

105-123-7903  
MOTC-IOT-104-H2DB001c

# 104 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 105 年 12 月

105-123-7903  
MOTC-IOT-104-H2DB001c

# 104 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 105 年 12 月

105

104  
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 : 1010503157  
定價 200 元

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. 104年 / 何良勝, 林受勳, 陳志弘著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民國105.12

面 ; 公分  
ISBN 978-986-05-1649-4(平裝)

1. 波動 2. 資訊管理系統 3. 臺灣

351.9

105025322

104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](http://www.ihmt.gov.tw) (中文版>中心出版品)

電話：(04)26587121

出版年月：中華民國 105 年 12 月

印刷者：

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究中心網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1010503157

ISBN：978-986-05-1649-4 (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。

## 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：104 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 ISBN: 978-986-05-1649-4 (平裝)	政府出版品統一編號 1010503157	運輸研究所出版品編號 105-123-7903	計畫編號 104-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 104 年 01 月 至 104 年 12 月
關鍵詞：防波堤維護管理資訊系統、波浪極值統計推算模式、颱風波浪推算			
摘要： <p>本報告為四年期程之第三年工作成果，報告內容主要包含建置安平港與高雄港兩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)及二維數值等三種模式的比較驗證；本研究亦針對安平港與高雄港兩港域進行氣候變遷對港域波浪影響、波浪極值統計推算分析探討，以及重新探討兩港域的設計波條件。另外，本年度亦針對基隆港辦理海嘯對防波堤結構物的影響探討。</p> <p>本研究所辦理之重新探討兩港域的設計波條件，以及海嘯對防波堤結構物的影響探討等項工作成果，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，所完成安平港與高雄港兩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。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
105 年 12 月	152	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： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 （解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密） <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

<b>TITLE: Setting Up Management Information System 2015 for the Safety of Taiwan Main Harbor Pools</b>			
ISBN 978-986-05-1649-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010503157	IOT SERIAL NUMBER 105-123-7903	PROJECT NUMBER 104-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			<b>PROJECT PERIOD</b> FROM January 2015 TO December 2015
<b>KEY WORDS:</b> breakwater safeguard and management system, ex-wave statistic estimating model, typhoon waves estimating			
<b>ABSTRACT:</b>  <p>The third year results for a four year term project include the establishment of typhoon-wave forecasting model for Anpin and Kaohsiung harbors. The artificial neural network method, M5 and a 2-D numerical model were applied for comparison. The climate change and extreme wave in these two harbors were also analyzed. Also, investigate security Keelung east caisson breakwater when the tsunami struck.</p> <p>The estimate design wave and the tsunami struck breakwater 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 Anpin and Kaohsiung harbors can provide related bay and coastal construction programming and designing, environmental influence assessment and design wave evaluation for academic research need.</p>			
<b>DATE OF PUBLICATION</b> December 2016	<b>NUMBER OF PAGES</b> 152	<b>PRICE</b> 200	<b>CLASSIFICATION</b> <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目 錄

中英文摘要表.....	I
目 錄.....	III
表目錄.....	VII
圖目錄.....	X
第一章 前言.....	1-1
第二章 氣候變遷對港域波浪影響探討.....	2-1
2.1 資料來源與處理方式.....	2-1
2.2 颱風之長期變化趨勢.....	2-3
2.3 波浪之長期變遷趨勢.....	2-5
2.3.1 資料來源.....	2-5
2.3.2 分析方法.....	2-7
2.3.3 分析結果.....	2-11
第三章 港域颱風波浪推算模式建立.....	3-1
3.1 資料分析方法.....	3-1
3.2 類神經颱風波浪推算模式建置.....	3-7
3.2.1 類神經網路架構.....	3-7
3.2.2 模式輸入之轉換函數.....	3-11
3.3 類神經颱風波浪推算結果.....	3-20

3.4 最小化模式樹(M5)波浪推算模式建置.....	3-24
3.4.1 模式推算與驗證.....	3-26
3.5 類神經與 M5 模式之推算結果比較.....	3-30
3.6 各港域類神經模式推算精度比較.....	3-40
3.7 波浪推算模式誤差分析.....	3-41
3.8 二維數值推算模式建置.....	3-45
3.8.1 數值模擬條件.....	3-47
3.8.2 數值模式驗證.....	3-49
第四章 港域設計波浪條件探討.....	4-1
4.1 極值統計分析方法.....	4-1
4.1.1 資料取樣方式.....	4-1
4.1.2 極值分布函數.....	4-1
4.1.3 極值分布參數推定法.....	4-3
4.1.4 信賴檢定.....	4-4
4.1.5 推估值之標準差.....	4-6
4.2 極值統計分析結果.....	4-7
4.2.1 安平港的推算結果.....	4-7
4.2.2 高雄港的推算結果.....	4-12
第五章 海嘯對港灣防波堤構造物之影響探討.....	5-1
5.1 海嘯概述.....	5-2
5.1.1 海嘯強度與規模.....	5-4

5.2 國內外海嘯資料蒐集與分析 .....	5-10
5.2.1 國內海嘯資料蒐集與分析 .....	5-10
5.2.2 國外海嘯資料蒐集與分析 .....	5-14
5.3 海嘯對基隆港防波堤之影響探討 .....	5-18
5.3.1 基隆港區概述 .....	5-18
5.3.2 基隆港受海嘯影響初探 .....	5-19
5.3.3 防波堤受力分析探討 .....	5-22
5.3.4 堤址波力評估探討 .....	5-26
5.3.5 海嘯對防波堤安全性分析 .....	5-30
第六章 結論與建議 .....	6-1
6.1 結論與建議 .....	6-1
6.2 成果效益及後續應用情形 .....	6-3
參考文獻 .....	7-1

## 表 目 錄

表 2.1 安平港 1951 年至 2014 年颱風侵襲次數趨勢.....	2-3
表 2.2 高雄港 1951 年至 2014 年颱風侵襲次數趨勢.....	2-4
表 2.3 安平港 2000 年至 2014 年波浪資料蒐集率百分比 .....	2-6
表 2.4 高雄港 1999 年至 2012 年波浪資料蒐集率百分比 .....	2-6
表 2.5 安平港長期波浪趨勢分析結果.....	2-15
表 2.6 高雄港長期波高趨勢分析結果.....	2-20
表 3.1 建立安平港模式之颱風資訊與其對應最大波高.....	3-2
表 3.2 建立高雄港模式之颱風資訊與其對應最大波高.....	3-3
表 3.3 高雄港三種風場模型之比較.....	3-15
表 3.4 安平港類神經颱風波浪推算結果.....	3-21
表 3.5 高雄港類神經颱風波浪推算結果.....	3-23
表 3.6 安平港最小化模式樹波浪推算結果與驗證.....	3-27
表 3.7 高雄港最小化模式樹波浪推算結果與驗證.....	3-29
表 3.8 安平港兩種波浪推算模式的推估比較.....	3-31
表 3.9 高雄港兩種波浪推算模式的推估比較.....	3-35
表 3.10 高雄港兩種波浪推算模式的推估比較.....	3-41
表 3.11 安平港與高雄港波浪推算之誤差分析綜合比較.....	3-45
表 3.12 風浪推算模擬之網格設定內容.....	3-48
表 3.13 模式參數設定彙整表.....	3-49
表 3.14 安平港數值模式波浪推算結果與驗證.....	3-58

表 3.15 高雄港數值模式波浪推算結果與驗證.....	3-59
表 4.1 計算樣本順位機率之 $\alpha$ 及 $\beta$ 值.....	4-4
表 4.2 相關係數殘差平均值公式之係數 $\bar{a}$ , $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值.....	4-5
表 4.3 重現期推算量之標準差公式中之係數.....	4-7
表 4.4 安平港年極值取樣法之各重現期分析結果.....	4-8
表 4.5 安平港四種樣本來源的極值分析結果.....	4-12
表 4.6 高雄港年極值取樣法之各重現期分析結果.....	4-12
表 4.7 高雄港四種樣本來源的極值分析結果.....	4-16
表 5.1 基隆港歷史海嘯紀錄.....	5-1
表 5.2 Sieberg-Ambraseys 海嘯強度等級分類.....	5-5
表 5.3 Imamura-Iida 海嘯規模分級表.....	5-6
表 5.4 2001 海嘯強度等級分類.....	5-8
表 5.5 臺灣近岸疑似及未有實測紀錄之海嘯列表.....	5-12
表 5.6 臺灣近岸有實測記錄之海嘯列表(1951~2006).....	5-13
表 5.7 1900~2014 年造成重大傷亡之海嘯一覽表.....	5-14
表 5.8 東防波堤標準斷面資料彙整.....	5-28
表 5.9 原設計堤前設計波高.....	5-28
表 5.10 本研究推算之設計波高.....	5-29
表 5.11 原設計條件波力計算結果.....	5-29
表 5.12 基隆港東防波堤可承受最大海嘯高度.....	5-30
表 5.13 基隆港東防波堤 CASE1 各海嘯條件之容許抬升水位比較表.....	5-31

表 5.14 基隆港東防波堤 CASE3 各海嘯條件之容許抬升水位比較表 .....5-32

表 5.15 基隆港東防波堤延伸段 CASE4 各海嘯條件之容許抬升水位比較表 .....5-33

## 圖目錄

圖 2.1 安平港海氣象觀測位置圖 .....	2-2
圖 2.2 高雄港海氣象觀測位置圖 .....	2-2
圖 2.3 中度颱風侵襲安平港次數的趨勢分析(500km 門檻值).....	2-4
圖 2.4 中度颱風侵襲高雄港次數的趨勢分析(500km 門檻值).....	2-5
圖 2.5 安平港逐時波浪資料與其趨勢線.....	2-11
圖 2.6 安平港日平均波浪資料及其趨勢線.....	2-12
圖 2.7 安平港月平均波浪資料及其趨勢線.....	2-12
圖 2.8 安平港年平均波浪資料與其趨勢線.....	2-12
圖 2.9 安平港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-13
圖 2.10 安平港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-13
圖 2.11 安平港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-14
圖 2.12 安平港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-14
圖 2.13 高雄港逐時波浪資料與其趨勢線.....	2-16
圖 2.14 高雄港日平均波浪資料及其趨勢線.....	2-16
圖 2.15 高雄港月平均波浪資料及其趨勢線.....	2-17
圖 2.16 高雄港年平均波浪資料與其趨勢線.....	2-17
圖 2.17 高雄港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-18
圖 2.18 高雄港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-18
圖 2.19 高雄港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-19
圖 2.20 高雄港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-19

圖 3.1 臺灣地區颱風路徑分類圖(1897-2010 年)(引自中央氣象局)....	3-5
圖 3.2 颱風中心位置與安平港波高資料空間分布圖.....	3-6
圖 3.3 颱風中心位置與高雄港波高資料空間分布圖.....	3-7
圖 3.4 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數.....	3-12
圖 3.5 目標點對颱風中心的方位角 $\theta_1$ 與颱風移動方位角 $\theta_2$ 示意圖 .....	3-14
圖 3.6 颱風距離與目標點波高分布 .....	3-18
圖 3.7 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(引自中央氣象局) .....	3-19
圖 3.8 層級模組法示意圖( $a_i$ 為屬性, $M_i$ 為分群之模組) .....	3-24
圖 3.9 M5 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 .....	3-25
圖 3.10 安平港 M5 與類神經模式推算結果低估時的比較結果.....	3-32
圖 3.11 兩種模式推算碧利斯(2006)颱風與安平港實測波浪的結 比較 .....	3-33
圖 3.12 兩種模式推算鳳凰(2008)颱風與安平港實測波浪的結果比較 .....	3-34
圖 3.13 兩種模式推算莫拉克(2009)颱風與安平港實測波浪的結 果比較.....	3-34
圖 3.14 兩種模式推算娜克莉(2001)颱風與高雄港實測波浪的結 果比較.....	3-36
圖 3.15 高雄港 M5 與類神經模式推算的結果比較.....	3-37
圖 3.16 高雄港 M5 與類神經模式推算 2003 年杜鵑颱風的結果比 較 .....	3-38
圖 3.17 高雄港 M5 與類神經模式推算 2004 年敏督利颱風的結果 比較 .....	3-39

圖 3.18 高雄港 M5 與類神經模式推算 2008 年鳳凰颱風的結果比較 .....	3-39
圖 3.19 高雄港 M5 與類神經模式推算 2009 年莫拉菲颱風的結果比較 .....	3-40
圖 3.20 安平港波浪推算模式之推算波高誤差分析.....	3-42
圖 3.21 安平港波浪推算模式之推算峰值發生時間誤差分析 .....	3-43
圖 3.22 高雄港波浪推算模式之推算波高誤差分析.....	3-43
圖 3.23 高雄港各波浪推算模式之推算峰值發生時間誤差分析 .....	3-44
圖 3.24 風浪推算模擬範圍之地形水深.....	3-48
圖 3.25 安平港示性波高時序列比較.....	3-51
圖 3.26 高雄港示性波高時序列比較.....	3-54
圖 4.1 常數 k 在不同情況下的機率密度表現.....	4-3
圖 4.2 年極值取樣法在安平港實測波浪之機率密度函數圖 .....	4-9
圖 4.3 年極值取樣法在安平港類神經推算之機率密度函數圖 .....	4-10
圖 4.4 年極值取樣法在安平港二維數值推算之機率密度函數圖 ....	4-10
圖 4.5 年極值取樣法在安平港最小化模式樹推算之機率密度函數圖 .....	4-11
圖 4.6 年極值樣法在高雄港實測資料之機率密度函數圖.....	4-14
圖 4.7 年極值樣法在高雄港類神經推算之機率密度函數圖 .....	4-14
圖 4.8 年極值樣法在高雄港二維數值模式推算之機率密度函數圖 .....	4-15
圖 4.9 年極值樣法在高雄港最小化模式樹模式推算之機率密度函數圖 .....	4-15

圖 5.1 海嘯生成之示意圖 .....	5-3
圖 5.2 一般波浪與海嘯之比較圖 .....	5-3
圖 5.3 海嘯抵達岸邊之放大效應 .....	5-4
圖 5.4 Shuto(1994)所整理之海嘯災害與建築物受損程度分類 .....	5-7
圖 5.5 臺灣鄰近海域斷層分佈 .....	5-11
圖 5.6 2004.12.26 南亞海嘯最大波高分佈圖 .....	5-15
圖 5.7 2011.03.11 日本海嘯最大波高分佈圖 .....	5-16
圖 5.8 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(釜石港) .....	5-17
圖 5.9 碼頭與岸壁遭海嘯淘刷後受損情形(左：鹿島港，右：相 馬港) .....	5-17
圖 5.10 碼頭與岸壁遭海嘯破壞後受損情形(左：相馬港，右：茨 城港) .....	5-18
圖 5.11 基隆港區平面示意圖 .....	5-18
圖 5.12 1867 年基隆海嘯可能之海嘯源分佈圖 .....	5-20
圖 5.13 海底山崩 L2 情境(基隆陸棚)海嘯波高分佈圖 .....	5-20
圖 5.14 海底山崩 L3 情境(基隆海谷)海嘯波高分佈圖 .....	5-21
圖 5.15 海底山崩 L4 情境(棉花峽谷)海嘯波高分佈圖 .....	5-21
圖 5.16 海底火山爆發 V2 情境(基隆市西北方 35 公里處火山)海 嘯波高分佈圖 .....	5-22
圖 5.17 防波堤直立部份波壓分佈圖 .....	5-22
圖 5.18a 東防波堤沉箱標準斷面圖(1) .....	5-27
圖 5.18b 東防波堤沉箱標準斷面圖(2) .....	5-27

圖 5.18c 東防波堤沉箱標準斷面圖(3).....	5-27
圖 5.18d 東防波堤延伸段標準斷面圖(4).....	5-28

# 第一章 前言

臺灣四周環海，開發海洋與近岸資源、沿岸國土保全及航運航行安全等為海洋國家之工作與使命，而從事港灣工程規劃設計者冀望以長期可靠之海氣象資料，作為港灣構造物、港內設施與船隻碇泊等相關事項改善之依據，尤其當颱風或異常波浪來襲時，能及時的提供相關安全資訊，作為港務單位維護港池安全之依據。

由於臺灣地理位置正處於西太平洋颱風發生及主要行進的區域，夏秋兩季常受颱風侵襲，而颱風帶來的強大風浪及豪雨，不僅造成陸上人員傷亡與建築物的破壞，且當颱風來襲時，因颱風風力強力吹襲海面所形成的波浪具有較長週期與較大波高，波浪能量即較平時之季節風波浪強，相對於沿岸地形或港灣結構物的破壞也隨之增加。針對臺灣現有主要港口而言，建港年期已有相當時程，部分港灣結構物因損壞而須經年進行修建維護。其原因固是受颱風波浪作用，然由於早期港口建構時現場觀測資料之匱乏，其原有使用的設計波浪條件是否適用，此即值得重新加以審視探討；另外，如何提供港務單位瞭解防波堤構造物之安全性並降低維護成本，亦是本研究審思之課題。

爰此，本研究於本年度(104年)應用本所港研中心於安平港與高雄港兩港域長期觀測之波浪資料，以類神經網路、最小化模式樹(M5)與二維數值模式等方法探討兩港域適用的港域即時性颱風波浪推算模式建置，並應用其波浪推算結果分析探討兩港域波浪極值的最適分佈函數與統計分析特性，用以建立波浪極值統計分析模式，以及重新探討兩港域的設計波條件。另外，本年度亦針對基隆港辦理海嘯對防波堤結構物的影響探討。本研究期望結合波浪推算及海嘯的影響評估，可提供港務單位一套預警資訊管理系統，用以瞭解結構物之穩定性及安全性，有效運用資源，延長港務設施使用年限及降低維護成本。

本報告為本研究計畫期程(民國 102~105)之第三年工作成果，報告內容主要包括，第二章為探討氣候變遷對安平港與高雄港兩港域颱風

波浪的影響；第三章是建置安平與高雄兩港域的即時性颱風波浪推算模式；第四章則是進行兩港域的設計波條件探討；第五章係以海嘯對基隆港外廓防波堤構造物的影響探討；最後則為本報告的結論與建議。

## 第二章 氣候變遷對港域波浪影響探討

在 20 世紀中期以後，由於全球平均氣溫逐漸升高而造成全球暖化的現象，近年來漸漸以「氣候變遷」說法所取代，其強調氣候的改變並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。因此，本研究本年度亦以此課題探討氣候變遷對高雄港與安平港兩港域包含颱風及波浪特性的長期性影響情況。

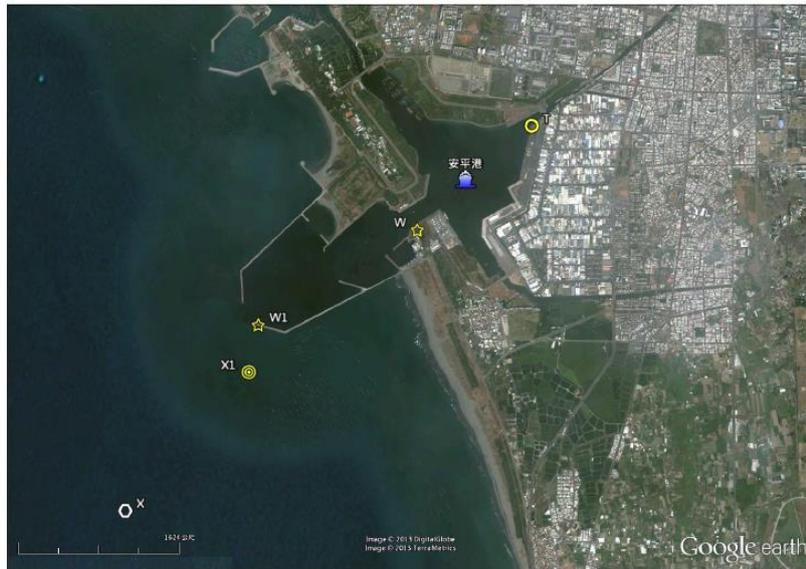
### 2.1 資料來源與處理方式

本研究所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。

本研究採用本所港灣技術研究中心(以下簡稱本中心)的波浪觀測資料來進行分析，本年度的研究目標港域為高雄港與安平港。安平港的相關觀測儀器位置如圖 2.1 所示，圖中安平港觀測樁水下 5 米處(稱測站 X)之 Inter Ocean S-4ADW 潮波儀所測得之 2Hz 水位變化時間序列處理而得，因 S-4 觀測儀器老舊，目前已更換為 NORTEK 公司之剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(AWCP)，觀測資料至觀測樁於 2011 年 7 月拆除為止。2011 年 7 月於南堤外海增設剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(AWCP)(稱測站 X1)。

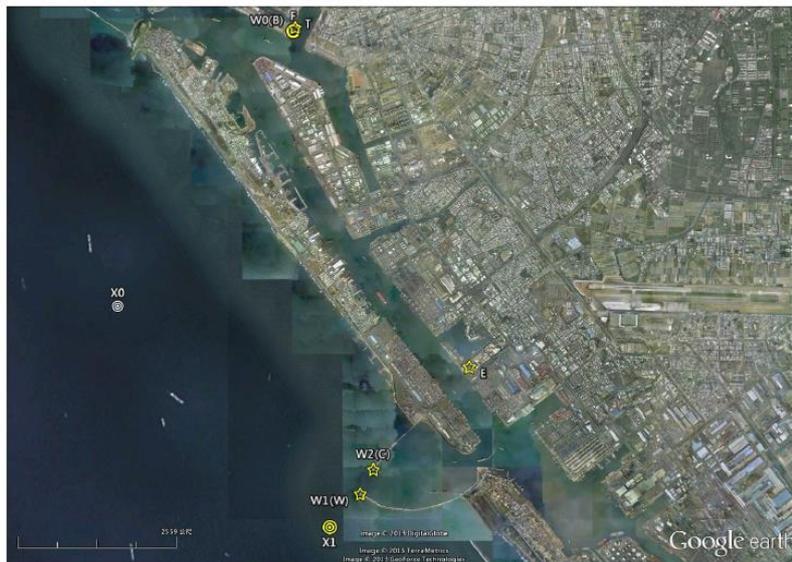
高雄港的相關觀測儀器位置如圖 2.2 所示，本中心於 2000 年購置挪威 NORTEK 公司之剖面海流與波浪即時監測系統，2000 年 12 月中旬經會勘後選定在高雄一港口與二港口間亦即高雄市中區污水處理廠附近海域(測站 X0)，以進行長期觀測。2001 年 6 月 23 日奇比颱風經過形成之外圍環流影響以致海底電纜遭受到外力拉扯受損後，以自記方式量測，2002 年 6 月重新補放運轉狀況良好，本站於 2005 年 8 月移至第二港口附近海(稱測站 X1)，水深約 18m。

其中，AWCP 系統相關觀測模式為：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。



☆ 風速計   ◎ 潮位計   ◎ 波流儀   ◎ 觀測塔

圖 2.1 安平港海氣象觀測位置圖



☆ 風速計   ◎ 潮位計   ◎ 波流儀

圖 2.2 高雄港海氣象觀測位置圖

## 2.2 颱風之長期變化趨勢

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，故本研究依據日本氣象廳所發布 1951 年至 2014 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，本研究首先以安平港為目標點，並以不同的距離門檻值篩選颱風，若颱風中心接近安平港的距離小於門檻值，則將其標記為侵台颱風，並將影響安平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四類：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 $\leq 997$  hPa)；3.中度颱風( $941$  hPa $<$ 中心海面氣壓 $\leq 976$  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，再依一階線性回歸找出每年次數的長期趨勢如下表：

表 2.1 安平港 1951 年至 2014 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	0.0035	0.0046	0.0038
強烈颱風	-0.0022	-0.0043	-0.0035
輕度颱風	0.0021	-0.0039	0.0022
中度颱風	0.0074	0.0138	0.0170

表 2.1 顯示三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 2014 年歷年侵襲安平港次數的趨勢分析結果，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 300、500 與 1000km 為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，中度颱風侵襲安平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 0.0138 次/年，以現有颱風紀錄而言每 50 年約會增加 0.69 個颱

風的侵襲機會，圖 2.3 為中度颱風侵襲安平港的歷年紀錄與一階線性回歸後的趨勢線，該線斜率為 0.0138(門檻值設為 500km)。

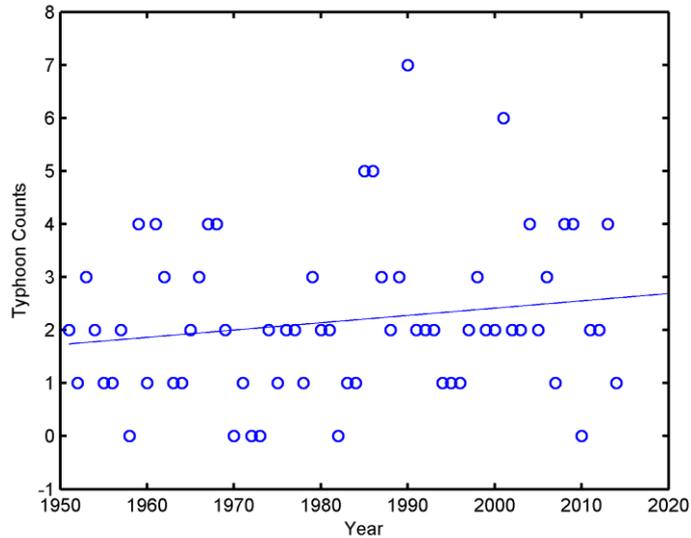


圖 2.3 中度颱風侵襲安平港次數的趨勢分析(500km 門檻值)

另以高雄港為目標點，進行相同分析。將各場颱風依據距離門檻值與颱風規模進行篩選，可計算出每年侵襲高雄港的颱風次數，再依線性回歸找出每年次數的長期趨勢如下表：

表 2.2 高雄港 1951 年至 2014 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	0.0008	0.0080	0.0077
強烈颱風	-0.0046	-0.0015	-0.0050
輕度颱風	0.0002	-0.0060	0.0031
中度颱風	0.0075	0.0147	0.0224

表 2.2 顯示三種距離門檻值對應各種不同颱風規模的資料集所統計出歷年侵襲高雄港次數的趨勢分析結果，由於高雄港與安平港的地理位置相近，其間僅距離 47.55km，故其分析結果與安平港相近，僅有中度颱風有明顯趨勢變化，高雄港部份的中度颱風侵襲次數年增率平均約為 0.0147 次/年，以現有颱風紀錄而言每 100 年約增加 0.74 個颱風的侵襲機會，圖 2.4 為中度颱風侵襲高雄港的歷年紀錄與線性回歸後的

趨勢線，該線斜率為 0.0147。本年度安平港與高雄港的分析結果顯示颱風侵襲次數僅些微增加。

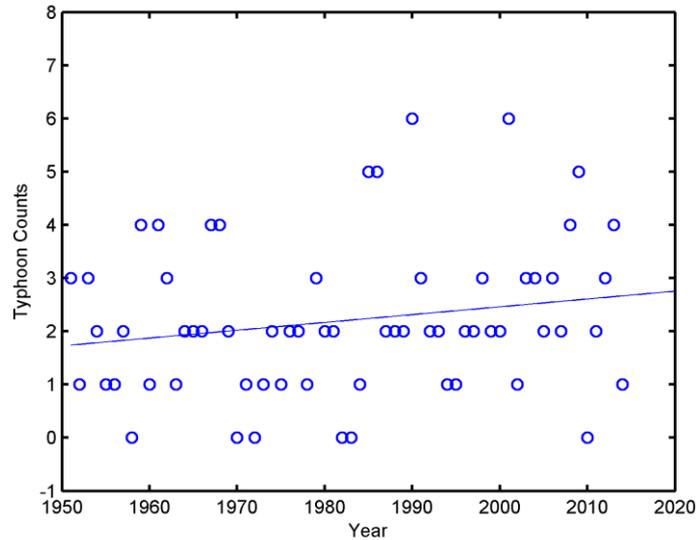


圖 2.4 中度颱風侵襲高雄港次數的趨勢分析(500km 門檻值)

## 2.3 波浪之長期變遷趨勢

### 2.3.1 資料來源

根據港灣技術研究中心所提供之安平港與高雄港波浪資料，其記錄時間皆為 2000 年至 2014 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 2.3 及表 2.4 所示。

安平港的波浪記錄時間為 2000 年一月至 2014 年十二月，其中除 2011 與 2014 兩年外其年資料蒐集率都有 70% 以上。2011 年九月至十一月、2014 年十月至十二月有較長期的資料缺漏。高雄港波浪資料起始時間雖然為 2000 年。但其中 2000 年僅從 12 月 20 日開始有紀錄，全年資料完整性僅 3.2%，故若要取樣進行年極值統計須將本年度排除，以確保分析的正確性。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皆會採用。

表 2.3 安平港 2000 年至 2014 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 (%)
2000	99.7	100.0	90.3	66.1	99.5	99.2	33.7	72.0	72.8	91.5	43.1	92.2	80.0
2001	76.3	97.5	90.6	100.0	54.3	86.5	100.0	100.0	99.6	82.5	51.4	85.3	85.3
2002	100.0	100.0	9.9	88.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	81.3	80.0	0.0	80.0
2003	100.0	100.0	0.0	99.4	49.9	95.3	100.0	98.7	91.1	94.8	88.2	0.0	76.4
2004	100.0	87.5	100.0	90.6	88.4	91.7	75.8	89.9	70.6	95.8	54.4	76.1	85.1
2005	92.5	74.1	91.9	61.0	63.2	93.9	84.7	100.0	100.0	69.4	97.8	36.8	80.4
2006	47.8	100.0	69.0	71.4	91.8	100.0	99.3	99.9	100.0	100.0	73.2	38.6	82.6
2007	99.7	100.0	99.6	98.9	83.5	99.7	98.4	97.3	98.9	99.3	99.7	99.2	97.9
2008	99.7	100.0	99.6	98.2	99.7	97.9	86.8	98.7	15.7	12.4	96.5	95.6	83.4
2009	93.7	89.6	80.8	99.9	90.7	99.0	97.6	99.3	99.9	57.4	32.6	95.7	86.3
2010	94.2	99.6	85.3	99.2	97.3	99.3	100.0	98.9	96.3	96.1	71.9	0.7	86.6
2011	0.4	11.8	96.2	99.3	80.9	88.1	89.5	75.3	0.0	0.0	0.0	69.9	50.9
2012	99.6	99.9	98.9	99.4	64.5	0.0	41.9	99.7	96.8	65.9	87.5	94.5	79.1
2013	99.5	99.4	97.2	91.5	99.9	99.6	99.7	94.8	77.9	91.9	99.3	99.7	95.9
2014	100.0	86.6	0.0	7.6	99.3	99.0	94.1	100.0	100.0	2.2	0.0	0.0	57.4

表 2.4 高雄港 1999 年至 2012 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 (%)
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.4	3.2
2001	95.3	70.2	97.0	77.1	70.7	93.9	0.0	92.7	72.5	27.3	0.0	0.0	58.1
2002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0	100.0	98.4	98.8	99.5	46.8	61.4	44.7
2003	0.0	83.5	92.6	61.9	98.9	99.4	99.9	97.2	99.9	99.9	82.1	0.0	76.3
2004	0.0	0.0	20.8	99.9	99.6	99.9	99.9	99.9	98.3	99.7	99.7	69.5	73.9
2005	99.9	99.9	71.0	0.0	0.0	81.0	99.9	98.1	98.9	99.7	100.0	100.0	79.0
2006	98.9	93.9	65.7	99.0	95.8	98.6	59.0	5.4	100.0	97.7	95.8	99.2	84.1
2007	100.0	21.6	49.5	100.0	75.4	97.5	95.4	29.4	79.6	94.6	95.8	90.6	77.5
2008	95.6	95.5	94.1	70.6	94.5	92.6	71.6	95.8	95.8	93.3	96.0	98.5	91.2
2009	83.6	92.4	72.2	99.2	99.2	98.9	58.3	61.0	83.2	98.7	98.2	99.9	87.1
2010	99.6	99.9	100.0	99.0	99.2	99.7	99.6	98.0	97.4	95.2	94.9	94.1	98.0
2011	94.5	95.4	95.0	93.6	94.6	95.7	94.6	95.6	93.3	46.2	95.1	95.8	90.8
2012	95.0	95.5	95.7	93.8	91.5	94.4	91.5	14.8	80.1	95.6	93.9	95.4	86.4
2013	95.4	94.5	94.4	92.8	53.2	0.0	7.8	100.0	100.0	9.7	34.2	100.0	65.2
2014	100.0	100.0	4.4	24.0	99.6	98.8	71.5	82.4	72.5	96.4	96.5	97.3	78.6

### 2.3.2 分析方法

在資料趨勢分析技術的相關研究中，往昔已有許多研究採用最小二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-Kendall 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。

不同於颱風一年平均出現 3 至 4 個的獨立事件，波浪現象為一連續的時間序列。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一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

$$y(t) = a_2 t + b_2 \sin(2\pi / 12t + c_2) + d_2 \quad (2.2)$$

式中有共有四個係數  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ ，亦可經由最小二乘法進行推求。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(2.7)計算全部統計量  $S'$

$$S' = \sum_{j=1}^m S_j \quad (2.7)$$

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。我國黃鐸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 皆需滿足下列兩個條件：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  $\theta_1$  與  $\theta_2$  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：

$$\sigma(t) = |m(t) / a(t)| \quad (2.17)$$

藉由上述兩個閾值  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  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  $r_n(t)$  再利用一階線性回歸方式來估算的年增率。本研究採用 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

本研究所蒐集安平港波浪資料自 2000 年至 2014 年共 15 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 2.5 所示。圖中趨勢線之斜率為  $3.66 \times 10^{-5}$ ，換算為年增率則為 0.0134m/year，顯示安平港逐時波浪資料的長期趨勢呈現些遞增情況。將逐時資料進行日平均分析後進行分析的結果如圖 2.6，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 2.7，將圖中趨勢線之斜率換算為年增率為 0.0129m/year。此外以年平均波高來進行長期趨勢分析則可繪製如圖 2.8，圖中趨勢線年增率為 0.0120m/year。

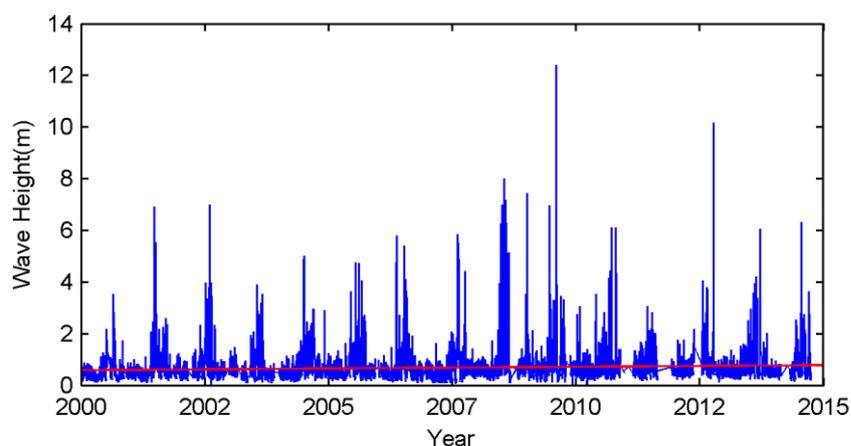


圖 2.5 安平港逐時波浪資料與其趨勢線

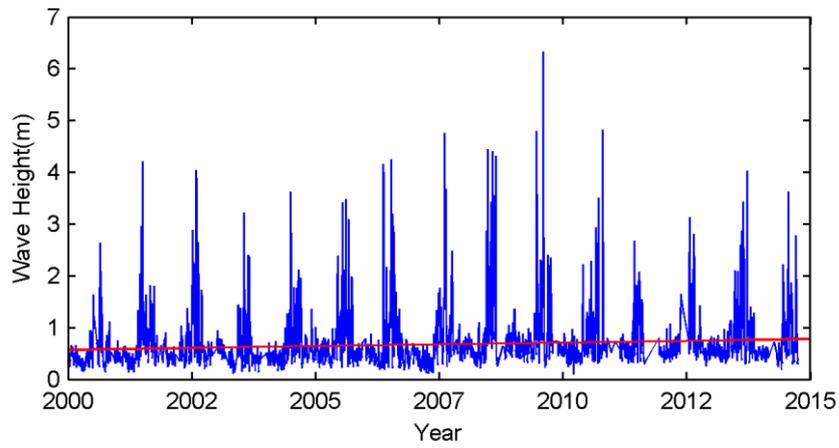


圖 2.6 安平港日平均波浪資料及其趨勢線

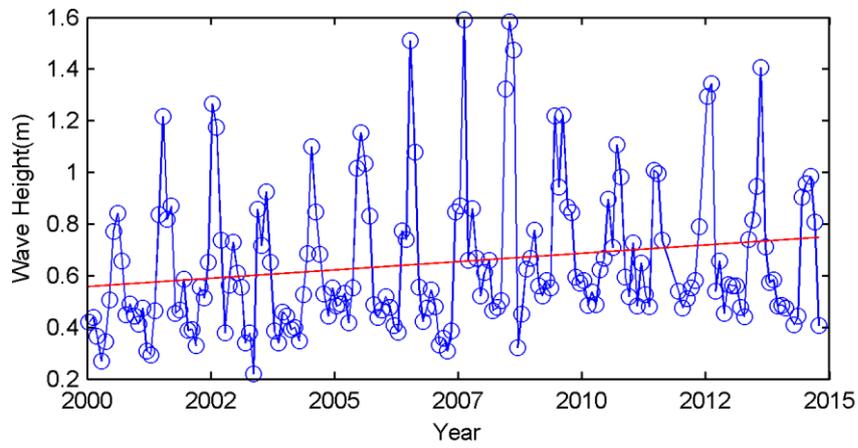


圖 2.7 安平港月平均波浪資料及其趨勢線

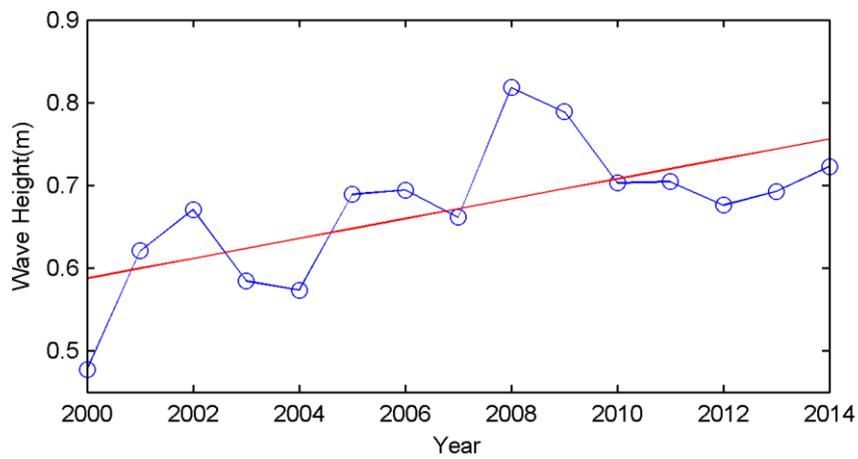


圖 2.8 安平港年平均波浪資料與其趨勢線

經由 EMD 分解後可獲得到長期波浪趨勢分量，安平港逐時波高資料進行 EMD 分解後的趨勢分量示如圖 2.9。為能比較不同取樣方式對長期波高趨勢的影響，另採用波高的日平均資料、月平均資料及年平均資料來進行分析。圖 2.10、圖 2.11 及圖 2.12 分別為以日平均、月平均及年平均波高進行 EMD 分析所獲得的趨勢線。以圖中紅線所表示的趨勢分量進行一階線性回歸可獲得資料的長期變遷趨勢，在逐時資料分析中其趨勢分量的年增率為 0.0136m/year，日平均資料為 0.0066m/year，月平均資料的年增率為 0.0022m/year，年平均資料的年增率為 0.0122m/year。其中可發現日平均與月平均取樣方式的趨勢分析結果有較大的差異。

