

106-073-7948
MOTC-IOT-105-H2DB001c

105 年臺灣主要港口港池安全 資訊管理系統建置之研究



交通部運輸研究所

中華民國 106 年 6 月

106-073-7948

MOTC-IOT-105-H2DB001c

105 年臺灣主要港口港池安全 資訊管理系統建置之研究

著 者：何良勝、林受勳、陳志弘

交通部運輸研究所

中華民國 106 年 6 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究.
105 年 / 何良勝, 林受勳, 陳志弘著. -- 初版. --
臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 106. 06
面 ; 公分
ISBN 978-986-05-2770-4(平裝)

1. 波動 2. 資訊管理系統 3. 臺灣

351.9

106009770

105 年臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究

著 者：何良勝、林受勳、陳志弘
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)26587121
出版年月：中華民國 106 年 06 月
印 刷 者：綠凌興業社
版(刷)次冊數：初版一刷 60 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研技中心網站
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：1010600849

ISBN：978-986-05-2770-4 (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。

106

105 年臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究

交通部運輸研究所

GPN : 1010600849

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：105 年臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究			
國際標準書號(或叢刊號) 978-986-05-2770-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1010600849	運輸研究所出版品編號 106-073-7948	計畫編號 105-H2DB001c
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：何良勝 研究人員：林受勳、陳志弘 聯絡電話：(04)26587121 傳真號碼：(04)26560661			研究期間 自 105 年 01 月 至 105 年 12 月
關鍵詞：防波堤維護管理、波浪極值統計推算模式、颱風波浪推算			
摘要： 本報告為 4 年期程之最後年度工作成果，報告內容主要包含建置臺中港域適用的颱風波浪推算模式，其中包含類神經網路、最小化模式樹(M5)及數值模式等 3 種比較驗證；本研究亦針對臺中港域進行氣候變遷對港域波浪影響以及波浪極值統計推算分析探討。同時，本年度探討花蓮港東防波堤的現場防波堤沉箱之安全性評估、結構物受損補強方案研擬，以及建置一套防波堤構造物維護管理資訊系統等項工作；其中，颱風波浪推算模式及防波堤現況調查與堤體安全性評估探討等工作成果，可建構港域適用的定期性防波堤維護管理資訊系統。 本研究辦理之防波堤構造物安全性評估與現場圖像調查，以及所建置防波堤構造物維護管理資訊系統等項工作成果，可提供港務機關瞭解港灣構造物之穩定性與安全性，以有效運用資源，延長港務設施使用年限及降低維護成本。另外，所完成港域之波浪極值統計特性結果，可提供相關港灣、海岸工程規劃設計、環境評估與學術研究所需之設計波浪的重新探討與比對依據。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
106 年 6 月	191	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: A Study to Set Up Management Information System for The Safety of Taiwan Main Harbor Pools 2016			
ISBN(OR ISSN) 978-986-05-2770-4(pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010600849	IOT SERIAL NUMBER 106-073-7948	PROJECT NUMBER 105-H2DB001c
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Y.F. PROJECT INVESTIGATOR: Ho L.S. PROJECT STAFF: Lin S.S, Chen C.H. PHONE: 04-26587121 FAX: 04-26560661			PROJECT PERIOD FROM Jan. 2016 TO Dec. 2016
KEY WORDS: breakwater safeguard and management, ex-wave statistics estimating model, typhoon waves estimating			
ABSTRACT: The last year results for a four year term project include the establishment of typhoon-wave forecasting model for Taichung harbor. The artificial neural network method, M5 and MIKE21 numerical model were applied for comparison. The extreme wave in this harbor was also analyzed; meanwhile, the investigation of Hualien east breakwater, the safety assessment of the breakwater caisson, reinforcement of harbor structure and set up of a management information system for harbor maintenance were all proceeded in this year. Among them, the typhoon-wave forecasting model and the safety evaluation of current breakwater condition can be applied in regular harbor structure maintenance. The safety assessment of the breakwater structure, the scene picture investigation and the management information system for harbor maintenance may offer harbor units a regular examination on harbor constructions so as to reduce the cost for harbor maintenance. Moreover, the results of extreme-wave characteristics in harbors can provide related bay and coast construction programming and designing, environmental influence assessment and design wave evaluation for academic research need.			
DATE OF PUBLICATION June 2017	NUMBER OF PAGES 191	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.			

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
目錄	III
圖目錄	VI
表目錄	XI
第一章 前言	1-1
1.1 計畫目的	1-1
1.2 文獻回顧	1-2
1.3 工作項目	1-7
1.4 本計畫各年度研究成果	1-8
1.5 本計畫創新發展	1-11
第二章 氣候變遷對颱風與波浪影響	2-1
2.1 資料來源	2-1
2.2 侵台颱風長期變化趨勢	2-2
2.3 波浪長期變遷趨勢	2-4
2.3.1 資料來源	2-4
2.3.2 趨勢分析	2-5
2.3.3 分析結果	2-9
2.3.4 各港分析結果	2-13
第三章 類神經颱風波浪推算模式	3-1
3.1 資料分析	3-1
3.2 類神經颱風波浪模式	3-6

3.2.1 類神經網路架構.....	3-6
3.2.2 轉換函數與訓練函數.....	3-9
3.2.3 隱藏層神經元測試.....	3-10
3.2.4 資料分類.....	3-11
3.2.5 模式輸入與輸入層轉換函數.....	3-11
3.3 波浪推算結果與實測波浪之驗證.....	3-18
第四章 M5 最小化模式樹波浪推算模式.....	4-1
4.1 模式介紹.....	4-1
4.2 模式驗證.....	4-3
第五章 類神經與 M5 最小化模式樹模式特性分析.....	5-1
5.1 類神經與 M5 最小化模式樹波浪推算模式之比較.....	5-1
5.2 各港類神經颱風波浪推算模式精度比較.....	5-9
5.3 波浪推算模式之誤差分析.....	5-10
第六章 數值模式之波浪推算方式.....	6-1
6.1 MIKE 21 SW 波浪模式.....	6-1
6.2 數值模擬條件.....	6-3
6.3 數值模式驗證.....	6-5
6.3.1 颱風波浪資料分析.....	6-5
6.3.2 模式推算結果.....	6-11
第七章 臺中港設計波探討.....	7-1
7.1 取樣方式.....	7-1
7.2 極值分布函數.....	7-1
7.3 極值分布參數推定法.....	7-3
7.4 信賴檢定.....	7-4

7.4.1 MIR 值檢定	7-4
7.4.2 RMSE 檢定	7-5
7.4.3 ER 檢定	7-6
7.5 推估值之標準差	7-6
7.6 極值分析結果	7-7
7.7 各港設計波高推估結果	7-10
第八章 設計波高資訊展示互動介面	8-1
第九章 沉箱安全評估探討	9-1
9.1 結論	9-43
9.2 建議	9-46
9.3 成果效益及後續應用情形	9-47
參考文獻	10-1

圖目錄

圖 1.1 全球平均波高的變化趨勢分布圖(YOUNG ET AL., 2011)	1-3
圖 1.2 臺灣周邊海域示性波高的變化趨勢分布圖(ZHENG AND LI, 2015)	1-3
圖 1.3 北大西洋高緯度及中緯度的氣旋數量統計圖 WANG ET AL.(2006)	1-4
圖 1.4 工作流程圖	1-10
圖 2.1 臺中港海氣象觀測位置圖	2-2
圖 2.2 中度颱風侵襲臺中港次數的趨勢分析(500KM 門檻值).....	2-3
圖 2.3 臺中港逐時波浪資料與其趨勢線.....	2-10
圖 2.4 臺中港日平均波浪資料及其趨勢線	2-10
圖 2.5 臺中港月平均波浪資料及其趨勢線.....	2-10
圖 2.6 臺中港年平均波浪資料與其趨勢線.....	2-11
圖 2.7 臺中港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-11
圖 2.8 2003 年至 2015 年颱風極值波高趨勢分析	2-13
圖 2.9 七個主要港口的波浪年增率(線性回歸)	2-14
圖 2.10 七個主要港口的波浪年增率(EMD).....	2-14
圖 2.11 SK 法之趨勢結果(☆)與各種方法年增率範圍(○).....	2-15
圖 3.1 臺灣地區颱風路徑分類圖(1911-2015 年)(引自中央氣象局).....	3-4
圖 3.2 颱風中心位置與相對應臺中港波高資料空間分布圖.....	3-5
圖 3.3 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數.....	3-10
圖 3.4 颱風中心對目標點方位角 Θ_1 與颱風移動方位角 Θ_2 示意圖 ...	3-12
圖 3.5 颱風距離與目標點波高分布	3-16
圖 3.6 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(引自中央氣象局) ...	3-17

圖 4.1 層級模組法示意圖(AI 為屬性，Mi 為分群之模組).....	4-1
圖 4.2 M5 最小化模式樹之分組樣本在變數 X_1 及 X_2 分布與輸出 Y 之示意圖	4-2
圖 5.1 臺中港 M5 與類神經模式推算結果低估的颱風波浪時序圖	5-4
圖 5.2 以兩種模式推算奇比(2006)颱風與臺中港實測波浪的比較圖 .	5-5
圖 5.3 以兩種模式推算芭瑪(2009)颱風與臺中港實測波浪的比較圖 .	5-6
圖 5.4 以兩種模式推算梅姬(2010)颱風與臺中港實測波浪的比較圖 .	5-6
圖 5.5 以兩種模式推算卡努(2005)颱風與臺中港實測波浪的比較圖 .	5-7
圖 5.6 以兩種模式推算碧利斯(2006)颱風與臺中港實測波浪的比較圖	5-7
圖 5.7 以兩種模式推算卡玫基(2008)颱風與臺中港實測波浪的比較圖	5-8
圖 5.8 以兩種模式推算辛樂克(2008)颱風與臺中港實測波浪的比較圖	5-8
圖 5.9 臺中港各波浪推算模式推算波高誤差分析	5-11
圖 5.10 臺中港各波浪推算模式推算峰值發生時間誤差分析	5-11
圖 6.1 風浪推算模擬範圍之地形水深	6-3
圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較	6-12
圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較(續 1)	6-13
圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較(續 2)	6-14
圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較	6-15
圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較(續 1)	6-16
圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較(續 2)	6-17
圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較	6-18
圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 1)	6-19
圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 2)	6-20

圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 3)	6-21
圖 6.5 安平港示性波高時序列比較	6-22
圖 6.5 安平港示性波高時序列比較(續 1)	6-23
圖 6.5 安平港示性波高時序列比較(續 2)	6-24
圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較	6-25
圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較(續 1)	6-26
圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較(續 2)	6-27
圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較	6-28
圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 1)	6-29
圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 2)	6-30
圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 3)	6-31
圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 4)	6-32
圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較	6-33
圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 1)	6-34
圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 2)	6-35
圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 3)	6-36
圖 7.1 常數 K 在不同情況下的機率密度表現	7-3
圖 7.2 臺中港數值模擬樣本之機率密度函數及機率函數圖	7-8
圖 8.1 設計波資訊互動展示網頁介面的初步規劃圖	8-1
圖 8.2 設計波資訊互動展示網頁(主頁與第一層框架)	8-2
圖 8.3 第二層資訊框架-推算點資訊	8-3
圖 8.4 第二層資訊框架-樣本資訊	8-3
圖 8.5 第二層資訊框架-設計波資訊	8-4
圖 8.6 介面地圖	8-4

圖 9.1 侵襲臺灣之颱風路徑統計圖(1897~2015)	9-1
圖 9.2 花蓮地區 4 季波高超值累積曲線圖	9-7
圖 9.3 花蓮地區 4 季週期超值累積曲線圖	9-7
圖 9.4 花蓮港潮位逐月變化圖	9-9
圖 9.5 堤址設計波浪評估分析流程圖	9-13
圖 9.6 重力式防波堤之破壞模式示意圖	9-15
圖 9.7 重力式防波堤之破壞連鎖圖	9-16
圖 9.8 花蓮港東防波堤消波沉箱斷面圖	9-18
圖 9.9 消波式沉箱波壓作用分佈圖	9-18
圖 9.10 容許越流量界定範圍圖	9-21
圖 9.11 海堤之期待越波量圖	9-22
圖 9.12 防波堤直立部份波壓分佈圖	9-23
圖 9.13 護基及堤址拋石之安定係數圖	9-28
圖 9.14 堤後破壞角與波力及剪力關係圖	9-31
圖 9.15 消波艙尺寸示意圖	9-32
圖 9.16 沉箱前址加強工法圖	9-33
圖 9.17 花蓮港東防波堤破壞情況(1)	9-37
圖 9.18 花蓮港東防波堤破壞情況(2)	9-37
圖 9.19 花蓮港東防波堤破壞情況(3)	9-38
圖 9.20 沉箱前趾加強工法圖	9-39
圖 9.21 0K+177.2~0K+207.8 水深平面圖	9-41
圖 9.22 0K+177.2~0K+207.8 水深斷面圖	9-42
圖 9.23 0K+177.2~0K+207.8 建議修復平面圖	9-42
圖 9.24 0K+177.2~0K+207.8 建議修復斷面圖	9-43

表目錄

表 2.1 臺中港 1951 年至 2015 年颱風侵襲次數趨勢	2-3
表 2.2 臺中港 2003 年至 2015 年波浪資料蒐集率百分比	2-4
表 2.3 臺中港長期波浪趨勢分析結果	2-12
表 3.1 選取用來建立臺中港模式的颱風資訊與其對應峰值波高	3-2
表 3.2 三種風場模型的比較表	3-13
表 3.3 臺中港類神經颱風波浪推算結果	3-19
表 4.1 臺中港 M5 最小化模式樹波浪推算模式之結果驗證	4-4
表 5.1 臺中港兩種波浪推算模式的誤差比較	5-3
表 5.2 各類神經颱風波浪推算成效比較	5-9
表 5.3 誤差分析結果綜合比較表	5-12
表 6.1 風浪推算模擬之網格設定內容	6-4
表 6.2 模式參數設定彙整表	6-5
表 6.3 颱風波浪實測資料	6-8
表 6.4 基隆港數值模式之波浪推算結果驗證	6-44
表 6.5 臺北港數值模式之波浪推算結果驗證	6-44
表 6.6 臺中港數值模式之波浪推算結果驗證	6-45
表 6.7 安平港數值模式之波浪推算結果驗證	6-46
表 6.8 高雄港數值模式之波浪推算結果驗證	6-47
表 6.9 花蓮港數值模式之波浪推算結果驗證	6-48
表 6.10 蘇澳港數值模式之波浪推算結果驗證	6-49
表 7.1 計算樣本順位機率之 α 及 β 值	7-4
表 7.2 相關係數殘差平均值公式之係數 $\bar{a}$, $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值	7-5

表 7.3 重現期推算量之標準差公式中之係數	7-7
表 7.4 臺中港各重現期分析結果	7-8
表 7.5 花蓮港各重現期建議設計波高範圍	7-9
表 7.6 蘇澳港各重現期建議設計波高範圍	7-9
表 7.7 臺北港各重現期建議設計波高範圍	7-9
表 7.8 基隆港各重現期建議設計波高範圍	7-12
表 7.9 安平港各重現期建議設計波高範圍	7-12
表 7.10 高雄港各重現期建議設計波高範圍	7-12
表 7.11 臺中港各重現期建議設計波高範圍	7-12
表 9.1 侵臺颱風次數統計表(1897 年~2015 年)	9-2
表 9.2 花蓮地區全年波高週期機率分佈表	9-3
表 9.3 花蓮地區春季波高週期機率分佈表	9-4
表 9.4 花蓮地區夏季波高週期機率分佈表	9-5
表 9.5 花蓮地區秋季波高週期機率分佈表	9-5
表 9.6 花蓮地區冬季波高週期機率分佈表	9-6
表 9.7 花蓮外海各方向各迴歸期颱風設計波高分析表	9-8
表 9.8 花蓮港各方向各迴歸期颱風原有設計波高分析表	9-14
表 9.9 消波式沉箱波壓係數表	9-19
表 9.10 海堤容許溢流量之推定值一覽表	9-20
表 9.11 堤後土地利用重要程度與容許溢流量關係一覽表	9-21
表 9.12 堤後破壞角與波力及剪力關係表	9-31
表 9.13 東堤歷年颱風災害資料	9-36

第一章 前言

1.1 計畫目的

港灣或海岸工程規劃設計階段或管理營運階段若有合適的波浪推算模式，即可更有效率的做出適當的決策。波浪推算模式不但能解決在決定設計波浪時遭遇現有實測資料記錄長度不足的問題，更能於營運階段提供防災與預警的功能，在颱風期能夠於災害發生前，先行提供船舶調度與減災預警的參考。近年來已發展許多成熟的波浪推算技術與極值統計方法，但這些技術的建立還是基於往昔的實測資料，在環境有所改變的情況下這些技術與方法的可靠性是需要再評估的。對氣候變遷造成海事工程之影響探討，本計畫將分析海洋環境的改變的趨勢，並提出港灣工程設計階段的因應方式。

本所港研中心近年來針對波浪推算模式提出大量的研究成果，應用類神經網路建立颱風波浪推算模式並已針對大部分國際港區進行模式建立與測試，更與經驗式波浪推算模式進行推算能力的比較，其成果顯示類神經颱風波浪推算模式的推算能力較佳。此外並以月最大法進行極值分析來探討季節性的特性，評估各種樣本、極值函數及參數推定法對設計波推求的影響。相較於往昔研究，本計畫考慮氣候變遷對環境造成改變下提升國內波浪推算技術之正確性。透過颱風侵台的狀況與港研中心所監測臺中港的波高資料來進行長期趨勢分析，其中波高長期趨勢分析的部分並選用多種趨勢偵測方法包括不同取樣方式的線性回歸、Mann-Kendall 趨勢檢測法、Seasonal Kendall 趨勢檢測法及經驗模態分解法(Empirical Mode Decomposition method, EMD)來進行臺中港的波高趨勢分析，評估受氣候變遷影響的顯著性。

在颱風波浪推算模式方面，本計畫以往昔的經驗與方法配合新的颱風波浪資料來更新臺中港類神經波浪推算模式。另應用 M5 最小化模式樹發展臺中港颱風波浪推算模式，並與類神經颱風波浪推算模式進行精度的分析與適用性評估。除此之外另以 DHI MIKE 21 軟體的 2

維風浪數值模式(SW)模擬各場颱風對臺中港造成的波場以供設計波浪的推算。以各樣本來源來進行臺中港的極值統計分析，討論樣本差異對設計波推算的影響，透過以上分析結果探討如何在設計波推定流程中考量氣候變遷的影響量，並對設計波高的決定標準提出相關對策與建議。最後將整合本計畫四個年度所完成臺灣主要港口的設計波資訊，建立互動式展示介面以提供未來相關規畫設計及營運單位作為參考。

1.2 文獻回顧

「氣候變遷」強調氣候的改變，並且不僅僅只有溫度的變化，其交互影響所造成海象、環境等自然變化也是需要評估的重點。在臺灣氣候變遷相關研究發現全球溫室效應增強，氣候變遷現象影響風能潛勢，臺灣西部離岸未來整體風力可能因為氣候變遷影響東北季風減弱。由於氣候變遷下使全球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、陡坡急流及地質不佳，容易造成崩塌、土石流等土砂災害。因受到氣候變遷的影響，未來各情境下流量與泥砂量有增加的趨勢。分析西北太平洋颱風活動及其影響因素，以解析颱風活動與氣候變遷的關連性。結果顯示臺灣平均每年約增加 0.1 個颱風。以莫拉克颱風為例說明氣候變遷在全球各處引發多起重大災害，造成屏東沿海地區嚴重水患，在各處也造成重大災情。並針對海岸環境進行探查結合颱風災害與海平面上升對海岸之衝擊作災害風險分析。近年來氣候變遷所造成的極端氣候現象已是無法逃避的風險，聯合國提出了減緩以及調適作為回應之方案，歐盟的海岸帶調適管理中整合性海岸帶管理策略引導各國合作，提供了技術、經驗以及經費的補助，並提醒各沿海成員國海岸帶管理與國土安全的直接連結，使各成員國願意投入各個不同層級的海岸帶管理策略行動。

以衛星測高資料與浮標資料分析全球波浪與風速的極端值，整合往昔研究五種趨勢偵測法進行風速及波高的變化趨勢評估，圖 1.1 為全球平均波高的變化趨勢分布圖。其結果顯示 1988 至 2011 年間年平均

示性波高的年增率為 1.52cm/yr。其中琉球群島、臺灣海峽及南海北側區域有顯著性的增加趨勢，約 0.5-4.5cm/yr，尤其以東沙群島的波高增加趨勢最為明顯。另外季節性的變化中波浪增加的趨勢以 12 月至 5 月較為顯著，其長期示性波高變遷趨勢示如圖 1.2。

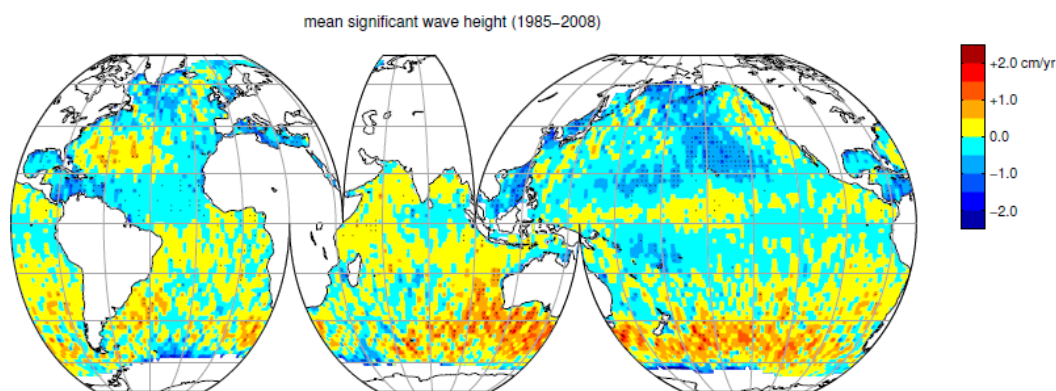


圖 1.1 全球平均波高的變化趨勢分布圖(Young et al., 2011)

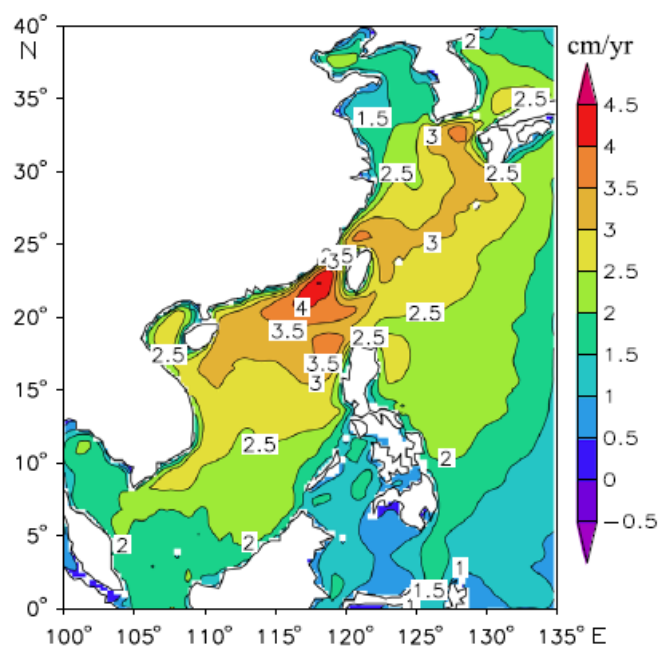


圖 1.2 臺灣周邊海域示性波高的變化趨勢分布圖(Zheng and Li, 2015)

對於颱風事件的趨勢分析，採用不同氣壓門檻值所計算出來北大西洋中緯度及高緯度的氣旋數量統計圖，示如圖 1.3，其結果顯示發生於北大西洋高緯度地區的颱風次數於近 40 年間是呈現增加的趨勢，而

中緯度的部分則相反，在近 40 年間颱風發生次數是保持遞減的狀態，此結果顯示氣候變遷對於颱風發生次數的影響量在空間分布上也有所不同。

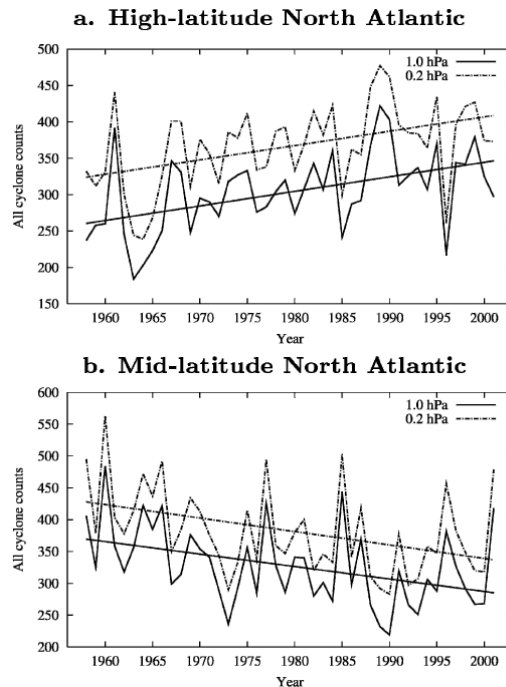


圖 1.3 北大西洋高緯度及中緯度的氣旋數量統計圖 Wang et al.(2006)

本研究由以上國內外相關研究結果，歸納臺灣氣候變遷對港灣環境造成可能的影響有：

- 1.水位的抬升改變波浪碎波位置與港灣周遭流況；
- 2.季節風風速條件的改變造成季節性波浪改變；
- 3.颱風等極端氣候因素發生的頻率與規模改變而造成颱風波浪與暴潮的變化；
- 4.降雨分布與雨量改變造成河川下游對海岸輸沙量的變化。

然海象中所發生的極端事件通常是由組合因素造成的，且即便在一個不受外力影響地的氣候環境中，各種極端事件也是經常發生的。在這兩個理由下，想要確認海象極端因素是否由氣候變遷所造成是非常不容易的。故本計畫先不考慮暖化升溫等相對較複雜的成因，單純

以港研中心在臺中港的波浪資料以及造成極端波浪的颱風因素加以分析，評估目前氣候變遷對於海岸與港灣環境會造成的影響量，並期望能提出港灣工程與管理上因應的設計標準。港灣或海岸工程規劃設計所需之設計波浪須由長期實測波浪資料或推算波浪資料來決定。近年來為解決現有記錄的時間不足的狀況，已發展許多成熟的波浪推算技術與極值統計方法，但這些技術的建立還是基於往昔的實測資料，在環境有所改變的情況下這些技術與方法的可靠性需要再評估的。應用類神經網路建立颱風波浪推算模式並已針對大部分國際港區進行模式建立與測試，更與經驗式波浪推算模式進行推算能力的比較，其成果顯示類神經颱風波浪推算模式的推算能力較佳。

針對颱風所造成的波高提升屬於連續型的數值資料，一般能以回歸分析(Regression Analysis)、資料探勘裡的回歸樹(Regression Tree)和模式樹(Model Tree)以及類神經網路(Artificial Neural Network)等方法來進行模擬或預測。然以往昔類神經建立颱風波浪模式之經驗顯示，在波浪推算模式影響波浪大小的成因過於複雜，包括颱風因子中心風速、中心距離與目標推算點方位角；底床地形效應、陸地遮蔽效應、及風場衰減效應等。各影響因子可能為獨立影響或交互影響，本計畫另嘗試使用模式樹的方式來建立颱風波浪推算模式。M5 模式樹是透過找尋屬性分割前後類別值標準差降低程度最多的分割點，以此來架構整棵樹狀結構，當時則依照 M5 最小化模式樹提出了更完整的架構模式樹之步驟，稱為 M5'。隨著本計畫持續發展臺灣各主要港口的 M5 最小化模式樹波浪推算模式，國內外也持續有新的應用與修正方式，其指出 M5 最小化模式樹的計算與應用較類神經簡單，而精度上明顯較經驗公式、回歸樹及分類演算法有更好的表現。而最近的研究並將 M5 最小化模式樹配合基因程序用來建立熔融擠製成型技術中。

另外由於風場與風浪數值模式配合高速計算機的快速發展，本研究另採用 NCEP 風場以 2 維數值風浪模式進行波浪推算，NCEP 風場資料係由美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)與國家大氣研究中心(National Centers for Atmospheric

Research, NCAR)在西元 1989 年開始合作發展氣候資料再分析計畫(NCEP/NCAR Reanalysis Project)，此計畫之目標為利用西元 1948 年至今之舊有氣候觀測資料重新進行分析，並發展一氣候資料同化系統(Climote data assimilation system, CDAS)用來分析現今之大氣情況。此系統納入了許多不同類型之觀測資料結果，包括地面觀測、船艦觀測、飛機觀測、無線電探空觀測、衛星觀測等，再經過數據品質(QC)步驟，集成為此氣候資料同化系統，目前已有氣象組織利用此系統分析資料進行真實氣象預報。NCEP/NCAR Reanalysis Project 提供資料自 1948 年迄今，資料時距包含每日 6 小時、單日及單月資料，資料項目有氣溫、地表溫度、地中溫度、氣壓、濕度、風速等。本計畫採用 NCEP 每日 6 小時且為海平面上 10m 處之 u、v 向風速資料，資料範圍包含緯度 $88.542^{\circ} \sim -88.542^{\circ}$ 、經度 $0^{\circ} \sim 358.125^{\circ}$ ，風場資料解析格網為 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。

設計波高的推定須針對波高樣本資料進行極值統計，在確定樣本來源以後，首先必須將原始資料作基本之選取及排序(data sorting)。早期極值統計之資料選取，是討論所有觀測資料。但實際海域上波浪存在各種特性之波高，大部分的取樣資料並不是極端值情況，導致很難由觀測資料推測極值波高的母體參數。故現今極值分析討論局部觀測資料，依資料選取方式，主要可分為超量門檻取樣法與極端值取樣法 2 種。極端值取樣法即國內目前慣用的年最大法，而超量門檻取樣法為先設定一門檻值，選取所有超越門檻值的資料為觀測樣本，稱為超量門檻取樣法(Peak Over Threshold, POT)。而國內近年研究中以 FT-I、Weibull、GEV 及 Log-Normal 四種極值分布函數配合 MLE、LSM 及 MOM 等 3 種參數推定方式進行測試，其研究成果包括花蓮港、高雄港、安平港、臺北港、基隆港與臺中港等主要港口的最適極值函數與參數推定法，並針對各主要港口推算出 50 年回歸期的設計波高及其信賴區間。

1.3 工作項目

本計畫以臺中港為主，利用各港長期監測的波浪資料與颱風相關資訊進行趨勢分析，以評估其受氣候變遷影響下是否有顯著的長期變化趨勢。本計畫擬採用類神經、M5 最小化模式樹及 MIKE SW 的 2 維風浪數值模式等 3 種波浪推算模式的結果來進行設計波高的分析，類神經波浪推算模式主要採用港研中心所發展的類神經颱風推算模式配合近年來針對臺中港所監測的波浪資料進行模式修正。另採用 M5 最小化模式樹進行臺中港波浪推算模式的建立，再與類神經網路推算模式進行精度與特性的比較。2 維風浪數值模式將嘗試採用不同的風場資料對歷史颱風進行模擬，推求對各港口造成的波場，並探討風場對推算結果的精度影響。最後並依各樣本來源考量與颱風及波浪在時空環境改變下針對設計波高的決定標準提出相關對策與建議。

本年度研究計畫之工作項目分為 6 個部份，工作內容為以下工作項目：

1. 分析臺中港之颱風與波浪在氣候變遷下之影響。
2. 建立臺中港 M5 波浪推算模式。
3. 比較臺中港類神經網路波浪推算模式與 M5 波浪推算模式之推算精度以及探討其適用性。
4. 以 2 維數值模式進行臺中港之波浪推算。
5. 臺中港設計波高標準之分析探討。
6. 整合臺灣各主要港口設計波資訊，提出因應氣候變遷設計波高決定之方法以及建立互動展示介面。
7. 就本計畫成果之特性，填報績效指標項目，並以量化或質化方式，說明本計畫主要研究成果及重大突破。

1.4 本計畫各年度研究成果

本計畫為 4 年計畫中的第 4 年，總計畫工作流程圖如圖 1.4。前 3 年度的執行工作成果分述如下：

第 1 年度工作以花蓮港與蘇澳港為研究目標，蒐集颱風與波浪資料及多種長期趨勢分析方法，包括回歸分析、兩種無母數趨勢檢測及兩種 EMD 趨勢檢測法。分析結果顯示兩種 EMD 法中的 Rilling 法較佳，而無母數趨勢檢測法中 Seasonal Kendall 檢測法較適用於資料缺漏與週期性變化的情況。此外第 1 年度創新研發以 M5 建立颱風波浪推算模式，發現其波高峰值推算能力與類神經模式接近，雖然峰值波高與發生時間有較大的誤差，但其推算之波高時序列之 RMSE 與相關係數較高。類神經模式對於在行進至花蓮外海突然轉向往北的颱風會有明顯高估的誤判。此外，經東部外海向北移動卻未登陸的颱風，在 2 種模式的推估結果相近，但相較於實測資料皆有明顯的低估現象。整體而言兩種模式各有其優缺點，但 M5 模式所推算的時序列結果由於其分區回歸的特性，其推算結果常會有類似階梯函數突然增加或下降的現象，且其峰值的誤差較大。2 維風浪推算模式以 NCEP 風場資料作為輸入進行模擬，並進行風場資料比較，發現 2km 風場資料能有效提升 2 維數值模式的推算精度。設計波推算部分則建立了完整的極值分析流程，包括多種極值函數的參數推定法及最適函數的檢定標準之程式編寫，另比較 2 種取樣方式包括年極值取樣與超量門檻取樣等方法。

第 2 年度以臺北港與基隆港為研究目標，在波浪長期趨勢分析中發現兩港雖然距離不遠，但由於地理特性或地形水深的差異，有不同的波高變化趨勢。另進行臺北港與基隆港 M5 模式的建立與類神經颱風波浪推算模式的更新，並收集港研中心在臺北港所監測的 10m 風速資料配合 3 種模型風場資料進行比較，發現 SLOSH model 在各項比較中皆較往昔使用的 RVM 準確，故往後類神經與 M5 模式建立時皆採用 SLOSH model 作為風場計算方法。在兩模式的推算能力比較中發現第六路徑類型颱風在類神經模式容易有峰值高估的情形發生，而東向西行登陸臺灣中北部的颱風類神經模式則是在 2 種模式皆會有峰值低估

的情形。在模式推估結果的風險分析中 M5 模式所推估的波高峰值誤差較有偏低的現象，類神經模式則無。在模式推估峰值發生時間的部分，由標準偏差可以發現類神經模式推估峰值發生時間誤差的波動幅度較 M5 模式大。整體而言類神經模式所推算的結果較有高估的現象，M5 模式則較多低估的現象。2 維風浪推算模式第 2 年度 ARW_NFS 2km 風場資料進行測試，然而 NFS 資料僅從 2010 年開始，若要考慮將模擬結果作為設計波推算之樣本，必須有較長期的風場資料。設計波推算部分第 2 年度以 4 種極值樣本包括類神經、M5、2 維數值模式與實測資料進行比較，結果顯示臺北港類神經樣本與實測樣本的分析結果接近，2 維數值模式與 M5 模式樣本則有低估的現象。基隆港部分 3 種模式樣本的分析結果接近，但較實測樣本而言皆有低估的現象。

第 3 年度以安平港與高雄港為研究目標，颱風與波浪長期趨勢分析結果顯示高雄港與安平港的波浪長期趨勢分析結果相當接近，皆是屬於些微遞增。M5 模式建立與類神經模式更新後的比較結果顯示，部分波高峰值的推算精度以類神經模式較佳，但整體推算 RMSE 及 R^2 皆是以 M5 最小化模式樹波浪推算模式較佳。高雄港 46 場颱風的分析結果顯示類神經模式在四種誤差評估指標的精度表現上都高於 M5 模式所推估的結果。另針對推算較差的幾場颱風進行探討，除了少數幾場推估結果會與實測波高峰值相差約 2m 外，另發現由東向西侵台的颱風在遠離臺灣本島進入中國大陸後會造成另一波高峰值，這種現象目前 2 種模式皆無法模擬此現象。安平港與高雄港 2 種模式在波高峰值推估上都有些許低估的現象。而無論是安平或高雄港，類神經模式所推估波高峰值發生時間在誤差標準值部分皆小於 M5 模式，顯示在峰值發生時間部分類神經模式所推估的結果較為可靠。透過 WRF 模式追算高解析度的風場資料，以此為輸入條件可提升 2 維數值風浪推算模式的推算能力，以驗證結果來看，安平港與高雄港的推算精度都高於目前類神經與 M5 模式。由 3 種模式推算樣本配合實測波高樣本進行極值統計分析並推求 50 重現期的結果比較中發現 2 維數值模式的推算樣本最接近實測波高樣本，約有 1m 內的差量；類神經模式樣本次之，

約有 2m 的差量；M5 模式樣本最差，差量約 2.5m，有明顯低估的現象。此外第 3 年度並以波高長期變遷趨勢最大的臺北港為例，評估波高長期變遷趨勢對極值統計分析的影響，結果顯示在進行極值分析前先 detrend 的做法可避免因考量氣候變遷因素而高估設計波高。除展示本計畫目前 2 維數值模式精度的提升並探討目前決定設計波的流程與不同目標點的設計波比較，此外會議中並提出幾項新的討論議題包括：1. 深海位置的選擇 2. 16 方位的極值樣本與極值分析 3. 以深水設計波再由浪模式推算至防波堤前的外力設計條件 4. 國外設計防波堤的流程。

本年度以臺中港為研究目標，以前 3 年度的工作經驗與基礎持續完成各工作項目包括颱風與波浪的受氣候變遷影響量的評估，M5 模式建立與類神經模式之更新，2 維數值風浪模式之推算與設計波推算等。其中 ARW_CFCSR2km 的風場經大量的計算已完成 1990 年至 2010 年所有颱風的風場追算，可提供高空間解析度的風場讓 2 維風浪推算模式獲得更高的推算精度，以作為各港設計波推算之樣本。本年度各工作成果如後續章節所述。



圖 1.4 工作流程圖

1.5 本計畫創新發展

基於往昔研究深入探討設計波標準，有以下創新發展：

1. 因應全球氣候變遷議題，針對侵台颱風與各主要港口的波浪進行長期趨勢分析，其中波浪資料更以多種趨勢檢測法進行分析(線性回歸分析、Mann-Kandall 趨勢檢測法、Seasonal Kandall 趨勢檢測法及經驗模態分解法)。已完成花蓮港、蘇澳港、臺北港、基隆港、安平港、高雄港及臺中港 6 大港口。
2. 經港研中心所提供臺北港海面上 10m 風速之比較多種參數模型風場，本年度類神經網路颱風波浪模式中的風速推算改採用 SLOSH 參數風場來進行推算點的風速計算。
3. 以 M5 最小化模式樹建立臺灣各主要港口波浪推算模式。
4. 2 維數值風浪推算模式中採用 WRF 模式計算空間解析度更佳的风場來進行 MIKE 21 SW 風浪模式之模擬，以提升風浪推算結果的準確度。
5. 為擬定合適的設計波推估流程，並同時考量氣候變遷下所造成波浪的長期影響量造成的不確定性。
6. 比較計畫中所採用的各種波浪推算方法，探討於國內港灣營運與防災工程中應用的合適定位。
7. 規劃與建立設計波資訊展示互動介面，未來可由港研中心提供工程規劃相關單位參考。

第二章 氣候變遷對颱風與波浪影響

2.1 資料來源

本計畫為分析氣候變遷對颱風與波浪造成的趨勢分析，需收集長期的颱風與波浪資料。目前颱風資料來源除中央氣象局所發布的資料外，日本氣象廳 RSMC-Tokyo Center 亦有提供往昔熱帶氣旋中心資訊，另外聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center，簡稱 JTWC)有提供完整西太平洋往昔與預測颱風資訊。

本研究採用港研中心的波浪觀測資料來進行分析，臺中港實測波高資料由港研中心提供，於 1999 年 10 月安置挪威 NORTEK 公司表面波浪監測系統於測站 X_0 處，2000 年因臺中港北防波堤延長工程開始展開整平拋石工作影響到儀器安全，於 8 月 18 日暫時停止量測並將設備收回。2003 年 5 月臺中港北防波堤延長工程完成後隨即在 2003 年 7 月 5 日安裝完成波高波向與剖面海流即時傳送監測系統，安裝在臺中港北防波堤堤頭 150 公尺外、水深 25 公尺處(稱測站 X_1)，觀測樁位置如圖 2.1 所示。AWAC 系統有 2 個分離波高量測模式：1 個是對平靜波浪時，當資料由傳統式壓力感應器量測時將會因儀器佈放的深度而受很大的影響。此時，表面高度必須用 1 個聲波式的高度感應器量測波高。

波高量測範圍：

- (1)資料量測模式：壓力及沿每一個波束選取一個流速層。
- (2)量測流層距離：0.5、1.0、2.0 m 可選擇性。
- (3)最大資料輸出頻率：2Hz(以內含)。
- (4)儀器內取樣頻率：4~6Hz。
- (5)取樣期間之取樣數：512、1024 或 2048 次可選擇性。
- (6)所有資料都儲存於岸上的電腦與主機內。



圖 2.1 臺中港海氣象觀測位置圖

2.2 侵台颱風長期變化趨勢

由於日本氣象廳 RSMC-Tokyo Center 有針對往昔熱帶氣旋提供較完整的中心資訊，故本計畫依據日本氣象廳所發布 1951 年至 2015 年西太平洋熱帶氣旋的路徑及氣壓資料進行整理，並建立颱風資料庫以評估各港長期受颱風侵襲的紀錄。

颱風中心與目標點的距離為颱風侵襲與否的主要判斷因子，本計畫首以臺中港為目標點，並以不同的距離門檻值篩選颱風，若颱風中心接近臺中港的距離小於門檻值，則將其標記為侵台颱風，並將影響臺中港這段期間內的最低中心氣壓依中央氣象局所劃分的颱風規模做分級，以評估該颱風所屬級別。中央氣象局所定義颱風級別可分為 4 類：1.熱帶低壓(中心海面氣壓 >997 hPa)；2.輕度颱風(976 hPa $<$ 中心海面氣壓 ≤ 997 hPa)；3.中度颱風(941 hPa $<$ 中心海面氣壓 ≤ 976 hPa)；4.強烈颱風(941 hPa $\geq$ 中心海面氣壓)。將各場颱風依據距離門檻值與颱風規模進行篩選，可計算出每年侵襲各港的颱風次數，再依 1 階線性回歸找出每年次數的長期趨勢如下表：

表 2.1 臺中港 1951 年至 2015 年颱風侵襲次數趨勢

	門檻值 300km	門檻值 500km	門檻值 1000km
所有熱帶低壓	0.0033	0.0073	0.0073
強烈颱風	-0.0003	-0.0008	0.0006
輕度颱風	0.0002	-0.0035	0.0035
中度颱風	0.0052	0.0155	0.0100

表 2.1 顯示 3 種距離門檻值對應各種不同颱風規模的資料集所統計出 1951 年至 2015 年歷年侵襲臺中港次數的趨勢分析結果，顯示在 3 種門檻值設定中，侵襲臺中港的颱風次數有隨著時間逐漸遞增的趨勢，但其趨勢不明顯，平均約增加 0.0060 次/年。整體而言除中度颱風以外，強烈颱風與輕度颱風的變化趨勢相對較小。較具有明顯趨勢變化的中度颱風以 3 種距離門檻值的趨勢分析結果可發現，只有當距離門檻值設定在 500km 以上，中度颱風侵襲臺中港次數才有較為顯著的趨勢，以門檻值 500km 來看每年增加率平均約為 0.0155 次/年，以現有颱風紀錄而言每 50 年約會增加 0.78 個颱風的侵襲機會，圖 2.2 為中度颱風侵襲臺中港的歷年紀錄與一階線性回歸後的趨勢線，該線斜率為 0.0155(門檻值設為 500km)，決定係數為 0.043。

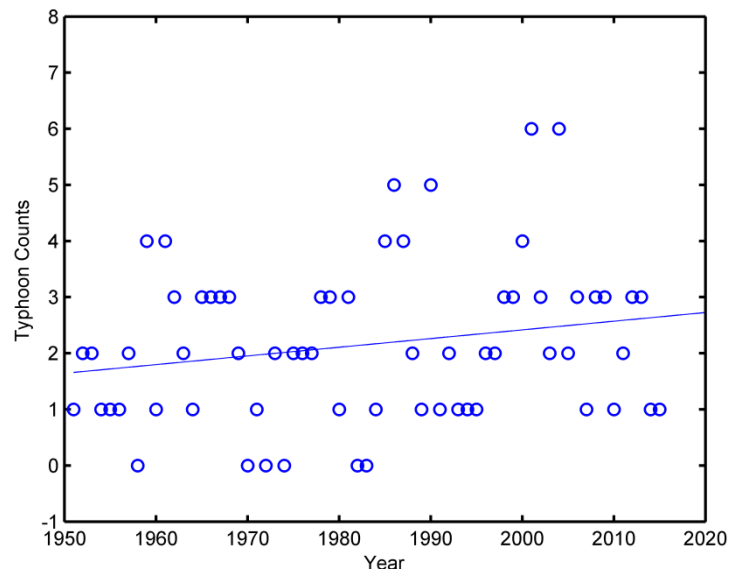


圖 2.2 中度颱風侵襲臺中港次數的趨勢分析(500km 門檻值)

2.3 波浪長期變遷趨勢

2.3.1 資料來源

根據港研中心所提供之臺中港波浪資料，其記錄時間為 2003 年至 2015 年，為瞭解波浪資料缺漏的狀況，本計畫整理各月份的波浪資料蒐集率，其中若該月份波浪記錄資料完整則記為 100%，若有缺漏則依該月份應有資料量為分母計算百分比，如表 2.2 所示。

已蒐集臺中港的波浪記錄時間 2003 年 8 月至 2015 年 11 月，其中除 2003、2008 與 2009 年外其年資料蒐集率都有 70% 以上。2008 年 10 月至 2009 年 5 月有較長期的資料缺漏，故若要取樣進行年極值統計須考量這些資料的代表性，波浪推算模式與數值模式的驗證上只要在各颱風侵台期間有完整波浪紀錄的資料皆會採用。

表 2.2 臺中港 2003 年至 2015 年波浪資料蒐集率百分比

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均 蒐集率 (%)
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.2	100.0	99.7	99.9	99.6	41.4
2004	97.4	61.1	99.9	99.9	90.1	97.9	97.4	96.6	99.9	99.3	98.8	99.7	94.8
2005	99.7	99.0	98.3	99.2	99.2	98.9	70.4	92.6	97.2	97.3	53.6	0.0	83.8
2006	96.4	95.5	29.3	36.8	99.9	99.9	97.2	99.3	81.0	99.7	99.9	99.1	86.2
2007	99.9	98.1	97.2	99.0	99.1	98.2	97.4	99.6	100.0	74.1	0.0	0.0	80.2
2008	44.2	64.1	41.5	31.0	11.7	99.2	99.6	99.9	91.5	0.0	0.0	0.0	48.6
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39.6	99.7	99.7	99.9	99.9	99.9	100.0	53.2
2010	100.0	98.4	100.0	100.0	99.1	100.0	100.0	100.0	98.5	100.0	100.0	99.9	99.6
2011	99.7	93.2	95.6	97.5	97.8	99.0	99.1	99.6	99.9	99.9	99.3	100.0	98.4
2012	100.0	47.3	49.9	100.0	100.0	100.0	99.9	53.6	100.0	100.0	100.0	93.4	87.0
2013	84.8	90.6	91.9	90.1	93.7	95.6	97.0	98.3	97.1	99.6	97.5	80.5	93.1
2014	69.6	68.6	20.7	100.0	100.0	100.0	100.0	90.7	93.3	99.9	100.0	99.5	86.9
2015	99.6	99.6	99.7	99.4	99.6	99.9	98.9	99.1	99.2	100.0	100.0	0.0	91.2

2.3.2 趨勢分析

在資料趨勢分析技術的往昔研究中，往昔已有許多研究採用最小 2 乘法求得回歸係數這種方法進行趨勢的分析，然而 Sen(1968)即提出這種方法容易導致誤判且其結果的可靠度受限於常態分布的母體樣本。Hirsch et al. (1984)指出，當資料呈非常態分佈或有缺漏資料情況，適合應用無母數檢定法，無母數法較具有顯著之效率且呈現之結果也較不受離群值影響。Mann-Kendal 趨勢檢測為 Mann(1945)以及之後的 Kendall(1975)所提出的無母數方法，能針對資料進行趨勢偵測並能處理缺漏值的狀況，被廣泛的應用在相關的環境科學研究中。Hirsch 等人 (1982)針對 Mann-Kendall 趨勢檢定法提出修改，提出能應用於有週期特性樣本資料的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法。

不同於颱風 1 年平均出現 3 至 4 個的獨立事件，波浪現象為連續的時間序列。若要評估其長期變化趨勢，可用數值方法來進行評估。趨勢偵測法中最簡單的方式即是採用 1 階線性回歸方式進行資料回歸，如式(2-1)

$$y(t) = a_1 t + b_1 \quad (2-1)$$

式中 $y(t)$ 為波高資料為時間的函數， t 為時間， a_1 與 b_1 則為回歸係數，回歸係數可經由最小乘法求得，往昔已有許多研究採用這種方法進行趨勢的分析，然而這種方法容易導致誤判且其結果的可靠度受限於常態分布的母體樣本。傳統線性回歸的方法可經由以下回歸型式去除季節性的影響

$$y(t) = a_2 t + b_2 \sin(2\pi / 12t + c_2) + d_2 \quad (2-2)$$

式中有共有 4 個係數 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 ，亦可經由最小 2 乘法進行推求。雖然這種回歸型式可以明確分離出季節性影響，但與所有回歸方式相同，此法仍會因為母體樣本內的雜訊而產生偽造的趨勢結果。

Mann-Kendall 趨勢檢測法是一種無母數方法，能針對時間序列資料做相對趨勢的檢測。此法能處理母體樣本中有缺漏的狀況。在隨機

資料不存在趨勢的假設狀況下，樣本 $Y=(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ 為 n 個獨立且同樣為隨機分布的變數。可以定義一測試統計量 S

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(y_j - y_k) \quad (2-3)$$

其中

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

在樣本無趨勢的假設下，當 $n \rightarrow \infty$ 趨近於無窮大時 S 的分布應為對稱的常態分布，且其平均值應為 0，變異量 V_S^2 應為

$$V_S^2 = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (2-5)$$

可導出雙尾檢驗

$$Z = [S - \text{sgn}(S)]/V_S \quad (2-6)$$

若以 $\alpha/2$ 為顯著水準，若 $|Z| < Z_{\alpha/2}$ 成立則顯示此樣本符合原假設狀況(無趨勢)，若不成立則代表樣本帶有顯著趨勢，且 Z 值為正代表有增加趨勢，反之則具有降低的趨勢。

Hirsch 等人(1982)針對 Mann-Kendall 趨勢檢定法提出修改，提出 Seasonal Kendall 趨勢檢定法，將 m 個季節的個別檢定結果合併，並以式(6-7)計算全部統計量 S'

$$S' = \sum_{j=1}^m S_i \quad (2-7)$$

其中 S' 為測試統計量，而 S_i 為 Mann-Kendall 趨勢檢定法在 i 季的統計量($i=1,2,3, \dots, m$)。整體統計量應為對稱的常態分布，且其平均值應為 0，變異量 $V_{S'}^2$ 應為

$$V_{S'}^2 = \sum_{i=1}^m V_{S_i}^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m \text{cov}(S_i, S_k) \quad (2-8)$$

其中 S_i 、 S_k 分別為 Mann-Kendall 趨勢檢定在第 i 、 k 季的統計量， $\text{cov}(S_i, S_k)$ 為 S_i 、 S_k 的共變異數(covariance)，若為獨立變量則可簡化為

$$V_{S'}^2 = \sum_{i=1}^m V_{S_i}^2 \quad (2-9)$$

而 Seasonal Kendall 趨勢檢定法的常態檢定變量 Z' 為近似標準常態分布並定義如

$$Z = \begin{cases} \frac{S'-1}{V_{S'}^2} & \text{if } S' > 0 \\ 0 & \text{if } S' = 0 \\ \frac{S'+1}{V_{S'}^2} & \text{if } S' < 0 \end{cases} \quad (2-10)$$

其中 S' 為正值表示為遞增趨勢，負值為遞減趨勢。

除了上述線性回歸與無母數分析外，本計畫並應用經驗模態分解法對長期波高資料來進行分析。中央研究院黃鵬院士所提出之經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition method, EMD) 為希伯特-黃轉換(Hilbert-Huang Transform, HHT)的程序之一，被認定對於獲得非平穩(non-stationery)以及非線性(nonlinear)訊號的趨勢擁有良好效果。

EMD 法是將訊號分解成多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)及一個均值趨勢(mean trend)，每個 IMF 皆需滿足下列 2 個條件：

1. 整筆資料中，局部極大值(local maxima)與局部極小值(local minima)的數目之和與跨零點(zero-crossing)的數目要相等或是最多相差一個。

2. 在任一時間點上，由局部極大值所定義的上包絡線(upper envelope)與局部極小值所定義的下包絡線(lower envelope)，所得到之均值為零或幾乎為零。

而經驗模態分解法流程如下：

1. 可視為找出原始時間序列函數 $y(t)$ 所有局部極大值，將所有局部極大值連接並以立方雲線(cubic spline)內插，得到上包絡線，亦利用局部極小值以相同方式獲取下包絡線，爾後利用上包絡線與下包絡線得到均值包絡線 $m(t)$ 。
2. 將原始時間序列函數 $y(t)$ 與 $m_1(t)$ 為 $h_1(t)$ 。

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t) \quad (2-11)$$

經判別 $h_1(t)$ 不為本質模態函數，將繼續上述之程序；即以 $h_1(t)$ 為待處理訊號，重複上述步驟 k 次直到 $h_k(t)$ 滿足本質模態函數之定義，將此視為一種篩選程序(sifting process)，而 $h_k(t)$ 記為

$$c_1(t) = h_k(t) \quad (2-12)$$

3. 分解出第一個本質模態函數 $c_1(t)$ ，利用 $c_1(t)$ 與 $y(t)$ 之差值得殘餘值(residue)為 $r_1(t)$

$$r_1(t) = y(t) - c_1(t) \quad (2-13)$$

4. 當 $r_1(t)$ 不為一趨勢分量，則將 $r_1(t)$ 作為一新的時間序列函數，並重複上述步驟 1 至步驟 3，找出剩餘之本質模態函數。

經上述流程可將原始時間序列函數 $y(t)$ 分解 n 個本質模態函數為 $c_i(t)$ ， $i=1 \cdots n$ 與一趨勢分量為 $r_n(t)$ ，即可表示為

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2-14)$$

此外 Rilling 等人(2003)提出篩選程序中新的停止準則(stopping criterion)以避免篩選程序的篩選次數過多而破壞本質模態函數的特性；其利用兩個閾值 θ_1 與 θ_2 作為停止準則。

首先利用上包絡線及下包絡線定義出模態振幅(mode amplitude) $a(t)$ 與均值 $m(t)$ ，其公式分別表示為

$$a(t) = (e_{\max}(t) - e_{\min}(t)) / 2 \quad (2-15)$$

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t)) / 2 \quad (2-16)$$

其中 $e_{\max}(t)$ 為上包絡線而 $e_{\min}(t)$ 為下包絡線。

再以模態振幅與均值的比值且取絕對值定義為評估函數 (evaluation function) $\sigma(t)$ ，其公式為

$$\sigma(t) = |m(t) / a(t)| \quad (2-17)$$

藉由上述 2 個閾值 θ_1 、 θ_2 及參數評估函數 $\sigma(t)$ ，使篩選程序停止篩選。其準則為在 $(1-\alpha)$ 倍的時間序列的總延時下 $\sigma(t) < \theta_1$ ，並且剩餘部分為 $\sigma(t) < \theta_2$ ；且上述參數一般預設為 $\alpha \approx 0.05$ ， $\theta_1 \approx 0.05$ 和 $\theta_1 \approx 10\theta_2$ 。波高資料為時間的函數，可利用上述之經驗模態分解法或改良其停止準則的經驗模態分解法已獲得趨勢分量為 $r_n(t)$ 再利用 1 階線性回歸方式來估算的年增率。本計畫採用 Rilling 等人(2003)所提出的新停止準則來實作經驗模態分解，針對不同取樣方式的波浪記錄資料進行模態分解，並選用各模態外之殘差來進行趨勢分析。

2.3.3 分析結果

本計畫所蒐集臺中港波浪資料自 2003 年至 2015 年共 13 年，將逐時資料進行一階線性回歸可獲得逐時資料的趨勢線，如圖 2.3 所示。圖中趨勢線之斜率為 -3.41×10^{-5} ，換算為年增率則為 -0.0125m/year ，顯示臺中港逐時波浪資料的長期趨勢呈現些微遞減情況。將逐時資料進行日平均分析後進行分析的結果如圖 2.4，將圖中趨勢線之斜率換算為年增率為 -0.0136m/year 。以月平均波高來進行長期趨勢分析則可繪製如圖 2.5，將圖中趨勢線之斜率換算為年增率為 -0.0099m/year 。此外以年平均波高來進行長期趨勢分析則可繪製如圖 2.6，圖中趨勢線年增率為 -0.0170m/year 。

