

105-001-7851
MOTC-IOT-103-H2DB001c

103 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 2 月

105-001-7851

MOTC-IOT-103-H2DB001c

103 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 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究.
103 年 / 何良勝, 林受勳, 陳志弘著. -- 初版. -- 臺
北市 : 交通部運研所, 民 105.02
面 ; 公分
ISBN 978-986-04-7889-1(平裝)

1.波動 2.資訊管理系統 3.臺灣

351.9

105000809

103 年臺灣主要港口港池安全資訊管理系統建置之研究

著 者：何良勝、林受勳、陳志弘
出版機關：交通部運輸研究所
地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號
網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版 > 中心出版品)
電 話：(04)26587121
出版年月：中華民國 105 年 02 月
印 刷 者：九易數碼科技印刷有限公司
版(刷)次冊數：初版一刷 60 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研技中心網站
定 價： 200 元
展 售 處：
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880
國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207
五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010500101

ISBN：978-986-04-7889-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

105

103 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 : 1010500101

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：103 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 ISBN978-986-04-7889-1(平裝)	政府出版品統一編號 1010500101	運輸研究所出版品編號 105-001-7851	計畫編號 103-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 103 年 01 月 至 103 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二年工作成果，報告內容主要包含建置臺北港與基隆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；本研究亦針對臺北港與基隆港兩港域進行氣候變遷對港域波浪影響以及波浪極值統計推算分析探討。同時，本年度亦辦理基隆港東西防波堤的現場圖像調查、防波堤沉箱之安全性評估探討、結構物受損補強方案研擬，以及建置一套防波堤構造物維護管理資訊系統等項工作；其中，颱風波浪推算模式及防波堤現況調查與堤體安全性評估探討等工作成果，可建構港域適用的定期性防波堤維護管理資訊系統。</p> <p>本研究辦理之防波堤構造物安全性評估與現場圖像調查，以及所建置防波堤構造物維護管理資訊系統等項工作成果，可提供港務機關瞭解港灣構造物之穩定性與安全性，以有效運用資源，延長港務設施使用年限及降低維護成本。另外，所完成臺北港與基隆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 2 月	176	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**

TITLE: Setting Up Management Information System for the Safety of Taiwan Two Main Harbor Waters, 2014			
ISBN 978-986-04-7889-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010500101	IOT SERIAL NUMBER 105-001-7851	PROJECT NUMBER 103-H2DB001c
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Y.F. PROJECT INVESTIGATOR: Ho L.S. PROJECT STAFF: Lin S.S, Chen C.H. PHONE: 04-26587121 FAX: 04-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2014 TO December 2014
KEY WORDS: breakwater safeguard and management system, ex-wave statistics estimating model, typhoon waves estimating			
ABSTRACT: <p>The second year results for a four year term project include the establishment of typhoon-wave forecasting model for Taipei and Keelung harbors. The artificial neural network method, M5 and a 2-D numerical model were applied for comparison. The extreme wave in these two harbors were also analyzed; meanwhile, the scene picture investigation of Keelung east & west breakwater, the safety assessment of the breakwater caisson, reinforcement of harbor structure and set up of a management information system for harbor maintenance were all proceeded in this year. Among them, the typhoon-wave forecasting model and the safety evaluation of current breakwater condition can be applied in regular harbor structure maintenance.</p> <p>The safety assessment of the breakwater structure, the scene picture investigation and the management information system for harbor maintenance may offer harbor units a regular examination on harbor constructions so as to reduce the cost for harbor maintenance. Moreover, the results of extreme-wave characteristics in Taipei and Keelung harbors can provide related bay and coast construction programming and designing, environmental influence assessment and design wave evaluation for academic research need.</p>			
DATE OF PUBLICATION February 2016	NUMBER OF PAGES 176	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

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 資料來源與處理說明	2-1
2.2 颱風之長期變化趨勢	2-3
2.3 波浪長期變遷趨勢	2-6
2.3.1 資料來源	2-6
2.3.2 分析方法	2-8
2.3.3 分析結果	2-12
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立	3-8
3.2.1 類神經網路架構	3-8
3.2.2 模式輸入之轉換函數	3-12
3.2.3 轉換函數與訓練函數	3-18

3.2.4 隱藏層神經元測試.....	3-19
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.....	3-44
3.8.1 數值模擬條件.....	3-46
3.8.2 數值模式驗證.....	3-48
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 臺北港的推算結果.....	4-7
4.2.2 基隆港的推算結果.....	4-15
第五章 港灣防波堤構造物安全評估探討.....	5-1

5.1 防波堤圖像資料調查	5-2
5.1.1 多音束監測作業	5-3
5.1.2 水下攝影作業	5-3
5.1.3 水下作業工作成果	5-4
5.1.4 水上結構物檢視工作成果	5-9
5.2 防波堤設計條件檢討	5-12
5.2.1 防波堤原有設計條件	5-13
5.2.2 颱風波浪及暴潮位設計條件探討	5-16
5.3 防波堤結構物受損紀錄	5-18
5.4 防波堤結構物受力分析探討	5-20
5.4.1 受力計算方法	5-20
5.4.2 堤址波力評估探討	5-23
5.5 防波堤結構物安全性評估探討	5-28
5.5.1 堤體安全性分析方法	5-28
5.5.2 計算結果與分析	5-30
5.5.3 綜合分析結果比較	5-33
5.6 防波堤結構物補強方案探討	5-34
5.6.1 堤體穩定補強方案探討	5-34
5.6.2 現況損壞補強方案初探	5-38
第六章 港灣防波堤維護管理資訊系統建置	6-1
6.1 維護管理檢測因子	6-1

6.2 防波堤檢維修表單建置	6-3
6.3 基隆港防波堤檢測成果評估	6-12
第七章 結論與建議	7-1
7.1 結論與建議	7-1
7.2 成果效益及後續應用情形	7-3
參考文獻	8-1

表 目 錄

表 2.1 臺北港 1951 年至 2013 年颱風侵襲次數趨勢.....	2-4
表 2.2 基隆港 1951 年至 2013 年颱風侵襲次數趨勢.....	2-5
表 2.3 臺北港 1996 年至 2013 年波浪資料蒐集率百分比	2-7
表 2.4 基隆港 1999 年至 2012 年波浪資料蒐集率百分比	2-8
表 2.5 臺北港長期波浪趨勢分析結果.....	2-17
表 2.6 基隆港長期波高趨勢分析結果.....	2-22
表 3.1 選取用來建立臺北港模式的颱風資訊與其對應最大波高	3-2
表 3.2 選取用來建立基隆港模式的颱風資訊與其對應最大波高	3-3
表 3.3 臺北港類神經颱風波浪推算結果.....	3-21
表 3.4 基隆港類神經颱風波浪推算結果.....	3-23
表 3.5 臺北港 M5 最小化模式樹波浪推算結果驗證.....	3-27
表 3.6 基隆港 M5 最小化模式樹波浪推算結果驗證.....	3-29
表 3.7 臺北港兩種波浪推算模式的誤差比較.....	3-30
表 3.8 基隆港兩種波浪推算模式的誤差比較.....	3-35
表 3.9 各港域類神經颱風波浪推算結果比較.....	3-41
表 3.10 誤差分析結果綜合比較表.....	3-44
表 3.11 風浪推算模擬之網格設定內容.....	3-47
表 3.12 模式參數設定彙整表.....	3-48
表 3.13 臺北港數值模式之波浪推算結果驗證.....	3-49
表 3.14 基隆港數值模式之波浪推算結果驗證.....	3-52

表 4.1 計算樣本順位機率之 α 及 β 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 臺北港年極值取樣法之各重現期分析結果.....	4-8
表 4.5 臺北港超量門檻取樣法之各重現期分析結果.....	4-12
表 4.6 臺北港四種樣本來源以兩種取樣方式的極值分析結果.....	4-15
表 4.7 基隆港年極值取樣法之各重現期分析結果.....	4-16
表 4.8 基隆港超量門檻取樣法之各重現期分析結果.....	4-19
表 4.9 基隆港四種樣本來源以兩種取樣方式的極值分析結果.....	4-23
表 5.1 基隆港防波堤圖像調查項目與時程.....	5-3
表 5.2 基隆港東防波堤港外水下調查彙整表.....	5-5
表 5.3 基隆港西防波堤港外水下調查彙整表.....	5-7
表 5.4 基隆港潮位資料表.....	5-13
表 5.5 基隆港東防波堤原設計深海波浪條件.....	5-14
表 5.6 基隆港東防波堤延伸段原設計深海波浪條件.....	5-14
表 5.7 基隆港東防波堤原設計堤前設計波高.....	5-14
表 5.8 基隆港東防波堤延伸段原設計堤前設計波高.....	5-15
表 5.9 基隆港東防波堤原設計安全係數表.....	5-15
表 5.10 基隆港東防波堤延伸段原設計安全係數表.....	5-16
表 5.11 目標區深海颱風波浪推算波高與原設計條件比對結果	5-17
表 5.12 本研究推算結果與原設計條件比對.....	5-18

表 5.13 基隆港東防波堤沉陷記錄統計表.....	5-19
表 5.14 基隆港東防波堤維修記錄.....	5-19
表 5.15 東防波堤標準斷面資料彙整.....	5-25
表 5.16 原設計堤前設計波高.....	5-26
表 5.17 本研究推算之設計波高.....	5-26
表 5.18 原設計條件波力計算結果.....	5-27
表 5.19 本研究推算設計條件波力計算結果.....	5-27
表 5.20 原設計波浪條件堤體穩定計算結果.....	5-32
表 5.21 本研究推算波浪條件堤體穩定計算結果.....	5-33
表 5.22 港灣設施維護工程紀錄表.....	5-34
表 6.1 防波堤檢測項目.....	6-3
表 6.2 防波堤定期檢測評估表(水上項目).....	6-4
表 6.3 防波堤定期檢測評估表(水下項目).....	6-5
表 6.4 D.E.R.&U.評等法之評估準則.....	6-6
表 6.5 防波堤單元劣化程度與對應之急迫性指標關係.....	6-7
表 6.5(續) 防波堤單元劣化程度與對應之急迫性指標關係.....	6-8
表 6.6 防波堤構造物檢測表.....	6-10
表 6.6(續) 防波堤構造物檢測表.....	6-11
表 6.7 基隆港東防波堤沉箱#9 檢測表.....	6-12
表 6.7(續) 基隆港東防波堤沉箱#9 檢測表.....	6-13
表 6.8 基隆港東防波堤調查成果總表.....	6-15
表 6.9 基隆港西防波堤調查成果總表.....	6-16

圖目錄

圖 2.1 臺北港海氣象觀測位置圖.....	2-3
圖 2.2 基隆港海氣象觀測位置圖.....	2-3
圖 2.3 中度颱風侵襲臺北港次數的趨勢分析(500km 門檻值).....	2-5
圖 2.4 中度颱風侵襲基隆港次數的趨勢分析(500km 門檻值).....	2-6
圖 2.5 臺北港逐時波浪資料與其趨勢線.....	2-13
圖 2.6 臺北港日平均波浪資料及其趨勢線.....	2-13
圖 2.7 臺北港月平均波浪資料及其趨勢線.....	2-14
圖 2.8 臺北港年平均波浪資料與其趨勢線.....	2-14
圖 2.9 臺北港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-15
圖 2.10 臺北港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-15
圖 2.11 臺北港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-16
圖 2.12 臺北港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-16
圖 2.13 基隆港逐時波浪資料與其趨勢線.....	2-18
圖 2.14 基隆港日平均波浪資料及其趨勢線.....	2-18
圖 2.15 基隆港月平均波浪資料及其趨勢線.....	2-19
圖 2.16 基隆港年平均波浪資料與其趨勢線.....	2-19
圖 2.17 基隆港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-20
圖 2.18 基隆港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-20
圖 2.19 基隆港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-20
圖 2.20 基隆港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線.....	2-21

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 颱風中心位置與臺北港波高資料對應分布圖.....	3-6
圖 3.3 颱風中心位置與基隆港波高資料對應分布圖.....	3-7
圖 3.4 目標點對颱風中心的方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 示意圖	3-12
圖 3.5 氣旋中心附近風速風向分布示意圖.....	3-14
圖 3.6 颱風距離與目標點波高分布.....	3-16
圖 3.7 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(摘自中央氣象局)	3-17
圖 3.8 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數.....	3-19
圖 3.9 層級模組法示意圖(ai 為屬性，Mi 為分群之模組).....	3-24
圖 3.10 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 3.11 臺北港 M5 與類神經模式推算結果較差的颱風波浪時序 圖.....	3-32
圖 3.12 臺北港類神經模式推算結果明顯高估的颱風波浪時序圖 ...	3-33
圖 3.13 臺北港 M5 模式推算結果明顯低估的颱風波浪時序圖.....	3-34
圖 3.14 基隆港 M5 與類神經模式推算結果比較圖.....	3-37
圖 3.15 基隆港 M5 與類神經模式推算 2003 年蘇迪勒颱風結果比 較圖.....	3-37
圖 3.16 基隆港 M5 與類神經模式推算 2004 年康森颱風結果比較 圖.....	3-38
圖 3.17 基隆港 M5 與類神經模式推算 2012 年天秤颱風結果比較 圖.....	3-38

圖 3.18 基隆港 M5 與類神經模式推算 2005 年泰利颱風結果比較 圖	3-39
圖 3.19 基隆港 M5 與類神經模式推算 2007 年柯羅莎颱風結果比 較圖	3-39
圖 3.20 基隆港 M5 與類神經模式推算 2009 年莫拉克颱風結果比 較圖	3-40
圖 3.21 臺北港各波浪推算模式推算波高誤差分析.....	3-42
圖 3.22 臺北港各波浪推算模式峰值時間誤差分析.....	3-42
圖 3.23 基隆港各波浪推算模式推算波高誤差分析.....	3-43
圖 3.24 基隆港各波浪推算模式峰值時間誤差分析.....	3-43
圖 3.25 風浪推算模擬範圍之地形水深.....	3-47
圖 4.1 常數 k 在不同情況下的機率密度表現.....	4-3
圖 4.2 年極值取樣法在臺北港類神經推算結果之機率密度函數 圖	4-9
圖 4.3 年極值取樣法在臺北港實測資料之機率密度函數圖	4-10
圖 4.4 年極值取樣法在臺北港二維數值推算結果之機率密度函 數圖	4-10
圖 4.5 採年極值取樣法在臺北港 M5 模式樹推算結果之機率密度 函數圖	4-11
圖 4.6 超量門檻取樣法在臺北港類神經推算結果之機率密度函 數圖	4-12
圖 4.7 超量門檻取樣法在臺北港實測資料之機率密度函數圖	4-13
圖 4.8 超量門檻取樣法在臺北港二維數值模式推算結果之機率 密度函數圖	4-13

圖 4.9 超量門檻取樣法在臺北港 M5 模式樹推算結果之機率密度 函數圖	4-14
圖 4.10 年極值取樣法在基隆港類神經推算結果之機率密度函數 圖	4-17
圖 4.11 年極值取樣法在基隆港實測資料之機率密度函數圖	4-17
圖 4.12 年極值取樣法在基隆港二維數值模式推算結果之機率密 度函數圖	4-18
圖 4.13 年極值取樣法在基隆港 M5 模式樹推算結果之機率密度 函數圖	4-18
圖 4.14 超量門檻取樣法在基隆港類神經推算結果之機率密度函 數圖	4-20
圖 4.15 超量門檻取樣法在基隆港實測資料之機率密度函數圖	4-21
圖 4.16 超量門檻取樣法在基隆港二維數值推算結果之機率密度 函數圖	4-21
圖 4.17 超量門檻取樣法在基隆港 M5 模式樹推算結果之機率密 度函數圖	4-22
圖 5.1 基隆港區平面示意圖	5-2
圖 5.2 多音束監測作業範圍與船跡圖	5-4
圖 5.3 水下攝影工作情況	5-4
圖 5.4a 東防波堤沉箱#3~#8 間堤址點雲圖	5-8
圖 5.4b 東防波堤沉箱#9~#14 間堤址點雲圖	5-8
圖 5.4c 東防波堤沉箱#13~#20 間堤址點雲圖	5-8
圖 5.4d 東防波堤沉箱#24~#26 間堤址點雲圖	5-9

圖 5.5a 東防波堤沉箱#16~#18 銜接段.....	5-9
圖 5.5b 東防波堤沉箱#18 與沉箱#19 異形銜接段.....	5-10
圖 5.6a 東防波堤沉箱#4~#16 堤面凹槽.....	5-10
圖 5.6b 東防波堤沉箱#13 與#14 接縫情況.....	5-11
圖 5.7 堤面與接縫破損情況.....	5-11
圖 5.8 基隆港東防波堤分段示意圖.....	5-12
圖 5.9 防波堤直立部份波壓分佈圖.....	5-20
圖 5.10a 東防波堤沉箱標準斷面圖(1)	5-24
圖 5.10b 東防波堤沉箱標準斷面圖(2)	5-24
圖 5.10c 東防波堤沉箱標準斷面圖(3)	5-25
圖 5.10d 東防波堤延伸段標準斷面圖(4)	5-25
圖 5.11 護基及堤址拋石之安定係數圖.....	5-29
圖 5.12 堤後有限背填示意圖.....	5-36
圖 5.13 東防波堤 Case1 補強方案示意圖.....	5-36
圖 5.14 東防波堤 Case2 補強方案示意圖.....	5-37
圖 5.15 東防波堤 Case3 補強方案示意圖.....	5-37
圖 6.1 沉箱式防波堤破壞機制示意圖.....	6-2
圖 6.2 防波堤設施構件與劣化類型.....	6-9
圖 6.3 基隆港東防波堤總分圖.....	6-17
圖 6.4 基隆港西防波堤總分圖.....	6-17
圖 6.5 基隆港防波堤維修等級評估.....	6-18
圖 6.6 防波堤維修等級評估.....	6-18

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(103年)應用本所港研中心於臺北港與基隆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，本年度亦辦理基隆港防波堤構造物現場圖像資料調查與堤體安全評估探討，以及建立相關構造物維護管理資料庫。本研究期望結合波浪推算及維護管理評估作業，建置檢測評估表單與維護工法，以格式化及電子資訊化型式提供港務單位一套港灣構造物維護管理資訊系統，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)之第二年工作成果，報告內容主要包括，第二章為探討氣候變遷對臺北港與基隆港兩港域颱風波浪的影響；第三章是建置臺北與基隆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；第五章係針對基隆港外廓防波堤為計畫對象辦理之港灣構造物安全性評估探討，其中包含防波堤圖像調查、堤體安全性評估探討與維護方案研擬等；第六章說明所建構防波堤維護管理資訊系統內容；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臺北港與基隆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

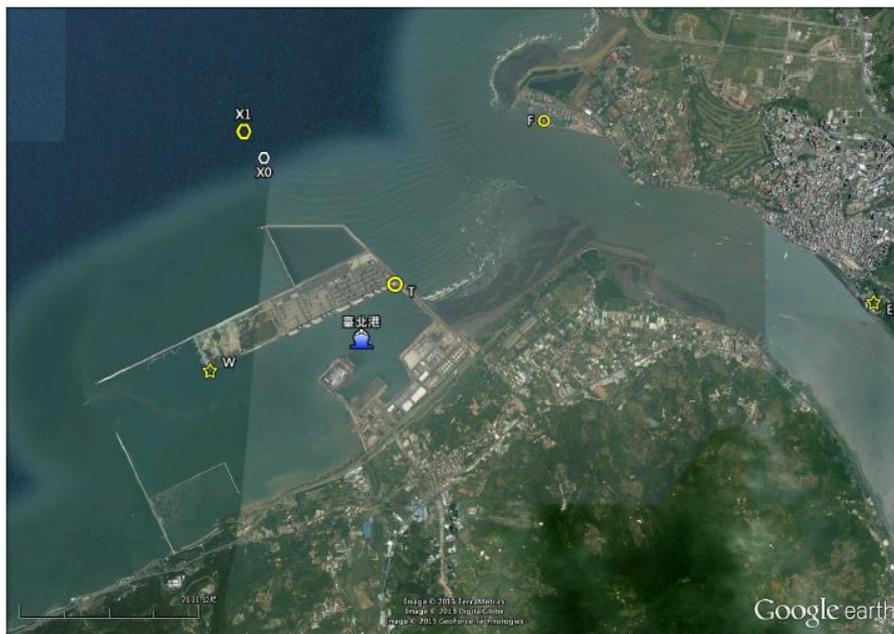
本研究所收集長期的颱風與波浪資料，目前颱風資料來源除中央氣象局所發布的資料外，日本氣象廳 RSMC-Tokyo Center 亦有提供往昔熱帶氣旋中心資訊，另外聯合颱風警報中心(Joint Typhoon Warning Center，簡稱 JTWC)有提供完整西太平洋往昔與預測颱風資訊。

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，本中心於 1996 年受臺灣港務股份有限公司基隆港務分公司(前為交通部基隆港務局)委託辦理「淡水國內商港漂沙調查暨海氣象與海岸地形變遷監測計畫」，於臺北港外海水深 15m 處布置海上觀測樁，測站位置為 $25^{\circ}10'14''$ N, $121^{\circ}22'41''$ E，並於水下深度 5m 及 10m 兩處裝設潮波流儀 Seapac2160 Directional Wave 和 Tide & Current Meter 觀測波浪、潮位與海流，並於 1999 年 7 月購置 S-4 ADW 投入觀測作業取代原 Seapac2160。由於舊觀測樁傾斜嚴重，2004 年 12 月於 $25^{\circ}10'54''$ N, $121^{\circ}22'32''$ E 更換新觀測樁，並於 2008 年增購另一海氣象即時觀測系統挪威 AWAC 方向性潮波流儀，具備可測得逐時波浪、分層流向流速、水位值之功能。其新舊觀測樁位置如圖 2.1 所示。

基隆港域觀測儀器設置方面，本中心於 2001 年 6 月中旬安置挪威 NORTEK 公司之剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(簡稱 AWCP)，安裝在基隆港東防波堤堤頭外水深 44 m 處(測站 X0)，2006 年 8 月因

防波堤延伸工程，移至現址(測站 X1)。AWCP 系統有兩個分離波高量測模式：一個是對平靜波浪時，當資料由傳統式壓力感應器量測時將會因儀器佈放的深度而受很大的影響。此時，表面高度必須用一個聲波式的高度感應器量測波高。波高量測範圍(1)資料量測模式：壓力及沿每一個波束選取一個流速層；(2)量測流層距離：0.5、1.0、2.0 m 可選擇性；(3)最大資料輸出頻率：2Hz(以內含)；(4)儀器內取樣頻率：4~6Hz；(5)取樣期間之取樣數：512、1024 或 2048 次可選擇性；(6)所有資料都儲存於岸上的電腦與主機內。其新舊觀測樁位置如圖 2.2 所示。

AWCP 系統有兩個分離波高量測模式：1.對平靜波浪時，當資料由傳統式壓力感應器量測時將會因儀器佈放的深度而受很大的影響。此時，表面高度必須用一個聲波式的高度感應器量測波高。波高量測範圍：(1)資料量測模式：壓力及沿每一個波束選取一個流速層；(2)量測流層距離：0.5、1.0、2.0m 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。波向量測範圍：波向的量測從海面下 3m 以上的流向資料與波高資料計算轉換而得。2.對攪動的海況時，用於轉換波向的該層深度應該自動被調整為平均水位，也就是 $H_{max}/2$ 。量測的參數為：平均波向及波向分布，波向單位為度。



☆ 風速計 ◎ 潮位計 ◎ 觀測塔

圖 2.1 臺北港海氣象觀測位置圖



☆ 風速儀 ◎ 潮位計 ◎ 波流儀

圖 2.2 基隆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 2013 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，本研究首先以臺北港為目標點，並以不同的距離門檻值篩選颱風，若颱風中心接近臺北港的距離小於門檻值，則將其標記為侵台颱風，並將影響臺北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 ≤ 997 hPa)；3.中度颱風(941 hPa $<$ 中心海面氣壓 ≤ 976 hPa)；4.強烈颱風(941 hPa \geq 中心海面氣壓)。將各場颱風依據距離門檻值與颱風規模進行篩選，可計算出每年侵襲臺北港的颱風次數，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 臺北港 1951 年至 2013 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	0.0169	0.0061	0.0159
強烈颱風	0.0006	-0.0016	-0.0020
輕度颱風	0.0008	-0.0031	-0.0054
中度颱風	0.0155	0.0213	0.0281

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 2013 年歷年侵襲臺北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，中度颱風侵襲臺北港次數有明顯的增加，每年增加率平均約為 0.022 次/年，以現有颱風紀錄而言每 50 年約會增加 1.1 個颱風的侵襲機會，圖 2.3 為中度颱風侵襲臺北港的歷年紀錄與一階線性回歸後的趨勢線，該線斜率為 0.0213(門檻值設為 500km)。

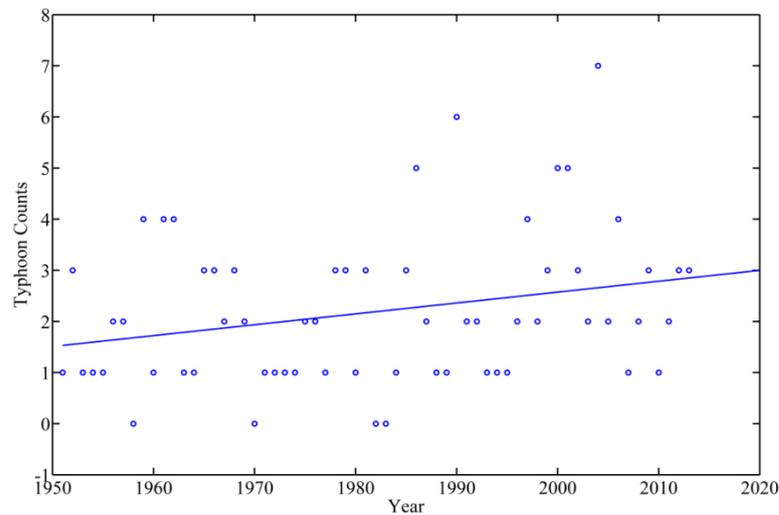


圖 2.3 中度颱風侵襲臺北港次數的趨勢分析(500km 門檻值)

另以基隆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，可計算出每年侵襲基隆港的颱風次數，再依線性回歸找出每年次數的長期趨勢如下表：

表 2.2 基隆港 1951 年至 2013 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	0.0105	0.0006	0.0140
強烈颱風	-0.0016	-0.0018	-0.0027
輕度颱風	0.0014	-0.0004	-0.0030
中度颱風	0.0142	0.0162	0.0232

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基隆港次數的趨勢分析結果，由於基隆港與臺北港的地理位置僅距離 38.4km，故其分析結果與臺北港相近，僅有中度颱風有明顯趨勢變化，基隆港部份的中度颱風侵襲次數年增率平均約為 0.0179 次/年，以現有颱風紀錄而言每 100 年約增加 1.8 個颱風的侵襲機會，圖 2.4 為中度颱風侵襲基隆港的歷年紀錄與線性回歸後的趨勢線，該線斜率為 0.0162。

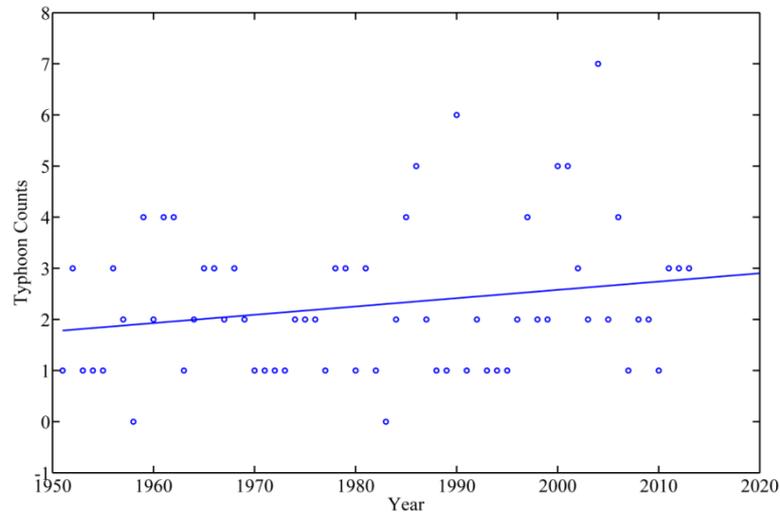


圖 2.4 中度颱風侵襲基隆港次數的趨勢分析(500km 門檻值)

2.3 波浪長期變遷趨勢

2.3.1 資料來源

依據本中心臺北港與基隆港波浪資料，其記錄時間分別為 1996 年至 2013 年及 1999 年至 2012 年，為瞭解波浪資料缺漏的狀況，本研究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 與表 2.4 所示。

表 2.3 臺北港 1996 年至 2013 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 (%)
1996	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.0	0.0	0.0	43.8	51.4	53.1	14.9
1997	14.2	72.6	59.1	69.4	67.7	0.0	58.7	65.5	64.9	76.7	46.7	83.2	56.6
1998	0.0	0.0	12.4	38.1	53.5	8.3	71.9	41.3	92.4	83.9	36.8	0.0	36.5
1999	0.0	69.9	50.5	96.4	65.1	0.0	50.4	67.5	53.5	0.0	35.3	82.4	47.6
2000	91.5	88.2	96.8	94.4	57.5	71.4	0.0	100.0	86.8	0.0	68.8	95.6	70.9
2001	59.9	19.8	71.9	91.9	96.5	96.5	82.1	100.0	96.5	78.6	74.0	100.0	80.7
2002	0.0	0.0	0.0	72.6	42.1	61.8	78.4	71.9	91.7	85.5	92.5	53.2	54.1
2003	99.9	100.0	18.0	99.9	96.6	96.5	86.3	96.5	96.5	91.9	18.2	80.4	81.7
2004	100.0	96.3	96.6	96.8	96.8	81.7	96.8	98.1	56.9	0.0	0.0	94.9	76.2
2005	69.0	37.8	72.8	80.3	90.2	58.6	96.6	100.0	99.6	94.2	68.3	51.2	76.6
2006	94.0	93.8	94.4	37.6	0.0	31.8	100.0	96.4	96.1	96.5	99.7	54.8	74.6
2007	100.0	80.4	99.5	99.6	99.1	98.8	84.0	77.4	88.8	0.0	0.0	64.5	74.3
2008	99.7	87.4	0.0	75.7	96.6	65.7	96.9	67.7	78.1	95.4	67.9	90.2	76.8
2009	91.9	96.0	99.6	55.1	79.3	97.1	99.6	56.6	66.3	85.2	97.2	100.0	85.3
2010	94.0	98.4	98.4	97.4	97.2	98.5	98.3	94.6	92.1	96.0	83.1	96.9	95.4
2011	44.6	19.2	97.4	98.2	91.9	99.2	88.0	97.0	99.2	7.7	81.3	95.0	76.6
2012	84.0	99.9	96.0	99.6	96.2	92.4	89.9	89.9	99.7	98.8	99.7	92.3	94.9
2013	0.0	0.0	99.6	97.5	99.5	99.9	99.3	85.3	80.1	97.4	70.4	0.0	69.1

由本中心臺北港波浪資料，紀錄時間為 1996 年 7 月至 2013 年 11 月。但其中 2000 年以前的資料完整性較低，全年平均資料完整性都在 60% 以下。其他如 2000 年的七月與十月、2002 年的一月至三月、2004 年的九月至十一月、2007 年的九月至十一月及 2011 與 2013 年的一月與二月有較長期的資料缺漏，其餘波浪資料大致上完整。

表 2.4 基隆港 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 (%)
1999	91.8	97.8	100.1	98.9	100.0	98.6	100.0	98.9	75.8	19.8	0.0	0.0	73.5
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.2	90.2	96.2	82.5	73.8	98.5	90.6	46.7
2002	95.0	98.1	98.7	97.2	97.7	83.1	81.7	94.5	95.7	97.6	100.0	46.0	90.4
2003	0.0	0.0	0.0	63.6	98.8	94.6	98.3	100.0	97.2	98.8	97.5	94.9	70.3
2004	97.7	98.6	99.3	97.5	98.7	99.6	96.5	97.4	19.6	78.6	99.3	99.6	90.2
2005	99.2	99.9	99.6	99.9	99.7	99.4	99.6	99.2	99.9	99.1	99.9	94.2	99.1
2006	99.5	98.2	88.3	99.7	10.9	0.0	0.0	48.5	98.3	99.9	93.3	92.3	69.1
2007	92.7	12.8	7.3	71.3	76.1	73.3	91.1	81.5	99.9	87.9	99.7	99.7	74.4
2008	99.9	99.7	99.9	99.6	89.8	82.1	93.1	99.7	99.7	99.7	99.6	99.9	96.9
2009	99.7	99.9	99.7	99.7	99.9	99.7	99.9	95.8	99.2	99.2	99.6	99.2	99.3
2010	100.0	98.4	100.0	100.0	100.0	98.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	79.0	98.0
2011	0.0	40.0	99.9	99.7	99.6	99.9	99.9	99.1	94.4	93.1	96.5	100.0	85.2
2012	100.0	100.0	100.0	100.0	81.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	90.1

基隆港的波浪記錄時間為 1999 年一月至 2012 年十二月，其中 1999 年十月至 2001 年六月、2003 年一月至四月、2006 年五月至七月、2007 年二月與三月及 2011 年一月有較長期的資料缺漏。

2.3.2 分析方法

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，並以下式計算全部統計量 S'

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

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

$$V_{S'}^2 = \sum_{i=1}^m V_{S_i}^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=i+1}^m \text{cov}(S_i, S_k) \quad (2.8)$$

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

$$V_{S'}^2 = \sum_{i=1}^m V_{S_i}^2 \quad (2.9)$$

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

$$Z = \begin{cases} \frac{S'-1}{V_{S'}^2} & \text{if } S' > 0 \\ 0 & \text{if } S' = 0 \\ \frac{S'+1}{V_{S'}^2} & \text{if } S' < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

其中 S' 為正值表示為遞增趨勢，負值為遞減趨勢。

除了上述線性回歸與無母數分析外，本研究以我國黃鶚院士所提出之經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition method, EMD) 作為長期波高資料之分析方法。

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，其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 $c_i(t)$ ， $i=1 \dots n$ 與一趨勢分量為 $r_n(t)$ ，即可表示為：

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2.14)$$

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

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

$$a(t) = (e_{\max}(t) - e_{\min}(t)) / 2 \quad (2.15)$$

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t)) / 2 \quad (2.16)$$

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

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

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

藉由上述兩個閾值 θ_1 、 θ_2 及參數評估函數 $\sigma(t)$ ，使篩選程序停止篩選。其準則為在 $(1-\alpha)$ 倍的時間序列的總延時下 $\sigma(t) < \theta_1$ ，並且剩餘部分為 $\sigma(t) < \theta_2$ ；且上述參數一般預設為 $\alpha \approx 0.05$ ， $\theta_1 \approx 0.05$ 和 $\theta_1 \approx 10\theta_2$ 。波高資料為時間的函數，可利用上述之經驗模態分解法或改良其停止準則的經驗模態分解法已獲得趨勢分量為 $r_n(t)$ 再利用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

本研究所蒐集臺北港波浪資料自 1996 年至 2013 年共 18 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 0.000063，換算為年增率則為 0.0230m/year，顯示臺北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 0.0248m/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 0.0240m/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 0.0166m/year。

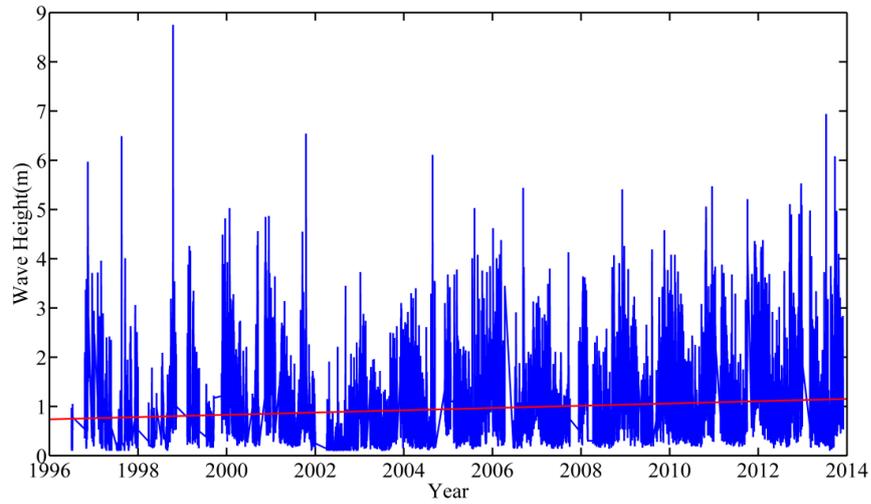


圖 2.5 臺北港逐時波浪資料與其趨勢線

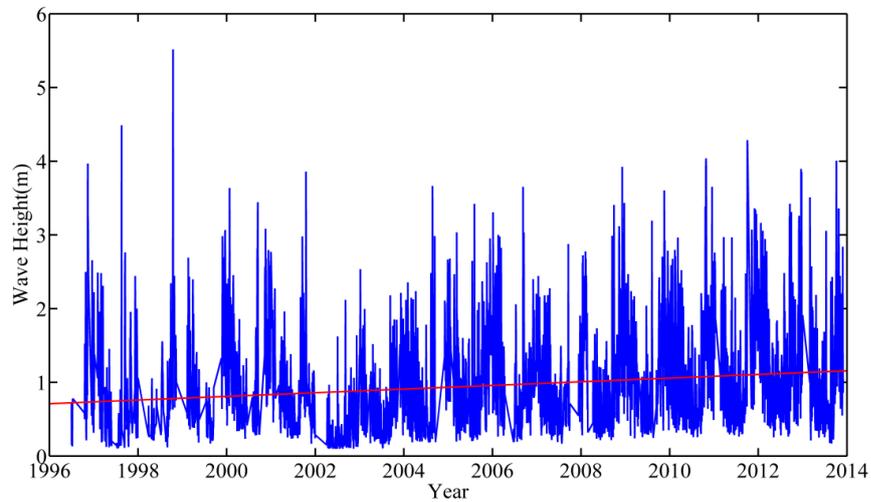


圖 2.6 臺北港日平均波浪資料及其趨勢線

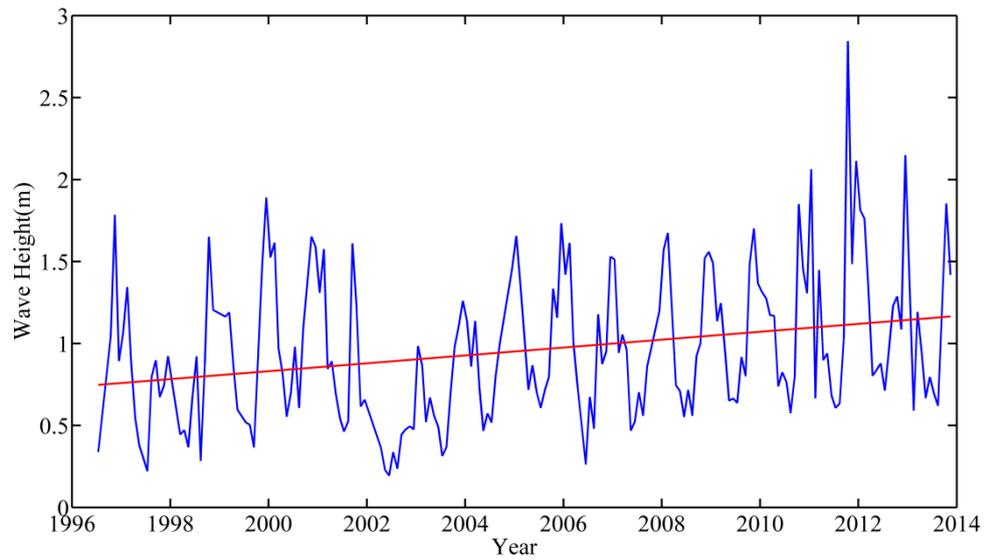


圖 2.7 臺北港月平均波浪資料及其趨勢線

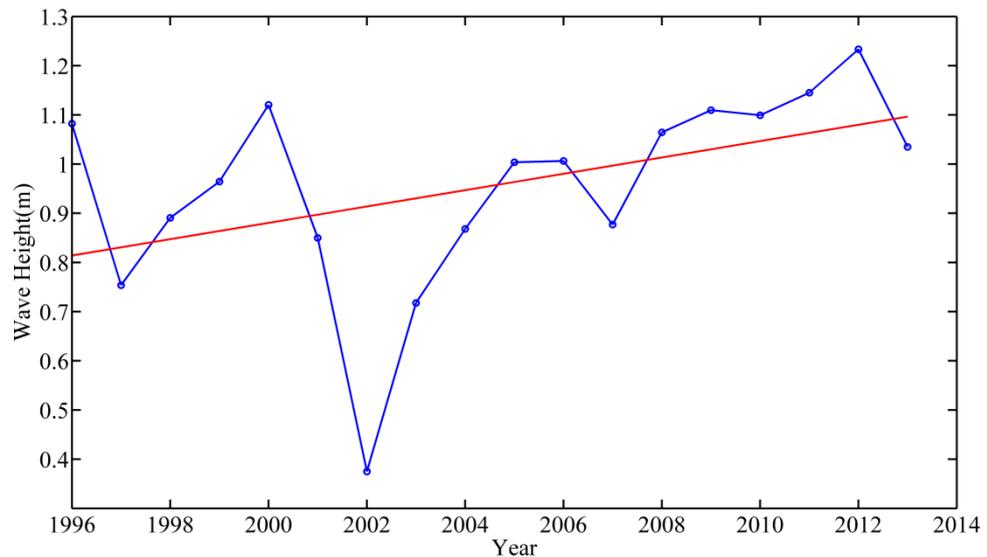


圖 2.8 臺北港年平均波浪資料與其趨勢線

經由 EMD 分解後可獲得到長期波浪趨勢分量，臺北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 與圖 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 0.0262m/year ，日平均資料為 0.0132m/year ，月平均資料的年增率為 0.0286m/year ，年平均資料的年增率為 0.0043m/year 。其中可發現月平均波浪資料的趨勢分量有明顯分為兩段不同特性，若以 2005 年為界可發現 1996 至 2005 年的趨勢略為遞減，其年增率為 -0.011m/year 。而 2005 年至 2013 年的趨勢則為遞增，其年增率為 0.0586m/year 。