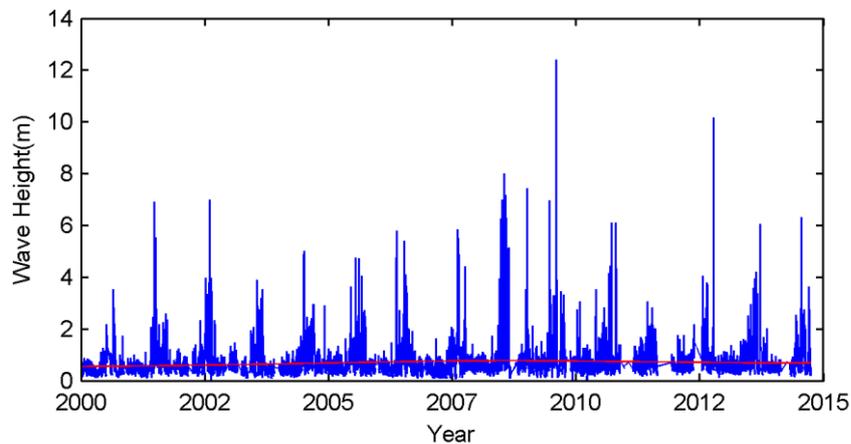


圖 2.9 安平港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

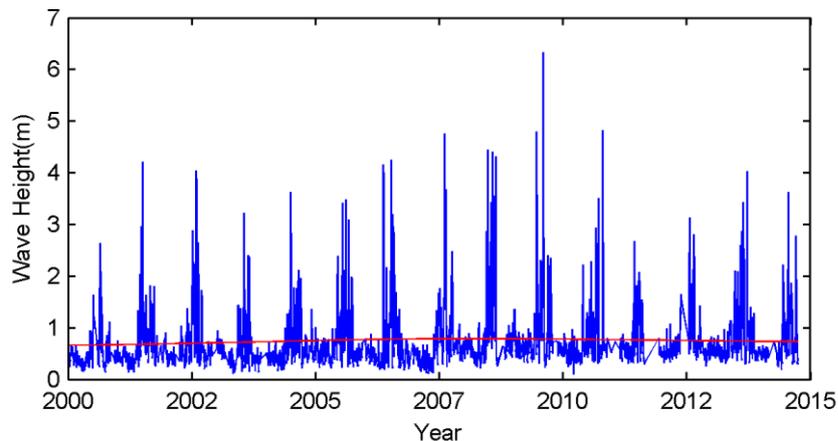


圖 2.10 安平港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

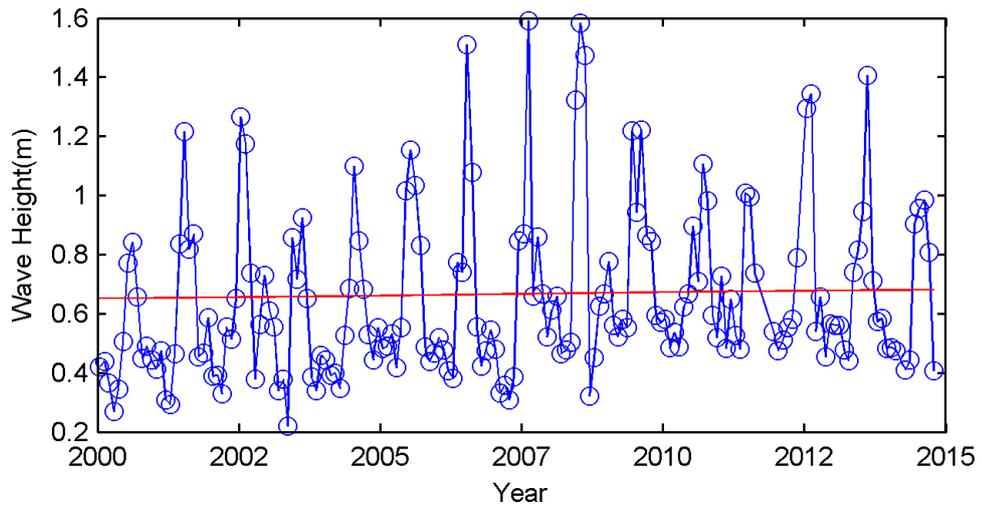


圖 2.11 安平港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

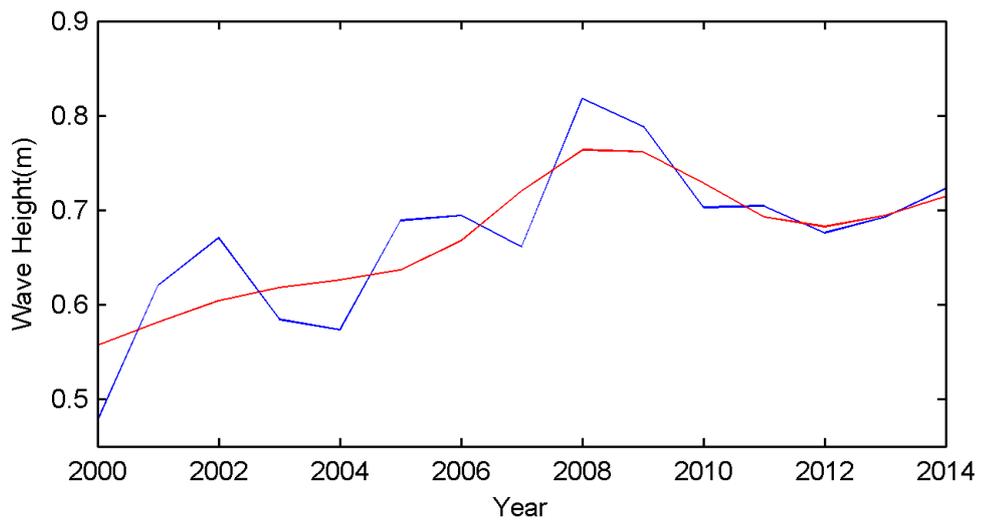


圖 2.12 安平港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

另外除了以上述一階線性回歸方式來估算的年增率，本研究並採用 Mann-Kendall 趨勢檢測法來進行檢定，其結果顯示在顯著水準 0.05 下，安平港的波浪資料在各種取樣方式包括逐時、日平均、月平均與年平均皆顯示原假設狀況不成立，即皆歸納為有趨勢的資料。為進一步考量季節性變化影響下的波浪長期變化趨勢，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 月分為四個季節指標，在顯著水準 0.05 的情況下，安平港月平均波浪資料不符合原假設，是為一含有趨勢的資料集，其年增率經計算為 0.0109m/year。

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 2.5 所示，其結果顯示以逐時取樣、日平均、月平均或年平均等取樣方式所計算出來的年增率皆為正值，雖然各種取樣方式不同造成年增率有所差異，但整體而言安平港自 2000 年至 2014 年間的波浪趨勢是屬於遞增的。而各種方法與取樣方式的比較可以發現，線性回歸在不同取樣方式下其回歸結果相近，僅年平均有較大的差異，而 EMD 法所得到的趨勢分析結果在不同取樣方式下有較大的差異。本計畫所分析的結果安平港波高年增率為 0.0022 至 0.0136 m/year。但若以趨勢檢定法的特性而言，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，其分析結果安平港波高年增率為 0.0109m/year 應較具代表性。

**表 2.5 安平港長期波浪趨勢分析結果**

分析與取樣方式	年增率(m/year)
逐時資料線性趨勢	0.0134
日平均線性趨勢	0.0136
月平均線性趨勢	0.0129
年平均線性趨勢	0.0120
Seasonal Kendall 月平均趨勢檢定	0.0109
EMD 趨勢分析 (逐時)	0.0136
EMD 趨勢分析(日平均)	0.0066
EMD 趨勢分析(月平均)	0.0022
EMD 趨勢分析(年平均)	0.0122

本研究所蒐集高雄港波浪資料自 2000 年至 2014 年共 15 年，進行一階線性回歸可獲得逐時資料的趨勢線，如圖 2.13 所示。圖中趨勢線之斜率為  $2.29 \times 10^{-5}$ ，換算為年增率則為 0.0084m/year。以日平均波高進行趨勢分析可獲得其結果如圖 2.14，其波高年增率為 0.0091m/year。月平均波高進行長期趨勢分析的結果如圖 2.15，將圖中趨勢線之斜率換算為年增率為 0.0100m/year。以年平均波高來進行長期趨勢分析則可繪製如圖 2.16，圖中趨勢線年增率為 0.0132m/year。

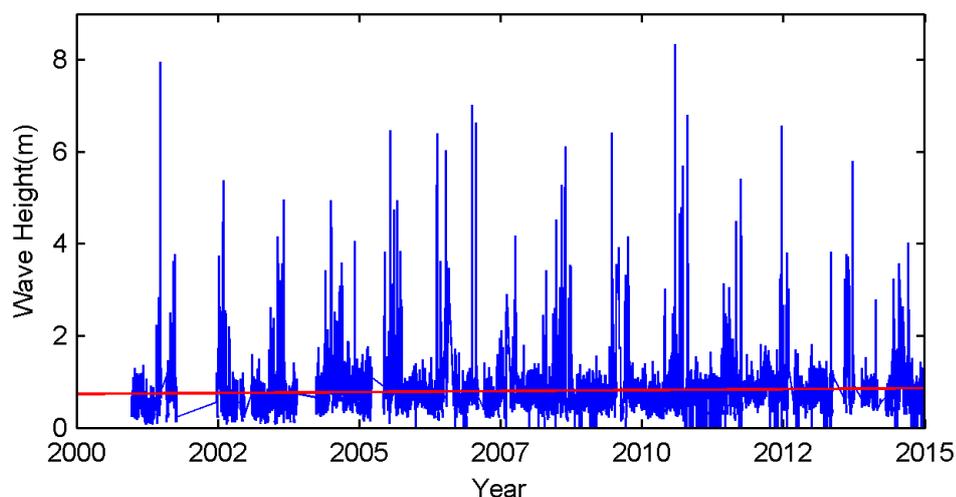


圖 2.13 高雄港逐時波浪資料與其趨勢線

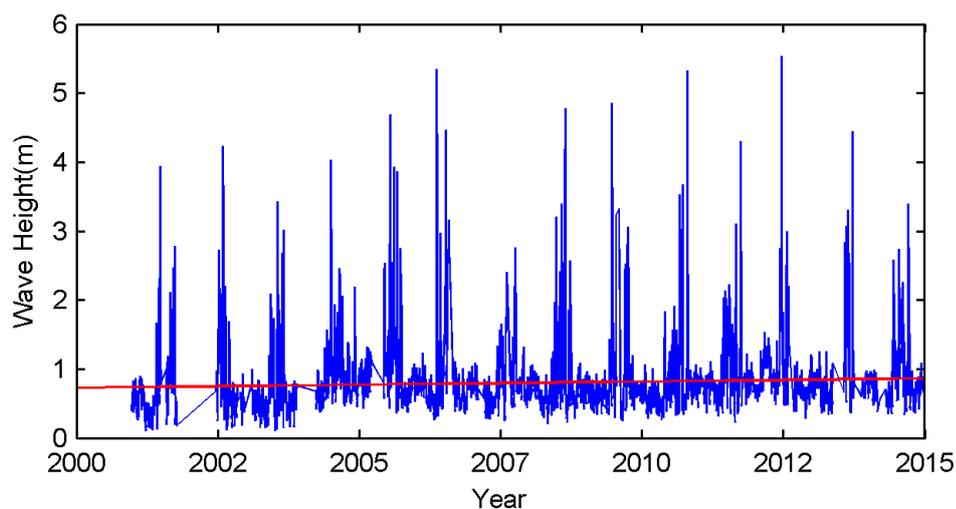


圖 2.14 高雄港日平均波浪資料及其趨勢線

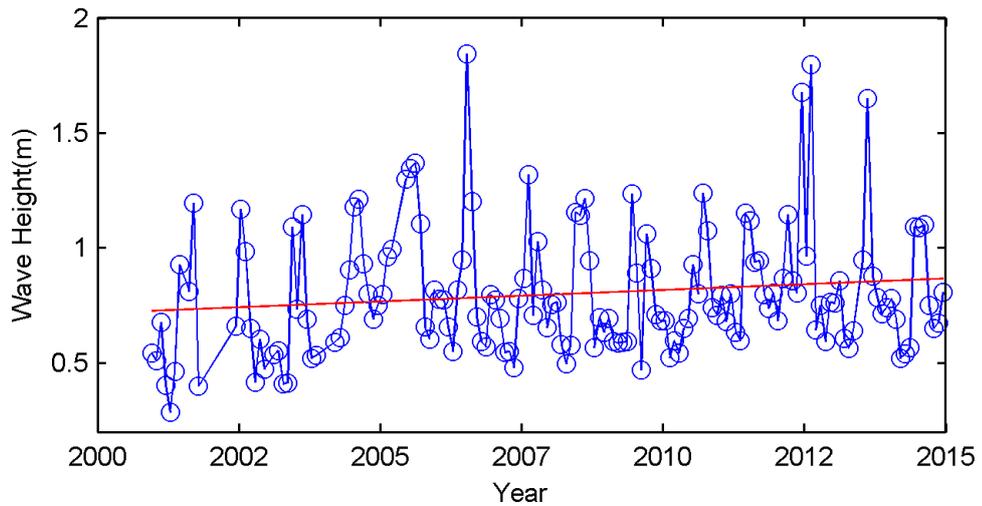


圖 2.15 高雄港月平均波浪資料及其趨勢線

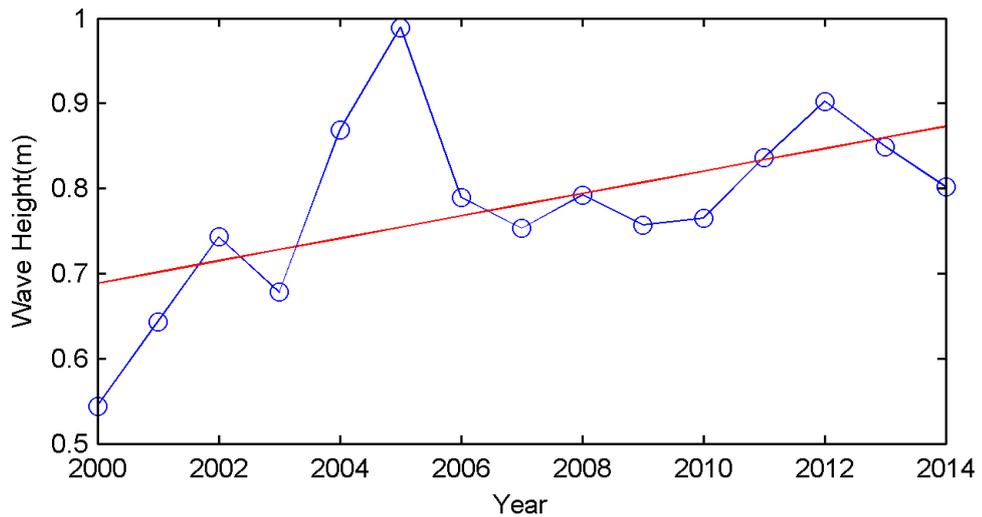


圖 2.16 高雄港年平均波浪資料與其趨勢線

將高雄港逐時波高資料進行EMD分解後的趨勢分量示如圖 2.17，經一維線性回歸後獲得其波高年增率為  $0.0042\text{m/year}$ 。此外另採用波高的日平均資料、月平均資料及年平均資料來進行分析。圖 2.18、圖 2.19 及圖 2.20 分別為以日平均、月平均及年平均波高進行 EMD 分解後的趨勢分量，其年增率分別為  $0.0105\text{m/year}$ 、 $0.0087\text{m/year}$  及  $0.0054\text{m/year}$ 。

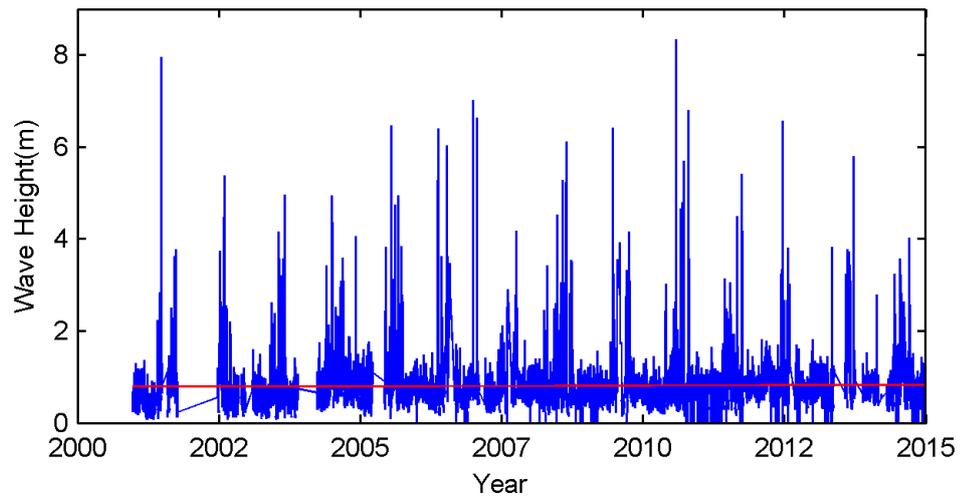


圖 2.17 高雄港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

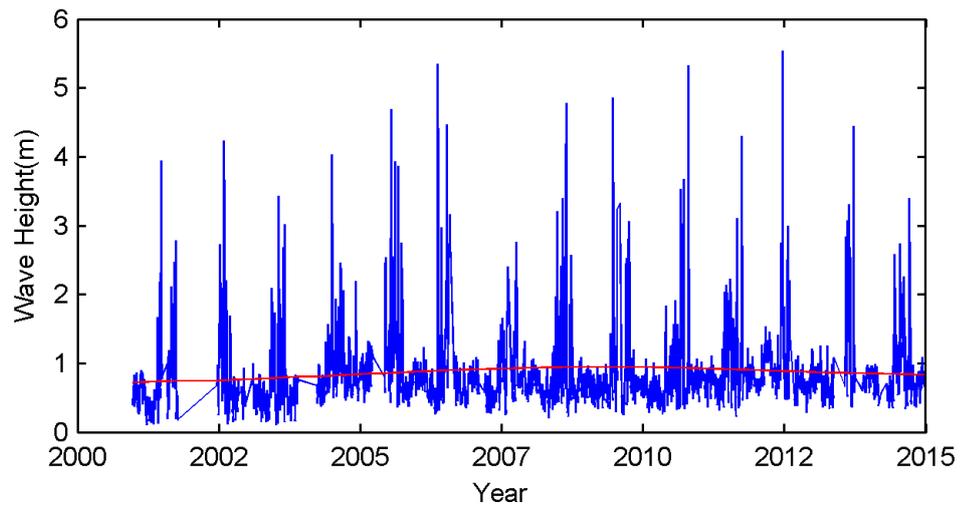


圖 2.18 高雄港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

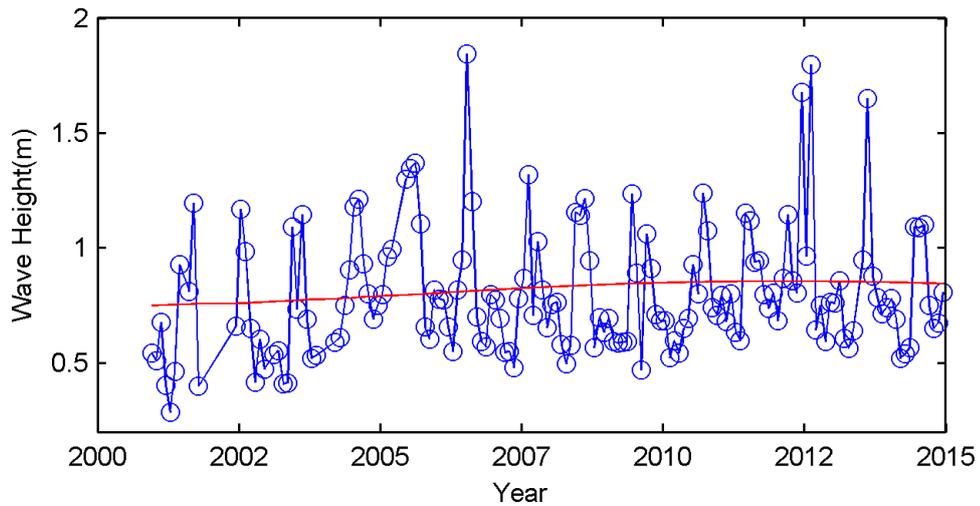


圖 2.19 高雄港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

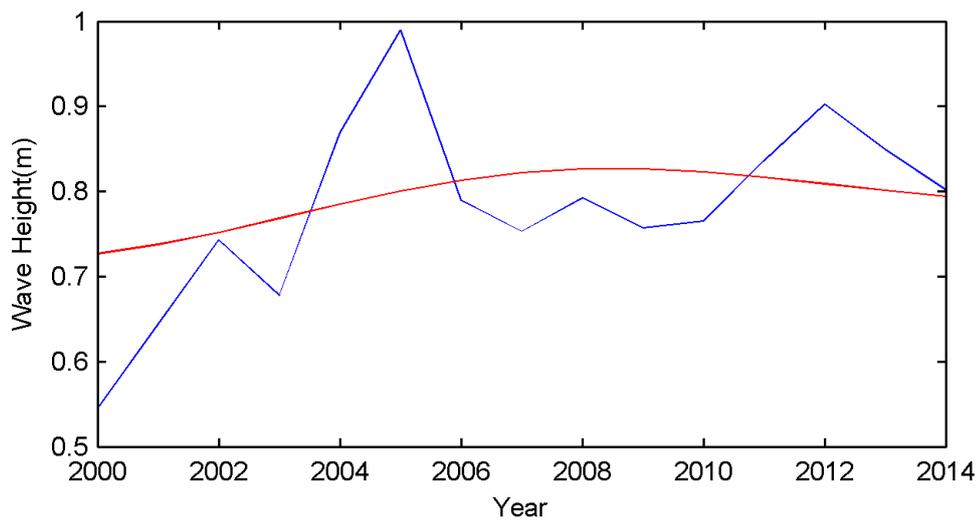


圖 2.20 高雄港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

另外除了以上述一階線性回歸方式來估算的年增率，本研究並採用 Mann-Kendall 趨勢檢測法來進行分析，其結果顯示在顯著水準 0.05 下，高雄港的波浪資料在逐時、日平均、月平均與年平均四種取樣方式下皆顯示原假設狀況不成立，即皆歸納為有趨勢的資料。為進一步考量季節性變化影響下的波浪長期變化趨勢，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 月分為四個季節指標，在顯著水準 0.05 的情況下，高雄港月平均波浪資料判定是為有趨勢的資料集，其年增率為 0.0101m/year。

經多種趨勢檢定方法與各種資料取樣方式的分析結果如表 2.6，其結果顯示以各種取樣方式經一維線性回歸方式所計算出高雄港波浪年增率為 0.0084 至 0.0132m/year 之間，顯示高雄港波高長期變遷趨勢為些遞增。而 EMD 法趨勢分析在各種取樣方式下的趨勢分析結果其波高年增率約為 0.0042 至 0.0105m/year。另外採用 Mann-Kendall 趨勢檢測法的結果顯示高雄港在各種取樣方式下其趨勢是存在的，考慮季節性變化的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法也判定高雄港的長期波浪資料具趨勢性的變化。考量各種趨勢檢定法的特性而言，無母數分析的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法適用於資料缺漏與週期性變化的情形，其分析結果高雄港波高年增率為 0.0101m/year。

**表 2.6 高雄港長期波高趨勢分析結果**

分析與取樣方式	年增率(m/year)
逐時資料線性趨勢	0.0084
日平均線性趨勢	0.0091
月平均線性趨勢	0.0100
年平均線性趨勢	0.0132
Seasonal Kendall 月平均趨勢檢定	0.0101
EMD 趨勢分析 (逐時)	0.0042
EMD 趨勢分析(日平均)	0.0105
EMD 趨勢分析(月平均)	0.0087
EMD 趨勢分析(年平均)	0.0054

綜合上述分析結果，安平港與高雄港兩個研究基地在波浪長期趨勢分析的結果皆屬於少量遞增的現象。雖然以各種不同取樣方式來進行趨勢分析會有些許的差異，但以較具有代表性的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法來判斷，兩港波浪變遷趨勢十分接近，約為每 100 年增加 1m 波高。

## 第三章 港域颱風波浪推算模式建立

臺灣位於西太平洋之濱，每年夏季常受颱風侵襲，經常造成人員傷亡或建築物的破壞。對國內港務單位而言，當颱風來襲時，能即時的提供相關海象預警資訊，以作為港灣構造物及港內船隻碇泊之安全防護措施參考，是為重要課題。

本研究應用本所港研中心於安平港與高雄港兩港域長期觀測之波浪資料，以類神經網路、最小化模式樹(M5)與二維數值模式等方法探討兩港域適用的港域即時性颱風波浪推算模式建置，有關推算模式建置過程，如下分述。

### 3.1 資料分析方法

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 小時一筆，而港灣技術研究中心之波浪資料為每 1 小時一筆，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)，利用三次多項式內插，將其時間間距內插為 1 小時一筆。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，本研究選擇對應安平港與高雄港實測波浪資料完整之颱風各 46 場，如表 3.1 及表 3.2 所示。

表 3.1 建立安平港模式之颱風資訊與其對應最大波高

年份	颱風名稱	颱風名稱	起始日期	終止日期	最大風速 (knot)	最大波高 (m)
2000	碧利斯	BILIS	2000/8/19	2000/8/23	110	3.52
2001	奇比	CHEBI	2001/6/20	2001/6/24	65	6.92
2001	尤特	UTOR	2001/7/2	2001/7/6	60	5.53
2001	納莉	NARI	2001/9/6	2001/9/20	75	2.58
2001	利奇馬	LEKIMA	2001/9/22	2001/9/27	70	2.36
2002	娜克莉	NAKRI	2002/7/9	2002/7/12	50	3.82
2003	伊布都	IMBUDO	2003/7/17	2003/7/25	90	3.90
2003	莫拉克	MORAKOT	2003/8/2	2003/8/4	45	2.75
2003	科羅旺	KROVANH	2003/8/21	2003/8/26	65	3.18
2003	杜鵑	DUJUAN	2003/8/30	2003/9/3	80	3.52
2004	敏督利	MINDULLE	2004/6/23	2004/7/4	95	5.01
2004	南瑪都	NANMADOL	2004/11/29	2004/12/4	90	2.91
2005	海棠	HAITANG	2005/7/16	2005/7/20	105	4.76
2005	馬莎	MATSA	2005/7/31	2005/8/7	80	2.52
2005	珊瑚	SANVU	2005/8/11	2005/8/13	50	4.72
2005	泰利	TALIM	2005/8/27	2005/9/2	95	4.05
2005	丹瑞	DAMREY	2005/9/21	2005/9/27	80	2.73
2005	龍王	LONGWANG	2005/9/28	2005/10/3	95	2.06
2006	珍珠	CHANCHU	2006/5/9	2006/5/19	95	5.80
2006	碧利斯	BILIS	2006/7/9	2006/7/15	60	5.36
2006	凱米	KAEMI	2006/7/19	2006/7/26	80	4.08
2007	聖帕	SEPAT	2007/8/13	2007/8/19	110	5.38
2007	柯羅莎	KROSA	2007/10/2	2007/10/8	105	4.08
2008	風神	FENGSHEN	2008/6/19	2008/6/25	90	6.16
2008	鳳凰	FUNG_WONG	2008/7/25	2008/7/29	75	5.92
2008	如麗	NURI	2008/8/18	2008/8/23	75	5.08
2009	蓮花	LINFA	2009/6/18	2009/6/22	60	6.90
2009	南卡	NANGKA	2009/6/23	2009/6/26	40	3.35
2009	莫拉菲	MOLAVE	2009/7/16	2009/7/19	65	3.29
2009	莫拉克	MORAKOT	2009/8/3	2009/8/10	75	11.90
2010	萊羅克	LIONROCK	2010/8/29	2010/9/2	50	4.11
2010	凡那比	FANAPI	2010/9/15	2010/9/20	95	5.72
2010	梅姬	MEGI	2010/10/13	2010/10/23	125	6.08
2011	米雷	MEARI	2011/6/22	2011/6/27	60	2.13
2012	蘇拉	SAOLA	2012/7/28	2012/8/3	70	2.40
2012	啟德	KAI_TAK	2012/8/13	2012/8/18	65	2.76
2012	天秤	TEMBIN	2012/8/19	2012/8/30	80	3.67
2013	蘇力	SOULIK	2013/7/8	2013/7/14	100	2.92
2013	尤特	UTOR	2013/8/10	2013/8/15	105	3.94
2013	潭美	TRAMI	2013/8/18	2013/8/22	60	4.20
2013	康芮	KONG_REY	2013/8/26	2013/8/30	55	3.13
2013	天兔	USAGI	2013/9/17	2013/9/23	110	5.92
2014	雷馬遜	RAMMASUN	2014/7/12	2014/7/19	90	2.77
2014	麥德姆	MATMO	2014/7/17	2014/7/25	70	6.00
2014	卡玫基	KALMAEGI	2014/9/12	2014/9/17	75	3.53
2014	鳳凰	FUNG_WONG	2014/9/17	2014/9/24	45	2.75

表 3.2 建立高雄港模式之颱風資訊與其對應最大波高

年份	颱風名稱	颱風名稱	起始日期	終止日期	最大風速 (knot)	最大波高 (m)
2001	奇比	CHEBI	2001/6/20	2001/6/24	65	7.95
2001	利奇馬	LEKIMA	2001/9/22	2001/9/27	70	3.77
2002	娜克莉	NAKRI	2002/7/9	2002/7/12	50	3.23
2003	伊布都	IMBUDO	2003/7/17	2003/7/25	90	4.16
2003	莫拉克	MORAKOT	2003/8/2	2003/8/4	45	3.21
2003	科羅旺	KROVANH	2003/8/23	2003/8/26	65	3.13
2003	杜鵑	DUJUAN	2003/8/30	2003/9/3	80	4.96
2004	康森	CONSON	2004/6/7	2004/6/11	80	2.13
2004	敏督利	MINDULLE	2004/6/23	2004/7/4	95	4.94
2004	南瑪都	NANMADOL	2004/11/29	2004/12/4	90	4.06
2005	海棠	HAITANG	2005/7/13	2005/7/20	105	6.46
2005	馬莎	MATSA	2005/7/31	2005/8/7	80	3.13
2005	珊瑚	SANVU	2005/8/11	2005/8/13	50	4.75
2005	泰利	TALIM	2005/8/27	2005/9/2	95	4.85
2005	丹瑞	DAMREY	2005/9/21	2005/9/27	80	3.78
2005	龍王	LONGWANG	2005/9/29	2005/10/3	95	2.56
2006	珍珠	CHANCHU	2006/5/9	2006/5/19	95	6.39
2006	碧利斯	BILIS	2006/7/9	2006/7/15	60	6.02
2007	柯羅莎	KROSA	2007/10/2	2007/10/8	105	4.10
2008	風神	FENGSHEN	2008/6/19	2008/6/25	90	4.43
2008	卡玫基	KALMAEGI	2008/7/15	2008/7/18	65	3.02
2008	鳳凰	FUNG_WONG	2008/7/25	2008/7/29	75	5.08
2008	如麗	NURI	2008/8/18	2008/8/23	75	5.99
2008	辛樂克	SINLAKU	2008/9/9	2008/9/21	100	2.77
2008	哈格比	HAGUPIT	2008/9/19	2008/9/25	90	3.42
2008	薔蜜	JANGMI	2008/9/24	2008/10/1	115	3.40
2009	蓮花	LINFA	2009/6/18	2009/6/22	60	6.31
2009	南卡	NANGKA	2009/6/23	2009/6/26	40	2.31
2009	莫拉菲	MOLAVE	2009/7/16	2009/7/19	65	3.53
2009	芭瑪	PARMA	2009/10/3	2009/10/14	75	3.03
2010	萊羅克	LIONROCK	2010/8/29	2010/9/2	50	4.59
2010	莫蘭蒂	MERANTI	2010/9/9	2010/9/10	55	4.75
2010	凡那比	FANAPI	2010/9/15	2010/9/20	95	5.69
2010	梅姬	MEGI	2010/10/13	2010/10/23	125	6.66
2011	南瑪都	NANMADOL	2011/8/23	2011/8/31	100	4.48
2011	尼莎	NESAT	2011/9/24	2011/9/30	80	5.21
2012	泰利	TALIM	2012/6/17	2012/6/20	50	6.55
2012	杜蘇芮	DOKSURI	2012/6/27	2012/6/30	40	2.62
2012	蘇拉	SAOLA	2012/7/28	2012/8/3	70	2.98
2013	尤特	UTOR	2013/8/10	2013/8/15	105	3.75
2013	潭美	TRAMI	2013/8/18	2013/8/22	60	3.70
2013	康芮	KONG_REY	2013/8/26	2013/8/30	55	3.34
2013	天兔	USAGI	2013/9/17	2013/9/23	110	5.75
2014	哈吉貝	HAGIBIS	2014/6/14	2014/6/17	40	3.20
2014	雷瑪遜	RAMMASUN	2014/7/12	2014/7/19	90	3.51
2014	卡玫基	KALMAEGI	2014/9/12	2014/9/17	75	3.98

由表 3.1 得知，在 2000 至 2014 年中有 46 場颱風擁有相對應完整的波浪資料，其中對應波高小於 3m 的有 13 場，這 13 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安平港影響較小的颱風進行模式建立。波高在 3m 至 5m 間的有 18 場占最多數，5m 至 7m 有 14 場，7m 以上僅有 1 場。表 3.2 中顯示在 2000 至 2014 年中有 46 場颱風在高雄港擁有相對應完整的波浪資料，其中對應波高小於 3m 的有 6 場，波高在 3m 至 5m 間的有 28 場占最多數，5m 至 7m 有 11 場，7m 以上僅 1 場。

對於安平港與高雄港而言，其港區位置皆位於臺灣西南側海岸，在每年六至九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台灣的季節，由表 3.1 及表 3.2 可發現在六月至九月侵襲安平港與高雄港的颱風皆在 46 場颱風中占 43 場，約為總颱風場數的 93% 以上，顯示安平港與高雄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。

以本研究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。從歷年的臺灣地區颱風路徑分類統計圖(圖 3.1)可發現，較可能對安平港與高雄港造成直接影響的路徑為第五路徑、第七路徑、第八路徑及第九路徑等。其餘路徑皆會受到地形以及高山的屏障影響。因此本計畫針對安平港與高雄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，其結果如圖 3.2 與圖 3.3 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。

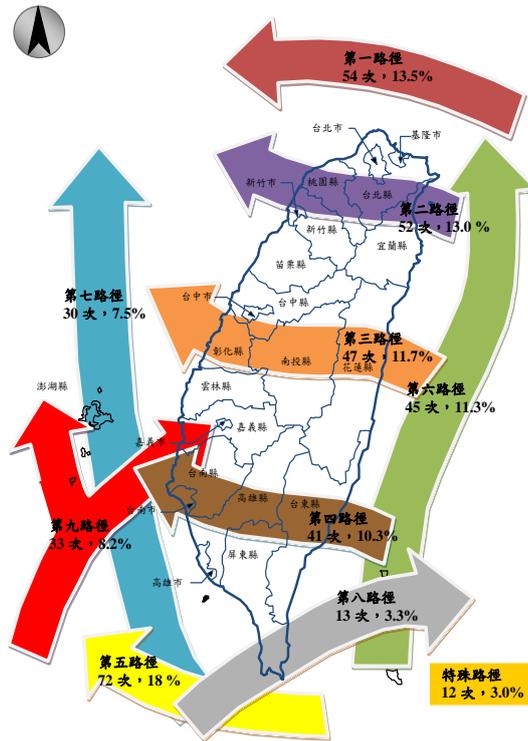


圖 3.1 臺灣地區颱風路徑分類圖(1897-2010 年)(引自中央氣象局)

由圖 3.2 顯示，對安平港波浪造成最大影響的颱風中心位置皆集中於台灣苗栗外海處，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)則分布於台灣西側外海方與正北方處，綠色資料點(3m 至 5m)分布的範圍則較大，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。為能標出各資料點與安平港的相對距離，故以安平港為中心繪製半徑 500km 與半徑 1000km 的同心圓分界線，圖 3.2 中可發現紅色資料點皆發生於半徑 500km 的距離內，顯示對安平港而言，颱風只有在中心距離靠近安平港 500km 以內才有機會造成 7m 以上的示性波高。藍色資料點大部分也集中在半徑 500km 內，綠色資料點分布則較廣，僅少部分出現在台灣東側。較值得注意的既使颱風由東向西穿過中央山脈往東北移動，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，故其造成影響的次數更較由南往北直撲安平港的颱風來得多。

