

101-103-7641  
MOTC-IOT-100-H2DB001c

# 臺灣港灣構造物動態資訊 管理系統建置之研究(3/4)



交通部運輸研究所

中華民國 101 年 7 月

101-103-7641  
MOTC-IOT-100-H2DB001c

# 臺灣港灣構造物動態資訊 管理系統建置之研究(3/4)

著者：何良勝、林受勳、江玟德、陳志弘

交通部運輸研究所

中華民國 101 年 7 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

臺灣港灣構造物動態資訊管理系統建置之研究(3/4)/  
何良勝等著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，  
民 101.07  
面 ； 公分  
ISBN 978-986-03-3111-0 (平裝)

1. 波動 2.防波堤 3.資訊管理系統

351.941029

101013801

臺灣港灣構造物動態資訊管理系統建置之研究(3/4)

著 者：何良勝、林受勳、江玟德、陳志弘  
出版機關：交通部運輸研究所  
地 址：10548 台北市敦化北路 240 號  
網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw)(中文版>中心出版品)  
電 話：(04) 26587121  
出版年月：中華民國 101 年 7 月  
印 刷 者：  
版(刷)次冊數：初版一刷 80 冊  
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站  
定 價：250 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：1010101430

ISBN：978-986-03-3111-0 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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





## 交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                         |                            |                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 出版品名稱：臺灣港灣構造物動態資訊管理系統建置之研究(3/4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                         |                            |                                                              |
| 國際標準書號（或叢刊號）<br>ISBN978-986-03-3111-0 (平裝)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 政府出版品統一編號<br>1010101430 | 運輸研究所出版品編號<br>101-103-7641 | 計畫編號<br>100-H2DB001c                                         |
| 主辦單位：港灣技術研究中心<br>主管：邱永芳<br>計畫主持人：何良勝<br>研究人員：林受勳、江玟德、陳志弘、張惠華<br>聯絡電話：(04)26587121<br>傳真號碼：(04)26560661                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |                            | 研究期間<br><br>自 100 年 01 月<br>至 100 年 12 月                     |
| 關鍵詞：防波堤維護管理資訊系統、波浪極值統計推算模式、颱風波浪推算                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                         |                            |                                                              |
| 摘要： <p>本報告為四年期程之第三年研究報告，報告內容主要包含建置安平港與臺北港兩港域適用的即時性颱風波浪推算模式；並且亦辦理此兩港域季節性變化之月極值及年極值兩方面的統計特性探討，本極值分析方法，首先應用箱型圖分析檢核取樣，再進一步討論極值分析之最佳方法。本年度仍延續辦理包含現場圖像監測調查、防波堤沉箱安全性評估探討與研擬結構物損壞補強方案之高雄港第二港口防波堤構造物維護管理資訊系統建置工作；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，兩者合構建置一套高雄港適用的定期性防波堤維護管理資訊系統。另外，本年度針對高雄港初步辦理海嘯對防波堤構造物之影響探討。</p> <p>依據工作成果，本研究之波浪極值統計特性分析結果警示，臺灣主要港口早期所應用之設計波浪條件確實值得重新探討與審視比對；而定期性防波堤維護管理資訊系統可提供港務單位預先瞭解防波堤構造物之安全性，並以定期性檢測方式降低維護成本。</p> |                         |                            |                                                              |
| 出版日期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 頁數                      | 定價                         | 本出版品取得方式                                                     |
| 101 年 7 月                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 220                     | 250                        | 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：<br><input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密<br>（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，<br><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）<br><input checked="" type="checkbox"/> 普通           |                         |                            |                                                              |
| 備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |                            |                                                              |

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                     |                                          |                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TITLE:</b> The Establishment of Dynamic Information Management System on Taiwan ' s Harbors Constructions<br>(3/4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                     |                                          |                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>ISBN (OR ISSN)</b><br>ISBN978-986-03-3111-0<br>(pbk)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER</b><br>1010101430 | <b>IOT SERIAL NUMBER</b><br>101-103-7641 | <b>PROJECT NUMBER</b><br>100-H2DB001c                                                                                                                                                                                         |
| <b>DIVISION:</b> HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER<br><b>DIVISION DIRECTOR:</b> Chiu, Y.F.<br><b>PROJECT INVESTIGATOR:</b> Ho, L.S.<br><b>PROJECT STAFF:</b> Lin, S.S., Jiang, W.D., Chen, C.H., Chang, F.F.<br><b>PHONE:</b> 04-26587121<br><b>FAX:</b> 04-26560661                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                     |                                          | <b>PROJECT PERIOD</b><br>FROM January 2011<br>TO December 2011                                                                                                                                                                |
| <b>KEY WORDS:</b> BREAKWATER SAFEGUARD AND MANAGEMENT SYSTEM, EX-WAVE STATISTICS ESTIMATING<br>MODEL, TYPHOON WAVES ESTIMATING                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                     |                                          |                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>ABSTRACT:</b><br><br><p>This report is the third year research of a four-year project. The major results, including A special wave prediction model using artificial neural network is developed for typhoon waves considering land effects on the wind structure of a typhoon and wave decay. The ex-wave statistics results, Wave samples are first examined valid by using the technique of box-plot. Maximum likelihood and least squared method are suitable for determining parameters of probability distribution for extreme analysis is checked. Typhoon wave estimating model, field investigation and safety assessment of the breakwater are combined to set up a regular system for Kaohsiung harbor breakwater safeguard and management. We also newly study the tsunami that would affect Kaohsiung Harbor's breakwater.</p> <p>According to the study, the analysis of wave extreme values shows that the design wave condition used in the early harbor constructions in Taiwan must be carefully examined and re-evaluated. The application of breakwater information managing system may offer harbor units a regular examination on harbor constructions so as to reduce the cost for harbor maintenance.</p> |                                                     |                                          |                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>DATE OF PUBLICATION</b><br>July 2012                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>NUMBER OF PAGES</b><br>220                       | <b>PRICE</b><br>250                      | <b>CLASSIFICATION</b><br><input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL<br><input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET<br><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.....                   | VI   |
| 圖目錄.....                   | X    |
| 第一章 前言 .....               | 1-1  |
| 第二章 港域颱風波浪推算模式建立.....      | 2-1  |
| 2.1 資料來源與處理說明.....         | 2-1  |
| 2.2 類神經颱風波浪推算模式 .....      | 2-10 |
| 2.2.1 類神經網路架構.....         | 2-10 |
| 2.2.2 資料分類說明.....          | 2-13 |
| 2.2.3 模式輸入與輸入層轉換函數 .....   | 2-14 |
| 2.2.4 歸屬函數修正輸入參數 .....     | 2-20 |
| 2.2.5 轉換函數與訓練函數 .....      | 2-27 |
| 2.2.6 隱藏層神經元測試 .....       | 2-28 |
| 2.3 類神經颱風波浪推算結果 .....      | 2-29 |
| 2.4 類神經颱風波浪推算模式之風險分析 ..... | 2-33 |
| 2.5 颱風波浪之實際推算結果 .....      | 2-35 |
| 2.6 半經驗颱風波浪推算模式 .....      | 2-38 |
| 2.7 半經驗颱風波浪模式推算結果 .....    | 2-42 |
| 2.8 兩種颱風波浪推算模式結果比較 .....   | 2-45 |
| 第三章 港域波浪極值統計特性分析.....      | 3-1  |
| 3.1 波浪極值統計分析方法 .....       | 3-1  |
| 3.1.1 極值分布函數.....          | 3-1  |
| 3.1.2 極值分布參數推定 .....       | 3-3  |
| 3.1.3 信賴檢定.....            | 3-5  |
| 3.1.4 推估值之標準偏差 .....       | 3-7  |
| 3.2 資料來源與處理方法.....         | 3-9  |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 3.2.1 資料選取及補遺.....            | 3-9        |
| 3.2.2 箱型圖分析方法.....            | 3-10       |
| 3.2.3 重現期的極值波高估算.....         | 3-16       |
| 3.3 月極值統計分析.....              | 3-17       |
| 3.4 年極值統計分析.....              | 3-44       |
| 3.4.1 資料分析方式.....             | 3-44       |
| 3.4.2 推算結果.....               | 3-44       |
| <b>第四章 港灣構造物維護管理系統建立.....</b> | <b>4-1</b> |
| 4.1 防波堤圖像資料調查.....            | 4-1        |
| 4.1.1 調查內容.....               | 4-1        |
| 4.1.2 多音束監測作業.....            | 4-2        |
| 4.1.3 水下攝影作業.....             | 4-6        |
| 4.1.4 水上結構物檢視作業 .....         | 4-8        |
| 4.2 防波堤設計條件檢討.....            | 4-13       |
| 4.2.1 防波堤原有設計條件 .....         | 4-13       |
| 4.2.2 重新計算之設計條件 .....         | 4-15       |
| 4.2.3 原有與更新設計條件之比較 .....      | 4-17       |
| 4.3 高雄港防波堤歷年維修情形 .....        | 4-18       |
| 4.4 防波堤安全性評估探討 .....          | 4-21       |
| 4.4.1 防波堤堤址波浪計算 .....         | 4-21       |
| 4.4.2 第二港口防波堤原有設計概況 .....     | 4-23       |
| 4.4.3 防波堤堤體安全性探討 .....        | 4-25       |
| 4.4.4 計算結果與分析.....            | 4-32       |
| 4.5 防波堤損壞原因探討與補強方案研擬 .....    | 4-39       |
| 4.5.1 防波堤損壞原因探討 .....         | 4-40       |
| 4.5.2 防波堤變形分類.....            | 4-41       |
| 4.5.3 補強方案之工法研擬 .....         | 4-42       |
| 4.6 防波堤維護方案研擬.....            | 4-43       |
| 4.6.1 防波堤現況損壞補強修護對策 .....     | 4-43       |
| 4.6.2 防波堤維護檢測分類 .....         | 4-44       |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 4.6.3 防波堤檢測評估方法 .....           | 4-46       |
| 4.7 防波堤構造物維護管理資訊系統之建置 .....     | 4-57       |
| 4.7.1 表單資訊化 .....               | 4-57       |
| 4.7.2 系統電腦化 .....               | 4-59       |
| 4.7.3 資料庫建置 .....               | 4-64       |
| 4.7.4 維護管理資訊系統示範 .....          | 4-72       |
| 4.7.5 平板電腦系統建置及展示 .....         | 4-77       |
| <b>第五章 海嘯對防波堤構造物之影響探討 .....</b> | <b>5-1</b> |
| 5.1 海嘯成因 .....                  | 5-1        |
| 5.2 海嘯強度與規模 .....               | 5-1        |
| 5.3 國內外海嘯資料蒐集與分析 .....          | 5-8        |
| 5.3.1 國內海嘯資料蒐集與分析 .....         | 5-9        |
| 5.3.2 國外海嘯資料蒐集與分析 .....         | 5-13       |
| 5.4 港灣結構物受海嘯侵襲之破壞案例 .....       | 5-14       |
| 5.5 海嘯對高雄港之影響初探 .....           | 5-18       |
| 5.6 綜合分析結果 .....                | 5-22       |
| <b>第六章 結論與建議 .....</b>          | <b>6-1</b> |
| 6.1 結論與建議 .....                 | 6-1        |
| 6.2 成果效益及後續應用情形 .....           | 6-3        |
| <b>參考文獻 .....</b>               | <b>7-1</b> |

## 表 目 錄

|        |                                                         |      |
|--------|---------------------------------------------------------|------|
| 表 2.1  | 本計畫所選擇影響安平港之颱風及其對應波高.....                               | 2-4  |
| 表 2.2  | 本計畫所選擇影響臺北港之颱風及其對應波高.....                               | 2-5  |
| 表 2.3  | 本計畫所選用建立安平港模式之颱風及其對應波高 .....                            | 2-8  |
| 表 2.4  | 本計畫所選用建立高雄港模式之颱風及其對應波高 .....                            | 2-9  |
| 表 2.5  | 輸入因子與波浪間的相關性分析.....                                     | 2-20 |
| 表 2.6  | 雙峰轉換後的輸入參數與波高間的相關性分析(1800km 以內).....                    | 2-26 |
| 表 2.7  | 安平港類神經颱風波浪推算結果.....                                     | 2-30 |
| 表 2.8  | 臺北港類神經颱風波浪推算結果.....                                     | 2-32 |
| 表 2.9  | 各港域類神經颱風波浪推算成效比較.....                                   | 2-33 |
| 表 2.10 | 安平港半經驗颱風波浪推算結果.....                                     | 2-42 |
| 表 2.11 | 臺北港半經驗颱風波浪推算結果.....                                     | 2-44 |
| 表 2.12 | 安平港兩種波浪推算模式的誤差比較.....                                   | 2-45 |
| 表 2.13 | 臺北港兩種波浪推算模式的誤差比較.....                                   | 2-46 |
| 表 3.1  | 各極值分佈相關統計量之特性.....                                      | 3-3  |
| 表 3.2  | 計算樣本順位機率之 $\alpha$ 及 $\beta$ 值.....                     | 3-5  |
| 表 3.3  | 相關係數殘差平均值公式之係數 $\bar{a}$ ， $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值..... | 3-6  |
| 表 3.4  | 重現期推算量之標準偏差公式中之係數.....                                  | 3-8  |
| 表 3.5  | 臺北港每月最大波高資料表（單位:m） .....                                | 3-11 |
| 表 3.6  | 安平港每月最大波高資料表（單位:m） .....                                | 3-12 |
| 表 3.7  | 臺北港 1999~2010 年每月波高之箱型圖分析表（單位：m）.....                   | 3-14 |
| 表 3.8  | 安平港 2000~2010 年每月波高之箱型圖分析表（單位：m）.....                   | 3-15 |
| 表 3.9  | 推估臺北港 1 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....                          | 3-18 |
| 表 3.10 | 推估臺北港 2 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....                          | 3-19 |
| 表 3.11 | 推估臺北港 3 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....                          | 3-20 |
| 表 3.12 | 推估臺北港 4 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....                          | 3-21 |

|        |                                 |      |
|--------|---------------------------------|------|
| 表 3.13 | 推估臺北港 5 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-22 |
| 表 3.14 | 推估臺北港 6 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-23 |
| 表 3.15 | 推估臺北港 7 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-24 |
| 表 3.16 | 推估臺北港 8 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-25 |
| 表 3.17 | 推估臺北港 9 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-26 |
| 表 3.18 | 推估臺北港 10 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-27 |
| 表 3.19 | 推估臺北港 11 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-28 |
| 表 3.20 | 推估臺北港 12 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-29 |
| 表 3.21 | 推估安平港 1 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-31 |
| 表 3.22 | 推估安平港 2 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-32 |
| 表 3.23 | 推估安平港 3 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-33 |
| 表 3.24 | 推估安平港 4 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-34 |
| 表 3.25 | 推估安平港 5 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-35 |
| 表 3.26 | 推估安平港 6 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-36 |
| 表 3.27 | 推估安平港 7 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-37 |
| 表 3.28 | 推估安平港 8 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-38 |
| 表 3.29 | 推估安平港 9 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 .....  | 3-39 |
| 表 3.30 | 推估安平港 10 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-40 |
| 表 3.31 | 推估安平港 11 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-41 |
| 表 3.32 | 推估安平港 12 月份波浪之各重現期波高及標準偏差 ..... | 3-42 |
| 表 3.33 | 臺北港各月份最適極值函數與 50 年重現期波高.....    | 3-43 |
| 表 3.34 | 安平港各月份最適極值函數與 50 年重現期波高.....    | 3-43 |
| 表 3.35 | 推估臺北港各重現期波高及標準偏差.....           | 3-45 |
| 表 3.36 | 推估安平港各重現期波高及標準偏差.....           | 3-47 |
| 表 3.37 | 臺北港井島模式最大波浪之重現期波高及標準偏差 .....    | 3-48 |
| 表 3.38 | 安平港井島模式最大波浪之重現期波高及標準偏差 .....    | 3-49 |
| 表 4.1  | 高雄港防波堤圖像調查項目與時程.....            | 4-2  |
| 表 4.2  | 高雄港第一港口南北防波堤水下調查彙整表.....        | 4-7  |
| 表 4.3  | 高雄港第二港口南北防波堤沉箱水下調查彙整表.....      | 4-7  |
| 表 4.4  | 高雄港第二港口沉箱原有設計波高表.....           | 4-14 |

|        |                              |      |
|--------|------------------------------|------|
| 表 4.5  | 高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表.....     | 4-15 |
| 表 4.6  | 高雄地區潮汐調和分析表.....             | 4-16 |
| 表 4.7  | 高雄港極端水位分析表.....              | 4-16 |
| 表 4.8  | 高雄港各迴歸期暴潮偏差分析表.....          | 4-17 |
| 表 4.9  | 高雄港深海颱風波浪推算波高與原有設計條件比對結果 ..  | 4-17 |
| 表 4.10 | 高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表.....        | 4-18 |
| 表 4.11 | 高雄港第二港口防波堤歷年維修工程主要工項數量表 .... | 4-20 |
| 表 4.12 | 防波堤堤址波場模式與波壓判斷式計算結果.....     | 4-22 |
| 表 4.13 | 防波堤堤址波高計算結果.....             | 4-22 |
| 表 4.14 | 防波堤消波塊重量計算結果.....            | 4-22 |
| 表 4.15 | 重力式結構物安全係數.....              | 4-33 |
| 表 4.16 | 計算分析種類一覽表.....               | 4-33 |
| 表 4.17 | 原有設計潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表 .... | 4-34 |
| 表 4.18 | 原有設計潮位結構體承载力檢核分析資料表.....     | 4-35 |
| 表 4.19 | 極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表.....   | 4-35 |
| 表 4.20 | 極端潮位結構體承载力檢核分析資料表.....       | 4-36 |
| 表 4.21 | 現況下極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表     | 4-37 |
| 表 4.22 | 現況下極端潮位結構體承载力檢核分析資料表.....    | 4-37 |
| 表 4.23 | 高雄港發生海嘯時之堤前波壓與原設計條件之比較 ..... | 4-38 |
| 表 4.24 | 高雄港第二港口防波堤設計分析結果比較表.....     | 4-39 |
| 表 4.25 | 沉箱式防波堤定期檢測項目表.....           | 4-45 |
| 表 4.26 | 防波堤詳細檢測項目表.....              | 4-46 |
| 表 4.27 | 防波堤損壞程度及評估項標準.....           | 4-47 |
| 表 4.28 | 高雄港港灣設施平時巡查異常報告表.....        | 4-48 |
| 表 4.29 | 高雄港防波堤巡查紀錄表.....             | 4-49 |
| 表 4.30 | 沉箱式防波堤定期檢測評估(水上)表 .....      | 4-50 |
| 表 4.31 | 沉箱式防波堤定期檢測評估(水下)表 .....      | 4-51 |
| 表 4.32 | 沉箱式防波堤特別檢測評估表.....           | 4-52 |
| 表 4.33 | 沉箱式防波堤檢測劣化程度與評估值關係表.....     | 4-54 |
| 表 4.34 | 港灣設施專案檢測參考表.....             | 4-56 |



|        |                                 |      |
|--------|---------------------------------|------|
| 表 4.35 | 圓筒式直立堤定期檢測評估表.....              | 4-58 |
| 表 4.36 | 使用者帳戶表.....                     | 4-66 |
| 表 4.37 | 堤防型式清單表.....                    | 4-66 |
| 表 4.38 | 堤防檢測位置及項目表.....                 | 4-66 |
| 表 4.39 | 劣化程度清單表.....                    | 4-67 |
| 表 4.40 | 維修工法清單表.....                    | 4-67 |
| 表 4.41 | 維修工法對應表.....                    | 4-67 |
| 表 4.42 | 損壞範圍分級表.....                    | 4-68 |
| 表 4.43 | 港灣清單表.....                      | 4-68 |
| 表 4.44 | 構造物基本資料表.....                   | 4-68 |
| 表 4.45 | 構造物基本資料表.....                   | 4-70 |
| 表 4.46 | 維修紀錄表.....                      | 4-70 |
| 表 4.47 | 維修項目清單表.....                    | 4-71 |
| 表 4.48 | 檢測工作記錄表.....                    | 4-72 |
| 表 4.49 | 測項目記錄表.....                     | 4-72 |
| 表 4.50 | 港灣設施維修紀錄表.....                  | 4-75 |
| 表 4.51 | 港灣設施維護工程紀錄表.....                | 4-76 |
| 表 5.1  | Sieberg-Ambraseys 海嘯強度等級分類..... | 5-3  |
| 表 5.2  | Imamura-Iida 海嘯規模分級表.....       | 5-4  |
| 表 5.3  | 海嘯強度等級分類(2001).....             | 5-6  |
| 表 5.4  | 臺灣近岸疑似及未有實測紀錄之海嘯列表.....         | 5-11 |
| 表 5.5  | 臺灣近岸有實測記錄之海嘯列表(1951~2006).....  | 5-12 |
| 表 5.6  | 1900~2011 年造成重大傷亡之海嘯一覽表.....    | 5-13 |
| 表 5.7  | 高雄港發生海嘯時之堤前波壓與原設計條件之比較.....     | 5-21 |

## 圖 目 錄

|        |                                                           |      |
|--------|-----------------------------------------------------------|------|
| 圖 2.1  | 安平港波浪觀測位置示意圖 .....                                        | 2-2  |
| 圖 2.2  | 臺北港波浪觀測樁位置示意圖 .....                                       | 2-2  |
| 圖 2.3  | 臺灣地區颱風路徑分類圖(1897-2010 年)(摘自中央氣象局)<br>.....                | 2-7  |
| 圖 2.4  | 目標點對颱風中心的方位角 $\theta_1$ 與颱風移動方位角 $\theta_2$ 示意<br>圖 ..... | 2-14 |
| 圖 2.5  | 氣旋中心附近風速風向分布示意圖 .....                                     | 2-16 |
| 圖 2.6  | 颱風距離與目標點波高分布 .....                                        | 2-18 |
| 圖 2.7  | 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(摘自中央氣象局)                                | 2-19 |
| 圖 2.8  | 各距離範圍的 $\theta_1$ 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖 .....                  | 2-21 |
| 圖 2.9  | 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的 $\theta_1$ 高斯歸屬函<br>數 ..... | 2-22 |
| 圖 2.10 | 各距離範圍的 $\theta_3$ 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖 .....                  | 2-23 |
| 圖 2.11 | 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的 $\theta_3$ 高斯歸屬函<br>數 ..... | 2-24 |
| 圖 2.12 | 各距離範圍的 $V_{deg}$ 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖 .....                   | 2-25 |
| 圖 2.13 | 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的 $V_{deg}$ 高斯歸屬<br>函數 .....  | 2-26 |
| 圖 2.14 | 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數 .....                                     | 2-27 |
| 圖 2.15 | 學習組與驗證組使用不同神經元個數時之 RMSE .....                             | 2-29 |
| 圖 2.16 | 安平港類神經颱風波浪推算模式風險分析 .....                                  | 2-34 |
| 圖 2.17 | 臺北港類神經颱風波浪推算模式風險分析 .....                                  | 2-34 |
| 圖 2.18 | 類神經颱風波浪推算模式推算花蓮港颱風波浪結果 .....                              | 2-35 |
| 圖 2.19 | 類神經颱風波浪推算模式推算高雄港颱風波浪結果 .....                              | 2-36 |
| 圖 2.20 | 類神經颱風波浪推算模式推算安平港颱風波浪結果 .....                              | 2-37 |
| 圖 2.21 | 類神經颱風波浪推算模式推算臺北港颱風波浪結果 .....                              | 2-37 |
| 圖 2.22 | 湯(1970)和井島(1972)推算模式模擬範圍 .....                            | 2-41 |
| 圖 3.1  | 箱型圖架構示意圖 .....                                            | 3-10 |

|        |                              |      |
|--------|------------------------------|------|
| 圖 3.2  | 箱型圖分析流程圖 .....               | 3-13 |
| 圖 3.3  | 臺北港 1999~2010 年極值波高箱型圖 ..... | 3-14 |
| 圖 3.4  | 安平港 2000~2010 年極值波高箱型圖 ..... | 3-15 |
| 圖 3.5  | T 年重現期極值波高估算之流程示意圖 .....     | 3-16 |
| 圖 3.6  | 推估臺北港 1 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-18 |
| 圖 3.7  | 推估臺北港 2 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-19 |
| 圖 3.8  | 推估臺北港 3 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-20 |
| 圖 3.9  | 推估臺北港 4 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-21 |
| 圖 3.10 | 推估臺北港 5 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-22 |
| 圖 3.11 | 推估臺北港 6 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-23 |
| 圖 3.12 | 推估臺北港 7 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-24 |
| 圖 3.13 | 推估臺北港 8 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-25 |
| 圖 3.14 | 推估臺北港 9 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-26 |
| 圖 3.15 | 推估臺北港 10 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-27 |
| 圖 3.16 | 推估臺北港 11 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-28 |
| 圖 3.17 | 推估臺北港 12 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-29 |
| 圖 3.18 | 推估安平港 1 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-31 |
| 圖 3.19 | 推估安平港 2 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-32 |
| 圖 3.20 | 推估安平港 3 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-33 |
| 圖 3.21 | 推估安平港 4 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-34 |
| 圖 3.22 | 推估安平港 5 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-35 |
| 圖 3.23 | 推估安平港 6 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-36 |
| 圖 3.24 | 推估安平港 7 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-37 |
| 圖 3.25 | 推估安平港 8 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-38 |
| 圖 3.26 | 推估安平港 9 月份波浪之機率密度函數圖 .....   | 3-39 |
| 圖 3.27 | 推估安平港 10 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-40 |
| 圖 3.28 | 推估安平港 11 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-41 |
| 圖 3.29 | 推估安平港 12 月份波浪之機率密度函數圖 .....  | 3-42 |
| 圖 3.30 | 推估臺北港波浪之機率密度函數圖 .....        | 3-46 |
| 圖 3.31 | 推估安平港波浪之機率密度函數圖 .....        | 3-47 |

|        |                                         |      |
|--------|-----------------------------------------|------|
| 圖 3.32 | 臺北港井島模式最大波浪波浪之機率密度函數圖.....              | 3-48 |
| 圖 3.33 | 安平港井島模式最大波浪波浪之機率密度函數圖.....              | 3-49 |
| 圖 4.1  | 高雄港第一、二港口防波堤圖像調查範圍示意圖.....              | 4-2  |
| 圖 4.2  | 多音束監測作業範圍與船跡圖.....                      | 4-3  |
| 圖 4.3a | 高雄港第一港口南防波堤堤頭多音束監測成果.....               | 4-4  |
| 圖 4.3b | 高雄港第一港口北防波堤堤頭多音束監測成果.....               | 4-4  |
| 圖 4.3c | 高雄港第二港口北防波堤堤頭附近多音束監測成果.....             | 4-5  |
| 圖 4.3d | 高雄港第二港口南防波堤#60~#65 沈箱外側多音束監測<br>成果..... | 4-5  |
| 圖 4.3e | 高雄港第二港口南防波堤#44~#49 沈箱外側多音束監測<br>成果..... | 4-6  |
| 圖 4.3f | 高雄港第二港口南防波堤#29~#34 沈箱外側多音束監測<br>成果..... | 4-6  |
| 圖 4.4  | 第一港口北防波堤 0k+050 堤面裂痕情形 .....            | 4-9  |
| 圖 4.5  | 第一港口南防波堤 0k+472 堤面落差情形 .....            | 4-9  |
| 圖 4.6a | 第二港口北防波堤#33 沉箱堤面破損情形.....               | 4-10 |
| 圖 4.6b | 第二港口北防波堤#38 沉箱堤面破損情形.....               | 4-10 |
| 圖 4.6c | 第二港口北防波堤#51 沉箱堤面破損情形.....               | 4-11 |
| 圖 4.7a | 第二港口南防波堤#26 沉箱堤面破損情形.....               | 4-11 |
| 圖 4.7b | 第二港口南防波堤#32 沉箱堤面破損情形.....               | 4-12 |
| 圖 4.7c | 第二港口南防波堤#36 沉箱堤面破損情形.....               | 4-12 |
| 圖 4.7d | 第二港口南防波堤#62 沉箱堤面破損情形.....               | 4-13 |
| 圖 4.8  | 高雄港第二港口防波堤平面配置示意圖.....                  | 4-24 |
| 圖 4.9  | 24m 圓形楔入式沉箱堤設計平面圖與斷面圖 .....             | 4-24 |
| 圖 4.10 | 防波堤直立部份波壓分佈圖.....                       | 4-26 |
| 圖 4.11 | 護基及堤址拋石之安定係數圖.....                      | 4-30 |
| 圖 4.12 | 海嘯作用時堤前波壓分佈圖.....                       | 4-32 |
| 圖 4.13 | 沈箱式防波堤損傷變形連鎖圖.....                      | 4-42 |
| 圖 4.14 | 多層分散式架構圖.....                           | 4-61 |
| 圖 4.15 | 系統登入頁面示意圖.....                          | 4-62 |

|        |                                     |      |
|--------|-------------------------------------|------|
| 圖 4.16 | 整體架構說明 .....                        | 4-62 |
| 圖 4.17 | 地理資訊系統功能架構圖 .....                   | 4-63 |
| 圖 4.18 | 檢測評估資料庫整體資料表關聯圖 .....               | 4-64 |
| 圖 4.19 | 基本資料維護類別圖 .....                     | 4-65 |
| 圖 4.20 | 工程資料維護資料庫類別圖 .....                  | 4-69 |
| 圖 4.21 | 檢測資料維護資料庫類別圖 .....                  | 4-71 |
| 圖 4.22 | 防波堤基本資料查詢示意圖 .....                  | 4-73 |
| 圖 4.23 | 防波堤基本資料屬性表單示意圖 .....                | 4-73 |
| 圖 4.24 | 系統作業流程圖 .....                       | 4-78 |
| 圖 4.25 | 系統登入畫面圖 .....                       | 4-79 |
| 圖 4.26 | 自動搜尋位置圖 .....                       | 4-79 |
| 圖 4.27 | 設施基本資料查詢圖 .....                     | 4-80 |
| 圖 4.28 | 檢測系統清單圖 .....                       | 4-80 |
| 圖 4.29 | 檢測工作查詢圖 .....                       | 4-81 |
| 圖 4.30 | 新增檢測記錄圖 .....                       | 4-81 |
| 圖 4.31 | 檢測記錄查詢圖 .....                       | 4-82 |
| 圖 4.32 | 維護記錄查詢圖 .....                       | 4-82 |
| 圖 4.33 | 使用者管理圖 .....                        | 4-83 |
| 圖 5.1  | 海嘯生成之示意圖 .....                      | 5-2  |
| 圖 5.2  | 一般波浪與海嘯之比較圖 .....                   | 5-2  |
| 圖 5.3  | 海嘯抵達岸邊之放大效應 .....                   | 5-3  |
| 圖 5.4  | Shuto(1994)所整理之海嘯災害與建築物受損程度分類 ..... | 5-8  |
| 圖 5.5  | 臺灣鄰近海域斷層分佈 .....                    | 5-9  |
| 圖 5.6  | 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(八戶港) .....          | 5-15 |
| 圖 5.7  | 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(釜石港) .....          | 5-15 |
| 圖 5.8  | 碼頭與岸壁遭海嘯淘刷後受損情形(左：鹿島港，右：相馬港) .....  | 5-16 |
| 圖 5.9  | 碼頭與岸壁遭海嘯破壞後受損情形(左：相馬港，右：茨城港) .....  | 5-16 |
| 圖 5.10 | 防潮堤堤前淘刷(大船渡市) .....                 | 5-16 |

|        |                            |      |
|--------|----------------------------|------|
| 圖 5.11 | 碼頭堤面破壞(女川港).....           | 5-17 |
| 圖 5.12 | 漁船漂流撞擊(小名浜港).....          | 5-17 |
| 圖 5.13 | 碼頭堤面沉陷(釜石港).....           | 5-17 |
| 圖 5.14 | 台灣鄰近海域海底地形圖.....           | 5-19 |
| 圖 5.15 | 規模 9.0 之馬尼拉海溝地震之初始波高.....  | 5-20 |
| 圖 5.16 | 馬尼拉海溝發生規模 9 地震時所引發之海嘯波高分析圖 | 5-20 |

# 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，本研究擬以四年時間(民國 98~101 年)應用本所港研中心於臺灣各主要港口地區長期觀測之波浪資料，探討其波浪極值之最適分佈函數與統計分析特性，並建立即時性的颱風波浪推算模式；同時針對老舊港口或易受颱風侵襲破壞港域，辦理港灣構造物圖像監測資料庫與安全評估探討之維護管理資訊系統。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。

本年度為本計畫第三年研究期程，報告內容主要包括，第二章為

臺北港與安平港兩港域之即時性颱風波浪推算建置與探討；第三章是臺北與安平兩港域之波浪極值統計探討及特性分析；第四章高雄港防波堤沉箱安全性評估探討及維護管理資訊系統建置說明，其中包含防波堤圖像調查、堤體安全性評估探討與修復維護方案研擬等；第五章則是收集國內外海嘯對港灣結構物破壞案例，並初步探討海嘯對高雄港外闊防波堤的破壞影響；最後則為本報告的結論與建議。



## 第二章 港域颱風波浪推算模式建立

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

依據本所港研中心於往昔相關計畫建置花蓮港與高雄港兩港域颱風波浪推算模式之經驗，本計畫本年度擬為安平港及臺北港建置一套結合颱風風場、數值模式與類神經網路推算的颱風波浪推算模式，並配合後端操作之視窗化介面系統，提供兩港務單位可簡易且快速操作之颱風波浪推算操作系統。本章中並引用國內常用之半經驗颱風波浪推算模式與所建立推算模式，予以現場觀測資料作一驗證比較。有關觀測資料來源及推算模式建置過程，如下分述。

### 2.1 資料來源與處理說明

本項工作擬引用分析之波浪資料為本所港研中心於安平與臺北港外海的觀測所得，有關測站設置如圖 2.1 與圖 2.2 所示。本計畫中以選取  $H_s$ (示性波高)來分析說明相關波浪特性， $H_s$  其計算方法即以波群中波高較大的 1/3 部份的個別波波高平均值來代表，在統計特性上，其具有最大的安定性(不隨取樣不同而變化)，較能反映波浪所含能量的大小，故是最常用的代表波(郭，2001)。