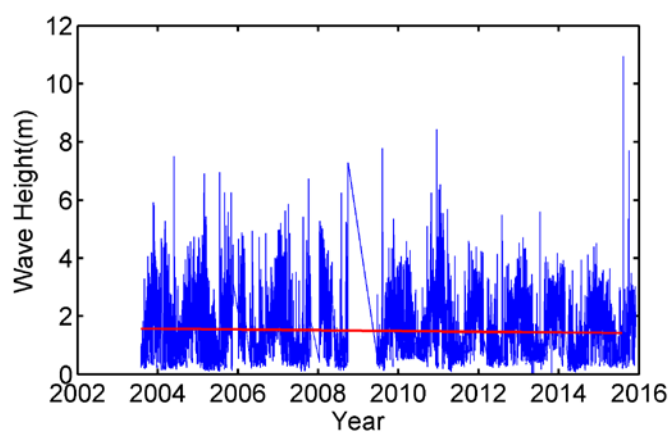


圖 2.3 臺中港逐時波浪資料與其趨勢線

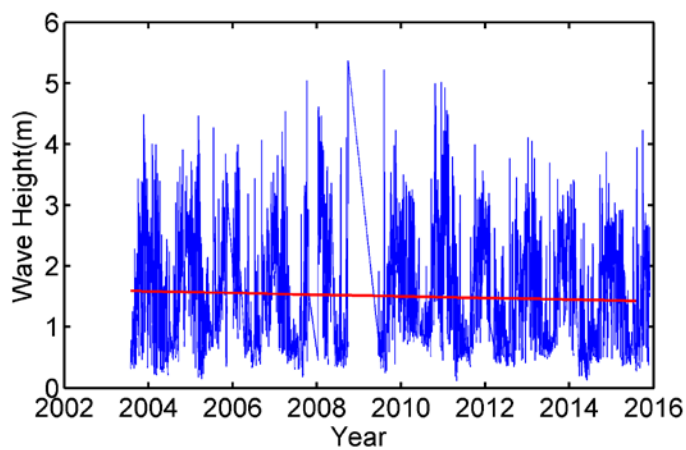


圖 2.4 臺中港日平均波浪資料及其趨勢線

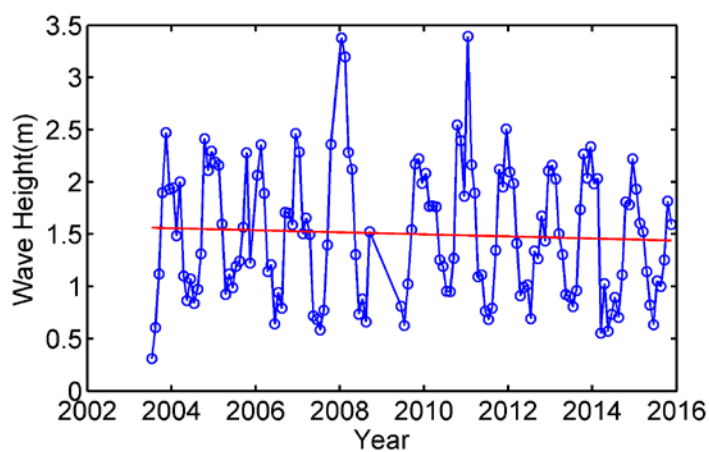


圖 2.5 臺中港月平均波浪資料及其趨勢線

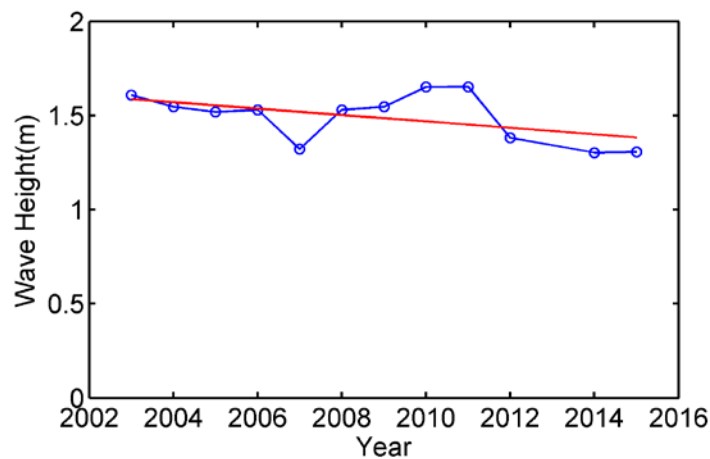


圖 2.6 臺中港年平均波浪資料與其趨勢線

經由 EMD 分解後可獲得到長期波浪趨勢分量，臺中港月平均波高資料進行 EMD 分解後的趨勢分量示如圖 2.7。為能比較不同取樣方式對長期波高趨勢的影響，以圖中紅線所表示的趨勢分量進行 1 階線性回歸可獲得資料的長期變遷趨勢，在月平均資料分析中其趨勢分量的年增率為-0.0277m/year。

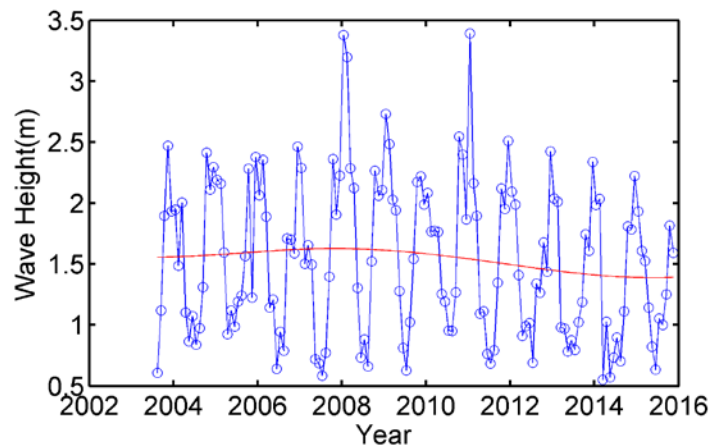


圖 2.7 臺中港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

除利用上述 1 階線性回歸方式與 EMD 法來估算的年增率，本計畫並採用無母數趨勢檢測法來進行檢定，為進一步考量季節性變化影響下的波浪長期變化趨勢並克服資料缺漏的問題，本計畫採用考慮季節性變化的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法，將每年 3~5 月、6~8 月、9~11 月及 12~2 月分為 4 個季節指標，將分析期間資料缺漏的月份進行適當

的插值，在顯著水準 0.05 的情況下，臺中港月平均波浪資料符合原假設，是為一不具趨勢的資料集。

經上述多種趨勢檢定方法與不同波高取樣方式所分析的結果如表 2.3 所示，其結果顯示以線性趨勢分析、EMD 法趨勢分析所計算出來的年增率皆為負值，各種取樣方式不同造成年增率有所差異，但 Seasonal Kendall 趨勢檢定趨勢檢定法則有不同的結果，無母數分析的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法可適用於資料缺漏與週期性變化的情形，其分析結果應較具代表性。此外，冬季與夏季作用期間的取樣方式也一併進行分析，結果顯示去除夏季資料後僅以 11 月至次年 4 月的波浪長期變化趨勢與全部資料的分析結果較為相近，而去除冬季資料僅分析 5~10 月的波浪年增率雖然一樣是遞減的趨勢，但其變化趨勢較不明顯。

表 2.3 臺中港長期波浪趨勢分析結果

分析與取樣方式	年增率(m/year)	11~4 月年增率 (m/year)	5~10 月年增率 (m/year)
逐時資料線性趨勢	-0.0125	-0.0170	-0.0083
日平均線性趨勢	-0.0136	-0.0181	-0.0093
月平均線性趨勢	-0.0099	-0.0195	-0.0034
年平均線性趨勢	-0.0170	-0.0117	-0.0066
EMD 趨勢分析(月平均)	-0.0277	-	-
Seasonal Kendall 月平均趨勢檢定	無趨勢	-	-

另針對臺中港 2003 年至 2015 年所收集到的 42 場颱風事件分析其峰值颱風波浪進行趨勢分析，結果如圖 2.8 所示，其波高年增率為 0.0632m/year，顯示颱風事件所造成的波高峰值有微幅增加的趨勢。

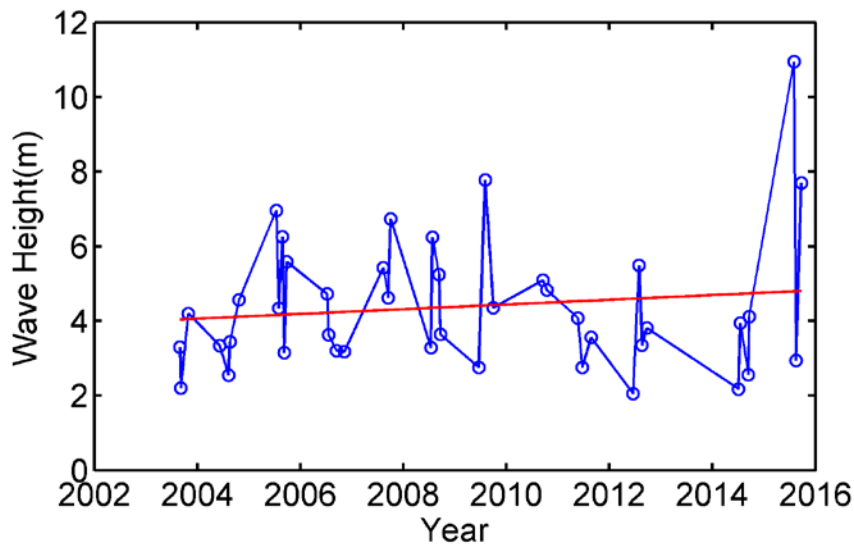


圖 2.8 2003 年至 2015 年颱風極值波高趨勢分析

2.3.4 各港分析結果

本計畫前 3 年度完成花蓮港、蘇澳港、臺北港、基隆港、安平港與高雄港，加上本年度臺中港共 7 大主要港口的分析結果整合比較如下。一階線性回歸並配合不同的取樣方式進行趨勢分析結果如圖 2.9。圖中橫軸為臺灣 7 個主要港口，縱軸則為 1 階線性回歸所分析出的波浪年增率，圖中並以圓形、矩形、菱形及三角形符號表示各種不同的取樣方式。結果顯示各港波浪資料在不同的取樣方式下，檢測出不同的趨勢變化量，除臺北港年平均取樣結果與其他取樣方式有較大差異外，其餘各港的在不同取樣方式下所檢測出的波浪年增率較無太大的差異。在 7 個主要港口的分析中，可發現花蓮港、基隆港與臺中港的波浪長增率皆小於 0，顯示其變遷趨勢是屬於遞減的，而其他港則屬於逐年遞增的狀況。

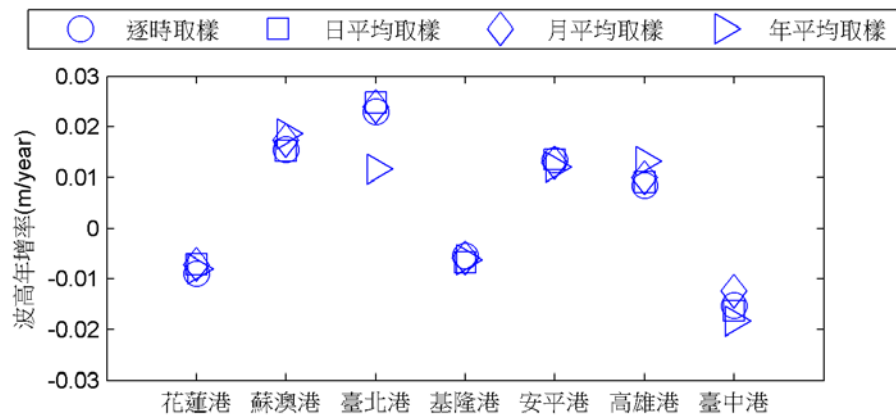


圖 2.9 七個主要港口的波浪年增率(線性回歸)

另外採用 EMD 法對應各種取樣方式的趨勢分析結果如圖 2.10 所示。橫軸分別為臺灣 7 個主要港口，縱軸則為 EMD 法檢測出的波浪年增率，圖中並以圓形、矩形、菱形及三角形符號表是各種不同的取樣方式。結果顯示各港波浪資料在不同的取樣方式下，以 EMD 法檢測的波浪變化趨勢有較為不同的結果，若與圖 2.9 線性回歸分析的結果做比較可更明顯的看出此現象。尤其臺中港採用 EMD 法在不同取樣方式下所分析出來的波浪變遷趨勢甚至有趨勢不一致的問題，例如逐時資料取樣的方式進行 EMD 後檢測出波浪遞增的現象，而月平均與年平均取樣方式卻檢測出相反的遞減現象，此現象為 EMD 量化趨勢的方法所造成。

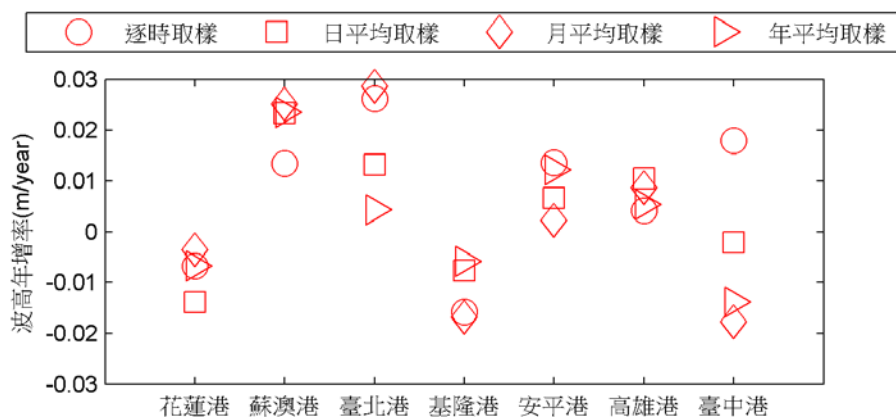


圖 2.10 七個主要港口的波浪年增率(EMD)

在上述 2 種方法搭配不同取樣方式的分析結果中可發現波浪變遷趨勢有很大的差異，除了取樣方式造成的差異外，不同的趨勢偵測方法對於雜訊、資料缺漏及周期性變化也會有不同程度上的影響。本研究另採用無母數趨勢偵測法進行測試，可判斷資料是否具有趨勢變化特性，其中 Seasonal Kendall 檢測法可給定時序列數據中額外的季節性標記，能有效針對資料缺漏問題與週期性數據進行趨勢檢測。其檢測結果如圖 2.11 所示。圖中實線代表各港以上述各種方法與取樣方式的趨勢偵測結果的範圍，頂端圓形符號與底部圓形符號分別對應該範圍內的最大與最小值。圖內星號則為各港月平均取樣法資料進行 Seasonal Kendall 法的趨勢偵測結果。圖中可發現花蓮港、蘇澳港、臺北港、安平港及高雄港等 5 個港口在 Seasonal Kendall 法中皆判定為具有趨勢性的數據，而基隆港與臺中港則判斷為不具趨勢性。其結果顯示花蓮港長期波浪趨勢分析中其波浪年增率為-0.0068m/year，屬於微量遞減。蘇澳港、臺北港、安平港與高雄港則分別為 0.0133m/year、0.0236m/year、0.0109m/year 及 0.0101m/year，屬於逐年遞增的趨勢。

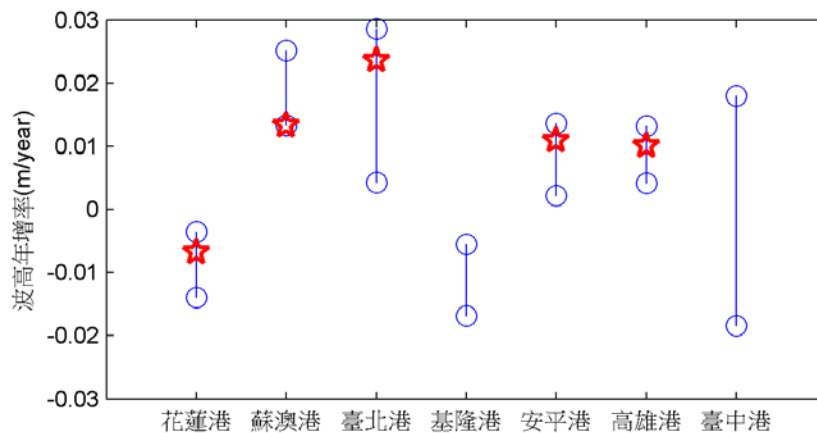


圖 2.11 SK 法之趨勢結果(☆)與各種方法年增率範圍(○)

第三章 類神經颱風波浪推算模式

為提升設計波浪的推估技術，本計畫希望能評估目前所發展的類神經網路颱風波浪推算模式與 M5 最小化模式樹波浪推算模式之推算能力。臺中港的類神經波浪推算模式為港研中心研究計畫中所建立，但為能採用同樣的資料群來比較 2 種模式的推算能力，本計畫採用本年度收集的新資料來對類神經網路波浪推算模式做更新。

3.1 資料分析

波浪資料本研究選取 H_s (示性波高)作為實測波高資料，即以波群中依照大小排序，取前 1/3 大的個別波波高平均值來代表波浪的大小，其在統計特性上，具安定性且較能反映波浪所含之能量大小，是最常使用的代表波。(郭，2001)

颱風資料取自日本國土交通省氣象廳(簡稱 JMA)的 RSMC-Tokyo Center 颱風氣象資料，颱風的名稱、發生時間與行進路徑皆採用 RSMC-Tokyo Center 發佈的資料為準，時間格式以臺灣的所在時區為準。RSMC-Tokyo Center 所發佈之颱風資料，為每 6 小時 1 筆，而港灣技術研究中心之波浪資料為每 1 小時 1 筆，為配合波浪資料之時間間距，本研究將颱風氣象資料(經緯度、中心氣壓、近中心最大風速)，利用 3 次多項式內插，將其時間間距內插為 1 小時 1 筆。再依據各場颱風路徑資訊與目標推算點相對位置來挑選合適的颱風作為模式的建立與驗證之用。建立類神經颱風推算模式需要考慮資料的品質與完整性，本研究考慮每場颱風對應之波浪資料之完整性及相關性，故在模式建立前必須剔除對應波浪資料不完整的颱風，本研究選擇對應臺中港實測波浪資料完整之颱風 42 場，如表 3.1 所示。

表 3.1 選取用來建立臺中港模式的颱風資訊與其對應峰值波高

年份	颱風名稱	颱風名稱	起始日期	終止日期	最大風速 (knot)	峰值波高 (m)	路徑 分類
2003	DUJUAN	杜鵑	2003/08/30	2003/09/03	80	3.3	5
2003	MAEMI	梅米	2003/09/06	2003/09/14	105	2.2	
2003	MELOR	米勒	2003/10/30	2003/11/03	50	4.2	8
2004	CONSON	康森	2004/06/07	2004/06/11	80	3.34	
2004	RANANIM	蘭寧	2004/08/08	2004/08/13	80	2.55	
2004	AERE	艾利	2004/08/20	2004/08/26	80	3.44	1
2004	NOCK_TEN	納坦	2004/10/23	2004/10/26	85	4.56	6
2005	HAITANG	海棠	2005/07/13	2005/07/20	105	6.96	3
2005	MATSA	馬莎	2005/07/31	2005/08/07	80	4.34	1
2005	TALIM	泰利	2005/08/27	2005/09/02	95	6.26	3
2005	KHANUN	卡努	2005/09/07	2005/09/13	85	3.15	
2005	LONGWANG	龍王	2005/09/26	2005/10/03	95	5.58	3
2006	BILIS	碧利斯	2006/07/09	2006/07/15	60	4.72	2
2006	KAEMI	凱米	2006/07/19	2006/07/26	80	3.63	3
2006	SHANSHAN	珊珊	2006/09/14	2006/09/18	110	3.2	
2006	CHEBI	奇比	2006/11/09	2006/11/13	100	3.18	
2007	SEPAT	聖帕	2007/08/13	2007/08/19	110	5.43	3
2007	WIPHA	韋帕	2007/09/16	2007/09/19	100	4.62	1
2007	KROSA	柯羅莎	2007/10/02	2007/10/08	105	6.74	2
2008	KALMAEGI	卡玫基	2008/07/15	2008/07/18	65	3.28	2
2008	FUNG_WONG	鳳凰	2008/07/25	2008/07/29	75	6.24	3
2008	SINLAKU	辛樂克	2008/09/09	2008/09/21	100	5.24	2
2008	HAGUPIT	哈格比	2008/09/19	2008/09/25	90	3.64	
2009	LINFA	蓮花	2009/06/18	2009/06/22	60	2.76	9
2009	MORAKOT	莫拉克	2009/08/03	2009/08/10	75	7.78	3
2009	PARMA	芭瑪	2009/09/29	2009/10/14	100	4.35	s
2010	FANAPI	凡那比	2010/09/15	2010/09/20	95	5.09	4
2010	MEGI	梅姬	2010/10/13	2010/10/23	125	4.83	9
2011	SONGDA	桑達	2011/05/21	2011/05/29	105	4.08	
2011	MEARI	米雷	2011/06/22	2011/06/27	60	2.76	
2011	NANMADOL	南瑪都	2011/08/23	2011/08/31	100	3.56	4
2012	TALIM	泰利	2012/06/17	2012/06/20	50	2.05	9
2012	SAOLA	蘇拉	2012/07/28	2012/08/03	70	5.49	2
2012	TEMBIN	天秤	2012/08/19	2012/08/30	80	3.35	s
2012	JELAWAT	杰拉華	2012/09/21	2012/10/01	110	3.81	
2014	NEOGURI	浣熊	2014/07/04	2014/07/11	100	2.18	
2014	MATMO	麥德姆	2014/07/17	2014/07/25	70	3.94	3
2014	KALMAEGI	海鷗	2014/09/12	2014/09/17	75	2.56	
2014	FUNG_WONG	鳳凰	2014/09/17	2014/09/24	45	4.12	s
2015	SOUDELOR	蘇迪勒	2015/08/01	2015/08/11	115	10.95	3
2015	GONI	天鵝	2015/08/15	2015/08/25	100	2.94	
2015	DUJUAN	杜鵑	2015/09/22	2015/09/29	110	7.7	2

資料來源：本計畫整理

表 3.1 中顯示在 2003 至 2015 年中有 42 場颱風擁有相對應完整的波浪資料，其中該場颱風發生的峰值波高小於 3m 的有 8 場，這 8 場颱風雖然對波浪造成的影響不大，甚至其影響量可能小於季節風所造成的季節風浪。但為能讓模式能有效地應用在各種規模的侵台颱風推算本計畫仍考慮選取對研究目標臺中港影響較小的颱風進行模式建立。峰值波高在 3m 至 5m 間的有 22 場占最多數，5m 至 7m 有 9 場，7m 以上僅有 3 場。

對於臺中港而言，其港區位置位於臺灣西部海岸，在每年 6 至 9 月受到西南季風作用，然而此段時間也恰好為颱風容易侵襲臺灣的季節，由表 3.1 及可發現在 6 月至 9 月侵襲臺中港的颱風皆在 42 場颱風中占 37 場，約為總颱風場數的 88% 以上，顯示臺中港有大部分的颱風波浪資料除颱風所造成的影響量外，其波高上升的原因亦可能包含季節風浪成分在內，若在季節風與颱風對波浪的影響量是相互累積之假設下，此現象會使颱風波浪推算模式的建立更為困難。

以本計畫的目標推算點的地理位置來說，大部分的侵台颱風路徑都會受到中央山脈阻擋而造成結構鬆散，依往昔經驗這類型的颱風受到高山的屏障效應，對於其所造成的波浪影響量就會變小。僅從歷年的臺灣地區颱風路徑分類統計圖(如圖 3.1)來看臺中港的空間位置，較可能對臺中港造成直接影響的路徑為第 7 路徑及第 9 路徑，其餘路徑皆會受到地形以及高山的屏障影響。然而大部分的侵台颱風是屬東向西行，因此本計畫針對臺中港所有時間序列中的颱風位置與相對應推算點波高值作一空間分布的特性分析，以了解臺中港波浪受不同位置的颱風的影響程度，其結果如圖 3.2 所示。圖中各點位所對應的顏色為目標點的波高值，黃色代表波高小於 3m 的資料點，綠色代表 3m 至 5m 間的資料點，藍色為 5m 至 7m 間的資料點，紅色則代表發生 7m 以上波高的資料點。

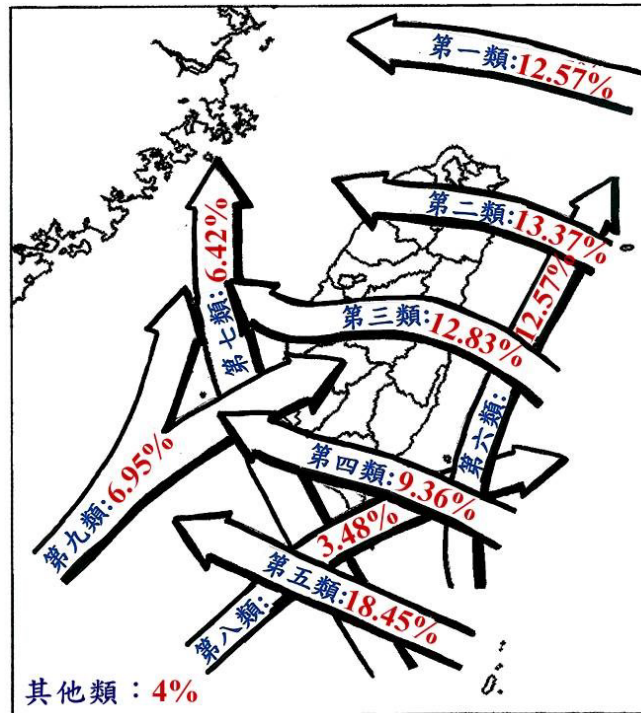


圖 3.1 臺灣地區颱風路徑分類圖(1911-2015 年)(引自中央氣象局)

圖 3.2 中發現對臺中港波浪較有影響的颱風中心位置大約都在東經 120 度以東，造成最大影響的颱風中心位置皆集中於臺灣本島中部處，見圖中紅色資料點(對應波高 7m 以上)，藍色資料點(對應波高 5m 至 7m)則分布於臺灣中部及宜蘭花蓮外海東方處，綠色資料點(3m 至 5m)大多集中於東經 120 度以東，黃色資料點(對應波高 1m 至 3m)由於尺度已接近一般風浪，所以各處都可見其資料點。為能方便判讀各資料點與臺中港的相對距離，故以臺中港為中心繪製半徑 500km 與半徑 1000km 的同心圓分界線，圖 3.2 中可發現紅色資料點與藍色資料點皆發生於半徑 500km 的距離內，顯示對臺中港而言，颱風只有在中心距離靠近臺中港 500km 以內才有機會造成 5m 以上的波高。綠色資料點分布則較廣，在臺中港半徑距離 1000km 內都有出現，但僅少部分出現在臺灣西側。此部分分析可以看出大部分對臺中港造成影響的颱風皆由東向西經過中央山脈而侵襲臺中港，出現較大波浪的情況十分明顯，由於此類颱風出現的機會較多，反而來自西南側直撲臺中港的颱風在現有資料紀錄中都沒有造成較明顯的波浪。

在所選用的 42 場颱風中，其中所造成峰值波高大於 7m 對於臺中港有較大影響有莫拉克(MORAKOT, 1998)、蘇迪勒(SOUDELOR, 2015)及杜鵑(DUJUAN, 2015)，前 2 場與第 3 場分別屬於第 3 路徑與第 2 路徑，皆由臺灣東海岸由中部與北部登陸穿過中央山脈。5m 至 7m 波高的颱風包括海棠(HAITANG, 2005)、泰利(TALIM, 2005)、龍王(LONGWANG, 2005)、聖帕(SEPAT, 2007)、柯羅莎(KROSA, 2007)、鳳凰(FONGWONG, 2008)、辛樂克(SINLAKU, 2008)、凡那比(FANAPI, 2010)、蘇拉(SOALA, 2012)等，其中除凡那比是屬於第 4 路徑外，其餘皆為第 2 路徑與第 3 路徑，上述波高大於 5m 以上的 12 個颱風其皆為自東向西登陸台灣本島穿越中央山脈後往西行進，此分析結果突顯出本研究建立模式會面臨的兩個問題，其一為大部分的颱風都是先經過台灣本島陸地與山脈的遮蔽與屏障後才影響臺中港，此遮蔽與屏障效應相較於直撲型的颱風波浪推算更加不易。另由於缺少自西方或西南方直撲臺中港的較大型颱風波浪案例，未來模式應用於推算與波浪預報時對於該類型颱風的推算結果可能會較差。

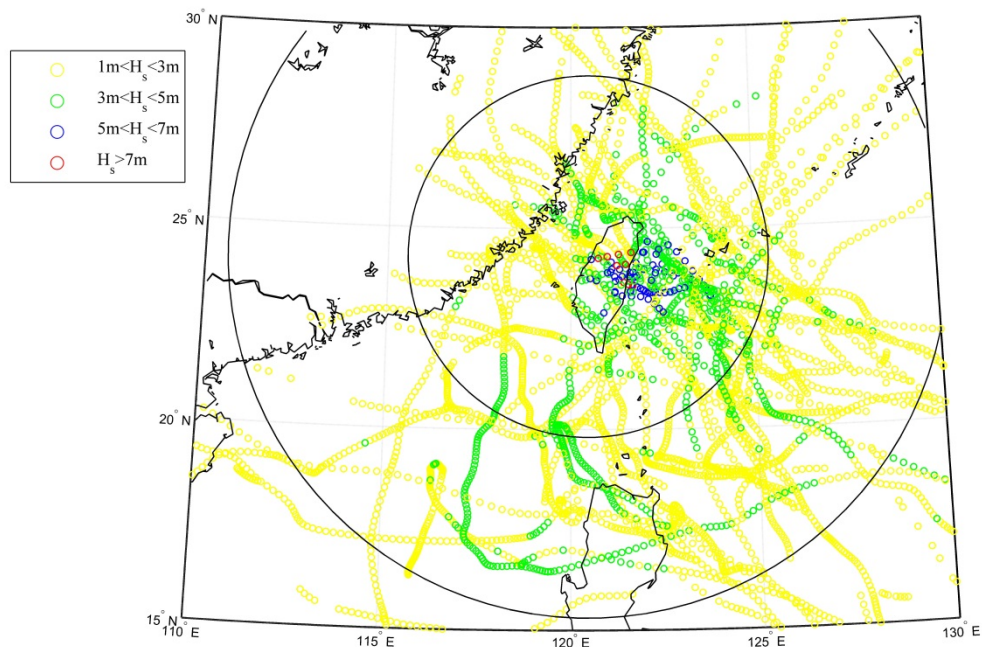


圖 3.2 颱風中心位置與相對應臺中港波高資料空間分布圖

3.2 類神經颱風波浪模式

3.2.1 類神經網路架構

類神經網路具備著一些優良的特性其中包括(1)高速的計算能力(2)自我學習能力(3)高容量的記憶力(4)容錯的能力。

人工神經元輸出值與輸入值的關係式，可以表示如下：

$$Y_i = f\left(\sum_j W_{ij} X_j - \theta_i\right) \quad (3-1)$$

其中， Y_i 為人工神經元模型的輸出訊號； f 為人工神經元模型的轉換函數(transfer function)，將人工神經元的輸出，經由轉換函數處理後，得到輸出訊號； W_{ij} 為人工神經元模型連結加權值； X_j 為人工神經元模型的輸入訊號； θ_i 為人工神經元模型的閾值。

本研究使用 MATLAB 類神經網路軟體，選擇其中的工具程式庫之倒傳遞網路作為颱風推算的工具。倒傳遞類神經網路(back-propagation neural network, BPNN)，屬於前向監督式學習網路，其基本原理是利用最陡坡降法(gradient steepest descent method)，疊代修正誤差函數而使誤差函數達到最小。倒傳遞類神經網路的總體運作學習方式有兩種，一為學習過程，就是網路依既定的學習演算法，從使用的輸入資料中學習，並藉以調整網路連結的加權值；使得網路演算結果與目標輸出值相同；另一種為回想過程，網路依照設定的回想法則，以輸入資料來決定網路的輸出值。

倒傳遞類神經網路學習演算法中，加權值矩陣為 W_1 及 W_2 ，偏權值量為 θ_1 及 θ_2 ，輸入量為 X ，目標輸出量為 T ，轉換函數則採用雙曲函數(hyperbolic tangent function)，而網路輸出量為 Y ，網路的學習過程大致可分為下列幾個單元：

(1)計算隱藏層輸出量 Z 與網路輸出量 Y

$$net_1 = \sum_i W_{1i} X_i - \theta_1 \quad (3-2)$$

$$Z = f(net_1) = \frac{e^{net_1} - e^{-net_1}}{e^{net_1} + e^{-net_1}} \quad (3-3)$$

$$net_2 = \sum_j W_{2j} X_j - \theta_2 \quad (3-4)$$

$$Y = f(net_2) = \frac{e^{net_2} - e^{-net_2}}{e^{net_2} + e^{-net_2}} \quad (3-5)$$

(2) 計算隱藏層差距量 δ_1 與輸出層差距量 δ_2

$$\delta_1 = Z(1-Z) \sum_j (W_{2j} \delta_j) \quad (3-6)$$

$$\delta_2 = (1+Y)(1-Y)(Z-Y) \quad (3-7)$$

(3) 計算加權值矩陣的修正量 ΔW

由於監督式學習目的在降低網路的目標輸出值 T_j 與網路輸出值 Y_j 之間的差距，為了達到這個目的，以誤差函數 E 做為修正的加權值指標，並藉由轉換函數降低誤差函數值，誤差函數 E 設為：

$$E = \frac{1}{2} \sum_j (T_j - Y_j)^2 \quad (3-8)$$

此時加權值的修正量可表示為：

$$\Delta W = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W} \quad (3-9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = -\delta_j^n A_i^{n-1} \quad (3-10)$$

其中 η 為學習速率(learning rate)，主要控制每次誤差函數最小化的速率快慢， δ_j^n 為 W_{ij} 所連結第 n 層之處理單元差距量， A_i^{n-1} 為 W_{ij} 所連結第 $n-1$ 層之處理單元值。

(4) 隱藏層與輸出層加權值矩陣 W_1 、 W_2 及偏權值向量 θ_1 、 θ_2 的更新：

$$W_1 = W_1 + \Delta W_1 \quad (3-11)$$

$$\theta_1 = \theta_1 + \Delta \theta_1 \quad (3-12)$$

$$W_2 = W_2 + \Delta W_2 \quad (3-13)$$

$$\theta_2 = \theta_2 + \Delta \theta_2 \quad (3-14)$$

當倒傳遞類神經網路經過輸入值與目標輸出值一次的學習，便算是經過一個學習的循環，而學習循環的次數將取決於誤差函數收斂與否以及是否達到容許的誤差量。一般而言，倒傳遞類神經網路較其他的類神經網路需要較多的學習循環次數。由測試用的資料數據，利用學習完成的網路參數進行網路回想的過程，由網路回想過程得到的網路輸出值與目標輸出值比較，以評估網路學習的精度。

類神經網路模式採用倒傳遞類神經網路架構(Backpropagation Neural Network, BPNN)，關於倒傳遞神經網路的理論與演算詳見 Eberhar and Dobbins (1990)的說明與推導。倒傳遞類神經網路對於線性及非線性函數有良好的模擬能力，而類神經網路在適當的結構組織下能夠模擬有限範圍的隨機函數，也就是類神經結構擁有極佳的記憶能力，模擬能力的好壞受限制於學習資料的完整性及類神經網路結構。

倒傳遞類神經網路藉由學習資料與模擬結果的誤差修正各個加權值，同時藉由學習的過程建構正確的輸入參數與輸出值間的關係。對於具有一個隱藏層的倒傳遞類神經網路通常表示為：

$$O_{P \times 1} = f(W_{S \times R} I_{R \times 1} + b_{S \times 1}) \quad (3-15)$$

其中 $O_{P \times 1}$ 為神經網路具有 P 個向量的輸出矩陣， f 為轉移函數， $I_{R \times 1}$ 為具有 R 個向量的輸入矩陣， $W_{S \times R}$ 為具有 S 個神經元的神經網路權重矩陣， $b_{S \times 1}$ 為網路偏權值矩陣。式(15)簡單的表示方法為 "S-P"，所以一個具有 2 個隱藏層神經元的個數分別為 10 及 20，且一個輸出單元時，簡單的表示法為 1-10-20-1。

在使用倒傳遞網路的首先必須決定隱藏層的層數，以確定網路的大小，方能建構一個好的模式。在許多理論研究的結果與工程領域的模擬應用上都顯示，大多數問題可藉由單層隱藏層的架構來處理，2 層以上的架構是用來處理更複雜的問題以及非線性的關係，隱藏層層

數的決定在不同的研究或問題中有不同的結論(Chester, 1990; Hayashi 等, 1990; Kurkova, 1992; Hush 和 Horne, 1993)。

類神經網路架構的建置包括輸入層、隱藏層及輸出層，輸入層與輸出層都可以由現有的資訊以及問題本身決定，系統的控制因子或影響因子決定輸入層的神經元個數，系統的預測變數決定輸出層的神經元個數。輸入項資料建議先經過前處理，將資料正規化至一定的範圍間，如此可在網路訓練前考慮輸入參數與輸出值的極端狀況，來確定網路輸入與輸出的值域，且經過處理後的訓練資料，可以讓訓練時權重調整的速率相近。當決定隱藏層的層數後，各隱藏層神經元個數的多寡對網路有相當大的影響，過少的神經元個數無法建構適當的網路來描述問題，過多的神經元個數則造成網路自由度過高，進而難以控制網路訓練的目標造成過度學習的狀況，甚至隱含了雜訊的描述，而失去歸納推演的能力。選取的隱藏層神經元個數一般須經由測試來避免網路結構太過複雜或太過簡單，以往研究結果建議可採用 Huang 和 Foo (2002)提出的經驗公式

$$h = 2z + 1 \quad (3-16)$$

其中， z 為輸入層的神經元個數， h 為隱藏層神經元個數。

3.2.2 轉換函數與訓練函數

為了避免網路的複雜化以及過度學習的情況發生，Kecman(2001)提出隱藏層的個數宜採用 1 或 2 層具有最好的收斂性質，因每增加一層隱藏層需要計算的權重值與偏權值數量就會突增，需要測試的神經元個數組合亦會增加，故過多的隱藏層會使網路趨向複雜，減緩其收斂速度。本研究採用的類神經隱藏層個數為 1 層，欲模擬非線性的運算過程，以及輸入參數會有正負方向性，故選用具有能輸出正負值的正切雙彎曲轉換函數(tansig)為其隱藏層之轉換函數，正切雙彎曲轉換函數的輸出介於-1 和 1 之間，相較於雙彎曲函數(logsig)輸出介於 0 和 1 之間擁有較多的輸出範圍。當正切雙彎曲轉換函數之自變數趨近於正負無窮大時，輸出值會接近於-1 或 1。如圖 3.3 所示。

基本的倒傳遞網路所使用的訓練演算法為最陡坡降法，意即權重以及閾值的調整方向，是朝著目標函數的負梯度方向前進，雖然朝著負梯度方向降低最快，但是未必能有最快的收斂。本研究所使用的訓練演算法為共軛梯度演算法(Conjugate Gradient Algorithm)中收斂速度較慢的 *trainscg*(Scaled Conjugate Gradient)，Scaled Conjugate Gradient 是由 Moller(1993)提出，其在最陡坡降法的簡易演算程序與牛頓法快速的 2 次收斂速率之間採用了折衷的方式，調整的方向是由前次調整方向與目標函數梯度之線性組合而成。

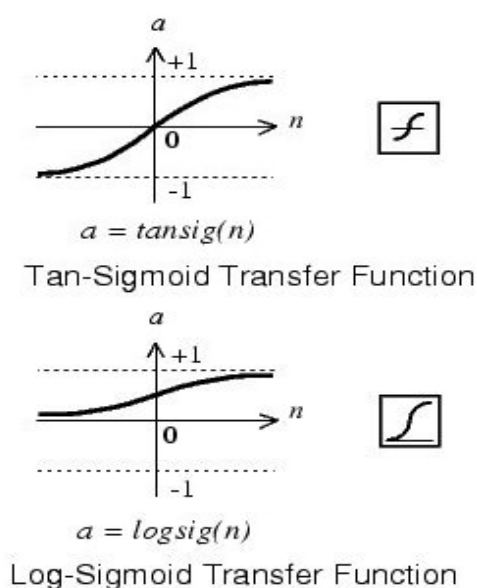


圖 3.3 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數

3.2.3 隱藏層神經元測試

決定隱藏層個數後，隱藏層神經元個數的多寡亦對網路有著相當大的影響，使用過少的神經元個數無法有效的建構適當的網路來描述問題，使用過多的神經元個數會使網路的複雜度過高，易發生過度學習的狀況，甚至造成模擬的結果有雜訊的產生，失去了網路的推演能力。本研究使用 Dawson(2001)所提出的網路增長法(Constructive algorithm)來確定神經元個數，其方法為先設定小數目的隱藏層神經元個數開始訓練，再逐一增加神經元個數，當神經元個數增加到某一個數之後，整體學習組的 *RMSE* 無法被有效的降低，該個數即為最佳的

神經元個數。同時配合驗證組的 $RMSE$ ，確保使用的神經元個數不會發生過度學習的情況。另外亦參考 Huang 及 Foo (2002) 提出的經驗公式 $h=2z+1$ ，其中 z 為輸入層的神經元個數、 h 為隱藏層神經元個數。

3.2.4 資料分類

本計畫依循往昔港研中心研究中所採用的資料與分類方式來建立臺中港波浪推算模式，對於颱風風速及路徑變化我們採用群集分析法 (cluster analysis) 對颱風資料進行分類，獲得各特性不同的分類群後再將各分類群以三分之二與三分之一的比例分為學習資料與驗證資料，即可獲得相同特性的學習資料與驗證資料。此方式可以確保學習資料包含各種不同的特性，以避免類神經在學習階段為了保留驗證資料而未包含應有的特性。

3.2.5 模式輸入與輸入層轉換函數

RSMC-Tokyo Center 的颱風氣象資料包括颱風經緯度、中心最大風速及中心氣壓，為了使類神經模式輸入的資訊更為精細與明確，本研究利用這 3 項颱風資料計算出 5 個類神經的輸入參數，分別為：

1. 颱風與目標點距離(D)、
2. 颱風中心對目標點的方位角(θ_1)、
3. 颱風侵襲角(θ_3)、
4. 目標點海面 10m 風速(V)、
5. 目標點上空風向(V_{deg})。

由經緯度資料可計算：颱風與目標點距離(D)、颱風中心對目標點的方位角(θ_1)、颱風移動方位角(θ_2)，距離與方位角只需透過颱風中心座標與目標點座標即可計算。 θ_1 與 θ_2 如圖 3.4 所示。

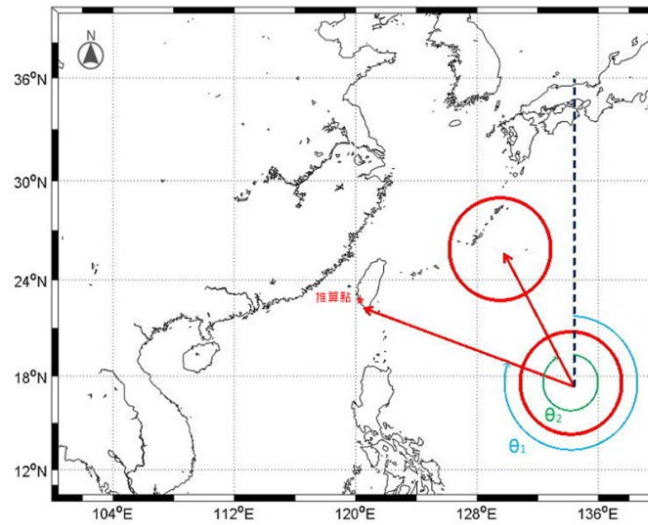


圖 3.4 颱風中心對目標點方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 示意圖

因北半球的颱風為逆時鐘旋轉，以颱風前進方向為中心來看，其右半圓較左半圓的風力大，故目標點所面臨的是颱風的左半圓或右半圓對於模式推算來說是一個需要考量的因素。本研究透過颱風移動方位角減去颱風中心對目標點方位角($\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$)來定義目標點所面臨的颱風結構(左右半圓)， θ_3 定義為颱風侵襲角。以圖 3.4 狀況為例，颱風中心是由圖中右下往左上方移動，目標點目前所面臨的是颱風的左半圓。由以上關係可知，若 θ_3 在 0° 至 180° 則目標推算點所面臨的是颱風的左半圓，反之，若 θ_3 在 0° 至 -180° 則目標推算點所面臨的是颱風的右半圓。圖 3.4 中 θ_1 小於 θ_2 ，故 θ_3 為正值，顯示目標點面臨的是颱風的左半圓。

本計畫收集近年來參數化風場模型的相關文獻，選擇 3 種常用的參數化颱風風場模型以進行測試，風場模型包括：1. 中央氣象局提供之 CWB Model(參見吳，2014)；2. SLOSH model；3. Rankin-Vortex Model(RVM)。以 3 種風場模型針對臺北港現有風速資料之 21 場颱風進行推算並比較其結果如顯示 3 種風場模型於 21 場颱風所推算出的風速結果與臺北港實測風速資料間的判定係數(R-square, R^2)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風最大風速誤差 $\Delta V_{s,p}$ 及最大風速發生時間誤差 Δt_p 。而將各場颱風最大風速誤差取絕對值後進行平均

可以發現以 CWB model 的誤差最大，其值為 7.56m/s。RVM 的誤差次之，其值為 7.41m/s，而 SLOSH model 最小，其值為 6.44m/s。以最大風速發生時間的誤差而言，SLOSH model 的誤差較小，其值為 11.33 小時，CWB model 次之，而 RVM 最差，其最大風速發生時間的誤差達 23.57 小時。整體 RMSE 是以 SLOSH model 最佳，CWB model 次之，RVM 最差。判定係數是以 SLOSH model 較佳，RVM 次之，而 CWB model 較差。經以上 21 場颱風的風速推算精度測試後發現 SLOSH model 在各項比較中皆較往昔使用的 RVM 準確，故本計畫採用 SLOSH model 來進行模型風場的推估。

表 3.2。顯示 3 種風場模型於 21 場颱風所推算出的風速結果與臺北港實測風速資料間的判定係數(R-square, R^2)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風最大風速誤差 $\Delta V_{s,p}$ 及最大風速發生時間誤差 Δt_p 。而將各場颱風最大風速誤差取絕對值後進行平均可以發現以 CWB model 的誤差最大，其值為 7.56m/s。RVM 的誤差次之，其值為 7.41m/s，而 SLOSH model 最小，其值為 6.44m/s。以最大風速發生時間的誤差而言，SLOSH model 的誤差較小，其值為 11.33 小時，CWB model 次之，而 RVM 最差，其最大風速發生時間的誤差達 23.57 小時。整體 RMSE 是以 SLOSH model 最佳，CWB model 次之，RVM 最差。判定係數是以 SLOSH model 較佳，RVM 次之，而 CWB model 較差。經以上 21 場颱風的風速推算精度測試後發現 SLOSH model 在各項比較中皆較往昔使用的 RVM 準確，故本計畫採用 SLOSH model 來進行模型風場的推估。

表 3.2 三種風場模型的比較表

年份	颱風名稱	CWB model				SLOSH model				RVM			
		$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2
2000	巴比倫	-0.22	34	1.97	0.47	2.00	31	2.50	0.44	2.84	30	3.00	0.60
2001	納莉	4.60	-7	4.58	0.29	5.87	-8	4.18	0.40	7.72	-9	4.48	0.68
2002	雷馬遜	-5.80	-16	5.81	0.14	-4.78	-16	5.30	0.21	-4.08	-16	6.68	0.35
2002	辛樂克	-2.85	-11	3.69	0.58	-0.54	-3	3.68	0.56	3.65	-3	4.04	0.73
2004	敏督利	9.80	-31	4.92	0.05	14.25	-31	6.26	0.07	12.42	-31	5.79	0.11

2004	蘭寧	6.46	10	5.48	0.28	8.35	9	6.29	0.24	9.17	11	6.61	0.42
2010	凡那比	-1.35	-17	4.21	0.57	0.39	-17	3.71	0.66	3.79	-17	4.24	0.83
2010	梅姬	-10.31	-82	7.05	0.18	-11.69	27	7.60	0.02	-13.58	37	9.73	-0.38
2011	艾利	-12.89	-8	4.38	0.05	-9.81	-5	3.47	0.18	-13.56	-84	5.33	-0.26
2011	桑達	-2.43	4	5.06	0.48	-1.47	4	5.35	0.39	-8.22	0	7.39	0.50
2011	米雷	-9.43	-17	5.35	0.45	-5.95	-15	4.11	0.52	-5.83	-16	6.54	0.53
2011	南瑪都	-10.25	-4	4.13	0.29	-7.27	-3	3.99	0.20	-6.63	-2	5.81	0.29
2012	泰利	-11.90	0	2.82	0.27	-6.58	0	2.44	0.35	-11.29	0	3.43	0.79
2012	杜蘇芮	-15.11	4	5.00	0.39	-13.00	-7	3.95	0.43	-10.53	-7	3.91	0.46
2012	蘇拉	-2.29	16	6.79	0.31	1.06	16	6.70	0.23	2.83	17	8.23	0.48
2012	海葵	-5.52	-4	3.27	0.72	-3.91	-4	2.65	0.70	-3.04	-6	2.71	0.80
2012	啟德	-11.32	-1	3.82	0.18	-10.73	-2	3.27	0.31	-8.88	52	3.46	0.35
2012	天秤	0.51	-7	3.11	0.33	4.31	-7	3.35	0.33	1.17	-120	3.53	0.74
2013	蘇力	-6.71	-8	6.42	0.37	-2.72	-8	5.84	0.49	2.57	-6	5.83	0.74
2013	西馬隆	-21.73	-6	7.09	0.21	-19.38	-6	6.14	0.20	-19.77	-12	6.58	0.20
2013	康芮	-7.24	-19	5.60	0.13	-1.20	-19	5.52	0.14	-4.00	-19	5.90	0.34
	平均絕對值	7.56	14.57	4.79	0.32	6.44	11.33	4.59	0.34	7.41	23.57	5.39	0.44

此3種風場模型於不同時期採用了不同的探空資料或空間實測風速來進行經驗公式的擬合，其公式型態接近，但可能由於其來源資料的地域特性不同而有不同的參數結果。

SLOSH 參數風場模式可透過颱風中心位置與相關參數(壓力、影響半徑範圍)來推算颱風風場分布。其理論公式如下：

$$V_r = V_{\max} \frac{2R_m r}{R_m^2 + r^2} \quad (3-17)$$

其中， V_r 為距颱風中心 R 公里處之旋轉風速， R_m 為最大暴風半徑， $V_{\max}$ 為近中心最大風速。有關最大暴風半徑 R_m 之計算，本研究採 Knaff(2007)之公式：

$$R_m = 66.785 - 0.09102V_{\max} + 1.0619(|\phi| - 25) \quad (3-18)$$

SLOSH 風場模型的公式是以水平的壓力梯度風場分布狀況，而本文所探討的風速為垂直方向的海面 10m 上空風速，因此公式須作一個修正，修正方式以一個修正係數修正之，其公式如下：

$$V_{10} = K_m V \quad (3-19)$$

其中， K_m 為一修正係數，一般建議 SLOSH Wind Model 的修正係數為 $0.75 < K_m < 0.8$ 。本研究修正係數取 0.8。

颱風在北半球為逆時鐘方向旋轉，在行徑過程中颱風的右半邊的風速會是增強的趨勢，颱風的左半邊的風速會是減弱的趨勢，須加上颱風行進狀態時的修正項風速修正，其修正公式如下：

$$U(r) = \frac{R_m r}{R_m^2 + r^2} V_f \quad (3-20)$$

其中， U 為距離颱風中心 r 公里處之修正風速(m/s)、 r 為颱風中心至目標點的距離(km)、 R_m 為最大暴風半徑(km)， V_f 為颱風前進速度(m/s)。最終所求目標點海面 10m 風速 V_{10} 公式如下：

$$V_{10} = V(r) + U(r) \quad (3-21)$$

由以上之說明可知，利用 SLOSH 模型颱風模式計算的風場，颱風中心前進速度 V_f 與方向 ϕ 、中心氣壓 P_c 及近中心最大風速 V_{max} ，可由颱風記錄直接輸入，而後即可算出目標點海面 10m 風速 V 以及目標點上空風向 V_{deg} 。本研究在輸入參數的選擇上，挑選了具有能夠代表颱風遠近特性、位置特性、左右不對稱性，共 3 個輸入參數 D 、 θ_1 、 θ_3 ，以及能夠代表目標點特性的風速與風向，共兩個輸入參數 V 、 V_{deg} 。以下針對上節所計算之 5 個參數做進一步的探討。

(1) 目標點 10m 風速 V ：

颱風接近目標點時，驅動波浪最主要的動力為風，風的起因是由於颱風中心低氣壓與外部壓力的差異造成壓力梯度的變化，此壓力梯度使得空氣劇烈的流動形成風。利用模型颱風模式計算風速時，只需要輸入目標點座標以及颱風逐時座標與逐時中心氣壓，但其並未考慮陸地上受到地形或是山脈的遮蔽影響，若要以傳統的統計方法、歸納或是理論方法計算地形影響亦不容易，所以本研究將目標點風速 V 配合其他輸入參數一起輸入類神經網路進行學習，以期能解決複雜的地形影響。

(2) 颱風與目標點距離 D ：

颱風與目標點的距離越近，對目標點當地波浪的影響就越大，意即距離 D 越小，波高值會越大。以颱風資料相對應之波浪資料來繪製距離-波高分布圖，如圖 3.5 所示。圖中顯示雖然颱風距離與目標點波高大致上呈現反比，但在距離小時仍會有許多波高小的狀況發生(圖中左下角密集區)，這顯示颱風因為其他因素例如颱風減弱、陸地遮蔽或陸域地形造成風場的衰減，使得目標點波高降低，距離與波高值並非單純的呈現反比關係。另外也可發現在颱風距離目標點 2000km 以上，出現波高 3m 的數量明顯的變少，故本研究將排除 2000km 以上的資料點，並將剩餘資料點距離除以 2000km 來作正規化再以 1 減之，將原本反比之關係修改為正比關係再輸入類神經。

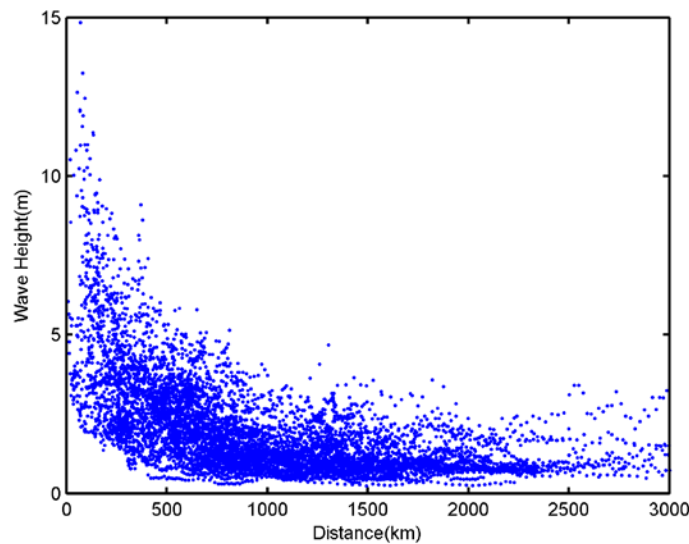


圖 3.5 颱風距離與目標點波高分布

(3) 目標點的方位角 θ_1 ：

由目標點的方位角表示目標點是在颱風中心的哪一個方位，本研究設定正北為 0° ，若 θ_1 為 90° 則表示目標點在颱風的右側，反之若 θ_1 為 270° 則表示目標點位於颱風的西側，這兩種不同的位置，會因為地形遮蔽與阻隔產生不同的影響。在目標點右側的颱風不會受到中央山

脈的遮蔽影響，此位置的颱風對目標點有直接的影響；而在目標點左側的颱風則會受到中央山脈的遮蔽影響。

(4) 颱風侵襲角 θ_3 ：

如前所述，侵襲角公式為 $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ 。颱風風速結構圖如圖 3.6 所示，圖 3.6 中顯示颱風暴風範圍內的風速並非均勻分布的，如以象限劃分，在北半球行進中的颱風其右前方象限的風最大，因該象限颱風環流風向與導引氣流風向相同。如向西行進之颱風此象限吹東北風與夏季西太平洋的東北信風合併而增強了風速，至於右後方及左前方象限則是偏南的風與偏西的風，因與東北信風有抵消作用，風勢較小，在左後方象限的風最小，因該象限吹西南風恰與西太平洋的東北信風相反，故大量抵消，所以一般而言，颱風前半部風力大於後半部。由於 SLOSH 模型颱風模式並未考量到這種颱風的不對稱性，故需輸入此參數用以判斷目標點是位於颱風的左半圓還是右半圓(以前進方向為中心)。同時考慮 θ_3 與 θ_1 兩種方位角的影響，即同時考慮到颱風的不對稱性與地形的遮蔽效應，而同時 θ_3 隱含了 θ_2 (颱風移動方位角) 的資訊，意即輸入 θ_3 也輸入了 θ_2 ，也等於將颱風的行進路徑一起納入考量。

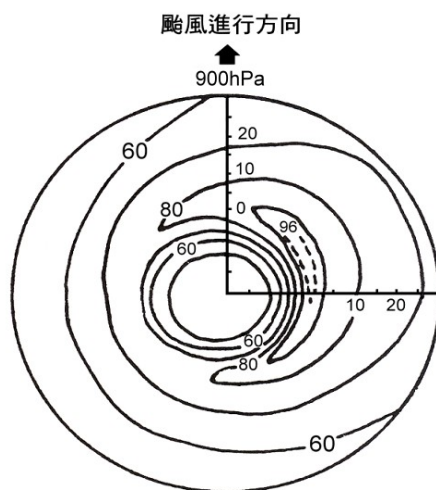


圖 3.6 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(引自中央氣象局)