在所選用的 46 場颱風中，其中所造成最大示性波高大於 7m 對於安平港有較大影響僅莫拉克(MORAKOT, 1998)，其路徑為第三路徑。5m 至 7m 波高的颱風包括奇比(CHEBI, 2001)、尤特(UTOR, 2001)、敏督利(MINDULLE, 2004)、珍珠(CHANCHU, 2006)、碧利斯(BILIS, 2006)、聖帕(SEPAT, 2007)、風神(FENGSHEN, 2008)、鳳凰(FUNGWONG, 2008)、如麗(NURI, 2008)及蓮花(LINFA, 2009)等。上述波高大於 5m 以上的 15 個颱風，其中有 5 個的路徑是屬於東向西穿過台灣本島的颱風，其餘皆是屬於台灣西南側往北行進或是台灣南側外海自東向西前進的颱風。

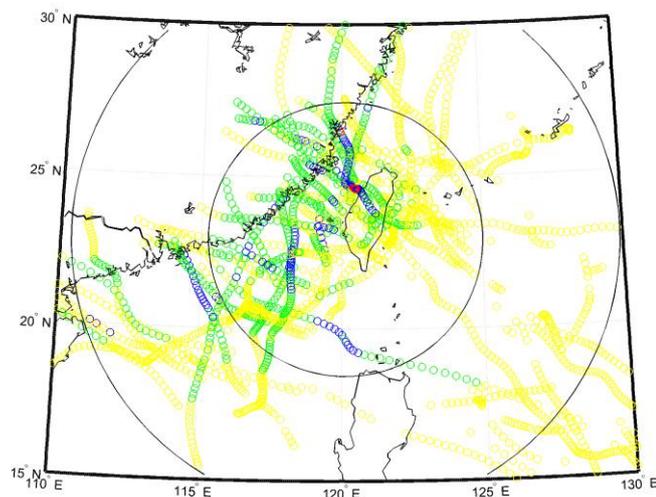


圖 3.2 颱風中心位置與安平港波高資料空間分布圖

由圖 3.3 中得知，對高雄港波浪造成最大影響的颱風中心位置是在台灣高雄外海，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)則分布於台灣西北與西南側，綠色資料點(3m 至 5m)主要分布圖中西半部，僅有少數位於東半部，黃色資料點(對應波高 1m 至 3m)則分布於臺灣周邊海域。為能標出各資料點與高雄港的相對距離，故以高雄港為中心繪製半徑 500km 與半徑 1000km 的同心圓分界線，圖 3.3 中可發現紅色、藍色資料點幾乎發生於半徑 500km 的距離內，顯示以高雄港而言，颱風只有在中心距離靠近高雄港 500km 以內且其

中心位於台灣西側才較有機會造成 5m 以上的示性波高。綠色與黃色資料點分布則較廣。

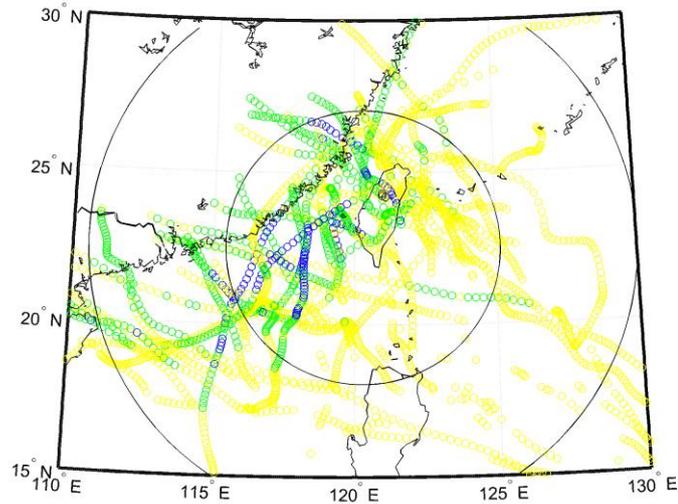


圖 3.3 颱風中心位置與高雄港波高資料空間分布圖

在高雄港所選用的 46 場颱風中，其中所造成最大示性波高大於 7m 的僅有奇比(CHEBI, 2001)，是屬於第七路徑。5m 至 7m 波高的颱風共有 11 場，這 11 場中以路徑特性來看分成三種，第一種如珍珠(CHANCHU, 2006)、蓮花(LINFA, 2009)、梅姬(MEGI, 2010)與泰利(TALIM, 2012)等四場第九路徑的颱風。第二種為海棠(HAITANG, 2005)、碧利斯(BILIS, 2006)、鳳凰(FONGWONG, 2008)及凡那比(FANAPI, 2010)等四場自東向西穿過台灣本島的颱風。第三種則為颱風自東向西經過台灣南側與菲律賓海域的颱風，有如麗(NURI, 2008)、尼莎(NESAT, 2011)及天兔(USAGI, 2013)等。

## 3.2 類神經颱風波浪推算模式建置

### 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； $\theta_i$  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  $\theta_1$  及  $\theta_2$ ，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 $\delta_1$ 與輸出層差距量 $\delta_2$

$$\delta_1 = Z(1-Z)\sum_j (W_{2j}\delta_j) \quad (3.6)$$

$$\delta_2 = (1+Y)(1-Y)(Z-Y) \quad (3.7)$$

## 3. 計算加權值矩陣的修正量 $\Delta W$

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  $\eta$  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， $\delta_j^n$  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 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 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)，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(3.15)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 模式輸入之轉換函數

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 3.4 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二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。

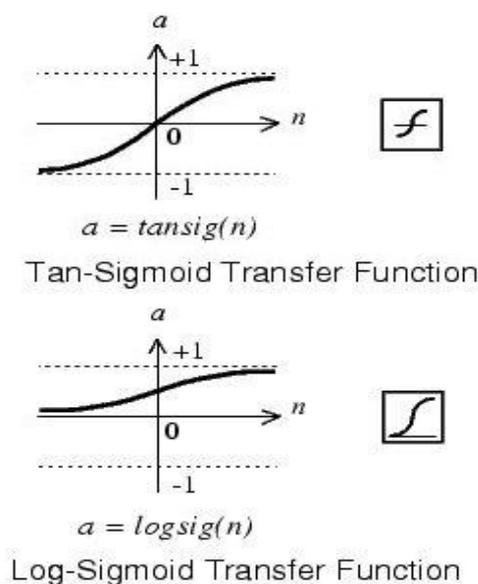


圖 3.4 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數

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。

本研究依循往昔交通部運輸研究所臺灣技術研究中心『臺灣主要港口附近海域長期波浪統計特性及設計波推算之研究』研究中所採用的資料與分類方式來建立安平港及高雄港波浪推算模式，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學到該有的特性。

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，本研究利用這三項颱風資料計算出 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( $\theta_1$ )；(3) 颱風侵襲角( $\theta_3$ )；(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( $\theta_1$ )、颱風移動方位角( $\theta_2$ )；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。 $\theta_1$  與  $\theta_2$  如圖 3.5 示。

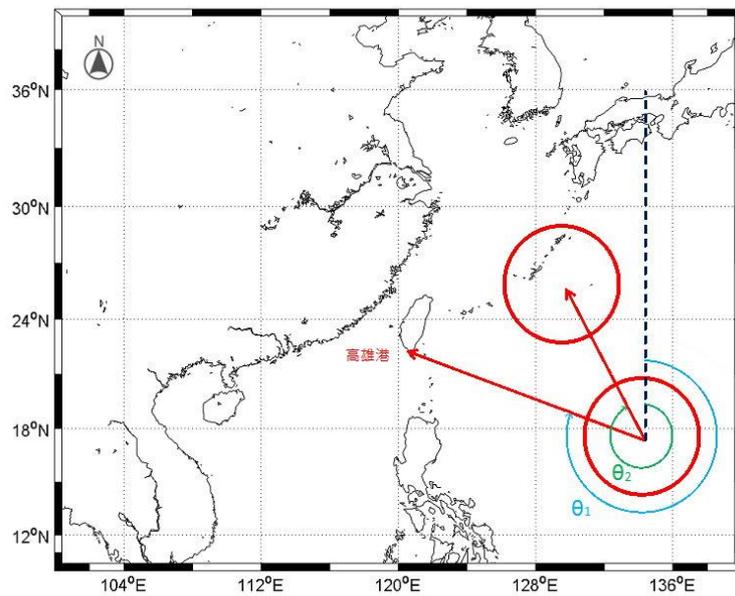


圖 3.5 目標點對颱風中心的方位角  $\theta_1$  與颱風移動方位角  $\theta_2$  示意圖

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)， $\theta_3$  定義為颱風侵襲角。以圖 3.5 狀況為例，颱風中心是由圖中右下往左上方移動，目標點安平港目前所面臨的是颱風的左半圓。由以上關係可知，若  $\theta_3$  在  $0^\circ$  至  $180^\circ$  則目標推算點所面臨的是颱風的左半圓，反之，若  $\theta_3$  在  $0^\circ$  至  $-180^\circ$  則目標推算點所面臨的是颱風的右半圓。圖 2.6  $\theta_1$  小於  $\theta_2$ ，故  $\theta_3$  為正值，顯示目標點安平港面臨的是颱風的左半圓。

本研究收集近年來參數化風場模型的相關文獻，選擇三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)，以三種風場模型針對高雄港現有風速資料之 21 場颱風進行推算並比較其結果如表 3.3。

表 3.3 高雄港三種風場模型之比較

年份	颱風名稱	CWB model				SLOSH model				RVM			
		$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$\Delta V_{s,p}$ (m/s)	$\Delta t_p$ (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
	絕對平均值	7.56	14.57	4.79	0.32	6.44	11.33	4.59	0.34	7.41	23.57	5.39	0.44

此三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。表 3.3 中顯示，三種風場模型於 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  $\Delta t_p$ 。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。

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  $\varphi$ 、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，共三個輸入參數  $D$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_3$ ，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五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 3.6 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。

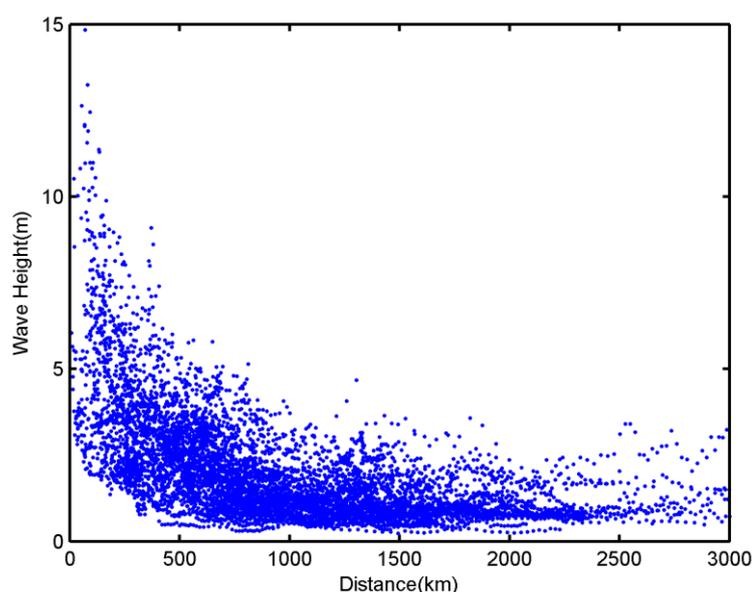


圖 3.6 颱風距離與目標點波高分布

### 3.目標點的方位角 $\theta_1$

由目標點的方位角可以計算目標點是在颱風中心的哪一個方位，本研究設定正北為  $0^\circ$ ，若  $\theta_1$  為  $90^\circ$  表示颱風是在目標點的左側，反之若  $\theta_1$  為  $270^\circ$  則表示颱風位於目標點的東側太平洋的位置，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 $\theta_3$

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 3.7 所示，圖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)。本研究同時考慮  $\theta_3$  與  $\theta_1$  兩種方位角的影響，意即同時考慮到颱風的不對稱性與地形的遮蔽效應，而同時  $\theta_3$  隱含了  $\theta_2$ (颱風移動方位角)的資訊，意即輸入  $\theta_3$  也輸入了  $\theta_2$ ，也等於將颱風的行進路徑一起納入考量。

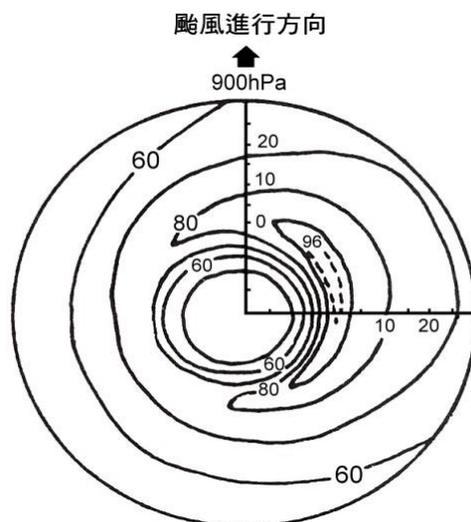


圖 3.7 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(引自中央氣象局)

### 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 類神經颱風波浪推算結果

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，分別為相關係數(R, correlation coefficient)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  及最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$ 。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})}{\sqrt{\left( \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left( \sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)}} \quad (3.22)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (3.23)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (3.24)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (3.25)$$

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波高最大值發生時間； $t_{p,obs}$  為測站實測颱風波浪示性波高最大值發生時間。由(3.24)式可知，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(3.25)式可知，若  $\Delta t_p$  為正值，表示模式推算的示性波高最大值發生時間較實測晚，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  $\Delta t_p$  的平均值部分採用絕對值平均來表示。以安平港與高雄港選擇的各場實測颱風波浪資料進行建立及驗證，其結果如表 3.4 與表 3.5 所示。

表 3.4 安平港類神經颱風波浪推算結果

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)
2000	碧利斯	BILIS	0.84	1.00	0.53	0.76	3.52
2001	奇比	CHEBI	-2.57	2.00	0.75	0.76	6.92
2001	尤特	UTOR	-1.42	21.00	1.80	0.14	5.53
2001	納莉	NARI	0.63	27.00	0.37	0.49	2.58
2001	利奇馬	LEKIMA	-0.04	-13.00	0.39	0.66	2.36
2002	娜克莉	NAKRI	1.32	1.00	0.93	0.26	3.82
2003	伊布都	IMBUDO	-0.31	9.00	0.67	0.56	3.9
2003	莫拉克	MORAKOT	1.55	-4.00	1.10	0.67	2.75
2003	科羅旺	KROVANH	-0.48	4.00	0.59	0.45	3.18
2003	杜鵑	DUJUAN	0.40	-5.00	0.58	0.88	3.52
2004	敏督利	MINDULLE	-0.51	-21.00	0.60	0.74	5.01
2004	南瑪都	NANMADOL	0.90	-6.00	0.77	0.12	2.91
2005	海棠	HAITANG	-0.21	8.00	0.63	0.83	4.76
2005	馬莎	MATSA	0.07	-3.00	0.41	0.58	2.52
2005	珊瑚	SANVU	-0.24	-8.00	0.68	0.88	4.72
2005	泰利	TALIM	0.80	6.00	0.59	0.83	4.05
2005	丹瑞	DAMREY	0.12	-8.00	0.56	0.59	2.73
2005	龍王	LONGWANG	2.42	1.00	0.96	0.92	2.06
2006	珍珠	CHANCHU	-0.08	-9.00	0.64	0.86	5.8
2006	碧利斯	BILIS	-1.51	-14.00	1.11	0.56	5.36
2006	凱米	KAEMI	0.22	-13.00	0.65	0.72	4.08
2007	聖帕	SEPAT	-0.65	5.00	1.31	0.46	5.38
2007	柯羅莎	KROSA	0.11	9.00	0.92	0.42	4.08
2008	風神	FENGSHEN	-1.90	2.00	0.72	0.92	6.16
2008	鳳凰	FUNG_WONG	-1.30	-13.00	0.90	0.88	5.92
2008	如麗	NURI	-0.73	4.00	0.57	0.86	5.08
2009	蓮花	LINFA	-1.61	-7.00	0.67	0.81	6.9
2009	南卡	NANGKA	0.62	2.00	0.66	0.64	3.35
2009	莫拉菲	MOLAVE	0.42	-3.00	0.53	0.92	3.29
2009	莫拉克	MORAKOT	-6.94	-25.00	1.56	0.83	11.9
2010	萊羅克	LIONROCK	0.04	6.00	0.99	0.32	4.11
2010	凡那比	FANAPI	-0.75	-1.00	0.81	0.79	5.72
2010	梅姬	MEGI	-0.96	6.00	0.57	0.88	6.08
2011	米雷	MEARI	0.72	0.00	0.76	0.00	2.13
2012	蘇拉	SAOLA	0.40	16.00	0.37	0.61	2.4
2012	啟德	KAI_TAK	0.35	-4.00	0.59	0.59	2.76
2012	天秤	TEMBIN	-0.01	-8.00	0.66	0.46	3.67
2013	蘇力	SOULIK	1.19	-5.00	0.58	0.81	2.92
2013	尤特	UTOR	-0.13	-2.00	0.94	0.53	3.94
2013	潭美	TRAMI	-0.61	-11.00	0.42	0.85	4.2
2013	康芮	KONG_REY	-1.13	11.00	0.44	0.77	3.13
2013	天兔	USAGI	-1.38	-4.00	0.56	0.85	5.92
2014	雷馬遜	RAMMASUN	0.55	5.00	0.53	0.76	2.77
2014	麥德姆	MATMO	-1.47	-8.00	0.87	0.53	6
2014	卡玫基	KALMAEGI	-0.70	-12.00	0.73	0.41	3.53
2014	鳳凰	FUNG_WONG	0.31	10.00	0.57	0.15	2.75
絕對平均值			0.90	7.89	0.73	0.64	4.26

由表 3.4 中，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 31 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以莫拉克(2009)颱風誤差較大，其誤差達-6.94m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  則以納莉(2001)相差最多，相差 27 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差  $RMSE$  最大為莫拉克(2009)，誤差值為 1.56m。推算波高結果與實測波高的  $R^2$  則以南瑪都(2004)最差，其值為 0.12。此外在驗證組中 15 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以莫拉克(2003)相差最大，誤差 1.55m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以尤特(2001)相差最多，誤差 21 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之  $RMSE$  最大為尤特(2001)，其值為 1.8m。推算波高結果與實測波高的  $R^2$  最差為米雷(2011)。平均來說模式推算結果的各颱風最大波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  約為 0.90m，最大波高發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  約為 7.89 小時， $RMSE$  約為 0.73m， $R^2$  約為 0.64。以四指數來評估模式優劣，其中最大波高值誤差與最大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。

由表 3.5 中，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 32 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以如麗(2008)颱風誤差較大，其誤差達 2.4m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  則以杜鵑(2003)相差最多，相差 23 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差  $RMSE$  最大為杜鵑(2003)，誤差值為 1.17m。推算波高結果與實測波高的  $R^2$  則以杜鵑(2003)最差，其值為 0.31。此外在驗證組中 14 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以娜克莉(2002)相差最大，誤差 2.36m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以馬莎(2005)相差最多，誤差 35 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之  $RMSE$  最大為伊布都(2003)，其值為 0.79m。推算波高結果與實測波高的  $R^2$  最差為娜克莉(2002)的 0.27。平均來說模式推算結果的各颱風最大波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  約為 0.76m，最大波高發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  約為 5.83 小時， $RMSE$  約為 0.59m， $R^2$  約為 0.75。以四指數來評估模式優劣，其中最大波高值誤差與最大波高發生時間誤差越低代表模式

模擬結果越佳。整體評估安平港類神經推算結果中的最大波高其誤差平均值為-0.30m，標準差為 1.4m；高雄港則為-0.14m 與 0.99m，顯示類神經模式於高雄港的推算能力較安平港好，但兩港的模式推算結果都有些微低估的現象。

表 3.5 高雄港類神經颱風波浪推算結果

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)
2001	奇比	CHEBI	-1.44	4.00	0.43	0.94	7.95
2001	利奇馬	LEKIMA	-0.47	-6.00	0.44	0.76	3.77
2002	娜克莉	NAKRI	2.36	1.00	0.72	0.27	3.23
2003	伊布都	IMBUDO	-0.82	10.00	0.79	0.56	4.16
2003	莫拉克	MORAKOT	0.45	-2.00	0.73	0.74	3.21
2003	科羅旺	KROVANH	-0.13	4.00	0.43	0.83	3.13
2003	杜鵬	DUJUAN	-0.66	23.00	1.17	0.31	4.96
2004	康森	CONSON	0.41	-2.00	0.34	0.52	2.13
2004	敏督利	MINDULE	-0.26	-20.00	0.73	0.71	4.94
2004	南瑪都	NANMADOL	1.53	1.00	0.64	0.71	4.06
2005	海棠	HAITANG	-1.55	7.00	0.72	0.94	6.46
2005	馬莎	MATSA	0.77	35.00	0.66	0.49	3.13
2005	珊瑚	SANVU	-0.54	1.00	0.63	0.81	4.75
2005	泰利	TALIM	0.16	2.00	0.54	0.86	4.85
2005	丹瑞	DAMREY	-0.72	2.00	0.49	0.66	3.78
2005	龍王	LONGWANG	1.68	-2.00	0.71	0.76	2.56
2006	珍珠	CHANCHU	-0.27	0.00	0.56	0.92	6.39
2006	碧利斯	BILIS	-2.04	-2.00	0.85	0.83	6.02
2007	柯羅莎	KROSA	0.11	-3.00	0.80	0.50	4.1
2008	風神	FENGSHEN	-1.25	10.00	0.47	0.88	4.43
2008	卡玫基	KALMAEGI	0.22	2.00	0.34	0.86	3.02
2008	鳳凰	FUNG_WONG	0.04	-17.00	0.67	0.79	5.08
2008	如麗	NURI	-2.40	4.00	0.87	0.94	5.99
2008	辛樂克	SINLAKU	1.33	20.00	0.70	0.67	2.77
2008	哈格比	HAGUPIT	0.24	8.00	0.52	0.92	3.42
2008	薔蜜	JANGMI	1.01	-3.00	0.71	0.44	3.4
2009	蓮花	LINFA	-0.49	-3.00	0.50	0.92	6.31
2009	南卡	NANGKA	0.48	1.00	0.31	0.72	2.31
2009	莫拉菲	MOLAVE	0.30	-15.00	0.54	0.81	3.53
2009	芭瑪	PARMA	-0.34	-1.00	0.37	0.64	3.03
2010	萊羅克	LIONROCK	0.32	1.00	0.70	0.71	4.59
2010	莫蘭蒂	MERANTI	-0.01	-1.00	0.64	0.69	4.75
2010	凡那比	FANAPI	0.99	-1.00	0.46	0.92	5.69
2010	梅姬	MEGI	-1.10	9.00	0.52	0.92	6.66
2011	南瑪都	NANMADOL	0.29	-4.00	0.54	0.81	4.48
2011	尼莎	NESAT	-2.09	9.00	0.88	0.90	5.21
2012	泰利	TALIM	-0.94	-6.00	0.69	0.90	6.55
2012	杜蘇芮	DOKSURI	0.61	-1.00	0.58	0.83	2.62
2012	蘇拉	SAOLA	0.81	-4.00	0.40	0.79	2.98
2013	尤特	UTOR	0.06	0.00	0.42	0.92	3.75
2013	潭美	TRAMI	0.06	1.00	0.60	0.76	3.7
2013	康芮	KONG_REY	-0.46	-1.00	0.38	0.83	3.34
2013	天兔	USAGI	-1.08	-3.00	0.40	0.96	5.75

2014	哈吉貝	HAGIBIS	-0.27	1.00	0.52	0.49	3.2
2014	雷瑪遜	RAMMASUN	-0.28	13.00	0.42	0.83	3.51
2014	卡孜基	KALMAEGI	-0.94	2.00	0.68	0.66	3.98
絕對平均值			0.76	5.83	0.59	0.75	4.30

### 3.4 最小化模式樹(M5)波浪推算模式建置

本研究本年度另以最小化模式樹(M5)方法作為另一種波浪推算模式的建置方式，用以驗證比較，本模式之詳細介紹可見，Bhattacharya and Solomatine(2005)、Cios et al.(2007)。

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 3.8 所示。

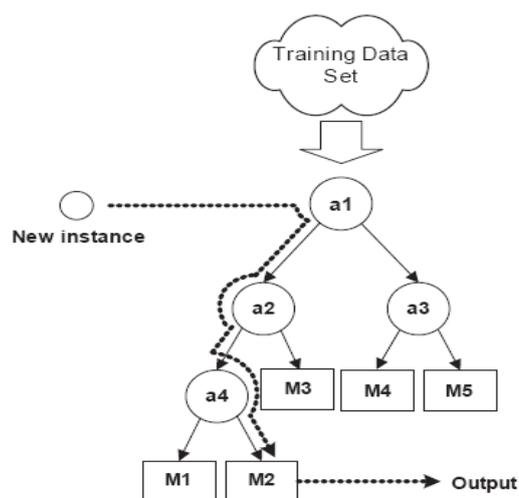


圖 3.8 層級模組法示意圖(ai 為屬性，Mi 為分群之模組)

以兩變數為例，再將分組數據與輸出值做線性回歸，如圖 3.9 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

$$SDR = sd(T) - \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (3.26)$$

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(3.26)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。本研究利用此方法，以安平港與高雄港的颱風資料進行推估颱風所造成的波浪大小。

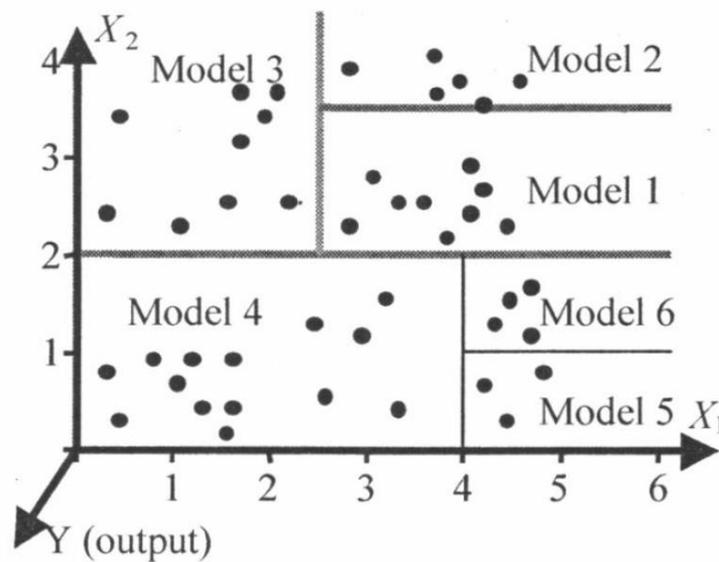


圖 3.9 M5 模式樹之分組樣本在變數  $x_1$  及  $x_2$  分布與輸出  $y$  之示意圖

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。本研究將颱風資訊轉算為 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( $\theta_1$ )、3.颱風侵襲角( $\theta_3$ )、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。

### 3.4.1 模式推算與驗證

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，相關步驟如下：

- 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( $\nu$ )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安平港波浪推算模式其運算規則達 581 組，而高雄港波浪推算模式則為 461 組，顯示安平港的波浪推算模式用了較多的運算規則，表示其複雜度較高。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，安平港與高雄港的波浪模式推算結果與驗證，如表 3.6 與表 3.7 所示。

表 3.6 中，颱風英文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，

將採用前節所述 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、颱風波浪最大波高誤差及最大波高發生時間誤差。

表 3.6 安平港最小化模式樹波浪推算結果與驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)
2000	碧利斯	BILIS	1.04	-5.00	0.78	0.62	3.52
2001	奇比	CHEBI	-2.01	1.00	0.46	0.94	6.92
2001	尤特	UTOR	-1.63	14.00	1.25	0.55	5.53
2001	納莉	NARI	-0.01	22.00	0.25	0.73	2.58
2001	利奇馬	LEKIMA	0.49	-75.00	0.61	0.40	2.36
2002	娜克莉	NAKRI	-0.82	-1.00	0.52	0.57	3.82
2003	伊布都	IMBUDO	-0.94	11.00	0.50	0.82	3.9
2003	莫拉克	MORAKOT	-0.54	-1.00	0.63	0.71	2.75
2003	科羅旺	KROVANH	-0.40	0.00	0.31	0.81	3.18
2003	杜鵑	DUJUAN	-0.18	0.00	0.49	0.88	3.52
2004	敏督利	MINDULLE	-1.28	-11.00	0.82	0.48	5.01
2004	南瑪都	NANMADOL	-0.65	-7.00	0.40	0.51	2.91
2005	海棠	HAITANG	-1.04	13.00	1.03	0.61	4.76
2005	馬莎	MATSA	1.14	-1.00	0.64	0.46	2.52
2005	珊瑚	SANVU	-0.45	-8.00	1.02	0.58	4.72
2005	泰利	TALIM	-0.15	7.00	0.49	0.83	4.05
2005	丹瑞	DAMREY	0.15	-9.00	0.32	0.85	2.73
2005	龍王	LONGWANG	1.64	3.00	0.67	0.87	2.06
2006	珍珠	CHANCHU	-0.36	-18.00	0.87	0.72	5.8
2006	碧利斯	BILIS	-1.43	-11.00	0.58	0.84	5.36
2006	凱米	KAEMI	-0.22	-13.00	0.31	0.95	4.08
2007	聖帕	SEPAT	-1.33	2.00	0.61	0.81	5.38
2007	柯羅莎	KROSA	-0.46	24.00	1.10	0.16	4.08
2008	風神	FENGSHEN	-1.72	-4.00	0.57	0.97	6.16
2008	鳳凰	FUNG_WONG	-2.14	-4.00	1.07	0.85	5.92
2008	如麗	NURI	-0.76	-6.00	0.45	0.93	5.08
2009	蓮花	LINFA	-1.87	1.00	0.58	0.87	6.9
2009	南卡	NANGKA	-0.85	3.00	0.30	0.78	3.35
2009	莫拉菲	MOLAVE	0.35	-12.00	0.33	0.90	3.29
2009	莫拉克	MORAKOT	-7.76	-22.00	1.85	0.46	11.9
2010	萊羅克	LIONROCK	-0.11	-2.00	0.63	0.55	4.11
2010	凡那比	FANAPI	-1.87	0.00	0.65	0.90	5.72
2010	梅姬	MEGI	-1.11	-1.00	0.44	0.95	6.08
2011	米雷	MEARI	-0.05	-1.00	0.21	0.73	2.13
2012	蘇拉	SAOLA	-0.07	16.00	0.34	0.64	2.4
2012	啟德	KAI_TAK	0.13	-4.00	0.42	0.70	2.76
2012	天秤	TEMBIN	-0.70	-20.00	0.44	0.70	3.67
2013	蘇力	SOULIK	0.10	-6.00	0.30	0.92	2.92
2013	尤特	UTOR	-1.19	-3.00	0.44	0.90	3.94
2013	潭美	TRAMI	-0.36	-5.00	0.54	0.73	4.2
2013	康芮	KONG_REY	-0.32	11.00	0.37	0.78	3.13
2013	天兔	USAGI	-0.60	-5.00	0.65	0.83	5.92
2014	雷馬遜	RAMMASUN	-0.13	2.00	0.23	0.95	2.77
2014	麥德姆	MATMO	-2.31	-1.00	0.68	0.66	6
2014	卡玫基	KALMAEGI	-0.77	-2.00	0.31	0.91	3.53
2014	鳳凰	FUNG_WONG	-0.42	37.00	0.39	0.46	2.75
絕對平均值			0.96	9.24	0.58	0.73	4.26

由表 3.6 中可發現安平港學習組中 31 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以莫拉克(2009)颱風誤差較大，其峰值大小相差 7.26m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以利奇馬(2001)相差最多，差 75 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差  $RMSE$  最大為莫拉克(2009)，其誤差達 1.85m。推算波高結果與實測波高的判定係數  $R^2$  則以柯羅莎(2007)最差，其值為 0.16。此外在驗證組中 15 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以麥德姆(2014)相差最大，誤差 2.31m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以鳳凰(2014)相差最多，誤差 37 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之  $RMSE$  最大為尤特(2001)，其值為 1.25m。推算波高結果與實測波高  $R^2$  最差為鳳凰(2014)的 0.46。平均來說模式推算結果的各颱風最大波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  約為 0.96m，最大波高發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  約為 9.24 小時， $RMSE$  約為 0.58m， $R^2$  約為 0.73。

由表 3.7 中顯示，高雄港學習組中 32 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以海棠(2005)颱風誤差較大，其值為 2.38m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以丹瑞(2005)相差最多，與實際資料相差 49 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差  $RMSE$  最大為杜鵑(2003)，其誤差達 1.06m。推算波高結果與實測波高的判定係數  $R^2$  亦以杜鵑(2003)最差，其值為 0.34。此外在驗證組中 14 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以娜克莉(2001)相差最大，誤差 2.16m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以敏督利(2004)相差最多，誤差 20 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差  $RMSE$  最大為娜克莉(2003)，其值為 1.07m。推算波高結果與實測波高的  $R^2$  最差為馬莎(2005)的 0.32。平均來說模式推算結果的各颱風波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  約為 0.82m，波高誤差發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  約為 6.87 小時， $RMSE$  約為 0.60m， $R^2$  約為 0.74。以四個指標來評估安平港與高雄港的 M5 最小化模式樹波浪推算模式，發現高雄港的推算能力較安平港好。

表 3.7 高雄港最小化模式樹波浪推算結果與驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)
2001	奇比	CHEBI	-1.71	-1.00	0.52	0.94	7.95
2001	利奇馬	LEKIMA	-0.62	-8.00	0.44	0.75	3.77
2002	娜克莉	NAKRI	2.16	0.00	1.07	0.51	3.23
2003	伊布都	IMBUDO	-0.45	1.00	0.87	0.49	4.16
2003	莫拉克	MORAKOT	0.77	-4.00	0.77	0.82	3.21
2003	科羅旺	KROVANH	0.50	7.00	0.56	0.81	3.13
2003	杜鵑	DUJUAN	-0.44	19.00	1.06	0.34	4.96
2004	康森	CONSON	0.06	21.00	0.39	0.45	2.13
2004	敏督利	MINDULLE	-0.47	-20.00	0.72	0.70	4.94
2004	南瑪都	NANMADOL	0.98	2.00	0.44	0.76	4.06
2005	海棠	HAITANG	-2.38	1.00	0.90	0.93	6.46
2005	馬莎	MATSA	0.82	-7.00	0.66	0.32	3.13
2005	珊瑚	SANVU	-0.60	2.00	0.97	0.57	4.75
2005	泰利	TALIM	0.13	2.00	0.42	0.91	4.85
2005	丹瑞	DAMREY	-0.19	49.00	0.59	0.63	3.78
2005	龍王	LONGWANG	1.15	-2.00	0.58	0.86	2.56
2006	珍珠	CHANCHU	-1.44	2.00	0.58	0.94	6.39
2006	碧利斯	BILIS	-2.17	6.00	0.96	0.73	6.02
2007	柯羅莎	KROSA	-0.55	-4.00	0.83	0.39	4.1
2008	風神	FENGSHEN	-0.38	-2.00	0.45	0.85	4.43
2008	卡玫基	KALMAEGI	-0.13	-11.00	0.27	0.91	3.02
2008	鳳凰	FUNG_WONG	-0.64	-17.00	0.54	0.90	5.08
2008	如麗	NURI	-2.01	3.00	0.81	0.89	5.99
2008	辛樂克	SINLAKU	1.31	4.00	0.76	0.77	2.77
2008	哈格比	HAGUPIT	-0.14	0.00	0.42	0.86	3.42
2008	薔蜜	JANGMI	1.53	0.00	0.83	0.45	3.4
2009	蓮花	LINFA	-1.31	-3.00	0.70	0.85	6.31
2009	南卡	NANGKA	0.96	1.00	0.32	0.65	2.31
2009	莫拉菲	MOLAVE	0.47	-17.00	0.79	0.48	3.53
2009	芭瑪	PARMA	-0.76	-2.00	0.43	0.48	3.03
2010	萊羅克	LIONROCK	0.32	-2.00	0.54	0.80	4.59
2010	莫蘭蒂	MERANTI	0.05	-1.00	0.50	0.81	4.75
2010	凡那比	FANAPI	-0.64	-2.00	0.65	0.89	5.69
2010	梅姬	MEGI	-1.57	4.00	0.53	0.92	6.66
2011	南瑪都	NANMADOL	0.10	-5.00	0.61	0.79	4.48
2011	尼莎	NESAT	-1.38	-4.00	0.62	0.92	5.21
2012	泰利	TALIM	-1.46	1.00	0.85	0.84	6.55
2012	杜蘇芮	DOKSURI	1.09	8.00	0.58	0.68	2.62
2012	蘇拉	SAOLA	-0.34	-3.00	0.31	0.88	2.98
2013	尤特	UTOR	0.02	-11.00	0.36	0.96	3.75
2013	潭美	TRAMI	-0.26	12.00	0.56	0.67	3.7
2013	康芮	KONG_REY	-0.91	5.00	0.30	0.91	3.34
2013	天兔	USAGI	-1.08	-11.00	0.59	0.86	5.75
2014	哈吉貝	HAGIBIS	-0.40	-2.00	0.53	0.56	3.2
2014	雷瑪遜	RAMMASUN	-0.19	24.00	0.32	0.89	3.51
2014	卡玫基	KALMAEGI	-0.76	3.00	0.31	0.92	3.98
絕對平均值			0.82	6.87	0.60	0.74	4.26