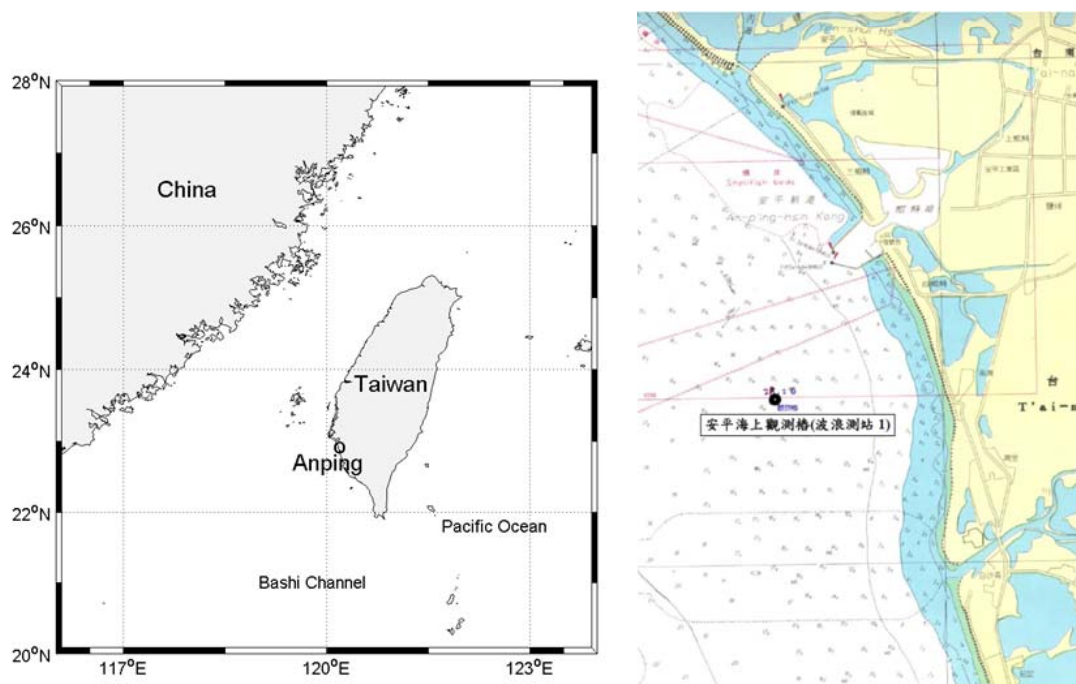


圖 2.1 安平港波浪觀測位置示意圖

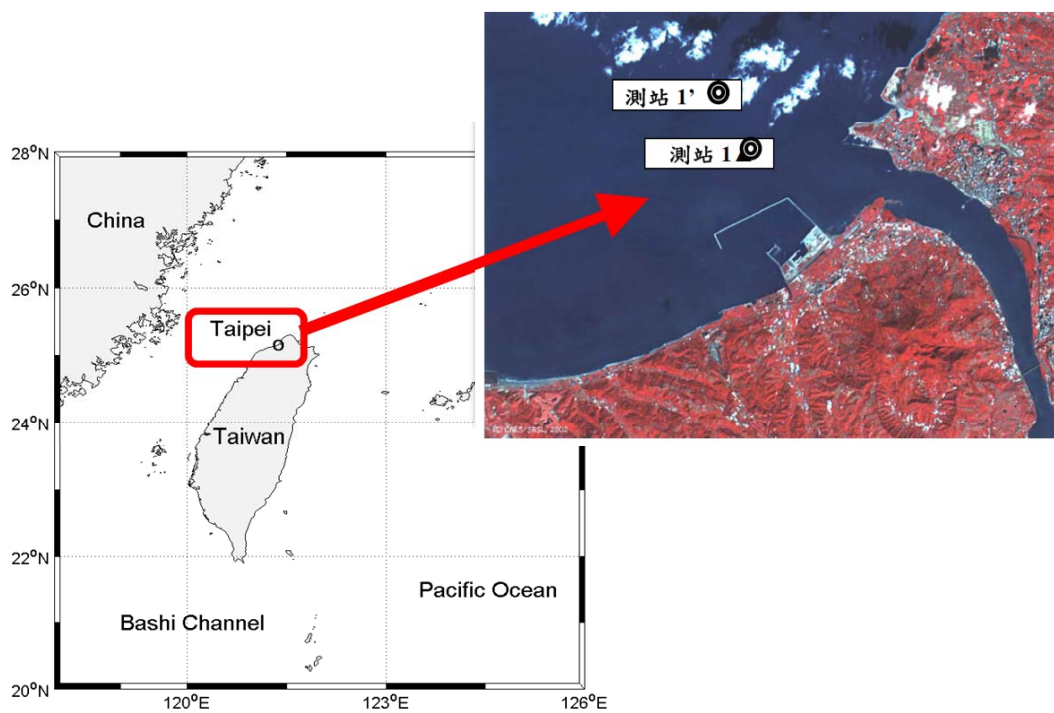


圖 2.2 臺北港波浪觀測樁位置示意圖

依據本所港灣技術研究中心實測之安平港波浪資料，紀錄時間為 1999 年 10 月至 2010 年 12 月。其中 2002 年波浪資料缺漏 12 月，而 2003 年波浪資料缺漏 3 月與 12 月，尚有零星的部分缺漏，但波浪資料大致上完整，但遇上颱風時常會有 6~10 小時的缺漏。

颱風資料取自日本國土交通省氣象廳(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。再依據中央氣象局(CWB)所公佈之侵臺颱風列表，挑選合適的颱風作為模式的建立與驗證之用。中央氣象局公佈之 2000 年至 2010 年侵臺颱風共有 73 場，考慮每場颱風對應之波浪資料之完整性及相關性，本研究選擇對安平港波浪會造成影響且實測波浪資料完整之颱風共 56 場來進行資料分析，針對這 56 場颱風評估是否適合模式之學習與驗證，如表 2.1 所示。臺北港則選擇會造成影響且實測波浪資料完整之颱風共 63 場來進行資料分析，針對這 63 場颱風評估是否適合模式之學習與驗證，如表 2.2 所示。

表 2.1 本計畫所選擇影響安平港之颱風及其對應波高

| 年份   | 颱風名稱      | 颱風名稱 | 最大示性波高(m) | 路徑分類 | 年份   | 颱風名稱     | 颱風名稱 | 最大示性波高(m) | 路徑分類 |
|------|-----------|------|-----------|------|------|----------|------|-----------|------|
| 2000 | KAI_TAK   | 啟德   | 2.16      | 6    | 2004 | NOCK_TEN | 納坦   | 1.20      | 6    |
| 2000 | BIKIS     | 碧利斯  | 1.89      | 3    | 2004 | NANMADOL | 南瑪都  | 2.91      | 9    |
| 2000 | PRAPIROON | 巴比倫  | 2.83      | 6    | 2005 | HAITANG  | 海棠   | 4.76      | 3    |
| 2000 | BOPHA     | 寶發   | 1.73      | --   | 2005 | MATSA    | 馬莎   | 2.52      | 1    |
| 2000 | YAGI      | 雅吉   | 0.63      | --   | 2005 | SANVU    | 珊瑚   | 4.72      | --   |
| 2000 | XANGSANE  | 象神   | 1.74      | 6    | 2005 | TALIM    | 泰利   | 4.05      | 3    |
| 2000 | BEBINCA   | 貝碧佳  | 1.74      | --   | 2005 | KHANUN   | 卡努   | 0.75      | --   |
| 2001 | CHEBI     | 奇比   | 6.92      | 7    | 2005 | DAMREY   | 丹瑞   | 2.73      | --   |
| 2001 | TRAMI     | 潭美   | 2.77      | 4    | 2005 | LONGWANG | 龍王   | 2.06      | 3    |
| 2001 | YUTU      | 玉兔   | 1.53      | --   | 2006 | EWINIAR  | 艾維尼  | 2.15      | --   |
| 2001 | TORAJI    | 桃芝   | 2.18      | 3    | 2006 | BILIS    | 碧利斯  | 5.35      | 2    |
| 2001 | LEKIMA    | 利奇馬  | 2.36      | 4    | 2006 | KAEMI    | 凱米   | 3.47      | 3    |
| 2001 | HAIYAN    | 海燕   | 1.20      | --   | 2006 | SAOMAI   | 桑美   | 1.56      | --   |
| 2002 | RAMMASUN  | 雷馬遜  | 2.71      | --   | 2006 | BOPHA    | 寶發   | 1.36      | 4    |
| 2002 | NAKRI     | 娜克莉  | 3.96      | 9    | 2006 | SHANSHAN | 珊珊   | 1.35      | --   |
| 2002 | SINLAKU   | 辛樂克  | 0.96      | 1    | 2007 | PABUK    | 帕布   | 5.83      | 4    |
| 2003 | KUJIRA    | 柯吉拉  | 0.91      | --   | 2007 | WUTIP    | 梧提   | 1.93      | 3    |
| 2003 | NANGKA    | 南卡   | 1.95      | --   | 2007 | SEPAT    | 聖帕   | 4.84      | 3    |
| 2003 | SOUDELOR  | 蘇迪勒  | 1.74      | --   | 2007 | WIPHA    | 韋帕   | 1.50      | 1    |
| 2003 | IMBUDO    | 尹布都  | 3.90      | --   | 2007 | KROSA    | 柯羅莎  | 3.57      | 2    |
| 2003 | MORAKOT   | 莫拉克  | 2.75      | 4    | 2008 | NURI     | 如麗   | 5.81      | --   |
| 2003 | KROVANH   | 柯羅旺  | 3.18      | --   | 2008 | SINLAKU  | 辛樂克  | 1.84      | 2    |
| 2003 | DUJUAN    | 杜鵑   | 3.52      | 5    | 2008 | HAGUPIT  | 哈格比  | 3.28      | --   |
| 2003 | MELOR     | 米勒   | 0.76      | 8    | 2008 | JANGMI   | 薑蜜   | 3.02      | 2    |
| 2004 | CONSON    | 康森   | 1.72      | --   | 2009 | LINFA    | 蓮花   | 7.20      | 9    |
| 2004 | MINDULLE  | 敏督利  | 5.01      | 6    | 2009 | MOLAVE   | 莫拉菲  | 3.63      | --   |
| 2004 | KOMPASU   | 康柏斯  | 1.96      | --   | 2009 | MORAKOT  | 莫拉克  | 7.66      | 3    |
| 2004 | RANANIM   | 蘭寧   | 2.11      | --   | 2009 | PARMA    | 芭馬   | 2.26      | --   |

表 2.2 本計畫所選擇影響臺北港之颱風及其對應波高

| 年份   | 颱風名稱      | 颱風名稱 | 最大示性波高(m) | 路徑分類 | 年份   | 颱風名稱      | 颱風名稱 | 最大示性波高(m) | 路徑分類 |
|------|-----------|------|-----------|------|------|-----------|------|-----------|------|
| 2000 | BILIS     | 碧利斯  | 1.74      | 3    | 2005 | MATSA     | 馬莎   | 5.03      | 1    |
| 2000 | PRAPIROON | 巴比倫  | 2.67      | 6    | 2005 | SANVU     | 珊瑚   | 2.69      | --   |
| 2000 | BOPHA     | 寶發   | 4.27      | --   | 2005 | TALIM     | 泰利   | 4.08      | 3    |
| 2001 | CIMARON   | 西馬隆  | 2.43      | 8    | 2005 | KHANUN    | 卡努   | 3.19      | --   |
| 2001 | CHEBI     | 奇比   | 1.34      | 7    | 2005 | DAMREY    | 丹瑞   | 1.65      | --   |
| 2001 | UTOR      | 尤特   | 1.33      | 5    | 2005 | LONGWANG  | 龍王   | 2.95      | 3    |
| 2001 | TRAMI     | 潭美   | 0.53      | 4    | 2006 | EWINIAR   | 艾維尼  | 1.81      | --   |
| 2001 | YUTU      | 玉兔   | 0.68      | --   | 2006 | BILIS     | 碧利斯  | 2.91      | 2    |
| 2001 | TORAJI    | 桃芝   | 0.78      | 3    | 2006 | KAEMI     | 凱米   | 1.08      | 3    |
| 2001 | NARI      | 納莉   | 4.55      | --   | 2006 | SAOMAI    | 桑美   | 1.88      | --   |
| 2001 | LEKIMA    | 利奇馬  | 3.32      | 4    | 2006 | BOPHA     | 寶發   | 1.88      | 4    |
| 2001 | HAIYAN    | 海燕   | 6.54      | --   | 2006 | SHANSHAN  | 珊珊   | 3.83      | --   |
| 2002 | RAMMASUN  | 雷馬遜  | 2.21      | --   | 2007 | PABUK     | 帕布   | 1.23      | 4    |
| 2002 | NAKRI     | 娜克莉  | 1.10      | 9    | 2007 | WUTIP     | 梧提   | 0.93      | 3    |
| 2002 | SINLAKU   | 辛樂克  | 3.45      | 1    | 2007 | SEPAT     | 聖帕   | 1.23      | 3    |
| 2003 | KUJIRA    | 柯吉拉  | 1.95      | --   | 2007 | WIPHA     | 韋帕   | 4.13      | 1    |
| 2003 | NANGKA    | 南卡   | 1.40      | --   | 2008 | KALMAEGI  | 卡玫基  | 2.20      | 2    |
| 2003 | SOUDELOR  | 蘇迪勒  | 1.72      | --   | 2008 | FUNG_WONG | 鳳凰   | 2.58      | 3    |
| 2003 | IMBUDO    | 尹布都  | 1.30      | --   | 2008 | NURI      | 如麗   | 1.70      | --   |
| 2003 | MORAKOT   | 莫拉克  | 0.46      | 4    | 2008 | SINLAKU   | 辛樂克  | 3.83      | 2    |
| 2003 | VAMCO     | 梵高   | 0.55      | --   | 2008 | HAGUPIT   | 哈格比  | 0.84      | --   |
| 2003 | KROVANH   | 柯羅旺  | 1.15      | --   | 2008 | JANGMI    | 薔蜜   | 4.07      | 2    |
| 2003 | DUJUAN    | 杜鵑   | 1.21      | 5    | 2009 | LINFA     | 蓮花   | 2.66      | 9    |
| 2003 | MELOR     | 米勒   | 2.63      | 8    | 2009 | MOLAVE    | 莫拉菲  | 0.81      | --   |
| 2004 | CONSON    | 康森   | 1.56      | --   | 2009 | MORAKOT   | 莫拉克  | 4.19      | 3    |
| 2004 | MINDULLE  | 敏督利  | 2.61      | 6    | 2009 | PARMA     | 芭馬   | 3.22      | --   |
| 2004 | KOMPASU   | 康柏斯  | 0.95      | --   | 2010 | LIONROCK  | 萊羅克  | 2.14      | 9    |
| 2004 | RANANIM   | 蘭寧   | 3.29      | --   | 2010 | NAMTHEUN  | 南修   | 2.14      | --   |
| 2004 | AERE      | 艾利   | 6.11      | 1    | 2010 | MERANTI   | 莫蘭蒂  | 1.60      | --   |
| 2004 | HAIMA     | 海馬   | 3.51      | 6    | 2010 | FANAPI    | 凡那比  | 2.94      | 4    |
| 2004 | NANMADOL  | 南瑪都  | 3.10      | 9    | 2010 | MEGI      | 梅姬   | 3.47      | 9    |
| 2005 | HAITANG   | 海棠   | 4.01      | 3    |      |           |      |           |      |

由表 2.1 得知，在 2000 至 2010 年中有 56 場擁有完整的波浪資料，其中 2010 年因為中央氣象局有發佈之侵臺颱風對應之實測波浪資料，皆有連續缺漏 6 小時左右的情況發生，故在選用列表中無法將其列入。而在安平港 56 場颱風中，有 36 場颱風最大示性波高未達 3m，小於 2m 的有 21 場，小於 1m 的有 5 場。對於安平港而言，其港區位置位於臺灣西南側的海岸，會受到每年七、八、九月之夏季西南季風影響，最大示性波高值 3m 以上的颱風，不一定是由颱風所造成的波浪，可能為季節風所造成。在選用模式適合之颱風時，需同時考慮到颱風行徑的路徑，如果颱風是由臺灣東部往西部行徑，颱風結構容易受到中央山脈阻擋而造成結構鬆散，這種類型的颱風受到高山的屏障效應，對於安平港的影響就會變小，而颱風的最大示性波高就會偏低。

颱風選用列表中(表 2.1)，最大示性波高未達 3m 的颱風佔了整體颱風 63%，顯示出有 63%的颱風，對於安平港的影響是小的甚至是沒有影響，其原因為大部分颱風皆為由東向西行進的第二、三、四路徑，約占整體颱風的 53%，而直撲安平港的第九路徑佔了整體颱風的不到 10%。從歷年的臺灣地區颱風路徑分類統計圖中也可發現(如圖 2.3)，第九路徑僅占了 8.2%，而由東向西的第二、三、四路徑占了 35%，由此可見對於模式的建立，地形以及高山的屏障影響，是一個需要考慮的因素。

最大示性波高大於 3m 的部分，對於安平港有較大影響之第五、七、九路徑的颱風有奇比(CHEBI・2001)、納克莉(NAKRI・2002)、杜鵑(DUJUAN・2003)、南瑪都(NANMADOL・2004)、蓮花(LINFA・2009)，我們將這 5 場颱風列為適合模式推算的颱風。

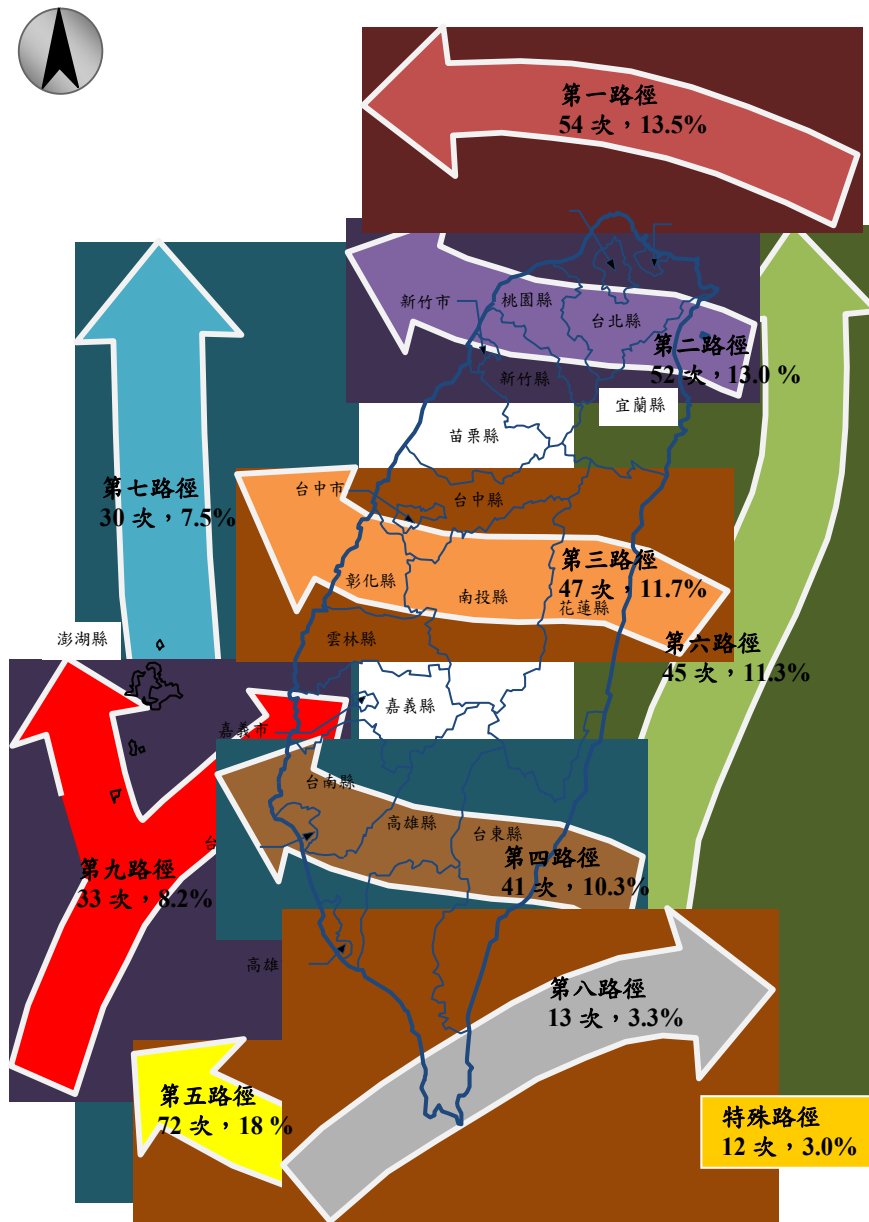


圖 2.3 臺灣地區颱風路徑分類圖(1897-2010 年)(摘自中央氣象局)

同時考量前述各種季節風、地形、高山屏障影響之原因以及去除影響較小(波高小於 1m)及雙颱風交互影響的颱風後，再依照各路徑均勻選取颱風，盡量讓每個路徑之颱風皆有被選取，最後選取了 29 場颱風進行模式的建立，如表 2.3 所示。

**表 2.3 本計畫所選用建立安平港模式之颱風及其對應波高**

| 年份   | 颱風名稱      | 颱風名稱 | 最大波高(m) | 路徑分類 |
|------|-----------|------|---------|------|
| 2000 | PRAPIROON | 巴比倫  | 2.83    | 6    |
| 2000 | XANGSANE  | 象神   | 1.74    | 6    |
| 2001 | CHEBI     | 奇比   | 6.92    | 7    |
| 2001 | LEKIMA    | 利奇馬  | 2.36    | 4    |
| 2002 | NAKRI     | 娜克莉  | 3.96    | 9    |
| 2003 | IMBUDO    | 尹布都  | 3.90    | --   |
| 2003 | MORAKOT   | 莫拉克  | 2.75    | 4    |
| 2003 | KROVANH   | 柯羅旺  | 3.18    | --   |
| 2003 | DUJUAN    | 杜鵑   | 3.52    | 5    |
| 2004 | MINDULLE  | 敏督利  | 5.01    | 6    |
| 2004 | KOMPASU   | 康柏斯  | 1.96    | --   |
| 2004 | RANANIM   | 蘭寧   | 2.11    | --   |
| 2004 | NOCK_TEN  | 納坦   | 1.20    | 6    |
| 2004 | NANMADOL  | 南瑪都  | 2.91    | 9    |
| 2005 | HAITANG   | 海棠   | 4.76    | 3    |
| 2005 | MATSA     | 馬莎   | 2.52    | 1    |
| 2005 | SANVU     | 珊瑚   | 4.72    | --   |
| 2005 | TALIM     | 泰利   | 4.05    | 3    |
| 2005 | DAMREY    | 丹瑞   | 2.73    | --   |
| 2005 | LONGWANG  | 龍王   | 2.06    | 3    |
| 2007 | WIPHA     | 韋帕   | 1.50    | 1    |
| 2007 | KROSA     | 柯羅莎  | 3.57    | 2    |
| 2008 | NURI      | 如麗   | 5.81    | --   |
| 2008 | SINLAKU   | 辛樂克  | 1.84    | 2    |
| 2008 | HAGUPIT   | 哈格比  | 3.28    | --   |
| 2008 | JANGMI    | 薔蜜   | 3.02    | 2    |
| 2009 | LINFA     | 蓮花   | 7.20    | 9    |
| 2009 | MOLAVE    | 莫拉菲  | 3.63    | --   |
| 2009 | MORAKOT   | 莫拉克  | 7.66    | 3    |

臺北港港區位置位於臺灣北側的海岸，其容易直接受到由太平洋側由右而左襲來的颱風影響，這種類型的颱風受地形影響因素較小。若颱風是由臺灣南部往北部行徑，颱風結構容易受到中央山脈阻擋而



造成結構鬆散，這種類型的颱風受到高山的屏障效應，行徑過臺北港時颱風便會處於一個較弱的狀態，颱風對於臺北港會較無影響力。

**表 2.4 本計畫所選用建立高雄港模式之颱風及其對應波高**

| 年份   | 颱風名稱      | 颱風名稱 | 最大波高(m) | 路徑分類 |
|------|-----------|------|---------|------|
| 2000 | PRAPIROON | 巴比倫  | 2.67    | 6    |
| 2000 | BILIS     | 碧利斯  | 1.74    | 3    |
| 2001 | NARI      | 納莉   | 4.55    | --   |
| 2001 | LEKIMA    | 利奇馬  | 3.32    | 4    |
| 2001 | HAIYAN    | 海燕   | 6.54    | --   |
| 2002 | RAMMASUN  | 雷馬遜  | 2.21    | --   |
| 2002 | SINLAKU   | 辛樂克  | 3.45    | 1    |
| 2003 | KUJIRA    | 柯吉拉  | 1.95    | --   |
| 2003 | SOUDELOR  | 蘇迪勒  | 1.72    | --   |
| 2003 | DUJUAN    | 杜鵑   | 1.21    | 5    |
| 2003 | MELOR     | 米勒   | 2.63    | 8    |
| 2004 | MINDULLE  | 敏督利  | 2.61    | 6    |
| 2004 | RANANIM   | 蘭寧   | 3.29    | --   |
| 2004 | AERE      | 艾利   | 6.11    | 1    |
| 2004 | HAIMA     | 海馬   | 3.51    | 6    |
| 2004 | NANMADOL  | 南瑪都  | 3.10    | 9    |
| 2005 | HAITANG   | 海棠   | 4.01    | 3    |
| 2005 | MATSA     | 馬莎   | 5.03    | 1    |
| 2005 | TALIM     | 泰利   | 4.08    | 3    |
| 2005 | KHANUN    | 卡努   | 3.19    | --   |
| 2005 | LONGWANG  | 龍王   | 2.95    | 3    |
| 2006 | BILIS     | 碧利斯  | 2.91    | 2    |
| 2006 | SAOMAI    | 桑美   | 1.88    | --   |
| 2006 | SHANSHAN  | 珊珊   | 3.83    | --   |
| 2007 | WIPHA     | 韋帕   | 4.13    | 1    |
| 2008 | KALMAEGI  | 卡玫基  | 2.20    | 2    |
| 2008 | FUNG_WONG | 鳳凰   | 2.58    | 3    |
| 2008 | SINLAKU   | 辛樂克  | 3.83    | 2    |
| 2009 | MORAKOT   | 莫拉克  | 4.19    | 3    |
| 2010 | FANAPI    | 凡那比  | 2.94    | 4    |
| 2010 | MEGI      | 梅姬   | 3.47    | 9    |

同時考量各種地形、高山屏障影響之原因以及去除影響較小(波高小於 1m)及雙颱風交互影響的颱風後，再依照各路徑均勻選取颱風，盡量讓每個路徑之颱風皆有被選取，最後選取了 31 場颱風進行模式的建立，如表 2.4 所示。

## 2.2 類神經颱風波浪推算模式

### 2.2.1 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：

$$Y_i = f\left(\sum_j W_{ij} X_j - \theta_i\right) \quad (2.1)$$

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

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

倒傳遞類神經網路學習演算法中，加權值矩陣為  $W_1$  及  $W_2$ ，偏權值量為  $\theta_1$  及  $\theta_2$ ，輸入量為  $X$ ，目標輸出量為  $T$ ，轉換函數則採用雙曲函數(hyperbolic tangent function)，而網路輸出量為  $Y$ ，網路的學習過程大致可分為下列幾個單元：

### 1. 計算隱藏層輸出量 $Z$ 與網路輸出量 $Y$

$$net_1 = \sum_i W_{1i} X_i - \theta_1 \quad (2.2)$$

$$Z = f(net_1) = \frac{e^{net_1} - e^{-net_1}}{e^{net_1} + e^{-net_1}} \quad (2.3)$$

$$net_2 = \sum_j W_{2j} X_j - \theta_2 \quad (2.4)$$

$$Y = f(net_2) = \frac{e^{net_2} - e^{-net_2}}{e^{net_2} + e^{-net_2}} \quad (2.5)$$

### 2. 計算隱藏層差距量 $\delta_1$ 與輸出層差距量 $\delta_2$

$$\delta_1 = Z(1-Z) \sum_j (W_{2j} \delta_j) \quad (2.6)$$

$$\delta_2 = (1+Y)(1-Y)(Z-Y) \quad (2.7)$$

### 3. 計算加權值矩陣的修正量 $\Delta W$

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

$$E = \frac{1}{2} \sum_j (T_j - Y_j)^2 \quad (2.8)$$

此時加權值的修正量可表示為：

$$\Delta W = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = -\delta_j A_i^{n-1} \quad (2.10)$$

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

#### 4.隱藏層與輸出層加權值矩陣 $W_1$ 、 $W_2$ 及偏權值向量 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 的更新

$$W_1 = W_1 + \Delta W_1 \quad (2.11)$$

$$\theta_1 = \theta_1 + \Delta \theta_1 \quad (2.12)$$

$$W_2 = W_2 + \Delta W_2 \quad (2.13)$$

$$\theta_2 = \theta_2 + \Delta \theta_2 \quad (2.14)$$

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

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

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

$$O_{P \times 1} = f(W_{S \times R} I_{R \times 1} + b_{S \times 1}) \quad (2.15)$$

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(2.15)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

$$h = 2z + 1 \quad (2.16)$$

其中， $z$  為輸入層的神經元個數， $h$  為隱藏層神經元個數。

## 2.2.2 資料分類說明

本計畫於往昔相關計畫中已完成花蓮港及高雄港的類神經颱風波浪推算模式以及其使用者介面的開發研究，而在本研究前兩年度採用

更完整的資料與分類方式對花蓮港與高雄港颱風推算模式進行改善與建立，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。

### 2.2.3 模式輸入與輸入層轉換函數

RSMC-Tokyo Center 的颱風氣象資料包括颱風經緯度、中心最大風速及中心氣壓，為了使類神經模式輸入的資訊更為精細與明確，本研究利用這三項颱風資料計算出 5 個類神經的輸入參數，分別為：1. 颱風與目標點距離( $D$ )、2. 颱風中心對目標點的方位角( $\theta_1$ )、3. 颱風侵襲角( $\theta_3$ )、4. 目標點海面 10m 風速( $V$ )、5. 目標點上空風向( $V_{deg}$ )。由經緯度資料可計算：颱風與目標點距離( $D$ )、颱風中心對目標點的方位角( $\theta_1$ )、颱風移動方位角( $\theta_2$ )，距離與方位角只需透過颱風中心座標與目標點座標即可計算。 $\theta_1$ 與 $\theta_2$ 如圖 2.4 所示。

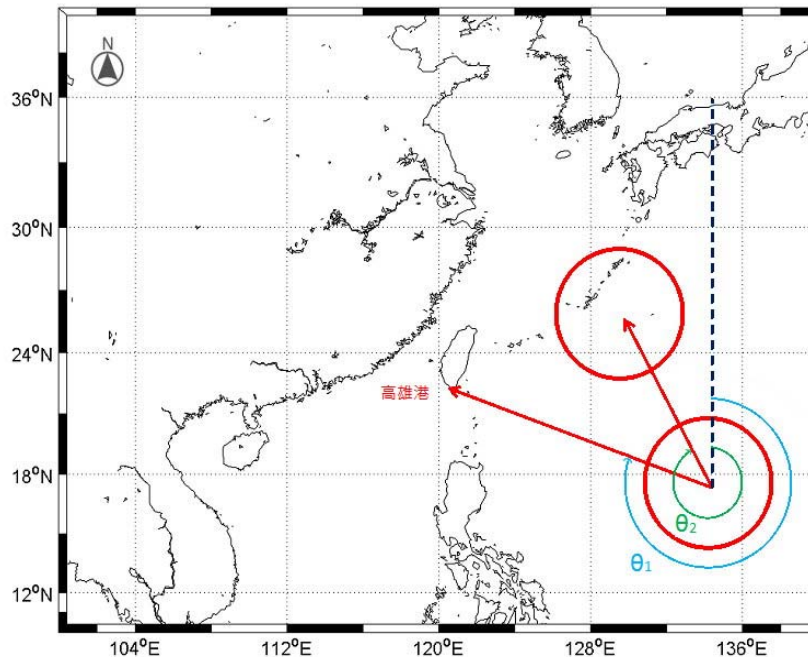


圖 2.4 目標點對颱風中心的方位角  $\theta_1$  與颱風移動方位角  $\theta_2$  示意圖

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

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：

$$V_r = \begin{cases} V_{\max} (R/R_m)^7 \exp(7(1 - R/R_m)) & \text{for } R < R_m \\ V_{\max} \exp((0.0025R_m + 0.05)(1 - R/R_m)) & \text{for } R \geq R_m \end{cases} \quad (2.17)$$

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：

$$R_m = 28.52 \tanh(0.0873(\phi - 28)) + 12.22 / \exp((P_\infty - P_c) / 33.86) + 0.2V_f + 37.22 \quad (2.18)$$

其中， $\phi$  為緯度， $P_c$  為中心氣壓，而  $P_\infty$  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

$$V_t = 0.5 V_f \cos \varphi \quad (2.19)$$

其中， $V_f$  為颱風中心前進速度，而  $\varphi$  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 2.5 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  $V_r + V_t$ 。