(5) 目標點 10m 風向 V_{deg} ：

V_{deg} 是由 SLOSH 模型風場模式中計算而得，此處的風向定義為風的去向，而一般定義風向為來向。當風向為從海上往陸上吹時，其所造成的波浪應較大，而從陸上往海上吹時，造成的波浪則較小，本研究期望藉由 V_{deg} 讓類神經網路判別風向所造成波浪大小的影響。

3.3 波浪推算結果與實測波浪之驗證

為瞭解各模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 4 個指標來評估各模式推算結果的優劣，分別為判定係數(R-square, R^2)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 及峰值波高發生時間誤差 Δt_p 。

$$R^2 = \frac{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num}) \right)^2}{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)} \quad (3-22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (3-23)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (3-24)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (3-25)$$

其中 $H_{s,num}$ 為模式推算颱風波浪示性波高； $H_{s,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高； $t_{p,num}$ 為模式推算颱風波浪示性峰值波高發生時間； $t_{p,obs}$ 為測站實測颱風波浪峰值波高發生時間。由式(3-24)可知，若 $\Delta H_{s,p}$ 為正值，表示模式推算的示性波高過於高估，若為負值則表示低估，由式(3-25)可知，若 Δt_p 為正值，表示模式推算的峰值波高發生時間較實測晚，若為負值則表示較實測早。另外本文相關表格中為避免常態性的誤差分布造成平均值偏小的狀況，在 $\Delta H_{s,p}$ 與 Δt_p 的平均值部分採用絕對值平均來表示。以臺中港選擇的各場實測颱風波浪資料進行建立及驗證，其結果如灰底色的部分為驗證組的颱風，其餘則為學習組，表中可發現學習組中 29 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以蘇迪勒(2015)颱風誤差較大，其誤差達-3.09m。峰值波高發生

時間誤差 Δt_p 則以芭瑪(2009)相差最多，相差 49 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為納坦(2004)，誤差值為 1.24m。推算波高結果與實測波高的 R^2 則以蓮花(2009)最差，其值為 0.10。此外在驗證組中 13 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以米勒(2003)相差最大，誤差 -1.33m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以米雷(2011)相差最多，誤差 37 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為韋帕(2007)，其值為 1.29m。推算波高結果與實測波高的 R^2 最差為韋帕(2007)。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 約為 0.67m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 8.21 小時， $RMSE$ 約為 0.70m， R^2 約為 0.64。以四指數來評估模式優劣，其中峰值波高值誤差與峰值波高發生時間誤差越低代表模式模擬結果越佳，各場颱風 $RMSE$ 越低與 R^2 越高都能顯示模式模擬準確度越高。整體評估臺中港類神經推算結果峰值波高其誤差平均值 -0.25m，標準差 0.92m，顯示類神經模式在颱風波浪峰值推算有些微低估現象。

表 3.3 所示。灰底色的部分為驗證組的颱風，其餘則為學習組，表中可發現學習組中 29 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以蘇迪勒(2015)颱風誤差較大，其誤差達 -3.09m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 則以芭瑪(2009)相差最多，相差 49 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為納坦(2004)，誤差值為 1.24m。推算波高結果與實測波高的 R^2 則以蓮花(2009)最差，其值為 0.10。此外在驗證組中 13 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以米勒(2003)相差最大，誤差 -1.33m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以米雷(2011)相差最多，誤差 37 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為韋帕(2007)，其值為 1.29m。推算波高結果與實測波高的 R^2 最差為韋帕(2007)。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 約為 0.67m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 8.21 小時， $RMSE$ 約為 0.70m， R^2 約為 0.64。以四指數來評估模式優劣，其中峰值波高值誤差與峰值波高發生時間誤差越低代表模式模擬結果越佳，各場颱風 $RMSE$ 越低與 R^2 越高都能顯示模式模擬準確度越高。整體評估

臺中港類神經推算結果峰值波高其誤差平均值-0.25m，標準差 0.92m，顯示類神經模式在颱風波浪峰值推算有些微低估現象。

表 3.3 臺中港類神經颱風波浪推算結果

年份	英文名稱	中文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
2003	DUJUAN	杜鵑	0.74	3.00	0.59	0.86	3.3
2003	MAEMI	梅米	0.44	0.00	0.50	0.79	2.2
2003	MELOR	米勒	-1.33	-1.00	0.59	0.61	4.2
2004	CONSON	康森	-0.24	2.00	0.53	0.58	3.34
2004	RANANIM	蘭寧	0.09	20.00	0.56	0.38	2.55
2004	AERE	艾利	-0.18	7.00	0.44	0.85	3.44
2004	NOCK_TEN	納坦	-0.19	1.00	1.24	0.70	4.56
2005	HAITANG	海棠	-0.94	0.00	0.51	0.88	6.96
2005	MATSA	馬莎	-1.46	7.00	0.54	0.56	4.34
2005	TALIM	泰利	0.40	1.00	0.91	0.71	6.26
2005	KHANUN	卡努	-0.30	-18.00	0.41	0.50	3.15
2005	LONGWANG	龍王	0.10	-2.00	0.62	0.74	5.58
2006	BILIS	碧利斯	-1.06	-9.00	0.68	0.81	4.72
2006	KAEMI	凱米	0.10	3.00	0.86	0.71	3.63
2006	SHANSHAN	珊珊	0.73	8.00	0.45	0.79	3.2
2006	CHEBI	奇比	-0.17	-16.00	0.91	0.35	3.18
2007	SEPAT	聖帕	0.01	0.00	0.70	0.73	5.43
2007	WIPHA	韋帕	-0.28	8.00	1.29	0.22	4.62
2007	KROSA	柯羅莎	0.28	-1.00	1.19	0.65	6.74
2008	KALMAEGI	卡玫基	0.95	-15.00	0.94	0.69	3.28
2008	FUNG_WONG	鳳凰	-1.40	1.00	0.77	0.86	6.24
2008	SINLAKU	辛樂克	0.84	29.00	0.65	0.73	5.24
2008	HAGUPIT	哈格比	-0.20	10.00	0.66	0.79	3.64
2009	LINFA	蓮花	-0.25	0.00	1.06	0.10	2.76
2009	MORAKOT	莫拉克	-2.86	-2.00	0.72	0.94	7.78
2009	PARMA	芭瑪	-1.18	49.00	0.61	0.58	4.35
2010	FANAPI	凡那比	0.72	-1.00	0.68	0.75	5.09
2010	MEGI	梅姬	-1.41	-5.00	0.97	0.44	4.83
2011	SONGDA	桑達	-0.95	4.00	0.57	0.56	4.08
2011	MEARI	米雷	-0.30	37.00	0.51	0.50	2.76
2011	NANMADOL	南瑪都	0.31	0.00	0.71	0.62	3.56
2012	TALIM	泰利	0.47	0.00	0.61	0.11	2.05
2012	SAOLA	蘇拉	-0.54	-1.00	0.62	0.76	5.49
2012	TEMBIN	天秤	0.98	5.00	0.84	0.66	3.35
2012	JELAWAT	杰拉華	-0.74	-6.00	0.66	0.65	3.81
2014	NEOGURI	浣熊	-0.06	9.00	0.52	0.36	2.18
2014	MATMO	麥德姆	0.56	1.00	0.45	0.75	3.94
2014	KALMAEGI	海鷗	0.54	11.00	0.57	0.78	2.56
2014	FUNG_WONG	鳳凰	-0.30	28.00	0.77	0.62	4.12
2015	SOUDELOR	蘇迪勒	-3.09	0.00	0.59	0.88	10.95
2015	GONI	天鵝	0.22	22.00	0.88	0.66	2.94
2015	DUJUAN	杜鵑	0.37	2.00	0.61	0.86	7.7
平均絕對值			0.67	8.21	0.70	0.64	4.38

第四章 M5 最小化模式樹波浪推算模式

為提升颱風波浪推算模式的品質，本計畫除持續更新往昔類神經網路波浪推算模式外，並以 M5 最小化模式樹進行波浪推算模式之建立，再與類神經颱風波浪推算模式進行精度的分析與適用性評估。期望能在提升颱風波浪推算的能力，以增加設計波高估算的合理性。

4.1 模式介紹

當有各種因子影響一個複雜問題時，可將此因子之數據劃分成幾個類似屬性(attribute)分別去關連一個輸出量(output)，以此概念之方法可稱為機械學習(machine learning)、專家(expert)或模組(module)。當數據以動態分群(dynamic committee)時，即將輸入值(input space)區分為數群(sub regions)，逐漸成樹支狀(tree-like)之結構，這種分群之模式統稱為層級模組法(hierarchical(tree-like) modular model)，而類神經或本文 M5 最小化模式樹都是此類方法，模組法之詳細介紹可見，Bhattacharya and Solomatine(2005)、Cios et al.(2007)。M5 最小化模式樹已證實是一種架構小但精準有效之層級模組法。選擇測試數據，以屬性分界逐漸分支(split)樹狀，最後獲得數個末端葉子(leaf)，如圖 4.1 所示。

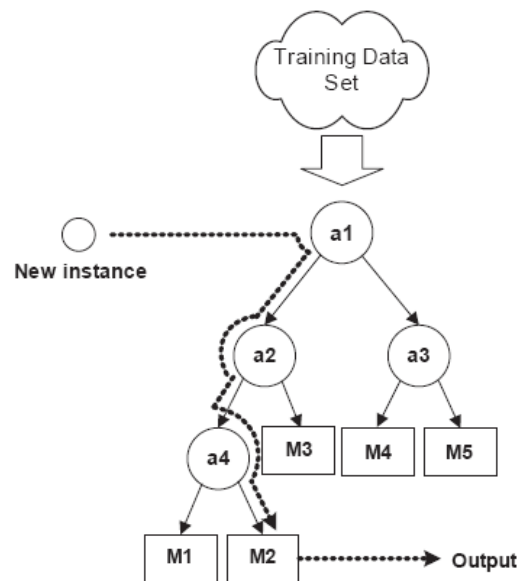


圖 4.1 層級模組法示意圖(ai 為屬性，Mi 為分群之模組)

以兩變數為例，再將分組數據與輸出值做線性回歸，如圖 4.2 所示。M5 最小化模式樹是否分支(split)，取決於分群的數量或其變異量，本文以標準差衰減量(standard deviation reduction, SDR)為指標來決定是否再分支，其定義為

$$SDR = sd(T) - \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (4-1)$$

其中 T 為進至某屬性之目標值(target value，推估值)，而 T_i 為分區 i 之目標值， $sd(T_i)$ 為分群資料 T_i 之標準差。由式(4-1)可知當同一屬性之數據分在同群，其推估值比較接近線性， $sd(T_i)$ 較小，因此 SDR 大，因此選擇最佳模式應在最大 SDR 值上。本文利用此方法，以臺中港的颱風資料進行推估颱風所造成的波浪大小。

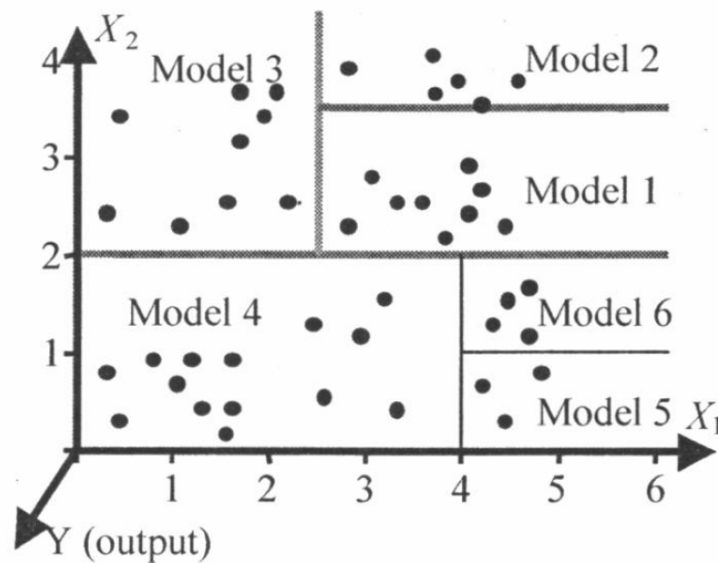


圖 4.2 M5 最小化模式樹之分組樣本在變數 x_1 及 x_2 分布與輸出 y 之示意圖

依建立類神經颱風波浪模式所採用的資料與分類方式來建立 M5 最小化模式樹波浪推算模式，對於颱風風速及路徑變化我們採用群集分析法(cluster analysis)對颱風資料進行分類，獲得各特性不同的分類群後再將各分類群以三分之二與三分之一的比例分為學習資料與驗證資料，即可獲得相同特性的學習資料與驗證資料。本計畫將颱風資訊轉

算為第三章所提及的5個輸入參數，分別為：1. 颱風與目標點距離(D)、2. 颱風中心對目標點的方位角(θ_1)、3. 颱風侵襲角(θ_3)、4. 目標點海面10m 風速(V)、5. 目標點上空風向(V_{deg})。並配合相對應的波高資料以進行 M5 最小化模式樹的建立。

4.2 模式驗證

將前述準備好的學習資料以 M5 最小化模式樹進行模式建立，有下列之步驟：

1. 誤差估算(error estimate): 為評估模式精度以實測輸出與推估之絕對誤差為標準，並考慮參數數量(ν)與數據個數(n)，以 $(n+\nu)/(n-\nu)$ 乘以絕對誤差來降低誤差的低估。
2. 線性模式(linear models): 各所有可能分群之輸入值與輸出值以直線回歸(linear regression)表示之。
3. 簡化 (simplification of linear models): 因為有些輸入參數在分群回歸時無高相關，遂可減少變數回歸。
4. 修剪(pruning): 若輸入值因屬性相近而不用在分支時，則變為最終葉。
5. 平滑(smoothing) 因為本方法為分區回歸，因此在分區界可能有不連續現場，故以加權(weighting)來估算以平滑化推估值。

利用 M5 最小化模式樹模式所建立的臺中港波浪推算模式其運算規則達 590 組。在建立波浪推算模式後本計畫採用相對樣的實測波浪資料進行驗證，臺中港的波浪模式推算結果驗證如表 4.1。

表 4.1 中颱風名稱標為灰階底色的颱風為未加入模式建立階段的驗證用颱風，利用驗證颱風的精度可以評估該模式是否具有通用性，可以避免建立過度複雜的模式樹來迎合現有學習資料，但卻無法適用於其他颱風的狀況。要測試各模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 3.2 節所述 4 個指標來評估各模式推算結果的優劣，分別為判定係數、均方根誤差、颱風波浪峰值波高誤差及峰值波高發生時間誤差。

表 4.1 臺中港 M5 最小化模式樹波浪推算模式之結果驗證

年份	英文名稱	中文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
2003	DUJUAN	杜鵑	-0.38	-4.00	0.53	0.80	3.3
2003	MAEMI	梅米	0.57	-4.00	0.61	0.41	2.2
2003	MELOR	米勒	-0.49	-23.00	0.90	0.24	4.2
2004	CONSON	康森	0.08	0.00	1.27	0.00	3.34
2004	RANANIM	蘭寧	0.25	8.00	0.50	0.63	2.55
2004	AERE	艾利	-0.39	5.00	0.68	0.64	3.44
2004	NOCK_TEN	納坦	-0.90	0.00	1.49	0.65	4.56
2005	HAITANG	海棠	-1.61	0.00	0.55	0.86	6.96
2005	MATSA	馬莎	-1.31	-14.00	0.67	0.45	4.34
2005	TALIM	泰利	-0.83	1.00	0.72	0.75	6.26
2005	KHANUN	卡努	-0.15	-32.00	0.58	0.44	3.15
2005	LONGWANG	龍王	-0.55	0.00	0.65	0.64	5.58
2006	BILIS	碧利斯	-1.24	-14.00	0.47	0.87	4.72
2006	KAEMI	凱米	-0.38	1.00	0.70	0.60	3.63
2006	SHANSHAN	珊珊	0.48	9.00	0.61	0.70	3.2
2006	CHEBI	奇比	-0.14	-28.00	0.99	0.16	3.18
2007	SEPAT	聖帕	-0.83	1.00	0.50	0.75	5.43
2007	WIPHA	韋帕	-0.88	8.00	0.92	0.38	4.62
2007	KROSA	柯羅莎	-0.80	-1.00	1.33	0.67	6.74
2008	KALMAEGI	卡玫基	0.35	-16.00	0.78	0.70	3.28
2008	FUNG_WONG	鳳凰	-1.66	2.00	0.87	0.80	6.24
2008	SINLAKE	辛樂克	-1.41	10.00	0.57	0.80	5.24
2008	HAGUPIT	哈格比	-0.53	11.00	0.52	0.56	3.64
2009	LINFA	蓮花	-0.26	0.00	0.57	0.49	2.76
2009	MORAKOT	莫拉克	-3.05	1.00	1.14	0.72	7.78
2009	PARMA	芭瑪	-0.78	-46.00	0.78	0.51	4.35
2010	FANAPI	凡那比	0.06	-1.00	0.65	0.80	5.09
2010	MEGI	梅姬	-1.34	-74.00	1.70	0.22	4.83
2011	SONGDA	桑達	-0.76	2.00	0.76	0.47	4.08
2011	MEARI	米雷	-0.49	-7.00	0.40	0.57	2.76
2011	NANMADOL	南瑪都	-0.57	5.00	0.50	0.62	3.56
2012	TALIM	泰利	0.28	-8.00	0.40	0.28	2.05
2012	SAOLA	蘇拉	-1.72	0.00	0.47	0.89	5.49
2012	TEMBIN	天秤	0.06	116.00	0.93	0.37	3.35
2012	JELAWAT	杰拉華	-0.77	1.00	0.73	0.73	3.81
2014	NEOGURI	浣熊	0.43	17.00	0.40	0.53	2.18
2014	MATMO	麥德姆	0.64	2.00	0.37	0.79	3.94
2014	KALMAEGI	海鷗	1.01	-3.00	0.40	0.71	2.56
2014	FUNG_WONG	鳳凰	-0.55	27.00	0.58	0.76	4.12
2015	SOUDELOR	蘇迪勒	-4.91	1.00	0.72	0.83	10.95
2015	GONI	天鵝	0.30	17.00	0.59	0.68	2.94
2015	DUJUAN	杜鵑	-0.82	1.00	0.56	0.93	7.7
平均絕對值			0.83	12.40	0.72	0.60	4.38

由表 4.1 中可發現臺中港學習組中 29 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以蘇迪勒(2015)颱風誤差較大，其峰值大小相差-4.91m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以天秤(2012)相差最多，差 116 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 RMSE 最大為梅姬

(2010)，其誤差達 1.70m。推算波高結果與實測波高的判定係數 R^2 則以康森(2004)最差。此外在驗證組中 13 場颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以海鷗(2014)相差最大，誤差 1.01m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以米勒(2003)相差最多，誤差 23 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為柯羅莎(2007)，其值為 1.33m。推算波高結果與實測波高 R^2 最差為米勒(2003)的 0.24。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 約為 0.83m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 12.40 小時， $RMSE$ 約為 0.72m， R^2 約為 0.60。

第五章 類神經與 M5 最小化模式樹模式特性分析

本章為比較港研中心近年來所發展的類神經網路與 M5 最小化模式樹兩套波浪推算模式對於颱風波浪推算的適用性，故採用相同的訓練資料群與測試資料群來進行模式建構，再以相同的推算目標颱風的波浪推算結果進行特性分析。在上述相同基準下比較各場颱風的四個誤差指標，分別為判定係數 R^2 、均方根誤差 $RMSE$ 、颱風波浪峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 及峰值波高發生時間誤差 Δt_p 。並針對其中峰值波高誤差與峰值發生時間誤差進行模式推算風險分析，來評估臺中港兩種模式推估結果的準確性及其誤差特性。此外本年度所更新的臺中港類神經網路波浪推算模式也與往昔所建立其他各港的類神經網路波浪推算模式之推算能力做比較，以了解各港由於地理位置及氣候特性不同而產生的差異。

5.1 類神經與 M5 最小化模式樹波浪推算模式之比較

本節將臺中港 M5 最小化模式樹波浪推算模式(以下簡稱 M5 模式)與類神經波浪推算模式(以下簡稱類神經模式)之推算結果作比較，兩種模式皆採用往昔歷史資料來建立一『輸入-輸出』的計算方法，類神經模式先決定好網路架構，再經由訓練資料不斷的透過演算法修正網路中的各個權重來提升及輸出結果的精度。M5 模式則由輸入資料的特性以樹狀的觀念不斷劃分規則區，各個規則區中再透過線性回歸來完成計算。2 種方法雖有差異但皆適合用來模擬複雜的機制。臺中港兩種模式推算結果與實測資料進行比較的 42 場颱風如表 5.1。以臺中港 42 場颱風來看，四種評估指標顯示類神經模式的推算結果明顯較 M5 模式佳，全部 42 場颱風中有 30 場颱風類神經網路模式與 M5 模式的推算峰值誤差皆在 1m 以內，顯示兩種模式在這些颱風的模擬有良好的結果。

表 5.1 臺中港兩種波浪推算模式的誤差比較

年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R ²	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R ²	H_{obs} (m)
		類神經				M5				
2003	杜鵑(DUJUAN)	0.74	3.00	0.59	0.86	-0.38	-4.00	0.53	0.80	3.3
2003	梅米(MAEMI)	0.44	0.00	0.50	0.79	0.57	-4.00	0.61	0.41	2.2
2003	米勒(MELOR)	-1.33	-1.00	0.59	0.61	-0.49	-23.00	0.90	0.24	4.2
2004	康森(CONSON)	-0.24	2.00	0.53	0.58	0.08	0.00	1.27	0.00	3.34
2004	蘭寧(RANANIM)	0.09	20.00	0.56	0.38	0.25	8.00	0.50	0.63	2.55
2004	艾利(AERE)	-0.18	7.00	0.44	0.85	-0.39	5.00	0.68	0.64	3.44
2004	納坦(NOCK_TEN)	-0.19	1.00	1.24	0.70	-0.90	0.00	1.49	0.65	4.56
2005	海棠(HAITANG)	-0.94	0.00	0.51	0.88	-1.61	0.00	0.55	0.86	6.96
2005	馬莎(MATSA)	-1.46	7.00	0.54	0.56	-1.31	-14.00	0.67	0.45	4.34
2005	泰利(TALIM)	0.40	1.00	0.91	0.71	-0.83	1.00	0.72	0.75	6.26
2005	卡努(KHANUN)	-0.30	-18.00	0.41	0.50	-0.15	-32.00	0.58	0.44	3.15
2005	龍王(LONGWANG)	0.10	-2.00	0.62	0.74	-0.55	0.00	0.65	0.64	5.58
2006	碧利斯(BILIS)	-1.06	-9.00	0.68	0.81	-1.24	-14.00	0.47	0.87	4.72
2006	凱米(KAEMI)	0.10	3.00	0.86	0.71	-0.38	1.00	0.70	0.60	3.63
2006	珊珊(SHANSHAN)	0.73	8.00	0.45	0.79	0.48	9.00	0.61	0.70	3.2
2006	奇比(CHEBI)	-0.17	-16.00	0.91	0.35	-0.14	-28.00	0.99	0.16	3.18
2007	聖帕(SEPAT)	0.01	0.00	0.70	0.73	-0.83	1.00	0.50	0.75	5.43
2007	韋帕(WIPHA)	-0.28	8.00	1.29	0.22	-0.88	8.00	0.92	0.38	4.62
2007	柯羅莎(KROSA)	0.28	-1.00	1.19	0.65	-0.80	-1.00	1.33	0.67	6.74
2008	卡玫基(KALMAEGI)	0.95	-15.00	0.94	0.69	0.35	-16.00	0.78	0.70	3.28
2008	鳳凰(FUNG_WONG)	-1.40	1.00	0.77	0.86	-1.66	2.00	0.87	0.80	6.24
2008	辛樂克(SINLAKE)	0.84	29.00	0.65	0.73	-1.41	10.00	0.57	0.80	5.24
2008	哈格比(HAGUPIT)	-0.20	10.00	0.66	0.79	-0.53	11.00	0.52	0.56	3.64
2009	蓮花(LINFA)	-0.25	0.00	1.06	0.10	-0.26	0.00	0.57	0.49	2.76
2009	莫拉克(MORAKOT)	-2.86	-2.00	0.72	0.94	-3.05	1.00	1.14	0.72	7.78
2009	芭瑪(PARMA)	-1.18	49.00	0.61	0.58	-0.78	-46.00	0.78	0.51	4.35
2010	凡那比(FANAPI)	0.72	-1.00	0.68	0.75	0.06	-1.00	0.65	0.80	5.09
2010	梅姬(MEGI)	-1.41	-5.00	0.97	0.44	-1.34	-74.00	1.70	0.22	4.83
2011	桑達(SONGDA)	-0.95	4.00	0.57	0.56	-0.76	2.00	0.76	0.47	4.08
2011	米雷(MEARL)	-0.30	37.00	0.51	0.50	-0.49	-7.00	0.40	0.57	2.76
2011	南瑪都(NANMADOL)	0.31	0.00	0.71	0.62	-0.57	5.00	0.50	0.62	3.56
2012	泰利(TALIM)	0.47	0.00	0.61	0.11	0.28	-8.00	0.40	0.28	2.05
2012	蘇拉(SAOLA)	-0.54	-1.00	0.62	0.76	-1.72	0.00	0.47	0.89	5.49
2012	天秤(TEMBIN)	0.98	5.00	0.84	0.66	0.06	116.00	0.93	0.37	3.35
2012	杰拉華(JELAWAT)	-0.74	-6.00	0.66	0.65	-0.77	1.00	0.73	0.73	3.81
2014	浣熊(NEOGURI)	-0.06	9.00	0.52	0.36	0.43	17.00	0.40	0.53	2.18
2014	麥德姆(MATMO)	0.56	1.00	0.45	0.75	0.64	2.00	0.37	0.79	3.94
2014	海鷗(KALMAEGI)	0.54	11.00	0.57	0.78	1.01	-3.00	0.40	0.71	2.56
2014	鳳凰(FUNG_WONG)	-0.30	28.00	0.77	0.62	-0.55	27.00	0.58	0.76	4.12
2015	蘇迪勒(SOUDELOR)	-3.09	0.00	0.59	0.88	-4.91	1.00	0.72	0.83	10.95
2015	天鵝(GONI)	0.22	22.00	0.88	0.66	0.30	17.00	0.59	0.68	2.94
2015	杜鵑(DUJUAN)	0.37	2.00	0.61	0.86	-0.82	1.00	0.56	0.93	7.7
平均絕對值		0.67	8.21	0.70	0.64	0.83	12.40	0.72	0.60	4.38

本研究選出下列在臺中港推算中誤差較大的颱風進行探討與比較，如莫拉克(2009)、鳳凰(2008)與蘇迪勒(2015)3 場颱風這兩種模式的推算結果都接近，但與實測仍有較大的誤差，其波高推算值與實測值比較圖示如圖 5.1。圖中各場颱風以兩種模式的推算結果其趨勢與峰值發生時間都與實測波浪資料相近，但其推算出的峰值仍與實測資料有明顯的差異。其中蘇迪勒(2015)颱風的實測波浪資料顯示峰值在 1 小時內由 4.61m 突增至 10.95m，既使把蘇迪勒颱風納入學習資料群進行訓練仍然無法妥善模擬出此峰值變化特性，故兩種模式在推算此類颱風仍有改善的空間，若未來有更多類似的颱風事件可供學習與 Rawdata 分析，可考慮納入訓練資料群提升模式推算能力。

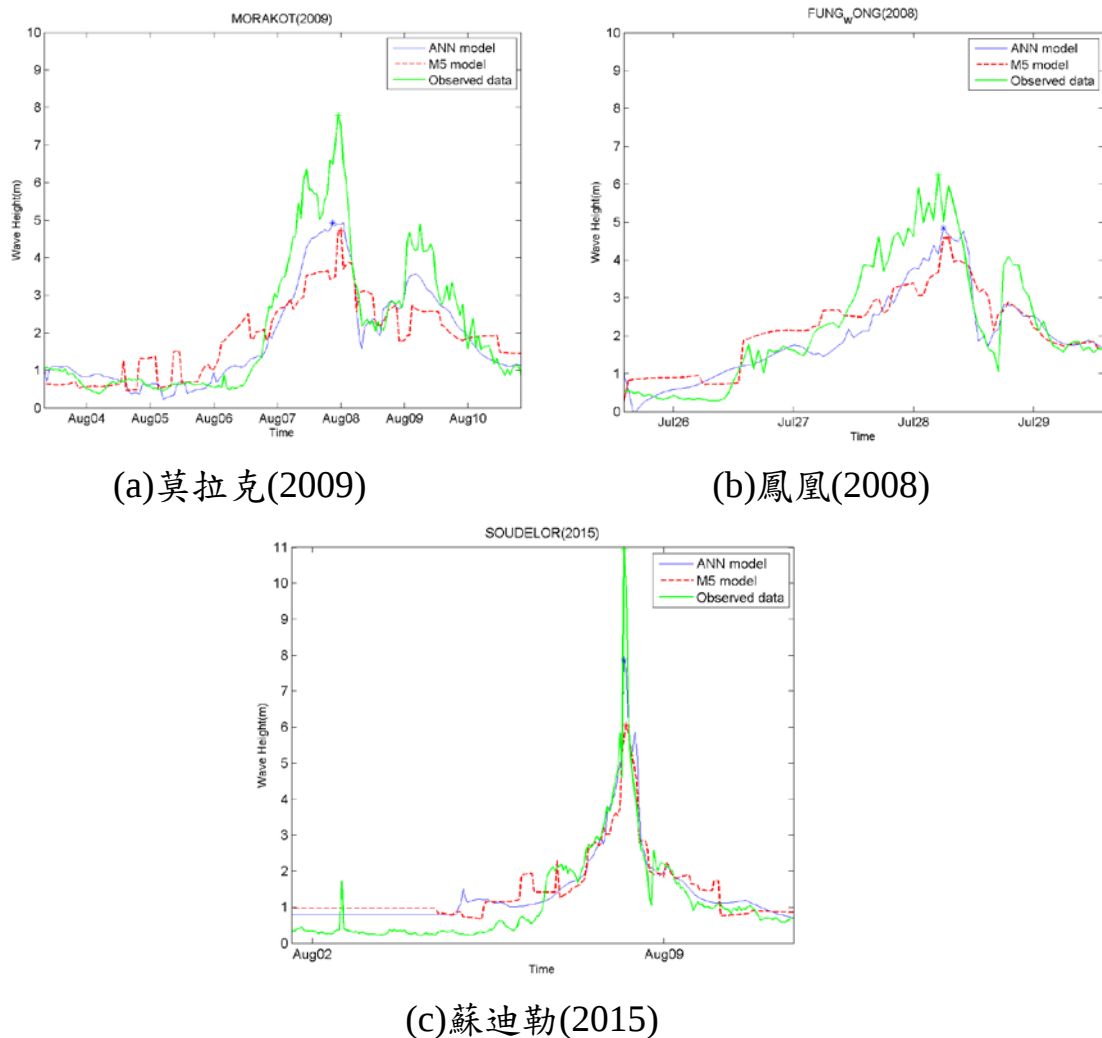


圖 5.1 臺中港 M5 與類神經模式推算結果低估的颱風波浪時序圖

此外在分析兩種模式的精度比較中顯示有些颱風的推算峰值發生時間與實測值有較大誤差，排除其中由於颱風波浪峰值不明顯的案例外，發現有兩類的西行颱風會造成此現象。第 1 類為由台灣南端與菲律賓群島間自東向西行的颱風，如圖 5.2、圖 5.3 及圖 5.4 的奇比(2006)、芭瑪(2009)及梅姬(2010)3 場颱風。圖 5.2 中可發現兩種模式推算的峰值結果都偏早發生，其中 M5 模式推算的峰值發生時間差最多。另圖 5.3 顯示芭瑪颱風(2009)的路徑較為複雜，兩種模式推算的峰值發生時間也有很大的差異。梅姬颱風(2010)的推算結果則示如圖 5.4，類神經模式的推估峰值發生時間與實測資料接近，但 M5 模式所推估的峰值時間卻與實測資料相差 74 小時。雖然此類型颱風大多對臺中港造成影響的歷史紀錄較少，但由現有分析結果來看，M5 模式對此類颱風的模擬能力都較差。

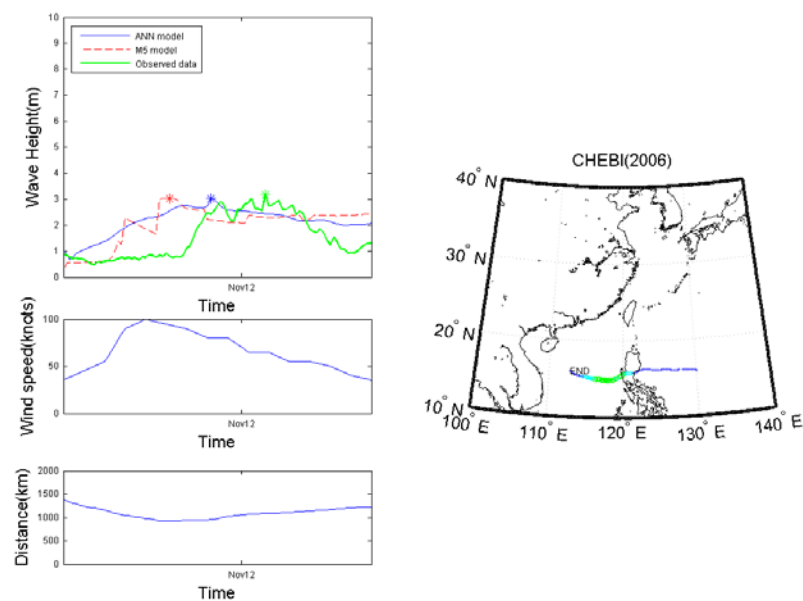


圖 5.2 以兩種模式推算奇比(2006)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

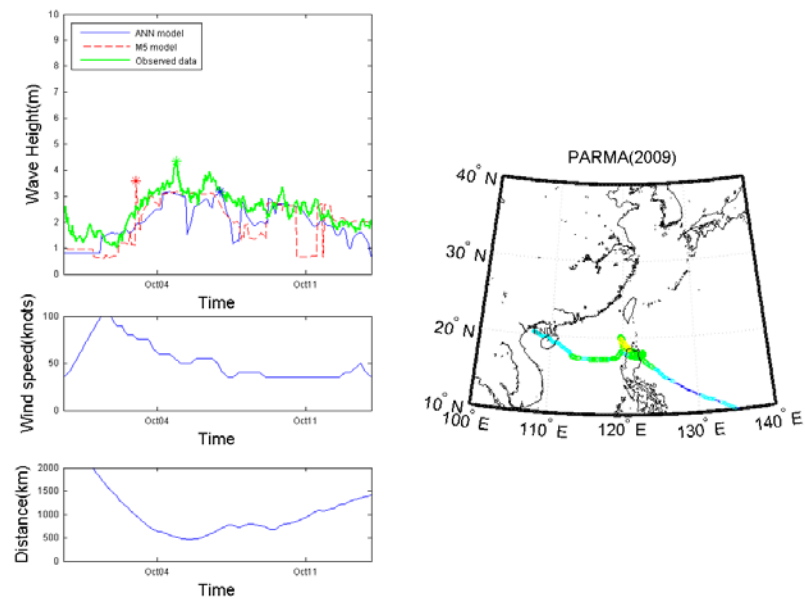


圖 5.3 以兩種模式推算芭瑪(2009)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

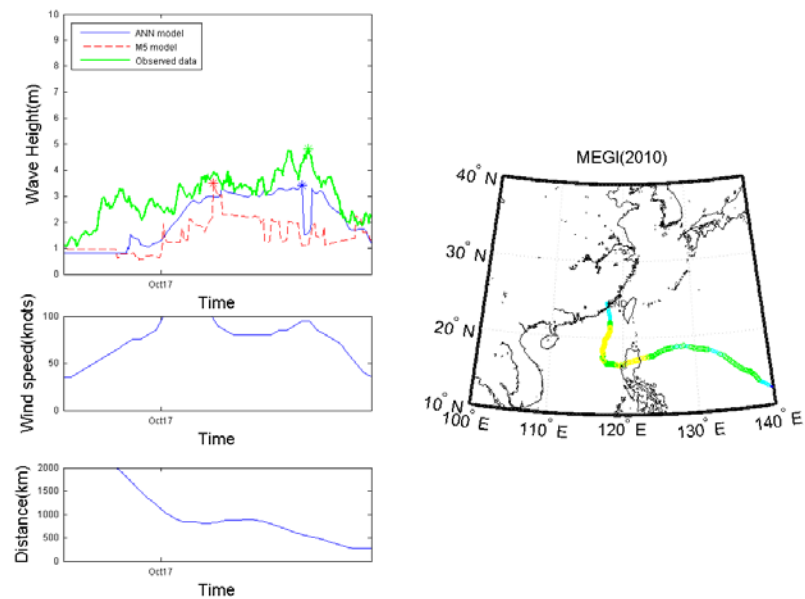


圖 5.4 以兩種模式推算梅姬(2010)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

另一類西行颱風則是由宜蘭外海處向西北往中國大陸前進的颱風路徑，如卡努(2005)、碧利斯(2006)、卡玫基(2008)及辛樂克(2008)等四場颱風，其推算結果如圖 5.5 至圖 5.8 所示。圖中可發現類神經模式與

M5 模式兩種方法在模擬此類路徑的颱風波浪峰值發生時間皆有明顯的誤差，且大多的峰值推估時間都早於實測資料的峰值發生時間。

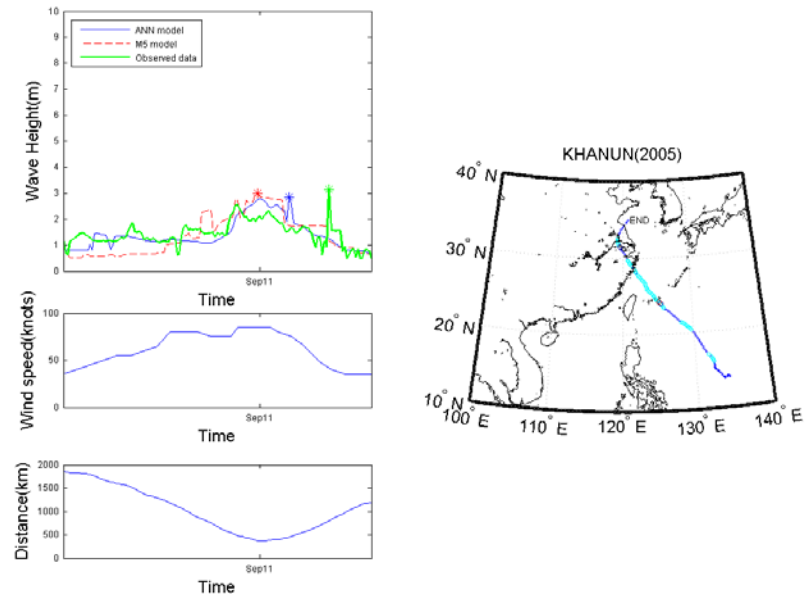


圖 5.5 以兩種模式推算卡努(2005)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

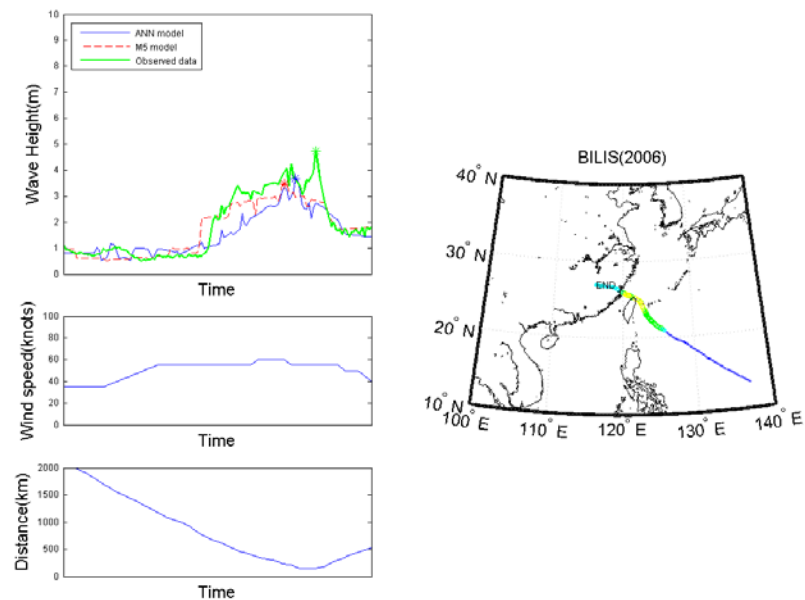


圖 5.6 以兩種模式推算碧利斯(2006)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

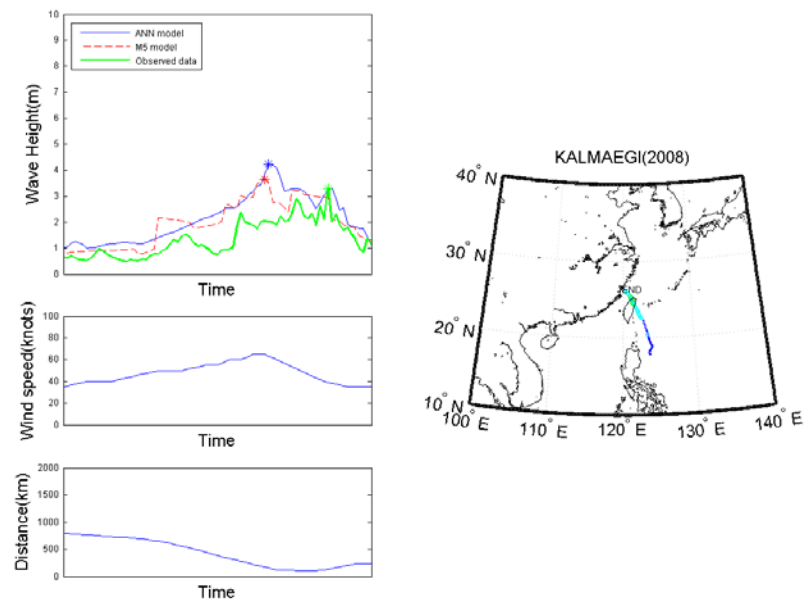


圖 5.7 以兩種模式推算卡玫基(2008)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

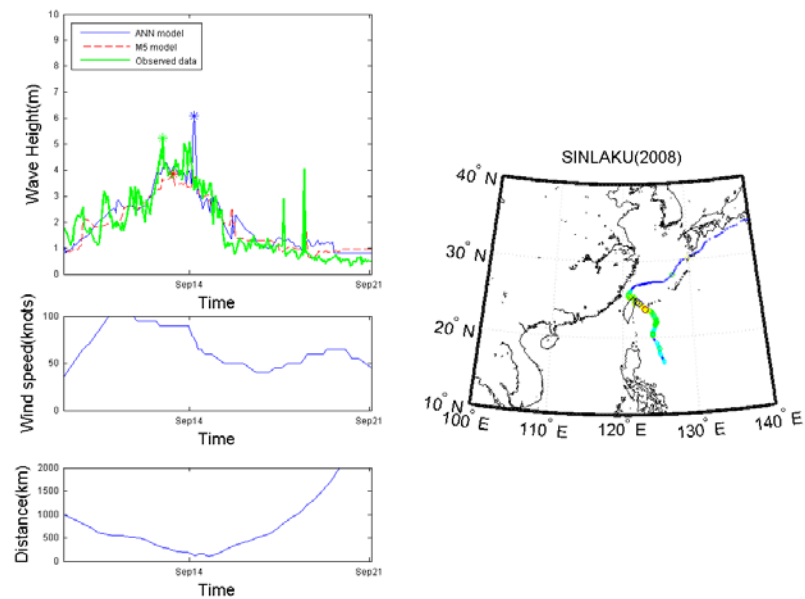


圖 5.8 以兩種模式推算辛樂克(2008)颱風與臺中港實測波浪的比較圖

在上述分析與比較中可發現 M5 最小化模式樹與類神經兩種方法所建立的颱風波浪推算模式的推算能力相近，且在上述特定路徑的臺風推算上也有相同的問題，但整體而言類神經模式推算颱風波浪的精

度較 M5 模式好，尤其在峰值發生時間部分類神經模式所推估的結果較為可靠，且 M5 模式所推估的波高時序列常有不連續的現象。故現階段若考慮這兩種方法，無論是應用於即時預報或極值樣本推算仍建議採用以類神經模式較為合適。工作團隊已長期利用類神經模式進行颱風波浪的推算與預報，預報來源資料可在颱風侵台時由 Unisys weather 網站下載 72 小時的預報路徑與最大風速資料，並輸入各港類神經模式進行推算繪圖，由於類神經模式的來源資料下載與前置處理皆已完成使用者操作介面建置，其下載與運算時間迅速，一般可在 5 分鐘內完成所有操作。

5.2 各港類神經颱風波浪推算模式精度比較

截至本年度本計畫已完成包括花蓮、高雄、臺北、臺中、基隆及蘇澳等全國 6 大港及安平港的類神經颱風波浪推算模式，本年度並以新蒐集之颱風波浪資料更新臺中港之推算模式。表 5.2 顯示歷年來發展颱風波浪推算模式的成效比較，表中臺中港(2016)為本年度增加蒐集 2011 至 2015 年颱風波浪資料所建立的新模式。其中 $\Delta H_{s,p}$ 部分是以本年度更新的臺中港模式最佳，誤差 0.67m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 波則以花蓮港波浪推算模式最為準確。均方根誤差 RMSE 則以高雄港最佳，其值為 0.59m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以高雄港為最佳，其值為 0.75。

表 5.2 各類神經颱風波浪推算成效比較

	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2
花蓮港	0.98	5.04	0.69	0.69
高雄港	0.76	5.83	0.59	0.75
安平港	0.90	7.89	0.73	0.64
臺北港	0.93	6.35	0.81	0.58
臺中港	0.79	10.86	0.70	0.50
基隆港	0.95	6.00	0.69	0.66
蘇澳港	1.09	5.96	0.85	0.66
臺中港(2016)	0.67	8.21	0.70	0.64

隨著觀測資料量的增加，本計畫本次更新臺中港類神經波浪推算模式的精度有很大的提升。西部海岸的臺中港、安平港與高雄港的峰值波高誤差平均絕對值介於 0.67m 至 0.90m 之間，北部的臺北港與基隆港介於 0.93m 至 0.95m，東部海岸花蓮與蘇澳港則介於 0.98m 至 1.09m 之間，整體而言各港的波高峰值誤差平均絕對值僅有蘇澳港略大於 1m，顯示類神經颱風波浪推算模式的精度已相當準確，東部海岸與北部海岸誤差稍大的原因為此 2 海域遭受颱風波浪較大。峰值發生時間的誤差平均絕對值各港約介於 5.04 小時至 8.21 小時間，考慮輸入模式的颱風資料為每六小時一筆的情況來看，此誤差範圍相當合理。目前類神經颱風波浪推算模式已可應用於即時颱風波浪推算與預測，由上述誤差來看各港都有良好的推估結果，應用於台灣各海域也沒有明顯的差異。

5.3 波浪推算模式之誤差分析

前述各波浪推算的模式驗證部分以前述四個誤差特性來表現各場颱風的推算結果，本節則以各波浪推算模式其推算波高峰值的誤差來做風險分析，臺中港的峰值波高推算誤差分析如圖 5.9，圖中紅色空心點為誤差值以 Normal 分布繪製的機率密度函數，紅色虛線為其 90%信賴區間範圍；藍色實線為利用 ksdensity 所繪製的機率密度函數，藍色虛線為其 95%信賴區間範圍。圖 5.9 顯示以臺中港 M5 模式推算結果的各場颱風波高峰值誤差的誤差分析，其平均值為 -0.61m，中位數為 -0.53m，標準差為 1.02m，42 個樣本中不通過 95%信賴度的有 2 個，佔全部的 4.76%。臺中港類神經颱風推算結果的各場颱風波高峰值誤差的風險分析，其平均值為 -0.23m，中位數為 -0.17m，標準差為 0.91m，42 個樣本中為於 95%信賴度區間外的有 2 個，佔全部的 4.76%。

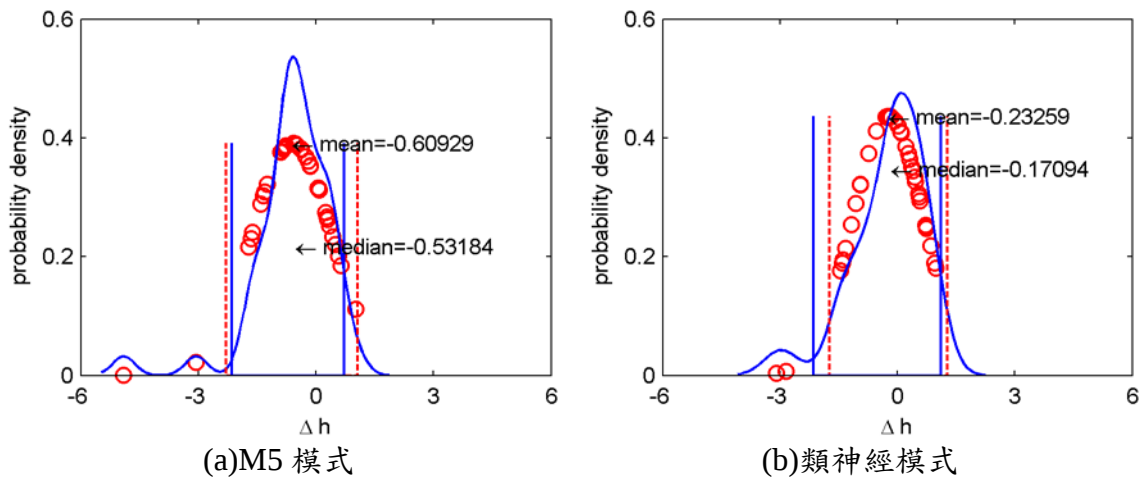


圖 5.9 臺中港各波浪推算模式推算波高誤差分析

圖 5.10 顯示以臺中港 M5 模式推算結果的各場颱風波高峰值發生時間誤差的風險分析，其平均值為-0.86 小時，中位數為 0 小時，標準差為 24.89 小時，42 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 7.14%。臺中港類神經颱風推算結果的各場颱風波高峰值發生時間誤差的風險分析，其平均值為 4.28 小時，中位數為 1.00 小時，標準差為 13.00 小時，42 個樣本中為於 95%信賴度區間外的有 5 個，佔全部的 11.90%。

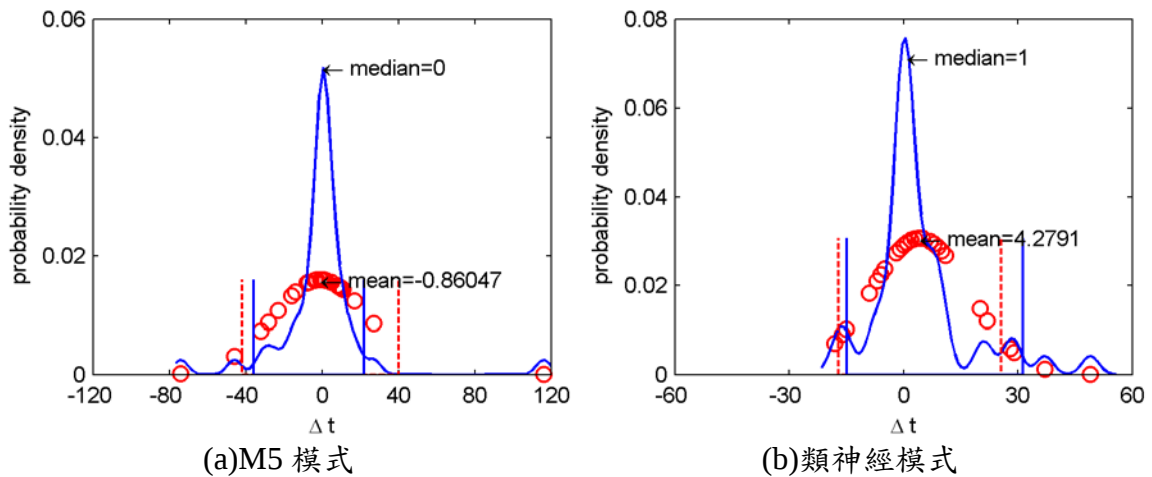


圖 5.10 臺中港各波浪推算模式推算峰值發生時間誤差分析

表 5.3 為誤差分析的綜合比較表，表中可發現臺中港 2 種模式在波高峰值推估上都有些許低估的現象，峰值發生時間則有較為不同的現象，M5 模式推算結果稍微較實測資料早發生；類神經模式則較晚發生。類神經模式標準差較小，顯示其推估波高峰值與發生時間的誤差較為集中。

表 5.3 誤差分析結果綜合比較表

	M5 模式		類神經模式	
	峰值 波高	發生 時間	峰值 波高	發生 時間
平均值	-0.61	-0.86	-0.23	4.28
中位數	-0.53	0.00	-0.17	1.00
標準差	1.02	24.89	0.91	13.00
未通過 95% 百分比	4.76	7.14	4.76	11.90

第六章 數值模式之波浪推算方式

6.1 MIKE 21 SW 波浪模式

本計畫數值模式採用丹麥水力研究所(DHI: Danish Hydraulic Institute)研發完成之 MIKE 21 軟體進行數值模擬，DHI 是一個獨立的國際諮詢及科學研究機構，其所研發的 MIKE 21 是模擬水動力、水質、泥沙、波浪的專業工程軟體，主要應用於港口、河流、湖泊、河口海岸和海洋，具有先進的前後處理功能和用戶介面。模式以有限體積法(Finite Volume Method)將控制方程式在空間上進行離散，所採用之網格系統為非結構性三角形網格，每一個三角形都代表一個元素，每一時間步均可解出各元素中心的 N 值。

MIKE 21 SW 主要用於模擬離岸及近岸區，風浪和湧浪的成長、衰減及傳播變形。MIKE 21 SW 包含兩個不同公式：

1. 全譜公式

全譜公式基於 Komen 等人(1994)和 Young (1999)的波動守恆方程。全譜模式包含下列物理現象：風浪成長、波與波非線性交互作用、白沫消散、底床摩擦消散、水深引起的波浪破碎、水深變化引起的折射和淺水變形、波流交互作用、水深隨時間變化產生的影響、波浪場冰層覆蓋產生的影響。

該模式係模擬波浪在各種外力作用下之波能變化，其求解之方程式為波浪作用力守恆方程式(Wave action conservation equation)，此方程式為二維時變域之偏微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (6-1)$$

其中， $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ 為波力頻譜密度函數(wave action density function)，與波能頻譜密度函數(wave energy density function)之關係為 $N=E/\sigma$ ； $\bar{x}=(x, y)$ 為卡氏坐標； t 為時間； σ 為角頻率；而 θ 則為波向角。

$\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 為一個 4 維空間的向量， $(c_x, c_y) = d\bar{x}/dt = \bar{c}_g + \bar{U}$ ，代表群波在空間上的傳遞速度，其中 $\bar{c}_g$ 為群波速度，而 $\bar{U}$ 則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。 $c_\sigma = d\sigma/dt$ ，代表角頻率 σ 之變化速度。 $c_\theta = d\theta/dt$ ，代表波向角 θ 之變化速度。

$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial \sigma, \partial/\partial \theta)$ 為一個 4 維空間的向量運算子， S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程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，表示如下：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (6-2)$$

其中 S_{in} 為風浪之成長項， S_{nl} 為波與波非線性交互作用項， S_{ds} 為白沫消散項， S_{bot} 為底床摩擦項，而 S_{surf} 則為碎波消耗項。

2. 方向參數化解耦公式

方向參數化解耦公式基於波動守恆方程的參數化形式，按照 Holthuijsen (1989) 理論，參數化在頻率空間內進行，引入波譜的零階和一階矩作為決定變量，可用於以波浪碎波後而產生之沿岸流的泥沙傳輸計算。參數化的方程式表示如下：

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (6-3)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (6-4)$$

其中 $m_0(x, y, \theta)$ 為波譜 $N(x, y, \omega, \theta)$ 的零次矩， $m_1(x, y, \theta)$ 為波譜 $N(x, y, \omega, \theta)$ 的一次矩， C_{gx} 及 C_{gy} 分別為群波速度 x 、 y 方向之分量， C_θ 為 θ 方向的波浪行進速度， ω 為角頻率， T_0 和 T_1 為 Source Terms，包含風、底床摩擦、碎波等因素。 n 次矩 $m_n(\theta)$ 定義為

$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega \quad (6-5)$$

6.2 數值模擬條件

1.地形及網格設定

本計畫所採用之地形資料，於近岸區利用海軍海洋測量局發行之海圖地形，而遠岸區則採用 National Geophysical Data Center 發布之全球高程資料 ETOPO2v2 (2006)。該地形資料範圍包含東經 180°~西經 180°、北緯 89.967°~南緯 90°，地形格網之解析精度為 2'×2' (約為 4×4 公里)。本計畫採用非結構型三角網格方式計算，模擬範圍之邊界南約至北緯 14°、北約至北緯 30°、西約至東經 111°、東約至東經 135°，範圍涵蓋至大陸、台灣及菲律賓群島，所模擬範圍之地形水深如圖 6.1 所示。由圖中可知，為於近岸區獲得較高精度之模擬結果，鄰近台灣、澎湖、金門、馬祖海域之海岸線採用較密之網格，而遠岸區則採用較粗之網格，共計有 5,436 個節點、9,709 個元素，網格之設定如表 6.1 所示。