### 3.5 類神經與 M5 模式之推算結果比較

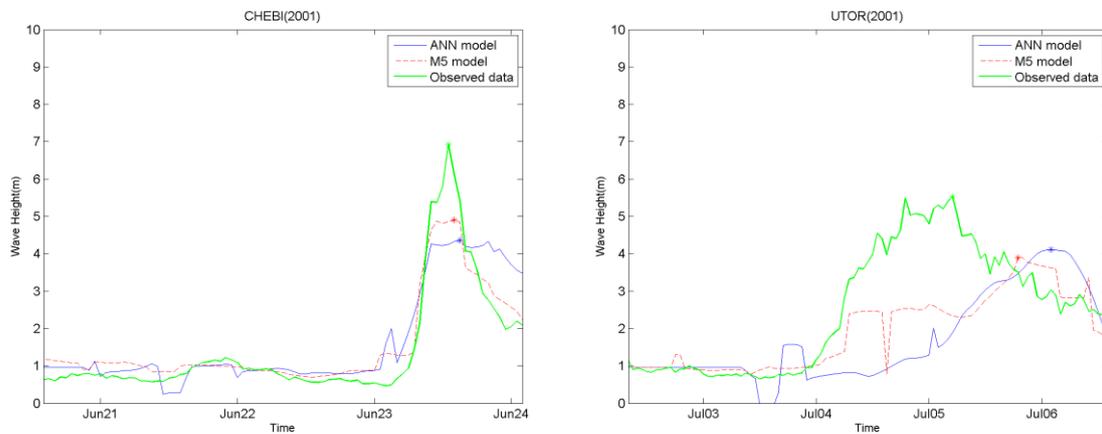
本節中將安平港與高雄港最小化模式樹(M5)波浪推算模式(以下簡稱 M5 模式)與類神經波浪推算模式(以下簡稱類神經模式)之推算結果作一比較。

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，兩種方法雖有差異但皆適合用來模擬複雜的機制。安平港兩種模式推算結果與實測資料進行比較的 46 場颱風如表 3.8。以安平港 46 場颱風來看，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。由表 3.8 的結果比較中可以發現，大部分颱風以兩種不同模式推估的結果類似，全部 46 場颱風中有 24 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 3.8 安平港兩種波浪推算模式的推估比較

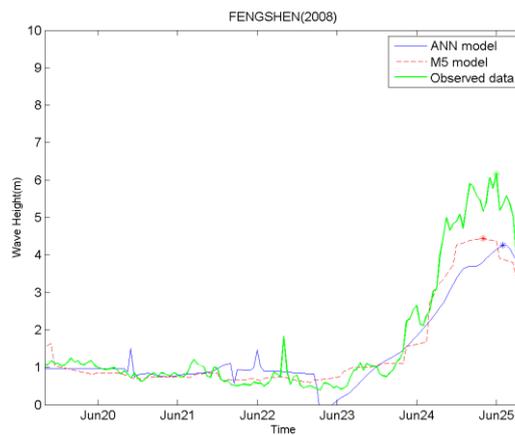
年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$	$\Delta t_p$	RMSE	R <sup>2</sup>	$\Delta H_{s,p}$	$\Delta t_p$	RMSE	R <sup>2</sup>	$H_{obs}$
		(m)	(hour)			(m)	(hour)			
		類神經				M5				(m)
2000	碧利斯(BILIS)	0.84	1.00	0.53	0.76	1.04	-5.00	0.78	0.62	3.52
2001	奇比(CHEBI)	-2.57	2.00	0.75	0.76	-2.01	1.00	0.46	0.94	6.92
2001	尤特(UTOR)	-1.42	21.00	1.80	0.14	-1.63	14.00	1.25	0.55	5.53
2001	納莉(NARI)	0.63	27.00	0.37	0.49	-0.01	22.00	0.25	0.73	2.58
2001	利奇馬(LEKIMA)	-0.04	-13.00	0.39	0.66	0.49	-75.00	0.61	0.40	2.36
2002	娜克莉(NAKRI)	1.32	1.00	0.93	0.26	-0.82	-1.00	0.52	0.57	3.82
2003	伊布都(IMBUDO)	-0.31	9.00	0.67	0.56	-0.94	11.00	0.50	0.82	3.9
2003	莫拉克(MORAKOT)	1.55	-4.00	1.10	0.67	-0.54	-1.00	0.63	0.71	2.75
2003	科羅旺(KROVANH)	-0.48	4.00	0.59	0.45	-0.40	0.00	0.31	0.81	3.18
2003	杜鵑(DUJUAN)	0.40	-5.00	0.58	0.88	-0.18	0.00	0.49	0.88	3.52
2004	敏督利(MINDULLE)	-0.51	-21.00	0.60	0.74	-1.28	-11.00	0.82	0.48	5.01
2004	南瑪都(NANMADOL)	0.90	-6.00	0.77	0.12	-0.65	-7.00	0.40	0.51	2.91
2005	海棠(HAITANG)	-0.21	8.00	0.63	0.83	-1.04	13.00	1.03	0.61	4.76
2005	馬莎(MATSA)	0.07	-3.00	0.41	0.58	1.14	-1.00	0.64	0.46	2.52
2005	珊瑚(SANVU)	-0.24	-8.00	0.68	0.88	-0.45	-8.00	1.02	0.58	4.72
2005	泰利(TALIM)	0.80	6.00	0.59	0.83	-0.15	7.00	0.49	0.83	4.05
2005	丹瑞(DAMREY)	0.12	-8.00	0.56	0.59	0.15	-9.00	0.32	0.85	2.73
2005	龍王(LONGWANG)	2.42	1.00	0.96	0.92	1.64	3.00	0.67	0.87	2.06
2006	珍珠(CHANCHU)	-0.08	-9.00	0.64	0.86	-0.36	-18.00	0.87	0.72	5.8
2006	碧利斯(BILIS)	-1.51	-14.00	1.11	0.56	-1.43	-11.00	0.58	0.84	5.36
2006	凱米(KAEMI)	0.22	-13.00	0.65	0.72	-0.22	-13.00	0.31	0.95	4.08
2007	聖帕(SEPAT)	-0.65	5.00	1.31	0.46	-1.33	2.00	0.61	0.81	5.38
2007	柯羅莎(KROSA)	0.11	9.00	0.92	0.42	-0.46	24.00	1.10	0.16	4.08
2008	風神(FENGSHEN)	-1.90	2.00	0.72	0.92	-1.72	-4.00	0.57	0.97	6.16
2008	鳳凰(FUNG_WONG)	-1.30	-13.00	0.90	0.88	-2.14	-4.00	1.07	0.85	5.92
2008	如麗(NURI)	-0.73	4.00	0.57	0.86	-0.76	-6.00	0.45	0.93	5.08
2009	蓮花(LINFA)	-1.61	-7.00	0.67	0.81	-1.87	1.00	0.58	0.87	6.9
2009	南卡(NANGKA)	0.62	2.00	0.66	0.64	-0.85	3.00	0.30	0.78	3.35
2009	莫拉菲(MOLAVE)	0.42	-3.00	0.53	0.92	0.35	-12.00	0.33	0.90	3.29
2009	莫拉克(MORAKOT)	-6.94	-25.00	1.56	0.83	-7.76	-22.00	1.85	0.46	11.9
2010	萊羅克(LIONROCK)	0.04	6.00	0.99	0.32	-0.11	-2.00	0.63	0.55	4.11
2010	凡那比(FANAPI)	-0.75	-1.00	0.81	0.79	-1.87	0.00	0.65	0.90	5.72
2010	梅姬(MEGI)	-0.96	6.00	0.57	0.88	-1.11	-1.00	0.44	0.95	6.08
2011	米雷(MEARI)	0.72	0.00	0.76	0.00	-0.05	-1.00	0.21	0.73	2.13
2012	蘇拉(SAOLA)	0.40	16.00	0.37	0.61	-0.07	16.00	0.34	0.64	2.4
2012	啟德(KAI_TAK)	0.35	-4.00	0.59	0.59	0.13	-4.00	0.42	0.70	2.76
2012	天秤(TEMBIN)	-0.01	-8.00	0.66	0.46	-0.70	-20.00	0.44	0.70	3.67
2013	蘇力(SOULIK)	1.19	-5.00	0.58	0.81	0.10	-6.00	0.30	0.92	2.92
2013	尤特(UTOR)	-0.13	-2.00	0.94	0.53	-1.19	-3.00	0.44	0.90	3.94
2013	潭美(TRAMI)	-0.61	-11.00	0.42	0.85	-0.36	-5.00	0.54	0.73	4.2
2013	康芮(KONG_REY)	-1.13	11.00	0.44	0.77	-0.32	11.00	0.37	0.78	3.13
2013	天兔(USAGI)	-1.38	-4.00	0.56	0.85	-0.60	-5.00	0.65	0.83	5.92
2014	雷馬遜(RAMMASUN)	0.55	5.00	0.53	0.76	-0.13	2.00	0.23	0.95	2.77
2014	麥德姆(MATMO)	-1.47	-8.00	0.87	0.53	-2.31	-1.00	0.68	0.66	6
2014	卡攷基(KALMAEGI)	-0.70	-12.00	0.73	0.41	-0.77	-2.00	0.31	0.91	3.53
2014	鳳凰(FUNG_WONG)	0.31	10.00	0.57	0.15	-0.42	37.00	0.39	0.46	2.75
平均絕對值		0.90	7.89	0.73	0.64	0.96	9.24	0.58	0.73	0.85

本研究選出下列在安平港推算中誤差較大的颱風進行探討與比較，如奇比(2001)、尤特(2001)與風神(2008)三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 3.10。圖中奇比(2001)與風神(2008)兩種模式的推算結果在趨勢上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。尤特(2001)颱風兩種模式的推算結果皆與實測有很大的差異，尤其峰值發生時間更與實測峰值有 14~21 小時的差異，然而由尤特颱風在本計畫中是屬於測試用颱風，也就是完全沒有納入兩種模式的訓練資料群，若未來作模式更新可考慮納入訓練資料群。



(a)奇比(2001)

(b)尤特(2001)



(c)風神(2008)

圖 3.10 安平港 M5 與類神經模式推算結果低估時的比較結果

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，排除其中由於颱風波浪峰值不明顯的案例外，發現某類的西行颱風侵台後進入台灣海峽往西北方移動時，造成安平港波浪測站有測得較大的波浪，而兩種模式對於此類颱風峰值的推估會有較大誤差，如圖 3.11、圖 3.12 及圖 3.13 的碧利斯(2006)、鳳凰(2008)及莫拉克(2009)三場。圖中除了看出兩種模式推算的峰值結果都偏早發生，以最大風速與其颱風中心與推算點的距離時序列圖來看，這三場颱風波浪實測資料中發生峰值的時間點都明顯較為延遲，表示颱風遠離台灣登入中國大陸後還有可能會在安平港發生波高峰值，這種狀況是目前兩種模式都無法正確模擬的。目前無法判明是否為一般傳統所稱的『回南效應』所造成，未來可配合現場風速資料做評估。

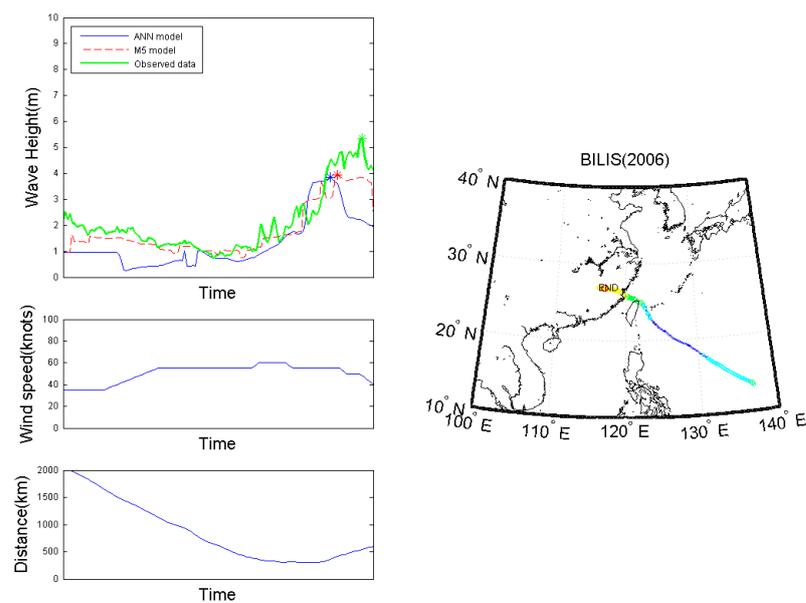


圖 3.11 兩種模式推算碧利斯(2006)颱風與安平港實測波浪的結果比較

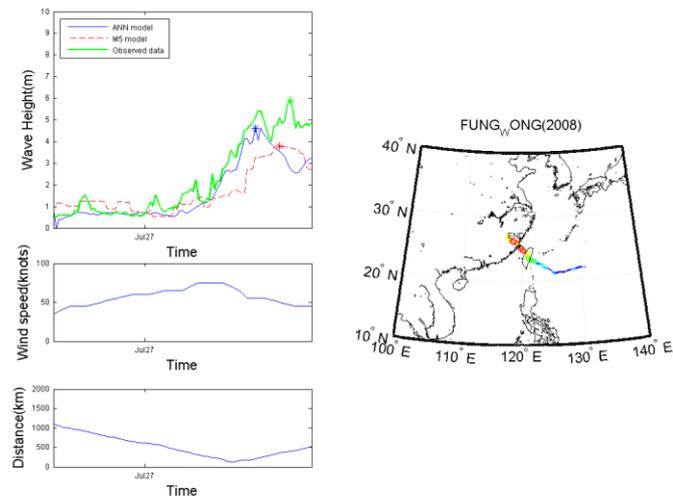


圖 3.12 兩種模式推算鳳凰(2008)颱風與安平港實測波浪的結果比較

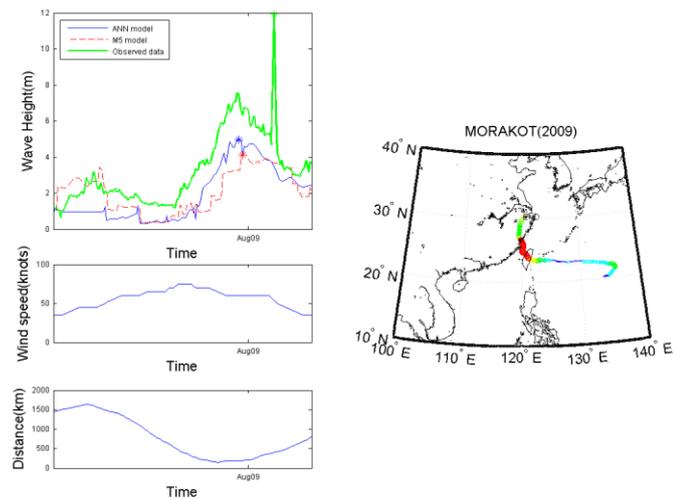


圖 3.13 兩種模式推算莫拉克(2009)颱風與安平港實測波浪的結果比較

另以高雄港 M5 模式與類神經模式之推算結果進行比較，選取兩種模式皆有推算出結果且能與實測資料進行比較的颱風共 46 場如表 3.9。其中以四種模式評估指標包括：波高峰值、峰值發生時間、*RMSE* 與  $R^2$  進行評估，以高雄港 46 場颱風的絕對平均值來看，類神經模式在各方面的精度都高於 M5 模式所推估的結果。

表 3.9 高雄港兩種波浪推算模式的推估比較

年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$	$\Delta t_p$	RMSE	R <sup>2</sup>	$\Delta H_{s,p}$	$\Delta t_p$	RMSE	R <sup>2</sup>	$H_{obs}$
		(m)	(hour)			(m)	(hour)			
		類神經				M5				(m)
2001	奇比(CHEBI)	-1.44	4.00	0.43	0.94	-1.71	-1.00	0.52	0.94	7.95
2001	利奇馬(LEKIMA)	-0.47	-6.00	0.44	0.76	-0.62	-8.00	0.44	0.75	3.77
2002	娜克莉(NAKRI)	2.36	1.00	0.72	0.27	2.16	0.00	1.07	0.51	3.23
2003	伊布都(IMBUDO)	-0.82	10.00	0.79	0.56	-0.45	1.00	0.87	0.49	4.16
2003	莫拉克(MORAKOT)	0.45	-2.00	0.73	0.74	0.77	-4.00	0.77	0.82	3.21
2003	科羅旺(KROVANH)	-0.13	4.00	0.43	0.83	0.50	7.00	0.56	0.81	3.13
2003	杜鵑(DUJUAN)	-0.66	23.00	1.17	0.31	-0.44	19.00	1.06	0.34	4.96
2004	康森(CONSON)	0.41	-2.00	0.34	0.52	0.06	21.00	0.39	0.45	2.13
2004	敏督利(MINDULLE)	-0.26	-20.00	0.73	0.71	-0.47	-20.00	0.72	0.70	4.94
2004	南瑪都(NANMADOL)	1.53	1.00	0.64	0.71	0.98	2.00	0.44	0.76	4.06
2005	海棠(HAITANG)	-1.55	7.00	0.72	0.94	-2.38	1.00	0.90	0.93	6.46
2005	馬莎(MATSA)	0.77	35.00	0.66	0.49	0.82	-7.00	0.66	0.32	3.13
2005	珊瑚(SANVU)	-0.54	1.00	0.63	0.81	-0.60	2.00	0.97	0.57	4.75
2005	泰利(TALIM)	0.16	2.00	0.54	0.86	0.13	2.00	0.42	0.91	4.85
2005	丹瑞(DAMREY)	-0.72	2.00	0.49	0.66	-0.19	49.00	0.59	0.63	3.78
2005	龍王(LONGWANG)	1.68	-2.00	0.71	0.76	1.15	-2.00	0.58	0.86	2.56
2006	珍珠(CHANCHU)	-0.27	0.00	0.56	0.92	-1.44	2.00	0.58	0.94	6.39
2006	碧利斯(BILIS)	-2.04	-2.00	0.85	0.83	-2.17	6.00	0.96	0.73	6.02
2007	柯羅莎(KROSA)	0.11	-3.00	0.80	0.50	-0.55	-4.00	0.83	0.39	4.1
2008	風神(FENGSHEN)	-1.25	10.00	0.47	0.88	-0.38	-2.00	0.45	0.85	4.43
2008	卡玫基(KALMAEGI)	0.22	2.00	0.34	0.86	-0.13	-11.00	0.27	0.91	3.02
2008	鳳凰(FUNG_WONG)	0.04	-17.00	0.67	0.79	-0.64	-17.00	0.54	0.90	5.08
2008	如麗(NURI)	-2.40	4.00	0.87	0.94	-2.01	3.00	0.81	0.89	5.99
2008	辛樂克(SINLAKU)	1.33	20.00	0.70	0.67	1.31	4.00	0.76	0.77	2.77
2008	哈格比(HAGUPIT)	0.24	8.00	0.52	0.92	-0.14	0.00	0.42	0.86	3.42
2008	薔蜜(JANGMI)	1.01	-3.00	0.71	0.44	1.53	0.00	0.83	0.45	3.4
2009	蓮花(LINFA)	-0.49	-3.00	0.50	0.92	-1.31	-3.00	0.70	0.85	6.31
2009	南卡(NANGKA)	0.48	1.00	0.31	0.72	0.96	1.00	0.32	0.65	2.31
2009	莫拉菲(MOLAVE)	0.30	-15.00	0.54	0.81	0.47	-17.00	0.79	0.48	3.53
2009	芭瑪(PARMA)	-0.34	-1.00	0.37	0.64	-0.76	-2.00	0.43	0.48	3.03
2010	萊羅克(LIONROCK)	0.32	1.00	0.70	0.71	0.32	-2.00	0.54	0.80	4.59
2010	莫蘭蒂(MERANTI)	-0.01	-1.00	0.64	0.69	0.05	-1.00	0.50	0.81	4.75
2010	凡那比(FANAPI)	0.99	-1.00	0.46	0.92	-0.64	-2.00	0.65	0.89	5.69
2010	梅姬(MEGI)	-1.10	9.00	0.52	0.92	-1.57	4.00	0.53	0.92	6.66
2011	南瑪都(NANMADOL)	0.29	-4.00	0.54	0.81	0.10	-5.00	0.61	0.79	4.48
2011	尼莎(NESAT)	-2.09	9.00	0.88	0.90	-1.38	-4.00	0.62	0.92	5.21
2012	泰利(TALIM)	-0.94	-6.00	0.69	0.90	-1.46	1.00	0.85	0.84	6.55
2012	杜蘇芮(DOKSURI)	0.61	-1.00	0.58	0.83	1.09	8.00	0.58	0.68	2.62
2012	蘇拉(SAOLA)	0.81	-4.00	0.40	0.79	-0.34	-3.00	0.31	0.88	2.98
2013	尤特(UTOR)	0.06	0.00	0.42	0.92	0.02	-11.00	0.36	0.96	3.75
2013	潭美(TRAMI)	0.06	1.00	0.60	0.76	-0.26	12.00	0.56	0.67	3.7
2013	康芮(KONG_REY)	-0.46	-1.00	0.38	0.83	-0.91	5.00	0.30	0.91	3.34
2013	天兔(USAGI)	-1.08	-3.00	0.40	0.96	-1.08	-11.00	0.59	0.86	5.75
2014	哈吉貝(HAGIBIS)	-0.27	1.00	0.52	0.49	-0.40	-2.00	0.53	0.56	3.2
2014	雷瑪遜(RAMMASUN)	-0.28	13.00	0.42	0.83	-0.19	24.00	0.32	0.89	3.51
2014	卡玫基(KALMAEGI)	-0.94	2.00	0.68	0.66	-0.76	3.00	0.31	0.92	3.98
平均絕對值		0.76	5.83	0.59	0.75	0.82	6.87	0.60	0.74	4.26

由表 3.9 中可以發現娜克莉(2001)、海棠(2005)、碧利斯(2006)鳳凰(2008)及尼莎(2011)等五場颱風由兩個模式推估的結果其波浪峰值皆與實測紀錄有較大差異，其中娜克莉(2001)的推算結果為高估，其餘則較低於實測波浪資料。娜克莉(2001)的波高比較圖如圖 3.14 所示，圖中顯示本場颱風自高雄外海處生成，而後穿過台灣本島往東北方前進，由於其生成點與推算點太接近，且此類西南往東北移動的颱風更為少見，目前兩種模式推估出來的結果峰值發生時間吻合，但峰值波高有明顯高估的現象，未來若有此類型颱風可再加以評估是否納入訓練資料群，以提高模式精度。圖 3.15 為兩種模式推算結果其波高峰值皆明顯低於實測波浪資料的四場颱風，此類情況除了造成模式預報對於現場情況的低估外，若採用此資料進行極值分析推估設計波高可能將造成誤判。目前本計畫所建立的兩種模式都將此四場颱風納入訓練資料群中，但推算出來的波高峰值誤差仍約為 2m。

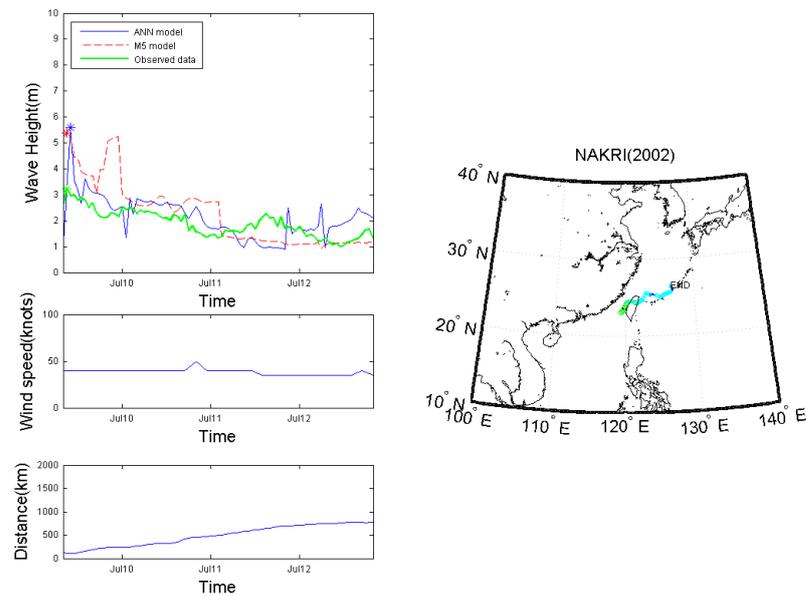
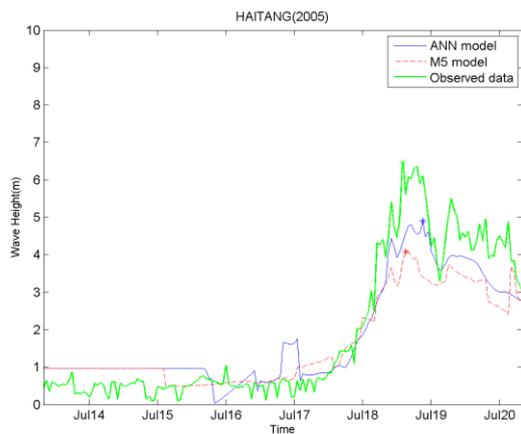
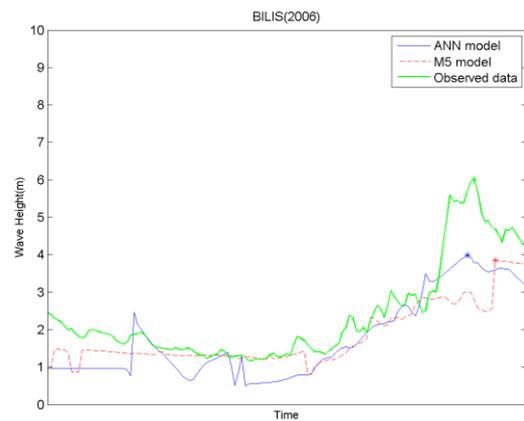


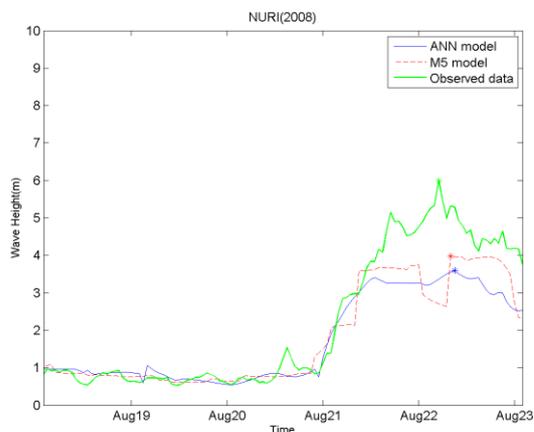
圖 3.14 兩種模式推算娜克莉(2001)颱風與高雄港實測波浪的結果比較



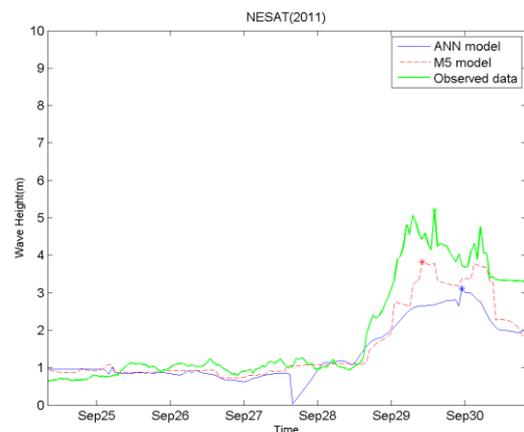
(a)海棠(2005)



(b)碧利斯(2006)



(c)如麗(2008)



(d)尼莎(2011)

圖 3.15 高雄港 M5 與類神經模式推算的結果比較

[(a)海棠(2005) (b)碧利斯(2006) (c)如麗(2008) (d)尼莎(2011)]

由表 3.9 中，另外可以發現有杜鵑(2003)、敏督莉(2004)、鳳凰(2008)與莫拉菲(2009)四場颱風的推算結果在波高峰值發生時間上有較大的誤差，圖 3.16 為杜鵑(2003)颱風的推算結果比較圖，圖中顯示杜鵑颱風中心在距離高雄港約 500km 遠處的花蓮外海即造成高雄港測站測得 5m 的波高峰值，此類現象較為少見，以目前兩種模式納入訓練資料也無法推估出類似結果。另圖 3.17、圖 3.18 及圖 3.19 分別為敏督利(2004)、鳳凰(2008)及莫拉菲(2009)三場颱風的推估與實測比較圖，圖中顯示兩

種模式推估的峰值發生時間點都偏早，由實測波浪資料中來看這場颱風在最靠近高雄港時幾乎都有造成一波高峰值，但隨著颱風遠離波高下降後，在颱風中心接近中國大陸時在高雄港又會造成一更大的峰值，此期間約相差 15 至 20 小時，目前兩種模式所推估的峰值發生時間都是颱風中心靠近推算點高雄港的第一個峰值時間，所以峰值推估時間會與實測資料有較大的誤差。

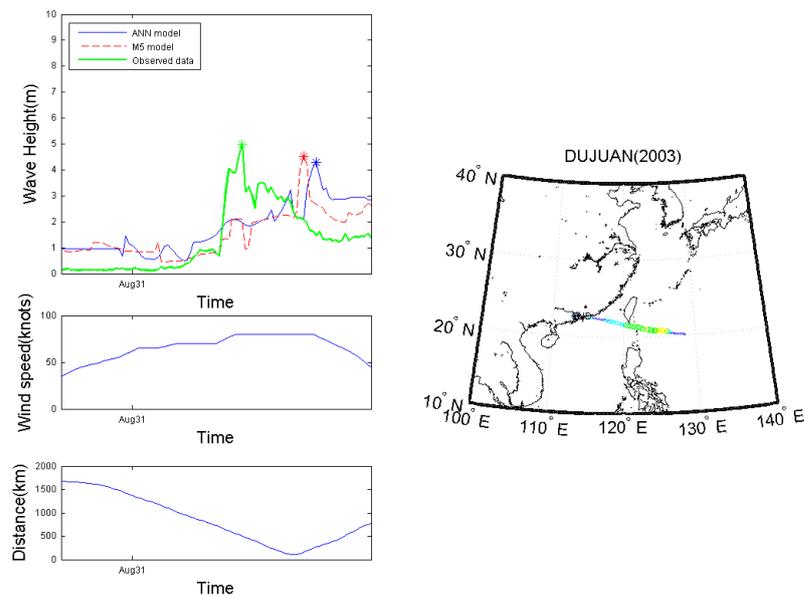


圖 3.16 高雄港 M5 與類神經模式推算 2003 年杜鵑颱風的結果比較

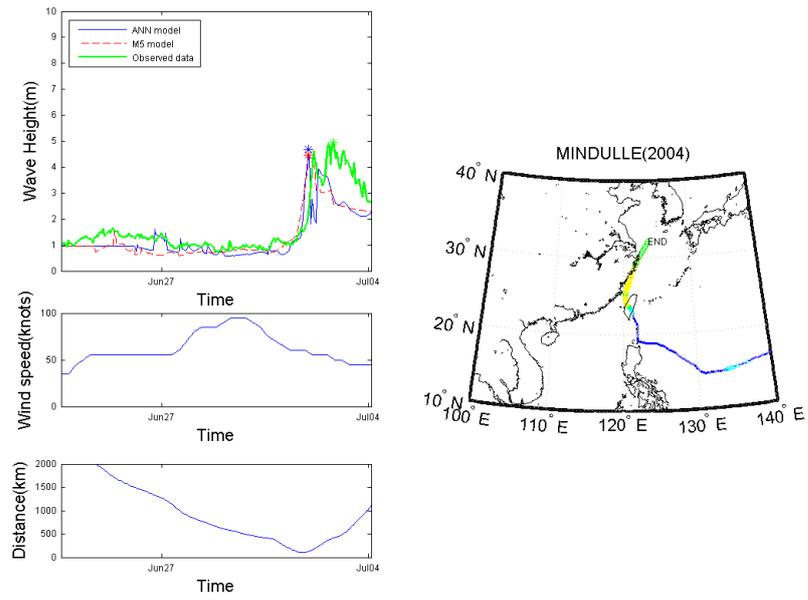


圖 3.17 高雄港 M5 與類神經模式推算 2004 年敏督利颱風的結果比較

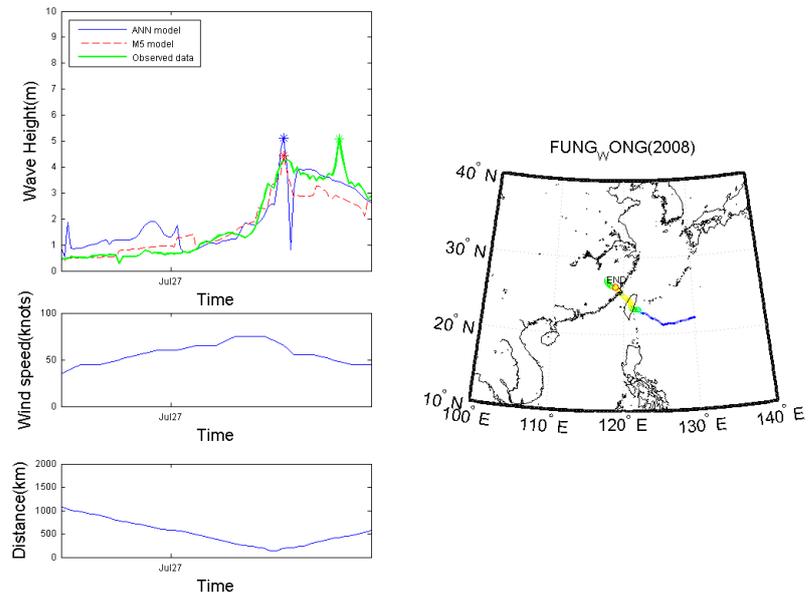


圖 3.18 高雄港 M5 與類神經模式推算 2008 年鳳凰颱風的結果比較

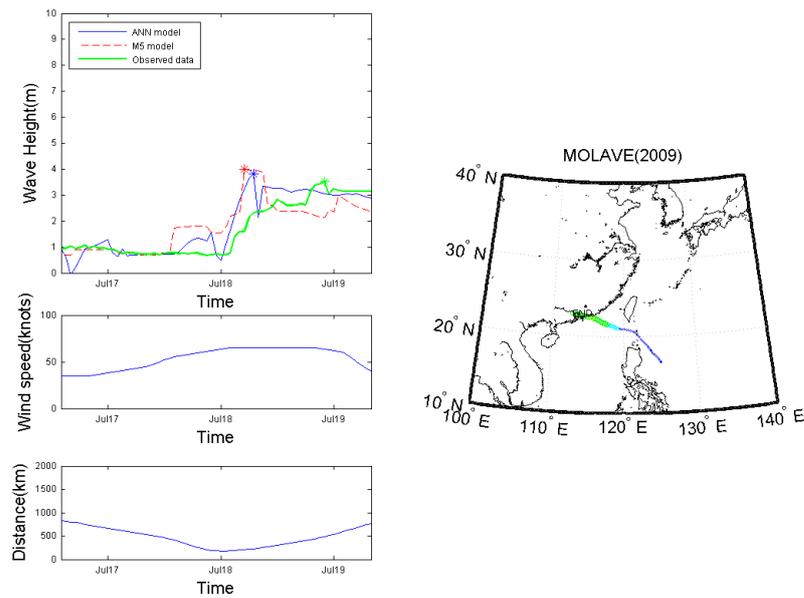


圖 3.19 高雄港 M5 與類神經模式推算 2009 年莫拉菲颱風的結果比較

在上述分析與比較中顯示，最小化模式樹(M5)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。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。

### 3.6 各港域類神經模式推算精度比較

綜合本研究 102 年~104 年的研究成果，交通部運輸研究所港灣技術研究中心已完成包括花蓮、高雄、臺北、臺中、基隆及蘇澳等全國六大國際港及安平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安平港與高雄港之推算模式。表 3.10 為三年來發展颱風波浪推算模式的成效比較，其中  $\Delta H_{s,p}$  部分是以高雄港最佳，誤差 0.76m，但其可能原因是為高雄港記錄的颱風波浪峰值都較其他港小。

最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  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  $R^2$  以最高雄港為最佳，其值為 0.75。

表 3.10 各港域類神經颱風波浪推算成效比較

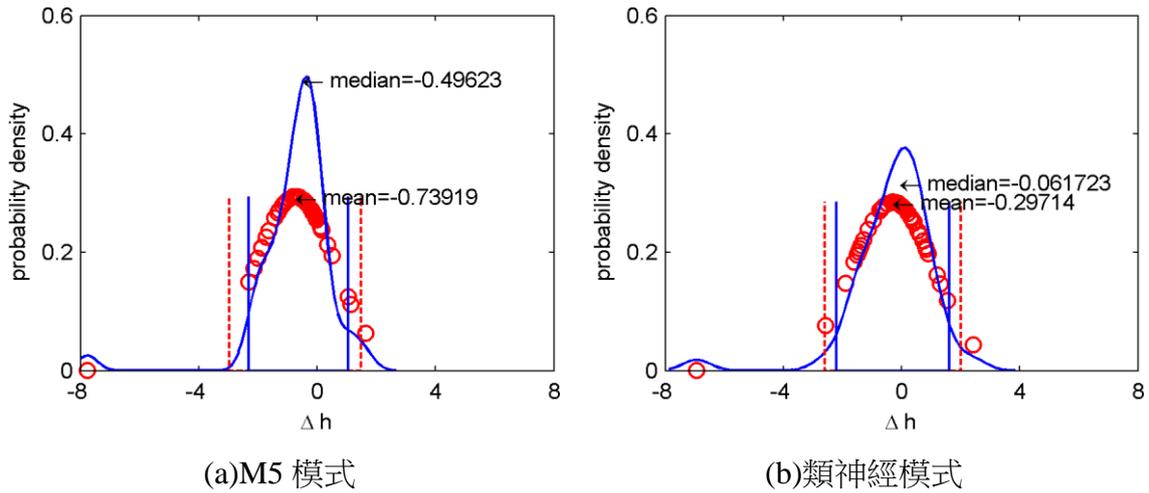
	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$
花蓮港	0.98	5.04	0.69	0.69
高雄港	0.76	5.83	0.59	0.75
安平港	0.90	7.89	0.73	0.64
臺北港	0.93	6.35	0.81	0.58
臺中港	0.79	10.86	0.70	0.50
基隆港	0.95	6.00	0.69	0.66
蘇澳港	1.09	5.96	0.85	0.66

隨著觀測資料量的增加，本研究在更新的安平港與高雄港類神經波浪推算模式的精度有很大的提升。往昔臺灣東岸與北端的花蓮港、蘇澳港與基隆港三個港的模式的推算結果較佳，相反的西岸的高雄港、安平港、臺中港及西北端的臺北港則明顯較差。現在透過更多颱風波浪樣本進行模式更新，各港的類神經波浪模式推算能力皆能有所提升，而且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。

