境之條件設定參考表 4-3，圖中藍色標誌為水平合力同波向方向的滑動安全係數 fs^+ ，其公式參考 4.4.5 式，值為隨時間變動之參考量，紅色標誌為水平合力反波向方向的滑動安全係數 fs^- ，其公式參考 4.4.6 式，值為隨時間變動之參考量，黑色虛線表示不考慮越波情況的最小滑動安全係數 fs ，其公式參考 4.4.3 式。將表 4-3 中各種波浪條件考慮堤後越波之 fs^+ 和 fs^- 集合之最小值和不考

慮越波情況之 f_s 繪於圖 4.26 中，圖中藍色標誌是考慮堤後越波之動態最小滑動安全係數，綠色標誌是不考慮越波情況之滑動安全係數，紅色標誌是合田波壓公式計算結果，虛線為安全係數 1.2 之臨界線，圖中合田波壓公式明顯高估於考慮越波情況和不考慮越波情況之數值計算結果，其中 case9~case12、case18~case20、case23、case25~case31、case33 之考慮越波之滑動安全係數小於不考慮越波情況之滑動安全係數，說明考慮越波情況的堤後水位變化對滑動安定性分析的重要性。其中 case13~case16、case21~case24 和 case29~32 之考慮越波情況之動態滑動安全係數小於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析具有一定的影響，值得注意的是，超過臨界值的迴歸期為 100 年以上，因此若採用目前慣用之 50 年為設計迴歸週期，50 年迴歸期之波浪條件受氣候變遷影響的情境下仍然屬安定，但是在工程設計的角度，隨著氣候變遷的影響變化，在港灣工程選擇設計迴歸期是否需要調整至更長迴歸期時間，這部分仍須進一步研究。

將不同情境下的傾倒安全係數計算，以 case1~case4 為例繪於圖 4.27 其餘之傾倒安全係數計算於附錄三中，圖中藍色標誌為水平合力同波向方向的傾倒安全係數 fo^1 ，其公式參考 4.4.7，值為隨時間變動之參考量，紅色標誌為水平合力反波向方向的傾倒安全係數 fo^2 ，其公式參考 4.4.8，值為隨時間變動之參考量，黑色虛線表示不考慮越波情況的最小傾倒安全係數，其公式參考 4.4.4 式，以此最小值作基準值。將表 4-3 中各種波浪條件考慮堤後越波之 fo^1 和 fo^2 集合之最小值和不考慮越波情況之 fo 繪於圖 4.28 中，圖中藍色標誌是考慮堤後越波之動態最小傾倒安全係數，綠色標誌是不考慮越波情況之傾倒安全係數，紅色標誌是合田公式計算結果，虛線為安全係數 1.2 之臨界線，圖中合田波壓公式明顯高估於考慮越波情況和不考慮越波情況之數值計算結果，而 case7、case9、case10~case12、case17~case21、case23~case27、case29、case30 和 case33 之考慮越波情況之動態傾倒安全係數小於不考慮越波情況之傾倒安全係數，如上所述，再次說明考慮越波情況的堤後水位變

化對傾倒安定性分析的重要性。而所有波浪條件的計算之考慮越波情況傾倒安全係數皆大於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析而言，傾倒的安定性在設計迴歸期或者更長之迴歸期都認為是穩定的情況。另外比較歷史大波和各迴歸週期的安定性比較，分別以 case33 和 case34 模擬歷史大波條件下於斷面 I 和斷面 VI 之結構物受力情形，其滑動安全係數或傾倒安全係數都大於臨界值 1.2 以上，與各迴歸週期條件相比，歷史大波條件之安全係數明顯低於 50 年、100 年迴歸週期條件，而略高於 200 年迴歸週期條件。

以 case 1 的情況為例，將壓力分佈繪於圖 4.29，圖中 30 秒時(左上)，波浪還沒傳遞到堤前，堤體周圍水位靜止，堤前和堤後皆屬靜水壓分佈，堤體底部之波壓均勻分布。圖中 40 秒時(右上)，波浪傳到堤前造成水位抬升，因此堤前波壓高於堤後波壓，堤體底部之波壓分布與水平方向一致。圖中 80 秒時(左下)，波浪高於堤頂，產生越波。圖中 100 秒時，越波造成堤後水位震盪，堤前之波浪於波谷位置，因此明顯可見其堤後之波壓大於堤前之波壓，堤體底部之波壓分佈和水平方向一致。

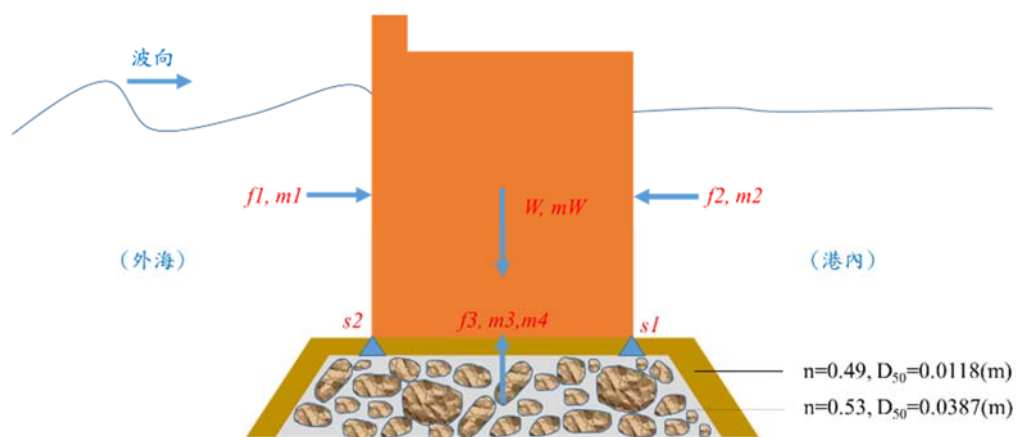


圖4.20 防波堤受力示意圖

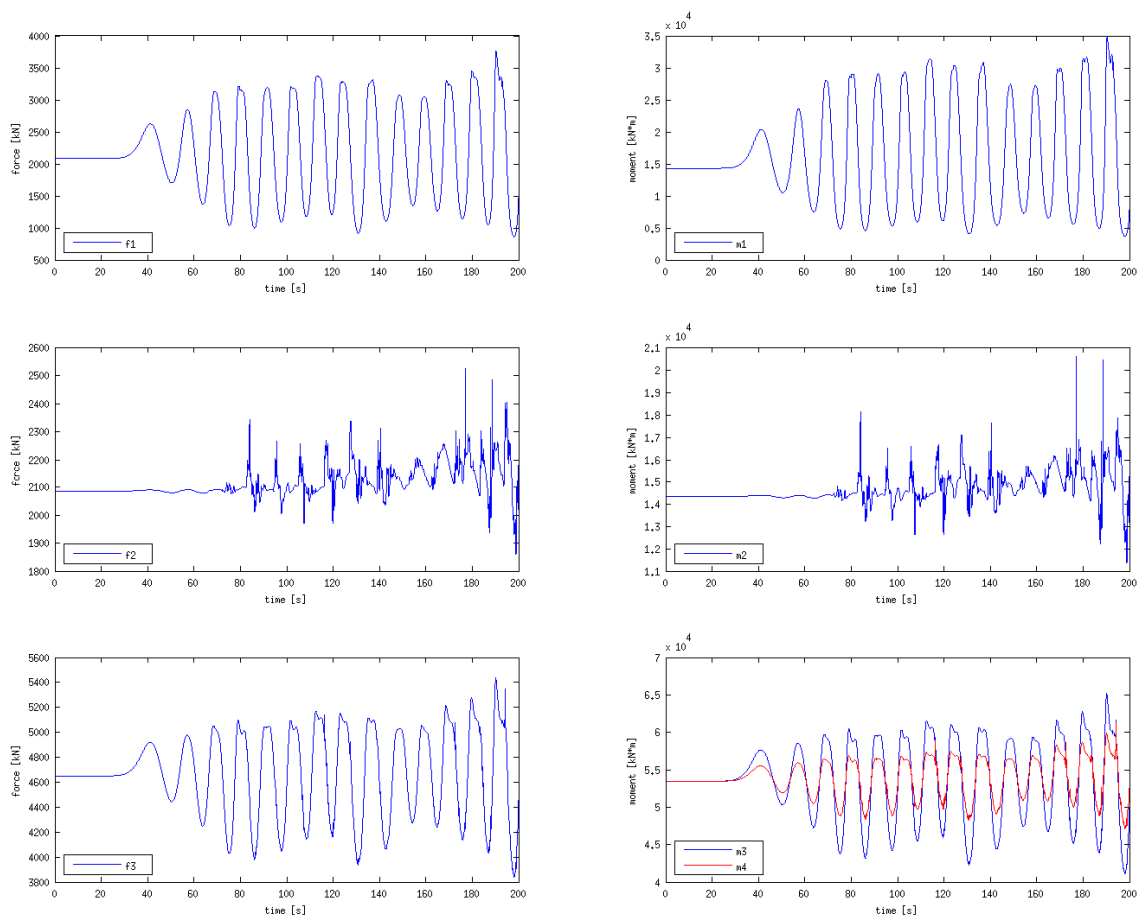


圖4.21 case1各種作用力計算

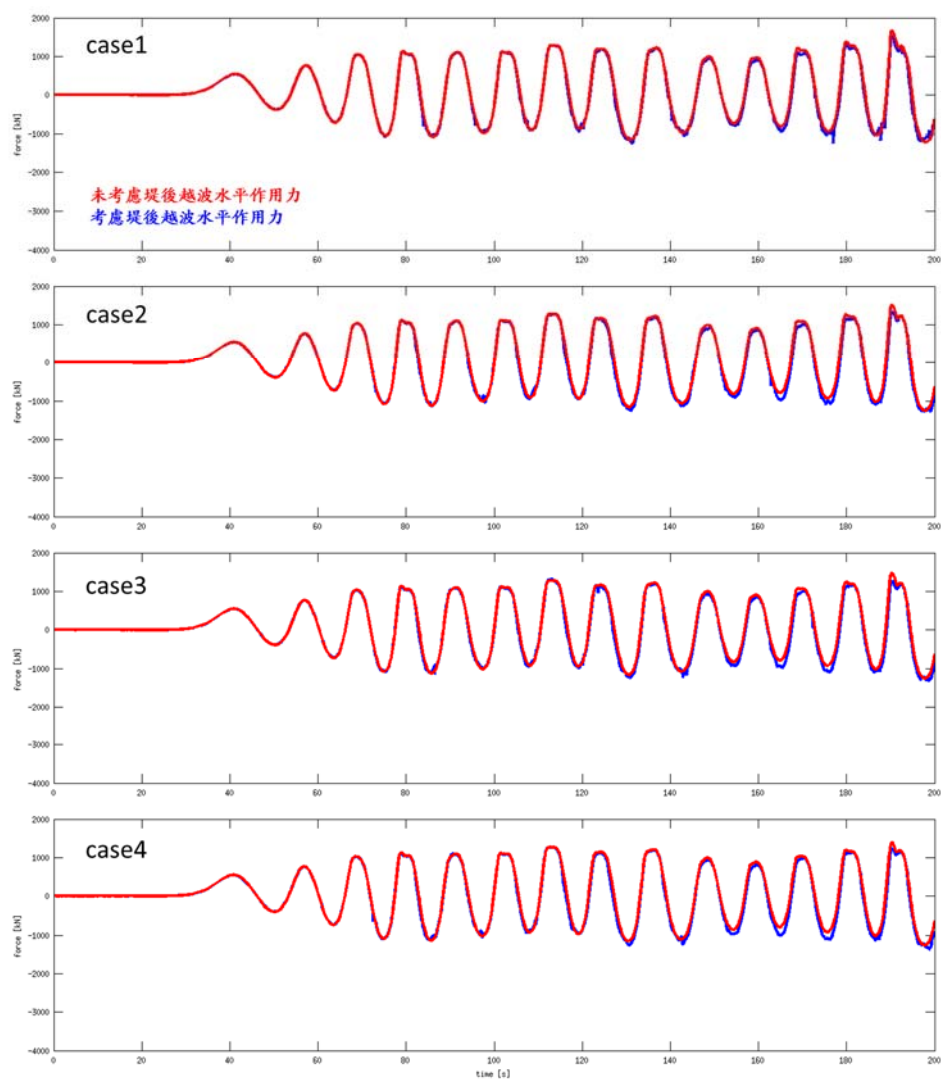


圖4.22 不同情境下波浪作用之水平合力計算方式比較圖

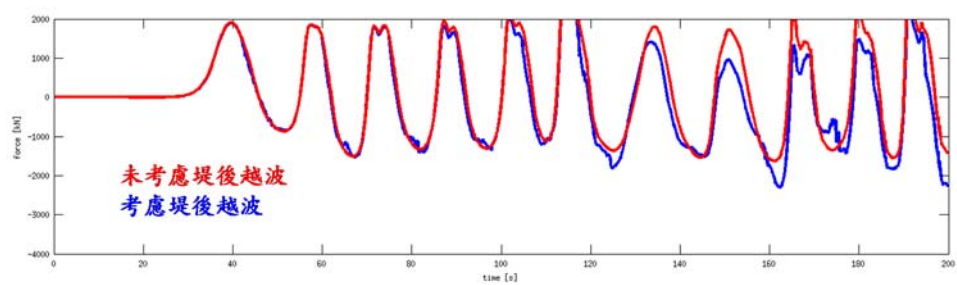


圖4.23 case21波浪作用之水平合力計算方式比較圖

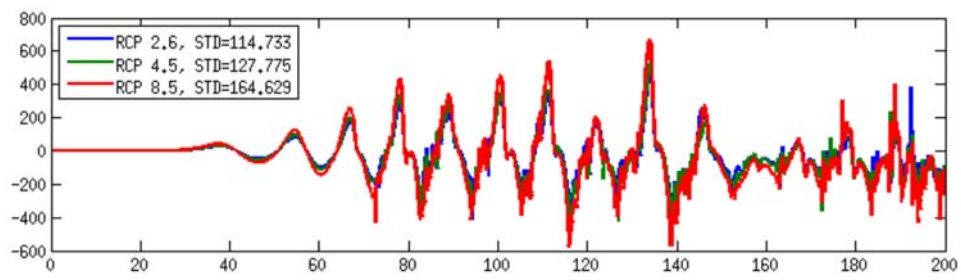


圖4.24 不同情境水平波浪作用力差異量比較圖

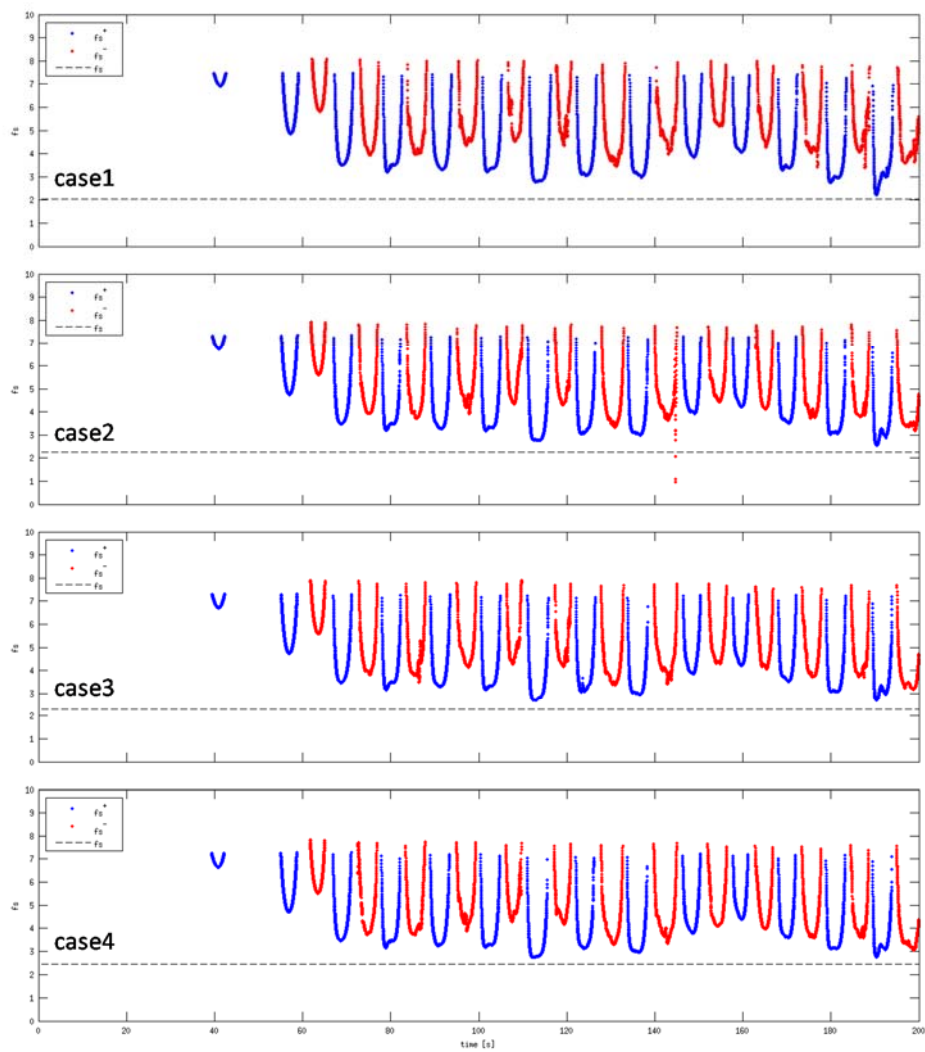


圖4.25 不同情境下滑動安全係數時間序列圖

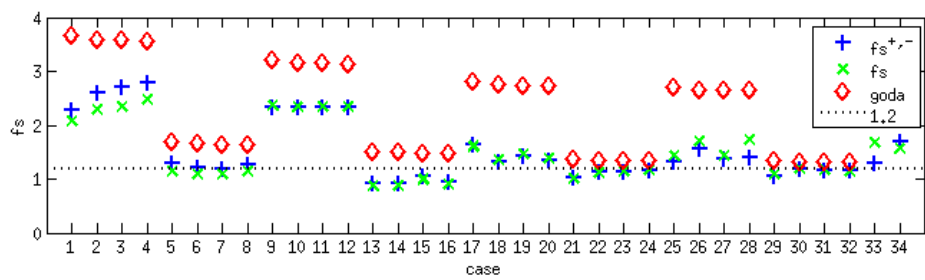


圖4.26 不同情境下滑動安全係數比較圖

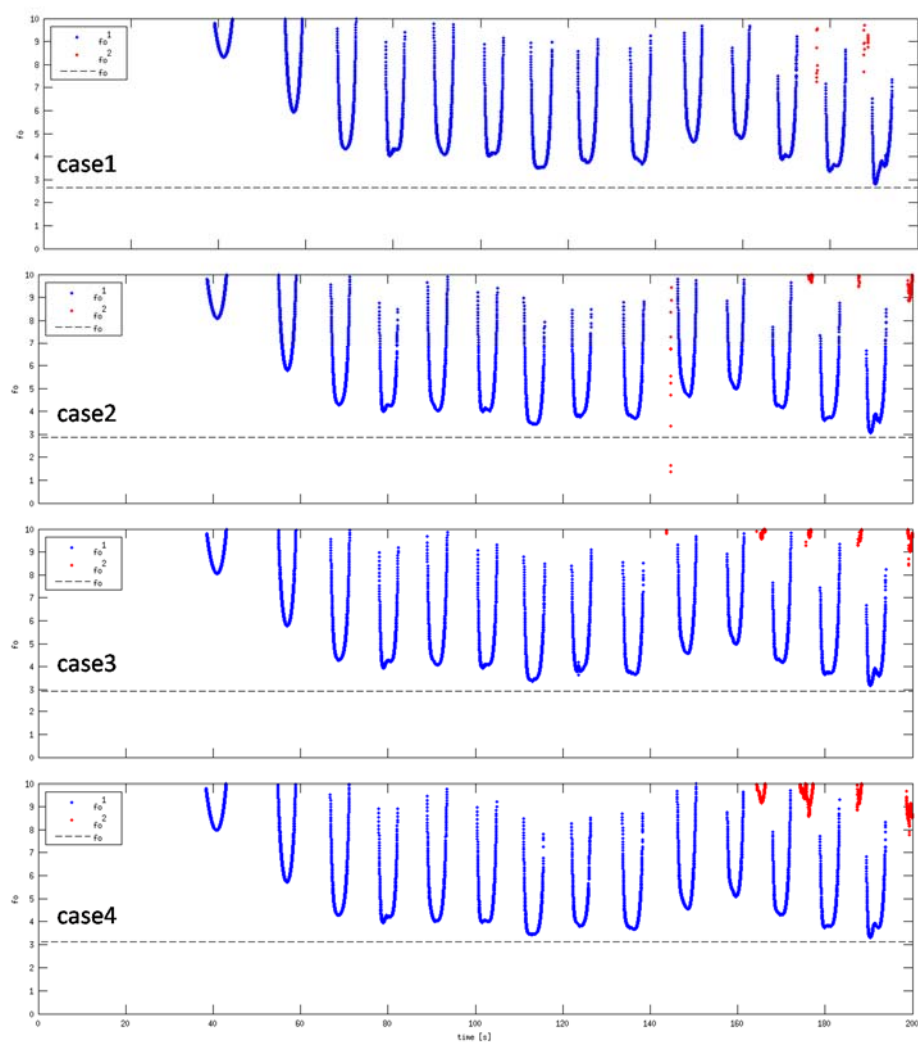


圖4.27 不同情境下傾倒安全係數時間序列圖

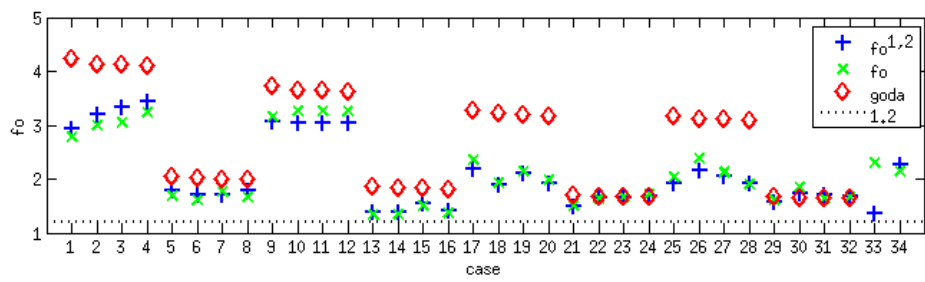


圖4.28 不同情境下傾倒安全係數比較圖

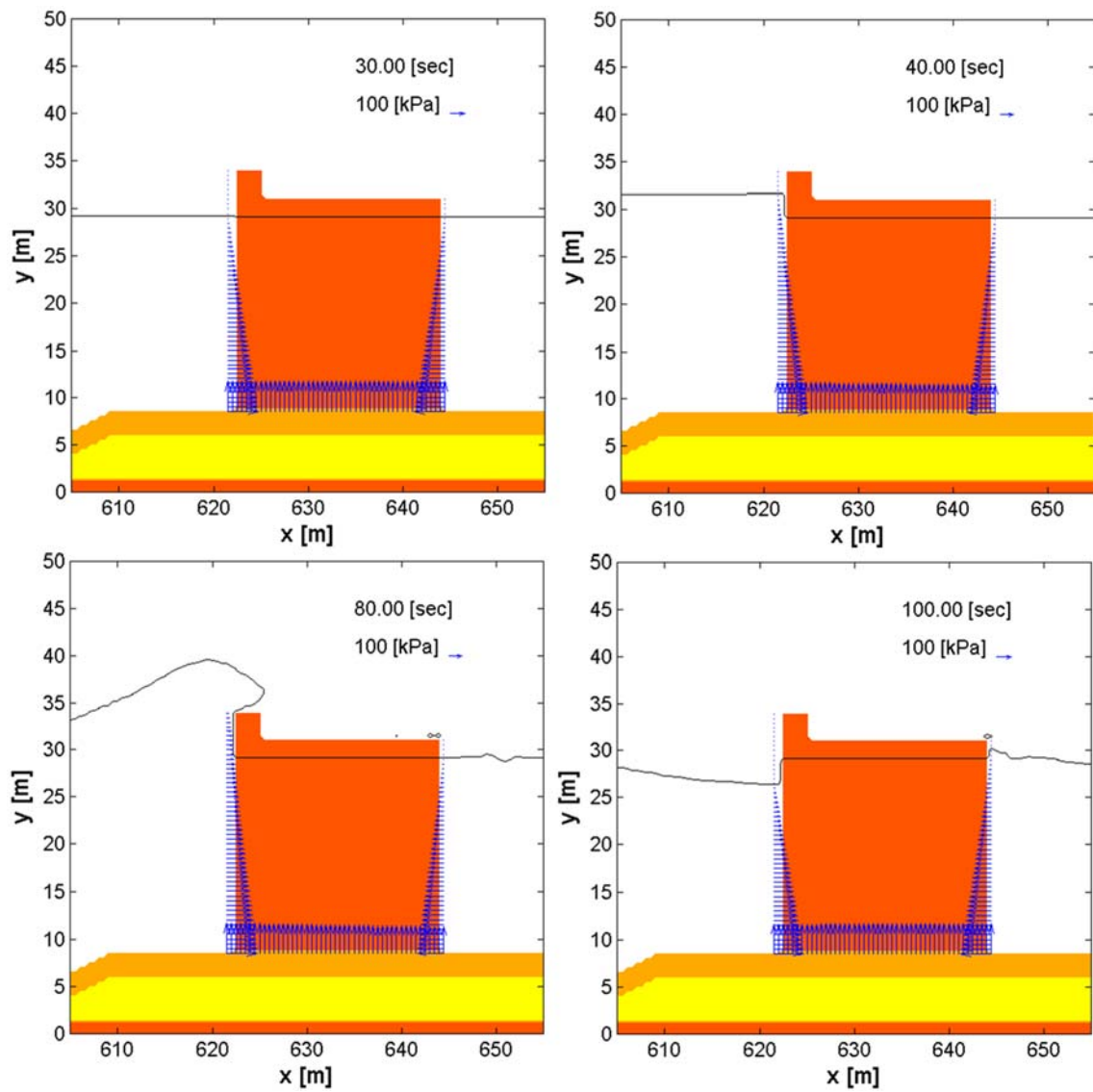


圖4.29 水位分布和壓力分布圖 (時間30、40、80和100秒)

4.5 越波量計算

上述之滑動與傾倒的安定性計算公式中，引入越波造成堤後水位變化修正計算方法，來檢視其安全係數是否在合乎標準，並且與交通部運輸研究所「臺中港港口第二期擴建工程規劃—工程初步設計報告書」(交通部運輸研究，1999)計算方法之結果比較，因此越波情況計算並且對應不同情境下的情形是本節的討論重點。越波量即波浪於海岸結構物頂部所能通過之水量，計算模式中水位超過直立壁堤頂部分之高度與流速分布再將其相乘便可知通過堤頂之越波量。以 case1 為例，計算瞬時越波量繪於圖 4.30，計算累積越波量於圖 4.31，圖 4.30 可見於模式計算時間約 90 秒後開始產生越波，最大瞬時越波量產生於約 193 秒時，計算累積越波量繪於圖 4.31，由圖 4.31 可見 case1 於 150 秒累積越波量約為 200 立方公尺，至 200 秒時累積越波量約 370 立方公尺。將表 4-3 中各種波浪條件之最大瞬時越波量繪於圖 4.32，各種波浪條件於計算時間 150 秒之累積越波量繪於圖 4.33，由圖 4.32 可見瞬時越波量在不同波浪條件的分佈並沒有顯著的規律，但是基本上隨著迴歸期越大越大，另外以許泰文(2013)計算之氣候變遷影響之波高變化之波浪條件(如 case5~case8)明顯大於一般情況(case1~case4)。圖 4.33 相對具規律性，基本上其波浪條件之波高和水位對累積越波量都有明顯的相關性。

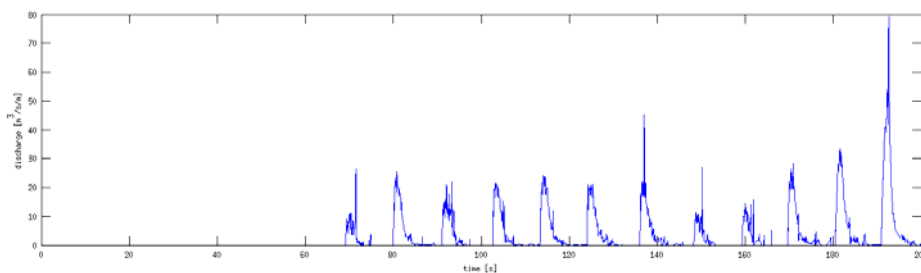


圖4.30 case1之瞬時越波量圖

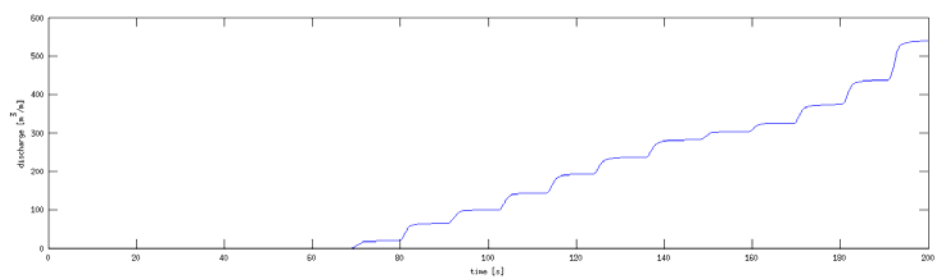


圖4.31 case1之逐時累積越波量圖

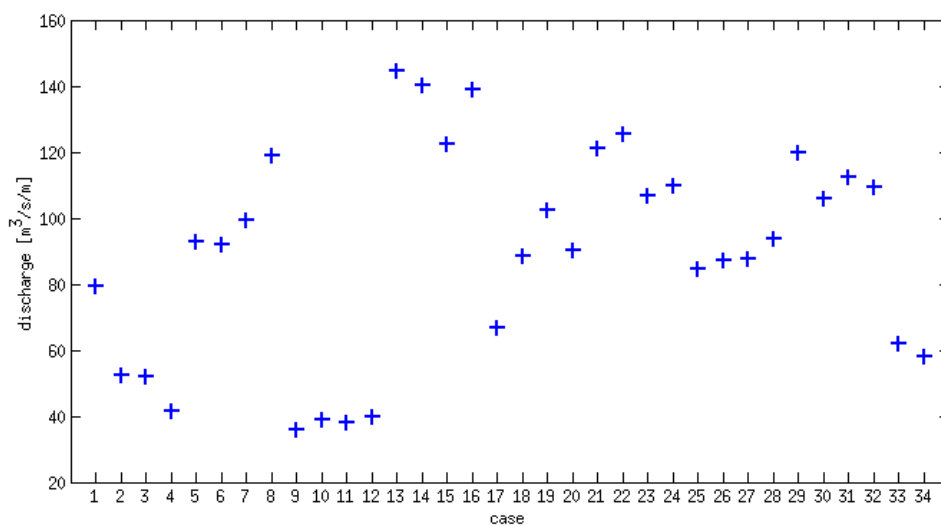


圖4.32 不同情境之最大瞬時越波量圖

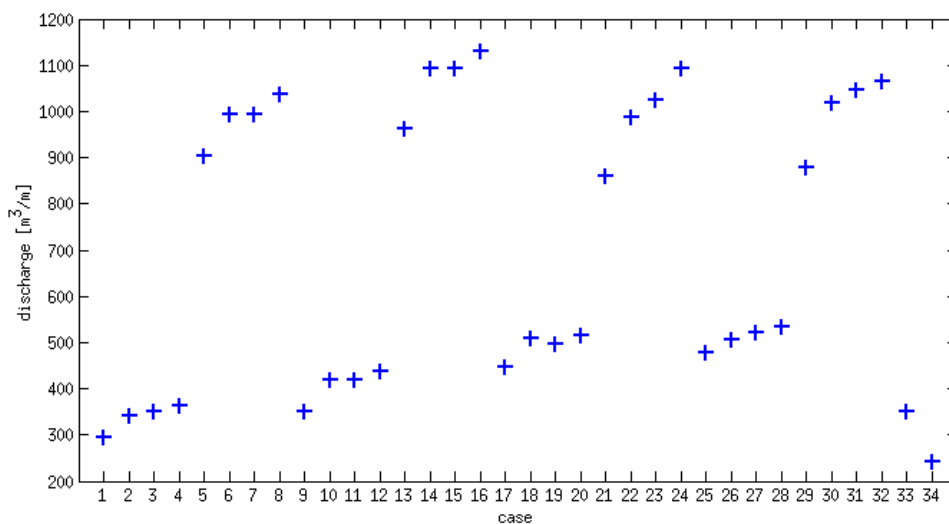


圖4.33 不同情境之累積越波量

第五章 結論與建議

本研究探討結港灣構物在歷史大波、以及未來可能因氣候變遷而發生的極端波浪(extreme waves)下的受力狀況，於上年度已完成臺中港港域波流場(NearCoM模式)及臺中港防波堤受力分析(COBRAS模式)的設置與模擬，今年度將針對IPCC AR5(2013)提出的四種氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下臺中港港域波流場變化情況，應用COBRAS模式計算結構物時變受力及時變安全穩定等問題，並加入浮標軌跡模擬與現場量測資料驗證，研究成果將可作為港務機關設計港灣結構物強度時之參考。

本年度針對臺中港附近海域進行分析，其工作範圍北起大甲溪南岸，南至大肚溪口，南北縱長約41公里，西至水深約-50公尺內近岸水域。主要工作包含蒐集並分析臺中港港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性。並利用目標港區附近現場調查資料校驗港灣結構物附近波、流場數值模式。及應用COBRAS模式分析歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪作用下防波堤受力情形及其安全穩定。

5.1 結論

1. 由於臺中港北向的颱風波浪示性波高最大，且於滿潮時不同的 RCP 情境下，臺中港北防波堤北側波高皆是增加的，對於臺中港北防波堤的受力是增加的。故不同的氣候變遷情境下北向的颱風波浪對於北防波堤的受力分析是較其他波向的波浪重要。
2. 雖然臺中港 50 年迴歸期西向颱風波浪示性波高較北向的小，但西向的波會有傳播入港的情況產生。因此，探討不同的氣候變遷情境下波浪對於港內靜穩的影響則需考慮西向波浪的影響。
3. 對於一般浮標追蹤模擬常用的方式為 $x(t+\Delta t) = x(t) + U(t)\Delta t$ ，如莊與廖(2011)即使用此方式。而近年的研究於浮標追蹤模擬時考慮水平擴

散的影響如(Spydell et al. 2015)。本研究依 Thorpe et al.(2004)考慮水平擴散時則改善浮標追蹤模擬，並完成臺中港區水平擴散係數率定。

4. 應用 COBRAS 模式完成臺中港北防波堤波場與結構物計算模式建置，在颱風波浪條件下，依據天文潮最高高潮位的情況作為原始條件，模擬波浪場的水位、流速和結構物上的波壓分布，計算波浪場特性如渦度和紊流強度和結構物受力變化情形與安定性分析計算，並依照氣候變遷影響造成水位抬升的不同情境，討論防波堤受越波量影響的安定性分析。
5. 考量氣候變遷造成水位抬升以及波浪增大情形之影響評估，以 NearCoM 模擬臺中港外海北向波浪的不同迴歸期(50 年、100 年、200 年和 250 年)之統計波浪條件，計算到延伸段防波堤前 100 公尺，選擇發生最大波高的斷面區域做為 COBRAS 模式的計算範圍並以 NearCoM 計算的最大波高做為入射波浪條件，加上由臺中港量測之歷史大波資料，作為本研究氣候變遷影響之安定性分析、越波浪和衝擊波發生情形之研究。
6. 未來水位抬升可能造成越波量增加，故必須修正過去以靜水位計算安全係數的方法，考慮堤後水位變化的影響，計算安全係數時，發現若是堤前和堤後剛好在位相差異於波峰和波谷情況，如堤前水位於波峰而堤後水位下降下降至波谷情況，於造成安定性下降，反應當越波情況發生時，考慮越波造成堤後水位變化之影響，可能對防波堤結構物的安定性下降。
7. 考慮不同情境下水平作用力之變動差異量發現氣候變遷影響，因此必須重新評估不同迴歸期情況下之近岸結構物安定性，分別就滑動安全係數和傾倒安全係數以數值計算不同情境下，比較僅考慮靜水位情況之 Goda 公式、數值計算結果和考慮堤後越波的最小安全係數，在滑動安全係數部分，34 種不同波浪條件之 case 中，case2、case6、case8、case18~case20、case23、case25~case31、和 case33 之動態滑動安全係數小於靜水壓情況之滑動安全係數，說明考慮越波

情況的堤後水位變化對滑動安定性分析的重要性。而檢視結果發現 case6、case13~case16、case21~case14 和 case29、case32 之滑動安全係數小於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析具有一定的影響，值得注意的是，超過臨界值的迴歸期為 100 年以上，因此若採用目前慣用之 50 年為設計迴歸週期，50 年迴歸期之波浪條件受氣候變遷影響的情境下仍然屬安定，但是在工程設計的角度，隨著氣候變遷的影響變化，在港灣工程選擇設計迴歸期是否需要調整至更長迴歸期時間，這部分仍須進一步研究。在傾倒安全係數的部分，case2、case6~case12、case17~case21、case23~case27、case29、case30 和 case33 之動態傾倒安全係數小於靜水壓情況之傾倒安全係數，再次說明考慮越波情況的堤後水位變化對傾倒安定性分析的重要性。又僅 case6 之傾倒安全係數小於臨界值 1.2，因此在考慮氣候變遷造成水位抬升影響波浪之條件下，對臺中港防波堤的滑動安定性分析而言，傾倒的安定性在設計迴歸期或者更長之迴歸期都認為是穩定的情況。

8. 越波計算的部分，瞬時越波量在 34 種波浪條件的分佈並沒有顯著的規律，但是基本上隨著迴歸期越大而越大，另外以許(2013)計算之氣候變遷影響之波高變化之波浪條件(如 case5~case8)明顯大於一般情況(case1~case4)。累積越波量則相對具規律性，基本上其波浪條件之波高和水位對累積越波量都有明顯的相關性，又由 case9~case16 和 case34 可以發現累積越波量明顯的較同樣迴歸期之 case1~case8 和 case33 小，因為其斷面 IV 的堤頂高度較斷面 I 高之緣故。

5.2 建議

臺灣東北部及西南部沿海區域為較可能形成海嘯的危險區域，故第三年可針對海嘯對港灣結構物的影響進行探討，但為能更具實質意義，建議第三年目標港區不選在臺中港，改選擇基隆港、蘇澳港或是高雄港等較可能受到海嘯侵害的港口。

5.3 成果效益與後續應用情形

本研究於本年度已完成臺中港區現場資料蒐集與分析，對 IPCC AR5(2013)提出的四種氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.0)下臺中港港域波流場變化情況，且利用數值模式計算非線性颱風波浪與港灣結構物互制作用，包含流場分佈、越波現象、波力作用、衝擊波壓及安定性分析等。

期望藉由本研究的探討與分析案例之說明，能提供未來修訂基準之參考，另外，藉由本研究之分析過程，能提供相關港灣工程從業人員了解波浪對不同結構物受力的影響，進而能依本研究之分析步驟與方法著手評估既有碼頭構造物之安定能力。

參考文獻

1. 宇泰工程顧問有限公司，1999，台中港港口第二期擴建工程規劃，交通部運輸研究所。
2. 張金機、簡仲璟、蘇青和、曾哲茂、陳冠宇、陳毓清，1999，台中港港口第二期擴建工程規劃－工程初步設計報告書，交通部運輸研究所。
3. 交通部中央氣象局，1999~2012，氣候資料年報-地面資料。
4. 交通部中央氣象局，1999~2012，潮汐觀測資料年報。
5. 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，第 219-231 頁。
6. 李勁毅，2006，海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究，國立臺灣海洋大學碩士論文。
7. 謝志敏、黃榮鑑、楊文昌，2008，波浪與透水結構物互制之研究，第三十屆海洋工程研討會論文集，第 373-378。
8. 徐肇晞、王明輝，2009，日本氣候變遷調適策略參訪心得。
9. 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。
10. 謝志敏、黃榮鑑、王育崇，2010，波浪與近岸潛沒透水結構物之交互作用，第三十二屆海洋工程研討會論文集，第 387-391。
11. 莊文傑、廖建明，2011，臺灣鄰近海域洋流之模擬及其對近岸海流之影響評估(2/4)，交通部運輸研究所。
12. 黃清和，2011，台灣海域波候長期變遷趨勢研究，國立中興大學土木工程研究所博士論文。
13. 許泰文、黃清哲，2012，強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(1/2)，經濟部水利署。

14. 葉弘德，2012，氣候變遷對臺灣西部離岸風能潛勢與發電量之影響評估，臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
15. 趙紀翔，2012，氣候變遷對蘭陽河流域影響評估，國立台北科技大學環境工程與管理研究所碩士論文。
16. 廖建明、莊文傑、許泰文、楊文昌，2012，臺灣各國際商港海域綜合洋流與潮流效應之海流數值模擬，交通部運輸研究所。
17. 台灣世曦工程顧問有限公司，2013，臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司。
18. 許泰文，2013，強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(2/2)，經濟部水利署。
19. 江玟德，張憲國，劉勁成，陳蔚瑋，何良勝，2014，臺灣主要港口附近海域混合波浪統計特性及推算模式建置研究(1/4)，交通部運輸研究所。
20. 邱永芳、李忠潘、蔡金吉，2014，港灣防波堤堤頭三維沖蝕特性及防制機制之研究(1/4)，交通部運輸研究所。
21. 蔡立宏、黃茂信，2014，港灣構造物與波流互制研究(1_4)，交通部運輸研究所。
22. 蘇青和、黃茂信、李俊穎，2014，2012 年港灣海氣象觀測資料年報(臺中港)，交通部運輸研究所。
23. 臺灣氣候變遷與資訊平臺計畫網站，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>
24. Allan, J. and Komar, P., 2001, "Wave climate change and coastal erosion in the US Pacific Northwest", In *Proceedings, WAVES2001 Conference*, San Francisco, ASCE.
25. Allsop N.W.H., McKenna J.E., Vicinanza D., Whittaker T.J.T., 1996 "New design formulae for wave loadings on vertical breakwaters and seawalls", *Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, pp. 2508–2521.