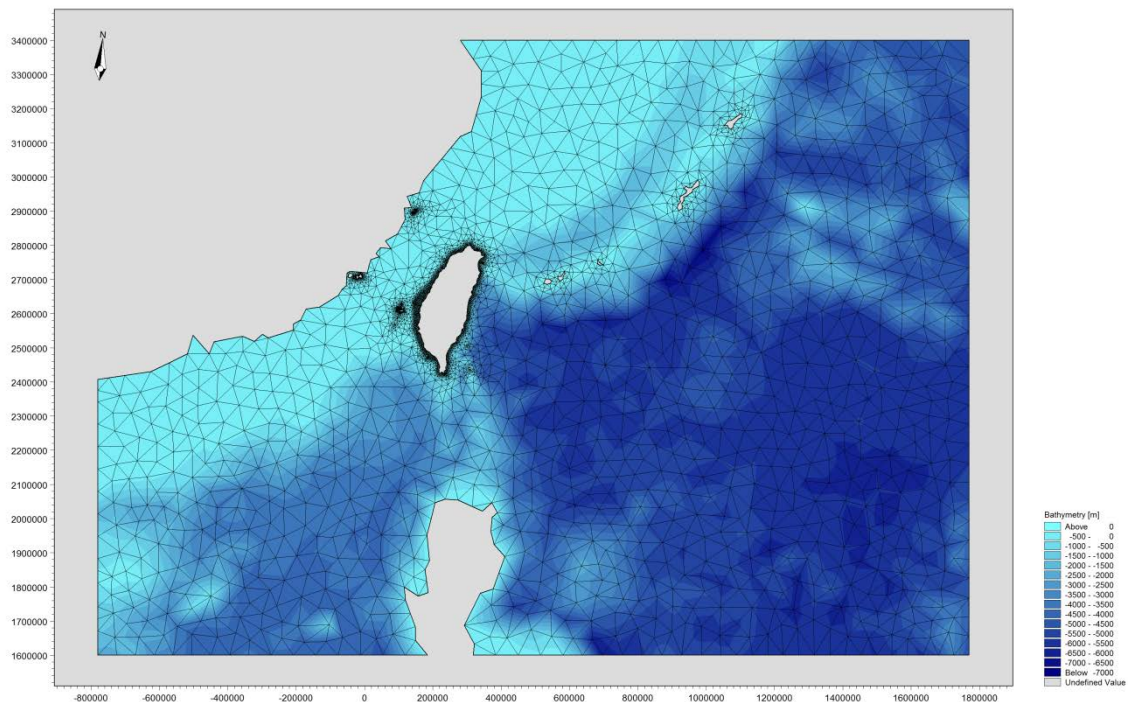


圖 6.1 風浪推算模擬範圍之地形水深

表 6.1 風浪推算模擬之網格設定內容

元素個數	9,709
節點個數	5,436
最小元素面積(m ²)	1,984
最大元素面積(m ²)	1.2×10^9

2.風場模式

本計畫風場模式採用的風場主要是將大氣模式的風場資料細化成 2km 的解析度(以下簡稱 ARW_NFS2km)，並依照波浪推算模式的需求逐時輸出風場資料，ARW_NFS2km 所使用之大氣風場預報模式係以 Weather Research and Forecasting (WRF)模式(e.g., Skamarock et al. 2001)為基礎，經由進階改良之 Advanced Research WRF (ARW; e.g., Skamarock et al. 2005; Skamarock et al. 2008)模式。ARW_NFS2km 模式之優點為可使用多層巢狀方式，將全球觀測資料所預報之大尺度預報資訊(約為 50km 解析度)，以動力降尺度方式逐漸內化到各指定小區域，並經由提高網格點之解析度，達到指定區域所需求之高解析度預報資訊。ARW_NFS2km 以全球預報模式之高解析度($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，約 50km 網格點)預報結果為邊界條件，採用三層巢狀系統，以 4 倍放大效率，依序使用 32km、8km、2km 解析度，將全球預報資訊降尺度到臺灣鄰近海域與港灣區。

目前國內僅有 ARW_NFS2km 計算如此細網格的風場且可逐時輸出提供波浪推算使用，然該風場僅有 2010 年後的資料，至於 2010 年前的風場，採用 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al., 2010)作為邊界條件，資料為美國環境預報中心(National Environmental Prediction Centers, NCEP)執行 1979~2010 年觀測資料之同化，並提高資料同化後之重分析資料的解析度，表面 10m 風場之解析度約為 30 公里，此資料提供 6 小時之觀測風場，為目前可涵蓋臺灣鄰近海域範圍最高空間解析度之觀測重分析資料。將 CFSR 的風場資料細化成 2km 的解析度(以下簡稱 ARW_CFSR2km)，ARW_CFSR2km 模式仍使用多層巢

狀方式，將 CFSR 風場以動力降尺度方式逐漸內化到各指定小區域，並經由提高網格點之解析度，達到指定區域所需求之高解析度資訊，進而獲得可靠度更高的設計波浪條件。

3. 模式參數設定

本計畫進行 SW 模組颱風波浪推算所設定之相關參數如表 6.2 所示。在頻率領域方面，最小頻率採 0.055Hz，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶，相當於週期 1.85~18.18 秒。在角度領域方面，以 22.5° 為 1 個角度單位，共計分割成 16 個方向角，計算時距以 15 分鐘進行計算。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白沫消散等物理機制。計算範圍的邊界條件共分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，其考慮波浪通過此邊界時完全被吸收。

表 6.2 模式參數設定彙整表

相關參數	設 定
頻率領域	0.055Hz~0.542Hz
角度領域	$0^\circ \sim 360^\circ$ 、 $\Delta\theta=22.5^\circ$
時 距	$\Delta t=15\text{min}$
碎波指標	$\gamma=0.8$
底床摩擦	$k_N=0.04m$
白沫消散	$C_{ds}=4.5$ 、 $\delta_{ds}=0.5$

6.3 數值模式驗證

6.3.1 颱風波浪資料分析

數值模擬成果將提供後續極值統計分析作為極值樣本使用，取樣方式目前國內皆採用年極端值取樣法的年最大法，此法可在某時間尺度下均勻選取範圍內的極端代表值，由於每年僅選取當年度最大值作為代表，因此該極端值樣本的精度便顯得特別重要，故本計畫將透過每年實測第一大示性波高和第二大示性波高來進行模式的驗證，以了

解模式在模擬第一大示性波高和第二大示性波高的準確性。表 6.3 為各港觀測到的最大波高，表中 KL、TP、TC、AP、KH、HL 及 SA 分別表示基隆港、臺北港、臺中港、安平港、高雄港、花蓮港及蘇澳港，而各港觀測最大波高中之「-」表示該測站未觀測到資料，為使驗證的標準一致，因此選取目前仍繼續觀測的測站，且使用的觀測儀器為 AWAC (Acoustic Wave And Current) 方向性潮波流儀，早期測站位置不同或觀測儀器不同如表中空白無數字所示，在同時不考慮 3m 以下與季風波浪階量大致相同的波浪，依照此標準即可選擇出各港驗證的颱風如表中灰色的格子所示。

在基隆港方面，2014 年波高皆低於 3m，不符合颱風選取標準，故無驗證該年度颱風；2009 年、2007 年和 2006 年皆僅有一場颱風符合標準，故僅選擇一場颱風進行驗證。

在臺北港方面，2015 年皆未觀測到最大波高，故無法驗證；2014 年、2011 年、2010 年、2009 年、2008 年和 2006 年皆僅有一場颱風符合標準，故僅選擇一場颱風進行驗證；而 2007 年皆未觀測到最大波高，故無法驗證。

在臺中港方面，2012 年泰利颱風雖為該年度第二大示性波高，然由實測資料可看出最大波高發生時間為 6/20 下午 11 時，此時颱風中心在臺北北北西方 40km 海面，經比對臺中港風速測站可知當時風速僅為 11.9m/s，應不致產生 4.14m 的波高，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取杰拉華颱風進行驗證；2009 年芭瑪颱風雖為該年度第二大示性波高，然由實測資料可看出波高約略呈現一直線，無颱風波浪呈現鐘狀的特性，故不考慮而僅驗證第一大示性波高。

在安平港方面，2014 年、2012 年和 2011 年波高皆低於 3m，不符合颱風選取標準，故無驗證該年度颱風。

在高雄港方面，2015 年第二大示性波高為蓮花颱風和昌鴻颱風，此為雙颱風效應較難區分哪個颱風造成的影響，故不考慮而僅驗證第一

大示性波高；2014 年和 2012 年波高皆低於 3m，不符合颱風選取標準，故無驗證該年度颱風；2011 年和 2007 年，皆僅有一場颱風符合標準，故僅選擇一場颱風進行驗證；2006 年皆未觀測到最大波高，故無法驗證。

在花蓮港方面，2013 年第二大示性波高為蘇力颱風，然該波高約為鄰近蘇澳港測站的 1/2，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取菲特颱風進行驗證；2007 年第二大示性波高為梧提颱風和帕布颱風，此為雙颱風效應較難區分哪個颱風造成的影響，故不考慮，而米塔颱風由實測資料可看出波高約略呈現一直線，無颱風波浪呈現鐘狀的特性，故不考慮而僅驗證第一大示性波高；2006 年第二大示性波高為寶發颱風和桑美颱風，此為雙颱風效應較難區分哪個颱風造成的影響，故不考慮而僅驗證第一大示性波高；2003 年第一大示性波高為尹布都颱風和蘇迪勒颱風，故該年度驗證三場颱風。

在蘇澳港方面，2015 年第一大示性波高和第二大示性波高分別為蘇迪勒颱風和杜鵑颱風，然該波高約為鄰近花蓮港測站的 2 倍，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，再加上蓮花颱風和昌鴻颱風，此為雙颱風效應較難區分哪個颱風造成的影響，故該年度僅驗證天鵝颱風；2013 年第二大示性波高為天兔颱風，經比對蘇澳港風速測站可知最大風速僅為 11.2m/sec，花蓮港風速測站最大風速為 12m/sec，且該颱風由巴士海峽經過，應不致產生較花蓮港 5.5m 更大的 7.9m 波高，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取菲特颱風進行驗證；2010 年皆未觀測到最大波高，故無法驗證；2008 年第一大示性波高為薔蜜颱風，然該波高約為鄰近花蓮港測站的 2 倍，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取鳳凰颱風和辛樂克颱風進行驗證；2007 年第一大示性波高為梧提颱風和帕布颱風，此為雙颱風效應較難區分哪個颱風造成的影響，故不考慮，而米塔颱風由實測資料可看出波高約略呈現一直線，無颱風波浪呈現鐘狀的特性，故不考慮而僅驗韋帕颱風；2006 年第一大示性波高為凱米颱風，經比對蘇澳港風速測站可知

最大風速僅為 15m/sec，應不致產生 7.37m 的波高，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取碧利斯颱風和珊珊颱風進行驗證；2005 年第一大示性波高為泰利颱風，然該波高約為鄰近花蓮港測站的 2 倍，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，第二大示性波高為龍王颱風，經比對蘇澳港風速測站可知最大風速僅為 20.2m/sec，應不致產生 12.45m 的波高，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取珊瑚颱風和馬莎颱風進行驗證；2004 年第一大示性波高為納坦颱風，然該波高約為鄰近花蓮港測站的 2 倍，顯示該筆數據可能有問題，故暫不考慮採用此颱風資料作為驗證，而選取敏督利颱風和南瑪都颱風進行驗證。

表 6.3 颱風波浪實測資料

年份	中文名稱	英文名稱	KL	TP	TC	AP	KH	HL	SA
2015	杜鵑	DUJUAN	6.34		5.7	3.03		6.19	11.14
	天鵝	GONI	2.29		2.94	1.39	2.01	4.21	5.62
	蘇迪勒	SOUDELOR	6.36		6.16	2.76	6.27	8.57	16.02
	蓮花	LINFA	5.63		3		4.03	3.44	5.26
	昌鴻	CHANHOM	5.63		3		4.03	3.44	5.26
	紅霞	NOUL	1.91		1.86	0.91	1.15	2.57	3.3
2014	鳳凰	FUNG-WONG	2.73	4.11	4.12	2.75	-	4.05	5.61
	麥德姆	MATMO	2.32	-	3.94	-	-	7.07	8.26
	哈吉貝	HAGIBIS	0.82	1.93	1.2	2.04	2.23		1.42
2013	菲特	FITOW	5.95	4.97	3.3	-	-	3.88	5.94
	天兔	USAGI	3.79	2.79	3.86	5.5	5.8	5.5	7.9
	康芮	KONG-REY	3.76	3.28	2.09	3.36	3.43	2.35	2.98
	潭美	TRAMI	4.14	3.46	3.28	4.21	3.72	2.94	3.98
	西馬隆	CIMARON	0.84	1.43	1.21	1.72	-	1.57	2.34
	蘇力	SOULIK	7.88	6.94	5.6	2.95	-	4.6	9.83
2012	杰拉華	JELAWAT	5.55	4.9	3.81	-	1.46	3.96	6.62
	天秤	TEMBIN	2.5	2.4	3.35	-	-	4.18	4.18
	啟德	KAI-TAK	0.83	0.92	-	-	-	1.63	2.1
	海葵	HAIKUI	3.18	2.6	-	1.84	-	-	2.2

	蘇拉	SAOLA	4.87	3.75	5.49	2.42	3.02	4.65	6.26
	杜蘇芮	DOKSURI	1.12	0.86	1.35	-	2.67	1.97	2.48
	泰利	TALIM	2.62	3.02	4.14	-	5.92	2.65	3.22
2011	南瑪都	NANMADOL	2.36	1.75	3.56	-	4.5	3.46	4.46
	梅花	MUIFA	3.52	-	1.2	2.01	1.94	2.77	4.02
	米雷	MEARI	3.31	3.29	2.76	2.13	2.42	2.77	-
	桑達	SONGDA	4.29	-	4.08	-	1.58	3.11	-
	艾利	AERE	1.23	1.87	1.78	1.43	1.05	2.08	-
2010	梅姬	MEGI	4.94	3.65	4.83	5.98	6.8	3.94	-
	凡那比	FANAPI	3.29	-	5.09	6.26	5.52	6.35	-
	莫蘭蒂	MERANTI	1.03	1.6	2.3	4.43	4.91	1.92	-
	南修	NAMTHEUN	-	-	-	-	-	-	-
	萊羅克	LIONROCK	1.77	2.14	2.06	4.15	5.04	1.94	-
2009	芭瑪	PARMA	-	-	4.35	2.26	3.08	3.43	4.85
	莫拉克	MORAKOT	4.51	4.19	7.78	7.66	-	6.53	7.15
	莫拉菲	MOLAVE	-	-	1.22	3.63	-	4.12	5.14
	蓮花	LINFA	0.92	2.66	-	7.2	6.41	2.63	-
2008	薔蜜	JANGMI	4.78	-	-	3.02	3.51	6	12.64
	哈格比	HAGUPIT	-	-	3.64	3.28	3.53	3.4	5.02
	辛樂克	SINLAKU	4.19	3.83	5.24	1.84	2.82	5.37	7.68
	如麗	NURI	0.58	1.49	1.53	4.96	6.12	2.97	3.85
	鳳凰	FUNG-WONG	3.19	-	6.24	-	5.27	7.32	8.9
	卡玫基	KALMAEGI	-	-	3.28	-	3.05	2.85	5.08
2007	米塔	MITAG	-	-	-	-	1.83	4.43	3.85
	柯羅莎	KROSA	7.06	-	6.74	3.57	4.18	6.49	-
	韋帕	WIPHA	-	-	4.62	1.5	1.98	3.74	3.59
	聖帕	SEPAT	2.51	-	5.43	4.84	-	-	-
	梧提	WUTIP	-	-	1.94	1.85	2.51	4.94	7.42
	帕布	PABUK	-	-	2.14	4.78	-	4.94	7.42
2006	珊珊	SHANSHAN	4.67	3.83	-	1.35	-	4.24	5.37
	寶發	BOPHA	-	-	3.02	1.56	-	3.86	3.84
	桑美	SAOMAI	-	-	3.02	1.36	-	3.86	3.84
	凱米	KAEMI	-	1.08	3.63	3.47	-	-	7.37
	碧利斯	BILIS	-	-	4.72	4.69	-	-	5.7
	艾維尼	EWINIAR	-	-	1.15	2.15	-	2.17	3

	珍珠	CHANCHU	-	-	3.86	5.8	-	2.89	3.21
2005	龍王	LONGWANG		2.95	5.58	2.06	2.64	10.85	12.45
	丹瑞	DAMREY		-	3.6	2.73	3.84	3.13	-
	卡努	KHANUN		-	2.57	0.75	1.09	-	2.85
	泰利	TALIM		4.08	6.26	4.05	4.94	7.53	14.84
	珊瑚	SANVU		-	2.03	4.72	4.75	3.86	5.45
	馬莎	MATSA		5.03	4.34	2.52	3.13	3.18	4.27
	海棠	HAITANG		4.01	-	-	6.46	7.5	-
2004	南瑪都	NANMADOL						4.38	5.07
	納坦	NOCK-TEN						5.33	11.57
	米雷	MEARI						2.17	-
	海馬	HAIMA						2.78	4.92
	艾利	AERE						3.68	4.53
	蘭寧	RANANIM						3.52	4.51
	康柏斯	KOMPASU						3.81	2.5
	敏督利	MINDULLE						5.5	6.87
	康森	CONSON						2.06	2.38
2003	米勒	MELOR						3.24	
	杜鵑	DUJUAN						-	
	柯羅旺	KROVANH						2.67	
	梵高	VAMCO						2.13	
	莫拉克	MORAKOT						2.91	
	尹布都	IMBUDO						3.71	
	蘇迪勒	SOUDELOR						3.71	
	南卡	NANGKA						1.61	
	柯吉拉	KUJIRA						3.76	

6.3.2 模式推算結果

1. 模式評估指標

為瞭解模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 6 個指標來評估各模式推算結果的優劣，分別為判定係數(R-square, R^2)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 、峰值波高發生時間誤差 Δt_p 、峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 及均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 。本研究同時訂定評估指標的誤差標準，即決定係數 $R^2 > 0.6$ 、峰值波高發生時間誤差 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max} < 20\%$ 。

2. 示性波高的時序列比較

圖 6.2~圖 6.8 為各港示性波高的時序列比較圖，圖中實心圓點為觀測值，實線為 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場的推算結果。由圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較中可知，所有颱風的示性波高模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較中可知，僅 2014 年的鳳凰(Fungwong)颱風在峰值波高處有差異，其餘模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較中可知，僅 2009 年的莫拉克(Morakot)颱風和 2014 年的鳳凰(Fungwong)颱風在峰值波高處有差異，其餘模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.5 安平港示性波高時序列比較中可知，所有颱風的示性波高模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較中可知，所有颱風的示性波高模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較中可知，僅 2005 年的泰利(Talim)颱風、2008 年的鳳凰(Fungwong)颱風、2009 年的莫拉克(Morakot)颱風、2011 年的桑達(Songda)颱風、2011 年的南瑪都(Nanmadol)颱風及 2014 年的鳳凰(Fungwong)颱風在峰值波高處有差異，其餘模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較中可知，僅 2005 年的珊瑚(Sanvu)颱風、2006 年的珊珊(Shanshan)颱風、2008 年的鳳凰(Fungwong)颱風、2009 年的莫拉克

(Morakot)颱風、2011 年的梅花(Muifa)颱風、2011 年的南瑪都(Nanmadol)颱風及 2013 年的菲特(Fitow)颱風在峰值波高處有差異，其餘模擬趨勢和觀測值皆非常一致。

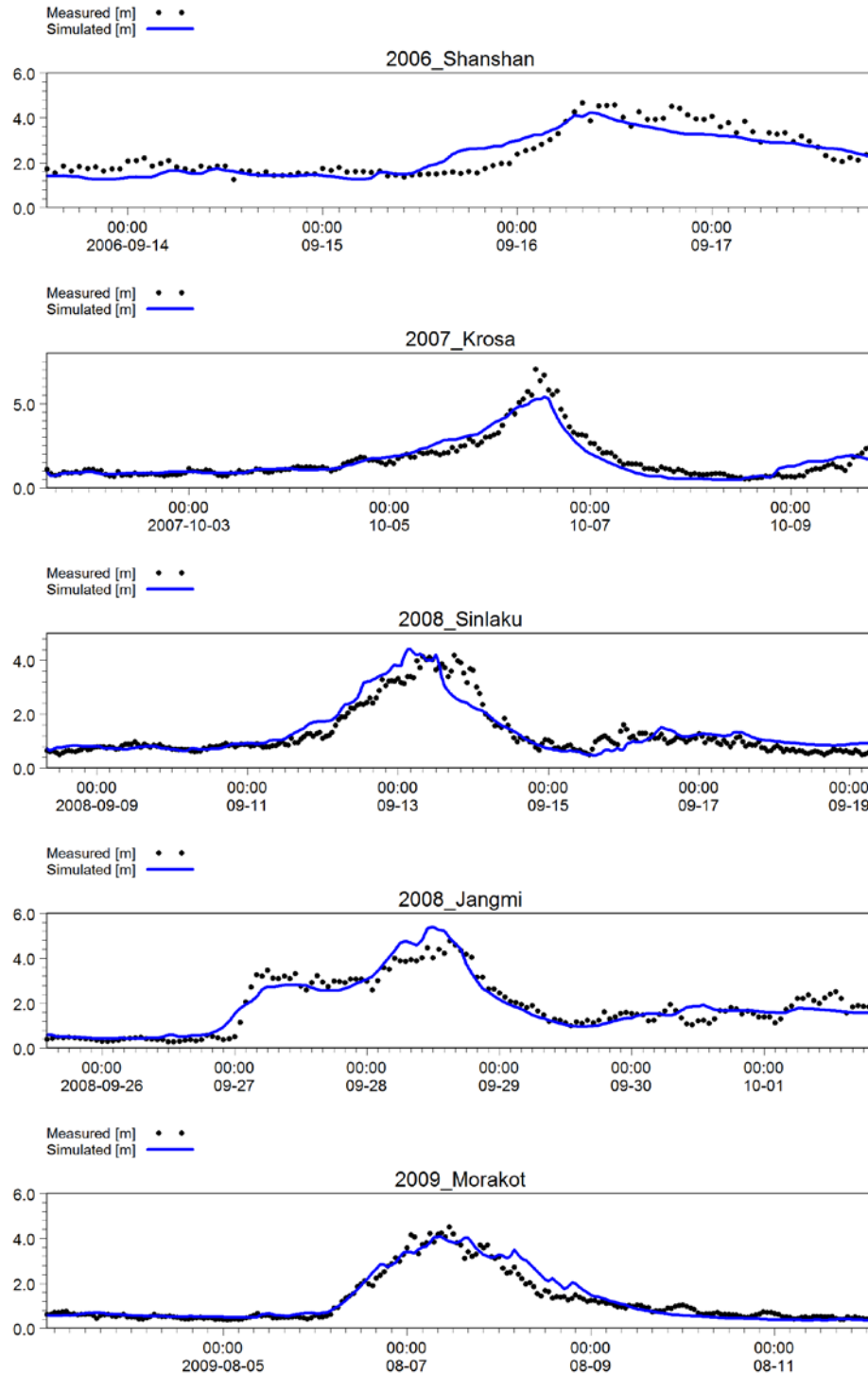


圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較

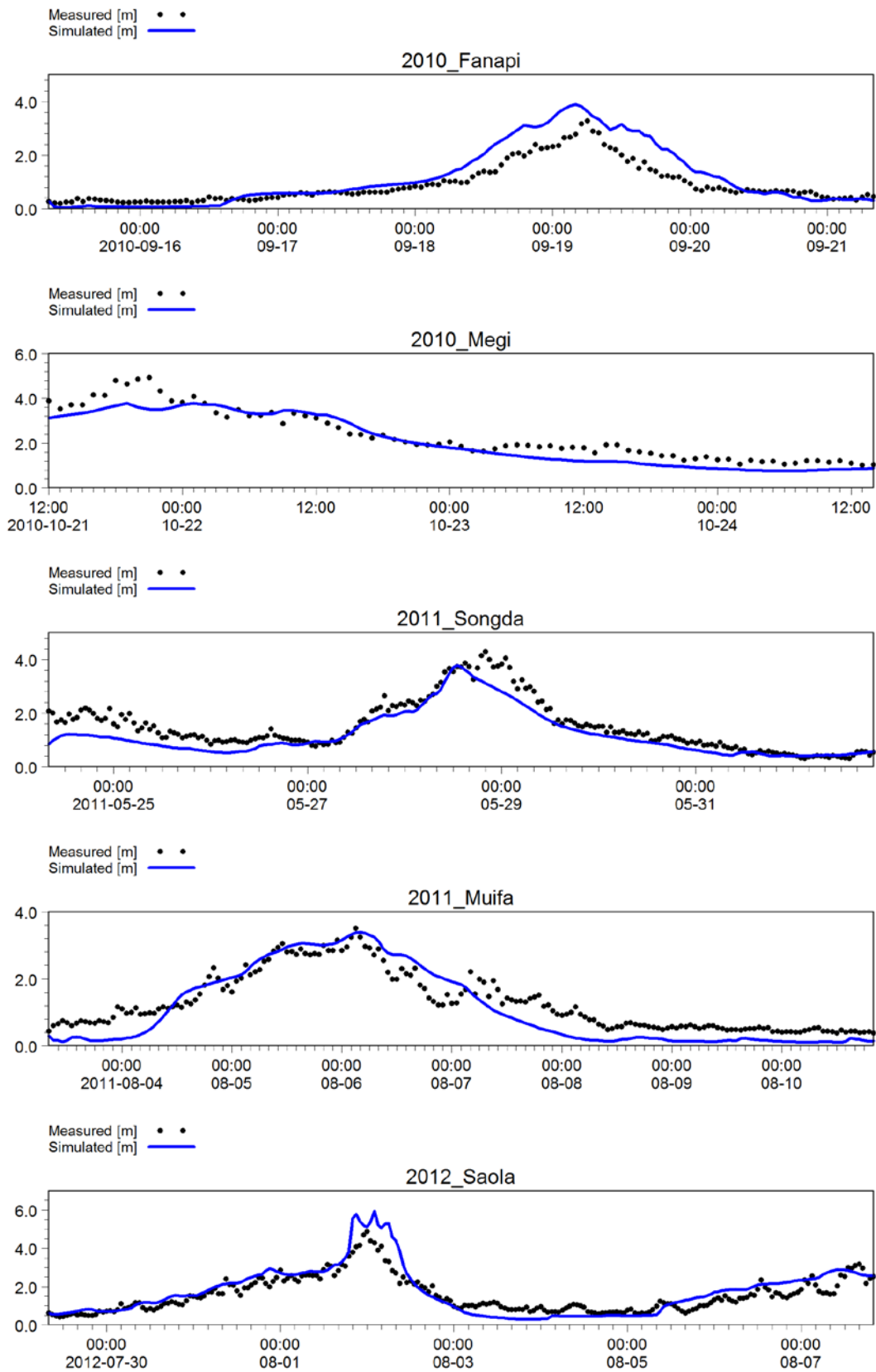


圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較(續 1)

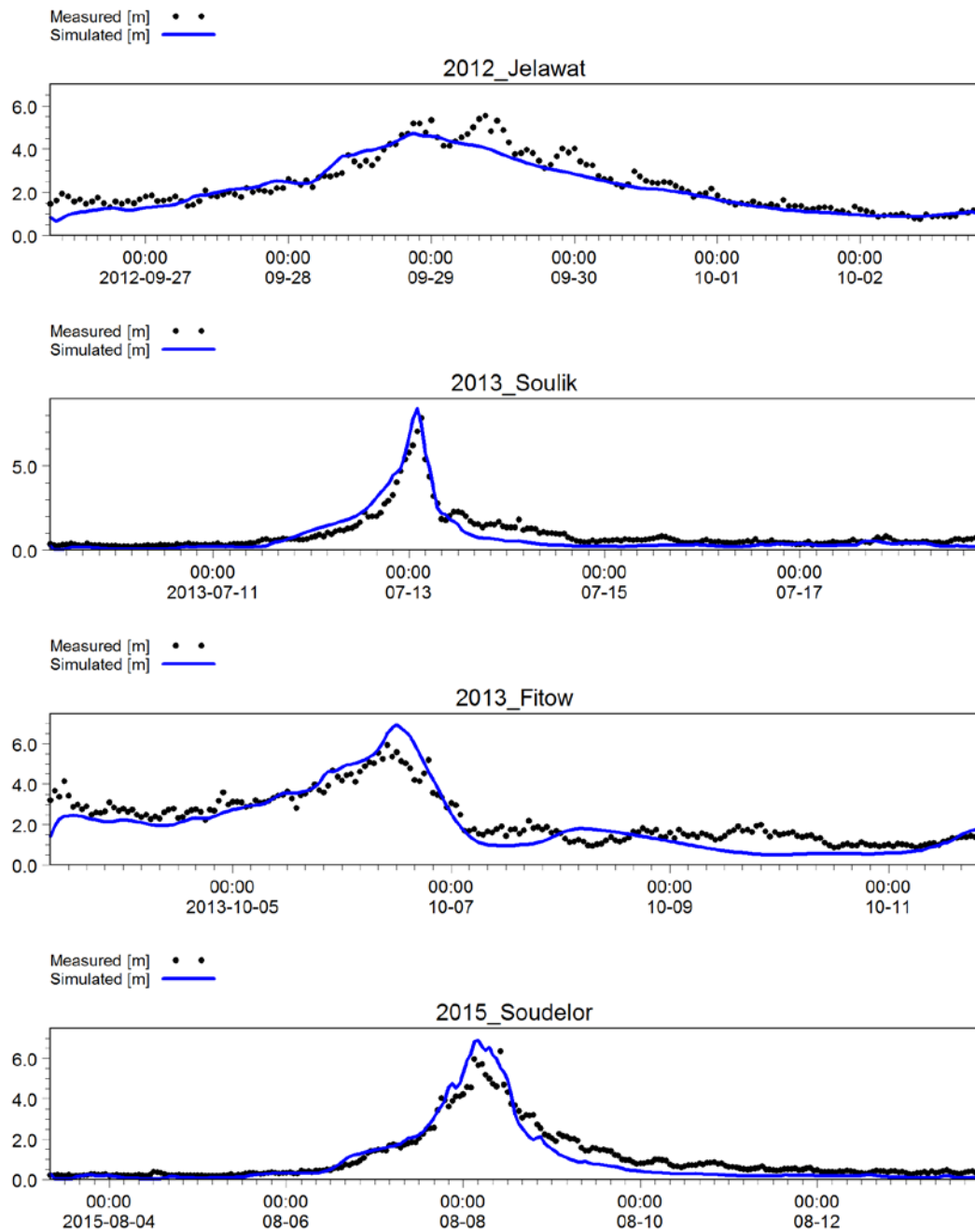


圖 6.2 基隆港示性波高時序列比較(續 2)

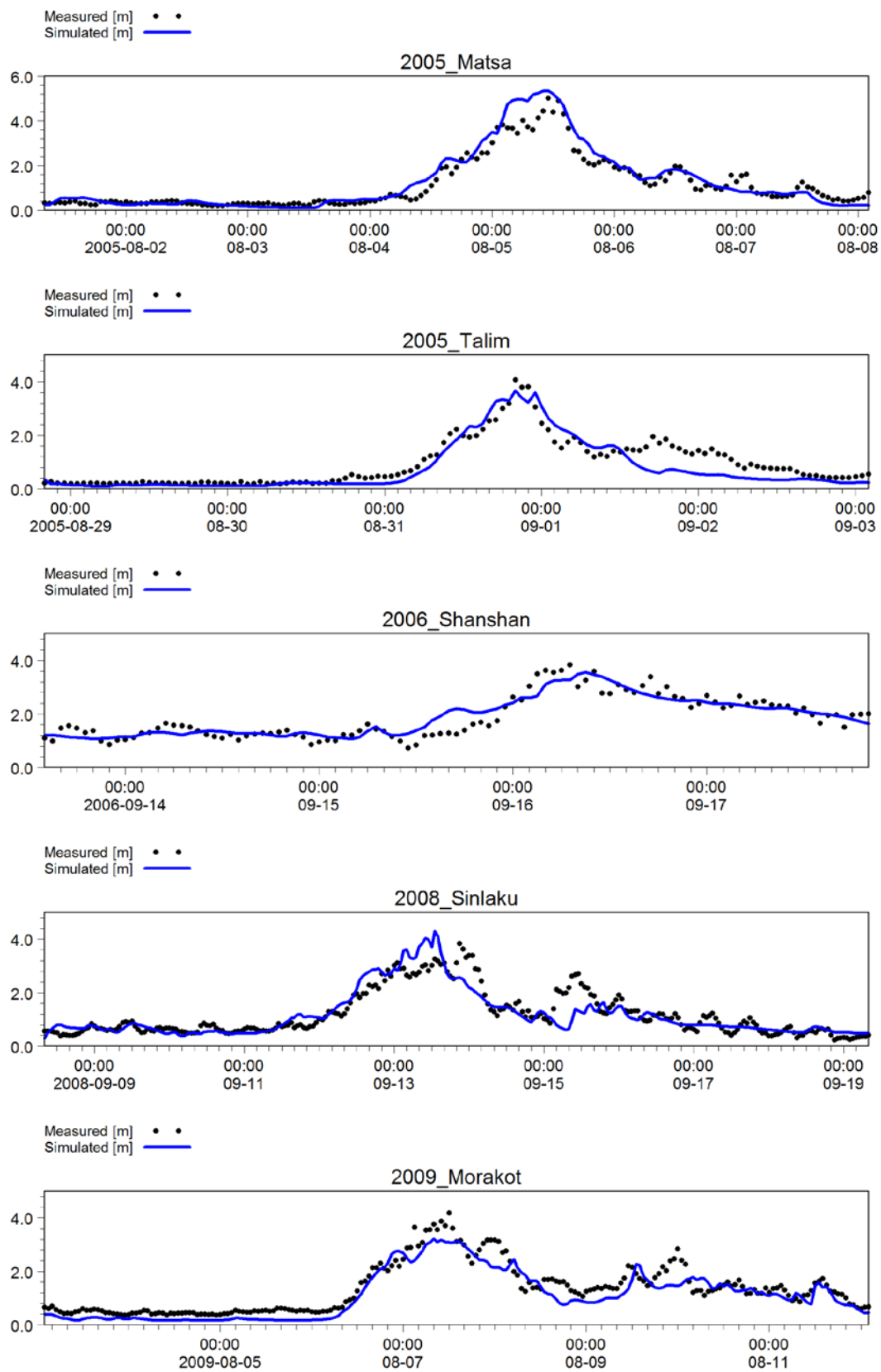


圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較

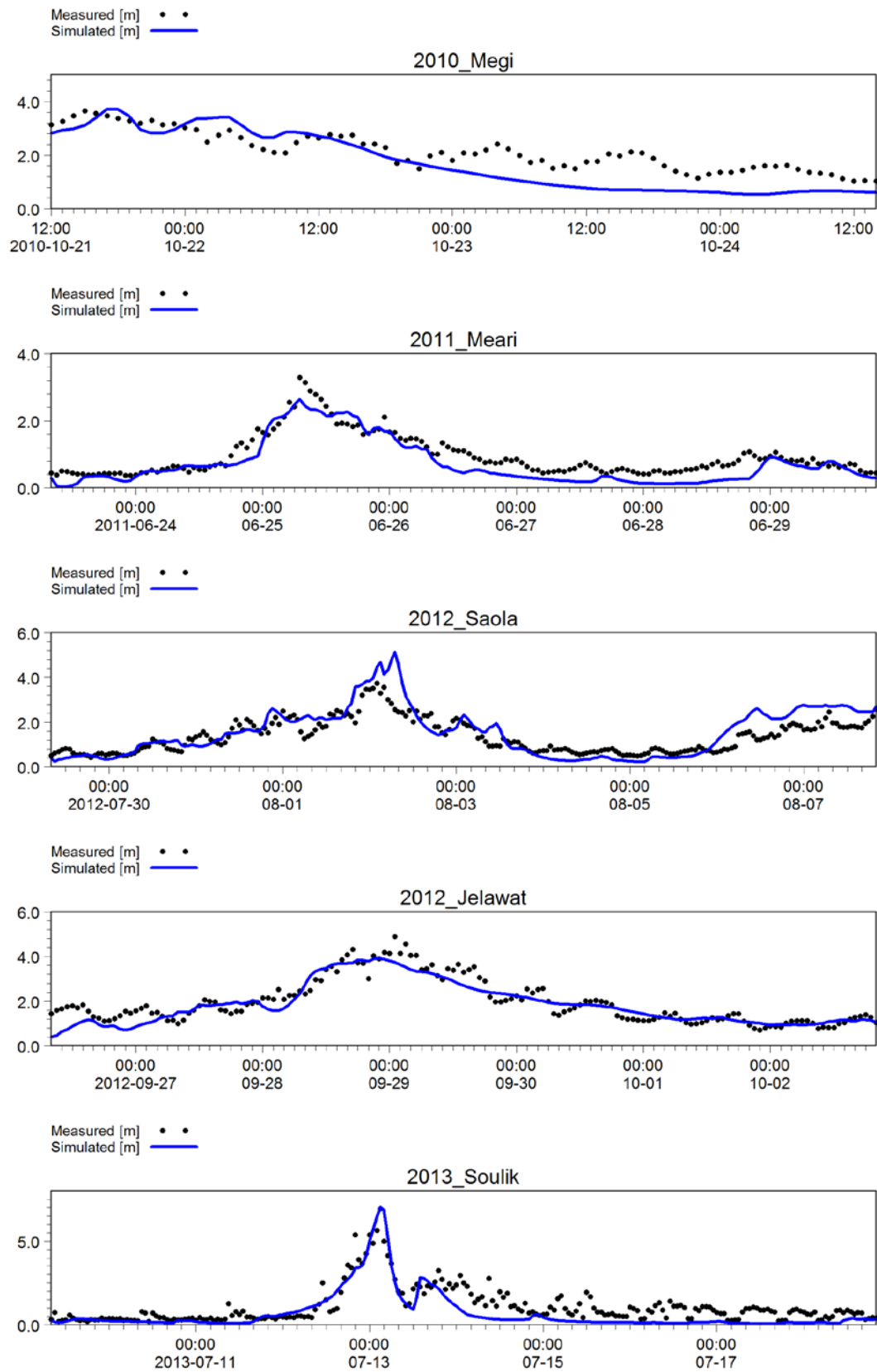


圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較(續 1)

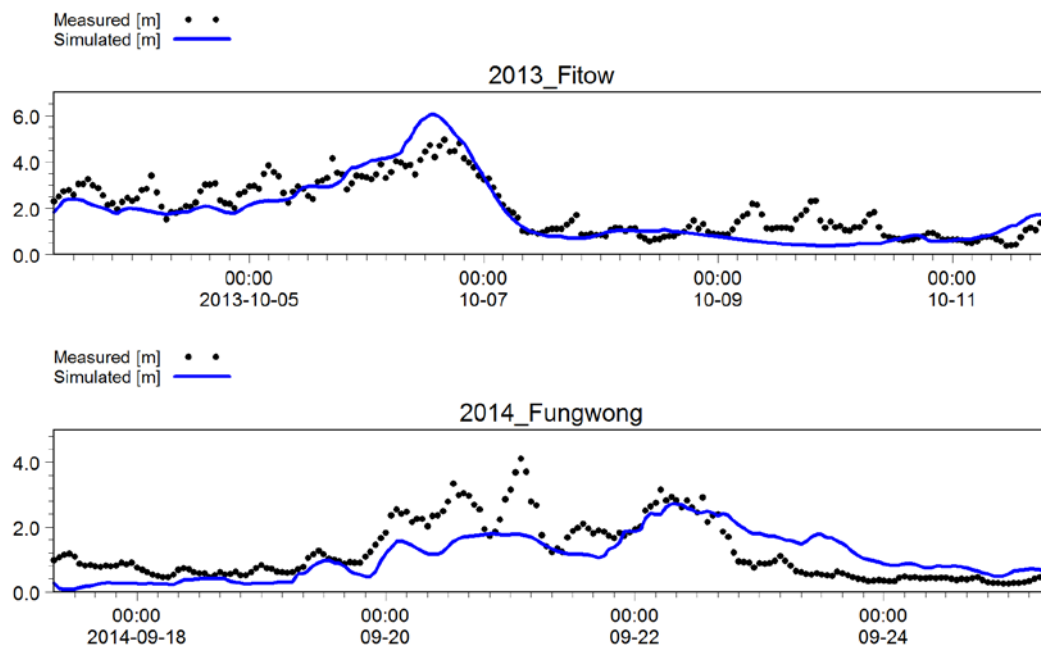


圖 6.3 臺北港示性波高時序列比較(續 2)

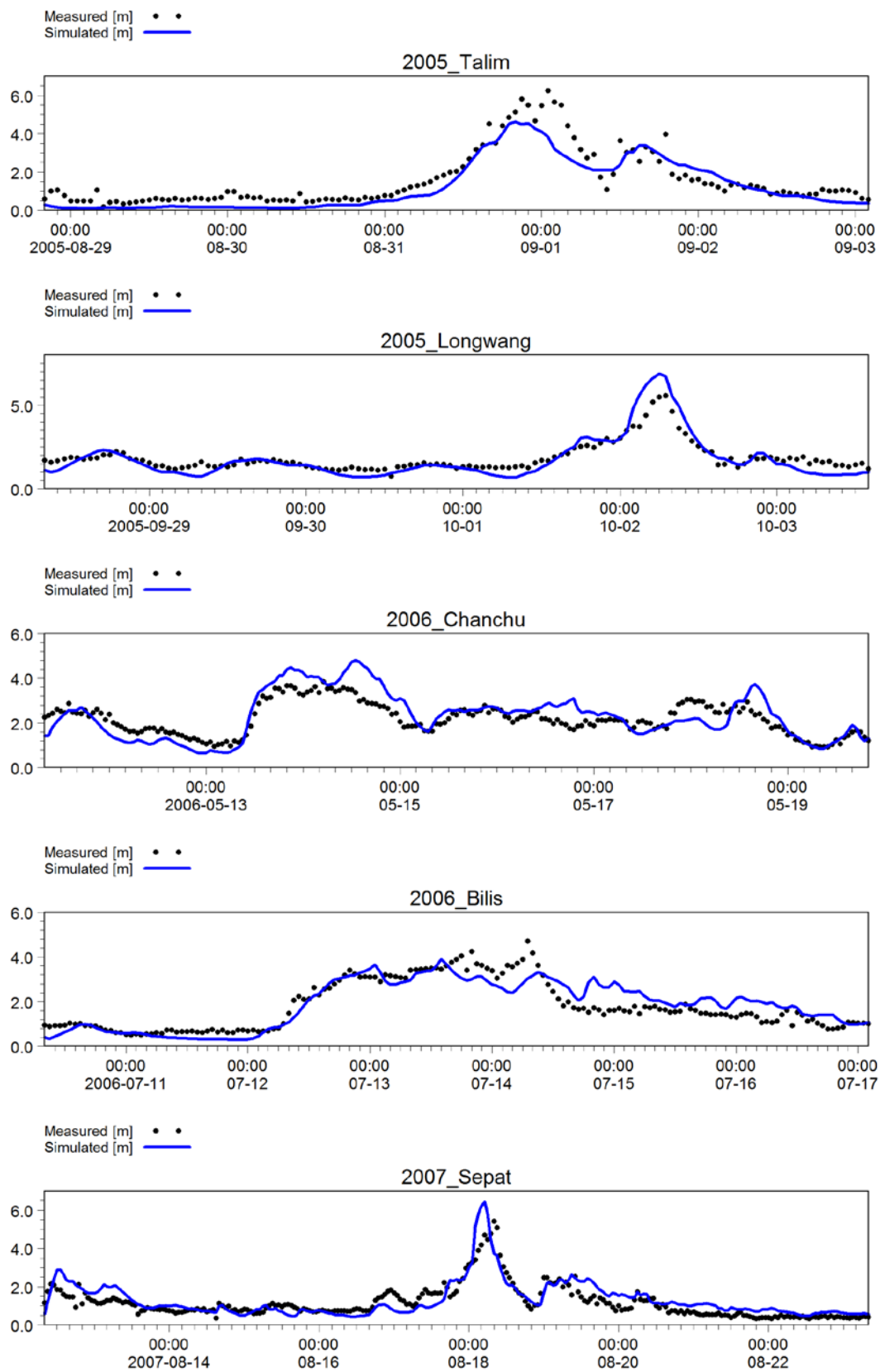


圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較

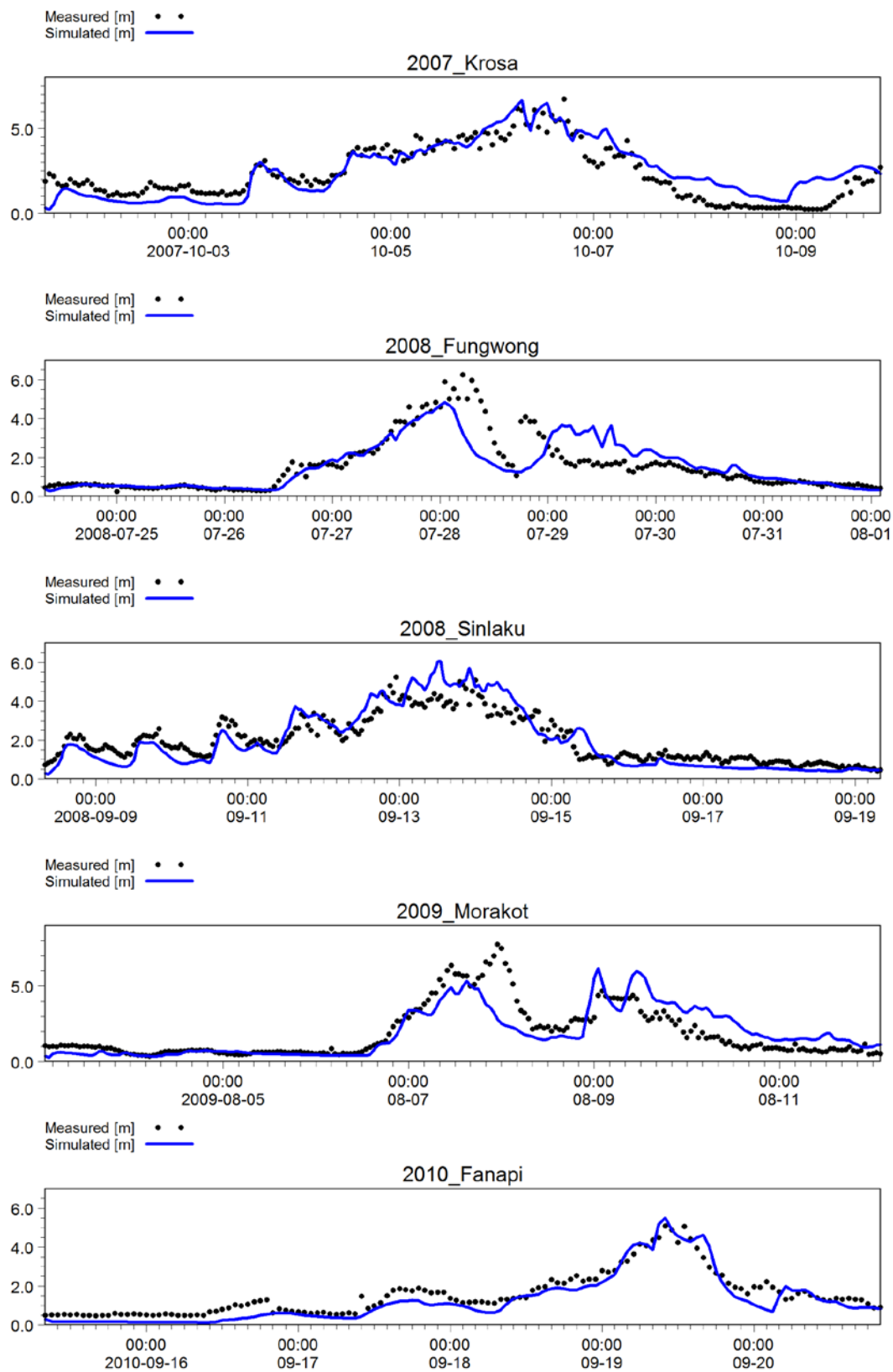


圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 1)

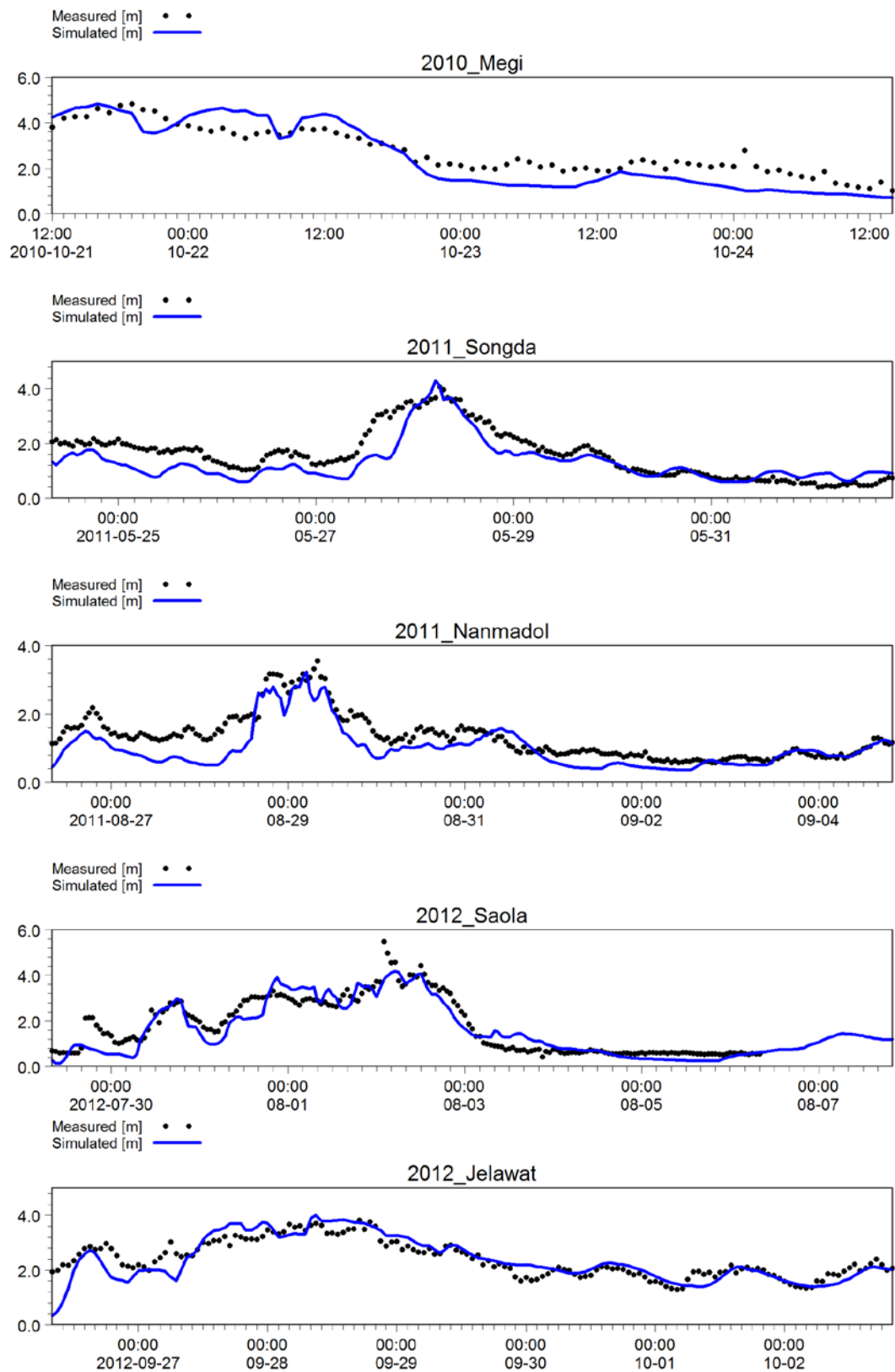


圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 2)

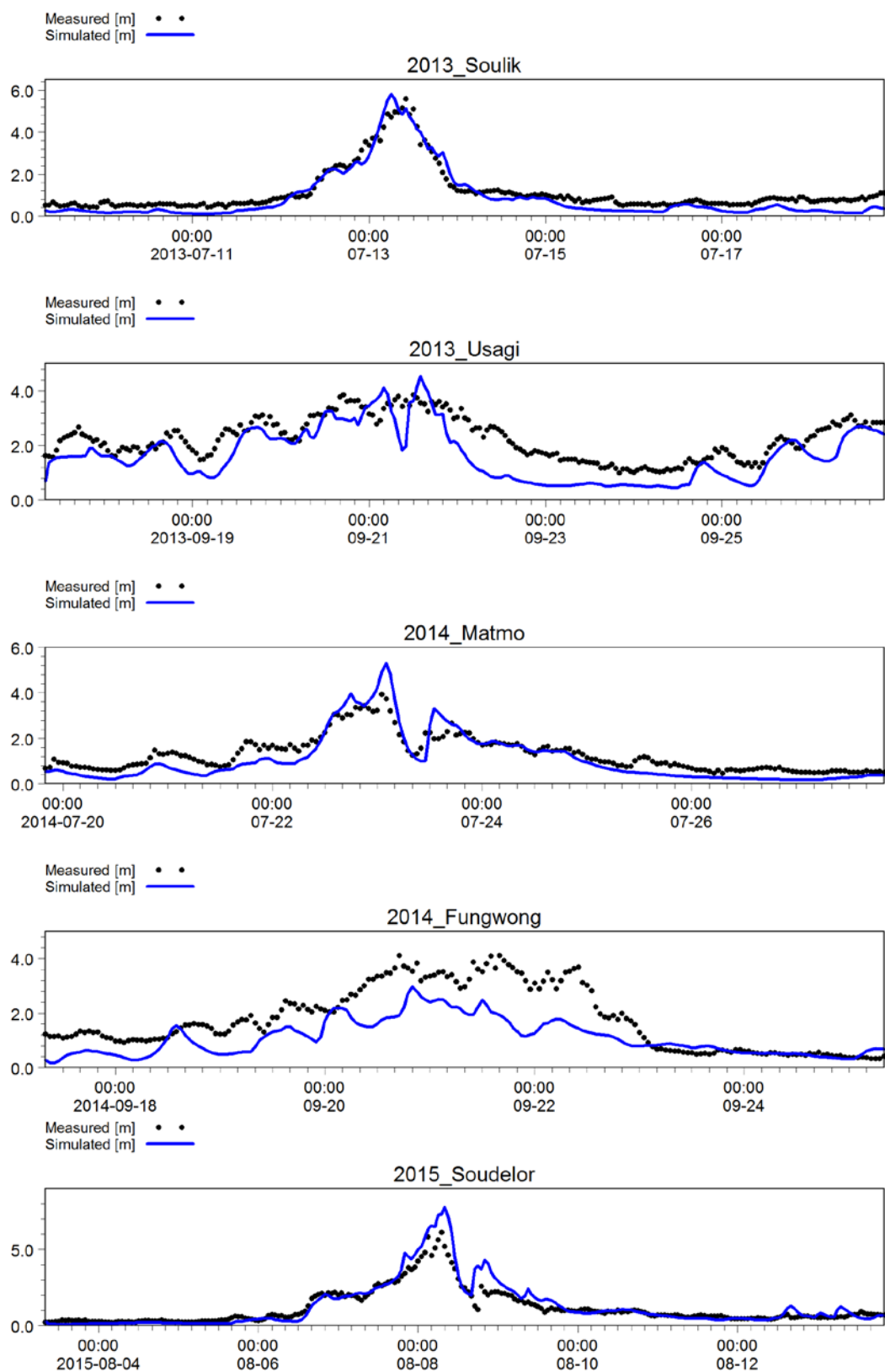


圖 6.4 臺中港示性波高時序列比較(續 3)