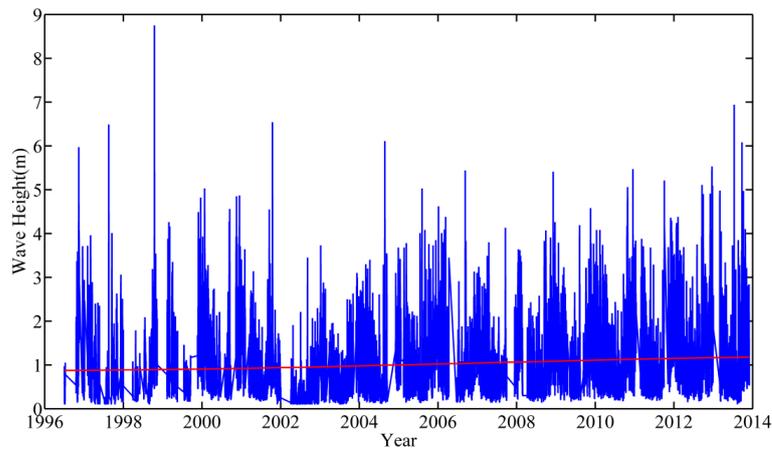


圖 2.9 臺北港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

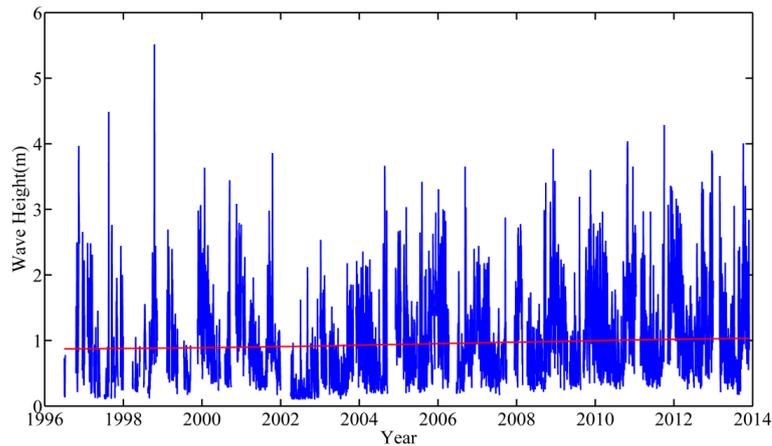


圖 2.10 臺北港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

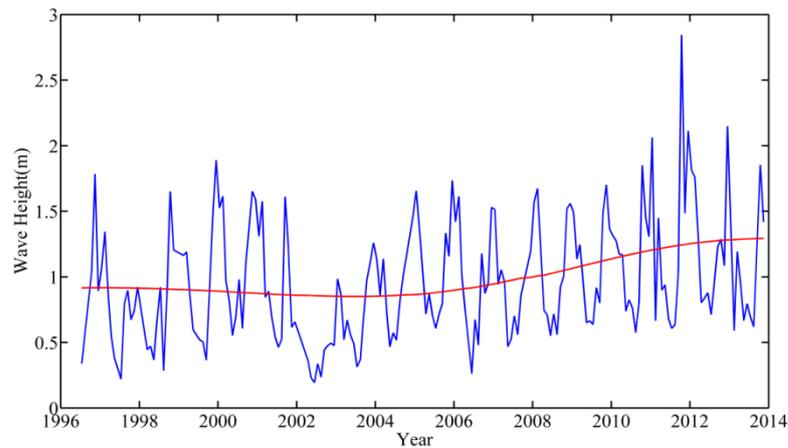


圖 2.11 臺北港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

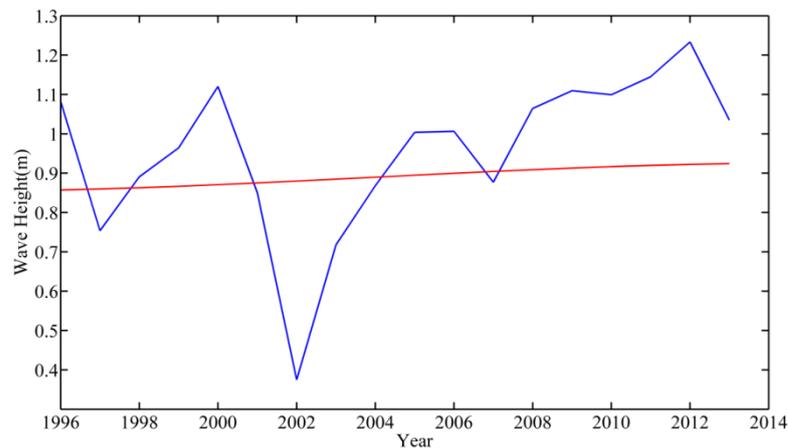


圖 2.12 臺北港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

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，臺北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，臺北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 0.0236m/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，但整體而言臺北港自 1996 年至 2013 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臺北港波高年增率為 0.0116 至 0.0286 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，其分析結果臺北港波高年增率為 0.0236m/year 應較具代表性。

表 2.5 臺北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	0.0230
日平均線性趨勢	0.0248
月平均線性趨勢	0.0240
年平均線性趨勢	0.0116
Seasonal Kendall 月平均趨勢檢定	0.0236
EMD 趨勢分析 (逐時)	0.0262
EMD 趨勢分析(日平均)	0.0132
EMD 趨勢分析(月平均)	0.0286
EMD 趨勢分析(年平均)	0.0043

本研究所蒐集基隆港波浪資料自 1999 年至 2012 年共 14 年，缺漏的資料並將其餘資料接起來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-0.000015，換算為年增率則為-0.0055m/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-0.0067m/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 -0.0093m/year ，然而在圖 2.15 中可發現在 2004 年九月由於記錄資料有大量遺失，使得該月平均值明顯大於其他月份，若對此筆資料進行剔除，其年增率為 -0.0059 。此外以年平均波高來進行長期趨勢分析則可繪製如圖 2.16，圖 2.16 中趨勢線年增率為 -0.0063m/year 。

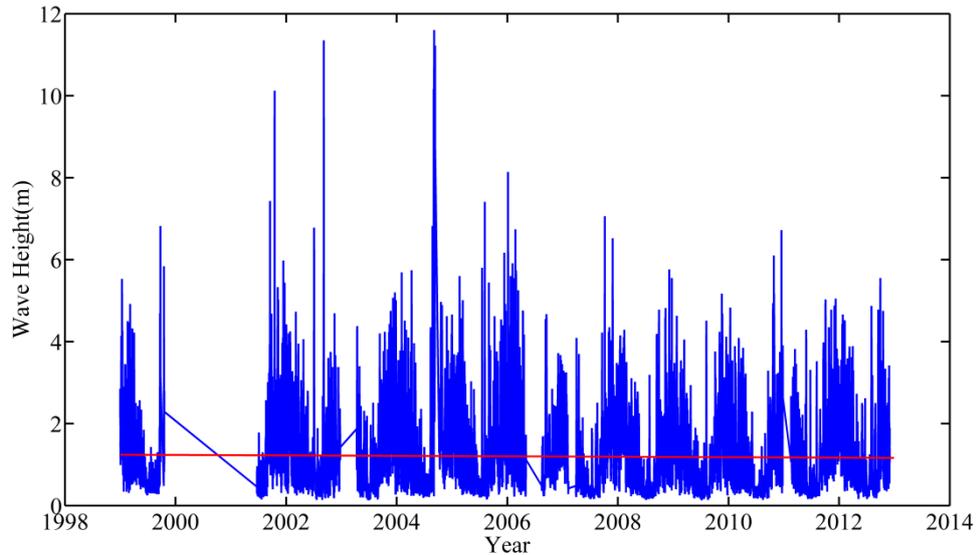


圖 2.13 基隆港逐時波浪資料與其趨勢線

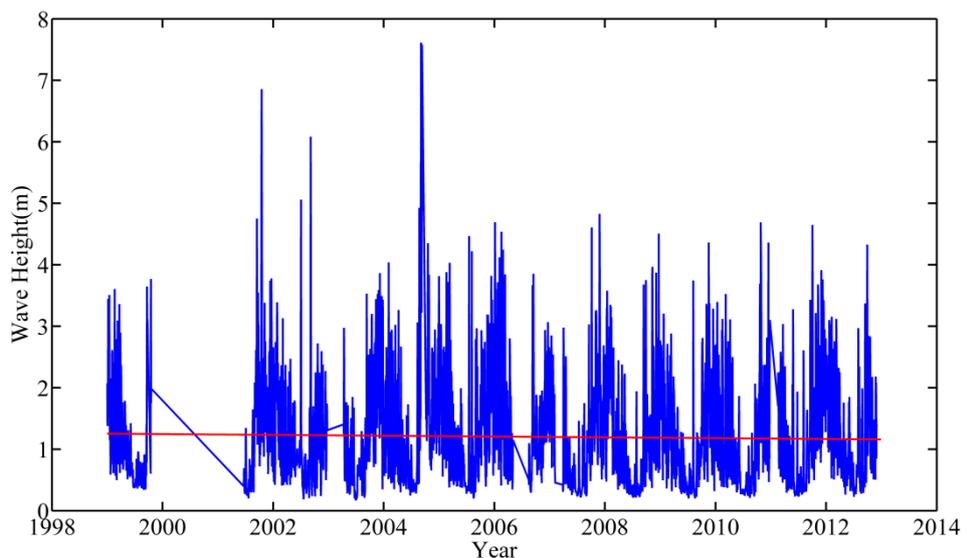


圖 2.14 基隆港日平均波浪資料及其趨勢線

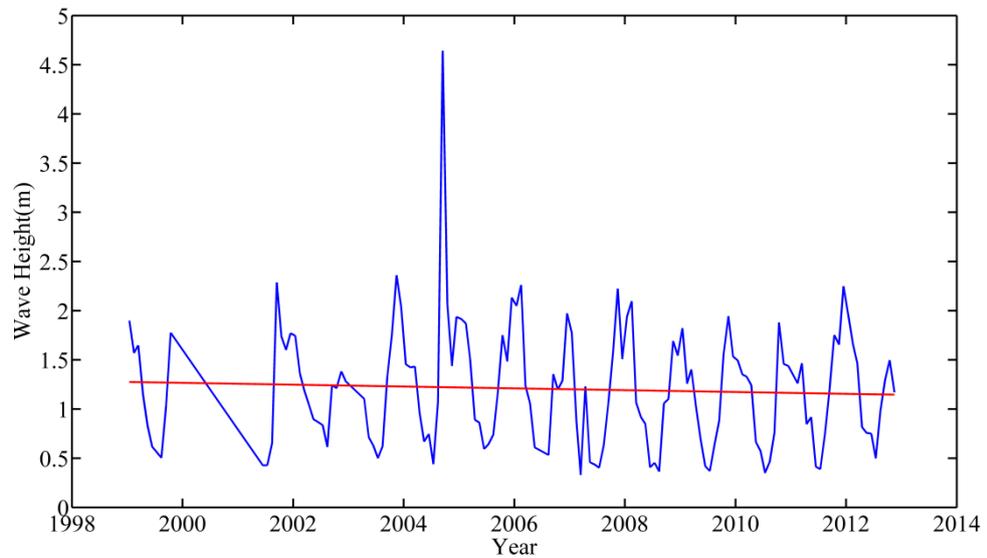


圖 2.15 基隆港月平均波浪資料及其趨勢線

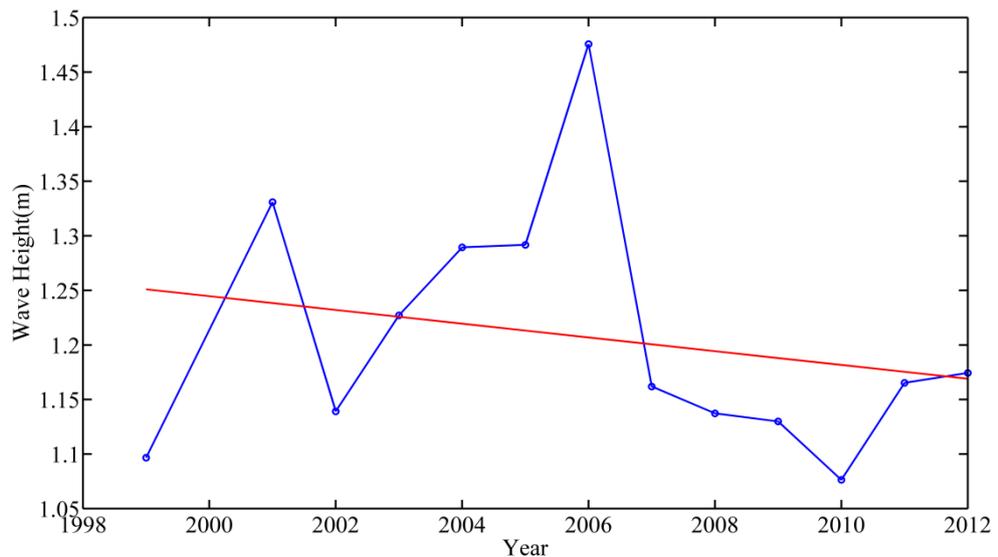


圖 2.16 基隆港年平均波浪資料與其趨勢線

將基隆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 -0.0158m/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 與圖 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 -0.0077m/year 、 -0.0172m/year 及 -0.0058m/year 。

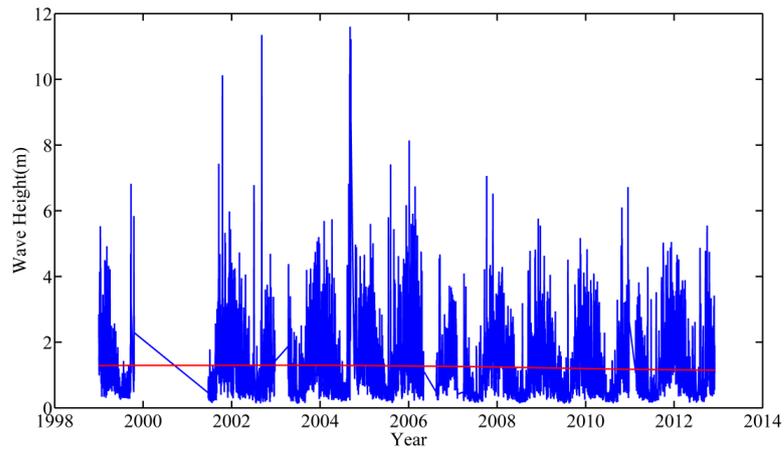


圖 2.17 基隆港逐時波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

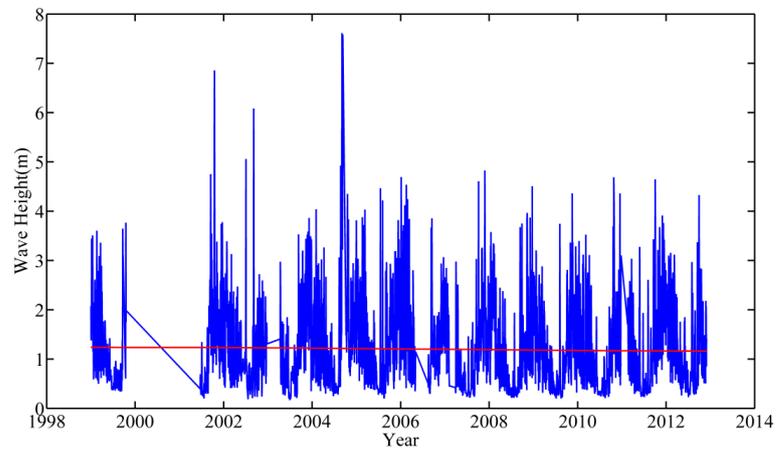


圖 2.18 基隆港日平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

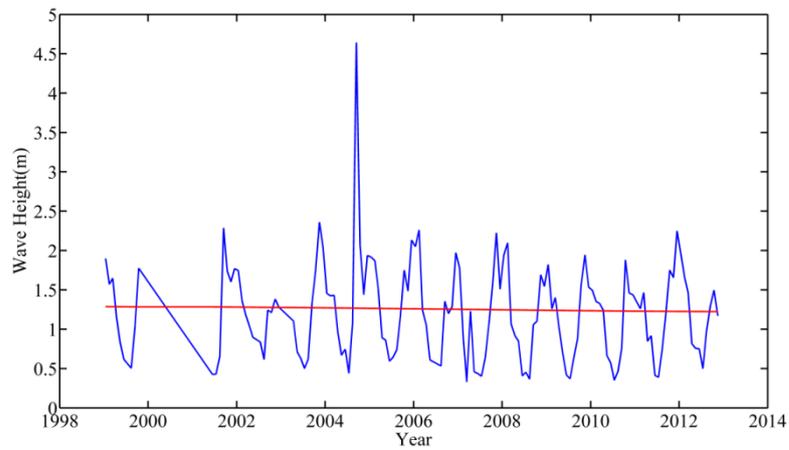


圖 2.19 基隆港月平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

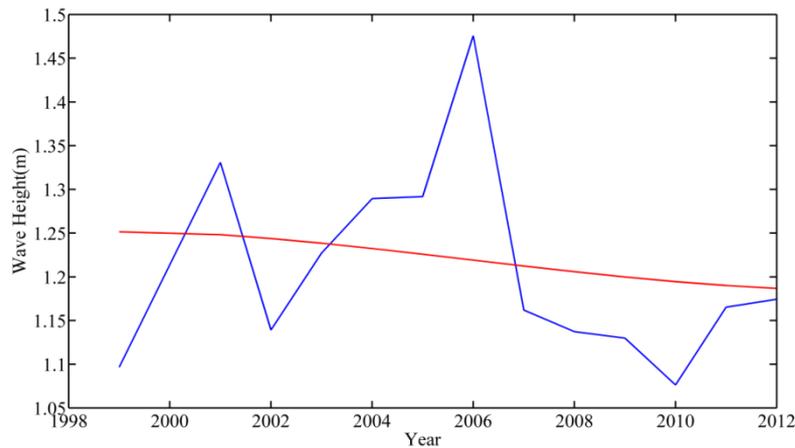


圖 2.20 基隆港年平均波浪資料與 EMD 分析後的趨勢線

如同臺北港分析方法，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，基隆港的波浪資料在逐時與日平均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，而月平均與年平均兩種取樣方式下，Mann-Kendall 檢測的結果符合原假設狀況，顯示資料為無趨勢。為進一步考量季節性變化影響下的波浪長期變化趨勢，本研究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，基隆港月平均波浪資料符合原假設，判定是為無趨勢的資料集。

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基隆港波浪年增率為 -0.0055 至 -0.0067m/year 之間，顯示基隆港波高長期變遷趨勢為些微遞減。而在 EMD 法趨勢分析中則有較大的差異，在日平均與年平均取樣方式下的趨勢分析結果與線性回歸分析的結果相近，年增率為 -0.0058 至 -0.0077m/year。但逐時資料與月平均取樣方式的結果則為 -0.0158 至 -0.0168m/year 間。另外採用 Mann-Kendall 趨勢檢測法的結果顯示月平均與年平均取樣方式下的資料是被判定為不具趨勢性。考慮季節性變化的 Seasonal Kendall 趨勢檢定法也判定基隆港的波浪長期來看不具趨勢性的變化，整體就各種評估的方式而論，基隆港波高長期變化趨勢極小可視為無明顯趨勢變化。

表 2.6 基隆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	-0.0055
日平均線性趨勢	-0.0067
月平均線性趨勢	-0.0059
年平均線性趨勢	-0.0063
Seasonal Kendall 月平均趨勢檢定	無趨勢
EMD 趨勢分析 (逐時)	-0.0158
EMD 趨勢分析(日平均)	-0.0077
EMD 趨勢分析(月平均)	-0.0168
EMD 趨勢分析(年平均)	-0.0058

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护措施參考，是為重要課題。

本研究應用本所港研中心於臺北港與基隆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，本研究選擇對應臺北港實測波浪資料完整之颱風共 31 場，如表 3.1 所示；基隆港則選擇 33 場，如表 3.2。

表 3.1 選取用來建立臺北港模式的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)
1997	溫妮	WINNIE	1997/8/9	1997/8/20	100	6.49
1998	瑞伯	ZEB	1998/10/15	1998/10/18	90	8.75
2000	巴比倫	PRAPIROON	2000/8/27	2000/9/1	70	2.67
2000	桑美	SAOMAI	2000/9/11	2000/9/16	95	4.56
2000	寶發	BOPHA	2000/9/7	2000/9/11	45	4.27
2001	納莉	NARI	2001/9/6	2001/9/20	75	4.55
2001	海燕	HAIYAN	2001/10/12	2001/10/18	70	6.54
2002	雷馬遜	RAMMASUN	2002/6/29	2002/7/6	85	2.21
2002	辛樂克	SINLAKU	2002/8/29	2002/9/8	80	3.45
2003	梅米	MAEMI	2003/9/10	2003/9/14	105	2.5
2003	米勒	MELOR	2003/10/30	2003/11/3	50	2.63
2004	蘭寧	RANANIM	2004/8/8	2004/8/13	80	3.29
2004	艾利	AERE	2004/8/20	2004/8/26	80	6.11
2005	海棠	HAITANG	2005/7/13	2005/7/20	105	4.01
2005	馬莎	MATSA	2005/7/31	2005/8/7	80	5.03
2005	泰利	TALIM	2005/8/27	2005/9/2	95	4.08
2005	卡努	KHANUN	2005/9/7	2005/9/13	85	3.19
2005	龍王	LONGWANG	2005/9/26	2005/10/3	95	2.95
2006	碧利斯	BILIS	2006/7/9	2006/7/15	60	2.91
2006	珊珊	SHANSHAN	2006/9/10	2006/9/18	110	3.83
2007	韋帕	WIPHA	2007/9/16	2007/9/19	100	4.13
2008	鳳凰	FUNG_WONG	2008/7/25	2008/7/29	75	2.58
2008	辛樂克	SINLAKU	2008/9/9	2008/9/21	100	3.83
2009	莫拉克	MORAKOT	2009/8/3	2009/8/10	75	4.19
2011	桑達	SONGDA	2011/5/21	2011/5/29	105	3.68
2011	米雷	MEARI	2011/6/22	2011/6/27	60	3.29
2012	蘇拉	SAOLA	2012/7/28	2012/8/3	70	3.75
2012	杰拉華	JELAWAT	2012/9/21	2012/10/1	110	4.9
2013	蘇力	SOULIK	2013/7/8	2013/7/14	100	6.94
2013	潭美	TRAMI	2013/8/18	2013/8/22	60	3.46
2013	菲特	FITOW	2013/10/1	2013/10/7	75	4.97

表 3.2 選取用來建立基隆港模式的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	納莉	NARI	2001/9/14	2001/9/20	75	7.43
2002	雷馬遜	RAMMASUN	2002/6/29	2002/7/6	85	6.78
2002	辛樂克	SINLAKU	2002/8/29	2002/9/8	80	11.35
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	2003/6/13	2003/6/19	80	2.19
2003	杜鵑	DUJUAN	2003/8/30	2003/9/3	80	2.5
2003	梅米	MAEMI	2003/9/6	2003/9/14	105	4.2
2003	米勒	MELOR	2003/10/30	2003/11/3	50	3.81
2004	康森	CONSON	2004/6/7	2004/6/11	80	2.36
2004	蘭寧	RANANIM	2004/8/8	2004/8/13	80	4.35
2004	艾利	AERE	2004/8/20	2004/8/26	80	6.82
2004	納坦	NOCK_TEN	2004/10/22	2004/10/26	85	4.31
2005	海棠	HAITANG	2005/7/13	2005/7/20	105	5.8
2005	馬莎	MATSA	2005/7/31	2005/8/7	80	7.41
2005	泰利	TALIM	2005/8/27	2005/9/2	95	5.44
2005	卡努	KHANUN	2005/9/7	2005/9/13	85	3.79
2005	龍王	LONGWANG	2005/9/26	2005/10/3	95	3.05
2006	珊珊	SHANSHAN	2006/9/10	2006/9/18	110	4.67
2007	聖帕	SEPAT	2007/8/13	2007/8/19	110	2.51
2007	韋帕	WIPHA	2007/9/16	2007/9/19	100	4.22
2007	柯羅莎	KROSA	2007/10/2	2007/10/8	105	7.06
2008	鳳凰	FUNG_WONG	2008/7/25	2008/7/29	75	3.19
2008	辛樂克	SINLAKU	2008/9/9	2008/9/21	100	4.19
2008	薔蜜	JANGMI	2008/9/24	2008/10/1	115	4.78
2009	莫拉克	MORAKOT	2009/8/3	2009/8/10	75	4.51
2009	盧碧	LUPIT	2009/10/15	2009/10/27	95	2.76
2010	凡那比	FANAPI	2010/9/15	2010/9/20	95	3.29
2011	桑達	SONGDA	2011/5/21	2011/5/29	105	4.29
2011	米雷	MEARI	2011/6/22	2011/6/27	60	3.31
2011	梅花	MUIFA	2011/7/28	2011/8/9	95	3.52
2011	南瑪都	NANMADOL	2011/8/23	2011/8/31	100	2.36
2012	蘇拉	SAOLA	2012/7/28	2012/8/3	70	4.87
2012	天秤	TEMBIN	2012/8/19	2012/8/30	80	2.5
2012	杰拉華	JELAWAT	2012/9/21	2012/10/1	110	5.55

由表 3.1 得知，在 1996 至 2013 年中有 31 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 7 場，這七場颱風雖然對波浪造成的影響不大，甚至其影響量可能小於季節風所造成的季節風浪。但為能讓模式能有效地應用在各種規模的侵台颱風推算本計畫仍考慮選取對研究目標臺北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 5 場，7m 以上僅有 1 場。表 3.2 中顯示在 1999 至 2012 年中有 33 場颱風在基隆港擁有相對應完整的波浪資料，其中對應波高小於 3m 的有 7 場，這七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基隆港影響較小的颱風進行模式建立。波高在 3m 至 5m 間的有 17 場占最多數，5m 至 7m 有 5 場，7m 至 9m 間有 3 場，9m 以上的僅有一場。

由於臺北港與基隆港兩港區位置分別位於臺灣西北端與東北端的海岸，在每年 9 月開始受到冬季季風作用波高逐漸增加至 12 月或隔年 1 月，波高又逐漸遞減至 3 月，而其他季節若發生較大波浪一般都是颱風所造成。但九月至十月也是颱風容易侵襲台灣的季節，由表 3.2 可發現九月以後侵襲臺北港與基隆港的颱風分別為 14 場與 17 場，約為總颱風場數的一半，顯示臺北港與基隆港有半數以上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。

依據臺北港與基隆港兩港區位置來說，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，較可能對臺北港與基隆造成直接影響的路徑為第一路徑、第六路徑、第七路徑及特殊路徑等。其餘路徑皆會受到地形以及高山的屏障影響。因此本研究針對臺北港與基隆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。

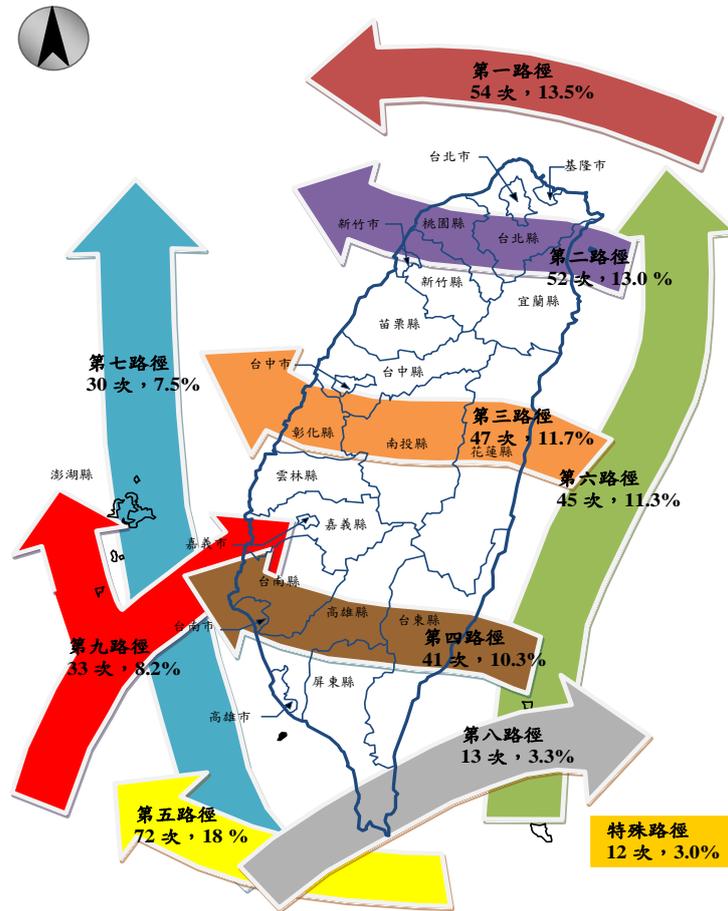


圖 3.1 臺灣地區颱風路徑分類圖(1897-2010 年)(引自中央氣象局)

由圖 3.2 顯示，對臺北港波浪造成最大影響的颱風中心位置是在宜蘭外海處，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)則分布於臺灣東北方與正北方處，綠色資料點(3m 至 5m)主要分布宜蘭、花蓮外海及臺灣東北方海面，黃色資料點(對應波高 1m 至 3m)則分布於除了臺灣西南側以外的臺灣周邊海域。為能標出各資料點與臺北港的相對距離，故以臺北港為中心繪製半徑 500km 與半徑 1000km 的同心圓分界線，圖 3.2 中可發現紅色、藍色資料點皆發生於

半徑 500km 的距離內，顯示以臺北港而言，颱風只有在中心距離靠近臺北港 500km 以內才有機會造成 5m 以上的示性波高。綠色資料點大部分亦包覆在 500km 的範圍內，僅少部分出現在日本沖繩群島區域。較值得注意的是雖然臺北港位於臺灣西北端且港口方向為西北方，但綠色、藍色及紅色資料點(即波高大於 3m)的位置幾乎都在 500km 同心圓內的右半圓，即所有造成 3m 以上波浪的颱風都不是以直撲臺北港的方式造成影響。

在所選用的 31 場颱風中，其中所造成最大示性波高大於 7m 對於臺北港有較大影響僅瑞伯(ZEB, 1998)，其路徑為第六路徑。5m 至 7m 波高的颱風包括溫妮(WINNIE, 1997)、海燕(HAIYAN, 2001)、艾莉(AERE, 2004)、馬莎(MATSA, 2005)及蘇力(SOULIK, 2013)等，其中除了蘇力為穿越臺灣北部的第二路徑外，其餘皆屬無直接登陸臺灣本島的第一路徑(向西)與第六路徑(向北)。這些對臺北港影響較大的颱風也就是圖 3.2 中紅色及藍色資料點(波高 5m 以上)。

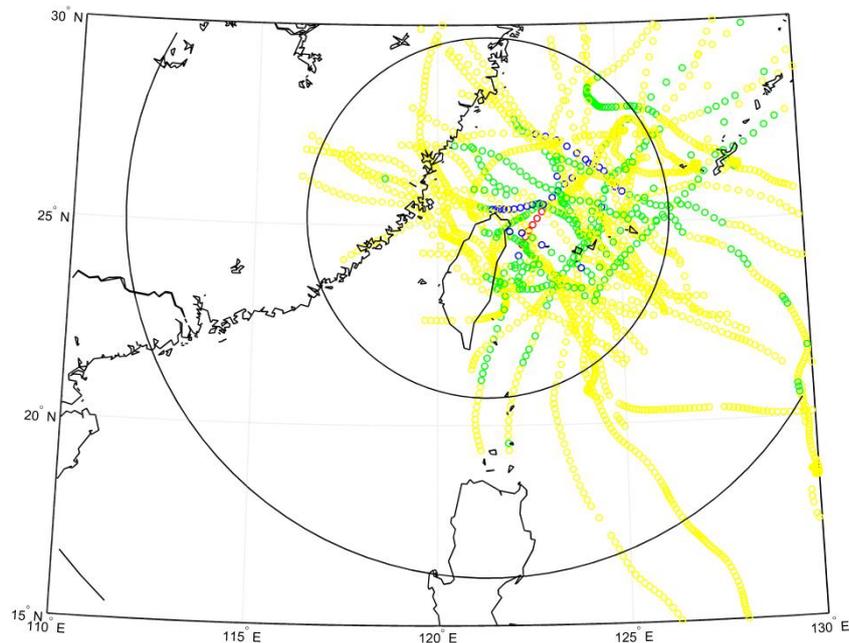


圖 3.2 颱風中心位置與臺北港波高資料對應分布圖

由圖 3.3 得知，對基隆港波浪造成最大影響的颱風中心位置是在台灣東北角與東北方外海，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)則分布於花蓮與其外海部份及臺灣東北方處，綠色資料點(3m 至 5m)主要分布宜蘭、花蓮外海及臺灣東北方海面，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基隆港的相對距離，故以基隆港為中心繪製半徑 500km 與半徑 1000km 的同心圓分界線，圖 3.3 中可發現紅色、藍色資料點皆發生於半徑 500km 的距離內，顯示以基隆港而言，颱風只有在中心距離靠近臺北港 500km 以內才有機會造成 5m 以上的示性波高。綠色資料點大部分亦包圍在 500km 的範圍內。綠色、藍色及紅色資料點(即波高大於 3m)的位置幾乎都在 500km 同心圓內的右半圓，與臺北港特性較不同的地方在於臺灣正北端沒有發生較大波浪的資料點。

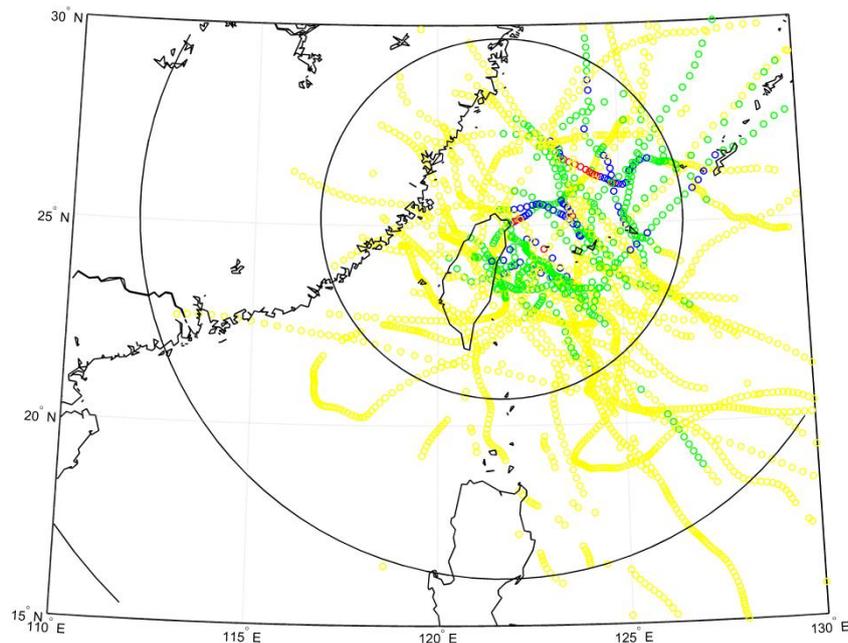


圖 3.3 颱風中心位置與基隆港波高資料對應分布圖

在所選用的 33 場颱風中，其中所造成最大示性波高大於 7m 對於基隆港有較大影響有納莉(NARI, 2001)、辛樂克(SINLAKU, 2002)、馬莎(MATSA, 2005)及柯羅莎(KROSA, 2007)等四場，其中除納莉屬於特

殊路徑外，其路徑為東向西行的第一路徑與第二路徑。5m 至 7m 波高的颱風包括雷馬遜(RAMMASUN, 2002)、艾莉(AERE, 2004)、海棠(HAITAN, 2005)、泰利(TALIM, 2005)及杰拉華(JELAWAT, 2012)等，其中艾莉為行經臺灣北方無登陸的第一路徑，雷馬遜與杰拉華則屬於由臺灣西側向北無登陸的第六路徑，海棠與泰利則屬於自花蓮登陸臺灣往西前進的第三路徑，上述為對基隆港影響較大的颱風(波高 5m 以上)，如圖 3.3 中紅色及藍色點所示。

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； θ_i 為人工神經元模型的閾值。

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

值相同；另一種為回想過程，網路依照設定的回想法則，以輸入資料來決定網路的輸出值。

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

1. 計算隱藏層輸出量 Z 與網路輸出量 Y

$$net_1 = \sum_i W_{1i} X_i - \theta_1 \quad (3.2)$$

$$Z = f(net_1) = \frac{e^{net_1} - e^{-net_1}}{e^{net_1} + e^{-net_1}} \quad (3.3)$$

$$net_2 = \sum_j W_{2j} X_j - \theta_2 \quad (3.4)$$

$$Y = f(net_2) = \frac{e^{net_2} - e^{-net_2}}{e^{net_2} + e^{-net_2}} \quad (3.5)$$

2. 計算隱藏層差距量 δ_1 與輸出層差距量 δ_2

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

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

3. 計算加權值矩陣的修正量 ΔW

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

$$E = \frac{1}{2} \sum_j (T_j - Y_j)^2 \quad (3.8)$$

此時加權值的修正量可表示為：

$$\Delta W = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = -\delta_j^n A_i^{n-1} \quad (3.10)$$

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

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

$$W_1 = W_1 + \Delta W_1 \quad (3.11)$$

$$\theta_1 = \theta_1 + \Delta \theta_1 \quad (3.12)$$

$$W_2 = W_2 + \Delta W_2 \quad (3.13)$$

$$\theta_2 = \theta_2 + \Delta \theta_2 \quad (3.14)$$

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

類神經網路模式採用倒傳遞類神經網路架構(Backpropagation Neural Network, BPNN)，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。

本研究本年度針對各颱風風速及路徑變化採用群集分析法(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。

3.2.2 模式輸入之轉換函數

RSMC-Tokyo Center 的颱風氣象資料包括颱風經緯度、中心最大風速及中心氣壓，為了使類神經模式輸入的資訊更為精細與明確，本研究利用這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(θ_1)；(3) 颱風侵襲角(θ_3)；(4) 目標點海面 10m 風速(V)；(5) 目標點上空風向(V_{deg})。由經緯度資料可計算：颱風與目標點距離(D)、颱風中心對目標點的方位角(θ_1)、颱風移動方位角(θ_2)；距離與方位角只需透過颱風中心座標與目標點座標即可計算。 θ_1 與 θ_2 如圖 3.4 示。