26. Bagnold, R.A. 1939. "Committee on wave pressures: interim report on wave-pressure research." *Journal of the Institute of Civil Engineers*, 12,201-226.
27. Blackmore, P.A. and Hewson, P.J., 1984, "Experiments on full-scale wave impact pressures", *Coastal Engineering*, 8 ,331-346
28. Booij, N., Holthuijsen, L. H., Doorn, N. and Kieftenburg, A. T. M. M., 1997, "Diffraction in a spectral wave model", *Proceedings of 3th International Symposium Ocean Wave Measurement and Analysis WAVES 97*, ASCE, New York, 243–255
29. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999, "A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
30. Burcharth, H. F., 1998, "Breakwaters with vertical and inclined concrete walls: Identification and evaluation of design tools ." *Rep. of Sub-Group A, Working Group 28, Permanent Technical Committee II*, Permanent International Association of Navigation Congresses, Brussels, Belgium.
31. Burcharth, H. F., 2002, "Reliability based design of coastal structures ." Chapter VI-6, *Coastal engineering manual*, part VI: Design of coastal project elements , Hughes, S. A. , ed., U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 49.
32. Carter DJT, Draper L., 1988, "Has the Northeast Atlantic become rougher?", *Nature*, 332, 494-494.
33. Casulli, V. and Cheng, R. T., 1992, "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15 (6), 629-648.
34. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, WorldScientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
35. Dreier N., Schlamkow C., Fröhle P., Salecker D., 2013, "Changes of 21st century's average and extreme wave conditions at the German

Baltic Sea coast due to global climate change', *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65, pp. 1921-1926

36. Erduran, K. S., Ilic, S., and Kutija, V., 2005, "Hybrid finite-volume finite-difference scheme for the solution of Boussinesq equations", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 49, 1213-1232.
37. Gaillard, D.D., 1904. "Wave Action in Relation to Engineering Structures", *U.S. Army Corps of Engineers*, Washington, D. C
38. Goda, Y., 1974. New wave pressure formulae for composite breakwater. *Proc. of 14th Int. Conf. Coastal Eng.*, Copenhagen, Denmark. ASCE, New York, pp. 1702–1720.
39. Goda, Y. , and Takahashi, S., 2001, "Advanced design of maritime structures in the 21st century," *Port and Harbour Research Institute*, Yokosuka, Japan.
40. Guanche, R., I.J. Losada and J.L. Lara. (2009). Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability, *Coastal Engineering*, 56, 543-558
41. Haas, K. A., Svendsen, I. A., Haller, M. C. and Zhao, Q., 2003, "Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems", *Journal of Geophysical Research*, 108 (7), 3217.
42. Hiroi, I., 1920, *The force and power of waves*, The Engineer 184–187 August.
43. Hogarth P., 2014, "Preliminary Analysis of Acceleration of Sea Level Rise through the 20th Century using Extended Tide Gauge Data Sets", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 7645-7659.
44. Hsu, T. J., Sakakiyama T. and Liu, P. L.-F., 2002, "A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater", *Coastal Engineering*, 46, 25-50.
45. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding,

- D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
46. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
 47. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 48. Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A., 1992, *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.4. Documentation and User's Manual*, Research Report No. CACR-92-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
 49. Kirby, J. T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J. C. and Grilli, S. T., 2013, "Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects", *Ocean Modeling*, 62, 39-55.
 50. Kirkgöz, M. S., 1995, "Breaking wave impact on vertical and sloping structures", *Ocean Engineering*, 22, 35-48.
 51. Klammer, P., Kortenhaus, A., and Oumeraci, H., 1996, "Wave impact loading of vertical face structures for dynamic stability analysis-prediction formulae ", *Proc. 25th International conference on coastal engineering*, 2534-2547.

52. Kortenhaus, A., Oumeraci, H., Kohlhase, S. And Klammer, P., 1994, "Wave induced up-lift loading of caisson breakwaters" *Proc. 24th International conference on coastal engineering*, 1298-1311.
53. Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1990, "Numerical Model for Wave on Rough Permeable Slopes", *Journal of Coastal Research*, 7,149-166.
54. Kobayashi, N., and Demirbilek, Z., 1995, "Wave forces on inclined and vertical wall structures", *ASCE, Reston, VA*.
55. Kothe, D. B., Mjolsness, R. C. and Torrey, M. D., 1991, "*RIPPLE: A computer program for incompressible flows with free surfaces*", available to DOE and DOE contractors from OSTI.
56. Lin, P. and Liu, P.L.-F., 1998 "A numerical study of breaking waves in the surf zone", *Journal of Fluid Mechanics*, 359, 239-264
57. Liu, P. L. and Lin, P., 1997, A Numerical Model for Breaking Waves: The Volume of Fluid Method, *Research Report No. CACR-97-02. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark*.
58. Liu, P. L.-F., and Wen, J., 1997, "Nonlinear Diffusive Surface Waves in Porous Media", *Journal of Fluid Mechanics*, 347,119-139.
59. Liu, P. L. F., Lin, P., Chang, K. A. and Sakakiyama, T., 1999, "Numerical modeling of wave interaction with porous structure", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 125 (6), 322-320.
60. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1962, "Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats' ", *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481–504.
61. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1964, "Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications", *Deep Sea Research and Oceanographic*, 11(4), 529–562.

62. Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R, and Gonzalez-Ondina, J. M. 2008. "Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters", *Coastal Engineering*, 55, 47-62.
63. Lynett, P. J., Melby, J. A., and Kim, D-H. 2010. "An application of Boussinesq modeling to Hurricane wave overtopping and inundation," *Ocean Engineering*, 37, 135-153.
64. Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Karunaratna, H., and Reeve, D. (2015). "Analysis of Climate Change Effects on Seawall Reliability." *Coastal Engineering Journal*, 57(3), 1550010.
65. Minikin, R. C. R., 1963, Winds, Waves, and Maritime Structures: Studies in Harbour Making and in the Protection of Coasts, *Griffin*.
66. Mori N., Shimura T., Yasuda T., Mase H., 2013, "Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—Future change of waves, sea level and wind", *Ocean Engineering*. doi:10.1016/j.oceaneng.2013.02.016i
67. Newberger, P. A. and Allen, J. S., 2007, "Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive equation model for application in the surf zone: 1. Formulation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
68. Okayasu, A., Sakai, K., 2006. "Effect of sea level rise on sliding distance of a caisson breakwater: optimization with probabilistic design method". In: *Proceedings of the 30th International Conference of Coastal Engineering*. ASCE, 4883–4893
69. Pullen T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus A., Schüttrumpf H., van der Meer, J. W., 2007. "EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual," www.overtopping-manual.com.
70. Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, "Three-dimensional dispersion of momentum in wave induced nearshore currents", *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 409-427.

71. Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, “Three-dimensional dispersion of momentum in wave induced nearshore currents”, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 409-427.
72. Rodi, W., 1980, Turbulence Models and Their Application in Hydraulics—A state of the Art Review, *International Association for Hydraulic Research Publication*, Delft, Netherlands.
73. Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H., 2010, “Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes”, *Coastal Engineering*, 57, 407-423.
74. Sainflou, G., 1928, “Essai sur les digues maritimes verticales”, *Ann. Ponts Chaussées Paris* 98 (11), 5–48 (in French).
75. Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F., 2001, “Laboratory Experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater”, *Coastal Engineering*, 44, 117-139.
76. Sasaki, W. and Hibiya, T., 2007, “Interannual variability and predictability of summertime significant wave heights in the western North Pacific”, *Journal of Oceanography*, 63, 203-213.
77. Shi, F. and Sun, W., 1995, “A variable boundary model of storm surge flooding in generalized curvilinear grids”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 (8), 641-651.
78. Shi, F., Sun, W. and Wei, G., 1998, “AWDM method on generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding”, *Applied Ocean Research*, 19(4), 275-282.
79. Shi, F., Svendsen, I. A., Kirby, J. T. and Smith, J. M., 2003, “A curvilinear version of a Quasi-3D nearshore circulation model”, *Coastal Engineering*, 49 (1-2), 99-124.
80. Shi, F., Kirby, J. T. and Hanes, D., 2007, “An efficient mode-splitting method for a curvilinear nearshore circulation model”, *Coastal Engineering*, 54, 811-824.
81. Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B. and Harris, J. C., 2011a, “*FUNWAVE-TVD, users’ manual and benchmark tests*”, Center for

Applied Coastal Research Report, CACR 2011-04, University of Delaware, Newark, Delaware.

82. Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D. and Grilli, S. T., 2011b, “A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation”, *Ocean Modelling*, 43, 36-51.
83. Shi, F., Kirby, J. T., Hsu, T. J. and Chen J. L., 2012, “*NearCoM-TVD, documentation and users' manual*”, Research Report, CACR, University of Delaware, Newark, Delaware.
84. Shiach, J. B. and Mingham, C. G., 2009, “A temporally second-order accurate Godunov-type scheme for solving the extended Boussinesq equations”, *Coastal Engineering*, 56, 32-45.
85. Shih, T.-H., Zhu, J. and Lumley, J.L., 1996, “Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23(11), 1133-1144
86. Shum, C.K., and C.Y. Kuo (2011) “Observation and geophysical causes of present-day sea level rise, *Climate Change and Food Security in South Asia Part 2, Chapter 7* (eds R. Lal, M. Sivakumar, S. Faiz, A. Rahman, and K. Islam)pp.85-104, doi: 10.1007/978-90-481-9516-9_7.
87. Sollitt, C. K. and Cross, R. H., 1972 “Wave Transmission through Permeable Breakwaters”, *Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1827-1846.
88. Spydell, M. S., Feddersen, F., Olabarrieta, M., and Chen, J. L., 2015, “Observed and modeled drifters at a tidal inlet”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI 10.1002/2014JC010541.
89. Stevenson, T., 1874, *The design and construction of harbors*, 2nd edition. Black, London.
90. Sulisz, W., 1985, “Wave Reflection and Transmission at Permeable Breakwaters of Arbitrary Cross-section”, *Coastal Engineering*, 9, 371-386.

91. Svendsen, I. A. and Putrevu, U., 1990, "Nearshore circulation with 3-D profiles", *Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 241-254.
92. Svendsen, I. A., Haas, K. A. and Zhao, Q., 2003, *Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0, Research Report*, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
93. Takahashi, S., Tanimoto, K., Shimosako, K., 1993, Experimental study of impulsive pressures on composite breakwaters — fundamental feature of impulsive pressure and the impulsive pressure coefficient. *Report of Port and Harbour Research Institute* 31 (5), 33–72 (in Japanese).
94. Takayama, T., 1994, "Wave barriers in deepwaters", Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan.
95. Tehranirad, B., Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C. and Grilli, S., 2011, *Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD, Version 1.0*, Research Report No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
96. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. and Mastin, C. W., 1985, "Numerical grid generation: foundations and applications", Amsterdam: North-hollan.
97. Thorpe, S. E., Heywood, K. J., Stevens, D. P., and Brandon, M. A., 2004, "Tracking passive drifter in a high resolution ocean model: implications for interannual variability of larval krill transport to South Georgia", *Deep-Sea Research I*, 51,909-920.
98. Tonelli, M. and Petti, M., 2009, "Hybrid finite volume - finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 609-620.
99. Toro, E. F., 2009, *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction*, Third edition, Springer, New York.

100. Van der Meer, J. W., Bernardini, P., Snijders, W., and Regeling, E. 2006. "The wave overtopping simulator," *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, 5, 4654-4666.
101. Van der Meer, J. W., Steendam, G. J., de Raat, G., and Bernardini, P. 2008. "Further developments on the wave overtopping simulator," *Proceedings of the 31st International 25 Hughes, Shaw, and Howard Conference Coastal Engineering*, 4, pp. 2957-2969.
102. Van Dorn, W.G., 1953, "Wind Stress on an Artificial Pond", *Journal of Marine Research*, 12, 249-276.
103. Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R. and Rubio, J., 1988, "Solitary Wave Transmission through Porous Breakwaters", *Proceedings of 21th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1073-1083.

附錄一

臺中港區之海氣象資料統計表

附表1-1 臺中氣象站2004年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2004/01	16.3	28.1	6.5	1.8	340	12.7	40	73	33	1009.0	19.8	33.9	7	171.9
2004/02	17.6	30.4	9.0	1.5	320	11.4	40	76	40	1007.2	78.1	77.6	7	195.8
2004/03	19.4	30.4	11.1	1.8	320	14.0	60	75	44	1005.1	85.2	53.9	10	176.3
2004/04	23.3	32.6	13.0	1.5	320	10.8	40	74	38	1002.5	131.2	39.3	7	171.1
2004/05	27.4	34.8	20.4	1.6	330	11.9	180	71	27	999.3	164.2	31.9	8	198.9
2004/06	28.4	35.8	23.3	1.7	340	10.7	40	69	39	997.1	76.7	8.9	5	176.8
2004/07	28.1	39.9	22.4	1.7	200	19.6	210	76	31	998.0	1025.1	98.4	17	188.1
2004/08	28.3	34.2	23.1	1.6	330	19.6	340	75	47	993.9	466.7	64.5	18	143.1
2004/09	27.2	34.2	22.5	1.5	330	14.7	30	75	49	1000.1	155.8	54.8	10	153.6
2004/10	23.6	31.4	16.6	2.0	20	18.8	40	63	30	1003.8	8.7	12.8	2	256.2
2004/11	22.4	31.1	13.9	1.4	350	12.6	350	70	36	1007.2	0.0	0.0	0	208.8
2004/12	19.3	27.5	8.3	1.8	10	18.6	20	73	29	1007.4	49.2	25.5	3	209.7
年統計	23.4	39.9	6.5	1.7	320	19.6	210	72.5	27	1002.6	2260.7	501.5	94	2250.3

資料來源：中央氣象局

附表1-2 臺中氣象站2005年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2005/01	16.1	26.4	6.0	1.9	350	14.0	30	77	43	1008.3	17.6	16.0	4	152.3
2005/02	16.9	30.9	6.9	1.6	330	11.8	20	84	43	1007.3	155.2	85.9	14	99.1
2005/03	17.5	30.2	5.0	1.7	330	13.6	330	76	31	1007.8	228.3	111.6	16	126.1
2005/04	23.8	32.4	14.1	1.5	330	11.1	10	76	33	1003.8	46.7	25.7	7	119.1
2005/05	26.9	33.7	21.7	1.6	200	11.7	260	79	45	998.9	620.1	71.3	12	157.8
2005/06	27.5	33.5	23.4	1.6	210	11.6	200	80	43	996.6	566.1	96.0	21	91.3
2005/07	28.8	35.4	22.4	1.9	340	34.0	350	76	49	996.9	378.1	68.2	11	201.3
2005/08	27.9	34.3	22.9	1.5	200	26.8	340	82	55	996.1	351.1	102.0	21	123.4
2005/09	28.2	34.0	21.6	1.5	360	27.1	170	77	40	999.1	161.3	38.4	9	188.7
2005/10	25.7	32.9	19.4	1.8	340	23.1	10	73	48	1003.3	28.8	15.0	4	209.2
2005/11	23.3	31.1	15.5	1.5	350	11.8	30	73	26	1005.4	5.9	12.8	4	181.2
2005/12	16.8	27.9	6.3	1.9	350	15.2	10	72	29	1009.7	15.3	17.4	4	155.4
年統計	23.3	35.4	5.0	1.7	350	34.0	350	77.1	26	1002.8	2574.5	660.3	127	1804.9

資料來源：中央氣象局

附表1-3 臺中氣象站2006年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2006/01	17.7	29.6	8.7	1.7	350	10.5	30	80	42	1007.2	28.9	37.5	7	159.2
2006/02	18.3	29.9	12.8	1.9	350	11.6	340	78	39	1009.3	22.3	18.3	4	159.8
2006/03	19.7	32.4	10.3	1.6	330	12.7	30	77	25	1005.2	93.4	91.3	13	147.8
2006/04	24.1	32.4	15.9	1.5	330	12.7	350	81	48	1002.3	221.6	86.4	14	94.8
2006/05	26.1	32.8	19.4	1.6	340	16.8	230	81	46	1001.2	316.3	76.8	14	133.3
2006/06	27.1	35.0	19.4	1.5	180	14.4	180	81	47	998.7	754.5	143.6	18	124.3
2006/07	28.8	34.5	24.0	1.8	190	19.0	10	76	50	994.6	328.9	69.9	16	174.1
2006/08	28.8	37.0	23.3	1.5	210	11.7	150	75	38	996.1	117.4	21.0	14	171.7
2006/09	27.2	33.8	21.7	1.4	350	14.5	330	76	44	999.0	143.7	36.2	14	169.3
2006/10	25.9	32.5	20.5	1.6	350	14.3	30	71	36	1003.4	0.0	0.0	0	213.3
2006/11	23.2	30.7	18.1	1.3	340	12.1	30	75	26	1005.1	95.7	59.0	14	152.9
2006/12	18.9	29.8	9.6	1.7	30	13.1	40	72	32	1008.9	49.2	33.6	4	191.6
年統計	23.8	37.0	8.7	1.6	350	19.0	10	76.9	25	1002.6	2171.9	673.6	132	1892.1

資料來源：中央氣象局

附表1-4 臺中氣象站2007年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2007/01	17.2	27.1	6.2	2.0	340	14.3	40	74	26	1010.4	57.0	53.0	8	174.6
2007/02	19.3	29.6	7.6	1.5	340	13.1	340	70	31	1007.3	24.5	23.1	6	178.8
2007/03	20.7	31.1	11.6	1.6	340	15.2	20	77	45	1005.1	87.9	50.1	13	127.6
2007/04	22.3	31.2	12.0	1.6	330	16.3	60	75	45	1004.1	136.4	71.6	15	101.5
2007/05	26.5	34.4	18.6	1.5	340	9.8	330	75	34	1000.2	169.1	55.5	15	173.4
2007/06	27.4	34.3	22.8	1.4	180	14.2	200	79	52	998.0	735.2	113.4	17	124.7
2007/07	29.8	35.6	23.9	1.7	190	10.7	200	69	43	998.1	62.0	17.4	9	233.4
2007/08	27.8	34.9	22.5	1.5	180	16.3	160	75	45	995.2	516.0	122.5	20	131.6
2007/09	27.6	34.1	22.2	1.5	330	15.6	320	76	46	996.8	315.7	62.3	11	157.1
2007/10	25.4	33.8	18.9	2.0	330	27.7	340	71	40	1001.7	289.8	49.3	5	182.1
2007/11	21.6	29.9	12.1	2.0	330	18.3	20	70	43	1004.5	22.6	25.3	7	172.5
2007/12	19.6	28.7	11.6	1.6	330	11.0	20	72	33	1007.1	16.7	7.4	2	206.1
年統計	23.8	35.6	6.2	1.7	330	27.7	340	73.6	26	1002.4	2432.9	650.9	128	1963.4

資料來源：中央氣象局

附表1-5 臺中氣象站2008年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2008/01	17.9	30.7	9.7	1.9	330	11.2	360	75	40	1008.2	15.2	20.4	7	143.6
2008/02	15.0	24.4	8.7	2.2	360	11.6	50	77	45	1009.3	38.4	45.8	11	97.6
2008/03	20.3	29.9	10.3	1.6	330	14.4	20	70	22	1005.4	34.1	29.9	9	179.1
2008/04	24.3	33.1	14.3	1.5	330	13.2	20	73	34	1002.6	31.2	31.7	10	109.5
2008/05	25.8	33.5	19.0	1.5	200	12.5	360	74	39	998.5	332.0	57.0	15	162.7
2008/06	27.5	34.7	22.2	1.5	200	14.1	250	77	31	998.6	182.8	69.4	19	142.1
2008/07	28.1	34.8	22.6	1.8	190	22.3	170	78	47	996.2	907.6	105.3	17	178.0
2008/08	28.7	35.1	23.4	1.5	210	13.7	240	75	43	997.7	50.7	11.6	11	187.4
2008/09	27.6	35.4	22.3	1.7	350	29.7	0	81	48	996.3	829.7	128.1	16	143.9
2008/10	26.8	33.1	21.9	1.4	330	9.8	250	76	48	1003.4	20.5	11.1	2	204.4
2008/11	21.9	32.6	10.9	1.9	20	13.4	20	74	37	1006.9	24.4	30.7	5	194.3
2008/12	18.1	28.3	9.9	1.7	20	13.8	30	69	30	1008.9	11.2	28.9	4	210.2
年統計	23.5	35.4	8.7	1.7	330	29.7	0	74.9	22	1002.7	2477.8	569.9	126	1952.8

資料來源：中央氣象局

附表1-6 臺中氣象站2009年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2009/01	15.5	26.4	5.4	1.9	20	13.8	30	72	29	1010.7	T	2.7	0	237.8
2009/02	21.3	32.9	13.7	1.6	330	11.2	340	74	32	1005.7	12.5	2.4	1	215.8
2009/03	19.9	29.7	11.8	1.7	330	14.8	30	77	36	1005.5	161.2	61.5	10	143
2009/04	22.5	30.9	14.8	1.5	330	11.8	350	72	45	1002.9	303	72.1	13	137.1
2009/05	25.9	33.5	19.3	1.5	330	9.8	330	68	32	1001.3	20.5	16.4	5	195.2
2009/06	27.8	34.2	22.1	1.6	200	15.4	180	75	42	996.8	421.5	56.4	14	159.5
2009/07	29.1	35.3	23.8	1.6	330	11.2	210	72	43	997	83.5	23.2	9	162.5
2009/08	28.7	36.1	24.5	1.7	200	26.9	310	76	52	994.4	810.8	113.5	14	130.4
2009/09	29.3	35.2	24	1.2	340	9.4	320	70	43	997.7	119.7	25.6	6	164.5
2009/10	25.7	33.8	18.5	1.7	30	12.4	10	68	32	1000.8	12.4	15.5	3	198.5
2009/11	22	31.1	16.5	1.8	30	18	30	72	32	1006.3	16	10.4	2	186.1
2009/12	17.7	29.4	10.1	1.5	350	11.6	10	72	32	1008.7	17.6	25.4	9	163.6
年統計	23.8	36.1	5.4	1.6	330	26.9	310	72	29	1002.3	1978.7	425.1	86	2094

資料來源：中央氣象局

附表1-7 臺中氣象站2010年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2010/01	17.1	27.6	6.8	1.3	10	12.9	30	75	22	1009.9	34.1	37.8	9	153.8
2010/02	18.5	31.4	9.5	1.4	10	10.3	20	80	34	1006.8	118.3	76.3	11	118.4
2010/03	21.1	31.4	9.5	1.5	360	13.9	30	72	36	1006.9	22.6	15.3	4	176.8
2010/04	22	32.4	14.1	1.3	360	10.9	20	78	27	1004.9	158.4	63	16	127.8
2010/05	26.6	34.2	19.5	1.4	350	11.2	230	75	44	999.4	145.3	36.8	10	153.5
2010/06	27.1	34.3	21	1.4	190	11.5	240	78	51	998.8	529.9	104.2	17	108.4
2010/07	29.2	35.9	23.8	1.7	200	14.3	180	74	46	999.5	463.5	60.2	16	179.7
2010/08	28.9	35.6	23.4	1.1	210	12.9	180	77	49	998.9	203.5	45.5	20	155.9
2010/09	28.1	34.6	23.3	1.3	360	25.5	10	77	49	999.4	328.6	47.2	15	163.8
2010/10	25.9	33.2	17.2	1.8	30	15.4	40	72	47	1001.7	2.1	5.7	3	165.2
2010/11	21.8	28.4	15.7	1.4	10	13.1	40	71	40	1005.8	20.7	38.5	7	181.5
2010/12	18.1	28.7	7.5	1.4	30	17.5	30	67	30	1005.5	27.4	24.1	3	201.3
年統計	23.7	35.9	6.8	1.4	10	25.5	10	75	22	1003.1	2054.4	554.6	131	1886.1

資料來源：中央氣象局

附表1-8 臺中氣象站2011年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2011/01	14.9	23.3	7.9	2.1	10	15.4	40	74	40	1009.7	35.4	39.2	5	129.1
2011/02	17.2	27.8	10.3	1.4	350	14.1	30	74	34	1006.4	27.6	35.6	8	162.4
2011/03	18.2	30.5	11.6	1.5	10	12.1	330	69	31	1008	33.2	45.6	8	109.6
2011/04	23.1	33.1	15.3	1.3	350	10	30	64	29	1004	5.1	10	5	150.6
2011/05	26	35.6	20.1	1.2	350	16.4	200	74	38	999.7	95	56	16	118.8
2011/06	29.1	35.7	23.1	1.5	220	12.5	200	71	49	997.3	151.3	49.6	11	182.8
2011/07	28.8	35.3	23.7	1.3	200	12.1	260	73	48	996.3	300.6	49.6	13	188.5
2011/08	29	35.1	23.9	1.1	180	12.7	200	72	47	996.3	256.3	47	12	169.6
2011/09	28	34.3	22.6	1.0	340	11.9	170	70	47	998.5	99.3	14.4	9	172.6
2011/10	25.9	32.8	20.3	1.5	30	10.3	330	70	45	1003.2	13.3	20	5	188.6
2011/11	23.8	32.5	17.5	1.2	340	10.4	350	77	48	1004.6	150.7	78.2	10	130.1
2011/12	17.8	27.5	9.6	1.9	10	11.4	360	72	43	1008.6	37.1	24.7	7	139.4
年統計	23.5	35.7	7.9	1.4	10	16.4	200	71.7	29	1002.7	1204.9	469.9	109	1842.1

資料來源：中央氣象局

附表1-9 臺中氣象站2012年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2012/01	16.6	25.9	10.8	1.7	350	10.9	360	75	47	1008.0	57.1	60	10	142.9
2012/02	16.7	28.6	10.1	1.6	330	12.6	340	75	44	1006.4	77.2	57.8	10	104.1
2012/03	19.8	32.2	12.0	1.4	340	13.6	360	75	36	1005.5	40.8	31.4	5	165.7
2012/04	24.6	33.7	17.2	1.2	200	13.9	190	75	44	1002.2	234.6	54.4	17	88.7
2012/05	26.9	33.8	21.6	1.3	190	14.6	220	74	34	998.4	267.9	62.1	14	170.3
2012/06	27.8	34.4	23.1	1.5	190	17.7	140	79	49	994.4	331.6	91.8	18	134.1
2012/07	29.1	34.9	24.0	1.5	200	13.2	210	73	49	996.1	215.6	40.1	14	204.2
2012/08	28.0	35.1	23.5	1.4	190	22.0	40	77	46	993.3	726.2	75.7	21	96.4
2012/09	27.6	34.5	20.8	1.4	10	20.5	40	69	34	999.8	34.2	8.9	5	190.1
2012/10	24.9	31.9	19.1	1.6	10	13.4	30	64	40	1003.5	1.4	4.4	3	222.9
2012/11	22.3	32.2	14.2	1.1	360	10.3	20	71	37	1005.4	144.8	92.0	11	132.6
2012/12	18.4	28.3	9.0	1.4	350	13.5	10	73	41	1007.3	71.1	62.3	13	143.6
年統計	23.6	35.1	9.0	1.4	190	22.0	40	73	34	1001.7	2202.5	640.9	141	1795.6

資料來源：中央氣象局

附表1-10 臺中氣象站2013年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2013/01	16.9	26.5	10.4	1.7	10	14.7	10	74	32	1009.1	11.2	20.6	8	184.2
2013/02	19.4	29.3	13.9	1.6	340	13.1	350	74	39	1007.9	1.2	2.3	2	174.7
2013/03	21.0	30.0	11.6	1.4	350	11.4	330	72	24	1005.6	62.7	26.6	14	175.5
2013/04	22.2	31.2	14.8	1.1	320	11.9	30	79	48	1002.5	258.6	125.8	21	69.5
2013/05	26.4	34.1	19.1	1.2	210	12.0	180	75	48	999.8	356.4	76.8	18	111.1
2013/06	28.8	34.6	24.2	1.4	200	13.8	230	72	48	997.4	72.6	25.6	14	153.4
2013/07	28.1	35.1	22.6	1.3	350	25.2	230	74	43	998.9	467.7	70.0	21	193.7
2013/08	28.2	34.7	22.2	1.2	240	13.7	330	77	48	996.6	763.0	119.7	14	151.5
2013/09	27.8	34.0	20.6	1.2	340	10.3	320	73	40	998.4	44.9	15.2	6	169.0
2013/10	24.9	33.7	16.2	1.9	10	15.0	30	65	39	1002.3	2.7	15.9	1	242.3
2013/11	22.1	32.2	9.9	1.4	350	11.6	10	68	29	1006.7	22.6	15.4	6	136.3
2013/12	17.1	28.4	9.1	1.7	10	13.4	350	70	19	1007.7	69.4	44.2	15	128.2
年統計	23.6	35.1	9.1	1.4	350	25.2	230	73	19	1002.7	2133	558.1	140	1889.4

資料來源：中央氣象局

附表1-11 臺中氣象站2014年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向 (°)	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向 (°)	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2014/01	16.4	26.4	7.2	1.5	10	13.2	360	66	26	1009.9	2.0	3.1	1	236.9
2014/02	16.9	29.1	6.7	1.5	350	11.5	360	74	33	1006.9	45.2	38.5	12	129.9
2014/03	19.8	31.8	13.4	1.3	350	10.9	350	72	45	1007.2	47.7	27.9	12	107.6
2014/04	24.1	32.5	17.1	1.3	350	11.3	360	69	40	1003.4	15.6	14.1	8	143.6
2014/05	25.7	33.7	16.5	1.1	210	12.5	30	78	48	1001.0	659.6	127.8	22	66.5
2014/06	28.6	34.9	23.0	1.6	200	11.4	200	74	48	995.4	181.0	44.3	15	152.1
2014/07	30.1	36.4	23.9	1.6	330	22.2	170	71	41	995.9	149.1	37.9	10	207.0
2014/08	28.9	35.1	23.6	1.4	180	11.6	160	76	41	998.1	278.3	45.5	12	172.9
2014/09	29.2	36.5	23.7	1.2	340	10.3	250	74	47	998.8	47.0	15.7	8	183.6
2014/10	25.6	33.7	18.8	1.6	340	16.5	20	65	41	1003.6	0.0	0.0	0	256.1
2014/11	23.1	30.9	16.7	1.3	320	12.6	350	72	39	1006.0	0.8	7.6	1	172.3
2014/12	17.1	26.9	8.7	1.6	360	12.9	20	71	35	1010.1	30.0	43.6	11	116.1
年統計	23.8	36.5	6.7	1.4	350	22.2	170	71.8	26	1003.0	1456.3	406	112	1944.6

資料來源：中央氣象局

附表1-12 梧棲氣象站2004年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2004/01	15.7	24.6	7.4	6.0	360	22.9	30	78	50	1016.6	9.4	26.7	5	137.5
2004/02	16.9	28.1	10.0	4.9	360	26.7	60	79	50	1014.6	81.0	70.6	7	155.3
2004/03	18.4	27.5	12.2	5.8	360	24.8	70	77	48	1012.6	68.0	39.1	9	143.8
2004/04	22.7	30.0	12.8	4.2	360	23.0	30	75	41	1009.6	153.0	32.5	6	181.8
2004/05	26.6	31.3	18.5	3.9	350	19.9	250	78	37	1006.2	78.5	25.5	5	214.1
2004/06	27.9	33.8	22.1	4.9	350	20.9	360	75	55	1003.9	4.0	3.6	3	237.4
2004/07	28.4	36.9	23.4	4.0	240	28.6	220	80	54	1004.6	416.5	77.4	14	245.2
2004/08	28.7	33.0	23.9	3.9	330	24.1	320	80	52	1000.7	302.7	48.2	11	218.6
2004/09	27.1	32.5	22.8	3.7	360	24.5	360	83	60	1007.1	150.0	65.2	13	183.8
2004/10	22.8	29.1	17.8	7.1	360	28.0	360	69	37	1011.0	7.6	7.9	2	279.5
2004/11	21.8	28.5	15.0	4.6	360	23.5	360	75	48	1014.3	0.4	0.7	1	222.3
2004/12	18.8	26.5	8.1	5.5	350	26.3	350	76	37	1014.8	54.0	27.4	3	207.1
年統計	23.0	36.9	7.4	4.9	360	28.6	220	77.1	37	1009.7	1325.1	424.8	79	2426.4

資料來源：中央氣象局

附表1-13 梧棲氣象站2005年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2005/01	15.3	25.1	7.2	6.1	350	23.5	340	78	47	1015.9	13.5	10.6	3	139.6
2005/02	15.3	28.9	7.3	5.5	350	25.3	360	86	50	1015.2	196.2	77.8	10	58.9
2005/03	16.5	29.3	7.5	5.1	350	29.1	360	73	33	1015.7	170.0	100.6	15	145.0
2005/04	23.2	30.9	14.9	3.8	350	20.0	350	76	38	1011.2	45.5	20.7	6	155.1
2005/05	26.5	32.9	20.1	3.8	350	20.0	350	80	51	1005.6	361.4	60.1	11	189.5
2005/06	27.5	32.8	22.2	4.0	150	18.6	150	79	57	1003.1	389.3	86.6	16	130.2
2005/07	28.9	32.9	23.8	4.1	330	41.9	340	74	56	1003.6	202.7	39.0	7	273.6
2005/08	28.5	32.8	22.9	3.8	330	40.9	340	78	56	1002.8	268.5	79.6	13	184.7
2005/09	28.2	33.2	23.6	3.7	330	48.6	320	76	48	1005.8	99.5	26.4	3	257.1
2005/10	25.1	32.4	19.3	5.9	350	42.4	340	73	51	1010.3	10.7	5.7	2	237.3
2005/11	22.8	30.0	16.8	4.8	350	26.0	360	73	29	1012.4	4.5	4.2	1	200.1
2005/12	16.3	24.8	7.0	6.7	350	28.6	350	72	39	1017.2	22.6	30.8	4	154.3
年統計	22.8	33.2	7.0	4.8	350	48.6	320	76.5	29	1009.9	1784.4	542.1	91	2125.4

資料來源：中央氣象局

附表1-14 梧棲氣象站2006年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2006/01	16.2	22.7	9.2	6.0	350	25.6	360	81	60	1014.5	19.4	20.9	5	99.3
2006/02	16.6	27.6	12.8	6.3	350	28.6	350	79	57	1016.4	47.6	30.7	3	102.1
2006/03	18.5	30.3	10.2	4.7	350	30.5	10	76	26	1012.2	59.9	64.0	11	155.5
2006/04	23.5	30.9	15.5	3.6	350	20.1	280	77	55	1008.9	171.2	66.4	12	111.0
2006/05	25.6	31.2	17.0	4.1	350	26.2	160	81	57	1008.2	258.5	72.7	12	148.8
2006/06	27.7	33.0	18.9	3.6	150	23.5	200	82	60	1005.6	392.5	95.8	13	172.4
2006/07	29.1	33.8	24.2	4.6	150	30.4	340	77	52	1001.7	238.0	59.9	9	236.1
2006/08	29.1	33.5	25.3	2.9	340	23.0	350	76	58	1003.3	7.5	8.8	6	244.9
2006/09	27.0	33.3	20.8	4.5	350	23.9	350	74	46	1006.4	25.0	16.2	7	210.2
2006/10	25.2	30.8	20.0	5.1	350	23.7	350	71	41	1010.4	T	0.5	0	281.7
2006/11	22.7	28.9	18.4	4.1	350	22.1	350	75	35	1012.1	93.5	40.9	10	167.8
2006/12	18.7	27.0	11.7	6.0	350	25.3	350	76	41	1016.2	59.5	24.9	3	196.9
年統計	23.3	33.8	9.2	4.6	350	30.5	10	77.1	26	1009.7	1372.6	501.7	91	2126.7

資料來源：中央氣象局

附表1-15 梧棲氣象站2007年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2007/01	16.4	25.4	8.5	6.6	350	25.3	350	80	26	1018.0	53.5	40.2	6	142.9
2007/02	18.4	27.6	8.7	4.3	350	25.1	360	79	30	1014.6	21.0	16.5	5	183.7
2007/03	19.8	28.7	11.3	4.5	350	24.4	360	83	60	1012.3	110.6	35.4	9	131.3
2007/04	21.4	28.8	11.5	3.9	360	29.3	360	80	45	1011.3	116.6	54.7	12	125.1
2007/05	26.0	32.3	20.3	2.9	330	15.0	310	78	41	1007.1	95.0	52.6	10	227.7
2007/06	27.5	32.0	23.0	3.3	150	19.9	260	81	62	1004.6	683.0	91.9	13	160.8
2007/07	29.5	33.1	25.2	3.6	150	15.7	230	75	59	1004.7	25.9	8.6	4	314.0
2007/08	27.9	33.2	23.4	3.4	150	27.3	10	80	57	1001.8	704.8	94.6	16	178.8
2007/09	27.5	34.7	22.0	3.9	350	29.1	320	79	54	1003.5	164.0	39.9	7	207.1
2007/10	24.5	32.5	17.8	6.1	350	46.4	320	76	53	1008.7	194.1	48.6	5	210.0
2007/11	20.6	27.2	14.3	7.3	350	35.9	350	77	59	1011.8	17.5	33.9	4	178.7
2007/12	18.6	26.0	10.8	5.5	350	24.4	10	79	36	1014.4	17.7	5.8	2	203.7
年統計	23.2	34.7	8.5	4.6	350	46.4	320	78.9	26	1009.4	2203.7	522.7	93	2263.8

資料來源：中央氣象局

附表1-16 梧棲氣象站2008年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2008/01	16.6	28.7	9.9	6.5	350	27.5	340	82	53	1015.7	7.7	24.1	8	133.0
2008/02	13.5	20.7	8.9	7.1	350	26.2	350	84	62	1016.9	40.8	47.6	7	67.5
2008/03	19.1	26.7	11.6	4.4	350	23.5	330	75	29	1012.7	32.7	19.9	6	190.1
2008/04	22.9	30.6	13.5	3.8	350	22.1	350	78	42	1009.7	26.4	32.4	9	142.1
2008/05	24.9	32.7	16.9	4.0	360	23.0	360	77	41	1005.3	229.6	43.9	11	180.9
2008/06	27.5	33.7	21.6	3.6	150	17.3	220	77	55	1005.1	174.3	48.0	10	165.8
2008/07	28.3	32.7	23.0	4.5	240	29.6	340	77	59	1002.7	401.8	71.4	13	224.8
2008/08	28.7	34.3	23.4	3.2	140	20.3	210	75	48	1004.3	14.1	8.5	8	260.5
2008/09	27.5	33.2	20.3	4.6	340	46.1	0	82	59	1003.3	585.2	93.6	10	185.3
2008/10	25.9	30.8	21.2	4.2	10	19.8	20	80	64	1010.7	58.0	14.1	2	222.8
2008/11	21.5	29.2	12.3	6.3	10	26.6	30	75	47	1014.1	28.3	25.0	3	191.4
2008/12	17.9	24.2	10.9	5.8	10	27.8	10	73	49	1016.1	14.6	22.9	3	209.0
年統計	22.9	34.3	8.9	4.8	350	46.1	0	77.9	29	1009.7	1613.5	451.4	90	2173.2

資料來源：中央氣象局

附表1-17 梧棲氣象站2009年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2009/01	15	22.6	7.5	6.3	10	26.2	360	76	41	1018	0.2	2.1	1	183.4
2009/02	20	29.9	14	4.7	10	22.5	10	80	45	1012.7	16	3.8	2	162.8
2009/03	18.7	28.2	10.5	4.9	10	27.8	10	79	52	1012.8	182.4	45.7	11	125.5
2009/04	21.7	28.5	13.6	4.2	10	23.5	40	75	48	1010.1	158.9	47.2	10	153.5
2009/05	25.4	31.4	18.4	3.6	350	19.4	360	71	36	1008.5	23.7	12.4	2	229.2
2009/06	28	33.5	21.7	3.4	350	26	250	75	47	1003.5	148.5	37.7	11	196.6
2009/07	29.3	33.1	25.4	3.4	350	14.9	250	73	54	1003.7	72.9	10.1	9	236
2009/08	29.2	35.4	25	3.9	350	41.3	360	75	55	1001.3	336.5	74	12	196.1
2009/09	29.5	34.3	25.4	3.5	360	21	40	70	40	1004.6	1.7	10	5	236.2
2009/10	25	30.9	18.5	6.3	10	26.6	10	72	38	1007.6	8.3	11.2	3	217.7
2009/11	21.6	28.9	15.6	5.7	10	35	10	76	40	1013.2	31.6	23.8	5	169.4
2009/12	17.1	26.6	10.3	5.4	10	24	10	74	48	1016	16.6	30.4	8	155.4
年統計	23.4	35.4	7.5	4.6	10	41.3	360	75	36	1009.3	997.3	308.4	79	2261.8