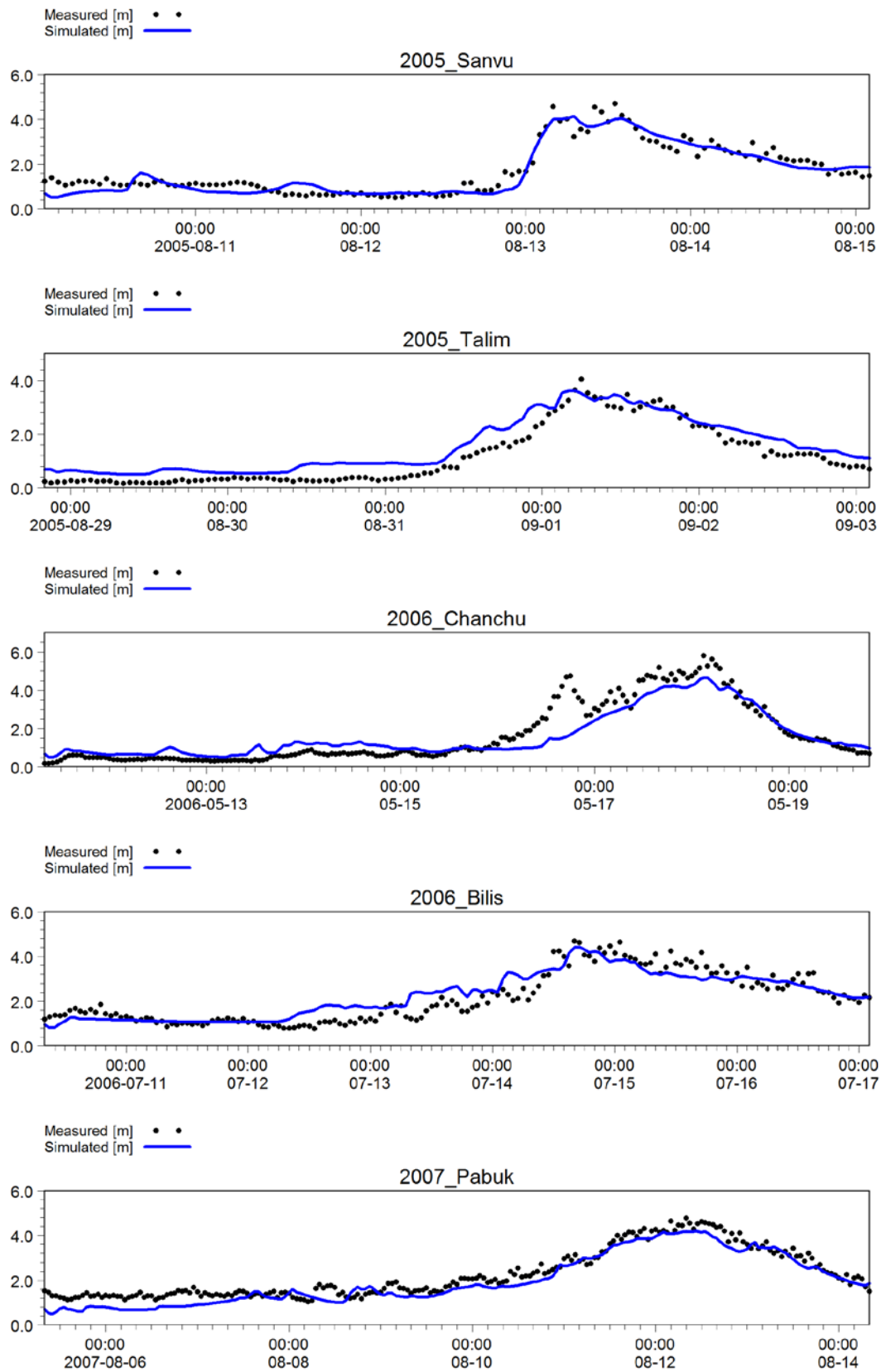


圖 6.5 安平港示性波高時序列比較

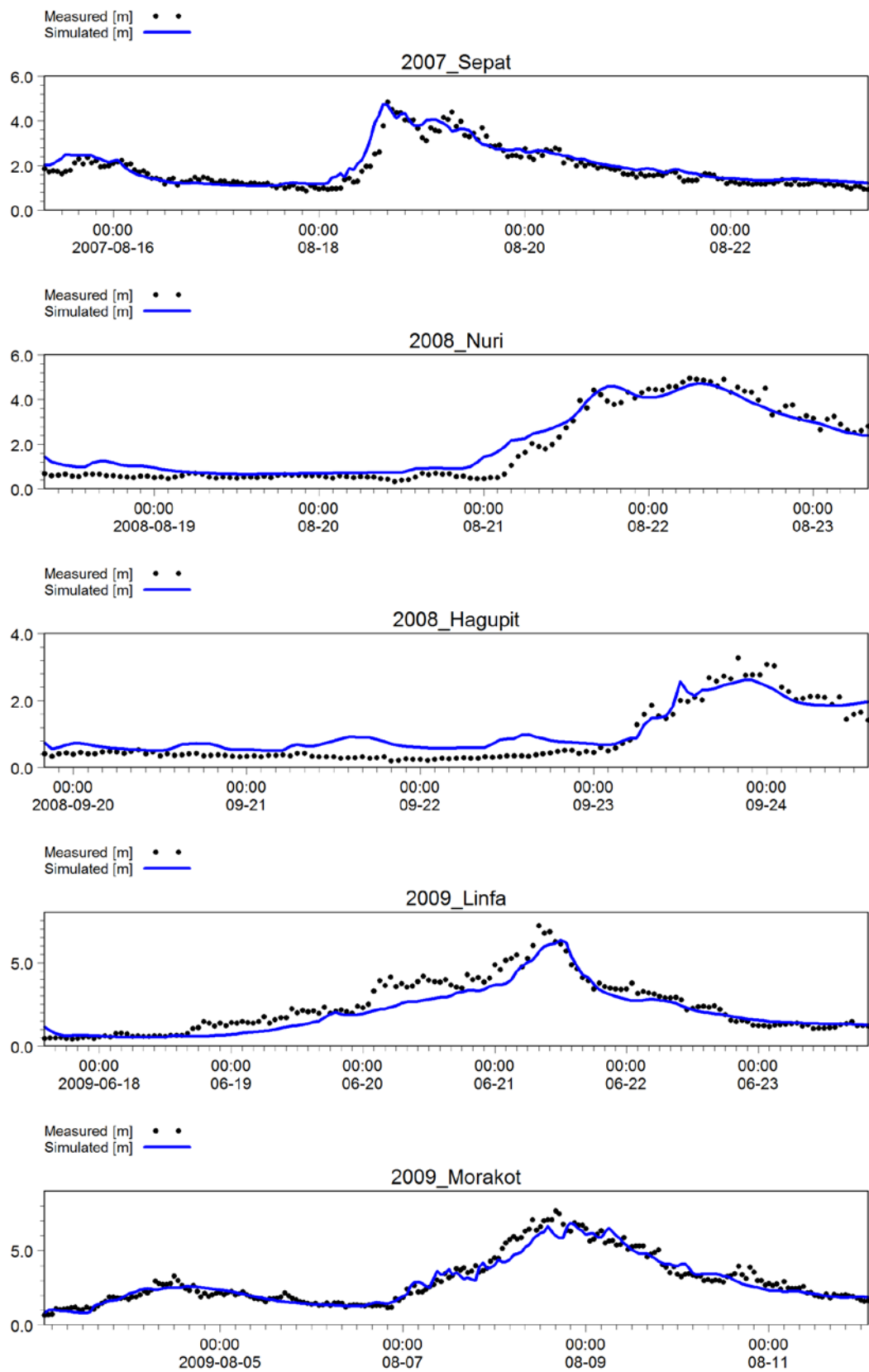


圖 6.5 安平港示性波高時序列比較(續 1)

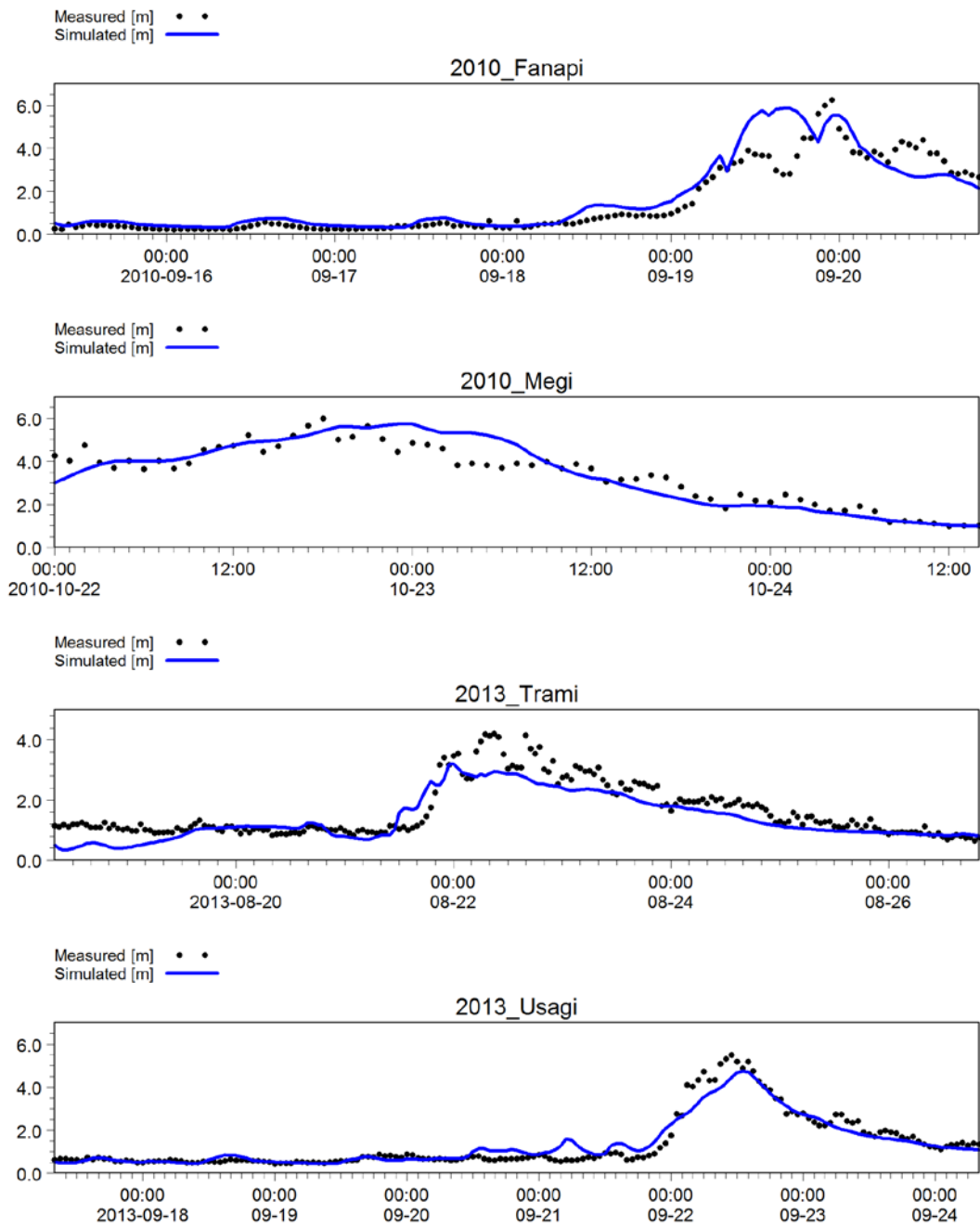


圖 6.5 安平港示性波高時序列比較(續 2)

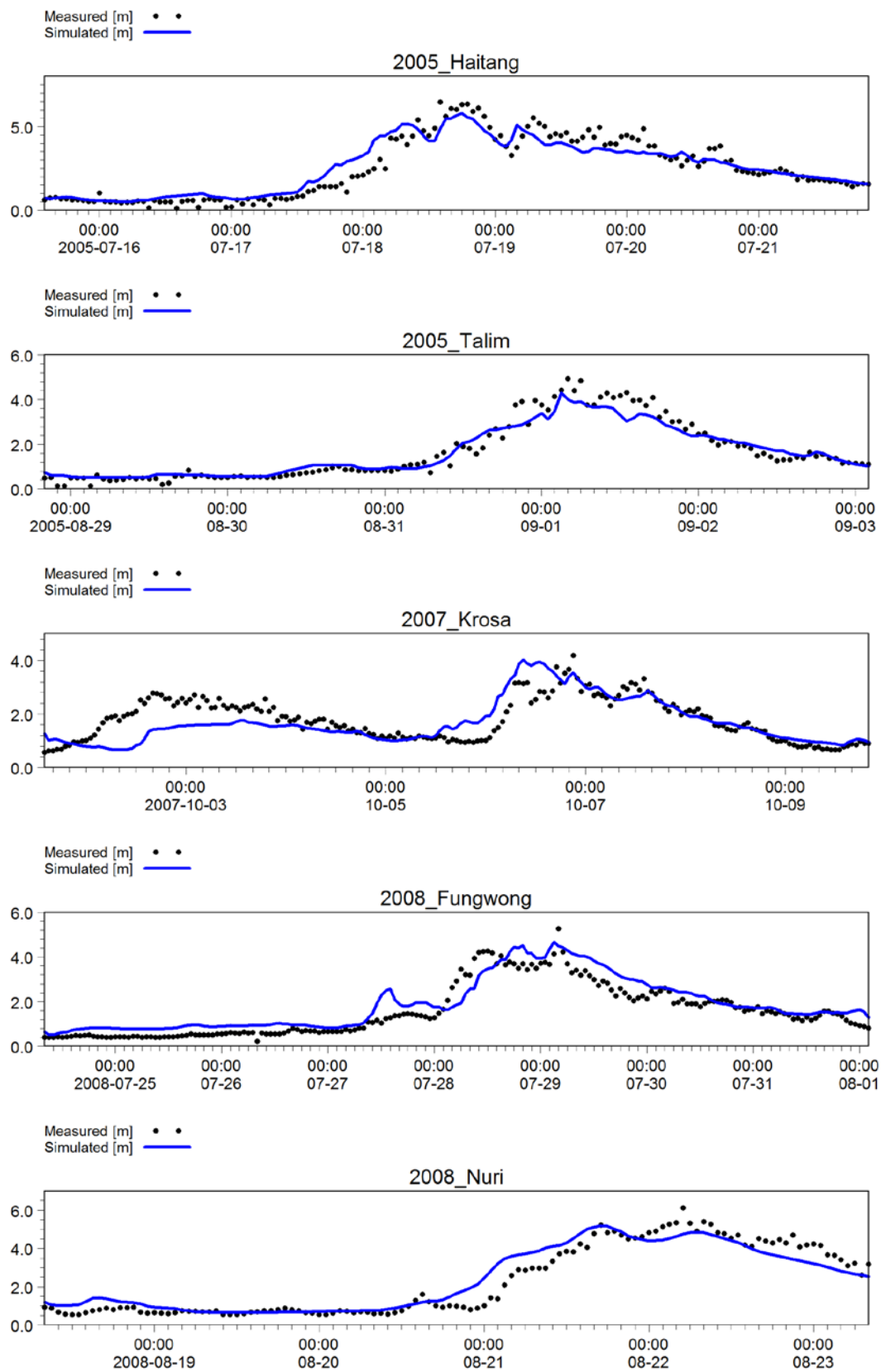


圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較

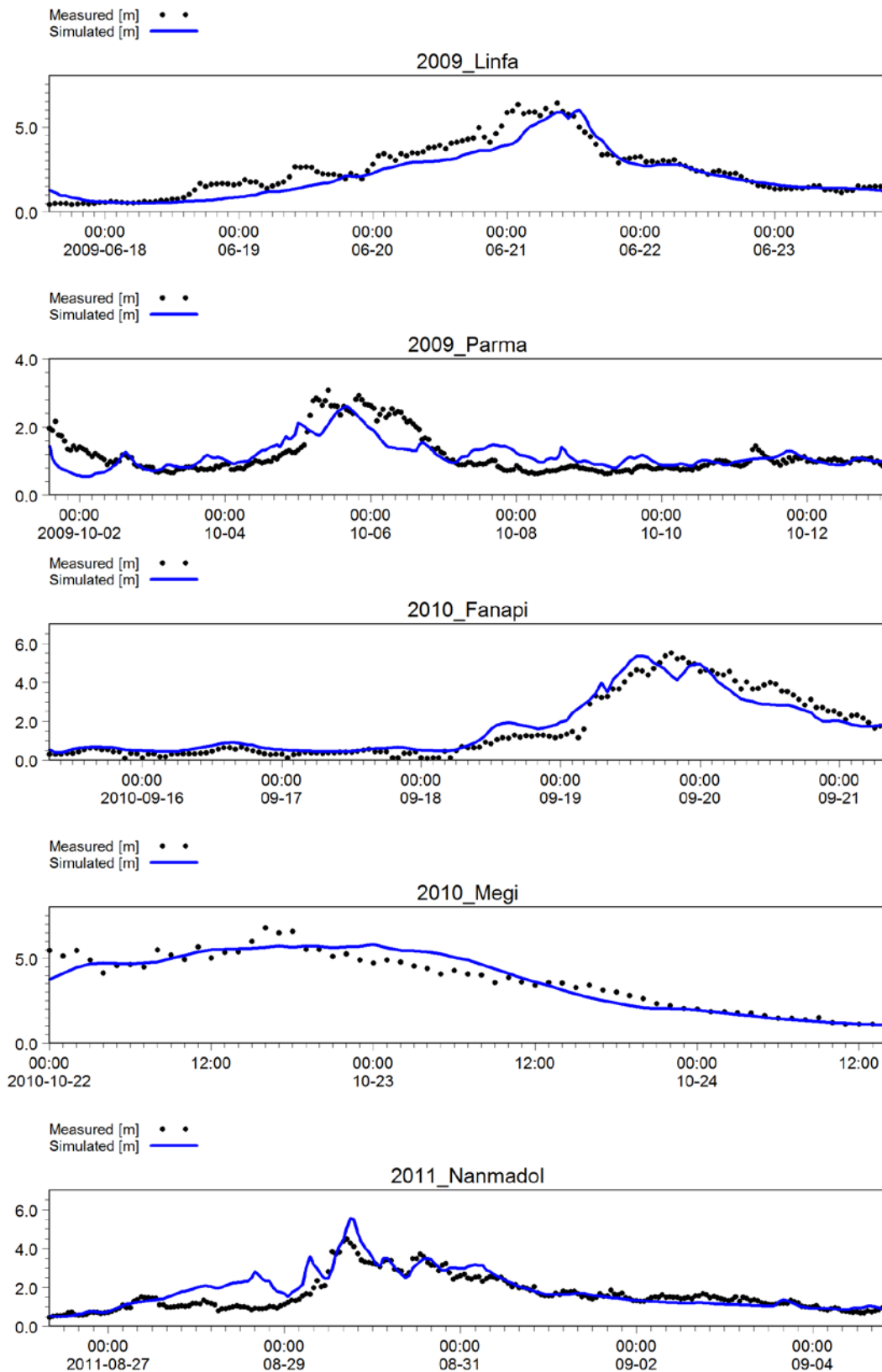


圖 6.6 高雄港示性波高時序序列比較(續 1)

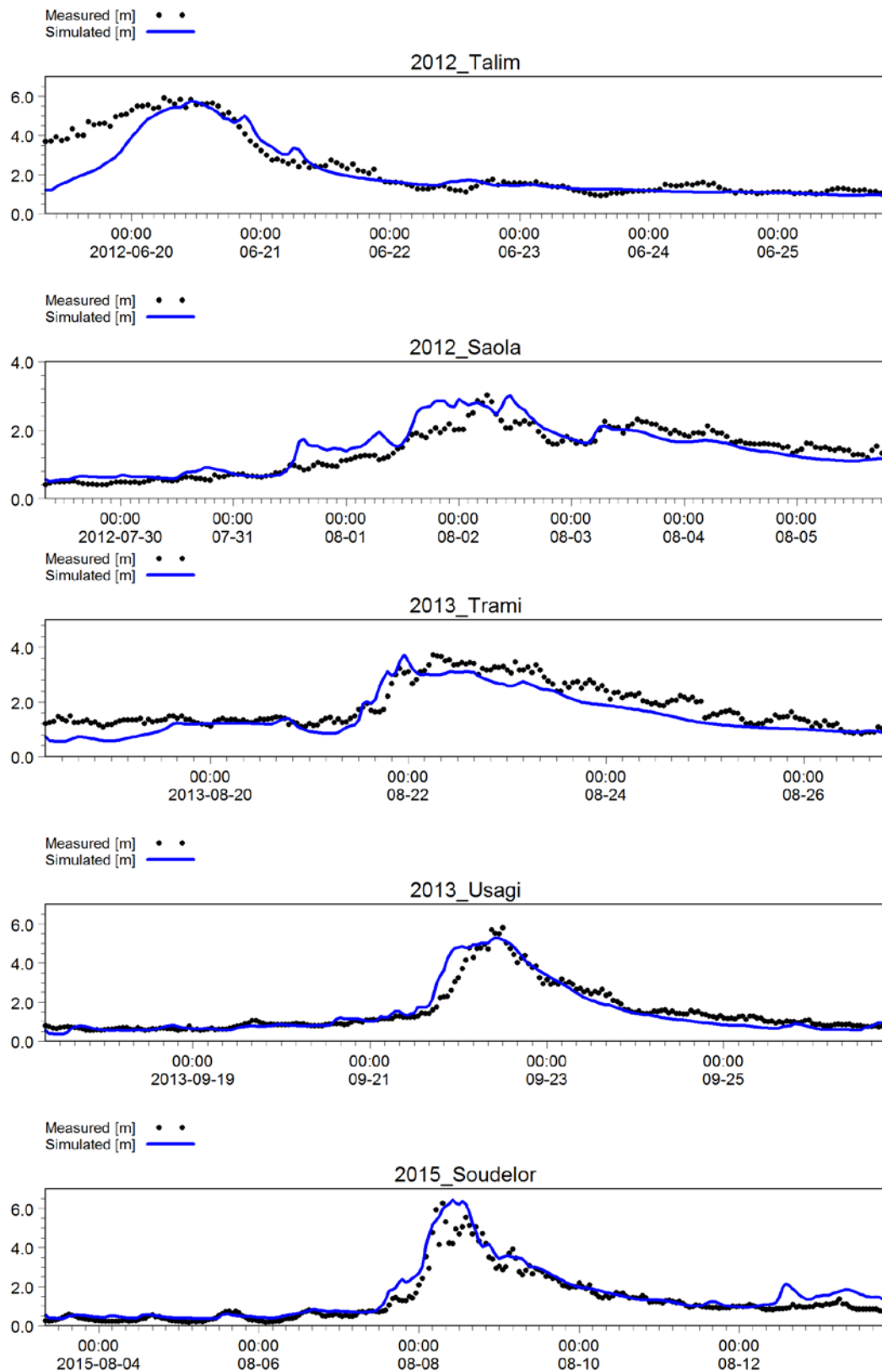


圖 6.6 高雄港示性波高時序列比較(續 2)

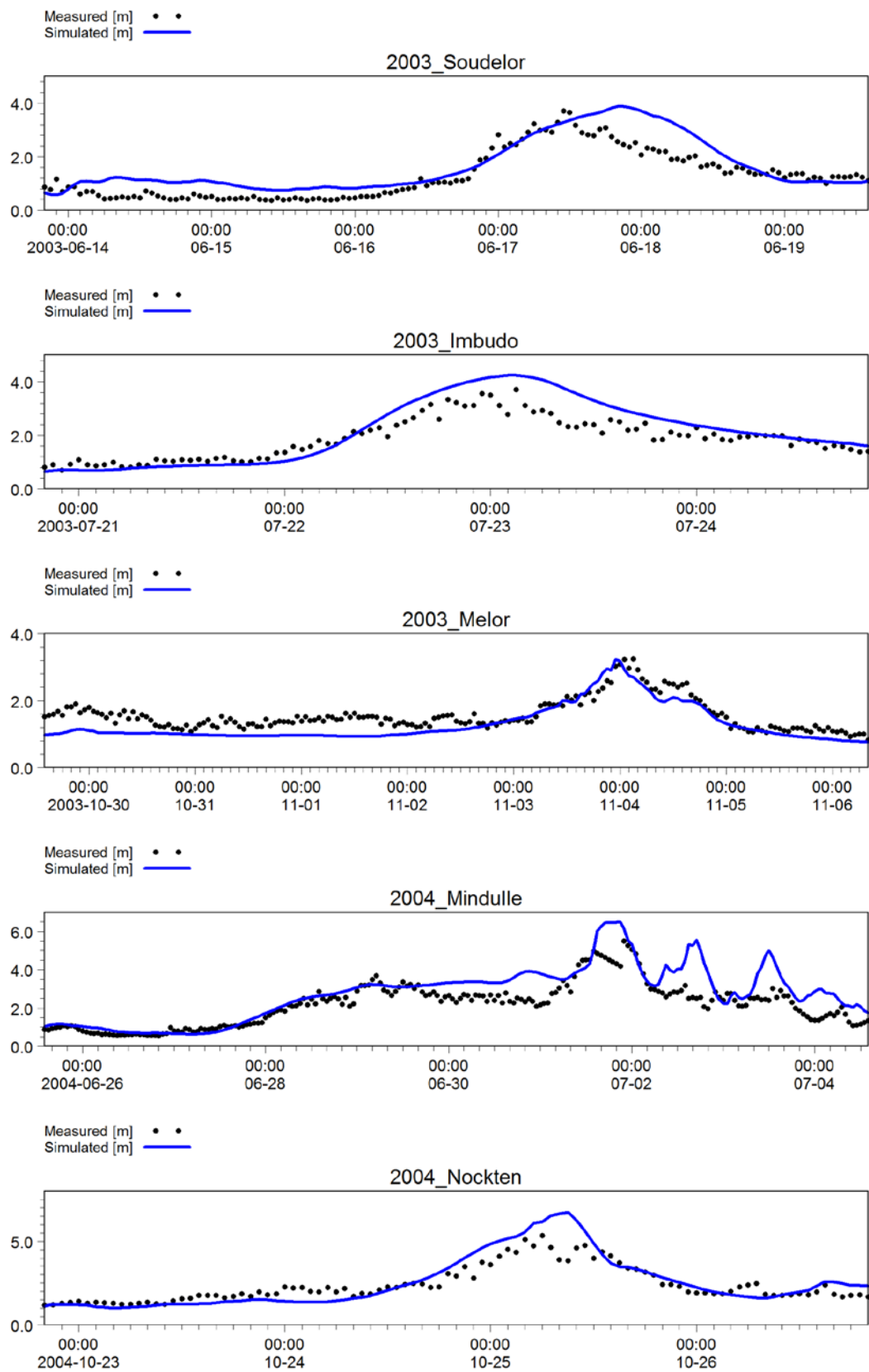


圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較

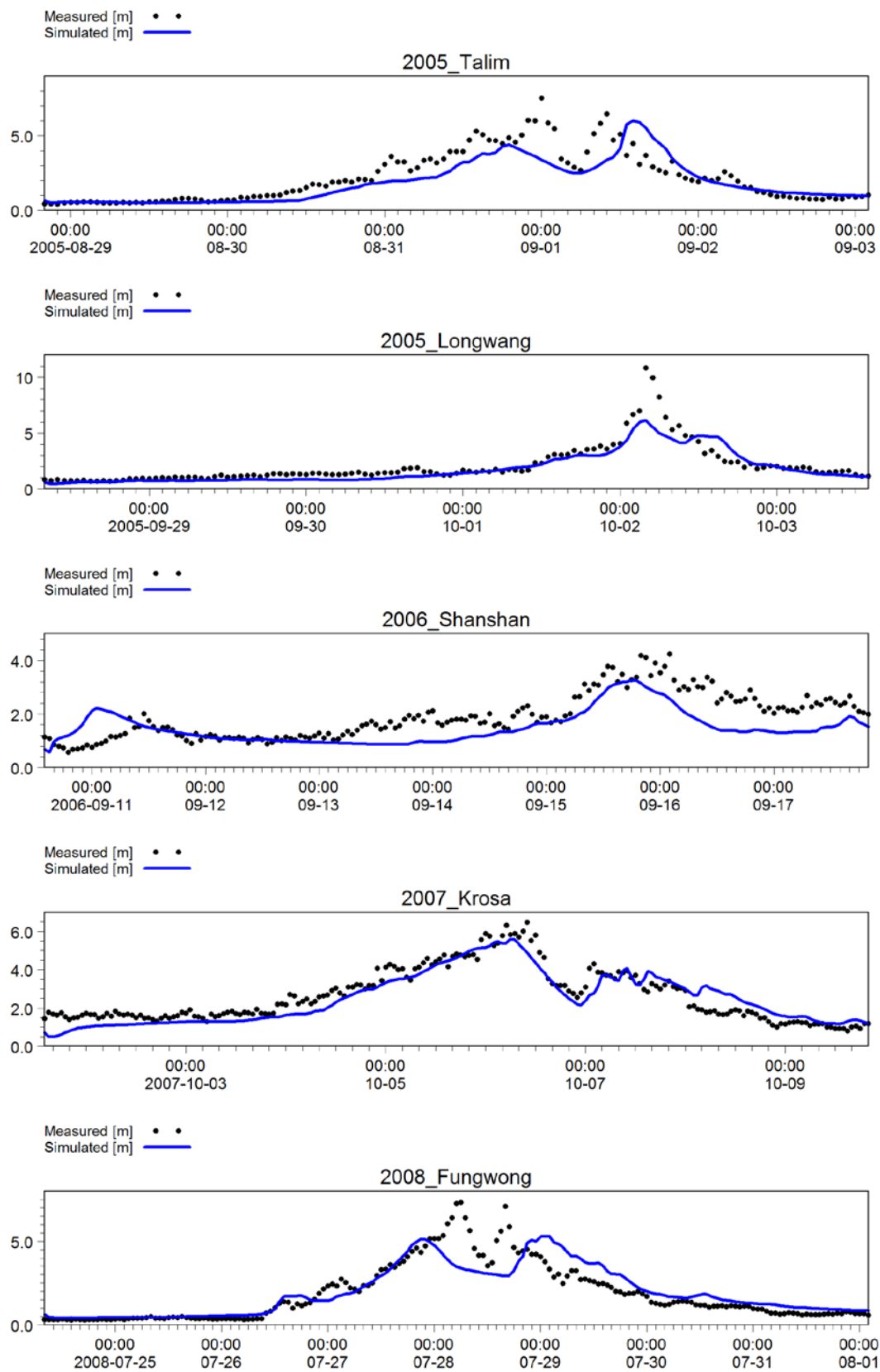


圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 1)

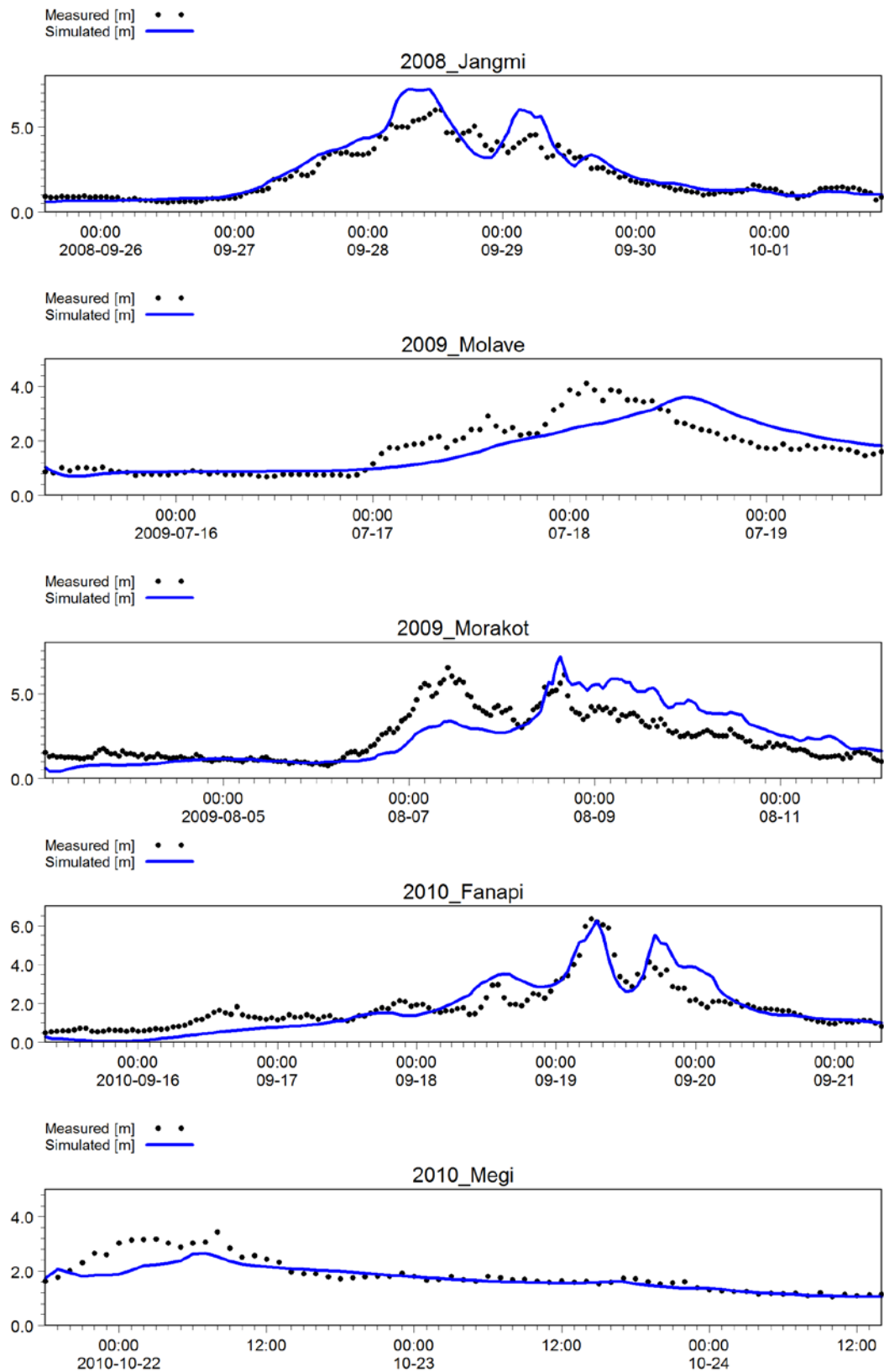


圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 2)

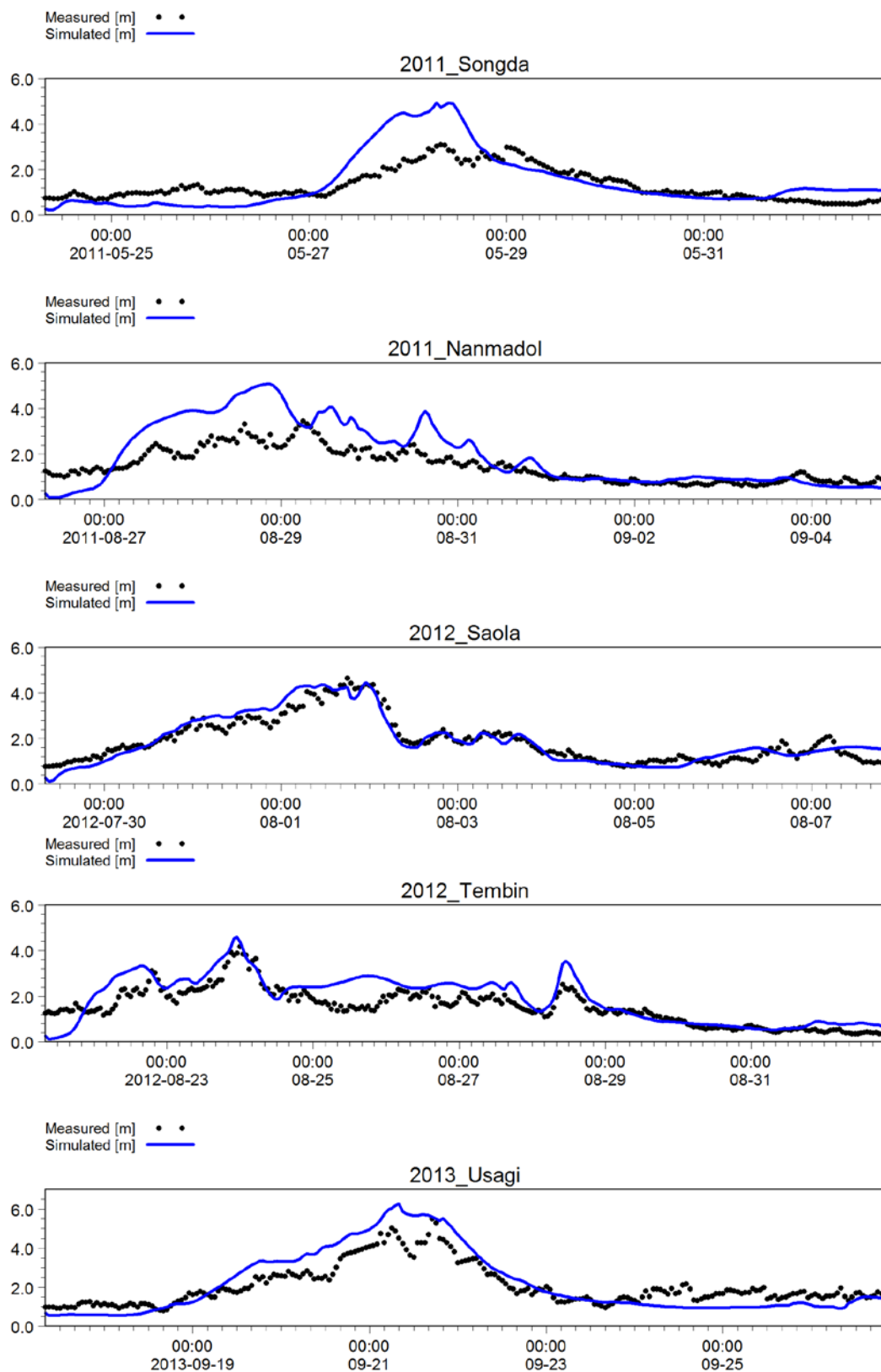


圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 3)

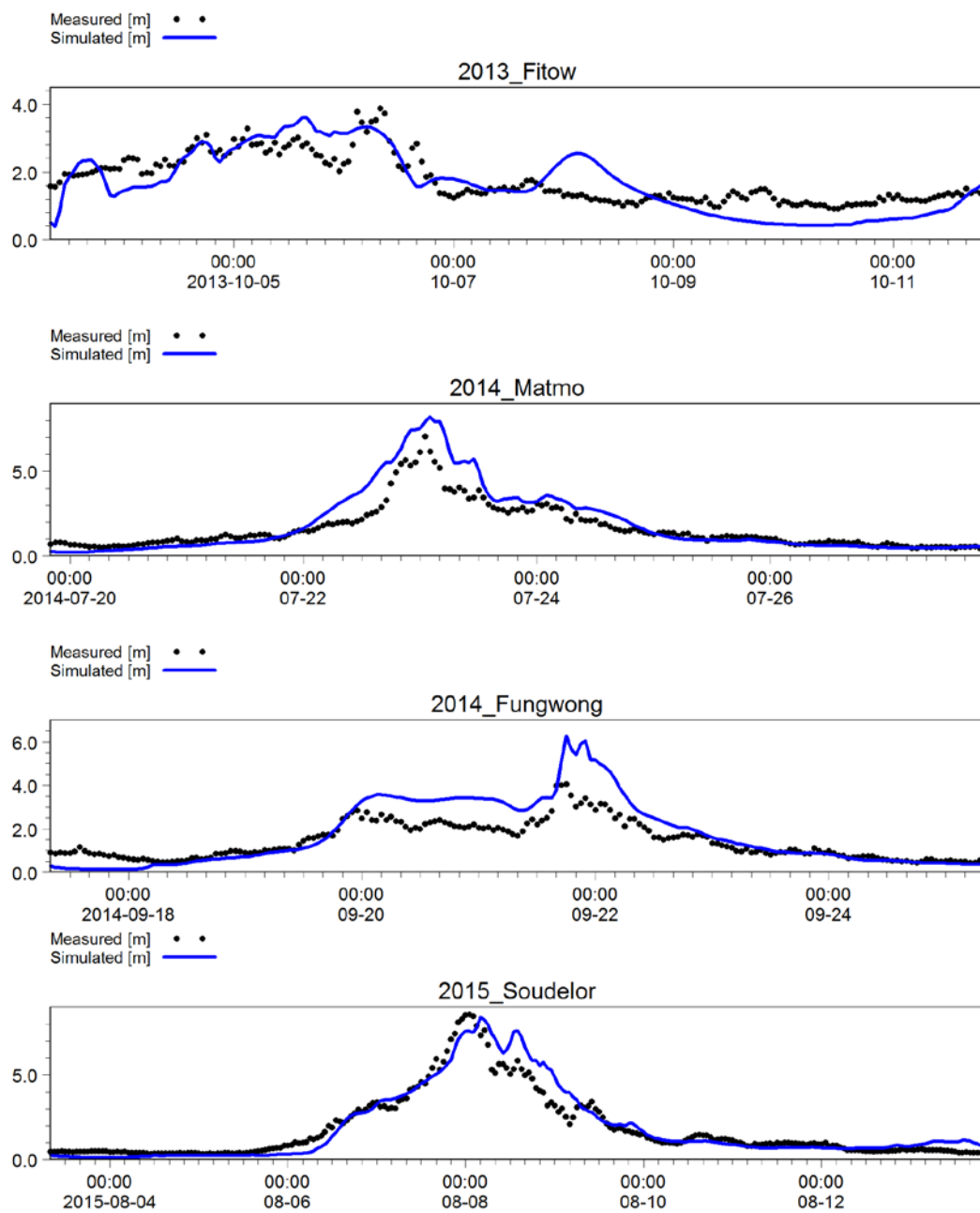


圖 6.7 花蓮港示性波高時序列比較(續 4)

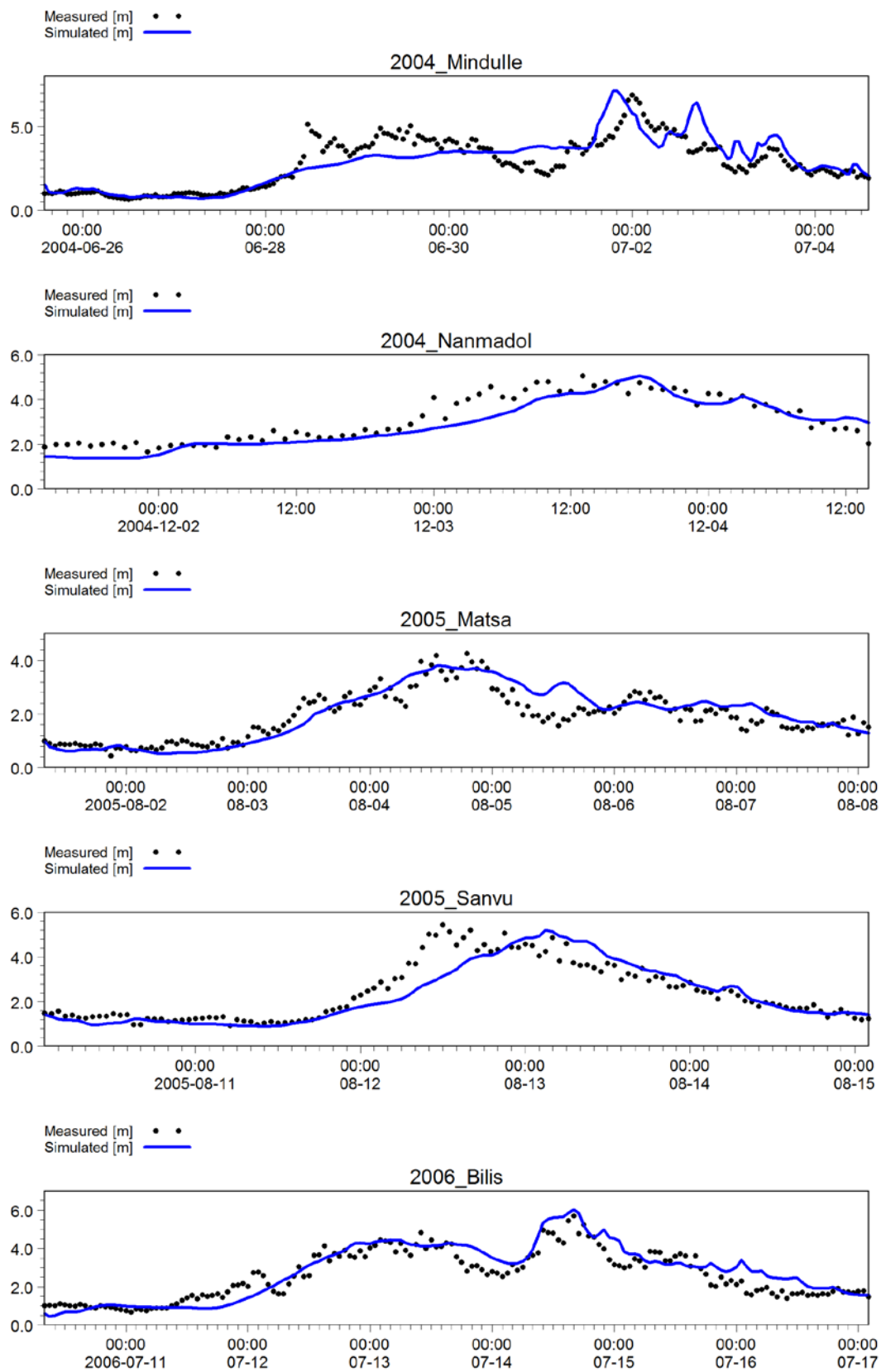


圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較

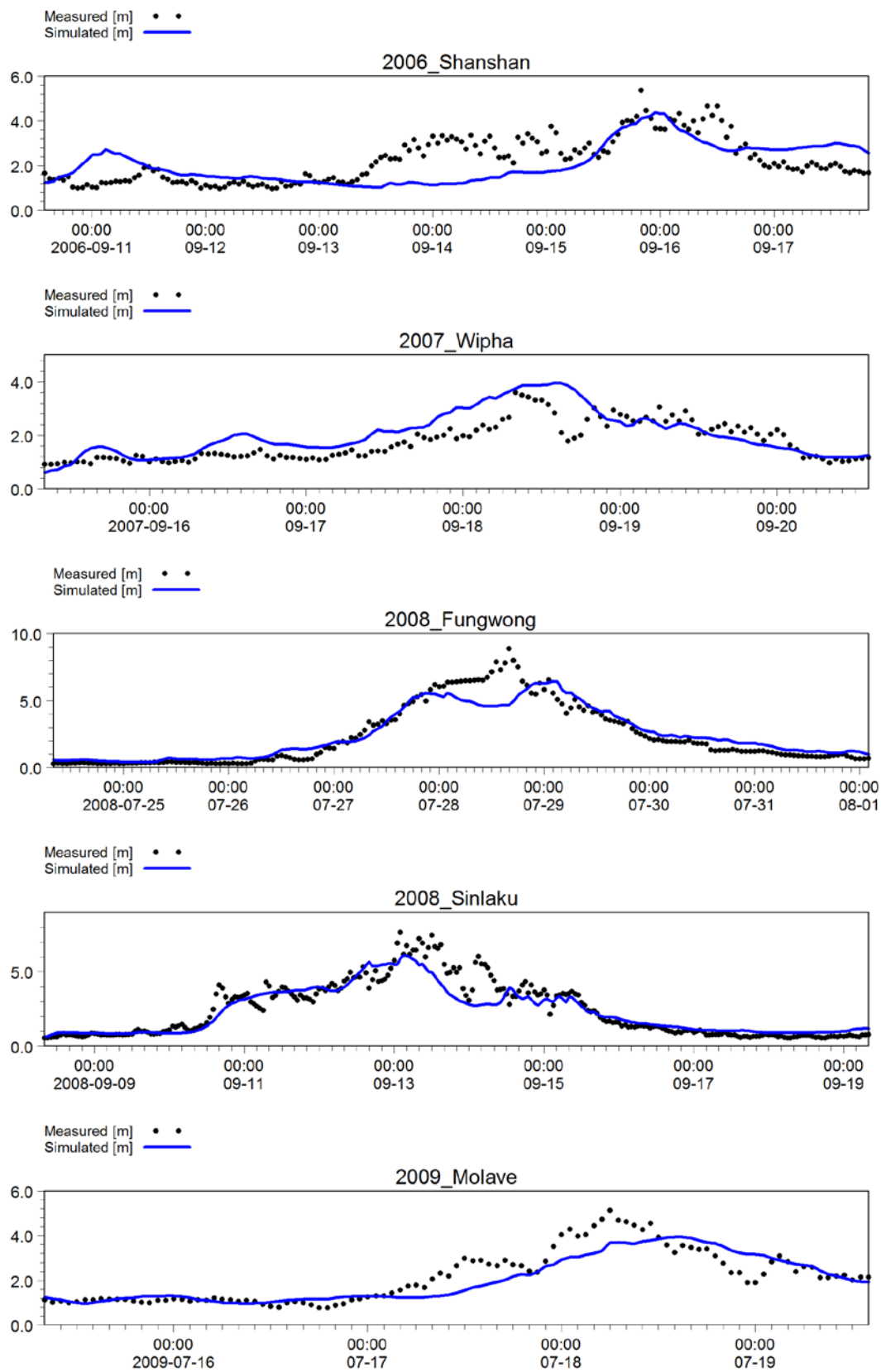


圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 1)

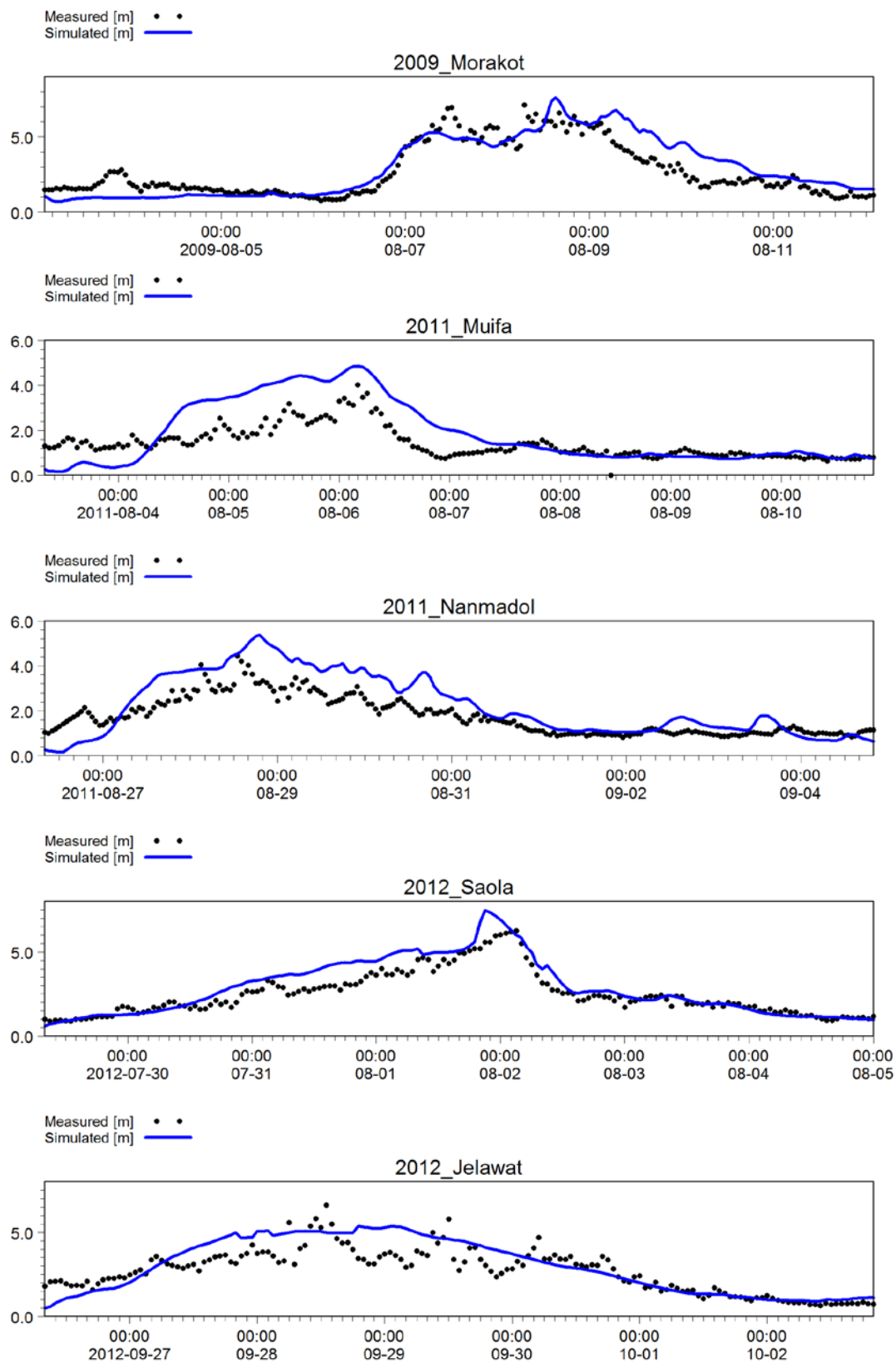


圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 2)

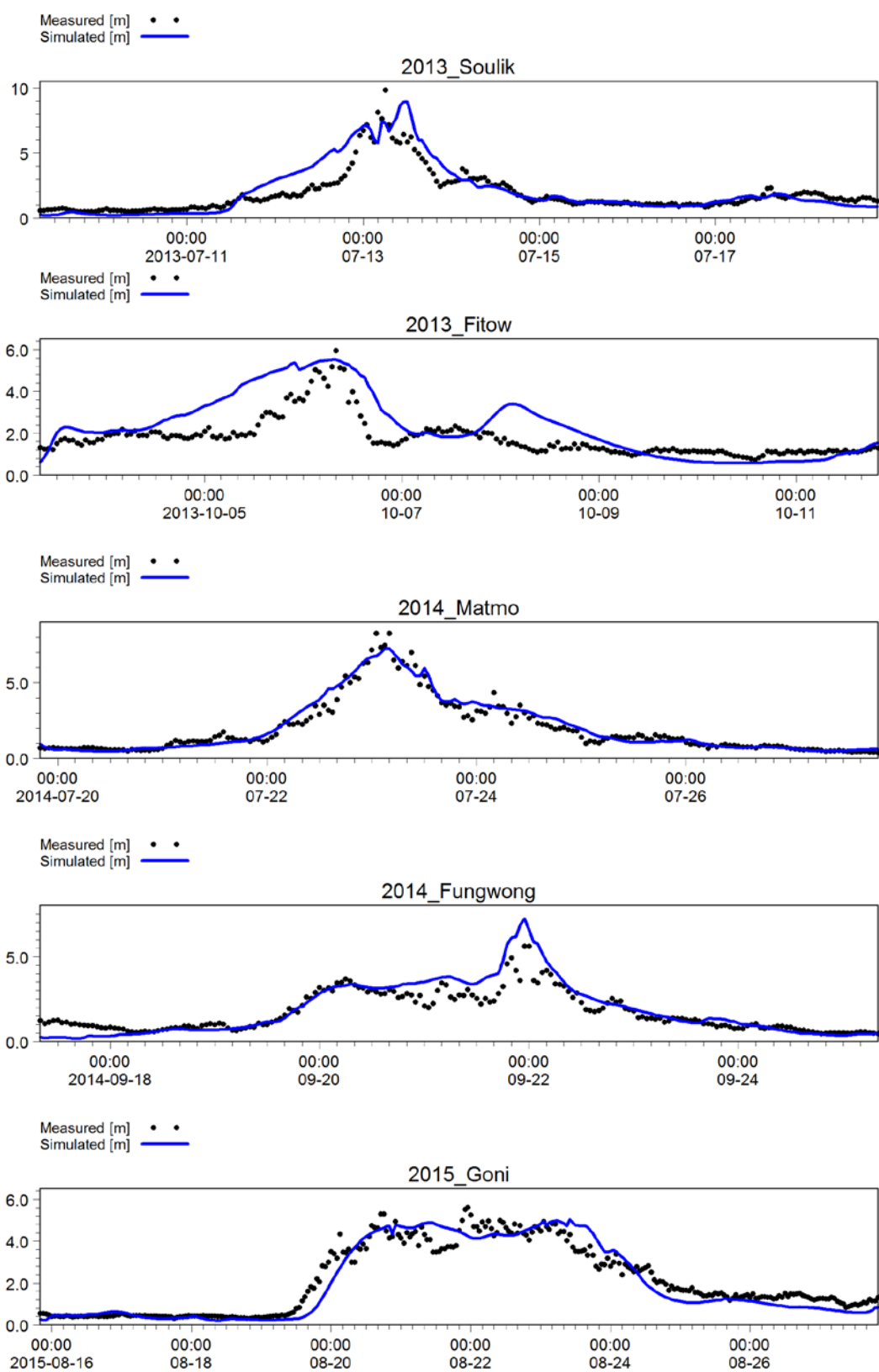


圖 6.8 蘇澳港示性波高時序列比較(續 3)

3.示性波高的評估指標比較

表 6.4 為基隆港推算結果的比較，由表中可發現基隆港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以柯羅莎(2007)颱風誤差最大，其誤差達 1.65m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以辛樂克(2008)颱風相差最多，其誤差達 14 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為菲特(2013)颱風，其誤差達 0.67m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以珊珊(2006)颱風最差，其值為 0.78。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以柯羅莎(2007)颱風誤差最大，其誤差達 23.34%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以凡那比(2010)颱風誤差最大，其誤差達 15.56%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.69m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 4 小時， $RMSE$ 為 0.46m，決定係數 R^2 為 0.89，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 13.30%， $RMSE/H_{max}$ 為 9.48%。另由評估指標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅辛樂克(2008)颱風在 Δt_p 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內，顯示 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場在基隆港有不錯的推算結果。

表 6.5 為臺北港推算結果的比較，由表中可發現臺北港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以鳳凰(2014)颱風誤差最大，其誤差達 1.39m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以鳳凰(2014)颱風相差最多，其誤差達 29 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為蘇力(2013)颱風，其誤差達 0.7m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以鳳凰(2014)颱風最差，其值為 0.45。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以蘇拉(2012)颱風誤差最大，其誤差達 36.93%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以鳳凰(2014)颱風誤差最大，其誤差達 16.85%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.68m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 5 小時， $RMSE$ 為 0.48m，決定係數 R^2 為 0.78，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 16.28%， $RMSE/H_{max}$ 為 11.09%。另由評估指

標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅蘇拉(2012)颱風在 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 未達標準，鳳凰(2014)颱風在 Δt_p 、 R^2 和 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內，顯示 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場在臺北港有不錯的推算結果。

表 6.6 為臺中港推算結果的比較，由表中可發現臺中港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以蘇迪勒(2015)颱風誤差最大，其誤差達 1.64m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以莫拉克(2009)颱風相差最多，其誤差達 26 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 RMSE 最大為莫拉克(2009)颱風，其誤差達 1.12m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以莫拉克(2009)颱風最差，其值為 0.6。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以麥德姆(2014)颱風誤差最大，其誤差達 35.01%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以鳳凰(2014)颱風誤差最大，其誤差達 23.90%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.86m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 7 小時，RMSE 為 0.63m，決定係數 R^2 為 0.80，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 16.76%， $RMSE/H_{max}$ 為 12.54%。另由評估指標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅碧利斯(2006)颱風、羅莎(2007)颱風、辛樂克(2008)颱風、莫拉克(2009)颱風和天兔(2013)颱風在 Δt_p 未達標準，泰利(2005)颱風、麥德姆(2014)颱風、鳳凰(2014)颱風和蘇迪勒(2015)颱風在 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 未達標準，天兔(2013)颱風和鳳凰(2014)颱風在 $RMSE/H_{max}$ 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內，顯示 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場在臺中港有不錯的推算結果。表 6.7 為安平港推算結果的比較，由表中可發現安平港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以珍珠(2006)颱風誤差最大，其誤差達 1.14m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以潭美(2013)颱風相差最多，其誤差達 9 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為凡那比(2010)颱風，其誤差達 0.74m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以碧利斯(2006)颱風最差，其值為 0.81。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤

差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以潭美(2013)颱風誤差最大，其誤差達 24.09%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以凡那比(2010)颱風誤差最大，其誤差達 11.79%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.57m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 3 小時， $RMSE$ 為 0.48m，決定係數 R^2 為 0.89，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 11.19%， $RMSE/H_{max}$ 為 9.18%。另由評估指標的誤差標準比較可知，所有颱風的各指標皆有達到標準內，顯示 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場在安平港有不錯的推算結果。表 6.8 為高雄港推算結果的比較，由表中可發現高雄港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以南瑪都(2010)颱風誤差最大，其誤差達 1.04m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以柯羅莎(2007)颱風和如麗(2008)颱風相差最多，其誤差達 12 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為泰利(2012)颱風，其誤差達 0.79m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以芭瑪(2009)颱風最差，其值為 0.51。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以南瑪都(2011)颱風誤差最大，其誤差達 23.19%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以柯羅莎(2007)颱風誤差最大，其誤差達 14.06%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.46m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 5 小時， $RMSE$ 為 0.51m，決定係數 R^2 為 0.82，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 8.71%， $RMSE/H_{max}$ 為 10.17%。另由評估指標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅柯羅莎(2007)颱風和芭瑪(2009)颱風在 R^2 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內，顯示 MIKE 21 SW 採用 ARW 風場在高雄港有不錯的推算結果。表 6.9 為花蓮港推算結果的比較，由表中可發現花蓮港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以龍王(2005)颱風誤差最大，其誤差達 4.67m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以莫拉克(2009)颱風相差最多，其誤差達 29 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為莫拉克(2009)颱風，其誤差達 1.16m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以珊珊(2006)颱風最差，其值為 0.5。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以桑達(2011)颱風誤差最大，其誤差達 58.56%。

均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以南瑪都(2011)颱風誤差最大，其誤差達 27.74%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 1.04m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 6 小時， $RMSE$ 為 0.70m，決定係數 R^2 為 0.78，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 19.54%， $RMSE/H_{max}$ 為 14.03%。另由評估指標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅泰利(2005)颱風、鳳凰(2008)颱風、莫拉克(2009)颱風和菲特(2013)颱風在 Δt_p 未達標準，珊珊(2006)颱風和莫拉克(2009)颱風在 R^2 未達標準，納坦(2004)颱風、龍王(2005)颱風、鳳凰(2008)颱風、桑達(2011)颱風、南瑪都(2011)颱風和鳳凰(2014)颱風在 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 未達標準，桑達(2011)颱風和南瑪都(2011)颱風在 $RMSE/H_{max}$ 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內。表 6.10 為蘇澳港推算結果的比較，由表中可發現蘇澳港颱風波浪推算結果與實測結果峰值波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以鳳凰(2008)颱風誤差最大，其誤差達 2.46m。峰值波高發生時間誤差 Δt_p 以天鵝(2015)颱風相差最多，其誤差達 35 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 $RMSE$ 最大為菲特(2013)颱風，其誤差達 1.02m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以珊珊(2006)颱風最差，其值為 0.26。峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 以鳳凰(2014)颱風誤差最大，其誤差達 28.9%。均方根誤差與峰值波高的相對誤差 $RMSE/H_{max}$ 以梅花(2011)颱風誤差最大，其誤差達 24.89%。平均來說模式推算結果的各颱風峰值波高誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.86m，峰值波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 為 6 小時， $RMSE$ 為 0.73m，決定係數 R^2 為 0.78，峰值波高誤差與峰值波高的相對誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 為 14.02%， $RMSE/H_{max}$ 為 12.72%。另由評估指標的誤差標準比較可知，表中灰階部分為未達標準的項目，僅珊瑚(2005)颱風和天鵝(2015)颱風在 Δt_p 未達標準，珊珊(2006)颱風在 R^2 未達標準，鳳凰(2008)颱風和鳳凰(2014)颱風在 $\Delta H_{s,p}/H_{max}$ 未達標準，梅花(2011)颱風在 $RMSE/H_{max}$ 未達標準，其餘颱風的各指標皆有達到標準內。

表 6.4 基隆港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2006	珊珊	SHANSHAN	-0.43	1	0.48	0.78	4.67	-9.13	10.37
2007	柯羅莎	KROSA	-1.65	2	0.43	0.89	7.06	-23.34	6.08
2008	辛樂克	SINLAKU	0.23	-14	0.38	0.85	4.19	5.44	9.14
2008	薑蜜	JANGMI	0.62	-3	0.41	0.89	4.78	12.89	8.54
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.44	-3	0.31	0.93	4.51	-9.71	6.76
2010	凡那比	FANAPI	0.60	-2	0.51	0.94	3.29	18.17	15.56
2010	梅姬	MEGI	-1.15	4	0.48	0.89	4.94	-23.29	9.70
2011	桑達	SONGDA	-0.50	-7	0.44	0.90	4.29	-11.71	10.35
2011	梅花	MUIFA	-0.12	1	0.46	0.90	3.52	-3.38	13.12
2012	蘇拉	SAOLA	1.07	2	0.54	0.87	4.87	21.87	11.06
2012	杰拉華	JELAWAT	-0.83	-12	0.44	0.90	5.55	-15.00	7.85
2013	蘇力	SOULIK	0.55	-1	0.45	0.92	7.88	6.93	5.71
2013	菲特	FITOW	0.98	2	0.67	0.86	5.95	16.52	11.24
2015	蘇迪勒	SOUDELOR	0.56	-6	0.46	0.93	6.36	8.83	7.26
平均絕對值			0.69	4	0.46	0.89	5.13	13.30	9.48

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

表 6.5 臺北港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2005	馬莎	MATSA	0.32	0	0.40	0.95	5.03	6.42	7.99
2005	泰利	TALIM	-0.42	0	0.40	0.85	4.08	-10.22	9.88
2006	珊珊	SHANSHAN	-0.28	2	0.32	0.83	3.83	-7.21	8.43
2008	辛樂克	SINLAKU	0.47	-8	0.43	0.76	3.83	12.31	11.23
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.98	-4	0.41	0.87	4.19	-23.38	9.85
2010	梅姬	MEGI	0.07	2	0.40	0.61	3.65	1.99	10.89
2011	米雷	MEARI	-0.65	0	0.33	0.86	3.29	-19.80	10.14
2012	蘇拉	SAOLA	1.38	5	0.58	0.78	3.75	36.93	15.42
2012	杰拉華	JELAWAT	-0.97	-3	0.42	0.83	4.90	-19.83	8.58
2013	蘇力	SOULIK	0.11	0	0.70	0.77	6.94	1.56	10.06
2013	菲特	FITOW	1.08	-2	0.68	0.78	4.97	21.77	13.76
2014	鳳凰	FUNG-WONG	-1.39	29	0.69	0.45	4.11	-33.90	16.85
平均絕對值			0.68	5	0.48	0.78	4.38	16.28	11.09

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

表 6.6 臺中港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2005	泰利	TALIM	-1.63	-5	0.67	0.85	6.26	-26.02	10.70
2005	龍王	LONGWANG	1.31	-1	0.50	0.93	5.58	23.40	9.03
2006	珍珠	CHANCHU	0.94	8	0.59	0.71	3.86	24.46	15.40
2006	碧利斯	BILIS	-0.82	-17	0.55	0.76	4.72	-17.38	11.60
2007	聖帕	SEPAT	0.99	-3	0.52	0.72	5.43	18.28	9.50
2007	柯羅莎	KROSA	-0.11	-10	0.82	0.76	6.74	-1.60	12.19
2008	鳳凰	FUNG-WONG	-1.41	-4	0.86	0.63	6.24	-22.57	13.82
2008	辛樂克	SINLAKU	0.81	13	0.65	0.86	5.24	15.51	12.36
2009	莫拉克	MORAKOT	-1.60	26	1.12	0.60	7.78	-20.55	14.34
2010	凡那比	FANAPI	0.55	0	0.49	0.92	5.09	10.83	9.65
2010	梅姬	MEGI	-0.01	-3	0.69	0.87	4.83	-0.14	14.26
2011	桑達	SONGDA	0.21	-1	0.53	0.76	4.08	5.23	12.97
2011	南瑪都	NANMADOL	-0.33	-3	0.46	0.75	3.56	-9.32	13.04
2012	蘇拉	SAOLA	-1.31	3	0.49	0.86	5.49	-23.94	8.99
2012	杰拉華	JELAWAT	0.19	-8	0.40	0.75	3.81	5.00	10.42
2013	蘇力	SOULIK	0.21	-4	0.40	0.95	5.6	3.78	7.06
2013	天兔	USAGI	0.67	21	0.79	0.72	3.86	17.38	20.46
2014	麥德姆	MATMO	1.38	1	0.48	0.90	3.94	35.01	12.20
2014	鳳凰	FUNG-WONG	-1.15	3	0.98	0.73	4.12	-28.00	23.90
2015	蘇迪勒	SOUDELOR	1.64	1	0.54	0.92	6.16	26.70	8.84
平均絕對值			0.86	7	0.63	0.80	5.12	16.76	12.54

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $\text{RMSE}/H_{max} < 20\%$)

表 6.7 安平港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2005	珊瑚	SANVU	-0.59	-6	0.36	0.91	4.72	-12.45	7.54
2005	泰利	TALIM	-0.41	-1	0.44	0.95	4.05	-10.03	10.86
2006	珍珠	CHANCHU	-1.14	1	0.68	0.85	5.80	-19.67	11.70
2006	碧利斯	BILIS	-0.25	1	0.49	0.81	4.69	-5.39	10.48
2007	帕布	PABUK	-0.59	2	0.41	0.93	4.78	-12.35	8.51
2007	聖帕	SEPAT	-0.09	-1	0.33	0.89	4.84	-1.82	6.86
2008	如麗	NURI	-0.23	2	0.43	0.95	4.96	-4.71	8.61
2008	哈格比	HAGUPIT	-0.65	1	0.34	0.92	3.28	-19.75	10.27
2009	蓮花	LINFA	-0.84	4	0.60	0.91	7.20	-11.73	8.38
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.82	4	0.46	0.93	7.66	-10.71	6.02
2010	凡那比	FANAPI	-0.39	-7	0.74	0.83	6.26	-6.22	11.79
2010	梅姬	MEGI	-0.24	5	0.60	0.86	5.98	-3.94	9.95
2013	潭美	TRAMI	-1.01	-9	0.46	0.82	4.21	-24.09	10.98
2013	天兔	USAGI	-0.76	2	0.36	0.93	5.50	-13.81	6.53
平均絕對值			0.57	3	0.48	0.89	5.28	11.19	9.18

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

表 6.8 高雄港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2005	海棠	HAITANG	-0.68	4	0.62	0.89	6.46	-10.59	9.66
2005	泰利	TALIM	-0.62	-1	0.36	0.95	4.94	-12.56	7.25
2007	柯羅莎	KROSA	-0.16	-12	0.59	0.55	4.18	-3.91	14.06
2008	鳳凰	FUNG-WONG	-0.60	-1	0.50	0.87	5.27	-11.36	9.57
2008	如麗	NURI	-0.93	-12	0.58	0.90	6.12	-15.15	9.44
2009	蓮花	LINFA	-0.43	4	0.60	0.89	6.41	-6.72	9.43
2009	芭瑪	PARMA	-0.46	6	0.41	0.51	3.08	-14.99	13.25
2010	凡那比	FANAPI	-0.16	-5	0.49	0.92	5.52	-2.89	8.85
2010	梅姬	MEGI	-0.98	8	0.58	0.88	6.80	-14.35	8.48
2011	南瑪都	NANMADOL	1.04	1	0.53	0.75	4.50	23.19	11.80
2012	泰利	TALIM	-0.17	5	0.79	0.78	5.92	-2.79	13.28
2012	蘇拉	SAOLA	-0.01	5	0.34	0.78	3.02	-0.44	11.24
2013	潭美	TRAMI	0.01	-7	0.46	0.84	3.72	0.21	12.26
2013	天兔	USAGI	-0.51	-2	0.39	0.92	5.80	-8.71	6.66
2015	蘇迪勒	SOUDELOR	0.17	3	0.46	0.93	6.27	2.79	7.34
平均絕對值			0.46	5	0.51	0.82	5.20	8.71	10.17

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

表 6.9 花蓮港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	0.17	9	0.57	0.79	3.71	4.48	15.48
2003	尹布都	IMBUDO	0.53	0	0.56	0.92	3.71	14.28	15.01
2003	米勒	MELOR	-0.01	-4	0.37	0.79	3.24	-0.31	11.39
2004	敏督利	MINDULLE	0.99	-2	0.88	0.78	5.50	18.02	15.92
2004	納坦	NOCK-TEN	1.39	3	0.70	0.86	5.33	26.00	13.10
2005	泰利	TALIM	-1.52	14	1.03	0.68	7.53	-20.22	13.66
2005	龍王	LONGWANG	-4.67	0	0.84	0.82	10.85	-43.07	7.77
2006	珊珊	SHANSHAN	-0.98	-8	0.73	0.50	4.24	-23.03	17.19
2007	柯羅莎	KROSA	-0.89	-4	0.58	0.84	6.49	-13.78	8.94
2008	鳳凰	FUNG-WONG	-1.99	20	0.92	0.71	7.32	-27.22	12.53
2008	薔蜜	JANGMI	1.24	-1	0.65	0.92	6.00	20.59	10.80
2009	莫拉菲	MOLAVE	-0.50	12	0.60	0.63	4.12	-12.22	14.66
2009	莫拉克	MORAKOT	0.64	29	1.16	0.53	6.53	9.87	17.72
2010	凡那比	FANAPI	-0.10	1	0.69	0.79	6.35	-1.56	10.81
2010	梅姬	MEGI	-0.79	-1	0.36	0.77	3.94	-20.08	9.19
2011	桑達	SONGDA	1.82	2	0.81	0.65	3.11	58.56	26.14
2011	南瑪都	NANMADOL	1.62	-10	0.96	0.80	3.46	46.68	27.74
2012	蘇拉	SAOLA	-0.20	5	0.35	0.90	4.65	-4.36	7.51
2012	天秤	TEMBIN	0.43	-1	0.61	0.76	4.18	10.32	14.68
2013	天兔	USAGI	0.77	-9	0.73	0.89	5.50	13.97	13.35
2013	菲特	FITOW	-0.27	-16	0.57	0.64	3.88	-6.98	14.68
2014	麥德姆	MATMO	1.17	1	0.81	0.94	7.07	16.58	11.39
2014	鳳凰	FUNG-WONG	2.22	0	0.80	0.91	4.05	54.76	19.86
2015	蘇迪勒	SOUDELOR	-0.16	3	0.62	0.92	8.57	-1.89	7.18
平均絕對值			1.04	6	0.70	0.78	5.39	19.54	14.03

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

表 6.10 蘇澳港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{s,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2004	敏督利	MINDULLE	0.29	-4	0.89	0.67	6.87	4.16	12.93
2004	南瑪都	NANMADOL	0.01	5	0.51	0.84	5.07	0.16	10.06
2005	馬莎	MATSA	-0.46	-5	0.46	0.80	4.27	-10.86	10.73
2005	珊瑚	SANVU	-0.24	15	0.62	0.79	5.45	-4.49	11.45
2006	碧利斯	BILIS	0.33	0	0.60	0.85	5.7	5.78	10.55
2006	珊珊	SHANSHAN	-1.00	3	0.96	0.26	5.37	-18.57	17.82
2007	韋帕	WIPHA	0.39	6	0.58	0.64	3.59	10.75	16.21
2008	鳳凰	FUNG-WONG	-2.46	10	0.82	0.88	8.9	-27.59	9.26
2008	辛樂克	SINLAKU	-1.56	1	0.76	0.85	7.68	-20.26	9.86
2009	莫拉菲	MOLAVE	-1.20	8	0.59	0.76	5.14	-23.28	11.48
2009	莫拉克	MORAKOT	0.49	8	0.97	0.77	7.15	6.80	13.61
2011	梅花	MUIFA	0.85	0	1.00	0.70	4.02	21.12	24.89
2011	南瑪都	NANMADOL	0.93	6	0.87	0.80	4.46	20.80	19.58
2012	蘇拉	SAOLA	1.20	-6	0.64	0.93	6.26	19.17	10.25
2012	杰拉華	JELAWAT	-1.26	6	0.89	0.73	6.62	-18.96	13.40
2013	蘇力	SOULIK	-0.90	5	0.88	0.83	9.83	-9.17	8.92
2013	菲特	FITOW	-0.43	0	1.02	0.68	5.94	-7.20	17.25
2014	麥德姆	MATMO	-1.00	3	0.42	0.95	8.26	-12.05	5.05
2014	鳳凰	FUNG-WONG	1.62	0	0.64	0.89	5.61	28.90	11.49
2015	天鵝	GONI	-0.58	35	0.54	0.91	5.62	-10.30	9.66
平均絕對值			0.86	6	0.73	0.78	6.09	14.02	12.72

註：誤差標準($R^2 > 0.6$ 、 $\Delta t_p < 12\text{hr}$ 、 $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、 $RMSE/H_{max} < 20\%$)

第七章 臺中港設計波探討

設計波高需由波浪資料中選定具代表性的極值樣本來進行推算，一般波浪資料的來源有兩種，包括現場的量測數據或波浪推算結果。極值統計所採用的資料，基本上須滿足獨立性、等質性及分布性等 3 項要求。所謂獨立性係指 2 個事件的發生是不相關的。等質性為事件出現在空間或者時間上的統計特性是相當的。分布性是指資料數據大小滿足某種分布型態。本計畫持續發展各種波浪推算模式，然而前 3 年度的工作成果顯示 M5 最小化模式樹與類神經模式在精度上與多方向波浪推估的能力不如 2 維數值風浪模式，其快速推算的能力較適合應用於即時颱風波浪的推算與預報。故本年度採用的極值樣本來源為 DHI MIKE 21 2 維風浪數值模式的推算結果。在取樣方式上選用年極端值取樣法的年最大法，而極值分析中的極值分布函數、極值分布參數推定法、信賴檢定法與推估值標準差則分述如下。**7.1 取樣方式**

極值分析是以有限的觀測資料來推求較大重現期所可能會遭遇到的極值情況，依資料選取方式，主要可分為超量門檻選用法與極端值選用法 2 種，然而超量門檻值選用法之門檻值設定有多種設定方式，目前尚無明確的學理根據可說明何者為最適設定，在目前採用數值模式推算可推算完整極值樣本的情況下，國內皆採用極端值選用法來進行取樣，此法可在某時間尺度下均勻選取範圍內的極值代表值，故在本計畫中選用年最大法來進行各港極值樣本取樣。

7.2 極值分布函數

根據 CEM (coastal engineering manual, 2002)及往昔文獻建議長期波浪極值之適合機率分布函數為

1.極值 I 型分布(FT- I 型分布，又稱 Gumbel 分布)

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, -\infty < x < \infty \quad (7-1a)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A}} e^{-\frac{x-B}{A}} \quad (7-1b)$$

2. 極值 II 型分布 (FT-II 型分布)

$$F(x) = e^{-\left(1 + k \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}}, \quad B - kA \leq x < \infty \quad (7-2a)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}} \quad (7-2b)$$

3. Weibull 分佈

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, \quad B \leq x < \infty \quad (7-3a)$$

$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (7-3b)$$

4. 對數常態分佈 (lognormal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - B}{\sqrt{2}A}\right)\right) \quad 0 < x < \infty \quad (7-4a)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} e^{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}} \quad (7-4b)$$

其中 $\operatorname{erf}(x)$ 為誤差函數 (error function)，其定義

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (7-4c)$$

式 (7-1) 至式 (7-4) 中， x 為樣本變數， $f(x)$ 為機率密度函數 (probability density function)， $F(x)$ 為累積機率函數 (cumulative probability function)， A 及 B 為描述機率密度函數形狀之參數， B 稱為位置參數 (location parameter) 與樣本平均值 (mean) 有關，而 A 值稱為尺度參數 (scale parameter) 與樣本標準差 (standard deviation) 有關， k 為形狀常數，決定機率函數之尖扁形狀。其中 Weibull 分布中 k 常數在

不同值下會有不同的機率密度表現，如圖 0.1 所示。圖中顯示 $k=0.75$ 與 $k=1.0$ 的兩種情況下，機率密度的在橫軸座標較小的一側將不會遞減至零，而 $k=1.4$ 及 $k=2.0$ 的機率密度圖則在橫軸座標較小的一側會遞減至零。至於如何選用 k 值通常需視資料特性而定，目的是為了能夠更完美的擬合較大波浪部分的資料分布特性。

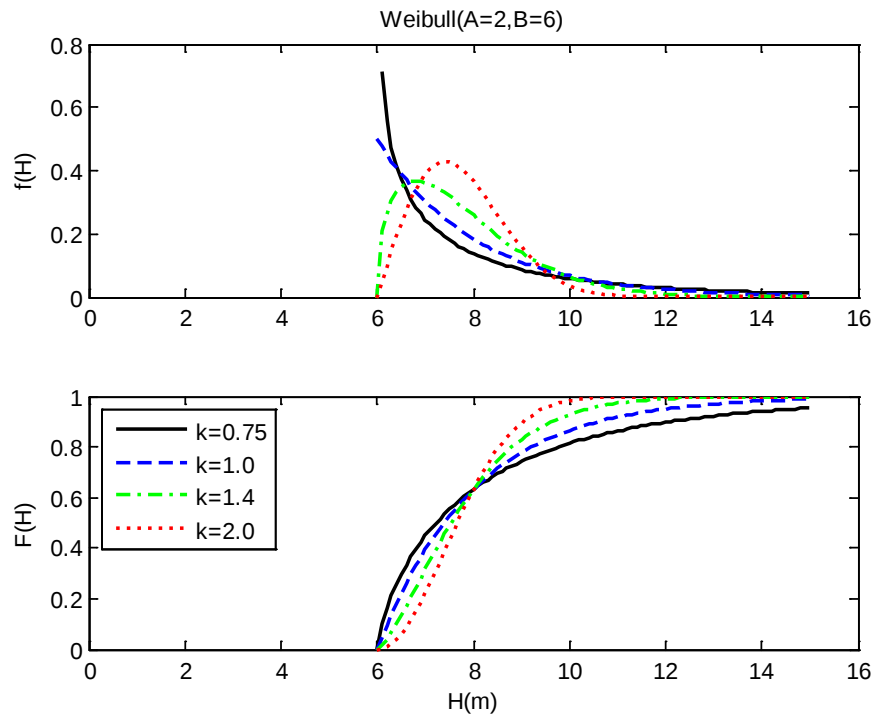


圖 7.1 常數 k 在不同情況下的機率密度表現

7.3 極值分布參數推定法

當資料選取方法及極值分布函數決定後，極值分布中參數如何推定，有不同的方法。一般極值分布參數推定法，有力矩法 (method of moment, MOM)，最小 2 乘法 (least squared method, LSM)，最大概似法 (Maximum likelihood estimates, MLE)，加權機率力矩法 (probability weighted moment, PWM) 等。其中，MOM 法為最簡單之參數推定法，此乃利用位置參數與尺度參數分別與平均值與變異數之公式直接計算獲得，LSM 及 MLE 為最常用之推定法。由 98 年度至 101 年度 4 年的研究計畫中已針對花蓮、高雄、安平、臺北、臺中及基隆港 6 大商港

進行波浪極值分析，並比較 3 種參數推定法，顯示 LSM 對於臺灣各主要港口的極值樣本較為適用，故本計畫選用 LSM 法來進行參數推定。

LSM 法需要先決定樣本之排序機率。當資料收集後，首先適當的劃位 (plotting position) 得到無偏態的排序資料之機率。Goda (2000) 提出不同極值分布之劃位，當選取 N 個資料，首先將 N 個資料依大小順序排列，再計算第 m 順位之值的累積機率 F_m ，其計算公式如下

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (7-7)$$

α 及 β 值在不同分布函數其值不同如下所示(Goda, 2000)。

表 7.1 計算樣本順位機率之 α 及 β 值

分佈函數	α 值	β 值
Gumbel	0.44	0.12
GEV	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$
Weibull	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$
Lognormal	0.375	0.25

7.4 信賴檢定

7.4.1 MIR 值檢定

一般使用卡方檢定及相關係數檢定，檢定所選極值分布函數是否適用。Goda (2000) 提出以 $MIR = (1 - r) / \Delta \bar{r}$ 相對相關係數殘差來檢定極值分布函數的合適性。其中 r 為樣本及排序機率下之推算值之相關係數， $\Delta \bar{r}$ 為平均相關係數殘差。MIR 值愈小，代表樣本較適合此極值分布。

各極值分布函數之排序機率下之推算值 x_m 如下公式

$$x_m = ay_m + b \quad (7-8)$$

式中之 A, B 分別為推估出之參數， y_m 為各極值分布函數在機率 F_m 下之相關值，如下

$$\text{Gumbel : } y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (7-9a)$$

$$\text{GEV : } y_m = \frac{1}{k}[(-\ln F_m)^{-k} - 1] \quad (7-9b)$$

$$\text{Weibull : } y_m = [-\ln(1 - F_m)]^{1/k} \quad (7-9c)$$

$$\text{Lognormal : } y_m = \text{inverf}(F_m) \quad (7-9d)$$

而 $\Delta \bar{r}$ 之計算依各極值分布函數 Goda (2000)建議為

$$\Delta \bar{r} = e^{\bar{a} + \bar{b} \ln N + \bar{c} (\ln N)^2} \quad (7-10)$$

式(4-10)中 N 為樣本個數係數， $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值依不同分佈分別示如表 0.2。

表 7.2 相關係數殘差平均值公式之係數 $\bar{a}$ ， $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值

分佈函數	係數 $\bar{a}$	係數 $\bar{b}$	係數 $\bar{c}$
Gumbel	-2.310	-0.3122	-0.044
GEV (k=2.5)	-2.455	-0.1582	0
(k=4.33)	-2.471	-0.1970	-0.007
(k=5.0)	-2.463	-0.2241	-0.019
(k=10.0)	-2.409	-0.2580	-0.033
Weibull (k=0.75)	-2.603	-0.1009	-0.047
(k=1.0)	-2.355	-0.2612	-0.043
(k=1.4)	-2.221	-0.3668	-0.044
(k=2.0)	-2.047	-0.4767	-0.041
Lognormal	-2.094	-0.4343	-0.045

7.4.2 RMSE 檢定

因 MIR 值係與相關係數有關表示與推估各排序機率下之整體波高與樣本間之相關性程度，若計算出各排序機率下之波高與樣本之誤差有相似誤差，其 MIR 值就小，為整體評估各排序機率下之波高與樣本間之誤差，另外可以 RMSE 來當檢定標準。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2} \quad (7-11)$$

其中 x_m 為推估各排序機率下之波高。

7.4.3 ER 檢定

極值分析主要是推估各重現期之極值，當樣本數量多時，樣本最大值代表具有欲計算重現期之物理量，因此本研究仿往昔學者比較樣本最大值之推估值與實測值之差異。ER 定義如下

$$ER = |x_{MAX} - (x_{MAX})_m| \quad (7-12)$$

7.5 推估值之標準差

利用極值分析所推算出的各種限期之物理值，因為收集到的數據不可能完全符合選擇之分布函數，故所推算之結果必含有不確定性，亦即推算結果僅是機率上之平均值，其偏差量大小應要予以估算。

Gumbel 分佈之估算值之標準差量為

$$\sigma(x_R) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1 + 0.885(y_R - \gamma) + 0.6687(y_R - \gamma)^2 \right]^{1/2} \sigma_x \quad (7-13)$$

式(7-13)中 σ_x 為樣本 x 之標準差， y_R 為重現期之基準化變量，即式(7-10)， x_R 為重現期之推算值。其他分佈並無簡易公式推定，合田和小舟(1989)提出以補助統計量的標準差 σ_z 乘以樣本 x 之標準差 σ_x ，當做推算偏差量

$$\sigma(x_R) = \sigma_x \cdot \sigma_z \quad (7-14)$$

Gumbel、GEV 及 Weibull 分佈之標準差 σ_z 為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1.0 + \hat{A}(y_R - c)^2 \right]^{1/2} \quad (7-15)$$

而 $\hat{A}$ 值在 Gumbel 及 Weibull 分佈為：

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 N^{-1.3}} \quad (7-16a)$$

但 GEV 及 FT-II 之 $\hat{A}$ 值可表為

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 \left[\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) \right]^2 - \kappa \left[\ln \left(\frac{1}{v_0} \right) \right]^2} \quad (7-16b)$$

式(7-15)至式(7-16)中之係數如所示

至於對數常態函數之 σ_z 則為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1.2 + 0.65(y_R - 0.2)^{2.0} \right]^{1/2} \quad (4-17)$$

表 7.3 重現期推算量之標準差公式中之係數

分佈函數	a_1	a_2	κ	c	N_0	v_0
Gumbel	0.64	9.0	0.93	0		
GEV ($1/k = 2.5$)	1.27	0.12	0.24	0.3	23	1.34
($1/k = 4.33$)	1.23	0.09	0.36	0.2	25	0.66
($1/k = 5.0$)	1.34	0.07	0.41	0.1	35	0.45
($1/k = 10.0$)	1.48	0.06	0.47	0.0	60	0.34
Weibull ($k = 0.75$)	1.65	11.4	-0.63	0.0		
($k = 1.0$)	1.92	11.4	0.00	0.3		
($k = 1.4$)	2.05	11.4	0.69	0.4		
($k = 2.0$)	2.24	11.4	1.34	0.5		

7.6 極值分析結果

本節利用 6.2 節所述 ARW_NFS2km 與 ARW_CFSR2km 追算出 2km 空間解析度的風場資料，以 DHI MIKE 12 2 維風浪推算模式推算出 1990 年至 2015 年共 26 年的所有颱風波浪共 113 場。以年極值取樣法 (Annual Max, AM) 進行取樣，再依長期波浪趨勢分析的結果扣除各年氣候變遷影響量可獲得 26 筆極值樣本。配合 FT-I、FT-II、Weilbull 與 Log-Noraml 4 種極值分布函數以 LSM 參數推定法進行計算各重現期的極值波高與標準差，最後再以 MIR、RMSE 與 ER 3 種信賴檢定法來決定最適分布函數。計算 10 年、25 年、50 年、100 年與 200 年等不同重現期的結果如表 7.4 所示。

表 7.4 臺中港各重現期分析結果

Index	T (yr)	二維數值模式樣本			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(m)		1.58	2.27	1.10	0.96
RMSE(m)		0.30	0.40	0.22	0.23
ER (m)		0.83	1.08	0.52	0.77
$x_R(m)$	10	7.19	7.09	7.25	7.34
	25	8.06	8.06	7.95	8.14
	50	8.70	8.84	<u>8.42</u>	8.71
	100	9.33	9.68	8.84	9.25
	200	9.97	10.56	9.24	9.77
σ (m)	10	0.49	0.60	0.44	0.32
	25	0.66	0.86	0.53	0.38
	50	0.79	1.07	<u>0.59</u>	0.42
	100	0.92	1.30	0.65	0.46
	200	1.05	1.55	0.70	0.50

表 7.4 中灰階底色部分顯示在四種極值樣本的極值分析中 MIR、RMSE 及 ER 信賴檢定法最好的結果，此三種檢定方式的結果越低顯示此極值函數較為合適，表中顯示臺中港數值推算的極值樣本經三種檢定的結果一致是以 Weibull 分布為最適分布。表中 x_R 為各重現期的極值波高； σ 則為各重現期極值波高的標準差，以一般工程常用的 50 年重現期來看，臺中港極值分析結果極值波高為表中標示底線部分的 8.42m，而標準差為 0.59m。各種機率密度函數與機率函數圖示如圖 7.2。圖中顯示各極值分布與樣本資料間的回歸近似情況。

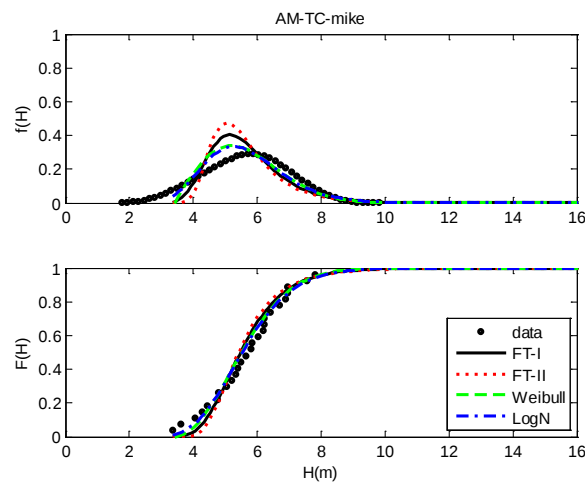


圖 7.2 臺中港數值模擬樣本之機率密度函數及機率函數圖

7.7 各港設計波高推估結果

利用本計畫 2.3 節 Seasonal Kendall 趨勢檢定法所分析波浪長期變遷趨勢結果，估算在氣候變遷的影響下各重現期的波高變化量，即可推求考慮長期變遷的設計波標準。綜合本計畫 4 年度的 7 大主要港口之設計波推算結果如下，7 個主要港口極值分析檢定所得的最適分布皆為 Weibull 分布。

表 7.5 花蓮港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	8.6	0.59	7.56~9.50
25	9.52	0.71	8.18~10.52
50	10.13	0.79	8.48~11.10
100	10.69	0.87	8.57~11.45
200	11.21	0.95	8.29~11.41

表 7.6 蘇澳港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	8.72	0.54	7.95~9.75
25	9.56	0.66	8.81~10.98
50	10.12	0.73	9.58~12.00
100	10.64	0.8	10.64~13.30
200	11.11	0.87	12.34~15.21

表 7.7 臺北港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	5.94	0.54	5.28~7.08
25	6.8	0.66	6.31~8.48
50	7.37	0.73	7.35~9.76
100	7.9	0.8	8.93~11.59
200	11.21	0.95	8.29~11.41

表 7.8 基隆港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	7.73	0.7	6.58~8.89
25	8.86	0.84	7.47~10.25
50	9.6	0.94	8.05~11.16
100	10.28	1.03	8.58~11.99
200	10.92	1.12	9.07~12.76

表 7.9 安平港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	5.81	0.41	5.25~6.59
25	6.45	0.49	5.92~7.53
50	6.87	0.55	6.52~8.32
100	7.26	0.6	7.36~9.34
200	7.62	0.65	8.73~10.87

表 7.10 高雄港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	6.33	0.41	5.76~7.10
25	6.94	0.49	6.39~8.00
50	7.35	0.55	6.95~8.76
100	7.72	0.6	7.74~9.73
200	8.07	0.65	9.01~11.16

表 7.11 臺中港各重現期建議設計波高範圍

重現期 (年)	極值波高 (m)	標準偏差 (m)	建議設計波高範圍 (m)
10	7.25	0.44	6.52~7.98
25	7.95	0.53	7.08~8.83
50	8.42	0.59	7.44~9.39
100	8.84	0.65	7.77~9.91
200	9.24	0.7	8.07~10.40

第八章 設計波高資訊展示互動介面

為整合本計畫各主要港口設計波推算成果，本計畫為各年度設計波推算結果建立資訊展示平台。初步規劃 2 種介面環境來做展示，1 種為安裝於一般個人電腦或工作站的使用者操作介面(GUI 應用程式)，另 1 種選擇則是網頁式互動介面。GUI 應用程式優點為可以單機操作不需要網路環境，但缺點是應用程式資訊更新不易，且需要安裝軟體與相關套件。網頁介面優點為適用於多種環境，包括任何有聯網功能電腦或行動設備等多種系統，更新資訊時僅須從伺服器端著手進行，缺點部分是需要架設與維護伺服器，用戶端則須有網路環境。考量上述優缺點，討論後決議採用網頁介面來進行建立。

因應未來網頁介面需要整合於港研中心現有的網頁環境，初步規劃以 javascript 處理兩層隱藏式的內嵌框架來進行多層次展示，避免用戶瀏覽器需要多開視窗跳離現有網頁，在多層框架中以收合方式關閉現有資訊頁，也方便於多層框架中來回瀏覽，初步規劃圖如圖 8.1。此外考量用戶端有不同的系統環境，應用響應式網頁設計(Responsive Web Design)來自動控制網頁的大小，可自動判別用戶端使用的最佳瀏覽解析度與大小並自動調整為最適展示比例，若於行動裝置上進行瀏覽亦可以滑動方式瀏覽較多資訊的頁面。

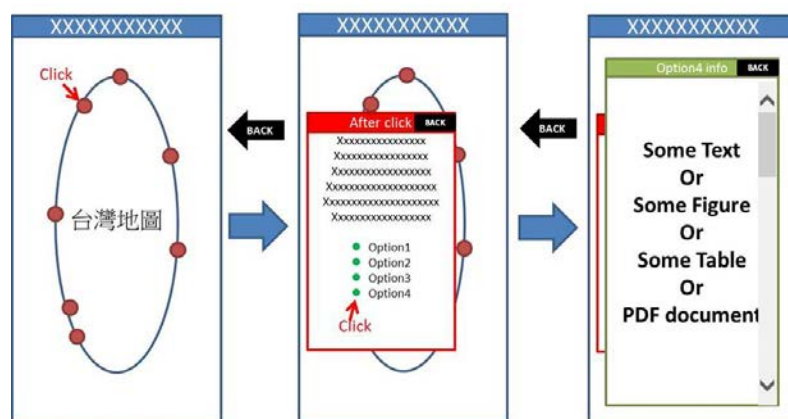


圖 8.1 設計波資訊互動展示網頁介面的初步規劃圖

本介面展示內容為本計畫中 7 大主要港口包括花蓮港、蘇澳港、臺北港、基隆港、安平港、高雄港與臺中港。故主頁部分即以臺灣全島地圖提供用戶直接點選 7 大主要港口來顯示詳細資訊，內容有推算點資訊、極值樣本資訊及設計波資訊，主頁與第一層詳細資訊如圖 8.2。



圖 8.2 設計波資訊互動展示網頁(主頁與第一層框架)

推算點資訊中包括推算點的位置圖及其座標，如圖 8.3。而樣本資訊中詳細介紹該主要港口的極值樣本推算方式及該樣本與實測資料的精度驗證，如圖 8.4。設計波資訊中則展示該港設計波推定的結果，包括各重現期的設計波高、前 6 優勢方向的 50 年重現期設計波高、相對應的最適函數、建議設計波高範圍及前 3 大優勢方向的港區示意圖，如圖 8.5。整體網頁介面地圖示如圖 8.6。

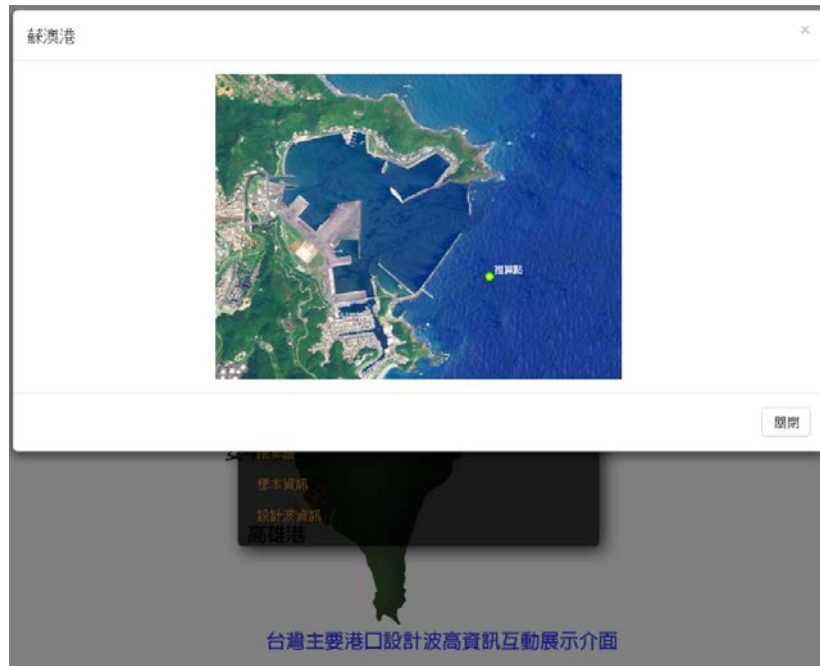


圖 8.3 第二層資訊框架-推算點資訊

花蓮港

本港設計波擬定所採用的颱風波浪樣本來源自1990年至2015年共26年，期間總共模擬113場颱風資料。

本資訊介面極值分析的颱風波浪樣本為丹麥水力研究所(DHI: Danish Hydraulic Institute)研發完成之MIKE 21 SW所模擬。其地形資料於近岸區利用海軍海洋測量局發行之海圖地形，而遠岸區則採用National Geophysical Data Center發布之全球高程資料ETOPO2v2 (2006)。風場資料來源為港研中心『臺北港區風場數值預報系統之建置研究』計畫中的ARW_NFS2km與『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』計畫中的ARW_CFSR2km模式之推算結果。

上述推算流程包括風場推算與風浪模擬，在『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』四年期的計畫中不斷改善與精進，以確保能有最高精度的極值樣本，以供推算精準的設計波高。以下為本港風浪模擬的精度分析。

花蓮港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{z,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)	$\frac{\Delta H_{z,p}}{H_{max}}(\%)$	$\frac{RMSE}{H_{max}}(\%)$
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	0.17	9	0.57	0.79	3.71	4.48	15.48
2003	伊布都	IMBUDO	0.53	0	0.56	0.92	3.71	14.28	15.01
2003	泰利	MELOR	-0.01	-4	0.37	0.79	3.24	-0.31	11.39
2004	敏督利	MINDULLE	0.99	-2	0.88	0.78	5.50	18.02	15.92
2004	納坦	NOCK-TEN	1.39	3	0.70	0.86	5.33	26.00	13.10
2005	泰利	TALIM	-1.52	14	1.03	0.68	7.53	-20.22	13.66

台灣主要港口設計波高資訊互動展示介面

圖 8.4 第二層資訊框架-樣本資訊

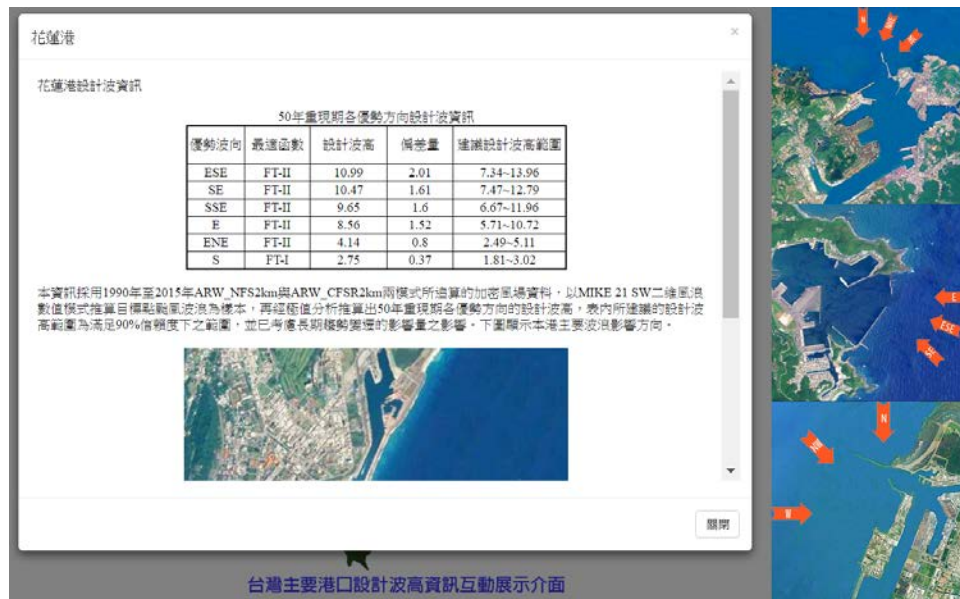


圖 8.5 第二層資訊框架-設計波資訊

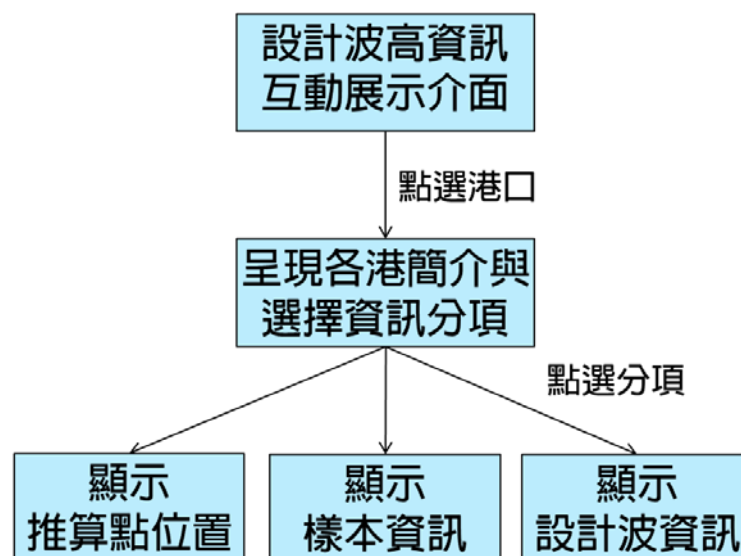


圖 8.6 介面地圖

上述功能與資訊頁面皆已建立完成，未來透過專家座談會討論與提供相關建議進行修正後，港研中心可以此介面展示各主要港口的設計波高資訊，提供規劃設計及營運單位做參考。

第九章 沉箱安全評估探討

本計畫蒐集花蓮港原有之設計條件及歷年觀測之波浪資料，加以整理分析與比對，同時，亦將針對原有花蓮港設計條件之合理性進行沉箱安全評估探討分析、結構物堤址波浪外力評估檢討。

一、結構物堤址波浪外力評估

本計畫首先將蒐集花蓮港原有之設計條件及歷年觀測之波浪資料，加以整理分析與比對，同時，亦將針對原有花蓮港設計條件之合理性進行檢討。

(一)基本條件資料蒐集及分析

1. 颱風

颱風為威脅台灣地區最嚴重之自然災害，歷年來因颱風損失之生命及財產實不可勝數，尤其當颱風直接襲擊時，不僅影響海上船隻作業安全，更對海岸結構物造成極大之衝擊。茲根據中央氣象局發佈於1897～2015年之颱風資料進行統計分析，相關分析成果則說明如下。

(1) 颱風侵台之頻率

一般颱風多見於夏、秋兩季，冬、春期間則較少發生。依據中央氣象局氣象研究科技中心彙整統計1897～2015年計119年間侵襲台灣及其附近海域之颱風，各月侵台颱風總次數及頻率如表4.2-1所示。由表可知，侵台颱風最早出現於4月，最晚為12月。侵台颱風總數為415次，其中以8月份佔127次為最高，約佔總數之30.6%；7月份居次，共計98次，約佔總數之23.6%；每年1月至3月間尚無颱風侵台之記錄。惟2004年12月首次發生颱風於冬季侵台之記錄(南瑪都颱風，2004.12.03～2004.12.04)。

表 9.1 侵臺颱風次數統計表(1897 年～2015 年)

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合計
次數	-	-	-	2	15	30	98	127	96	37	9	1	415
百分比	0.0	0.0	0.0	0.5	3.6	7.2	23.6	30.6	23.1	8.9	2.2	0.2	100.0
年平均次數	-	-	-	0.02	0.13	0.25	0.82	1.07	0.81	0.31	0.08	0.01	3.49

資料來源：中央氣象局

(2) 侵台颱風路徑

侵台颱風路徑大致可劃分為 10 類，依據中央氣象局過去 119 年 (1897～2015 年)間之侵台颱風，詳如圖所示。

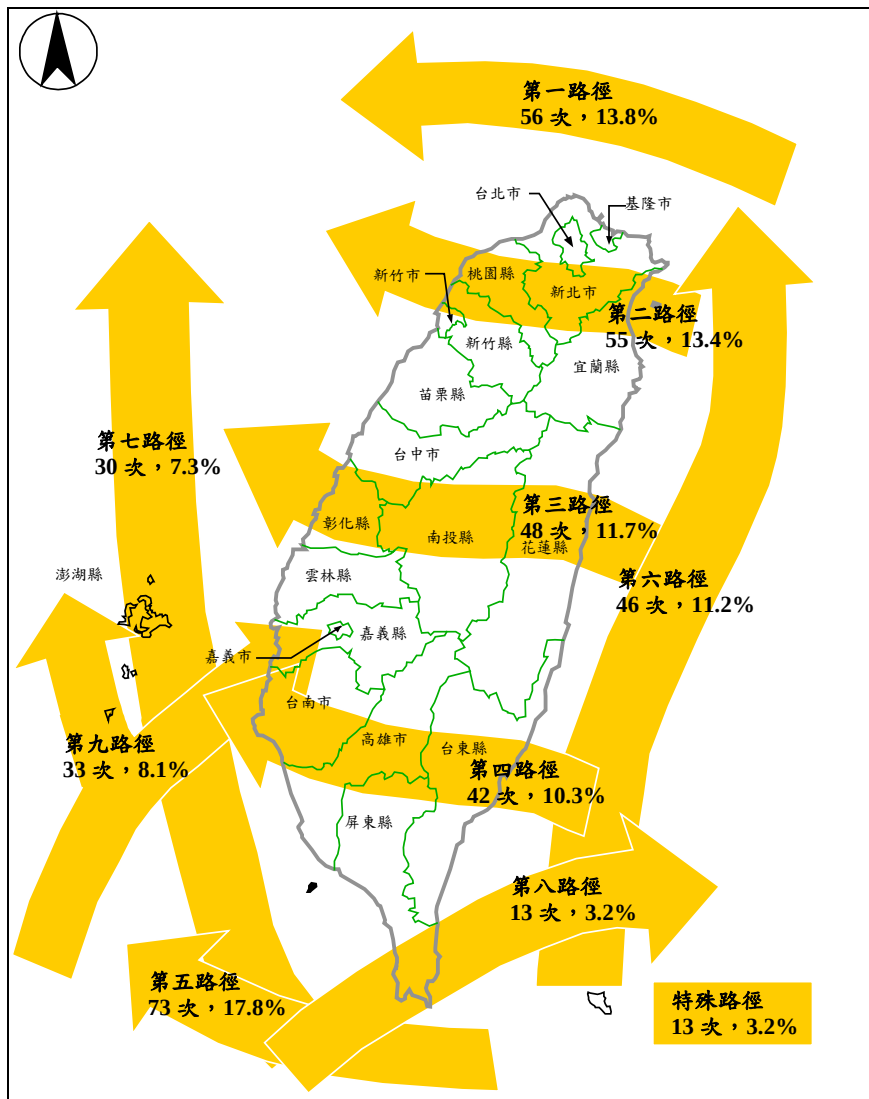


圖 9.1 侵襲臺灣之颱風路徑統計圖(1897～2015)

註：

1. 2008 年前颱風路徑資料，採中央氣象局圖書館歷年颱風調查報告，1897 年～2008 年侵台颱風綱要表之 9 類路徑分類(<http://photino.cwb.gov.tw/rdcweb/lib/clm/tyname.htm>) 2009 年後採用中央氣象局 TDB 防災颱風資料庫(<http://rdc28.cwb.gov.tw/data.php>)
2. 颱風編號-191610、191710、194700、197426、199603 無颱風路徑資料故不列入統計分類，本次統計侵台颱風總數為 409 次。

(3) 影響計畫區附近之颱風

本計畫區位於臺灣東海岸，受第 2、3、6 路徑之颱風影響，依上述之統計結果，侵台颱風約有 36.3%將可能影響本區海域，即平均每年約有 1.25 個颱風將影響附近海域。

2. 波浪

(1) 季風波浪

為期瞭解花蓮沿海地區之長年波浪狀況，本計畫報告中，港研中心於 1990～2001 年在花蓮測候站所觀測之波浪資料加以敘述、分析全年及 4 季之波高週期機率分佈表詳表至表所示。由全年波浪統計結果顯示，波高小於 3.0m 之波浪約為 96.3%，其中 78.8%波高集中於 0.5～2.0m 之間。週期分析結果，33.9%集中於 7～8 秒為最多，92.5%主要集中於 4～9 秒，96.3%週期小於 10 秒。由各季波高之超值累積曲線圖(詳圖)，可顯示出冬季波高最大，夏季最小；另由各季週期分佈圖(詳圖)得知，春季週期較長，冬季較短。

表 9.2 花蓮地區全年波高週期機率分佈表

H(m)\T(s)	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~50	合計 (%)	累計 機率
0~0.5	-	-	0.1	0.8	1.4	1.1	0.4	0.1	-	-	-	-	-	-	3.9	3.9
0.5~1	-	-	1.1	5.6	11.2	7.4	1.9	0.7	0.2	0.1	-	-	-	-	28.3	32.1
1~1.5	-	-	0.5	3.8	10.7	10.6	3.0	0.7	0.2	0.1	-	-	-	-	29.7	61.9
1.5~2	-	-	0.2	1.5	6.1	9.0	3.0	0.6	0.2	0.1	-	-	-	-	20.8	82.6
2~3	-	-	-	0.4	2.7	5.3	3.2	1.0	0.5	0.2	0.1	-	-	-	13.7	96.3
3~4	-	-	-	-	0.1	0.5	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	-	-	-	2.2	98.6
4~5	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	0.7	99.3
5~6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	0.4	99.7
6~7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	-	-	0.2	99.9

7~8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	100.0
8~9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
9~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
10~11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
11~12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
12~13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
13~14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
14~15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
15~50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
合計(%)	-	-	1.9	12.1	32.2	33.9	12.4	3.8	1.7	0.8	0.6	0.4	0.1	-	100.0	

資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」(2003)

表 9.3 花蓮地區春季波高週期機率分佈表

H(m)\T(s)	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~50	合計 (%)	累計 機率
0~0.5	-	-	0.2	0.4	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8	0.8
0.5~1	-	-	1.7	6.8	11.7	8.8	1.9	0.2	-	-	-	-	-	-	31.1	31.9
1~1.5	-	-	0.7	5.4	12.4	12.2	2.8	0.5	0.2	-	-	-	-	-	34.2	66.1
1.5~2	-	-	0.3	2.5	6.2	8.6	2.5	0.4	0.2	0.1	-	-	-	-	20.7	86.8
2~3	-	-	-	0.7	3.8	4.4	1.2	0.6	0.5	0.3	0.3	-	0.1	-	12.0	98.8
3~4	-	-	-	-	0.2	0.5	0.4	0.1	-	-	-	-	-	-	1.2	100.0
4~5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
5~6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
6~7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
7~8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
8~9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
9~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
10~11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
11~12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
12~13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
13~14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
14~15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
15~50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
合計(%)	-	-	2.9	15.8	34.4	34.6	8.8	1.7	1.0	0.4	0.3	-	0.1	-	100.0	

資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」(2003)

表 9.4 花蓮地區夏季波高週期機率分佈表

H(m)\T(s)	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~50	合計 (%)	累計 機率
0~0.5	-	-	0.5	3.0	5.6	3.2	1.2	0.1	-	-	-	-	-	-	13.6	13.6
0.5~1	-	-	1.8	12.3	19.1	11.5	4.3	2.9	1.0	0.2	0.1	-	-	-	53.1	66.7
1~1.5	-	-	0.8	3.4	6.2	4.1	1.2	0.9	0.6	0.4	0.1	-	-	-	17.8	84.5
1.5~2	-	-	0.1	0.8	1.7	2.2	0.9	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	-	-	6.4	91.0
2~3	-	-	-	0.2	0.5	1.2	1.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	-	4.5	95.4
3~4	-	-	-	-	-	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	-	1.7	97.1
4~5	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.3	0.2	0.4	0.2	-	-	1.5	98.6
5~6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	-	0.7	99.3
6~7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.1	-	0.4	99.7
7~8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	99.8
8~9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.1	99.9
9~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	100.0
10~11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
11~12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
12~13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
13~14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
14~15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
15~50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
合計(%)	-	-	3.1	19.6	33.1	22.5	9.4	5.1	2.9	1.5	1.3	1.1	0.4	0.1	100.0	

資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」(2003)

表 9.5 花蓮地區秋季波高週期機率分佈表

H(m)\T(s)	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~50	合計 (%)	累計 機率
0~0.5	-	-	-	0.6	1.4	1.9	0.8	0.2	-	-	-	-	-	-	4.8	4.8
0.5~1	-	-	1.3	5.1	12.0	6.4	1.7	0.7	0.3	0.1	-	-	-	-	27.7	32.5
1~1.5	-	-	0.5	4.1	11.1	10.2	4.4	1.3	0.3	0.1	0.1	-	-	-	32.0	64.5
1.5~2	-	-	0.1	1.3	5.2	6.8	3.5	1.1	0.3	-	-	-	-	-	18.3	82.9
2~3	-	-	-	0.4	2.4	3.8	2.9	1.3	0.7	0.3	0.1	-	-	-	12.1	94.9
3~4	-	-	-	-	0.1	0.5	0.8	0.7	0.4	0.2	0.1	-	0.1	-	2.8	97.8
4~5	-	-	-	-	-	-	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	-	1.2	99.0
5~6	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.6	99.6
6~7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.2	99.8
7~8	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.2	100.0