### 3.7 波浪推算模式誤差分析

前節中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，安平港的最大波高推算誤差分析如圖 3.20，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 3.20 顯示以安平港 M5 模式推算結果的各場颱風波高波峰值誤差的誤差分析，其平均值為 -0.74m，中位數

為-0.50m，標準差為 1.36m，46 個樣本中不通過 95%信賴度的有 2 個，佔全部的 4.35%。安平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-0.30m，中位數為-0.06m，標準差為 1.40m，46 個樣本中為於 95%信賴度區間外的有 2 個，佔全部的 4.35%。



**圖 3.20 安平港波浪推算模式之推算波高誤差分析**

圖 3.21 顯示以安平港 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-1.98 小時，中位數為-1.00 小時，標準差為 15.63 小時，46 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 6.52%。安平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-1.11 小時，中位數為-1.50 小時，標準差為 10.11 小時，46 個樣本中為於 95%信賴度區間外的有 5 個，佔全部的 10.87%。

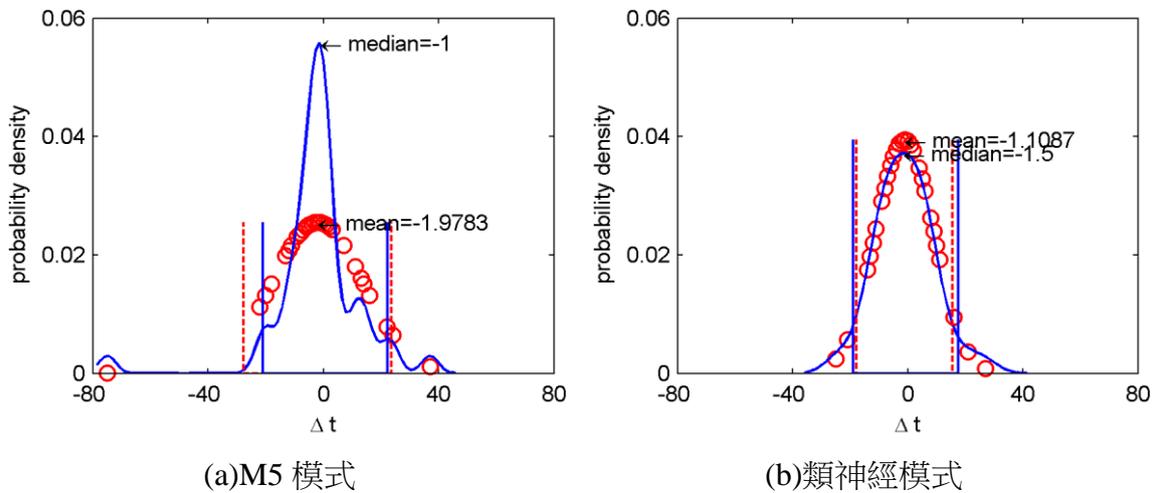


圖 3.21 安平港波浪推算模式之推算峰值發生時間誤差分析

圖 3.22 顯示以高雄港 M5 模式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-0.28m，中位數為-0.36m，標準差為 1.00m，46 個樣本中不通過 95%信賴度的有 5 個，佔全部的 10.87%。高雄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-0.14m，中位數為-0.07m，標準差為 0.99m，46 個樣本中為於 95%信賴度區間外的有 6 個，佔全部的 13.04%。

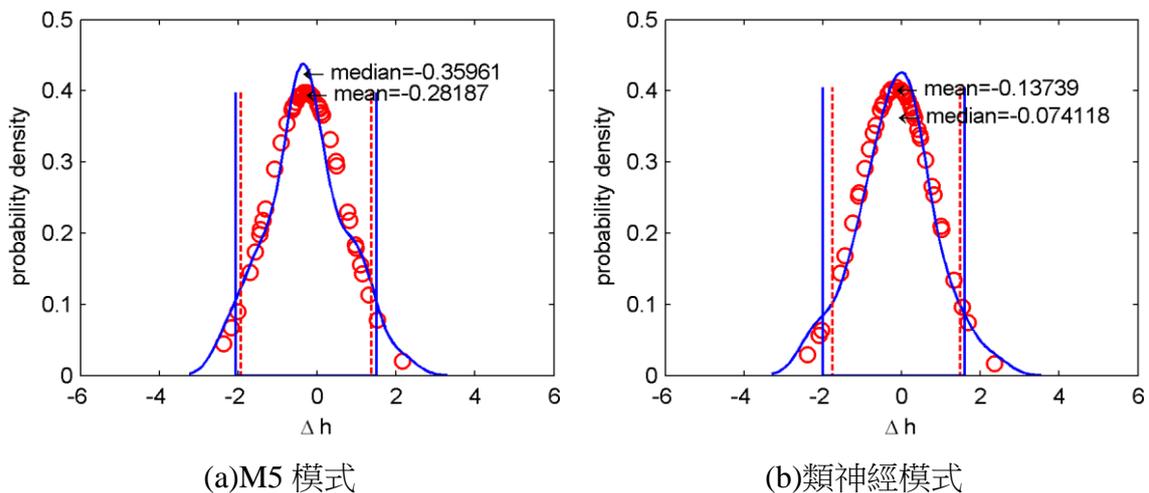
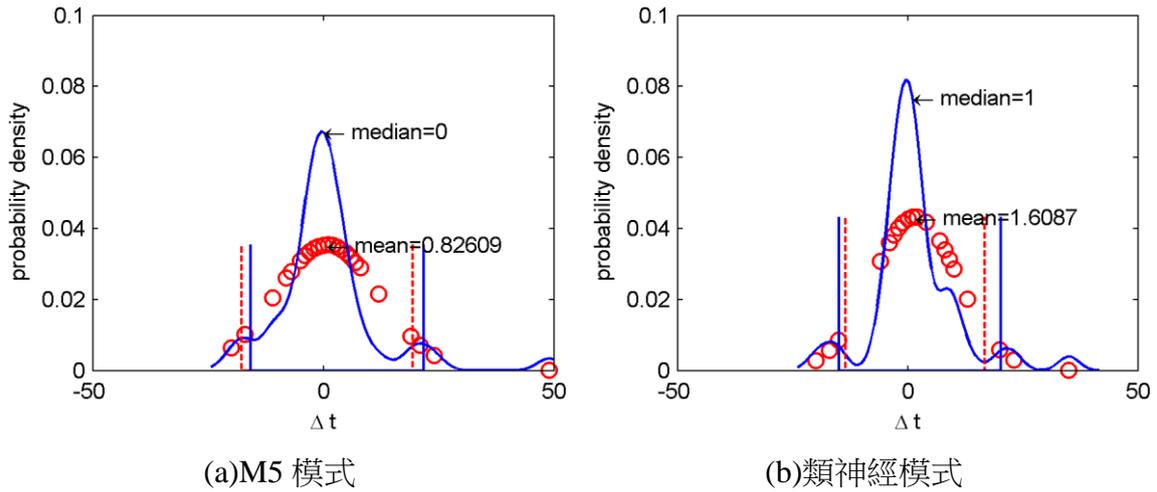


圖 3.22 高雄港波浪推算模式之推算波高誤差分析

圖 3.23 顯示以高雄港 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 0.83 小時，中位數為 0 小時，標準

差為 11.26 小時，46 個樣本中為於 95% 信賴度區間外的有 4 個，佔全部的 8.7%。高雄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 1.61 小時，中位數為 1.00 小時，標準差為 9.22 小時，46 個樣本中為於 95% 信賴度區間外的有 6 個，佔全部的 13.04%。



**圖 3.23 高雄港各波浪推算模式之推算峰值發生時間誤差分析**

表 3.11 為安平港與高雄港二種波浪推算模式之誤差分析的綜合比較表，表中可發現安平港兩種模式在波高峰值推估上都有些許低估的現象，峰值發生時間則稍微較實測資料早發生。高雄港兩模式所推估的波高峰值誤差也有類似現象，而兩模式所推估的峰值發生時間則稍較實測波浪資料晚發生。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。

表 3.11 安平港與高雄港波浪推算之誤差分析綜合比較

	安平港 M5		安平港類神經		高雄港 M5		高雄港類神經	
	最大 波高	發生 時間	最大 波高	發生 時間	最大 波高	發生 時間	最大 波高	發生 時間
平均值	-0.74	-1.98	-0.30	-1.11	-0.28	0.83	-0.14	1.61
中位數	-0.50	-1.00	-0.06	-1.50	-0.36	0.00	-0.07	1.00
標準差	1.36	15.63	1.40	10.11	1.00	11.26	0.99	9.22
未通過 95% 百分比	4.35	6.52	4.35	10.87	10.87	8.70	13.04	13.04

### 3.8 二維數值推算模式建置

本研究所採用數值模式為丹麥水力研究所(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：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.27)$$

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； $\sigma$  為角頻率；而  $\theta$  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  $\sigma$  之變化速度。 $c_\theta=d\theta/dt$ ，代表波向角  $\theta$  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：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3.28)$$

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：

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{\theta}m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{\theta}m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (3.30)$$

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， $C_{\theta}$  為  $\theta$  方向的波浪行進速度， $\omega$  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

$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega \quad (3.31)$$

### 3.8.1 數值模擬條件

本研究採用之地形資料，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  $180^{\circ}$ ~西經  $180^{\circ}$ 、北緯  $89.967^{\circ}$ ~南緯  $90^{\circ}$ ，地形格網之解析精度為  $2' \times 2'$  (約為  $4 \times 4$  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  $14^{\circ}$ 、北約至北緯  $30^{\circ}$ 、西約至東經  $111^{\circ}$ 、東約至東經  $135^{\circ}$ ，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 3.24 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 5,387 個節點、9,630 個元素，網格之設定如表 3.12 所示。

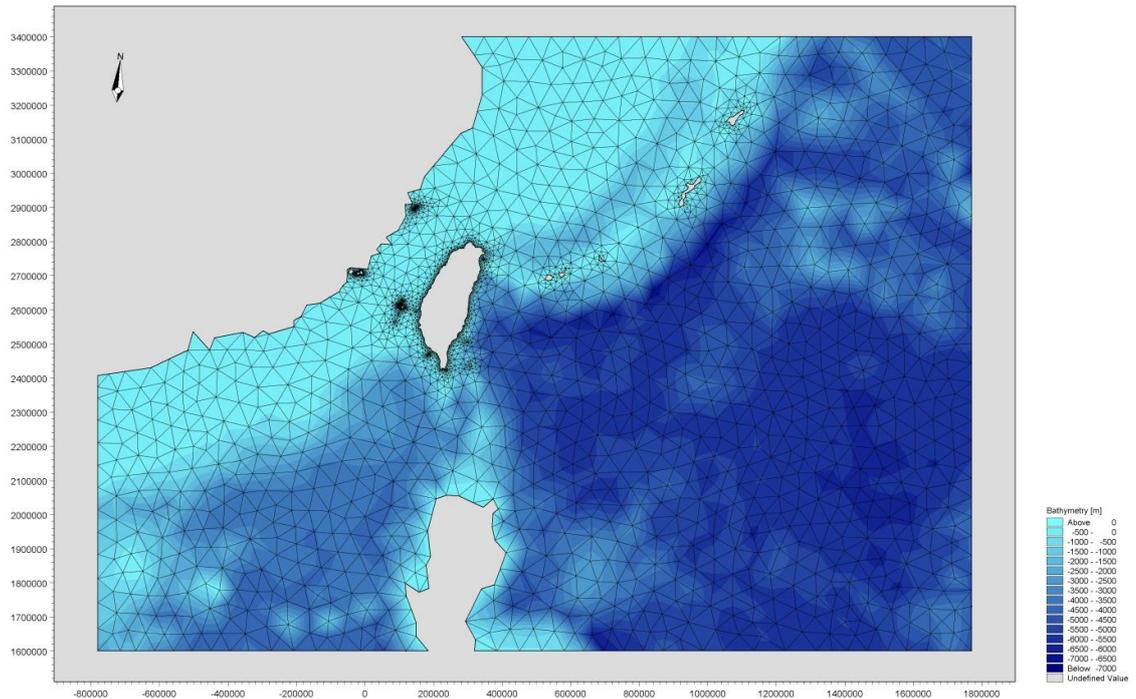


圖 3.24 風浪推算模擬範圍之地形水深

表 3.12 風浪推算模擬之網格設定內容

元素個數	9,630
節點個數	5,387
最小元素面積(m <sup>2</sup> )	6,862
最大元素面積(m <sup>2</sup> )	2.5 × 10 <sup>9</sup>

本研究採用 NCEP 風場進行波浪推算，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，再經過數據品管(QC)步驟，集成成為

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、單日及單月為一報之資料，資料項目有氣溫、地表溫度、地中溫度、氣壓、濕度、風速等，提供方式可以經由網路下載(<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>)。本研究採用 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  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。

本研究進行 SW 模組颱風波浪推算所設定之相關參數如表 3.13 所示。在頻率領域方面，最小頻率採  $0.055\text{Hz}$ ，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  $1.85 \sim 18.18$  秒。在角度領域方面，以  $22.5^{\circ}$  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 3.13 模式參數設定彙整表

相關參數	設 定
頻率領域	$0.055\text{Hz} \sim 0.542\text{Hz}$
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	$C_{ds}=4.5$ 、 $\delta_{ds}=0.5$

### 3.8.2 數值模式驗證

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，故本研究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。

## 1. 模式評估指標

測試數值模式推算值與觀測值的吻合程度，除了採用前節所述 4 個指標來評估模式推算結果的優劣，更增加相對誤差的比較，評估指標分別為決定係數( $R^2$ , coefficient of determination)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$ 、最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$ 、最大波高誤差與最大波高的相對誤差  $\Delta H_{s,p}/H_{max}$  及均方根誤差與最大波高的相對誤差  $RMSE/H_{max}$ 。本研究同時訂定評估指標的誤差標準，即決定係數  $R^2 > 0.6$ 、最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p < 12hr$ 、最大波高誤差與最大波高的相對誤差  $\Delta H_{s,p}/H_{max} < 25\%$ 、均方根誤差與最大波高的相對誤差  $RMSE/H_{max} < 20\%$ 。

## 2. 示性波高的時序列比較

圖 3.25 為安平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，由圖中可知，僅 2013 年的潭美(Trami)颱風在波高處有差異，其餘模擬趨勢和觀測值皆非常一致。圖 3.26 為高雄港示性波高的時序列比較圖，由圖中可知，所有颱風的示性波高模擬趨勢和觀測值皆非常一致。

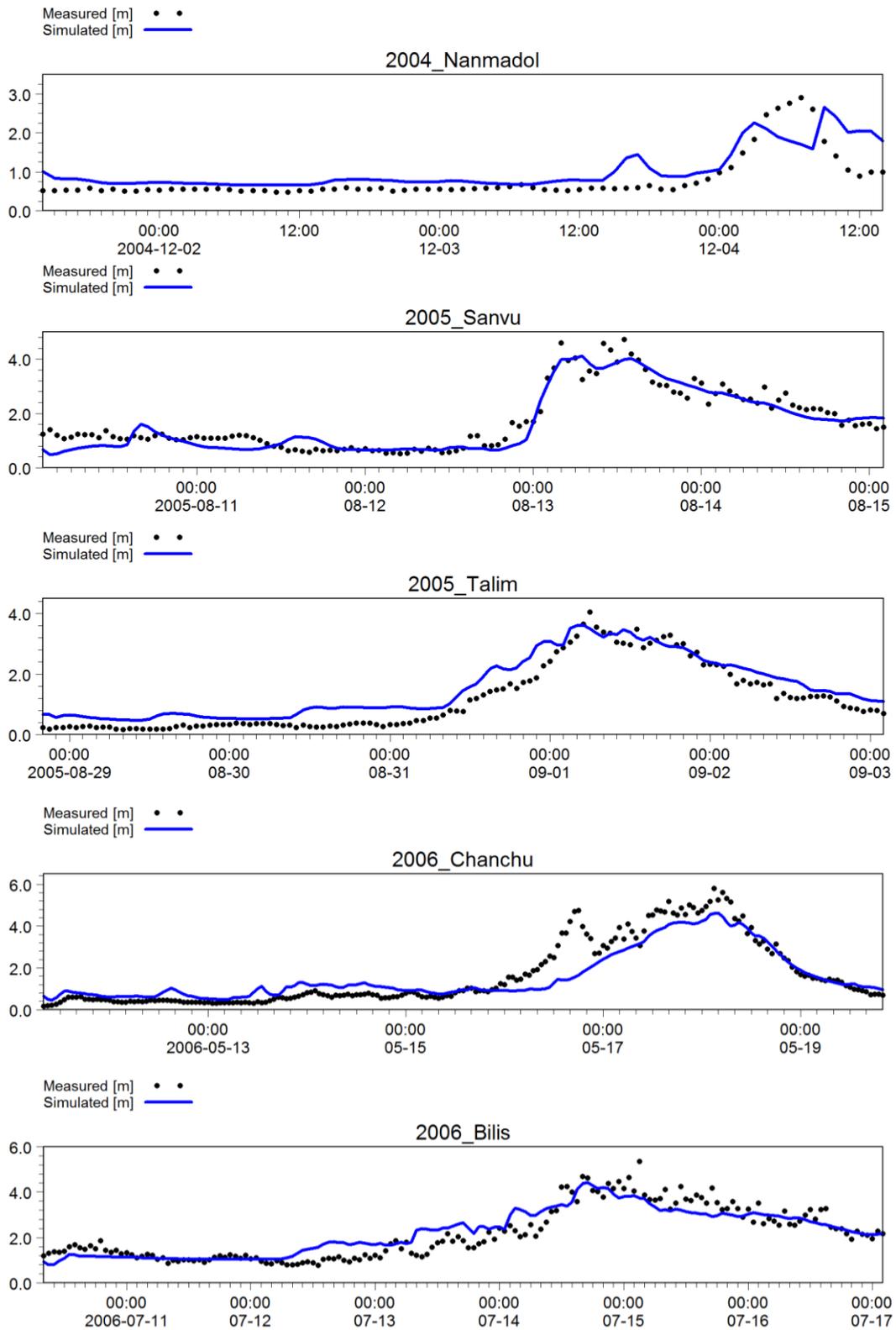


圖 3.25 安平港示性波高時序列比較

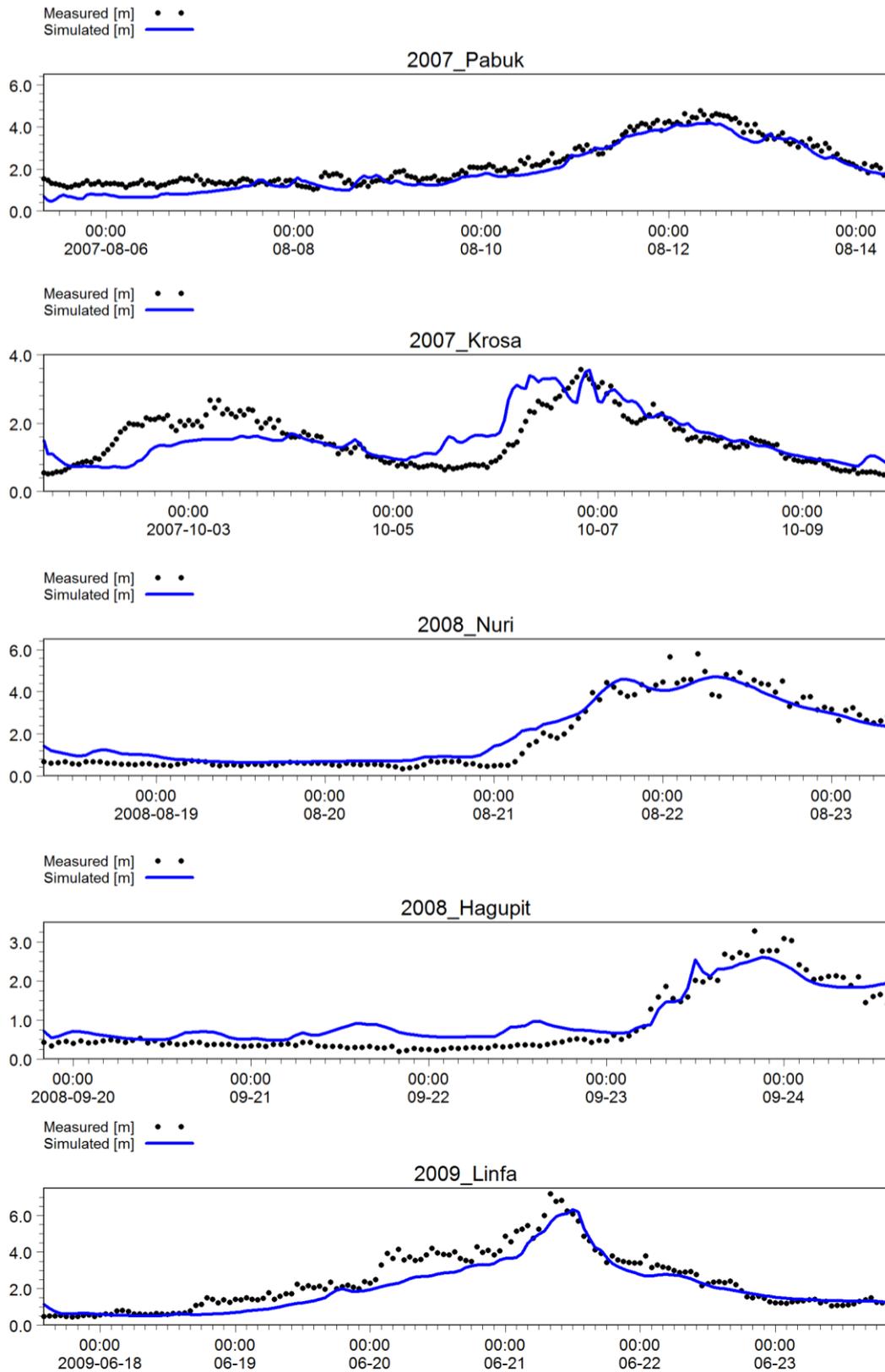


圖 3.25(續 1) 安平港示性波高時序列比較

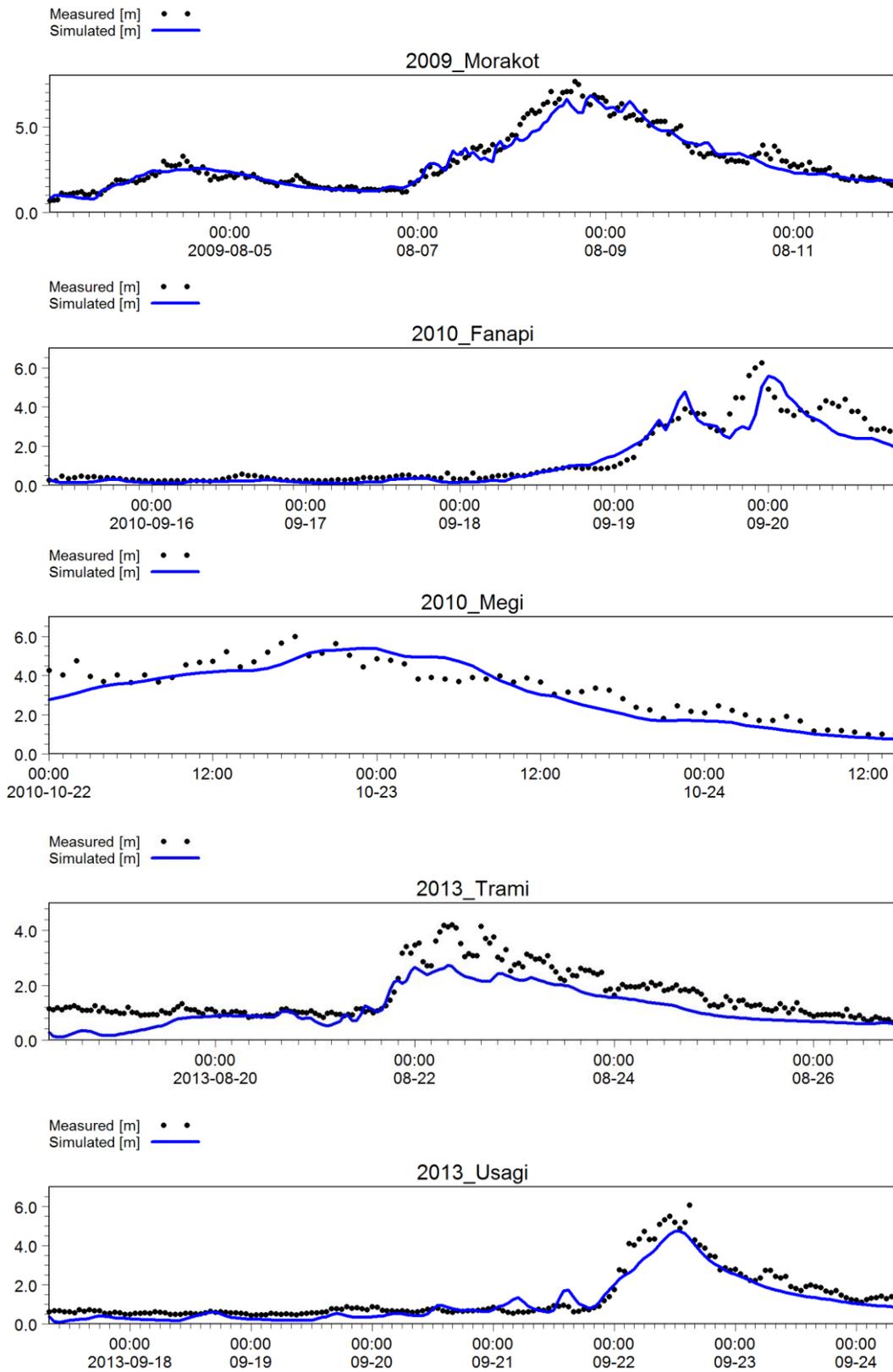


圖 3.25(續 2) 安平港示性波高時序列比較

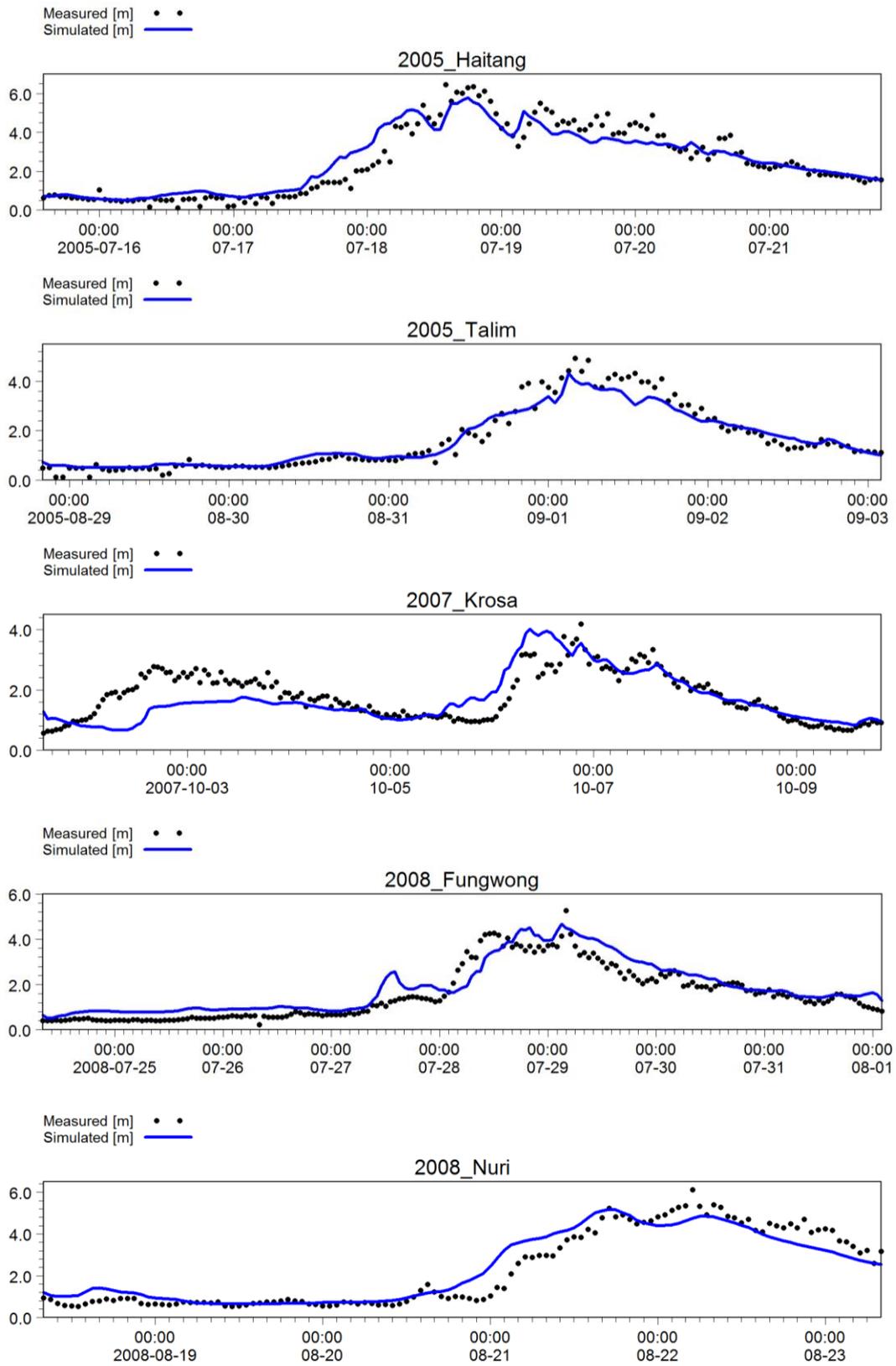


圖 3.26 高雄港示性波高時序列比較

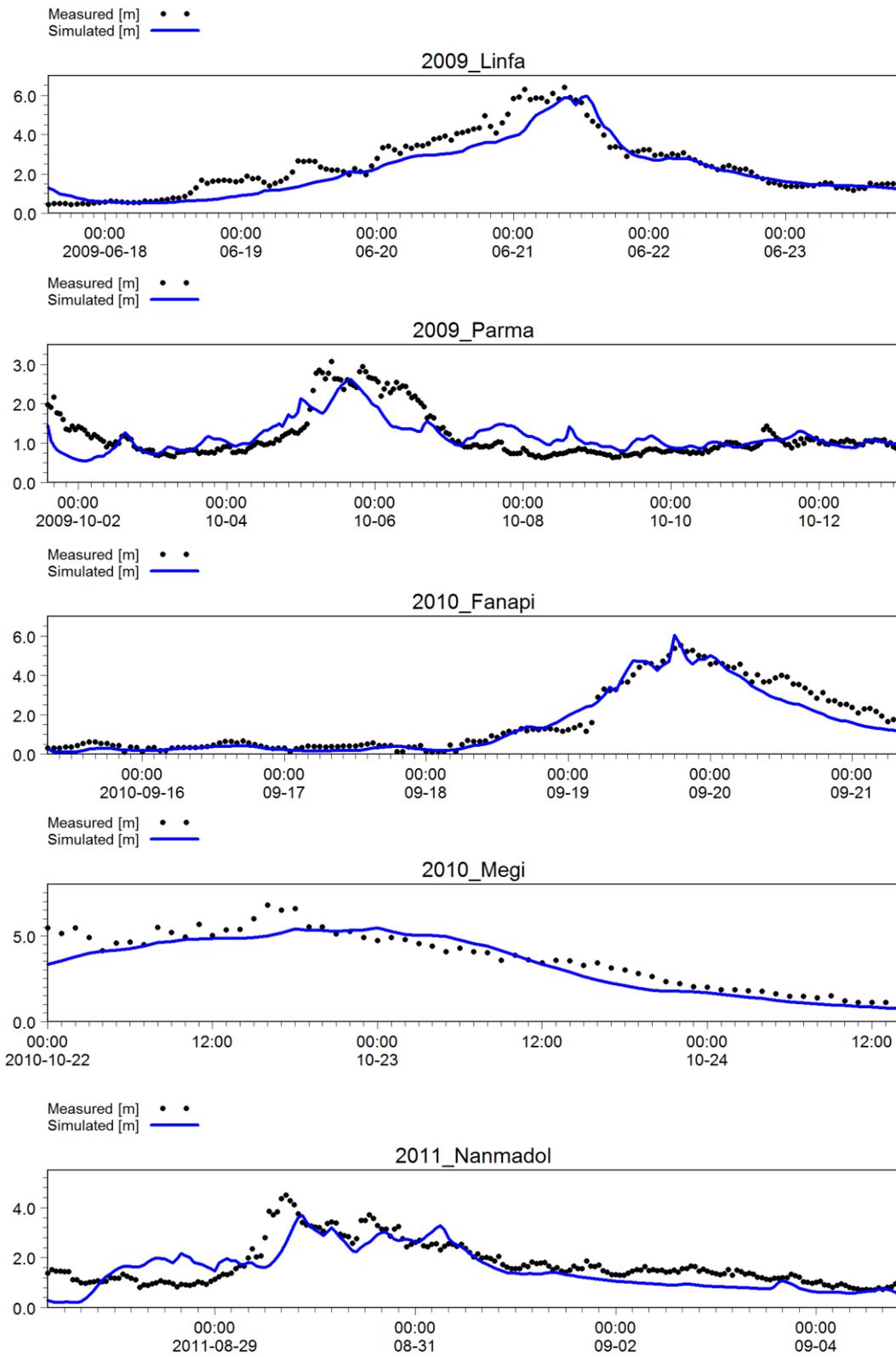


圖 3.26(續 1) 高雄港示性波高時序列比較

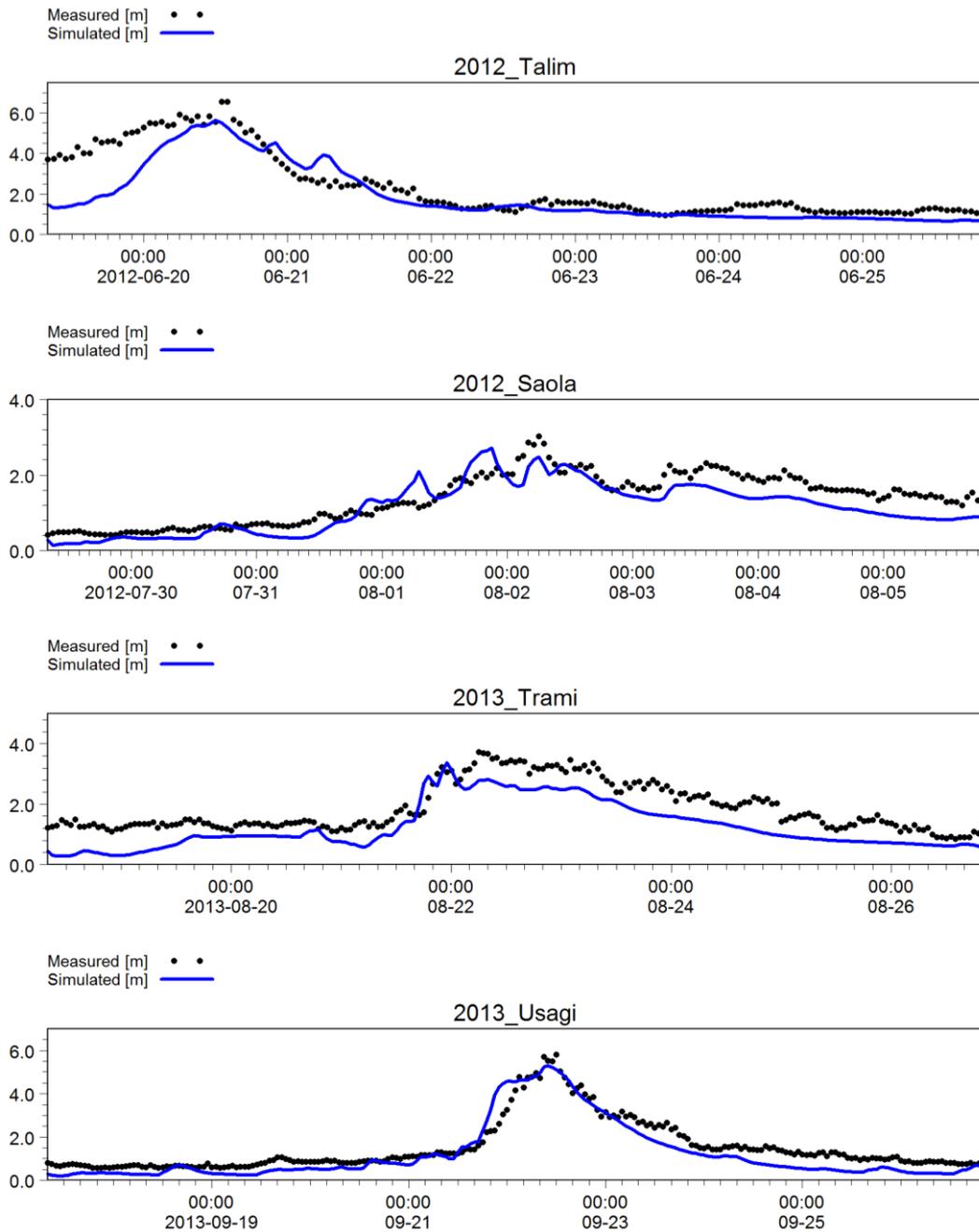


圖 3.26(續 2) 高雄港示性波高時序列比較

### 3. 示性波高的評估指標比較

表 3.14 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最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以潭美(2013)颱風誤差較大，

其誤差達 1.48m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以碧利斯(2006)颱風相差最多，其誤差達 10 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差  $RMSE$  最大為珍珠(2006)颱風，其誤差達 0.68m。推算波高結果與實測波高的決定係數  $R^2$  以柯羅莎(2007)颱風最差。平均來說模式推算結果的各颱風最大波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  為 0.77m，最大波高發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  為 3 小時， $RMSE$  為 0.5m，決定係數  $R^2$  為 0.85。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，僅南瑪都(2004)颱風和柯羅莎(2007)颱風在決定係數  $R^2$  未達標準、潭美(2013)颱風在最大波高誤差與最大波高的相對誤差  $\Delta H_{s,p}/H_{max}$  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 風場在安平港有不錯的推算結果。