資料來源：中央氣象局

附表1-18 梧棲氣象站2010年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2010/01	16.2	25.5	7.6	4.9	10	22.2	25	78	29	1017.3	24.7	36.3	9	132.7
2010/02	17.5	28.9	9.2	4.6	10	22.2	18	82	44	1014	93.7	76.4	12	105.1
2010/03	19.8	28.8	8	4.4	360	28.1	25	75	36	1014.2	33.5	13.6	3	169.3
2010/04	21	30.9	13.5	4.4	10	22.8	13	78	51	1012.1	111.9	56	13	120.9
2010/05	25.2	32.4	19.9	3.8	350	22.3	23	79	49	1006.5	172.1	38.2	11	153.7
2010/06	26.6	32.5	19.3	4.1	150	20.4	5	79	60	1005.7	312.3	67.7	17	131.7
2010/07	29.2	33.9	23.4	3.9	160	16.2	7	74	52	1006.2	187.5	34.8	6	242.2
2010/08	29.3	33.6	24.1	3	150	18.8	8	75	52	1005.3	108.8	26.3	9	228.8
2010/09	28.1	34.2	23.3	3.7	350	37.5	19	77	57	1005.9	97.2	29.9	13	208
2010/10	24.7	31.1	17	6.2	10	30.6	26	75	53	1008.4	0.7	3.6	4	183.5
2010/11	20.9	25.9	14.7	5.5	10	24.6	8	76	45	1013	16	39.7	6	164.8
2010/12	17.3	25.6	8.3	5	10	35.7	16	71	34	1012.9	24	11.7	2	214.9
年統計	23	34.2	7.6	4.5	10	37.5	19	77	29	1010.1	1182.4	434.2	105	2055.6

資料來源：中央氣象局

附表1-19 梧棲氣象站2011年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2011/01	13.8	22	7.9	7.6	10	28.4	40	79	46	1017.3	24.2	31.6	7	93.3
2011/02	15.1	25.5	9.3	5.4	10	24.3	40	83	47	1013.9	33.3	26	7	115.3
2011/03	16.3	27.1	11	5.7	10	28.5	360	75	42	1015.5	33.2	27.2	8	101.9
2011/04	21.8	30	14.3	3.9	360	21	360	74	39	1011.2	2.3	10.8	3	161.1
2011/05	24.9	32.8	18.4	3.6	360	27.9	50	80	50	1006.7	75.1	46.5	14	142.7
2011/06	28.6	34	22.8	3.7	180	17.8	10	77	50	1004.1	42.2	23.8	8	221.7
2011/07	28.8	33.4	24.8	3.2	170	15.4	180	76	56	1003	110.9	25.2	11	243.7
2011/08	29.2	34.1	24	3.1	150	21.2	150	75	44	1002.9	75	35	8	254.6
2011/09	27.5	33.3	21.9	3.9	360	21.1	360	75	50	1005.4	6.9	8	5	217.2
2011/10	24.3	29.8	19.7	5.7	10	26.3	40	76	53	1010.1	14.7	17	6	187.6
2011/11	22.7	29.2	16.1	4.4	10	23.6	360	81	53	1011.6	158.1	70.6	9	112.7
2011/12	17	23.7	11.5	7.1	10	31	50	76	52	1016.2	29.1	23.2	5	112.9
年統計	13.8	22	7.9	4.8	10	31.0	50	77.3	39	1009.8	605.0	344.9	91	1964.7

資料來源：中央氣象局

附表1-20 梧棲氣象站2012年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2012/01	15.5	23	10.2	6.4	10	26.6	60	83	59	1015.6	62.6	60.1	10	101.7
2012/02	14.4	27.3	9.1	6.1	10	28.3	10	86	59	1014.0	95.6	45.6	9	48.5
2012/03	17.8	29.4	10.3	4.9	10	24.2	30	80	45	1012.9	22.2	24.8	8	137.0
2012/04	24.1	33.0	15.8	3.1	10	24.8	360	79	52	1009.2	230.4	45.1	17	107.3
2012/05	26.2	32.4	20.5	3.8	10	22.7	10	79	53	1005.3	132.4	46.0	14	199.0
2012/06	27.5	32.6	22.3	4.2	10	29.5	170	83	61	1001.1	273.1	73.9	17	161.8
2012/07	29.2	33.1	25.1	3.5	170	31.6	10	78	55	1002.9	87.8	23.3	8	255.5
2012/08	28.3	33.1	23.0	4.0	170	33.3	360	80	62	1000.0	552.5	46.0	14	147.8
2012/09	27.1	32	20.7	4.2	360	30.3	360	74	42	1006.7	8.5	9.2	4	212.0
2012/10	23.7	29.4	18.7	5.6	10	24.9	360	71	51	1010.6	1.0	2.5	1	254.7
2012/11	21.4	30.5	13.5	3.8	10	21.7	30	80	55	1012.5	134.7	79.0	10	140.0
2012/12	17.6	26.4	8.4	4.9	10	28.3	350	81	56	1014.8	60	66.5	12	142.6
年統計	22.7	33.1	8.4	4.5	10	33.3	360	80	42	1008.8	1660.8	522.0	124	1907.9

資料來源：中央氣象局

附表1-21 梧棲氣象站2013年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2013/01	15.6	20.6	9.7	6	360	27.3	10	85	56	1016.7	12	24	7	127.4
2013/02	17.1	25.4	12.5	5.6	360	23.8	360	88	50	1015.4	4.3	6.2	3	89.1
2013/03	19.9	27.4	11.5	4.4	360	23.0	360	82	41	1012.9	49.6	26.3	10	175.1
2013/04	21.3	30.1	14.5	3.7	10	21.0	30	82	42	1009.5	162.0	108.2	18	84.7
2013/05	25.9	32.9	16.9	3.3	170	19.7	10	79	50	1006.5	273.6	61.3	14	143.7
2013/06	28.4	33.6	24.6	3.4	340	19.7	250	77	54	1004.1	70.9	22.5	12	191.7
2013/07	28.7	33.7	20.6	3.4	140	31.9	310	74	51	1005.6	567.5	32.4	11	255.8
2013/08	28.5	33.0	22.9	3.3	160	24.6	330	78	55	1003.1	653.1	105.6	12	194.2
2013/09	27.3	32.8	21.8	3.9	360	25.1	360	74	54	1005.1	22.1	14.9	4	208.5
2013/10	24.1	32.1	16.5	6.3	360	24.8	360	72	42	1009.3	3.5	3.8	1	261.4
2013/11	21.0	28.4	9.5	5.0	360	23.1	30	75	31	1013.9	17.9	16	6	137.9
2013/12	16.3	24.9	9.6	5.8	360	26.3	10	76	43	1015.1	84.9	62	12	117.7
年統計	22.8	33.7	9.5	4.5	360	31.9	310	78.5	31	1009.8	1921.4	483.2	110	1987.2

資料來源：中央氣象局

附表1-22 梧棲氣象站2014年之氣象觀測資料統計

年/月	平均溫度 (°C)	最高溫度 (°C)	最低溫度 (°C)	平均風速 (m/sec)	最多風向	最大瞬間風速 (m/sec)	最大瞬間風向	平均相對溼度 (%)	最小相對溼度 (%)	氣壓 (hPa)	雨量 (mm)	降水時數 (小時)	降水日數 (日)	日照時數 (小時)
2014/01	15.6	25.0	7.7	5.3	360	28.5	30	74	40	1017.4		0.8	0	222.1
2014/02	15.8	25.8	8.4	5.0	10	25.6	30	82	47	1014.4	43.8	31.4	9	116.3
2014/03	18.4	30.1	12.4	4.2	360	26.5	360	80	50	1014.6	29.2	21.7	11	119.7
2014/04	22.6	29.0	16.9	4.0	360	22.0	10	79	47	1010.6	17.6	15.6	5	164.9
2014/05	25.4	32.7	15.3	3.2	160	22.4	360	85	52	1007.6	494	89.6	19	71.9
2014/06	28.1	33.3	23.5	3.9	360	19.9	360	82	57	1002.0	125.1	34.4	11	183.7
2014/07	30.0	34.8	23.4	3.9	340	32.2	240	77	52	1002.5	163.0	30.8	8	290.7
2014/08	29.0	34.3	24.7	3.2	160	15.4	180	78	51	1004.7	219.9	32.2	12	240.4
2014/09	29.1	34.9	24.0	3.0	350	18.6	360	78	52	1005.5	24.5	6.7	4	249.6
2014/10	24.4	29.9	17.1	5.6	360	26.9	10	73	46	1010.6	T	0.2	0	266.5
2014/11	22.1	28.8	17.6	4.8	360	25.9	20	79	50	1013.1	2.6	15.5	4	177.4
2014/12	16.2	24.5	10.2	5.9	360	26.7	360	74	48	1017.6	28.0	48.4	9	129.4
年統計	23.7	34.9	7.7	4.3	360	32.2	240	79	40	1009.4	1147.7	327.3	92	2010.5

資料來源：中央氣象局

附表1-23 臺中港2002年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2002/01	744	6.0	13.9	NNE	41.0	47.4	11.6	0.0	84.4	7.8	4.4	3.2	0.1
2002/02	672	6.2	16.2	NE	38.1	47.6	13.7	0.6	89.7	4.9	0.9	4.5	0.0
2002/03	744	4.6	14.3	NNE	61.4	32.1	6.5	0.0	63.0	10.9	12.1	13.8	0.1
2002/04	720	4.4	12.8	NNE	65.3	30.3	4.4	0.0	49.7	9.7	28.5	11.9	0.1
2002/05	744	3.5	12.2	NNE	78.9	19.4	1.7	0.0	49.6	14.1	19.4	16.8	0.1
2002/06	720	3.5	10.8	NNE	80.1	19.3	0.6	0.0	19.6	19.0	56.4	5.0	0.0
2002/07	744	3.4	14.5	NNE	82.5	14.4	3.1	0.0	27.0	21.0	34.9	16.9	0.1
2002/08	744	2.8	9.4	WSW	92.9	7.1	0.0	0.0	14.0	22.8	45.4	17.7	0.0
2002/09	720	4.6	13.0	NNE	63.2	29.4	7.4	0.0	65.7	14.9	14.6	4.9	0.0
2002/10	744	5.5	17.9	NNE	55.4	28.8	14.2	1.6	78.5	10.9	4.6	5.8	0.3
2002/11	720	11.5	21.8	NNE	23.2	17.9	17.2	41.7	84.9	7.9	3.1	3.6	0.6
2002/12	743	10.9	26.5	NNE	28.0	18.4	26.8	26.8	85.6	7.8	0.8	5.7	0.1

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-24 臺中港2003年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2003/01	744	6.6	17.1	N	39.2	40.1	19.5	1.2	90.9	4.0	0.7	4.4	0.0
2003/02	672	5.8	14.9	NNE	49.4	34.1	16.5	0.0	78.1	8.8	5.7	7.4	0.0
2003/03	744	5.6	13.4	NE	46.5	42.5	11.0	0.0	77.0	5.5	10.6	6.9	0.0
2003/04	720	4.1	16.8	NNE	72.4	21.9	5.4	0.3	55.1	9.6	22.5	12.5	0.3
2003/05	744	4.3	14.8	NNE	65.7	28.1	6.2	0.0	56.5	13.3	21.6	8.5	0.1
2003/06	720	4.2	13.4	NNE	73.6	22.1	4.3	0.0	34.0	15.3	47.1	3.5	0.1
2003/07	744	3.1	9.3	NNE	89.8	10.2	0.0	0.0	8.3	14.4	66.8	10.5	0.0
2003/08	744	2.5	9.1	NNE	96.4	3.6	0.0	0.0	17.6	25.3	34.3	22.8	0.0
2003/09	720	4.0	15.1	NNE	70.4	24.0	5.4	0.1	64.7	10.8	8.3	15.8	0.3
2003/10	732	6.0	15.2	NE	46.4	37.2	16.3	0.1	84.0	5.2	5.7	5.1	0.0
2003/11	676	7.7	17.2	NNE	35.7	25.6	35.1	3.7	89.8	5.3	1.0	3.8	0.0
2003/12	743	7.7	17.8	NNE	34.5	31.4	30.3	3.9	94.8	2.3	0.0	3.0	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-25 臺中港2004年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2004/01	744	6.8	14.5	NNE	33.3	48.0	18.7	0.0	94.9	2.4	0.1	2.6	0.0
2004/02	466	5.7	16.4	NNE	53.9	25.1	19.7	1.3	68.5	10.1	10.7	10.7	0.0
2004/03	744	6.6	15.8	NE	32.0	53.1	14.2	0.7	87.8	4.2	3.0	5.1	0.0
2004/04	720	4.3	14.9	NNE	66.0	28.5	5.6	0.0	53.1	14.2	19.4	13.3	0.0
2004/05	744	3.6	12.9	NNE	79.2	19.9	0.9	0.0	45.3	11.3	29.8	13.6	0.0
2004/06	720	4.7	13.9	NNE	62.1	31.1	6.8	0.0	50.6	7.6	32.6	9.2	0.0
2004/07	736	3.2	11.3	S	86.7	12.8	0.5	0.0	17.7	17.0	46.5	18.9	0.0
2004/08	744	3.6	13.6	N	78.9	15.2	5.9	0.0	33.5	17.6	31.6	17.3	0.0
2004/09	720	3.9	14.9	N	73.6	18.8	7.6	0.0	57.4	17.1	12.4	13.2	0.0
2004/10	744	8.1	17.9	NNE	23.9	43.4	30.0	2.7	99.3	0.0	0.0	0.7	0.0
2004/11	720	5.3	14.6	NNE	58.9	23.3	17.8	0.0	82.9	7.5	2.2	7.4	0.0
2004/12	743	6.3	14.2	NNE	43.5	36.3	20.2	0.0	91.8	4.2	1.3	2.7	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-26 臺中港2005年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2005/01	690	7.4	15.3	NNE	31.0	37.5	31.2	0.3	91.7	3.5	2.3	2.5	0.0
2005/02	370	6.7	16.7	NNE	39.2	38.4	21.4	1.1	83.5	2.7	7.8	5.9	0.0
2005/03	688	5.9	19.9	NNE	55.1	25.1	16.9	2.9	77.3	6.7	6.3	9.7	0.0
2005/04	720	3.9	13.0	NNE	72.5	24.6	2.9	0.0	58.8	11.1	20.7	9.4	0.0
2005/05	744	3.6	12.5	NNE	81.5	16.7	1.9	0.0	35.1	12.4	41.9	10.6	0.0
2005/06	720	3.4	10.4	NNE	87.6	12.1	0.3	0.0	21.1	20.7	53.2	5.0	0.0
2005/07	744	3.6	26.1	N	83.5	12.2	2.3	2.0	26.5	11.2	46.1	16.3	0.0
2005/08	744	3.3	23.5	N	84.8	12.8	1.2	1.2	23.9	17.9	36.4	21.8	0.0
2005/09	720	3.7	26.2	N	78.1	18.1	3.3	0.6	63.3	12.1	13.1	11.5	0.0
2005/10	744	7.2	27.3	NNE	35.1	37.5	24.7	2.7	89.9	5.2	2.2	2.7	0.0
2005/11	720	5.9	17.5	NNE	50.7	29.7	18.2	1.4	78.1	7.5	4.6	9.9	0.0
2005/12	719	8.5	19.0	NNE	22.9	37.7	34.2	5.1	95.7	2.1	0.6	1.7	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-27 臺中港2006年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2006/01	575	7.0	17.8	NE	32.0	44.2	21.0	2.8	92.0	2.4	1.0	4.5	0.0
2006/02	483	8.6	18.7	N	24.4	34.2	34.8	6.6	93.4	1.0	0.8	4.8	0.0
2006/03	611	5.5	18.7	NNE	52.5	37.5	8.5	1.5	82.3	6.4	4.9	5.7	0.7
2006/04	263	3.6	11.4	NNE	79.1	17.9	3.0	0.0	50.2	9.1	30.4	10.3	0.0
2006/05	725	4.4	16.9	NNE	68.8	24.1	5.9	1.1	53.2	10.2	28.0	8.6	0.0
2006/06	121	3.9	7.7	SW	72.7	27.3	0.0	0.0	5.0	15.7	74.4	5.0	0.0
2006/07	491	4.4	18.3	N	74.1	15.1	5.9	4.9	24.6	18.1	43.8	13.0	0.4
2006/08	744	2.8	14.5	NNE	89.9	8.9	1.2	0.0	34.3	17.7	31.5	16.4	0.1
2006/09	720	5.1	18.1	NNE	61.4	29.0	8.3	1.3	66.3	14.3	15.4	3.9	0.1
2006/10	744	6.1	15.8	NNE	46.6	36.2	16.9	0.3	92.9	3.8	1.1	2.3	0.0
2006/11	720	5.0	16.2	NNE	59.4	30.7	9.7	0.1	81.8	10.3	2.4	5.6	0.0
2006/12	743	7.7	16.8	NE	28.5	40.6	28.3	2.6	95.2	1.1	0.9	2.8	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-28 臺中港2007年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2007/01	744	8.5	16.4	NNE	17.5	46.8	34.5	1.2	97.6	1.1	0.0	1.3	0.0
2007/02	672	5.0	14.7	NNE	56.8	35.4	7.7	0.0	80.1	7.6	5.7	6.5	0.1
2007/03	744	5.2	15.2	NNE	57.1	32.7	10.1	0.1	67.9	7.4	17.7	7.0	0.0
2007/04	679	4.4	18.5	NNE	66.9	25.2	7.7	0.3	63.0	10.9	14.4	11.5	0.1
2007/05	744	2.9	9.0	NNE	89.1	10.9	0.0	0.0	35.1	18.8	31.7	13.2	1.2
2007/06	720	2.8	8.4	SW	94.3	5.7	0.0	0.0	10.8	30.4	48.3	10.3	0.1
2007/07	744	3.1	7.5	NNE	91.8	8.2	0.0	0.0	9.9	18.7	56.2	14.8	0.4
2007/08	744	3.0	17.9	NNE	87.9	11.4	0.4	0.3	24.1	25.4	35.1	14.8	0.7
2007/09	720	4.2	14.7	N	70.6	20.8	8.6	0.0	63.3	16.1	12.4	8.2	0.0
2007/10	744	7.3	20.8	NNE	32.0	43.4	19.6	5.0	84.9	3.1	7.9	4.0	0.0
2007/11	720	9.9	23.3	NNE	17.9	30.7	38.5	12.9	98.2	1.4	0.3	0.1	0.0
2007/12	743	7.0	15.5	NNE	33.6	43.1	22.9	0.4	92.1	5.2	1.6	1.1	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-29 臺中港2008年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2008/01	692	15.1	26.7	NE	6.5	19.5	20.4	53.6	97.4	0.4	0.4	1.7	0.0
2008/02	576	16.3	25.6	NE	3.6	9.7	19.8	66.8	99.5	0.3	0.2	0.0	0.0
2008/03	725	9.8	21.6	NNE	25.2	26.2	29.9	18.6	87.3	3.2	5.2	4.3	0.0
2008/04	706	8.2	21.7	NE	27.6	42.4	20.4	9.6	72.4	2.4	18.7	6.5	0.0
2008/05	742	8.7	25.1	NE	24.4	46.4	15.6	13.6	49.5	3.1	43.5	3.9	0.0
2008/06	719	7.0	16.0	SSW	32.0	48.0	18.6	1.4	11.7	6.5	74.5	7.2	0.0
2008/07	744	8.2	37.5	NNE	29.0	49.6	8.1	13.3	15.3	7.7	67.6	9.4	0.0
2008/08	219	3.9	10.9	SSW	68.9	30.1	0.9	0.0	37.0	10.0	21.9	31.1	0.0
2008/09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/10	25	4.3	10.6	NNE	72.0	24.0	4.0	0.0	32.0	8.0	28.0	32.0	0.0
2008/11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-30 臺中港2009年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2009/01	744	8.0	16.9	29.4	30.9	31.2	32.9	5.0	97.8	1.2	0.0	0.9	0.0
2009/02	672	5.3	14.2	24.5	51.2	36.3	12.5	0.0	81.0	4.9	8.2	6.0	0.0
2009/03	744	5.8	18.8	28.13	45.7	40.7	12.9	0.5	80.9	2.3	7.1	9.7	0.1
2009/04	720	4.7	14.8	24.14	62.5	27.1	10.3	0.0	74.3	6.9	6.0	12.8	0.1
2009/05	744	3.6	12.2	27.8	75.5	19.6	3.4	0.0	65.7	9.1	9.1	16.0	1.5
2009/06	720	2.4	8.2	19.86	94.7	5.0	0.0	0.0	29.4	10.3	47.9	12.4	0.3
2009/07	558	2.4	6.8	218.6	96.8	3.2	0.0	0.0	12.9	16.7	50.9	19.5	0.0
2009/08	744	3.6	26.2	4.6	80.0	14.8	1.6	3.5	27.4	13.2	16.8	42.6	0.1
2009/09	720	3.8	13.8	19.2	75.8	17.5	6.5	0.0	62.5	12.9	8.2	16.4	0.1
2009/10	744	8.6	18.8	22.5	30.5	26.2	33.2	10.1	90.2	3.1	1.5	5.2	0.0
2009/11	437	13.5	21.6	23.6	22.7	11.7	14.6	51.0	94.7	2.5	1.1	1.6	0.0
2009/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-31 臺中港2010年風之風速及風向統計表

年/月	觀測筆數	平均風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2010/01	744	11.1	25.8	28.5	22.3	20.2	25.4	32.1	87.0	4.3	3.1	5.6	0.0
2010/02	461	10.9	23.8	33.1	22.8	26.7	19.1	31.5	73.8	4.1	17.1	5.0	0.0
2010/03	740	9.3	28.3	32.1	28.5	33.8	16.9	20.8	72.8	3.6	15.0	8.5	0.0
2010/04	720	9.4	24.0	21.5	27.5	32.2	18.5	21.8	70.6	3.5	16.7	9.3	0.0
2010/05	744	7.0	17.2	22.4	32.5	44.2	20.7	2.6	50.3	3.4	35.2	11.2	0.0
2010/06	720	7.9	18.7	20.7	22.4	52.8	17.1	7.8	31.1	13.9	53.3	1.7	0.0
2010/07	732	7.0	16.9	208.7	37.3	38.1	23.0	1.6	13.8	10.9	64.5	10.8	0.0
2010/08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2010/09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2010/10	44	7.2	15.7	23.3	47.7	22.7	18.2	11.4	54.5	13.6	18.2	13.6	0.0
2010/11	468	11.8	24.8	26.3	21.8	16.5	19.7	42.1	84.8	5.6	2.6	7.1	0.0
2010/12	653	11.1	30.3	23.7	24.2	19.1	25.7	30.9	89.1	3.7	2.6	4.6	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-32 臺中港2011年風之風速及風向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2011/01	738	17.4	27.8	29.5	1.1	7.2	14.4	77.4	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2011/02	669	12.1	24.8	28.5	14.8	23.0	24.8	37.4	91.6	1.8	3.0	3.6	0.0
2011/03	666	13.3	32.4	40.1	16.8	19.1	17.9	46.2	89.3	1.5	6.0	3.2	0.0
2011/04	662	7.8	20.5	35.8	41.2	26.6	16.8	15.4	60.6	6.2	23.1	10.1	0.0
2011/05	744	7.4	25.8	22.3	38.6	34.0	20.2	7.3	62.6	5.1	19.1	13.2	0.0
2011/06	719	6.6	18.8	21.4	34.4	51.2	12.8	1.7	19.5	5.0	65.4	10.2	0.0
2011/07	744	5.9	15.8	203.2	39.2	50.8	9.7	0.3	5.5	12.8	67.1	14.7	0.0
2011/08	744	5.5	17.6	169.3	52.8	33.7	12.6	0.8	19.5	15.5	46.1	19.0	0.0
2011/09	719	8.0	21.7	28.2	39.2	24.2	22.7	13.9	71.3	7.6	9.7	11.3	0.0
2011/10	744	13.6	27.6	30.9	10.5	19.1	21.8	48.7	94.2	0.0	1.1	4.7	0.0
2011/11	720	10.7	25	29.3	26.4	21.1	21.9	30.6	83.2	3.3	5.7	7.8	0.0
2011/12	575	17.7	28.4	28.6	6.3	5.6	13.9	74.3	96.2	0.5	2.4	0.9	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-33 臺中港2012年風之風速及風向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2012/01	744	16.6	25.7	NNE	0.5	3.8	25.0	70.7	73.5	0.9	0.0	25.5	0.7
2012/02	696	15.6	27.8	N	4.9	8.0	25.4	61.6	68.2	3.0	0.4	28.3	0.4
2012/03	744	13.5	28.8	NNE	14.2	9.1	28.8	47.8	55.9	8.1	5.4	30.6	0.0
2012/04	720	6.3	19.7	N	26.7	65.0	7.8	0.6	35.6	11.9	28.5	24.0	2.4
2012/05	744	7.4	22.0	NNE	28.5	49.7	14.2	7.5	48.7	8.2	28.6	14.5	0.0
2012/06	720	8.5	20.9	S	25.3	38.8	28.2	7.8	39.4	5.6	47.5	7.5	0.0
2012/07	744	6.3	28.9	NNE	41.1	44.9	10.9	3.1	15.9	11.0	59.8	13.3	0.0
2012/08	744	7.4	27.5	NNE	38.7	37.9	13.4	9.9	31.0	10.8	44.6	13.6	0.0
2012/09	720	8.7	27.2	NNE	41.8	25.1	9.9	23.2	62.9	7.4	17.1	12.6	0.0
2012/10	744	12.3	22.7	NNE	15.6	19.6	24.7	40.1	90.7	1.6	4.0	3.6	0.0
2012/11	721	8.7	23.6	NNE	32.6	27.2	22.7	17.3	78.2	5.5	9.6	6.5	0.0
2012/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-34 臺中港2013年風之風速及風向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2013/01	744	13.7	24.9	31.2	9.8	18.8	20.8	50.5	97.0	0.7	0.0	2.3	0.0
2013/02	672	12.3	25.1	28.1	21.6	16.5	19.6	42.3	90.9	2.2	2.4	4.5	0.0
2013/03	744	9.4	25.0	30.7	34.7	23.3	19.1	23.0	62.4	8.9	21.4	7.4	0.0
2013/04	720	8.2	22.5	35.1	27.9	42.2	17.1	12.8	61.3	9.0	24.2	5.6	0.0
2013/05	744	6.5	20.5	29.4	34.3	53.6	9.1	3.0	31.2	7.8	50.8	10.2	0.0
2013/06	720	6.5	17.5	219.5	37.6	43.3	17.5	1.5	29.9	5.1	54.2	10.8	0.0
2013/07	744	5.5	29.3	230.1	52.4	40.3	2.8	4.4	23.7	19.4	36.4	20.6	0.0
2013/08	744	5.8	22.1	213.1	50.3	34.5	10.9	4.3	17.9	14.2	49.5	18.4	0.0
2013/09	719	8.7	24.7	28.1	36.0	26.0	18.5	19.5	77.7	8.1	8.3	5.8	0.0
2013/10	370	13.7	23.5	19.9	10.5	17.6	25.9	45.9	89.7	2.7	5.4	2.2	0.0
2013/11	583	11.4	21.8	29.4	21.3	20.9	20.9	36.9	85.9	2.2	4.3	7.5	0.0
2013/12	744	14.0	25.1	28.5	12.1	13.6	23.5	50.8	96.4	1.6	0.1	1.9	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-35 臺中港2014年風之風速及風向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 風速 m/sec	風速		風速 <5m/sec (%)	風速 5~10m/sec (%)	風速 10~15m/sec (%)	風速 >15m/sec (%)	風向 N~E (%)	風向 E~S (%)	風向 S~W (%)	風向 W~N (%)	靜風 <0.3m/sec (%)
			最大值 m/sec	風向									
2014/01	743	11.9	27.9	28.9	25.8	21.1	13.7	39.3	88.2	4.3	1.7	5.8	0.0
2014/02	672	11.4	25.2	32.8	20.2	25.6	18.8	35.4	87.1	5.4	1.9	5.7	0.0
2014/03	744	9.2	27.8	29.2	39.8	19.0	16.3	25.0	66.4	6.3	15.1	12.2	0.0
2014/04	720	8.3	20.7	29.8	29.3	35.0	26.3	9.4	73.5	1.5	13.3	11.7	0.3
2014/05	744	6.4	21.3	28.9	39.1	47.4	9.7	3.8	36.2	9.4	44.9	9.5	0.0
2014/06	720	7.8	19.3	26.6	28.1	46.3	18.2	7.5	29.0	7.5	57.5	6.0	0.0
2014/07	744	6.9	28.6	23.3	38.8	42.7	11.0	7.4	23.5	8.3	48.3	19.9	0.0
2014/08	694	5.5	15.2	221.7	49.9	39.2	10.8	0.1	7.1	14.1	68.2	10.7	0.0
2014/09	684	5.6	19.7	21.0	54.2	31.4	11.1	3.2	42.1	7.9	36.1	13.9	0.0
2014/10	733	11.9	25.6	24.1	21.4	16.2	23.7	38.6	90.5	1.6	3.8	4.1	1.2
2014/11	720	10.8	26.0	31.0	22.4	26.3	23.9	27.5	90.8	4.3	1.5	3.3	0.7
2014/12	743	11.9	27.9	28.9	25.8	21.1	13.7	39.3	88.2	4.3	1.7	5.8	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-36 臺中港2004年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2004/01	726	40.0	105.2	258.0	38.0	28.9	32.0	1.1	11.8	4.7	32.5	51.0
2004/02	426	48.3	134.0	273.6	21.8	36.2	37.1	4.9	11.0	0.5	20.0	68.5
2004/03	744	45.7	131.0	256.5	24.5	36.2	36.2	3.2	4.4	0.0	36.7	58.9
2004/04	720	38.9	124.8	284.4	32.4	39.6	26.5	1.5	17.2	0.0	9.4	73.3
2004/05	671	27.6	93.8	335.9	52.0	37.1	10.9	0.0	23.0	1.6	10.1	65.3
2004/06	690	57.1	125.2	183.9	8.6	28.3	59.9	3.3	4.3	77.2	5.2	13.2
2004/07	741	49.9	142.5	6.5	15.2	36.0	45.2	3.5	10.9	2.2	0.9	86.0
2004/08	744	36.5	130.6	284.5	31.0	47.3	20.8	0.8	17.2	3.6	3.0	76.2
2004/09	720	35.5	132.3	281.5	40.6	37.6	19.2	2.6	18.2	1.5	12.5	67.8
2004/10	740	59.5	173.0	259.1	18.8	22.7	47.2	11.4	1.2	0.0	38.5	60.3
2004/11	714	50.1	131.8	280.0	24.1	31.1	36.6	8.3	2.4	0.0	21.6	76.1
2004/12	743	54.3	137.6	267.0	17.2	30.3	44.8	7.7	1.1	0.0	38.5	60.4

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-37 臺中港2005年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2005/01	743	62.2	132.6	266.4	10.8	28.0	49.1	12.1	2.8	0.0	31.0	66.2
2005/02	667	52.5	158.1	271.0	17.2	39.6	33.9	9.3	3.9	2.5	27.9	65.7
2005/03	731	55.2	237.6	279.6	20.0	33.0	36.7	10.4	9.0	2.5	28.2	60.3
2005/04	716	39.8	91.5	329.5	28.2	39.2	32.5	0.0	14.5	2.9	11.9	70.7
2005/05	739	40.0	95.9	352.7	23.4	49.0	27.6	0.0	12.3	0.0	8.9	78.8
2005/06	713	47.2	126.5	1.3	14.9	42.1	41.9	1.1	23.8	0.0	5.3	70.8
2005/07	521	56.2	189.1	272.5	12.5	29.6	52.8	5.2	10.7	0.2	3.8	85.2
2005/08	669	46.8	147.5	275.1	13.9	44.2	40.7	1.2	8.5	0.0	2.5	88.9
2005/09	689	40.2	152.7	320.8	31.8	33.5	33.7	1.0	6.0	0.4	9.6	84.0
2005/10	725	55.7	248.3	273.0	19.3	31.7	36.1	12.8	1.1	0.3	29.9	68.7
2005/11	388	45.3	129.2	264.2	26.8	36.3	29.9	7.0	9.3	6.2	19.1	65.5
2005/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-38 臺中港2006年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2006/01	718	52.5	171.9	266.6	27.4	27.4	32.0	13.1	1.1	0.0	32.7	66.2
2006/02	644	61.9	170.9	272.6	19.3	28.9	34.5	17.4	6.4	0.0	34.2	59.5
2006/03	219	45.0	133.2	281.7	35.2	29.7	23.3	11.9	14.6	0.5	18.3	66.7
2006/04	268	35.8	91.2	333.9	34.3	38.8	26.9	0.0	3.4	0.0	13.8	82.8
2006/05	744	42.3	148.3	249.8	27.6	39.5	29.4	3.5	3.2	0.0	15.2	81.6
2006/06	720	49.0	101.2	326.4	11.5	38.5	49.7	0.3	9.7	0.0	0.0	90.3
2006/07	739	54.1	150.2	251.1	9.6	32.7	54.7	3.0	3.9	0.0	5.3	90.8
2006/08	729	40.2	87.5	267.6	19.8	51.2	29.1	0.0	1.8	0.0	6.2	92.0
2006/09	588	37.2	168.1	271.3	36.4	38.3	22.6	2.7	2.4	1.4	41.2	55.1
2006/10	744	37.9	100.9	249.7	35.8	34.3	29.8	0.1	6.0	1.5	46.4	46.1
2006/11	719	40.2	105.7	249.3	30.9	39.5	29.2	0.4	9.0	3.1	44.9	43.0
2006/12	742	55.5	133.9	266.6	25.6	26.3	32.1	16.0	3.6	1.5	63.2	31.7

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-39 臺中港2007年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2007/01	743	52.2	129.6	270.8	22.2	28.4	43.2	6.2	3.8	3.2	69.7	23.3
2007/02	671	39.9	113.0	246.5	29.5	39.5	29.1	1.9	12.1	2.7	40.5	44.7
2007/03	741	44.2	151.1	260.8	28.1	39.7	26.5	5.8	12.3	4.3	28.3	55.1
2007/04	718	38.0	193.9	256.1	38.9	38.3	18.2	4.6	8.1	2.2	29.7	60.0
2007/05	741	37.6	95.0	335.1	28.5	42.9	28.6	0.0	11.2	3.2	5.0	80.6
2007/06	709	44.1	96.0	339.5	16.6	43.4	39.9	0.0	14.8	0.4	2.4	82.4
2007/07	727	46.0	92.5	335.2	17.6	35.5	46.9	0.0	11.3	0.3	1.4	87.1
2007/08	400	45.7	98.7	348.7	16.3	42.5	41.3	0.0	13.0	0.5	0.0	86.5
2007/09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2007/10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2007/11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2007/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-40 臺中港2008年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2008/01	493	78.4	182.9	264.6	19.9	9.7	35.5	34.9	6.9	0.8	58.6	33.7
2008/02	691	71.2	157.6	263.8	15.3	16.1	51.5	17.1	3.3	12.7	36.9	47.0
2008/03	743	34.6	101.7	245.1	42.8	36.2	20.9	0.1	9.6	6.7	24.8	59.0
2008/04	720	31.8	114.0	251.4	44.6	36.8	18.1	0.6	18.1	6.0	19.9	56.1
2008/05	470	50.2	150.0	251.2	10.4	45.3	40.0	3.8	29.6	1.7	14.5	53.8
2008/06	720	44.4	129.3	14.7	19.2	44.9	35.3	0.7	35.1	1.1	14.9	48.9
2008/07	744	50.2	145.4	356.7	15.5	40.9	39.0	4.7	25.1	40.9	24.6	9.4
2008/08	744	47.2	120.9	155.2	16.5	41.8	40.2	1.5	19.9	62.6	11.4	6.0
2008/09	667	53.9	240.2	282.4	22.9	32.8	34.3	9.9	10.3	41.7	29.2	18.7
2008/10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-41 臺中港2009年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2009/01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/06	286	57.4	189.0	14.7	15.0	31.8	45.5	7.7	47.6	0.3	5.2	46.9
2009/07	743	48.9	150.2	7.7	19.7	36.3	39.0	5.0	51.3	2.7	2.0	44.0
2009/08	440	38.0	140.4	281.4	27.0	51.8	20.0	1.1	30.9	0.7	5.0	63.4
2009/09	720	33.3	88.9	22.8	34.0	51.9	14.0	0.0	24.4	1.1	17.4	57.1
2009/10	744	50.3	128.2	244.4	19.1	35.9	40.9	4.2	12.0	0.1	60.2	27.7
2009/11	719	52.9	182.6	244.8	23.2	32.1	33.7	11.0	15.4	0.7	59.8	24.1
2009/12	741	37.8	112.9	245.4	36.3	35.8	27.4	0.5	15.1	0.5	60.7	23.6

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-42 臺中港2010年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2010/01	744	37.3	112.6	243.7	32.1	44.0	22.2	1.7	19.1	1.3	45.3	34.3
2010/02	672	38.0	118.3	240.4	33.3	40.6	24.6	1.5	31.0	0.6	42.0	26.5
2010/03	742	35.8	134.4	1.3	43.3	32.6	22.1	2.0	68.9	0.0	15.9	15.2
2010/04	719	33.2	84.8	240.0	36.9	46.0	17.1	0.0	31.0	2.5	31.0	35.5
2010/05	738	28.6	87.9	6.9	48.0	40.8	11.2	0.0	31.6	3.5	14.1	50.8
2010/06	715	36.5	86.4	347.7	28.0	50.1	22.0	0.0	35.5	0.0	12.4	52.0
2010/07	743	46.6	101.8	18.6	13.2	42.7	44.0	0.1	54.6	0.0	1.9	43.5
2010/08	743	44.5	93.8	338.2	10.2	53.4	36.3	0.0	54.8	0.1	2.0	43.1
2010/09	710	35.7	117.9	250.3	26.6	54.8	17.9	0.7	47.2	0.8	12.0	40.0
2010/10	741	53.3	168.8	245.6	20.1	37.9	28.9	13.1	13.4	0.3	54.9	31.4
2010/11	718	38.3	102.0	249.3	24.0	54.6	21.0	0.4	18.0	0.0	46.2	35.8
2010/12	744	41.9	165.3	323.0	19.6	51.2	26.9	2.3	37.0	9.4	27.0	26.6

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-43 臺中港2011年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2011/01	712	20.6	56.7	32.4	63.9	35.0	1.1	0.0	26.0	62.2	8.6	3.2
2011/02	600	15.7	56.1	100.3	78.7	20.7	0.7	0.0	58.2	24.2	7.7	10.0
2011/03	683	19.8	66.1	103.6	63.7	34.8	1.5	0.0	48.2	33.2	10.8	7.8
2011/04	688	21.1	129.9	287.9	58.6	36.3	4.8	0.3	70.9	13.4	3.8	11.9
2011/05	697	28.3	93.1	241.8	48.5	43.8	7.7	0.0	29.3	1.4	24.7	44.6
2011/06	666	32.8	80.7	20.7	31.8	54.1	14.1	0.0	65.8	0.8	5.3	28.2
2011/07	697	33.2	88.1	27.7	28.8	57.1	14.1	0.0	73.2	0.3	1.1	25.4
2011/08	711	31.3	95.1	26.5	42.8	34.5	22.8	0.0	61.3	0.4	4.5	33.8
2011/09	690	21.6	65.2	231.9	62.9	32.9	4.2	0.0	28.6	1.9	31.9	37.7
2011/10	713	35.0	143.6	242.2	41.8	37.2	17.7	3.4	16.3	0.3	62.0	21.5
2011/11	686	36.2	103.7	243.3	33.5	46.9	19.2	0.3	18.5	1.0	38.9	41.5
2011/12	104	60.7	128.3	239.0	16.3	23.1	49.0	11.5	8.7	1.0	83.7	6.7

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-44 臺中港2012年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2012/01	743	42.4	101.8	241.2	23.8	44.5	31.4	0.3	3.1	0.0	68.2	28.7
2012/02	329	40.0	117.8	239.8	36.5	33.4	28.0	2.1	14.9	0.3	45.0	39.8
2012/03	371	37.3	92.9	235.8	27.8	48.5	23.7	0.0	52.6	0.3	27.8	19.4
2012/04	719	32.9	90.9	31.5	39.2	40.8	20.0	0.0	45.3	1.4	11.8	41.4
2012/05	743	25.9	84.3	355.9	53.6	37.4	9.0	0.0	34.7	2.6	34.3	28.4
2012/06	719	30.0	99.0	13.9	42.6	44.6	12.8	0.0	54.2	1.5	20.4	23.8
2012/07	743	31.1	112.7	238.8	39.8	46.0	13.7	0.4	66.6	2.6	10.9	19.9
2012/08	403	39.3	123.0	245.4	32.5	38.2	26.8	2.5	40.9	0.2	25.1	33.7
2012/09	709	39.2	124.6	237.6	29.1	46.8	20.9	3.2	39.8	1.1	29.6	29.5
2012/10	743	31.9	104.8	225.6	41.6	37.8	20.5	0.1	20.6	0.8	53.2	25.4
2012/11	719	29.5	97.7	238.1	44.1	42.6	13.4	0.0	24.3	0.1	41.2	34.4
2012/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-45 臺中港2013年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2013/01	625	45.2	128.3	237.2	18.9	49.9	26.9	4.3	12.0	0.3	57.0	30.7
2013/02	596	45.4	134.8	240.1	23.2	41.9	31.0	3.9	13.4	0.8	53.9	31.9
2013/03	620	39.1	128.5	240.4	26.5	49.8	22.3	1.5	33.2	1.1	37.9	27.7
2013/04	576	33.5	97.4	233.4	33.7	52.1	14.2	0.0	30.2	1.7	22.9	45.1
2013/05	562	30.8	86.5	335.3	37.7	52.3	10.0	0.0	38.1	2.1	4.4	55.3
2013/06	542	26.1	85.8	338.1	53.0	41.0	6.1	0.0	35.1	4.8	7.9	52.2
2013/07	546	25.0	148.6	131.0	58.2	34.2	6.6	0.9	31.0	12.8	6.4	49.8
2013/08	569	22.8	75.7	351.0	62.7	32.0	5.3	0.0	19.5	11.6	10.9	58.0
2013/09	605	26.6	107.9	21.2	57.0	32.2	10.4	0.3	15.9	4.5	37.7	42.0
2013/10	699	49.5	121	233.2	25.2	29.6	41.1	4.1	7.4	1.6	72.5	18.5
2013/11	660	35.6	105.3	237.2	37.9	36.2	25.8	0.2	8.6	2.9	70.9	17.6
2013/12	590	52.3	123.8	239.1	16.6	38.6	38.1	6.6	10.3	0	70.2	19.5