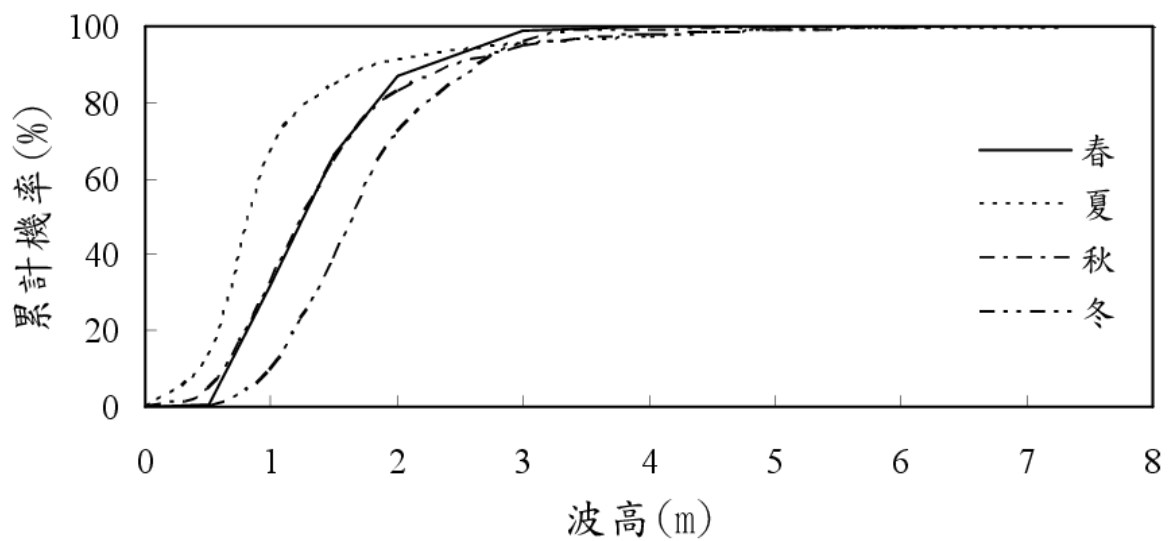
8~9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
9~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
10~11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
11~12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
12~13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
13~14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
14~15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
15~50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
合計(%)	-	-	2.0	11.5	32.3	29.5	14.5	5.6	2.3	1.0	0.6	0.6	0.2	0.1	100.0	

資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」(2003)

表 9.6 花蓮地區冬季波高週期機率分佈表

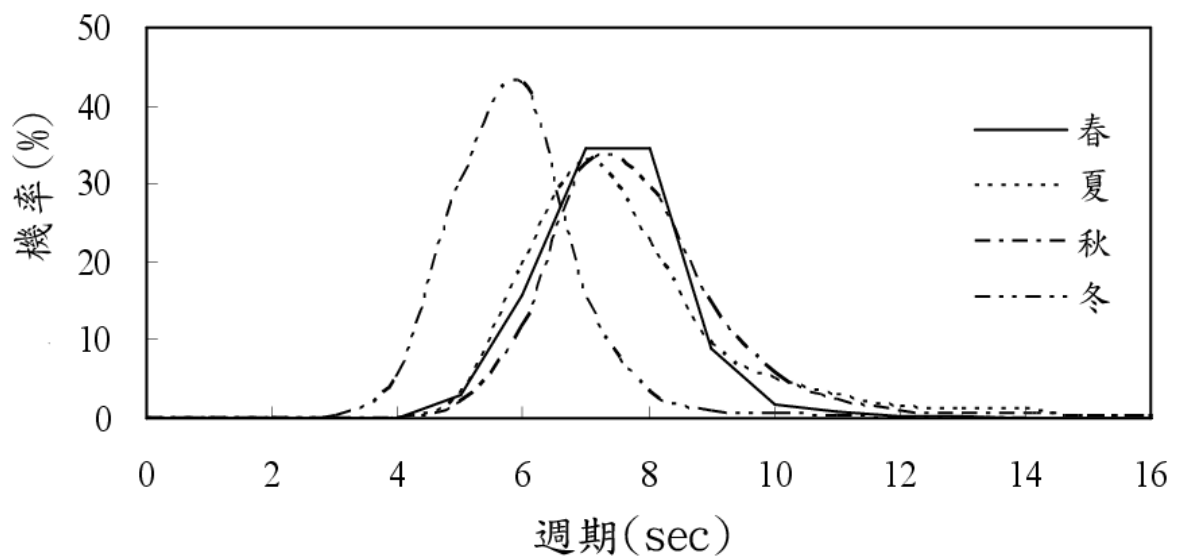
H(m)\T(s)	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~50	合計 (%)	累計 機率
0~0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5~1	-	-	0.1	0.9	4.6	3.2	0.5	-	-	-	-	-	-	-	9.3	9.3
1~1.5	-	-	0.3	2.6	11.8	12.3	2.7	0.3	-	-	-	-	-	-	29.9	39.2
1.5~2	-	-	0.1	1.5	9.9	16.1	4.5	0.7	0.2	-	-	-	-	-	33.0	72.2
2~3	-	-	-	0.5	3.8	10.6	6.5	1.4	0.5	0.1	0.1	-	-	-	23.5	95.7
3~4	-	-	-	-	0.1	0.8	1.3	0.7	0.2	0.1	-	-	-	-	3.2	98.9
4~5	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	-	-	0.5	99.4
5~6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.2	0.1	-	-	-	0.4	99.7
6~7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.1	-	-	-	0.2	99.9
7~8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
8~9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
9~10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
10~11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
11~12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
12~13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
13~14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
14~15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
15~50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0
合計(%)	-	-	0.4	5.4	30.3	42.9	15.6	3.3	1.0	0.6	0.3	0.1	-	-	100.0	

資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」(2003)



資料來源：交通部運輸研究所「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002～2006)」(2003)，本計畫整理。

圖 9.2 花蓮地區 4 季波高超值累積曲線圖



資料來源：交通部運輸研究所「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002～2006)」(2003)，本計畫整理。

圖 9.3 花蓮地區 4 季週期超值累積曲線圖

由上述可發現，花蓮沿海地區冬季至夏季期間，示性波高逐漸減小，秋季為一轉型期，示性波高逐漸增加，至冬季 12 月達到最大，而冬季示性波高較夏季大，可能是東北季風盛行之故。示性週期方面則隨著波高增大而增加，但一般皆在 6~8 秒之間。

(2) 颱風波浪

本計畫區位於臺灣東海岸，平均每年約有 1.25 個颱風侵襲附近海域，故附近港工結構物之設計皆須以颱風波浪為基準。因此，颱風資料之完整蒐集及颱風波浪之準確推算，將直接影響海上工程之安全及結構物之安定；本報告係依井島武士及湯麟武博士之理論發展出之 TYPH 電腦程式，以模擬推算颱風波浪。茲就對本區影響較大之颱風進行颱風波浪推算，並將其各方向可能發生之最大示性波高，後依大小順序列表，再以極端值分佈法推算各復現期之波高，如表所示。由表可知，侵襲本區之颱風波浪以 ENE 向波浪最大，而後成扇形向 E、NE 兩方向逐漸減弱，惟可能影響本計畫區之波向為 NNE 至 S 等 8 個方向，以港工結構物設計之 50 年迴歸期設計條件而言，本計畫區受 ENE 向影響最大，其外海波浪條件 $H_o=18.2\text{m}$ 、 $T_o=17.9\text{sec}$ ，並逐漸向南遞減，至 S 方向時降為 $H_o=10.7\text{m}$ 、 $T_o=13.7\text{sec}$ 。

表 9.7 花蓮外海各方向各迴歸期颱風設計波高分析表

波向	250		200		100		50		25		20		10	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
S	13.9	15.7	13.4	15.4	12.1	14.6	10.7	13.7	9.3	12.8	8.9	12.5	7.5	11.5
SSE	14.6	16.0	14.3	15.9	13.3	15.3	12.2	14.7	11.0	13.9	10.6	13.7	9.2	12.7
SE	16.7	17.2	16.4	17.0	15.2	16.4	14.0	15.7	12.6	14.9	12.2	14.7	10.6	13.7
ESE	19.8	18.7	19.4	18.5	18.1	17.9	16.6	17.1	15.1	16.3	14.5	16.0	12.8	15.0
E	20.8	19.2	20.4	19.0	19.0	18.3	17.5	17.6	15.9	16.7	15.4	16.5	13.5	15.4
ENE	21.9	19.7	21.4	19.4	19.8	18.7	18.2	17.9	16.4	17.0	15.8	16.7	13.8	15.6
NE	19.9	18.7	19.4	18.5	18.0	17.8	16.4	17.0	14.7	16.1	14.1	15.8	12.2	14.7
NNE	16.2	16.9	15.8	16.7	14.5	16.0	13.2	15.3	11.7	14.4	11.2	14.1	9.6	13.0
N	12.7	15.0	12.4	14.8	11.2	14.1	10.0	13.3	8.7	12.4	8.2	12.0	6.8	11.0

註：1.依據 1940～2016 年間之颱風資料推算。 2.推算目標區為 121.68°E ， 24.25°N 。
3.目標區水深為-141m。 4.Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

3. 潮汐

地球表面的海水，受天體引潮力之作用，並因海底及海岸地形影響、海灣河口之共振與地球自轉所生之力等作用，造成水位作週期性

之變動，稱為潮汐。當水位變化不考慮氣象因素之作用時，其水位必與天體之位置有關，可推算至非常正確，稱為天文潮。

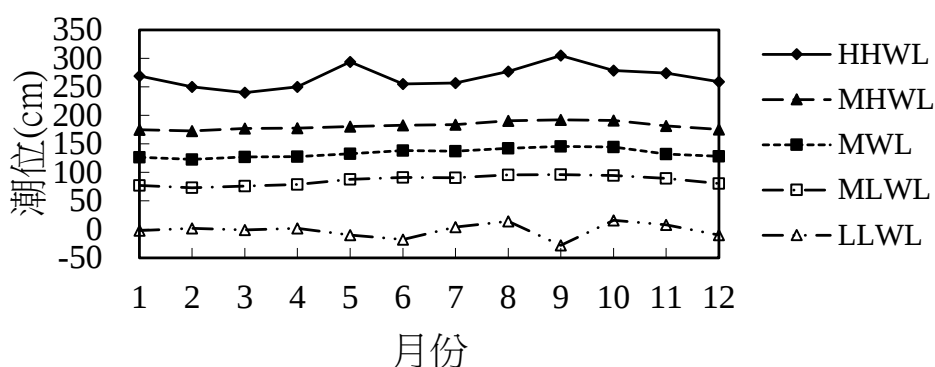
天文潮為受天體引力所引生之潮汐，各地之水位因時間而異，可以正確預測。但當海面有低氣壓或颱風通過時，水位會因氣壓之降低而上升。此時一般海面同時有強風吹襲，因風之壅積作用，將於風域下方造成水位升高，是為風揚作用，此種水位純因氣象作用而引起，稱為氣象潮，又稱為異常潮或暴潮。此種潮位與當時天文潮位之差，稱為暴潮偏差。一般港灣結構物需經得起暴潮力之作用，故設計標準均須以暴潮為基準。

根據報告中將中央氣象局之觀測記錄無異常現象者計入，包括民國 77~78 年、民國 81~82 年及民國 88 年~90 年等資料，加以分析整理得以下之潮位資料：

潮位	花蓮港潮位系統	基隆平均海水面系統
最高高潮位(H.H.W.L.)	+3.05m	EL.+1.73m
平均高潮位(M.H.W.L.)	+1.82m	EL.+0.50m
平均潮位(M.W.L.)	+1.34m	EL.+0.02m
平均低潮位(M.L.W.L.)	+0.86m	EL.-0.46m
最低低潮位(L.L.W.L.)	-0.28m	EL.-1.60m

* 花蓮港潮位零點對應於基隆平均海水面水準系統為 EL.-1.323m

而逐月潮位變化如圖所示，由圖中可知平均潮差約 1 公尺，最低潮位約相當於零水位。



資料來源：「花蓮港整體規劃及未來發展計畫(2002~2006)」

圖 9.4 花蓮港潮位逐月變化圖

(二)折繞射平面數值分析

經由 50 年颱風波浪推算，可求得計畫區影響較大之颱風波浪，以了解何種方向波浪對近岸波高之影響較大，再由折繞射平面數值分析，求出平面各位置處之折繞射係數($K_r \times K_d$)，經轉換可得堤址斷面設計之外海波高，此波高值稱相當外海波高(Equivalent Deepwater waves) $H_o' = H_o \times K_r \times K_d$ 。最後，透過 Goda 公式，即可求得堤前最大波高(H_{max})、堤前示性波高(H_s)及等堤址波高條件。後續在進行結構安全性分析時，將以此結果作為評估之外力條件依據。

(三)堤址波力評估探討

堤址設計波浪受堤址附近地形水深影響極大，各國規範皆有相類似之規定，主要參考之規範如下：

美國規範— “Coastal Engineering Manual” Part II, 2002.4

日本規範— “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facility in Japan” , 2002

1. 依據前述美國規範 Coastal Hydrodynamics , Chapter II-8 : Hydradynamic Analysis and Design Condition , P.II-8-20~29 , 有關極端波浪(extreme waves)之決定，其重點如下：

極端波浪可分別考量於下列 3 種區域：

- (1) 深水區(Deep water)—可由量測或預測而得
- (2) 中度水深區(Intermediate-depth water)—波浪受地形影響但尚未碎波，可利用近岸波浪理論推算之方法加以決定
- (3) 淺水區(Shallow water)—在淺水區之最大波高受淺化及碎波影響，故在碎波帶內之波高往往較碎波帶外之(深水區)波高為大，有關淺水區波高之採用，可參考 Goda (1985)之著作 “Random Seas and Design of Maritime Structures”。

2. 依據前述日本規範 Part II Design Condition, Chapter 4 Wave 有針對設計波浪之決定流程提出說明，流程中各項重點如下設計中採用之波浪主要包括：

代表性波高 H_s ，最大波高 H_{max}

深水波高 H_o ，相當外海波高 H_o'

波浪受水深因素影響而有淺化及碎波現象，造成堤址波高之變化；波浪受海底平面地形變化因素影響而有淺化、折射、繞射現象，亦造成堤址波高之變化，故設計波浪必須針對上述因素加以分析，其中不規則波浪受水深因素影響之淺化及碎波現象，乃依據 Goda (1985)之理論計算碎波帶內波高變化及海堤越浪等特性，此理論係基於(渠道式)斷面模式之條件而得，無法將平面地形折繞射影響加以列入，理論中之深海波高之取用，必需將折繞射因子之影響加以濾除，故可由一般平面波浪計算模式，求出平面各位置處之折繞射係數($kr \times kd$)，經轉換可得堤址斷面設計之外海波高，此波高值稱相當外海波高(Equivalent Deepwater waves) $H_o' = H_o \times kr \times kd$ 。

在規範中並規定，堤址水深較 3 倍相當外海波高還要淺時，皆須考量碎波影響，在規則波時碎波水深僅為單一位置，在不規則波時，碎波位於一範圍內(Breaker Zone)，在設計上採用不規則波，其碎波帶內之波高可由 Goda 理論加以估計，堤址波高可由 h/H_o' 及海床坡度而得。而當水深小於 1/2 相當外海波高時，由於波浪碎波造成波浪能量傳遞型式由水體上下起伏轉換成水平流動，波高變小而水平流速加大，為保守計，應採用水深位於 1/2 相當外海波高處之波高值做為其設計波高，同理，消波塊估計之重量亦需採用上述之波高值。

綜合以上所述，美國及日本於碎波帶內之波高計算皆採用 Goda 之理論值，故堤址設計波浪之決定可參考 Goda (1985)之著作，其堤址波高決定之流程，流程詳圖所示，由圖中可知，深水區之外海波浪可由颱風波浪推算(流程 ①～⑤)，淺水區中若考慮折射現象，則採用流程 ⑥⑧⑨⑩⑪⑫，若考慮繞射影響，則採用流程 ⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫。

Goda 利用一系列的實驗與分析，得到計算堤體受力所需之示性波高、最大波高與相當外海波高之間的關係式。

$$H_s = \begin{cases} K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o H_o' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_o', K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \beta_o = 0.028(H_o'/L_o) - 0.38 \exp[20 \tan 1.5 \theta]$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta]$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H_o'/L_o) - 0.29 \exp[2.4 \tan \theta]\}$$

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8 K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o * H_o' + \beta_1 * h), \beta_{\max} * H_o', 1.8 K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中 } H_o' : \text{相當外海波高}(H_o' = H_o \cdot K_r \cdot K_d)$$

$$\beta_o * : 0.052(H_o'/L_o) - 0.38 \exp[20 \tan 1.5 \theta]$$

$$\beta_1 * : 0.63 \exp[3.8 \tan \theta]$$

$$\beta_{\max} * : \max\{1.65, 0.53(H_o'/L_o) - 0.29 \exp[2.4 \tan \theta]\}$$

$$\tan \theta : \text{堤址附近海底坡度}$$

所謂相當外海波高(H_o')，係指外海入射波高與折射、繞射係數之乘積($H_o' = H_o \times K_r \times K_d$)。折射、繞射係數之乘積($K_r \times K_d$)可利用數值模式求得。將堤址之折射、繞射係數乘積($K_r \times K_d$)乘以外海入射波高(H_o)，即可推算相當外海波高。最後，透過 Goda 公式，即可求得堤前最大波高($H_{\max}$)、堤前示性波高(H_s)及等堤址波高條件。

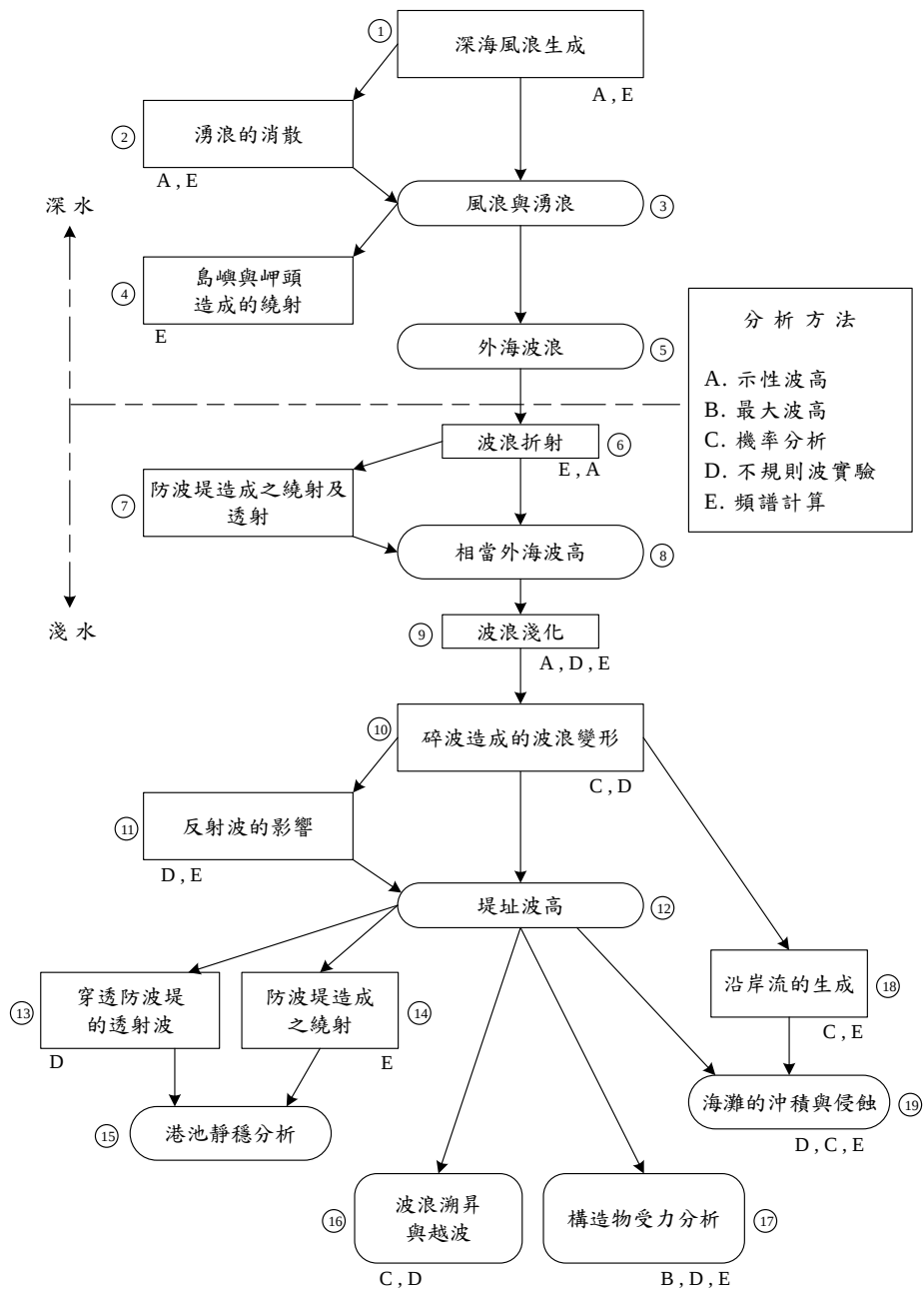


圖 9.5 堤址設計波浪評估分析流程圖

(四)舊有及更新外力設計條件之比對及探討

本計畫除所蒐集上述的自然條件資料外，並將蒐集花蓮港舊有設計條件作為檢討之基準。另外，進行深海颱風波浪推算及暴潮位設計條件探討，並將分析結果與舊有設計條件比對，以瞭解設計條件是否適宜。

1. 舊有設計潮位條件

依據「花蓮港第 4 期擴建外廓防波堤設計」報告中，統計自民國 40 年至 63 年之潮位記錄得花蓮港潮位系統：

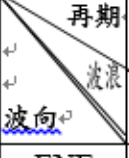
最高高潮位	(H.H.W.L.)	+2.55m
平均高潮位	(M.H.W.L.)	+1.31m
平均潮位	(M.W.L.)	+1.34m
平均低潮位	(M.L.W.L.)	+0.86m
最低低潮位	(L.L.W.L.)	-0.28m

因取+2.5 公尺為設計水位，所對應的迴歸期為 44 年。本水位約以天文潮最低潮位為水準零點，施工中花蓮港務局另定水準零點，較上者低 50cm，故設計水位應改為+3.0 公尺，惟此高程均以花港局所定者為基準。

2. 舊有設計波浪條件

依據「花蓮港第 4 期擴建外廓防波堤設計」報告顯示，原設計深海浪條件如表所示，由表中可知，原有設計條件皆較本計畫所計算之深海颱風波浪值小，初步判斷為引用的資料年份長度不同及颱風模式計算目標區中心位置不同，故有進一步檢討之必要，以訂出一合理的設計條件。

表 9.8 花蓮港各方向各迴歸期颱風原有設計波高分析表

	5 年		10 年		15 年		25 年		50 年	
	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts	Hs	Ts
ENE	7.8	11.4	9.5	12.6	10.4	13.2	11.3	13.8	12.6	14.6
E	7.8	11.4	9.5	12.6	10.4	13.2	11.3	13.8	12.6	14.6
ESE	7.8	11.4	9.5	12.6	10.4	13.2	11.3	13.8	12.6	14.6
SE	7.2	11.0	8.8	12.2	9.7	12.8	10.5	13.8	11.7	14.0
SSE	6.2	10.2	7.6	11.3	8.3	11.8	9.0	12.3	10.1	13.0

二、舊有結構物安全性分析及破壞原因檢討

(一)現場結構物破壞原因及災損資料蒐集與分析

本計畫將依上小節舊有結構物安全性分析結果，對既有結構物受損情形進行檢討，並初步研擬受損結構補強方案及防止舊有結構物受損之預防措施。今由交通部運輸研究所辦理「港灣設施防災技術之研究(二)-港灣設施防災對策之研究」報告中，摘錄沈箱式防波堤的破壞模式及災損復健工法，作為後續計畫執行依據。

外廓防波堤構築於港灣最外圍，經年累月受到各種不同週期的波浪拍擊，由文獻中的破壞實例可知，防波堤的損害絕大部分皆與波浪有關，但地震在深水區或強震區時亦不可忽略。重力式防波堤受波浪力作用後的受損情形，如圖所示，其主要的破壞包括沉箱滑動、沉箱傾覆、沉箱下陷與沉箱結構體受損。以下將就上述各種破壞模式及材料劣化造成的損害作一介紹，其破壞連鎖圖如圖所示。

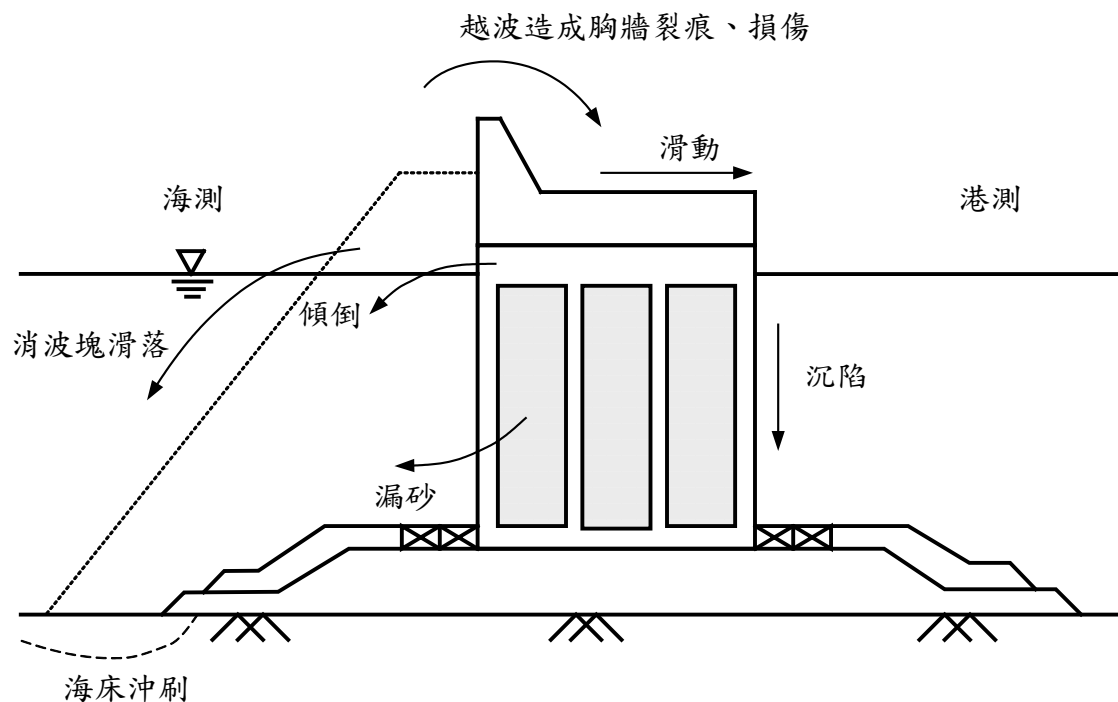


圖 9.6 重力式防波堤之破壞模式示意圖

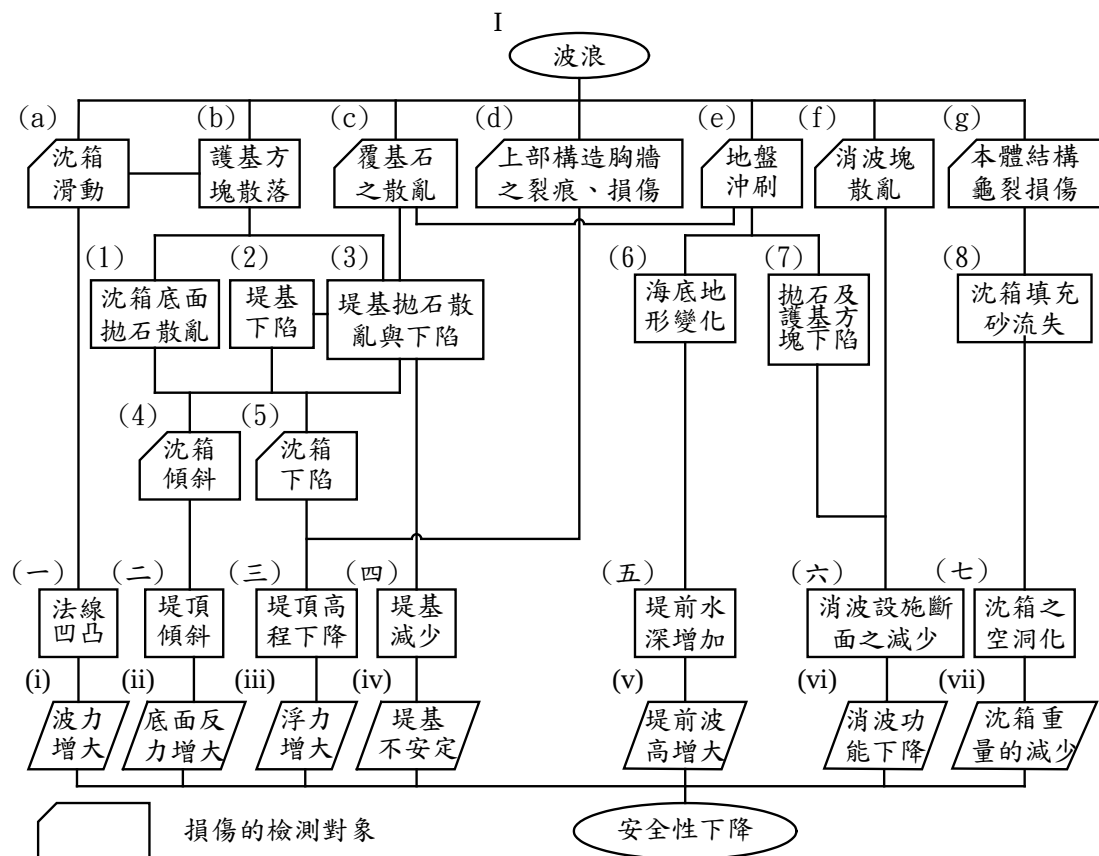


圖 9.7 重力式防波堤之破壞連鎖圖

1. 沉箱滑動

當沉箱本體直接遭受波浪力量的作用而產生滑動時，將發生法線凹凸的情形。此時因為防波堤的法線發生變動，波浪的力量亦將重新分佈，某些地方會發生波力集中增大的現象，造成更嚴重的滑動及其他相關損壞。

2. 沉箱傾覆

波浪作用於防波堤時，會產生向下淘刷的力量，作用於堤前的海床、堤基覆蓋部及護基方塊，導致沖刷坑的形成，使得堤基覆蓋部或拋石基礎散亂、沉陷，間接引起沉箱傾斜、沉陷及堤面胸牆混凝土之破壞，導致頂面高度不足。

3. 沉箱下陷

當海床沖刷造成的沖刷坑過大時，覆基石及底部拋石會發生滑動散落的情形，影響沉箱的安定性，高度不足，造成沉箱本體下陷。而地震所引起的基礎液化，亦會造成沉箱的下陷。

4. 沉箱結構體受損

當越波(overtopping)的情形發生時，會使得胸牆及堤面混凝土受到波浪拍擊而受損。此外，當波浪作用導致消波塊或護基方塊散落時，其散落時會與沉箱碰撞而造成沉箱側牆的受損破裂，進而引起內部填充材料的流失，造成隔牆受損發生結構不平衡的情況而使上部堤面和胸牆傾倒、塌陷。

5. 材料劣化的破壞模式探討

由於長年的浸泡於海洋惡劣環境下，混凝土本身又多孔隙材質，更易受到海水鹽分(硫酸鹽離子、氯離子)等有害物的侵入，造成防波堤沉箱之混凝土品質劣化，表面龜裂、剝落，內部鋼筋腐蝕、體積膨脹開裂，加上波浪不斷的衝擊施加能量，更加速形成結構體破裂、塌陷等嚴重損壞之可能性。

(二)防波堤結構安全性分析

本計畫將利用結構物外力條件分析及堤址波浪外力評估，配合現場堤趾攝影與測量數據之蒐集，來進行舊有結構物安全性分析，以確實瞭解舊有結構物破壞機制與現況結構之安全性。

有鑑於花蓮港東防波堤為沉箱為消波式結構(詳如圖)，波力計算雖仍可採用 Goda 之波壓公式，但早期設計 λ_1 (緩變波壓項之修正係數)於消波式沉箱中皆採用 0.9，惟今該項公式已有部分修正，亦即隨著波浪作用狀況的不同，此時公式中之 λ_1 、 λ_2 之值應做修正，如圖及表所示。故本計畫後續進行波力計算時，分別依三種不同波浪作用狀況計算受力總合，結果則是採用最保守之波力條件進行消波式沉箱外力條件檢核。

本項工作將依序進行堤址波高決定及堤體安全性分析，各細項工作方法將分述如后。

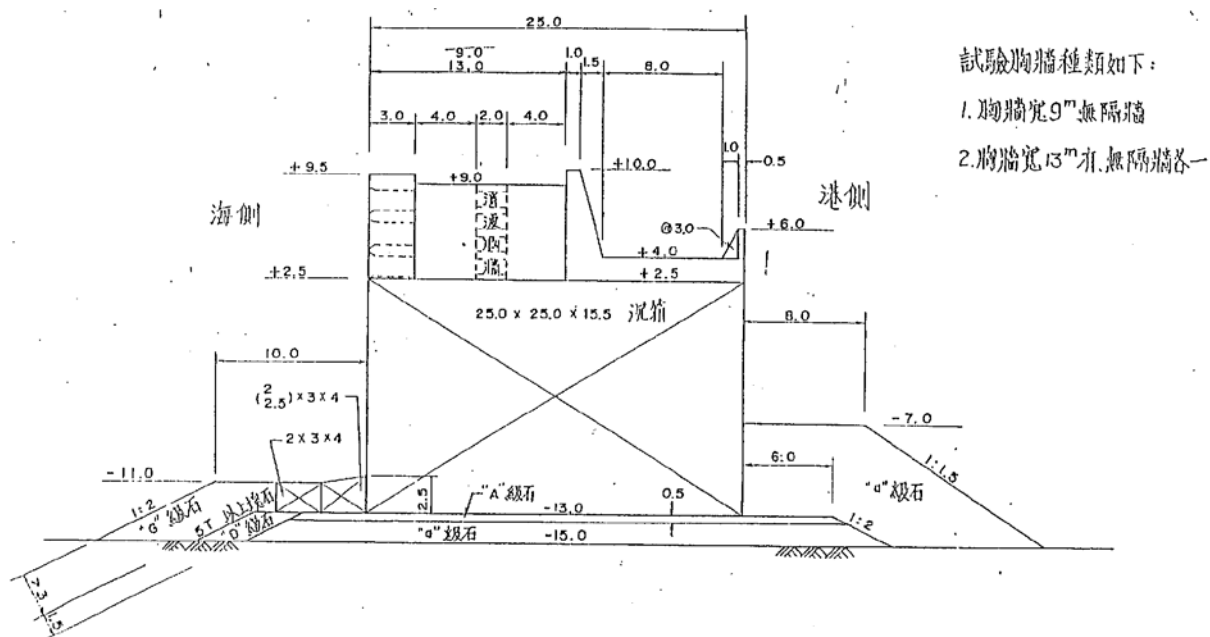


圖 9.8 花蓮港東防波堤消波沉箱斷面圖

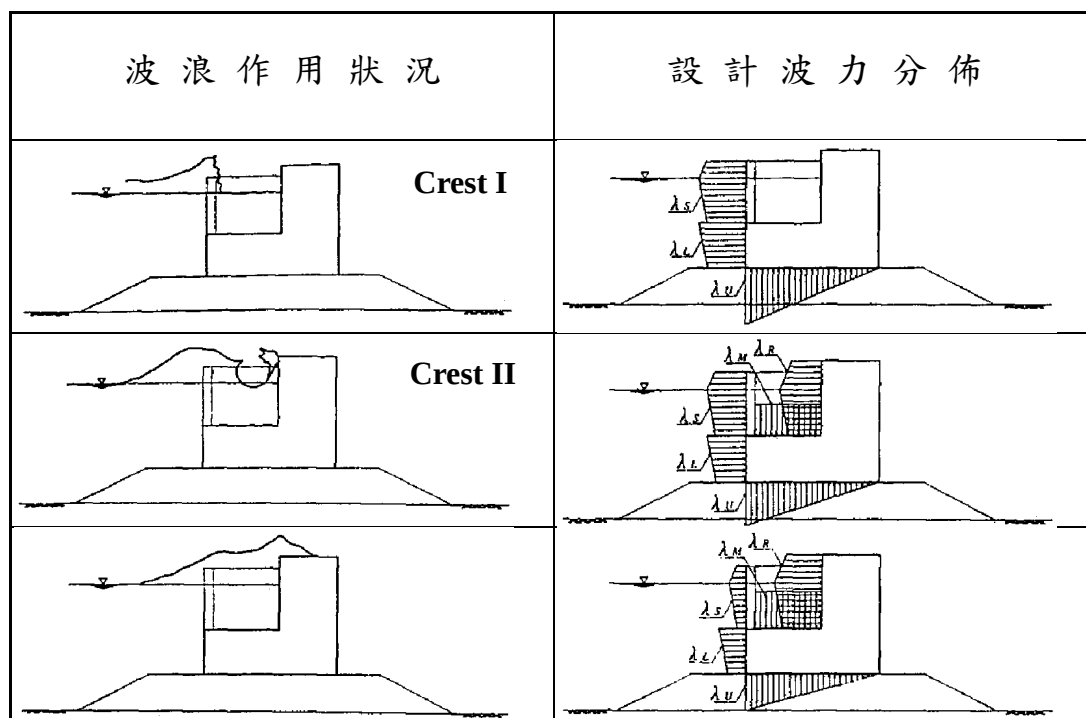


圖 9.9 消波式沉箱波壓作用分佈圖

表 9.9 消波式沉箱波壓係數表

		Crest-I	Crest-II _a	Crest-II _b
消能壁	λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{S2}	$\begin{cases} 0.4 & (\alpha^* \leq 0.75) \\ 0.3/\alpha^* & (\alpha^* > 0.75) \end{cases}$	0	0
前壁	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	$\begin{cases} 0.4 & (\alpha^* \leq 0.5) \\ 0.2/\alpha^* & (\alpha^* > 0.5) \end{cases}$	0	0
後壁	λ_{R1}	0	$\begin{cases} 20\ell/3L' & (\ell/L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell/L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H/h \leq 0.1) \\ 1.6 - 2H/h & (0.1 < H/h < 0.3) \\ 1.0 & (H/h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{R2}	0	$\begin{cases} 0.56 & (\alpha^* \leq 25/28) \\ 0.5/\alpha^* & (\alpha^* > 25/28) \end{cases}$	0
底板	λ_{M1}	0	$\begin{cases} 20\ell/3L' & (\ell/L' \leq 0.15) \\ 1.0 & (\ell/L' > 0.15) \end{cases}$	$\begin{cases} 1.4 & (H/h \leq 0.1) \\ 1.6 - 2H/h & (0.1 < H/h < 0.3) \\ 1.0 & (H/h \geq 0.3) \end{cases}$
	λ_{M2}	0	0	0
揚壓力	$\lambda_U (= \lambda_3)$	1.0	0.75	0.65

1. 堤體斷面研擬

堤體斷面一般係依據施工需求與經驗累積進行設定，初步先選定特定區位之堤體高程，如拋石頂部高程、沉箱頂部高程、經驗假設之

堤面高程與沉箱底部高程等條件，經計算分析後，逐漸修正至最佳斷面。研擬斷面所考量因素包括如下：

- (1) 拋石堤拋石頂面高度，如為滿足陸上拋石作業需求，一般採高潮位以上。
- (2) 沉箱堤沉箱頂部高度，為考量沉箱回填砂之作業需求，一般亦採高潮位以上。
- (3) 堤面場鑄混凝土厚度，一般在 1m 以上，沉箱堤多在 2m 以上。
- (4) 沉箱堤基礎拋石厚度不可小於 1.5m。

2. 胸牆頂高決定

(1) 防波堤胸牆頂高

一般大型港口防波堤設計，如堤後有寬廣水域可供越波消能，則頂高可採大於設計水位 0.6 倍示性設計波高以上高度考量；小型港口如堤後無胸牆足夠水域可供越波消能，則胸牆頂高須大於設計水位 1.25 倍示性設計波高以上之高度。

(2) 海堤胸牆頂高

海堤後側為受保護土地，一般胸牆頂高需視堤後土地之利用情況與堤體安全考量後決定。其決定方式可採 Goda 之經驗公式，配合 Goda 由以往海堤受災實例，所推定之容許溢流量詳表所示，此外，Nagai 考量堤後土地利用重要程度與及容許溢流量之關係，列如表所示，以供設計推估適當之胸牆高度。另參考美國工兵團海岸工程手冊(Coastal Engineering Manual)亦針對各種結構物保護下，其堤後容許越波量之情形，彙整如圖所示。

表 9.10 海堤容許溢流量之推定值一覽表

種類	保 護 工	溢流量($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$)
護 岸	堤頂無保護工	0.05
	堤頂有保護工	0.20

堤 防	堤頂及背後均無保護工	0.005以下
	堤頂保護，背後無保護工	0.02
	三面混凝土保護	0.05

資料來源：“Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan”

表 9.11 堤後土地利用重要程度與容許溢流量關係一覽表

重 要 程 度	溢流量($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$)
堤後有高密度住宅及公共設施等，波浪越波會引起特別嚴重危害之區域	約 0.01
其他重要地區	約 0.02
其他地區	0.02~0.06

資料來源：“Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan”

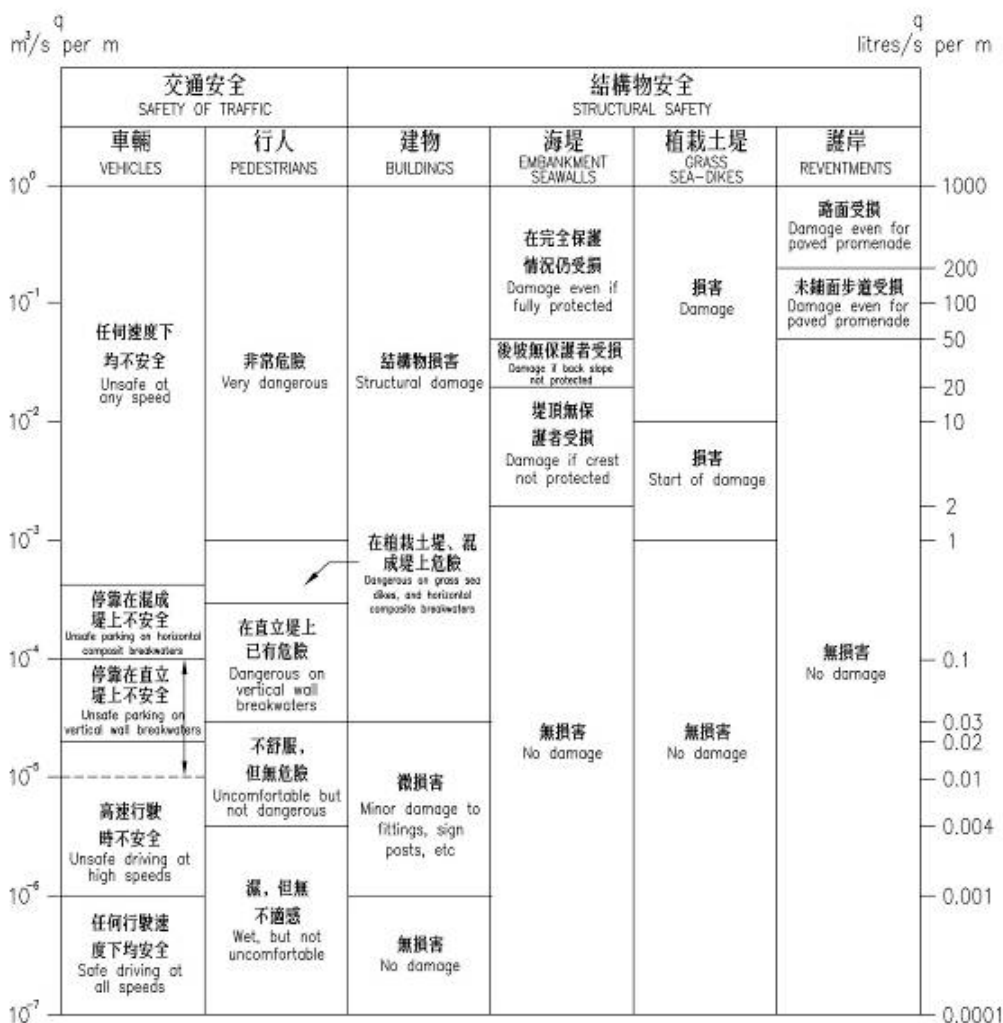


圖 9.10 容許越流量界定範圍(圖資料來源：“Coastal Engineering Manual”)

Goda 利用實驗所得溢流量與波高之關係曲線，考慮波高出現機率推算溢流量之期待值 q_{exp} ，並繪製成圖，以供計算堤頂高程或估算溢流量之參考，詳圖所示。當波浪有以下情況時，堤頂出水高度 h_c 可採下列公式計算修正：

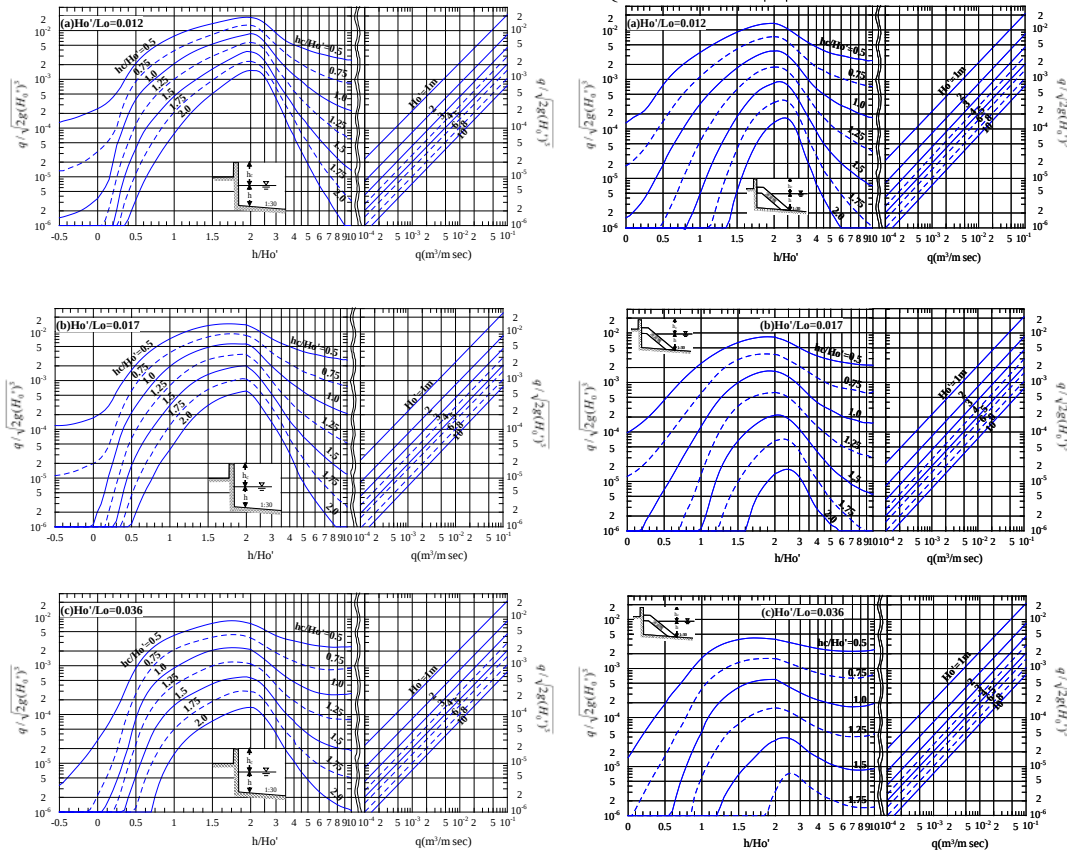
堤外側有消波塊 $\beta = 0.9 \sim 0.7$

垂直長條消波之海堤 $\beta = 0.6$

後置胸牆 $\beta = 0.5 \sim 1.0$

階梯式海堤 $\beta = 1.0 \sim 1.7$

波浪斜向入射 $\beta = \begin{cases} 1 - \sin^2 \theta : |\theta| \leq 30^\circ \\ 1 - \sin^2 30^\circ : |\theta| > 30^\circ \end{cases}$



(a)無消波塊部分(海床坡度 1/30)

(b)有消波塊部分(海床坡度 1/30)

資料來源：「Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan」

圖 9.11 海堤之期待越波量圖

式中 β ：等值頂高係數(Equivalent Crown Height Coefficient)

θ : 波浪與堤法線之夾角

3. 波力計算原則

堤前波高計算採用合田良實(Goda)波壓公式，各壓力分佈如圖 9.1 所示，計算步驟如下：

(1) 波壓作用高程

$$\eta = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_{1H\max}$$

 η : 波壓作用在靜水位以上高度 (m)

β : 入射波向與海堤垂線之夾角 $\pm 15^\circ$ ，取其大者。

λ_1 ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0，通常沉箱堤設計採用 1.0；拋石堤則採用 0.9。

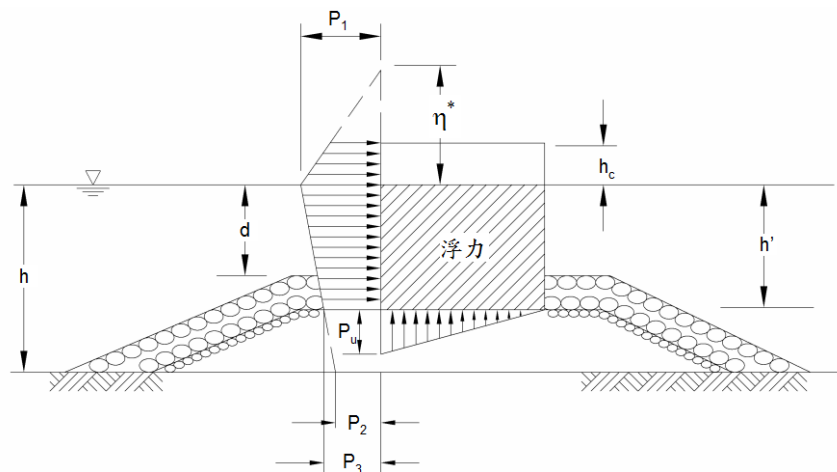


圖 9.12 防波堤直立部份波壓分佈圖

(2) 波壓強度

$$P1 = 1/2(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) W_o H_{max}$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$P3 = \alpha_3 \cdot P1$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1$$

β : 入射波向與堤線垂線之夾角 $\pm 15^\circ$ ，取其大者。

λ_1 : 緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0。

λ_2 : 碎波波壓項之修正係數

λ_3 : 上揚壓力項之修正係數

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

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right]$$

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

$$\alpha_4 = 1 - hc^*/\eta^*$$

$$hc^* = \min[\eta^*, hc]$$

式中 P_1 : 靜水位之波壓強度 (t/m²)

P_2 : 海底之波壓強度 (t/m²)

P_3 : 堤底之波壓強度 (t/m²)

P_4 : 胸牆頂之波壓強度 (t/m²)

h : 堤趾水深 (m)

h_b : 堤前 5 倍 $H_{1/3}$ 距離處之水深 (m)

h' : 直立部份之水深 (m)

d : 護基方塊或覆坡石(塊)中水深較小者 (m)

W_o : 海水單位重 (t/m³)

L : 水深 h 處之波長

$\min\{a,b\}$: a,b 中取較小值

若為直立堤且入射波向角 $\beta < 30^\circ$ 之情況下，尚需考量衝擊波壓發生之可能。此時 α_2 值應修正為 α^* ，其中

$$\alpha^* = \max[\alpha_2, \alpha_{10} \cdot \alpha_{11}]$$

$$\alpha_{10} = H/d \quad H \leq 2d$$

$$= 2 \quad H > 2d$$

$$\alpha_{11} = \cos \delta_2 / \cosh \delta_1 \quad \delta_2 \leq 0$$

$$= 1 / [\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{1/2}] \quad \delta_2 > 0$$

$$\delta_1 = 20 \delta_{11} \quad \delta_{11} \leq 0$$

$$= 15 \delta_{11} \quad \delta_{11} > 0$$

$$\delta_2 = 4.9 \delta_{22} \quad \delta_{22} \leq 0$$

$$= 3 \delta_{22} \quad \delta_{22} > 0$$

$$\delta_{11} = 0.93(B_m / L - 0.12) + 0.36[(h-d)/h - 0.6]$$

$$\delta_{22} = 0.36(B_m / L - 0.12) + 0.93[(h-d)/h - 0.6]$$

式中 B_m : 堤前拋石平台寬(m)

(3) 浮力及上揚力

浮力僅考慮直立堤身於設計水位以下部份。上揚力則假設為三角形分佈，作用於直立堤身底部；最大上揚力 P_u 作用於海側堤趾，港側堤趾則為零，其計算公式如下：

$$P_u = 1/2(1 + \cos \beta) \cdot \lambda^3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot W_o \cdot H_{\max}$$

(4) 波力合成力及其力矩

基於上述計算，波力之合成力 P 及力矩 Mp 可依下式求得：

$$P = 1/2(P_1 + P_3)h' + 1/2(P_1 + P_4)hc^*$$

$$M_p = 1/6(2P_1 + P_3)h'^2 + 1/2(P_1 + P_4)h' \times hc^* + 1/6(P_1 + 2P_4)hc^{*2}$$

上揚力之合成力 U 及力矩 Mu 可由下式求之：

$$U = 1/2 P_u \cdot \ell_u$$

$$M_u = 2/3 U \cdot \ell_u$$

式中 ℓ_u ：表示上揚力作用於堤底之範圍

若直立堤身位於設計水位之下，則 $\ell_u = B$ 堤底寬

若直立堤身位於設計水位以上，則 $\ell_u = \min \left\{ B, 0.2 \frac{(\eta^* + h')^2}{|h'|} \right\}$

其中 h' ：直立堤底部出水面之高度(取負值)

(5) 護基方塊護面石及堤址塊石重量計算

採用 Hudson 類型之公式推算。

$$W = \frac{\gamma_s H_s^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \text{----- 消波塊}$$

$$W = \frac{\gamma_s H_s^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \text{----- 護基方塊、護面石}$$

式中 W：護面塊重量 (t)

γ_s ：護面塊單位重 (t/m³)

H_s ：堤前設計波高 ($H/3$)

K_d ：穩定係數 ($N_s^3 = K_d \cot \alpha$)

S_r ：護面塊對海水比重

α : 斜面與水平面之夾角

如依谷本勝利(TANIMOTO)建議之計算方式如下：

$$N_s = \max. \left\{ 1.8, \left[A \frac{1-k}{k^m} \frac{h'}{H_{1/3}} + NSC \exp \left(-B \frac{(1-k)^2}{k^m} \frac{h'}{H_{1/3}} \right) \right] \right\}$$

其中
$$k = \frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')} \sin^2 \left[\frac{2\pi B_m}{L'} \right]$$

h' : 護基方塊放置處之水深(m)

L' : h' 水深處之波長(m)

B_m : 堤前拋石平台寬(m)

A 、 m 、 NSC 、 B : 係數，依採用護基型式不同而取不同之值如下：

護基型式	A	m	NSC	B
塊石	1.3	1/3	1.8	1.5
方塊	1.0	1/3	1.4	1.2
開孔方塊	0.82	1/2	1.6	0.9

另 Shore Protection Manual 依拋石功用區分為基礎保護用及護基用 2 大類型，具以提供安定係數 N_s 圖表選取之方式，如圖 9.13 所示。

4. 穩定分析

(1) 滑動驗算

$$SF_s = \frac{\mu(W_A - W_B - U) + W_s}{P}$$

式中 SFs : 滑動安全係數

μ : 摩擦係數

WA：堤體重量

WB：堤體所受之浮力

U：堤體所受之上揚力

WS：堤體所受之被動土壓力

P：堤體所受波浪之合力

(2) 傾倒驗算

$$SF_o = \frac{M_A - M_B - M_U + M_S}{M_p}$$

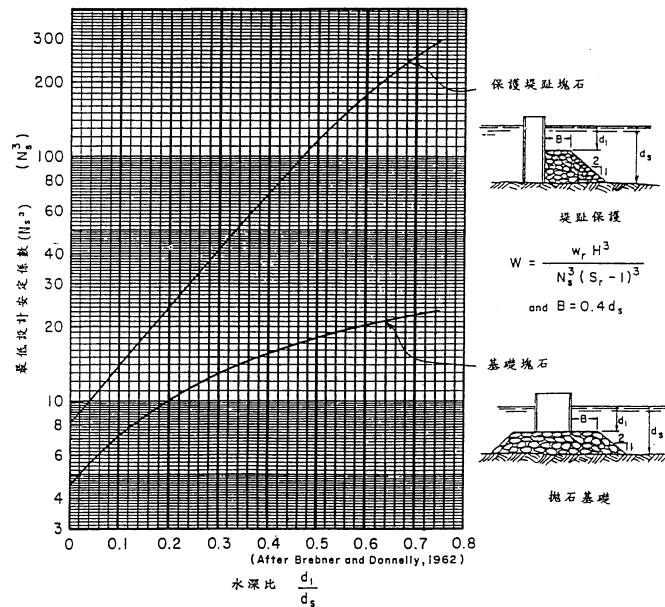
式中 SFo：傾倒安全係數

MA：由堤體自重產生之抗傾力矩

MB：由堤體所受浮力產生之力矩

MU：由堤體所受上揚力產生之力矩

MS：由堤體所受被動土壓力產生之抗傾力矩



資料來源：Shore Protection Manual

圖 9.13 護基及堤趾拋石之安定係數圖

(三)防波堤之消波艙結構安全性檢討

由消波艙破壞情況，顯示可能有大於消波艙所能負荷之外力作用發生，因而產生破壞。由於消波艙主要受側向波力作用，以下將針對消波艙之混凝土剪力破壞及因分段施工造成之接合面破壞加以探討。

1. 消波艙之剪力破壞分析

混凝土剪力計算強度公式如下：

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b_w d$$

V_c ：剪力強度(kg)

f'_c ：混凝土之抗壓強度(kg/cm²)

b_w ：寬度

2. 以目前消波艙開孔與開孔間之混凝土最短距離至少超過 80cm 且厚度至少 200cm 之條件予以計算，可知以 175kg/cm² 之混凝土打設下，30cm*200cm 之混凝土面積至少可承受約 112ton 之外力作力，遠大於波力所產生之外力，由此可知，在混凝土結構一致之條件下，消波艙之混凝土結構應不致產生破壞。