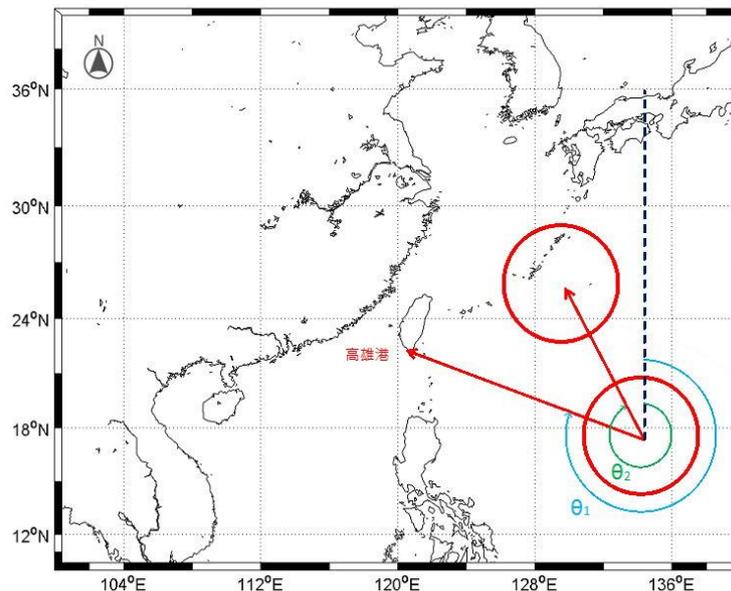


圖 3.4 目標點對颱風中心的方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 示意圖

因北半球的颱風為逆時鐘旋轉，以颱風前進方向為中心來看，其右半圓較左半圓的風力大，故目標點所面臨的是颱風的左半圓或右半圓對於模式推算來說是一個需要考量的因素。本研究透過颱風移動方位角減去颱風中心對目標點方位角($\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$)來定義目標點所面臨的颱風結構(左右半圓)， θ_3 定義為颱風侵襲角。以圖 3.4 狀況為例，颱風中心是由圖中右下往左上方移動，目標點安平港目前所面臨的是颱風的左半圓。由以上關係可知，若 θ_3 在 0° 至 180° 則目標推算點所面臨的是颱風的左半圓，反之，若 θ_3 在 0° 至 -180° 則目標推算點所面臨的是颱風的右半圓。圖 2.6 θ_1 小於 θ_2 ，故 θ_3 為正值，顯示目標點安平港面臨的是颱風的左半圓。

由經緯度資料再搭配中心最大風速與中心氣壓資料經由 RVM 模型颱風模式 (Rankin-Vortex Model) 可計算：目標點海面 10m 風速(V)、目標點上空風向(Vdeg)。RVM 係模擬颱風風場架構，在資料齊全條件下，風場可由氣壓分佈推算而得。但在絕大多數情形下，氣壓分佈資料取得不易，由氣壓分佈資料去產生風場較為困難。一般而言，當颱風成形後，因其內部氣壓低導致環繞周圍的空氣由外邊高壓處向低壓的氣旋中心流動，因海面上颱風中心附近之氣壓分佈具有對稱性，故熱帶氣旋所造成之風場可利用風場模式推算之，其理論公式如下：

$$V_r = \begin{cases} V_{\max} (R/R_m)^7 \exp(7(1-R/R_m)) & \text{for } R < R_m \\ V_{\max} \exp((0.0025R_m + 0.05)(1-R/R_m)) & \text{for } R \geq R_m \end{cases} \quad (3.17)$$

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，係採 Graham 和 Nunn (1959) 之公式：

$$R_m = 28.52 \tanh(0.0873(\phi - 28)) + 12.22 / \exp((P_\infty - P_c) / 33.86) + 0.2V_f + 37.22 \quad (3.18)$$

其中， ϕ 為緯度， P_c 為中心氣壓，而 P_∞ 為距颱風中心無限遠處之氣壓，可設定為 1 大氣壓(1013.3mb)。旋轉風速係指純粹由氣壓差所產

生之風速，當颱風中心靜止不動時，旋轉風速即為颱風中心附近之風速，當颱風在移動時，則應加上修正風速

$$V_t = 0.5 V_f \cos \varphi \quad (3.19)$$

其中， V_f 為颱風中心前進速度，而 φ 為至颱風中心連線與最大風速連線兩條線之間的夾角，其相互關係如圖 3.5 所示。颱風中心前進方向與最大風速連線之間夾角約 115 度，而風速總和 V 則為 $V_r + V_t$ 。

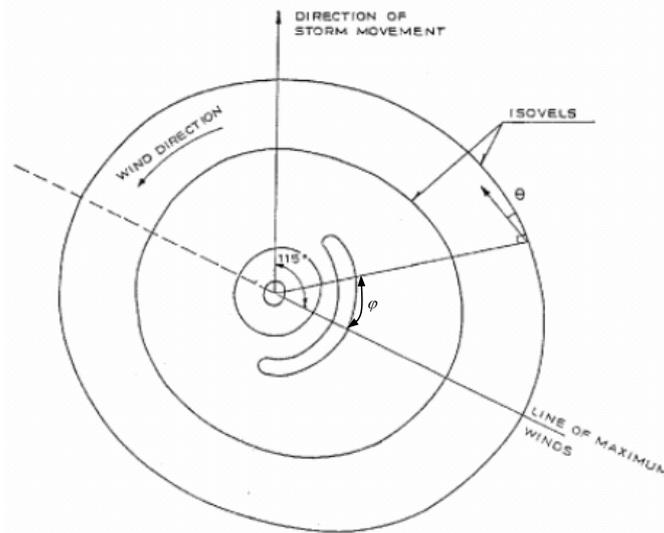


圖 3.5 氣旋中心附近風速風向分布示意圖

颱風中心附近之風向，係沿著等壓線依至氣旋中心之距離向氣旋中心偏移 10~25 度。偏移角度之計算公式如下：

$$\theta = \begin{cases} 10^\circ & \text{for } 0 < R \leq R_m \\ 10^\circ + 15^\circ(R - R_m)/(0.2R_m) & \text{for } R_m < R \leq 1.2R_m \\ 25^\circ & \text{for } 1.2R_m < R \end{cases} \quad (3.20)$$

由以上之說明可知，利用 RVM 模型颱風模式計算的風場，颱風中心前進速度 V_f 與方向 φ 、中心氣壓 P_c 及近中心最大風速 V_{max} ，可由颱風記錄直接輸入，而後即可算出目標點海面 10m 風速 V 以及目標點上空風向 V_{deg} 。本研究在輸入參數的選擇上，挑選了具有能夠代表颱風遠近特性、位置特性、左右不對稱性，共三個輸入參數 D 、 θ_1 、 θ_3 ，以及

能夠代表目標點特性的風速與風向，共兩個輸入參數 V 、 V_{deg} ，以下針對上節所計算之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 RVM 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，以期望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。以本研究所收集的颱風資料相對應之安平港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 1800km 以上，出現波高 3m 的數量明顯的變少，故本研究將排除 1800km 以上的資料點，並將剩餘資料點距離除以 1800km 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。

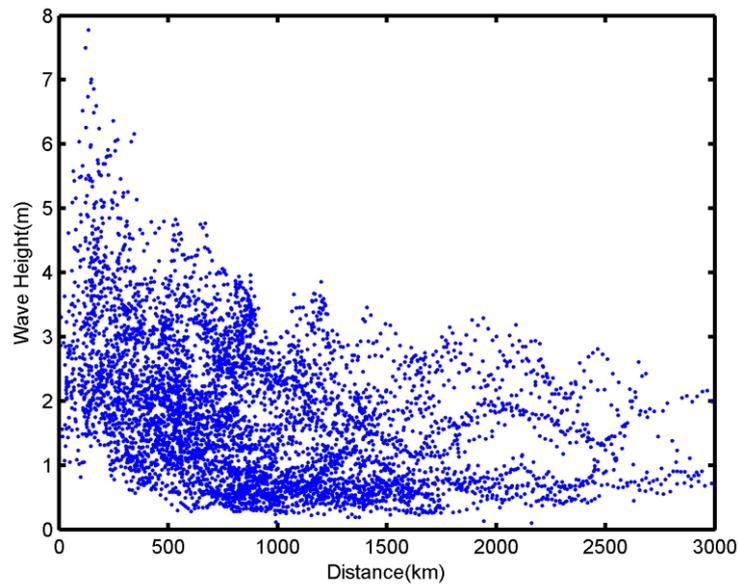


圖 3.6 颱風距離與目標點波高分布

3. 目標點的方位角 θ_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° ，若 θ_1 為 90° 表示颱風是在目標點的左側，反之若 θ_1 為 270° 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。在目標點安平港左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安平港有直接的影響；而在目標點安平港右側的颱風則會受到中央山脈的遮蔽影響，使其影響力降低。

4. 颱風侵襲角 θ_3

如前所述，侵襲角公式為 $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ 。颱風風速結構圖如圖 3.7 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 RVM 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 θ_3 與 θ_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 θ_3 隱含了 θ_2 (颱風移動方位角)的資訊，意即輸入 θ_3 也輸入了 θ_2 ，也等於將颱風的行進路徑一起納入考量。

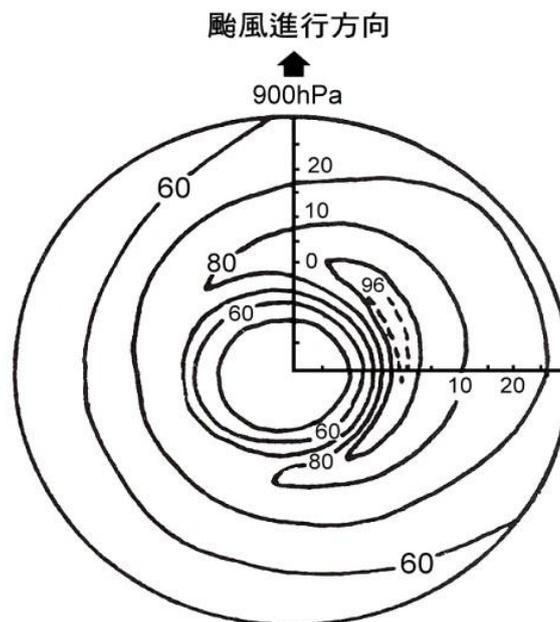


圖 3.7 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(摘自中央氣象局)

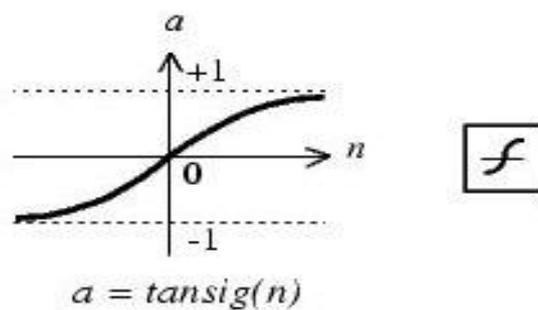
5. 目標點 10m 風向 V_{deg}

V_{deg} 是由 RVM 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。由於目標點安平港位於臺灣西南方，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。

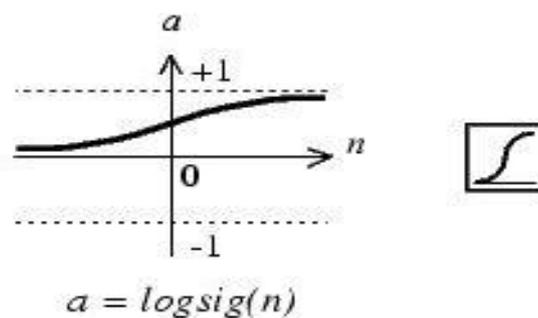
3.2.3 轉換函數與訓練函數

為了避免網路的複雜化以及過度學習的情況發生，Kecman(2001)提出隱藏層的個數宜採用 1 或 2 層具有最好的收斂性質，因每增加一層隱藏層需要計算的權重值與偏權值數量就會突增，需要測試的神經元個數組合亦會增加，故過多的隱藏層會使網路趨向複雜，減緩其收斂速度。本研究採用的類神經隱藏層個數為 1 層，欲模擬非線性的運算過程，以及輸入參數會有正負方向性，故選用具有能輸出正負值的正切雙彎曲轉換函數(tansig)為其隱藏層之轉換函數，正切雙彎曲轉換函數的輸出介於-1 和 1 之間，相較於雙彎曲函數(logsig)輸出介於 0 和 1 之間擁有較多的輸出範圍。當正切雙彎曲轉換函數之自變數趨近於正負無窮大時，輸出值會接近於-1 或 1，如圖 3.8 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。



Tan-Sigmoid Transfer Function



Log-Sigmoid Transfer Function

圖 3.8 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數

3.2.4 隱藏層神經元測試

決定隱藏層個數後，隱藏層神經元個數的多寡亦對網路有著相當大的影響，使用過少的神經元個數無法有效的建構適當的網路來描述問題，使用過多的神經元個數會使網路的複雜度過高，易發生過度學習的狀況，甚至造成模擬的結果有雜訊的產生，失去了網路的推演能力。本研究使用 Dawson(2001)所提出的網路增長法(Constructive algorithm)來確定神經元個數，其方法為先設定小數目的隱藏層神經元個數開始訓練，再逐一增加神經元個數，當神經元個數增加到某一個數之後，整體學習組的 *RMSE* 無法被有效的降低，該個數即為最佳的神經元個數。同時配合驗證組的 *RMSE*，確保使用的神經元個數不會發生過度學習的情況。另外亦參考 Huang 及 Foo (2002)提出的經驗公式 $h=2z+1$ ，其中 z 為輸入層的神經元個數、 h 為隱藏層神經元個數。

3.3 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 Δt_p 。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)}} \quad (3.21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (3.22)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (3.23)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (3.24)$$

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(3.23)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(3.24)式可知，若 Δt_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 Δt_p 的平均值部分採用絕對值平均來表示。以臺北港與基隆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 3.3 與表 3.4 所示。

表 3.3 臺北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)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
1997	溫妮	WINNIE	-2.67	7.00	0.94	0.75	3.82
1998	瑞伯	ZEB	-1.64	0.00	1.03	0.80	7.11
2000	巴比倫	PRAPIROON	0.42	3.00	0.54	0.67	3.09
2000	桑美	SAOMAI	-1.16	19.00	1.19	0.04	3.40
2000	寶發	BOPHA	-1.90	-5.00	1.26	0.64	2.37
2001	納莉	NARI	0.20	-11.00	0.59	0.48	4.75
2001	海燕	HAIYAN	-1.93	4.00	1.04	0.78	4.61
2002	雷馬遜	RAMMASUN	0.57	-16.00	0.71	0.53	2.78
2002	辛樂克	SINLAKU	0.18	10.00	0.67	0.75	3.63
2003	梅米	MAEMI	1.22	0.00	0.83	0.60	3.72
2003	米勒	MELOR	-0.18	10.00	0.41	0.62	2.45
2004	蘭寧	RANANIM	0.38	4.00	0.57	0.78	3.67
2004	艾利	AERE	-0.25	11.00	0.60	0.87	5.86
2005	海棠	HAITANG	-0.41	-3.00	0.63	0.63	3.60
2005	馬莎	MATSA	-0.82	-3.00	0.78	0.61	4.21
2005	泰利	TALIM	-0.58	1.00	0.68	0.63	3.50
2005	卡努	KHANUN	0.66	1.00	0.77	0.56	3.85
2005	龍王	LONGWANG	0.32	-1.00	0.66	0.36	3.27
2006	碧利斯	BILIS	0.86	5.00	0.72	0.41	3.77
2006	珊珊	SHANSHAN	2.39	-1.00	1.31	0.13	6.22
2007	韋帕	WIPHA	0.13	0.00	0.60	0.80	4.26
2008	鳳凰	FUNG_WONG	0.84	5.00	0.75	0.51	3.42
2008	辛樂克	SINLAKU	4.27	47.00	1.34	0.22	8.10
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.89	3.00	0.54	0.74	3.30
2011	桑達	SONGDA	1.75	-1.00	0.92	0.55	5.43
2011	米雷	MEARI	-0.12	10.00	0.67	0.65	3.17
2012	蘇拉	SAOLA	0.46	7.00	0.55	0.73	4.21
2012	杰拉華	JELAWAT	-0.27	-6.00	0.81	0.65	4.63
2013	蘇力	SOULIK	-0.06	0.00	0.81	0.68	6.88
2013	潭美	TRAMI	0.35	-2.00	0.45	0.80	3.81
2013	菲特	FITOW	-0.79	-1.00	1.64	0.72	4.18
絕對平均值			0.93	6.35	0.81	0.60	4.23

由表 3.3 中得知，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 20 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以珊珊(2006)颱風誤差較大，其誤差達 2.39m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 則以雷馬遜(2002)相差最多，相差 16 小時。模式推算颱風波浪

與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為菲特(2013)，誤差值為 1.64m。推算波高結果與實測波高的 R^2 則以珊珊(2006)最差，其值為 0.13。此外在驗證組中 11 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以辛樂克(2008)相差最大，誤差 4.27m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以辛樂克(2008)相差最多，誤差 47 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為辛樂克(2008)，其值為 1.34m。推算波高結果與實測波高的 R^2 最差為桑美(2000)的 0.04。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 0.93m，最大波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 6.35 小時， $RMSE$ 約為 0.81m， R^2 約為 0.60。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 3.4 中得知，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 22 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以辛樂克(2002)颱風誤差較大，其誤差達 2.75m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 則以南瑪都(2011)相差最多，相差 19 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為辛樂克(2002)，誤差值為 0.77m。推算波高結果與實測波高的 R^2 則以卡努(2005)最差，其值為 0.53。此外在驗證組中 11 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以天秤(2012)相差最大，誤差 3.25m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以天秤(2012)相差最多，誤差 20 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為納坦(2004)，其值為 1.40m。推算波高結果與實測波高的 R^2 最差為納坦(2004)的 0.07。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 0.95m，最大波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 6.00 小時， $RMSE$ 約為 0.69m， R^2 約為 0.69。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。整體評估臺北港類神經推算結果中的最大波高其誤差平均值為 0.04m，標準差為 1.33m；基隆港則為 0.12m 與 1.35m，顯示

類神經模式於臺北與基隆兩港的計算能力相近，且無明顯大量低估與高估的現象。

表 3.4 基隆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)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
2001	納莉	NARI	-1.05	1	0.51	0.84	6.38
2002	雷馬遜	RAMMASUN	-0.26	0	0.54	0.89	6.52
2002	辛樂克	SINLAKU	-2.75	1	0.77	0.88	8.60
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	2.66	-1	0.74	0.62	4.85
2003	杜鵑	DUJUAN	-0.18	-5	0.42	0.74	2.32
2003	梅米	MAEMI	3.00	-3	0.98	0.78	7.20
2003	米勒	MELOR	0.07	11	0.40	0.77	3.88
2004	康森	CONSON	2.24	11	1.29	0.20	4.60
2004	蘭寧	RANANIM	0.83	-5	0.41	0.91	5.18
2004	艾利	AERE	-1.02	-3	0.57	0.92	5.80
2004	納坦	NOCK_TEN	0.07	6	1.40	0.07	4.38
2005	海棠	HAITANG	-1.47	5	0.70	0.88	4.33
2005	馬莎	MATSA	-0.10	5	0.76	0.83	7.31
2005	泰利	TALIM	-1.59	4	0.61	0.89	3.85
2005	卡努	KHANUN	0.59	-3	0.65	0.53	4.38
2005	龍王	LONGWANG	0.45	-1	0.44	0.62	3.50
2006	珊珊	SHANSHAN	-0.15	13	1.24	0.32	4.52
2007	聖帕	SEPAT	-0.05	-5	0.34	0.77	2.46
2007	韋帕	WIPHA	0.46	3	0.68	0.68	4.68
2007	柯羅莎	KROSA	-1.67	2	0.62	0.90	5.39
2008	鳳凰	FUNG_WONG	-0.10	6	0.53	0.82	3.09
2008	辛樂克	SINLAKU	0.12	3	0.51	0.87	4.31
2008	薔蜜	JANGMI	-0.04	1	0.73	0.72	4.74
2009	莫拉克	MORAKOT	-1.15	6	0.43	0.88	3.36
2009	盧碧	LUPIT	-0.13	3	0.44	0.69	2.63
2010	凡那比	FANAPI	0.76	-4	0.63	0.90	4.05
2011	桑達	SONGDA	-0.55	2	0.62	0.68	3.74
2011	米雷	MEARI	2.25	19	1.35	0.45	5.56
2011	梅花	MUIFA	0.63	3	0.45	0.79	4.15
2011	南瑪都	NANMADOL	-0.47	-19	0.25	0.69	1.89
2012	蘇拉	SAOLA	-0.67	5	0.57	0.72	4.20
2012	天秤	TEMBIN	3.25	20	1.18	0.11	5.75
2012	杰拉華	JELAWAT	0.05	-8	0.81	0.67	5.60
絕對平均值			0.95	6.00	0.69	0.69	4.53

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 3.9 所示。

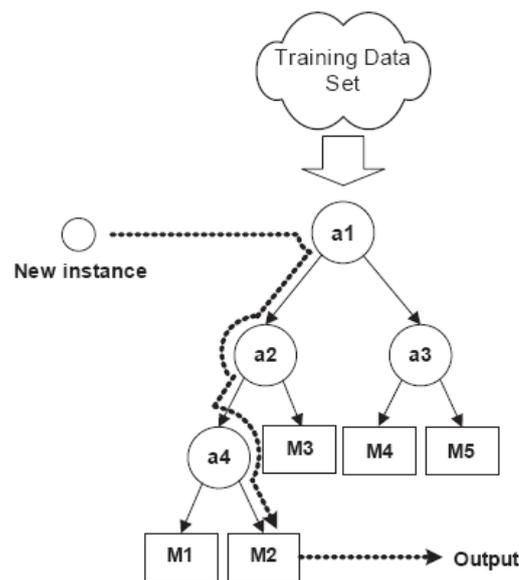


圖 3.9 層級模組法示意圖(ai 為屬性，Mi 為分群之模組)

以兩變數為例，再將分組數據與輸出值做線性回歸，如圖 3.10 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

$$SDR = sd(T) - \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (3.25)$$

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(3.25)可知當同一屬性之數據分在同群，其推估值比較接近線性， $sd(T_i)$ 較小，因此 SDR 大，因此選擇最佳模式應在最大 SDR 值上。本文利用此方法，以臺北港與基隆港的颱風資料進行推估颱風所造成的波浪大小。

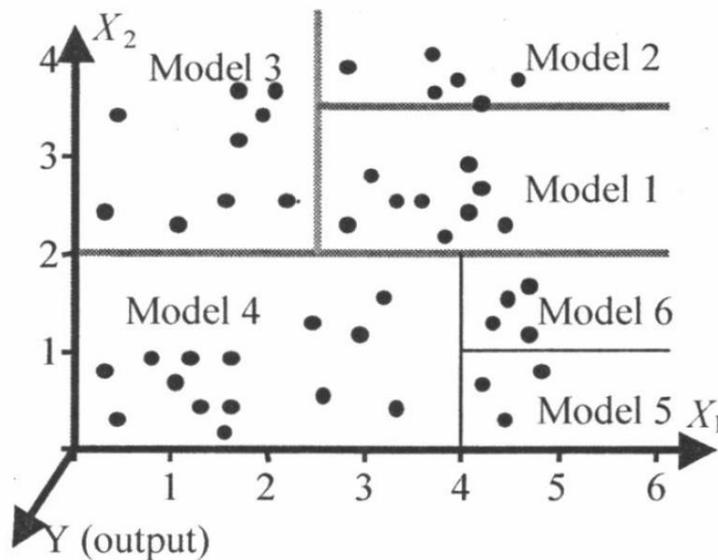


圖 3.10 M5 模式樹之分組樣本在變數 x_1 及 x_2 分布與輸出 y 之示意圖

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。本計畫將颱風資訊轉算為第三章所提及的 5 個輸入參數，分別為：1. 颱風與目標點距離(D)、2. 颱風中心對目標點的方位角(θ_1)、3. 颱風侵襲角(θ_3)、4. 目標點海面

10m 風速(V)、5.目標點上空風向(Vdeg)。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(ν)與數據個數(n)，以 $(n+\nu)/(n-\nu)$ 乘以絕對誤差來降低誤差的低估。
- 2.線性模式(linear models):各所有可能分群之輸入值與輸出值以直線回歸(linear regression)表示之。
- 3.簡化 (simplification of linear models):因為有些輸入參數在分群回歸時無高相關，遂可減少變數回歸。
- 4.修剪(pruning):若輸入值因屬性相近而不用在分支時，則變為最終葉。
- 5.平滑(smoothing)因為本方法為分區回歸，因此在分區界可能有不連續現場，故以加權(weighting)來估算以平滑化推估值。

利用 M5 最小化模式樹模式所建立的臺北港波浪推算模式其運算規則達 339 組，而基隆港波浪推算模式則為 428 組，顯示基隆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，臺北港與基隆港的波浪模式推算結果驗證如表 3.5 與表 3.6 所示。

表 3.5 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 3.5 臺北港 M5 最小化模式樹波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
1997	溫妮	WINNIE	-2.80	5	1.01	0.76	3.69
1998	瑞伯	ZEB	-4.22	-2	1.67	0.76	4.53
2000	巴比倫	PRAPIROON	0.49	-5	0.62	0.78	3.16
2000	桑美	SAOMAI	-2.15	40	1.05	0.11	2.41
2000	寶發	BOPHA	-2.16	11	0.96	0.49	2.11
2001	納莉	NARI	-0.24	-12	0.62	0.48	4.31
2001	海燕	HAIYAN	-3.08	-1	0.94	0.68	3.46
2002	雷馬遜	RAMMASUN	0.65	2	0.84	0.57	2.86
2002	辛樂克	SINLAKU	0.37	3	0.83	0.58	3.82
2003	梅米	MAEMI	0.84	-1	0.71	0.55	3.34
2003	米勒	MELOR	-0.32	6	0.33	0.74	2.31
2004	蘭寧	RANANIM	0.55	-2	0.68	0.84	3.84
2004	艾利	AERE	-1.21	4	0.69	0.90	4.90
2005	海棠	HAITANG	-0.48	-5	0.53	0.85	3.53
2005	馬莎	MATSA	-0.73	-5	0.73	0.78	4.30
2005	泰利	TALIM	-0.99	6	0.56	0.82	3.09
2005	卡努	KHANUN	0.78	-3	0.71	0.58	3.97
2005	龍王	LONGWANG	-0.06	1	0.48	0.52	2.89
2006	碧利斯	BILIS	1.90	3	0.67	0.66	4.81
2006	珊珊	SHANSHAN	0.00	-3	0.91	0.21	3.83
2007	韋帕	WIPHA	0.54	-8	0.69	0.62	4.67
2008	鳳凰	FUNG_WONG	0.30	5	0.58	0.64	2.88
2008	辛樂克	SINLAKU	1.26	6	0.96	0.63	5.09
2009	莫拉克	MORAKOT	-1.40	3	0.52	0.76	2.79
2011	桑達	SONGDA	-0.19	-2	0.74	0.46	3.49
2011	米雷	MEARI	-0.22	-12	0.56	0.53	3.07
2012	蘇拉	SAOLA	0.75	12	0.67	0.65	4.50
2012	杰拉華	JELAWAT	-1.75	-8	0.70	0.70	3.15
2013	蘇力	SOULIK	-1.70	1	0.73	0.78	5.24
2013	潭美	TRAMI	1.07	-1	0.64	0.72	4.53
2013	菲特	FITOW	-0.88	0	1.16	0.64	4.09
絕對平均值			1.10	5.74	0.76	0.64	3.70

由表 3.5 可得知，臺北港學習組中 20 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以瑞伯(1998)颱風誤差較大，其峰值大小相差 4.22m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以納莉(2001)與米雷(2011)相差最多，差 12 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為瑞伯(1998)，其誤差達 1.67m。推算波高結果與實測波高的判定係數 R^2 則以珊珊(2006)最差，其值為 0.21。此外在驗證組中 11 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以溫妮(1997)相差最大，誤差 2.80m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以桑美(2000)相差最多，誤差 40 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之 $RMSE$ 最大為桑美(2000)，其值為 1.05m。推算波高結果與實測波高 R^2 最差為桑美(2000)的 0.11。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 1.10m，最大波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 5.74 小時， $RMSE$ 約為 0.76m， R^2 約為 0.64。

由表 3.6 顯示，基隆港學習組中 22 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以辛樂克(2002)颱風誤差較大，其值為 4.94m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 亦以辛樂克(2002)相差最多，與實際資料相差 10 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為蘇迪勒(2003)，其誤差達 1.07m。推算波高結果與實測波高的判定係數 R^2 則以盧碧(2009)最差，其值為 0.50。此外在驗證組中 11 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以天秤(2012)相差最大，誤差 3.22m。最大波高發生時間誤差 Δt_p 亦以天秤(2012)相差最多，誤差 19 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪之均方根誤差 $RMSE$ 最大為米雷(2011)，其值為 1.38m。推算波高結果與實測波高的 R^2 最差為天秤(2012)的 0.10。平均來說模式推算結果的各颱風波高峰值誤差絕對值 $\Delta H_{s,p}$ 約為 1.24m，波高峰值發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 5.35 小時， $RMSE$ 約為 0.73m， R^2 約為 0.70。以模式架構來看基隆港的模式運算規則較為複雜，其驗證結果中顯示除了波高峰值誤差外，其餘波高峰值發生時間及整體 $RMSE$ 及 R^2 僅稍微較臺北港模式好。

表 3.6 基隆港 M5 最小化模式樹波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
2001	納莉	NARI	-2.24	-3	0.69	0.72	5.19
2002	雷馬遜	RAMMASUN	-1.29	0	0.53	0.89	5.49
2002	辛樂克	SINLAKU	-4.94	-10	0.94	0.81	6.41
2003	蘇迪勒	SOUDELOR	3.06	0	1.07	0.67	5.25
2003	杜鵑	DUJUAN	-0.66	-6	0.51	0.63	1.84
2003	梅米	MAEMI	0.87	2	0.76	0.77	5.07
2003	米勒	MELOR	-0.92	9	0.51	0.70	2.89
2004	康森	CONSON	2.00	5	1.11	0.45	4.36
2004	蘭寧	RANANIM	1.43	-4	0.58	0.86	5.78
2004	艾利	AERE	-1.41	7	0.50	0.94	5.41
2004	納坦	NOCK_TEN	1.94	4	1.23	0.27	6.25
2005	海棠	HAITANG	-1.76	0	0.68	0.91	4.04
2005	馬莎	MATSA	-1.91	13	0.71	0.84	5.50
2005	泰利	TALIM	-1.53	3	0.67	0.86	3.91
2005	卡努	KHANUN	0.86	-5	0.84	0.49	4.65
2005	龍王	LONGWANG	0.20	-3	0.53	0.53	3.25
2006	珊珊	SHANSHAN	0.39	7	1.12	0.38	5.06
2007	聖帕	SEPAT	0.44	-6	0.59	0.61	2.95
2007	韋帕	WIPHA	0.70	4	0.72	0.75	4.92
2007	柯羅莎	KROSA	-2.25	2	0.59	0.91	4.81
2008	鳳凰	FUNG_WONG	-0.08	4	0.36	0.91	3.11
2008	辛樂克	SINLAKU	-0.08	6	0.63	0.81	4.11
2008	薔蜜	JANGMI	-0.81	2	0.65	0.79	3.97
2009	莫拉克	MORAKOT	-1.31	-2	0.55	0.85	3.20
2009	盧碧	LUPIT	-0.37	-7	0.51	0.50	2.39
2010	凡那比	FANAPI	0.18	-3	0.57	0.88	3.47
2011	桑達	SONGDA	0.91	0	0.75	0.57	5.20
2011	米雷	MEARI	2.70	-3	1.38	0.89	6.01
2011	梅花	MUIFA	0.37	-4	0.63	0.75	3.89
2011	南瑪都	NANMADOL	-0.10	-1	0.29	0.62	2.26
2012	蘇拉	SAOLA	0.02	16	0.64	0.68	4.89
2012	天秤	TEMBIN	3.22	19	1.34	0.10	5.72
2012	杰拉華	JELAWAT	-1.16	-9	0.72	0.85	4.39
絕對平均值			1.24	5.35	0.73	0.70	4.35

3.5 類神經與 M5 模式之推算結果比較

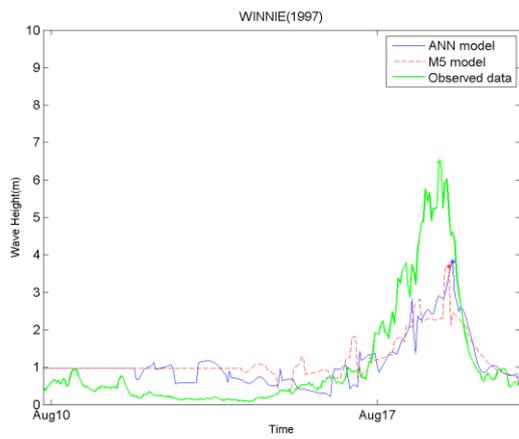
本節中將臺北港及基隆港 M5 最小化模式樹波浪推算模式(以下簡稱 M5 模式)與類神經波浪推算模式(以下簡稱類神經模式)之推算結果作比較，臺北港部份選取兩種模式皆有推算出結果且能與實測資料進行比較的颱風共 31 場如表 3.7 所示。以臺北港 31 場颱風來看，波高峰值的估算精度以類神經模式較佳，但其他如峰值發生時間、整體推算 RMSE 及 R^2 皆是以 M5 最小化模式樹波浪推算模式較佳。由表 3.7 的結果比較中可以發現大部分颱風以兩種不同模式推估的結果類似，全部 31 場颱風中有 16 場颱風類神經網路模式與 M5 模式的推算峰值誤差皆在 1m 以內，顯示兩種模式在這些颱風的模擬有良好的結果。

表 3.7 臺北港兩種波浪推算模式的誤差比較

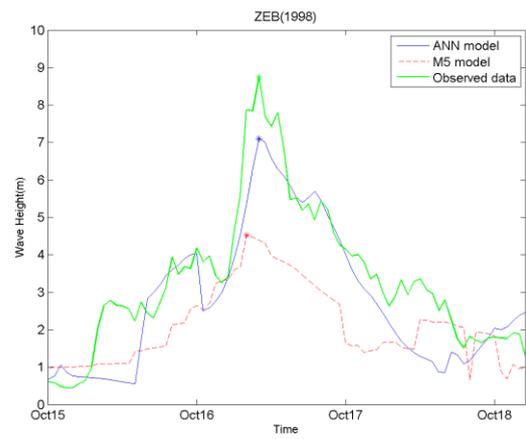
年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$	Δt_p	RMSE	R^2	$\Delta H_{s,p}$	Δt_p	RMSE	R^2	H_{obs}
		(m)	(hour)			(m)	(hour)			
		類神經				M5				
1997	溫妮 (WINNIE)	-2.67	7	0.94	0.75	-2.80	5	1.01	0.76	6.49
1998	瑞伯 (ZEB)	-1.64	0	1.03	0.80	-4.22	-2	1.67	0.76	8.75
2000	巴比倫 (PRAPIROON)	0.42	3	0.54	0.67	0.49	-5	0.62	0.78	2.67
2000	桑美 (SAOMAI)	-1.16	19	1.19	0.04	-2.15	40	1.05	0.11	4.56
2000	寶發 (BOPHA)	-1.90	-5	1.26	0.64	-2.16	11	0.96	0.49	4.27
2001	納莉 (NARI)	0.20	-11	0.59	0.48	-0.24	-12	0.62	0.48	4.55
2001	海燕 (HAIYAN)	-1.93	4	1.04	0.78	-3.08	-1	0.94	0.68	6.54
2002	雷馬遜 (RAMMASUN)	0.57	-16	0.71	0.53	0.65	2	0.84	0.57	2.21
2002	辛樂克 (SINLAKU)	0.18	10	0.67	0.75	0.37	3	0.83	0.58	3.45
2003	梅米 (MAEMI)	1.22	0	0.83	0.60	0.84	-1	0.71	0.55	2.5
2003	米勒 (MELOR)	-0.18	10	0.41	0.62	-0.32	6	0.33	0.74	2.63
2004	蘭寧 (RANANIM)	0.38	4	0.57	0.78	0.55	-2	0.68	0.84	3.29
2004	艾利 (AERE)	-0.25	11	0.60	0.87	-1.21	4	0.69	0.90	6.11
2005	海棠 (HAITANG)	-0.41	-3	0.63	0.63	-0.48	-5	0.53	0.85	4.01
2005	馬莎 (MATSA)	-0.82	-3	0.78	0.61	-0.73	-5	0.73	0.78	5.03
2005	泰利 (TALIM)	-0.58	1	0.68	0.63	-0.99	6	0.56	0.82	4.08
2005	卡努 (KHANUN)	0.66	1	0.77	0.56	0.78	-3	0.71	0.58	3.19
2005	龍王 (LONGWANG)	0.32	-1	0.66	0.36	-0.06	1	0.48	0.52	2.95
2006	碧利斯 (BILIS)	0.86	5	0.72	0.41	1.90	3	0.67	0.66	2.91
2006	珊珊 (SHANSHAN)	2.39	-1	1.31	0.13	0.00	-3	0.91	0.21	3.83

2007	韋帕 (WIPHA)	0.13	0	0.60	0.80	0.54	-8	0.69	0.62	4.13
2008	鳳凰 (FUNG_WONG)	0.84	5	0.75	0.51	0.30	5	0.58	0.64	2.58
2008	辛樂克 (SINLAKU)	4.27	47	1.34	0.22	1.26	6	0.96	0.63	3.83
2009	莫拉克 (MORAKOT)	-0.89	3	0.54	0.74	-1.40	3	0.52	0.76	4.19
2011	桑達 (SONGDA)	1.75	-1	0.92	0.55	-0.19	-2	0.74	0.46	3.68
2011	米雷 (MEARI)	-0.12	10	0.67	0.65	-0.22	-12	0.56	0.53	3.29
2012	蘇拉 (SAOLA)	0.46	7	0.55	0.73	0.75	12	0.67	0.65	3.75
2012	杰拉華 (JELAWAT)	-0.27	-6	0.81	0.65	-1.75	-8	0.70	0.70	4.9
2013	蘇力 (SOULIK)	-0.06	0	0.81	0.68	-1.70	1	0.73	0.78	6.94
2013	潭美 (TRAMI)	0.35	-2	0.45	0.80	1.07	-1	0.64	0.72	3.46
2013	菲特 (FITOW)	-0.79	-1	1.64	0.72	-0.88	0	1.16	0.64	4.97
平均絕對值		0.93	6.35	0.81	0.60	1.10	5.74	0.76	0.64	6.49

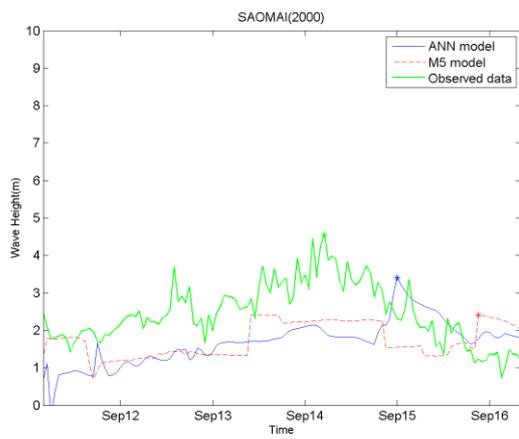
本研究選出下列誤差較大的颱風進行探討與比較，如溫妮(1997)、瑞伯(1998)、桑美(2000)、寶發(2000)與海燕(2001)五場颱風這兩種模式的推算結果都與實測有較大的誤差，其波高推算值與實測值比較圖示如圖 3.11。圖中溫妮(1997)與瑞伯(1998)明顯兩種模式的推算峰值都與實測值有很大的差距。桑美(2000)與寶發(2000)則是兩種模式在峰值發生時間與實測峰值有很大差異，經檢驗其參數風場模式推算結果，此兩場颱風在所推算出的推算點 10 米風速較小，使得波浪峰值相對不明顯。海燕(2001)的時序比較圖顯示 M5 模式有稍微低估，而類神經模式在峰值發生前後段仍屬吻合，但峰值的該時刻處並沒有模擬出實測資料中突然上升的波高值。另外珊珊(2006)、辛樂克(2008)與桑達(2011)則是屬於類神經模式有明顯高估的三場颱風，其波高比較圖示如圖 3.12，類神經模式在三場颱風的波浪峰值處都有明顯的高估，尤其辛樂克(2008)更在峰值後有異常的跳動值，但 M5 模式的模擬結果則仍屬接近。杰拉華(2012)與蘇力(2013)的則是 M5 模式的推算結果有明顯低估的現象，其波高比較圖示如圖 3.13。圖中顯示兩種推算模式計算的波浪峰值與實測峰值發生時間十分接近，但 M5 模式所推算的峰值與實測有較大誤差，類神經模式則較接近。