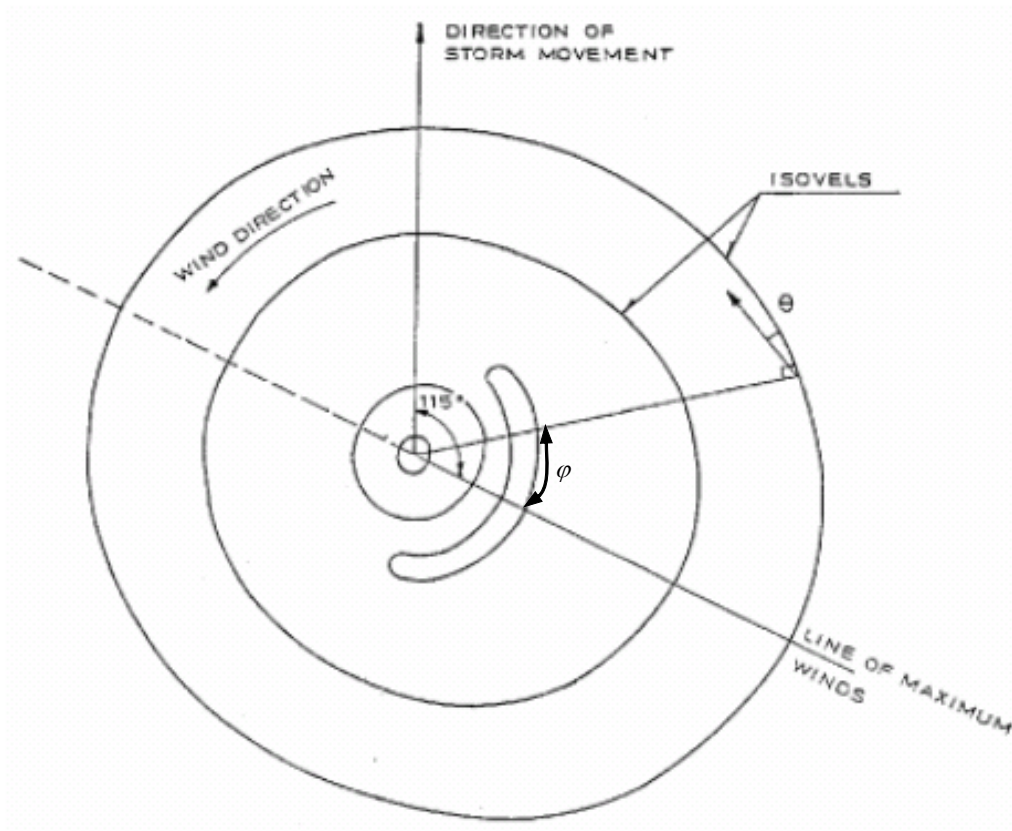


圖 2.5 氣旋中心附近風速風向分布示意圖

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：

$$\theta = \begin{cases} 10^\circ & \text{for } 0 < R \leq R_m \\ 10^\circ + 15^\circ(R - R_m)/(0.2R_m) & \text{for } R_m < R \leq 1.2R_m \\ 25^\circ & \text{for } 1.2R_m < R \end{cases} \quad (2.20)$$



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  $\varphi$ 、中心氣壓  $P_c$  及近中心最大風速  $V_{max}$ ，可由颱風記錄直接輸入，而後即可算出目標點海面 10m 風速  $V$  以及目標點上空風向  $V_{deg}$ 。本研究在輸入參數的選擇上，挑選了具有能夠代表颱風遠近特性、位置特性、左右不對稱性，共三個輸入參數  $D$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_3$ ，以及能夠代表目標點特性的風速與風向，共兩個輸入參數  $V$ 、 $V_{deg}$ ，以下針對上節所計算之五個參數做進一步的探討。

## 1. 目標點 10m 風速 $V$

颱風接近目標點時，驅動波浪最主要的動力為風，風的起因是由於颱風中心低氣壓與外部壓力的差異造成壓力梯度的變化，此壓力梯度使得空氣劇烈的流動形成風。利用 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 2.6 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。

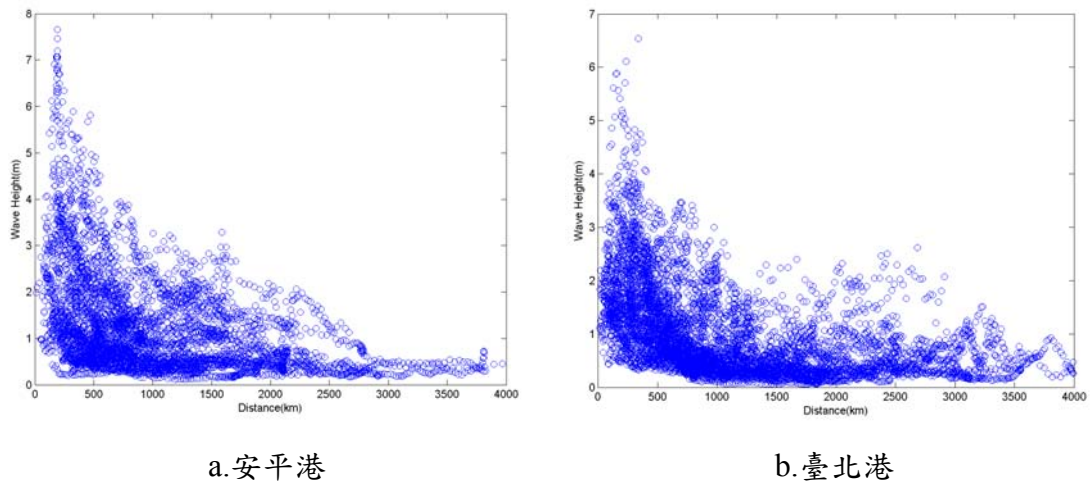


圖 2.6 颱風距離與目標點波高分布

### 3. 目標點的方位角 $\theta_1$

由目標點的方位角可以計算目標點是在颱風中心的哪一個方位，本研究設定正北為  $0^\circ$ ，若  $\theta_1$  為  $90^\circ$  表示颱風是在目標點的左側，反之若  $\theta_1$  為  $270^\circ$  則表示颱風位於目標點的東側太平洋的位置，這兩種不同的位置，會因為地形遮蔽與阻隔產生不同的影響。在目標點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 $\theta_3$

如前所述，侵襲角公式為  $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ 。颱風風速結構圖如圖 2.7 所示，圖 2.7 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  $\theta_3$  與  $\theta_1$  兩種方位角的影響，意即同時考慮到颱風的不對稱性與地形的遮蔽效應，而同時  $\theta_3$  隱含了  $\theta_2$ (颱風移動方位角)的資訊，意即輸入  $\theta_3$  也輸入了  $\theta_2$ ，也等於將颱風的行進路徑一起納入考量。

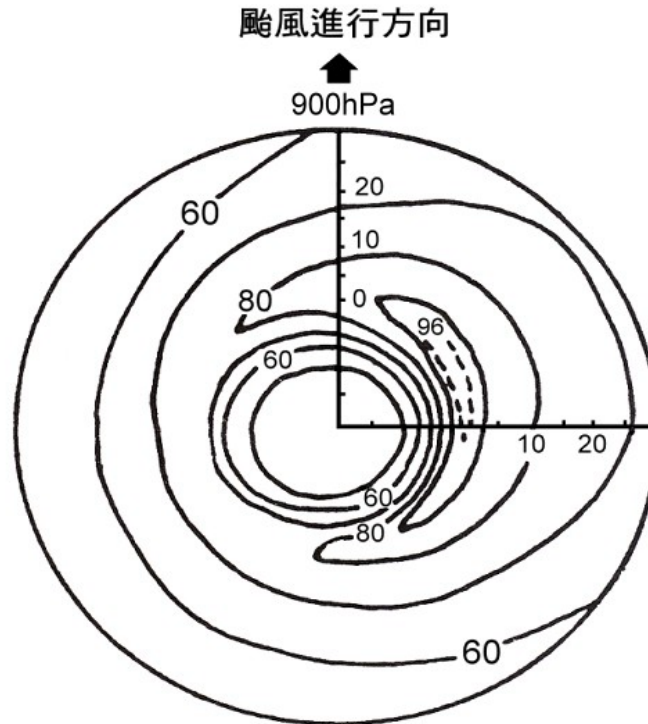


圖 2.7 颱風在等壓面上內平均風速分布示意圖(摘自中央氣象局)

##### 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。

#### 2.2.4 歸屬函數修正輸入參數

本研究在輸入參數的選擇上，挑選了具有能夠代表颱風遠近特性、位置特性、左右不對稱性，共三個輸入參數  $D$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_3$ ，以及能夠代表目標點特性的風速與風向，共兩個輸入參數  $V$ 、 $V_{deg}$ 。但在正式開始訓練前可先透過相關性分析來了解各輸入因子與輸出層波高值間的關係，其結果如表 2.5 所示。

表 2.5 輸入因子與波浪間的相關性分析

| 安平港               |         |
|-------------------|---------|
| 輸入因子              | 相關性 $R$ |
| 目標點風速 $V$         | 0.46    |
| 距離 $D$            | 0.33    |
| 目標點方位角 $\theta_1$ | -0.49   |
| 颱風侵襲角 $\theta_3$  | 0.06    |
| 目標點風向 $V_{deg}$   | -0.38   |
| 臺北港               |         |
| 輸入因子              | 相關性 $R$ |
| 目標點風速 $V$         | 0.50    |
| 距離 $D$            | 0.55    |
| 目標點方位角 $\theta_1$ | -0.07   |
| 颱風侵襲角 $\theta_3$  | 0.06    |
| 目標點風向 $V_{deg}$   | 0.13    |

輸入因子與波浪間的相關性分析顯示目前輸入參數只有目標點風速  $V$ 、距離  $D$  與波高的相關性是正相關，而其餘三個參數與波高的相關性都偏低或是呈現負相關的現象。

$\theta_1$ 、 $\theta_3$ 、 $V_{deg}$  這三個輸入參數為「角度」，但是角度的大小值卻不一定能有效地反映出該輸入參數與波高的關聯性。以  $\theta_1$  為例，當  $\theta_1=90^\circ$  時代表颱風是在目標點的左側，對應到的輸出波高會較大，以直觀想法僅為將  $90^\circ$  輸入類神經，告訴類神經當角度等於  $90^\circ$  時波高就會大，但在類神經內部  $90^\circ$  是被當作一個值，先被正規化處理，再與權重相乘

後，被送進隱藏層神經元並與其他參數相加，此種運算方式無法有效地告知類神經角度與波高的關聯性。

本研究欲以一個歸屬函數來描述角度與波高的關係，透過歸屬函數的轉換後再輸入類神經，用意為將「角度資訊」轉換為「影響度資訊」，其值介於 0 至 1，當影響度越高對應到的波高就越大。以  $\theta_1$  為例，當  $\theta_1=90^\circ$  時，透過歸屬函數的轉換得到影響度會接近 1，代表其影響程度大。而在類神經內部計算時，影響度的大小便可以控制隱藏層神經元內的整體函數值的大小，讓類神經對於輸入參數的學習更加直接。影響度的大小，代表轉換前的參數角度對波高的影響力，轉換前對應到的波高大，轉換後得到的影響度就會大；轉換前對應到的波高小，則轉換後得到的影響度就會小。此種關係顯示，經由轉換後的影響度與波高會是一個正線性相關。為找到一個高斯函數作為合適的歸屬函數，以提高輸入參數與波高的相關性，相關分析如下：

### 1. 目標點方位角 $\theta_1$

本研究將距離 1800km 以外的目標點方位角  $\theta_1$  資料刪除後，將剩下距離 0 至 1800km 分為 36 組，針對每一組進行尺度參數為 30 而中心位置為  $0^\circ$  至  $360^\circ$  的高斯轉換，其轉換結果與波高的相關性分布示如圖 2.8。

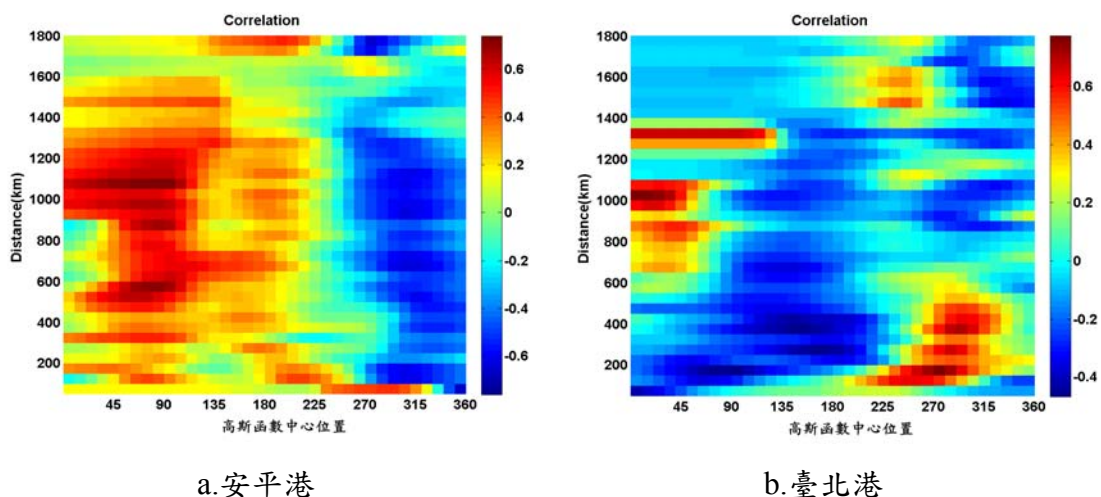


圖 2.8 各距離範圍的  $\theta_1$  經高斯轉換後與波高的相關性分布圖



圖 2.8(a)中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $225^\circ$  為分界，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數中心位置在  $225^\circ$  以下其轉換結果與波高的相關性高，反之當高斯歸屬函數中心位置在  $225^\circ$  以上則其結果與波高的相關性低。從不同距離上可發現當高斯歸屬函數中心位置在  $90^\circ$  時，各距離組之轉換結果與波高的相關性皆是高的。圖 2.8 (b)中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $135^\circ$  與  $225^\circ$  為分界，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數中心位置小於  $135^\circ$  以及大於  $225^\circ$  時其轉換結果與波高的相關性高，反之當高斯歸屬函數中心位置在介於  $135^\circ$  與  $225^\circ$  時則其結果與波高的相關性低。

配合上述的特性，再以多變量的 Derivative-based 最佳化搜尋法找到兩個高斯函數峰點中心位置分別為  $55^\circ$  與  $180^\circ$ ，如圖 2.9a 所示。結果顯示當  $\theta_1=55^\circ$  時會得到最大影響度 1，意即當颱風在目標點安平港的西南側( $55^\circ$ )時，會對目標點造成最大的影響，而在北側( $180^\circ$ )時亦會有一個較小的影響產生，安平港歸屬函數如圖 2.9a 所示。如圖 2.9b 所示。結果顯示當  $\theta_1=35^\circ$  時會得到最大影響度 1，意即當颱風位於目標點臺北港的東北側( $35^\circ$ )時，會對目標點造成最大的影響，而在西側( $260^\circ$ )時亦會有一個較大的影響產生，其歸屬函數如圖 2.9 所示。

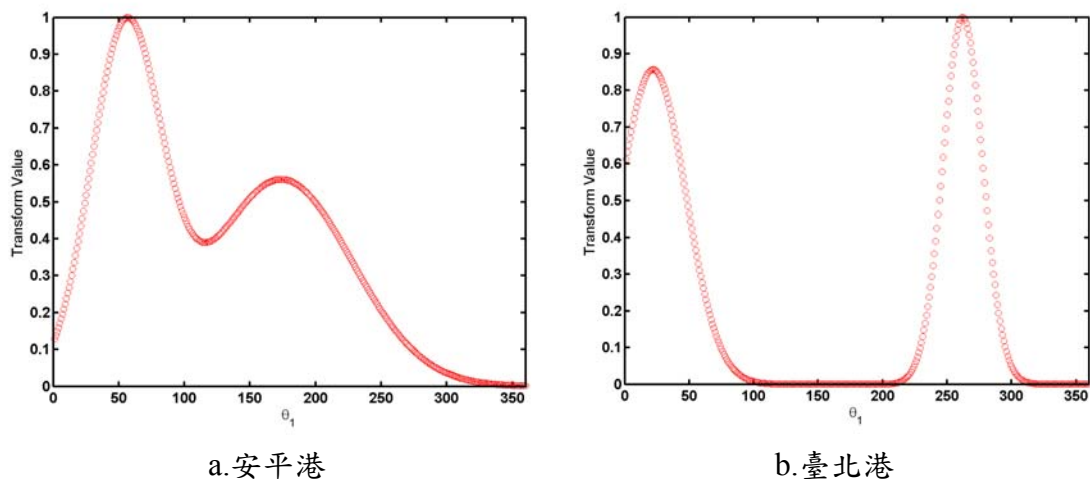


圖 2.9 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的  $\theta_1$  高斯歸屬函數

## 2. 颱風侵襲角 $\theta_3$

將距離 1800km 以外的颱風侵襲角  $\theta_3$  資料刪除後，將剩下距離 0 至 1800km 分為 36 組，針對每一組進行尺度參數為 30 而中心位置為  $-180^\circ$  至  $180^\circ$  的高斯轉換，其轉換結果與波高的相關性分布示如圖 2.10。

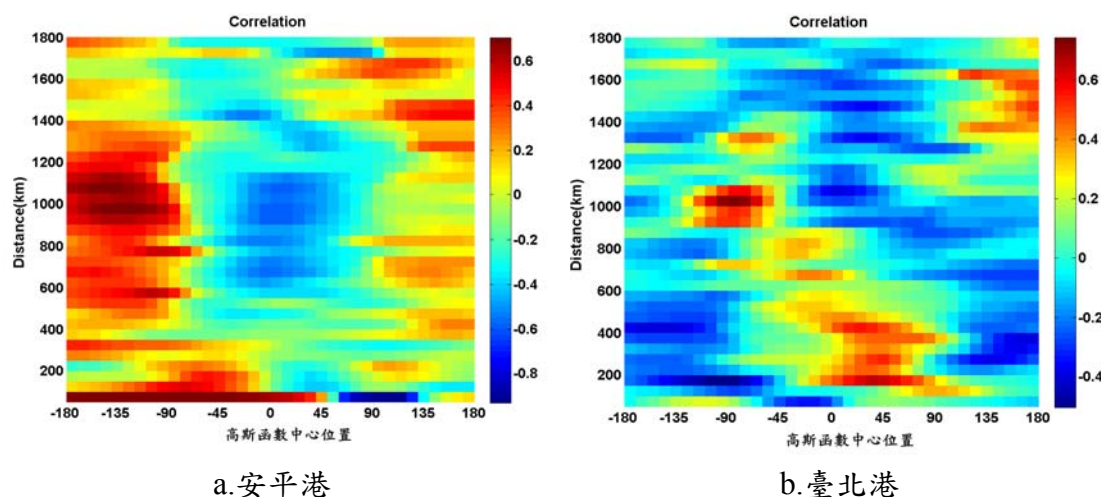
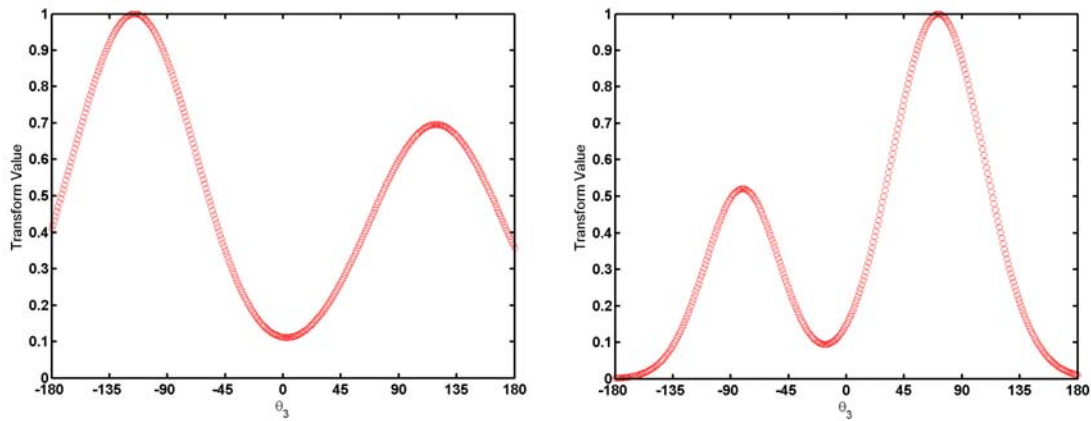


圖 2.10 各距離範圍的  $\theta_3$  經高斯轉換後與波高的相關性分布圖

圖 2.10(a)中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $-90^\circ$  以下與  $90^\circ$  以上，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數的中心位置在  $-90^\circ$  以下與  $90^\circ$  以上其轉換結果與波高的相關性高，反之當高斯歸屬函數的中心位置介於  $-90^\circ$  至  $90^\circ$  中間時其結果與波高的相關性低。從不同距離上可發現當高斯歸屬函數的中心位置在  $-120^\circ$  時，各距離組之轉換結果與波高的相關性皆是高的。圖 2.10 (b)中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $-90^\circ$  與  $45^\circ$ ，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數的中心位置在  $-90^\circ$  與  $45^\circ$  附近其轉換結果與波高的相關性高另外在 1600 公里處中心位置在  $140^\circ$  也有相關性高的結果。

配合上述的特性，再以多變量的 Derivative-based 最佳化搜尋法找到兩個高斯函數峰點中心位置分別為  $-110^\circ$  與  $120^\circ$ ，如圖 2.11 所示。其結果顯示，在颱風的右半圓與左半圓各有一個侵襲角度能對目標點造成大的影響。由於侵襲角公式為  $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ ，是由颱風移動方向角與目

標點方位角所組成，這兩個角度的組合即為颱風的移動路徑，當移動路徑造成侵襲角接近 $-110^\circ$ 或 $120^\circ$ 時，此種路徑的颱風對於目標點的影響度就會增大。同時亦可發現 $\theta_3 = -110^\circ$ 之影響度大於 $\theta_3 = 120^\circ$ 之影響度，代表颱風右半圓的影響度較左半圓大，其歸屬函數如圖 2.11 (a) 所示。臺北港部分找到兩個高斯函數峰點中心位置分別為 $-85^\circ$ 與 $85^\circ$ ，在颱風的右半圓與左半圓各有一個侵襲角度能對目標點造成大的影響。由於侵襲角公式為 $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ ，是由颱風移動方向角與目標點方位角所組成，這兩個角度的組合即為颱風的移動路徑，當移動路徑造成侵襲角接近 $-85^\circ$ 或 $85^\circ$ 時，此種路徑的颱風對於目標點的影響度就會增大。



a. 安平港

b. 臺北港

圖 2.11 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的  $\theta_3$  高斯歸屬函數

### 3. 目標點風向 $V_{deg}$

將距離 1800km 以外的目標點風向  $V_{deg}$  資料刪除後，將剩下距離 0 至 1800km 分為 36 組，針對每一組進行尺度參數為 30 而中心位置為  $0^\circ$  至  $360^\circ$  的高斯轉換，其轉換結果與波高的相關性分布示如圖 2.12。



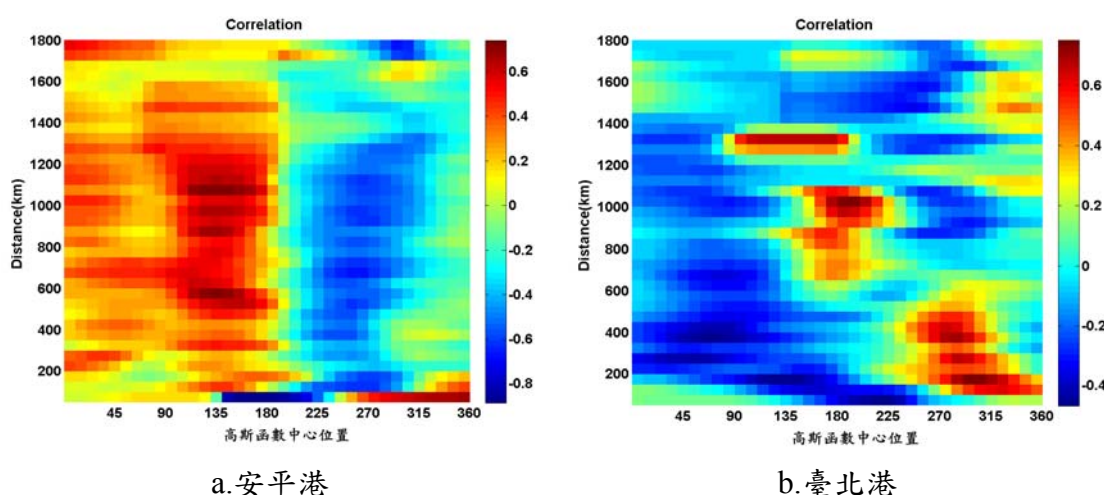
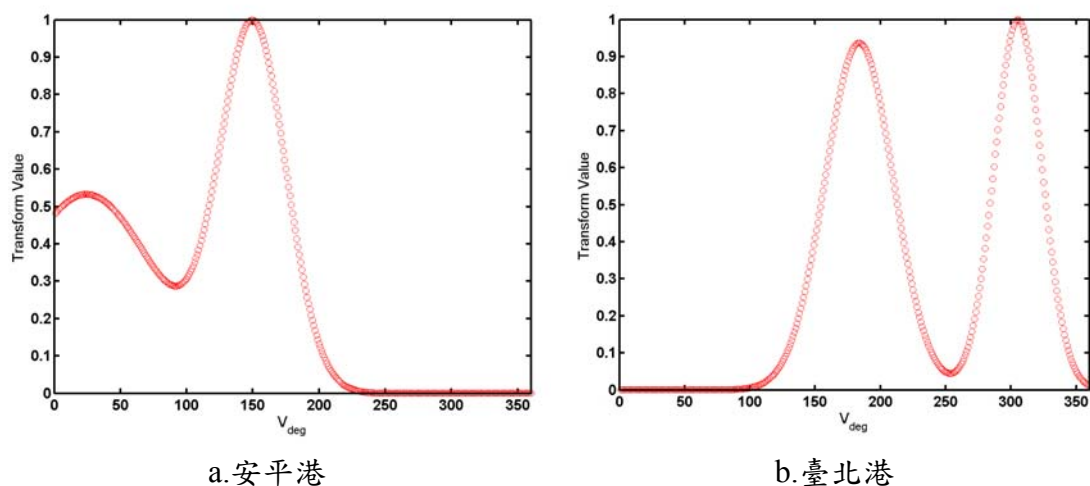


圖 2.12 各距離範圍的  $V_{deg}$  經高斯轉換後與波高的相關性分布圖

圖 2.12 (a) 中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $200^\circ$  為分界，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數的中心位置在  $200^\circ$  以下其轉換結果與波高的相關性高，反之當高斯歸屬函數的中心位置在  $200^\circ$  以上則其結果與波高的相關性低。從距離上可發現當高斯歸屬函數的中心位置在  $135^\circ$  時，各距離組之轉換結果與波高的相關性皆是高的。圖 2.12 (b) 中可發現經高斯轉換後中心位置約以  $180^\circ$  與  $290^\circ$  為分界，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯歸屬函數的中心位置在  $180^\circ$  與  $290^\circ$  附近時其轉換結果與波高的相關性高，反之則其結果與波高的相關性低。

配合上述的特性，本研究再以多變量的 Derivative-based 最佳化搜尋法找到兩個高斯函數峰點中心位置分別為  $40^\circ$  與  $150^\circ$ ，如圖 2.13 所示。其結果顯示，當風向角  $V_{deg}=150^\circ$  時會得到最大影響度 1，而當  $V_{deg}=40^\circ$  時亦會有一個較小的影響產生。由於 RVM 模型風場模式的風向為風的去向而非來向，對於目標點安平港而言  $40^\circ$  與  $150^\circ$  皆為從海上往陸上吹的風， $40^\circ$  為偏西南風， $150^\circ$  為偏西北風，其歸屬函數如圖 2.13 所示。以圖 2.13 (b) 為例，兩個高斯函數峰點中心位置分別為  $180^\circ$  與  $310^\circ$ ，顯示當風向角  $V_{deg}=170^\circ$  時會得到最大影響度 1，而當  $V_{deg}=310^\circ$  時亦會有一個較大的影響產生。



**圖 2.13 利用 Derivative-based 最佳化搜尋法求得的  $V_{deg}$  高斯歸屬函數**

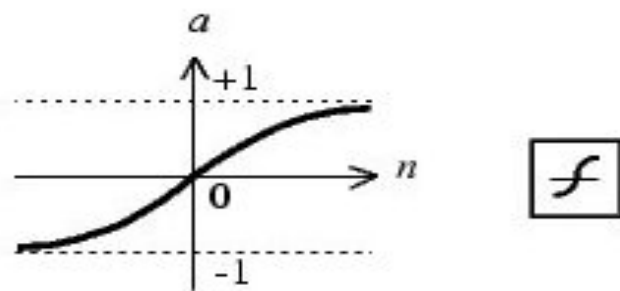
經由(1)、(2)、(3)之計算後，我們可於安平港與臺北港各得三組雙峰的高斯歸屬函數用來描述這三種角度參數，轉換後再與波高作相關性分析，其結果如表 2.6 所示。 $\theta_1$  經過轉換後相關性由-0.49 提升為 0.57、 $V_{deg}$  經過轉換後相關性由-0.38 提升為 0.55， $\theta_3$  經過轉換後相關性僅由 0.06 提升到 0.43，三者之  $R$  皆有顯著提升。

**表 2.6 雙峰轉換後的輸入參數與波高間的相關性分析(1800km 以內)**

| 安平港                  |         |
|----------------------|---------|
| 雙峰轉換後的輸入參數           | 相關性 $R$ |
| 方位角影響度( $\theta_1$ ) | 0.57    |
| 侵襲角影響度( $\theta_3$ ) | 0.43    |
| 風向影響度( $V_{deg}$ )   | 0.55    |
| 臺北港                  |         |
| 雙峰轉換後的輸入參數           | 相關性 $R$ |
| 方位角影響度( $\theta_1$ ) | 0.35    |
| 侵襲角影響度( $\theta_3$ ) | 0.27    |
| 風向影響度( $V_{deg}$ )   | 0.38    |

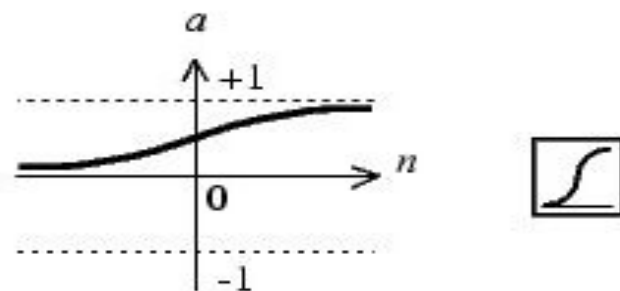
### 2.2.5 轉換函數與訓練函數

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 2.14 所示。



$$a = \text{tansig}(n)$$

Tan-Sigmoid Transfer Function



$$a = \text{logsig}(n)$$

Log-Sigmoid Transfer Function

圖 2.14 正切雙彎曲轉換函數與雙彎曲函數

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。

### 2.2.6 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。由圖 2.15 以安平港為例，採用 Dawson(2001)的神經元測試結果，當神經元個數超過 10 時，學習組的 *RMSE* 無法有效的被降低，表示網路已無法透過增加神經元個數來減少學習組的誤差，而同時驗證組的 *RMSE* 已趨於穩定，神經元個數宜採用 10 個。其結果與採用 Huang、Foo (2002)經驗公式，當輸入參數為 5 時，神經元個數  $h=11$  相近。

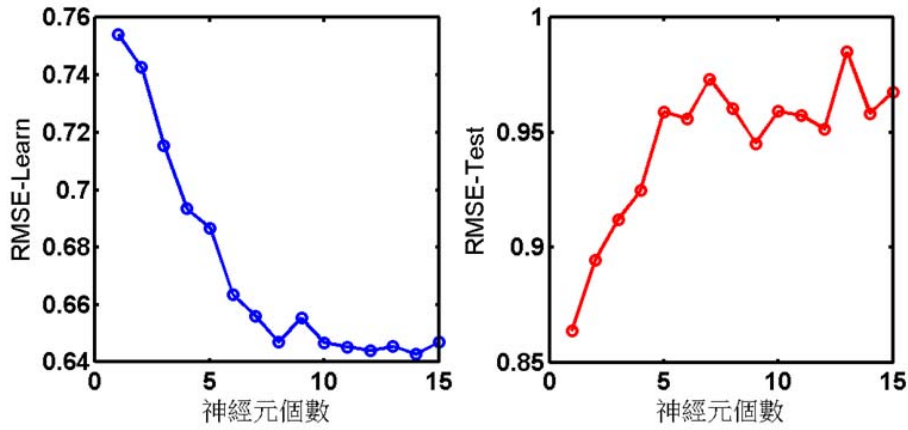


圖 2.15 學習組與驗證組使用不同神經元個數時之 RMSE

## 2.3 類神經颱風波浪推算結果

為瞭解各模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 4 個指標來評估各模式推算結果的優劣，分別為相關係數(R, correlation coefficient)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  及最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$ 。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})}{\sqrt{\left( \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left( \sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)}} \quad (2.21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (2.22)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (2.23)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (2.24)$$

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(2.23)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(2.24)式可知，若  $\Delta t_p$  為正值，表示模式推算的示性波高最大值