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-46 臺中港2014年海流之流速及流向統計表

年/月	觀測 筆數	平均 流速 (cm/sec)	最大流速		流速 <25cm/sec (%)	流速 25~50cm/sec (%)	流速 50~100cm/sec (%)	流速 >100cm/sec (%)	流向 N~E (%)	流向 E~S (%)	流向 S~W (%)	流向 W~N (%)
			流速 (cm/sec)	流向 (°)								
2014/01	599	51.5	123.8	239.1	17.9	38.1	37.6	6.5	11.7	0.0	69.1	19.2
2014/02	518	46.3	137.4	236.7	24.3	40.2	29.7	5.8	38.8	0.2	44.6	16.4
2014/03	461	45.3	135.9	241.1	26.5	31.9	36.4	5.2	27.3	0.4	49.5	22.8
2014/04	154	28.8	96.1	22.9	46.1	42.9	11.0	0.0	37.0	1.3	15.6	46.1
2014/05	720	25.9	73.3	4.5	54.4	41.0	4.6	0.0	12.5	0.4	43.9	43.2
2014/06	744	32.6	93.0	13.1	41.1	43.8	15.1	0.0	30.9	0.0	19.5	49.6
2014/07	720	35.9	88.2	22.8	27.5	49.2	23.3	0.0	37.6	0.3	16.4	45.7
2014/08	744	37.5	145.5	7.0	28.1	46.5	23.4	2.0	45.0	0.3	3.1	51.6
2014/09	675	32.0	155.4	295.5	38.4	43.0	17.6	1.0	48.4	2.8	1.5	47.3
2014/10	683	26.1	86.4	276.1	53.1	40.0	6.9	0.0	40.8	3.4	16.7	39.1
2014/11	743	39.6	107.8	237.2	33.6	33.8	31.9	0.7	16.6	1.3	60.6	21.5
2014/12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-47 臺中港2004年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2004/01	725	1.9	5.2	3.5	6.4	N	2.3	5.1	92.6	0.0	98.9	0.0	0.0	1.1	98.1	1.9	0.0	0.0
2004/02	425	1.5	5.3	4.7	5.2	N	44.0	7.8	48.2	0.0	89.6	0.0	1.4	8.9	95.3	4.7	0.0	0.0
2004/03	743	2.0	5.4	5.3	5.1	NNE	15.6	12.5	71.7	0.1	93.7	0.0	0.1	6.2	91.7	8.3	0.0	0.0
2004/04	719	1.1	5.4	4.1	6.0	NNE	40.2	14.3	45.5	0.0	80.7	0.6	2.5	16.3	86.0	14.0	0.0	0.0
2004/05	670	0.9	5.2	7.5	6.2	WSW	47.3	16.9	35.0	0.6	64.3	0.9	6.3	28.5	96.7	3.3	0.0	0.0
2004/06	705	1.1	6.2	3.3	7.2	ENE	27.4	29.4	43.3	0.0	61.6	2.4	21.6	14.5	32.6	62.4	4.5	0.4
2004/07	725	0.8	5.3	3.1	6.8	WSW	9.0	72.1	18.9	0.0	5.5	0.0	17.9	76.6	67.6	28.4	3.4	0.6
2004/08	719	1.0	6.5	3.4	8.6	N	11.1	58.0	30.9	0.0	37.6	0.0	2.6	59.8	36.3	51.9	8.6	3.2
2004/09	719	1.3	6.9	4.0	9.9	N	12.5	32.5	55.0	0.0	49.4	0.0	2.4	48.2	27.4	47.2	21.0	4.3
2004/10	739	2.4	7.1	4.6	8.9	N	0.0	1.1	98.9	0.0	91.2	0.1	0.0	8.7	16.5	63.5	16.8	3.2
2004/11	711	2.1	7.0	4.7	9.3	N	2.4	9.1	88.5	0.0	93.5	0.0	0.0	6.5	16.9	65.5	17.3	0.3
2004/12	742	2.3	7.2	4.1	8.9	N	0.8	2.6	96.6	0.0	93.8	0.0	0.0	6.2	7.7	72.5	19.7	0.1

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-48 臺中港2005年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2005/01	742	2.2	7.1	4.7	8.3	N	5.3	9.0	85.6	0.0	96.9	0.0	0.0	3.1	14.2	73.0	12.7	0.0
2005/02	668	2.2	7.2	6.2	6.2	NW	7.9	8.4	83.0	0.6	94.3	0.0	0.0	5.7	10.3	82.8	6.6	0.0
2005/03	731	1.6	6.8	6.9	6.2	N	33.9	13.7	50.5	1.9	76.7	0.0	0.0	23.3	11.1	80.2	8.8	0.0
2005/04	714	0.9	6.1	3.2	6.5	NNE	38.2	21.8	39.9	0.0	64.0	0.0	0.8	35.2	28.9	69.5	1.7	0.0
2005/05	738	1.1	5.9	2.9	6.3	NNE	10.7	38.9	50.5	0.0	64.0	0.1	5.0	30.9	40.9	56.5	2.6	0.0
2005/06	712	1.0	5.8	2.2	7.1	NNE	4.6	48.9	46.4	0.0	27.0	0.0	17.6	55.5	59.7	39.0	0.7	0.1
2005/07	524	1.2	11.7	7.0	8.9	N	7.4	59.7	31.5	1.4	15.1	0.0	29.6	55.3	53.1	32.3	7.4	0.4
2005/08	690	1.2	12.4	5.8	8.0	N	4.2	39.3	56.1	0.4	22.3	0.0	26.1	51.6	36.5	51.7	4.3	0.6
2005/09	700	1.6	7.5	6.3	9.3	N	1.6	16.9	81.0	0.5	70.9	0.6	1.6	26.9	28.3	51.7	15.1	4.1
2005/10	724	2.3	7.1	6.3	6.2	NNE	0.0	0.1	99.3	0.5	91.2	0.0	1.0	8.7	4.6	80.2	15.1	0.1
2005/11	386	1.2	6.2	4.5	6.2	N	27.5	27.5	45.1	0.0	73.8	1.6	7.3	17.4	38.1	52.8	9.1	0.0
2005/12	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-49 臺中港2006年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2006/01	717	2.1	7.0	4.7	10.1	N	0.0	4.3	95.7	0.0	91.8	0.0	0.0	8.2	16.9	67.2	15.6	0.3
2006/02	642	2.4	7.5	4.9	10.1	N	0.3	9.5	90.2	0.0	87.6	0.2	0.0	12.1	10.7	53.0	35.2	1.1
2006/03	218	1.9	6.3	3.7	9.5	N	3.7	0.9	95.4	0.0	93.6	0.0	0.0	6.4	28.0	67.4	4.6	0.0
2006/04	265	1.1	5.9	2.8	7.9	N	6.0	38.1	55.8	0.0	72.5	0.0	0.0	27.2	40.0	55.8	3.8	0.4
2006/05	743	1.2	6.0	4.9	12.1	N	5.2	49.7	45.1	0.0	65.0	0.0	3.1	31.9	50.3	36.9	11.7	1.1
2006/06	719	0.6	5.5	2.0	5.7	WSW	42.7	42.1	15.2	0.0	7.8	0.0	19.2	73.0	62.0	32.7	5.1	0.1
2006/07	723	0.9	5.9	4.7	7.9	NW	16.6	60.4	23.0	0.0	9.2	0.0	27.1	63.6	51.3	36.5	11.8	0.4
2006/08	739	0.8	5.9	3.0	7.9	NNE	16.9	66.3	16.8	0.0	32.3	0.0	8.1	59.4	48.4	43.2	7.8	0.5
2006/09	583	1.7	7.1	4.9	10.2	N	0.2	17.0	82.8	0.0	76.7	0.0	0.2	22.8	17.2	63.5	13.4	6.0
2006/10	742	1.7	6.4	3.7	8.0	N	0.0	14.7	85.3	0.0	97.0	0.0	0.0	3.0	32.6	65.0	2.4	0.0
2006/11	719	1.6	6.8	3.4	7.0	N	0.3	18.2	81.5	0.0	91.9	0.4	0.4	7.2	23.1	65.9	10.7	0.3
2006/12	737	2.5	7.6	4.1	8.6	N	0.0	0.0	100.0	0.0	89.7	0.0	0.0	9.7	3.5	64.3	32.2	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-50 臺中港2007年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2007/01	743	2.3	7.2	5.2	6.9	N	0.0	2.2	97.7	0.1	75.4	0.0	0.0	24.6	10.2	73.8	16.0	0.0
2007/02	659	1.5	6.2	4.8	7.7	N	4.4	27.6	68.0	0.0	77.8	2.4	0.0	19.4	34.6	62.8	2.6	0.0
2007/03	723	1.7	6.3	5.6	8.2	N	4.0	27.9	67.1	1.0	66.0	8.4	0.8	24.5	30.6	62.9	6.5	0.0
2007/04	713	1.5	6.3	5.9	9.3	N	9.1	22.0	67.2	1.7	66.8	1.0	1.7	30.3	29.3	64.8	5.9	0.0
2007/05	737	0.7	5.0	3.5	7.5	NNE	24.2	60.5	15.3	0.0	45.7	3.0	1.8	49.5	68.8	29.7	1.1	0.4
2007/06	707	0.7	5.6	3.5	6.3	ENE	17.1	75.0	7.9	0.0	27.3	0.1	16.4	56.2	55.3	40.9	3.8	0.0
2007/07	725	0.6	4.9	3.2	6.7	WNW	36.4	61.0	2.6	0.0	9.9	0.1	16.8	73.1	71.9	21.4	4.6	2.2
2007/08	741	0.8	6.2	5.4	9.1	N	45.1	27.4	27.3	0.3	56.3	0.0	13.0	30.8	29.4	64.1	5.8	0.5
2007/09	721	1.4	6.6	4.6	7.0		15.9	20.7	63.4	0.0	26.1	24.5	26.0	23.4	18.9	72.7	8.3	0.0
2007/10	704	2.4	6.9	6.7	9.8		3.8	5.7	88.6	1.8	22.2	24.4	23.2	30.3	8.7	86.6	4.8	0.0
2007/11	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2007/12	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-51 臺中港2008年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2008/01	329	3.4	7.8	5.3	7.6	N	0.6	0.3	98.8	0.3	98.5	0.0	0.0	1.5	2.1	51.4	46.5	0.0
2008/02	446	3.2	7.3	5.0	8.5	N	0.0	2.9	96.9	0.2	98.4	0.0	0.0	1.6	4.5	74.2	21.3	0.0
2008/03	309	2.3	6.6	4.3	7.8	N	4.2	8.1	87.7	0.0	97.7	0.0	0.0	2.3	14.9	80.9	4.2	0.0
2008/04	223	2.1	6.6	3.8	6.8	18.2	3.6	5.8	90.6	0.0	92.8	0.0	0.4	6.7	12.6	86.1	0.9	0.4
2008/05	87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/06	714	0.7	5.3	1.6	5.2	255.0	22.5	59.1	18.3	0.0	16.7	0.0	26.3	57.0	67.6	29.8	2.1	0.4
2008/07	741	0.9	5.6	6.2	7.7	21.3	32.9	46.0	20.0	1.1	11.5	0.9	20.5	67.1	51.8	43.9	4.3	0.0
2008/08	742	0.7	5.7	2.0	5.7	288.4	25.3	64.0	10.6	0.0	8.8	3.0	19.4	68.9	55.1	36.1	7.8	0.9
2008/09	659	1.5	6.9	7.3	10.8	353.7	14.1	36.3	47.0	2.6	52.2	3.8	5.5	38.5	17.0	65.4	14.7	2.9
2008/10	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/11	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2008/12	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-52 臺中港2009年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2009/01	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/02	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/03	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/04	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/05	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2009/06	285	0.81	6.0	2.76	9.9	269.7	17.9	62.1	20.0	0.0	9.8	0.0	17.5	72.6	54.0	33.0	7.4	5.6
2009/07	742	0.63	5.8	1.72	5.8	257.2	30.9	59.7	9.4	0.0	11.7	0.0	7.5	80.7	47.3	48.4	4.0	0.3
2009/08	742	1.02	6.6	7.78	8.7	—	38.5	29.1	29.6	2.7	72.0	0.0	0.0	28.0	27.2	62.8	9.0	0.9
2009/09	719	1.54	6.8	3.32	8.7	11.9	0.3	20.7	79.0	0.0	94.0	0.0	0.0	6.0	20.3	69.5	10.2	0.0
2009/10	743	2.17	7.2	4.35	9.2	12.7	0.0	3.8	96.2	0.0	99.7	0.0	0.0	0.3	9.0	66.9	24.1	0.0
2009/11	719	2.22	7.4	5.36	11.2	4.4	9.2	5.3	85.3	0.3	92.9	0.0	0.0	7.1	12.5	53.7	31.0	2.8
2009/12	740	1.99	6.5	3.73	8.9	15	0.1	8.0	91.9	0.0	97.6	0.0	0.0	2.4	26.4	63.6	10.0	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-53 臺中港2010年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2010/01	743	2.08	6.9	4.07	9.4	9.7	0.0	12.1	87.9	0.0	96.0	0.0	0.0	4.0	24.0	50.3	25.4	0.3
2010/02	661	1.77	6.3	3.78	9.4	6.3	0.2	23.1	76.7	0.0	85.5	0.0	6.4	8.2	38.1	44.6	17.2	0.0
2010/03	741	1.78	6.7	4.58	9.8	9.8	0.0	19.4	80.6	0.0	92.6	0.0	0.0	7.4	27.7	57.9	14.3	0.1
2010/04	719	1.77	6.6	4.28	9.7	10.0	0.0	23.1	76.9	0.0	88.9	0.0	1.1	10.0	32.7	51.3	15.9	0.1
2010/05	737	1.25	5.5	2.49	7.2	23.3	0.0	30.4	69.6	0.0	77.7	0.0	4.9	17.4	57.4	41.7	0.9	0.0
2010/06	715	1.19	5.3	2.92	7.1	12.3	0.0	54.4	45.6	0.0	41.5	0.0	26.4	32.0	61.5	37.3	1.1	0.0
2010/07	742	0.95	5.1	1.83	4.5	275.0	0.1	60.5	39.4	0.0	9.2	0.0	34.5	56.3	73.6	20.9	3.6	1.9
2010/08	742	0.95	5.7	2.99	7.7	21.3	2.3	61.7	36.0	0.0	48.1	0.5	8.4	43.0	50.1	44.9	4.9	0.1
2010/09	709	1.27	6.5	5.09	9.4	8.5	2.7	43.9	53.2	0.3	50.8	0.0	8.2	41.0	35.4	50.9	13.4	0.3
2010/10	741	2.54	7.6	6.25	9.2	10.5	0.0	3.8	95.3	0.9	92.7	0.0	0.0	7.3	11.2	51.7	33.7	3.4
2010/11	717	2.40	7.3	4.34	9.3	7.6	0.0	2.9	97.1	0.0	94.0	0.0	0.0	6.0	5.6	75.6	18.8	0.0
2010/12	743	1.87	6.7	8.44	11.1	5.4	9.3	11.7	77.5	1.5	89.5	0.5	0.8	9.2	22.7	62.3	13.9	1.1

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-54 臺中港2011年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2011/01	38	1.10	6.1	1.64	7.6	18.4	0.0	31.6	68.4	0.0	50.0	21.1	23.7	5.3	50.0	44.7	5.3	0.0
2011/02	15	0.95	6.5	1.87	8.3	12.4	0.0	66.7	33.3	0.0	33.3	40.0	13.3	13.3	53.3	26.7	20.0	0.0
2011/03	12	0.54	4.9	0.73	4.2	242.8	41.7	58.3	0.0	0.0	16.7	0.0	58.3	25.0	75.0	25.0	0.0	0.0
2011/04	656	1.04	6.2	3.91	8.9	16.4	24.7	32.3	43.0	0.0	84.6	0.5	7.0	7.9	39.2	51.1	9.3	0.5
2011/05	664	0.69	5.2	2.67	7.6	212.2	25.5	62.7	11.9	0.0	53.3	26.8	16.0	3.9	69.7	23.3	6.9	0.0
2011/06	688	0.60	5.6	1.24	5.2	60.5	34.3	61.6	4.1	0.0	42.9	32.5	17.2	7.4	55.8	33.9	9.2	1.2
2011/07	706	0.71	5.9	3.61	9.0	14.7	52.0	28.0	20.0	0.0	45.2	2.8	26.2	25.8	48.7	38.0	10.1	3.3
2011/08	681	1.25	6.8	3.5	9.2	11.8	4.0	40.1	55.9	0.0	91.2	0.0	0.0	8.8	22.8	63.7	8.2	5.3
2011/09	702	2.01	7.2	4.31	10.7	1.4	0.0	12.5	87.5	0.0	97.0	0.1	0.0	2.8	14.2	66.5	16.0	3.3
2011/10	662	1.85	7.3	3.73	10.0	11.7	1.5	11.2	87.3	0.0	97.1	0.0	0.2	2.7	4.8	74.3	19.9	0.9
2011/11	96	2.30	7.4	3.44	10.1	10.7	0.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	10.4	64.6	24.0	1.0
2011/12	38	1.10	6.1	1.64	7.6	18.4	0.0	31.6	68.4	0.0	50.0	21.1	23.7	5.3	50.0	44.7	5.3	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-55 臺中港2012年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2012/01	744	2.09	7.54	4.2	9.0	18.5	0.0	2.8	97.2	0.0	99.5	0.0	0.0	0.5	2.6	63.8	33.6	0.0
2012/02	329	1.99	7.53	4.2	10.0	15.8	0	14.9	85.1	0.0	99.4	0.0	0.0	0.6	6.7	62.9	27.7	2.7
2012/03	371	1.41	6.94	3.3	8.6	21.4	14.6	26.7	58.8	0.0	96.8	0.0	0.0	3.2	17.3	62.0	20.8	0.0
2012/04	720	0.91	5.80	2.8	8.0	14.9	22.9	39.7	37.4	0.0	77.5	0.0	3.3	19.2	45.3	51.9	2.6	0.1
2012/05	744	0.99	6.09	3.1	8.9	12.9	16.0	40.7	43.3	0.0	85.1	0.0	2.6	12.4	38.7	57.5	3.8	0.0
2012/06	720	1.02	6.31	4.1	9.7	10.4	7.5	53.1	39.4	0.0	44.0	0.0	18.1	37.9	39.0	48.1	10.4	2.5
2012/07	743	0.69	5.60	3.3	7.9	201.5	38.5	52.9	8.6	0.0	4.3	53.3	21.5	20.9	56.5	38.6	3.6	1.2
2012/08	399	1.34	7.25	5.5	8.9	184.2	12.8	38.1	48.9	0.3	49.4	24.6	8.3	17.8	17.8	54.6	20.6	7.0
2012/09	714	1.26	6.79	3.8	9.6	358.1	28.2	23.9	47.9	0.0	78.9	1.7	1.7	17.8	39.6	36.6	16.1	7.7
2012/10	743	1.67	6.62	3.3	9.1	3.1	0.1	15.2	84.7	0.0	88.2	0.0	0.0	11.8	22.2	70.0	7.4	0.4
2012/11	720	1.44	6.61	3.3	8.4	12.9	6.4	18.2	75.4	0.0	90.8	0.0	0.1	9.0	25.7	65.7	8.6	0.0
2012/12	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-56 臺中港2013年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2013/01	631	2.04	7.33	4.4	9.8	5.7	0.6	10.3	89.1	0.0	78.0	0.2	0.2	21.7	15.2	51.0	31.7	2.1
2013/02	604	1.91	7.27	4.54	10.1	0.4	2.0	18.0	80.0	0.0	82.3	0.2	0.2	17.4	11.6	64.1	21.7	2.6
2013/03	681	1.39	6.36	4.15	9.4	3	13.8	27.5	58.7	0.0	80.3	2.3	2.6	14.7	32.2	53.6	13.2	1.0
2013/04	645	1.21	5.96	2.92	7.2	17.7	14.1	31.8	54.1	0.0	74.0	2.5	3.4	20.2	40.6	54.4	5.0	0.0
2013/05	691	0.83	5.56	3.27	9.4	5.2	22.3	51.4	26.3	0.0	43.6	4.1	14.2	38.2	53.4	40.7	5.9	0.0
2013/06	678	0.81	5.62	2.66	9	350.9	18.0	62.4	19.6	0.0	39.1	2.8	27.1	31.0	51.8	41.6	6.6	0.0
2013/07	669	0.65	5.58	4.58	8.2	280.4	30.5	63.7	5.8	0.0	10.6	4.0	33.3	52.0	53.2	39.2	7.6	0.0
2013/08	725	0.85	6.39	4	7.9	347.3	4.6	79.2	16.3	0.0	15.9	2.8	32.7	48.7	42.6	32.7	18.6	6.1
2013/09	695	1.61	6.90	3.73	8.1	4.5	0.1	20.3	79.6	0.0	93.7	0.3	0.3	5.8	25.2	50.6	23.7	0.4
2013/10	740	2.13	7.34	3.14	8.3	9.5	0.0	5.1	94.9	0.0	92.8	0.0	0.1	7.0	3.1	75.9	18.6	2.3
2013/11	702	1.91	6.94	3.37	9	3.9	0.0	9.4	90.6	0.0	84.5	0.0	0.0	15.5	15.8	65.2	18.9	0.0
2013/12	599	2.34	7.35	4.17	9.9	8.3	0.0	0.5	99.5	0.0	97.16	0.0	0.0	2.84	9.02	63.27	26.54	1.17

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-57 臺中港2014年示性波高、週期及波向資料統計表

年/月	觀測 筆數	H1/3 平均值 (m)	T1/3 平均值 (s)	H1/3			H1/3 <0.5m (%)	H1/3 0.5~1m (%)	H1/3 1~5m (%)	H1/3 >5m (%)	波向 N~E (%)	波向 E~S (%)	波向 S~W (%)	波向 W~N (%)	T1/3 <6sec (%)	T1/3 6~8sec (%)	T1/3 8~10sec (%)	T1/3 >10sec (%)
				最大值 (m)	週期 (sec)	波向												
2014/01	599	2.34	7.35	4.17	9.90	8.3	0.0	0.5	99.5	0.0	97.2	0.0	0.0	2.8	9.0	63.3	26.5	1.2
2014/02	518	1.99	7.03	3.82	5.00	11.2	1.2	16.2	82.6	0.0	95.0	0.4	0.0	4.6	22.2	56.2	21.4	0.2
2014/03	461	2.03	7.19	3.93	10.00	10.3	4.3	11.5	84.2	0.0	88.5	0.0	0.2	11.3	11.5	70.7	16.7	1.1
2014/04	154	0.54	6.37	1.75	6.20	11.5	59.7	20.8	19.5	0.0	65.6	0.0	8.4	26.0	9.7	89.6	0.6	0.0
2014/05	720	1.03	6.69	3.09	8.40	8.0	28.6	26.8	44.6	0.0	89.3	0.3	1.1	9.3	6.9	88.2	4.9	0.0
2014/06	744	0.57	6.58	3.57	8.90	11.1	64.5	22.2	13.3	0.0	59.4	0.1	7.3	32.9	5.9	90.2	3.9	0.0
2014/07	720	0.73	6.57	2.44	7.10	9.7	46.8	28.9	24.3	0.0	51.7	0.1	17.9	30.3	15.4	78.3	6.1	0.1
2014/08	744	0.90	5.93	3.94	9.10	14.5	18.4	56.3	25.3	0.0	27.2	0.0	14.4	58.5	52.6	29.7	13.3	4.4
2014/09	675	0.71	6.19	2.71	12.20	354.9	24.3	65.5	10.2	0.0	6.7	1.2	19.0	73.2	48.4	38.1	9.6	3.9
2014/10	682	1.09	6.59	4.12	9.90	6.1	33.9	26.1	40.0	0.0	63.2	0.0	0.0	36.8	32.8	48.7	17.0	1.5
2014/11	743	1.81	6.92	3.58	9.10	6.4	2.6	16.4	81.0	0.0	97.2	0.0	0.0	2.8	30.4	50.6	13.5	5.5
2014/12	720	1.79	6.66	4.40	10.00	10.2	3.5	13.5	83.1	0.0	97.6	0.0	0.0	2.2	29.9	60.1	10.0	0.0

資料來源：港灣技術研究中心

附表1-58 臺中港2003年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2003/01	282	473	91	502	18	21	12月19日	00:36	521	3	12月1日	05:00	-7	382	484	528
2003/02	290	478	101	509	34	19	12月17日	00:24	540	18	12月16日	05:48	5	377	475	535
2003/03	289	480	98	522	46	20	2月18日	00:00	555	19	2月17日	05:24	12	382	476	543
2003/04	294	478	106	518	51	19	3月18日	00:42	538	18	3月17日	18:42	4	372	467	534
2003/05	296	478	112	511	50	16	4月16日	23:30	549	18	4月18日	19:00	15	366	461	534
2003/06	299	477	118	504	45	14	5月15日	10:24	532	15	5月16日	17:24	16	359	459	516
2003/07	302	482	118	504	48	31	7月3日	12:36	523	14	6月15日	17:54	25	364	456	498
2003/08	316	504	122	532	62	30	8月3日	00:48	548	12	7月15日	17:48	38	382	470	510
2003/09	316	512	118	550	65	27	9月2日	11:30	573	27	9月2日	17:42	50	394	485	523
2003/10	309	501	116	541	60	26	10月2日	11:06	566	28	10月4日	06:30	11	385	481	555
2003/11	300	490	112	524	47	24	10月24日	11:00	565	25	10月25日	05:18	-12	378	477	577
2003/12	291	480	101	510	30	26	12月4日	00:18	536	24	12月2日	05:24	-13	379	480	549

潮高單位：公分；基準面：+619.37cm 水準點標高(基隆MSL)+351.25cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-59 臺中港2004年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2004/01	285	469	100	496	28	22	1月1日	23:24	518	23	1月2日	06:12	-10	369	468	528
2004/02	286	469	103	500	37	23	2月4日	00:24	527	21	2月2日	05:42	11	366	463	516
2004/03	295	477	110	519	49	21	2月1日	23:48	534	8	2月18日	05:54	27	367	470	507
2004/04	299	481	114	519	64	8	2月19日	00:36	557	9	2月20日	19:54	23	367	455	534
2004/05	307	487	123	515	63	5	3月17日	23:42	539	6	3月18日	17:54	6	364	452	533
2004/06	313	495	128	515	62	5	4月18日	00:12	547	4	4月17日	17:54	18	367	453	529
2004/07	318	503	129	531	55	2	5月15日	10:06	568	3	5月16日	18:00	15	374	476	553
2004/08	324	512	134	543	67	30	7月15日	10:54	580	30	7月15日	17:18	34	378	476	546
2004/09	317	505	128	543	77	1	7月17日	12:06	562	27	8月14日	16:12	59	377	466	503
2004/10	313	507	122	543	68	16	9月3日	12:12	563	16	9月3日	05:42	45	385	475	518
2004/11	304	489	120	517	53	13	10月2日	11:12	551	14	10月3日	05:30	19	369	464	532
2004/12	297	481	115	507	39	15	11月4日	00:30	534	13	11月2日	05:06	-5	366	468	539

潮高單位：公分；基準面相對KP：-268.12cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-60 臺中港2005年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2005/01	-2	181	-185	211	-255	14 日	12 月 5 日	01:18	240	12 日	12 月 3 日	06:06	-305	366	466	545
2005/02	-1	186	-187	224	-254	9 日	1 月 1 日	23:30	252	9 日	1 月 1 日	05:06	-295	373	479	547
2005/03	-6	183	-195	227	-246	11 日	2 月 2 日	23:36	265	10 日	2 月 1 日	05:00	-280	378	473	545
2005/04	10	189	-173	234	-230	8 日	2 月 30 日	23:06	252	26 日	3 月 18 日	18:24	-254	362	464	506
2005/05	20	195	-161	228	-230	25 日	4 月 18 日	11:42	241	26 日	4 月 19 日	18:48	-265	356	458	506
2005/06	24	199	-159	219	-231	24 日	5 月 18 日	12:24	238	23 日	5 月 17 日	18:00	-271	358	449	509
2005/07	24	203	-158	232	-237	23 日	6 月 18 日	12:06	267	22 日	6 月 17 日	17:36	-289	361	469	556
2005/08	29	214	-159	251	-232	21 日	7 月 17 日	12:00	291	20 日	7 月 16 日	17:42	-290	373	483	581
2005/09	31	218	-158	259	-219	19 日	8 月 16 日	11:36	282	18 日	8 月 15 日	17:12	-255	376	478	537
2005/10	18	207	-170	250	-221	18 日	9 月 16 日	11:24	274	18 日	9 月 16 日	05:12	-246	377	471	520
2005/11	16	200	-170	232	-235	14 日	10 月 13 日	21:54	250	4 日	10 月 3 日	05:54	-255	370	467	505
2005/12	-3	185	-185	213	-256	2 日	11 月 2 日	11:30	250	4 日	11 月 4 日	06:30	-278	370	469	528

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-61 臺中港2006年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2006/01	3	193	-188	229	-266	30 日	1 月 2 日	23:48	264	2 日	12 月 3 日	06:18	-297	381	495	561
2006/02	6	189	-180	223	-243	2 日	1 月 5 日	01:18	256	1 日	1 月 4 日	06:36	-287	370	466	543
2006/03	4	198	-191	238	-246	2 日	2 月 3 日	00:18	269	1 日	2 月 2 日	06:00	-297	389	484	566
2006/04	18	199	-169	238	-225	27 日	3 月 30 日	22:48	264	29 日	4 月 2 日	18:00	-260	368	463	524
2006/05	20	206	-166	228	-235	26 日	4 月 29 日	22:48	247	28 日	5 月 2 日	17:54	-265	372	462	513
2006/06	27	210	-160	230	-229	11 日	5 月 16 日	23:18	244	13 日	5 月 18 日	18:12	-257	371	459	501
2006/07	31	217	-159	252	-232	14 日	6 月 19 日	01:24	298	12 日	6 月 17 日	18:00	-257	377	484	555
2006/08	32	218	-156	251	-221	11 日	7 月 18 日	12:06	289	10 日	7 月 17 日	17:36	-267	374	472	556
2006/09	27	213	-158	276	-221	10 日	7 月 18 日	12:36	297	8 日	7 月 16 日	17:24	-251	371	497	548
2006/10	12	196	-173	242	-230	7 日	8 月 16 日	10:42	284	9 日	8 月 18 日	06:06	-269	369	471	552
2006/11	6	192	-177	228	-251	6 日	9 月 16 日	11:18	258	8 日	9 月 18 日	06:24	-290	369	478	548
2006/12	-4	183	-192	210	-266	5 日	10 月 15 日	11:12	225	6 日	10 月 16 日	05:36	-292	374	476	517

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-62 臺中港2007年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2007/01	-16	168	-201	203	-272	20 日	12 月 2 日	23:54	227	20 日	12 月 2 日	05:36	-290	369	475	517
2007/02	-11	171	-195	210	-268	20 日	1 月 3 日	00:12	251	19 日	1 月 2 日	06:00	-284	367	478	535
2007/03	1	185	-188	228	-247	19 日	2 月 1 日	23:24	265	21 日	2 月 3 日	18:42	-278	373	475	543
2007/04	-1	184	-189	225	-242	17 日	3 月 1 日	23:18	274	19 日	3 月 3 日	18:12	-300	373	467	575
2007/05	5	182	-173	206	-242	19 日	4 月 3 日	00:48	231	17 日	4 月 1 日	17:24	-277	356	448	508
2007/06	12	183	-166	202	-236	15 日	5 月 1 日	23:48	227	15 日	5 月 1 日	17:12	-270	349	438	496
2007/07	14	192	-171	215	-241	14 日	6 月 1 日	23:24	240	15 日	6 月 2 日	17:54	-271	363	456	511
2007/08	24	212	-169	241	-230	30 日	7 月 18 日	12:06	263	29 日	7 月 17 日	17:48	-253	381	471	516
2007/09	21	209	-170	246	-224	29 日	8 月 19 日	12:30	273	30 日	8 月 20 日	06:48	-259	379	470	532
2007/10	9	200	-183	238	-242	27 日	9 月 17 日	11:18	274	28 日	9 月 18 日	05:48	-285	383	480	559
2007/11	1	190	-183	228	-241	25 日	10 月 16 日	11:12	261	26 日	10 月 17 日	05:36	-298	374	468	559
2007/12	-1	190	-196	233	-266	27 日	11 月 18 日	00:30	238	26 日	11 月 17 日	06:12	-302	386	498	540

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-63 臺中港2008年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2008/01	-6	182	-196	213	-268	12 日	12 月 5 日	13:42	237	23 日	12 月 16 日	05:24	-299	378	480	536
2008/02	-14	173	-201	216	-257	23 日	1 月 17 日	12:42	240	21 日	1 月 15 日	05:00	-286	375	473	526
2008/03	-3	180	-192	226	-245	10 日	2 月 3 日	00:18	248	9 日	2 月 2 日	06:00	-275	371	471	522
2008/04	8	190	-182	229	-239	8 日	3 月 3 日	00:06	255	9 日	3 月 4 日	19:12	-276	372	468	531
2008/05	18	200	-170	226	-228	7 日	4 月 3 日	00:00	253	6 日	4 月 2 日	17:24	-292	370	454	545
2008/06	18	203	-172	219	-225	5 日	5 月 2 日	11:36	252	4 日	5 月 1 日	17:24	-283	374	444	535
2008/07	19	194	-168	165	-212	5 日	6 月 3 日	12:30	245	4 日	6 月 2 日	18:06	-287	362	377	532
2008/08	20	213	-174	240	-238	31 日	8 月 1 日	11:06	265	1 日	7 月 1 日	17:00	-279	387	478	544
2008/09	21	212	-172	257	-221	1 日	8 月 2 日	12:00	276	19 日	8 月 20 日	07:12	-242	384	477	517
2008/10	10	204	-184	236	-236	17 日	9 月 19 日	12:18	266	18 日	9 月 20 日	06:42	-269	388	471	535
2008/11	5	191	-182	249	-259	14 日	10 月 17 日	11:18	270	15 日	10 月 18 日	05:48	-299	373	508	568
2008/12	-5	177	-186	—	—	17 日	11 月 20 日	14:30	216	31 日	12 月 5 日	07:12	-254	362	—	470

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-64 臺中港2009年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2009/01	-10	179	-199	205	-250	12 日	12 月 17 日	11:54	249	13 日	12 月 18 日	06:24	-319	379	455	568
2009/02	-5	184	-194	229	-256	10 日	1 月 16 日	23:48	254	11 日	1 月 17 日	06:12	-295	378	486	549
2009/03	-6	181	-195	223	-256	10 日	2 月 14 日	22:42	242	11 日	2 月 15 日	05:00	-276	377	478	518
2009/04	0	189	-188	220	-253	9 日	3 月 14 日	23:12	238	27 日	4 月 3 日	18:36	-286	377	473	523
2009/05	9	191	-176	218	-245	26 日	5 月 3 日	12:0	242	27 日	5 月 4 日	19:12	-277	367	463	519
2009/06	18	201	-172	227	-244	25 日	5 月 3 日	12:30	266	24 日	5 月 2 日	18:18	-298	373	471	564
2009/07	19	204	-176	229	-250	25 日	6 月 4 日	13:12	264	23 日	6 月 2 日	18:06	-303	380	479	567
2009/08	31	218	-145	259	-202	21 日	7 月 2 日	12:0	277	20 日	7 月 1 日	17:30	-248	363	461	525
2009/09	37	230	-152	261	-200	19 日	8 月 1 日	11:0	300	17 日	7 月 29 日	15:54	-232	382	461	532
2009/10	26	219	-170	254	-214	18 日	9 月 1 日	10:54	277	19 日	9 月 2 日	05:24	-254	389	468	531
2009/11	18	209	-175	236	-226	5 日	9 月 19 日	12:36	265	5 日	9 月 19 日	06:06	-265	384	462	530
2009/12	9	203	-186	225	-252	5 日	10 月 19 日	0:12	253	5 日	10 月 19 日	06:30	-289	389	477	541

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-65 臺中港2010年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2010/01	0	194	-193	224	-266	31 日	12 月 17 日	23:48	268	2 日	11 月 18 日	5:48	-307	387	490	575
2010/02	8	197	-184	235	-244	2 日	12 月 19 日	0:42	273	1 日	12 月 18 日	6:18	-292	381	479	565
2010/03	17	205	-180	243	-224	1 日	1 月 16 日	23:36	289	1 日	1 月 16 日	05:00	-274	386	468	563
2010/04	11	196	-179	234	-240	2 日	2 月 18 日	01:06	257	30 日	3 月 17 日	18:12	-256	375	474	513
2010/05	18	199	-163	226	-223	28 日	4 月 15 日	23:48	240	15 日	4 月 2 日	17:48	-246	362	449	486
2010/06	20	199	-163	219	-225	14 日	5 月 3 日	12:06	236	15 日	5 月 4 日	19:24	-254	362	444	490
2010/07	28	211	-158	239	-220	15 日	6 月 4 日	13:30	271	13 日	6 月 2 日	18:18	-261	369	458	531
2010/08	35	216	-154	258	-208	11 日	7 月 2 日	11:42	283	11 日	7 月 2 日	18:12	-265	370	466	547
2010/09	36	218	-153	259	-201	9 日	8 月 2 日	11:18	305	7 日	7 月 29 日	16:18	-230	371	460	535
2010/10	25	211	-157	257	-205	8 日	9 月 1 日	11:06	285	9 日	9 月 2 日	5:42	-249	368	462	534
2010/11	17	215	-180	248	-239	6 日	10 月 1 日	10:54	286	8 日	10 月 3 日	06:00	-279	395	487	565
2010/12	13	199	-183	235	-255	24 日	11 月 19 日	13:12	268	8 日	11 月 3 日	6:24	-279	382	490	547

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-66 臺中港2011年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2011/01	-1	185	-189	217	-246	23	12月20日	13:24	253	22	12月19日	6:30	-283	373	463	536
2011/02	2	194	-193	232	-259	21	1月19日	0:36	268	20	1月18日	6:12	-290	387	491	558
2011/03	0	191	-192	239	-246	20	2月16日	23:36	278	22	2月18日	18:48	-277	384	485	555
2011/04	8	197	-184	243	-242	18	3月16日	23:24	273	19	3月17日	17:48	-288	380	485	561
2011/05	16	202	-172	226	-234	17	4月15日	10:36	246	17	4月15日	17:00	-272	374	459	517
2011/06	24	210	-165	228	-230	17	5月16日	11:48	245	16	5月15日	17:30	-254	374	458	499
2011/07	31	220	-163	247	-228	31	7月1日	11:12	269	31	7月1日	17:42	-244	383	475	513
2011/08	35	229	-162	269	-215	30	8月2日	11:30	312	1	7月2日	18:18	-245	390	484	557
2011/09	34	231	-166	270	-209	28	9月2日	11:12	312	30	9月4日	6:48	-253	397	479	565
2011/10	22	224	-180	264	-233	27	10月1日	11:00	296	29	10月3日	6:12	-280	404	497	576
2011/11	18	214	-181	241	-247	26	11月2日	11:36	268	27	11月3日	6:06	-295	394	488	563
2011/12	8	196	-181	217	-240	27	12月3日	12:54	236	25	12月1日	5:06	-287	377	457	524

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-67 臺中港2012年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2012/01	-1	193	-191	218	-255	14	12月21日	14:18	237	11	12月18日	6:00	-282	384	473	519
2012/02	6	197	185	233	-223	23	2月2日	12:00	262	11	1月20日	7:24	-262	382	456	524
2012/03	19	213	-177	262	-238	8	2月15日	23:12	287	10	2月17日	18:36	-260	389	499	547
2012/04	20	208	-171	242	-221	7	3月17日	23:48	281	9	3月19日	19:12	-276	379	463	557
2012/05	29	217	-167	250	-226	6	4月16日	23:20	268	7	4月17日	18:00	-276	384	476	544
2012/06	33	229	-175	250	-232	4	4月15日	23:12	272	5	4月16日	17:48	-268	404	482	539
2012/07	33	224	-166	252	-227	31	6月13日	22:00	270	4	5月16日	17:36	-269	390	479	538
2012/08	39	238	-161	276	-212	2	6月15日	10:48	321	3	6月16日	18:00	-237	398	489	558
2012/09	36	226	-152	268	-193	17	8月2日	11:48	303	19	8月4日	7:00	-236	377	461	540
2012/10	28	223	-167	260	-210	16	9月2日	11:18	294	19	9月5日	7:00	-256	390	470	550
2012/11	16	213	-175	239	-242	14	10月1日	23:12	272	16	10月3日	6:06	-278	389	480	550
2012/12	11	202	-180	231	-237	16	11月4日	0:30	266	15	11月3日	6:00	-294	382	468	560

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-68 臺中港2013年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2013/01	4	201	-192	238	-260	12	12月1日	23:24	279	12	12月1日	5:00	-297	393	498	576
2013/02	8	196	-188	247	-233	12	1月3日	0:00	263	10	1月1日	4:42	-281	384	479	544
2013/03	12	198	-178	244	-231	10	1月29日	22:24	261	12	2月1日	5:18	-252	376	475	513
2013/04	*	*	*	*	*		月				月			*	*	*
2013/05	25	210	-168	236	-224	26	4月17日	11:30	259	27	4月18日	18:54	-270	378	460	529
2013/06	23	212	-167	242	-216	24	5月17日	11:12	267	25	5月18日	18:30	-294	379	457	562
2013/07	25	211	-169	237	-230	23	6月16日	23:54	272	23	6月16日	17:30	-273	380	467	545
2013/08	36	227	-155	264	-198	23	7月17日	12:12	297	20	7月14日	16:18	-237	382	462	533
2013/09	31	222	-149	273	-176	22	8月18日	12:36	307	17	8月13日	15:18	-220	371	449	527
2013/10	25	232	-182	262	-219	8	9月4日	0:18	295	8	9月4日	6:48	-242	415	481	537
2013/11	5	204	-195	240	-239	3	10月1日	10:36	274	5	10月3日	5:42	-263	399	479	536
2013/12	*	*	*	*	*		月				月			*	*	*