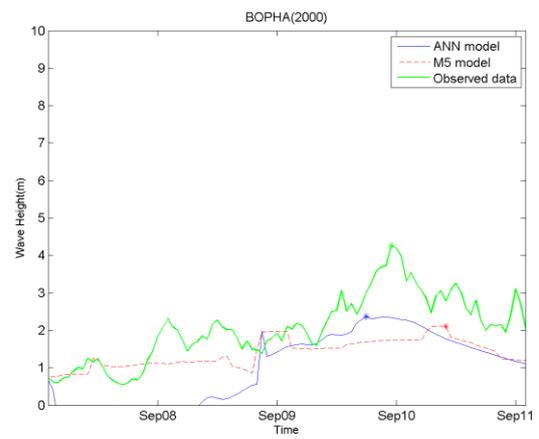
(a) 溫妮(1997)



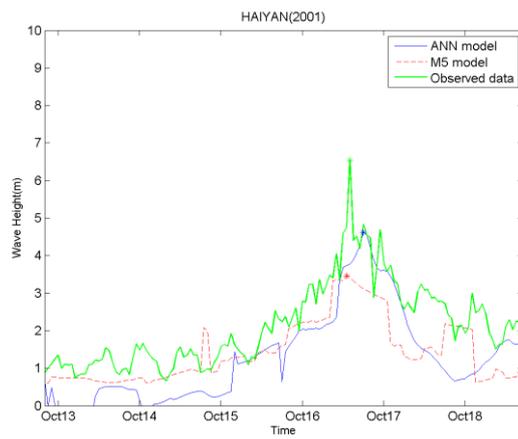
(b) 瑞伯(1998)



(c) 桑美(2000)

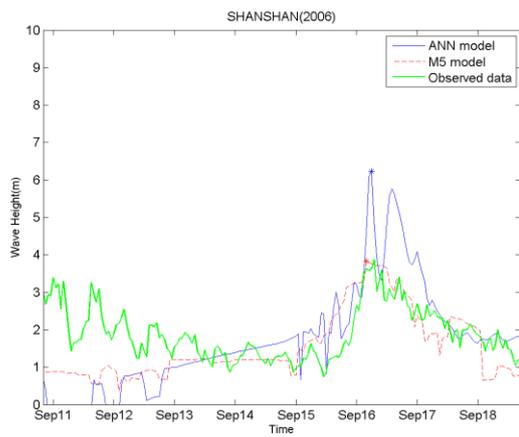


(d) 寶發(2000)

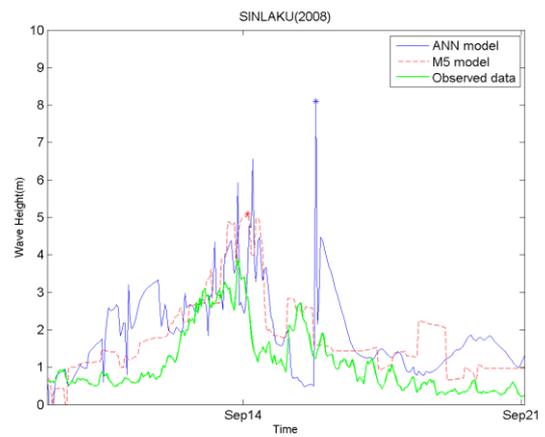


(e) 海燕(2001)

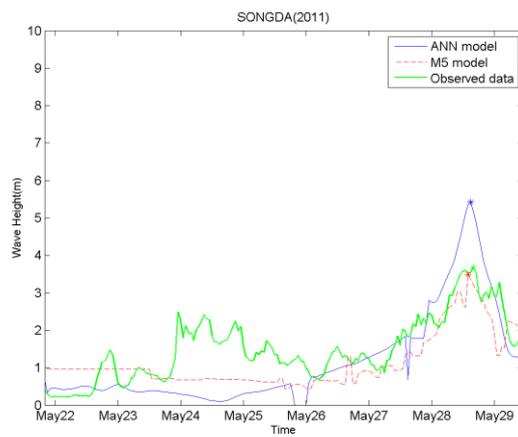
圖 3.11 臺北港 M5 與類神經模式推算結果較差的颱風波浪時序圖



(a) 珊珊(2006)

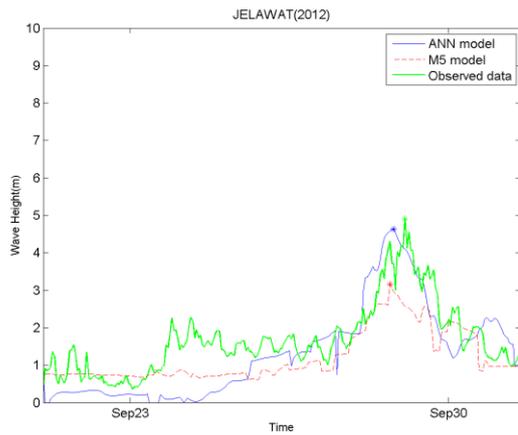


(b) 辛樂克(2008)

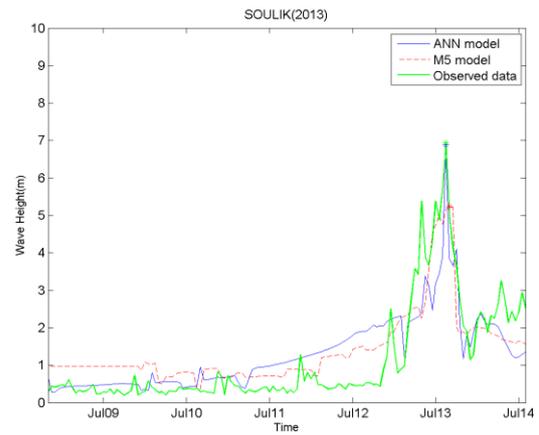


(c) 桑達(2011)

圖 3.12 臺北港類神經模式推算結果明顯高估的颱風波浪時序圖



(a)杰拉華(2012)



(b)蘇力(2013)

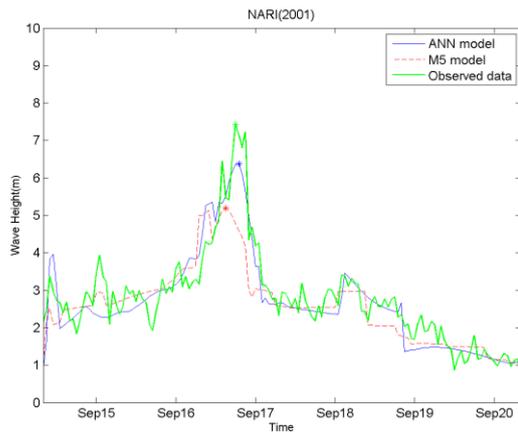
圖 3.13 臺北港 M5 模式推算結果明顯低估的颱風波浪時序圖

另以基隆港 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 33 場如表 3.8。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，以基隆港 33 場颱風的絕對平均值來看，類神經網路模式推估颱風所造成波浪的峰值誤差與整體 $RMSE$ 較 M5 模式佳，峰值發生時間誤差與 R^2 則以 M5 模式為佳。

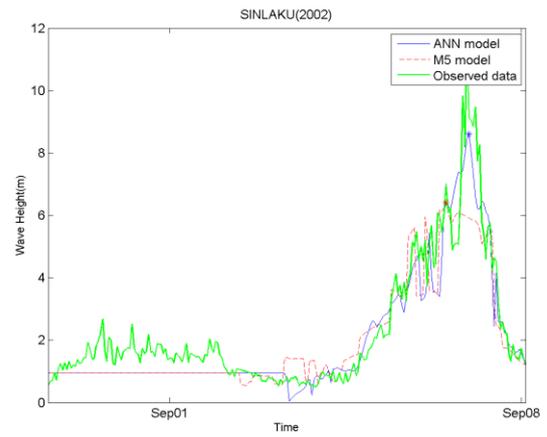
表 3.8 基隆港兩種波浪推算模式的誤差比較

年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$	Δt_p	RMSE	R ²	$\Delta H_{s,p}$	Δt_p	RMSE	R ²	H_{obs}
		(m)	(hour)			(m)	(hour)			
		類神經				M5				
2001	納莉 (NARI)	-1.05	1	0.51	0.84	-2.24	-3	0.69	0.72	7.43
2002	雷馬遜 (RAMMASUN)	-0.26	0	0.54	0.89	-1.29	0	0.53	0.89	6.78
2002	辛樂克 (SINLAKU)	-2.75	1	0.77	0.88	-4.94	-10	0.94	0.81	11.35
2003	蘇迪勒 (SOUDELOR)	2.66	-1	0.74	0.62	3.06	0	1.07	0.67	2.19
2003	杜鵑 (DUJUAN)	-0.18	-5	0.42	0.74	-0.66	-6	0.51	0.63	2.5
2003	梅米 (MAEMI)	3.00	-3	0.98	0.78	0.87	2	0.76	0.77	4.2
2003	米勒 (MELOR)	0.07	11	0.40	0.77	-0.92	9	0.51	0.70	3.81
2004	康森 (CONSON)	2.24	11	1.29	0.20	2.00	5	1.11	0.45	2.36
2004	蘭寧 (RANANIM)	0.83	-5	0.41	0.91	1.43	-4	0.58	0.86	4.35
2004	艾利 (AERE)	-1.02	-3	0.57	0.92	-1.41	7	0.50	0.94	6.82
2004	納坦 (NOCK_TEN)	0.07	6	1.40	0.07	1.94	4	1.23	0.27	4.31
2005	海棠 (HAITANG)	-1.47	5	0.70	0.88	-1.76	0	0.68	0.91	5.8
2005	馬莎 (MATSA)	-0.10	5	0.76	0.83	-1.91	13	0.71	0.84	7.41
2005	泰利 (TALIM)	-1.59	4	0.61	0.89	-1.53	3	0.67	0.86	5.44
2005	卡努 (KHANUN)	0.59	-3	0.65	0.53	0.86	-5	0.84	0.49	3.79
2005	龍王 (LONGWANG)	0.45	-1	0.44	0.62	0.20	-3	0.53	0.53	3.05
2006	珊珊 (SHANSHAN)	-0.15	13	1.24	0.32	0.39	7	1.12	0.38	4.67
2007	聖帕 (SEPAT)	-0.05	-5	0.34	0.77	0.44	-6	0.59	0.61	2.51
2007	韋帕 (WIPHA)	0.46	3	0.68	0.68	0.70	4	0.72	0.75	4.22
2007	柯羅莎 (KROSA)	-1.67	2	0.62	0.90	-2.25	2	0.59	0.91	7.06
2008	鳳凰 (FUNG_WONG)	-0.10	6	0.53	0.82	-0.08	4	0.36	0.91	3.19
2008	辛樂克 (SINLAKU)	0.12	3	0.51	0.87	-0.08	6	0.63	0.81	4.19
2008	薔蜜 (JANGMI)	-0.04	1	0.73	0.72	-0.81	2	0.65	0.79	4.78
2009	莫拉克 (MORAKOT)	-1.15	6	0.43	0.88	-1.31	-2	0.55	0.85	4.51
2009	盧碧 (LUPIT)	-0.13	3	0.44	0.69	-0.37	-7	0.51	0.50	2.76
2010	凡那比 (FANAPE)	0.76	-4	0.63	0.90	0.18	-3	0.57	0.88	3.29
2011	桑達 (SONGDA)	-0.55	2	0.62	0.68	0.91	0	0.75	0.57	4.29
2011	米雷 (MEARI)	2.25	19	1.35	0.45	2.70	-3	1.38	0.89	3.31
2011	梅花 (MUIFA)	0.63	3	0.45	0.79	0.37	-4	0.63	0.75	3.52
2011	南瑪都 (NANMADOL)	-0.47	-19	0.25	0.69	-0.10	-1	0.29	0.62	2.36
2012	蘇拉 (SAOLA)	-0.67	5	0.57	0.72	0.02	16	0.64	0.68	4.87
2012	天秤 (TEMBIN)	3.25	20	1.18	0.11	3.22	19	1.34	0.10	2.5
2012	杰拉華 (JELAWAT)	0.05	-8	0.81	0.67	-1.16	-9	0.72	0.85	5.55
平均絕對值		0.95	6.00	0.69	0.69	1.24	5.35	0.73	0.70	7.43

表 3.8 中另外可以發現納莉(2001)、辛樂克(2002)兩場颱風由兩個模式推估的結果其波浪峰值皆低於實測紀錄，其波高比較圖如圖 3.14 所示。圖中顯示兩場颱風波浪的推算結果有類似的情形，類神經模式的推算結果其峰值較實測紀錄低，但 M5 模式的峰值則更低。其中辛樂克(2002)為基隆港現有記錄中波高峰值最大的一場颱風，其波高峰值達 11.35m，以本計畫的類神經模式與 M5 模式推估結果波高峰值分別有 2.75m 與 4.94m 的低估情形。另外透過各個颱風的比較圖中發現第六路徑的蘇迪勒(2003)、康森(2004)及天秤(2012)三場颱風其路徑皆是屬於自台灣東部外海往東北移動的颱風，其波高比較圖示如圖 3.15 至圖 3.17。三場颱風的推算波高比較圖中可以發現三場類似路徑的颱風經由不同的推估方式，卻在模擬結果的波浪峰值中有相同的高估問題，其成因可能為學習資料組中有多組類似特性的資料點在日本沖繩群島處有造成較大波高所造成，另外梅米(2003)與米雷(2011)也有類似的峰值高估情形發生，其中高估的程度又以類神經較 M5 模式的推算結果高。泰利(2005)、柯羅莎(2007)與莫拉克(2009)三場颱風皆屬於東向西行登陸台灣中北部的第二路徑與第三路徑，這三場颱風的推算波高比較圖示如圖 3.18 至圖 3.20。圖中可以發現類神經模式與 M5 模式在此類登陸台灣中北部西行的颱風兩種模式的推估結果其波高峰值皆相近，但皆稍微低於實測紀錄波高峰值。



(a) 納莉(2001)



(b) 辛樂克(2002)

圖 3.14 基隆港 M5 與類神經模式推算結果比較圖

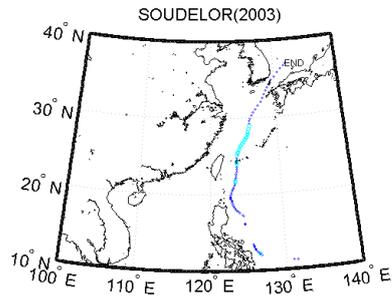
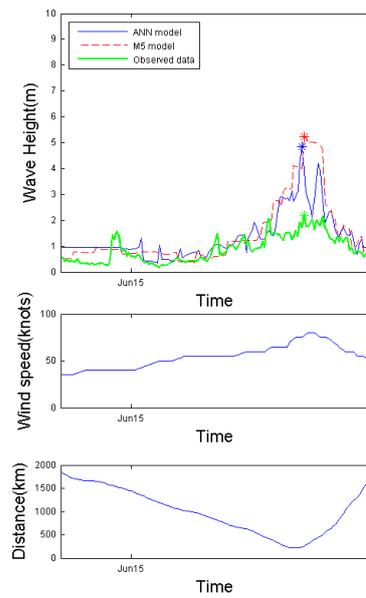


圖 3.15 基隆港 M5 與類神經模式推算 2003 年蘇迪勒颱風結果比較圖

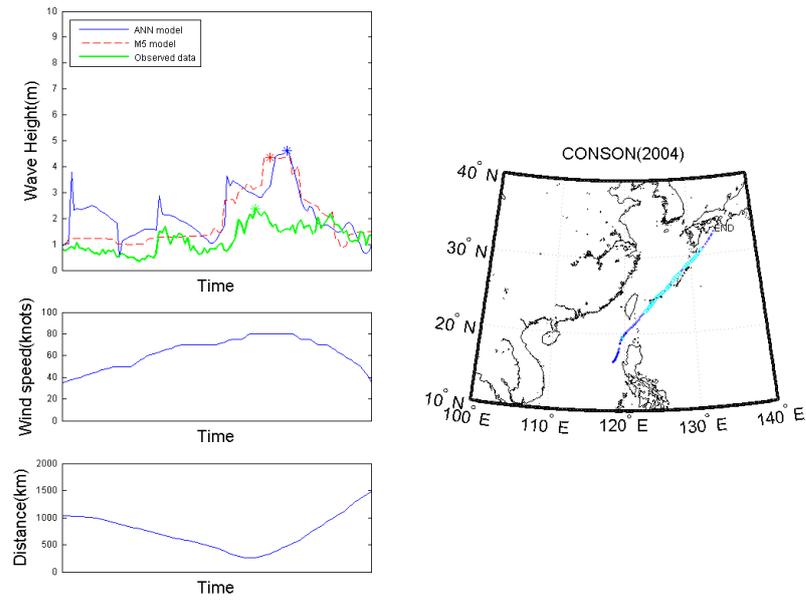


圖 3.16 基隆港 M5 與類神經模式推算 2004 年康森颱風結果比較圖

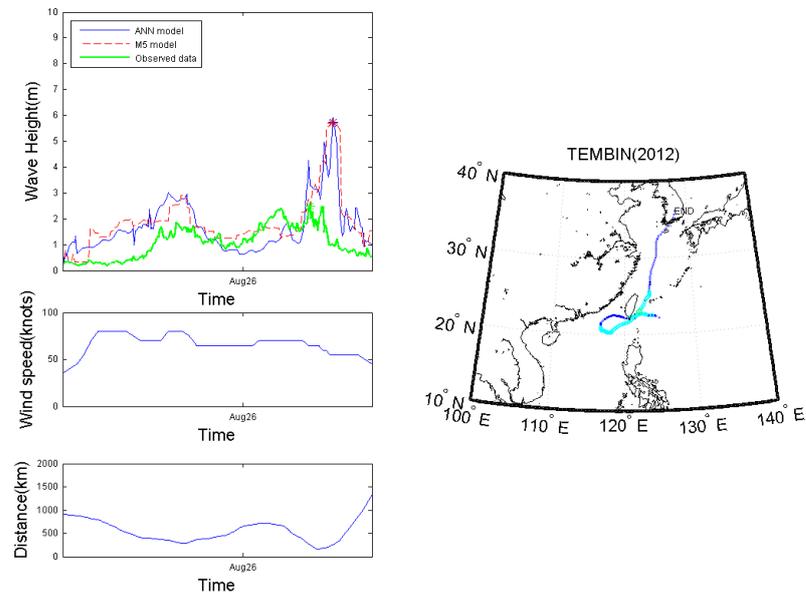


圖 3.17 基隆港 M5 與類神經模式推算 2012 年天秤颱風結果比較圖

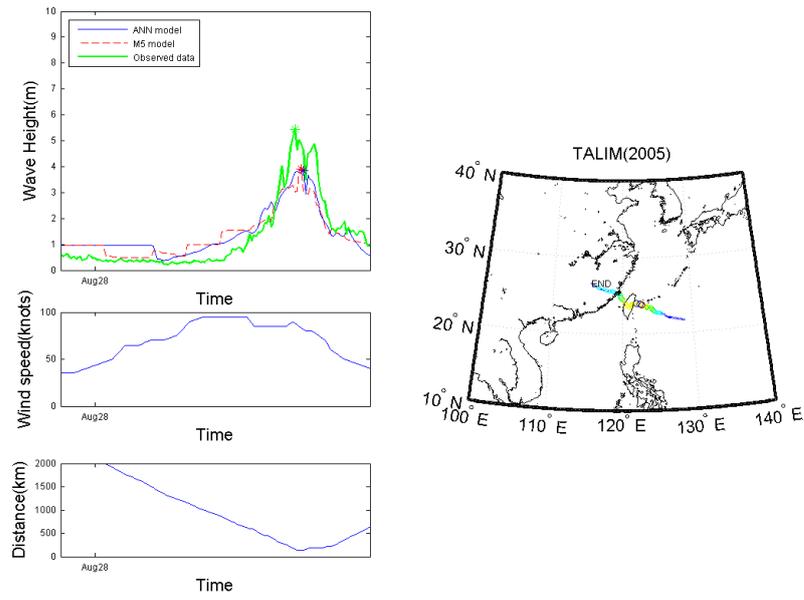


圖 3.18 基隆港 M5 與類神經模式推算 2005 年泰利颱風結果比較圖

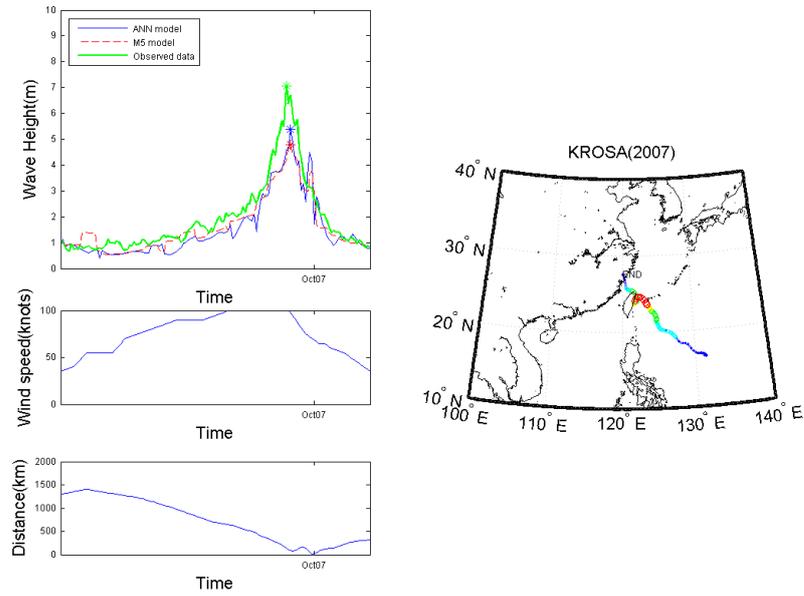


圖 3.19 基隆港 M5 與類神經模式推算 2007 年柯羅莎颱風結果比較圖

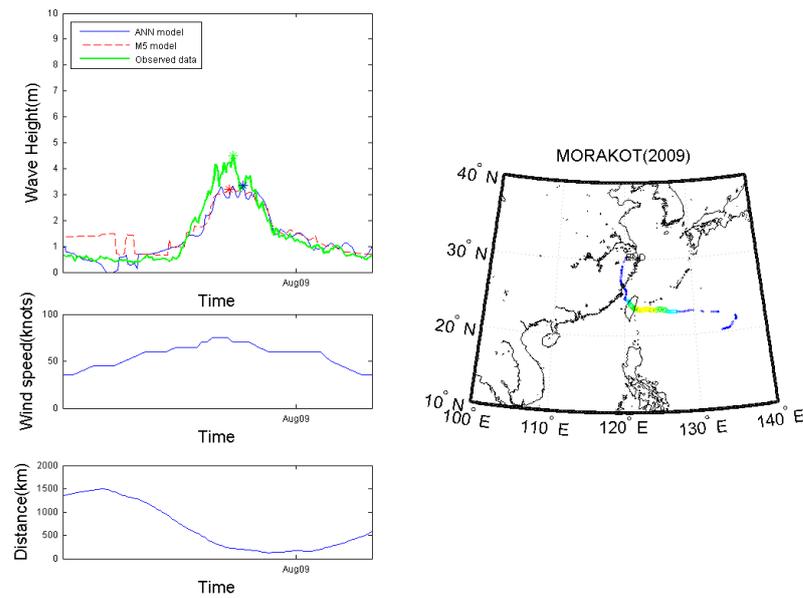


圖 3.20 基隆港 M5 與類神經模式推算 2009 年莫拉克颱風結果比較圖

3.6 各港域類神經模式推算精度比較

本年度本所港研中心已完成包括花蓮、高雄、臺中、基隆、蘇澳、安平與臺北港等幾個臺灣主要港口的類神經颱風波浪推算模式，表 3.9 顯示歷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 0.67m，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 Δt_p 波則以花蓮港波浪推算模式最為準確。均方根誤差 RMSE 則以高雄港最佳，其值為 0.64m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以最花蓮港為最佳，其值為 0.69。整體來說，位於臺灣東岸與北端的花蓮港、蘇澳港與基隆港三個港的模式推算結果較佳，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。由於大部分颱風皆由東往西侵臺，且花蓮港的颱風波浪實測資料最完整，所以該測站的模式推算能力較佳。高雄港、安平港與臺北港在地理位上有一個共通點，大部分颱風在接近此區域其風場結構皆受到地形的阻擋，其波浪傳遞也受到陸地的遮蔽效應，且颱風波浪資料較少，所以模式的推算能力並沒有花蓮港那麼好，

而臺中港部分由於資料較少，且有幾場颱風的對應波高有異常的波峰值外，配合二維的轉換函數，其模式推算能力與安平港模式接近，未來若能有更多的颱風波浪資料進行分析，相信能繼續提升模式推算能力。

表 3.9 各港域類神經颱風波浪推算結果比較

	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R ²
花蓮港	0.98	5.04	0.69	0.69
高雄港	0.67	8.70	0.64	0.55
安平港	1.03	10.06	0.72	0.53
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

3.7 波浪推算模式誤差分析

依據前節各場颱風的推算結果，本節中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。其中，臺北港的最大波高推算誤差分析如圖 3.21，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 3.21 顯示以臺北港 M5 模式推算結果的各場颱風波高峰值誤差的誤差分析，其平均值為-0.49m，中位數為-0.22m，標準差為 1.40m，31 個樣本中不通過 95%信賴度的有 4 個，佔全部的 12.90%。臺北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 0.04m，中位數為 0.13m，標準差為 1.33m，31 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 9.68%。圖 3.22 顯示以臺北港 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 1.26 小時，中位數為

0.00 小時，標準差為 9.22 小時，31 個樣本中不通過 95%信賴度的有 1 個，佔全部的 3.23%。臺北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 3.13 小時，中位數為 1.00 小時，標準差為 10.57 小時，31 個樣本中不通過 95%信賴度的有 2 個，佔全部的 6.45%。

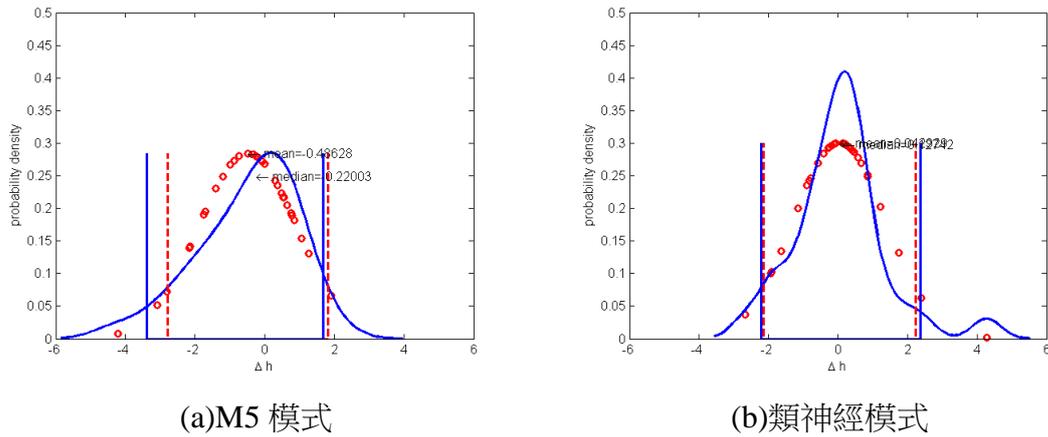


圖 3.21 臺北港各波浪推算模式推算波高誤差分析

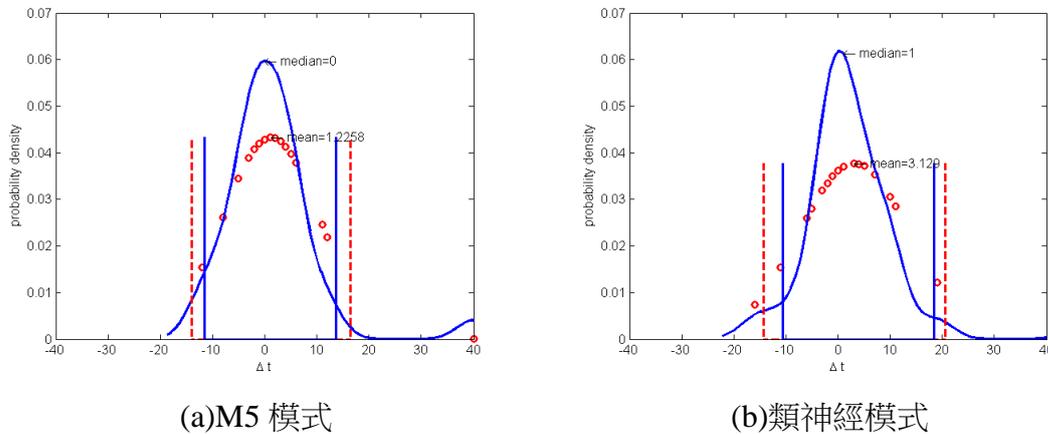


圖 3.22 臺北港各波浪推算模式峰值時間誤差分析

圖 3.23 顯示以基隆港 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 -0.11m，中位數為 -0.08m，標準差為 1.70m，33 個樣本中不通過 95%信賴度的有 4 個，佔全部的 12.12%。基隆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

0.12m，中位數為-0.05m，標準差為 1.35m，33 個樣本中不通過 95%信賴度的有 4 個，佔全部的 12.12%。圖 3.24 顯示以基隆港 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 1.12 小時，中位數為 0 小時，標準差為 6.74 小時，33 個樣本中不通過 95%信賴度的有 4 個，佔全部的 12.12%。基隆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 2.21 小時，中位數為 2.00 小時，標準差為 7.50 小時，33 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 9.09%。

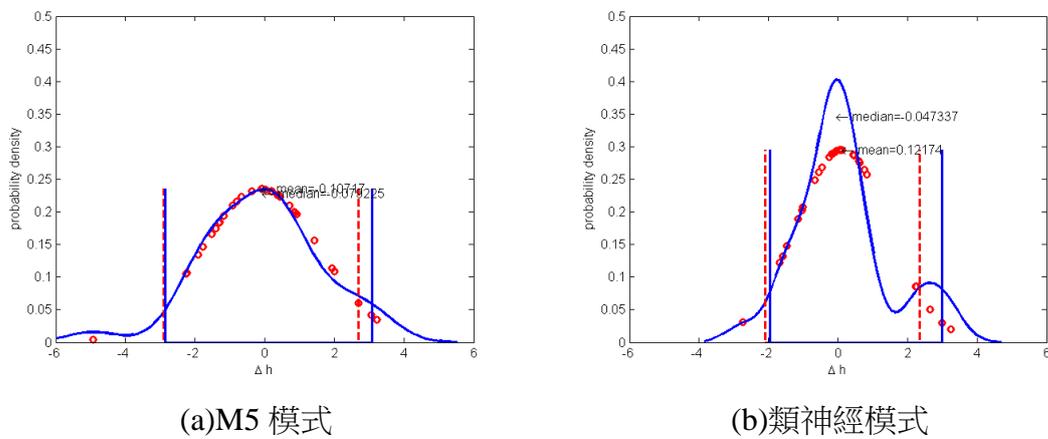


圖 3.23 基隆港各波浪推算模式推算波高誤差分析

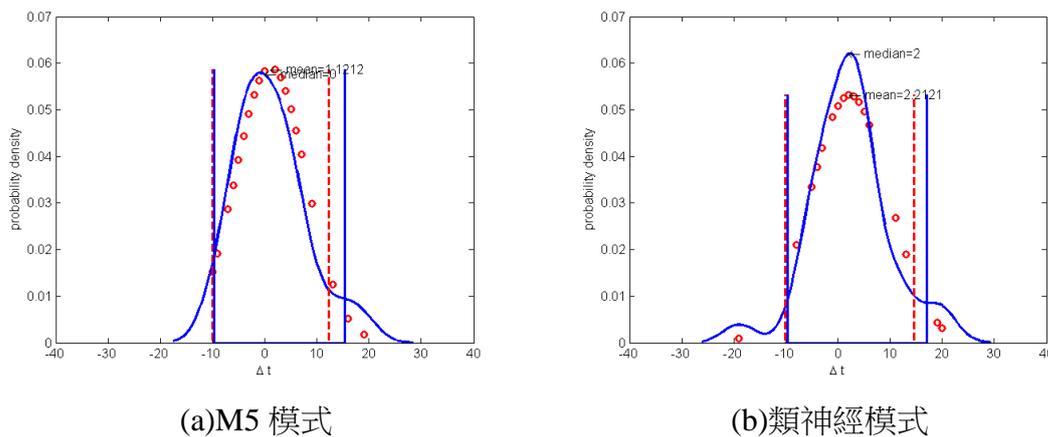


圖 3.24 基隆港各波浪推算模式峰值時間誤差分析

由上述推估誤差的風險分析雖然無法直接比較兩個模式的精度，但由圖中分布可看出臺北港與基隆港的 M5 模式所推估的波高峰值峰

值誤差較有偏低的現象，類神經模式則無。在模式推估峰值發生時間的部分，由標準偏差可以發現類神經模式推估峰值發生時間誤差的波動幅度較 M5 模式大，綜合比較表如下。

表 3.10 誤差分析結果綜合比較表

	臺北港 M5		臺北港類神經		基隆港 M5		基隆港類神經	
	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	-0.49	1.26	0.04	3.13	-0.11	1.12	0.12	2.21
中位數	-0.22	0.00	0.13	1.00	-0.08	0.00	-0.05	2.00
標準差	1.40	9.22	1.33	10.57	1.70	6.74	1.35	7.50
未通過 95%比	4/31	1/31	3/31	2/31	4/33	4/33	4/33	3/33

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：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.26)$$

其中， $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ 為波力頻譜密度函數(wave action density function)，與波能頻譜密度函數(wave energy density function)之關係為 $N=E/\sigma$ ； $\bar{x}=(x, y)$ 為卡氏坐標； t 為時間； σ 為角頻率；而 θ 則為波向角。 $\bar{v}=(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 為一個 4 維空間的向量， $(c_x, c_y)=d\bar{x}/dt=\bar{c}_g + \bar{U}$ ，代表群波在空間上的傳遞速度，其中 \bar{c}_g 為群波速度，而 \bar{U} 則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。 $c_\sigma=d\sigma/dt$ ，代表角頻率 σ 之變化速度。 $c_\theta=d\theta/dt$ ，代表波向角 θ 之變化速度。

$\nabla=(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial \sigma, \partial/\partial \theta)$ 為一個 4 維空間的向量運算子， S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象，表示如下：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3.27)$$

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：

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(C_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (3.29)$$

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

$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega \quad (3.30)$$

3.8.1 數值模擬條件

本研究所採用之地形資料，於近岸區利用海軍海洋測量局發行之海圖地形，而遠岸區則採用 National Geophysical Data Center 發布之全球高程資料 ETOPO2v2 (2006)。該地形資料範圍包含東經 180° ~西經 180° 、北緯 89.967° ~南緯 90° ，地形格網之解析精度為 $2' \times 2'$ (約為 4×4 公里)。本計畫採用非結構型三角網格方式計算，模擬範圍之邊界南約至北緯 14° 、北約至北緯 30° 、西約至東經 111° 、東約至東經 135° ，範圍涵蓋至大陸、台灣及菲律賓群島，所模擬範圍之地形水深如圖 3.25 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 3.11 所示。

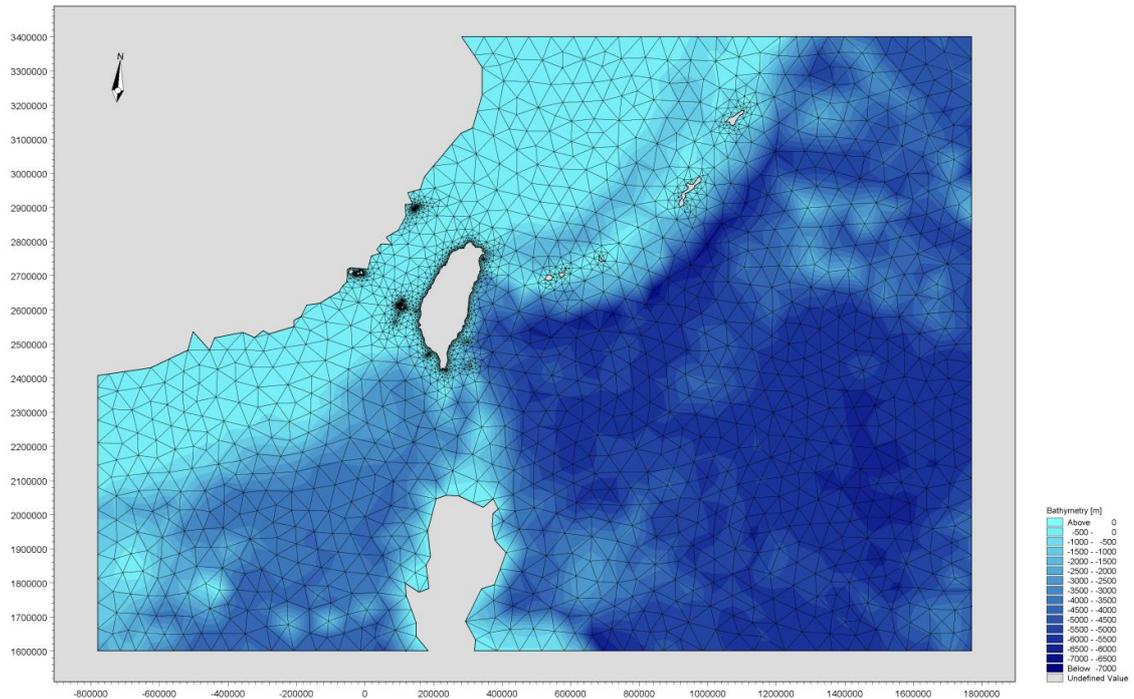


圖 3.25 風浪推算模擬範圍之地形水深

表 3.11 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 ²)	6,862
最大元素面積(m ²)	2.5 × 10 ⁹

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(Climat 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 3.12 所示。在頻率領域方面，最小頻率採 0.055Hz ，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶，相當於週期 $1.85 \sim 18.18$ 秒。在角度領域方面，以 22.5° 為 1 個角度單位，共計分割成 16 個方向角，計算時距以 15 分鐘進行計算。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白沫消散等物理機制。計算範圍的邊界條件共分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，其考慮波浪通過此邊界時完全被吸收。

表 3.12 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

測試數值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 $\Delta H_{s,p}$ 及最大波高發生時間誤差 Δt_p 。

表 3.13 中顯示，臺北港颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以芭比絲(1998)颱風誤差較大。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以艾維尼(2006)相差最多。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 *RMSE* 最大為雷馬遜(2002)，其誤差達 1.27m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以杜蘇芮(2012)和啟德(2012)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 $\Delta H_{s,p}$ 約為 0.77m，最大波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 24.53 小時，*RMSE* 約為 0.66m，決定係數 R^2 約為 0.45。

由表 3.14 中得知，颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以馬莎(2005)颱風誤差較大。最大波高發生時間誤差 Δt_p 以尹布都(2003)相差最多。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差 *RMSE* 最大為尤特(2001)，其誤差達 1.58m。推算波高結果與實測波高的決定係數 R^2 以泰利(2012)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 $\Delta H_{s,p}$ 約為 1.04m，最大波高發生時間誤差絕對值 Δt_p 約為 16.55 小時，*RMSE* 約為 0.71m，決定係數 R^2 約為 0.57。

表 3.13 臺北港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	<i>RMSE</i>	R^2	H_{max} (m)
1998	楊妮	YANNI	-0.87	9	0.54	0.26	3.19
1998	芭比絲	BABS	-4.61	6	0.85	0.52	8.75
2000	碧利斯	BILIS	0.91	-12	0.83	0.61	1.74
2000	寶發	BOPHA	-0.38	-20	0.77	0.67	4.27
2001	西馬隆	CIMARON	-0.02	44	0.76	0.06	2.43
2001	尤特	UTOR	1.49	-5	1.07	0.55	1.33
2001	潭美	TRAMI	-0.26	-54	0.19	0.01	0.53
2001	利奇馬	LEKIMA	-0.09	-79	0.71	0.15	3.32
2002	雷馬遜	RAMMASUN	1.93	-7	1.27	0.71	2.21
2003	柯吉拉	KUJIRA	-0.09	7	0.21	0.88	1.95