表 3.14 安平港數值模式波浪推算結果與驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)	$\Delta H_{s,p}$ / $H_{max}$ (%)	RMSE / $H_{max}$ (%)
2004	南瑪都	NANMADOL	-0.24	2	0.45	0.56	2.91	-8.37	15.4
2005	珊瑚	SANVU	-0.61	-6	0.36	0.91	4.72	-12.87	7.64
2005	泰利	TALIM	-0.43	-1	0.42	0.95	4.05	-10.52	10.45
2006	珍珠	CHANCHU	-1.16	1	0.68	0.85	5.8	-20.02	11.75
2006	碧利斯	BILIS	-0.93	-10	0.50	0.81	5.35	-17.43	9.42
2007	帕布	PABUK	-0.61	2	0.42	0.93	4.78	-12.77	8.81
2007	柯羅莎	KROSA	-0.02	2	0.55	0.52	3.57	-0.55	15.38
2008	如麗	NURI	-1.10	3	0.47	0.94	5.81	-19.00	8.07
2008	哈格比	HAGUPIT	-0.67	1	0.33	0.92	3.28	-20.35	9.95
2009	蓮花	LINFA	-0.86	4	0.61	0.91	7.20	-12.00	8.54
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.84	4	0.47	0.93	7.66	-10.97	6.08
2010	凡那比	FANAPI	-0.69	1	0.61	0.87	6.26	-11.03	9.69
2010	梅姬	MEGI	-0.57	5	0.60	0.87	5.98	-9.53	10.00
2013	潭美	TRAMI	-1.48	-1	0.63	0.84	4.21	-35.09	15.00
2013	天兔	USAGI	-1.33	-2	0.45	0.92	6.06	-21.92	7.44
絕對平均值			0.77	3	0.5	0.85	5.18	14.83	10.24

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 3.15 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最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以梅姬(2010)颱風誤差較大，其誤差達 1.35m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  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 最大為潭美(2013)颱風，其誤差達 0.68m。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。平均來說模式推算結果的各颱風最大波高誤差絕對值  $\Delta H_{s,p}$  為 0.62m，最大波高發生時間誤差絕對值  $\Delta t_p$  為 5.14 小時，RMSE 為 0.56m，決定係數  $R^2$  為 0.81。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、芭瑪(2009)颱風和南瑪都(2011)颱風在決定係數  $R^2$  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 3.15 高雄港數值模式波浪推算結果與驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	$\Delta t_p$ (hour)	RMSE	$R^2$	$H_{max}$ (m)	$\Delta H_{s,p}$ / $H_{max}$ (%)	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	0.53	-1	0.45	0.94	5.52	9.61	8.10
2010	梅姬	MEGI	-1.35	8	0.60	0.90	6.80	-19.89	8.79
2011	南瑪都	NANMADOL	-0.81	4	0.62	0.59	4.50	-18.00	13.88
2012	泰利	TALIM	-0.92	-1	0.95	0.75	6.57	-13.96	14.52
2012	蘇拉	SAOLA	-0.31	-9	0.40	0.78	3.02	-10.18	13.28
2013	潭美	TRAMI	-0.35	-7	0.68	0.85	3.72	-9.43	18.37
2013	天兔	USAGI	-0.52	-2	0.50	0.92	5.80	-8.89	8.54
絕對平均值			0.62	5.14	0.56	0.81	5.17	11.8	11.3

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



## 第四章 港域設計波浪條件探討

對使用年限較長之港灣或海岸工程規劃設計所需的設計波浪條件而言，應有較長時間的實測波浪資料或推算波浪資料來決定。針對臺灣現有主要港口，由於建構時期現場觀測資料之匱乏，其原有使用的設計波浪條件即值得重新加以審視探討。

參酌去年分析探討方式，本研究本年度針對安平港與高雄港兩港域，以本所港研中心長期的波浪觀測資料、類神經颱風波浪推算模式、DHI MIKE 21 二維風浪數值模式與 M5 最小化模式樹波浪推算模式等四種方法進行推算。相關取樣方式、極值分布函數選擇與參數推定、信賴檢定等方法分述如下。

### 4.1 極值統計分析方法

#### 4.1.1 資料取樣方式

本研究所應用極值分析中的資料選取方式，主要可分為超量門檻選用法與極端值選用法二種。國內往昔皆採用極端直選用法來進行取樣，如年最大法及月最大法，此法可在某時間尺度下均勻選取範圍內的極值代表值；另一種超量門檻選用法則是以一門檻值來進行劃分，在門檻值以上的值皆選為極值樣本，本研究所採用者為，年最大法取樣各年極值，再將其中最小值作為門檻值。在此門檻值以上將作為極值波高的樣本，故與年最大法的差異在於本取樣方式可在各年取不同數量的樣本來進行分析，本章節中將分別採用兩種取樣方式的樣本來進行極值分析。

#### 4.1.2 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如下：

##### 1.極值 I 型分布(FT- I 型分布，Gumbel 分布)

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, -\infty < x < \infty \quad (4.1)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A}} e^{-\frac{x-B}{A}} \quad (4.2)$$

## 2. 極值 II 型分布 (FT-II 型分布)

$$F(x) = e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}}, B - kA \leq x < \infty \quad (4.3)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-(1+k)} e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}} \quad (4.4)$$

## 3. Weibull 分佈

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, B \leq x < \infty \quad (4.5)$$

$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (4.6)$$

## 4. 對數常態分佈 (lognormal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - B}{\sqrt{2}A}\right)\right), 0 < x < \infty \quad (4.7)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} e^{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}} \quad (4.8)$$

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

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.9)$$

式 (4.1) 至式 (4.9) 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 4.1 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， $k$  值通常需視資料特性而定。

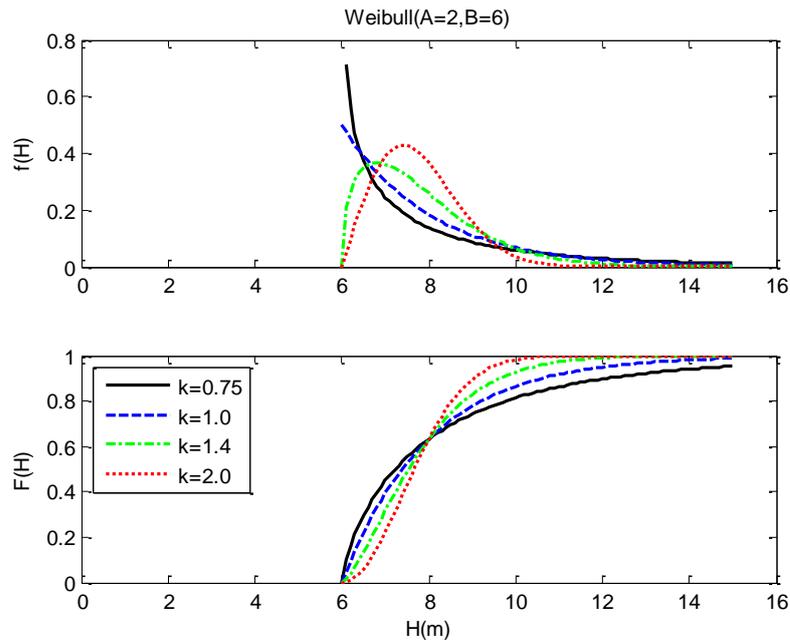


圖 4.1 常數  $k$  在不同情況下的機率密度表現

#### 4.1.3 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)，最小二乘法 (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。依據本所港研中心往昔研究中，有關花蓮、高雄、安平、臺北、臺中及基隆等港域的波浪極值分析成果，並比較三種參數推定法，顯示 LSM 對於台灣各主要港口的極值樣本較為適用，因此本研究選用 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

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (4.10)$$

$\alpha$  及  $\beta$  值在不同分布函數其值不同如下所示(Goda, 2000)。

表 4.1 計算樣本順位機率之  $\alpha$  及  $\beta$  值

分佈函數	$\alpha$ 值	$\beta$ 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

#### 4.1.4 信賴檢定

##### 1. MIR 值檢定

統計分析中一般使用卡方檢定及相關係數檢定，作為所選極值分布函數適用性的依據。本研究中並應用 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

$$x_m = ay_m + b \quad (4.11)$$

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

$$\text{Gumbel : } y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (4.12)$$

$$\text{GEV : } y_m = \frac{1}{k} [(-\ln F_m)^{-k} - 1] \quad (4.13)$$

$$\text{Weibull : } y_m = [-\ln(1 - F_m)]^k \quad (4.14)$$

$$\text{Lognormal : } y_m = \text{inverf}(F_m) \quad (4.15)$$

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

$$\Delta \bar{r} = e^{\bar{a} + \bar{b} \ln N + \bar{c} (\ln N)^2} \quad (4.16)$$

式(4.16)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 4.2。

表 4.2 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

## 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。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2} \quad (4.17)$$

其中  $x_m$  為推估各排序機率下之波高。

### 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：

$$ER = |x_{MAX} - (x_{MAX})_m| \quad (4.18)$$

#### 4.1.5 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

$$\sigma(x_R) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1 + 0.885(y_R - \gamma) + 0.6687(y_R - \gamma)^2 \right]^{1/2} \sigma_x \quad (4.19)$$

式(4.19)中  $\sigma_x$  為樣本  $x$  之標準差， $y_R$  為重現期之基準化變量，即式(4.16)， $x_R$  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  $\sigma_z$  乘以樣本  $x$  之標準差  $\sigma_x$ ，當做推算偏差量

$$\sigma(x_R) = \sigma_x \cdot \sigma_z \quad (4.20)$$

Gumbel、GEV 及 Weibull 分佈之標準差  $\sigma_z$  為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1.0 + \hat{A}(y_R - c)^2 \right]^{1/2} \quad (4.21)$$

而  $\hat{A}$  值在 Gumbel 及 Weibull 分佈為：

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 N^{-1.3}} \quad (4.22)$$

但 GEV 及 FT-II 之  $\hat{A}$  值可表為

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 \left[ \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) \right]^2 - \kappa \left[ \ln\left(\frac{I}{v_0}\right) \right]^2} \quad (4.23)$$

式(4.22)與式(4.23)中之係數如表 4.3 所示。

至於對數常態函數之  $\sigma_z$  則為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1.2 + 0.65(y_R - 0.2)^{2.0} \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

表 4.3 重現期推算量之標準差公式中之係數

分佈函數	$a_1$	$a_2$	$\kappa$	$c$	$N_0$	$v_0$
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		

## 4.2 極值統計分析結果

本研究所採用極值樣本來源包括類神經颱風波浪推算模式、本所港研中心長期觀測波浪資料、DHI MIKE 21 二維風浪數值模式及 M5 最小化模式樹波浪推算模式的推估結果來進行極值分析。配合前節所述 FT-I、FT-II、Weilbull 與 Log-Noraml 四種極值分布函數以 LSM 參數推定法進行計算各重現期的極值波高與標準差估算，最後再以 MIR、RMSE 與 ER 三種信賴檢定法來決定最適分布函數。

### 4.2.1 安平港的推算結果

本研究蒐集本所港研中心在安平港長期監測之波浪資料自 2000 起至 2014 年共 15 年，故以類神經颱風波浪推算模式、DHI MIKE 12 二維風浪推算模式及 M5 最小化模式樹波浪推算模式進行相對應時間的

推算結果。並將此結果進行年極值取樣法，年極值取樣法即選取當年度樣本中的最大值，在實測樣本中除了颱風期間的最大波高外並考慮非颱風所造成的波高，若年極值樣本小於非颱風季的波高，即以非颱風的最大波高為該年年極值樣本。四種樣本來源的年極值樣本並在扣除本研究前節所計算的長期波浪變遷趨勢再進行各重現期的分析，結果如表 4.4 所示。

表 4.4 安平港年極值取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	實測資料樣本(OBS)				類神經樣本(ANN)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR( <i>m</i> )		1.11	1.59	0.83	0.93	0.64	0.50	0.46	1.59
RMSE( <i>m</i> )		0.34	0.43	0.27	0.31	0.08	0.07	0.06	0.11
ER ( <i>m</i> )		0.69	0.87	0.45	0.78	0.04	0.04	0.02	0.23
$x_R(m)$	10	7.13	7.03	7.18	7.33	5.27	5.25	5.29	5.22
	25	8.16	8.21	8.01	8.37	5.58	5.61	5.60	5.43
	50	8.93	9.15	<u>8.56</u>	9.12	5.81	5.91	<u>5.82</u>	5.57
	100	9.69	10.16	9.06	9.85	6.04	6.22	6.03	5.70
	200	10.45	11.23	9.53	10.57	6.27	6.55	6.23	5.82
$\sigma (m)$	10	0.80	0.95	0.72	0.49	0.24	0.28	0.27	0.15
	25	1.09	1.37	0.88	0.58	0.32	0.41	0.35	0.17
	50	1.30	1.71	<u>0.99</u>	0.65	0.39	0.51	<u>0.41</u>	0.19
	100	1.52	2.08	1.08	0.72	0.45	0.62	0.47	0.21
	200	1.74	2.48	1.18	0.78	0.52	0.74	0.52	0.23
Index	T (yr)	二維數值模式樣本(MIKE)				M5 最小化模式樹樣本(M5)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR( <i>m</i> )		1.70	2.00	1.76	1.66	1.29	0.45	0.45	3.44
RMSE( <i>m</i> )		0.35	0.40	0.33	0.34	0.04	0.03	0.03	0.06
ER ( <i>m</i> )		0.14	0.30	0.06	0.27	0.06	0.04	0.00	0.14
$x_R(m)$	10	5.96	5.89	5.99	6.16	5.18	5.15	5.19	5.16
	25	6.80	6.84	6.66	7.01	5.30	5.32	5.34	5.23
	50	7.42	7.61	<u>7.10</u>	7.62	5.39	5.48	<u>5.46</u>	5.28
	100	8.03	8.42	7.51	8.22	5.48	5.68	5.57	5.32
	200	8.64	9.30	7.88	8.81	5.56	5.92	5.69	5.36
$\sigma (m)$	10	0.66	0.79	0.60	0.41	0.09	0.14	0.14	0.06
	25	0.90	1.13	0.73	0.48	0.12	0.22	0.20	0.07
	50	1.07	1.41	<u>0.81</u>	0.54	0.15	0.30	<u>0.24</u>	0.07
	100	1.25	1.72	0.89	0.59	0.17	0.40	0.29	0.08
	200	1.43	2.05	0.97	0.64	0.20	0.52	0.33	0.09

表 4.4 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，其結果顯示四種樣本皆以 Weibull 分布為最適分布。表中並將最適分布所對應的 50 年重現期極值波高與標準差以下底線方式做標註。實測資料樣本、類神經樣本、二維數值

模式樣本及 M5 最小化模式樹樣本的 50 年重現期極值波高分別為 8.56m、5.82m、7.10m 及 5.46m。標準差部分分別為 0.99m、0.41m、0.81m 與 0.24m。四種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖示如圖 4.2 至圖 4.5。圖中顯示各極值分布與樣本資料間的回歸近似情況，安平港四種樣本的年極值樣本皆可找到最適分布來進行後續分析。

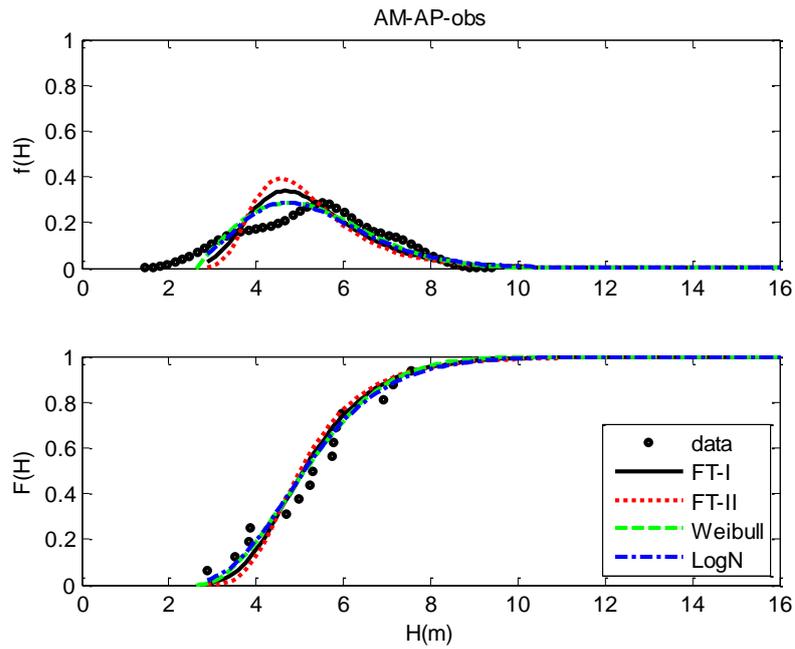


圖 4.2 年極值取樣法在安平港實測波浪之機率密度函數圖

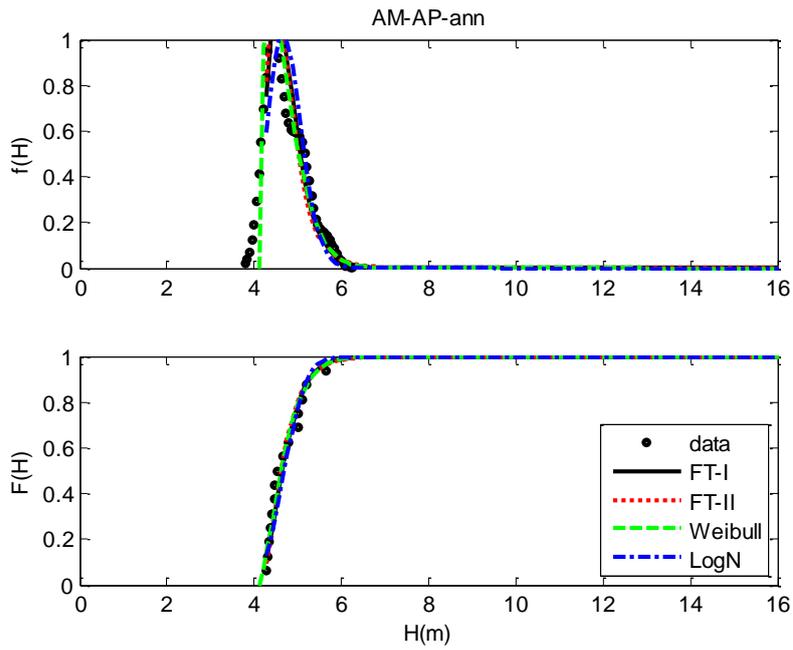


圖 4.3 年極值取樣法在安平港類神經推算之機率密度函數圖

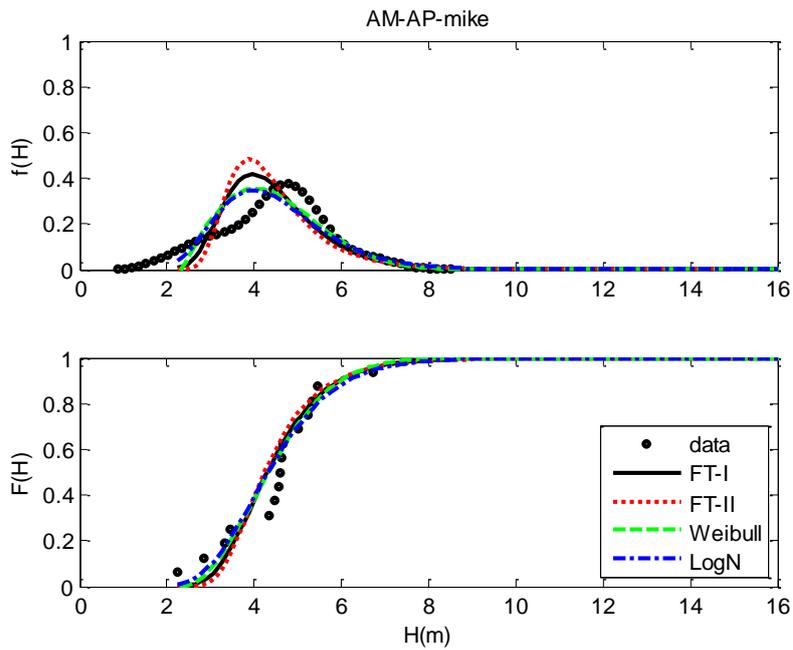


圖 4.4 年極值取樣法在安平港二維數值推算之機率密度函數圖

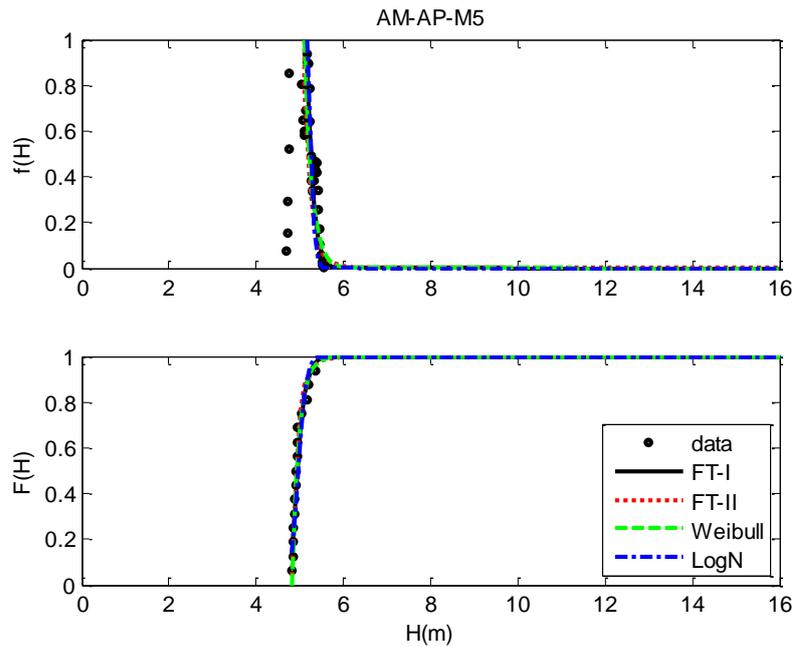


圖 4.5 年極值取樣法在安平港最小化模式樹推算之機率密度函數圖

為方便進行各樣本與取樣方式的比較，本研究整理上述極值分析結果如表 4.5，結果顯示四種樣本的 50 年重現期極值波高以實測資料最高、二維數值模式樣本次之而類神經樣本與 M5 樣本則由於其推算結果有低估的現象而較小；標準差則以類神經樣本與 M5 樣本較小，實測資料與二維數值模式較大。以安平港三種模式的極值分析結果顯示，二維數值模式的推算樣本應用於設計波的推算與實測波高資料推算的結果最為接近，類神經與 M5 模式則有偏低的現象。表中並列出四種樣本來源配合兩種取樣方式的 90% 信賴區間值，另利用本研究前節 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 50 年的波高變化量，即可推求考慮長期變遷的設計波標準。

表 4.5 安平港四種樣本來源的極值分析結果

樣本來源	50 年重現期		90% 信賴區間 (m)	考慮長期變遷 信賴區間 (m)
	極值波高 (m)	標準差 (m)		
實測資料	8.56	0.99	6.93~10.18	7.48~10.73
類神經樣本	5.82	0.41	5.14~6.50	5.69~7.05
二維數值模式	7.10	0.81	5.76~8.44	6.30~8.99
M5 樣本	5.46	0.24	5.06~5.86	5.60~6.40

#### 4.2.2 高雄港的推算結果

同樣，本研究蒐集本所港研中心在高雄港長期監測之波浪資料自 2001 起至 2014 年共 14 年，以類神經颱風波浪推算模式、DHI MIKE 12 二維風浪推算模式及 M5 最小化模式樹波浪推算模式進行相對應時間的推算結果。並將此結果進行年極值取樣，在實測樣本中除了颱風期間的最大波高外並考慮非颱風所造成的波高，若年極值樣本小於非颱風季的波高，即以非颱風的最大波高為該年年極值樣本。四種樣本來源的年極值樣本並在扣除本研究前節所計算的長期波浪變遷趨勢再進行各重現期的分析，結果如表 4.6 所示。

表 4.6 高雄港年極值取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	實測資料樣本(OBS)				類神經樣本(ANN)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(m)		1.35	1.72	1.22	1.03	0.76	1.09	0.55	0.59
RMSE(m)		0.32	0.38	0.28	0.27	0.15	0.20	0.12	0.13
ER (m)		0.24	0.39	0.06	0.18	0.33	0.44	0.21	0.15
$x_R(m)$	10	7.33	7.26	7.36	7.44	6.35	6.31	6.37	6.34
	25	8.18	8.23	8.05	8.20	6.92	6.95	6.82	6.77
	50	8.82	9.01	8.50	8.74	7.33	7.47	7.12	7.07
	100	9.45	9.85	8.92	9.25	7.74	8.02	7.40	7.34
	200	10.07	10.74	9.30	9.74	8.16	8.61	7.65	7.60
$\sigma (m)$	10	0.70	0.83	0.63	0.42	0.45	0.52	0.41	0.27
	25	0.95	1.19	0.77	0.50	0.61	0.75	0.49	0.32
	50	1.13	1.48	0.86	0.56	0.73	0.94	0.55	0.36
	100	1.32	1.80	0.95	0.62	0.85	1.15	0.61	0.40
	200	1.51	2.15	1.03	0.67	0.98	1.37	0.66	0.43
Index	T (yr)	二維數值模式樣本(MIKE)				M5 最小化模式樹樣本(M5)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(m)		1.70	1.97	1.85	1.59	1.06	0.43	0.56	2.41

RMSE(m)		0.35	0.40	0.34	0.33	0.12	0.09	0.09	0.17
ER (m)		0.12	0.28	0.07	0.16	0.17	0.03	0.01	0.39
$x_R(m)$	10	6.51	6.44	6.54	6.67	5.70	5.65	5.71	5.63
	25	7.34	7.39	7.20	7.47	6.07	6.14	6.19	5.87
	50	7.96	8.15	7.63	<u>8.03</u>	6.34	6.57	<u>6.55</u>	6.03
	100	8.57	8.96	8.03	8.57	6.62	7.07	6.90	6.18
	200	9.17	9.83	8.41	9.10	6.89	7.63	7.26	6.32
$\sigma (m)$	10	0.69	0.81	0.62	0.42	0.30	0.39	0.45	0.18
	25	0.93	1.17	0.75	0.49	0.41	0.60	0.64	0.22
	50	1.11	1.46	0.84	<u>0.55</u>	0.49	0.78	<u>0.79</u>	0.24
	100	1.30	1.77	0.93	0.60	0.57	0.99	0.94	0.26
	200	1.49	2.11	1.01	0.66	0.65	1.24	1.09	0.29

表 4.6 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，其結果顯示實測資料樣本與二維數值模式樣本是以 Log-Normal 為最適分布，而類神經樣本與 M5 樣本則以 Weibull 分布為最適分布，其中 M5 樣本若選用 FT-II 型分布也有不錯的結果，其推估的各重現期波高與標準差都與 Weibull 接近。表中並將最適分布所對應的 50 年重現期極值波高與標準差以下底線方式做標註。實測資料樣本、類神經樣本、二維數值模式樣本及 M5 最小化模式樹樣本的 50 年重現期極值波高分別為 8.74m、7.12m、8.03m 及 6.55m。標準差部分分別為 0.56m、0.55m、0.55m 與 0.79m。四種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖示如圖 4.6 至圖 4.9。圖中顯示各極值分布與樣本資料間的回歸近似情況，高雄港四種樣本的年極值樣本皆可找到最適分布來進行後續分析。

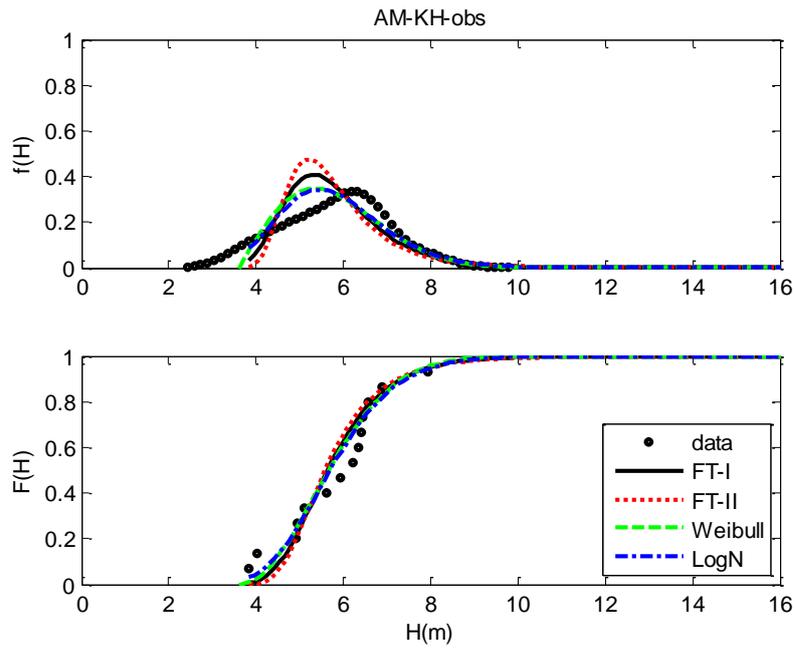


圖 4.6 年極值樣法在高雄港實測資料之機率密度函數圖

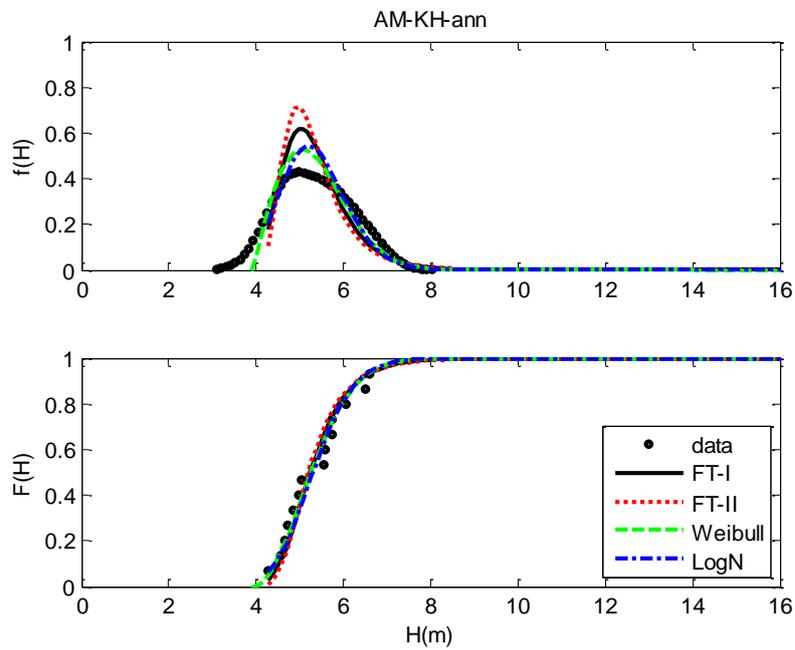


圖 4.7 年極值樣法在高雄港類神經推算之機率密度函數圖

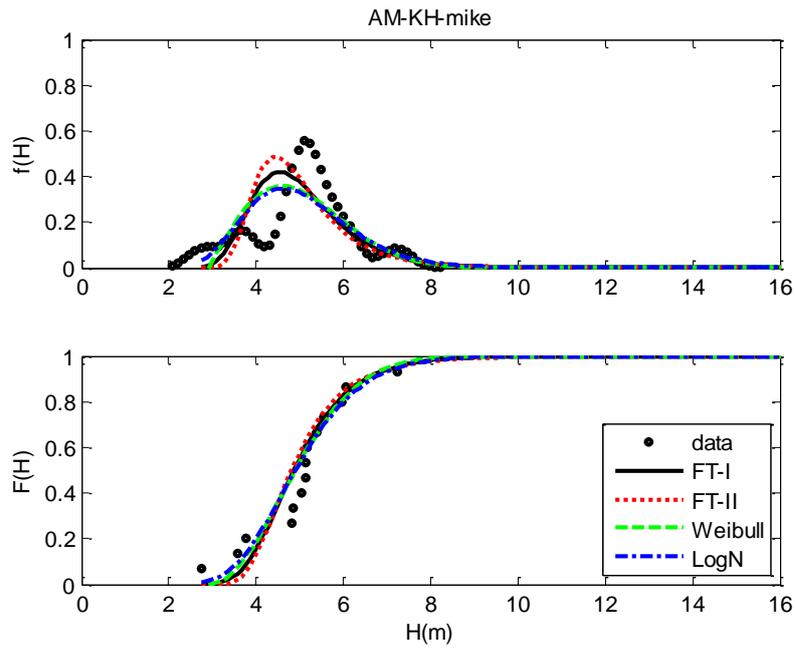


圖 4.8 年極值樣法在高雄港二維數值模式推算之機率密度函數圖

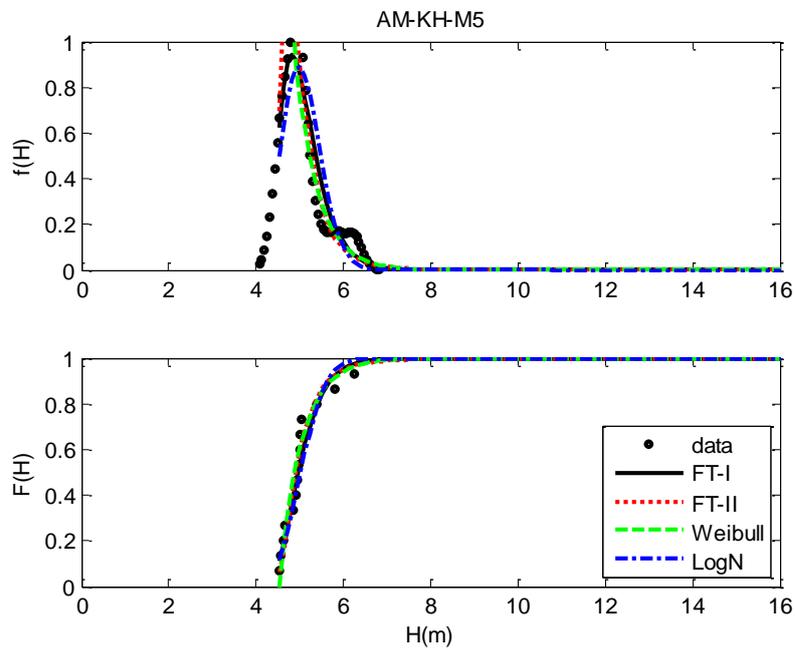


圖 4.9 年極值樣法在高雄港最小化模式樹模式推算之機率密度函數圖

同樣，本研究整理上述極值分析，進行各樣本與取樣方式的比較結果如表 4.7，結果顯示四種樣本的 50 年重現期極值波高以實測資料最高、二維數值模式樣本次之而類神經樣本與 M5 樣本則由於其推算結果有低估的現象而較小；標準差則以 M5 樣本較大，其於三種樣本較小且接近。分析結果顯示二維數值模式推算樣本進行極值分析的結果與實測波高樣本最為接近。表中並列出四種樣本來源配合兩種取樣方式的 90% 信賴區間值，另利用本研究前節 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 50 年的波高變化量，即可推求考慮長期變遷的設計波標準。

**表 4.7 高雄港四種樣本來源的極值分析結果**

樣本來源	50 年重現期		90% 信賴區間 (m)	考慮長期變遷 信賴區間 (m)
	極值波高 (m)	標準差 (m)		
實測資料	8.74	0.56	7.81~9.66	8.32~10.17
類神經樣本	7.12	0.55	6.21~8.04	6.71~8.54
二維數值模式	8.03	0.55	7.12~8.94	7.63~9.44
M5 樣本	6.55	0.79	5.24~7.85	5.74~8.36

## 第五章 海嘯對港灣防波堤構造物之影響探討

近年來海嘯造成之災難事件頻傳，如 2004 年南亞海嘯、2011 年日本海嘯等，均造成各地無數生命財產之嚴重損失；尤其日本海嘯造成港灣構造物的重大災害，為台灣地區港灣工程界值得研究探討之處。因此，本研究本年度先行針對基隆港域進行海嘯對其外廓防波堤的初步影響探討。

參考往昔台灣歷史海嘯紀錄中對基隆港的影響，如表 5.1。由表中得知分別在西元 1867 年 12 月 18 日、1918 年 5 月 1 日、1960 年 5 月 24 日時，其海嘯高度 0.66m~7.5m。而基隆港除有受海嘯侵襲之風險外，亦因直接面向大水深之太平洋波浪，每年受夏季颱風波浪強烈侵襲，在高水位極大波浪之作用下，外廓防波堤無可避免地承受了強大的波力以及大量的越波水量。在此波浪作用下，可能造成沉箱破壞、胸牆流失、拋石堤流失、消波塊流失及結構物裂縫沉陷等種種破壞，對海港之安全及水域之穩定性影響甚鉅。

表 5.1 基隆港歷史海嘯紀錄

時間	地點	出處	描述	備註
1867 年 12月18日	基隆	淡水廳志、 Alvarez, Formosa 等	「(同治六年)冬十一月，地大震。……二十三日，雞籠頭、金包里沿海，山傾地裂，海水暴漲，屋宇傾壞，溺數百人。」。Alvarez, Formosa: 「1867 年 12 月 18 日，北部地震更烈，災害亦更大，基隆城全被破壞，港水似已退落淨盡，船隻被擱於沙灘上；不久，水又復回，來勢猛烈，船被衝出，魚亦隨之而去。沙灘上一切被沖走。……」	諸多文獻皆明確指出此基隆海嘯，且海嘯高度在 6m 與 7.5m 之間。地震規模約為 7。可能為地震引發山崩海嘯。
1918 年 5月1日	基隆	楊春生等 (1983)	台電電源開發處之調查報告提到，1918 年 5 月 1 日台灣東北部海底地震引起海嘯，基隆海嘯溯上約 3.7 公尺。查鄭世楠、葉永田 (1989) 一書，	可能為山崩海嘯。