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局。

附表1-69 臺中港2014年潮位資料統計表

年/月	平均潮位 MWL	平均 高潮位 MHWL	平均 低潮位 MLWL	大潮平均 高潮位 HWOSt	大潮平均 低潮位 LWOSt	最高高潮位 HHWL				最低低潮位 LLWL				平均潮差 MR	大潮平均 潮差 STR	最大潮差 MTR
						發生日	農曆日期	時間	潮高	發生日	農曆日期	時間	潮高			
2014/01	-1	180	-189	207	-252	29	12月29日	21:48	238	31	1月1日	5:06	-287	369	459	525
2014/02	7	202	-190	239	-246	3	1月4日	0:54	274	1	1月2日	5:48	-294	392	485	569
2014/03	5	206	-199	246	-240	31	3月1日	11:06	281	1	2月1日	4:48	-275	406	486	556
2014/04	15	206	-181	243	-233	2	3月3日	12:30	260	2	3月3日	19:06	-255	387	475	515
2014/05	20	219	-181	229	-225	15	4月17日	23:42	248	16	4月18日	18:12	-253	400	454	502
2014/06	25	211	-155	232	-186	14	5月17日	11:30	263	17	5月20日	20:24	-244	367	418	507
2014/07	29	213	-155		-203	16	6月20日	1:36	264	15	6月19日	19:18	-263	368	-	526
2014/08	27	220	-156	256	-229	12	7月17日	11:48	299	11	7月16日	17:18	-266	376	486	564
2014/09	29	218	-170	260	-215	11	8月18日	12:24	294	9	8月16日	17:06	-248	388	475	542
2014/10	26	243	-178	287	-227	9	9月16日	11:06	316	10	9月17日	5:48	-243	421	514	558
2014/11	13	232	-200	250	-234	7	9月15日	10:48	272	8	9月16日	5:18	-263	431	484	535
2014/12	0	195	-198	234	-242	25	11月4日	13:24	257	24	11月3日	6:24	-302	393	476	559

潮高單位：公分；基準面相對KP：0cm。資料來源：中央氣象局

附錄二

模式介紹

2.1 波流場數值模式-NearCoM

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

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

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

本研究使用的 SHORECIRC 模式為 Dr. F.Y. Shi 所提供的新版模式，該模式使用結合有限體積及有限差分的 TVD 法(Toro, 2009)。完全

非線性 Boussinesq 模式以 TVD 法求解，在計算碎波與海岸線變遷問題上，已證明 TVD 是一個穩定及有效率的數值方法(Shi et al., 2011a; 2011b; Tehranirad et al., 2011; Kirby et al., 2013)。使用 TVD 法求解 Boussinesq 方程及淺水方程式亦皆有很好的表現(Tonelli and Petti, 2009; Roeber et al., 2010; Shiach and Mingham, 2009; Erduran et al., 2005)。

2.1.1 SHORECIRC 方程式

SHORECIRC 是擬三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu and Svendsen (1999)將瞬時水平速度設為為紊流項 u'^α 、波浪項 u_w^α 、水深及短波平均速度項 u^α 、以及短波平均速度的垂直變化 u_1^α 所組成，如式(2.1.1)：

$$u_{ins}^\alpha = u'^\alpha + u_w^\alpha + u^\alpha + u_1^\alpha \quad (2.1.1)$$

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

$$u^\alpha = \frac{1}{h} \int_h^\zeta u_{ins}^\alpha dz \quad (2.1.2)$$

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

$$\int_{-h}^\eta u_1^\alpha dz = -Q_w^\alpha \quad (2.1.3)$$

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

SHORECIRC 方程式在逆變形式下可寫成：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} [J u^\alpha H] = 0 \quad (2.1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\alpha H}{\partial t} + (u^\alpha u^\beta H)_{,\beta} + f^\alpha + \frac{1}{\rho} (S^{\alpha\beta})_{,\beta} + g H g^{\alpha\beta} \frac{\partial \eta}{\partial x_\beta} + \frac{\tau_b^\alpha}{\rho} - \frac{\tau_s^\alpha}{\rho} \\ - (H \tau^{\alpha\beta})_{,\beta} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

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

$$\tau^{\alpha\beta} = \nu_t T^{\alpha\beta} \quad (2.1.6)$$

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

$$\nu_t = C_1 \kappa \sqrt{\frac{f_{cw}}{2} u_0 h} + M h \left(\frac{D}{\rho}\right)^{1/3} + \nu_{t0} + \nu_s \quad (2.1.7)$$

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

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

$$\tau_s^\alpha = f_a \rho_a |\mathbf{W}| W_\alpha \quad (2.1.8)$$

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

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

$$\tau_b^\alpha = f_{cw} \rho u_0 (\beta_1 u_b^\alpha + \beta_2 u_w^\alpha). \quad (2.1.9)$$

其中 u_w 為在底床處的短波粒子速度振幅， f_{cw} 為摩擦係數， u_b^α 為底

床流速，可從方程式中垂直項的理論解獲得， β_1 和 β_2 是流和波動的權重係數(Svendsen and Putrevu, 1990)，並且使用線性波理論來評估。ROT在式(2.1.5)代表與大氣壓相關的剩餘項和三維頻散(詳細請參閱 Shi et al., 2003)。

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

速度向量的逆變項可表示如下：

$$u^\alpha = u_\beta L_\beta^\alpha \quad (2.1.10)$$

其中 u_β 是速度向量的笛卡爾項並且

$$L_\beta^\alpha = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x_\beta} \quad (2.1.11)$$

在直角坐標中的導數可(2.1.12)式轉換至曲線坐標

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} = L_\alpha^\beta \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \quad (2.1.12)$$

SHORECIRC 方程式的守恆形式如下，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial J P^\alpha}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (2.1.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H u_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \left[J P^\beta u_\alpha + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) J L_\alpha^\beta \right] + f_\alpha - g \eta \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} (h J L_\alpha^\beta) \\ + \frac{1}{\rho} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (S_{\alpha\beta} J L_\beta^\gamma) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (\tau_{\alpha\beta} J H L_\beta^\gamma) + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (2.1.14)$$

其中 $P^\alpha = H u^\alpha$ ，表示體積通量的逆變項； f_α 代表科氏力的笛卡爾項，如 $(-fHv, fHu)$ ，其中 (u, v) 代表直角坐標中的速度； $S_{\alpha\gamma}$ 代表輻射應力的笛卡爾項； τ_α^b 和 τ_α^s 是底床應力和風應力的笛卡爾項，注意(2.1.14)式的推導使用度量公制法(metric identity law, Thompson et al., 1985)，

如：

$$\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (JL_\beta^\alpha) \equiv 0 \quad (2.1.15)$$

$$-gHJ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} \left[\frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\beta^\alpha \right] + g\eta \frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (hJL_\beta^\alpha) \quad (2.1.16)$$

使用(2.1.13)式和(2.1.14)式會比使用(2.1.3)式和(2.1.4)式有以下優點：(1)他們是守恆形式可用於混合數值方法中。(2)不同於(2.1.5)中的逆變項，所有外力項在直角座標中將恢復為向量形式。(3)輻射應力項 $S_{\alpha\beta}$ 使用直角坐標中的原始形式，因此二階張量不需要轉換。缺點是(2.1.14)式包含笛卡爾項 u_α 和逆變項 P^α ，然而在 SHORECIRC 使用的混合數值方法，為方便求解這二個變數，採用顯式法，而非隱式法(Shi et al., 2007)。

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

$$\tau_{\alpha\beta} = \nu_t \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (2.1.17)$$

使用(2.1.12)式可求得在直角坐標中的導數。

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

$$\frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial z} \right) = F_\alpha \quad (2.1.18)$$

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

$$F_\alpha = \frac{1}{\rho h} f_{w\alpha} - f_\alpha^{lrad} + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (2.1.19)$$

其中 f_α^{lrad} 代表局部輻射應力如 Putrevu and Svendsen (1999)所定

義。在離岸區域無波力時，(2.1.19)式減化為

$$F^\alpha = \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (2.1.20)$$

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

$$u_\alpha^b = u_\alpha + u_{1\alpha}(z = -h) \quad (2.1.21)$$

2.1.2 SWAN方程式

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial(JC_g^\alpha)}{\partial \xi_\alpha} + \frac{\partial(C_{g\sigma}N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_{g\theta}N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.1.22)$$

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

$$C_g^\alpha = C_{g\beta} L_\beta^\alpha \quad (2.1.23)$$

其中，在矩形直角坐標 $C_{g\beta} = (C_{gx}, C_{gy})$ ，為了使其符合環流方程式，(2.1.22)式是張量不變形式，如 Booij et al. (1997)中擴展的數值形式。 $C_{g\sigma}$ 和 $C_{g\theta}$ 分別代表在 σ 和 θ 能量傳遞速度， S 表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數， N 是波浪作用力，其定義如下：

$$N = E(\xi^\alpha, \sigma, \theta, t) / \sigma \quad (2.1.24)$$

式中 E 是波浪能量密度。

至於流對波變形的影響詳述如下：

1. 群波速度(包含流的項)

$$C_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_{\alpha}}{|\mathbf{k}|^2} + u_{E\alpha} \quad (2.1.25)$$

其中 k_{α} 或 $\mathbf{k}$ 代表波速， d 是短波平均下之水深，而 $d = h + \eta$ 。

$u_{E\alpha} = u_a - Q_{w\alpha} / H$ 為回流項，或 Eulerian 平均速度。

2. 相對頻率的改變

$$C_{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u}_E \cdot \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial s} \quad (2.1.26)$$

3. 流導致之波浪折射

$$C_{\theta} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial m} \right) \quad (2.1.27)$$

其中 s 是在方向 θ 的空間坐標， m 是 s 的法線坐標

2.2 波場與結構物作用之數值模式-COBRAS

由 NearCoM 模式模擬出臺中港週邊波、流場後，再依其結果，選定具代表性的防波堤斷面進行結構物與波浪作用的數值模擬，計算結構物受波浪交互作用影響下水位的變化，結構物受波浪作用的壓力，本研究預計使用 COBRAS (Cornell Breaking wave And Structure) 模式。此數值模式原為美國 Los Alamos 國家實驗用以計算二維不可壓縮的流體之數值模式「RIPPLE」(Kothe et al., 1991)，由 Liu and Lin (1997) 將其修改以計算碎波相關問題，後來作波浪與孔隙介質交互作用問題 (Liu et al., 1999) 和計算波浪與近岸複合結構物交互作用問題 (Hsu et al., 2002)。此數值模型以 Fortran 程式語言撰寫，應用有限差分法 (Finite Difference Method) 計算二維 Reynolds Averaged Stokes (RANS) 方程式，結合非線性 $k-\varepsilon$ 紊流模式用以求解流場中的紊流動能 k 與紊流消散率

ε ，並利用流體體積法(Volume of Fluid, VOF)描述自由液面，可計算壓力，水位變化，水平和垂直方向的流速和越波量等資訊。

2.2.1 控制方程式

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2.2)$$

式(2.2.1)、(2.2.2)為 Navier-Stokes 方程式(NSE)。其中 $i, j=1, 2$ 分別表示為二維水平方向與垂直方向。 u_i 與 g_i 表示為 i 方向上的速度分量與重力加速度分量。 ρ 、 p 、 t 分別表示為密度、壓力、時間。 τ_{ij} 為牛頓流體假設下的分子剪應力張量可表示為：

$$\tau_{ij} = 2\mu\sigma_{ij} \quad (2.2.3)$$

上式(2.2.3)中 μ 表示為動力黏滯系數以及 σ_{ij} 為剪應變率張量可以進一步表示如下：

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2.4)$$

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

$$u_i = \langle u_i \rangle + u'_i \quad (2.2.5)$$

$$p_i = \langle p_i \rangle + p'_i \quad (2.2.6)$$

上兩式(2.2.5)、(2.2.6)中「 $\langle \rangle$ 」表示對物理量取時間平均，上標「 $'$ 」表示為物理量的瞬時擾動量。若瞬時擾動物理量為隨機且滿足高斯常態分佈則可以將瞬時擾動表示如下：

$$\langle u'_i \rangle = \langle p'_i \rangle \quad (2.2.7)$$

將上面兩式(2.2.5)、(2.2.6)代入式(2.2.1)、(2.2.2)中，並取時間平均，可以得到時間平均條件下的流場控制方程式：

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.8)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (2.2.9)$$

可將上式(2.2.9)同乘以 ρ 改寫如下：

$$\frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \quad (2.2.10)$$

而式(2.2.8)與式(2.2.9)或(2.2.10)即為 RANS 方程式。其中式(2.2.10)中 $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ 項為雷諾應力項(Reynolds stress)的張量式，其物理意義為受到對流作用的影響下而產生的動量交換量，用以表示紊流的影響。

2.2.2 k-ε 紊流閉合模式

由控制方程式中式(2.2.1)、(2.2.2)的NSE 比較取時間平均之式(2.2.8)與式(2.2.10)的 RANS 方程式，增加了雷諾應力項 $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ ，由於雷諾應力項的增加使得 RANS 方程式中帶求解的變數多於方程式的數目，即為超靜定系統。導致 RANS 方程式無法閉合求解。因此為了求解則

需要額外加入本構方程式(constitutive equation)來解決問題，此種求解方式稱為模式化。

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

一開始假設為線性及等向性(isotropic)之渦流動滯度(eddy viscosity)的閉合模式可將式(2.2.10)中的雷諾應力張量(Reynolds stress)表示如下：

$$\langle u'_i u'_j \rangle = -2\nu_t \langle \sigma_{ij} \rangle + \frac{2}{3} \kappa \sigma_{ij} \quad (2.2.11)$$

上式(2.2.11)中 σ_{ij} 為 Kronecker delta 函數，而 ν_t 為渦動滯度可以表示如下：

$$\nu_t = C_d \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.2.12)$$

上式(2.2.12)中的 C_d 為經驗參數，根據 Rodi (1980) 建議 $C_d = 0.09$ ，而上式(2.2.12)中紊流動能 k 與紊流消散率 ε 可定義如下：

$$k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle \quad (2.2.13)$$

$$\varepsilon = \nu \left\langle \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle \quad (2.2.14)$$

式(2.2.14)中 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 為分子運動黏滯係數(molecular kinematic viscosity)。

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

$$\rho \langle u'_i u'_j \rangle = -C_d \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij} - \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[\begin{aligned} &C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \\ &+ C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \\ &+ C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) \end{aligned} \right] \quad (2.2.15)$$

上式(2.2.15)中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_d 是經驗參數，其中 C_1 、 C_2 、 C_3 可由在 Couette shear flow 實驗中所量測而得的，根據 Lin and Liu (1998)三個參數分別為 $C_1 = 0.0054$ 、 $C_2 = -0.0171$ 、 $C_3 = 0.0027$ 。當 $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ 時，則上式(2.2.15)可還原成線性且等向性之模型如式(2.2.12)，Rodi (1980)建議 $C_d = 0.09$ 。

然而引用以上常數經驗參數，在一些較極端的條件下，這經驗參數的適用範圍將受到限制，例如 $(k/\varepsilon) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right) \rightarrow \infty$ 時，依照式(2.2.15)和 $C_d = 0.09$ 的條件下紊流動能 i 方向之 $\langle u'_i u'_i \rangle$ 可能為負值，為了滿足物理上無負值紊流動能的限制，應用上 Shih et al. (1996)給定 C_d 為 $(k/\varepsilon) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \right)$ 的反函數，Lin and Liu(1998)同樣將 C_1 、 C_2 、 C_3 給定為 $(k/\varepsilon) \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right)^2$ 的反函數，提出參數數值修正如下：

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + S_{\max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + D_{\max}^2} \\ C_2 &= \frac{1}{58.5 + D_{\max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + D_{\max}^2} \end{aligned} \quad (2.2.16)$$

上式參數之修正，能確保紊流場中的紊流速度不被忽略且滿足雷諾應力項。上式(2.2.16)中的 $S_{\max}$ 與 $D_{\max}$ 分別表示如下：

$$S_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right| \right] = 0 \quad (2.2.17)$$

$$D_{\max} = \frac{k}{\varepsilon} \max \left[\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \right] = 0 \quad (2.2.18)$$

上兩式(2.2.17)、(2.2.18) $S_{\max}$ 與 $D_{\max}$ 若趨近於零時，則經驗參數便可以還原為前面所敘述 $C_d = 0.09$ 、 $C_1 = 0.0054$ 、 $C_2 = -0.0171$ 、 $C_3 = 0.0027$ 之經驗參數。

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

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (2.2.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left[\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \\ &\quad - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2.2.20)$$

式(2.2.19)與式(2.2.20)中 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 為實驗校驗所得到的經驗參數。由 Rodi (1980)建議四個經驗參數分別為 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$

由紊流動能 k 控制方程中，可以發現雷諾應力張量只以紊流生成項 $-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u'_i \rangle}{\partial x_j}$ 的形式出現。而紊流動能 k 的控制方程(2.2.19)中各項物理意義表示如下：

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

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

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

紊流動能消散項: $-\varepsilon$

紊流消散 ε 控制方程(2.2.20)中各項物理意義表示如下:

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

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

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

2.3.2 透水性區域之控制流體方程式

將孔隙流體之對流慣性力項及黏滯力項加入Solitt and Cross (1972)所推導出的孔隙介質流體運動方程式如式(2.3.1)、(2.3.2):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3.1)$$

$$\frac{1+C_A}{n} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{U_j}{n^2} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.3.2)$$

其中 U 為流速， n 為孔隙率， C_A 是附加質量係數，Van Gent (1995)提出以下形式(2.3.3):

$$C_A = \gamma_p \frac{1-n}{n} \quad (2.3.3)$$

其中 $\gamma_p=0.34$ ，當 $n=1$ 時，就回復為RANS的控制方程式。式(2.3.2)右邊第三項可表示如下(2.3.4)：

$$\frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} = -a_p U_i - b_p \sqrt{U_j U_j} U_i \quad (2.3.4)$$

式(2.3.4)右邊第一項代表摩擦項，由黏滯力所造成；右邊第二項，是由於紊流效應所造成。當在低雷諾數時，由第一項所主導、高雷諾數時則由第二項所主導。

Liu et al. (1999) 採用 Van Gent (1995)的經驗式處理 a_p 和 b_p 如下(2.3.5)、(2.3.6)：

$$a_p = a \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{D_{50}^2} \quad (2.3.5)$$

$$b_p = \beta_p \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{D_{50}} \quad (2.3.6)$$