2003	南卡	NANGKA	0.15	56	0.40	0.53	1.4
2003	莫拉克	MORAKOT	0.47	-11	0.33	0.20	0.46
2003	梵高	VAMCO	0.89	17	0.85	0.03	0.61
2003	杜鵑	DUJUAN	1.31	-14	0.84	0.69	1.21
2003	米勒	MELOR	0.71	9	0.59	0.49	2.63
2004	康森	CONSON	0.26	53	0.39	0.49	1.56
2004	康柏斯	KOMPASU	-0.13	-10	0.28	0.06	0.95
2004	蘭寧	RANANIM	0.17	-19	0.89	0.69	3.29
2004	艾利	AERE	-2.40	-9	0.92	0.49	6.11
2005	海棠	HAITANG	-0.64	-13	0.90	0.59	4.01
2005	馬莎	MATSA	-1.49	-1	0.80	0.67	5.03
2005	珊瑚	SANVU	0.98	-53	0.95	0.14	1.14
2005	泰利	TALIM	-0.66	-9	0.67	0.72	4.08
2005	卡努	KHANUN	-0.33	-16	0.63	0.46	3.19
2005	丹瑞	DAMREY	0.56	-53	0.59	0.35	1.65
2005	龍王	LONGWANG	-0.34	0	0.56	0.48	2.95
2006	艾維尼	EWINIAR	1.84	153	0.71	0.11	1.81
2006	碧利斯	BILIS	0.74	-21	1.14	0.45	2.91
2006	凱米	KAEMI	0.69	5	0.48	0.41	1.08
2006	桑美	SAOMAI	0.22	-45	0.65	0.34	1.88
2006	寶發	BOPHA	0.22	-45	0.69	0.31	1.88
2007	梧提	WUTIP	1.27	15	1.06	0.58	0.93
2007	韋帕	WIPHA	-0.59	-15	0.79	0.62	4.13
2008	卡玫基	KALMAEGI	0.07	-9	0.37	0.58	2.2
2008	如麗	NURI	0.52	12	0.37	0.66	1.49
2009	蓮花	LINFA	-0.30	-11	0.40	0.50	2.66
2009	莫拉菲	MOLAVE	0.76	2	0.53	0.69	0.81
2009	莫拉克	MORAKOT	-0.23	-2	0.88	0.74	4.19

2009	芭瑪	PARMA	0.41	35	0.61	0.64	3.22
2010	萊羅克	LIONROCK	-0.89	66	0.56	0.04	2.14
2010	南修	NAMTHEUN	-1.59	25	0.81	0.01	2.14
2010	莫蘭蒂	MERANTI	0.19	-2	0.41	0.46	1.6
2010	梅姬	MEGI	0.03	-3	0.55	0.64	3.65
2011	艾利	AERE	-0.64	1	0.26	0.69	1.87
2011	米雷	MEARI	-0.21	-10	0.72	0.59	3.29
2011	南瑪都	NANMADOL	0.59	3	0.62	0.74	1.75
2012	泰利	TALIM	-1.29	-1	0.49	0.20	3.02
2012	杜蘇芮	DOKSURI	-0.18	97	0.30	0.00	1.22
2012	蘇拉	SAOLA	-0.12	-22	0.81	0.74	3.75
2012	海葵	HAIKUI	-0.15	-1	0.83	0.50	3.75
2012	啟德	KAI-TAK	0.07	-58	0.31	0.00	0.92
2012	天秤	TEMBIN	1.01	80	0.81	0.61	2.4
2012	杰拉華	JELAWAT	-1.14	1	0.54	0.74	4.9
2013	蘇力	SOULIK	-3.82	-16	0.85	0.53	6.94
2013	西馬隆	CIMARON	-0.84	57	0.54	0.01	1.43
2013	潭美	TRAMI	0.14	-14	0.79	0.62	3.46
2013	康芮	KONGREY	-0.41	-4	0.51	0.38	1.98
2013	天兔	USAGI	0.60	10	0.83	0.38	2.5
2013	菲特	FITOW	-1.35	-20	0.70	0.50	4.97
絕對平均值			0.77	24.53	0.66	0.45	2.66

表 3.14 基隆港數值模式之波浪推算結果驗證

年份	中文名稱	英文名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R^2	H_{max} (m)
2001	尤特	UTOR	3.02	-5	1.58	0.75	1.78
2002	雷馬遜	RAMMASUN	-0.66	-14	1.21	0.55	6.78
2003	尹布都	IMBUDO	0.67	143	0.53	0.08	1.59
2003	杜鵑	DUJUAN	1.21	-10	0.88	0.83	2.5
2003	米勒	MELOR	-0.84	16	0.70	0.60	3.81
2004	敏督利	MINDULLE	1.72	-2	0.76	0.42	1.43
2004	艾利	AERE	-2.41	-16	0.99	0.44	6.82
2004	納坦	NOCK-TEN	0.91	2	0.87	0.49	4.97
2004	南瑪都	NANMADOL	0.84	1	0.65	0.55	3.43
2005	海棠	HAITANG	0.76	-2	0.91	0.80	5.8
2005	馬莎	MATSA	-4.15	-18	1.00	0.43	7.41
2005	泰利	TALIM	-0.78	7	0.59	0.83	5.44
2005	龍王	LONGWANG	0.99	-3	0.62	0.57	3.05
2006	珊珊	SHANSHAN	-1.92	6	0.86	0.48	4.67
2007	聖帕	SEPAT	0.14	-6	0.42	0.79	2.51
2007	柯羅莎	KROSA	-1.25	-15	0.94	0.48	7.06
2008	鳳凰	FUNG-WONG	2.16	-1	1.09	0.89	3.19
2008	如麗	NURI	0.55	6	0.32	0.66	0.58
2008	辛樂克	SINLAKU	-0.10	-33	0.85	0.44	4.19
2008	薔蜜	JANGMI	0.67	-20	0.79	0.66	4.78
2009	蓮花	LINFA	-0.17	-12	0.17	0.02	0.92
2009	莫拉克	MORAKOT	2.30	-4	0.98	0.94	4.51
2010	萊羅克	LIONROCK	-0.68	45	0.47	0.05	1.77
2010	莫蘭蒂	MERANTI	0.43	15	0.29	0.64	1.03
2010	凡那比	FANAPI	-0.07	-13	0.64	0.74	3.29
2010	梅姬	MEGI	-0.81	-6	0.65	0.61	4.94

2011	艾利	AERE	0.11	-2	0.22	0.58	1.23
2011	桑達	SONGDA	-0.28	-5	0.46	0.83	4.29
2011	米雷	MEARI	-0.04	-14	0.85	0.26	3.31
2011	梅花	MUIFA	0.92	-13	0.50	0.81	3.52
2011	南瑪都	NANMADOL	0.82	2	0.58	0.86	2.36
2012	泰利	TALIM	-1.51	-11	0.46	0.00	2.62
2012	杜蘇芮	DOKSURI	0.42	-2	0.34	0.68	1.12
2012	蘇拉	SAOLA	0.51	-13	1.08	0.64	4.87
2012	海葵	HAIKUI	-1.91	101	0.76	0.44	4.87
2012	啟德	KAI-TAK	0.70	-5	0.42	0.67	0.83
2012	天秤	TEMBIN	1.74	-34	0.95	0.51	2.5
2012	杰拉華	JELAWAT	-0.50	-6	0.58	0.78	5.55
絕對平均值			1.04	16.55	0.71	0.73	3.56

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，本研究本年度針對臺北港與機基隆港兩港域，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。

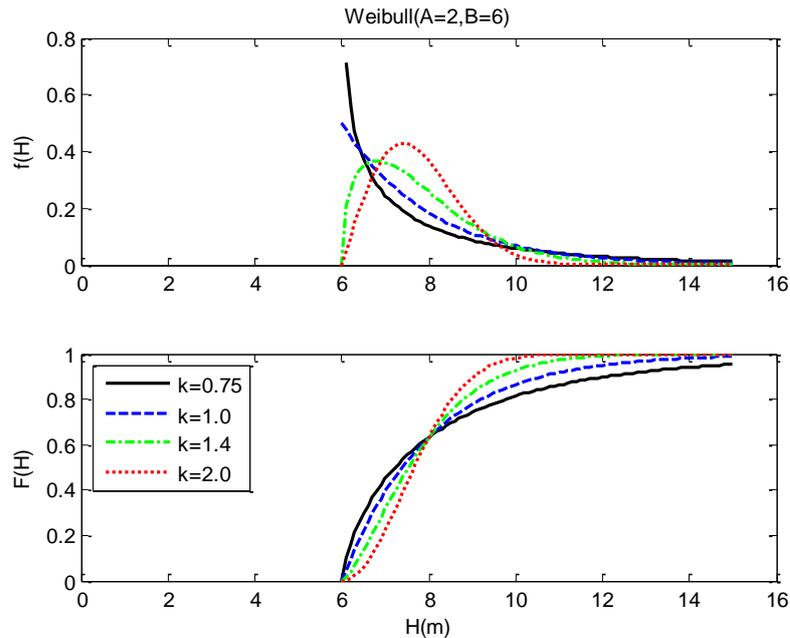


圖 4.1 常數 k 在不同情況下的機率密度表現

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

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

α 及 β 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 α 及 β 值

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

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

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

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

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

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

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 σ_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 σ_z 乘以樣本 x 之標準差 σ_x ，當做推算偏差量

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

Gumbel、GEV 及 Weibull 分佈之標準差 σ_z 為：

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

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 σ_z 則為：

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

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

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 臺北港的推算結果

在臺北港的推算方面，有關長期觀測波浪資料為本所港研中心在臺北港自 1996 起至 2013 年共 18 年的觀測所得；如上所述，並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等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(Annual Max, AM)，與超量門檻選用法(Peaks Over Threshold Method, POT)兩種方式進行極值樣本的取樣，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。以四種樣本來源的年極值樣本各 18 筆進行各重現期的分析，結果如表 4.4 所示。

表 4.4 臺北港年極值取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	類神經樣本(ANN)				實測資料樣本(OBS)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(<i>m</i>)		0.70	0.83	0.57	0.75	0.54	0.81	0.58	0.63
RMSE(<i>m</i>)		0.28	0.33	0.24	0.27	0.27	0.36	0.26	0.30
ER (<i>m</i>)		0.56	0.86	0.61	0.29	0.09	0.40	0.29	0.33
$x_R(m)$	10	6.63	6.55	6.70	6.59	7.24	7.14	7.28	7.49
	25	7.75	7.83	7.82	7.62	8.49	8.57	8.27	8.85
	50	8.58	8.87	<u>8.61</u>	8.38	<u>9.42</u>	9.73	8.93	9.86
	100	9.40	9.98	9.36	9.12	10.34	10.95	9.54	10.86
	200	10.22	11.16	10.08	9.85	11.25	12.26	10.10	11.87
$\sigma (m)$	10	0.77	0.93	0.87	0.48	0.86	1.03	0.77	0.54
	25	1.04	1.33	1.13	0.57	1.15	1.47	0.93	0.64
	50	1.25	1.66	<u>1.32</u>	0.64	<u>1.38</u>	1.84	1.04	0.71
	100	1.45	2.02	1.49	0.70	1.61	2.24	1.14	0.78
	200	1.66	2.40	1.67	0.76	1.84	2.66	1.24	0.84
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>)		2.10	2.60	2.08	1.20	1.59	2.21	1.23	0.91
RMSE(<i>m</i>)		0.11	0.13	0.10	0.07	0.22	0.28	0.18	0.16
ER (<i>m</i>)		0.18	0.23	0.11	0.10	0.52	0.64	0.38	0.47
$x_R(m)$	10	4.21	4.18	4.22	4.22	5.48	5.42	5.52	5.57
	25	4.44	4.45	4.41	4.40	6.06	6.07	5.98	6.08
	50	4.62	4.66	4.53	<u>4.52</u>	6.48	6.59	6.29	<u>6.43</u>
	100	4.79	4.89	4.65	4.63	6.91	7.14	6.57	6.77
	200	4.96	5.13	4.76	4.73	7.33	7.74	6.83	7.09
$\sigma (m)$	10	0.17	0.20	0.15	0.11	0.41	0.49	0.36	0.25
	25	0.23	0.29	0.18	0.13	0.55	0.70	0.44	0.30
	50	0.27	0.36	0.21	<u>0.14</u>	0.65	0.87	0.49	<u>0.34</u>
	100	0.32	0.44	0.23	0.15	0.76	1.06	0.54	0.37
	200	0.36	0.53	0.24	0.17	0.87	1.26	0.59	0.40

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，其結果顯示類神經樣本及實測資料樣本分別是以 Weibull 分布與 FT-I 分布為最適分布，其他則以

Log-normal 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。類神經樣本、實測資料樣本、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 8.61m、9.42m、4.52m 及 6.43m。標準差部分分別為 1.32m、1.38m、0.14m 與 0.34m。年極值取樣法四種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖，如圖 4.2 至圖 4.5 所示。圖中顯示各極值分布與樣本資料間的回歸近似情況，臺北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。

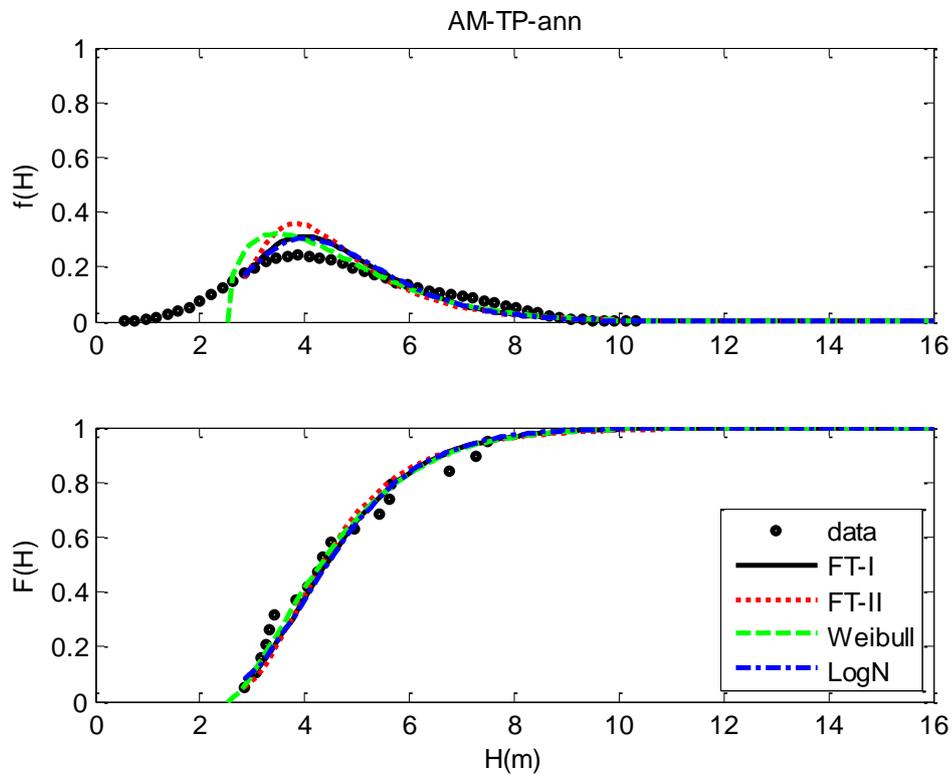


圖 4.2 年極值取樣法在臺北港類神經推算結果之機率密度函數圖

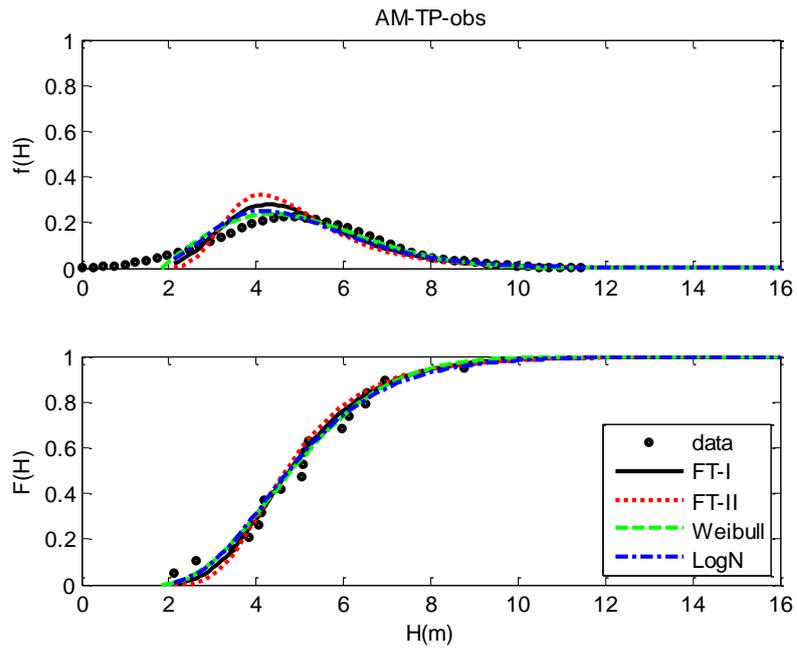


圖 4.3 年極值取樣法在臺北港實測資料之機率密度函數圖

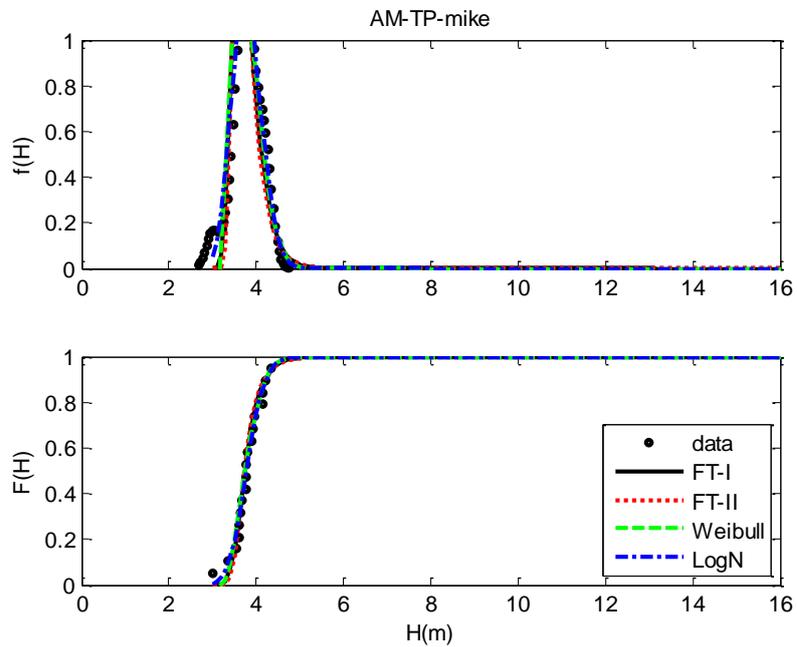


圖 4.4 年極值取樣法在臺北港二維數值推算結果之機率密度函數圖

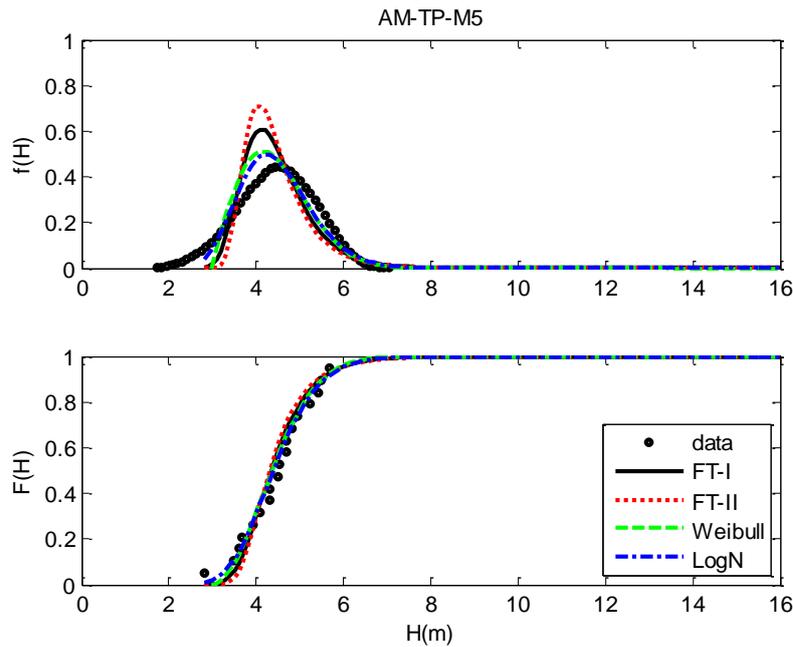


圖 4.5 採年極值取樣法在臺北港 M5 模式樹推算結果之機率密度函數圖

除年極值取樣法外，本研究另採用超量門檻取樣法對臺北港四種樣本來源共 18 年的資料中進行取樣，以各樣本來源年極值中的最小值做為門檻值，取樣所得類神經樣本、實測資料樣本、二維數值模式樣本及 M5 最小化模式樹樣本分別為 44、106、48 及 74 筆。並將此結果進行各重現期的分析，結果如表 4.5 所示，表中灰階底色部分顯示在三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，其結果顯示類神經與實測資料樣本皆是以 Weibull 分布為最適分布。而二維數值模式樣本的最適分布則為 Log-normal 分布。M5 樣本各種分布的表現都較差，整體而言以 FT-I 較為合適。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。類神經樣本、實測資料樣本、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 8.59m、9.13m、4.42 與 6.48m，標準差部分分別為 1.15m、0.89m、0.09 與 0.22m。超量門檻取樣法三種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖，如圖 4.6 至圖 4.9 所示。圖中顯示四種樣本可找到最適分布，但 M5 最小化模式樹樣本各種分布的擬合結果都較差。

表 4.5 臺北港超量門檻取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	類神經樣本(ANN)				實測資料樣本(OBS)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(m)		1.73	0.87	0.59	3.38	1.95	0.46	0.32	3.92
RMSE(m)		0.27	0.25	0.17	0.35	0.22	0.16	0.10	0.30
ER (m)		0.00	1.01	0.64	0.78	0.98	0.85	0.09	1.83
$x_R(m)$	10	6.43	6.50	6.69	6.02	6.67	7.14	7.16	6.14
	25	7.27	7.78	7.77	6.63	7.54	8.71	8.28	6.82
	50	7.90	8.92	<u>8.59</u>	7.06	8.19	10.09	<u>9.13</u>	7.33
	100	8.52	10.21	9.41	7.49	8.84	11.68	9.98	7.84
	200	9.15	11.71	10.23	7.92	9.49	13.51	10.83	8.35
$\sigma (m)$	10	0.49	0.75	0.75	0.29	0.40	0.71	0.63	0.22
	25	0.62	1.06	0.97	0.33	0.49	0.96	0.78	0.25
	50	0.71	1.34	<u>1.15</u>	0.36	0.55	1.19	<u>0.89</u>	0.27
	100	0.81	1.66	1.32	0.39	0.61	1.44	1.01	0.29
	200	0.91	2.03	1.49	0.42	0.68	1.74	1.12	0.31
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)		1.93	2.50	1.92	1.15	9.86	4.58	6.50	23.27
RMSE(m)		0.07	0.09	0.06	0.05	0.19	0.28	0.23	0.24
ER (m)		0.19	0.30	0.07	0.02	0.59	2.32	1.66	0.14
$x_R(m)$	10	4.25	4.26	4.22	4.19	5.76	6.15	6.28	5.28
	25	4.46	4.52	4.37	4.33	6.17	7.19	7.02	5.51
	50	4.62	4.74	4.47	<u>4.42</u>	<u>6.48</u>	8.19	7.62	5.68
	100	4.78	4.97	4.57	4.51	6.79	9.42	8.23	5.84
	200	4.94	5.21	4.66	4.59	7.11	10.93	8.86	5.99
$\sigma (m)$	10	0.12	0.16	0.10	0.07	0.17	0.44	0.43	0.09
	25	0.15	0.21	0.11	0.08	0.20	0.62	0.55	0.10
	50	0.18	0.26	0.12	<u>0.09</u>	<u>0.22</u>	0.79	0.64	0.10
	100	0.20	0.30	0.13	0.10	0.24	1.01	0.73	0.11
	200	0.22	0.35	0.14	0.10	0.26	1.27	0.83	0.12

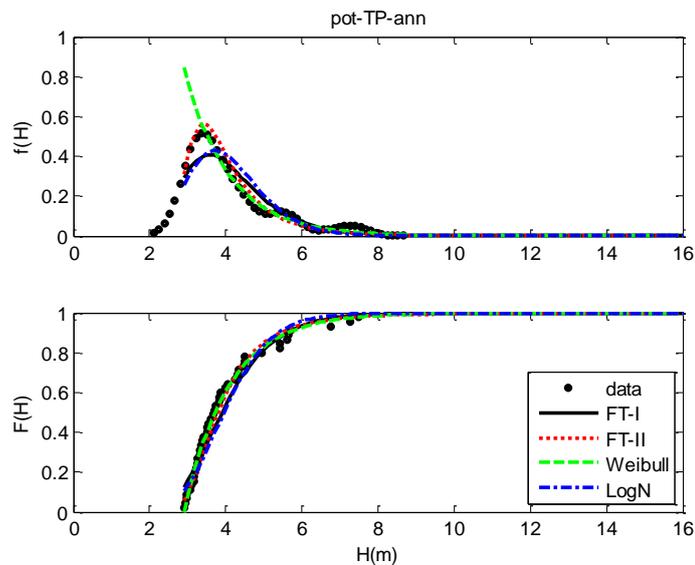


圖 4.6 超量門檻取樣法在臺北港類神經推算結果之機率密度函數圖

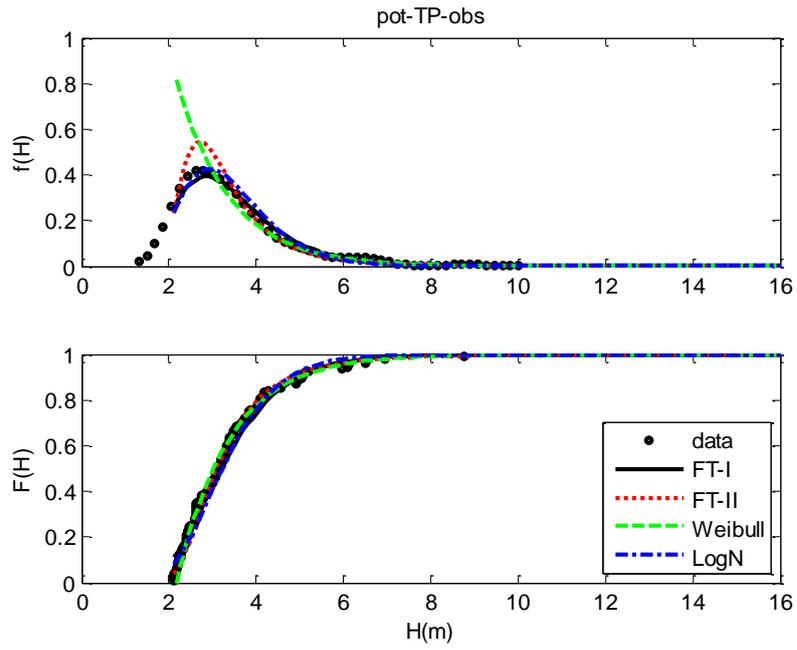


圖 4.7 超量門檻取樣法在臺北港實測資料之機率密度函數圖

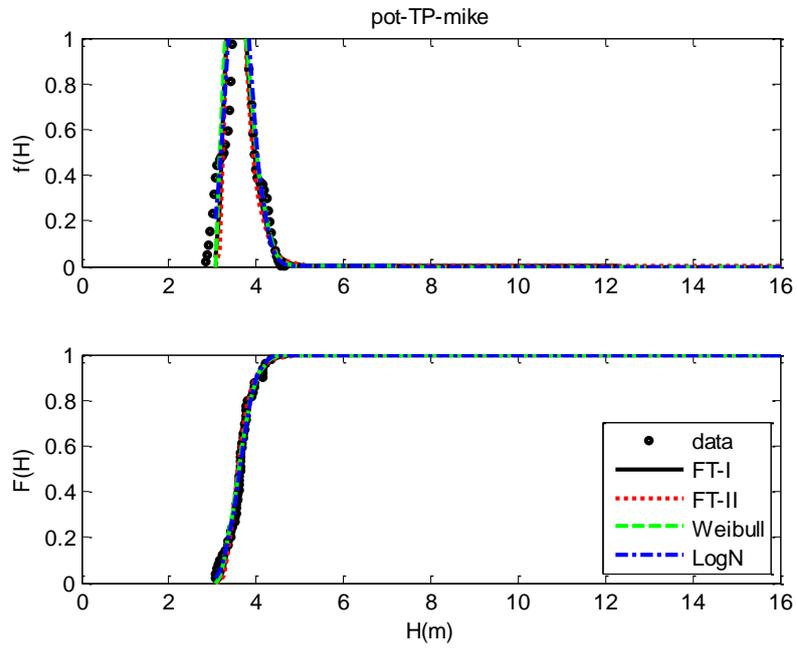


圖 4.8 超量門檻取樣法在臺北港二維數值模式推算結果之機率密度函數圖

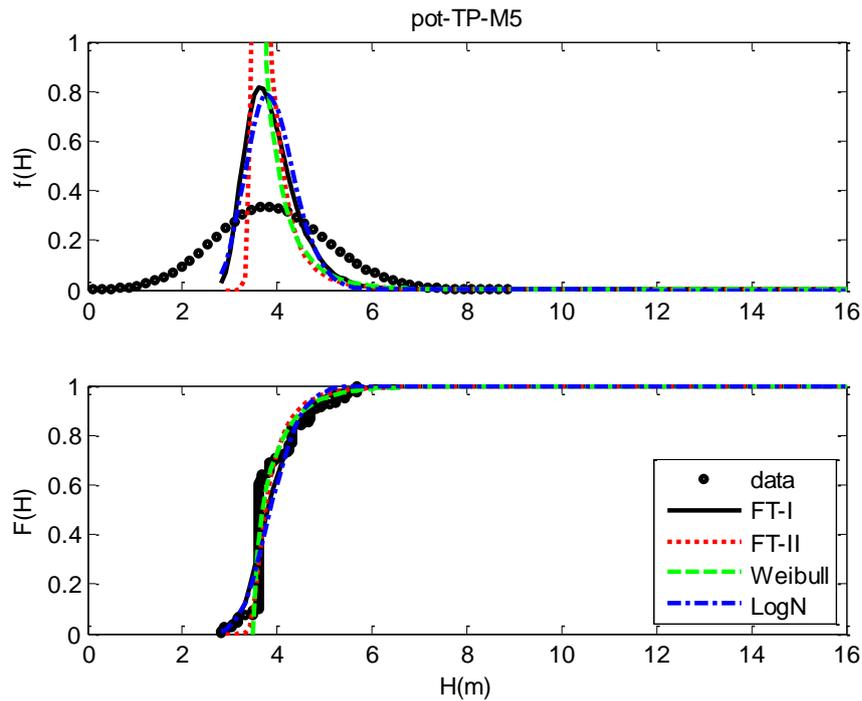


圖 4.9 超量門檻取樣法在臺北港 M5 模式樹推算結果之機率密度函數圖

表 4.6 為上述各種極值分析結果的比較，由表中結果顯示，四種樣本的 50 年重現期極值波高以實測資料最高、類神經樣本與 M5 樣本次之而二維數值模式樣本則由於其推算結果有低估的現象而較小；標準差則以類二維數值模式樣本與 M5 樣本較小，實測資料與類神經樣本較大。此外在年極值取樣法與超量門檻值取樣法的比較中，可以發現超量門檻值取樣法推求的 50 年重現期極值波高除 M5 樣本相近之外，其他三種樣本皆會略小於年極值取樣法，且其標準差明顯小於年極值取樣法，顯示超量門檻取樣法因能客觀選取樣本而進行極值分析後所獲得的極值波高較年極值取樣法可靠。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，此可參酌前節 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 4.6 臺北港四種樣本來源以兩種取樣方式的極值分析結果

樣本來源	取樣方式	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)		
類神經樣本	年極值取樣	8.61	1.32	6.44~10.78	7.62~11.96
	超量取樣	8.59	1.15	6.70~10.48	7.88~11.66
實測資料	年極值取樣	9.42	1.38	7.14~11.70	8.32~12.88
	超量取樣	9.13	0.89	7.66~10.60	8.84~11.78
二維數值模式	年極值	4.52	0.14	4.29~4.75	5.47~5.93
	超量取樣	4.42	0.09	4.27~4.57	5.45~5.75
M5 樣本	年極值	6.43	0.34	5.88~6.99	7.06~8.17
	超量取樣	6.48	0.22	6.12~6.84	7.30~8.02

4.2.2 基隆港的推算結果

在基隆港的推算方面，有關長期觀測波浪資料為本所港研中心在基隆港自 1999 起至 2012 年共 14 年的觀測所得；同樣，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，與超量門檻選用法兩種方式進行極值樣本的取樣，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。此外由於基隆港實測資料中有缺少 2000 整年的資料，為確保後續分析能進行故以其他各年年極值之平均值作代表。以四種樣本來源的年極值樣本各 14 筆進行各重現期的分析，結果如表 4.7 所示。表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皆以 Weibull 分布為最適分布，類神經樣本與 M5 樣本則是分別以 FT-II 分布及 Log-normal 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。類神經樣本、實測資料樣本、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 8.65m、

13.54m、7.94m 及 7.80m。標準差部分分別為 1.65m、2.62m、0.87m 與 0.47m。年極值取樣法四種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖，如圖 4.10 至圖 4.13。圖中顯示各極值分布與樣本資料間的回歸近似情況，基隆港四種樣本之年極值樣本皆可找到最適分布來進行後續分析。

表 4.7 基隆港年極值取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	類神經樣本(ANN)				實測資料樣本(OBS)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(<i>m</i>)		0.74	0.64	0.99	0.97	1.28	1.12	1.04	1.43
RMSE(<i>m</i>)		0.26	0.26	0.29	0.28	0.67	0.67	0.59	0.70
ER (<i>m</i>)		0.39	0.16	0.36	0.62	0.50	0.94	0.64	0.12
$x_R(m)$	10	6.67	6.62	6.70	6.65	10.23	10.13	10.35	9.98
	25	7.63	7.74	7.66	7.50	12.08	12.29	12.22	11.64
	50	8.35	<u>8.65</u>	8.34	8.10	13.46	14.02	<u>13.54</u>	12.86
	100	9.06	9.61	8.98	8.68	14.82	15.88	14.79	14.06
	200	9.77	10.64	9.59	9.25	16.18	17.85	15.98	15.26
$\sigma (m)$	10	0.78	0.92	0.88	0.47	1.52	1.79	1.73	0.92
	25	1.05	1.32	1.15	0.56	2.05	2.57	2.25	1.09
	50	1.26	<u>1.65</u>	1.34	0.62	2.46	3.22	<u>2.62</u>	1.22
	100	1.47	2.00	1.53	0.68	2.87	3.91	2.98	1.33
	200	1.68	2.38	1.70	0.74	3.28	4.65	3.33	1.45
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>)		1.58	2.18	1.13	1.14	3.24	3.93	2.76	2.38
RMSE(<i>m</i>)		0.35	0.43	0.27	0.29	0.40	0.47	0.35	0.34
ER (<i>m</i>)		0.80	0.92	0.63	0.84	0.84	0.92	0.73	0.89
$x_R(m)$	10	6.75	6.65	6.79	6.91	6.60	6.51	6.65	6.76
	25	7.60	7.62	7.48	7.73	7.26	7.25	7.19	7.37
	50	8.23	8.39	<u>7.94</u>	8.31	7.75	7.84	7.55	<u>7.80</u>
	100	8.86	9.22	8.36	8.87	8.24	8.48	7.88	8.20
	200	9.49	10.10	8.75	9.41	8.73	9.16	8.19	8.59
$\sigma (m)$	10	0.70	0.83	0.64	0.43	0.58	0.67	0.52	0.35
	25	0.95	1.20	0.77	0.51	0.78	0.97	0.64	0.42
	50	1.14	1.50	<u>0.87</u>	0.57	0.94	1.21	0.71	<u>0.47</u>
	100	1.33	1.82	0.95	0.62	1.10	1.48	0.79	0.51
	200	1.53	2.17	1.04	0.67	1.26	1.77	0.85	0.55

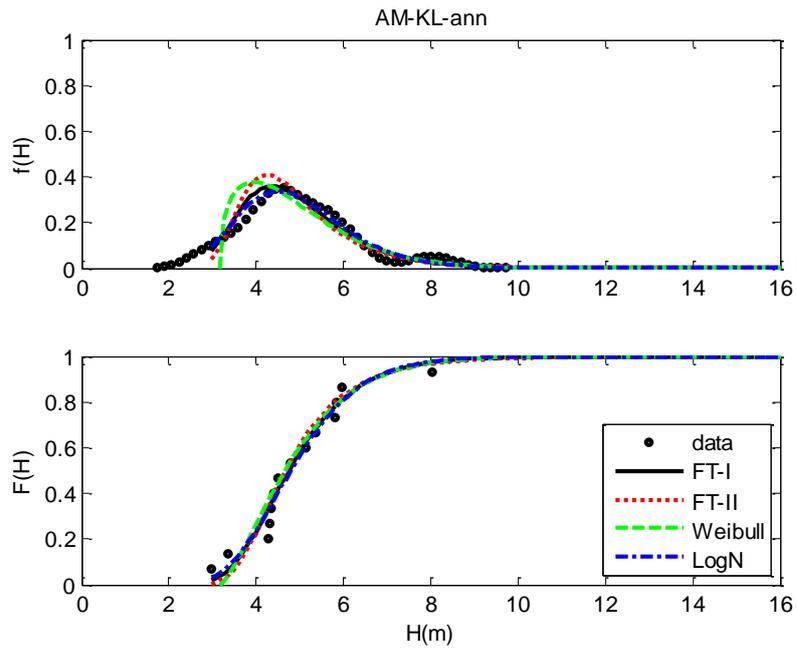


圖 4.10 年極值取樣法在基隆港類神經推算結果之機率密度函數圖

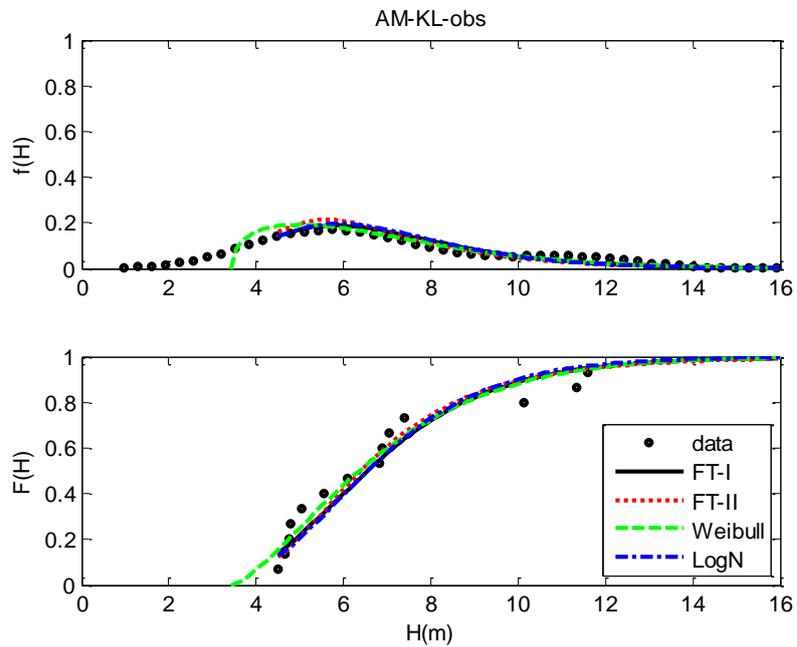


圖 4.11 年極值取樣法在基隆港實測資料之機率密度函數圖

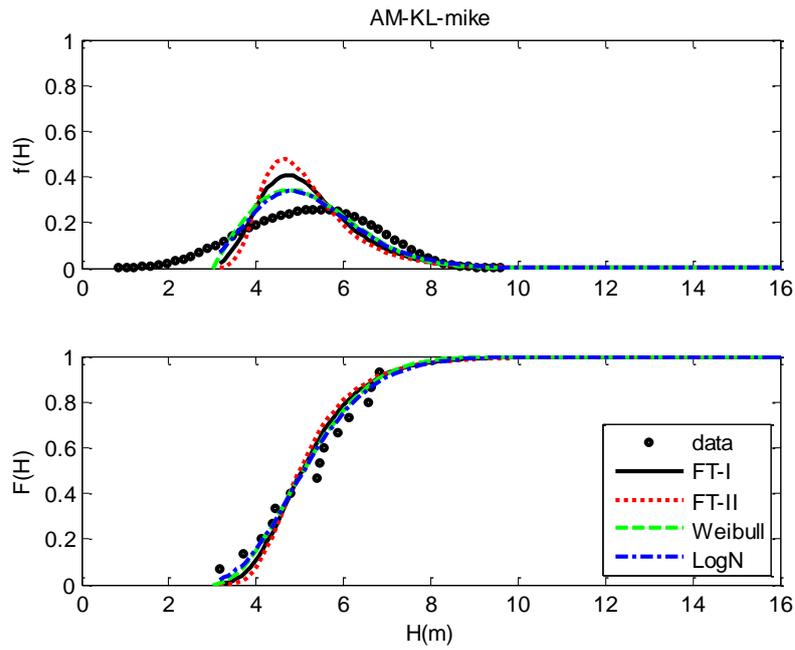


圖 4.12 年極值取樣法在基隆港二維數值模式推算結果之機率密度函數圖

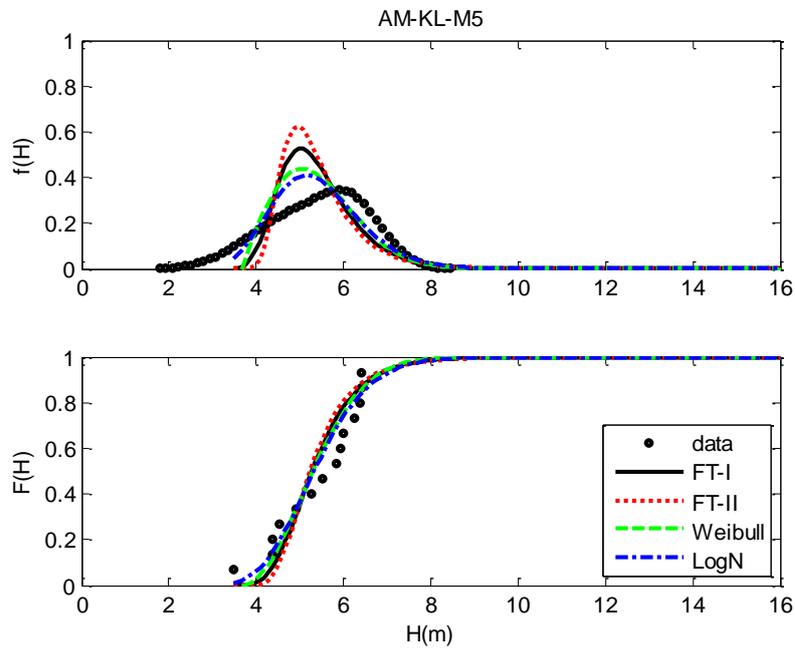


圖 4.13 年極值取樣法在基隆港 M5 模式樹推算結果之機率密度函數圖

除年極值取樣法外，本研究同樣另採用超量門檻取樣法對基隆港四種樣本來源共 14 年的資料中進行取樣，以各樣本來源年極值中的最

小值做為門檻值，取樣所得類神經樣本、實測資料樣本、二維數值模式樣本及 M5 最小化模式樹樣本分別為 49、32、44 及 80 筆。並將此結果進行各重現期的分析，結果如表 4.8 所示。