發生時間較實測晚，若為負值則表示較實測早。以安平港選擇的各場實測颱風波浪資料進行建立及驗證，其結果如下表 2.7 所示。

表 2.7 安平港類神經颱風波浪推算結果

| 年份    | 颱風名稱           | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R    | $H_{max}$<br>(m) |
|-------|----------------|-------------------------|------------------------|------|------|------------------|
| 2000  | 巴比倫(PRAPIROON) | -1.27                   | -14.00                 | 0.51 | 0.55 | 2.83             |
| 2000  | 象神(XANGSANE)   | 0.80                    | 12.00                  | 0.59 | 0.35 | 1.74             |
| 2001  | 奇比(CHEBI)      | -2.01                   | 2.00                   | 0.85 | 0.72 | 6.92             |
| 2001  | 利奇馬(LEKIMA)    | -0.02                   | 1.00                   | 0.42 | 0.75 | 2.36             |
| 2002  | 娜克莉(NAKRI)     | 0.22                    | 15.00                  | 0.65 | 0.72 | 3.96             |
| 2003  | 尹布都(IMBUDO)    | -0.89                   | 5.00                   | 0.67 | 0.75 | 3.90             |
| 2003  | 莫拉克(MORAKOT)   | 1.22                    | 3.00                   | 0.79 | 0.69 | 2.75             |
| 2003  | 柯羅旺(KROVANH)   | -0.25                   | -6.00                  | 0.65 | 0.37 | 3.18             |
| 2003  | 杜鵑(DUJUAN)     | 1.01                    | 4.00                   | 0.72 | 0.91 | 3.52             |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE)  | -0.78                   | -17.00                 | 0.72 | 0.86 | 5.01             |
| 2004  | 康柏斯(KOMPASU)   | 1.54                    | 15.00                  | 1.37 | 0.52 | 1.96             |
| 2004  | 蘭寧(RANANIM)    | -0.47                   | -6.00                  | 0.34 | 0.79 | 2.11             |
| 2004  | 納坦(NOCK_TEN)   | 0.50                    | 5.00                   | 0.45 | 0.65 | 1.20             |
| 2004  | 南瑪都(NANMADOL)  | 1.68                    | 4.00                   | 0.95 | 0.76 | 2.91             |
| 2005  | 海棠(HAITANG)    | -0.80                   | -1.00                  | 0.69 | 0.88 | 4.76             |
| 2005  | 馬莎(MATSA)      | -0.63                   | 83.00                  | 0.42 | 0.66 | 2.52             |
| 2005  | 珊瑚(SANVU)      | -0.61                   | -6.00                  | 0.58 | 0.90 | 4.72             |
| 2005  | 泰利(TALIM)      | 0.49                    | 11.00                  | 0.69 | 0.87 | 4.05             |
| 2005  | 丹瑞(DAMREY)     | 0.68                    | -3.00                  | 0.52 | 0.86 | 2.73             |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)   | 2.23                    | 8.00                   | 1.06 | 0.88 | 2.06             |
| 2007  | 韋帕(WIPHA)      | 1.30                    | 19.00                  | 0.89 | 0.31 | 1.50             |
| 2007  | 柯羅莎(KROSA)     | -0.29                   | 6.00                   | 0.75 | 0.48 | 3.57             |
| 2008  | 如麗(NURI)       | -2.40                   | -8.00                  | 0.68 | 0.96 | 5.81             |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)   | 1.51                    | -3.00                  | 0.71 | 0.86 | 1.84             |
| 2008  | 哈格比(HAGUPIT)   | 0.25                    | -3.00                  | 0.50 | 0.93 | 3.28             |
| 2008  | 薔蜜(JANGMI)     | 0.15                    | 4.00                   | 0.58 | 0.53 | 3.02             |
| 2009  | 蓮花(LINFA)      | -2.19                   | -2.00                  | 0.75 | 0.92 | 7.20             |
| 2009  | 莫拉菲(MOLAVE)    | 0.17                    | -15.00                 | 0.85 | 0.76 | 3.63             |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)   | -3.53                   | 11.00                  | 1.36 | 0.93 | 7.66             |
| 絕對值平均 |                | 1.03                    | 10.06                  | 0.72 | 0.73 | 3.54             |

由表 2.7 中，灰底色的部分為驗證組的颱風，其餘則為學習組，表中可發現學習組中 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 MORAKOT(2009)、LINFA(2009)、NURI(2008)及 CHEBI(2001)這四個颱風誤差較大。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  則以 RANANIM(2004)、MATSA(2005)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 MORAKOT(2009)。推算波高結果與實測波高的相關性  $R$  則以 XANGSANE(2000)最差。此外在驗證組中 9 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 LONGWANG(2005)相差最大，誤差 2.23m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以 MINDULLE(2004)相差最多，誤差 17 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差  $RMSE$  最大為 KOMPASU(2004)，其值為 1.37m。推算波高結果與實測波高的相關性  $R$  最差為 WIPHA(2007)的 0.31。平均來說模式推算結果的最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  約為 1.03m，最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  約為 10 小時， $RMSE$  約為 0.72m，相關係數  $R$  約為 0.73。

由表 2.8 中，灰底色的部分為驗證組的颱風，其餘則為學習組，可發現在臺北港模式中的 31 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以 HAIYAN(2001)相差最大，誤差 4.2m。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  以 KUJIRA(2003)相差最多，誤差 76 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差  $RMSE$  最大為 HAIYAN(2001)，其值為 1.22m。推算波高結果與實測波高的相關性  $R$  最差為 KALMAEGI(2008)的 0.04。平均來說模式推算結果的最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  約為 1.02m，最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  約為 14.81 小時， $RMSE$  約為 0.59m，相關係數  $R$  約為 0.73。

表 2.8 臺北港類神經颱風波浪推算結果

| 年份    | 颱風名稱           | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R    | $H_{max}$<br>(m) |
|-------|----------------|-------------------------|------------------------|------|------|------------------|
| 2000  | 巴比倫(PRAPIROON) | -0.47                   | 8.00                   | 0.36 | 0.85 | 2.67             |
| 2000  | 碧利斯(BILIS)     | 0.76                    | 1.00                   | 0.45 | 0.95 | 1.74             |
| 2001  | 海燕(HAIYAN)     | -4.20                   | 1.00                   | 1.22 | 0.91 | 6.45             |
| 2001  | 納莉(NARI)       | -2.20                   | -5.00                  | 0.65 | 0.40 | 4.55             |
| 2001  | 利奇馬(LEKIMA)    | -0.87                   | 58.00                  | 0.67 | 0.33 | 3.32             |
| 2002  | 雷馬遜(RAMMASUN)  | -0.19                   | -1.00                  | 0.48 | 0.81 | 2.21             |
| 2002  | 辛樂克(SINLAKU)   | -1.18                   | 11.00                  | 0.41 | 0.91 | 3.45             |
| 2003  | 柯吉拉(KUJIRA)    | 0.27                    | 76.00                  | 0.86 | 0.36 | 1.95             |
| 2003  | 蘇迪勒(SOUDELOR)  | 0.95                    | 18.00                  | 0.52 | 0.70 | 1.72             |
| 2003  | 杜鵑(DUJUAN)     | 0.94                    | 0.00                   | 0.58 | 0.84 | 1.21             |
| 2003  | 米勒(MELOR)      | -0.48                   | 22.00                  | 0.37 | 0.79 | 2.63             |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE)  | -0.35                   | -49.00                 | 0.64 | 0.36 | 2.61             |
| 2004  | 蘭寧(RANANIM)    | -0.77                   | 3.00                   | 0.30 | 0.92 | 3.29             |
| 2004  | 艾利(AERE)       | -2.99                   | 7.00                   | 0.74 | 0.92 | 6.11             |
| 2004  | 海馬(HAIMA)      | -0.38                   | 6.00                   | 0.63 | 0.85 | 3.51             |
| 2004  | 南瑪都(NANMADOL)  | -1.19                   | 12.00                  | 0.68 | 0.50 | 3.10             |
| 2005  | 海棠(HAITANG)    | -1.20                   | 3.00                   | 0.44 | 0.86 | 4.01             |
| 2005  | 馬莎(MATSA)      | -1.84                   | 4.00                   | 0.55 | 0.88 | 5.03             |
| 2005  | 泰利(TALIM)      | -1.25                   | 6.00                   | 0.46 | 0.87 | 4.08             |
| 2005  | 卡努(KHANUN)     | -0.33                   | 4.00                   | 0.37 | 0.86 | 3.19             |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)   | -0.26                   | 3.00                   | 0.41 | 0.79 | 2.95             |
| 2006  | 碧利斯(BILIS)     | 0.25                    | 12.00                  | 0.39 | 0.87 | 2.91             |
| 2006  | 桑美(SAOMAI)     | 1.31                    | 5.00                   | 0.78 | 0.68 | 1.88             |
| 2006  | 珊珊(SHANSHAN)   | -0.73                   | 6.00                   | 0.64 | 0.72 | 3.83             |
| 2007  | 韋帕(WIPHA)      | -1.00                   | 1.00                   | 0.51 | 0.86 | 4.13             |
| 2008  | 卡玫基(KALMAEGI)  | 0.60                    | -24.00                 | 0.78 | 0.04 | 2.20             |
| 2008  | 鳳凰(FUNG_WONG)  | 0.10                    | 10.00                  | 0.44 | 0.80 | 2.58             |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)   | -0.70                   | 23.00                  | 0.49 | 0.82 | 3.83             |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)   | -1.43                   | -5.00                  | 0.51 | 0.90 | 4.19             |
| 2010  | 凡那比(FANAPI)    | -0.27                   | -4.00                  | 0.67 | 0.63 | 2.94             |
| 2010  | 梅姬(MEGI)       | -2.18                   | -71.00                 | 1.19 | 0.55 | 3.47             |
| 絕對值平均 |                | 1.02                    | 14.81                  | 0.59 | 0.73 |                  |



表 2.9 顯示各港域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。最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  波則以花蓮港波浪推算模式最為準確。均方根誤差 RMSE 擇以台北港最佳，其值為 0.59m。推算波高結果與實測波高的相關性 R 以最花蓮港為最佳，其值為 0.83。整體來說，模式成效以花蓮港為最佳，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、安平港與台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，這個部份未來可透過更多的資料來進行改善。

表 2.9 各港域類神經颱風波浪推算成效比較

|     | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R    |
|-----|-------------------------|------------------------|------|------|
| 花蓮港 | 0.98                    | 5.04                   | 0.69 | 0.83 |
| 高雄港 | 0.67                    | 8.70                   | 0.64 | 0.74 |
| 安平港 | 1.03                    | 10.06                  | 0.72 | 0.73 |
| 臺北港 | 1.02                    | 14.81                  | 0.59 | 0.73 |

## 2.4 類神經颱風波浪推算模式之風險分析

前述安平港與臺北港的模式驗證部分以相關係數(R, correlation coefficient)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  及最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  等四個誤差特性來表現各場颱風的推算結果，本節則以兩個波浪推算模式其推算波高峰值的誤差來做風險分析，安平港與臺北港的波浪推算風險分析如圖。

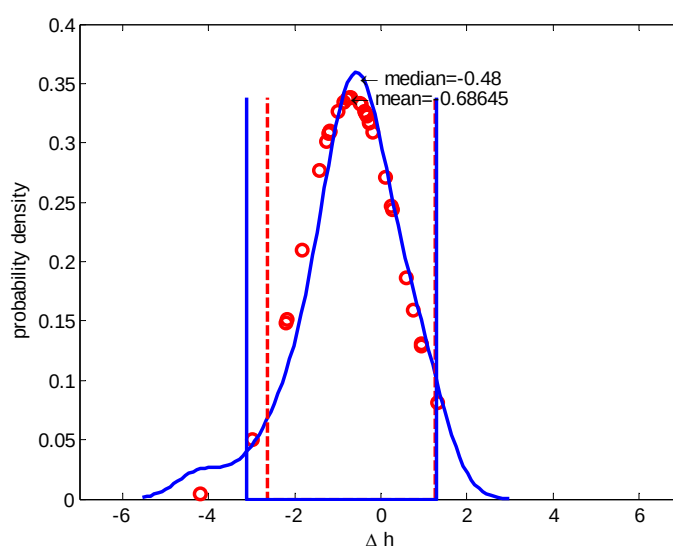


圖 2.16 安平港類神經颱風波浪推算模式風險分析

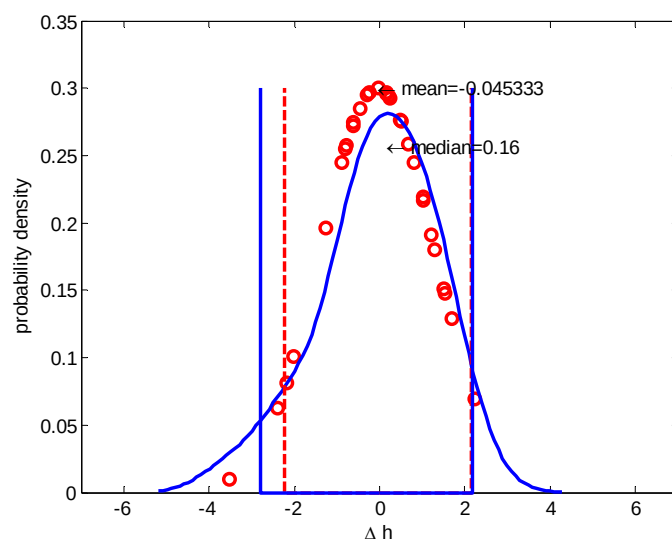


圖 2.17 臺北港類神經颱風波浪推算模式風險分析

由圖 2.16 顯示，安平港類神經颱風波浪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-0.69m，中位數為-0.48m，標準偏差為 1.18m，31 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 9.7%。安平港類神經颱風波浪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-0.045m，中位數為 0.16m，標準偏差為 1.18m，30 個樣本中不通過 95%信賴度的有 3 個，佔全部的 10%。

## 2.5 颱風波浪之實際推算結果

本研究目前已完成四個港口的類神經颱風波浪推算模式建構，分別為花蓮港、高雄港、安平港及臺北港。本節中以今年侵臺颱風南瑪都進行颱風波浪的推算，其結果如下所述。

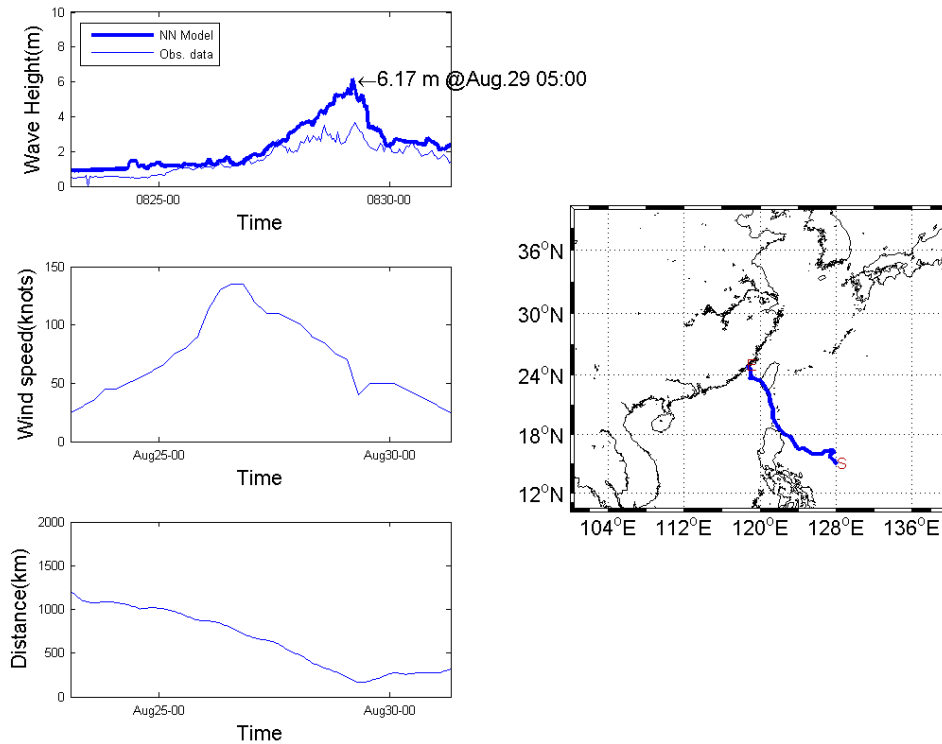


圖 2.18 類神經颱風波浪推算模式推算花蓮港颱風波浪結果

由圖 2.18 花蓮港推算結果與實測資料相比較發現南瑪都颱風的推算結果偏大，與實測資料的峰值差了將近 2m，而峰值的發生時間仍十分接近。圖 2.19 為高雄港的模式推算結果，由圖中可看出類神經颱風波浪推算模式的推估結果其峰值發生時間與實測資料吻合，但波高的峰值部分類神經颱風波浪推算模式的推算結果較實測資料低，誤差約為 0.6m。

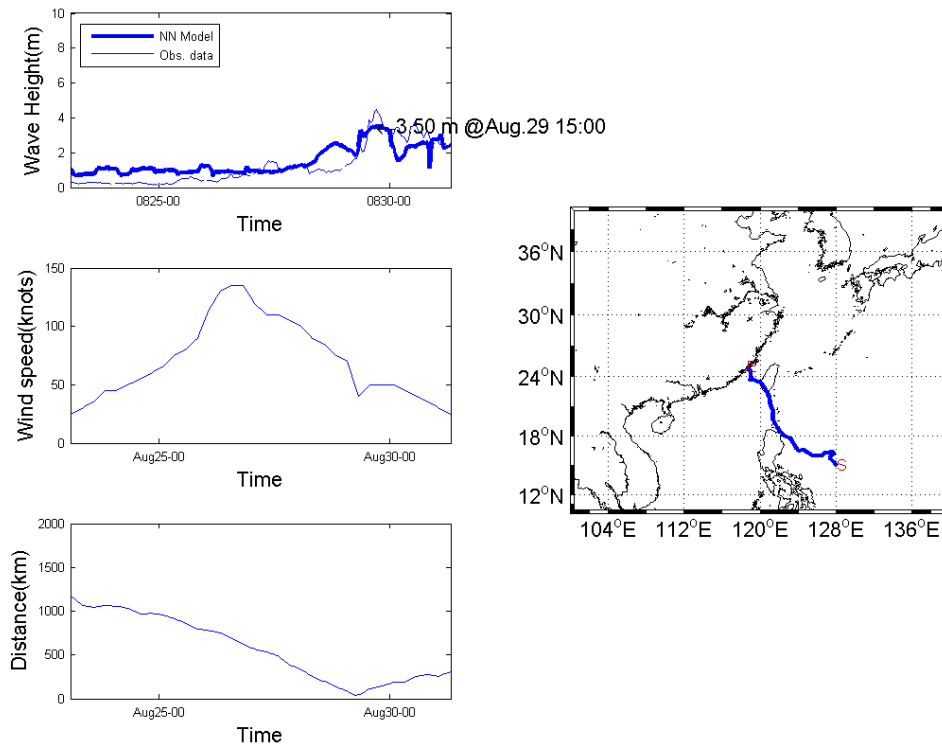


圖 2.19 類神經颱風波浪推算模式推算高雄港颱風波浪結果

圖 2.20 為安平港的模式推算結果，但由於安平港現有實測資料僅至民國 100 年 8 月 24 日，故無法進行比較。圖 2.21 為臺北港推算模式的推估結果，其峰值發生時間與實測資料吻合，但波高的峰值部分由於較小故難以判斷。

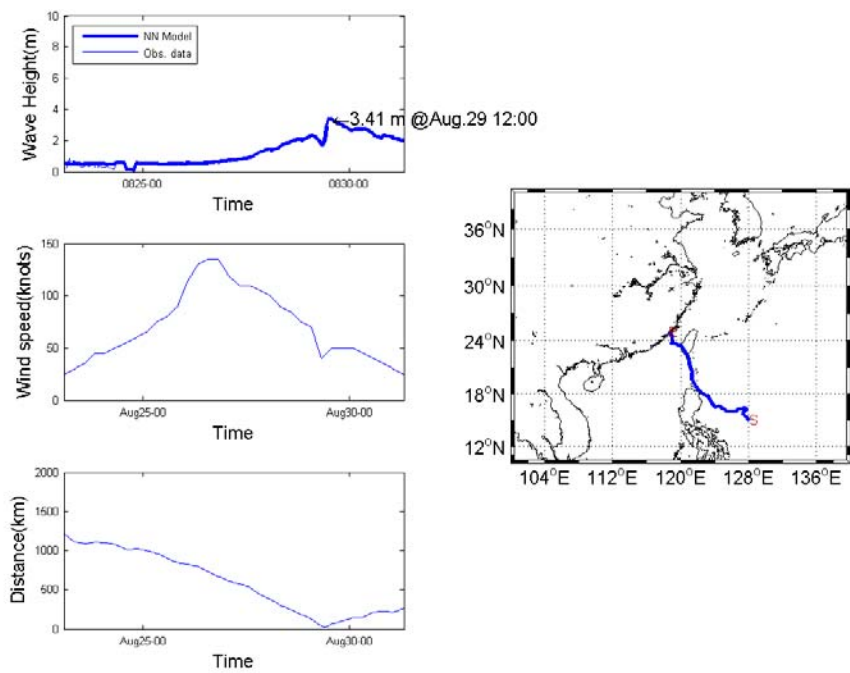


圖 2.20 類神經颱風波浪推算模式推算安平港颱風波浪結果

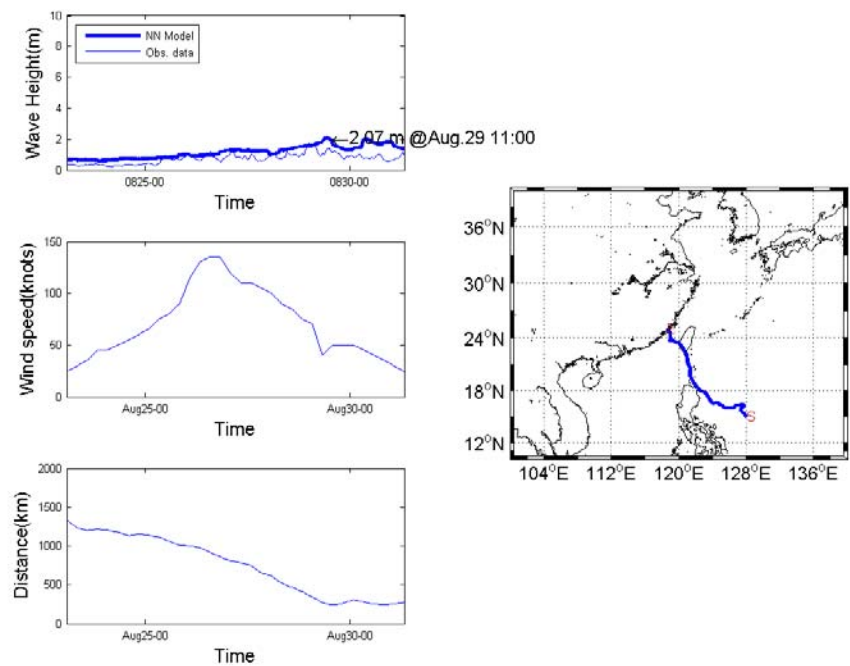


圖 2.21 類神經颱風波浪推算模式推算臺北港颱風波浪結果

## 2.6 半經驗颱風波浪推算模式

常見之半經驗颱風波浪推算模式 Breteschneider 參數法(1952)、井島(1972)之追蹤法、湯(1970)之移動風域數值推算法及梁(1993)之颱風湧浪預報法等。湯(1970)鑑於 Wilson 之方法只能推算深海風浪，不能直接推算海岸前之波浪狀況，故綜合 Wilson 及 Breteschneider 等經驗公式，配合淺海中之風浪關係、海底摩擦之影響、湧浪之推算方式及碎波後波浪之計算，提出移動風域數值推算模式，而本研究使用之定點颱風波浪推算半經驗模式即是依據上述原理建立而成，其基本原理概述如下。

### 1. 波向與風向之關係

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

$$H_\theta = H \cos \theta \quad (2.25)$$

式中  $H$  為前一推算點之波高， $\theta$  為新風向與原風向之夾角。

### 2. 風與風浪之關係

#### (1) 深海波浪

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

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \tanh \left[ k_1 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2.26)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \tanh \left[ k_2 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right] \quad (2.27)$$

式中  $H$  為示性波波高， $T$  為示性波週期， $F$  為吹風距離， $U$  為風速， $g$  為重力加速度， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $k_1$  及  $k_2$  為常數值，分別等於 0.26、1.40、0.01 及 0.0436。

## (2) 淺海波浪

當波浪進入淺水區後，依風、浪、水深間之關係為(湯，1968)

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \tanh \left[ k_3 \left( \frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{k_1 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[ k_3 \left( \frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (2.28)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \tanh \left[ k_4 \left( \frac{gD}{U^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{k_2 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[ k_4 \left( \frac{gD}{U^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \quad (2.29)$$

式中  $D$  表示水深，常數  $k_3=0.578$ ， $k_4=0.520$ 。當  $D \rightarrow \infty$  時，式(2.28)及(2.29)可簡化為式(2.26)及(2.27)。

## 3. 湧浪之計算

當風向改變角度  $\theta$  大於  $60^\circ$  或風浪獲得能量較損失者為小時，均視為湧浪，其波高及週期與風浪之關係依據 Bretschneider 之湧浪研究結果可表示如下式。

$$\frac{H_f}{H_d} = \cosh \left\{ 0.66 \left( \frac{F}{H_f} \right)^{0.06} \left( \frac{D}{F} \right)^{0.25} \tanh \left[ 3 \left( \frac{D}{F} \right)^{0.3} \right] \right\} \quad (2.30)$$

$$\frac{T_d}{T_f} = \cosh \left\{ 1.74 \left( \frac{2\pi F}{gT_f^2} \right)^{-0.05} \left( \frac{D}{F} \right)^{0.2} \tanh \left[ 1.02 \left( \frac{2\pi F}{gT_f^2} \right)^{-0.04} \left( \frac{D}{F} \right)^{0.32} \right] \right\} \quad (2.31)$$

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

#### 4. 波浪之能量傳遞速度

當波浪隨風向進行或轉變成湧浪後，其能量傳遞速度均以波浪群速度表示之。

#### 5. 氣象條件與風速之關係

颱風風速由兩種風速分量合成

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 \quad (2.32)$$

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

$$u_1 = c_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2 - \frac{fr}{2}} \quad (2.33)$$

$$u_2 = c_2 \frac{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2 - \frac{fr}{2}}}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{1}{e} + \left(\frac{fr_0}{2}\right)^2 - \frac{fr_0}{2}}} \quad (2.34)$$

式中  $\rho_a$  為空氣密度； $r_0$  為最大風速半徑； $r$  為求風速位置點與颱風中心之距離； $f$  為 Coriolis 係數  $= 2\omega \sin \varphi$ ； $\omega$  為地球自轉角速度； $\varphi$  為計算點之緯度； $c_1$  為地面風速與傾度風速之比值，在臺灣地區風向與等壓線約成  $30^\circ$  且反時針向內吹，一般  $c_1=0.6\sim0.65$ ； $c_2$  為 0.7； $\vec{u}_2$  為方向同颱風之移動風向； $\Delta P$  為氣壓深度或颱風中心氣壓  $P_c$  與外圍氣壓  $P(r)$  之差值，可由氣象雷達觀測估計或由如下之 Myers 公式計算

$$P(r) = P_c + \Delta P e^{-\frac{r_0}{r}} \quad (2.35)$$



## 6. 模擬範圍

湯(1970)和井島(1972)採用矩型格網方式計算，模擬範圍的邊界南至北緯  $18^{\circ}$ 、北至北緯  $28^{\circ}$ 、西至東經  $116^{\circ}$ 、東至東經  $126^{\circ}$ ，地形格網的解析精度為  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  (約為  $10 \times 10$  公里)，如圖 2.22 所示。圖中方框為目標推算區，該推算區大小為  $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$  (約為  $40 \times 40$  公里)，設定方式是以目標推算點為中心，東西南北各  $0.2^{\circ}$  來設定其邊界。湯(1970)和井島(1972)採用波浪追蹤法，該方法為計算所有模擬範圍內的波浪傳遞情形，當波浪傳遞至目標推算區的邊界時即記錄該波浪的大小及方向，如此重複計算至所有時刻皆完成，然此種方式受到颱風路徑的影響很大，因此並無法推算出每場颱風的波浪狀況。

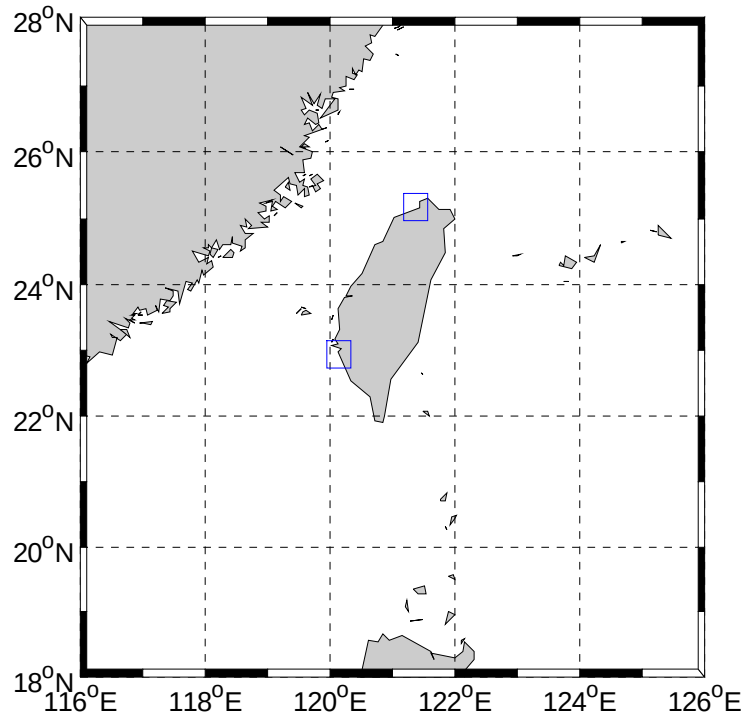


圖 2.22 湯(1970)和井島(1972)推算模式模擬範圍

## 2.7 半經驗颱風波浪模式推算結果

本研究以中央氣象局所公布有對臺灣造成影響的颱風輸入湯(1970)和井島(1972)的波浪推算模式進行推算，並與前節所述兼具資料完整性以及資料相關性的實測颱風波浪進行比較，安平港颱風波浪的推算結果如表 2.10，臺北港颱風波浪推算結果如表 2.11。

表 2.10 安平港半經驗颱風波浪推算結果

| 年份    | 颱風名稱          | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R     | $H_{obs}$<br>(m) |
|-------|---------------|-------------------------|------------------------|------|-------|------------------|
| 2000  | 啟德(KAI_TAK)   | 4.23                    | 20.00                  | 1.35 | -0.52 | 2.16             |
| 2000  | 碧利斯(BILIS)    | 2.76                    | -3.00                  | 2.28 | 0.78  | 1.89             |
| 2000  | 象神(XANGSANE)  | 6.43                    | 2.00                   | 2.71 | 0.57  | 1.74             |
| 2001  | 奇比(CHEBI)     | 1.23                    | -2.00                  | 1.31 | 0.91  | 6.92             |
| 2001  | 桃芝(TORAJI)    | 1.04                    | 11.00                  | 0.75 | 0.25  | 2.18             |
| 2001  | 納莉(NARI)      | 1.07                    | 0.00                   | 0.94 | 0.20  | 2.58             |
| 2001  | 利奇馬(LEKIMA)   | 1.37                    | -16.00                 | 1.38 | -0.05 | 2.36             |
| 2003  | 杜鵑(DUJUAN)    | -1.35                   | 3.00                   | 1.10 | 0.82  | 3.52             |
| 2004  | 康森( CONSON)   | 1.69                    | 1.00                   | 1.25 | 0.34  | 1.72             |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE) | -3.25                   | -26.00                 | 2.25 | 0.07  | 5.01             |
| 2004  | 艾利(AERE)      | -0.45                   | -23.00                 | 0.69 | -0.68 | 2.42             |
| 2004  | 納坦(NOCK_TEN)  | 0.96                    | 1.00                   | 0.74 | 0.64  | 1.2              |
| 2005  | 海棠(HAITANG)   | -0.89                   | -9.00                  | 1.34 | 0.33  | 4.76             |
| 2005  | 泰利(TALIM)     | -0.59                   | 6.00                   | 1.24 | 0.61  | 4.05             |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)  | 2.47                    | -1.00                  | 1.52 | 0.67  | 2.06             |
| 2006  | 珍珠(CHANCHU)   | -2.77                   | 6.00                   | 1.96 | 0.78  | 5.8              |
| 2006  | 凱米(KAEMI)     | 0.93                    | -2.00                  | 1.30 | 0.04  | 3.47             |
| 2007  | 聖帕(SEPAT)     | -0.63                   | -8.00                  | 1.75 | 0.01  | 4.84             |
| 2007  | 柯羅莎(KROSA)    | -0.56                   | -1.00                  | 0.82 | 0.79  | 3.57             |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)  | 1.39                    | 5.00                   | 0.83 | 0.28  | 1.84             |
| 2008  | 薔蜜(JANGMI)    | 0.04                    | -3.00                  | 0.61 | 0.79  | 3.02             |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)  | -5.06                   | 8.00                   | 3.31 | 0.54  | 7.66             |
| 絕對值平均 |               | 1.87                    | 7.14                   | 1.43 | 0.37  | 3.78             |

由於湯(1970)和井島(1972)的波浪推算模式會以目標範圍區的邊界所接收的各方向波浪大小及數量來做統計，故只有 23 場有被推算出結果，表 2.10 顯示安平港 23 場颱風波浪推算結果與實測資料間的相關係數、均方根誤差、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  及最大波高發生時間誤

差  $\Delta t_p$ 。表中可發現 2002 及 2010 兩年並沒有列出颱風波浪結果的比較，其中 2010 是因為本模式推算出有波浪的颱風恰好無實測資料可供比較；而 2002 年則是本模式沒有推算出颱風波浪的結果。

表中各場颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以 XANGSANE(2000)相差最大，其最大波高與實測資料相差了 6.43m；相差最小的則是 JANGMI(2008)，與實測最大波高僅差 0.04m，23 場颱風波浪中模式推算最大波高與實測最大波高相差值平均為 1.87m。此外最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  則以 MINDULLE (2004)相差最多，與實測最大波高發生時間差了 26 小時；相差最小的則有兩場其推算結果最大波高發生時間與實測完全符合；23 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高發生時間平均相差 7.14 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差最大為 MORAKOT (2009)，其值為 3.31m，最小為 JANGMI(2008)的 0.61m；23 場颱風波浪平均 RMSE 為 1.43m。推算波高結果與實測波高的相關性則以 CHEBI(2001)最佳，相關係數 0.91；最差為 ARER(2004)的-0.68；24 場颱風波浪與實測波高相關係數平均為 0.37。