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

附錄三

各種波浪條件下之滑動安全係數與傾倒安全係數

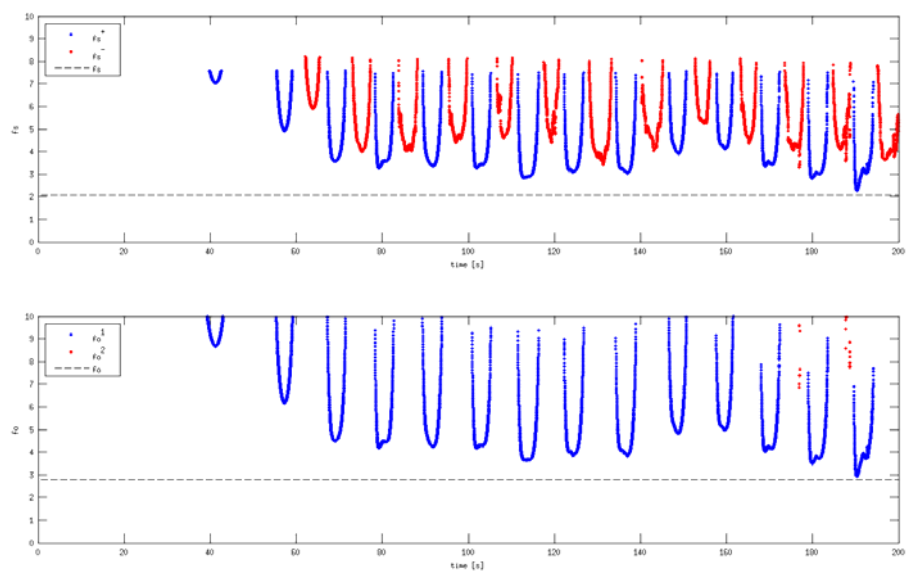


圖3.1 case1滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

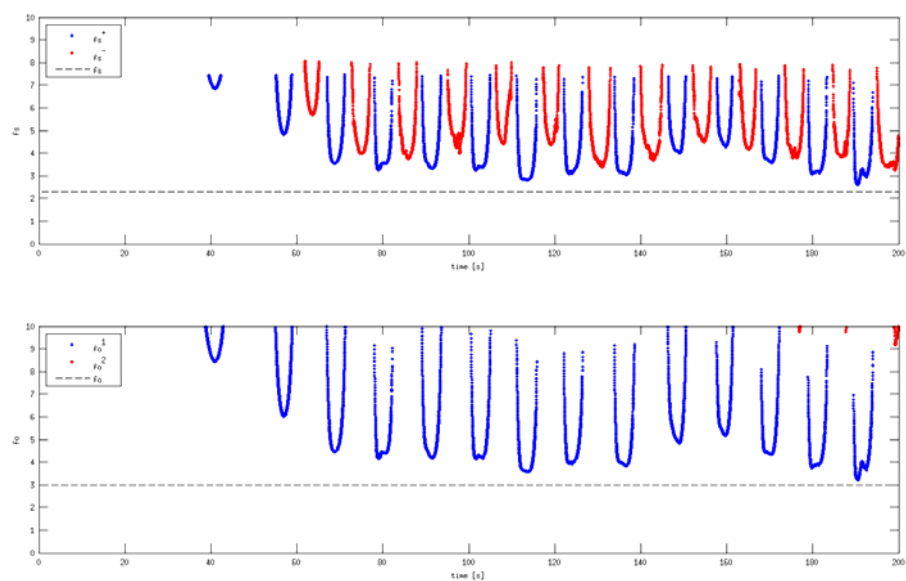


圖3.2 case2滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

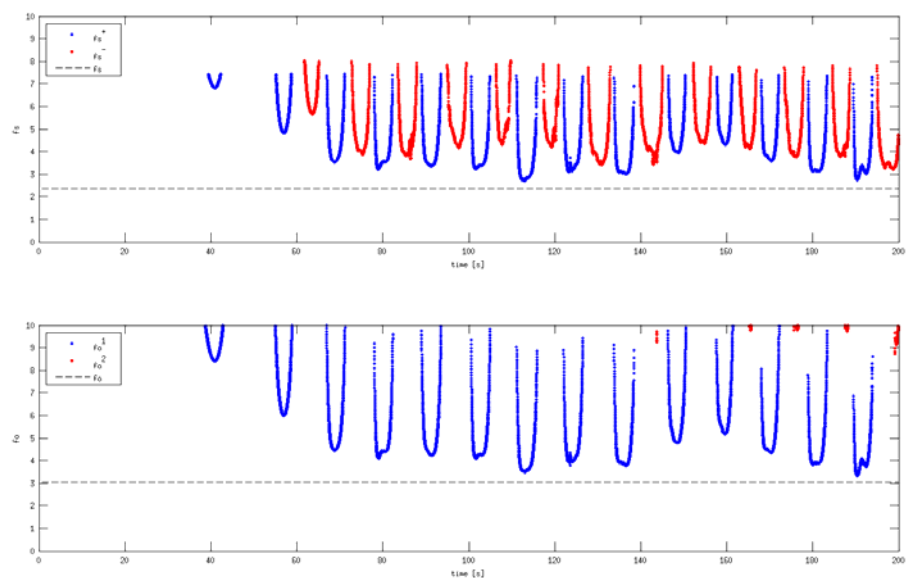


圖3.3 case3滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

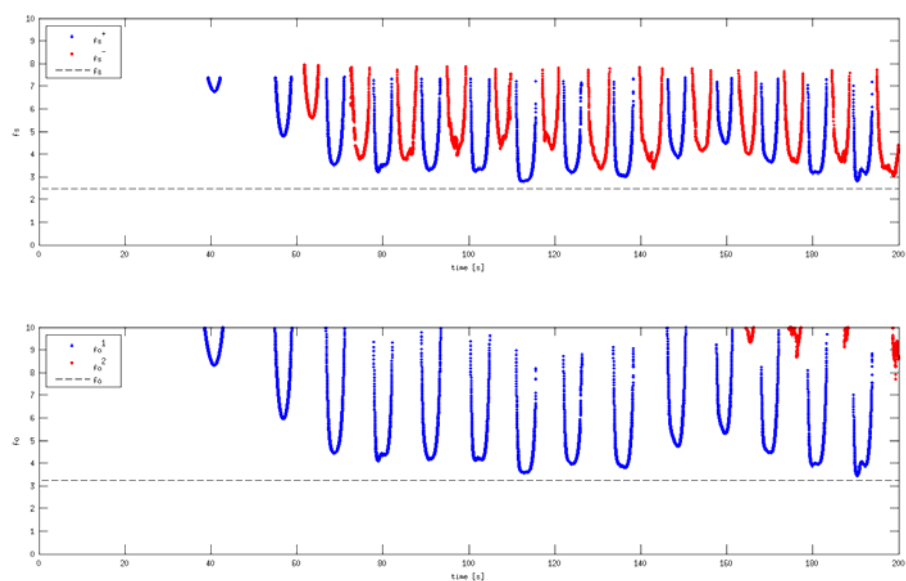


圖3.4 case4滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

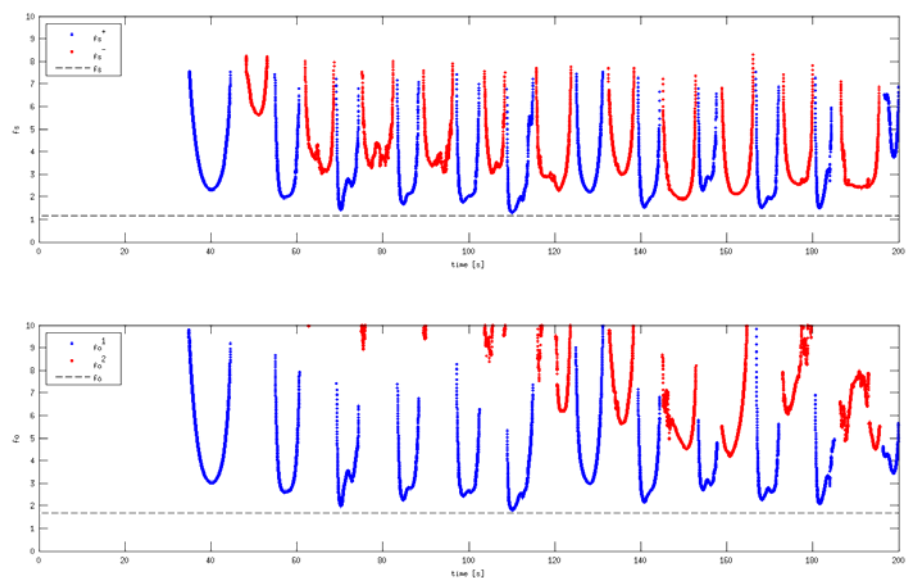


圖3.5 case5滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

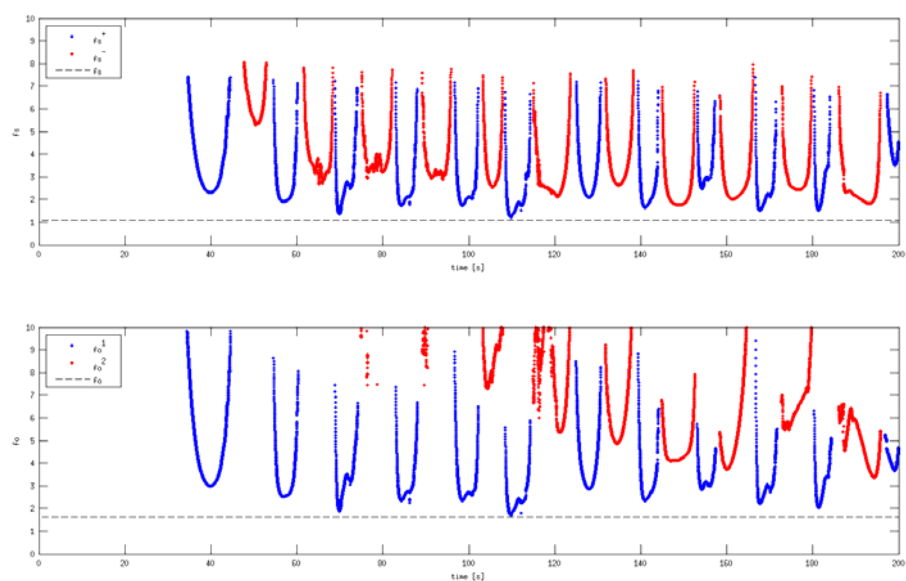


圖3.6 case6滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

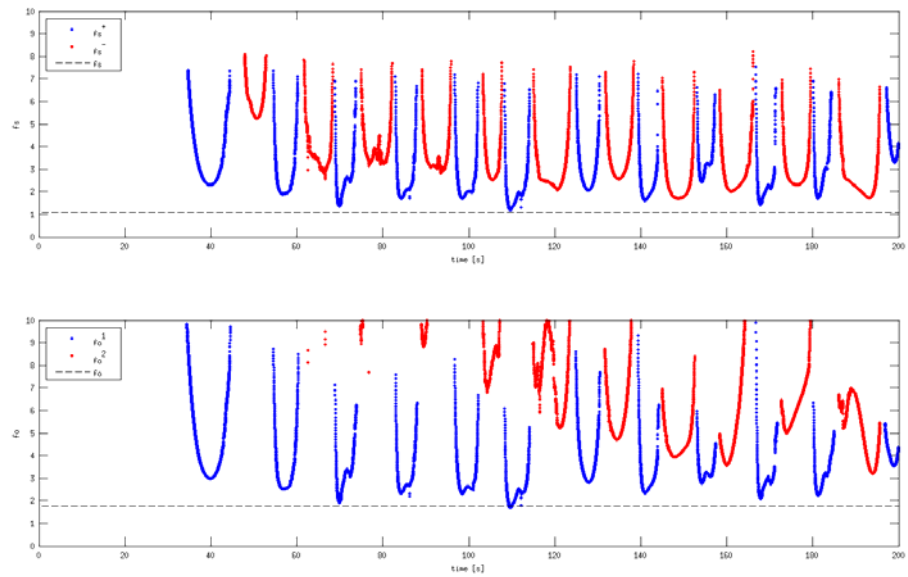


圖3.7 case7滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

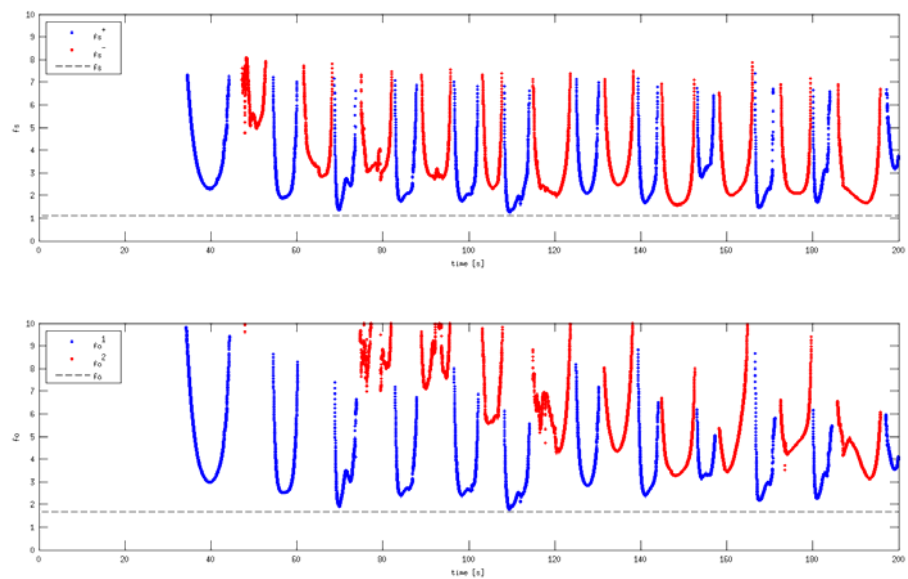


圖3.8 case8滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

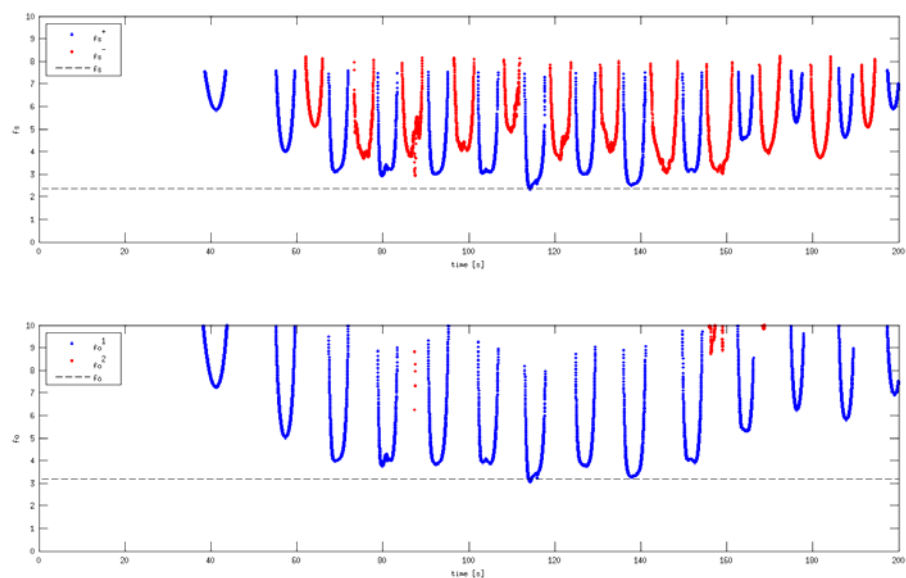


圖3.9 case9滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

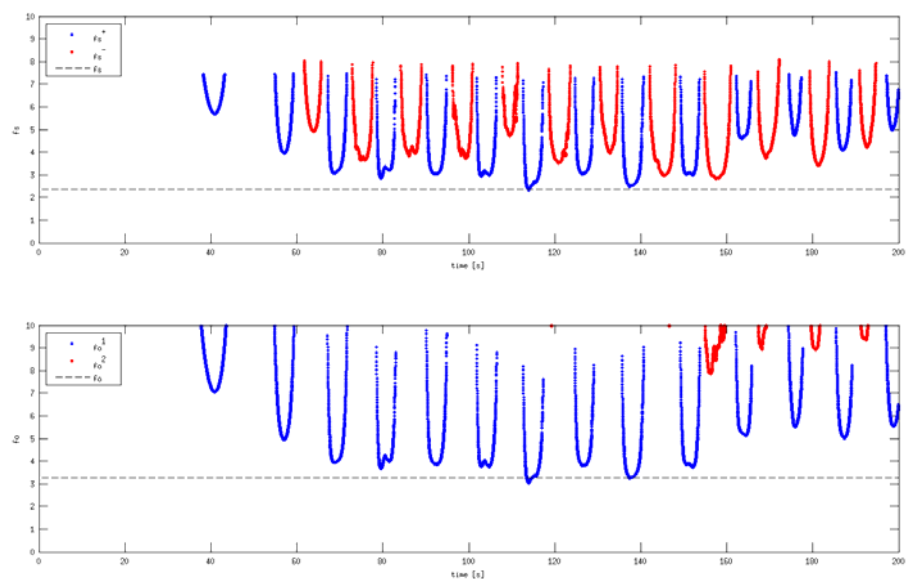


圖3.10 case10滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

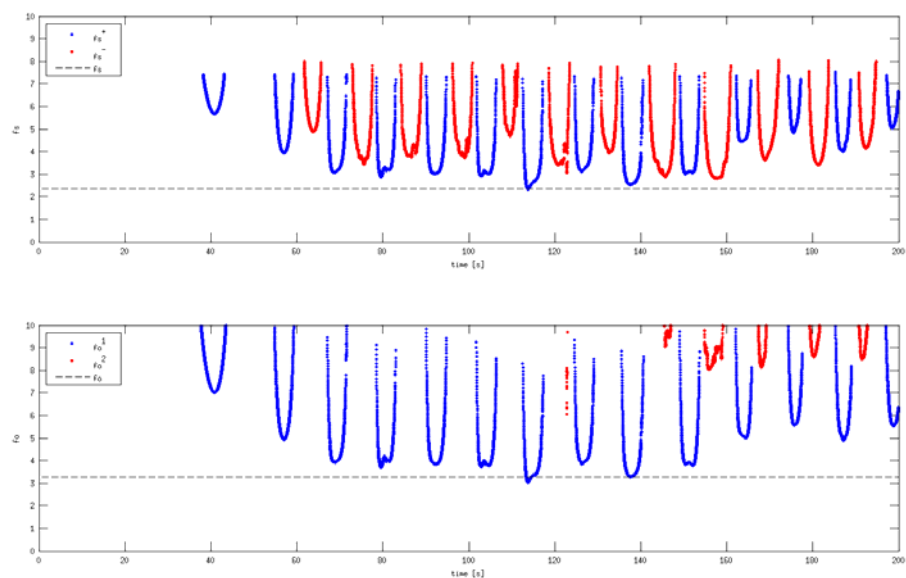


圖3.11 case11滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

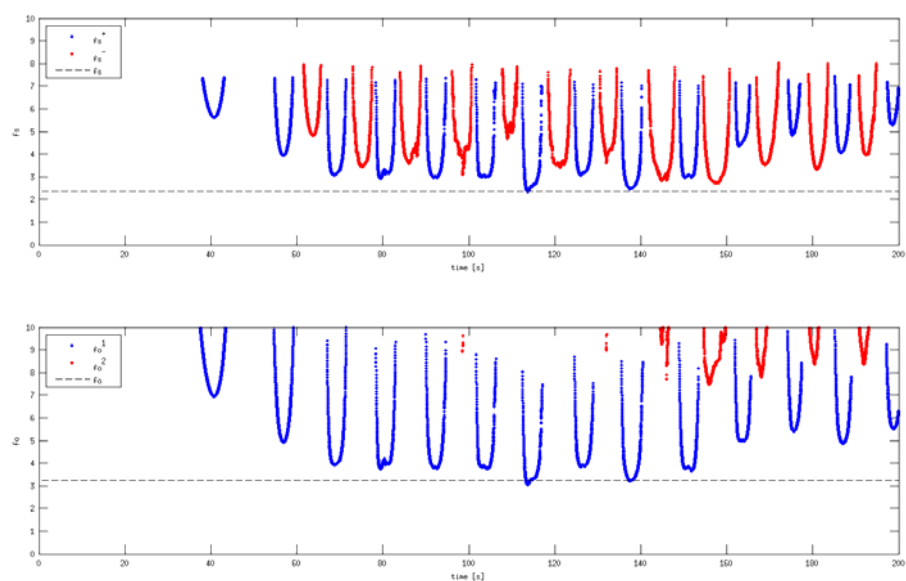


圖3.12 case12滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

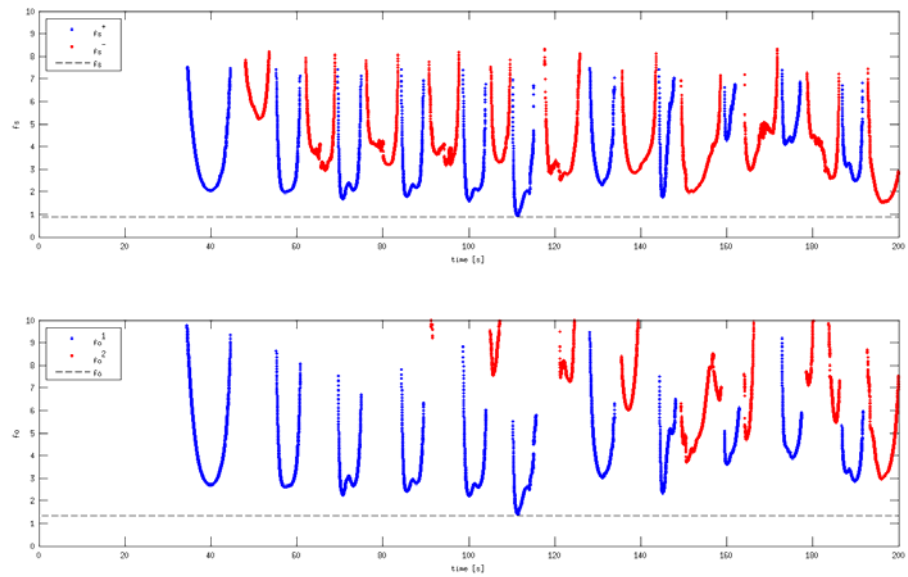


圖3.13 case13滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

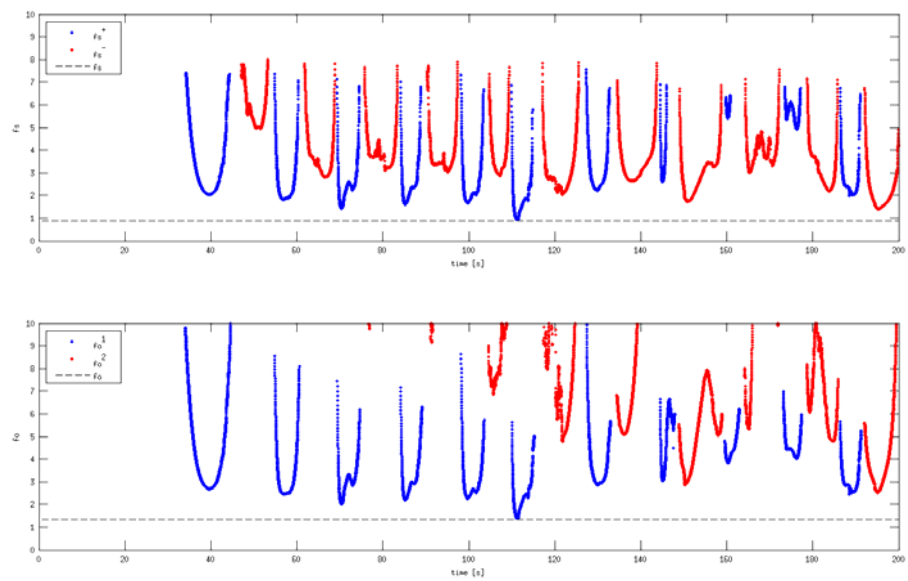


圖3.14 case14滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

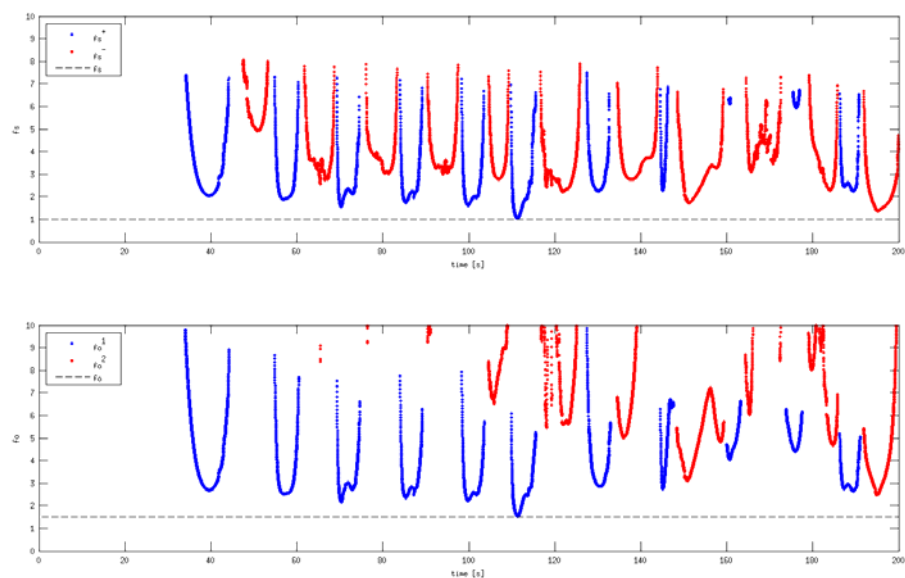


圖3.15 case15滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

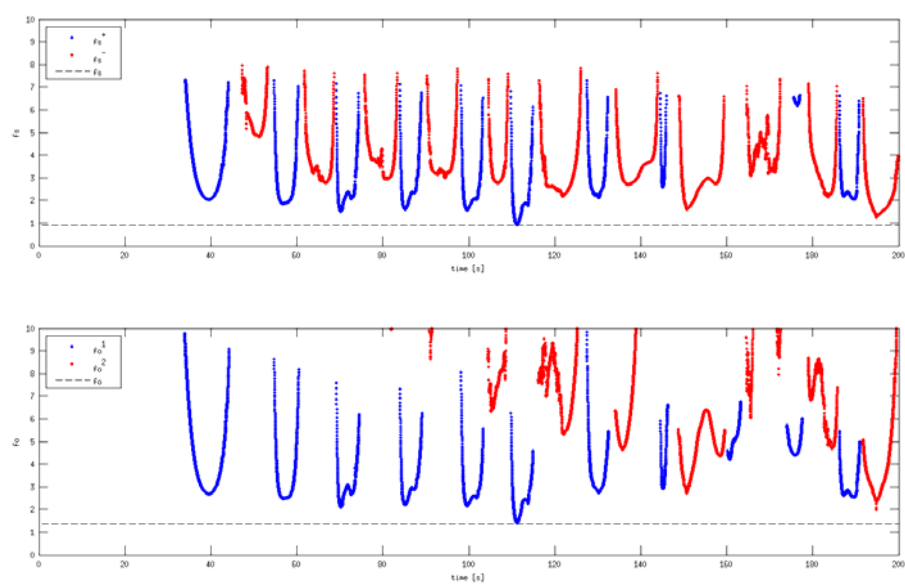


圖3.16 case16滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

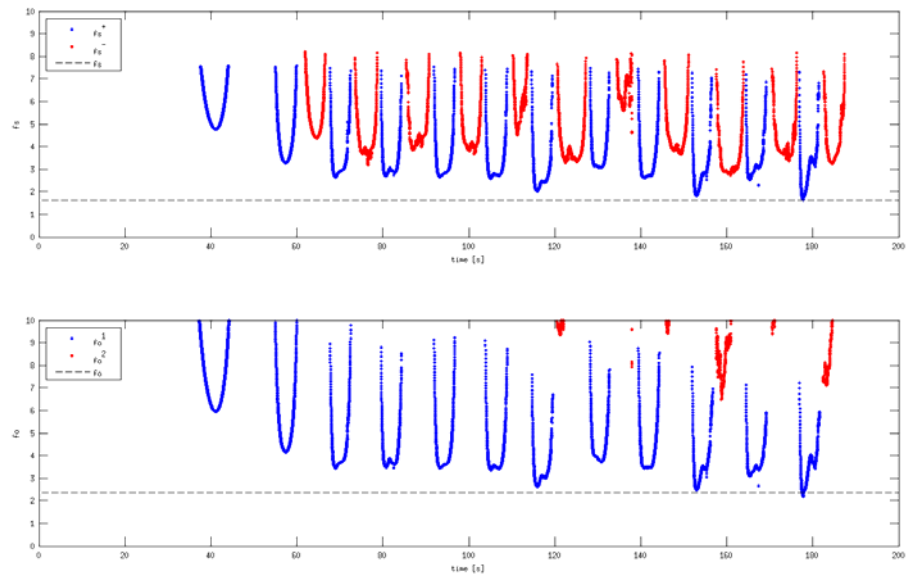


圖3.17 case17滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

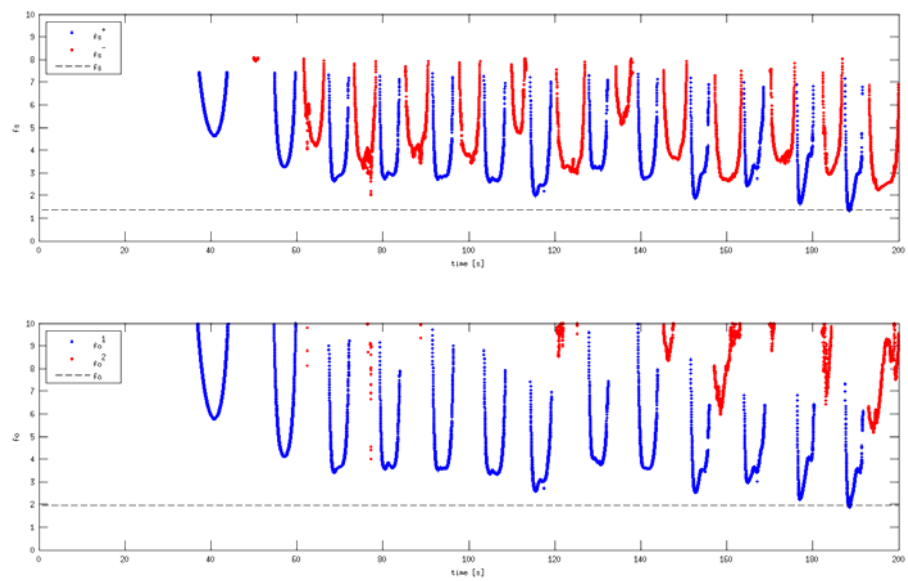


圖3.18 case18滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

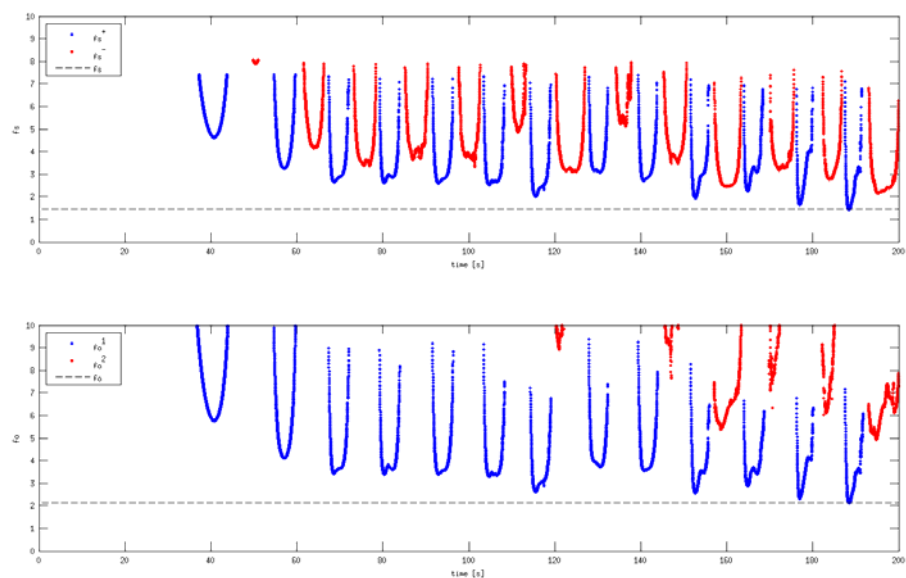


圖3.19 case19滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

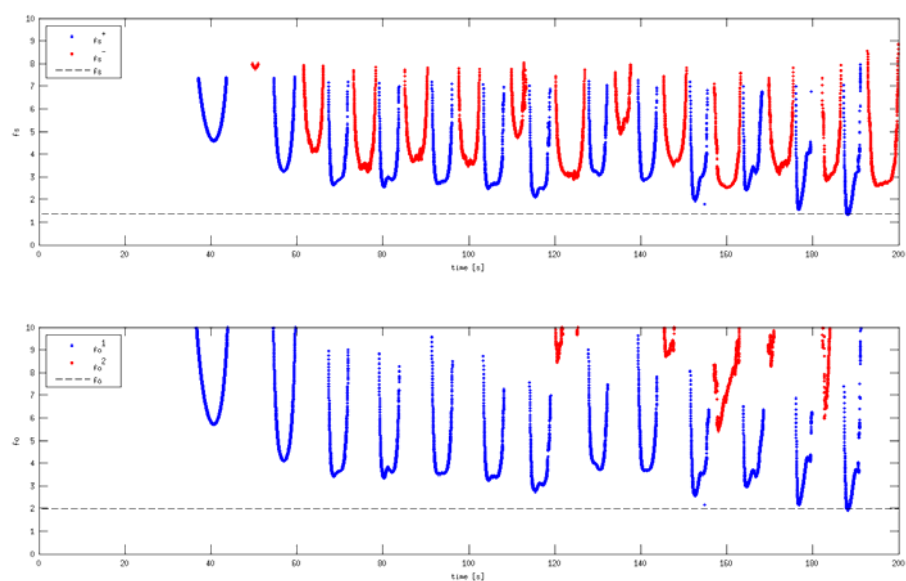


圖3.20 case20滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

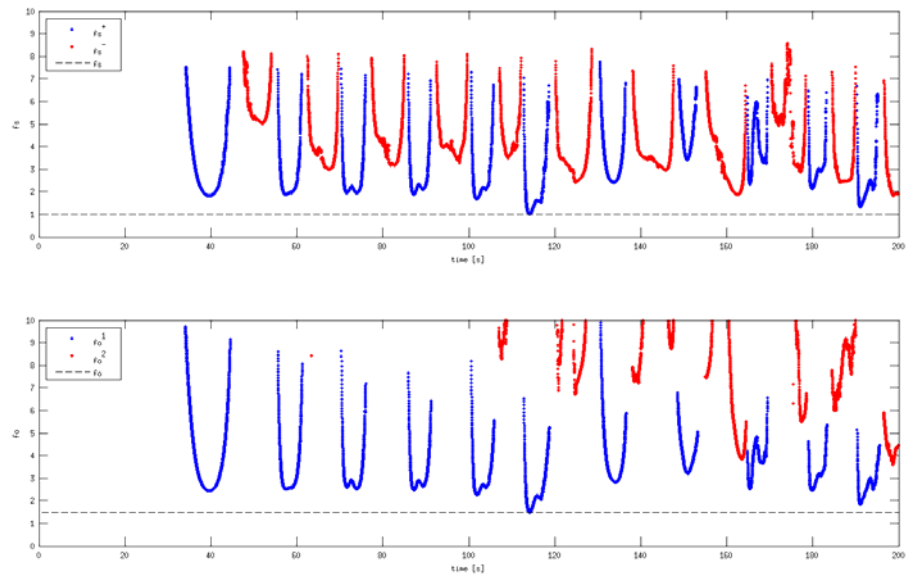


圖3.21 case21滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

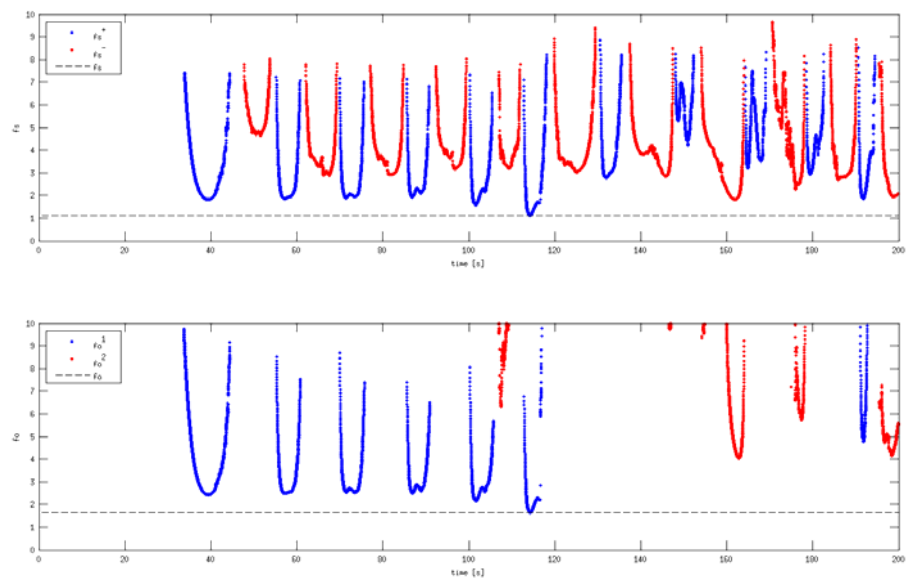


圖3.22 case22滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

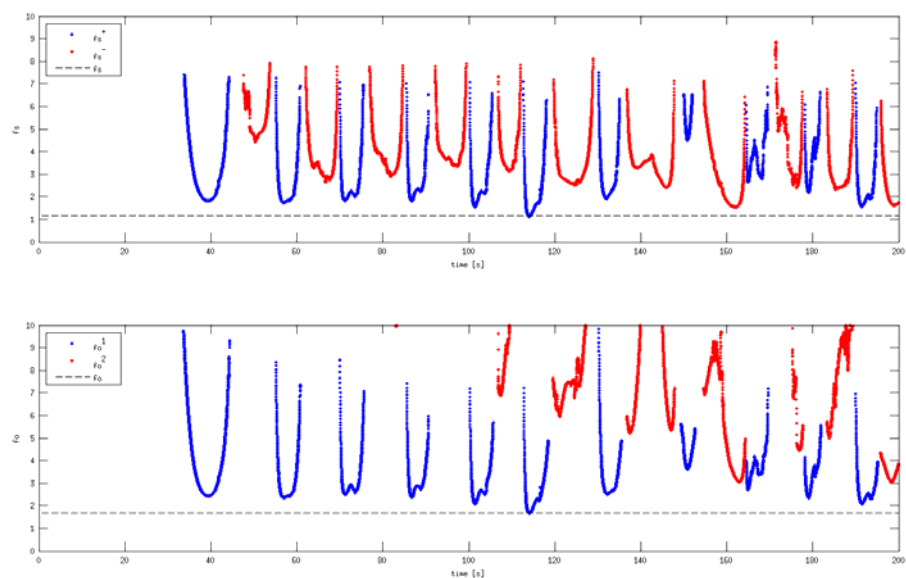


圖3.23 case23滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

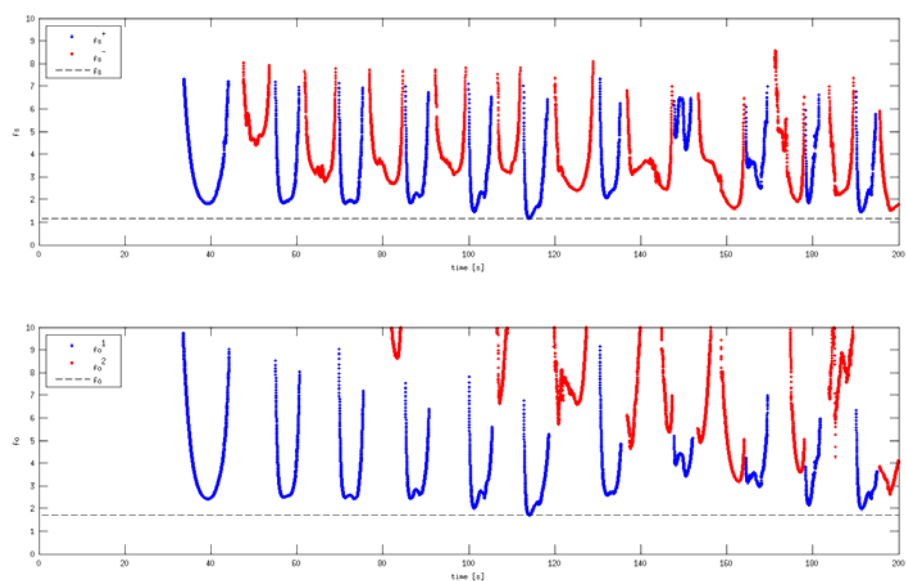


圖3.24 case24滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

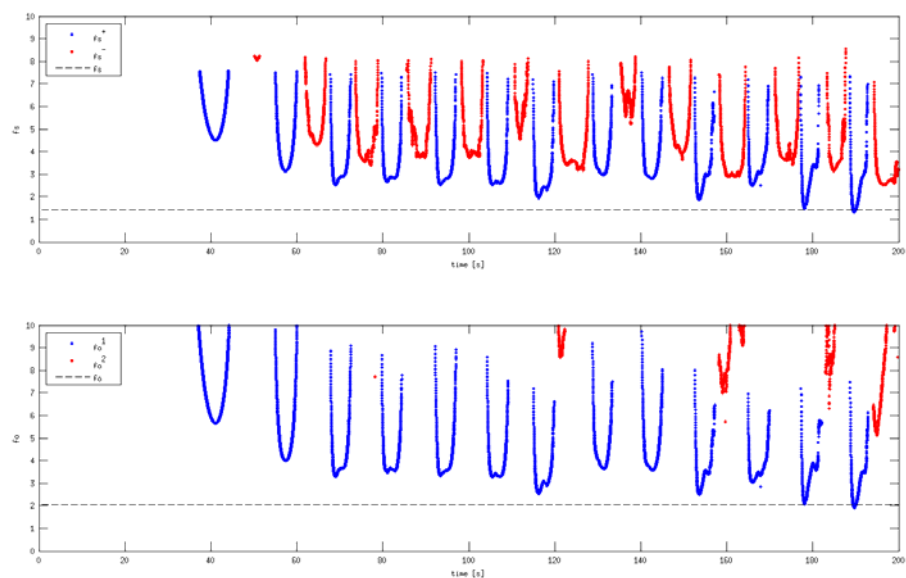


圖3.25 case25滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

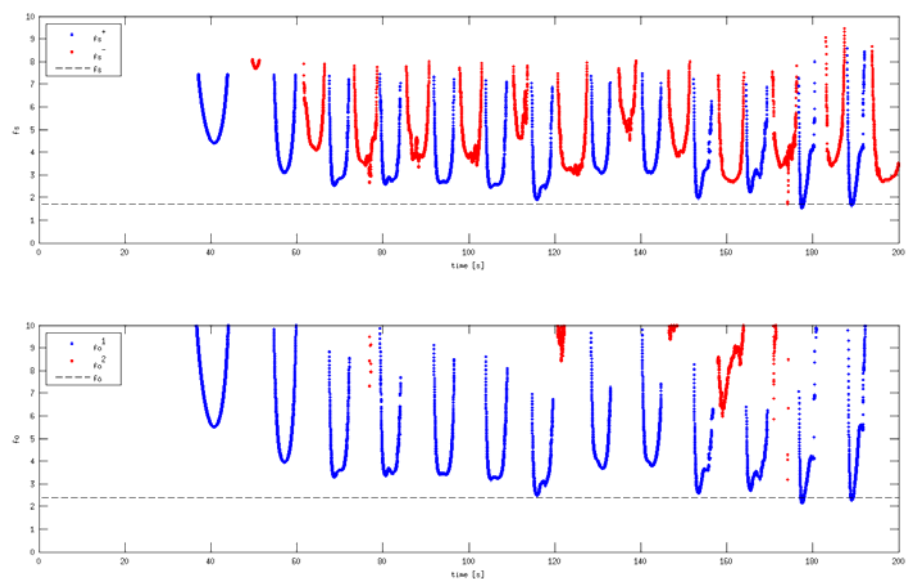


圖3.26 case26滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

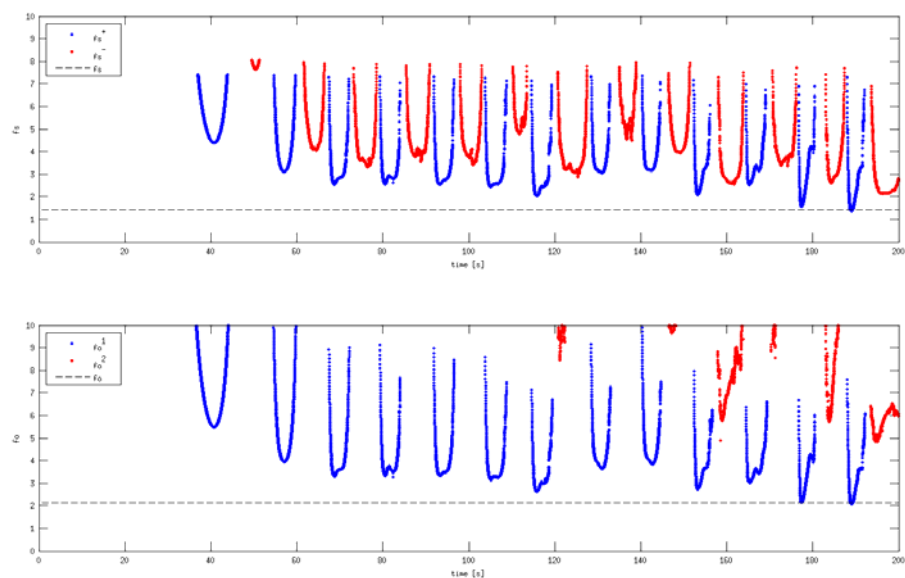


圖3.27 case27滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

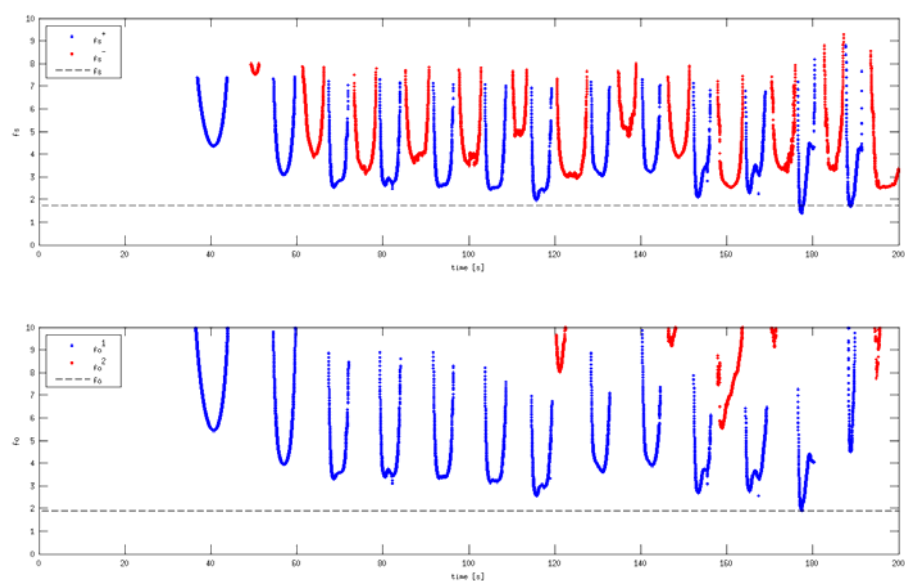


圖3.28 case28滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

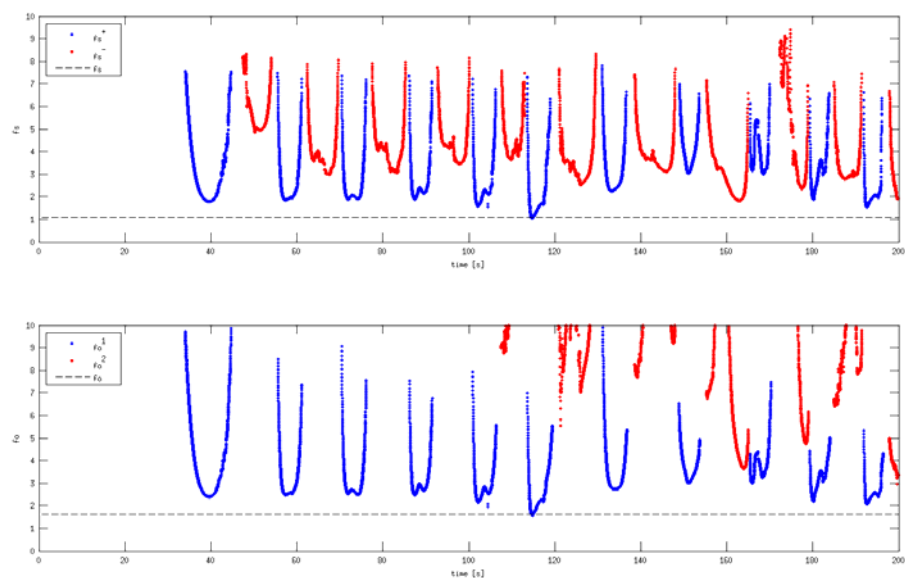


圖3.29 case29滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

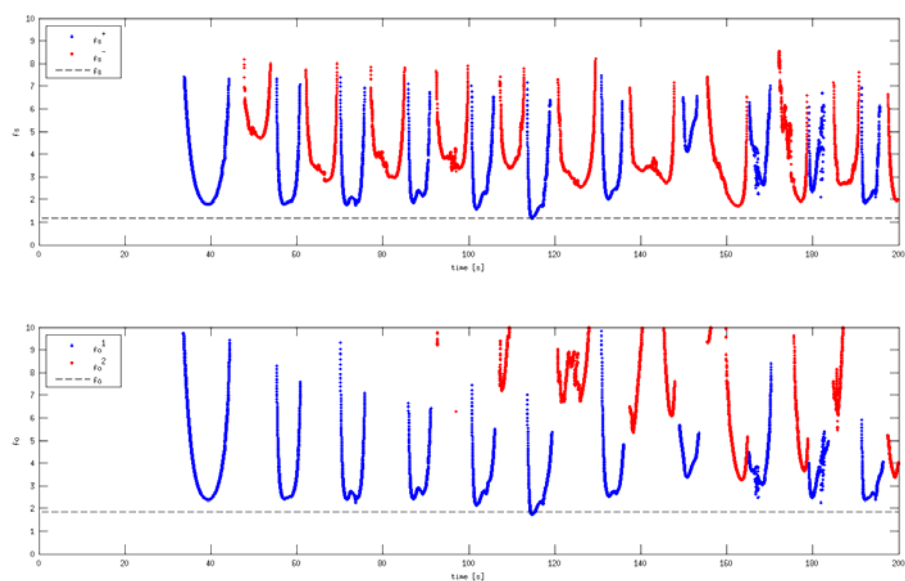


圖3.30 case30滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

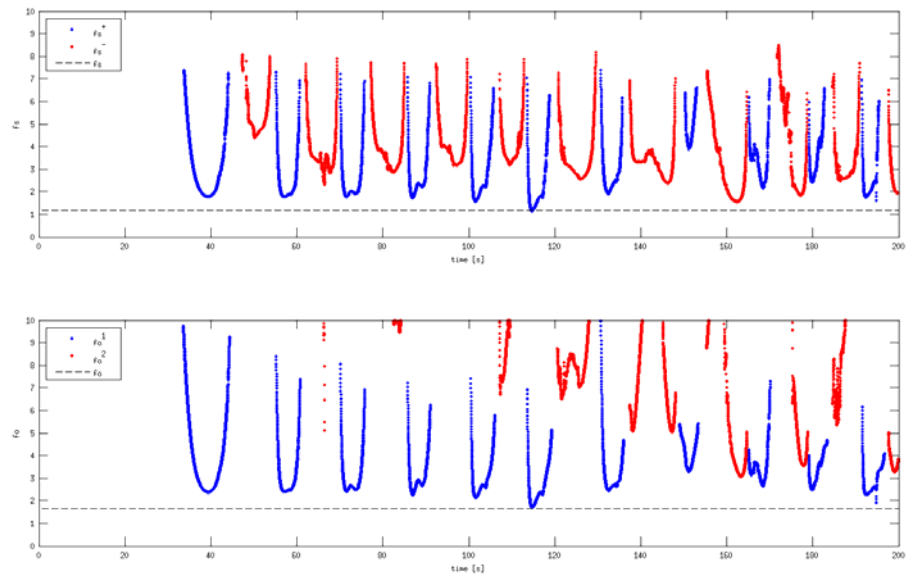


圖3.31 case31滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

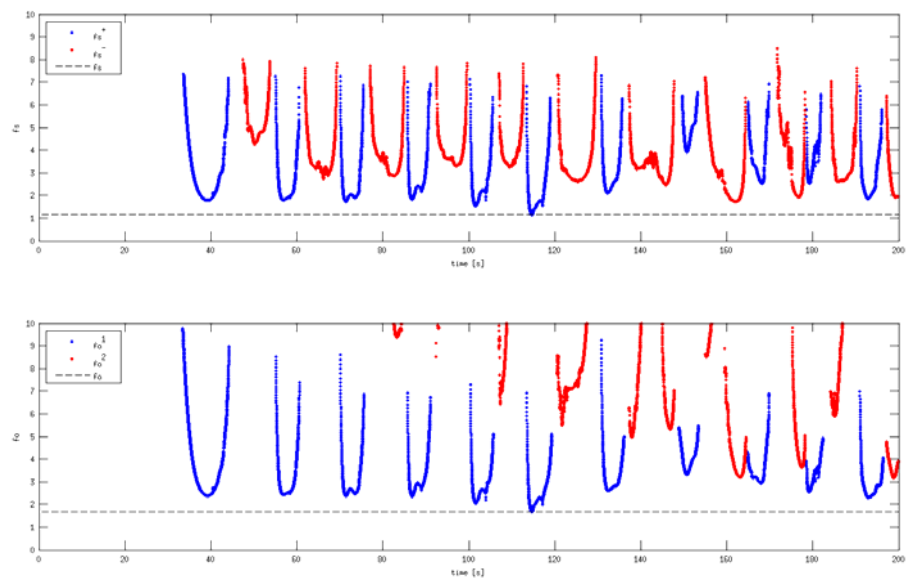


圖3.32 case32滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

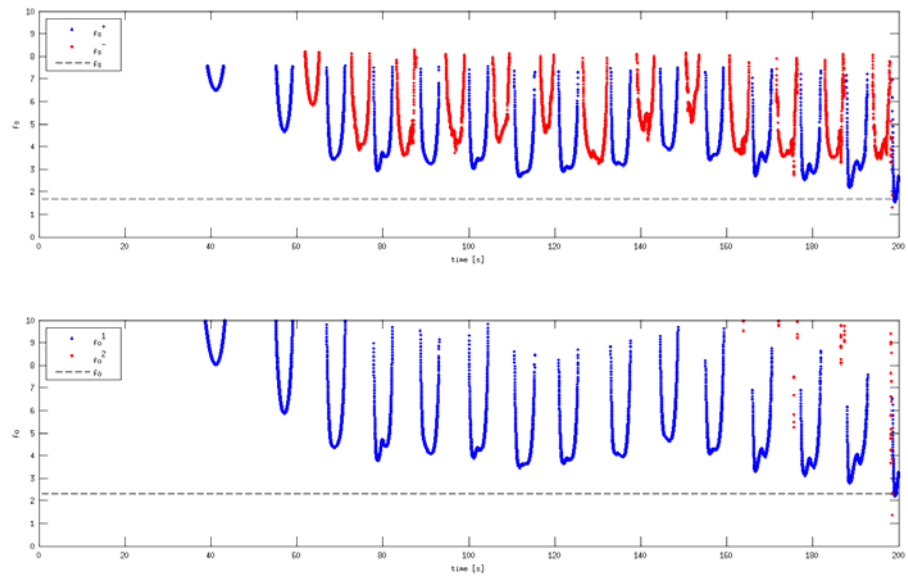


圖3.33 case33滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

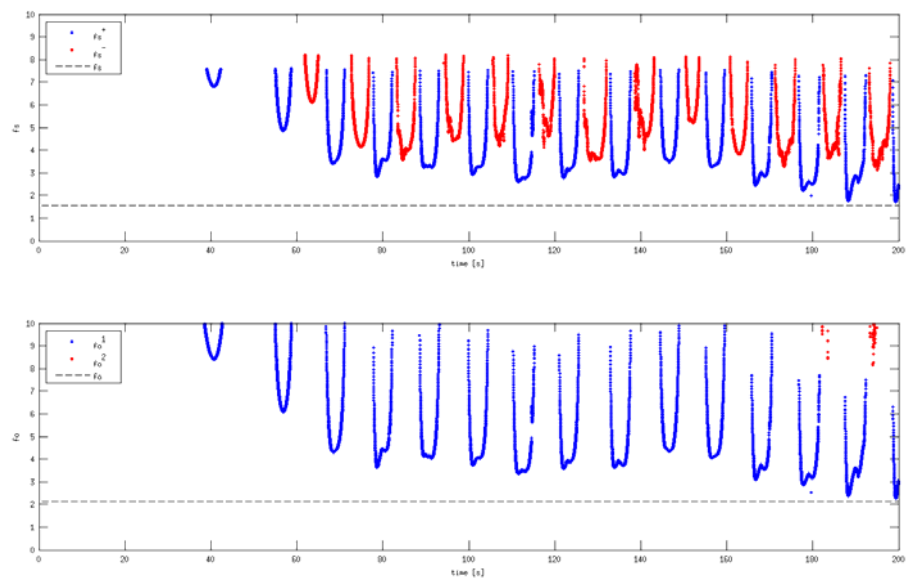


圖3.34 case34滑動安全係數與傾倒安全係數計算結果

附錄四

符號說明表

附表 4-1 符號說明表

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

附錄五

期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

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
蔡清標委員：		
1. 期中報告考慮氣候變遷海平面上升，評估臺中港防波堤受力之影響成果尚豐。	謝謝委員肯定。	同意。
2. 氣候變遷，考慮 2060 年四種情境之海平面上升，但均以現況 50 年迴歸期之波浪條件計算，這樣是否符合所謂的“未來氣候變遷可能發生的極端波浪條件”，應予補述	感謝委員建議。考慮 2100 年四種情境之海平面上升，以 50、100、200、250 年迴歸期之波浪條件計算，同時參考許泰文(2013)“強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力”研究計畫中評估 2020 年至 2039 颱風最大波高可能增加 65%做週期增加 25%為“未來氣候變遷可能發生的極端波浪條件”	同意。
3. 目前計算以 50 年迴歸期波浪條件計算，其與“歷年大波”差異性如何？	感謝委員建議，已遵照辦理，請參閱 p4-23。 分別以 case33 和 case34 模擬歷史大波條件下於斷面 I 和斷面 VI 之結構物受力情形，其滑動安全係數或傾倒安全係數都大於臨界值 1.2 以上，與各迴歸週期條件相比，歷史大波條件之安定係數明顯低於 50 年、100 年迴歸週期條件，而略高於 200 年迴歸週期條件。	符合。
4. 臺中港防波堤之原始設計條件應予補述，以評估其與本研究之異常波浪的差異。	感謝委員建議，已遵照辦理，請參閱表 4-2。	符合。
5. 目前既以規則波方式計算波力，為何安全係數會有時序列變化？	由於在波場模擬時，以五階規則波做為輸入條件，因此 COBRAS 模式模擬防波堤處波壓為時序列變化，可求得防波堤時序列受力情況，故安全係數會有時序列變化。因考慮越波發生情況下，堤後水位將隨時間震盪，堤前與堤後相位差異將防波堤受力情形，因此需考慮安全係數之時序變化，再取安全係數之最小值作為代表之安全係數。	同意。
6. 防波堤波壓分佈應劃出。直立部下方之拋石基礎本研究係如何考慮？請補述。	感謝委員建議，防波堤波壓分佈已新增於期末報告中。 直立部下方之拋石基礎本研究視為一透水結構物中值粒徑 0.007 公尺，透水性 0.49 採用 Hsu 等人(2002)所發展之 VARANS(volume-average/Reynolds averaged Navier-Stokes)法。多孔介質內部孔隙採用空間平均(spatially averaged)的 N-S 方程式。詳細說明已補充於附錄二中	符合。

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
7. 模式開放邊界係引用 TaiCom 之預測水位，建議將其水位歷線繪出表示。而其是否適用於氣候變遷情境模擬之邊界，請補述。	感謝委員建議，模式開放邊界係引用TaiCom之預測水位做調合分析取得邊界上M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2分潮係數之用。模式水位邊界以8個分潮計算。目前假設天文潮不受氣候變遷情境所影響。而氣候變遷所造成的水位抬升，以改變地形水深，達到水位抬升效果，故適用於氣候變遷情境模擬之邊界。參閱p3-2.	同意。
岳景雲委員：		
1. P.1-3 P.1-4 表 2-1?與表 1-1 不合，說明表 1 各值代表意義? “+” “-”表示?	感謝委員指正。表 1-1 中門檻值 300km 為颱風中心距離目標港區 300km 以內，標記為侵台颱風。以花蓮港門檻值 300km 強烈颱風 0.0067 年/次為例，以現有颱風紀錄而言每 50 年約會增加 0.335 個強烈颱風侵台機會。“+”即代表侵台颱風增加，“-”則為侵台颱風減少。	同意。
2. 浮漂軌跡追蹤，莊與廖(2011)缺參考文獻。	感謝委員指正，莊與廖(2011)已增列於參考文獻中。	符合。
3. COBRAS 模式計算對孔隙率、中值粒徑 d_{50} 、消波塊透水型式如何代入模式中?	感謝委員指正。COBRAS 模式在計算透水結構物與波浪交互作用採用 Hsu 等人 (2002) 所發展之 VARANS(volume-average/Reynolds averaged Navier-Stokes)法,多孔介質內部孔隙採用空間平均(spatially averaged)的 N-S 方程式。詳細說明已補充於附錄二中。	符合。
4. f_s 滑動安全(定)因素, f_o 傾倒安全(定)因素，是否請統一用“安全係數”	感謝委員建議。 f_s 滑動安全(定)因素已更改為滑動安全係數， f_o 傾倒安全(定)因素已更改為傾倒安全係數。	符合。
5. p5-5 水位變化示意圖 5-4 與 stoke 五階規則波是否一致?	一致。 Lin and Liu(1999)已進行 COBRAS 模式 stoke 五階規則波的模擬，其結果與理論比對相當一致。去年度計畫參考李(2006) 1:36 縮尺之水工模型試驗資料進行模式驗證，水位資料分別就一般波浪條件和颱風波浪條件，驗證結果良好，請參考 104 年港灣結構物受異常波浪影響分析(1/3)中 5.2 節模式驗證。	同意
6. p5-5 圖 5-10 防波堤示意圖下部結構請修正為梯形拋石，代表合成式防波堤。Goda 之設計波高定義，建議進一步說明釐清。	感謝委員建議，遵照辦理。 Goda(1975)由實驗數據及日本 Sakata 港實測資料整理分析，建議波高計算公式為 $H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H'_0, & h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0^* H'_0 + \beta_1^* h), \beta_{\max}^* H'_0, 1.8K_s H'\}, & h/L_0 < 0.2 \end{cases}$ 詳細說明已補充於 p4-4~p4-5	符合。
鐘英鳳委員：		
1. P5-10 第 5 行至第 9 行中所述「相較於過去第三次評估…參考圖 2.30 圖的…」等不知所述為何，且無 2.30，請加強說明表 5-1 是如何	感謝委員指正，已於 4-14 頁加強說明表 4-2 是如何得到如下: 以 NearCOM 計算的最大波高做為入射波浪條件，考慮不同颱風波浪迴歸期、氣候變遷影響和發生最大波浪情	符合。