表 4.8 基隆港超量門檻取樣法之各重現期分析結果

Index	T (yr)	類神經樣本(ANN)				實測資料樣本(OBS)			
		FT-I	FT-II	Weibull	LogN	FT-I	FT-II	Weibull	LogN
MIR(m)		1.12	0.49	1.16	2.77	2.54	0.97	0.81	4.33
RMSE(m)		0.17	0.15	0.19	0.24	0.58	0.45	0.40	0.73
ER (m)		0.90	0.02	0.43	1.49	0.39	1.03	1.45	1.70
$x_R(m)$	10	6.46	6.62	6.69	6.13	9.86	10.01	10.35	9.06
	25	7.13	7.73	7.54	6.59	11.20	12.10	12.65	10.00
	50	7.63	<u>8.71</u>	8.19	6.93	12.21	13.95	<u>14.51</u>	10.68
	100	8.13	9.83	8.83	7.26	13.22	16.06	16.46	11.35
	200	8.64	11.11	9.48	7.58	14.23	18.49	18.51	12.00
$\sigma (m)$	10	0.41	0.65	0.63	0.23	0.93	1.41	2.12	0.55
	25	0.50	0.91	0.80	0.26	1.18	2.01	2.96	0.63
	50	0.57	<u>1.13</u>	0.93	0.29	1.37	2.54	<u>3.65</u>	0.69
	100	0.65	1.39	1.06	0.31	1.56	3.15	4.37	0.75
	200	0.72	1.69	1.19	0.33	1.75	3.85	5.13	0.80
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)		1.04	1.28	0.83	1.46	11.21	6.06	8.34	23.76
RMSE(m)		0.18	0.23	0.15	0.19	0.22	0.33	0.22	0.26
ER (m)		0.64	1.02	0.64	0.15	0.90	2.50	1.39	0.13
$x_R(m)$	10	6.72	6.79	6.78	6.48	6.89	7.33	7.23	6.35
	25	7.45	7.73	7.46	7.02	7.32	8.44	7.78	6.57
	50	8.00	8.49	<u>7.95</u>	7.42	7.65	<u>9.51</u>	8.20	6.74
	100	8.55	9.30	8.42	7.81	7.97	10.83	8.62	6.90
	200	9.10	10.18	8.87	8.19	8.30	12.45	9.03	7.05
$\sigma (m)$	10	0.45	0.60	0.48	0.26	0.19	0.51	0.30	0.10
	25	0.56	0.80	0.58	0.30	0.22	0.72	0.36	0.11
	50	0.65	0.95	<u>0.64</u>	0.32	0.25	<u>0.92</u>	0.40	0.11
	100	0.73	1.12	0.71	0.35	0.27	1.17	0.45	0.12
	200	0.82	1.30	0.78	0.37	0.30	1.47	0.49	0.13

表中灰階底色部分顯示在三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，其結果與年極值取樣法的結果接近，實測資料樣本與二維數值模式樣本皆是以 Weibull 分布為最適分布。而類神經樣本則為 FT-II 分布。M5 樣本各種分布的表現都較差，整體而言以 FT-II 較為合適。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。類神經樣本、實測資料樣本、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

8.71m、14.51m、7.95m 與 9.51m，標準差部分分別為 1.13m、3.65m、0.64 與 0.92m。超量門檻取樣法四種樣本來源的各種機率密度函數與機率函數圖，如圖 4.14 至圖 4.17。圖中顯示三種樣本可找到最適分布，但 M5 最小化模式樹樣本各種分布的擬合結果都較差。

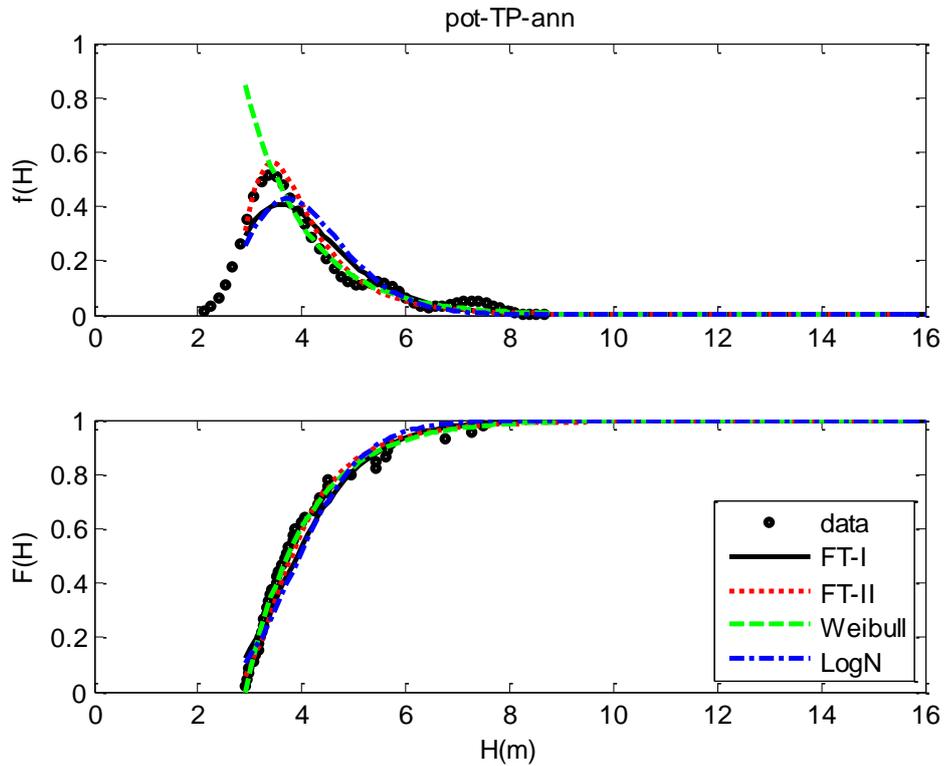


圖 4.14 超量門檻取樣法在基隆港類神經推算結果之機率密度函數圖

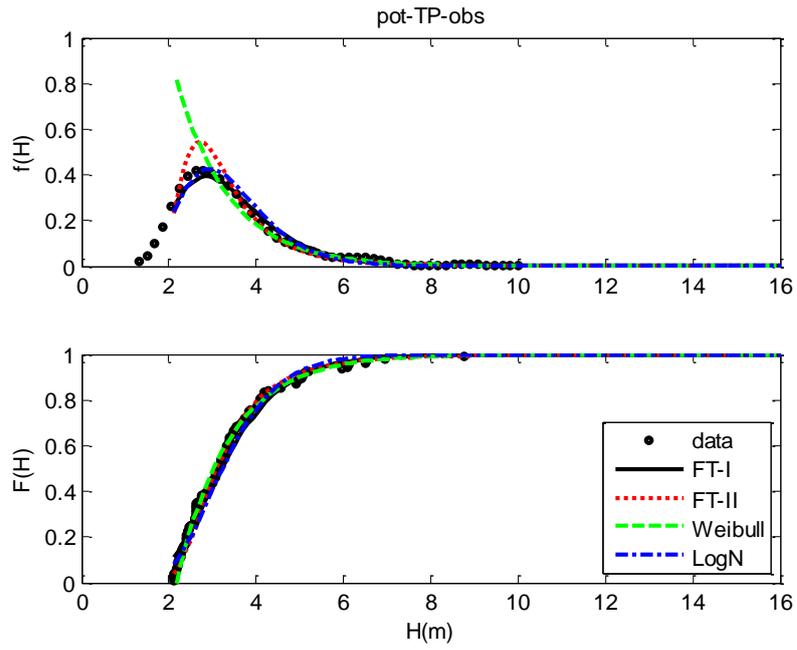


圖 4.15 超量門檻取樣法在基隆港實測資料之機率密度函數圖

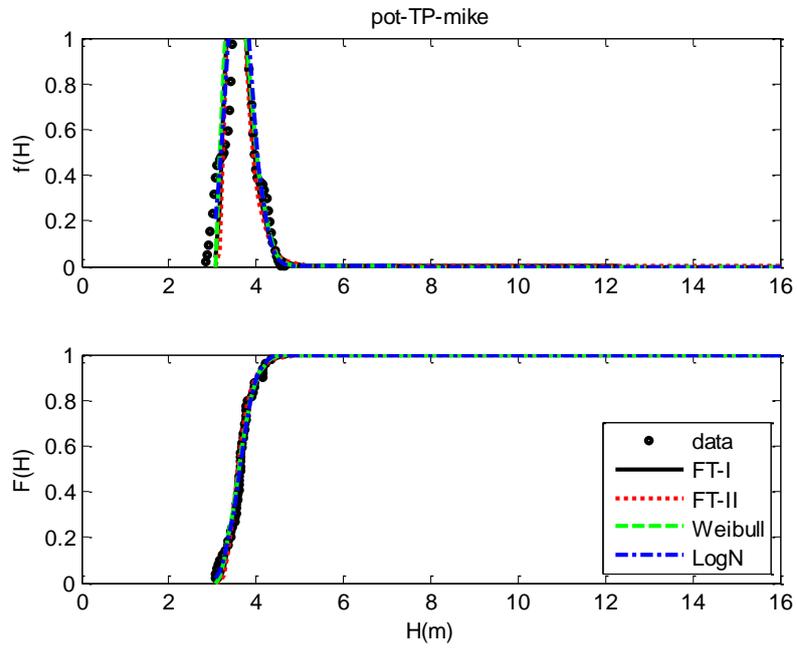


圖 4.16 超量門檻取樣法在基隆港二維數值推算結果之機率密度函數圖

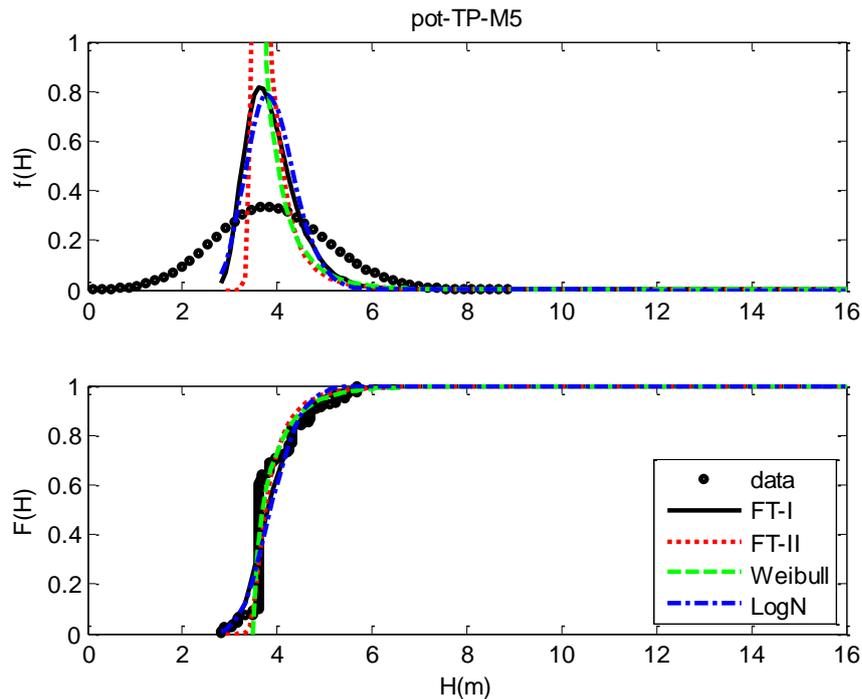


圖 4.17 超量門檻取樣法在基隆港 M5 模式樹推算結果之機率密度函數圖

表 4.9 為上述各種極值分析結果的比較，由表中結果顯示，四種樣本的 50 年重現期極值波高以實測資料最高、類神經樣本、M5 樣本與二維數值模式樣本則較為接近；標準差則以類二維數值模式樣本與 M5 樣本較小，類神經樣本次之，而實測資料最大。此外在年極值取樣法與超量門檻值取樣法的比較中，可以發現超量門檻值取樣法推求的 50 年重現期極值波高除 M5 樣本有較大差異外，其他三種樣本皆與年極值取樣法的結果接近，而其標準差再類神經樣本與二維數值模式樣本中以超量門檻值選用法較小，實測資料樣本與 M5 樣本則相反。此結論與往昔研究中的有所差異，在去年度(102 年)與本年度的花蓮、蘇澳與臺北港分析中皆顯示超量門檻取樣法因能客觀選取較多樣本而使各重現期的標準差較小。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，參酌前節 Seasonal Kendall 趨勢檢定法所分析波浪長期變遷趨勢結果顯示基隆港並無明顯變遷，故估算在氣候變遷的影響下 50 年的波高變化量即為考慮長期變遷的設計波標準。

表 4.9 基隆港四種樣本來源以兩種取樣方式的極值分析結果

樣本來源	取樣方式	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)		
類神經樣本	年極值取樣	8.65	1.65	5.93~11.36	5.42~11.87
	超量取樣	8.71	1.13	6.84~10.57	6.49~10.92
實測資料	年極值取樣	13.54	2.62	9.21~17.87	8.39~18.68
	超量取樣	14.51	3.65	8.49~20.53	7.35~21.66
二維數值模式	年極值	7.94	0.87	6.51~9.38	6.24~9.64
	超量取樣	7.95	0.64	6.88~9.01	6.68~9.21
M5 樣本	年極值	7.80	0.47	7.03~8.57	6.89~8.71
	超量取樣	9.51	0.92	8.00~11.03	7.71~11.31

第五章 港灣防波堤構造物安全評估探討

國內現有國際港口之防波堤的使用年齡，已逐漸到達原先設計之使用年限，且又受颱風、地震與東北季風波浪侵襲，造成堤面與胸牆處處龜裂，堤體有下陷及淘空情形，經年須花費龐大經費進行維修與復建，以維持構造物安全與港口正常營運。為港口整體規劃及未來發展，有必要進行外廓防波堤之長期監測與安全評估，用以減輕維修經費，避免港內設施與船隻之損壞。

本研究應用往昔計畫於花蓮港、高雄港與蘇澳港辦理外廓防波堤構造物安全評估之經驗，本年度(103年)辦理基隆港外廓防波堤沉箱辦理相關評估探討工作。本項工作主要包含現場圖像監測調查，用以觀察比較結構物損害情況，並據以進行其防波堤沉箱之安全性評估探討與研擬結構物損壞的補強方案，期望未來能提供港務單位瞭解防波堤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。

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，尤其接近政治、經濟中心之大台北都會區，都會週邊又密佈各類型工業區，腹地廣大，人口稠密，資源豐富，向為台灣高價值貨物吞吐最主要之門戶，港埠地位甚為顯要。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。而基隆港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。

本研究將針對基隆港之外廓防波堤(如圖 5.1 所示)辦理現場圖像資料調查，及檢討原有結構物之設計條件，瞭解結構物破壞之可能原因，並研擬短期的修護措施等項工作。

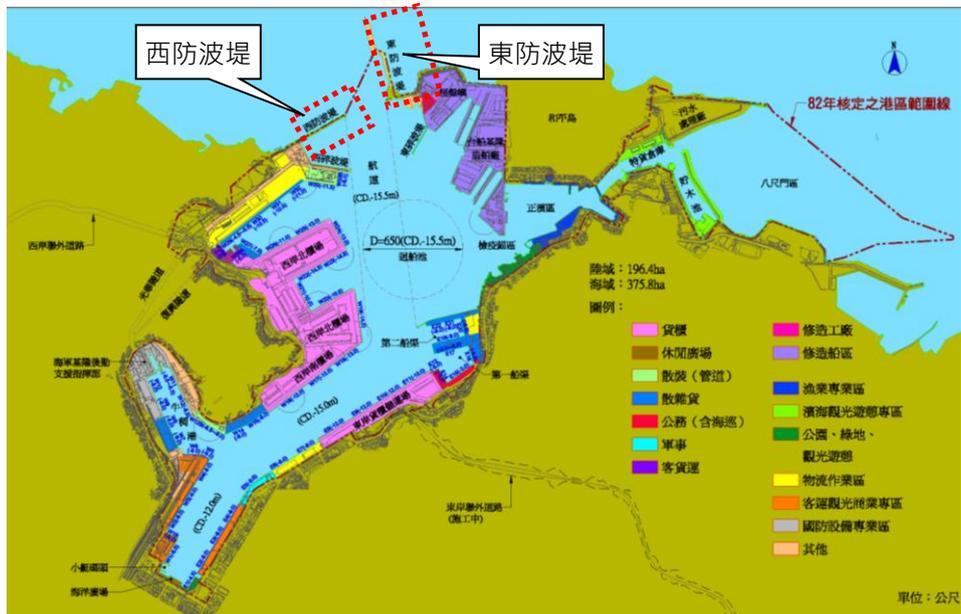


圖 5.1 基隆港區平面示意圖

5.1 防波堤圖像資料調查

本研究辦理基隆港外廓防波堤現況圖像資料調查工作，主要是作為後續防波堤安全性評估及損壞維護方案研擬之依據。本年度本工作項目與時程如表 5.1，調查範圍如前圖 5.1 所示之基隆港東西防波堤為主，其中東防波堤(含延伸段)全長約 1,280m，內外二側各 50m 為測區；西防波堤全長約 820m，內外二側亦以 50m 為測區，相關多因束監測、水下攝影與結構物檢視成果如下所述。

表 5.1 基隆港防波堤圖像調查項目與時程

項次	時間	地點	工作項目
第一測次	103.08.	東、西防波堤	水下作業：包含多音束監測及水下攝影
第二測次	103.11.	東、西防波堤	1.水下作業：包含多音束監測及水下攝影 2.水上結構物檢視

5.1.1 多音束監測作業

本項作業所使用之量測儀器包含 GPS 衛星定位儀、壓力式自動驗潮儀、多音束測深儀、聲速剖面儀、表面聲速儀及動態運動姿態感測儀等，其中，所採用多音束測深系統為 Reson 7125，作業規定為水深 10~15m 區域測量平均密度至少超過 30 筆/平方公尺，水深 15~18m 區域測量平均密度至少超過 20 筆/平方公尺，並且平均分配於測區，鄰近測線之間測帶必需重疊不得有空隙；同時依 IHO 規定特等測量應能辨視 1m 大小的特徵物，描述特徵物至少應有三點，於水深 20m 以內，為辨視 1m 大小的特徵物，使用儀器之測量足印大小(FootPrint)應小於 33cm。資料處理與計算軟體為 CARIS HIPS 模組處理軟體，軟體功能從作業前的水深測量規劃、作業中的導航及資料整合接收、作業後的資料處理分析計算及成果展示等，多音束監測之實測航跡如圖 5.2 所示。

5.1.2 水下攝影作業

水下攝影工作主要由合格之潛水人員以數位攝影機 (DV Record) 進行觀測，潛水人員沿各防波堤沉箱堤腳和堤址處錄影與察看，如發現有異樣或損壞情況，即加以量測與紀錄，相關作業情形如圖 5.3 所示。

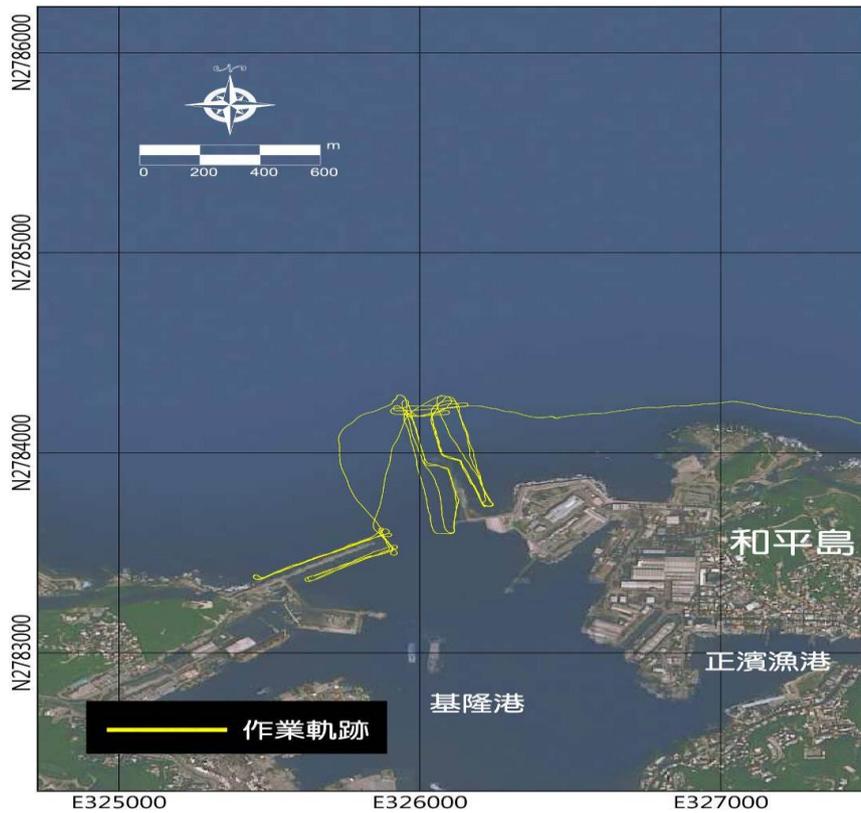


圖 5.2 多音束監測作業範圍與船跡圖



圖 5.3 水下攝影工作情況

5.1.3 水下作業工作成果

彙整本年度(103 年)兩次基隆港東西防波堤港內外的水下調查結果，如表 5.2 與表 5.3 所示。由表 5.2 可知，東防波堤#17~#21 部分沉

箱外側有 50~90cm 縫隙的情況，在#18~#24 沉箱內側亦有 50~90cm 縫隙的現象；另外，除發現有護基塊石堆積外，其他則尚無發現異狀。

由表 5.3 可知，於西防波堤#9 沉箱內側有明顯龜裂現象，在#14~#22 沉箱內側有 50~90cm 縫隙的情況；同樣除發現有護基塊石堆積外，其他尚無發現異狀。

表 5.2 基隆港東防波堤港外水下調查彙整表

沉箱編號	結構物現況及異常說明
#11 外	大型消波塊
#12 外	大型消波塊及塊石
#13 外	消波塊及塊石
#14 外	未發現異狀
#15 外	未發現異狀
#16 外	消波塊堆積及塊石
#17 外	沉箱內縮 90cm、護基方塊 2 層塊石堆積
#18 外	塊石堆積
#19 外	沉箱縫隙 50cm
#20 外	沉箱縫隙 50cm、護基方塊距沉箱壁 1.6m
#21 外	沉箱內縮 60cm
#22 外	未發現異狀
#23 外	未發現異狀
#24 外	未發現異狀
#25 外	沉箱內縮 70cm
#26 外	未發現異狀
#26 航道	未發現異狀
#26 內	2 層護基方塊
#25 內	塊石堆積

沉箱編號	結構物現況及異常說明
#24 內	沉箱縫隙 50cm
#23 內	塊石堆積
#22 內	塊石大量堆積
#21 內	塊石堆積
#20 內	沉箱內縮 70cm、塊石堆積
#19 內	沉箱縫隙 80cm
#18 內	沉箱內縮 90cm
#17 內	施工廢棄物、沉箱壁修補痕跡
#16 內	消波塊
#15 內	消波塊
#13 內	塊石堆積
#12 內	塊石堆積
#11 內	塊石堆積
#10 內	塊石堆積
#09 內	塊石堆積
#08 內	塊石堆積
#07 內	塊石堆積
#06 內	沉箱間隙 40cm、塊石及消波塊堆積
#05 內	消波塊區

表 5.3 基隆港西防波堤港外水下調查彙整表

沉箱編號	結構物現況及異常說明
#08 內	消波塊堆積
#09 內	沉箱壁明顯龜裂持續至水面頂部
#10 內	塊石堆積
#11 內	施工修復痕跡
#12 內	施工修復痕跡
#13 內	沉箱壁片剝落長寬各約 1m
#14 內	沉箱間隙 60cm
#15 內	沉箱內縮 90cm
#16 內	塊石堆積
#17 內	塊石堆積
#18 內	沉箱間隙 50cm
#19 內	沉箱內縮 1.2m
#20 內	沉箱內縮 60cm
#21 內	沉箱內縮 60cm
#22 內	沉箱間隙 60cm、塊石堆積
#23 內	沉箱內縮 1.4m
#24 內	廢棄錨鍊
#24 堤頭	大型消波塊區
#24 外	大型消波塊區

圖 5.4 為水下攝影及多音束作業的工作成果，因篇幅關係，本項工作僅擷錄部份成果，其他成果可參考本所 103 年蘇澳港防波堤圖像資料調查成果報告書。

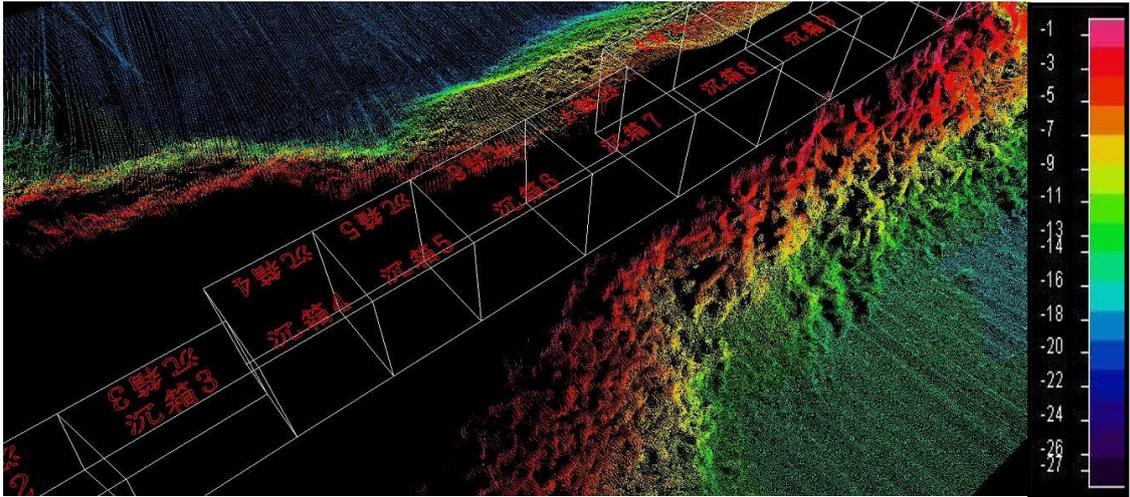


圖 5.4a 東防波堤沉箱#3~#8 間堤址點雲圖

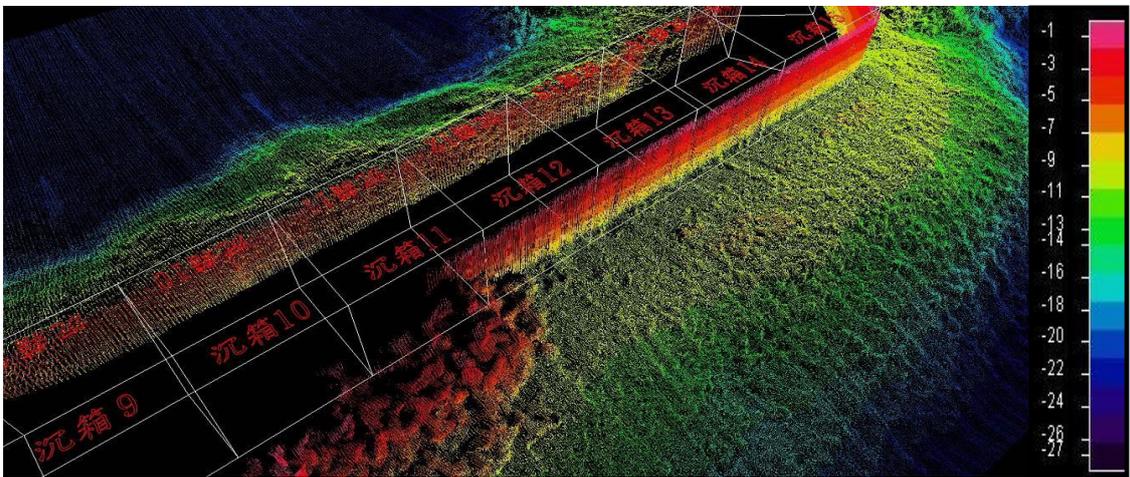


圖 5.4b 東防波堤沉箱#9~#14 間堤址點雲圖

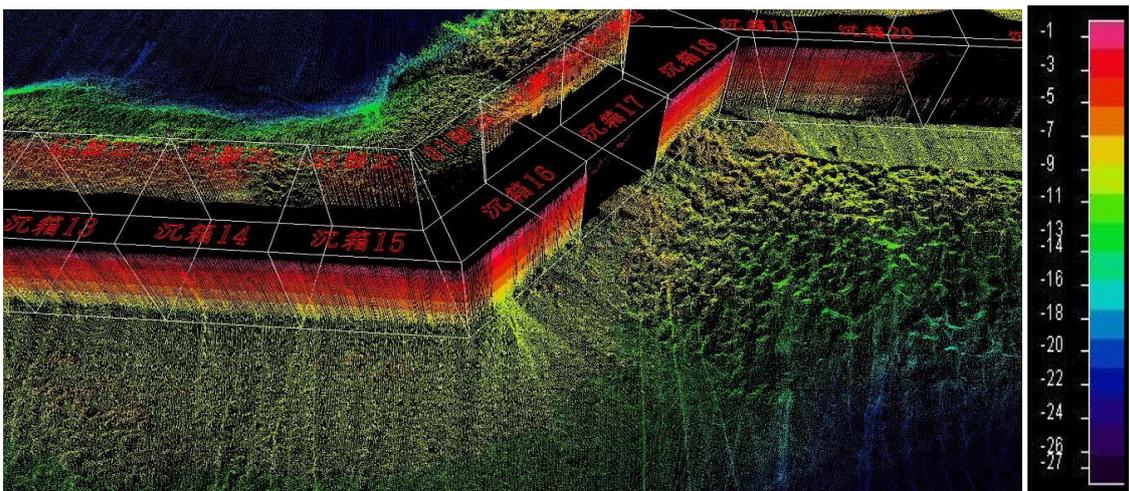


圖 5.4c 東防波堤沉箱#13~#20 間堤址點雲圖

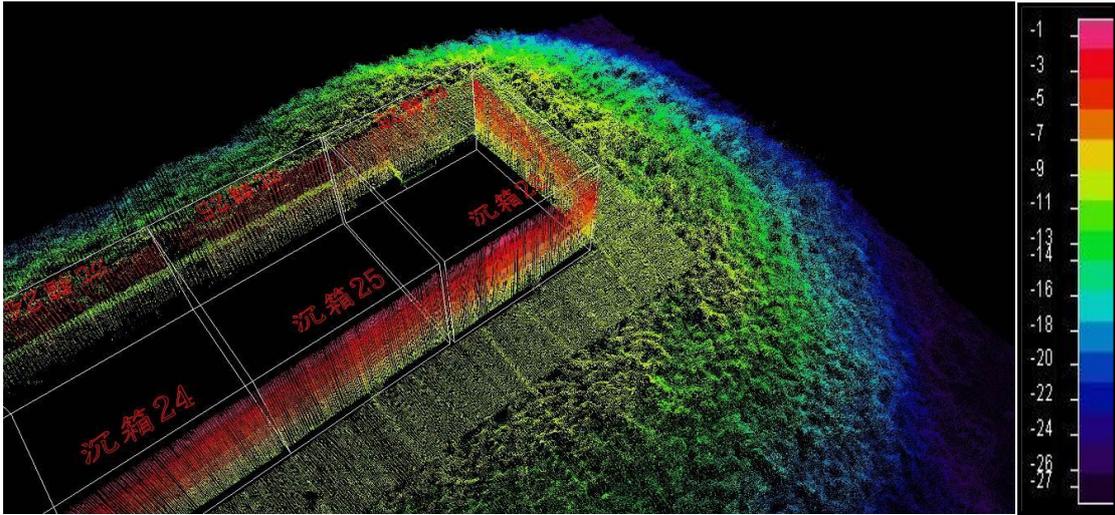


圖 5.4d 東防波堤沉箱#24~#26 間堤址點雲圖

5.1.4 水上結構物檢視工作成果

圖 5.5 至圖 5.7 為基隆港防波堤水面以上結構物的目視檢測情況，由檢測結果可發現，在堤體現況方面，東防波堤堤面場鑄混凝土有分數次加高之施工痕跡，水面上之沉箱本體則無明顯損壞，但於東防波堤#16~#18 沉箱，以及東防波堤延長段#19~#21 以及#24~#25 沉箱略有不連續與錯位之情形，研判可能為沉箱於安放時之誤差，或因沉箱受颱風波浪作用而產生位移，如圖 5.5 所示。



圖 5.5a 東防波堤沉箱#16~#18 銜接段



圖 5.5b 東防波堤沉箱#18 與沉箱#19 異形銜接段

在堤面現況方面，東防波堤沉箱#4~#16 之堤面場鑄混凝土於海側留有凹榫，推測可能為預留之胸牆凹榫以供日後需加置胸牆時使用；另東防波堤部份沉箱間有較大之沉箱間隙，如圖 5.6 所示。



圖 5.6a 東防波堤沉箱#4~#16 堤面凹槽



圖 5.6b 東防波堤沉箱#13 與#14 接縫情況

另外，民國 70 年所建置之東防波堤歷經多年使用後，於海測已產生堤面牆角破損，而於堤面上也有多處破損與修補，如圖 5.7 所示。



圖 5.7 堤面與接縫破損情況

5.2 防波堤設計條件檢討

本研究本年度擬先就基隆港東防波堤結構物之原有波浪設計條件進行檢討，並據以進行結構物安全性的探討比較，以作為後續防波堤結構物維護方案研擬之準備。

基隆港東防波堤依其興建年份，大致可區分為三堤段，如圖 5.8 所示。第一段(圖中紫色部份)為日本自民國 25 年起開始興建，歷經二次大戰戰火侵襲，於台灣光復後陸續完工；第二段(圖中藍色部份，為東防波堤第一次延長)於民國 65 年起造，全長 350m，於民國 70 年完工；第三段(圖中紅色部份，為東防波堤第二次延長)於民國 94 年開工，全長 200m，於民國 99 年完工。本研究擬探討之目標為東防波堤之第二段及第三段，為便於分辨兩堤段，後續擬將東防波堤第二堤段統一稱為「東防波堤」，第三堤段則統一稱為「東防波堤延伸段」。



資料來源：Google Earth；本研究彙整

圖 5.8 基隆港東防波堤分段示意圖

5.2.1 防波堤原有設計條件

1. 原有設計潮位條件

(1) 東防波堤

依據「基隆港東防波堤延伸工程」初步報告書以基隆港 20 年之潮位統計及設計潮位資料，如表 5.4 所示。

表 5.4 基隆港潮位資料表

潮位	數值	記錄值 (m)	設計採用值 (m)
設計暴潮位(H.H.W.L.)		-	+2.50
施測期間最高潮位(H.W.L.)		+1.93	+1.90
平均高潮位 (M.H.W.L.)		+1.15	-
平均潮位 (M.W.L.)		+0.90	+0.90
平均低潮位 (M.L.W.L.)		+0.68	-
天文潮最低潮位(L.W.L.)		±0.00	±0.00
施測期間最低潮位(L.L.W.L.)		-0.23	-0.23

註：潮位基準係以基隆港築港高程為基準。

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程初步報告書」，(64.04)

(2) 東防波堤延伸段

依據「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」報告，以歷史最高高潮位+2.48 作為設計水位，約相當於 100 年回歸期之暴潮位。

2. 原有颱風波浪條件

(1) 東防波堤

依據「基隆港東防波堤延伸工程」初步報告書以颱風路徑追蹤法(Tracing Method)推算 20 年所發生可能之最大颱風成果，如表 5.5 所示。本堤段原設計選取 NW~NNE 向為設計之深海波浪條件，其波高約介於 5.8~8.7m，週期則約介於 10.3~11.1sec。

表 5.5 基隆港東防波堤原設計深海波浪條件

波 向	波 高(M)	週 期(秒)
NNE	8.7	11.1
N	7.6	10.9
NNW	6.0	10.6
NW	5.8	10.3

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程初步報告書」，(64.04)

(2)東防波堤延伸段

依據「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」報告，本堤段原設計選取 NW~E 向為設計之深海波浪條件，其波高約介於 6.51~13.22m，週期則約介於 10.03~14.30sec，表 5.6 所示。

表 5.6 基隆港東防波堤延伸段原設計深海波浪條件

波向	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW
波高(m)	13.22	12.18	12.08	12.00	10.41	8.40	6.51
週期(sec)	14.30	13.72	13.67	13.62	12.69	11.40	10.03

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」，(93.03)

3.原有設計波浪條件

(1)東防波堤

依據「基隆港東防波堤延伸工程」初步報告書，本堤段以上述深海波浪條件計算其折射係數 k_r 及淺化係數以求取堤前之波高，其採用之設計條件如表 5.7 所示。

表 5.7 基隆港東防波堤原設計堤前設計波高

深海波向	深海波高(m)	H_0' (m)	$H_{1/3}$ (m)	週期(秒)
NNE	8.7	8.2	7.5	11

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程初步報告書」，(64.04)

(2)東防波堤延伸段

依據「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」報告以數值模式推算本堤段兩種不同堤址水深-40m 以及-42m 之等值深海波高及堤址波高成果，如表 5.8 所示。

表 5.8 基隆港東防波堤延伸段原設計堤前設計波高

堤址里程	設計水深 (m)	深海波向 (deg)	深海波高 (m)	折射係數 kr	H0' (m)	H1/3 (m)	Hmax (m)	週期 (秒)	堤前波向 (deg)
0K+000~0K+085	-40	NE	12.08	0.92	11.11	10.16	18.28	13.67	22
0K+085~0K+200	-42	NE	12.08	0.93	11.23	10.26	18.47	13.67	19

註：設計時統一採 $H_{1/3}=10.3\text{m}$ ， $H_{\text{max}}=18.5\text{m}$ 。

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」，(93.03)

4.原有安全係數條件

(1)東防波堤

依據「基隆港東防波堤延伸工程」初步報告書顯示，本堤段原設計於堤前水深 $d \geq 2H$ 之情況下視為重覆波，採用 Sainflou 公式計算其波力， $d < 2H$ 時則視為碎波則採用 Hiroi 公式計算波力，其安全係數如表 5.9 所示。