表 2.11 臺北港半經驗颱風波浪推算結果

| 年份    | 颱風名稱          | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R     | $H_{obs}$<br>(m) |
|-------|---------------|-------------------------|------------------------|------|-------|------------------|
| 1997  | 溫妮(WINNIE)    | -4.13                   | 9.00                   | 2.91 | 0.30  | 6.49             |
| 1998  | 瑞伯(ZEB)       | -4.66                   | 3.00                   | 3.23 | 0.48  | 7.79             |
| 2000  | 碧利斯(BILIS)    | -1.03                   | 0.00                   | 0.91 | 0.73  | 1.74             |
| 2001  | 奇比(CHEBI)     | 0.20                    | 5.00                   | 0.28 | 0.69  | 1.34             |
| 2001  | 納莉(NARI)      | 1.62                    | 0.00                   | 1.28 | 0.62  | 4.55             |
| 2002  | 辛樂克(SINLAKU)  | -0.90                   | 12.00                  | 0.88 | 0.16  | 3.45             |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE) | 2.86                    | -25.00                 | 1.88 | -0.49 | 1.92             |
| 2004  | 蘭寧(RANANIM)   | -1.58                   | 6.00                   | 1.41 | 0.62  | 3.29             |
| 2004  | 艾利(AERE)      | 0.33                    | 12.00                  | 1.67 | 0.47  | 6.11             |
| 2005  | 海棠(HAITANG)   | -2.89                   | 13.00                  | 1.25 | 0.40  | 4.01             |
| 2005  | 馬莎(MATSA)     | -2.18                   | 1.00                   | 1.30 | 0.66  | 5.03             |
| 2005  | 泰利(TALIM)     | -1.18                   | 0.00                   | 1.02 | 0.95  | 4.08             |
| 2005  | 卡努(KHANUN)    | -0.99                   | 0.00                   | 1.15 | 0.48  | 3.19             |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)  | -0.55                   | -4.00                  | 1.09 | 0.06  | 2.95             |
| 2006  | 凱米(KAEMI)     | -0.46                   | -1.00                  | 0.23 | 0.82  | 0.99             |
| 2006  | 桑美(SAOMAI)    | 1.89                    | 6.00                   | 1.53 | 0.71  | 1.88             |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)  | 2.59                    | 7.00                   | 1.88 | 0.26  | 3.83             |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)  | 0.76                    | 19.00                  | 1.30 | -0.32 | 3.18             |
| 2010  | 凡那比(FANAPI)   | -1.92                   | 0.00                   | 1.75 | 0.74  | 2.71             |
| 絕對值平均 |               | 1.72                    | 6.47                   | 1.42 | 0.44  | 3.61             |

臺北港只有 19 場有被推算出結果，表 2.11 顯示臺北港 19 場颱風波浪推算結果與實測資料間的相關係數、均方根誤差、颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  及最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$ 。表中可發現 1996、1999、2003 及 2007 四年並沒有列出颱風波浪結果的比較，其中 2007 是因為本模式推算出有波浪的颱風恰好無實測資料可供比較；而 1996、1999 與 2003 年則是本模式沒有推算出颱風波浪的結果。

表中各場颱風波浪最大波高誤差  $\Delta H_{s,p}$  以 ZEB(1998)相差最大，其最大波高與實測資料相差了 4.66m；相差最小的則是 CHEBI(2001)，與實測最大波高僅差 0.20m，19 場颱風波浪中模式推算最大波高與實測最大波高相差值平均為 1.72m。此外最大波高發生時間誤差  $\Delta t_p$  則以 MINDULLE (2004)相差最多，與實測最大波高發生時間差了 25 小時；相差最小的則有五場其推算結果最大波高發生時間與實測完全符合；

19 場颱風波浪推算結果與實測結果最大波高發生時間平均相差 6.47 小時。模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差最大為 ZEB (1998)，其值為 3.32m，最小為 KAEMI (2006) 的 0.23m；19 場颱風波浪平均 RMSE 為 1.42m。推算波高結果與實測波高的相關性則以 TALIM(2005) 最佳，相關係數 0.95；最差為 MINDULLE (2004) 的 -0.49；24 場颱風波浪與實測波高相關係數平均為 0.44。

## 2.8 兩種颱風波浪推算模式結果比較

本節中將半經驗波浪推算模式與類神經波浪推算模式的結果作比較，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分別列表如表 2.12 與表 2.13。由表中可發現類神經颱風波浪推算模式在波高峰值的誤差較小，峰值發生時間的誤差則是以半經驗推算方式較小，RMSE 與相關係數 R 皆以類神經颱風波浪推算模式較佳。

表 2.12 安平港兩種波浪推算模式的誤差比較

| 年份    | 颱風名稱          | $\Delta H_{s,p}$ | $\Delta t_p$ | RMSE | R     | $\Delta H_{s,p}$ | $\Delta t_p$ | RMSE | R    | $H_{obs}$ |
|-------|---------------|------------------|--------------|------|-------|------------------|--------------|------|------|-----------|
|       |               | (m)              | (hour)       |      |       | (m)              | (hour)       |      |      |           |
| 半經驗模式 |               |                  |              |      | 類神經模式 |                  |              |      |      |           |
| 2000  | 象神(XANGSANE)  | 6.43             | 2            | 2.71 | 0.57  | 0.8              | 12           | 0.59 | 0.35 | 1.74      |
| 2001  | 奇比(CHEBI)     | 1.23             | -2           | 1.31 | 0.91  | -2.01            | 2            | 0.85 | 0.72 | 6.92      |
| 2001  | 利奇馬(LEKIMA)   | 1.37             | -16          | 1.38 | -0.05 | -0.02            | 1            | 0.42 | 0.75 | 2.36      |
| 2003  | 杜鵑(DUJUAN)    | -1.35            | 3            | 1.1  | 0.82  | 1.01             | 4            | 0.72 | 0.91 | 3.52      |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE) | -3.25            | -26          | 2.25 | 0.07  | -0.78            | -17          | 0.72 | 0.86 | 5.01      |
| 2004  | 納坦(NOCK_TEN)  | 0.96             | 1            | 0.74 | 0.64  | 0.5              | 5            | 0.45 | 0.65 | 1.2       |
| 2005  | 海棠(HAITANG)   | -0.89            | -9           | 1.34 | 0.33  | -0.8             | -1           | 0.69 | 0.88 | 4.76      |
| 2005  | 泰利(TALIM)     | -0.59            | 6            | 1.24 | 0.61  | 0.49             | 11           | 0.69 | 0.87 | 4.05      |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)  | 2.47             | -1           | 1.52 | 0.67  | 2.23             | 8            | 1.06 | 0.88 | 2.06      |
| 2007  | 柯羅莎(KROSA)    | -0.56            | -1           | 0.82 | 0.79  | -0.29            | 6            | 0.75 | 0.48 | 3.57      |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)  | 1.39             | 5            | 0.83 | 0.28  | 1.51             | -3           | 0.71 | 0.86 | 1.84      |
| 2008  | 薔蜜(JANGMI)    | 0.04             | -3           | 0.61 | 0.79  | 0.15             | 4            | 0.58 | 0.53 | 3.02      |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)  | -5.06            | 8            | 3.31 | 0.54  | -3.53            | 11           | 1.36 | 0.93 | 7.66      |
| 絕對值平均 |               | 1.97             | 6.38         | 1.47 | 0.54  | 1.09             | 6.54         | 0.74 | 0.74 |           |

表 2.13 臺北港兩種波浪推算模式的誤差比較

| 年份    | 颱風名稱          | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R     | $\Delta H_{s,p}$<br>(m) | $\Delta t_p$<br>(hour) | RMSE | R    | $H_{obs}$<br>(m) |
|-------|---------------|-------------------------|------------------------|------|-------|-------------------------|------------------------|------|------|------------------|
|       |               | 半經驗模式                   |                        |      |       | 類神經模式                   |                        |      |      |                  |
| 2000  | 碧利斯(BILIS)    | -1.03                   | 0                      | 0.91 | 0.73  | 0.76                    | 1                      | 0.45 | 0.95 | 1.74             |
| 2001  | 納莉(NARI)      | 1.62                    | 0                      | 1.28 | 0.62  | -2.2                    | -5                     | 0.65 | 0.4  | 4.55             |
| 2002  | 辛樂克(SINLAKU)  | -0.9                    | 12                     | 0.88 | 0.16  | -1.18                   | 11                     | 0.41 | 0.91 | 3.45             |
| 2004  | 敏督利(MINDULLE) | 2.86                    | -25                    | 1.88 | -0.49 | -0.35                   | -49                    | 0.64 | 0.36 | 1.92             |
| 2004  | 蘭寧(RANANIM)   | -1.58                   | 6                      | 1.41 | 0.62  | -0.77                   | 3                      | 0.3  | 0.92 | 3.29             |
| 2004  | 艾利(AERE)      | 0.33                    | 12                     | 1.67 | 0.47  | -2.99                   | 7                      | 0.74 | 0.92 | 6.11             |
| 2005  | 海棠(HAITANG)   | -2.89                   | 13                     | 1.25 | 0.4   | -1.2                    | 3                      | 0.44 | 0.86 | 4.01             |
| 2005  | 馬莎(MATSA)     | -2.18                   | 1                      | 1.3  | 0.66  | -1.84                   | 4                      | 0.55 | 0.88 | 5.03             |
| 2005  | 泰利(TALIM)     | -1.18                   | 0                      | 1.02 | 0.95  | -1.25                   | 6                      | 0.46 | 0.87 | 4.08             |
| 2005  | 卡努(KHANUN)    | -0.99                   | 0                      | 1.15 | 0.48  | -0.33                   | 4                      | 0.37 | 0.86 | 3.19             |
| 2005  | 龍王(LONGWANG)  | -0.55                   | -4                     | 1.09 | 0.06  | -0.26                   | 3                      | 0.41 | 0.79 | 2.95             |
| 2006  | 桑美(SAOMAI)    | 1.89                    | 6                      | 1.53 | 0.71  | 1.31                    | 5                      | 0.78 | 0.68 | 1.88             |
| 2008  | 辛樂克(SINLAKU)  | 2.59                    | 7                      | 1.88 | 0.26  | -0.7                    | 23                     | 0.49 | 0.82 | 3.83             |
| 2009  | 莫拉克(MORAKOT)  | 0.76                    | 19                     | 1.3  | -0.32 | -1.43                   | -5                     | 0.51 | 0.9  | 3.18             |
| 2010  | 凡那比(FANAPI)   | -1.92                   | 0                      | 1.75 | 0.74  | -0.27                   | -4                     | 0.67 | 0.63 | 2.71             |
| 絕對值平均 |               | 1.55                    | 7.00                   | 1.35 | 0.40  | 1.12                    | 8.87                   | 0.52 | 0.78 |                  |

### 第三章 港域波浪極值統計特性分析

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。

極值統計分析應用於海洋工程時，一般採用年最大法，假設每一年的極值波高為符合某種分佈的隨機變量，取每年發生的最大波高進行分析。但實際海洋的波浪，常因受到具有季節性變化的氣象、洋流等外在因素的影響，一年中每個月的極值波浪會顯現出具有週期性變化的特性，而並非完全為隨機的過程。因此，本研究提出一個分析極值波高的季節性變化之方法與過程，考慮極值波高之年週期與半年週期的季節性變化影響，用以改善一整年極值分佈參數的變異。藉由評估極值統計不同的極值分佈函數與參數推定法，決定較佳模式配適結果，並分析比較年最大法與月最大法推估極值波高結果。期望以較佳之波浪極值統計分析結果，提供相關分析模式的適用性及引領未來港灣、海岸工程規劃設計或環評要求所需之設計波浪條件的重新省思。

#### 3.1 波浪極值統計分析方法

本節中先行概述擬應用之極值統計分析的相關理論，包括資料的選取方式、極值分布函數的種類、極值分布函數中的參數推估方法，以及檢定樣本的統計特性，判定是否適用於所選定的極值分布函數與參數推定。

##### 3.1.1 極值分布函數

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

### 1.極值 I 型分布(FT- I 型分布，又稱 Gumbel 分布)

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, -\infty < x < \infty \quad (3.1a)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A}} e^{-\frac{x-B}{A}} \quad (3.1b)$$

### 2.通用極值分佈(generalized extreme value, GEV)

$$F(x) = e^{-\left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{\frac{1}{k}}}, B - A/k \leq x < \infty \quad (3.2a)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} \left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{-\left(1+\frac{1}{k}\right)} e^{-\left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (3.2b)$$

### 3. Weibull 分佈

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, B \leq x < \infty \quad (3.3a)$$

$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (3.3b)$$

### 4.對數常態分佈 (lognormal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - B}{\sqrt{2}A}\right)\right) \quad 0 < x < \infty \quad (3.4a)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} e^{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}} \quad (3.4b)$$

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

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.4c)$$

(3.1)式至(3.4)式中， $x$  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) 與樣本標準偏差 (standard deviation)有關， $k$  為形狀常數，決定機率函數之尖扁形狀。當(3.2)式之通用極值分布函數之  $k$  為正時，通用極值分布轉為極值 II 型分布，當通用極值分布函數之  $k$  為負時，通用極值分布轉為極值 III 型分布。

### 3.1.2 極值分布參數推定

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。

#### 1. MOM 推定法

若已選出之分布函數後依統計則可計算出其統計量及函數之參數，如表 3.1 所示。

表 3.1 各極值分佈相關統計量之特性

| 分佈函數       | 眾數                                                                  | 平均值                                           | 標準偏差                                                                                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gumbel     | $B$                                                                 | $B + A\gamma$                                 | $\pi A/\sqrt{6}$                                                                                         |
| GEV        | $B + \frac{A}{k} \left[ \left( \frac{k}{1+k} \right)^k - 1 \right]$ | $B + \frac{A}{k} [\Gamma(1-k) - 1]$           | $\frac{A}{k} [\Gamma(1-2k) - \Gamma^2(1-k)]^{1/2}$                                                       |
| Weibull 分佈 | $B + A \left( 1 - \frac{1}{k} \right)^{1/k}, k > 1$                 | $B + A \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)$ | $A \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2}$ |
| Lognormal  | $e^{B-A^2}$                                                         | $e^{\left( B + \frac{A^2}{2} \right)}$        | $e^{\left( B + \frac{A^2}{2} \right)} (e^{A^2} - 1)^{1/2}$                                               |

表 3.1 中， $\Gamma(\cdot)$  為 Gamma 函數， $\gamma$  為 Euler 數， $\gamma = 0.5772\dots$ 。

## 2. MLE 推定法

最大概似法乃選擇機率密度函數或對數機率密度函數為最大概似函數(likelihood)及對數最大概似函數(log-likelihood)，以 Gumbel 分布為例分別為

$$L(x; A, B) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{A} e^{-\frac{x_i - B}{A}} e^{-\frac{x_i - B}{A}} \quad (3.5)$$

$$l(x; A, B) = \sum_{i=1}^n -\frac{x_i - B}{A} - e^{-\frac{x_i - B}{A}} - n \ln(A) \quad (3.6)$$

其中  $x_i$  為樣本。值若資料符合於機率密度函數中適合參數時，最大概似函數則越大；反之，資料符合於機率密度函數中不適合參數時，最大概似函數則越小。一般選用對數最大概似函數，將(3.6)式分別對參數偏微分等於零，則可找出最佳之參數讓樣本資料使最大概似函數為最大。

## 3. LSM 推定法

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

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.7)$$

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

表 3.2 計算樣本順位機率之  $\alpha$  及  $\beta$  值

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

由上述可知，推算重現期值之精準與 (1)樣本來源，(2)機率分布的函數，(3)參數推定方法等有關。

### 3.1.3 信賴檢定

#### 1. MIR 值檢定

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

各極值分布函數之排序機率下之推算值  $x_m$  如下公式

$$x_m = ay_m + b \quad (3.8)$$

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

$$\text{Gumbel : } y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (3.9a)$$

$$\text{GEV : } y_m = \frac{1}{k}[(-\ln F_m)^{-k} - 1] \quad (3.9b)$$

$$\text{Weibull : } y_m = [-\ln(1 - F_m)]^{1/k} \quad (3.9c)$$

$$\text{Lognormal : } y_m = \text{inverf}(F_m) \quad (3.9d)$$

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

$$\Delta \bar{r} = e^{\bar{a} + \bar{b} \ln N + \bar{c} (\ln N)^2} \quad (3.10)$$

(3.10)式中  $N$  為樣本個數係數， $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$  及  $\bar{c}$  值依不同分佈示如表 3.3。

表 3.3 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。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2} \quad (3.11)$$

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：

$$ER = |x_{MAX} - (x_{MAX})_m| \quad (3.12)$$

#### 3.1.4 推估值之標準偏差

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。

#### 1. Goda(2000)方法

Gumbel 分佈之估算值之標準偏差量為

$$\sigma(x_R) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1 + 0.885(y_R - \gamma) + 0.6687(y_R - \gamma)^2 \right]^{1/2} \sigma_x \quad (3.13)$$

(3.13)式中 $\sigma_x$ 為樣本 $x$ 之標準偏差， $y_R$ 為重現期之基準化變量，即(4.10)式， $x_R$ 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偏差 $\sigma_z$ 乘以樣本 $x$ 之標準偏差 $\sigma_x$ ，當做推算偏差量

$$\sigma(x_R) = \sigma_x \cdot \sigma_z \quad (3.14)$$

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

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1.0 + \hat{A}(y_R - c)^2 \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

而 $\hat{A}$ 值在 Gumbel 及 Weibull 分佈為：

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 N^{-1.3}} \quad (3.16a)$$

但 GEV 及 FT-II 之  $\hat{A}$  值可表為

$$\hat{A} = a_1 e^{a_2 \left[ \ln \left( \frac{N}{N_0} \right) \right]^2 - \kappa \left[ \ln \left( \frac{1}{v_0} \right) \right]^2} \quad (3.16b)$$

(3.15)式與(3.16)式中之係數如表 3.4 所示。

表 3.4 重現期推算量之標準偏差公式中之係數

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

至於對數常態函數之  $\sigma_z$  則為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ 1.2 + 0.65(y_R - 0.2)^{2.0} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

## 2. MLE 方法

MLE 推估估算值之標準偏差量時需先計算一個資訊矩陣 (information matrix)，以 Gumbel 分佈為例其定義為

$$IE = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 l}{\partial A^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial A \partial B} \\ -\frac{\partial^2 l}{\partial A \partial B} & -\frac{\partial^2 l}{\partial B^2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

變異與共變異矩陣  $\mathbf{V}$  (variance-covariance matrix) 為資訊矩陣之反矩陣。而重現期之推估值可表為

$$x_R = B - A \ln(F_R) \quad (3.19)$$

其中  $F_R=1-1/T$ ， $T$  為重現期。因分佈函數內參數之變化率則為

$$\nabla_{x_R} = \left[ \frac{\partial x_R}{\partial A}, \frac{\partial x_R}{\partial B} \right] = [-\ln F_R, 1] \quad (3.20)$$

估算值之變異數則為

$$\text{Var}(x_R) = \nabla_{x_R} V (\nabla_{x_R})^T \quad (3.21)$$

將(3.21)式取開根號則為估算值之標準偏差量。

## 3.2 資料來源與處理方法

本節將說明資料的來源與相關處理方法，其中先說明遺漏資料補齊方法，再利用箱型圖分析檢驗資料是否含有異常雜訊，以建立分析樣本，最後介紹由樣本推估重現期極值波高的方法。

### 3.2.1 資料選取及補遺

本研究所分析的波浪觀測資料為本所港灣技術研究中心於安平港與臺北港海象觀測站每隔一個小時記錄一筆波高與週期資料，分別以月與年為單位時間間隔，將單位時間間隔內的波高資料由大至小的順序排列後，選取每個單位時間間隔內的最大波高（即一月選一筆月最大波高及一年選一筆年最大波高），做為分析極值波高的樣本資料。

當有某月份缺乏整個月的觀測資料，為保持整體資料的完整性並考慮資料的平均趨勢，本研究將波浪資料以年為單位，若當年只缺一個月份的極值波高時，取該年其他月份極值波高的平均值做為該月的極值波高；若當年內缺兩個月份的極值波高時，則先判別該月是否有颱風來襲，再分別取該年發生颱風月份極值波高的平均值或未發生颱風月份極值波高的平均值，做為該月的極值波高。

### 3.2.2 箱型圖分析方法

利用儀器蒐集現場資料的過程中，常因電壓的不穩定或其它不明原因而產生異常的雜訊，本研究分析的對象為極值資料，極易和異常雜訊混淆不清，因此必需進一步檢定資料的合理性。本研究引用統計學上的箱型圖（Box Plot）理論進行資料之篩分，並佐以當地的海象資料以研判資料的合理性，箱型圖架構如圖 3.1 所示。

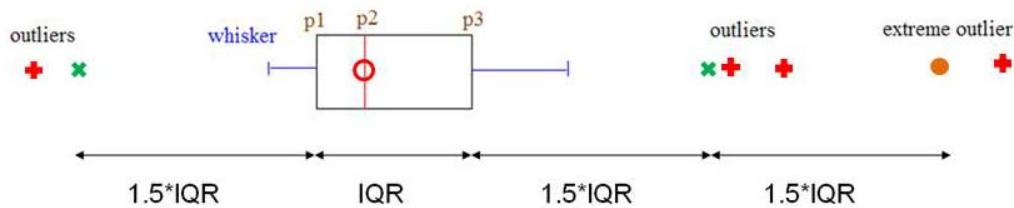


圖 3.1 箱型圖架構示意圖

圖 3.1 顯示，三個四分位數(即圖上 p1、p2、p3 點位值)構成箱型結構，組成箱型圖主體。其箱型之長度為 p3-p1 的值，稱為分位數間隔（interquartile range, IQR）。

進行箱型圖檢定時，首先將所有資料從小至大排序，之後判定四分位數值。

$$I_i = N*i/4, \quad i=1,2,3,4 \quad (3.22)$$

(3.22)式中，N 為總資料個數。 $I_i$  為排序資料中第 i 個四分位數的位置， $p_i$  為該位置處的資料值，稱之為第 i 個四分位數。估算第一四分位數（p1）與第三四分位數（p3）時，分別取  $i=1$ 、3，即排序為第 25% 與 75%位置處的資料值，用以描述資料之離散程度；估算第二四分位數（p2）時，取  $i=2$ ，為排序第 50%處的資料值，描述資料的中位數，若中位數偏左代表多數樣本數據偏小；反之，若中位數偏右代表多數樣本數據偏大。由式中計算出四分位數，繪出箱型主體後，須判定大於 75%與小於 25%的極值波高，以 1.5 倍與 3 倍的 IQR 分別定義為雜訊（outlier）與極端雜訊（extreme outlier）之界線，以符號x及●表示



之。另外樣本之範圍則以觸鬚（whisker）表示之，觸鬚範圍為箱型外向兩側延伸至樣本不大於 1.5 倍 IQR 之最大值及最小值；若樣本最大值或最小值超過觸鬚範圍時，則以＋字表示。若樣本最大值介於 1.5 倍與 3 倍 IQR 資料間，即雜訊，而樣本最大值大於 3 倍 IQR 時，稱為極端雜訊。以月最大法選取的臺北港與安平港每月最大波高資料如表 3.5 及表 3.6 所示。其中表內底色部分標明因資料不齊全而採用年後兩年該月資料進行內插的結果。

表 3.5 臺北港每月最大波高資料表（單位:m）

| 月份<br>年代 | 一月   | 二月   | 三月   | 四月   | 五月   | 六月   | 七月   | 八月   | 九月   | 十月   | 十一月  | 十二月  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1999     | 4.36 | 4.26 | 4.16 | 3.35 | 1.78 | 1.62 | 1.46 | 1.11 | 1.22 | 2.86 | 4.49 | 4.82 |
| 2000     | 5.03 | 3.28 | 2.52 | 2.74 | 2.13 | 2.21 | 1.67 | 2.67 | 4.56 | 4.71 | 4.85 | 4.87 |
| 2001     | 2.83 | 3.64 | 2.70 | 3.14 | 2.43 | 2.04 | 1.87 | 1.66 | 4.55 | 6.54 | 2.26 | 1.72 |
| 2002     | 3.28 | 3.26 | 2.16 | 1.91 | 0.89 | 0.67 | 2.21 | 1.13 | 3.45 | 2.07 | 2.00 | 2.30 |
| 2003     | 3.73 | 2.88 | 1.61 | 1.96 | 1.70 | 1.72 | 1.34 | 1.15 | 2.50 | 2.49 | 2.63 | 3.10 |
| 2004     | 2.71 | 2.92 | 3.30 | 3.40 | 2.65 | 1.69 | 2.61 | 6.11 | 3.55 | 3.13 | 3.18 | 3.68 |
| 2005     | 3.42 | 3.68 | 3.78 | 2.17 | 2.22 | 2.12 | 4.01 | 5.03 | 3.19 | 3.76 | 3.73 | 3.85 |
| 2006     | 4.26 | 4.01 | 4.38 | 3.45 | 2.04 | 0.72 | 2.91 | 1.88 | 5.44 | 2.11 | 2.56 | 3.13 |
| 2007     | 3.24 | 2.80 | 2.87 | 3.80 | 1.86 | 2.11 | 2.10 | 1.23 | 4.13 | 2.32 | 3.24 | 2.61 |
| 2008     | 3.64 | 3.49 | 3.05 | 2.30 | 2.43 | 1.84 | 2.58 | 1.70 | 4.07 | 2.52 | 3.91 | 5.41 |
| 2009     | 3.79 | 2.64 | 3.23 | 2.23 | 1.65 | 2.66 | 2.02 | 4.19 | 1.93 | 3.22 | 4.58 | 3.61 |
| 2010     | 3.68 | 3.60 | 3.53 | 3.23 | 1.86 | 2.13 | 2.31 | 2.14 | 2.94 | 5.06 | 3.06 | 4.76 |

表 3.6 安平港每月最大波高資料表（單位:m）

| 月份<br>年代 | 一月   | 二月   | 三月   | 四月   | 五月   | 六月   | 七月   | 八月   | 九月   | 十月   | 十一月  | 十二月  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2000     | 0.86 | 0.85 | 0.78 | 0.54 | 1.10 | 1.25 | 2.16 | 3.52 | 2.73 | 1.29 | 1.74 | 0.87 |
| 2001     | 0.99 | 0.83 | 0.75 | 1.10 | 2.06 | 6.92 | 5.53 | 2.25 | 2.58 | 1.2  | 0.80 | 1.24 |
| 2002     | 1.07 | 0.95 | 0.63 | 1.39 | 2.34 | 1.41 | 3.96 | 6.99 | 2.32 | 0.9  | 1.00 | 1.08 |
| 2003     | 1.33 | 1.48 | 0.83 | 0.94 | 0.51 | 2.07 | 3.9  | 3.19 | 3.52 | 0.76 | 0.84 | 0.92 |
| 2004     | 0.92 | 1.13 | 1.03 | 1.17 | 1.32 | 1.72 | 5.01 | 2.42 | 2.95 | 1.24 | 0.85 | 2.91 |
| 2005     | 1.17 | 0.97 | 1.33 | 1.01 | 1.63 | 3.64 | 4.76 | 4.72 | 4.05 | 2.06 | 0.85 | 1.02 |
| 2006     | 0.98 | 1.15 | 0.87 | 1.48 | 5.80 | 2.72 | 5.35 | 2.88 | 1.35 | 1.12 | 0.84 | 0.90 |
| 2007     | 0.85 | 0.85 | 0.95 | 1.26 | 0.97 | 1.85 | 2.01 | 5.83 | 1.50 | 3.57 | 1.32 | 1.29 |
| 2008     | 1.39 | 1.52 | 1.14 | 1.21 | 1.02 | 3.73 | 1.67 | 5.81 | 3.28 | 1.25 | 1.41 | 3.52 |
| 2009     | 2.04 | 2.11 | 1.33 | 1.53 | 1.10 | 7.20 | 3.63 | 7.66 | 3.45 | 2.26 | 1.15 | 0.88 |
| 2010     | 1.15 | 1.19 | 1.22 | 0.95 | 1.89 | 1.45 | 2.26 | 2.75 | 2.96 | 5.15 | 1.01 | 0.52 |

將表 3.5 與表 3.6 的每月最大波高資料代入箱型圖分析，篩分出屬於極值雜訊的波高及其發生時間，其過程如圖 3.2 流程圖。經由箱型圖分析後，通常會將極端雜訊的樣本資料捨棄，但因本文探討對象為極端值波高，篩分出的極端雜訊可能是當地的異常氣象所造成，不能冒然捨棄極端雜訊的樣本資料。因此引用中央氣象局所提供的颱風資料，與發生極端雜訊波高的時間點做進一步之比對，以決定極端雜訊波高的取捨。圖 3.3 及圖 3.4 所示分別為臺北港 1999 至 2010 年與安平港 2000 至 2010 年每個月極值波高的箱型圖，圖中符號說明如圖 3.1 說明。由圖 3.3、圖 3.4 與表 3.7、表 3.8 可知，臺北港月最大波高皆未超過雜訊上界限值，因此 2006 年 6 月、7 月所發生的之極值波高，均屬於雜訊波高。由於安平港 2004 年 12 月所發生 3.52m 以及 2.91m 以及 2006 年 5 月 5.8m 的最大波高，均超過雜訊上界限值為 2.52m 及 5.18m。

依中央氣象局提供的歷年颱風資訊，2008 年 12 月份沒有颱風之影響，因此認定波高 3.52m 為極端雜訊，排除極端雜訊之後重新計算之

12 月箱型圖分析數值，雜訊上界限值因此變更為 2.32。但 2004 年 12 月 03 日至 04 日及 2006 年 5 月 21 日至 24 日間曾發生中度颱風-南瑪都及中度颱風-珍珠，颱風路徑皆為第九類，屬於通過臺灣南部向東或東北部直接影響安平港的路徑；箱形圖分析得之極端雜訊波高發生於颱風侵襲臺灣之際，該極值波高極有可能是颱風所造成，而並非儀器產生的異常雜訊，故此極端雜訊波高被保留進行後續的分析，因此 2004 年 12 月發生的 2.91m 及 2006 年 5 月此發生之 5.8m 極值波高屬於極端雜訊波高，而 1、6 及 10 月的極值波高均屬於雜訊波高。

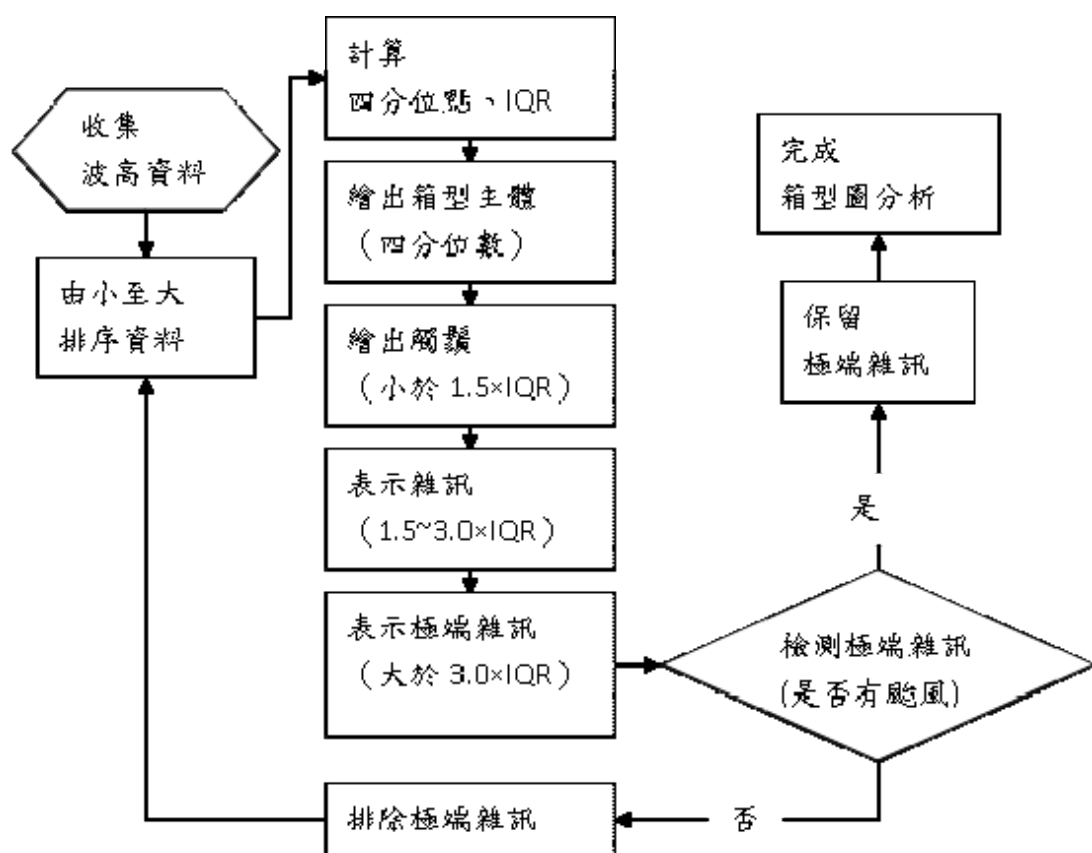


圖 3.2 箱型圖分析流程圖

表 3.7 臺北港 1999~2010 年每月波高之箱型圖分析表 (單位：m)

| 月份      | 一月   | 二月   | 三月   | 四月   | 五月   | 六月   | 七月   | 八月   | 九月   | 十月   | 十一月  | 十二月   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 第一四分位數  | 3.24 | 2.88 | 2.52 | 2.17 | 1.70 | 1.62 | 1.67 | 1.15 | 2.50 | 2.32 | 2.56 | 2.61  |
| 中位數     | 3.64 | 3.28 | 3.05 | 2.74 | 1.86 | 1.84 | 2.10 | 1.70 | 3.45 | 2.86 | 3.18 | 3.61  |
| 第三四分位數  | 3.79 | 3.64 | 3.53 | 3.35 | 2.22 | 2.12 | 2.58 | 2.67 | 4.13 | 3.76 | 3.91 | 4.76  |
| IQR     | 0.55 | 0.76 | 1.01 | 1.18 | 0.52 | 0.50 | 0.91 | 1.52 | 1.63 | 1.44 | 1.35 | 2.15  |
| 1.5*IQR | 0.83 | 1.14 | 1.52 | 1.77 | 0.78 | 0.75 | 1.37 | 2.28 | 2.45 | 2.16 | 2.03 | 3.23  |
| 3*IQR   | 1.65 | 2.28 | 3.03 | 3.54 | 1.56 | 1.50 | 2.73 | 4.56 | 4.89 | 4.32 | 4.05 | 6.45  |
| 觸鬚上界限   | 4.62 | 4.78 | 5.05 | 5.12 | 3.00 | 2.87 | 3.95 | 4.95 | 6.57 | 5.92 | 5.94 | 7.98  |
| 雜訊上界限   | 5.44 | 5.92 | 6.56 | 6.89 | 3.78 | 3.62 | 5.31 | 7.23 | 9.02 | 8.08 | 7.96 | 11.21 |