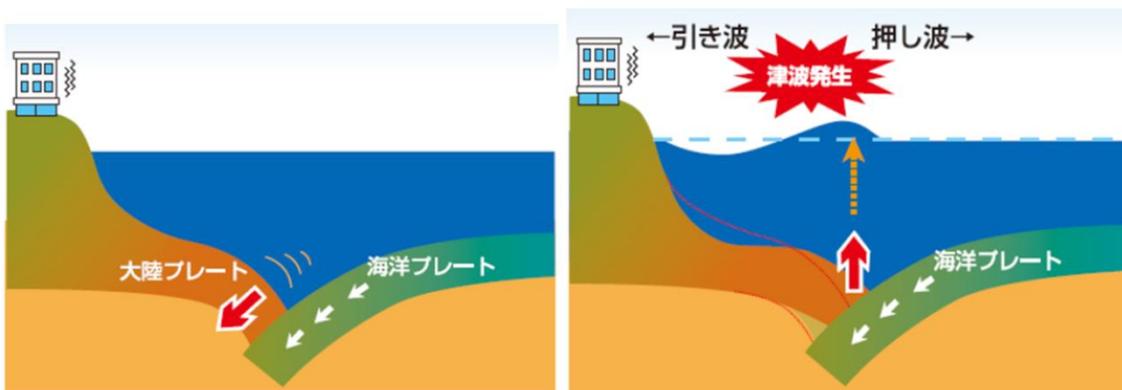
			該日並無規模大於 5 之地震。	
1960 年 5 月 24 日	基隆、花蓮	聯合報等	民國 49 年 5 月 25 日聯合報「基隆測候所的記錄，24 日上午 6 時 30 分，基隆港內海潮高出海平面 1.9 公尺，為基隆海潮的最高記錄，上一次的最高記錄是 1.5 公尺。」；「基隆市區內田寮港運河的尚志橋於上午 5 時許，被來自淺水碼頭附近港內的漂浮的巨枝柳安木所沖垮，另有崇仁、平等、自由三橋亦被沖壞。……。據昨日目擊當時的市民稱：有一艘小舢舨，被旋轉的海潮捲得直立達數分鐘之久，然後再傾覆。另有三艘舢舨亦被捲覆沒。」	智利海嘯傳至台灣所致。波高在基隆為 66cm 花蓮為 30cm。

資料來源：台灣自 1661 年起之 11 次台灣歷史海嘯紀錄（2013，吳祚任整理）

## 5.1 海嘯概述

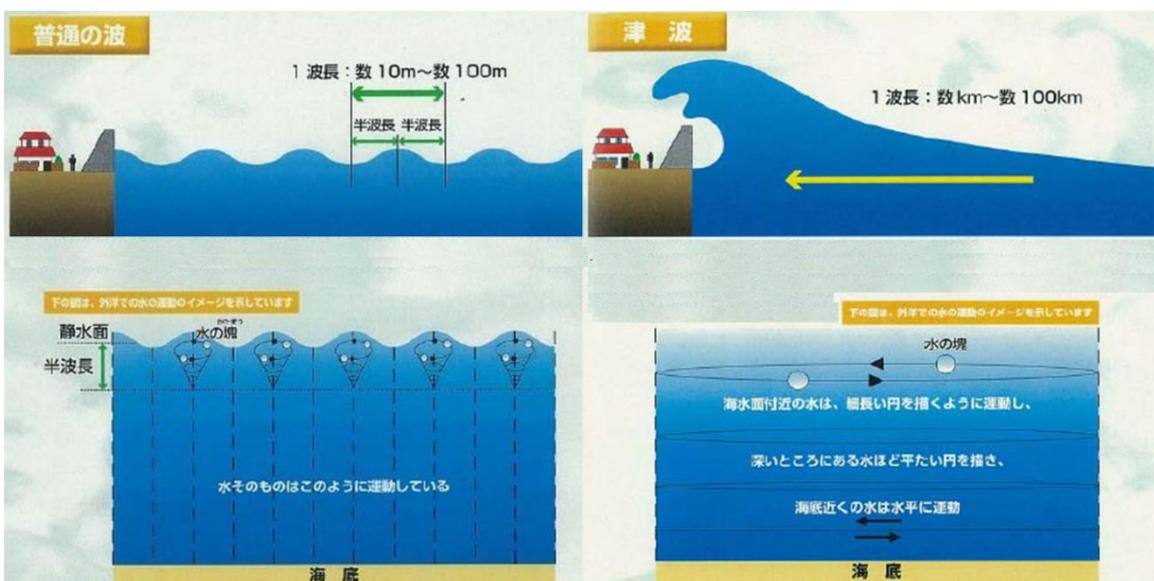
海嘯(Tsunami)一般指因海底大規模地殼變動引發之長週期重力波，通常因海底地震、火山爆發、隕石撞擊，或是山崩等因素所造成，並由於海底底床垂直之錯動，造成大範圍之海水從海底至海面整體抬昇或下降，並行成一連串之波浪向四方傳遞能量。一般其週期約介於 2 分~2 小時以上，波長則約為數十~數百公里，因其波長相對水深甚長，可直接視為淺水波，在深海時傳遞之波速則可達 500~1000km/hr，如圖 5.1 與圖 5.2 所示。

海嘯傳遞至近岸時，由於水深變淺，波速變慢，後波因波速未減慢，造成於近岸發生波能之堆疊，波高大增，造成近岸水位之異常變動，其朔升甚至可能造成近岸地勢較低之區域溢淹，如圖 5.3 所示。



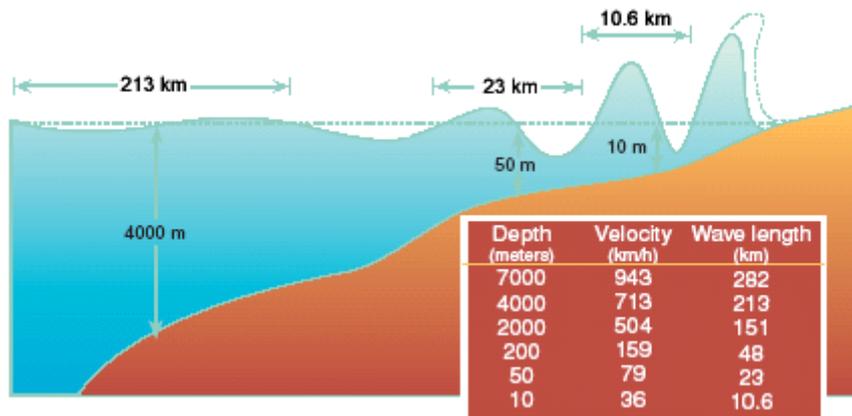
資料來源：日本港灣空港技術研究所

圖 5.1 海嘯生成之示意圖



資料來源：日本港灣空港技術研究所

圖 5.2 一般波浪與海嘯之比較圖



資料來源：國立中央大學水文與海洋科學研究所

圖 5.3 海嘯抵達岸邊之放大效應

### 5.1.1 海嘯強度與規模

現有海嘯強度(intensity)等級與海嘯規模(magnitude)乃類似地震強度等級與地震規模大小，將海嘯強度的等級以海嘯的影響程度作定性上的區別，而海嘯規模則是以具有物理意義之參數如海嘯波高等將海嘯的影響作量化的區別。Sieberg(1927)仿照地震強度分級之概念，依據海嘯對人類及目標物(如船隻及建築物等)巨觀的影響程度，將海嘯強度分為非常輕微的，輕微的，略強烈的，強烈的，非常強烈的以及災難性的等六個等級。之後，Ambraseys (1962)針對 Sieberg 海嘯強度分級提出較詳細的描述，修正後的版本稱之為 Sieberg-Ambraseys 或修正版的 Sieberg 六等級之海嘯強度，如表 5.2 所示。

表 5.2 Sieberg-Ambraseys 海嘯強度等級分類

強度	海嘯的描述	可能的海嘯影響性之描述
I	非常輕微的 (Very slight)	海嘯波極小並只能於水位計之紀錄中觀測發現。
II	輕微的 (Slight)	海嘯波可於近岸處觀測到並於海洋中被發現，惟於非常平坦底床之近岸處才易被觀測發現。
III	略強的 (Rather strong)	一般均可觀測到，緩坡海岸發生淹水現象，較輕之船隻被拍擊上岸，海岸附近結構物輕微受損，海嘯波引致水流亦從河口處往河川上游測流竄。
IV	強烈的 (Strong)	近岸處淹水至一定高度，人造場所地面將有些微掏刷現象，海堤與大壩亦有損毀情形。近岸處之較輕型之結構物損毀，而較堅固之結構物亦有受損情形。部份大船與大多數小船將被拍擊上岸亦或被下刷水流沖至大海處，海岸廢棄物將猶如土石流般漂移。
V	非常強烈的 (Very strong)	岸處隨處可見淹水至一定高度，碼頭與較堅固之結構物受損，較輕之結構物因而解體，陸域耕地產生強烈掏刷現象，海岸處盡是漂流物與海洋動物。除大型船隻外之其它船隻將被拍擊上岸亦或被下刷水流沖至大海處，河口處將出現大坑洞，港灣設施損毀，人員亦被淹死，海嘯波並伴隨巨大之呼嘯轟鳴聲。
VI	災難性的 (Disastrous)	部份或全部之結構物被推移至離海岸處相當距離遠，近岸處淹水嚴重，大型船隻損毀解體，樹木被連根拔，並造成嚴重之人員傷亡。

資料來源：「海堤及水門設施耐海嘯構造評估標準及作業準則訂定(1/2)」，經濟部水利署

在日本，Imamura(1942,1949)首先根據海嘯波高之大小將海嘯規模大小量化描述，並將海嘯規模(m)分為 0~4 級。Iida(1956,1967)進一步在海嘯規模 0 級之下增加一個-1 等級，成為-1~4 六個等級，稱為今村-飯田(Imamura-Iida)海嘯規模，如表 5.3 所示，並定義如下：

表 5.3 Imamura-Iida 海嘯規模分級表

海嘯規模(公尺)	海嘯浪高 H(公尺)	災 害
-1	0.5	無災害
0	1.0	災害輕微
1	2.0	海岸及船舶受害
2	4~6	沿岸有若干財產及生命損失
3	10~20	沿岸的 400km 以上有相當之災損
4	30 以上	沿岸的 500km 以上有相當之災損

資料來源：「海堤及水門設施耐海嘯構造評估標準及作業準則訂定(1/2)」，經濟部水利署

$$m = \log_2 \cdot H_{\max} \quad (5.1)$$

式中  $H_{\max}$  為海岸上觀測到的或潮位計記錄的最大海嘯波高。然而，以海嘯波高對海嘯規模大小量化，並無法做到如地震模規分級般之具體化，因此 Soloviev (1970)認為若以地震學專門術語觀點而言，今村-飯田海嘯規模分級實際上仍屬於海嘯強度分級的一種。至此，除了今村與飯田之分級外，相類似之定義均稱為“海嘯強度”。而 Soloviev (1970)提出以平均海嘯波高定義海嘯強度如下：

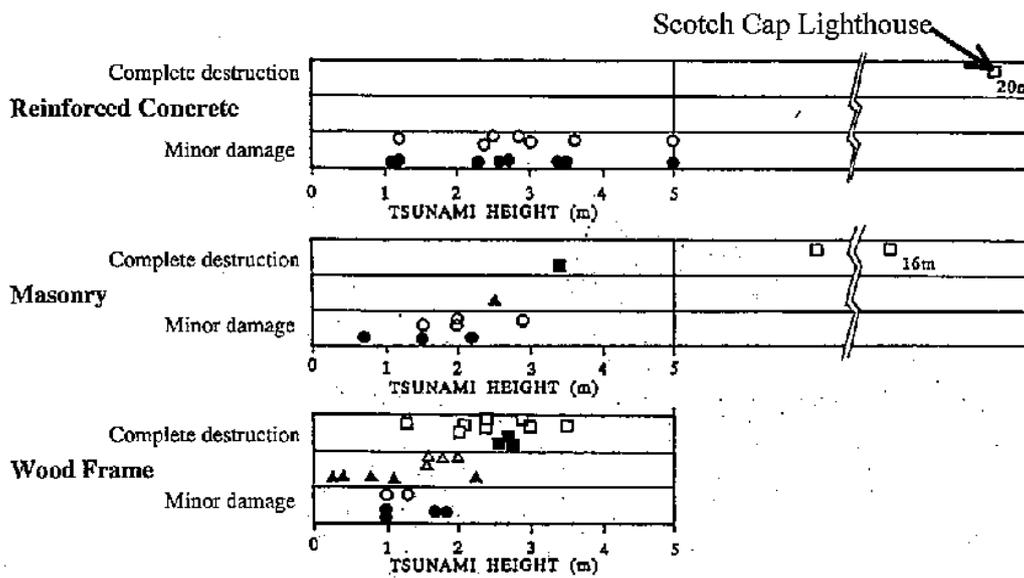
$$I_s = \log \cdot \sqrt{2} \cdot H \quad (5.2)$$

式中 H 為海岸上平均的海嘯高度(波高)。此外，Shuto (1993)則認為海嘯強度所定義的海嘯波高 H 應採用發生局部災損時的海嘯高度，因此提出海嘯強度之計算如下：

$$i_s = \log \cdot H \quad (5.3)$$

並將海嘯強度分為 0~5 六個等級，其中  $i_s=0$  代表海嘯波高小於 1.0m， $i_s=5$  代表海嘯波高大於 32.0m。Shoto (1994)綜整了海嘯災害所引致建築物受損程度之分類(如圖 5.4)，其中黑色標註為 1993 年 Okushiri 海嘯帶來之災損資料，至於空白標註則為 1993 年前之海嘯災損經驗資料。Papadopoulos 及 Imamura (2001)進一步提出新的 12 級海嘯強度分級，如表 5.4 所示，新的海嘯規模分級觀念主要依據海嘯對人

類、含船隻在內之物體以及建築物等的影響程度進行詳細的分類，同時與海嘯波高大小作一粗略的關連性描述。其中海嘯強度 I~V 級代表海嘯波高小於 1.0m，海嘯強度 VI 級之海嘯波高等於 2.0m，海嘯強度 VII~VIII 等級相當於海嘯波高等於 4.0m，海嘯強度 IX~X 等級相當於海嘯波高等於 8.0m，海嘯強度 XI 及 XII 等級分別相當於海嘯波高等於 16.0m 及 32.0m 之威力。



資料來源：「海堤及水門設施耐海嘯構造評估標準及作業準則訂定(1/2)」，經濟部水利署

圖 5.4 Shuto(1994)所整理之海嘯災害與建築物受損程度分類

表 5.4 2001 海嘯強度等級分類

強度	海嘯描述	海嘯可能的影響之描述
I	完全無感的 (Not felt)	無感覺 無影響性 無災損
II	幾乎無感的 (Scarcely felt)	(1) 僅少數人坐在小船上可感受到，但沿海近岸區無任何人觀察到。 (2) 無影響性。 (3) 無災損
III	弱的 (Weak)	(1) 多數人坐在小船上可感受到，沿海近岸區有少數人觀察到。 (2) 無影響性。 (3) 無災損。
IV	大到可被觀察的 (Largely observed)	(1) 所有人坐在小船上與少數人坐在大船上可感受到，沿海近岸區有大多數人觀測到。 (2) 一屆小型船隻會慢慢受海嘯波影響往近岸移動。 (3) 無任何人員傷亡及結構物損壞。
V	強烈的 (Strong) (波高約 1m)	(1) 坐在大船上可感受到，沿海近岸區所有人可觀測到，少數人並驚慌害怕的往高處地方跑動。 (2) 大多數小型船隻會劇烈的往近岸移動，少數船隻並互相撞擊甚至翻覆，近岸底床砂層運移，陸域地區有局部性之淹水情形。 (3) 戶外設施(如公園)與近岸之海岸結構物有局部淹水情形。
VI	輕微災害型的 (Slightly damaging) (波高約 2m)	(1) 大多數人驚慌害怕的往高處地方跑動。 (2) 大多數小型船隻非常劇烈得往近岸移動、互相撞擊與翻覆。 (3) 一屆木製結構物或設施有損毀或淹水情形，大多數之石造結構物尚經得起海嘯波侵襲。
VII	災害型的 (Damaging) (波高約 4m)	(1) 大多數人驚慌害怕並往更尚處地方跑動。 (2) 大多數小型船隻損毀，少數大型船隻劇烈振盪搖擺，部份船隻因而翻覆與漂移遠去，近岸底床砂層與小卵石道路等將被海嘯波衝擊而移至它處，一起養殖平台

強度	海嘯描述	海嘯可能的影響之描述
		<p>設施亦將被沖走。</p> <p>(3) 大多數木製結構物或設施損毀，少數翻覆並隨海嘯波被沖走，損壞等級為 1 而少數石造結構物有淹水情形。</p>
VIII	<p>嚴重災害型的 (Heavily damaging) (浪高約 4m)</p>	<p>(1) 所有人驚慌害怕往高處地方逃跑，一些人並會被水流沖走。</p> <p>(2) 大多數小型船隻損毀，另有多數船隻將被沖走，一些大型船隻往近岸漂移並互相撞擊，大型物品將被海嘯波衝擊而移至它處，但若遇到森林樹木阻擋則可停止漂移。海岸地形將產生侵蝕現象，大多數養殖平台設施亦將被沖走，少數因而損毀。</p> <p>(3) 大多數木製結構物或設施損毀或被沖走，少數石造結構物受損等級為 2。大多數鋼筋混凝土結構物可承受受損，少數受損程度為 1 並有大範圍區域之淹水現象。</p>
IX	<p>破壞性的 (Destructive) (波高約 8m)</p>	<p>(1) 大多數人被水流沖走。</p> <p>(2) 大多數小型船隻損毀解體並被水流帶走，大多數大型船隻往近岸漂移並互相撞擊，少部份則有損壞情形。海岸地形將擴大侵蝕範圍，大多數養殖平台設施損壞與被水流沖走。</p> <p>(3) 大多數石造結構物受損等級為 3，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 2 之損毀。</p>
X	<p>嚴重破壞性的 (波高約 8m)</p>	<p>(1) 引起大恐慌，大多數人被水流沖走。</p> <p>(2) 大多數大型船隻劇烈往近岸漂移並互相撞擊，有許多船隻因而破裂解體並撞擊陸域結構物。小型圓卵石將從海床上被沖擊至岸上，汽車翻覆並隨之漂移，石油氣溢出並造成火災，大範圍之陸地有下陷之情形。</p> <p>(3) 大多數石造結構物受損等級為 4，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 3 之損毀，人造堤防倒塌，港灣防波堤混毀。</p>
XI	<p>毀滅性的 (devastating) (波高約 16m)</p>	<p>(2) 維生系統被打斷阻隔，大範圍區域產生火災，海嘯引起之下刷水流將汽車與其它物品沖移至海上，而大型圓卵石將從海床上被水流拍擊至岸上。</p> <p>(3) 大多數石造結構物受損等級為 5，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 4 之損毀，許多鋼筋混凝土結構物可承受等級 3 之損毀。</p>

強度	海嘯描述	海嘯可能的影響之描述
XII	完全毀滅性的 (Completely devastating) (波高約 32m)	(3) 所有石造結構物損壞解體，大多數鋼筋混擬土結構物可承受等級 3 之損毀。

註：(1)對人類、(2)對含船隻在內之物體、(3)對建築物等影響程度之描述

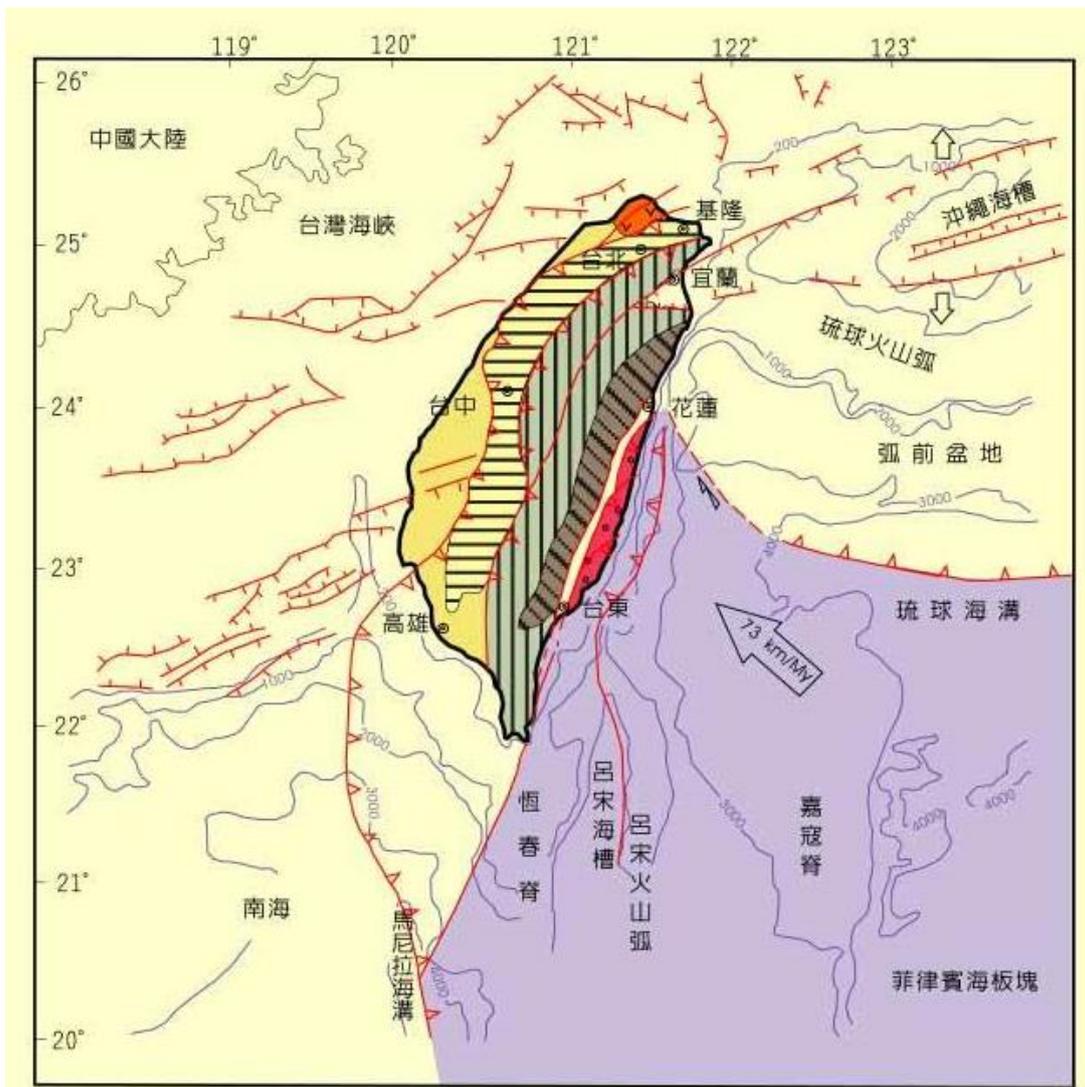
資料來源：「海堤及水門設施耐海嘯構造評估標準及作業準則訂定(1/2)」，經濟部水利署

## 5.2 國內外海嘯資料蒐集與分析

2004 年於印尼發生之大海嘯造成印度洋沿岸國家數十萬人之傷亡，並促使各大濱海國家建立海嘯防災及預警機制以儘可能減低災損。但 2011 年 3 月 11 日時，日本外海發生規模 9.0 之地震，引發大規模海嘯重創日本東北與關東地區，其驚人之破壞與災損影像透過各類媒體傳播震驚全世界，並再次引起國際間對海嘯與防災課題之重視，故此類異常氣候所造成之影響實有探討之必要。

### 5.2.1 國內海嘯資料蒐集與分析

臺灣位處太平洋板塊及歐亞板塊之交界地帶，東側有沖繩海槽與琉球海溝，南側則有馬尼拉海溝(如圖 5.6 所示)，易產生斷層滑動而導致地震活動，故有發生大規模地震之潛在危機；另依氣象局統計 1991~2006 年 16 年的觀測資料顯示，台灣地區平均每年約發生 18,500 次地震，其中約有 1,000 次為有感地震，可見地震頻率相當頻繁，因此台灣遭受海嘯侵襲之潛在威脅仍不可忽視。



資料來源：中央地質調查所

圖 5.5 臺灣鄰近海域斷層分佈

茲參考中央氣象局報告及近年學者整理野史資料，表列臺灣地區近年疑似及未有實測紀錄之海嘯及有實測紀錄之海嘯如表 5.5 及表 5.6 所示。由表可知，臺灣近百年來雖未有災難性海嘯之記錄，但依照野史資料分析可知，臺灣海域亦可能曾發生多次災害性的海嘯，雖多無觀測數據記錄可供佐證，且年代久遠，其可信度尚須驗證，但仍可發現臺灣南、北及東部均有發生海嘯之潛在危機。

表 5.5 臺灣近岸疑似及未有實測紀錄之海嘯列表

時間	地點	疑似海嘯現象	來源
1661.1	安平	港內水體激烈震動	德人 Herport 記載 包澄瀾等(1991) 楊華庭(1987)「中國海嘯歷史年表」
1721.1	台南	因地震，海水冷漲	明清史料彙編 徐泓(1983)「清代台灣天然災害史料彙編」
1754.4	淡水	許多房屋遭海嘯破壞	包澄瀾等(1991) 楊華庭(1987)「中國海嘯歷史年表」
1781.4	屏東佳冬	水漲數十丈	台灣采訪冊「祥異地震」
	高雄	海水暴吼如雷，水漲持續 1 至 8 小時。海嘯吞沒村庄	徐泓(1983)「清代台灣天然災害史料彙編」
1792.8	鹿耳門	水湧起數丈	台灣采訪冊「祥異地震」 徐泓(1983)「清代台灣天然災害史料彙編」
1866.12	高雄	河水陡落三尺，忽又上升	阿瓦力茲(Alvarez)著「福爾摩薩(Formosa)」
1867.12	基隆	海水暴漲，溺數百人	徐泓(1983)「清代台灣天然災害史料彙編」
1917.5	基隆	基隆海嘯 1 米，週期 26 分，但未有官方地震與海嘯記錄	包澄瀾等(1991) 楊華庭(1987)「中國海嘯歷史年表」
1918.5	基隆	基隆海嘯溯上約 3.7 公尺，但未有官方地震與海嘯記錄	台電電源開發處之調查報告 楊春生等(1983)「台灣東北部海岸地震海嘯數值推算之研究」
1921.9	安平	海嘯規模 0-1	馬宗晉等(1994)「中國重大災害及減災對策」
1963.2	台灣東部	地震規模 7.2 海嘯規模-1	羽鳥德太郎(1994)
1966.3	台灣東部	地震規模>7 海嘯規模 0-1	羽鳥德太郎(1994) 包澄瀾等(1991) 楊華庭(1987)「中國海嘯歷史年表」
1972.1	台灣東部	地震規模 7.2 海嘯規模 0	羽鳥德太郎(1994)
1978.7	蘭嶼	地震規模 7.2 海嘯規模 0	羽鳥德太郎(1994)

資料來源：中央氣象局，本研究整理

表 5.6 臺灣近岸有實測記錄之海嘯列表(1951~2006)

時間	震央位置	台灣之海嘯記錄	備註/資料來源
1951.10	花蓮外海	花蓮驗潮儀有海嘯記錄，波高幾十公分	地震規模 7.3 徐明同 (1981)
1960.5	智利	基隆、花蓮、南方澳、恆春等均有水位異常記錄，高度約數十公分~2 公尺不等	地震規模 9.5，史上規模最強之地震 徐明同 (1981) 聯合報/中央日報(民 49.5.25)
1963.10	千島	花蓮有十幾公分海嘯	地震規模 7.0 徐明同 (1981)
1964.3	阿拉斯加	花蓮 15cm	地震規模 8.4 徐明同 (1981)
1986.11	花蓮外海	花蓮 2m/台東富崗 13cm	地震規模 8.4 許明光(1994)/陳建宏(1994) 羽鳥德太郎 (1994)
1993.8	關島	花蓮 29cm/成功 27cm	地震規模 8.0 陳建宏(1994)中央氣象局海象中心
1996.2	印尼	成功 55cm/基隆 25cm/鹽寮 30cm	地震規模 8.1 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
1996.9	蘭嶼南方	梗枋 6cm/蘇澳 8cm/成功/22cm	地震規模 7.1 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
1998.5	花蓮東南	蘭嶼 7.4cm	地震規模 7.0 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
1999.9	南投	花蓮 21.4cm/成功 5.9cm	地震規模 7.3(921 大地震) 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
1999.11	萬那度	富基 18cm/鼻頭 19cm/馬岡 38cm/蘇澳 11cm	地震規模 7.1 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
2001.12	花蓮東南	梗枋 14.2cm/蘇澳 16.2cm/和平港/10cm	地震規模 6.7 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
2002.3	花蓮東南	梗枋 16.5cm/蘇澳 27.3cm/和平港 18.6cm/花蓮 18.5cm/成功 22.6cm	地震規模 6.8 (331 大地震) 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
2002.12	台東	成功 59.3cm/大武 22.8cm/後壁湖 20.7cm/蘇澳 15.6cm/將軍 15.4cm/永安 14.2cm/安平 13.8cm/東港 11.9cm/梗枋 9.6cm	地震規模 6.4 林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心
2003.12	台灣南方	後壁湖 30cm	地震規模 6.8 林欽隆(2008)/中央氣象局海象中心

2006.12	台東外海	成功 60cm	地震規模 6.4 林欽隆(2008)/中央氣象局海象中心
---------	------	---------	---------------------------------

資料來源：中央氣象局，本研究整理

## 5.2.2 國外海嘯資料蒐集與分析

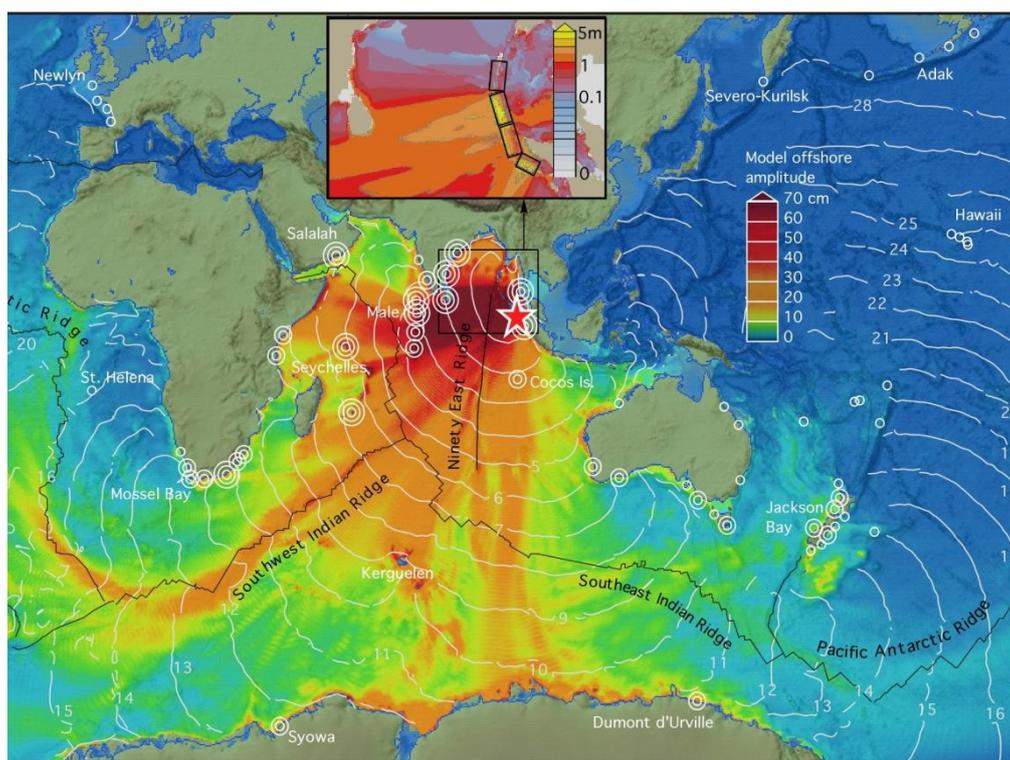
整理近年(1900~2014 年)國際間造成重大傷亡(死亡人數>500 人)之海嘯列表如表 5.7 所示。近十年來著名之海嘯事件，則當屬 2004 年發生於印尼之南亞大海嘯以及 2011 年日本三陸沖大地震引發之海嘯，均造成當地嚴重之傷亡與災損。其中 2004 年南亞大海嘯因其屬淺層地震，且規模達史上第四大(Mw=9.1)，在地形之影響下，所波及之國家遍及印度洋沿岸各國，範圍達到六個時區之廣，顯示海嘯波浪之能量可造成距離海嘯發生地數千公里外之海水面不正常之升降，甚至發生災損之情形，如圖 5.7 所示；而 2011 年 3 月 11 日於日本仙台東方約 130km 處發生規模達 9.0 之大地震，在宮古市造成海嘯朔上高度 40.4m，造成日本東北部份城市毀滅性之破壞，甚至在太平洋東岸亦有災情發生，可見海嘯之破壞力實不容忽視，如圖 5.7 所示。

表 5.7 1900~2014 年造成重大傷亡之海嘯一覽表

年	月	日	海嘯源		地震規模
			國家	位置	
1906	1	31	ECUADOR	OFF COAST	8.8
1908	12	28	ITALY	MESSINA STRAIT, IONIAN SEA	7.0
1923	9	1	JAPAN	SAGAMI BAY	7.9
1930	5	5	MYANMAR (BURMA)	MYANMAR COAST	7.3
1933	3	2	JAPAN	SANRIKU	8.4
1944	12	7	JAPAN	OFF SOUTHEAST COAST KII PENINSULA	8.1
1945	11	27	PAKISTAN	MAKRAN COAST	8.0
1946	8	4	DOMINICAN REPUBLIC	NORTHEASTERN COAST	7.8
1946	12	20	JAPAN	HONSHU: S COAST	8.1
1951	8	3	NICARAGUA	COSIGUINA VOLCANO	6.0
1952	11	4	RUSSIA	KAMCHATKA	9.0
1960	5	22	CHILE	CENTRAL CHILE	9.5
1969	2	23	INDONESIA	MAKASSAR STRAIT	6.9
1976	8	16	PHILIPPINES	MORO GULF	8.1
1979	7	18	INDONESIA	LEMBATA ISLAND	-

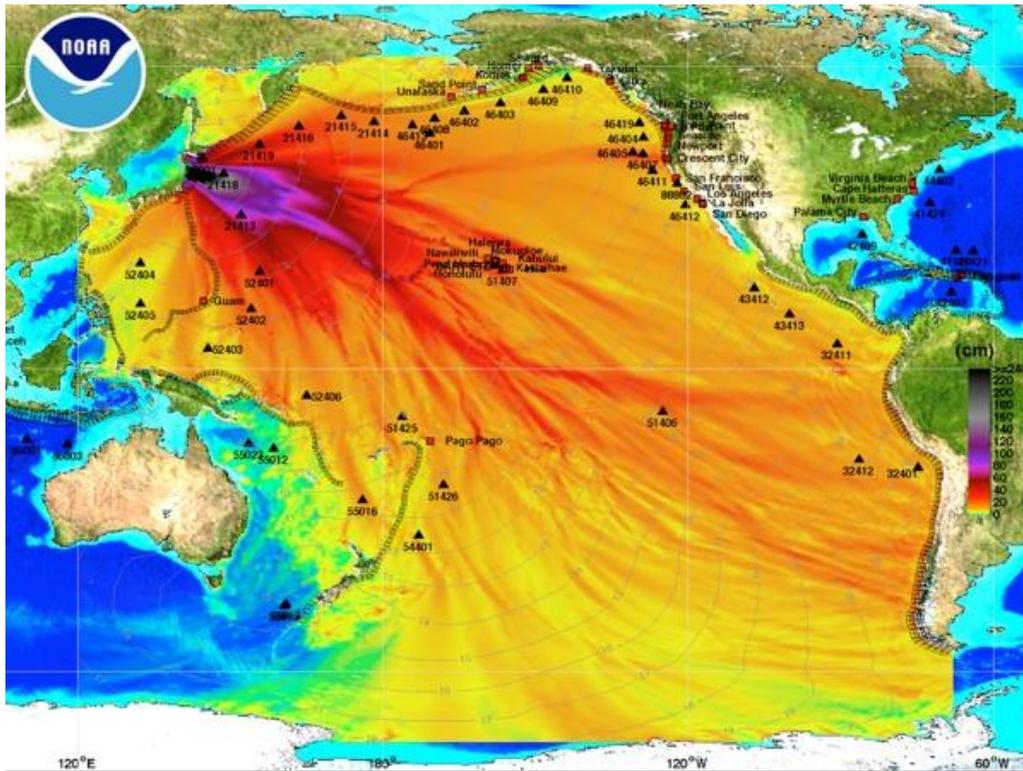
1979	12	12	COLOMBIA	COLUMBIA: OFF SHORE, PACIFIC OCEAN	7.7
1992	12	12	INDONESIA	FLORES SEA	7.8
1998	7	17	PAPUA NEW GUINEA	PAPUA NEW GUINEA	7.0
2004	12	26	INDONESIA	OFF W. COAST OF SUMATRA	9.1
2006	7	17	INDONESIA	JAVA	7.7
2011	3	11	JAPAN	HONSHU ISLAND	9.0

資料來源：NOAA/WDS Global Historical Tsunami Database at NGDC(National Geophysical Data Center)，本表僅列出造成傷亡人數大於 500 人之海嘯



資料來源：美國大氣海洋局 (NOAA)

圖 5.6 2004.12.26 南亞海嘯最大波高分佈圖



資料來源：美國大氣海洋局 (NOAA)