表 5.9 基隆港東防波堤原設計安全係數表

	碎波	重覆波
沉箱滑動	1.2	2.0
沉箱傾倒	2.0	2.5
海底支承力	2.0	3.0
拋石堤基礎滑動	1.2	1.2
拋石基礎支撐力	1.2	1.2
期待滑動量	在 $H_{1/3}$ 作用下滑動量必須小於 5cm	

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程初步報告書」，(64.04)

(2)東防波堤延伸段

依據「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」報告顯示，本堤段原設計採用 Goda 公式計算其波力，其安全係數如表 5.10 所示。

表 5.10 基隆港東防波堤延伸段原設計安全係數表

	安全係數
沉箱滑動	1.2
沉箱傾倒	1.2
基礎承載安全係數	1.5~2.5
拋石滑動安全係數(地震時)	1.2
拋石滑動安全係數(常時)	1.2

資料來源：基隆港務局，「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」，(93.03)

5.2.2 颱風波浪及暴潮位設計條件探討

1. 深海颱風波浪條件探討

於設計波浪部份，經由前述分析可知，本研究選定 135 個(1940~2013)對本區影響較大之颱風進行颱風波浪推算，而由本研究推算結果與東防波堤及其延伸段之原設計深海波浪條件進行比對顯示，其波高較原設計波高有增大之趨勢，以東防波堤而言，其波高約增加 16%~32%，週期約增加 6%~26%；而對於東防波堤延伸段而言，其波高差異約介於-6%~17%，週期則約增加 3%~15%，顯示原設計之波高條件有低估之虞，詳如表 5.11 所示。

表 5.11 目標區深海颱風波浪推算波高與原設計條件比對結果

波向	東防波堤原設計 (約相當 20 年回歸期)		東防波堤延伸段原設計 (50 年回歸期)		本計畫推算 (50 年回歸期)	
	Ho	To	Ho	To	Ho	To
NW	5.8 (-16%)	10.3 (-6%)	6.5 (-6%)	10.0 (-9%)	6.9	11
NNW	6.0 (-24%)	10.6 (-10%)	8.4 (6%)	11.4 (-3%)	7.9	11.8
N	7.6 (-25%)	10.9 (-18%)	10.4 (3%)	12.7 (-5%)	10.1	13.3
NNE	8.7 (-32%)	11.1 (-26%)	12.0 (-6%)	13.6 (-9%)	12.8	15
NE	-	-	12.1 (-15%)	13.7 (-13%)	14.2	15.8
ENE	-	-	12.2 (-17%)	13.7 (-15%)	14.7	16.1
E	-	-	13.2 (-16%)	14.3 (-14%)	15.7	16.6

註：1.本計畫推算颱風係依據 1940~2013 年間之颱風資料推算。

2.括號內數字代表與本計畫推算值之差異百分比。

2. 暴潮位設計條件探討

由前述原有設計條件資料顯示，東防波堤原設計採用+2.50m 進行設計，較歷年之實測最高高潮位+2.48m(基隆港測站民國 38 年~88 年實測)為高，且由暴潮極值分析結果顯示，東防波堤延伸段原設計採用+2.48m 之水位，約相當於 100 年回歸期之暴潮，應可符合現況設計之需求，故建議暫不予調整。

綜合上述各項設計條件比對結果，彙整如表 5.12 所示。由表中可知，除原設計之颱風波浪條件，相對於現況颱風波浪推算之值偏低外，設計水位與安全係數皆符合設計需求。

表 5.12 本研究推算結果與原設計條件比對

	東防波堤 原設計	東防波堤延伸段 原設計	本研究推算 設計條件	是否符合現 況
設計 水位	+2.50	+2.48	+2.48	OK
安全 係數	採用 Sainflou 及 Hiroi 公式計算 波力 滑動 1.2~2.0、 傾倒 2.0~2.5、 海底支承力 2.0 ~3.0、拋石基礎 滑動採用 1.2	採用 Goda 公式 計算波力 依規範在波壓作 用下，滑動、傾 覆皆為 1.2	同左	需進一步探 討
深海颶 風波浪	最大波浪發生方 向為 NNE 向，波 高值為 8.7m	最大波浪發生方 向為 E 向，波高 值為 13.2m	最大波浪發生方向 為 E 向，波高值為 15.7m	有低估之 虞，需進一步 探討

5.3 防波堤結構物受損紀錄

基隆港東防波堤完工於民國 70 年，於施工期間曾有顯著之沉箱沉陷記錄，參考民國 72 年「東防波堤延伸工程峻工報告」之分析成果可知，颱風侵襲次數對沉陷量影響並不明顯，而沉箱基礎厚度越小，單位基礎厚度之平均沉陷量越大。此外，地震次數與沉陷量亦大致成正比，顯示沉陷量與拋石基礎厚度及地震有密切之關係，初步判斷此一狀況與基礎地質及拋石材料無關，係因施工順序及時間所致，如表 5.13 所示。

另依據基隆港年鑑並與基隆港務分公司人員洽詢後得知，東防波堤過往並無顯著之破壞紀錄，僅曾於#4~#7 沉箱堤體海側進行數次 40T 雙 T 型消波塊加拋作業(如表 5.14 所示)，惟消波塊似有下陷之情形產生；而東防波堤延伸段完工於民國 99 年，歷經數次颱風侵襲，至今亦未發生明顯之災損。

表 5.13 基隆港東防波堤沉陷記錄統計表

沉箱安放時間		民國 67 年					民國 68 年					民國 69 年				
		7/12	7/8	6/17	9/5	8/22	6/1	6/6	6/25	7/2	7/26	9/5	6/14	6/24	7/8	7/15
沉箱編號		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
沉箱基礎厚度(m)		6	7	9	14	12	13	14	16	17	18	21	21	22	22	23
沉箱安放 365 天後	沉陷量(mm)	309	366	521	454	547	582	685	660	725	717	706	288	439	567	716
	颱風次數	3	3	3	5	5	5	5	5	6	6	3	6	7	7	6
	地震次數	3	3	3	2	3	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
	每公尺基礎厚度之平均沉陷量(mm)	51.5	52.3	57.9	32.4	45.6	44.8	49.1	41.3	42.6	39.8	33.6	13.7	20.0	25.8	32.5
沉箱安放 366~730 天	沉陷量(mm)	8	10	25	8	9	102	83	73	102	113	39	157	184	227	258
	颱風次數	6	6	5	3	2	5	5	7	6	7	7	5	4	3	4
	地震次數	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
	每公尺基礎厚度之平均沉陷量(mm)	1.3	1.4	2.8	0.6	0.8	7.8	5.9	4.6	6.0	6.3	1.9	7.5	8.4	10.3	11.2

註：1.表中沉箱編號#15 對應本計畫堤頭沉箱#18，餘依此類推。

2.表中#12~#15 號沉箱於沉箱安放 366~730 天部份僅有 260 日之沉陷記錄。

3.資料來源：基隆港務局「東防波堤延伸工程竣工報告」，民國 72 年 12 月。

表 5.14 基隆港東防波堤維修記錄

年份	工程名稱	備註
90	東防波堤護基混凝土塊加強工程	完成防波堤加高 186m 長，40T 雙 T 塊製作及吊放 42 塊。
91	東防波堤護基混凝土塊加強工程	完成 40 噸雙 T 塊製作及吊放 725 塊。
92	東防波堤加高延伸工程	完成東防波堤加高延伸 272m，消波塊製作及吊放 50 塊。
93	東防波堤消波塊加拋工程	完成消波塊製作及吊放 150 塊。
94	東防波堤消波塊加拋工程	完成 40T 消波塊製作及吊放 150 塊。
97	97 年度消波塊加拋工程	完成東、西防波堤護基消波塊加拋 585 塊。
98	98 年度消波塊加拋工程	完成東防波堤護基消波塊加拋 10T 300 塊，40T 50 塊。
102	102 年度消波塊加拋工程	40T 消波塊製作及吊放 55 塊。

資料來源：基隆港年鑑、基隆港務分公司。

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

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

η : 波壓作用在靜水位以上高度 (m)

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

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

3. 波壓強度

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

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

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1$$

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

λ_1 : 緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0。

λ_2 : 碎波波壓項之修正係數

λ_3 : 上揚壓力項之修正係數

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

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

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

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

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

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_0 : 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 α_2 值應修正為 α^* ，其中

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

式中 B_m ：堤前拋石平台寬(m)

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：

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

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

式中 l_u ：表示上揚力作用於堤底之範圍

若直立堤身位於設計水位之下，則 $l_u = B$ 堤底寬

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

其中 h' ：直立堤底部出水面之高度(取負值)

5.4.2 堤址波力評估探討

由前節舊有設計條件檢討可知，原設計條件中包括設計水位、

與安全係數等皆符合設計需求，因此後續進行堤址波力探討，將以代表性之條件進行分析，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 5.16 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 5.17)，針對各堤段之代表斷面(參考圖 5.10 及表 5.15)進行檢核，其代表斷面分別為 CASE1：水深(-30m)之東防波堤沉箱(B=15.5m)、CASE2：水深(-40m)之東防波堤沉箱(B=21.33m)、CASE3：水深(-40m)之東防波堤轉彎段沉箱(B=21.33m)、CASE4：水深(-42m)之東防波堤延伸段沉箱(B=30m)。

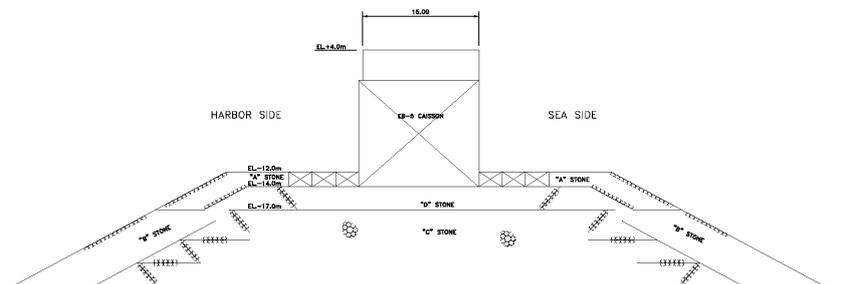


圖 5.10a 東防波堤沉箱標準斷面圖(1)

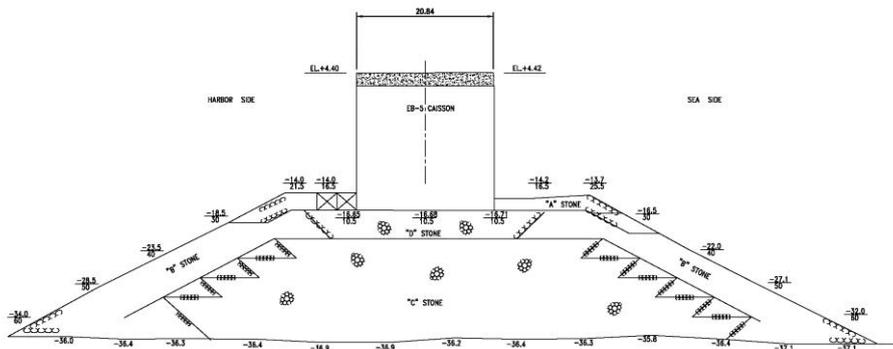


圖 5.10b 東防波堤沉箱標準斷面圖(2)

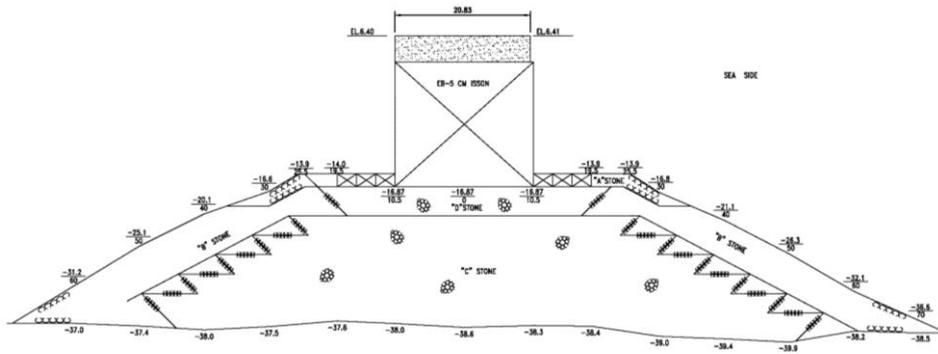


圖 5.10c 東防波堤沉箱標準斷面圖(3)

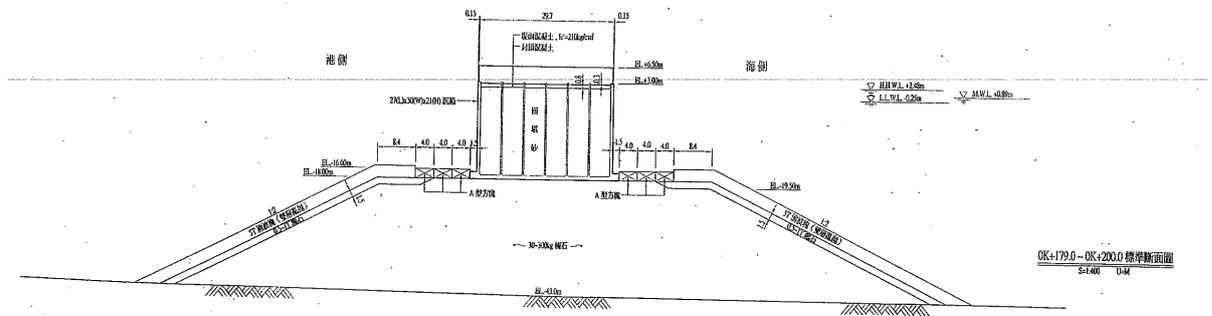


圖 5.10d 東防波堤延伸段標準斷面圖(4)

表 5.15 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 5.16 原設計堤前設計波高

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	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 5.17 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° ，轉彎段堤法線夾角 22°

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 5.18 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 Mp 為 1130.79~3697.06t-m，上揚力 U 為 44.31t~138.65t，上揚力矩 Mu 為 457.85~2980.95t-m。

表 5.18 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

2.本研究設計條件波力計算結果

經由前述目標區颱風資料重新估算，重新計算堤址波力如表 5.19 所示。由表中可知，本研究重新推算設計條件後，與原設計相較，其波力增加比例約介於 1.00~1.53 之間，其中以 CASE1 增加波力比例為最多，約為 1.53 倍，次之則為 CASE2，約為 1.52 倍，其次則為 CASE3，約為 1.44 倍，而 CASE4 之波力與原設計相較則差異不大。其波力增加量是否會對堤體穩定造成影響，將於後節予以探討。

表 5.19 本研究推算設計條件波力計算結果

種類	參數	計算結果 (新舊比值)			
		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)	184.05 (1.53)	278.52 (1.52)	456.33 (1.44)	294.93 (1.00)
	M _p (t-m)	1695.07	3298.87	5400.05	3684.80
	U(t)	73.12	101.58	124.56	145.62
	M _u (t-m)	755.60	1444.51	1771.29	3130.84

註：() 內為本計畫與原設計之比值

5.5 防波堤結構物安全性評估探討

5.5.1 堤體安全性分析方法

1. 護基方塊護面石及堤址塊石重量計算

採用 Hudson 類型之公式計算如下。

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

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

式中 W : 護面塊重量 (t)

γ_s : 護面塊單位重 (t/m^3)

H_s : 堤前設計波高 ($H_{1/3}$)

K_d : 穩定係數 ($N_s^3 = K_d \cot \alpha$)

S_r : 護面塊對海水比重

α : 斜面與水平面之夾角

如依谷本勝利(Tanimoto)建議之計算方式如下：

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

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

h' : 護基方塊放置處之水深(m)

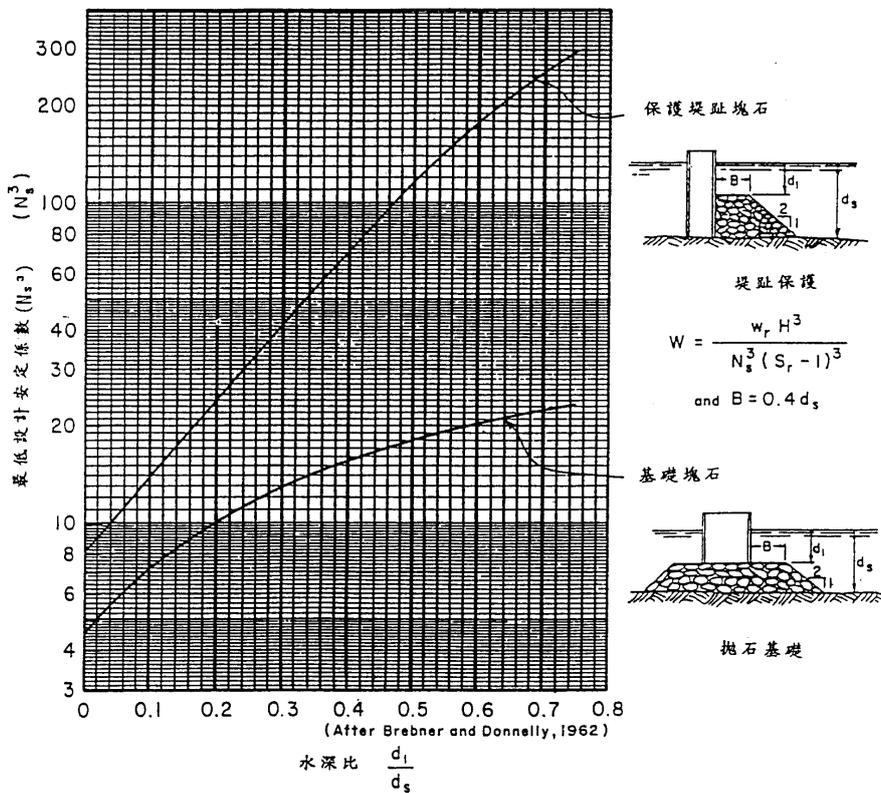
L' : h' 水深處之波長(m)

B_m : 堤前拋石平台寬(m)

A、m、NSC、B：係數，依採用護基型式不同而取不同之值如下：

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

另 Shore Protection Manual 依拋石功用區分為基礎保護用及護基用兩大類型，具以提供安定係數 N_s^3 圖表選取之方式，如圖 5.11 所示。



資料來源：Shore Protection Manual

圖 5.11 護基及堤趾拋石之安定係數圖

2.堤體穩定分析

(1)滑動驗算

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

式中

- SF_s : 滑動安全係數
- μ : 摩擦係數
- W_A : 堤體重量
- W_B : 堤體所受之浮力
- U : 堤體所受之上揚力
- W_S : 堤體所受之被動土壓力
- P : 堤體所受波浪之合力

(2)傾倒驗算

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

式中

- SF_o : 傾倒安全係數
- M_A : 由堤體自重產生之抗傾力矩
- M_B : 由堤體所受浮力產生之力矩
- M_U : 由堤體所患上揚力產生之力矩
- M_S : 由堤體所受被動土壓力產生之抗傾力矩

5.5.2 計算結果與分析

1.護基方塊及消波塊重量計算

(1)原設計計算結果

經上述 Hudson 公式及谷本勝利(Tanimoto)利用原設計颱風波浪條件計算結果可得，本研究方塊重量須達到 30.21t，但東防波堤原設計並無交代護基方塊之重量計算方式，若初步假設其長度為 3m，

則其尺寸分別為 3m x 3m x 2m(東防波堤)及 4m x 3m x 2m(東防波堤延伸段)，計算其重量分別為 41.4 t 及 55.2 t。經檢討可知護基方塊皆大於 30.21t，應可符合原設計之颱風波浪需求。

(2) 本研究分析結果

由前節現場水下調查結果可知，現況方塊並無明顯移動情形，符合原計算結果。但經採用本研究颱風波浪重新檢核，發現所需護基方塊重量至少為 41.19t，而現況護基方塊之重量皆大於所需條件，仍可符合安全需求。

另外，現況東防波堤堤腳處之消波塊主要以 40T 雙 T 塊為主，考量本研究目標區堤址水深較深，若初步參考港灣構造物設計基準中對 Dolos 塊之 K_d 建議值，保守以 $K_d=22$ ，坡度 1:1.5 進行計算，則雙 T 塊所需之重量至少需 36.95t 以上，方可符合安全之需求；惟由水下調查之點雲圖並無法看出現況消波塊之分佈情形，若其基部位於拋石斜面上，可能因波浪長期作用而造成消波塊產生緩慢下滑之情形。

2. 堤體穩定分析

(1) 原設計條件計算結果探討

由原設計計算檢核發現，東防波堤各堤段之堤體滑動安全係數(SFS)約介於 1.07~1.71，傾倒安全係數(SFo)約介於 1.50~3.37，規範要求與計算後安全係數之比較值詳表 5.20 所示。由表中可看出，堤體滑動、傾倒及拋石滑動穩定部份幾乎符合規範要求，僅有 CASE3 之堤體滑動穩定計算及拋石滑動穩定計算不符合規範，其主要原因係為原設計於計算波力時，所採用之 Sainflou 公式並未考慮上揚力所致，惟其安全係數仍大於 1，顯示在原設計波浪條件下堤體尚無立即性之危險。而在計算海床基礎承载力時，原設計之海床基礎安息角保守採用 30° ，原設計之堤底承载力及海床基礎承载力亦可滿足規範要求，由上述分析顯示現有堤體

承载力並無疑慮。

表 5.20 原設計波浪條件堤體穩定計算結果

項 目	規範要求	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
		h=-30m B=15.5m	h=-40m B=21.33m	h=-40m B=21.33m	h=-42m B=30m
堤體滑動穩定計算	1.2	1.47	1.71	1.07	1.63
堤體傾倒穩定計算	1.2	1.92	2.60	1.50	3.37
拋石滑動穩定計算	1.2	1.48	1.56	1.16	1.61
堤底後趾壓力計算		55.74	50.64	110.22	48.35
海床基礎後側壓力計算		33.66	42.15	45.98	48.69
堤底容許承載壓力計算		241.25	429.24	234.10	751.98
海床基礎容許承載壓力計算		45.61	68.46	67.64	91.96

(2)本研究設計條件之計算結果探討

表 5.21 為以本研究推算設計條件計算後與規範之比較值，由表中可看出，現況波浪條件僅 CASE4(東防波堤延伸段)完全符合規範要求，而對於東防波堤而言，堤體滑動部分於 CASE1~3 皆無法滿足規範要求，其滑動安全係數介於 0.67~1.03 之間；而在堤體傾倒部分，其中以 CASE1 及 CASE3 無法滿足規範要求，傾倒安全係數介於 0.93~1.11 之間，顯示在本計畫推算設計條件下，現有堤體有發生滑動及傾倒之可能；惟由現況調查可知，東防波堤現況並無顯著之堤體災損；另參考前述基隆外海颱風最大實測波高可知，過去基隆港曾發生之最大波高為 11.4m(民國 91 年辛樂克颱風)及 10.1m(民國 90 年海燕颱風)，與本研究推算之波浪條件相當，惟其對應週期分別為 5.5sec 及 5.4sec，波向則分別為 N 向及 W 向；而依本研究推算成果，主要影響堤體之波向為 NNE~NE 向，且設計波浪條件之週期亦較長，顯示東防波堤未發生災損之原因，可能因波浪入射角度並未正向入射，波浪週期較短，或規範之上揚力及摩擦係數偏保守估計等因素所致。

表 5.21 本研究推算波浪條件堤體穩定計算結果

項 目	規範要 求	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
		h=-30m B=15.5m	h=-40m B=21.33m	h=-40m B=21.33m	h=-42m B=30m
堤體滑動穩定計算	1.2	0.87	1.03	0.67	1.61
堤體傾倒穩定計算	1.2	1.11	1.54	0.93	3.34
拋石滑動穩定計算	1.2	1.09	1.21	0.85	1.60

5.5.3 綜合分析結果比較

綜合上述針對消波塊、堤基保護方塊重量，以及沉箱穩定性進行分析之成果，彙整如表 5.22 所示，由表中可知：

- 1.現有堤基保護方塊雖於現場圖像資料調查結果，並無顯示有滑動或是流失之情形，但依據現況颱風波浪之計算結果，堤基方塊重量應達 41.19t 以上，而本研究堤基方塊重量達 41.4t 以上，故現況安全性應無虞。
- 2.現況東防波堤堤腳處之消波塊主要以 40T 雙 T 塊為主，依本研究推算波浪以 Hudson 公式估算，其雙 T 塊所需之重量至少需 36.95t 以上，應可符合安全之需求。惟由水下多音束調查之點雲圖並無法看出現況消波塊之分佈情形，若其基部位於拋石斜面上，可能因波浪長期作用而造成消波塊產生緩慢下滑之情形。
- 3.以本研究推算之 50 年迴歸期颱風波浪作為設計條件進行沉箱安全性檢核後，東防波堤之沉箱滑動安全係數介於 0.67~1.61 間，而傾倒安全係數介於 0.93~3.34 間，由各斷面之計算結果顯示，東防波堤堤體結構安全已有立即性之危險，而東防波堤延伸段之堤體穩定應安全無虞。惟由現況調查可知，東防波堤現況並無顯著之堤體災損，另參考基隆外海颱風最大實測波高可知，過去基隆港曾發生之最大波高為 11.4m(民國 91 年辛樂克颱風)及 10.1m(民國 90 年海燕颱風)，與本研究推算之波浪條件相當，惟其對應週期分別為 5.5sec 及

5.4sec，波向則分別為 N 向及 W 向；而依本研究推算成果，主要影響堤體之波向為 NNE~NE 向，且設計波浪條件之週期亦較長，顯示東防波堤未發生災損之原因，可能因波浪入射角度並未正向入射，波浪週期較短，或規範之上揚力及摩擦係數偏保守估計等因素所致。

表 5.22 基隆港東防波堤沉箱現況穩定分析對照表

項 目		現 況	規 範	現況安全性
方塊及 消波塊	堤基保護方塊重量	41.4 t、55.2 t	$\geq 40.19t$	無虞
	消波塊重量	40t	$\geq 36.95t$	無虞
沉箱 主體	沉箱堤體滑動	0.67~1.61	≥ 1.2	有滑動之虞
	沉箱堤體傾倒	0.93~3.34	≥ 1.2	有傾倒之虞

5.6 防波堤結構物補強方案探討

依據前節針對基隆港東防波堤原有結構物安全性分析結果，本節中將對既有結構物受損情形進行檢討，並初步研擬受損結構補強方案及防止舊有結構物受損之預防措施。

5.6.1 堤體穩定補強方案探討

由前述以本研究推算之波浪條件進行分析後可知，東防波堤延伸段可滿足現今規範安全係數之要求，惟東防波堤現有堤體之滑動及傾倒安全係數無法滿足規範需大於 1.2 之要求，部份堤段之安全係數甚至小於 1.0，顯示若遭遇超越原設計波高及週期等條件之波浪，將可能發生立即性之破壞。此外，由現場圖像資料調查之成果可知，基隆港東防波堤現況亦有消波塊體流失、沉箱間隙過大與錯位，以及堤面場鑄混凝土破損等較輕微之損壞，以下將分別就其可能之補強方案進行說明。

1. 堤體穩定補強方案初探

經前節堤體穩定分析可知，東防波堤之可能發生滑動或是傾倒類型之破壞。由於沉箱主體為直接抵擋波浪作用，故如有沉箱發生移動或傾覆破壞，勢必會對港內造成影響。如要改善現有沉箱可能發生之移動或傾覆現象，其解決方式可將現有場鑄加高以增加堤體自重，或佐以堤後背填方式作為改善，亦可於堤前拋放消波塊以降低波能。惟依據前述波力計算結果可知，於本計畫推算之設計條件下，部份堤體受波壓最大可達 456t/m，而滑動安全係數僅 0.67，而堤面場鑄混凝土加高除將增加波力外，經堤體穩定分析後亦無法滿足規範安全係數需大於 1.2 之需求；故初步建議可採堤後背填或是堤前加拋消波塊之方式增加堤體抵抗波浪之能力，以解決堤體安全性欠佳之問題。

(1) 東防波堤 Case1 補強方案

本堤段現況滑動及傾倒安全係數均小於規範 1.2 之安全要求，考量堤前已有拋放消波塊，故建議可採堤後有限背填之方式進行補強。依據日本「Technical Standards for Port and Harbor Facilities in Japan」規範引用竹田氏之實驗成果計算，直立堤堤後有限背填所增加之抵抗力 R(如圖 5.12)可依下式估算：

$$R = \alpha W_s \quad (5.3)$$

$$\alpha = 0.9 + 0.2(H/h' - 0.5) \quad (\text{以拋石背填})$$

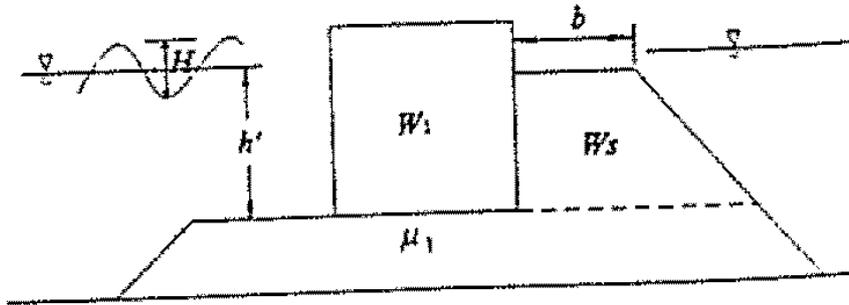
$$\alpha = 0.4 + 0.2(H/h' - 0.5) \quad (\text{以方塊背填})$$

若 $H/h' \leq 0.5$ ， $H/h' = 0.5$

式中 R : 背填增加之抵抗力 (t/m)

W_s : 堤後背填料之水中重量 (t/m)

- α : 抵抗係數
- h' : 拋石基礎頂面設置水深 (m)



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

圖 5.12 堤後有限背填示意圖

依據既有標準斷面以規範推算，若於本堤段(-30m 水深內)堤後高程-4.0m 處拋放頂面 1m 寬之背填石料，並以 1:2 收至既有基礎拋石面，此時可額外提供約 66t/m 之背填抵抗力，此時滑動及傾倒於背填後均可大於 1.2，故背填後可確保本堤段堤體穩定之安全；實際設計時則可參考一般拋石堤，外側以消波塊或預鑄方塊保護，內側石料則依級配概念進行設計，如圖 5.13 所示。

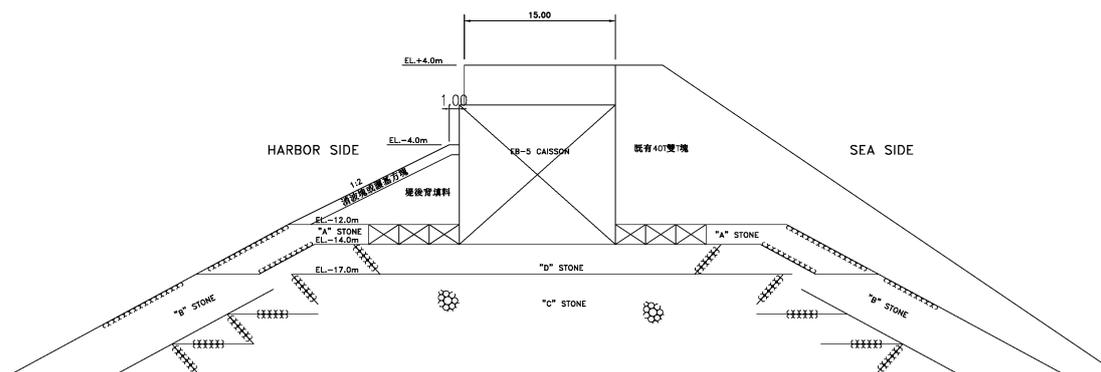


圖 5.13 東防波堤 Case1 補強方案示意圖

(2) 東防波堤 Case2、Case3 補強方案

東防波堤 Case2 堤段現況僅滑動安全係數小於規範 1.2 之安全要求，惟其仍大於 1.0，故尚不至發生立即性之危險；而 Case3 堤段之滑動及傾倒係數均小於 1.0，若遭遇超過原設計條件之波浪時即有發生破壞之可能，考量本堤段海側已無消波塊消減波能，故建議其補強方案建議可延續東防波堤淺水段於海側拋放 40T 雙 T 塊至堤面高程之方式進行補強，其堤腳處則鋪設襯墊及卵石以減少其沉陷量，初步估算拋放消波塊後之滑動及傾倒安全係數均可大於 1.2，必要時可輔以堤後有限背填因應，應可確保本堤段堤體穩定之安全，如圖 5.14 與圖 5.15 所示。

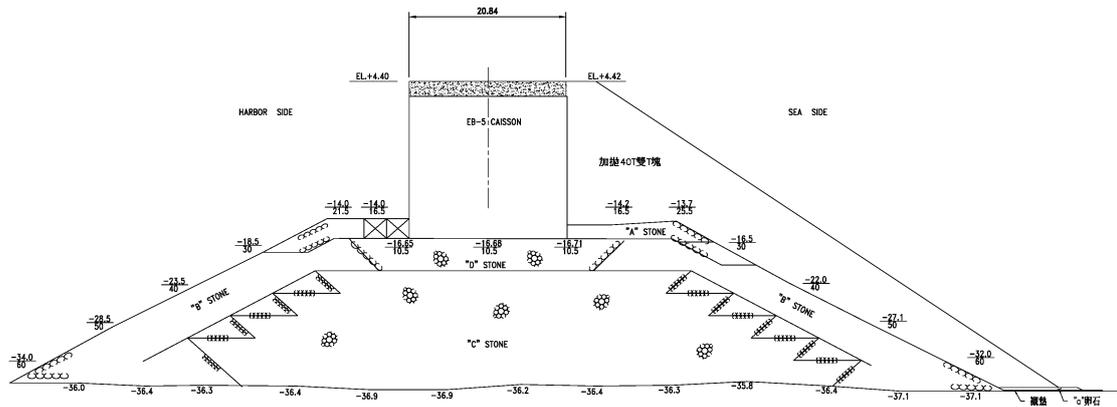


圖 5.14 東防波堤 Case2 補強方案示意圖

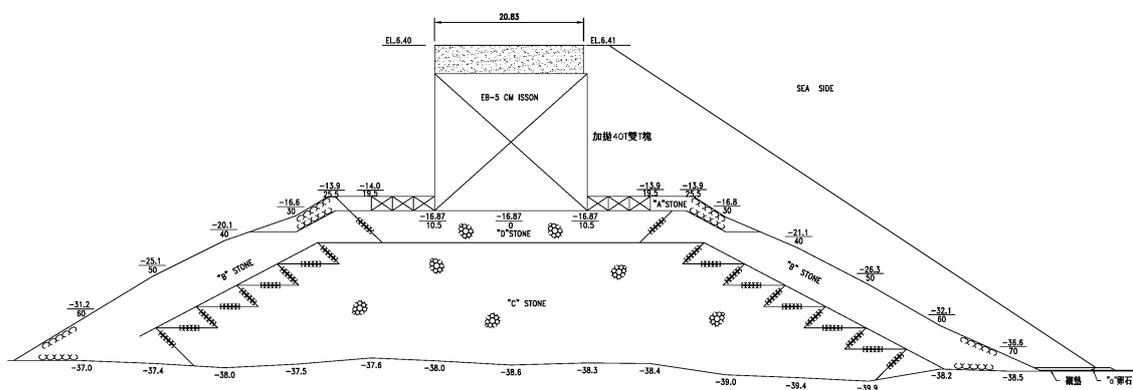


圖 5.15 東防波堤 Case3 補強方案示意圖

5.6.2 現況損壞補強方案初探

1. 消波塊體流失

經向港務公司洽詢後得知，基隆港東防波堤之消波塊似有沉陷之情況產生，故過往曾有數次消波塊補拋之記錄；考量本堤段水深較深維護不易，建議以定期補拋消波塊之方式維持其頂面高程不低於既有堤面，以確保其消減波能之能力。

2. 沉箱間隙過大與錯位

由前節之現場目視檢測結果發現，基隆港東防波堤部份沉箱有間隙過大與錯位之情形，其原因可能為沉箱於安放時之誤差，或因沉箱受颱風波浪作用而產生位移；初步建議可參考前述之補強方案以堤後背填或是堤前加拋消波塊之方式增加堤體之安定性，以避免颱風大浪造成進一步之災損。

3. 堤面場鑄混凝土破損

由前節現場堤面調查成果可知，東防波堤因使用時間已久，堤面場鑄混凝土有明顯破損之情形，因損傷尚屬輕微，且對結構安全無明顯影響，若需進行修復，建議可針對受損部位補澆置混凝土補強即可。

第六章 港灣防波堤維護管理資訊系統建置

國內現有主要港口之防波堤大都已屆使用年齡，由於歷經颱風波浪等外在條件侵襲，各港務單位經年須花費龐大經費進行維修與復建，以維持構造物安全與港口正常營運。是以，本研究擬整合港務單位既有的維護管理作業體系，研擬相關作業流程，並以資訊化方法建置一套符合實際需求的防波堤設施維護管理資訊系統，預防災害發生，加速維護作業之流程，期使損害降至最低。

本研究於往昔相關計畫已在花蓮港、高雄港與蘇澳港建置相關之維護管理資訊系統，本年度針對基隆港辦理本項工作，相關維護檢測方式、維修表單內容與展示方式等，如下列各節概述。

6.1 維護管理檢測因子

本節中首先就防波堤構造物的可能受破壞情況進行探討，進而研提相關維護檢修方法。一般而言，防波堤因外力所導致破壞連鎖反應結果，輕則降低防波堤功能，嚴重則影響防波堤堤體安全。基於防波堤的變狀及損傷機制是檢測作業的基礎，現將沈箱式防波堤主要受損的連鎖反應整理如圖 6.1 所示。

由圖 6.1 顯示，防波堤受波浪作用的損傷連鎖反應計有：(1)消波塊或拋石基礎散亂、下陷導致沈箱的傾斜或下陷；(2)因上部結構、胸牆的龜裂損傷而使堤頂高程下降；(3)防波堤消波塊或護基方塊碰撞沈箱，致使沈箱側壁損傷造成填充沙流出。在有消波塊的情況，波力可能會造成消波塊散亂或下陷，因消波塊大幅地移動或下陷，使得作用於沈箱的波壓增大，最後造成沈箱本體滑動。在沒有消波塊的情況，當波力造成拋石基礎所在的海底地盤被淘刷，則會引起基礎變形崩塌，最後造成沈箱下陷或傾斜。此外，也有肇因於地震、船舶衝撞、潮位差、地盤壓密下陷、溫度變化與材料劣化的變形現象。

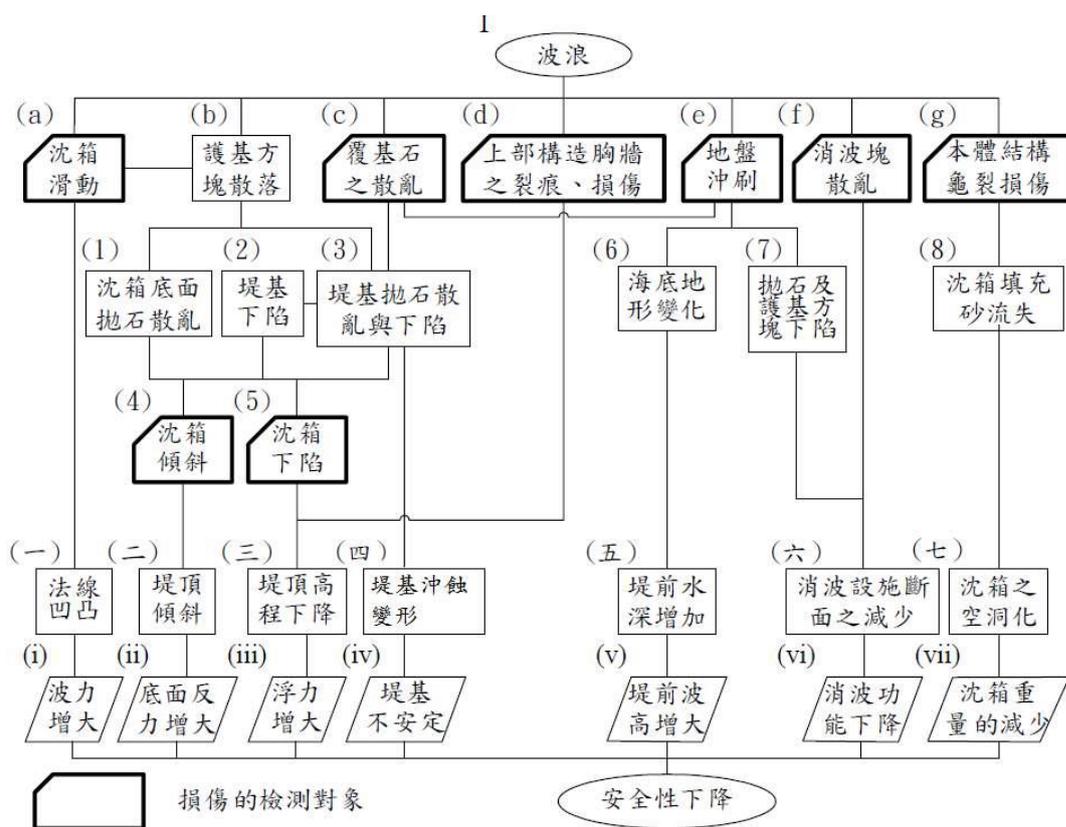


圖 6.1 沉箱式防波堤破壞機制示意圖

國內有關防波堤維護檢修作業相關規定中，目前以基隆港務分公司所建構之作業規範最早，也較為完備。以下僅就基隆港務公司「港埠設施維護檢修作業規定」中相關防波堤設施維護檢修作業規定，整理如表 6.1 所示。由表中可知，主要以水面上可目視的上部及沈箱本體結構之變狀為檢測對象，水上部分應每年辦理一次定期檢測，水下部分則至少每二年辦理一次定期檢測，同時對沉箱水下部分、水上部份及沈箱本體結構進行檢測。