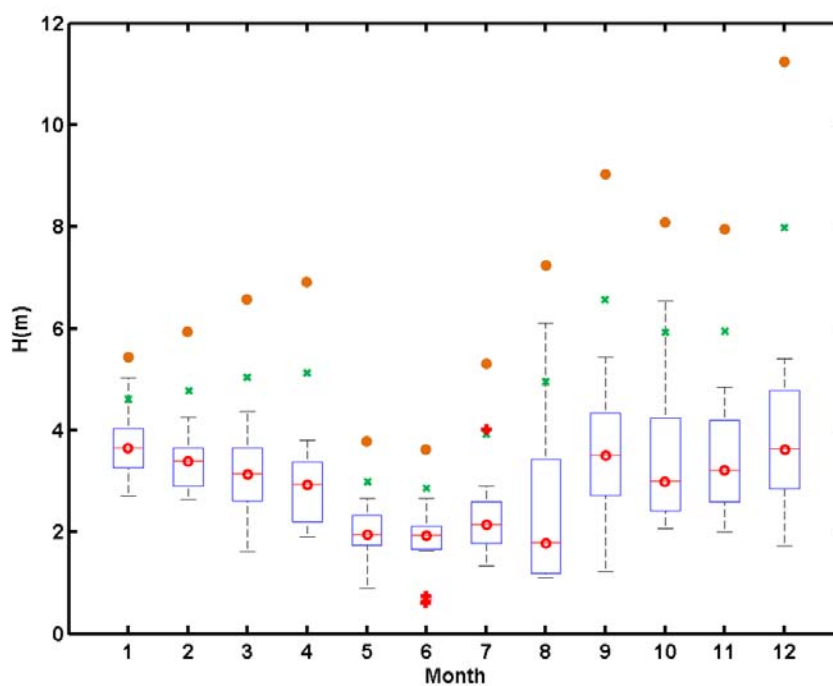


圖 3.3 臺北港 1999~2010 年極值波高箱型圖

表 3.8 安平港 2000~2010 年每月波高之箱型圖分析表（單位：m）

| 月份      | 一月   | 二月   | 三月   | 四月   | 五月   | 六月    | 七月    | 八月    | 九月   | 十月   | 十一月  | 十二月  |
|---------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 第一四分位數  | 0.92 | 0.85 | 0.78 | 0.95 | 1.02 | 1.45  | 2.16  | 2.75  | 2.32 | 1.12 | 0.84 | 0.88 |
| 中位數     | 1.07 | 1.13 | 0.95 | 1.17 | 1.32 | 2.07  | 3.90  | 3.52  | 2.95 | 1.25 | 1.00 | 0.92 |
| 第三四分位數  | 1.33 | 1.48 | 1.22 | 1.39 | 2.06 | 3.73  | 5.01  | 5.83  | 3.45 | 2.26 | 1.32 | 1.24 |
| IQR     | 0.41 | 0.63 | 0.44 | 0.44 | 1.04 | 2.28  | 2.85  | 3.08  | 1.13 | 1.14 | 0.48 | 0.36 |
| 1.5*IQR | 0.62 | 0.95 | 0.66 | 0.66 | 1.56 | 3.42  | 4.28  | 4.62  | 1.70 | 1.71 | 0.72 | 0.54 |
| 3*IQR   | 1.23 | 1.89 | 1.32 | 1.32 | 3.12 | 6.84  | 8.55  | 9.24  | 3.39 | 3.42 | 1.44 | 1.08 |
| 觸鬚上界限   | 1.95 | 2.43 | 1.88 | 2.05 | 3.62 | 7.15  | 9.29  | 10.45 | 5.15 | 3.97 | 2.04 | 1.78 |
| 雜訊上界限   | 2.56 | 3.37 | 2.54 | 2.71 | 5.18 | 10.57 | 13.56 | 15.07 | 6.84 | 5.68 | 2.76 | 2.32 |

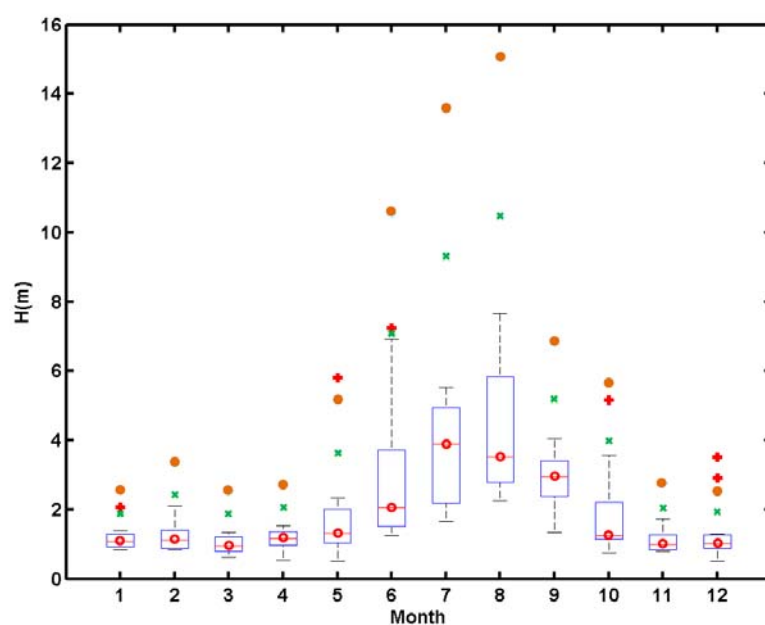


圖 3.4 安平港 2000~2010 年極值波高箱型圖

依中央氣象局提供的歷年颱風資訊，2004 年 12 月 03 日至 04 日及 2006 年 5 月 21 日至 24 日間曾發生南瑪都中度颱風及珍珠中度颱風，颱風路徑皆為第九類，屬於通過臺灣南部向東或東北部直接影響安平港的路徑；箱形圖分析得之極端雜訊波高發生於颱風侵襲臺灣之際，

該極值波高極有可能是颱風所造成，而並非儀器產生的異常雜訊，故此極端雜訊波高被保留進行後續的分析。

### 3.2.3 重現期的極值波高估算

利用前節所述之參數推定法推得不同分佈時的尺度參數及位置參數後，可推估各重現期的極值波高。將欲求的重現期年值  $T$ ，以年為單位，代入(3.23)式中可計算  $T$  年重現期的可靠度累積機率  $F_T$

$$F_T = 1 - 1/T \quad (3.23)$$

將  $F_T$  取代式(3.9)中的  $F_m$ ，可計算得  $T$  年重現期的基準化變量  $y_T$ 。將尺度參數設為斜率、位置參數設為截距與  $T$  年重現期基準化變量代入式(3.8)，可得  $T$  年重現期的極值波高  $x_T$ ，相關流程如圖 3.5 所示。

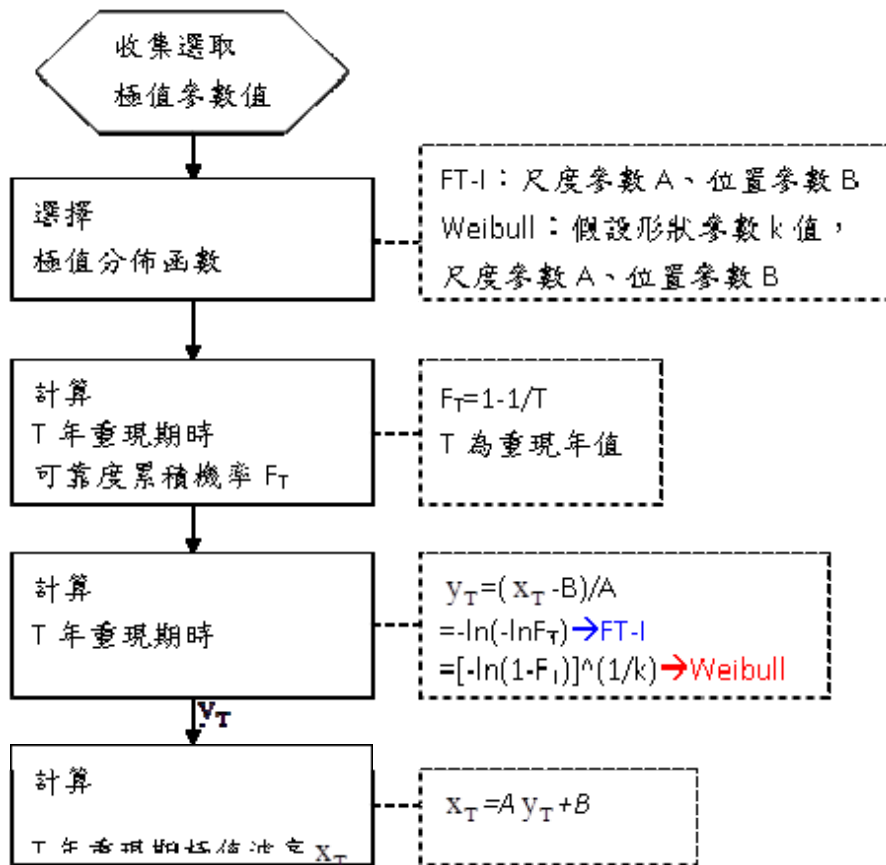


圖 3.5 T 年重現期極值波高估算之流程示意圖

### 3.3 月極值統計分析

利用臺北港 1999 至 2010 年與安平港 2000 至 2010 年之波高進行月極值統計分析，考量不同極值分布函數的適用性，並推算出各重現期的波高值，由表 3.9 至表 3.20 及圖 3.6 至圖 3.17 之檢定指標顯示，MIR 值在 LSM 及 MLE 兩種推估法中除了對數常態分佈稍有變動外，其餘各極值函數所得到之數值幾乎相等，而從 RMSE 值顯示，LSM 推估法所推估出來的各極值函數下之波高與樣本間之 RMSE 較 MLE 推估法低，因此極值推估法以 LSM 推估臺北及安平港較佳。

另外機率分布函數從各檢定指標來說，臺北港總共 12 年各月份波高除了 4、8 及 10 月為 Weibull 分布誤差較小之外，其餘大部分月份皆可以 GEV 分布來代表其適合之極值函數，從表 3.9 及表 3.20 與圖 3.6 及圖 3.17 顯示，8 月及 10 月因其各年最大波高的變動程度較大，8 月各年份最大波高變動高達 5m，10 月也有 4.47m，因此 GEV 分布的 RMSE 也跟著有所影響，分別為 0.81 及 0.54m，跟使用 Weibull 分布所推算之 RMSE 就有所差距。扣除 8 月及 10 月數據之外，從圖 3.6 及圖 3.17 可顯示，使用推估法所推估出來的各極值函數下之波高與樣本，其結果皆不會太差，選用各月份適合分布後，所推算波高與樣本間之 RMSE 值為 0.08-0.22m 之間。若推估重現期為  $T=10$ 、25、50 及 100 年之各極值分布函數之波高( $x_R$ )及其推算標準偏差( $\sigma$ )顯示，各月份以推估標準偏差最小的極值函數作為標準，臺北港各月份皆以 MIR 及 RMSE 值所推估出來的最適合分布擁有適當之標準偏差，因此以極值函數 Weibull 分布及 GEV 分布推算 50 年重現期之波高，若在 95%信賴度情況下，推算各月份波高值分別為一月 4.06m 至 6.52m、二月 3.67m 至 5.23m、三月 3.55m 至 5.51m、四月 3.26m 至 5.5m、五月 2.17m 至 3.15m、六月 2.02m 至 3.28m、七月 2.52m 至 6.2m、八月 1.7m 至 13.9m、九月 4.11m 至 7.05m、十月 2.8 m 至 12.8m、十一月 3.94m 至 6.68m 及十二月 4.22m 至 6.88m。

表 3.9 推估臺北港 1 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 0.32 | 0.43    | 0.40 | 0.32 | 0.32 | 0.43    | 0.41 | 0.32 |
| RMSE(m)     |           | 0.09 | 0.10    | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.12    | 0.11 | 0.11 |
| $X_e(m)$    |           | 0.05 | 0.02    | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.11    | 0.00 | 0.01 |
| $x_R(m)$    | 10        | 4.59 | 4.59    | 4.57 | 4.59 | 4.57 | 4.51    | 4.53 | 4.49 |
|             | 25        | 5.10 | 5.00    | 4.98 | 5.01 | 5.07 | 4.88    | 4.92 | 4.87 |
|             | 50        | 5.48 | 5.27    | 5.27 | 5.29 | 5.45 | 5.12    | 5.19 | 5.13 |
|             | 100       | 5.86 | 5.51    | 5.54 | 5.54 | 5.82 | 5.35    | 5.44 | 5.37 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.39 | 0.41    | 0.26 | 0.43 | 0.37 | 0.35    | 0.35 | 0.39 |
|             | 25        | 0.53 | 0.50    | 0.31 | 0.55 | 0.47 | 0.44    | 0.46 | 0.63 |
|             | 50        | 0.64 | 0.56    | 0.35 | 0.63 | 0.56 | 0.49    | 0.54 | 0.86 |
|             | 100       | 0.74 | 0.61    | 0.38 | 0.71 | 0.64 | 0.55    | 0.63 | 1.13 |

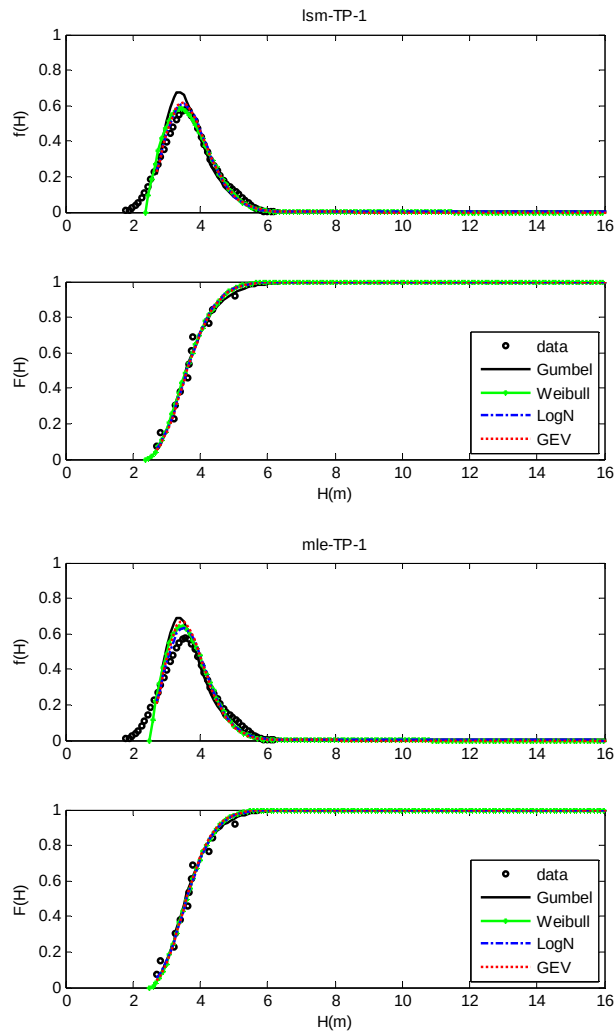


圖 3.6 推估臺北港 1 月份波浪之機率密度函數圖



表 3.10 推估臺北港 2 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 0.60 | 0.43    | 0.40 | 0.29 | 0.60 | 0.43    | 0.39 | 0.29 |
| RMSE(m)     |           | 0.10 | 0.08    | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.09    | 0.08 | 0.09 |
| $X_e(m)$    |           | 0.05 | 0.02    | 0.05 | 0.12 | 0.03 | 0.08    | 0.02 | 0.08 |
| $x_R(m)$    | 10        | 4.07 | 4.08    | 4.07 | 4.06 | 4.08 | 4.02    | 4.04 | 3.99 |
|             | 25        | 4.46 | 4.39    | 4.38 | 4.30 | 4.48 | 4.30    | 4.33 | 4.21 |
|             | 50        | 4.75 | 4.60    | 4.59 | 4.45 | 4.78 | 4.49    | 4.53 | 4.34 |
|             | 100       | 5.03 | 4.79    | 4.79 | 4.57 | 5.07 | 4.66    | 4.72 | 4.45 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.30 | 0.31    | 0.20 | 0.29 | 0.27 | 0.27    | 0.26 | 0.26 |
|             | 25        | 0.41 | 0.38    | 0.24 | 0.36 | 0.35 | 0.33    | 0.34 | 0.43 |
|             | 50        | 0.49 | 0.43    | 0.27 | 0.40 | 0.41 | 0.38    | 0.40 | 0.59 |
|             | 100       | 0.57 | 0.47    | 0.29 | 0.43 | 0.47 | 0.42    | 0.46 | 0.75 |

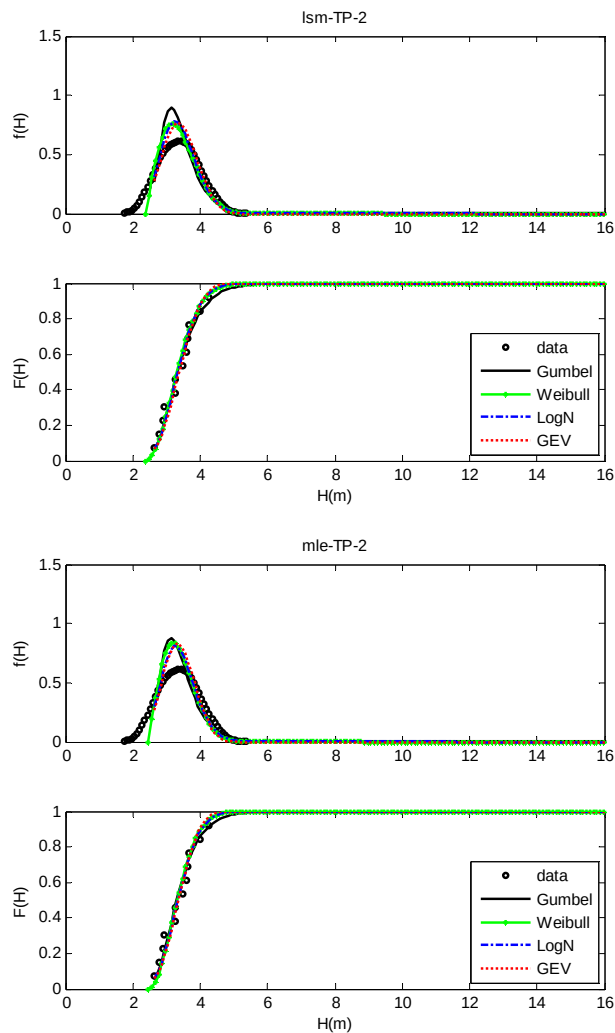


圖 3.7 推估臺北港 2 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.11 推估臺北港 3 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 0.84 | 0.60    | 0.68 | 0.09 | 0.84 | 0.60    | 0.66 | 0.09 |
| RMSE(m)      |           | 0.19 | 0.15    | 0.17 | 0.08 | 0.22 | 0.27    | 0.16 | 0.10 |
| Xe (m)       |           | 0.41 | 0.36    | 0.25 | 0.07 | 0.26 | 0.75    | 0.28 | 0.06 |
| $x_R(m)$     | 10        | 4.22 | 4.24    | 4.36 | 4.15 | 4.42 | 4.04    | 4.32 | 4.06 |
|              | 25        | 4.84 | 4.74    | 5.00 | 4.40 | 5.14 | 4.41    | 4.93 | 4.30 |
|              | 50        | 5.30 | 5.07    | 5.47 | 4.53 | 5.67 | 4.65    | 5.37 | 4.43 |
|              | 100       | 5.76 | 5.37    | 5.92 | 4.62 | 6.20 | 4.87    | 5.81 | 4.52 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.48 | 0.50    | 0.33 | 0.41 | 0.40 | 0.40    | 0.52 | 0.28 |
|              | 25        | 0.65 | 0.61    | 0.39 | 0.47 | 0.49 | 0.48    | 0.72 | 0.39 |
|              | 50        | 0.78 | 0.68    | 0.43 | 0.50 | 0.57 | 0.53    | 0.88 | 0.50 |
|              | 100       | 0.91 | 0.75    | 0.47 | 0.53 | 0.64 | 0.58    | 1.05 | 0.60 |

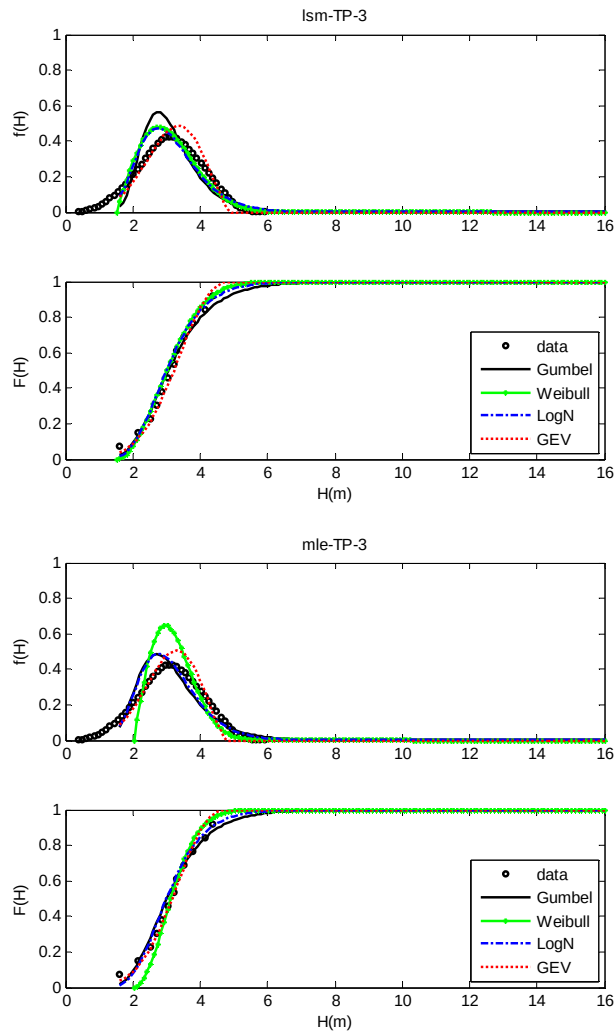


圖 3.8 推估臺北港 3 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.12 推估臺北港 4 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 1.78 | 1.44    | 1.54 | 1.51 | 1.78 | 1.44    | 1.54 | 1.51 |
| RMSE(m)     |           | 0.22 | 0.19    | 0.20 | 0.21 | 0.23 | 0.19    | 0.20 | 0.22 |
| $X_e(m)$    |           | 0.03 | 0.02    | 0.09 | 0.41 | 0.06 | 0.05    | 0.08 | 0.52 |
| $x_R(m)$    | 10        | 3.70 | 3.72    | 3.75 | 3.58 | 3.76 | 3.66    | 3.74 | 3.57 |
|             | 25        | 4.19 | 4.12    | 4.22 | 3.73 | 4.29 | 4.03    | 4.20 | 3.73 |
|             | 50        | 4.56 | 4.38    | 4.55 | 3.80 | 4.69 | 4.28    | 4.52 | 3.80 |
|             | 100       | 4.92 | 4.63    | 4.86 | 3.85 | 5.09 | 4.51    | 4.84 | 3.85 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.40 | 0.41    | 0.27 | 0.32 | 0.35 | 0.34    | 0.38 | 0.14 |
|             | 25        | 0.54 | 0.50    | 0.32 | 0.36 | 0.44 | 0.42    | 0.51 | 0.13 |
|             | 50        | 0.65 | 0.57    | 0.36 | 0.37 | 0.52 | 0.47    | 0.61 | 0.15 |
|             | 100       | 0.75 | 0.62    | 0.39 | 0.39 | 0.59 | 0.52    | 0.71 | 0.18 |

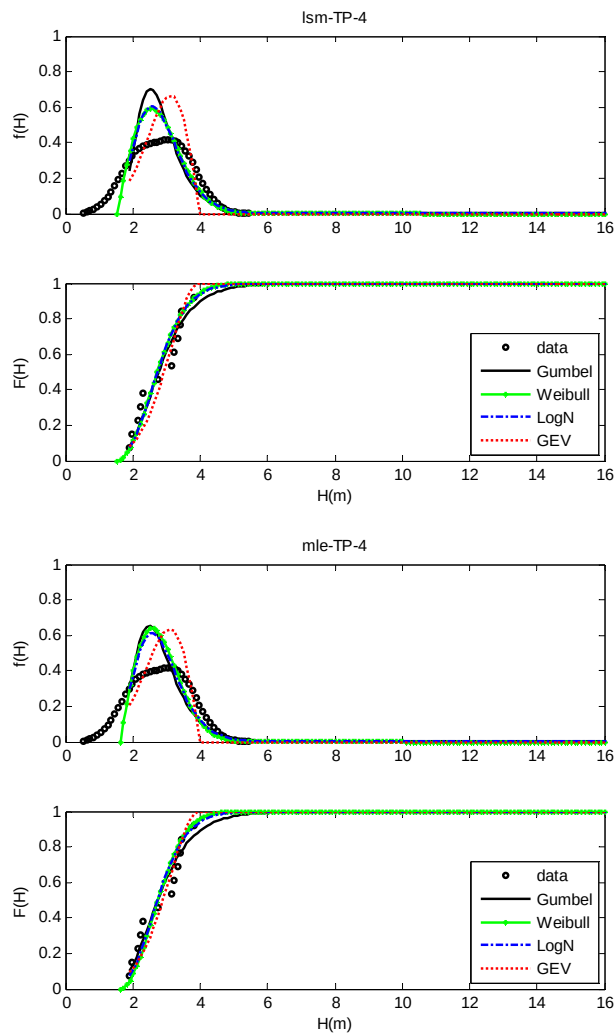


圖 3.9 推估臺北港 4 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.13 推估臺北港 5 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 2.26 | 2.19    | 2.10 | 0.59 | 2.26 | 2.19    | 2.15 | 0.59 |
| RMSE(m)      |           | 0.17 | 0.16    | 0.17 | 0.09 | 0.25 | 0.24    | 0.19 | 0.10 |
| Xe (m)       |           | 0.48 | 0.45    | 0.34 | 0.11 | 0.27 | 0.77    | 0.31 | 0.05 |
| $x_R(m)$     | 10        | 2.58 | 2.59    | 2.70 | 2.52 | 2.88 | 2.48    | 2.74 | 2.50 |
|              | 25        | 2.92 | 2.87    | 3.06 | 2.61 | 3.36 | 2.66    | 3.14 | 2.60 |
|              | 50        | 3.17 | 3.05    | 3.32 | 2.66 | 3.72 | 2.78    | 3.42 | 2.64 |
|              | 100       | 3.42 | 3.21    | 3.58 | 2.69 | 4.07 | 2.89    | 3.69 | 2.67 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.28 | 0.29    | 0.19 | 0.22 | 0.20 | 0.00    | 0.28 | 0.09 |
|              | 25        | 0.38 | 0.35    | 0.22 | 0.24 | 0.23 | 0.00    | 0.38 | 0.10 |
|              | 50        | 0.45 | 0.40    | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.00    | 0.45 | 0.11 |
|              | 100       | 0.53 | 0.44    | 0.27 | 0.26 | 0.29 | 0.00    | 0.53 | 0.13 |

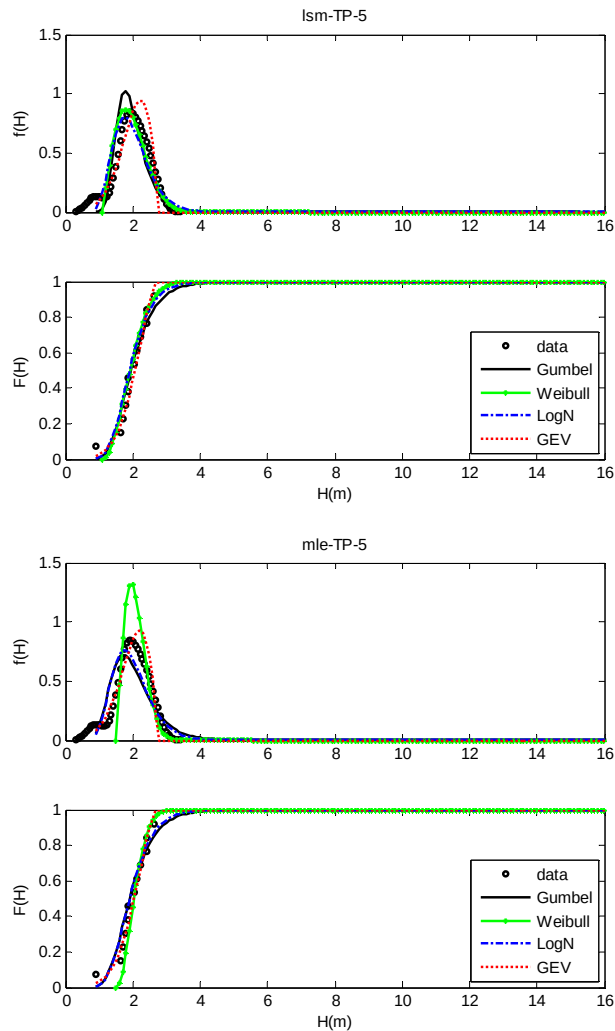


圖 3.10 推估臺北港 5 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.14 推估臺北港 6 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 3.38 | 3.35    | 3.92 | 1.16 | 3.38 | 3.35    | 4.12 | 1.16 |
| RMSE(m)     |           | 0.26 | 0.25    | 0.31 | 0.17 | 0.34 | 0.40    | 0.36 | 0.17 |
| $X_e(m)$    |           | 0.40 | 0.37    | 0.20 | 0.06 | 0.12 | 0.92    | 0.15 | 0.15 |
| $x_R(m)$    | 10        | 2.53 | 2.55    | 2.78 | 2.47 | 2.89 | 2.44    | 2.91 | 2.46 |
|             | 25        | 2.94 | 2.88    | 3.35 | 2.59 | 3.48 | 2.63    | 3.57 | 2.58 |
|             | 50        | 3.24 | 3.10    | 3.78 | 2.65 | 3.92 | 2.75    | 4.07 | 2.64 |
|             | 100       | 3.55 | 3.30    | 4.21 | 2.69 | 4.35 | 2.87    | 4.58 | 2.68 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.35 | 0.36    | 0.24 | 0.28 | 0.25 | 0.21    | 0.42 | 0.11 |
|             | 25        | 0.48 | 0.44    | 0.28 | 0.31 | 0.30 | 0.15    | 0.59 | 0.11 |
|             | 50        | 0.57 | 0.50    | 0.31 | 0.32 | 0.34 | 0.00    | 0.73 | 0.11 |
|             | 100       | 0.66 | 0.55    | 0.34 | 0.33 | 0.38 | 0.00    | 0.89 | 0.13 |

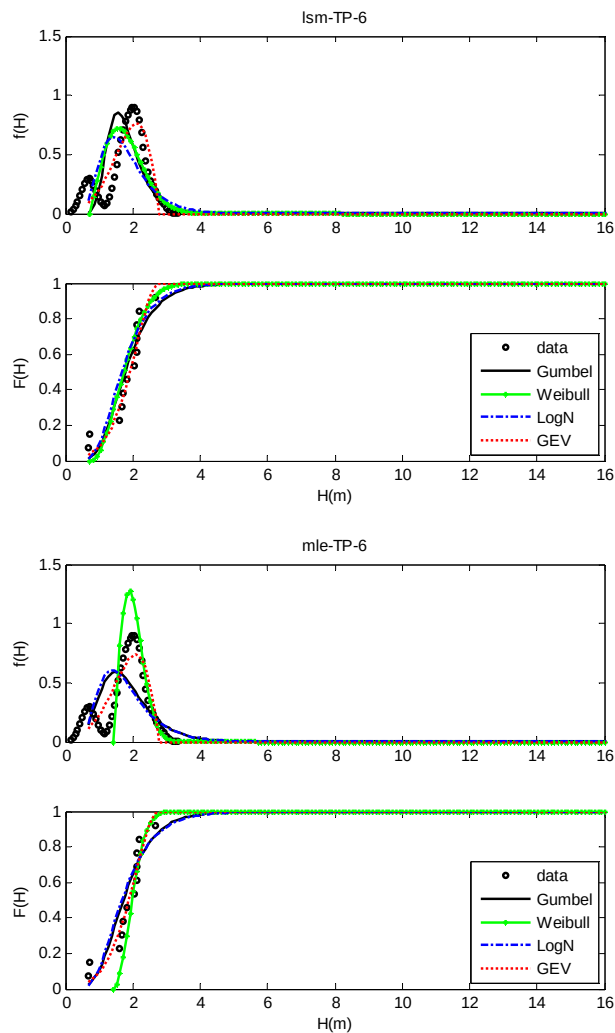


圖 3.11 推估臺北港 6 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.15 推估臺北港 7 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 0.41 | 0.44    | 0.57 | 0.28 | 0.41 | 0.44    | 0.59 | 0.28 |
| RMSE(m)      |           | 0.12 | 0.13    | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.15    | 0.15 | 0.12 |
| Xe (m)       |           | 0.08 | 0.20    | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.28    | 0.03 | 0.03 |
| $x_R(m)$     | 10        | 3.28 | 3.28    | 3.25 | 3.27 | 3.13 | 3.16    | 3.19 | 3.16 |
|              | 25        | 3.84 | 4.00    | 3.77 | 3.88 | 3.63 | 3.80    | 3.68 | 3.73 |
|              | 50        | 4.26 | 4.54    | 4.15 | 4.36 | 4.00 | 4.28    | 4.04 | 4.16 |
|              | 100       | 4.68 | 5.08    | 4.52 | 4.85 | 4.37 | 4.76    | 4.39 | 4.61 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.44 | 0.74    | 0.29 | 0.55 | 0.44 | 0.44    | 0.43 | 0.53 |
|              | 25        | 0.59 | 1.08    | 0.35 | 0.77 | 0.59 | 0.55    | 0.60 | 0.94 |
|              | 50        | 0.71 | 1.34    | 0.39 | 0.94 | 0.70 | 0.63    | 0.74 | 1.38 |
|              | 100       | 0.82 | 1.59    | 0.43 | 1.12 | 0.81 | 0.69    | 0.88 | 1.95 |