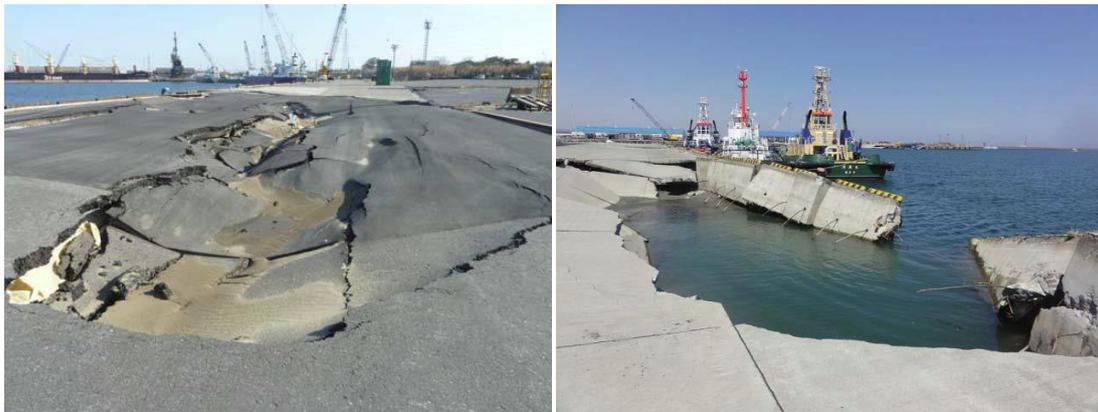
圖 5.7 2011.03.11 日本海嘯最大波高分佈圖

以 2011 日本海嘯為例，由於大海嘯傳遞至近岸時，並不一定以巨浪之形式出現，而是如同快速上升之潮汐般，挾帶著奔流洪水侵襲海岸與構造物。故海嘯對港灣結構物之破壞，主要以海嘯波壓所造成之沉箱滑動、傾倒，或是因流速甚快之洪水對堤腳及堤後背填淘刷，以及洪水載運大型物體(如船隻等)撞擊結構物等為主，可能造成沉箱翻覆、碼頭法線變位，岸壁破損及沉陷等等情形。圖 5.8 至圖 5.10 為 2011 年日本海嘯對東日本沿岸各港所造成之災損照片。



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.8 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(釜石港)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.9 碼頭與岸壁遭海嘯淘刷後受損情形(左：鹿島港，右：相馬港)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

圖 5.10 碼頭與岸壁遭海嘯破壞後受損情形(左：相馬港，右：茨城港)

### 5.3 海嘯對基隆港防波堤之影響探討

#### 5.3.1 基隆港區概述

基隆港位於臺灣基隆市，為臺灣四座國際商港之一，其肩負促進國際貿易及發展航業之重責大任。基隆港的港灣形狀大致呈北寬南窄的漏斗狀，整個港區水域分為外港、內港及牛稠港三大區域。碼頭方面可分為東岸碼頭和西岸碼頭兩大部分，其中以西岸運量較大；碼頭類型則分為商用、軍用、漁用等三大類，港區配置如圖 5.11 所示。

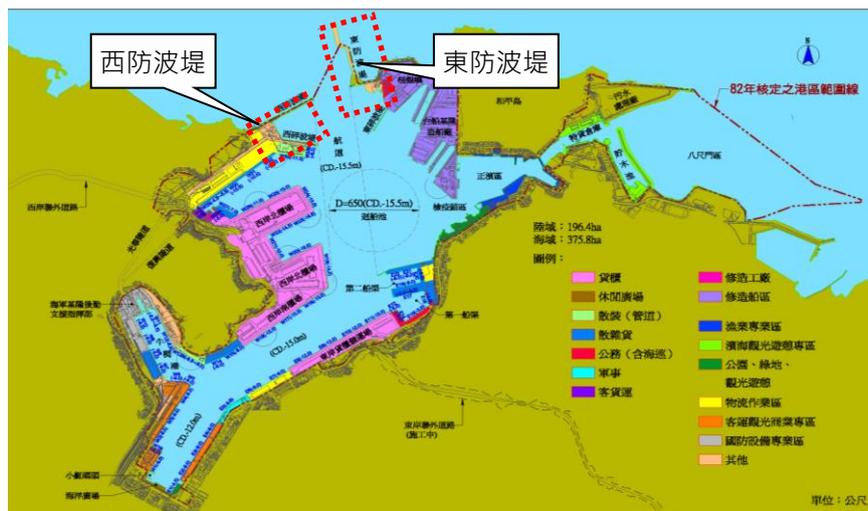
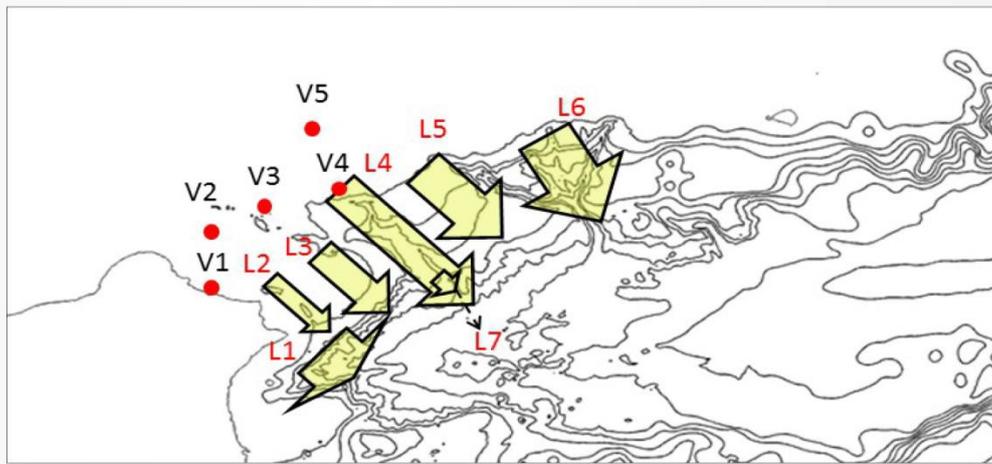


圖 5.11 基隆港區平面示意圖

### 5.3.2 基隆港受海嘯影響初探

依據國內外相關歷史文獻資料顯示，1867 年基隆海嘯為台灣近代史上可信度最高之災難性海嘯事件，曾在金山一帶海岸留有 6~7m 高之海嘯記錄；中研院與台大考古團隊亦曾於 2011 年 11 月於基隆和平島進行文化遺址的槽溝挖掘調查時，發現含珊瑚及海相軟體動物碎屑之礫質砂層，其厚度約 5~15 公分，頂部高程約為 6m，推測可能為 1867 年基隆海嘯所留下之沉積層(莊釗鳴等，2012)；惟因時隔久遠，相關佐證資料甚少，過往學者推測此次海嘯之成因亦不同，如基隆港東北方約 134 公里之海底火山爆發(台電、原委會)、基隆外海斷層 Mw=7.0 地震(徐明同等，1983)以及綜合地震、山崩、火山爆發及海岸形狀等因素(Ma and Lee，1997)等，不一而足。

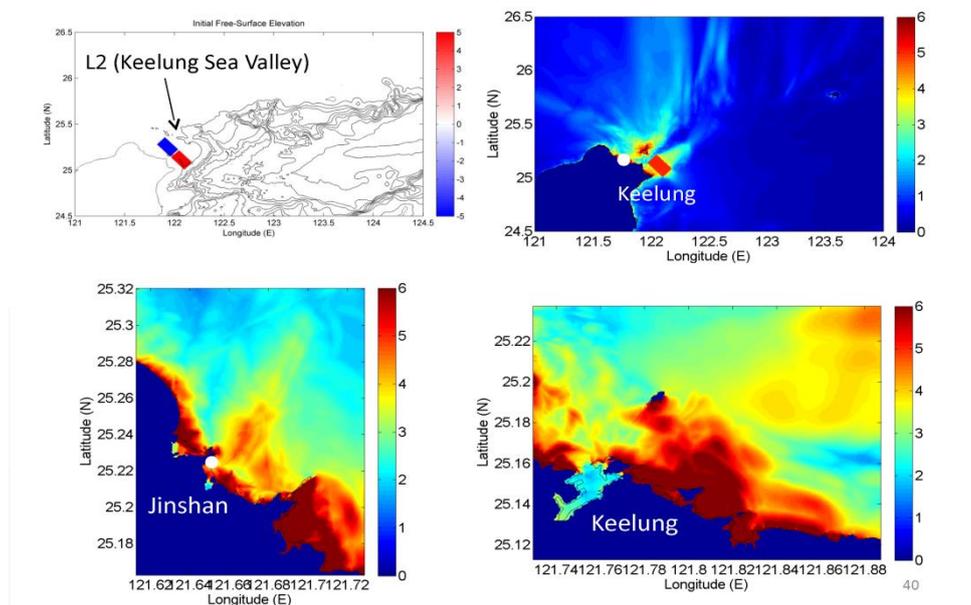
另參考吳祚任、李俊叡(2014)等人於「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」之研究成果，該研究考量北海岸海嘯成因除山腳斷層引發之地震外，北海岸複雜之海底地形和旺盛之火山活動亦可能引發較大規模之海嘯，故以海嘯源逆向追蹤法(Tsunami Reverse Tracking Method)尋找對北海岸具衝擊性之海嘯源，並以影響強度分析法(Impact Intensity Analysis)量化各潛在海嘯源對研究區域之威脅強度，發現以北海岸外海 7 處海底山崩及 5 處海底火山爆發為引發 1867 年基隆海嘯事件最有可能之海嘯源(如圖 5.12 所示)，並依各海嘯源之情境以數值模式進行分析；與歷史文獻資料波高作比對後可知，海底山崩情境中最有可能者來自於 L2(基隆陸棚)、L3(基隆海谷)或 L4(棉花峽谷)，火山情境最有可能者來自於 V2(基隆市西北方 35 公里處之火山)，其分析結果如圖 5.13 至圖 5.16 所示。



資料來源：中央大學水文及海洋科學研究所「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」。

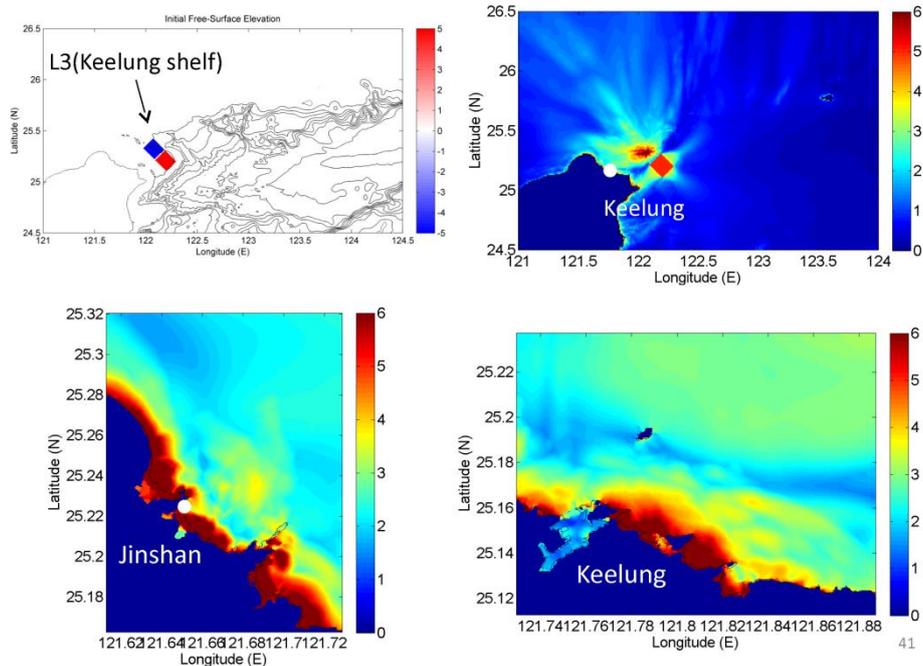
圖 5.12 1867 年基隆海嘯可能之海嘯源分佈圖

由上述重現 1867 年基隆海嘯之分析結果可知，當近岸海底山崩或海底火山爆發時，將造成基隆港外海 6m 以上之海嘯波高，基隆港內亦有 1~3m 高之海嘯，已達 Papadopoulos 及 Imamura (2001) 12 級海嘯強度分級中之 VIII~IX 級，可能造成沿岸及港埠嚴重之災損及破壞，故實有針對海嘯分析對設計條件影響之必要。



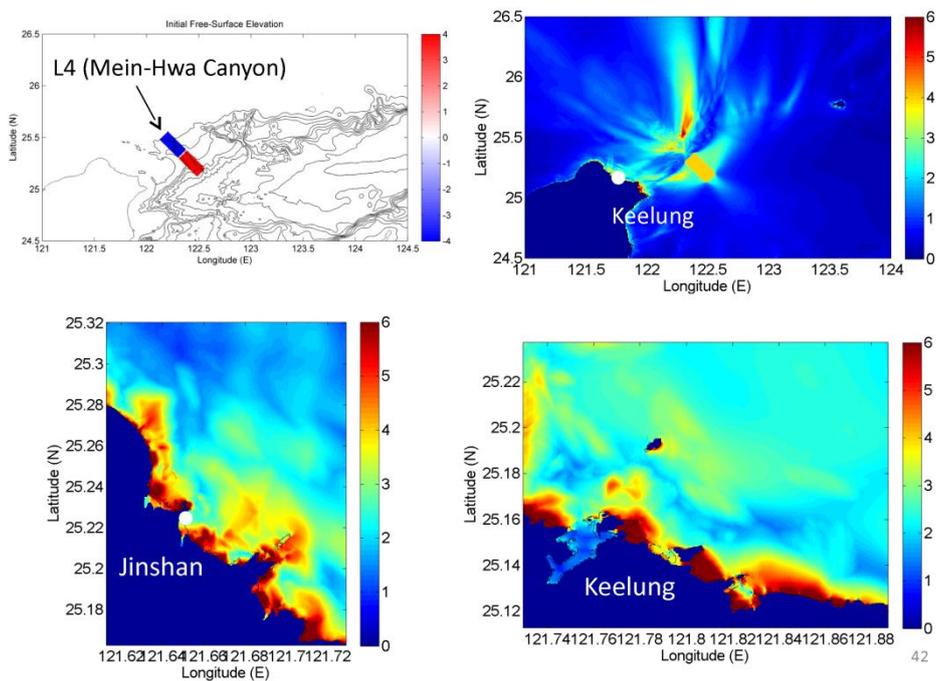
資料來源：中央大學水文及海洋科學研究所「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」。

圖 5.13 海底山崩 L2 情境(基隆陸棚)海嘯波高分佈圖



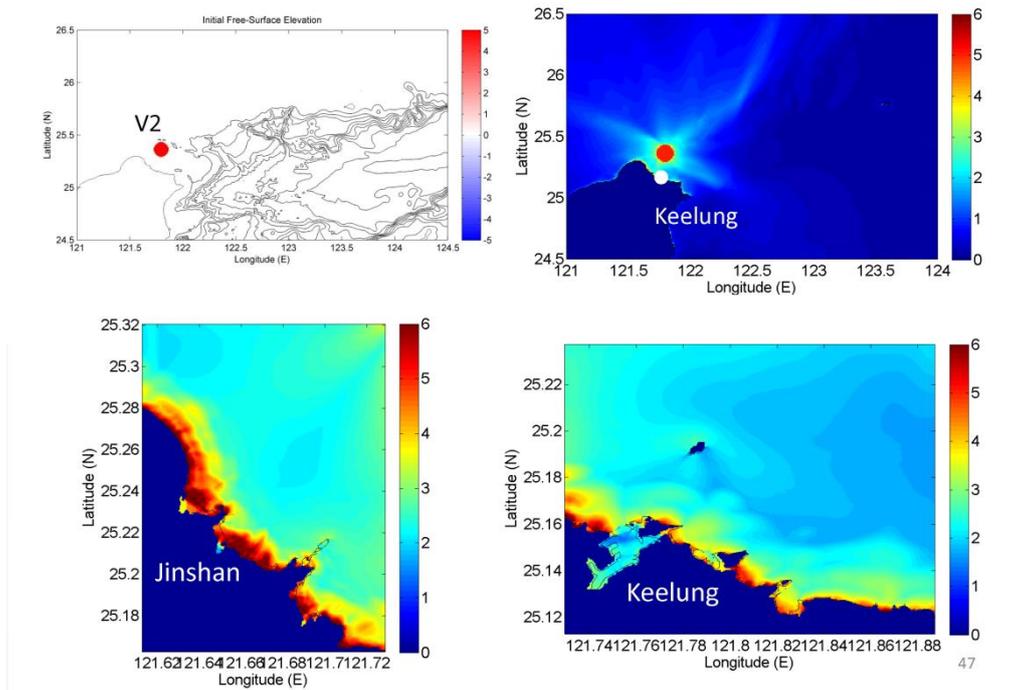
資料來源：中央大學水文及海洋科學研究所「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」。

圖 5.14 海底山崩 L3 情境(基隆海谷)海嘯波高分佈圖



資料來源：中央大學水文及海洋科學研究所「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」。

圖 5.15 海底山崩 L4 情境(棉花峽谷)海嘯波高分佈圖

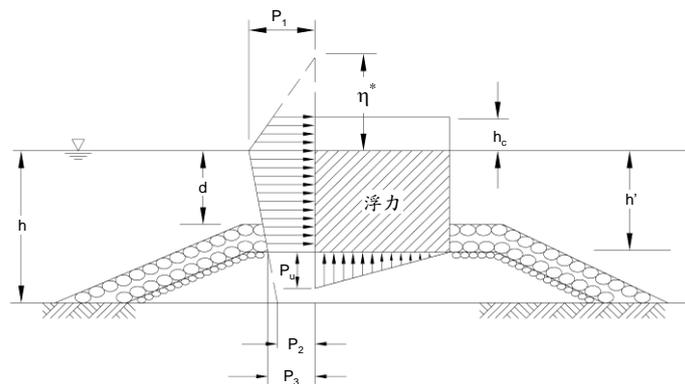


資料來源：中央大學水文及海洋科學研究所「台灣海嘯速算系統建置暨 1867 年基隆海嘯事件之還原與分析」。

圖 5.16 海底火山爆發 V2 情境(基隆市西北方 35 公里處火山)海嘯波高分佈圖

### 5.3.3 防波堤受力分析探討

有關防波堤堤前波高計算採用合田良實(Goda)波壓公式，各壓力分佈如圖 5.17 所示，計算步驟如下：



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

圖 5.17 防波堤直立部份波壓分佈圖

## 1. 示性波高與最大波高計算

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。

$$H_s = \begin{cases} K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o H_o' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_o', K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \end{cases} \quad (5.4)$$

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

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

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

$$H_{\max} = \begin{cases} 1.8 K_s H_o' & h/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o^* H_o' + \beta_1^* h), \beta_{\max}^* H_o', 1.8 K_s H_o'\} & h/L_o < 0.2 \end{cases} \quad (5.5)$$

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

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

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

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

$\tan \theta$ ：堤址附近海底坡度

## 2. 波壓作用高程

$$\eta = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_{\max}$$

$\eta$ ：波壓作用在靜水位以上高度 (m)

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

$\lambda_1$ ：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。

### 3. 波壓強度

$$P_1 = 1/2(1 + \cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2 \cos^2\beta)W_oH_{\max}$$

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

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1$$

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

$\lambda_1$ ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0。

$\lambda_2$ ：碎波波壓項之修正係數

$\lambda_3$ ：上揚壓力項之修正係數

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

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

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

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

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

式中  $P_1$ ：靜水位之波壓強度 ( $t/m^2$ )

$P_2$ ：海底之波壓強度 ( $t/m^2$ )

$P_3$ ：堤底之波壓強度 ( $t/m^2$ )

$P_4$ ：胸牆頂之波壓強度 ( $t/m^2$ )

$h$ ：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 ( $t/m^3$ )

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  $\alpha_2$  值應修正為  $\alpha^*$ ，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)

#### 4. 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：

$$P_u = 1/2(1 + \cos\beta) \cdot \lambda_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot W_o \cdot H_{\max}$$

#### 5. 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  $M_p$  可依下式求得：

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

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

上揚力之合成力  $U$  及力矩  $M_u$  可由下式求之：

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

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

式中  $\ell_u$ ：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)

### 5.3.4 堤址波力評估探討

依據基隆港原有波浪設計條件，本研究於基隆港東防波堤與轉彎段之原設計颱風波浪採用 NNE 向  $H_0' = 8.2\text{m}$ ，週期  $T = 11\text{s}$ （20 年回歸期），而東防波堤延伸段之颱風波浪採用 NE 向  $H_0' = 11.01 \sim 11.23\text{m}$ ，週期  $T = 13.69\text{s}$ （50 年回歸期），如表 5.8 所示。而本研究蒐集 135 個(1940~2013)颱風資料重新推算之結果，得知影響計畫區之波浪條件主要為 NE 及 NNE 向，其 50 年回歸期設計波浪  $H_0' = 10.37 \sim 10.88\text{m}$ ，週期  $T = 15.83 \sim 15.03\text{s}$ 。後續計算將分別採用原設計及本計畫推算之條件(如表 5.9)，針對各堤段之代表斷面(參考圖 5.18 及表 5.10)進行檢核，其代表斷面分別為 CASE1：水深(-30m)之東防波堤沉箱( $B = 15.5\text{m}$ )、CASE2：水深(-40m)之東防波堤沉箱( $B = 21.33\text{m}$ )、CASE3：水深(-40m)之東防波堤轉彎段沉箱( $B = 21.33\text{m}$ )、CASE4：水深(-42m)之東防波堤延伸段沉箱( $B = 30\text{m}$ )。



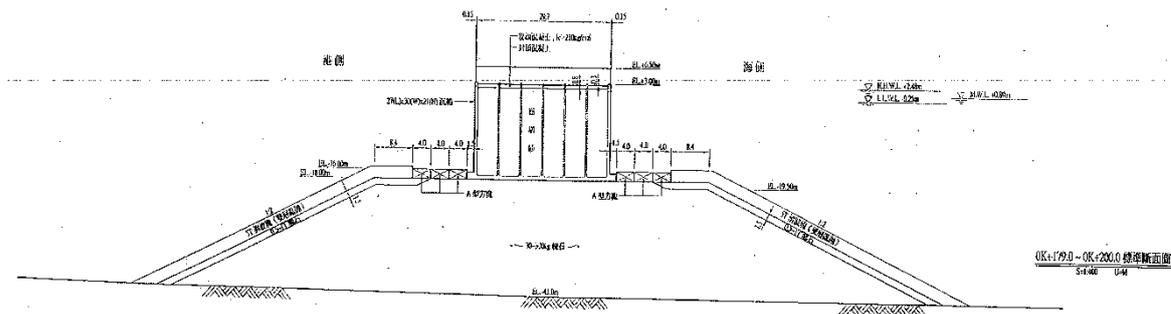


圖 5.18d 東防波堤延伸段標準斷面圖(4)

表 5.8 東防波堤標準斷面資料彙整

堤段	位置	沉箱編號	完工時間	水深	沉箱寬度	堤面高	備註
1	東防波堤	#7	民國 70 年	-30m	15.5m	+4.0m	拋放消波塊
2	東防波堤	#14	民國 70 年	-40m	21.33m	+4.4m	
3	東防波堤	#18	民國 70 年	-40m	21.33m	+6.4m	轉角段
4	東防波堤延伸段	#26	民國 99 年	-42m	30m	+6.5m	

表 5.9 原設計堤前設計波高

位置	外海波高 H <sub>o</sub>	相當外 海波高 H <sub>o'</sub>	堤址 波高 H <sub>s</sub>	$\beta = \min(\beta_0 - 15, \beta_0 + 15)$	波向	對應週期 (sec)	備註
東防波堤	8.70	8.20	7.50	39.5	NNE	11.00	20 年回歸期
東防波堤 轉彎段	8.70	8.20	7.50	0	NNE	11.00	
東防波堤 延伸段	12.08	11.11~11.23	10.26	43	NE	13.67	50 年回歸期

註：堤法線夾角 77°，轉彎段堤法線夾角 22°

表 5.10 本研究推算之設計波高

位置	外海波高 Ho	相當外海波高 Ho'	堤址波高 Hs	$\beta = \min(\beta_0 - 15, \beta_0 + 15)$	波向	對應週期 (sec)	備註
東防波堤	12.80	10.37	9.54	45	NNE	15.03	50 年回歸期
東防波堤轉彎段	14.20	10.37	9.62	0	NE	15.83	
東防波堤延伸段	12.80	10.88	9.98	45	NNE	15.03	

註：堤法線夾角  $77^\circ$ ，轉彎段堤法線夾角  $22^\circ$

### 1. 原設計條件波力計算結果

依上述設計條件及合田良實(Goda)公式計算後之結果詳表 5.11 所示，其中原設計條件下之總波力 P 計算為 120.26~293.87t，總波力矩  $M_p$  為 1130.79~3697.06t-m，上揚力 U 為 44.31t~138.65t，上揚力矩  $M_u$  為 457.85~2980.95t-m。

表 5.11 原設計條件波力計算結果

種類	參數	計算結果			
		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
		h=-30m B=15.5m	h=-40m B=21.33m	h=-40m B=21.33m	h=-42m B=30m
波力合成力及其力矩	P(t)	120.26	182.67	317.68	293.87
	$M_p(t-m)$	1130.79	2209.41	3849.89	3697.06
	U(t)	44.31	61.99	69.98	138.65
	$M_u(t-m)$	457.85	881.55	995.19	2980.95

### 5.3.5 海嘯對防波堤安全性分析

由於海嘯波力計算時並未考量波向角，本節將僅針對前述之 CASE1(東防波堤段，堤址水深  $h=-30\text{m}$ ，沉箱寬度  $B=15.5\text{m}$ )、CASE3(東防波堤段，堤址水深  $h=-40\text{m}$ ，沉箱寬度  $B=21.33\text{m}$ )及 CASE4(東防波堤延伸段，堤址水深  $h=-42\text{m}$ ，沉箱寬度  $B=30\text{m}$ )等斷面進行海嘯波力作用下之結構安全分析。

依前節所述規範對各標準斷面進行安全性檢核之結果如表 5.12 所示。由分析結果可知，在安全係數需大於 1.2 之條件下，東防波堤 CASE1 斷面因沉箱寬度最小，最大僅可抵擋 3.44m 高之海嘯，CASE3 斷面最大可抵擋 5.00m 高之海嘯，東防波堤延伸段 CASE3 則因堤寬最大，最大可抵擋 6.54m 高之海嘯，如表 5.13～表 5.15 所示；若東防波堤遭遇之海嘯高度大於 3.99～5.76m，或是東防波堤延伸段遭遇之海嘯高度大於 7.54m 時，滑動安全係數將低於 1，沉箱恐有立即發生滑動破壞之可能。

由上述分析結果可知，若參考 1867 年基隆海嘯，以 7.0m 高之海嘯高度作為設計條件，此時東防波堤 CASE1 及 CASE3 斷面之滑動安全係數均小於 1，可能將立即發生滑動之災損；而東防波堤延伸段 CASE3 斷面之滑動及傾倒安全係數分別為 1.09 及 2.31，其滑動安全係數雖不符合規範要求之 1.2，但整體之滑動抵抗力仍大於海嘯波力，故應不致發生立即性之滑動及傾倒破壞。

表 5.12 基隆港東防波堤可承受最大海嘯高度

堤段	安全係數	項 目	所需條件	計算結果
東防波堤 CASE1 $h=-30\text{m}$ $B=15.5\text{m}$	1.20	堤體滑動穩定計算	$a=3.44\text{m}$	1.20
		堤體傾倒穩定計算		1.61
	1.00	堤體滑動穩定計算	$a=3.99\text{m}$	1.00
		堤體傾倒穩定計算		1.31

東防波堤 CASE3 h=40m B=23.33m	1.20	堤體滑動穩定計算	a=5.00m	1.20
		堤體傾倒穩定計算		1.72
	1.00	堤體滑動穩定計算	a=5.76m	1.00
		堤體傾倒穩定計算		1.41
東防波堤延 伸段 CASE4 h=42m B=30m	1.20	堤體滑動穩定計算	a=6.54m	1.20
		堤體傾倒穩定計算		2.55
	1.00	堤體滑動穩定計算	a=7.48m	1.00
		堤體傾倒穩定計算		2.09

表 5.13 基隆港東防波堤 CASE1 各海嘯條件之容許抬升水位比較表

堤段	穩定計算結果	海嘯條件 (a=3.44m)		海嘯條件 (a=3.99m)		海嘯條件 (a=7.0m)
		數值	比例	數值	比例	結果
東防波堤 CASE1 h=30m B=15.5m	總波力(P)	139.46	0.49	161.89	0.57	284.67
	總波力矩(Mp)	1247.93	0.49	1449.83	0.57	2554.77
	總揚壓力(U)	60.41	0.49	70.07	0.57	122.93
	總揚壓力矩(Mu)	624.25	0.49	724.06	0.57	1270.28
	總防波堤重力(WE)	602.15	1.00	602.15	1.00	602.15
	總防波堤重力矩(ME)	4666.69	1.00	4666.69	1.00	4666.69
	總浮力(WB)	262.97	1.00	262.97	1.00	262.97
	總浮力矩(MB)	2038.03	1.00	2038.03	1.00	2038.03
	堤體水中重 (WE-WB-U)	278.77	1.29	269.11	1.24	216.25
	堤體水中重力矩 (ME-MB-Mu)	2004.41	1.48	1904.60	1.40	1358.38
	$SFs=[f*(WE-WB-U)]/P$	1.20	2.61	1.00	2.17	0.46
	$SFo=(ME-MB-Mu)/Mp$	1.61	3.04	1.31	2.47	0.53

註：上述比例係與海嘯(a=7.0m)下所計算之波力比較

表 5.14 基隆港東防波堤 CASE3 各海嘯條件之容許抬升水位比較表

堤段	穩定計算結果	海嘯條件 (a=5.00m)		海嘯條件 (a=5.76m)		海嘯條件 (a=7.0m)
		數值	比例	數值	比例	結果
東防波堤 CASE3 h=-40m B=23.33m	總波力(P)	257.99	0.71	298.08	0.82	363.49
	總波力矩(Mp)	2,943.31	0.71	3,409.97	0.82	4,171.38
	總揚壓力(U)	120.83	0.71	139.20	0.82	169.17
	總揚壓力矩(Mu)	1,718.27	0.71	1,979.44	0.82	2,405.57
	總防波堤重力(WE)	1,061.49	1.00	1,061.49	1.00	1,061.49
	總防波堤重力矩(ME)	11,320.78	1.00	11,320.78	1.00	11,320.78
	總浮力(WB)	425.60	1.00	425.60	1.00	425.60
	總浮力矩(MB)	4,539.05	1.00	4,539.05	1.00	4,539.05
	堤體水中重 (WE-WB-U)	515.05	1.10	496.68	1.06	466.72
	堤體水中重力矩 (ME-MB-Mu)	5,063.46	1.16	4,802.28	1.10	4,376.15
	$SFs=[f*(WE-WB-U)]/P$	1.20	1.56	1.00	1.30	0.77
	$SFo=(ME-MB-Mu)/Mp$	1.72	1.64	1.41	1.34	1.05

註：上述比例係與海嘯(a=7.0m)下所計算之波力比較

表 5.15 基隆港東防波堤延伸段 CASE4 各海嘯條件之容許抬升水位比較表

堤段	穩定計算結果	海嘯條件 (a=6.54m)		海嘯條件 (a=7.48m)		海嘯條件 (a=7.0m)
		數值	比例	數值	比例	結果
東防波堤 延伸段 CASE4 h=-42m B=30m	總波力(P)	356.98	0.93	409.16	1.07	382.52
	總波力矩(Mp)	4,306.39	0.93	4,945.67	1.07	4,619.23
	總揚壓力(U)	222.29	0.93	254.25	1.07	237.93
	總揚壓力矩(Mu)	4,445.89	0.93	5,084.90	1.07	4,758.60
	總防波堤重力(WE)	1,573.53	1.00	1,573.53	1.00	1,573.53
	總防波堤重力矩(ME)	25,963.26	1.00	25,963.26	1.00	25,963.26
	總浮力(WB)	637.53	1.00	637.53	1.00	637.53
	總浮力矩(MB)	10,519.27	1.00	10,519.27	1.00	10,519.27
	堤體水中重 (WE-WB-U)	713.70	1.02	681.75	0.98	698.07
	堤體水中重力矩 (ME-MB-Mu)	10,998.10	1.03	10,359.08	0.97	10,685.39
	$SFs=[f*(WE-WB-U)]/P$	1.20	1.10	1.00	0.92	1.09
	$SFo=(ME-MB-Mu)/Mp$	2.55	1.10	2.09	0.90	2.31

註：上述比例係與海嘯(a=7.0m)下所計算之波力比較

另參考日本 311 海嘯之經驗可知，海嘯對於防波堤損壞狀態約可歸納四種主要受災型態，分別為海嘯波力型、溢流沖刷型、堤頭沖刷型及退潮水位差型等四種，礙於現階段規範對於海嘯之相關破壞機制及計算方式尚未明確，因此本研究暫以日本 OCDI 規範推算海嘯波力，並評估堤體本身之穩定性，但其他受災形態恐仍有造成防波堤損壞之虞；如海嘯強勁之流速亦有可能造成堤基嚴重淘刷而間接造成堤體之損壞；考量海嘯之流速受地形影響甚大，若初步假設計畫區外側為寬闊海域，並以理論進行推算，7.0m 高之海嘯將於計畫區近岸產生約 4.0m/sec 之流速，依規範推算此時基礎保護之重量需達 9.6t 以上；而由既有標準斷面資料顯示，既有之護基方塊重量約達 40t 以上，應無遭沖刷而造成破壞之疑慮，

惟護基方塊未保護到之基礎拋石仍有可能因海嘯沖刷流失，若針對海嘯進行結構斷面之預防檢討時，必須將此情況納入考量。

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論與建議

綜合前述各項研究工作成果包含氣候變遷對港域波浪影響探討、颱風波浪推算模式建置、港域設計波條件探討、重新探討兩港域的設計波條件，以及針對基隆港辦理海嘯對防波堤結構物的影響探討等，歸納重要結論如下：

1. 有關氣候變遷對港域波浪影響方面，本研究針對近 60 年內侵襲臺北港與基隆港颱風的統計與趨勢分析發現，只有中度颱風侵襲次數有隨著時間增加，輕度颱風與強烈颱風則無明顯趨勢。中度颱風侵襲安平港的年增加率平均約為 0.0138 次/年，高雄港的中度颱風侵襲次數年增率平均約為 0.0147 次/年；兩港域以現有颱風紀錄而言，每 100 年約增加一個颱風的侵襲機會。另在波浪影響的分析結果，透過多種趨勢分析方法的結果顯示，安平港波高年增率為 0.0022 至 0.0136 m/year。但若以無母數分析的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法的分析結果得知，安平港波高年增率為 0.0109 m/year 較具代表性。高雄港以一階線性回歸與 EMD 法所估算的結果為年增率約為 0.0042 至 0.0105 m/year，而採用 Seasonal Kendall 趨勢檢定法其波高年增率為 0.0101 m/year，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，兩港域的波高約每 100 年增加 1m。
2. 由類神經颱風波浪推算與最小化模式樹(M5)波浪推算兩種推估模式的比較結果顯示，安平港與高雄港的 M5 模式可以達到與類神經模式相近的推算能力。利用波高峰值誤差、波高峰值發生時間誤差、RMSE 與 R2 等四個指標來評估安平港與高雄港的 M5 模式的分析比較，發現高雄港的推算能力較安平港好。
3. 在颱風推算的個案分析結果顯示，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台灣本

島進入中國大陸後會造成另一波高峰值，這種現象目前兩種模式皆無法模擬此現象。安平港與高雄港兩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。

4. 有關探討港域設計波條件方面，本研究利用類神經、最小化模式樹(M5)與二維數值模式等模式所推算的樣本，並配合港域實測資料樣本進行極值統計分析，及推求 50 重現期的結果比較中發現，二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。
5. 安平港利用實測資料樣本、類神經樣本、二維數值模式樣本及 M5 最小化模式樹樣本等所計算的 50 年重現期極值波高分別為 8.56m、5.82m、7.10m 及 5.46m；標準差則分別為 0.99m、0.41m、0.81m 與 0.24m。在高雄港方面，同樣以實測資料樣本、類神經樣本、二維數值模式樣本及 M5 模式樣本所計算的 50 年重現期極值波高分別是 8.74m、7.12m、8.03m 及 6.55m；標準差分別為 0.56m、0.55m、0.55m 與 0.79m。
6. 在海嘯對基隆港東防波堤的影響探討方面，本研究參考吳祚任教授之研究成果，以 1867 年基隆 7.0m 之歷史海嘯事件，探討基隆港東防波堤沉箱受海嘯襲擊時之安全性，由分析結果可知，東防波堤之沉箱滑動安全係數介於 0.46~1.09 間，而傾倒安全係數則介於 0.53~2.31，由各斷面之計算結果顯示，東防波堤若遭遇 7.0m 高之海嘯，恐有立即發生滑動及傾倒破壞之風險。而東防波堤延伸段之安全係數均大於 1，雖不滿足規範 1.2 之需求，但應暫無立即性之危險。

## 6.2 成果效益及後續應用情形

本研究所辦理之重新探討兩港域的設計波條件，以及海嘯對防波堤結構物的影響探討等項工作成果，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，所完成安平港與高雄港兩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。

## 參考文獻

1. 湯麟武，1970，“淺灘海岸上波浪推算方法之研究”，成功大學土木水利學術彙刊，第1期，第105~164頁。
2. 基隆港務局，1975，「東防波堤延伸工程」初步報告書。
3. 合田良實，1990，「港灣構造物的耐波設計」，鹿島出版社。
4. 郭一羽，2001，「海岸工程學」，文山書局。
5. 基隆港務局，2004，「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」。
6. 「港灣構造物設計基準—碼頭設計基準及說明」，2010，交通部運輸研究所。
7. 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臺風波浪推算模式」，2012，第三十四屆海洋工程研討會論文集。
8. 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(4/4)」，2012，交通部運輸研究所。
9. 「103年基隆港防波堤沉箱安全評估探討」，2014，交通部運輸研究所。
10. 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)。
11. Coastal engineering manual (2002) “Hydro-dynamic analysis and design conditions,” Chapter 8.
12. Ferreira, J.A., 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.
13. Ferreira, J.A., Guedes Soares, C., (2000) “Modelling distributions of significant wave height”, Coastal Engineering 40, 361-374.

14. 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.
15. Muir, J.R., El Shaarawi, A.H., (1986) "On the calculation of extreme wave heights", *Ocean Engineering* 13, 93-118.
16. Suh, K. D., Kim, M. and Chun J. (2013) "Estimation of design wave height using empirical simulation technique," *Ocean Engineering*, 61, 39-49.
17. Young, I. R., Zieger, S., Babanin, A. V. (2011) "Global Trends in Wind Speed and Wave Height," *Science*, 332, 6028, 451-455.
18. 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.