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
得到。	況，將入射波浪條件整理如表 4-2，	
2. p5-10 表 5-1 中案例編號 4RCP 水深 27.9717 比 RCP4.5 水深 27.9819 何以會如此，應有誤，導致後面文章及分析錯誤，請修正此一數值及後續相關說明，如 p5-14 第四、五行等...圖 5-21。	目前利用 2081-2100 年全球平均海平面的上升進行研究，已無此現象。	符合。
3. P5-12 中公式 5.4.4 及 5.4.7 中公式不完整，缺少 f_0 ，請補正 $f_0 \leq wt/(m1+m3-m0) \rightarrow m1$ 只是力矩，缺 f (力量)	公式 4.4.4 及 4.4.7(原 5.4.4 及 5.4.7)中的 f_0 是傾倒安全因素(安全係數)並非力。詳細說明請參 p4-21.	符合。
4. P5-12 倒數第七行及 P5-13.中有關表一，請修正為表 5-1。	感謝委員指正，已更正。	符合。
5. P5-22 中何以水位未抬升，但越流量已增加，是否合理，請說明。	感謝委員指正。圖 5.22 水位抬升與越流增加量的線性公式未通過原點，確實不合理，已於期末報告中移除。	符合。
曾相茂委員：		
1. P2-1 頁第七列 2000~2003 年再延長北防波堤 480 公尺…請再檢查確認。	感謝委員指正。已修正為“2000~2002 年再延長北防波堤 480 公尺”。	同意。
2. P2-12 本所港研中心之臺中港之風觀測站有兩個站，一為北防風林觀測站，另一為北防波堤堤頭綠燈塔，在報告中請註明那一個站(由資料顯示應為北防波堤堤頭站之資料)	感謝委員指正，已於 p2-9 中說明 2001~2005 年為北防風林觀測站，2006~2013 年為北防波堤堤頭站資料。	符合。
3. 附錄 1-30 潮位資料來源是中央氣象局，從 1999 年開始，但本所港研中心則自 1971 年 3 月~1981(臺中港務局) 至今都有資料，建議可由本所提供 44 年潮位資料加以研究分析	感謝委員建議，目前以 TaiCom 之預測水位做調合分析取得邊界上 M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2 分潮係數。未來可以考慮以本所提供 44 年潮位資料分析使用。	同意。
蘇青和委員：		
1. 港灣結構物受波浪作用，除波高及週期之波浪條件為重要因子外，水深也是重要因子，而平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮、氣候變遷等，皆影響水深重要因子，各種物理量之數量應做一說明。	感謝委員建議，平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮、氣候變遷等，皆影響水深重要因子，但本研究主要是針對氣候變遷進行研究，為避免問題過於複雜，故平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮為控制變因，氣候變遷為應變變因。其他水深因子如潮位變化已於第一年報告中進行討論。尚未考慮颱風暴潮。	同意。
2. 第 3 章 NearCom 及 COBRAS 兩模式理論部份，建議移置於附錄。	感謝委員建議，期末報告中第 3 章理論部份已移置附錄二。	符合。

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. 第 4 章及第 3 章，外海波浪條件(波高及週期)、水深(平均高潮位，颱風暴潮、氣候變遷等因子)，不同條件應製作表格做一完整比較，波場模式計算結果之防波堤前波高、週期及水深，也應與外海波高及水深做比較。整個防波堤前不同位置之變化也應納入考量。	感謝委員建議。已將不同迴歸期不同波向之颱風波浪及氣候變遷等因子。所造成的最大 $H_{1/3}$ 製表討論，請參閱表 3-4、3-4。	符合。
4. 第 5 章改為第 4 章，防波堤前之波高、週期及水深等考量條件，應具代表性及完整性。	感謝委員建議，已遵照辦理。	符合。
5. 報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入英文摘要。	感謝委員建議，期末報告已納入英文摘要。	符合。
6. 期末報告增加“結論與建議”，結論應顯示各項具體成果。	感謝委員建議，已遵照辦理。	符合。
何良勝委員：		
1. 於第二章中，建議刪除部份不必要之背景資料(例如，濕度、降水等)。	感謝委員建議，已刪除。	符合。
2. 請增列受氣象變遷影響之相關研究	感謝委員建議，已增列受氣象變遷影響之相關研究於第一章。	符合。
3. 補充說明，以 50 年迴歸期條件作為歷史大波之依據原因。	感謝委員建議，期末報告中已增加港研中心實測波浪資料中最大波，做為歷年大波模擬條件並且增加 50、100、200、250 年迴歸期條件進行模擬。	符合。
4. P. 4-5 中，請補充說明「參數波高增加比」之合理性。	感謝委員建議。波高增加比用於討論波流場變化受氣候變遷四種 RCP 情境海平面上升的影響，波高增加比為現今年波高與情境年波高差比上海平面上升高度 ($H_{s-diff} = (H_{s-RCPs} - H_{s-O}) / SRL_{RCPs}$)。波高增加比是用於結果討論，並非用模式設定條件。參數波高增加比已於期末報告中移除。	符合。
5. P4-37, 4.3 節浮標軌跡之用途為何？	3.4 節(原 4.3 節)浮標軌跡可驗證波流場中流速、流向等，未來浮標追蹤模組可延伸應用至污染擴散傳輸，生態模組等。	同意。

附錄六

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中 ■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

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
岳景雲委員：		
(一) 封面應為 期“末”報告	感謝委員指正，已修正為期末報告。	符合。
(二) 參考文獻有中文 23 篇，英文 83 篇，合計 106 篇，資料蒐集豐富，工作辛苦。	感謝委員肯定。	同意。
(三) P.2-5 建議說明表 2-2、表 2-3，台中、梧棲氣象站缺 2014 年資料原因(其後海象資料：風、海流、波浪.....等亦缺 2014 年資料)	因港研中心 2014 年資料於期末報告繳交前尚未公開無法取得，已新增於期末報告中。	符合。
(四) P.3-6 建議說明參數波高增加比 H_s-diff 之物理意義？ >1 ？ $=1$ ？ <1 ？	感謝委員建議，參數波高增加比已於期末報告中移除。	符合。
(五) 3-11 圖 3-6~圖 3-197 合計 192 張圖，找出特殊差異性或重點並補強說明，以增加可讀性，突顯出本計劃的重要性。	感謝委員建議，圖 3.6~圖 3.197 已精簡至圖 3.6~圖 3.17。	符合。
(六) P.3-108 方程式打字確認。P.3-109 圖.201 打字確認	感謝委員指正，已修正。	符合。
(七) P.4-16 北防波堤延伸段 斷面 I~IV，原設計圖南側在平均水位上、下均設有開孔，且內部為一斜坡，略述模式計算中如何模擬。	模式中將此結構物分為兩個部分，第一部分為一具透水性的梯型拋石基座，下底 72 公尺，上底 48 公尺，高為 6 公尺，欲模擬此拋石基座為一透水材質，將此分為兩層，外層為塊石披覆，中值粒徑 1.18 公分，孔隙率 0.49，內層為卵石堤心，中值粒徑 3.87 公分，孔隙率 0.53。第二部分為一不透水的直立壁，寬度為 22 公尺，胸牆頂高度根據表 4-1，並無考慮開孔和斜坡，去年度計畫已將此模式參考李勁毅(2006)『海床侵淤對直立堤前波浪與其動態行為影響研究』之水工模型試驗資料(縮尺 1/36)驗證並獲得良好的結果。	同意。

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
(八) P.3-8 從表 3-4 不同颱風波浪迴歸期下各波向(N,W,SW)最大波高與基準年(RCP 0.0)相比差異不大(小數點後 2 位)是否再確認！又 W 向最大波高反而小於基準年(RCP 0.0)之波高，略說明之 (九) 表 3-6 未來氣候變遷不同颱風波浪迴歸期下各波向(N,W,SW)最大波高亦有相同問題，(最大波高與基準年(RCP 0.0)相比差異不大，小數點後 2 位才有差別)，因此 RCP 2.6 情境下，計算結果與 RCP 4.5、RCP 8.5 很類似。	感謝委員建議，比較表 3-4 與表 3-6 可知各波向(北向,西向,西南向)最大波高變化趨勢是一致的，僅西向最大波高反而小於基準年(RCP 0.0)之波高，故氣候變遷所造成的海平面上升會導致西向入射颱風波浪在北防波堤處波高降低；而北向及西南向入射颱風波浪在北防波堤處波高增加。 感謝委員建議，比較表 3-4 與表 3-6 可知各波向(北向,西向,西南向)最大波高變化趨勢是一致的，僅西向最大波高反而小於基準年(RCP 0.0)之波高，故氣候變遷所造成的海平面上升會導致西向入射颱風波浪在北防波堤處波高降低；而北向及西南向入射颱風波浪在北防波堤處波高增加。	符合。 符合。
歐善惠委員： (一)本研究計畫研究內容包括波、流、越波、波力分析、結構物滑動、傾倒、衝擊波壓等，工作量甚大，研究成果良好 (二) 研究報告格式建議調整： 1.封面「期中報告」應是「期末報告」之誤。 2.目錄宜排列整齊。 3.頁數不宜分章排列。 4.章節「2.5 氣候變遷資料」應是「2.6 氣候變遷資料」之誤。 5.建議增列符號目錄。 6.第三章連續 96 頁 197 張圖宜做適當彙整規劃，部分結果置於附錄。 7.p.5-1 RCP 8.0 應是 RCP 8.5 之誤。 (三) p.2-31「透過在氣候的重建，資料可回溯到數百年至數百萬年前」，宜稍做說明。	感謝委員肯定。 1. 感謝委員指正，已修正為期末報告。 2. 感謝委員指正，已修正。 3. 感謝委員建議，頁數編排方式依照港研中心規定，故不更改。 4. 感謝委員指正，已修正。 5. 感謝委員建議，已增加符號說明如附錄四。 6. 感謝委員建議，已將部份結果移置附錄三。 7. 感謝委員指正，已修正。 感謝委員建議，已增加說明如下： 聯合國政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告—第一工作小組報告(AR5)中指出透過古氣候的重建，資料可回溯到數百年至數百萬年前。 Ref: IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.	同意。 符合。 同意。

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
(四) p.2-31「1971 至 2009 年..., 1993 年至 2009 年...2002 至 2011 年間...冰川冰量損失率...非常可能達到...」, 年代均已過去, 語氣應做修改。	感謝委員建議, 已修正。	符合。
(五) 本研究在探討港灣結構物在歷史大波以及未來可能遭遇的極端波浪下的受力狀況, 所謂歷史大波及未來可能的極端波浪如何定義?	感謝委員建議, 本計畫以港研中心波浪測站所量測到歷年最大波定義為歷史大波。而未來可能的極端波浪則參考許泰文(2013)報告為 50 年、100、200 年與 250 年迴歸期之颱風波浪波高乘上 1.65 倍, 週期乘上 1.25 倍之波浪。參考許(2013)之強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(2/2)報告。	同意。
梁乃匡委員: (一) 已完成預定工作, 研究方法新穎, 資料豐富, 具參考價值	感謝委員肯定。	同意。
郭一羽委員: (一)氣候變遷之波高, 海平面的依據, 有待商榷。 (二) 設計波高的決定, 其迴歸期是否有考慮結構物使用壽命問題。 (三) 因氣候變遷, 波高愈來愈大, 設計波高要以什麼時間點為對象	感謝委員建議, 目前海平面上升依據 IPCC(2013) AR5 報告, 是針對全球海平面上升情況進行預測。臺灣附近海域受氣候變遷之波高變化目前蒐集到較完整研究報告僅許泰文(2013)。 Ref: IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 許泰文, 2013, 強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(2/2), 經濟部水利署。 感謝委員指教。研究顯示氣候變遷的影響, 造成侵臺颱風強度增加, 港灣結構物可能遭受更極端的波浪作用, 造成結構物破壞。本計畫並無考慮結構物使用壽命, 僅討論不同迴歸期之颱風波浪條件及氣候變遷情境下結構物受力及安定性。 感謝委員指教。由於本研究目的是氣候變遷可能造成之海氣象變化, 如海平面上升、颱風波浪波高週期增加等, 對於臺中港北防波堤之受力分析及安定性分析。並非針對氣候變遷下防波堤設計, 故無設計波高與時間問題。	同意。 同意。 同意。

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
(四)原始設計波高及安全係數為何？應做比較	感謝委員指教。表 4-2 case 1~case 4 即為原始設計波高。	同意。
(五)堤前沖刷可能是最嚴重的破壞原因？水流的分析結果似乎沒用上	感謝委員指教。本研究目前尚未考慮堤前沖刷，僅針對波流場模擬並進行防波堤受力分析及安定性分析。	同意。
(六)歷史最大波如何決定？與原設計波高及本計畫設計波高有何不同	感謝委員指教。本研究以港研中心波浪測站所量測到歷年最大波定義為歷史大波。而臺中港北防波堤設計波高為 50 年迴歸期之颱風波浪。本計畫則是針對 50 年、100 年、200 年與 250 年迴歸期之颱風波浪，50 年、100、200 年與 250 年迴歸期之颱風波浪波高乘上 1.65 倍，週期乘上 1.25 倍之波浪進行模擬。	同意。
(七)本計畫只引用既有資料和計算公式，無創新研發部份。在實用上因設計條件不清楚，故有待釐清	感謝委員指教。氣候變遷已有許對相關研究，因此本計畫引用既有資料為模擬條件，本計畫創新部份為，NearCom 模式結合 Cobras 模式模擬港灣結構物受力，在受力及安定分析時考慮堤後越波對於防波堤之影響。修正 NearCom 模式中浮標追蹤模組加入水平擴散項，進行臺中港域海流驗證，並且率定出臺中港域之水平擴散係數。	同意。
曾相茂委員：		
(一) P2-21 臺中港潮汐不同的基準面是否能拉到同一基準面來做統計。請問資料來源？為何有這種不同的高程現象。	感謝委員指教，資料引用自中央氣象局潮汐觀測資料年報。基準面不同高程可能是儀器位置變動或底床淤積造成。由於 1999~2005 年基準面高程皆有不同，所以本小節主要利用潮差進行討論，以避免基準面不同的問題。	同意。
(二) P2-20 2.3.4 潮位第 4 行是否修正為「北防波堤堤頭外 600 公尺，水深 25 公尺處(測站 X)安置之 AWCP 即時傳送監測系統。...」	感謝委員建議，已修正。	符合。

附錄七

期末報告簡報資料



港灣結構物受異常波浪影響分析(2/3)

期末簡報

財團法人成大研究發展基金會

計畫主持人：許弘莒 博士 / 成大水工所 副研究員

簡報大綱

- 期中審查意見回覆
- 前言
- 基本資料蒐集與分析
- 研究方法
- 平面流場分析
- 結構物受力分析
- 結論



■ 蔡清標委員：

1. 期中報告考慮氣候變遷海平面上升，評估臺中港防波堤受力之影響成果尚豐。

回覆：謝謝委員肯定。

2. 氣候變遷，考慮2060年四種情境之海平面上升，但均以現況50年迴歸期之波浪條件計算，這樣是否符合所謂的“未來氣候變遷可能發生的極端波浪條件”，應予補述

回覆：感謝委員建議。考慮2100年四種情境之海平面上升，以50、100、200、250年迴歸期之波浪條件計算，同時參考許泰文(2013)“強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力”研究計畫中評估2020年至2039颱風最大波高可能增加65%，週期增加25%做為“未來氣候變遷可能發生的極端波浪條件”。



各迴歸期之颱風波浪條件

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

受氣候變遷之各迴歸期波浪條件 依許泰文(2013)顯示不同地區最大波高平均增率介於59%-65%，週期平均增率介於20.8%-25%。因此取其各年迴歸週期之颱風波浪波高再乘上係數1.65、週期乘上1.25

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

四種氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100年)

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



3. 目前計算以50年迴歸期波浪條件計算，其與“歷年大波”差異性如何？

回覆：感謝委員建議，已遵照辦理，請參閱p4-23。

分別以case33和case34模擬歷史大波條件下於斷面I和斷面VI之結構物受力情形，其滑動安全係數或傾倒安全係數都大於臨界值1.2以上，與各迴歸週期條件相比，歷史大波條件之安全係數明顯低於50年、100年迴歸週期條件，而略高於200年迴歸週期條件。

4. 臺中港防波堤之原始設計條件應予補述，以評估其與本研究之異常波浪的差異

回覆：感謝委員建議，已遵照辦理，請參閱表4-2。



波號	迴歸期(年)	波高(公尺)	波向(度)	波速(公尺/秒)	最大波高(公尺)	備註
1	50	—	11300	I	28.86	○
2	50	2.6	11300	I	29.41	○
3	50	4.5	11300	I	29.49	○
4	50	8.5	11300	I	29.68	○
5	50	—	14125	I	28.86	■
6	50	2.6	14125	I	29.41	■
7	50	4.5	14125	I	29.49	■
8	50	8.5	14125	I	29.68	■
9	100	—	11700	IV	30.85	○
10	100	2.6	11700	IV	31.41	○
11	100	4.5	11700	IV	31.49	○
12	100	8.5	11700	IV	31.68	○
13	100	—	14625	IV	30.85	■
14	100	2.6	14625	IV	31.41	■
15	100	4.5	14625	IV	31.49	■
16	100	8.5	14625	IV	31.68	■
17	200	—	12200	I	28.86	○
18	200	2.6	12200	I	29.41	○
19	200	4.5	12200	I	29.49	○
20	200	8.5	12200	I	29.68	○
21	200	—	15250	I	28.86	■
22	200	2.6	15250	I	29.41	■
23	200	4.5	15250	I	29.49	■
24	200	8.5	15250	I	29.68	■
25	250	—	12300	I	28.86	○
26	250	2.6	12300	I	29.41	○
27	250	4.5	12300	I	29.49	○
28	250	8.5	12300	I	29.68	○
29	250	—	15375	I	28.86	■
30	250	2.6	15375	I	29.41	■
31	250	4.5	15375	I	29.49	■
32	250	8.5	15375	I	29.68	■
33	—	—	111	I	28.86	○
34	—	—	111	V	30.85	○

○根據表3-4，代表一般情況之波浪條件

■根據表3-6，代表受氣候變遷影響之波浪條件增益情況(許2013)

◎根據表2-6，代表臺中港實際量測到之歷史大波情況

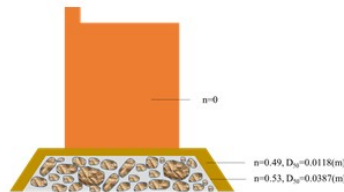


■ 5.目前既以規則波方式計算波力，為何安全係數會有時序列變化？

回覆:由於在波場模擬時，以五階規則波做為輸入條件，因此COBRAS模式模擬防波堤處波壓為時序列變化，可求得防波堤時序列受力情況，故安全係數會有時序列變化。因考慮越波發生情況下，堤後水位將隨時間震盪，堤前與堤後相位差異將影響防波堤受力情形，因此需考慮安全係數之時序變化，再取安全係數之最小值作為代表之安全係數。

6. 防波堤波壓分佈應劃出。直立部下方之拋石基礎本研究係如何考慮?請補述。

回覆:感謝委員建議，防波堤波壓分佈已新增於期末報告中。直立部下方之拋石基礎視為一透水結構物，由於設計報告中缺少中值粒徑和透水性資料，因此參考COBRAS使用手冊和相關文獻，將拋石基礎分為兩層，外層為塊石披覆，中值粒徑1.18公分，孔隙率0.49，內層為卵石堤心，中值粒徑3.87公分，孔隙率0.53。數值方法上採用Hsu等人(2002)所發展之VARANS(volume-average/Reynolds averaged Navier- Stokes)法，多孔介質內部孔隙採用空間平均(spatially averaged)的N-S方程式。



將孔隙流體之對流慣性力項及黏滯力項加入Solitt and Cross (1972)所推導出的孔隙介質流體運動方程式如式(2.3.1)、(2.3.2)：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3.1)$$

$$\frac{1+C_A}{n} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{U_j}{n^2} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.3.2)$$

其中 n 為孔隙率， C_A 是附加質量係數，Van Gen(1995)提出以下形式(2.3.3)：

$$C_A = \gamma_p \frac{1-n}{n} \quad (2.3.3)$$

其中 $\gamma_p=0.34$ ，當 $n=1$ 時，就回復為 RANS 的控制方程式。式 (2.3.2) 右邊第三項可表示如下(2.3.4)：

$$\frac{1}{n^2 \rho} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} = -a_p U_i - b_p \sqrt{U_j U_j} U_i \quad (2.3.4)$$

式(2.3.4)右邊第一項代表摩擦項，由黏滯力所造成；右邊第二項，是由於紊流效應所造成。當在低雷諾數時，由第一項所主導、高雷諾數時則由第二項所主導。

Liu et al. (1999) 採用Van Gent (1995) 的經驗式處理 a_p 和 b_p 如下(2.3.5)、(2.3.6)：

$$a_p = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{D_{50}^2} \quad (2.3.5)$$

$$b_p = \beta_p \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{D_{50}} \quad (2.3.6)$$

式中 $\alpha=1000$ 和 $\beta_p=1.1$ ， D_{50} 為透水性區域的中值粒徑。因此模式中給定透水性結構物的孔隙率 n 和中值粒徑 D_{50} ，便可以依照其孔隙流體之特性模擬孔隙流體的情形。

7. 模式開放邊界係引用TaiCom之預測水位，建議將其水位歷線繪出表示。而其是否適用於氣候變遷情境模擬之邊界，請補述。

回覆:感謝委員建議，模式開放邊界係引用TaiCom之預測水位做調合分析取得邊界上M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2分潮係數之用。模式水位邊界以8個分潮計算。目前假設天文潮不受氣候變遷情境所影響。而氣候變遷所造成的水位抬升，以改變地形水深，達到水位抬升效果，故適用於於氣候變遷情境模擬之邊界。參閱p3-2.



■ 岳景雲委員：

1. P.1-3 P.1-4表2-1?與表1-1不合，說明表1各值代表意義?“+”“-”表示?

回覆:感謝委員指正。表1-1中門檻值300km為颱風中心距離目標港區300km以內，標記為侵台颱風。以花蓮港門檻值300km強烈颱風0.0067年/次為例，以現有颱風紀錄而言每50年約會增加0.335個強烈颱風侵台機會。“+”即代表侵台颱風增加，“-”則為侵台颱風減少。

2. 浮漂軌跡追蹤，莊與廖(2011)缺參考文獻。

回覆:感謝委員指正，莊與廖(2011)已增列於參考文獻中

3. COBRAS模式計算對孔隙率、中值粒徑d50、消波塊透水型式如何代入模式中?

回覆:感謝委員指正。COBRAS模式在計算透水結構物與波浪交互作用採用Hsu等人(2002)所發展之VARANS(volume-average/Reynolds averaged Navier- Stokes)法,多孔介質內部孔隙採用空間平均(spatially averaged)的N-S方程式。



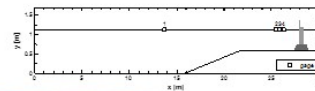
4. f_s 滑動安全(定)因素， f_o 傾倒安全(定)因素，是否請統一用“安全係數”

回覆:感謝委員建議。滑動安全(定)因素已更改為滑動安全係數，傾倒安全(定)因素已更改為傾倒安全係數。

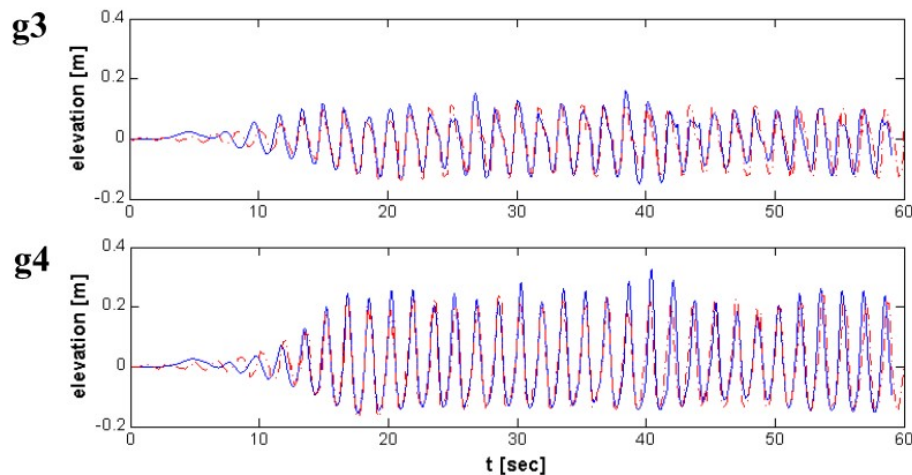
5. p5-5水位變化示意圖5-4與stoke五階規則波是否一致?

回覆:一致。

Lin and Liu(1999)已進行COBRAS模式stoke五階規則波的模擬，其結果與理論比對相當一致。去年度計畫參考李(2006)1:36縮尺之水工模型試驗資料進行模式驗證，水位資料分別就一般波浪條件和颱風波浪條件，驗證結果良好，請參考104年港灣結構物受異常波浪影響分析(1/3)中5.2節模式驗證。



波高0.19公尺，週期1.67秒，波長3.3公尺



一般波浪條件實測水位與模式計算比較圖



6. p5-5圖5-10防波堤示意圖下部結構請修正為梯形拋石，代表合成式防波堤。Goda之設計波高定義，建請進一步說明釐清。

回覆:感謝委員建議，遵照辦理。

Goda(1975)由實驗數據及日本Sakata港實測資料整理分析，建議波高計算公式為

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8K_s H'_0, & h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0^* H'_0 + \beta_1^* h), \beta_{\max}^* H'_0, 1.8K_s H'_0\}, & h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

詳細說明已補充於p4-4~p4-5



■ 鐘英鳳委員：

1. P5-10第5行至第9行中所述「相較於過去第三次評估...參考圖2.30圖的...」等不知所述為何，且無2.30，請加強說明表5-1是如何得到。

回覆:感謝委員指正，已於4-14頁加強說明表4-2是如何得到如下:

以NearCOM計算的最大波高做為入射波浪條件，考慮不同颱風波浪迴歸期、氣候變遷影響和發生最大波浪情況，將入射波浪條件整理如表4-2.

2. p5-10表5-1中案例編號4RCP水深27.9717比RCP4.5水深27.9819何以會如此，應有誤，導致後面文章及分析錯誤，請修正此一數值及後續相關說明，如p5-14第四、五行等...圖5-21

回覆:目前利用2081-2100年全球平均海平面的上升進行研究，已無此現象



3. P5-12 中公式 5.4.4 及 5.4.7 中公式不完整，缺少 f_0 ，請補正 $f_0 \leq Wt/(m_1+m_3-m_0) \rightarrow m_1$ 只是力矩，缺 f (力量)

回覆：公式 4.4.4 及 4.4.7 (原 5.4.4 及 5.4.7) 中的是傾倒安全因素(安全係數)並非力。詳細說明請參 p-20~p-21.

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

(4.4.3)

$$f_0 \leq Wt/(m_1+m_3-m_0)$$

(4.4.4)

$$f_{s+} \leq fW/(f_1-f_2)$$

(4.4.5)

$$f_{s-} \leq -fW/(f_1-f_2)$$

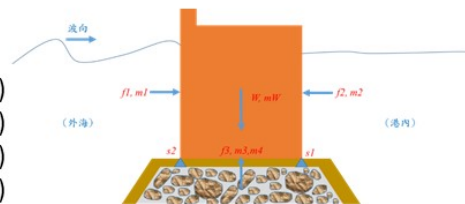
(4.4.6)

$$f_{o1} \leq Wt/(m_1+m_3-m_2)$$

(4.4.7)

$$f_{o2} \leq Wt/(m_2+m_4-m_1)$$

(4.4.8)



4. P5-12 倒數第七行及 P5-13. 中有關表一，請修正為表 5-1。

回覆：感謝委員指正，已改更正。

5. P5-22 中何以水位未抬升，但越流量已增加，是否合理，請說明。

回覆：感謝委員指正。圖 5.22 水位抬升與越流增加量的線性公式未通過原點，確實不合理，已於期末報告中移除。



■ 曾相茂委員：

1. P2-1 頁第七列 2000~2003 年再延長北防波堤 480 公尺...請再檢查確認。

回覆:感謝委員指正。已修正為“2000~2003 年再延長北防波堤 480 公尺”。

2. P2-12 本所港研中心之臺中港之風觀測站有兩個站，一為北防風林觀測站，另一為北防波堤堤頭綠燈塔，在報告中請註明那一個站(由資料顯示應為北防波堤堤頭站之資料)

回覆:感謝委員指正，已於 p2-9 中補充說明。2001~2005 年為北防風林觀測站，2006~2013 年為北防波堤堤頭站資料。

3. 附錄 1-30 潮位資料來源是中央氣象局，從 1999 年開始，但本所港研中心則自 1971 年 3 月~1981(臺中港務局)至今都有資料，建議可由本所提供 44 年潮位資料加以研究分析

回覆:感謝委員建議，目前以 TaiCom 之預測水位做調合分析取得邊界上 M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2 分潮係數。未來可以考慮以本所提供 44 年潮位資料分析使用。



■ 蘇青和委員

1. 港灣結構物受波浪作用，除波高及週期之波浪條件為重要因子外，水深也是重要因子，而平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮、氣候變遷等，皆影響水深重要因子，各種物理量之數量及應做一說明。

回覆:感謝委員建議，平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮、氣候變遷等，皆影響水深重要因子，但本研究主要是針對氣候變遷進行研究，為避免問題過於複雜，故平均潮位(高潮或低潮)、颱風暴潮為控制變因，氣候變遷為應變變因。其他水深因子如潮位變化已於第一年報告中進行討論。尚未考慮颱風暴潮。

2. 第 3 章 NearCom 及 COBRAS 兩模式理論部份，建議移置於附錄。

回覆:感謝委員建議，期末報告中第 3 章理論部份已移置附錄二。

3. 第 4 章及第 3 章，外海波浪條件(波高及週期)、水深(平均高潮位，颱風暴潮、氣候變遷等因子)，不同條件應製作表格做一完整比較，波場模式計算結果之防波堤前波高、週期及水深，也應與外海波高及水深做比較。整個防波堤前不同位置之變化也應納入考量。

回覆:感謝委員建議。已將不同迴歸期不同波向之颱風波浪及氣候變遷等因子，列表討論。請參閱表 3-4、3-4。



4.第5章改為第4章，防波堤前之波高、週期及水深等考量條件，應具代表性及完整性。

回覆:感謝委員建議，已遵照辦理。

5.報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入英文摘要。

回覆:感謝委員建議，期末報告已納入英文摘要。

6.期末報告增加“結論與建議”，結論應顯示各項具體成果。

回覆:感謝委員建議，已遵照辦理。



■ 何良勝委員:

1.於第二章中，建議刪除部份不必要之背景資料(例如，濕度、降水等)。

回覆:感謝委員建議，已刪除。

2.請增列受氣象變遷影響之相關研究

回覆:感謝委員建議，已增列受氣象變遷影響之相關研究於第一章。

3.補充說明，以50年迴歸期條件作為歷史大波之依據原因。

回覆:感謝委員建議，期末報告中已增加港研中心實測波浪資料中最大波，做為歷年大波模擬條件並且增加50、100、200、250年迴歸期條件進行模擬。



4. P. 4-5 中，請補充說明「參數波高增加比」之合理性。

回覆:感謝委員建議。波高增加比用於討論波流場變化受氣候變遷四種 RCP 情境海平面上升的影響，波高增加比為現今年波高與情境年波高差比上海平面上升高度 ($H_{s-diff} = (H_{s-RCPs} - H_{s-O}) / SRL_{RCPs}$)。波高增加比是用於結果討論，並非用模式設定條件。

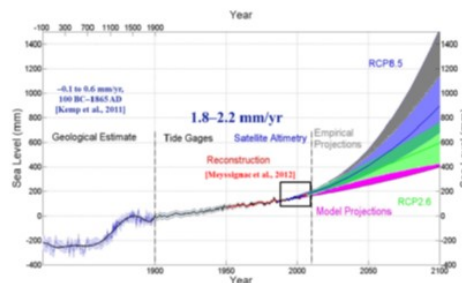
5. P4-37, 4.3 節浮標軌跡之用途為何?

回覆:3.4 節(原4.3節)浮標軌跡可驗證波流場中流速、流向等，未來浮標追蹤模組可延伸應用至污染擴散傳輸，生態模組等。



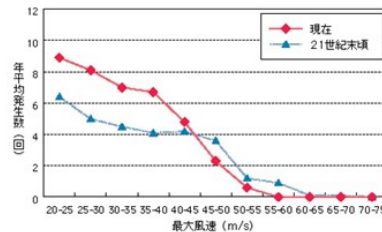
前言：研究動機及目的 (1/3)

- 近年來國內外氣候異常，**極端氣候**造成的海氣象變化，已遠超過現有之水利防洪及海岸防護標準。
美國卡崔娜颶風、莫拉克颱風、日本海嘯
- IPCC AR4(2007)推估21世紀末之氣候暖化程度，在平均值方面攝氏 1.0~3.7°C，下限為0.3°C，上限為4.8°C，而最新的IPCC AR5 (2013)報告以 AR4為基礎，並包含後續的新研究結果。其中指出已確定未來氣候系統會持續暖化。



前言：研究動機及目的(2/3)

- 日本氣象廳的資料顯示，未來颱風的個數可能會減少，但是強度卻會增加(徐與王，2009)



- Mori et al. (2013)以統計方法和降尺度法計算全球尺度的氣候變遷情況下，長期的海表面溫度，海平面上升與相關波浪特性，顯示未來一百年，海平面上升0.27公尺，而未來有義波高的變化幅度最大達 $\pm 15\%$
- 許泰文(2013)針對臺灣東北、西北海域進行模擬研究，評估2020年至2039年，颱風最大波高可能增加61%，颱風最大潮位(暴潮+天文潮)可能增加23~47%。



前言：研究動機及目的(3/3)

- 台灣航運貿易為其經濟發展之命脈，而港內穩靜則有賴港灣結構物作屏障保護，因此**港灣結構物的安全穩定**與港灣的營運密切相關。
- 港研中心配合交通部推動科學技術發展之目標，進行港灣結構物未來可能遭遇的**極端海象條件**作研究探討，以作為未來因應措施之參酌。



前言-研究範圍與對象

- 本計畫主要針對**臺中港**附近海域環境進行分析，其工作範圍北起**大安溪口**，南至**彰濱工業區崙尾區**海域，南北縱長約41公里，寬度約為15公里。水深至50m



前言-研究內容及工作項目(1/2)

- 去年(第一年)已收集目標港區內相關海氣象資料，**設置臺中港波流場數值模式(NearCom)****設置臺中港結構物受力模式(COBRAS)**，並以現今海氣象條件進行模擬分析。
- 本年度(第二年)工作為蒐集並分析目標港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性，並利用第一年建置的水理模式，以**歷年大波及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪**作為模擬條件，並進行結構物受力分析。

前言-研究內容及工作項目(2/2)

■ 104年工作項目

- 1.蒐集並分析目標港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性。
- 2.利用港研中心所提供之目標港區附近現場調查資料校驗港灣結構物附近波、流場數值模式。
- 3.利用數值模式分析歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪作用下，對防波堤之受力情形。
- 4.利用防波堤受歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生之極端波浪受力下，分析其安全穩定。



預定進度甘特圖

工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
蒐集並分析臺中港港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性。													
利用本所提供之目標港區附近現場調查資料校驗港灣結構物附近波、流場數值模式。													
探討分析歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生的極端波浪作用下防波堤受力情形。													
分析防波堤受歷史大波以及未來受氣候變遷可能發生之極端波浪作用受力下其安全穩定													
						※	※			※	※		
工作進度估計百分比(累積數)	5	10	20	30	35	45	55	75	80	95	100		



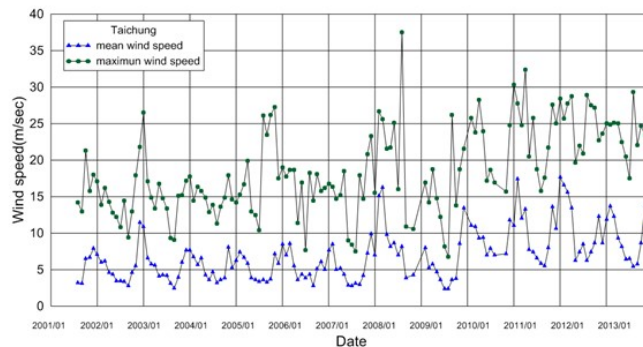
基本資料蒐集與分析

臺中港附近海域海氣象資料蒐集概況表

資料類別	測站	經度 / 緯度	觀測期間	觀測單位
波浪(X0)	臺中港	24°17'54"N 120°29'39"E	1999/10-2000/08	港研中心
波浪(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2003/08-2013/11	港研中心
海流(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2003/08-2013/11	港研中心
風(W1)	臺中港	24°17'59"N 120°29'12"E	2001/07-2013/11	港研中心
潮位(T)	臺中港	24°17'16"N 120°31'57"E	1999/10-1999/10 2001/04-2013/11	港研中心
潮位(X1)	臺中港	24°18'02"N 120°29'05"E	2003/08-2012/11	港研中心
潮位	臺中港	24°17'16"N 120°31'59"E	1999/01-1999/10 2002/01-2013/12	內政部
氣象	臺中	24°08'51"N 120°40'33"E	1999/01-2013/12	中央氣象局
氣象	梧棲	24°15'31"N 120°30'54"E	1999/01-2013/12	中央氣象局



海氣象資料統計—臺中港風速及風向之月統計圖

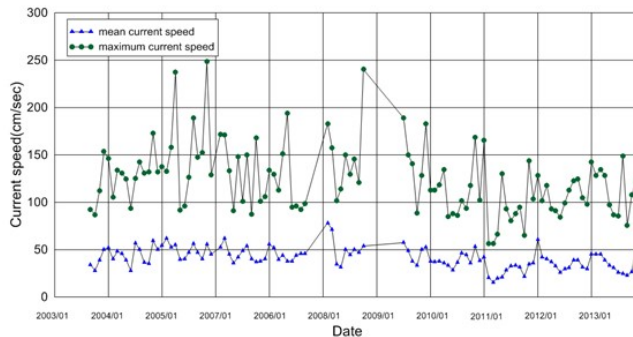


- 歷年之月平均風速介於2.4 m/sec至17.7 m/sec之間
- 月平均風速大於10 m/sec以上者皆發生在冬季
- 盛行風向多集中在北至東北向
- 歷年之平均風速為6.8cm/sec
- 歷年最大風速為37.5m/sec，其風向為北北西向。

資料來源：港灣海氣象觀測資料年報，2001年至2013年，交通部運輸研究所。



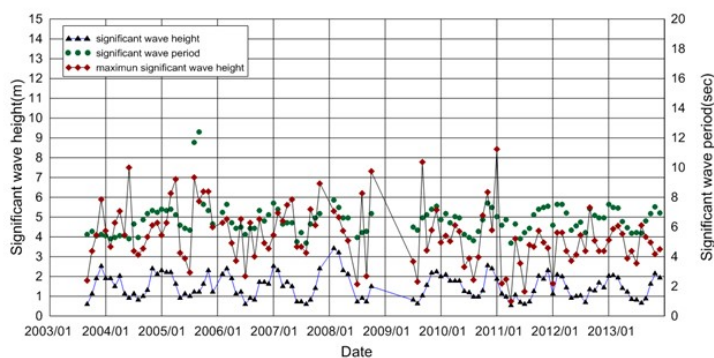
海氣象資料統計－臺中港海流流速及流向之月統計圖



- 歷年之月平均流速介於15 cm/sec至78 cm/sec之間
- 最多流向多集中在西至北向
- 歷年之平均流速為41.8 cm/sec
- 最大流速為248.3 cm/sec，其流向為西向
- 黑潮分支於夏季繞過雲彰隆起向北流動，於臺中海域再度接近近岸處，以致臺中港北堤外海流速受到洋流影響出現恆流現象

資料來源：港灣海氣象觀測資料年報，2003年至2013年，交通部運輸研究所。

海氣象資料統計－臺中港波高及波向之月統計圖



- 歷年之月平均波高小於3.5 m以下，月平均週期介於4.9 sec至12.4 sec之間。
- 歷年之平均波高為1.50 m
- 歷年最大波高為**8.44 m**，其週期為11.1 sec，發生於2010年12月16日。

資料來源：港灣海氣象觀測資料年報，2003年至2013年，交通部運輸研究所。

海氣象資料統計－臺中港外海颱風波迴歸分析統計表

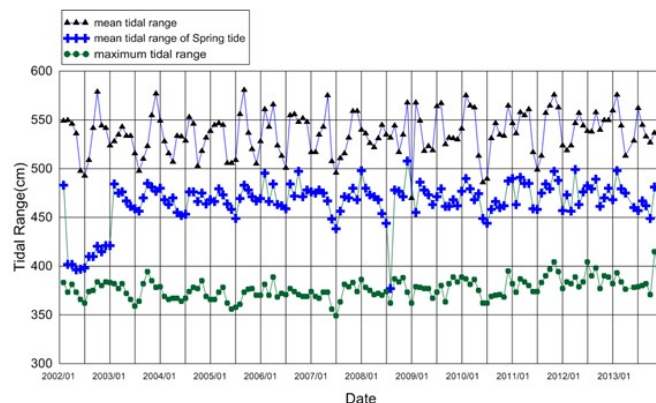
臺中港50年迴歸期颱風波浪以N向影響最大，波高約達7.2m、對應週期約為11.3秒。

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

- 註：1.依據1940～2011年間之颱風資料推算。
2.推算目標區為120.39°E，24.3°N。
3.目標區水深為-31.0m。
4.Hs單位為m，Ts單位為sec。

資料來源：「臺中港南堤路海側堤基保護工程初步設計報告書。」，臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司，102年。

海氣象資料統計－臺中港最大潮差、大潮平均潮差及平均潮差之月統計圖



- 最大潮差為619公分
- 大潮平均潮差為466公分
- 平均潮差為377公分

資料來源：潮汐觀測資料年報，2002年至2013年，交通部中央氣象局。

海氣象資料統計-歷年颱風資料統計



颱風路徑分類圖

1998年至2014年颱風路徑分類統計

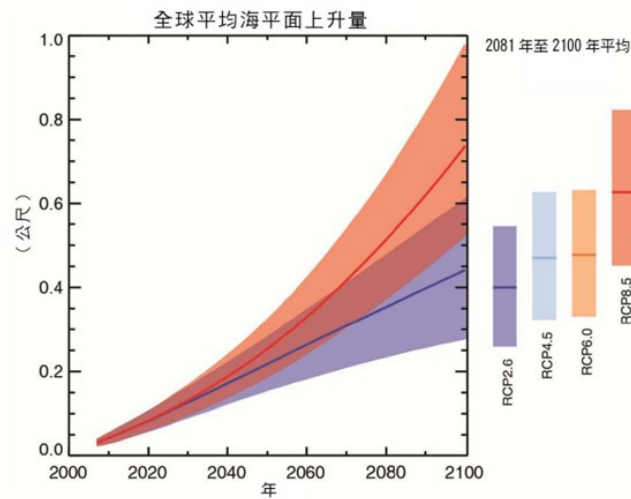
颱風路徑分類	發生次數	發生百分比
1	7	6.9%
2	7	6.9%
3	12	11.9%
4	7	6.9%
5	6	6.0%
6	9	8.9%
7	2	2.0%
8	2	2.0%
9	9	8.9%
其他	40	39.6%
合計	101	100.0%