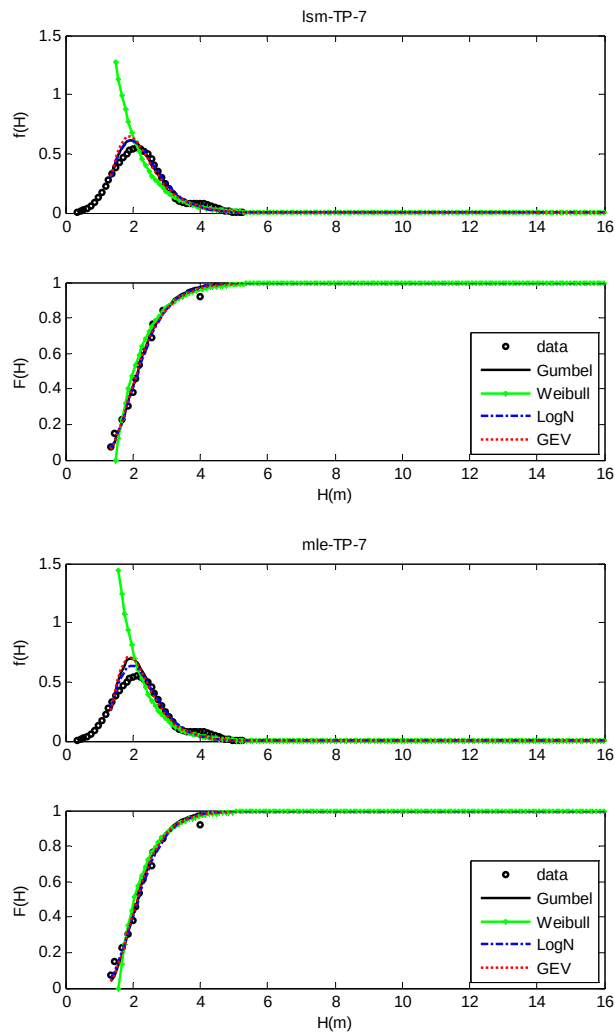


圖 3.12 推估臺北港 7 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.16 推估臺北港 8 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |       |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|-------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV   |
| MIR(m)      |           | 1.27 | 0.52    | 0.83 | 4.19 | 1.27 | 0.52    | 0.84 | 5.61  |
| RMSE(m)     |           | 0.48 | 0.32    | 0.44 | 0.81 | 0.61 | 0.36    | 0.45 | 25.64 |
| $X_e(m)$    |           | 0.87 | 0.28    | 0.33 | 0.80 | 0.47 | 0.11    | 0.33 | 0.03  |
| $x_R(m)$    | 10        | 4.80 | 4.87    | 4.54 | 2.42 | 4.13 | 4.61    | 4.52 | 12.59 |
|             | 25        | 6.08 | 6.54    | 6.03 | 4.87 | 5.11 | 6.09    | 6.00 | -     |
|             | 50        | 7.04 | 7.80    | 7.25 | -    | 5.83 | 7.21    | 7.20 | -     |
|             | 100       | 7.98 | 9.06    | 8.55 | -    | 6.55 | 8.33    | 8.48 | -     |
| $\sigma(m)$ | 10        | 1.02 | 1.74    | 0.68 | -    | 1.21 | 1.00    | 1.11 | 0.42  |
|             | 25        | 1.37 | 2.51    | 0.81 | -    | 1.66 | 1.22    | 1.76 | 3.65  |
|             | 50        | 1.64 | 3.11    | 0.90 | -    | 2.00 | 1.37    | 2.36 | -     |
|             | 100       | 1.91 | 3.71    | 0.99 | -    | 2.33 | 1.50    | 3.05 | -     |

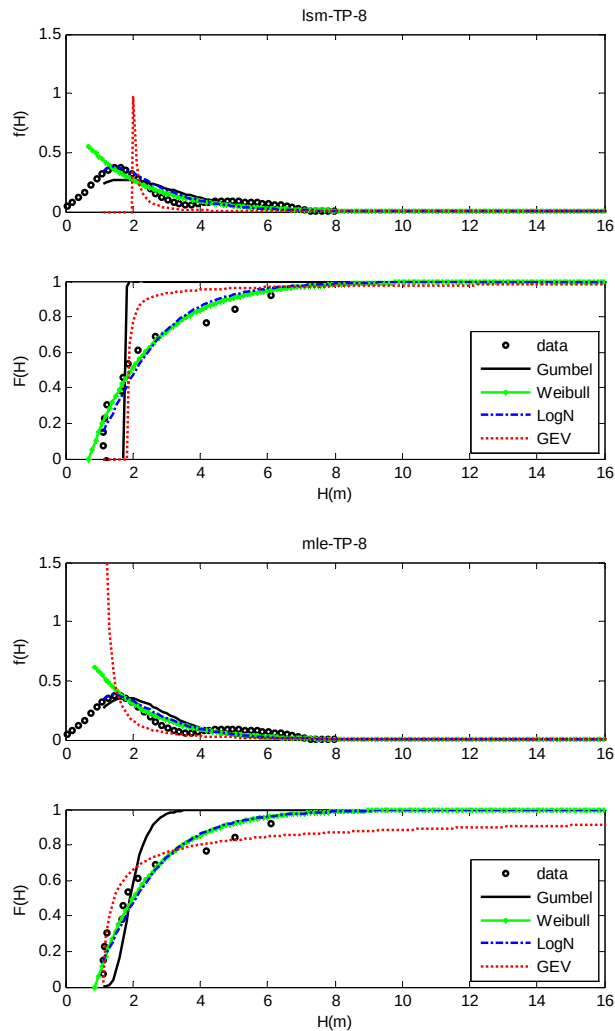


圖 3.13 推估臺北港 8 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.17 推估臺北港 9 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 1.13 | 0.89    | 1.46 | 0.10 | 1.13 | 0.89    | 1.46 | 0.10 |
| RMSE(m)      |           | 0.32 | 0.27    | 0.42 | 0.12 | 0.38 | 0.38    | 0.41 | 0.15 |
| $X_e$ (m)    |           | 0.63 | 0.56    | 0.41 | 0.09 | 0.36 | 1.05    | 0.41 | 0.07 |
| $x_R(m)$     | 10        | 5.10 | 5.13    | 5.52 | 5.02 | 5.46 | 4.87    | 5.52 | 4.89 |
|              | 25        | 6.01 | 5.86    | 6.72 | 5.39 | 6.54 | 5.44    | 6.71 | 5.25 |
|              | 50        | 6.69 | 6.35    | 7.63 | 5.58 | 7.35 | 5.82    | 7.62 | 5.44 |
|              | 100       | 7.36 | 6.80    | 8.56 | 5.72 | 8.15 | 6.17    | 8.54 | 5.58 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.72 | 0.74    | 0.48 | 0.62 | 0.58 | 0.59    | 0.93 | 0.39 |
|              | 25        | 0.97 | 0.91    | 0.57 | 0.70 | 0.72 | 0.70    | 1.35 | 0.52 |
|              | 50        | 1.16 | 1.02    | 0.64 | 0.75 | 0.83 | 0.78    | 1.71 | 0.63 |
|              | 100       | 1.36 | 1.12    | 0.70 | 0.79 | 0.93 | 0.84    | 2.10 | 0.75 |

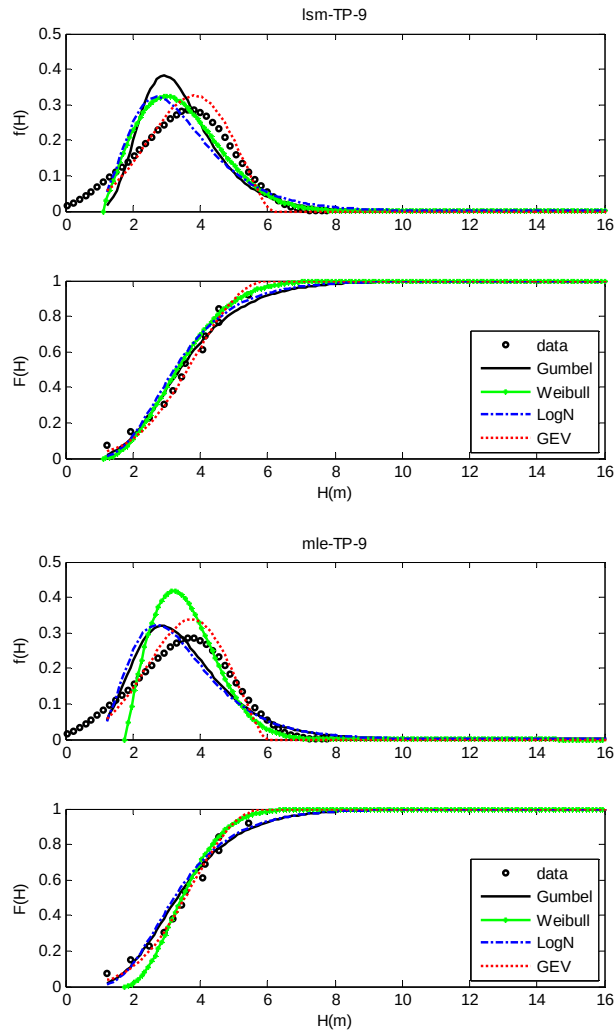


圖 3.14 推估臺北港 9 月份波浪之機率密度函數圖



表 3.18 推估臺北港 10 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |       |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|-------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV   |
| MIR(m)       |           | 0.62 | 0.16    | 0.64 | 2.26 | 0.62 | 0.16    | 0.66 | 2.26  |
| RMSE(m)      |           | 0.27 | 0.14    | 0.30 | 0.54 | 0.40 | 0.22    | 0.32 | 1.48  |
| Xe (m)       |           | 0.56 | 0.06    | 0.35 | 0.51 | 0.25 | 0.10    | 0.33 | 0.04  |
| $x_R(m)$     | 10        | 5.33 | 5.37    | 5.16 | 4.22 | 4.83 | 5.12    | 5.10 | 5.52  |
|              | 25        | 6.40 | 6.75    | 6.16 | 5.64 | 5.68 | 6.34    | 6.07 | 8.48  |
|              | 50        | 7.20 | 7.80    | 6.90 | 7.33 | 6.31 | 7.26    | 6.78 | 12.01 |
|              | 100       | 7.99 | 8.84    | 7.65 | 9.86 | 6.93 | 8.18    | 7.50 | 17.27 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.83 | 1.42    | 0.56 | 1.94 | 0.96 | 0.83    | 0.80 | 0.05  |
|              | 25        | 1.12 | 2.06    | 0.66 | 3.83 | 1.31 | 1.02    | 1.14 | 0.12  |
|              | 50        | 1.35 | 2.55    | 0.74 | 6.10 | 1.58 | 1.14    | 1.42 | 0.20  |
|              | 100       | 1.57 | 3.04    | 0.81 | 9.49 | 1.84 | 1.25    | 1.73 | 0.32  |

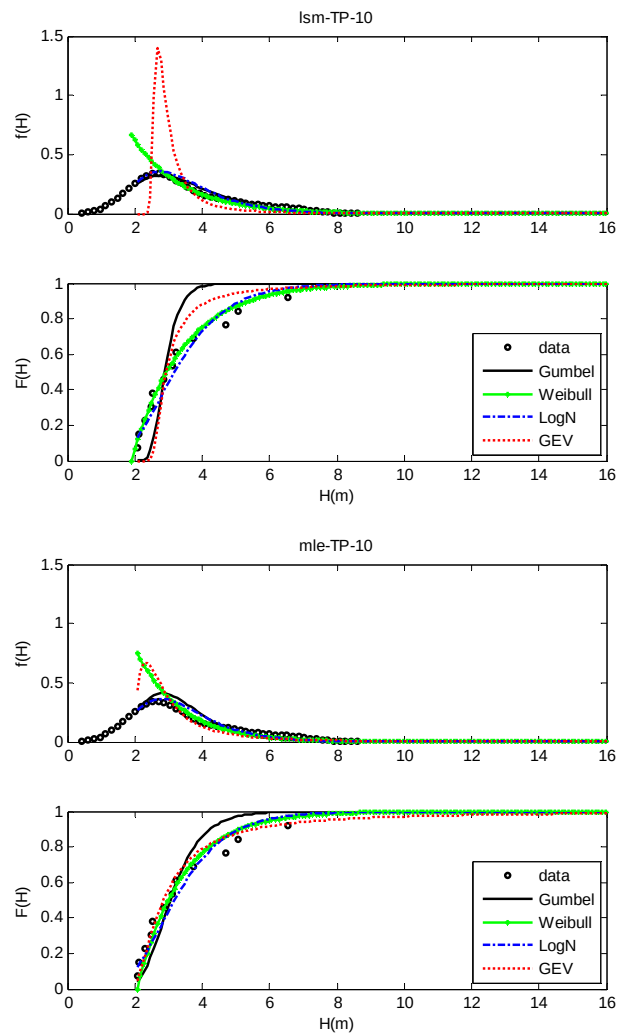


圖 3.15 推估臺北港 10 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.19 推估臺北港 11 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 0.79 | 0.51    | 0.67 | 0.34 | 0.79 | 0.51    | 0.65 | 0.34 |
| RMSE(m)     |           | 0.21 | 0.16    | 0.19 | 0.17 | 0.21 | 0.18    | 0.18 | 0.19 |
| $X_e(m)$    |           | 0.09 | 0.03    | 0.01 | 0.27 | 0.06 | 0.16    | 0.03 | 0.20 |
| $x_R(m)$    | 10        | 4.68 | 4.71    | 4.77 | 4.66 | 4.69 | 4.59    | 4.70 | 4.51 |
|             | 25        | 5.41 | 5.29    | 5.49 | 5.07 | 5.43 | 5.12    | 5.38 | 4.89 |
|             | 50        | 5.95 | 5.68    | 6.01 | 5.31 | 5.98 | 5.48    | 5.87 | 5.11 |
|             | 100       | 6.49 | 6.03    | 6.53 | 5.50 | 6.53 | 5.80    | 6.35 | 5.29 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.57 | 0.59    | 0.38 | 0.53 | 0.52 | 0.50    | 0.59 | 0.57 |
|             | 25        | 0.77 | 0.71    | 0.45 | 0.64 | 0.67 | 0.63    | 0.82 | 1.06 |
|             | 50        | 0.92 | 0.80    | 0.50 | 0.70 | 0.78 | 0.71    | 1.01 | 1.49 |
|             | 100       | 1.07 | 0.88    | 0.55 | 0.76 | 0.89 | 0.79    | 1.20 | 1.92 |

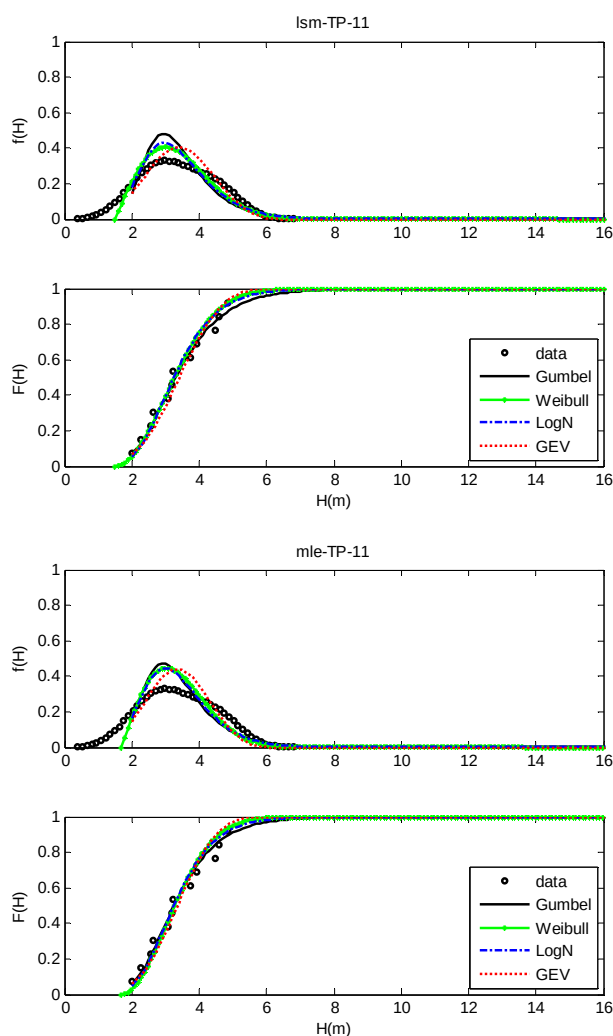


圖 3.16 推估臺北港 11 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.20 推估臺北港 12 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 1.15 | 0.83    | 1.18 | 0.34 | 1.15 | 0.83    | 1.15 | 0.34 |
| RMSE(m)     |           | 0.31 | 0.25    | 0.32 | 0.22 | 0.33 | 0.25    | 0.31 | 0.23 |
| $X_e(m)$    |           | 0.40 | 0.32    | 0.23 | 0.33 | 0.23 | 0.31    | 0.26 | 0.37 |
| $x_R(m)$    | 10        | 5.22 | 5.26    | 5.47 | 5.09 | 5.41 | 5.21    | 5.40 | 5.00 |
|             | 25        | 6.09 | 5.96    | 6.45 | 5.40 | 6.38 | 5.90    | 6.35 | 5.30 |
|             | 50        | 6.74 | 6.42    | 7.18 | 5.55 | 7.10 | 6.36    | 7.04 | 5.45 |
|             | 100       | 7.38 | 6.85    | 7.91 | 5.66 | 7.82 | 6.79    | 7.74 | 5.56 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.69 | 0.71    | 0.46 | 0.57 | 0.58 | 0.58    | 0.79 | 0.33 |
|             | 25        | 0.93 | 0.87    | 0.55 | 0.64 | 0.73 | 0.70    | 1.12 | 0.49 |
|             | 50        | 1.11 | 0.97    | 0.61 | 0.68 | 0.85 | 0.78    | 1.40 | 0.63 |
|             | 100       | 1.30 | 1.07    | 0.67 | 0.71 | 0.97 | 0.85    | 1.69 | 0.77 |

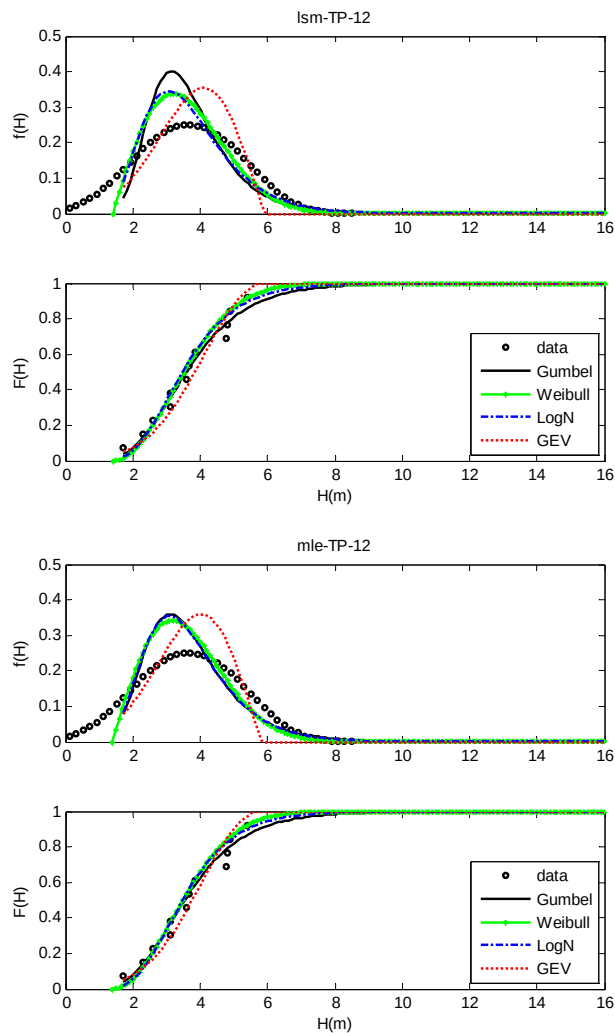


圖 3.17 推估臺北港 12 月份波浪之機率密度函數圖

以機率分布函數從各檢定指標來說，安平港總共 11 年各月份波高，除了 4 月、5 月及 9 月以 GEV 分布作為較適合之極值函數外，其實月份皆以 Weibull 分布配合 LSM 推估法所推估的數值誤差較小，從圖 3.18 至圖 3.29 及表 3.21 至表 3.32 顯示，6 至 8 月因其最大波高變動程度較大，此三個月份使用 GEV 分布所推算波高與樣本間之 RMSE 皆超過 1，與其他極值函數 RMSE 值差距非常大，其餘月份的各種分布所推算出來的 RMSE 相當接近，選用各月份適合分布後，所推算波高與樣本間之 RMSE 值為 0.04-0.55m 之間，且從數值得知臺北港月極值統計分布大部分月份適合 GEV 分布，而安平港為 Weibull 分布，恰為兩種不同性質的統計特性，因此各港口不同月份均有其較適合之極值分布。若推估重現期為  $T=10$ 、25、50 及 100 年之各極值分布函數之波高( $x_R$ )及其推算標準偏差( $\sigma$ )顯示，各月份以推估標準偏差最小的極值函數作為標準，安平港以標準偏差作為選取最適分佈的依據，推算各月份波高值分別為一月 0.17m 至 4.59m、二月 0.91m 至 3.93m、三月 1.15m 至 2.01m、四月 1.23m 至 1.81m、五月 0m 至 13.55m、六月 1.44m 至 17.98m、七月 4.51m 至 9.61m、八月 4.81m 至 14.53m、九月 3.13m 至 5.09m、十月 0 m 至 15.41m、十一月 0.86m 至 3.22m 及十二月 0m 至 7.98m，也代表在推算月極值重現期波高時，有些月份受到颱風影響推算出來的波高較大。

表 3.21 推估安平港 1 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 1.27 | 0.22    | 1.87 | 0.23 | 1.27 | 0.22    | 1.87 | 0.23 |
| RMSE(m)      |           | 0.10 | 0.05    | 0.12 | 0.04 | 0.13 | 0.07    | 0.12 | 0.10 |
| Xe (m)       |           | 0.14 | 0.03    | 0.10 | 0.04 | 0.05 | 0.08    | 0.10 | 0.01 |
| $x_R(m)$     | 10        | 1.63 | 1.61    | 1.56 | 1.47 | 1.48 | 1.53    | 1.56 | 1.59 |
|              | 25        | 1.89 | 2.03    | 1.76 | 1.88 | 1.67 | 1.88    | 1.76 | 2.11 |
|              | 50        | 2.08 | 2.38    | 1.90 | 2.32 | 1.82 | 2.17    | 1.90 | 2.67 |
|              | 100       | 2.27 | 2.74    | 2.04 | 2.94 | 1.96 | 2.47    | 2.04 | 3.45 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.22 | 0.52    | 0.14 | 0.47 | 0.26 | 0.26    | 0.17 | 0.19 |
|              | 25        | 0.29 | 0.85    | 0.17 | 0.88 | 0.37 | 0.39    | 0.23 | 0.00 |
|              | 50        | 0.35 | 1.13    | 0.19 | 1.34 | 0.44 | 0.50    | 0.27 | 0.00 |
|              | 100       | 0.40 | 1.43    | 0.21 | 1.96 | 0.52 | 0.62    | 0.32 | 0.00 |

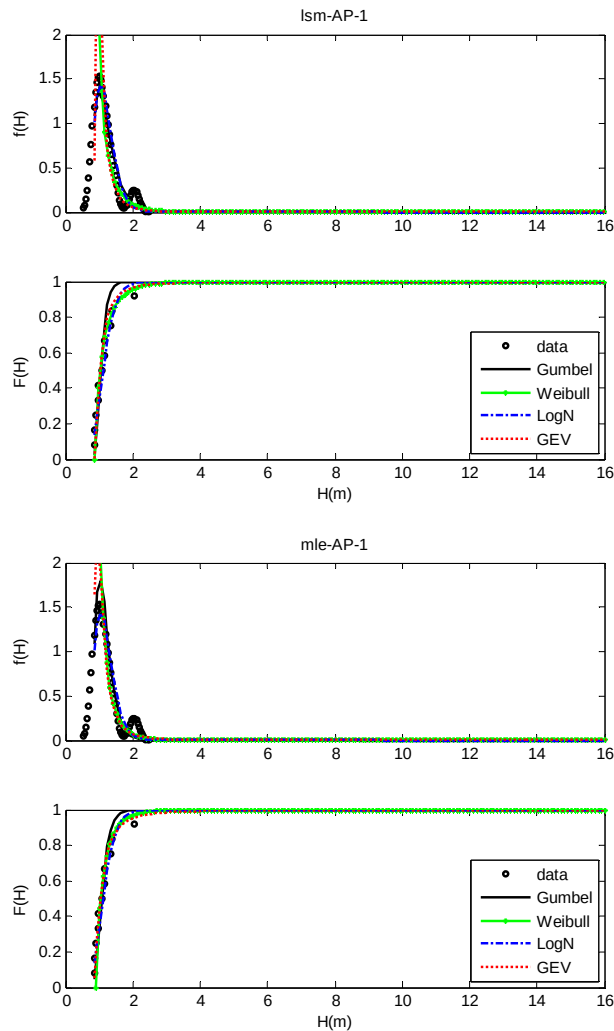


圖 3.18 推估安平港 1 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.22 推估安平港 2 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 0.86 | 0.25    | 1.17 | 3.17 | 0.86 | 0.25    | 1.18 | 3.17 |
| RMSE(m)      |           | 0.09 | 0.05    | 0.11 | 0.18 | 0.13 | 0.07    | 0.11 | 1.52 |
| Xe (m)       |           | 0.16 | 0.03    | 0.12 | 0.20 | 0.07 | 0.01    | 0.12 | 0.01 |
| $x_R(m)$     | 10        | 1.72 | 1.74    | 1.66 | 1.23 | 1.58 | 1.67    | 1.66 | 1.92 |
|              | 25        | 2.02 | 2.13    | 1.91 | 1.48 | 1.81 | 2.01    | 1.90 | 3.27 |
|              | 50        | 2.25 | 2.42    | 2.09 | 1.84 | 1.98 | 2.26    | 2.08 | 5.19 |
|              | 100       | 2.47 | 2.72    | 2.27 | 2.45 | 2.15 | 2.52    | 2.25 | 8.54 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.24 | 0.43    | 0.16 | 0.78 | 0.29 | 0.24    | 0.21 | 0.07 |
|              | 25        | 0.33 | 0.62    | 0.19 | 1.82 | 0.39 | 0.30    | 0.29 | 0.25 |
|              | 50        | 0.39 | 0.77    | 0.22 | 3.32 | 0.47 | 0.33    | 0.35 | 0.57 |
|              | 100       | 0.46 | 0.92    | 0.24 | 5.94 | 0.55 | 0.37    | 0.42 | 1.26 |

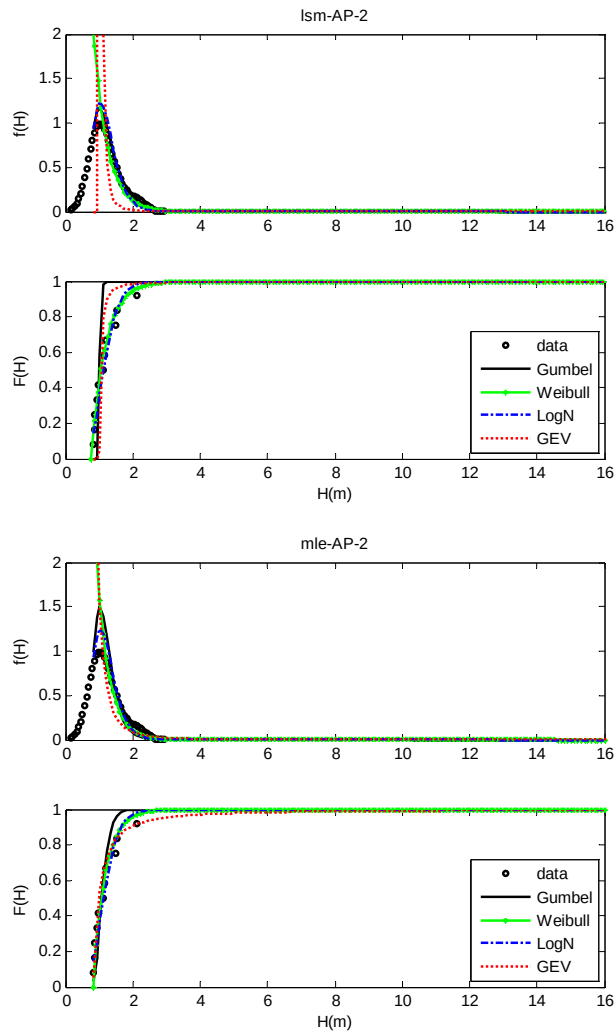


圖 3.19 推估安平港 2 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.23 推估安平港 3 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 0.93 | 0.64    | 0.73 | 0.43 | 0.93 | 0.64    | 0.72 | 0.43 |
| RMSE(m)     |           | 0.06 | 0.05    | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.05    | 0.05 | 0.05 |
| $X_e(m)$    |           | 0.04 | 0.02    | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 0.05    | 0.02 | 0.04 |
| $x_R(m)$    | 10        | 1.32 | 1.33    | 1.34 | 1.31 | 1.32 | 1.30    | 1.32 | 1.27 |
|             | 25        | 1.51 | 1.48    | 1.51 | 1.41 | 1.51 | 1.43    | 1.48 | 1.36 |
|             | 50        | 1.64 | 1.58    | 1.63 | 1.47 | 1.65 | 1.53    | 1.60 | 1.42 |
|             | 100       | 1.78 | 1.67    | 1.75 | 1.51 | 1.79 | 1.61    | 1.71 | 1.46 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.15 | 0.16    | 0.10 | 0.14 | 0.14 | 0.13    | 0.15 | 0.17 |
|             | 25        | 0.20 | 0.20    | 0.12 | 0.17 | 0.18 | 0.17    | 0.21 | 0.33 |
|             | 50        | 0.24 | 0.22    | 0.13 | 0.18 | 0.21 | 0.19    | 0.25 | 0.47 |
|             | 100       | 0.29 | 0.24    | 0.15 | 0.20 | 0.24 | 0.21    | 0.29 | 0.61 |

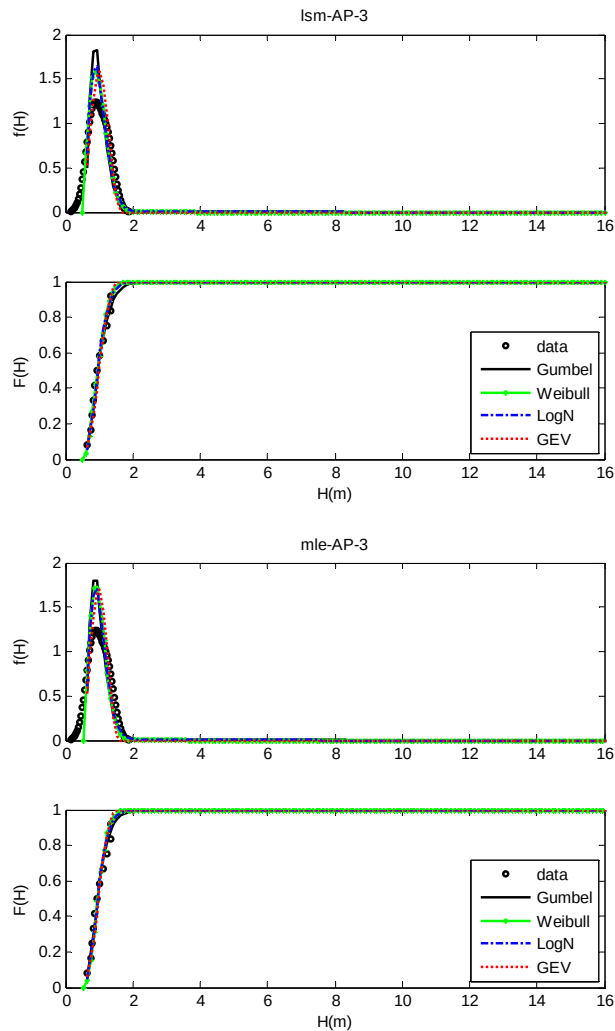


圖 3.20 推估安平港 3 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.24 推估安平港 4 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 1.78 | 1.58    | 1.61 | 0.48 | 1.78 | 1.58    | 1.63 | 0.48 |
| RMSE(m)     |           | 0.10 | 0.09    | 0.10 | 0.05 | 0.13 | 0.09    | 0.10 | 0.06 |
| $X_e(m)$    |           | 0.24 | 0.22    | 0.16 | 0.01 | 0.14 | 0.24    | 0.16 | 0.09 |
| $x_R(m)$    | 10        | 1.52 | 1.53    | 1.59 | 1.46 | 1.66 | 1.52    | 1.60 | 1.46 |
|             | 25        | 1.74 | 1.70    | 1.82 | 1.50 | 1.94 | 1.68    | 1.84 | 1.51 |
|             | 50        | 1.89 | 1.81    | 1.99 | 1.52 | 2.15 | 1.79    | 2.01 | 1.53 |
|             | 100       | 2.05 | 1.92    | 2.15 | 1.53 | 2.36 | 1.88    | 2.17 | 1.54 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.18 | 0.19    | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.00    | 0.19 | 0.07 |
|             | 25        | 0.24 | 0.23    | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.00    | 0.26 | 0.04 |
|             | 50        | 0.29 | 0.26    | 0.16 | 0.15 | 0.18 | 0.00    | 0.31 | 0.03 |
|             | 100       | 0.34 | 0.28    | 0.17 | 0.15 | 0.20 | 0.00    | 0.37 | 0.03 |