表 6.1 防波堤檢測項目

檢查位置	檢查對象	檢查重點	檢查頻率	
			定期檢查	不定期檢查
水下部分	基礎拋石	沈陷、位移	每2年至少定期檢查1次。	遇特殊情況配合重點檢查。
	護基方塊	位移、散失		
	沈箱主體	破損、龜裂、位移、傾斜		
	消波塊或拋石護坡	崩潰、缺陷		
水上部分	胸牆	龜裂、位移	每年定期檢查1次。	
	堤面	龜裂、沈陷		
	沈箱主體	破損、龜裂		

6.2 防波堤檢維修表單建置

表單之建立參考前節有關沈箱式防波堤的容許變形程度，及變形評估等級，本研究所擬沈箱式防波堤定期檢測評估表單可分為二部分，第一部分為防波堤檢測基本資料，應包含隸屬港口、堤段編號、檢測區段、防波堤高程、防波堤長度及寬度、檢測時間紀錄、檢測單位及檢測人員。第二部分為檢測評估紀錄表，包含檢測項目、劣化等級、評估指標等。定期檢測水上可目視部分，檢測人員可應用簡單量測器械進行，水下檢測則應配合潛水人員執行檢測，表 6.2 與表 6.3 為沈箱式防波堤堤體的定期檢測評估表。

表 6.2 防波堤定期檢測評估表(水上項目)

基本資料	隸屬港口	堤防編號(區段)		完工日期				
	堤防高程	堤防長度		堤防寬度				
	上次檢測	時間： 單位：	上次維護	日期： 項目：				
檢測項目位置	頻率	R	D	劣化程度	E	U	異常位置	
水上部分	<u>BA-101</u> 胸牆 •剝離 •龜裂損傷 •鋼筋外露	□ 一年	2	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落			
				3	<input type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 胸牆損傷致高度不足			
				4	<input type="checkbox"/> 胸牆斷落			
	<u>BA-102</u> 堤面 •龜裂損傷 •鋼筋外露 •沈陷	□ 一年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落			
				3	<input type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 輕微不均勻沈陷			
				4	<input type="checkbox"/> 明顯不均勻沈陷 <input type="checkbox"/> 堤面混凝土斷裂			
	<u>BA-103</u> 沈箱 •變位 •傾斜 •龜裂損傷 •鋼筋外露	□ 一年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 堤體變位不明顯 <input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷 <input type="checkbox"/> 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 <input type="checkbox"/> 輕微傾斜			
				3	<input type="checkbox"/> 堤體變位明顯 <input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 明顯傾斜			
				4	<input type="checkbox"/> 堤體嚴重變位 <input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂 <input type="checkbox"/> 嚴重傾斜			

表 6.3 防波堤定期檢測評估表(水下項目)

檢測項目位置		頻率	R	D	劣化程度	E	U	異常位置
水下部分	BA-201 沈箱 •龜裂損傷	□ 二年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷			
				3	<input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露			
				4	<input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂			
	BA-202 護基方塊 •變位	□ 二年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 部分發生下陷位移			
				3	<input type="checkbox"/> 小規模下陷位移			
				4	<input type="checkbox"/> 大範圍下陷位移			
	BA-203 消波塊 •滑落 •沈陷	□ 二年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 部分消波塊移動或滾落			
				3	<input type="checkbox"/> 消波塊散落沈陷達一層 <input type="checkbox"/> 堤體有滑動之虞			
				4	<input type="checkbox"/> 消波斷面減少，堤體可能滑動			
	BA-204 基礎海床 •沖刷	□ 二年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			
				2	<input type="checkbox"/> 輕微沖刷			
				3	<input type="checkbox"/> 大量沖刷			
				4	<input type="checkbox"/> 嚴重沖刷			
性能指標			$CI = 100 - 12.5 \sum (D + E) \times R / \sum R =$					
檢測人員意見：								
檢測時間			檢測單位			檢測人員		

註：D：破壞程度。E：破壞範圍。R：破壞影響性。U：急迫性。

上述表中之檢測評估指標則參酌本所「建立橋樑檢測制度方法及準則研究」中，針對橋樑構件檢測項目的劣化程度 (D)、發生範圍(E)及損壞影響性(R)與急迫性指標(U)所建構的 D.E.R. & U.評等法之評估準則，如表 6.4 所示。

在年度執行防波堤堤體定期檢測時，可根據上述 D.E.R. & U.評等法，配合防波堤堤體單元劣化程度與評估值關係，進行定期檢測評估表之勾選。本研究所建置防波堤堤體單元劣化程度與對應之急迫性指標關係，如表 6.5 所示。

表 6.4 D.E.R. & U.評等法之評估準則

	0	1	2	3	4
程 度(D)	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損害
範 圍(E)	無法檢測	< 10%	< 30%	< 60%	<
影響性(R)	無法判定重要性	微	小	中	大
急迫性(U)	無法判定急迫性	例行維護	三年內維護	一年內維護	緊急維修

表 6.5 防波堤單元劣化程度與對應之急迫性指標關係

檢測位置和項目		劣化程度	D 值	U 值	
水上部份	胸牆	龜裂損傷	● 無異狀 ● 輕微損傷 (龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm) ● 明顯損傷 (龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm) ● 胸牆斷落	1 2 3 4	1 2 3 4
		剝離與鋼筋外露	● 無異狀 ● 局部混凝土剝落 ● 胸牆損傷致高度不足 ● 混凝土剝落致鋼筋外露	1 2 3 4	1 2 3 4
	堤面	龜裂損傷	● 無異狀 ● 輕微損傷 (龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm) ● 明顯損傷 (龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm) ● 堤面混凝土斷裂	1 2 3 4	1 2 3 4
		沈陷	● 無異狀 ● 輕微不均勻沈陷 (輕微積水) ● 明顯不均勻沈陷 (嚴重積水)	1 2 3	1 2 3
		鋼筋外露	● 無異狀 ● 局部混凝土剝落 ● 混凝土剝落致鋼筋外露 ● 堤面混凝土斷裂	1 2 3 4	1 2 3 4
	沈箱	變位	● 無異狀 ● 堤體變位不明顯 (變位量約 < 5cm) ● 堤體變位明顯 (變位量約量 > 5cm) ● 堤體嚴重變位 (變位量約 > 10cm)	1 2 3 4	1 2~3 3 4
		傾斜	● 無異狀 ● 輕微傾斜 (傾斜率約<3%) ● 明顯傾斜 (傾斜率約3~5%) ● 嚴重傾斜 (傾斜率約>5%)	1 2 3 4	1 2~3 3 4

表 6.5(續) 防波堤單元劣化程度與對應之急迫性指標關係

水上部份	沈箱	龜裂損傷	● 無異狀	1	1
			● 堤體輕微損傷 (龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm)	2	2~3
● 堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm)	3		3		
● 堤體混凝土斷裂	4		4		
	鋼筋外露	● 無異狀	1	1	
		● 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露	2	2~3	
● 壁體剝落致鋼筋外露		3	3		
● 堤體混凝土破洞		4	4		
水下部份	沈箱	龜裂損傷	● 無異狀	1	1
			● 堤體輕微損傷 (龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm)	2	2~3
			● 堤體明顯損傷 (龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm)	3	3
			● 壁體剝落致鋼筋外露	3	3
		● 堤體混凝土斷裂(破洞)	4	4	
	護基方塊	變位	● 部分發生下陷位移 (變位量約<5cm)	2	1
			● 小規模下陷位移 (變位量約 5~10 cm)	3	2
			● 大範圍下陷位移 (變位量約>10 cm)	4	4
消波塊	滑落與沈陷	● 無異狀	1	1	
		● 部分消波塊移動或滾落	2	2~3	
		● 消波塊散落沈陷達一層, 堤體滑動安全率有減低之虞	3	3	
		● 消波斷面減少, 堤體滑動安全率已減低	4	4	
基礎海床	沖刷	● 無異狀	1	1	
		● 輕微沖刷 (沖刷坑深度約<50cm)	2	2~3	
		● 大量沖刷 (沖刷坑深度約 50 ~ 100cm)	3	3	
		● 嚴重沖刷 (沖刷坑深度約> 100cm)	4	4	

考量有關目視檢測標準訂定之複雜性，以及港灣結構物的特殊情況，本研究將現有之 D.E.R.&U.評估標準(D 為劣化程度、E 為劣化範圍、R 為相對重要性、U 為維修急迫性)簡化為僅評估 D 值，並且細分構件各種可能的劣化狀況，方便日後對應維修工法；而 E 值部分則會併於 D 值中說明，以摒除以往 E 值評估不合理的情形；R 值部分未來則以構件重要性進行取代，作為防波堤評估之用；而 U 值部分則配合 D 值來進行維修急迫性之判別，意即 D 值越大，設施構件劣化狀況越嚴重，則越優先維修。由於評估方式之整併，後續即將 D 值改稱為構件劣化狀況，相關情形如圖 6.2 所示。

經由上述建置說明，本研究針對港灣防波堤構造物所建置的檢測表單如表 6.6 所示。

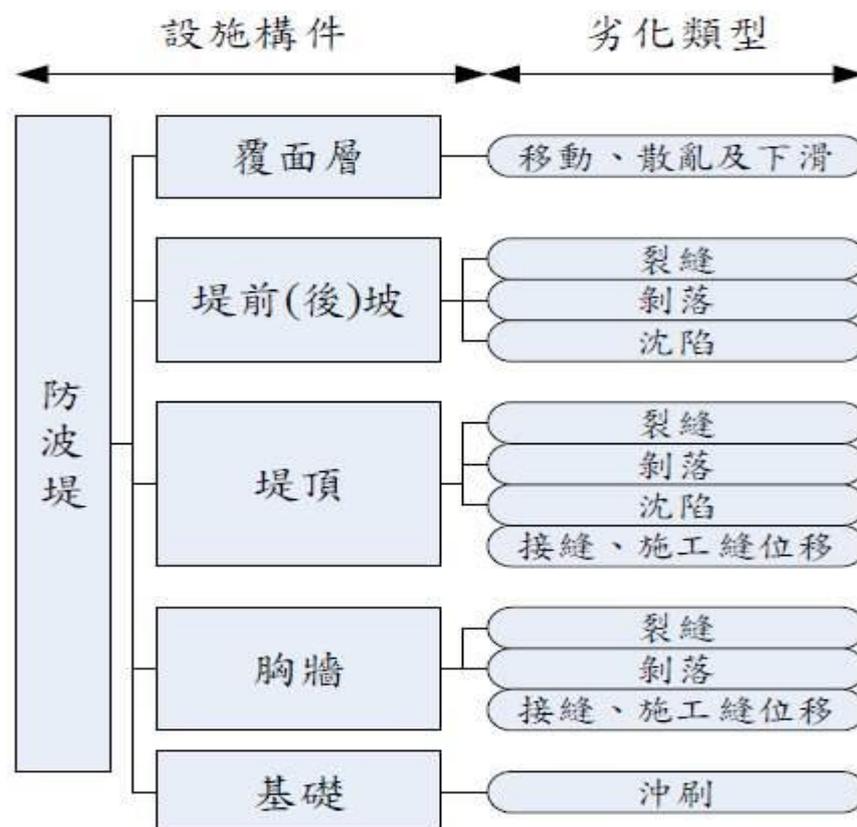


圖 6.2 防波堤設施構件與劣化類型

表 6.6 防波堤構造物檢測表

基本資料	隸屬港口		堤段編號(區段)		完工日期		
	堤段高程		堤段長度		堤段寬度		
	上次檢測	時間: 單位:	上次維護		日期: 項目:		
檢測項目位置		頻率	重要 權重	評 分	劣化程度		位置
(A) 水 上 部 分	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-101</div> 胸牆 • 剝離 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露	半年	2	1	<input type="checkbox"/> 無異狀		
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落		
				3	<input type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 胸牆損傷致高度不足		
				4	<input type="checkbox"/> 胸牆斷落		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-102</div> 堤面 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露 • 沉陷	半年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀		
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落		
				3	<input type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 輕微不均勻沉陷		
				4	<input type="checkbox"/> 明顯不均勻沉陷 <input type="checkbox"/> 堤面混凝土斷裂		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-103</div> 沉箱 • 變位 • 傾斜 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露	半年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀		
				2	<input type="checkbox"/> 堤體變位不明顯 <input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷 <input type="checkbox"/> 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 <input type="checkbox"/> 輕微傾斜		
				3	<input type="checkbox"/> 堤體變位明顯 <input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 整體剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 明顯傾斜		
				4	<input type="checkbox"/> 堤體嚴重變位 <input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂 <input type="checkbox"/> 嚴重傾斜		
(A) 水 下 部	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-201</div> 沉箱 • 龜裂損傷	<input type="checkbox"/> 一年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀		
				2	<input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷		
				3	<input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露		
				4	<input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂		

表 6.6(續) 防波堤構造物檢測表

分	BA-202 護基方塊 • 變位	<input type="checkbox"/> 半年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
	2			<input type="checkbox"/> 部份發生下陷位移		
	3			<input type="checkbox"/> 小規模下陷位移		
	4			<input type="checkbox"/> 大範圍下陷位移		
(B) 海象 指標	BA-203 消波塊 • 滑落 • 沉陷	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
	2			<input type="checkbox"/> 部分消波塊移動或滾落		
	3			<input type="checkbox"/> 消波塊散落沉陷達一層，堤體滑動安全率有減低之虞		
	4			<input type="checkbox"/> 消波斷面減少，堤體滑動安全率以減低		
	BA-204 基礎海床 • 沖刷	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
	2			<input type="checkbox"/> 輕微沖刷		
	3			<input type="checkbox"/> 大量沖刷		
	4			<input type="checkbox"/> 嚴重沖刷		
	BA-205 波浪、潮位	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input type="checkbox"/> 夾角不介於 45~135 度間	
	5			<input type="checkbox"/> 夾角介於 45~135 度間		
評估性能						
檢測人員意見：						
檢測時間		檢測單位		檢測人員		

6.3 基隆港防波堤檢測成果評估

依據前第五章基隆港防波堤現場調查結果，以及應用前述檢測方法，本年度於防波堤共調查 48 處，因篇幅關係僅陳列如表 6.7 所示，其餘可參考本所「103 年港灣構造物維護管理資訊系統建置」報告。

表 6.7 基隆港東防波堤沉箱#9 檢測表

基本資料	隸屬港口	基隆港	堤防編號(區段)			東堤防 9	天氣	晴
	堤段高程		堤段長度			18.75 m	堤段寬度	21 m
檢測時間	時段: 9/27 下午 12 時 單位: 台灣整合防災工程技術顧問有限公司			上次維護	日期: 項目:			
檢測項目位置	頻率	重要 權重	評 分	劣化程度			備註	
水上部分	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-101</div> 胸牆 • 剝離 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露	半年	2	1	<input checked="" type="checkbox"/> 無異狀			無胸牆
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落			
				3	<input type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 胸牆損傷致高度不足			
				4	胸牆段落			
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-102</div> 堤面 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露 • 沉陷	半年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			損壞問題圖(1.2.3.4)
				2	<input type="checkbox"/> 輕微損傷 <input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落			
				3	<input checked="" type="checkbox"/> 明顯損傷 <input type="checkbox"/> 混凝土剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 輕微不均勻沉陷			
				4	<input type="checkbox"/> 明顯不均勻沉陷 <input type="checkbox"/> 堤面混凝土斷裂			
水上部分	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">BA-103</div> 沉箱 • 變位 • 傾斜 • 龜裂損傷 • 鋼筋外露	<input type="checkbox"/> 半年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀			損壞問題圖(5.6)
				2	<input type="checkbox"/> 堤體變位不明顯 <input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷 <input type="checkbox"/> 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 <input type="checkbox"/> 輕微傾斜			
				3	<input type="checkbox"/> 堤體變位明顯 <input checked="" type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 整體剝落致鋼筋外露 <input type="checkbox"/> 明顯傾斜			
				4	<input type="checkbox"/> 堤體嚴重變位 <input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂			

表 6.7(續) 基隆港東防波堤沉箱#9 檢測表

					<input type="checkbox"/> 嚴重傾斜	
水下部分	BA-201 沉箱 • 龜裂損傷	<input type="checkbox"/> 一年	4	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
				2	<input checked="" type="checkbox"/> 堤體輕微損傷	
				3	<input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷 <input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露	
				4	堤體混凝土斷裂	
(A) 水下部分	BA-201 護基方塊 • 變位	<input type="checkbox"/> 半年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
				2	<input checked="" type="checkbox"/> 部份發生下陷位移	
				3	<input type="checkbox"/> 小規模下陷位移	
				4	<input type="checkbox"/> 大範圍下陷位移	
(B) 海象指標	BA-202 消波塊 • 滑落 • 沉陷	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input checked="" type="checkbox"/> 無異狀	無消波塊
				2	<input type="checkbox"/> 部分消波塊移動或滾落	
				3	<input type="checkbox"/> 消波塊散落沉陷達一層，堤體滑動安全率有減低之虞	
				4	<input type="checkbox"/> 消波斷面減少，堤體滑動安全率以減低	
	BA-203 基礎海床 • 沖刷	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input type="checkbox"/> 無異狀	
				2	<input checked="" type="checkbox"/> 輕微沖刷	
				3	<input type="checkbox"/> 大量沖刷	
				4	<input type="checkbox"/> 嚴重沖刷	
波浪、海流	<input type="checkbox"/> 一年	3	1	<input checked="" type="checkbox"/> 夾角不介於 45~135 度間		
			5	<input type="checkbox"/> 夾角介於 45~135 度間		
評估性能		性能等級：B 中危害度				
檢測人員意見：損壞明顯及變位						
檢測時間	9/27 下午 12 時	檢測單位	台灣整合防災 工程技術顧問 有限公司	檢測人員	黃金華 簡鼎哲	

由於防波堤整體狀況隨時間的劣化趨勢和構造物的型式、環境條件、使用期間的受力行為及材料性質的劣化有關，而破壞更是累積劣化的結果。因此，構造物耐久性的預測，可對條件相似的構造物，進行性能指標的資料統計分析，以指標值大小判定構造物狀況，求得相應構造物的整體狀況指標，本研究約略將構造物的整體狀況指標分成三個等級，如下所述：

A 級：表示安全無虞。

B 級：表示結構物已受損傷，可增加檢測項目或藉由儀器提高檢測精度，了解構造物性能的劣化趨勢。分析其營運管理成本，在預算許可的條件下進行維修。

C 級：表示構造物已受較嚴重損傷，此時應分析其生命週期成本，編列預算進行必要的維修及補強的工作，或在適當時機拆除重建。由上得知，當防波堤構造物處在於 B、C 級時需要做些維修處理。

經由前述分級，基隆港防波堤之調查成果彙整如表 6.8 與表 6.9 所示，另並將表中評分 (A)(B) 部分分數加總，如圖 6.3 與圖 6.4 所示。因基隆港防波堤損傷不嚴重，屬於 A~B 等級。

本研究另進行二維分析評估各檢測表，如圖 6.5，結果仍無法區分出 A、B、C 等級之防波堤。本研究再至基隆港現場蒐集損害較嚴重 C 等級之防波堤資料共六處，重繪成圖 6.6 之防波堤維修等級評估。

表 6.8 基隆港東防波堤調查成果總表

編號	防波堤評分									評估等級	
	A表			B表			評分				
	水上部分			水下部分							
胸牆	堤面	沉箱	沉箱	護基方塊	消波塊	海象指標 基礎海床	波浪、潮位	A	B		
1	1	1	1	1	1	1	2	1	5	4	A
2	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
3	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
4	1	2	1	1	1	1	1	1	6	3	A
5	1	2	3	1	1	1	2	1	8	4	B
6	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
7	1	1	1	2	2	1	1	1	7	3	A
8	1	1	1	2	1	1	1	1	6	3	A
9	1	3	3	2	2	1	2	1	11	4	B
10	1	1	3	2	1	1	2	1	8	4	B
11	1	1	1	1	1	1	2	1	5	4	A
12	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
13	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
14	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
15	1	2	2	1	1	1	1	1	7	3	A
16	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
17	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
18	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
19	1	1	1	2	1	1	1	1	6	3	A
20	1	1	1	2	1	1	1	1	6	3	A
21	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
22	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
23	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
24	1	1	1	1	1	1	1	1	5	3	A
25	1	3	3	1	1	1	2	1	9	4	A
26	2	1	1	1	1	1	3	5	6	9	A
27	1	1	1	1	1	1	3	5	5	9	A
28	2	1	1	1	1	1	3	5	6	9	B
29	1	1	1	1	1	1	3	5	5	9	A
30	1	1	1	1	1	1	3	5	5	9	A

表 6.9 基隆港西防波堤調查成果總表

防波堤評分											評估等級
編號	A表					B表			評分		
	水上部分			水下部分		海象指標			A	B	
	胸牆	堤面	沉箱	沉箱	護基方塊	消波塊	基礎海床	波浪、潮位			
1	2	2	2	1	1	2	2	5	8	9	A
2	2	2	1	1	3	1	2	5	9	8	B
3	2	2	3	1	2	2	2	5	10	9	A
4	2	2	3	1	2	2	2	5	10	9	B
5	2	2	1	1	2	1	2	5	8	8	A
6	1	2	1	1	2	1	2	5	7	8	A
7	3	1	2	1	1	1	2	5	8	8	A
8	1	2	1	1	1	1	2	5	6	8	A
9	1	1	3	1	1	1	2	5	7	8	A
10	1	2	1	1	1	1	2	5	6	8	A
11	3	1	1	1	2	1	2	5	8	8	A
12	2	1	1	1	2	1	2	5	7	8	A
13	1	1	1	1	1	2	2	5	5	9	A
14	1	2	1	1	1	1	2	5	6	8	A
15	2	2	1	1	1	2	2	5	7	9	A
16	1	1	1	3	1	2	2	5	7	9	A
17	2	2	1	1	1	2	2	5	7	9	A
18	1	1	1	3	1	2	2	5	7	9	A

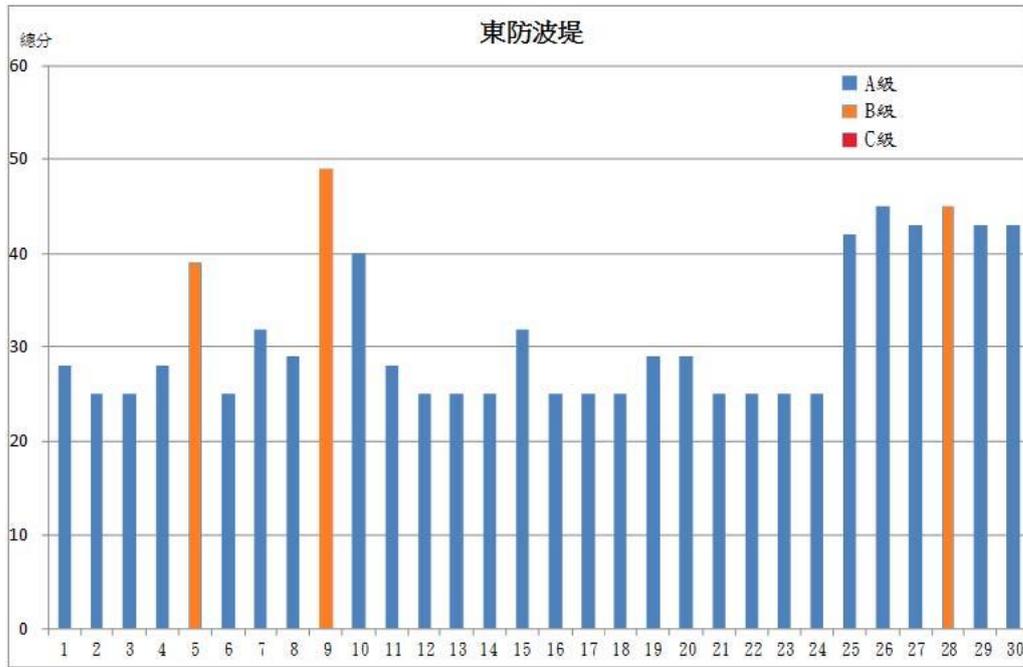


圖 6.3 基隆港東防波堤總分圖

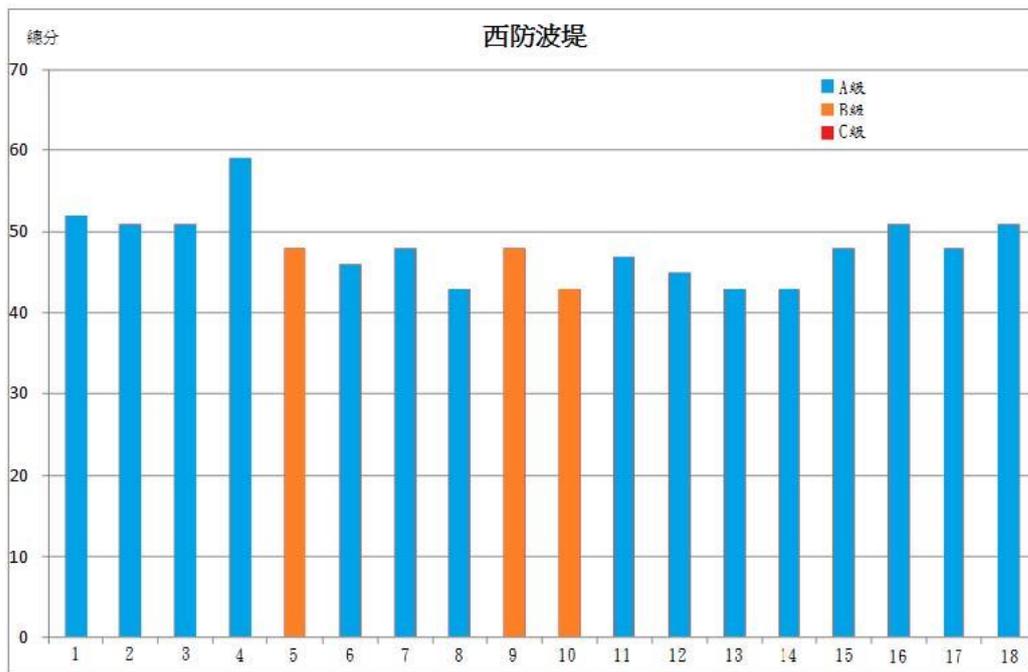


圖 6.4 基隆港西防波堤總分圖

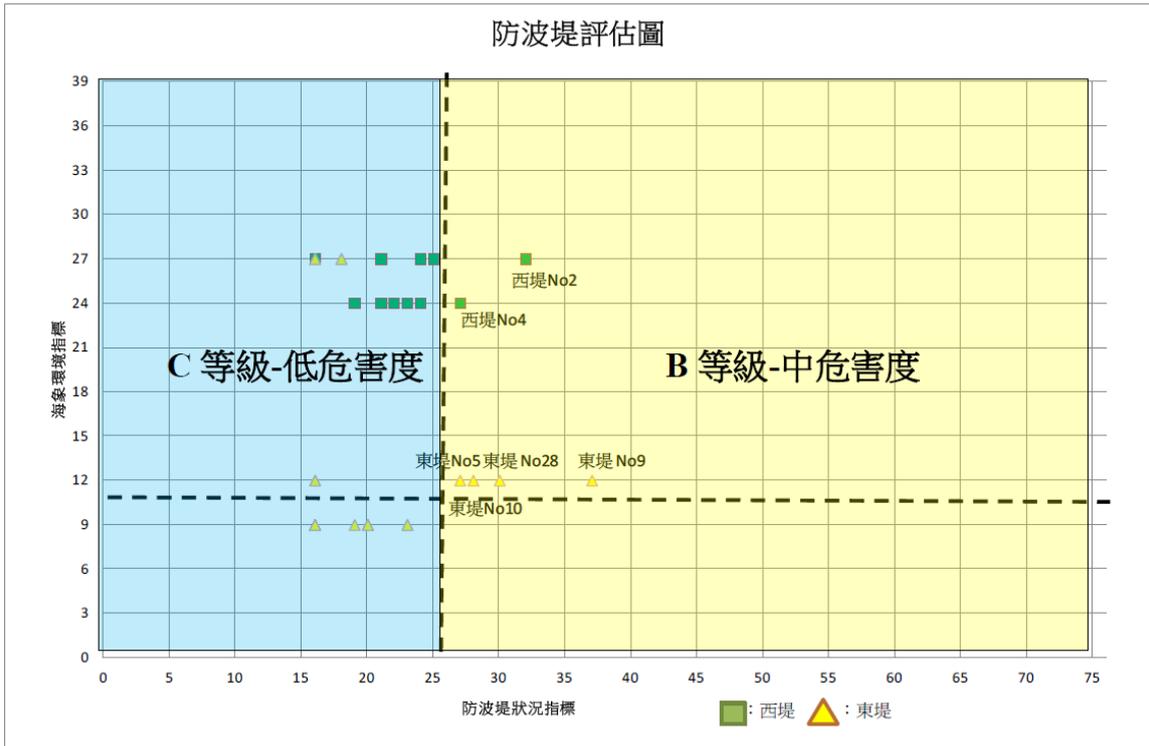


圖 6.5 基隆港防波堤維修等級評估

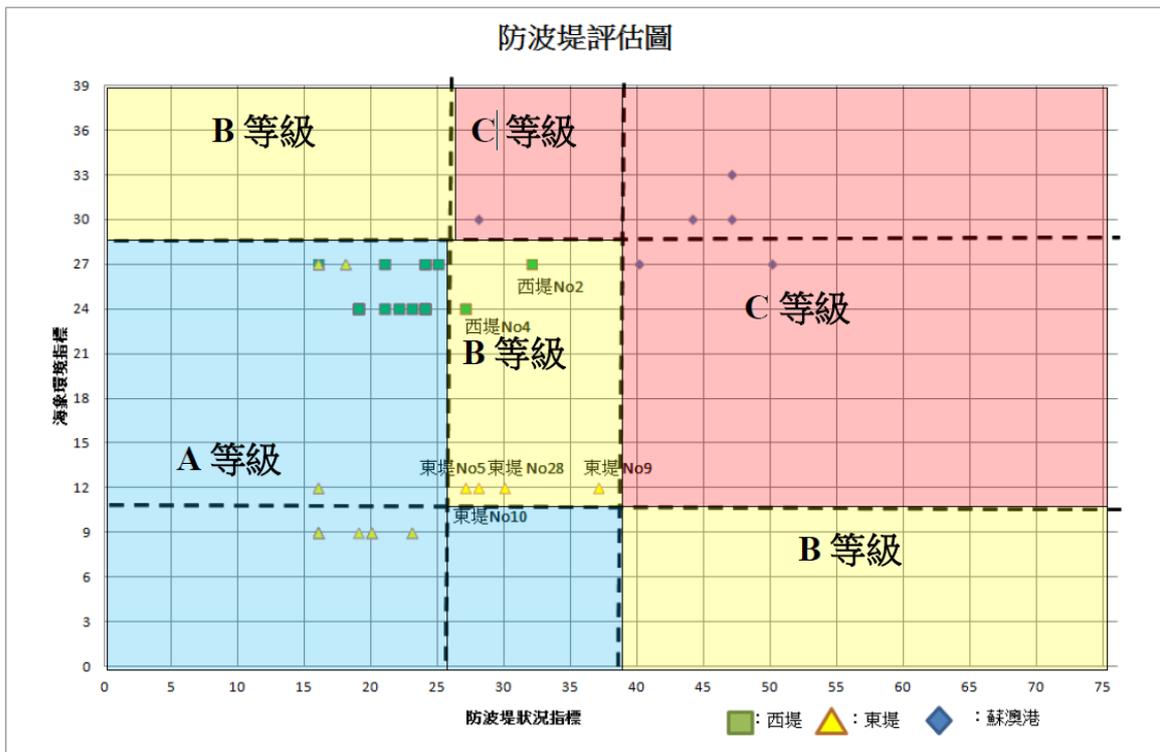


圖 6.6 防波堤維修等級評估

第七章 結論與建議

7.1 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、防波堤構造物安全性評估探討及維護管理資訊系統建置等，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。中度颱風侵襲臺北港的年增加率平均約為 0.022 次/年，基隆港部份的年增率平均約是 0.0179 次/年。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臺北港波高年增率為 0.0116 至 0.0286 m/year；但 Seasonal Kendall 趨勢檢定法則臺北港波高年增率為 0.0236 m/year 較具代表性，顯示臺北港自 1996 年至 2013 年間的波浪有遞增趨勢。而基隆港以一階線性回歸與 EMD 法所估算的年增率約為 -0.0055 至 -0.0168 m/year，顯示基隆港波高長期變化趨勢極小可視為無明顯趨勢變化。
2. 利用類神經推算、最小化模式樹(M5)與二維數值風浪模式等所建置臺北港與基隆港的颱風波浪推算模式，經由推算結果得知，利用 M5 模式所建立的臺北港波浪推算模式其運算規則達 339 組，而基隆港波浪推算模式則為 428 組；由兩港域的驗證結果中顯示，基隆港的波高峰值誤差較臺北港差，其餘波高峰值發生時間及整體 RMSE 及 R 僅稍微較臺北港模式好。
3. 由類神經與 M5 模式兩種推估模式的比較結果顯示，波高峰值的估算精度皆以類神經模式較佳，而峰值發生時間與 R^2 皆是以 M5 模式較佳。在模式推估結果的風險分析中 M5 模式所推估的波高峰值誤差較有偏低的現象，類神經模式則無。在模式推估峰值發生時間的部分，由標準偏差可以發現類神經模式推估峰值發生時間誤差的波

動幅度較 M5 模式大。就整體而言，類神經模式所推算的結果較有高估的現象，M5 模式則較多低估的現象。M5 模式所推算的結果雖然在各場颱風波浪整體誤差表現良好，但峰值部分較常有低估的情形。

4. 有關探討港域設計波條件方面，本研究利用類神經、二維數值模式與 M5 最小化模式樹等模式所推算的樣本，以及港域實測資料樣本，以年極值取樣法與超量門檻值取樣法進行臺北港與基隆港的極值分析，同時並推算 10、25、50、100 及 200 年等重現期的設計波高。另外，本研究在考量氣候變遷的影響下，計算 50 年重現期的臺北港與基隆港的設計波高標準。由計算結果得知，臺北港類神經樣本與實測樣本的分析結果較接近，二維數值模式與 M5 模式樣本則有低估的現象；而基隆港部分，其三種模式樣本的分析結果接近，但較實測樣本而言皆有低估的現象。
4. 在港灣防波堤構造物安全性評估探討方面，本年度針對基隆港東西防波堤辦理防波堤現場圖像調查、防波堤沉箱之安全性評估探討以及結構物受損補強方案研擬等項工作。在現場圖像調查方面，包含進行多因束監測、水下攝影與水上結構物檢視等，其調查結果可提供後續防波堤安全性評估及受損補強方案研擬之依據。
5. 在防波堤沉箱安全性評估探討方面，基隆港東防波堤段之原設計係採用 20 年迴歸期颱風波浪作為設計條件，東防波堤延伸段則與現行規範相同，以 50 年迴歸期波浪進行設計；本研究依現行規範採用更新之 50 年迴歸期颱風波浪作為檢核依據。綜合堤基保護方塊及消波塊重量、沉箱穩定性等的分析結果得知，堤基保護方塊依據計算結果，堤基方塊重量應達 41.19t 以上，而現有堤基方塊重量達 41.4t 以上，故現況安全性應無虞。現況東防波堤堤腳處之消波塊主要以 40T 雙 T 塊為主，依據推算波浪以 Hudson 公式估算，其雙 T 塊所需之重量至少需 36.95t 以上，應可符合安全之需求。
6. 依據本研究推算之 50 年迴歸期颱風波浪作為設計條件進行沉箱安全性檢核結果可知，東防波堤之沉箱滑動安全係數介於 0.67~1.61 間，而傾倒安全係數介於 0.93~3.34 間，由各斷面之計算結果顯示，

東防波堤堤體結構安全已達危險情況，而東防波堤延伸段之堤體穩定應安全無虞。惟由現況調查顯示，東防波堤現況並無顯著之堤體災損，此原因主要在於往昔發生之颱風波浪的入射波向及週期與推算結果有所差異；意即東防波堤未發生災損之原因，可能因波浪入射角度並未正向入射，波浪週期較短，或規範之上揚力及摩擦係數偏保守估計等因素所致。

6. 有關初步研擬基隆港東防波堤結構受損補強方案方面，東防波堤之消波塊似有沉陷之情況產生，依據基隆港務分公司往昔消波塊補拋之記錄，以及考量本堤段水深較深維護不易情況，本研究建議以定期補拋消波塊之方式維持其頂面高程不低於既有堤面，以確保其消滅波能之能力。同時由現場目視結果發現，東防波堤部份沉箱有間隙過大與錯位情形，其原因可能為沉箱於安放時之誤差，或因沉箱受颱風波浪作用而產生位移；本研究建議可以堤後背填或是堤前加拋消波塊之方式增加堤體之安定性，以避免颱風大浪造成進一步之災損。另外，堤面場鑄混凝土有明顯破損情況，因損傷尚屬輕微，且對結構安全無明顯影響，本研究建議受損部位補澆置混凝土補強即可。
7. 有關防波堤構造物維護管理資訊系統建置方面，本研究就防波堤因外力所導致破壞的連鎖反應情況，進行防波堤構造物維護管理檢測因子探討，同時參酌基隆港務分公司「港埠設施維護檢修作業規定」中相關防波堤設施維護檢修作業規定，研擬防波堤檢測項目，以及防波堤定期檢測評估表單。參考現場圖像調查結果及部分現場勘查情況，本研究建置基隆港東西防波堤 48 處之檢測評估表單；另外，並依據防波堤構造物損害情況，進行維修等級評估，用以提供港務單位參酌應用。

7.2 成果效益及後續應用情形

本研究所完成之波浪極值統計特性模式、防波堤構造物安全性評估，以及所建置防波堤構造物維護管理資訊系統等項工作成果，可與

本研究往昔相關計畫完成之「類神經網路之颱風波浪預報模式」合構成一套「港池安全操作系統」，用以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，本年度所完成臺北港與基隆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. 「蘇澳港防波堤改善工程規劃」，1997，省交通處港灣技術研究所。
5. 郭一羽，2001，「海岸工程學」，文山書局。
6. 基隆港務局，2004，「基隆港東防波堤延伸工程規劃評估」。
7. 「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。
8. 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。
9. 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。
10. 「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。
11. 「103年蘇澳港防波堤圖像資料調查」，2014，交通部運輸研究所。
12. 「103年港灣構造物維護管理資訊系統建置」，2014，交通部運輸研究所。
13. Coastal engineering manual (2002) “Hydro-dynamic analysis and design conditions,” Chapter 8.
14. 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.

15. Ferreira, J.A., Guedes Soares, C., (2000) "Modelling distributions of significant wave height", *Coastal Engineering* 40, 361-374.
16. 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.
17. Muir, J.R., El Shaarawi, A.H., (1986) "On the calculation of extreme wave heights", *Ocean Engineering* 13, 93-118.
18. Suh, K. D., Kim, M. and Chun J. (2013) "Estimation of design wave height using empirical simulation technique," *Ocean Engineering*, 61, 39-49.
19. Young, I. R., Zieger, S., Babanin, A. V. (2011) "Global Trends in Wind Speed and Wave Height," *Science*, 332, 6028, 451-455.