資料來源：中央氣象局網站，<http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/typhoon/>

新南水科學 水工試驗所
國立成功大學 Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1900

35

基本資料蒐集與分析-氣候變遷



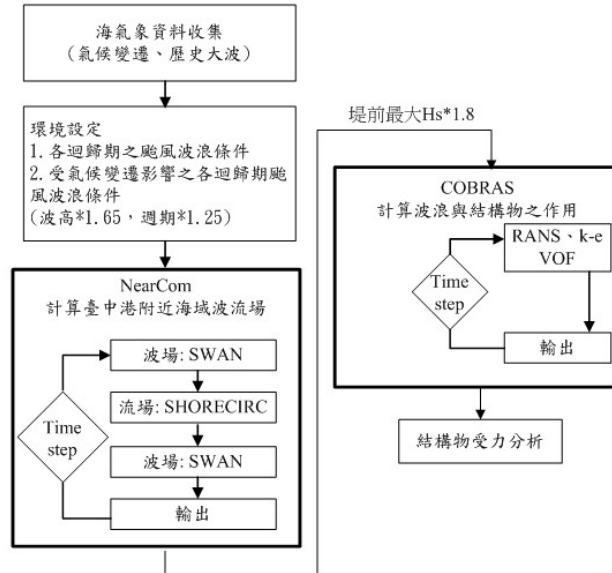
	RCP2.6(m)	RCP4.5(m)	RCP6.5(m)	RCP8.5(m)
2081~2100	0.26-0.55	0.32-0.63	0.33-0.63	0.45-0.82

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

新南水科學 水工試驗所
國立成功大學 Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1900

36

三、研究方法



波流場數值模式- NearCoM (1/2)

- NearCoM近岸系統(Nearshore Community Model)是在 National Oceanography Partnership Program(**NOPP**)支持下所發展，用於預測近岸及河口地區之波浪、海流、近岸流、漂沙和地形變遷的變化



- NearCoM系統整合數種不同的波浪、海流、近岸流理論及數值方法提供了多種波浪、海流、近岸流環境及漂沙之模式，可隨使用者需求自行配置及擴充而應用於不同研究主題。
- 本次研究採用之NearCoM系統為Shi et al. (2011)整合SWAN波浪模式並且修改系統中的SHORECIRC流場模式版本，將其擴展應用至大尺度海域系統。

波場與結構物作用之數值模式-COBRAS (1/2)

- COBRAS (Cornell Breaking wave And Structure)模式
建置**結構受力**，**波浪越波與溯升**數值模式。
 - 美國Los Alamos 國家實驗室用以計算二維不可壓縮的流體之數值模式「RIPPLE」(Kothe 等人 1991)
 - Liu and Lin (1997)** 將其修改以**計算碎波**相關問題，後來作波浪與**孔隙介質**交互作用問題 (Liu et al., 1999) 和計算**波浪與近岸複合結構物**交互作用問題 (Liu et al., 2002)。



波場與結構物作用之數值模式-COBRAS (2/2)

- 此數值模型為求解 Reynolds Averaged Stokes (**RANS**) 方程式。
- 結合**非線性k-ε紊流模式**用以求解流場中的紊流動能k與紊流消散率ε。
- 利用流體體積法 (Volume of Fluid, **VOF**) 描述自由液面。
- 透水結構物與波浪交互作用以VARANS(volume-average/Reynolds averaged Navier- Stokes)法, 多孔介質內部孔隙採用空間平均(spatially averaged)的N-S方程式



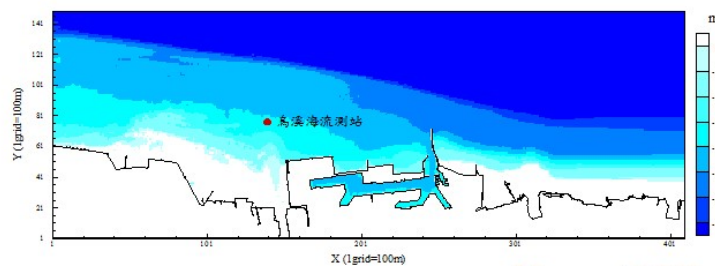
波流場數值模式－模式範圍

■ 模式模擬區域之選取



表 4-1 大區域海潮流模式之格網及計算條件

模式面積	41.1 公里×14.9 公里
格網大小	100 公尺×100 公尺
格網數目	411×149
原點座標 (Twd 67)	E=191,800 N=2,663,500
轉角 (由正北向順時針)	62°



Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1957

41

波流場數值模式－模式參數設定

- 水動力模式之主要參數包括**渦動粘性係數(0.001)**及**底床磨擦係數(0.0035)**，必須經由模式之率定來決定。
- 開放邊界水位資料
 - 模式開放邊界資料，採用臺灣近岸海象預報系統 (**TaiCOM Model**) 所提供的逐時預測水位。



Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1957

42

模擬波浪條件、海平面上升高度

各迴歸期之颱風波浪條件

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

受氣候變遷之各迴歸期波浪條件 依許泰文(2013)顯示不同地區最大波高平均增率介於59%-65%，週期平均增率介於20.8%-25%。因此取其各年迴歸週期之颱風波浪波高再乘上倍數1.65、週期乘上1.25

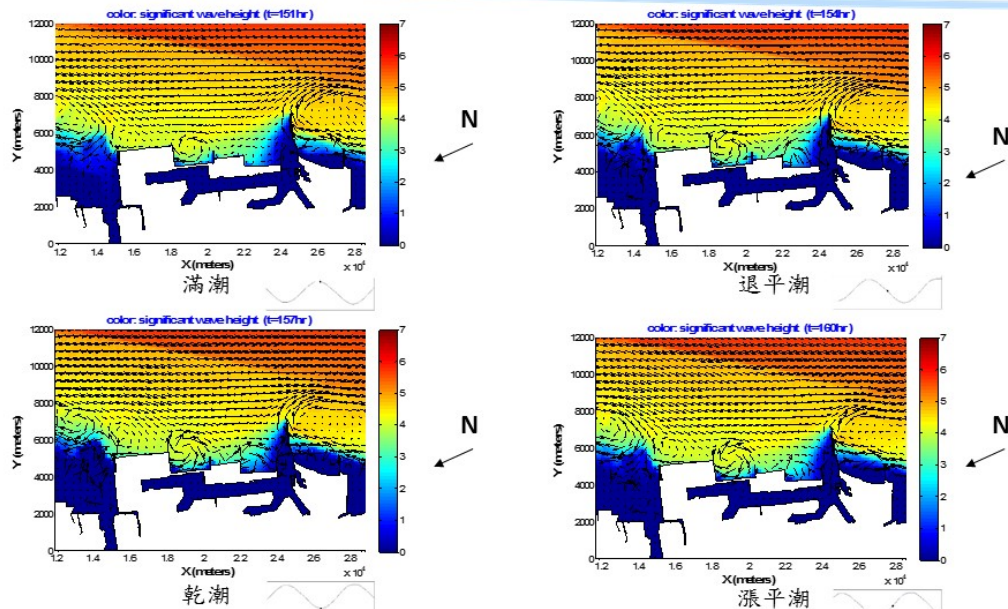
波向 \ 迴歸期	250		200		100		50	
	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)
N	14.2	15.4	13.9	15.3	12.9	14.6	11.9	14.1
W	11.1	13.6	10.9	13.5	10.1	13	9.4	12.5
SW	9.2	12.4	8.9	12.3	8.4	11.9	7.8	11.4

四種氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100年)

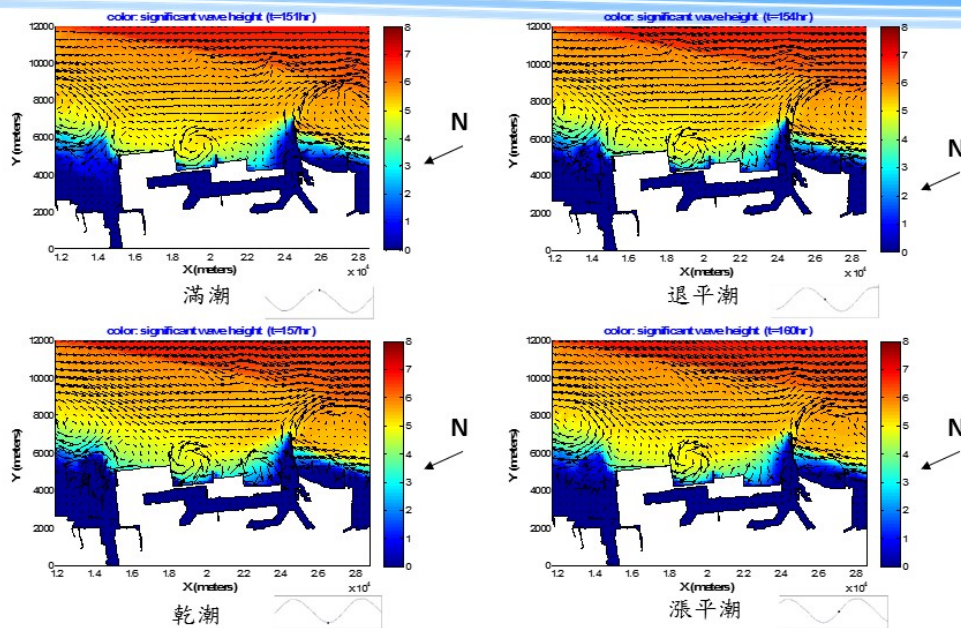
RCP2.6	0.55m
RCP4.5/RCP6.0	0.63m
RCP8.5	0.82m



臺中港附近海域波流場模擬(1/4)



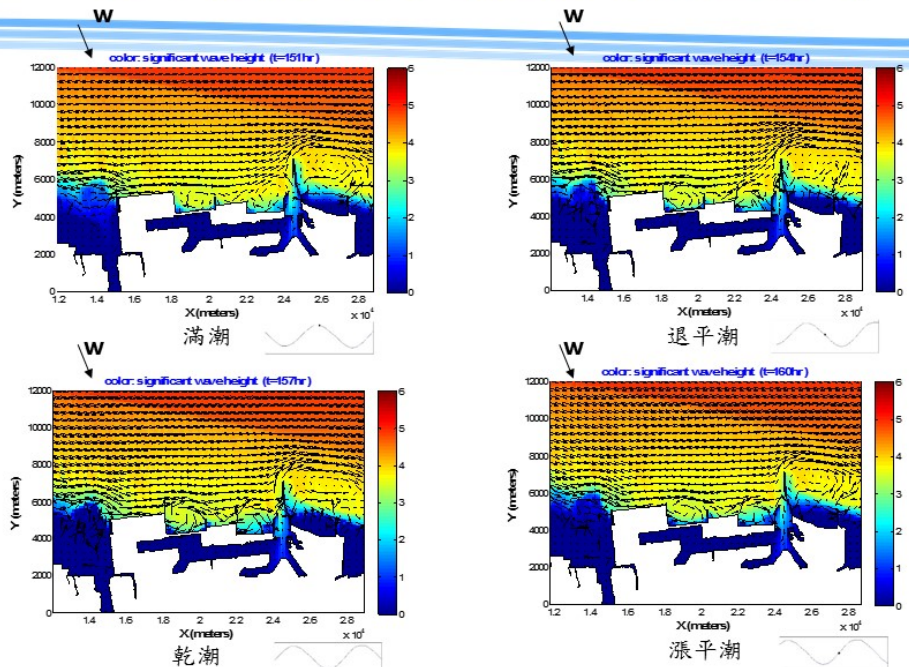
臺中港附近海域波流場模擬(2/4)



新南水科學
國立成功大學 水工試驗所
Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1951

45

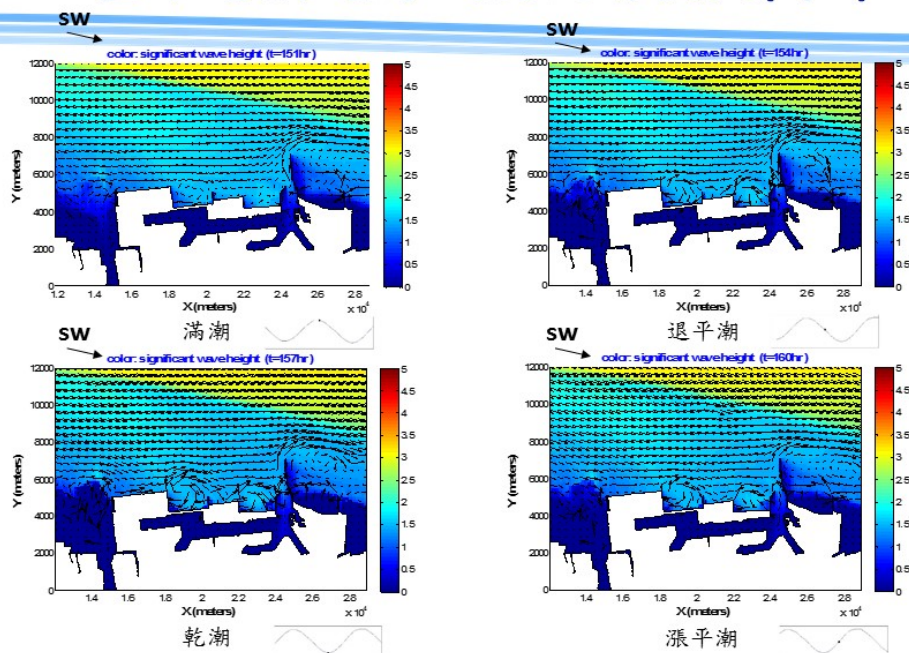
臺中港附近海域波流場模擬(3/4)



新南水科學
國立成功大學 水工試驗所
Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, Since 1951

46

臺中港附近海域波流場模擬(4/4)

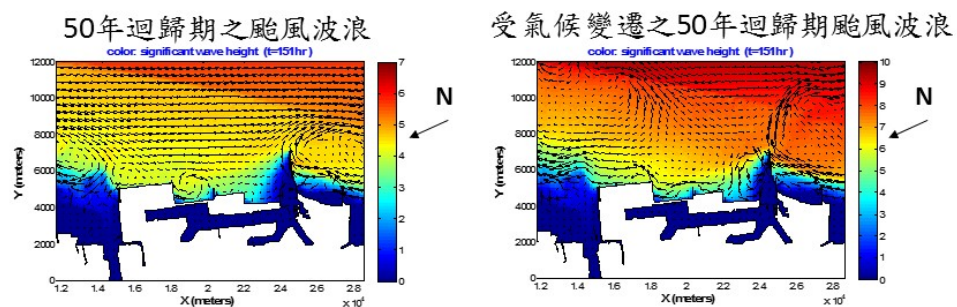


50 year :H=5.7m , T=10s , SW

新南水科學 水工試驗所
國立成功大學
Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, since 1959

47

臺中港附近海域受氣候變遷影響波流場模擬



H=7.2m, T=11.3s, N.

H=11.9m, T=14.2s, N.

新南水科學 水工試驗所
國立成功大學
Tainan Hydraulics Laboratory
National Cheng Kung University, since 1959

颱風波浪之堤前最大波高

不同颱風波浪迴歸期下之各波向最大波高

波向 模擬情境	N	W	SW
50年RCP0.0	4.32	3.22	1.06
50年RCP2.6	4.32	3.22	1.06
50年RCP4.5	4.32	3.22	1.06
50年RCP8.5	4.32	3.22	1.06
100年RCP0.0	4.70	3.48	1.16
100年RCP2.6	4.70	3.48	1.16
100年RCP4.5	4.70	3.48	1.16
100年RCP8.5	4.70	3.48	1.16
200年RCP0.0	5.13	3.793	1.23
200年RCP2.6	5.13	3.79	1.23
200年RCP4.5	5.13	3.79	1.23
200年RCP8.5	5.13	3.79	1.23
250年RCP0.0	5.25	3.86	1.23
250年RCP2.6	5.25	3.86	1.23
250年RCP4.5	5.25	3.86	1.23
250年RCP8.5	5.24	3.86	1.23

未來氣候變遷不同颱風波浪迴歸期下之各波向最大波高

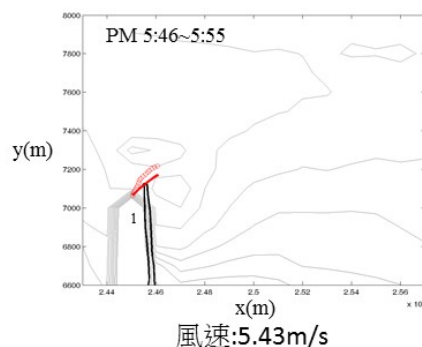
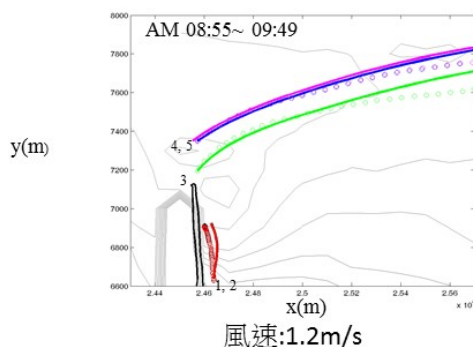
波向 模擬情境	N	W	SW
50年RCP0.0	7.15	5.45	1.75
50年RCP2.6	7.15	5.45	1.75
50年RCP4.5	7.15	5.45	1.75
50年RCP8.5	7.15	5.45	1.75
100年RCP0.0	7.61	5.89	1.91
100年RCP2.6	7.61	5.89	1.91
100年RCP4.5	7.61	5.89	1.91
100年RCP8.5	7.61	5.89	1.91
200年RCP0.0	8.04	6.39	2.04
200年RCP2.6	8.04	6.39	2.04
200年RCP4.5	8.04	6.39	2.04
200年RCP8.5	8.04	6.39	2.04
250年RCP0.0	8.13	6.49	2.11
250年RCP2.6	8.13	6.49	2.11
250年RCP4.5	8.13	6.49	2.11
250年RCP8.5	8.13	6.49	2.11



流場驗證-浮標軌跡追蹤 (1/2)

港研中心於2013年7月23日，於臺中港北防坡堤附近海域進行海面漂流浮標軌跡量測

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

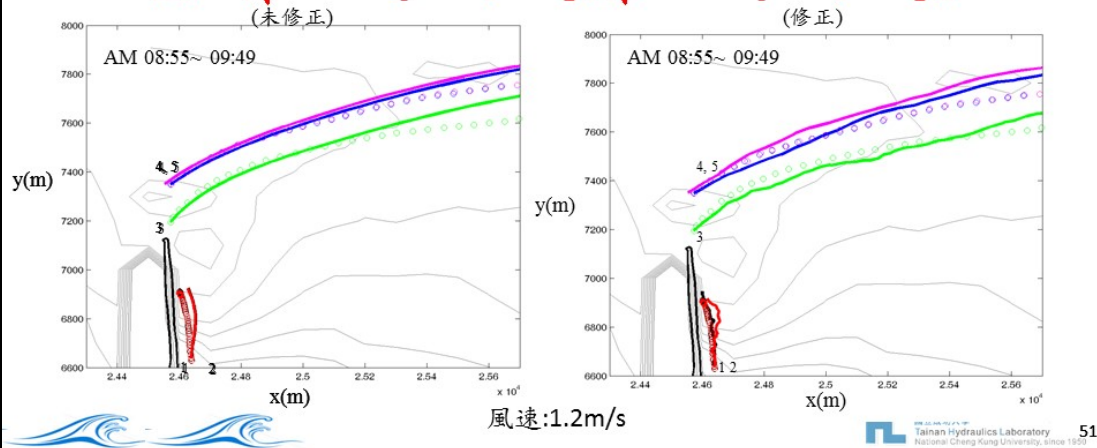


流場驗證-浮標軌跡追蹤 (2/2)

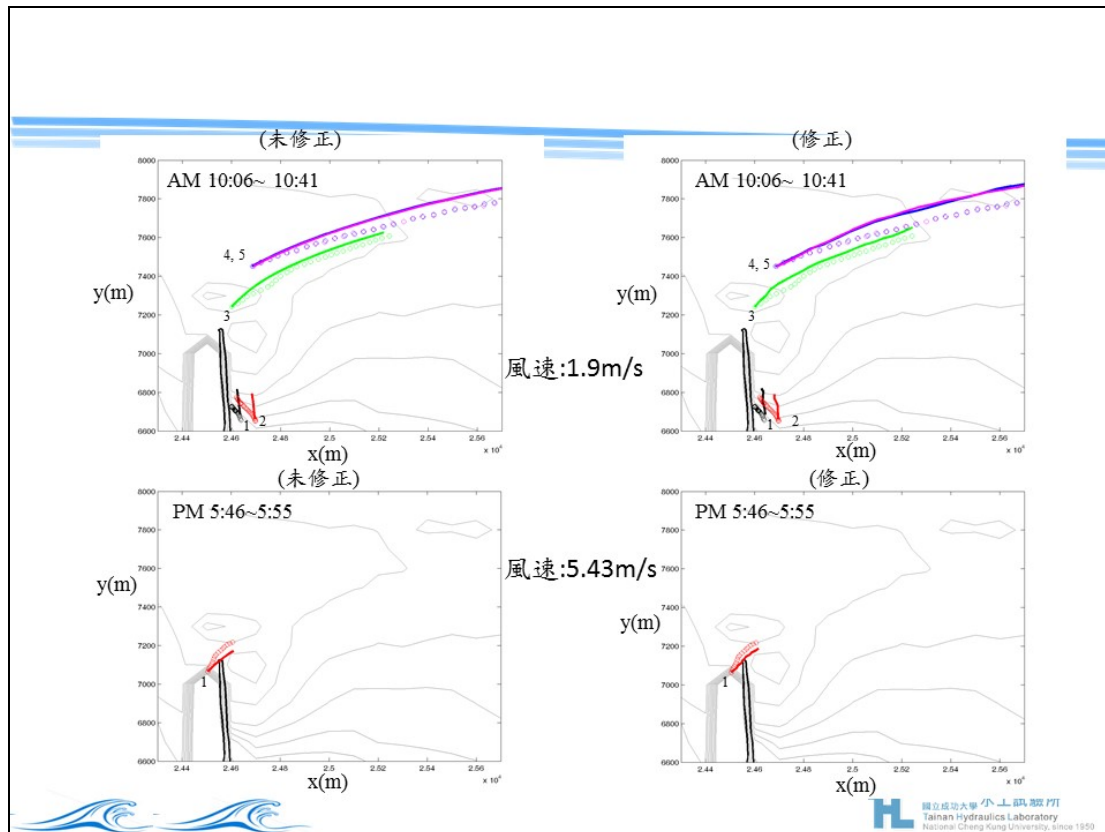
■ 根據Thorpe et al.(2004)方式加入擴散修正如下

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

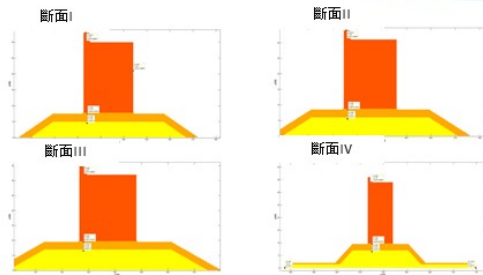
$$w(t') = (\sqrt{12\kappa \Delta t R_1} \cos(2\pi R_2), \sqrt{12\kappa \Delta t R_1} \sin(2\pi R_2))$$



51



結構物受力分析-模式建置



民國89年台中港港口第二期擴建工程北防波堤延伸四種斷面

堤線里程(m)	設計水深(m)	胸牆頂高程(m)	斷面種類
0~100	-22	11	斷面I
100~130	-23	11	斷面II
130~440	-24	11	斷面III
440~480	-24	11	斷面IV

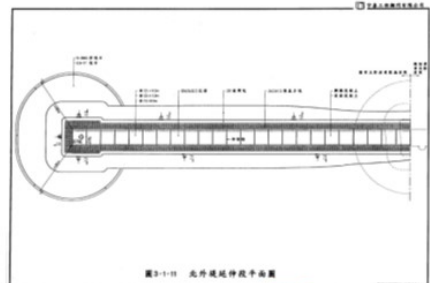


圖3-1-11 北外堤延伸段平面圖



北外堤延伸480公尺

波浪條件

case	堤線里程(年)	RCP	堤高(公尺)	斷面	水位(公尺)	最大波高(公尺)	備註
1	50	-	11.300	I	28.86	7.77	○
2	50	2.6	11.300	I	29.41	7.77	○
3	50	4.5	11.300	I	29.49	7.77	○
4	50	8.5	11.300	I	29.68	7.77	○
5	50	-	14.125	I	28.86	12.87	■
6	50	2.6	14.125	I	29.41	12.87	■
7	50	4.5	14.125	I	29.49	12.87	■
8	50	8.5	14.125	I	29.68	12.87	■
9	100	-	11.700	IV	30.86	8.46	○
10	100	2.6	11.700	IV	31.41	8.46	○
11	100	4.5	11.700	IV	31.49	8.46	○
12	100	8.5	11.700	IV	31.68	8.46	○
13	100	-	14.625	IV	30.86	13.70	■
14	100	2.6	14.625	IV	31.41	13.70	■
15	100	4.5	14.625	IV	31.49	13.69	■
16	100	8.5	14.625	IV	31.68	13.69	■
17	200	-	12.200	I	28.86	9.23	○
18	200	2.6	12.200	I	29.41	9.24	○
19	200	4.5	12.200	I	29.49	9.24	○
20	200	8.5	12.200	I	29.68	9.23	○
21	200	-	15.250	I	28.86	14.46	■
22	200	2.6	15.250	I	29.41	14.47	■
23	200	4.5	15.250	I	29.49	14.46	■
24	200	8.5	15.250	I	29.68	14.46	■
25	250	-	12.300	I	28.86	9.44	○
26	250	2.6	12.300	I	29.41	9.45	○
27	250	4.5	12.300	I	29.49	9.44	○
28	250	8.5	12.300	I	29.68	9.44	○
29	250	-	15.375	I	28.86	14.63	■
30	250	2.6	15.375	I	29.41	14.63	■
31	250	4.5	15.375	I	29.49	14.63	■
32	250	8.5	15.375	I	29.68	14.63	■
33	-	-	11.1	I	28.86	8.44	◎
34	-	-	11.1	IV	30.86	8.44	◎

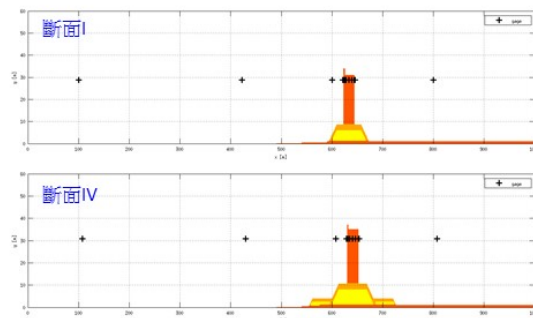
○根據表3-4，代表一般情況之波浪條件

■根據表3-6，代表受氣候變遷影響之波浪條件增益情況(許2013)

◎根據表2-6，代表臺中港實際量測到之歷史大波情況

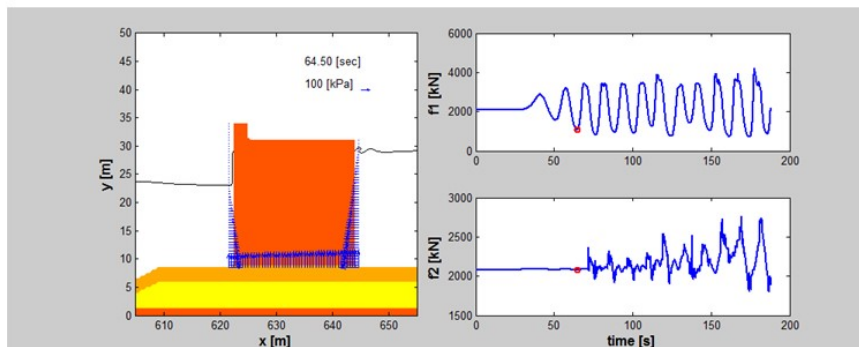
條件說明：

- 1.依照以NearCom模擬結果之表3-4和表3-6，取發生最大有義波高 H_s 之波向N為波浪條件。
- 2.採用天文潮最高高潮位(H.H.W.L) +5.86。
- 3.以表3-4和表3-6之有義波高結果乘上1.8倍計算作為設計波高($H_{1/250}=H_s*1.8$)
- 4.歷史大波參考臺中港波浪觀測資料表2-6中之最大值(2010年)



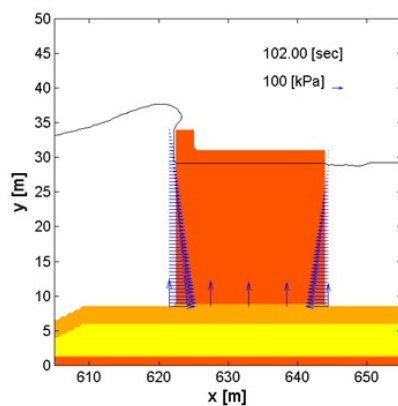
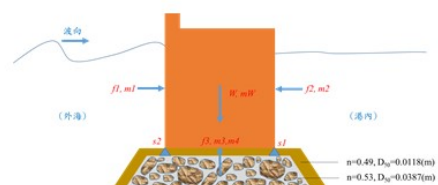
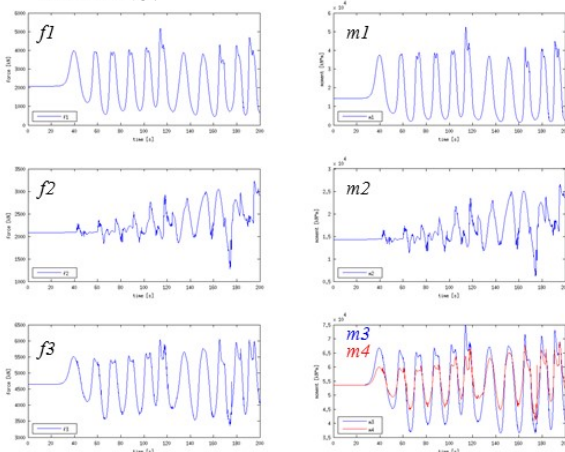
模式計算

以CASE17為例

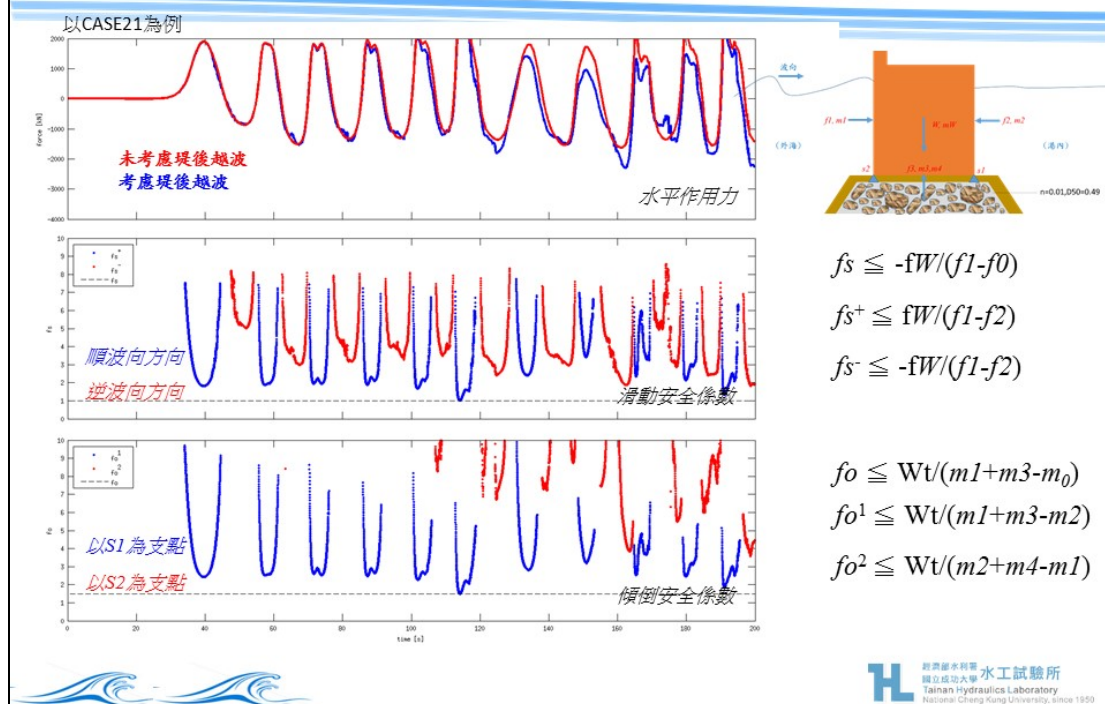


結構物受力計算

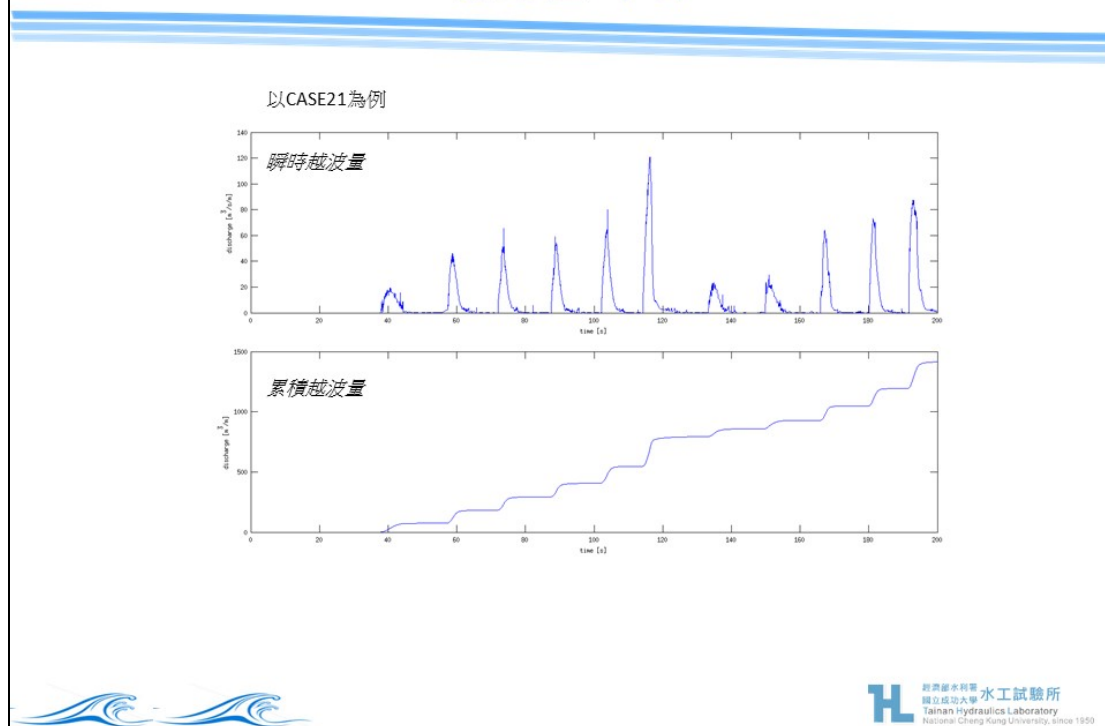
以CASE21為例



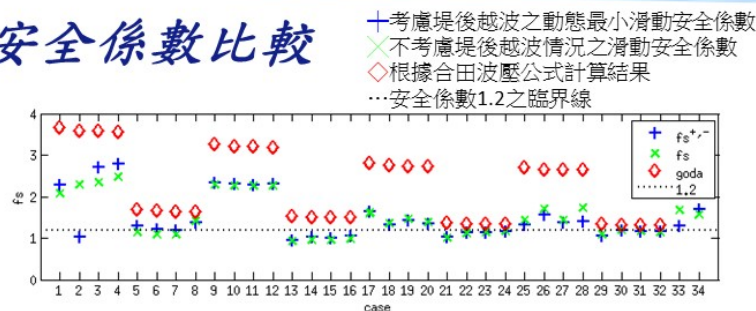
安定性計算



越波量計算

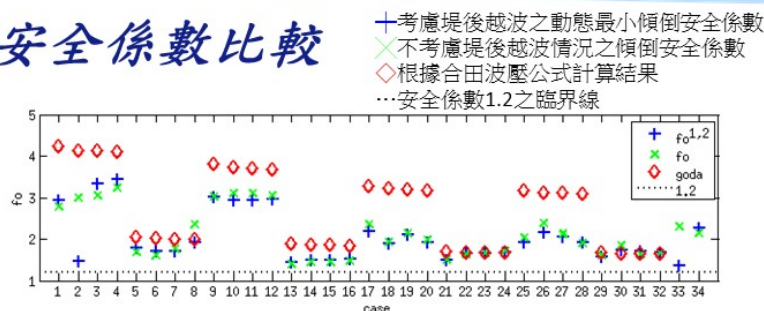


滑動安全係數比較



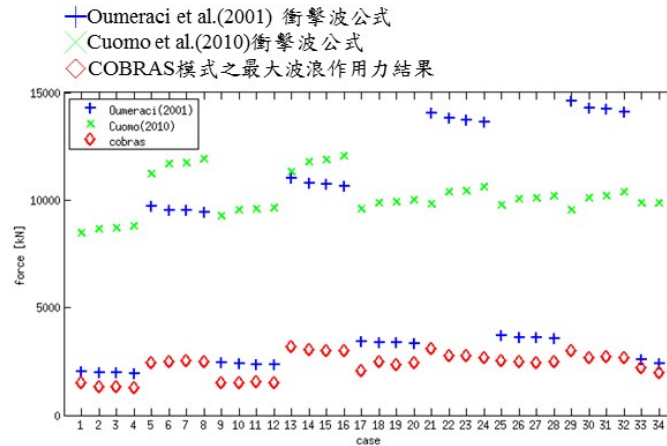
- 合田公式普遍規律且較數值計算結果有高估的情形。
- 部分動態滑動安全係數小於不考慮堤後越波情況之滑動安全係數，說明考慮越波情況的堤後水位變化對滑動安定性分析的必要性。
- 氣候變遷影響之波浪條件增益情形之滑動安全係數主要皆低於臨界值1.2，因此氣候變遷影響下，AR5(2014)預估的各種水位抬升條件對臺中港的防波堤滑動安定性影響較小，而氣候變遷影響波浪條件改變對其滑動安定性具有較大影響。

傾倒安全係數比較



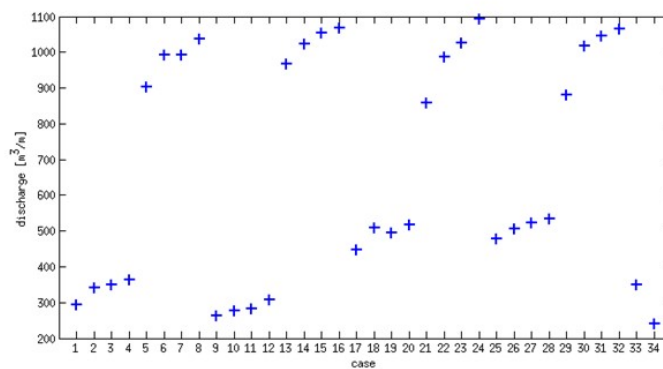
- 合田公式普遍規律且較數值計算結果有高估的情形。
- 部分動態傾倒安全係數小於不考慮堤後越波情況之傾倒安全係數，說明考慮越波情況的堤後水位變化對傾倒安定性分析的必要性。
- 對於臺中港北防波堤延伸段而言，考慮各種迴歸週期和氣候變遷影響條件下，防波堤滑動較傾倒的安定性較低。

最大波浪作用力比較



- Oumeraci et al.(2001)公式對於波高參數較敏感。
- Cuomo et al.(2010)公式較具一致性。
- 比較COBRAS模擬結果和Cuomo et al.(2010)公式結果，認為若考慮衝擊波力對結構物的影響情形，其結構物之安全性必須重新評估。

累積越波量比較



- 因此氣候變遷影響下，AR5(2014)預估的各種水位抬升條件和許(2013)預估之波浪條件增益情形對越波情形都有影響，其中水位抬升之影響較小，而波浪條件增益具有較大影響。

結論 (1/2)

- 氣候變遷情境下 **北向的颱風波浪對於北堤的受力分析**是較其他波向的波浪重要。
- 西向颱風波浪示性波高較北向的小，但西向的波會有傳播入港的情況產生。因此，探討不同的氣候變遷情境下波浪對於 **港內靜穩的影響則需考慮西向波浪**的影響。
- 而近年的研究於浮標追蹤模擬時考慮水平擴散的影響如(Spydell et al. 2015)。本研究依Thorpe et al.(2004)考慮水平擴散時則改善浮標追蹤模擬，並完成臺中港區水平擴散係數率定。



結論 (2/2)

- 考慮堤後水位變化的影響，計算安定因數時，發現若是 **堤前和堤後剛好在位相差異於波峰和波谷情況**，如堤前水位於波峰而堤後水位下降下降至波谷情況，於造成安定性下降，反應當越波情況發生時，**考慮越波造成堤後水位變化之影響，可能對防波堤結構物的安定性下降，其中case13~16，case21~24和case29~32的傾倒安全係數都低於1.2，有損壞的可能性。**
- 衝擊波壓的部分，將34種波浪條件之情境分別計算 Oumeraci et al.(2001)和Cuomo et al. (2010)之預估衝擊波力，並和本研究之最大作用力比較，發現Oumeraci et al.(2001)與Cuomo et al. (2010)之結果明顯大於COBRAS之結果，，因此若發生衝擊波時，其結構物受力將會大於模式預估，故安全係數會再下降。