3. 混凝土分段施工面之破壞分析

由前述分析可知，在混凝土結構完整之條件下，混凝土本身可承受極大之剪力，但由於消波艙之高度達 7m 左右，且必須施作消波艙之開孔，所以在實際施工時必須分次施工，依現場相片研判，每次打設之厚度約為 1.0m~1.5m 左右，部份之破壞是由施工交接面所產生。

由消波艙外壁頂部之混凝土與下層之混凝土間並無完整之接合，所以當波力作用時，消波艙外壁僅能依靠重力所產生摩擦力保持穩定，但當颱風大浪來襲時，波力大於摩擦力及後側混凝土剪力總合時，就容易產生外壁破壞飛離之情況。

初步以現場及斷面資料，以一次打設 2 艙，每艙 4m 寬、內隔牆厚度 0.8m、外壁厚 3m、混凝土高度 1.5m 及 50 年迴歸期颱風波浪所產生之堤頂波壓 11.17 ton/m² 作為初步驗核之基準。

(1) 波力計算

$$\text{受力面積 } 1.5 \times (4 \times 2 + 0.8) - 4 \times \pi \times 1.42 / 4 = 7.04 \text{ m}^2$$

$$\text{波力總合 } 11.17 \text{ ton/m}^2 \times 7.04 \text{ m}^2 = 78.64 \text{ ton}$$

(2) 混凝土剪力計算

以後側牆高 1m 為條件，整理堤後可能破壞角及波力於破壞面上之分力如表 9.1 及圖 9.14 所示。

表 9.12 堤後破壞角與波力及剪力關係表

破壞角 (度)	剪力 (ton)	波力(ton) (斜面分力)	差值 (ton)
10	323.01	77.44	245.57
20	164.00	73.89	90.10
30	112.18	68.10	44.08
40	87.26	60.24	27.02
50	73.22	50.55	22.67
60	64.77	39.32	25.45
70	59.69	26.90	32.79
80	56.96	13.66	43.30

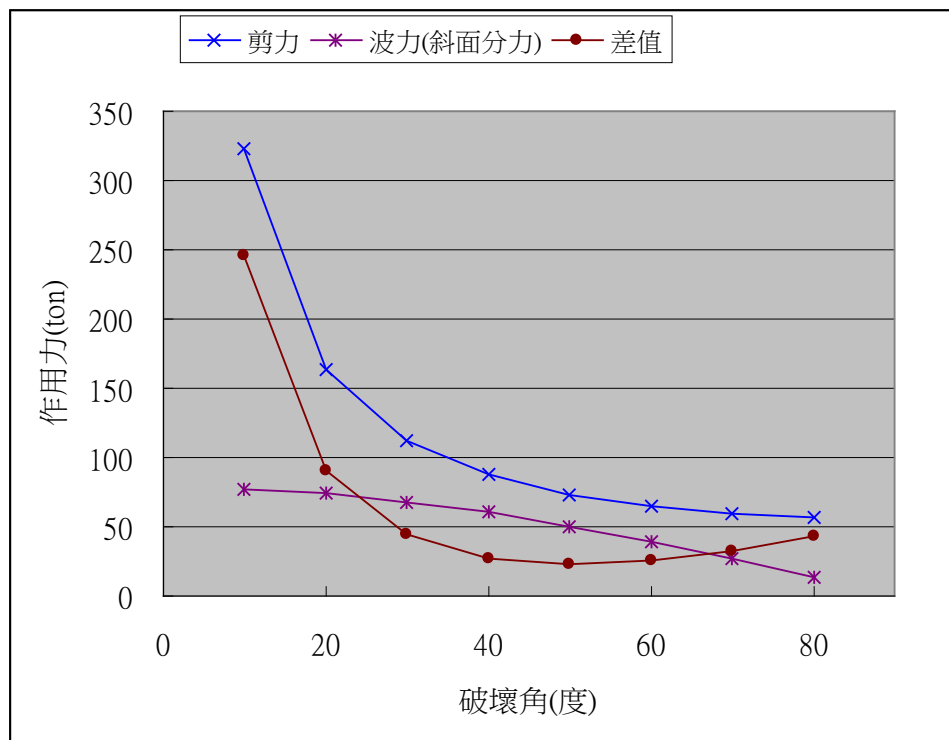


圖 9.14 堤後破壞角與波力及剪力關係圖

由以上計算顯示，外牆後之側牆可提供之剪力大於波力，而在破壞角約為 50° 兩者差值最小，但剪力仍較波力多出約 22.67ton，顯示在外牆受均勻力量作用時，側牆不致於產生剪力破壞之情形。

進一步探討側牆會發生破壞之原因，其中可能是波力作用於外牆時並非均勻分佈，如波力較偏於一側，則會造側牆受彎矩作用產生破壞而分離，但因非均勻受力無法詳細加以計算，建議後續應針對此部份再予以探討。

4. 消波艙結構計算結果

經檢核單一消波艙之結構安全，此處採用海側之前消波艙，前寬 4m，內長 5m，高 7m，兩邊側牆厚 0.8m，後側版厚 2m、前側(含消波孔)版厚 3m，3 邊固定，其尺寸詳圖 9.15 所示，計算結果可知，兩邊側牆厚僅需超過 0.51m 即可符合需求，而現況兩邊側牆厚度已超過標準，應屬安全設計，另所需配筋之尺寸因尚無法取得原設計配筋圖，故僅能計算符合安全需求之配筋量，惟俟日後取得原設計圖時再行檢核。

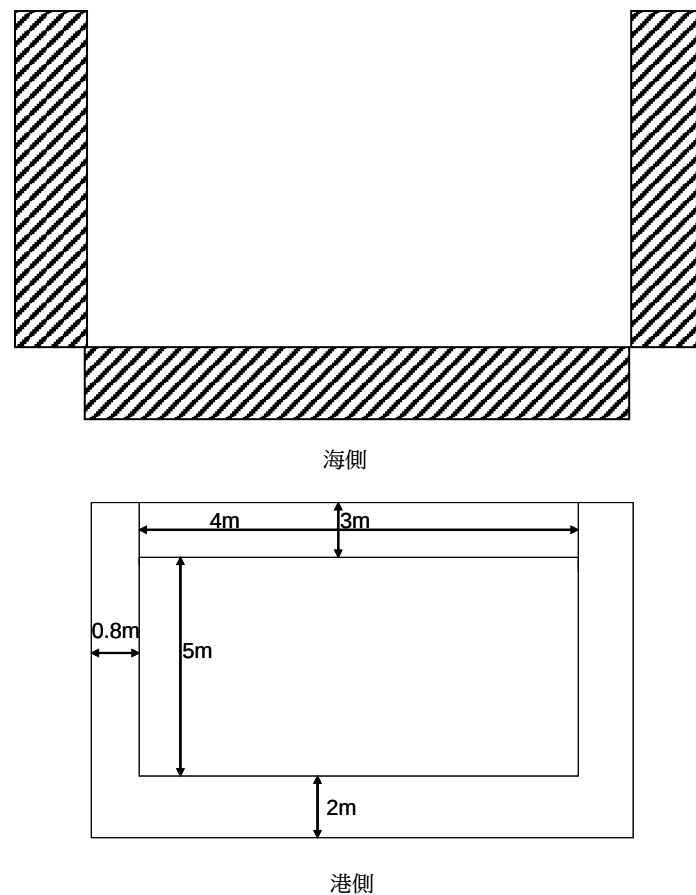


圖 9.15 消波艙尺寸示意圖

三、受損結構補強短期及長期方案研擬

(一) 沉箱移動

1. 增加沉箱自重

如將堤面混凝土加厚，或將沉箱回填砂改置較重之材料，或沉箱隔艙灌漿…等，均可以增加沉箱之自重，增加摩擦與抗滑動力。

2. 增加摩擦力

將沉箱隔艙底部鑿穿灌漿，增加沉箱與拋石基礎間摩擦力。

3. 沉箱前趾加強工法

詳工法 JC1(圖 9.16)所示。

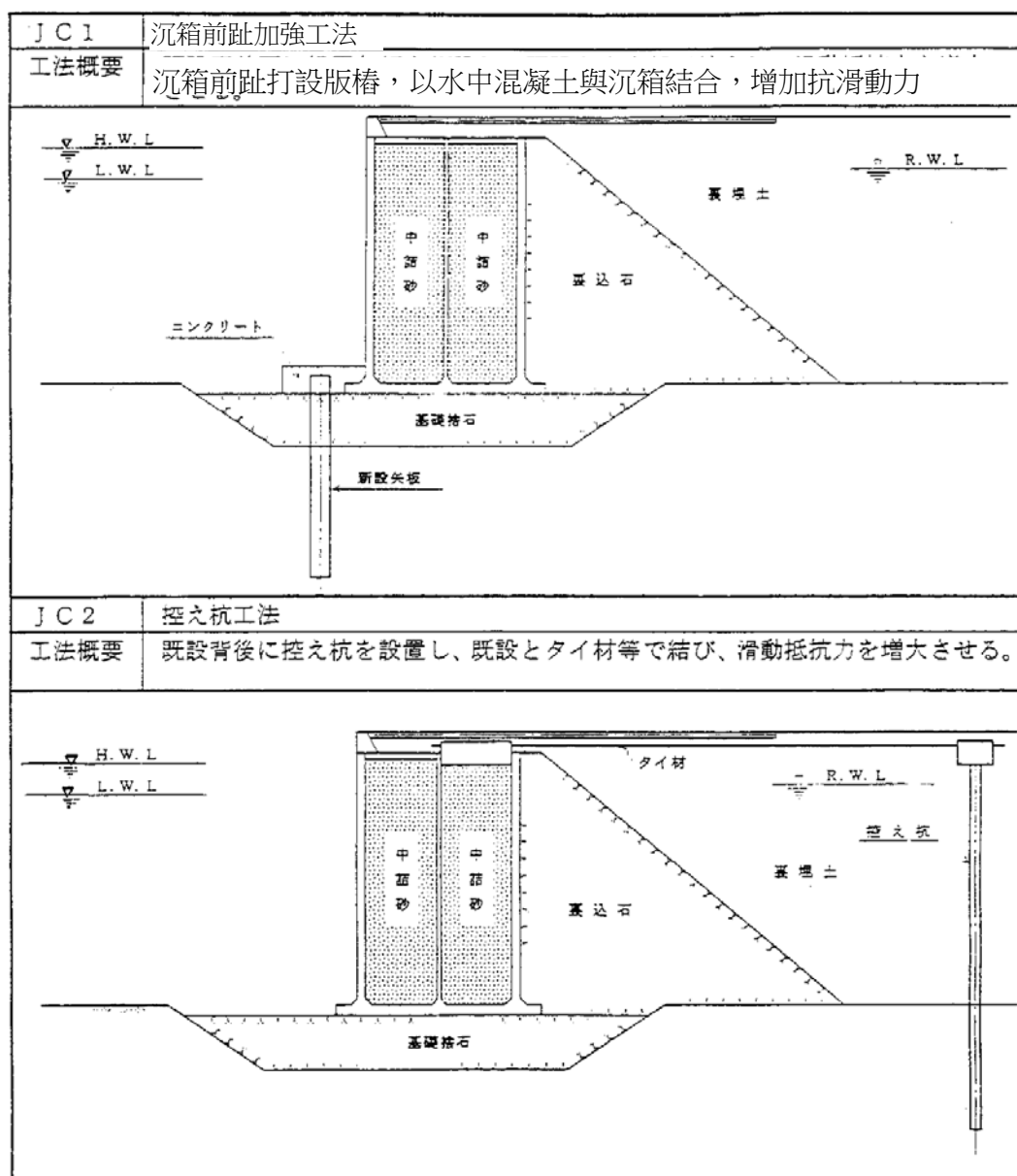


圖 9.16 沉箱前趾加強工法圖

(二)沉箱結構破損

可以選擇拆除重做或就破壞結構體進行修補作業，修補方式可以採用水中混凝土(添加非分離劑)或其他合宜材料。

四、沉箱式防波堤維護工法探討

港灣設施由於長年處於風浪之作用下，隨時間增加逐漸造成之材料劣化、結構變形及損傷等情況。因此如能適時找出有問題的港灣設

施，在造成重大損壞前予以補強，即能防範於未然，避免港灣災難的發生，為配合沉箱式防波堤維護項目，茲將可能之維護管理工法依結構位置概分為水上部份及水下部份。

1. 水上部分維護管理工法與施作項目。
2. 水下部分維護管理工法與施作項目。

五、重大課題

(一)現場結構物破壞原因及災損資料蒐集與分析

花蓮港東防波堤自民國 19 年建港以來，期間歷經多次擴建全長共有 1,837 公尺，而至今 88 年間亦遭受多次的颱風及地震的洗禮，依花蓮港務局提供資料顯示，花蓮港防波堤曾在歐菲莉(1990)、黛特(1990)、艾美(1991)、提姆(1994)、道格(1994)、安珀(1997)、碧利斯(2000)、梅姬(2016)等颱風侵襲時發生之破壞，如表 9.13.13 所示，其中以民國 83 年提姆颱風來襲時造成胸牆 487 公尺之結構破壞最為嚴重。以下先將就過往結構受損情形進行初探。

為瞭解花蓮港東防波堤過去曾發生之破壞情況，本工作團隊初步蒐集過往現勘照片，並佐以花蓮港務局提供之相關災損照片，將破壞型式大致歸納為以下幾類，現場照片詳圖 9.1 至圖 9.1 所示。

1. 消波塊體的流失情形

由位置 A 可清楚發現東堤海側，原拋放 40t 或 50t 的消波塊都已消失於水下，由於原設計用於抵擋或削減波力之消波塊已滑落至水下，導致東防波堤所受波力增大，將對東防波堤結構安全產生不良之影響。

2. 防波堤堤體的破損情形

位置 A 亦曾發生防波堤堤體破損情況，原沉箱堤面場鑄混凝土已不復可見，且因受颱風影響，沉箱堤體已被巨浪完全貫穿，於水面上可視之堤體均已消失，僅剩港側胸牆以長跨距型式懸空於堤址上，如

此將造成防波堤不連續，形成一缺口，且因其通水面積束縮，流速加快，未來將可能導致缺口兩側堤址之淘刷，擴大堤體破壞面積。

3. 海側開孔胸牆的斷裂與位移情形

由位置 B、C 及 D 破壞情形可知，由於開孔胸牆係採取分層澆置，可能因施工縫未妥善處理導致產生混凝土弱面，若再加上極端波浪作用下，將使混凝土單元間因失去摩擦抵抗力而發生移動及破壞之情形。

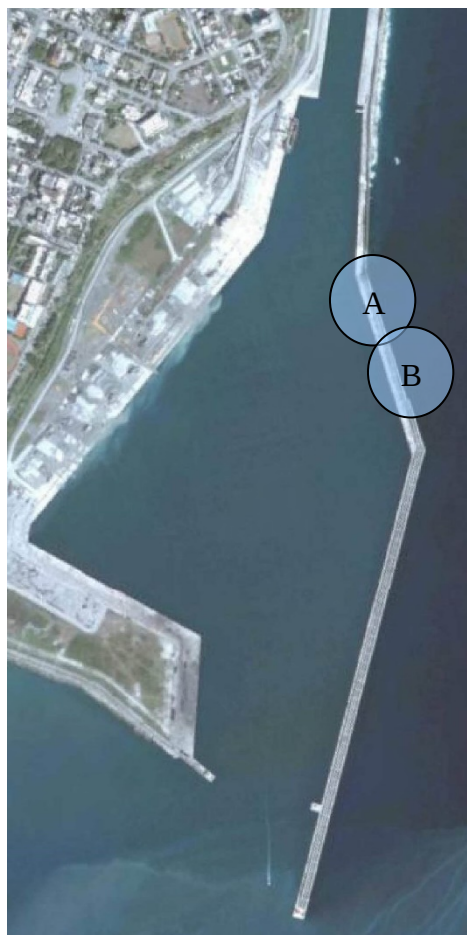
4. 側牆的裂縫情形

由位置 E 破壞情形可知，消波艙側牆發生直線型裂縫的龜裂現象，此原因可能是大量越波水量以及由孔洞進入消波室的水量在某一特殊時間差的狀況下，限制了消波室裡空氣或水量的溢散，導致因壓縮而對消波室側壁產生側向波壓，最終使側壁因承受超過預期之波力而發生龜裂，另由位置 F 照片可看出，新的側牆修復型式，除依原先設計尺寸外，並新增直徑 6” 之洩壓孔，應是為減少側向波壓之功能。

表 9.13 東堤歷年颱風災害資料

颱風 名稱	颱風 日期	災損範圍	修復經費 (仟元)	備 註
歐菲莉 颱風	79.06. 23	268個	7,380	西堤20T雙T塊沖失50個 東堤潛堤40T雙T塊沖失200個 東堤存放堤面道路40T雙T塊沖失18個
黛特 颱風	79.09. 07	沉箱75公尺 胸牆混凝140公尺 40T雙T塊沖失 100個	6,844	東堤NO.34座及相鄰NO.33、35沖毀 75公尺及第三道胸牆混凝140公尺沖毀 新舊東堤交角40T雙T塊沖失100個
艾美 颱風	80.07. 18	東堤50公尺	1,258	東堤NO.24 NO.35第三道胸牆沖毀50公尺
提姆 颱風	83.07. 10	胸牆混凝487公尺	19,000	0k+517-0k+581 0k+613-0k+870 0k+921-0k+966 1k+173-1k+223 1k+679-1k+750

道格 颱風	83.08. 07	西堤20T雙T塊沖 失600個 #25碼頭岸壁消波 RC梁柱98公尺	39,560	西堤20T雙T塊沖失600個 #25碼頭岸壁消波RC梁柱沖毀98公尺
安珀 颱風	86.08. 29	266公尺	9,230	1k+299-1k+463 1k+578-1k+680
碧利斯 颱風	89.08. 22	300公尺	10,500	舊東堤1k+125-1k+169 0k+426-0k+459 新東堤 1k+762-1k+788.65 0k+068-0k+94 1+765.4-1k+788.65
梅姬 颱風	105.0 9.27	沉箱25公尺	-	東堤NO.65堤基淘空



A

消波塊流失



B

海側開孔胸牆龜裂



圖 9.17 花蓮港東防波堤破壞情況(1)

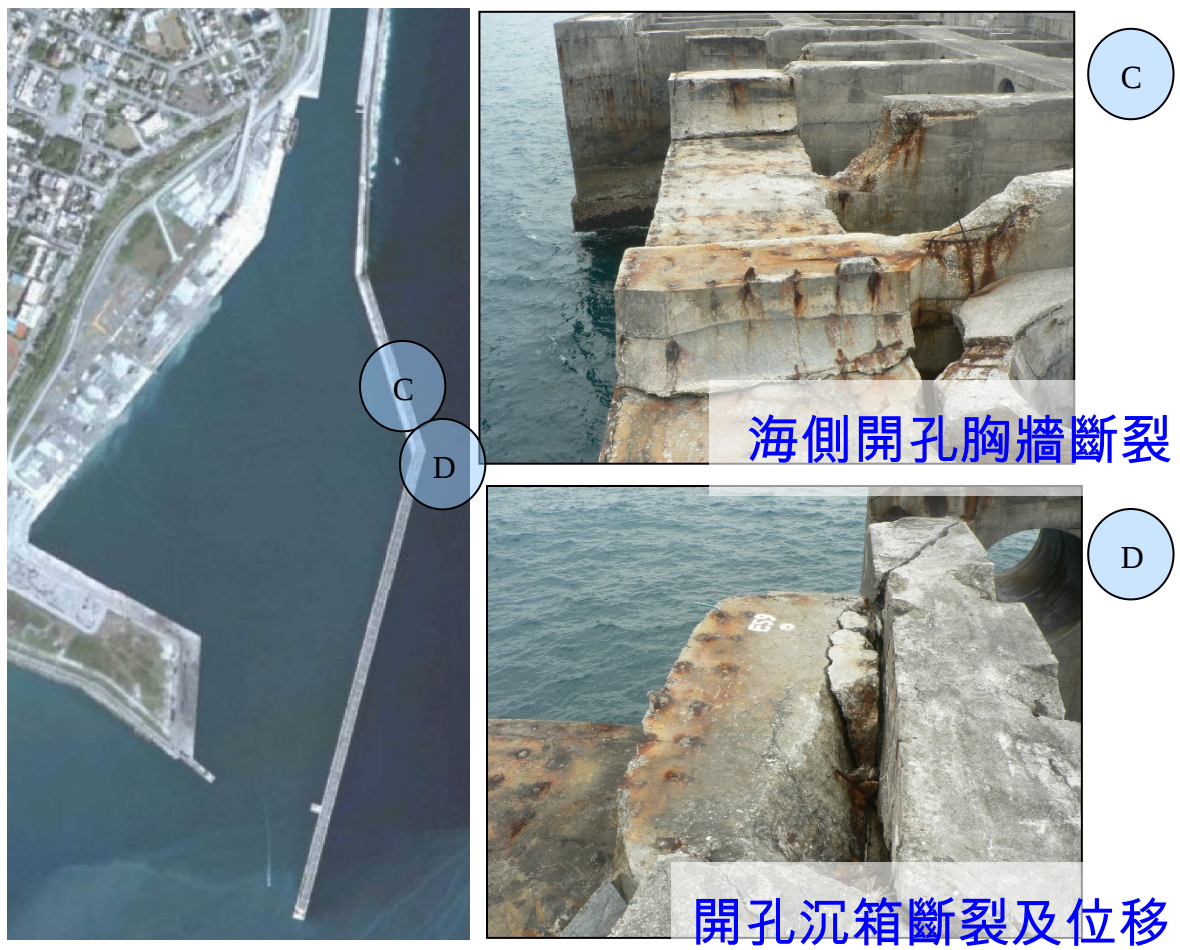


圖 9.18 花蓮港東防波堤破壞情況(2)



圖 9.19 花蓮港東防波堤破壞情況(3)

(二)受損結構補強短期及長期方案研擬

1. 基礎掏空及護基方塊位移補強方案研擬

考慮現有護基方塊移動將造成堤基掏空後使沉箱發生前傾現象，此狀況對沉箱擋浪功能之影響有限，但若長時期之掏空，亦不排除造成沉箱本體損傷而致破壞，故護基方塊之穩定性雖屬附屬保護設施，但其安全性亦需重視，今研擬 2 種修補基礎掏空方案，分述如后。

(1) 緊急修復—利用拋石修復基礎掏空並採用空心或開孔方塊作堤基

考量現有護基方塊重量不足並已位移，故建議可先以吊移或破碎方式將其清除，再利用石塊修補現有基礎掏空處及將堤前拋石基礎整平，最後，再重新放置開孔或實心方塊作為護基方塊，惟若以本計畫所計算之 50 年迴歸期颱風波浪計算，其方塊重量需達 101t 或開孔方塊

需達 46t 以上，方可確定不會移動，故建議可直接採用開孔方塊 ($l(m) \times b(m) \times h(m) = 5.0 \times 2.5 \times 2.0, t = 0.3m$) 或空心方塊並回填塊石方式使其重量達到 101t 以上，作為本計畫所需之護基方塊。

(2) 逐年維護(永久修復)—利用水中混凝土修補淘空部位

為防止現有堤基繼續淘空並使其護基方塊達到所需重量，可參考日本於阪神大地震後神戶港之修復工法，建議可採用水中混凝土將現有基礎淘空處及護基方塊一併澆置，詳圖 9.所示，藉由水中混凝土修補現有淘空部位，以防止堤基細料繼續流失及使其重量達到 101t 以上，以確保現有堤基之穩定性。

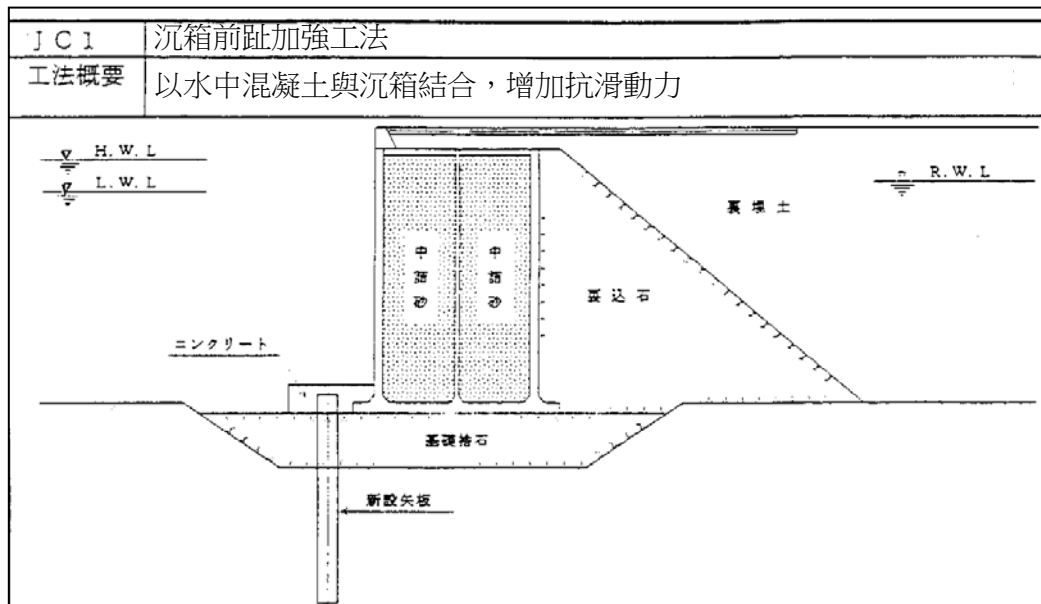


圖 9.20 沉箱前趾加強工法圖

2. 消波艙破壞補強方案研擬

有鑑於消波艙屬防波堤上部胸牆結構，其損壞對防波堤主體結構之影響較低，故建議僅需考慮逐年維護(永久修復)方案，視未來經費籌措情形辦理即可，今將消波艙破壞之修復方案說明如后。經上述消波艙安全性分析可知，其破壞類型包括開孔面及側牆破壞兩種，但整體而論皆屬於消波艙本身結構性破壞，因此，消波艙之補強方案初步可採用以下幾種方法。

(1) 消波艙開孔面及側牆面加厚

因側牆會發生破壞之原因，其中可能是波力作用於外牆時並非均勻分佈，如波力較偏於一側，則會造側牆受彎矩作用產生破壞而分離，因此，補強方案可採用消波艙開孔面及側牆加厚方式，來增加抵抗彎矩破壞作用力，惟此法可能因降低開孔之孔隙率而使堤面承受正向之波力增大，但由現況堤體穩定分析可知，因滑動安全係數依原設計條件估算尚達 1.27，故增加部分波力應不致影響堤體安全結構。

(2) 消波艙內填放塊石

此法係利用大型塊石填充於消波艙內，除可增加堤體自重外，亦可藉由填充艙內空間來增加消波艙開孔面及側牆抵抗力矩，惟此法需甚考量消波孔直徑與塊石大小之關係，亦即需採用大型塊石以防止塊石藉由消波孔流失，有關消波效果，則可以水工模型試驗加以確認。

(3) 消波艙內填放消波塊

此法補強原理與上述填放塊石相同，惟考慮大型塊石取得不易，且容易由消波孔流失之問題，因此，可考量採用消波塊替代，惟填放之消波塊應慎選固定性較佳且適合本計畫既有消波艙尺寸之型式。

3. 沉箱隙縫問題探討

經查沉箱隙縫約達 0.4m~1.0m，考量原先沉箱與沉箱間距在施工時均預留 0.1m~0.2m，故首先需釐清現有沉箱隙縫是否為受波浪外力所產生之移動或是施工階段因定位不當而產生之，經本計畫結構穩定計算可知，無論是原設計或本計畫重新推算之波浪條件，其滑動及傾倒之安全係數都大於 1.0，顯示現有沉箱因無受波浪外力而產生移動之可能，故現有沉箱隙縫應屬施工不當所造成之情形，亦即現有沉箱隙縫應為完成初期即發生之情形，故將不致有持續擴大之趨勢發生。惟需注意未來隙縫可能造成護基方塊移動或堤基石料淘空之情形，所幸經現有勘查結果發現，現有沉箱隙縫尚未造成上述損壞情形，未來仍需藉由持續監測瞭解是否有上述之損壞情形，若一經發現因沉箱隙縫所造成淘空之情形，將可比照本計畫所建議之基礎淘空及護基方塊位移補強方案辦理後續維護。

4. 沉箱堤體修復方式—以#65 沉箱為例

有鑑於沉箱堤體破壞茲事體大，且因#65 沉箱位處防波堤中段，此處破壞將造成其通水面積束縮，流速加快，未來亦可能導致缺口兩側堤址之淘刷，擴大堤體破壞面積。而經參考花蓮港務分公司提供之堤址水深圖(如圖 9.21 所示)，並將水深繪於斷面上(詳圖 9.2)以瞭解其破壞程度，圖中框線範圍內表尚存之構造物，由此可知，本段防波堤於海側之水下沉箱構造物均已損毀，僅存基礎拋石，港側則尚有部分沉箱構造物留存，惟其已無功能性可言。因此，考量搶修時程緊迫，初步建議以水中混凝土直接進行澆置，以節省工期，然本施工關鍵為如何於湍急水流中組裝模板，以降低波流對水中混凝土打設之影響，經評估因現有鋼板樁長度最長約 21m，而本修復斷面所需長度約為 30m，無法直接使用於本修復斷面中，故建議以 H 型鋼及鋼承板替之，如圖 9-3 所示，完成模板組立後，再以水中混凝土分層澆置，最後打設場鑄混凝土及修復消波式開孔胸牆。

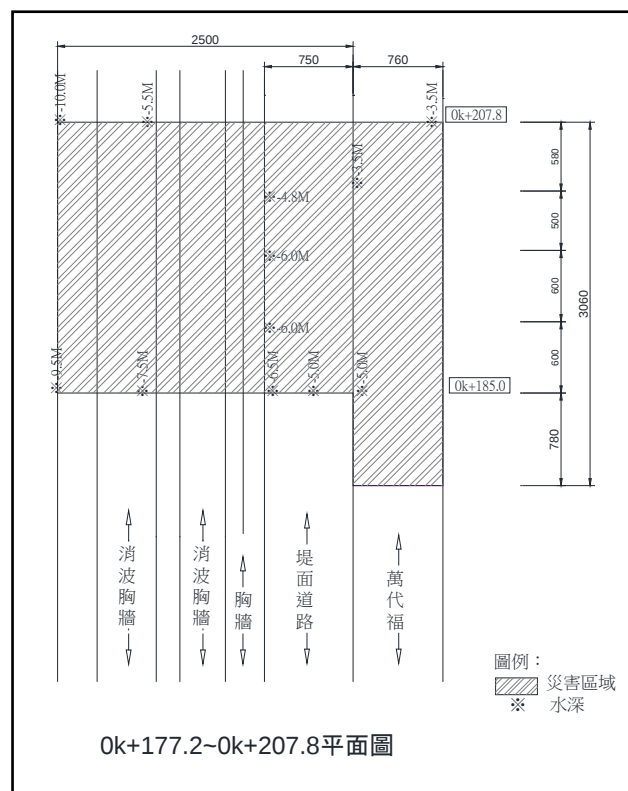


圖 9.21 0k+177.2~0k+207.8 水深平面圖

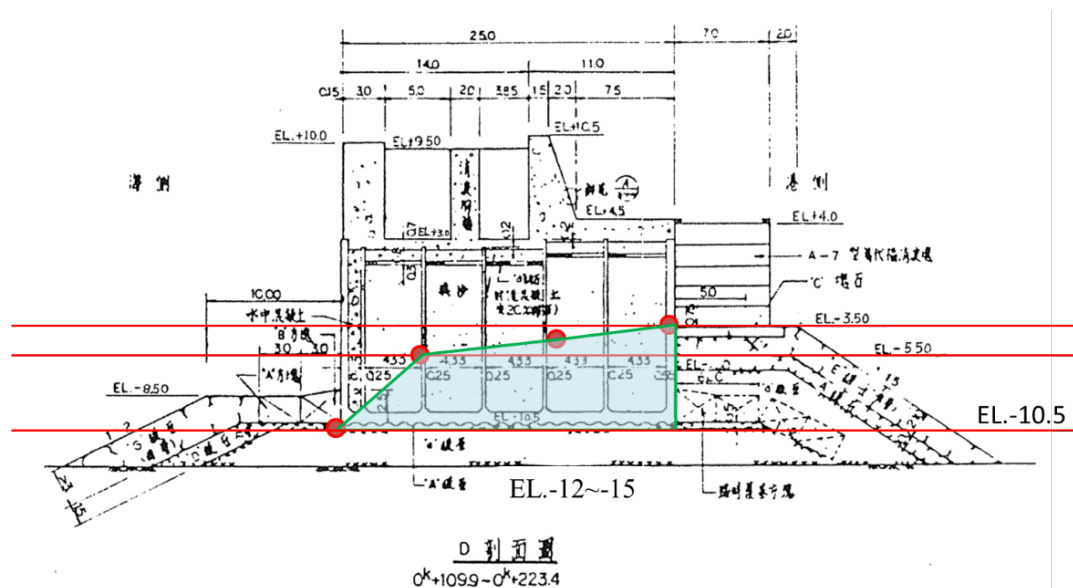
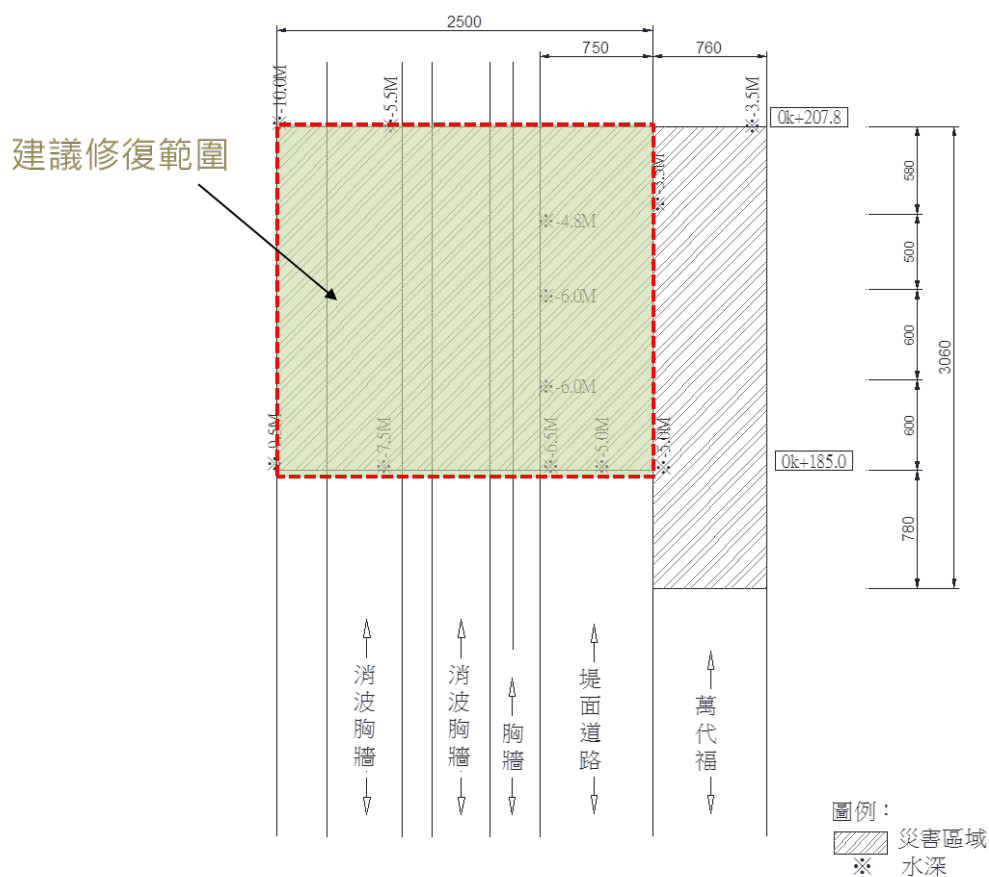
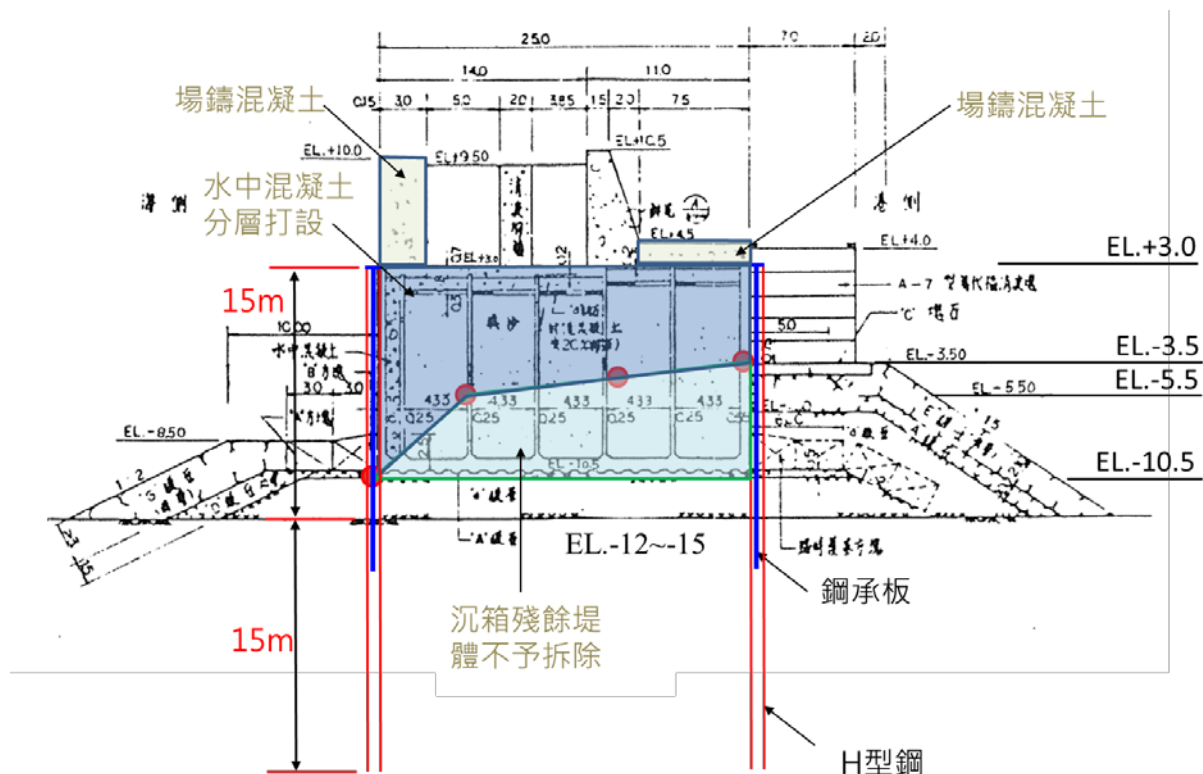


圖 9.2、0k+177.2~0k+207.8 水深斷面圖



0k+177.2~0k+207.8平面圖

圖 9-3、0k+177.2~0k+207.8 建議修復平面圖



註：本計畫分析彙整

圖 9-4、0k+177.2~0k+207.8 建議修復斷面圖

本計畫針對臺中港進行 M5 最小化模式樹之建構，並更新往昔發展的臺中港類神經波浪推算模式，以比較兩種波浪推算模式的精度及特性。2 維數值風浪推算模式以往年的工作經驗透過 WRF 追算高解析度的風場資料來推算高精度的極值樣本，再考慮本計畫所分析氣候變遷對波高所造成的影響量進行設計波推算。所獲得之結論、建議分述如下。

9.1 結論

1. 本計畫針對 1951 年至 2015 共 65 年內侵襲臺中港颱風做相關統計與趨勢分析後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無明顯趨勢。以門檻值 500km 來看每年增加率平均約為 0.0155 次/年，以現有颱風紀錄而言每 50 年約會增加 0.78 個颱風的侵襲機會。

2. 以線性趨勢分析、EMD 法趨勢分析臺中港波浪長期趨勢所計算出來的年增率皆為負值，各種取樣方式不同造成年增率有所差異，但 Seasonal Kendall 趨勢檢定趨勢檢定法則有不同的結果，無母數分析的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法可適用於資料缺漏與週期性變化的情形，其分析結果應較具代表性。此外，冬季與夏季作用期間的取樣方式也一併進行分析，結果顯示去除夏季資料後僅以 11 月至次年 4 月的波浪長期變化趨勢與全部資料的分析結果較為相近，而去除冬季資料僅分析 5~10 月的波浪年增率雖然一樣是遞減的趨勢，但其變化趨勢較不明顯。
3. 本計畫蒐集 2003 年至 2015 年臺中港颱風波浪資料配合較適用的 SLOSH 參數模型風場更新臺中港類神經網路波浪推算模式，以提升模式推算能力。針對目前已建立完成的颱風波浪推算模式進行比較，由於颱風波浪樣本的新增，已大幅提升臺中港的波浪推算能力，改善往昔臺灣西岸推算能力較東岸差的情況。
4. 臺中港 M5 最小化模式樹波浪推算模式，在驗證結果中顯示 M5 模式可以達到與類神經模式相當的推算能力。以臺中港 42 場颱風來評估兩種模式，四種評估指標皆顯示以類神經模式較佳。本計畫並針對推算較差的幾場颱風進行探討，發現兩種模式對於少數幾場颱風的峰值部分無法妥善模擬，推估結果會與實測波高峰值甚至相差 3m 以上。另發現兩種模式推算峰值發生時間在特定兩類路徑的情況會有較明顯誤差，分別為菲律賓群島處由西向東的颱風與宜蘭外海往西北方前進的颱風。在上述分析與比較中可發現類神經模式推算颱風波浪的精度較 M5 模式好，尤其在峰值發生時間部分類神經模式所推估的結果較為可靠，回顧前三年度的各港的比較結果也有相同的結果，故現階段在應用上仍建議採用以類神經模式較為合適。
5. 本計畫完成七個主要港口的類神經颱風波浪推算模式之更新，驗證結果顯示西部海岸的臺中港、安平港與高雄港的峰值波高誤差平均絕對值介於 0.67m 至 0.90m 之間，北部的臺北港與基隆港介於 0.93m 至 0.95m，東部海岸花蓮與蘇澳港則介於 0.98m 至 1.09m 之間，整

體而言各港的波高峰值誤差平均絕對值僅有蘇澳港略大於 1m，顯示類神經颱風波浪推算模式的精度已相當準確，東部海岸與北部海岸誤差稍大的原因為此二海域遭受颱風波浪較大。峰值發生時間的誤差平均絕對值各港約介於 5.04 小時至 8.21 小時間，考慮輸入模式的颱風資料為每六小時一筆的情況來看，此誤差範圍相當合理。目前類神經颱風波浪推算模式已可應用於即時颱風波浪推算與預測，由上述誤差來看各港都有良好的推估結果，應用於台灣各海域也沒有明顯的差異。

6. 經過兩年多的大量運算，本計畫透過 WRF 模式追算高解析度的風場資料，並以此為輸入條件來提升二維數值風浪推算模式的推算能力，驗證結果顯示北部的基隆港與臺北港峰值誤差之平均絕對值分別為 0.69 與 0.68m，臺中港為 0.86m，南部的安平港與高雄港分別為 0.57m 與 0.46m，東部的花蓮港與蘇澳港則分別為 1.04m 與 0.86m。此結果顯示只有花蓮港誤差大於 1m，整體而言各港波高峰值的推算結果都有很高的精度。而各港峰值發生時間誤差的平均絕對值平均為 5.1 小時，RMSE 平均為 0.57m， R^2 平均為 0.82。顯示二維數值模式能提供高精度且具備方向性的樣本資料，故在設計波樣本的應用上為最好的選擇，類神經與 M5 最小化模式樹等波浪波算模式由於其計算快速且預報資料取得容易，較適合應用於即時預報。
7. 本年度完成臺中港設計波高的推算，並整合前三年度的六個主要港口，在考慮氣候變遷影響量的情況下計算出建議的設計波高範圍。花蓮港測站位置 50 年重現期的建議設計波高範圍為 8.48~11.10m，蘇澳港為 9.58~12.00m，臺北港為 7.35~9.76m，基隆港為 8.05~11.16m，安平港為 6.52~8.32m，高雄港為 6.95~8.76m，臺中港則為 7.44~9.39m。此外本計畫並完成設計波資訊互動網頁介面的建立。

9.2 建議

類神經颱風波浪推算模式的研究成果目前仍有改善的空間，除了各場颱風波高峰值的誤差量還有其誤差發生時間的延遲，未來若有更

新的波浪資料或颱風資訊供學習或驗證可再提升模式之可靠度。其中第五章所歸納出由台灣南端與菲律賓群島間自東向西行與宜蘭外海處向西北往中國大陸前進的兩類路徑需要更多的類似颱風事件來進行分析與比較，以尋求改善方法。

9.3 成果效益及後續應用情形

本年度研究成果可提供臺中港務公司檢核設計波浪之資訊。本計畫中的類神經颱風波浪推算模式與 M5 模式樹波浪推算模式亦可提供臺中港務公司推算颱風侵臺時兩港域可能會發生的波浪災害，以達成預警的功能。颱風與波浪長期趨勢分析成果可作為未來工程與環境評估之參考。

另外整合本計畫四個年度的成果，本計畫創新研發 M5 模式應用於颱風波浪推算之技術，可供後續研發參考，M5 模式在本計畫中雖然不及類神經與二維數值模式之精度，但在其他領域的應用上可提供另一種機械學習方式來解決多因子等較複雜的問題。本計畫所採用的趨勢分析方法，已於文中說明各種方法應用在波浪長期趨勢分析上的差異，EMD 與線性回歸檢測法在資料取樣上所造成的差異，以及無母數的 Seasonal Kendall 法的應用也可供相關領域之研究做為參考。

在考慮氣候變遷影響量的情況下本計畫已推估各港測站位置的建議的設計波高範圍，經專家座談會討論出合適的外海推算點後，即可針對各港的外海推算點進行設計波的估算，未來能由港研中心公布各港外海推算點的建議設計波高範圍，可供相關規劃設計與營運相關單位作為標準，精確且具代表性的設計波高標準除了可以提升國內港灣工程技術外，更可避免往昔各單位推算方法與標準不同而造成的爭議。

參考文獻

1. 合田良実、小舟浩治，「波浪の極値統計における分布関数の棄却基準」，海岸工学論文集，第 36 卷，135-139(1989)。
2. 吳志剛，「氣候變遷對高屏溪流域水資源衝擊之探討」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文(2000)。
3. 郭一羽，「海岸工程學」，文山書局，第四章(2001)
4. 郭鎮維、李建堂，「翡翠水庫上游集水區水質趨勢分析」，地理學報，第三十八期，111-128(2004)。
5. 江玟德、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、何良勝，「臺灣主要港口附近海域長期波浪統計特性及設計波(3/4)」，交通部運輸研究所(2011)。
6. 張憲國、劉勁成、陳蔚瑋，「以 M5 模式及經驗公式推算透水與不透水堤面之波浪反射率」，第三十三屆海洋工程研討會論文集，高雄，臺灣(2011)。
7. 張書瑋，「氣候變遷下臺灣海岸地區脆弱度分析」，國立海洋大學河海工程學系碩士論文(2011)。
8. 陳蔚瑋、何良勝、林賢銘、張憲國，「結合歸屬函數之類神經網路颱風波浪推算模式」，第三十三屆海洋工程研討會論文集，高雄，臺灣(2011)。
9. 葉弘德，「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(2012)。
10. 趙紀翔，「氣候變遷對蘭陽溪流域影響評估」，國立台北科技大學環境工程與管理研究所碩士論文(2012)。
11. 邱品竣，「西北太平洋地區颱風活動研究：與氣候變遷之關係」，中國文化大學地學研究所博士論文(2012)。
12. 陳蔚瑋、張憲國、何良勝、劉勁成，「應用二維歸屬函數建立臺

中港類神經網路颱風波浪推算模式」，第三十四屆海洋工程研討會論文集，臺南，臺灣(2012)。

- 13.吳祚任，「臺灣海域近岸風暴潮溢淹預報模式之開發與研究(3/4)」，交通部中央氣象局(2014)。
- 14.Audiffren, N. (2000) "Mann-Kendall data tests for Ozone 1995-1999 data series at the PUY de Dome and in the AUVERGNE Region (France)," *Tropospheric Ozone Research Annual Report 2000*, 43-93.
- 15.Bhattacharya, B and D.P. Solomatine (2005) "Neural networks and M5 model trees in modeling water level-discharge relationship," *Neurocomputing*, 63, 381-396.
- 16.Chester, D. (1990) "Why two hidden layers are better than one," *In Proceeding IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Washington, D.C. 265-268.
- 17.Cios, K., Pedrycz, W., Seiniarski, R. W. and Kurgan, L. A. (2007) "Data mining, a knowledge discovery approach," Springer.
- 18.Davison, A.C. (1984) "Modelling excesses over high thresholds, with an application," *In: Tiago de Oliveira, J. (Ed.), Statistical Extremes and Applications. NATO Adv. Sci. Ser. C Math-Phys. Sci., Reidel, Dordrecht*, 461-482.
- 19.Davison, A.C. and Smith, R.L. (1990) "Models for exceedances over high thresholds with discussion," *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 62, 191-208.
- 20.Dawson, C W. and Wilby, R. L. (2001) "Hydrological Modeling Using Artificial Neural Networks," *Progress in Physical Geography*, 25(1): 80-108.
- 21.DHI (2011), User guide and reference manual of MIKE 21-coastal hydraulics and oceanography hydrodynamic model, Danish Hydraulic Institute.
- 22.Elsinghorst, C., Groeneboom, P., Jonathan, P., Smulders, L. and Taylor, P.H. (1998) "Extreme value analysis of North Sea storm

- severity," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120, 3, 177- 183.
23. Etemad-Shahidi, A. and Mahjoobi, J. (2009) "Comparison between M5' model tree and neural networks for prediction of significant wave height in Lake Superior," *Ocean Engineering*, 36, 1175-1181.
 24. Ferreira, J.A. and Guedes Soares, C. (1998) "An application of the peaks over threshold method to predict extremes of significant wave height," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120, 3, 165-176.
 25. Garg, A., Tai, K., Lee, C. H. and Savalani, M. M. (2014) "A Hybrid M5' -Genetic Programming Approach For Ensuring Greater Trustworthiness Of Prediction Ability In Modeling Of FDM Process," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, 1349-1365.
 26. Goda, Y. (2000) "Random Seas and Design of Maritime Structures," In: Liu, P.L.-F. (Ed.), *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 15. World Scientific, Singapore.
 27. Guedes Soares, C., Henriques, A.C. (1996) "Statistical uncertainty in long-term distributions of significant wave height," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 11, 284-291.
 28. Guedes Soares, C., Scotto, M. (2001) "Modelling uncertainty of long-term predictions of significant wave height," *Ocean Engineering* 28, 329-342.
 29. Guedes Soares, C. (1986) "Assessment of the uncertainty in visual observations of wave height," *Ocean Engineering*, 13, 1, 37-56.
 30. Haver, S. (1985) "Wave Climate off northern Norway," *Applied Ocean Research*, 7, 85-92.
 31. Hayashi, Y., Sakata, M., and Gallant, S.I. (1990) "Multi-layer versus single-layer neural networks and an application to reading hand-stamped characters," *In proceeding International Conference on Neural Networks*, Paris, 781-784.
 32. Hirsch, R. M., Slack, J. R. and Smith, R. A. (1982) "Techniques of

- trend analysis for monthly water quality data," *Water Resources Research*, 18, 1, 107-121.
- 33.Hirsch, R. M. and Slack, J. R. (1984) "A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence," *Water Resources Research*, 20, 6, 727-732.
 - 34.Holthuijsen, L.H, N. Booij and T.H.C. Herbers (1989), "A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents," *Coastal Engineering*, 13, 23-54.
 - 35.Houston, S.H., and Powell, M.D. (1994) "Observed and modeled wind and water-level response from tropical storm Marco (1990)," *Weather and Forecasting*, 9, 3, 427-439.
 - 36.Houston, S.H., Shaffer, W.A., Powell, M.D., and Chen, J. (1999) "Comparisons of HRD and SLOSH surface wind fields in hurricanes: Implications for storm surge modeling," *Weather and Forecasting*, 14, 5, 671-686.
 - 37.Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. and Liu, H.H. (1998) "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," *Proc. Roy. Soc.London A*, 454, 903-995.
 - 38.Huang, W., and Foo, S. (2002) "Neural network modeling of salinity variation in Apalachicola River," *Water Research*, Vol. 36, 356-362.
 - 39.Hush, D.R., and Horne, B.G. (1993) "Progress in supervised neural network: what's new since lippmann," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 10, 8-39.
 - 40.Jain, P. and Deo, M.C. (2008) "Artificial Intelligence Tools to Forecast Ocean Waves in Real Time," *The Open Ocean Engineering Journal*, 1, 13-20.
 - 41.Kecman, V. (2001) "Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks , and Fuzzy Logic Models," *The MIT Press Cambridge, Massachusetts London , England*.

42. Kendall, M. G. (1975) "Rank Correlation Methods," London: Charles Griffin.
43. Knaff, J.A., C. R. Sampson, M. DeMaria, T. P. Marchok, J. M. Gross, and McAdie, C. J. (2007) "Statistical Tropical Cyclone Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence," *Wea. Forecasting*, 22, 4, 781-791.
44. Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Doneland, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P.A.E.M. Janssen, (1994), Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, UK, 560p.
45. Kurkova, V. (1992) "Kolmogorov's Theorem and multilayer neural networks," *Neural Networks*, Vol. 5, 501-506.
46. Mann, H. B., (1945) "Non-parametric tests against trend," *Econometrica*, 13, 245-259.
47. Mendez, F.J., Menendez, M., Luceno, A. and Losada, I.J. (2006) "Estimation of the long-term variability of extreme significant wave height using a time-dependent POT model," *Journal of Geophysical Research*, 111, C07024.
48. Moller M, (1993) "A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning," *Neural Networks*, 6(4), 525-533.
49. Naess, A. and Clausen, P.H. (2002) "The impact of data accuracy on the POT estimates of long return period design values," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 124, 53-58.
50. Quinlan J.R. (1992) "Learning with continuous classes," Proceedings of 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, World Scientific, Singapore, 343-348.
51. Raika, A., Pietilainen, O. P., Rekolainen, S., Kauppila, P., Pitkanen, H., Niemi, J., Raateland, A. and Vuorenmaa, J. (2003) "Trends of phosphorus, nitrogen and chlorophyll a concentrations in Finnish rivers and lakes in 1975-2000," *The Science of the Total Environment*, 310, 47-59.

52. Rilling, G., Flandrin, P. and Goncalves, P. (2003) "On empirical mode decomposition and its algorithm," *Proc. IEEE-EURASIP Workshop NonLinear Signal Image Process.*
53. Saha, S. and Coauthors (2010) "The NCEP Climate Forecast System Reanalysis," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015-1057.
54. Samadi, M., Jabbari, E., Azamathulla, H. M. (2014) "Assessment of M5 model tree and classification and regression trees for prediction of scour depth below free overfall spillways," *Neural Comput & Applic.*, 24, 2, 357-366.
55. Sen, P. K. (1968) "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau," *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
56. Smith, R.L. (1986) "Extreme value theory based on the r largest annual events," *Journal of Hydrology*, 86, 27-43.
57. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, and Dudhia, J. (2001) "Prototype for the WRF (Weather Research and Forecasting) model," *Preprints, Ninth Conf. on Mesoscale Processes, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc.*, J11-J15.
58. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and Powers, J. G. (2005) A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR/TN-468_STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 88pp.
59. Skamarock, W. C. (2008) A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech Note NCAR/TN-4751STR, 125 pp.
60. Suh, K. D., Kim, M. and Chun J. (2013) "Estimation of design wave height using empirical simulation technique," *Ocean Engineering*, 61, 39-49.
61. U.S. Army Corps of Engineers (2002) Coastal Engineering Manual. Engineer Manual, Washington, D.C.
62. Van Vledder, G., Goda, Y., Hawkes, P., Mansard, E., Martin, M.J., Mathiesen, M., Peltier, E., Thompson, E. (1993) "Case studies of

- extreme wave analysis: a comparative analysis," *Proceedings of the Second International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*. ASCE, New York, 978-992.
63. Walker, W. W. (1991) "Water quality trends at inflows to Everglades National Park," *Water Resources Bulletin*, 27, 1, 59-72.
 64. Wang Y. and Witten I.H. (1997) "Induction of model trees for predicting continuous classes," *Proceedings European Conference on Machine Learning*, Prague, 128-137.
 65. Weibull, W. (1951) "A statistical distribution function of wide application," *Journal of Applied Mechanics*, 18, 293.
 66. Witten, I. H., and Frank, E. (2005) "Data Mining : Practical Machine Learning Tools and Techniques (2nd ed.)," San Francisco : Morgan Kaufmann.
 67. Woolf, D. K., Cotton, P. D. and Challenor, P. G. (2003) "Measurements of the offshore wave climate around the British Isles by satellite altimeter," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* , 361, 27.
 68. Young, I.R. (1999), Wind Generated Ocean Waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.
 69. Young, I. R., Zieger, S., Babanin, A. V. (2011) "Global Trends in Wind Speed and Wave Height," *Science*, 332, 6028, 451-455.
 70. Yue, S. and Hashino, M. (2003) "Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan," *Journal of the American Water Resources Association*, 39, 3, 587-596.
 71. Zahiri, A., Azamathulla, H. M. (2014) "Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels," *Neural Comput & Applic*, 24, 413-420.
 72. Zheng, C. W., Li, C. Y. (2015) "Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 381-387.

73. Zipper, C. E., Holtzman, G. I., Darken, P. F., Gildea, J. J. and Stewart, R. E. (2002) "Virginia USA water quality, 1978 to 1995: regional interpretation," *Journal of the American Water Resources Association*, 38, 3, 789-802.