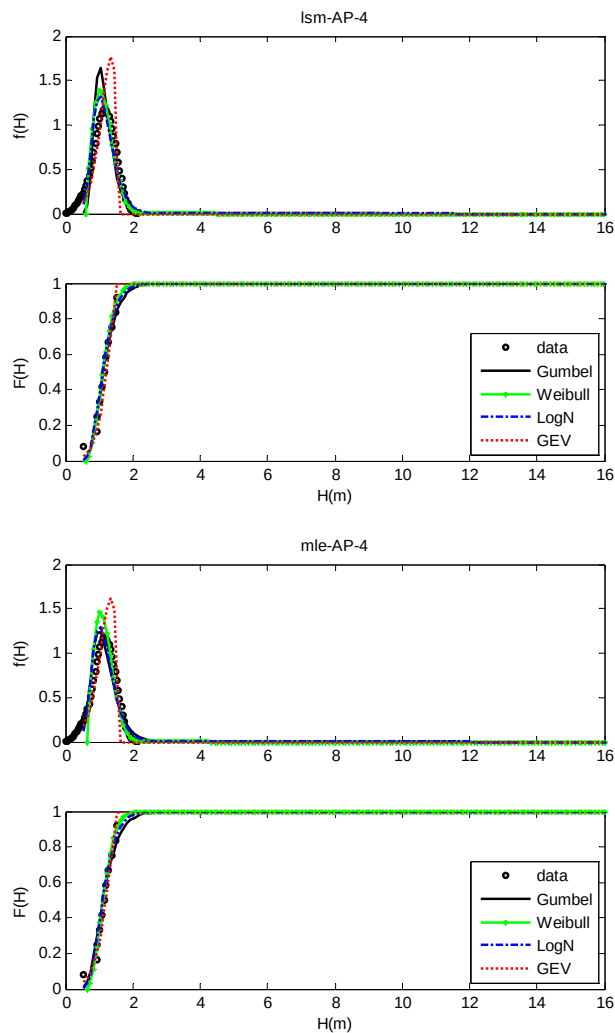


圖 3.21 推估安平港 4 月份波浪之機率密度函數圖



表 3.25 推估安平港 5 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 2.79 | 0.73    | 1.97 | 0.62 | 2.79 | 0.73    | 2.01 | 0.62 |
| RMSE(m)     |           | 0.60 | 0.35    | 0.57 | 0.30 | 0.73 | 0.40    | 0.59 | 0.37 |
| $X_e(m)$    |           | 0.49 | 0.14    | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 0.31    | 0.03 | 0.14 |
| $x_R(m)$    | 10        | 3.64 | 3.66    | 3.32 | 3.42 | 2.94 | 3.37    | 3.27 | 3.15 |
|             | 25        | 4.67 | 5.37    | 4.47 | 5.05 | 3.64 | 4.82    | 4.38 | 4.54 |
|             | 50        | 5.43 | 6.78    | 5.41 | 6.63 | 4.16 | 6.02    | 5.30 | 5.87 |
|             | 100       | 6.18 | 8.28    | 6.44 | 8.60 | 4.68 | 7.29    | 6.28 | 7.54 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.90 | 2.16    | 0.61 | 1.49 | 1.23 | 1.05    | 0.90 | 1.29 |
|             | 25        | 1.22 | 3.57    | 0.72 | 2.52 | 1.73 | 1.59    | 1.45 | 2.78 |
|             | 50        | 1.46 | 4.74    | 0.80 | 3.53 | 2.11 | 2.02    | 1.96 | 4.70 |
|             | 100       | 1.70 | 5.98    | 0.88 | 4.80 | 2.49 | 2.48    | 2.56 | 7.61 |

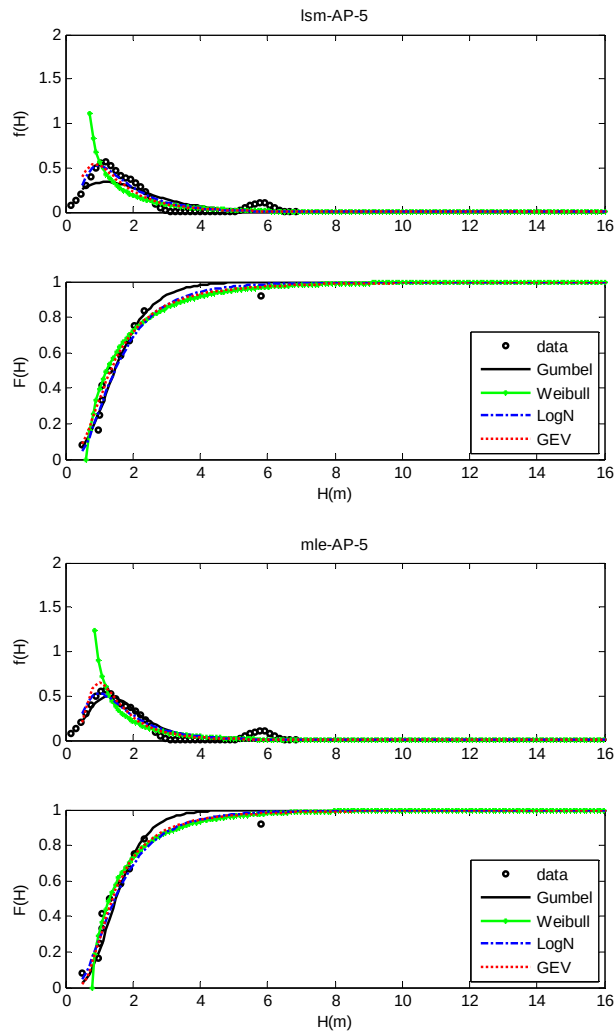


圖 3.22 推估安平港 5 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.26 推估安平港 6 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |       |      | MLE  |         |      |       |
|--------------|-----------|------|---------|-------|------|------|---------|------|-------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN  | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV   |
| MIR(m)       |           | 1.57 | 0.94    | 1.25  | 7.52 | 1.57 | 0.94    | 1.26 | 7.52  |
| RMSE(m)      |           | 0.68 | 0.55    | 0.64  | 1.46 | 0.83 | 0.59    | 0.66 | 18.71 |
| Xe (m)       |           | 0.94 | 0.24    | 0.31  | 1.29 | 0.46 | 0.04    | 0.29 | 0.09  |
| $x_R(m)$     | 10        | 5.98 | 6.06    | 5.73  | 2.95 | 5.14 | 5.74    | 5.66 | 6.96  |
|              | 25        | 7.59 | 8.14    | 7.69  | 3.57 | 6.37 | 7.61    | 7.56 | 15.25 |
|              | 50        | 8.78 | 9.71    | 9.30  | 4.53 | 7.29 | 9.03    | 9.12 | 28.21 |
|              | 100       | 9.96 | 11.28   | 11.03 | 6.35 | 8.20 | 10.44   | 10.8 | -     |
| $\sigma$ (m) | 10        | 1.35 | 2.35    | 0.90  | 5.04 | 1.57 | 1.30    | 1.53 | 0.14  |
|              | 25        | 1.82 | 3.41    | 1.07  | -    | 2.15 | 1.60    | 2.46 | 0.56  |
|              | 50        | 2.17 | 4.22    | 1.20  | -    | 2.59 | 1.79    | 3.32 | 1.32  |
|              | 100       | 2.53 | 5.04    | 1.31  | -    | 3.03 | 1.96    | 4.32 | 3.05  |

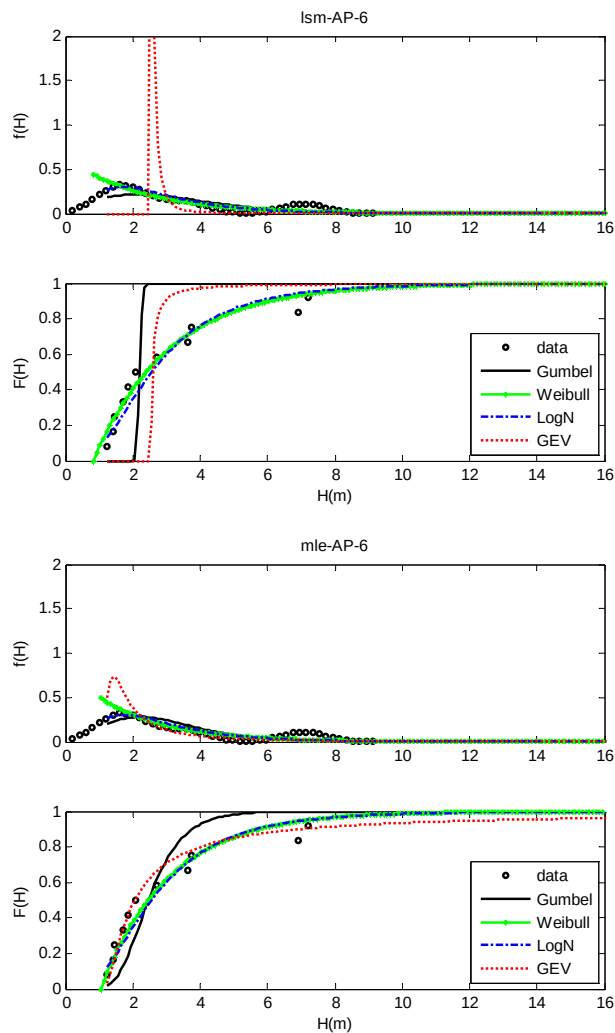


圖 3.23 推估安平港 6 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.27 推估安平港 7 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 1.75 | 1.37    | 2.10 | 4.71 | 1.75 | 1.37    | 2.08 | 4.71 |
| RMSE(m)      |           | 0.48 | 0.40    | 0.53 | 0.80 | 0.49 | 0.41    | 0.53 | 1.58 |
| Xe (m)       |           | 0.15 | 0.04    | 0.00 | 1.05 | 0.04 | 0.18    | 0.01 | 5.05 |
| $x_R(m)$     | 10        | 5.58 | 5.62    | 5.93 | 4.60 | 5.74 | 5.50    | 5.91 | 5.37 |
|              | 25        | 6.64 | 6.49    | 7.29 | 4.64 | 6.91 | 6.31    | 7.25 | 5.47 |
|              | 50        | 7.43 | 7.06    | 8.33 | 4.66 | 7.77 | 6.84    | 8.27 | 5.50 |
|              | 100       | 8.22 | 7.58    | 9.39 | 4.66 | 8.63 | 7.33    | 9.32 | 5.52 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.90 | 0.95    | 0.60 | 0.57 | 0.78 | 0.76    | 1.11 | 0.00 |
|              | 25        | 1.21 | 1.16    | 0.72 | 0.59 | 0.99 | 0.94    | 1.62 | 0.00 |
|              | 50        | 1.45 | 1.30    | 0.80 | 0.59 | 1.15 | 1.06    | 2.07 | 0.00 |
|              | 100       | 1.69 | 1.43    | 0.88 | 0.59 | 1.31 | 1.18    | 2.56 | 0.00 |

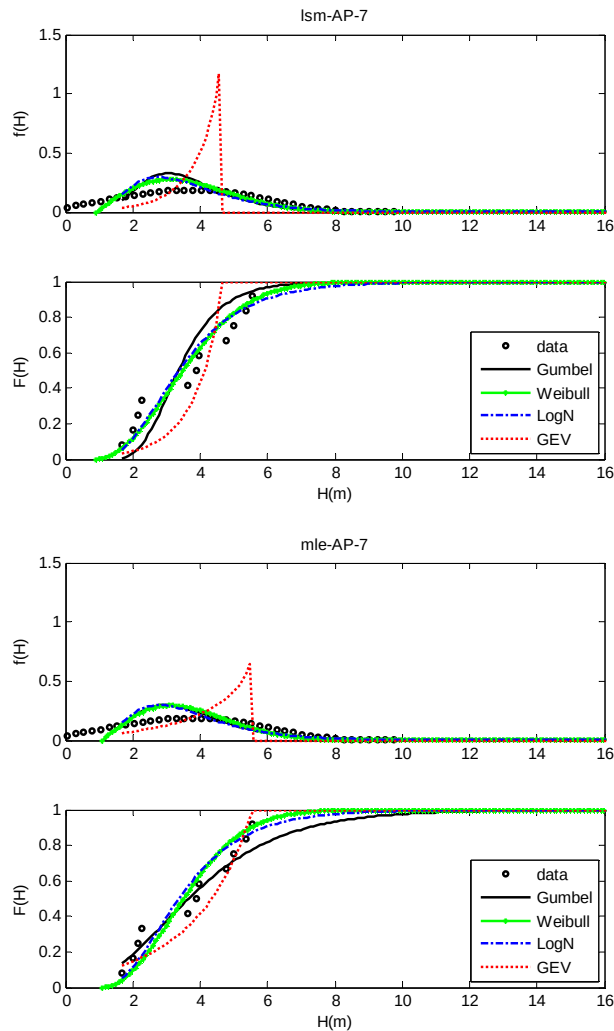


圖 3.24 推估安平港 7 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.28 推估安平港 8 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM   |         |       |       | MLE   |         |       |       |
|-------------|-----------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
|             |           | EV-I  | Weibull | LogN  | GEV   | EV-I  | Weibull | LogN  | GEV   |
| MIR(m)      |           | 0.84  | 0.72    | 0.88  | 4.06  | 0.84  | 0.72    | 0.87  | 4.06  |
| RMSE(m)     |           | 0.45  | 0.41    | 0.45  | 1.01  | 0.50  | 1.49    | 0.45  | 2.14  |
| $X_e(m)$    |           | 0.46  | 0.18    | 0.31  | 0.94  | 0.30  | 0.01    | 0.27  | 0.09  |
| $x_R(m)$    | 10        | 7.05  | 7.12    | 7.14  | 5.65  | 6.68  | 6.78    | 7.03  | 7.70  |
|             | 25        | 8.54  | 8.62    | 8.83  | 7.58  | 8.02  | 8.06    | 8.64  | 11.90 |
|             | 50        | 9.64  | 9.67    | 10.1  | 9.77  | 9.01  | 8.96    | 9.88  | 16.66 |
|             | 100       | 10.74 | 10.67   | 11.46 | 12.90 | 10.00 | 9.81    | 11.14 | 23.47 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 1.22  | 1.63    | 0.82  | 2.63  | 1.24  | 1.35    | 1.39  | 0.17  |
|             | 25        | 1.64  | 2.12    | 0.97  | 4.96  | 1.64  | 1.84    | 2.07  | 0.36  |
|             | 50        | 1.96  | 2.48    | 1.08  | 7.63  | 1.95  | 2.18    | 2.65  | 0.58  |
|             | 100       | 2.28  | 2.82    | 1.18  | -     | 2.25  | 2.52    | 3.29  | 0.92  |

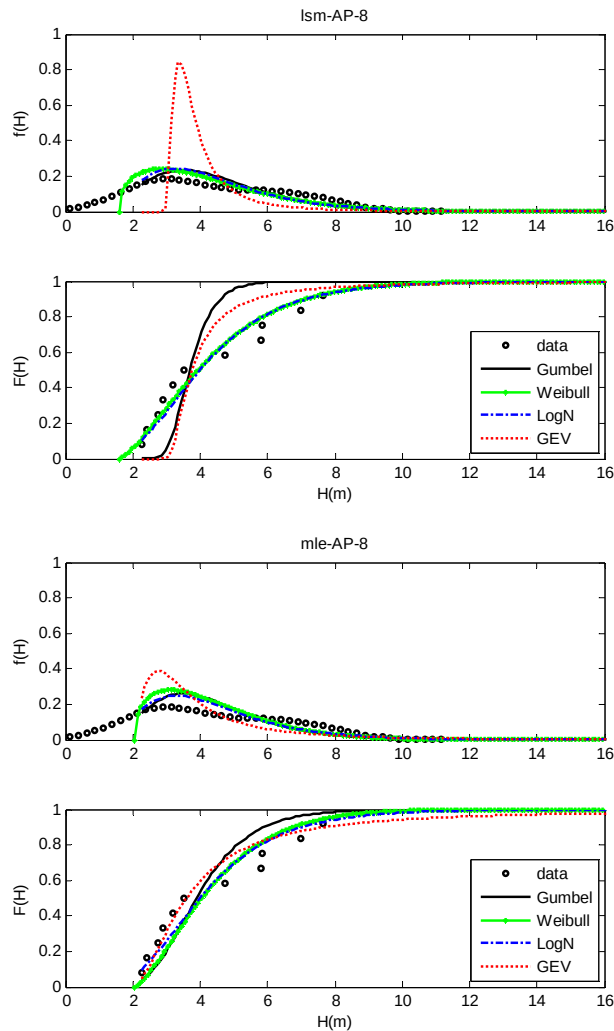


圖 3.25 推估安平港 8 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.29 推估安平港 9 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 1.61 | 1.38    | 1.67 | 0.46 | 1.61 | 1.38    | 1.68 | 0.46 |
| RMSE(m)      |           | 0.27 | 0.23    | 0.29 | 0.15 | 0.32 | 0.24    | 0.29 | 0.16 |
| Xe (m)       |           | 0.37 | 0.31    | 0.18 | 0.19 | 0.15 | 0.21    | 0.18 | 0.24 |
| $x_R(m)$     | 10        | 3.91 | 3.93    | 4.13 | 3.81 | 4.19 | 3.94    | 4.14 | 3.75 |
|              | 25        | 4.53 | 4.43    | 4.86 | 4.01 | 4.96 | 4.47    | 4.87 | 3.95 |
|              | 50        | 4.99 | 4.76    | 5.39 | 4.11 | 5.53 | 4.82    | 5.41 | 4.05 |
|              | 100       | 5.45 | 5.06    | 5.93 | 4.18 | 6.09 | 5.14    | 5.94 | 4.11 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.52 | 0.55    | 0.35 | 0.42 | 0.41 | 0.42    | 0.60 | 0.22 |
|              | 25        | 0.70 | 0.67    | 0.42 | 0.47 | 0.51 | 0.51    | 0.84 | 0.26 |
|              | 50        | 0.84 | 0.75    | 0.46 | 0.50 | 0.58 | 0.56    | 1.04 | 0.31 |
|              | 100       | 0.98 | 0.83    | 0.51 | 0.52 | 0.66 | 0.61    | 1.25 | 0.36 |

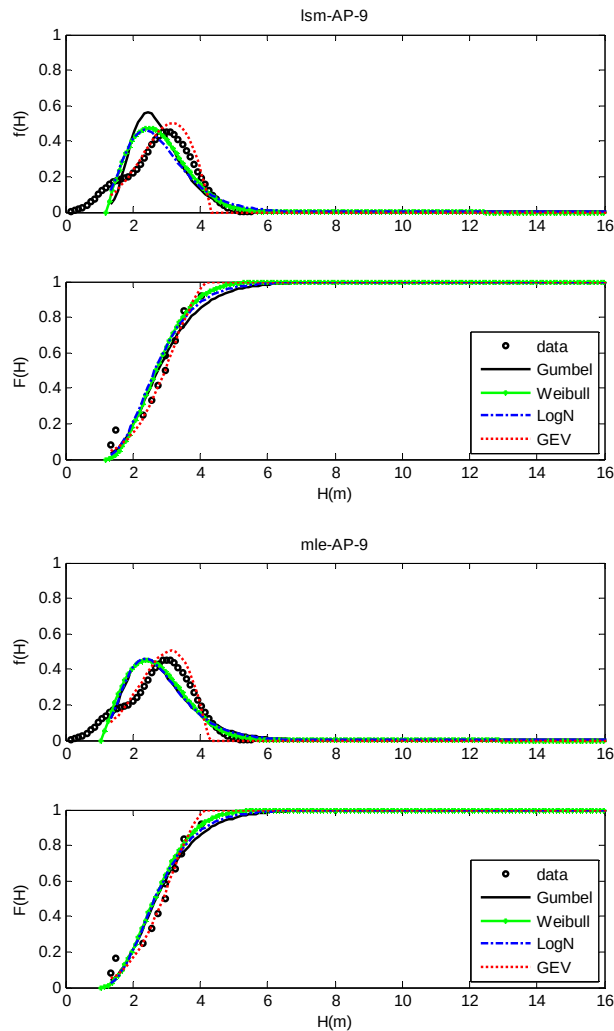


圖 3.26 推估安平港 9 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.30 推估安平港 10 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |       | MLE  |         |      |       |
|-------------|-----------|------|---------|------|-------|------|---------|------|-------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV   | EV-I | Weibull | LogN | GEV   |
| MIR(m)      |           | 1.62 | 0.22    | 0.97 | 1.27  | 1.62 | 0.22    | 0.98 | 1.27  |
| RMSE(m)     |           | 0.44 | 0.18    | 0.43 | 0.41  | 0.57 | 0.28    | 0.43 | 1.02  |
| $X_e(m)$    |           | 0.61 | 0.03    | 0.14 | 0.34  | 0.21 | 0.21    | 0.14 | 0.08  |
| $x_R(m)$    | 10        | 3.71 | 3.68    | 3.38 | 2.63  | 3.05 | 3.37    | 3.37 | 3.49  |
|             | 25        | 4.72 | 5.33    | 4.47 | 4.05  | 3.77 | 4.73    | 4.44 | 5.93  |
|             | 50        | 5.46 | 6.69    | 5.35 | 5.78  | 4.29 | 5.86    | 5.30 | 8.92  |
|             | 100       | 6.21 | 8.13    | 6.28 | 8.43  | 4.82 | 7.05    | 6.22 | 13.49 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.85 | 2.03    | 0.57 | 2.07  | 1.12 | 1.16    | 0.85 | 0.15  |
|             | 25        | 1.14 | 3.35    | 0.67 | 4.20  | 1.56 | 1.81    | 1.34 | 0.32  |
|             | 50        | 1.37 | 4.45    | 0.75 | 6.83  | 1.89 | 2.35    | 1.79 | 0.56  |
|             | 100       | 1.59 | 5.62    | 0.83 | 10.85 | 2.22 | 2.92    | 2.30 | 0.95  |

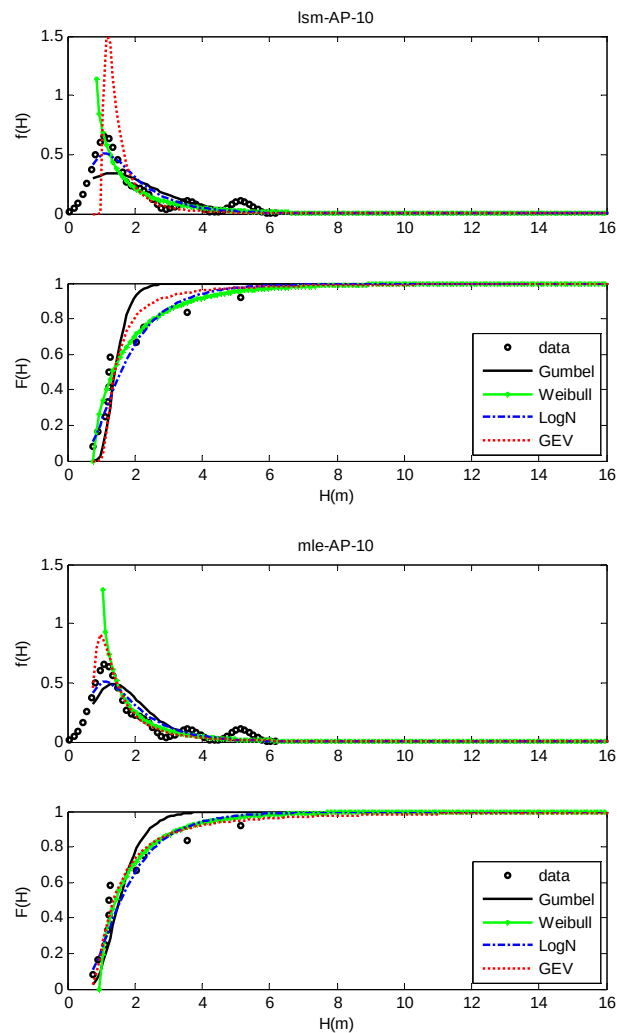


圖 3.27 推估安平港 10 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.31 推估安平港 11 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 0.84 | 0.25    | 1.24 | 5.54 | 0.84 | 0.25    | 1.23 | 5.54 |
| RMSE(m)      |           | 0.07 | 0.04    | 0.09 | 0.18 | 0.10 | 0.05    | 0.09 | 2.98 |
| Xe (m)       |           | 0.13 | 0.03    | 0.11 | 0.19 | 0.07 | 0.01    | 0.11 | 0.01 |
| $x_R(m)$     | 10        | 1.49 | 1.51    | 1.45 | 1.05 | 1.38 | 1.45    | 1.45 | 1.67 |
|              | 25        | 1.73 | 1.81    | 1.63 | 1.14 | 1.57 | 1.71    | 1.63 | 2.94 |
|              | 50        | 1.90 | 2.04    | 1.76 | 1.29 | 1.70 | 1.91    | 1.77 | 4.94 |
|              | 100       | 2.07 | 2.27    | 1.89 | 1.57 | 1.84 | 2.11    | 1.90 | 8.72 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.19 | 0.33    | 0.13 | 0.72 | 0.22 | 0.19    | 0.16 | 0.03 |
|              | 25        | 0.26 | 0.48    | 0.15 | 1.86 | 0.30 | 0.23    | 0.21 | 0.09 |
|              | 50        | 0.31 | 0.60    | 0.17 | 3.66 | 0.36 | 0.26    | 0.25 | 0.20 |
|              | 100       | 0.36 | 0.71    | 0.19 | 7.07 | 0.42 | 0.29    | 0.30 | 0.47 |

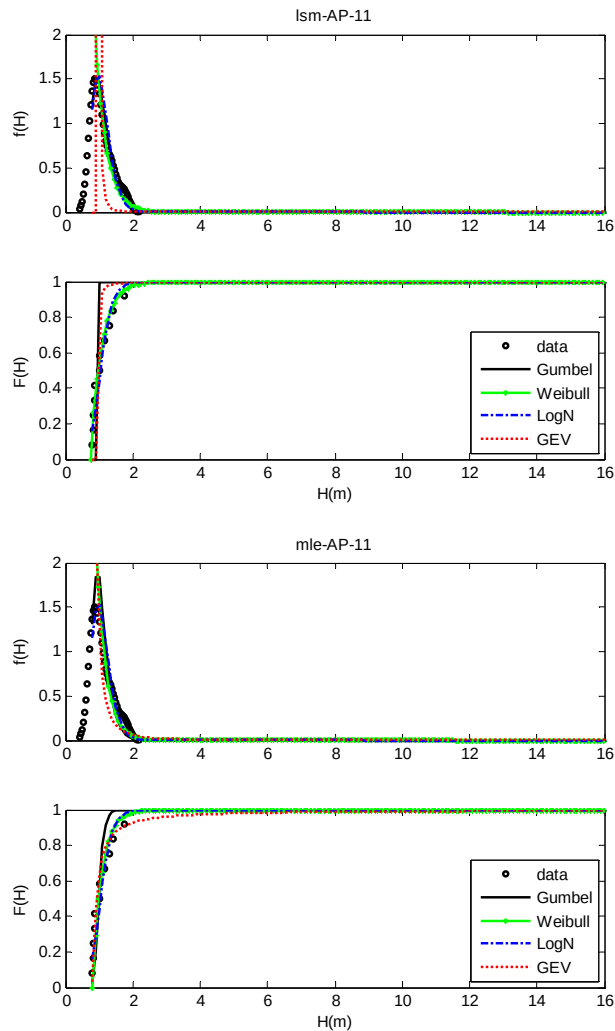


圖 3.28 推估安平港 11 月份波浪之機率密度函數圖

表 3.32 推估安平港 12 月份波浪之各重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|              |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)       |           | 3.16 | 1.09    | 3.25 | 1.55 | 3.16 | 1.09    | 3.19 | 1.55 |
| RMSE(m)      |           | 0.29 | 0.19    | 0.31 | 0.22 | 0.34 | 0.21    | 0.31 | 0.25 |
| $X_e$ (m)    |           | 0.13 | 0.13    | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.20    | 0.02 | 0.09 |
| $x_R$ (m)    | 10        | 1.99 | 2.00    | 1.81 | 1.96 | 1.71 | 1.87    | 1.84 | 1.79 |
|              | 25        | 2.45 | 2.77    | 2.21 | 2.62 | 2.03 | 2.53    | 2.26 | 2.31 |
|              | 50        | 2.79 | 3.41    | 2.51 | 3.19 | 2.27 | 3.07    | 2.58 | 2.76 |
|              | 100       | 3.12 | 4.08    | 2.82 | 3.85 | 2.51 | 3.64    | 2.91 | 3.29 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.43 | 1.06    | 0.29 | 0.63 | 0.53 | 0.49    | 0.33 | 0.59 |
|              | 25        | 0.58 | 1.75    | 0.34 | 0.97 | 0.74 | 0.73    | 0.48 | 1.11 |
|              | 50        | 0.69 | 2.33    | 0.38 | 1.28 | 0.90 | 0.92    | 0.60 | 1.71 |
|              | 100       | 0.81 | 2.94    | 0.42 | 1.64 | 1.06 | 1.12    | 0.74 | 2.54 |

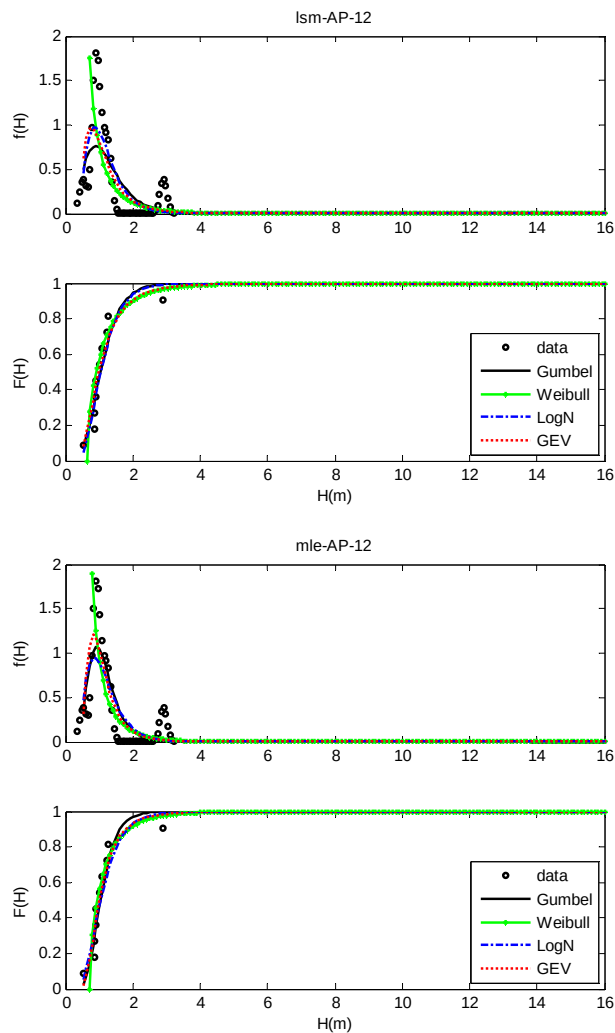


圖 3.29 推估安平港 12 月份波浪之機率密度函數圖



本研究將各月份最示極值函數與參數推定法以及對應的推估 50 年重現期高波列如表 3.33 與表 3.34 所示，由表中可發現，臺北港各月份最適極值函數以 GEV 分布為主，其餘為 Weibull 分布，但並無明顯季節性分布。安平港則相反，最適極值函數以 Weibull 為主，少數為 GEV，而春季的 3~5 月即是以 GEV 為最佳極值函數。

**表 3.33 臺北港各月份最適極值函數與 50 年重現期波高**

| 月份   | 最適極值<br>函數 | 重現期 50 年<br>波高(m) |
|------|------------|-------------------|
| 1 月  | GEV        | 5.29              |
| 2 月  | GEV        | 4.45              |
| 3 月  | GEV        | 4.53              |
| 4 月  | Weibull    | 4.38              |
| 5 月  | GEV        | 2.66              |
| 6 月  | GEV        | 2.65              |
| 7 月  | GEV        | 4.36              |
| 8 月  | Weibull    | 7.80              |
| 9 月  | GEV        | 5.58              |
| 10 月 | Weibull    | 7.80              |
| 11 月 | GEV        | 5.31              |
| 12 月 | GEV        | 5.55              |

**表 3.34 安平港各月份最適極值函數與 50 年重現期波高**

| 月份   | 最適極值<br>函數 | 重現期 50 年<br>波高(m) |
|------|------------|-------------------|
| 1 月  | Weibull    | 2.38              |
| 2 月  | Weibull    | 2.42              |
| 3 月  | GEV        | 1.47              |
| 4 月  | GEV        | 1.52              |
| 5 月  | GEV        | 6.53              |
| 6 月  | Weibull    | 9.71              |
| 7 月  | Weibull    | 7.06              |
| 8 月  | Weibull    | 9.67              |
| 9 月  | Weibull    | 4.76              |
| 10 月 | Weibull    | 6.69              |
| 11 月 | Weibull    | 2.04              |
| 12 月 | Weibull    | 3.41              |

### 3.4 年極值統計分析

#### 3.4.1 資料分析方式

一般波浪資料的來源有兩種，包括現場的量測數據或波浪推算結果。極值統計所採用的資料，基本上須滿足獨立性、等質性及分布性等三項要求。所謂獨立性係指兩個事件的發生是不相關的。等質性為事件出現在空間或者時間上的統計特性是相當的。分布性是說資料數據大小滿足某種分布型態。極值分布之推定，首先必須將每年各場颱風最大值波高取出後，再將其排序，取出每年最大波高值來作為極值分析之樣本。本節中應用前節所述之極值函數與參數推定方法及各種檢定值來測試最適函數與參數推定法，以推估臺北港與安平港各重現期的年極值統計結果。

#### 3.4.2 推算結果

年極值統計部分，除了臺北港 12 年及安平港 11 年波高實測資料作為分析外，並與 1940 至 2010 共 71 年使用井島武士模式所推算之臺北港及安平港每年最大波高作為年極值統計分析比較，從表 3.35 至

表 3.38 及圖 3.30 至圖 3.33 顯示，與月極值統計相同，四種極值分布函數利用 LSM 法推估出來的樣本數值，其 RMSE 皆低於 MLE 法所推估出來的數值，代表極值推估法的選用跟月極值統計相同，仍以 LSM 法來推估會擁有較佳的相關性，推估出來的數值樣本較適合各極值。

以各檢定指標來評估機率分布函數的適用性，臺北港採用 12 年的實測波高以 GEV 分布所推估之 MIR 為 0.3m 及 RMSE 值為 0.15m，安平港採用 11 年的實測波高以 GEV 分布來推估之 MIR 為 0.28m 及 RMSE 值為 0.22m，皆以 GEV 較為適用。以半經驗波浪推算模式推算臺北港與安平港 71 年的最大波高樣本值，再以 GEV 分布來推估臺北港之 MIR 為 0.36m 及 RMSE 值為 0.23m，推估安平港 71 年之 MIR 為 0.63m 及 RMSE 值為 0.29m，配合 LSM 推估法所推估的數值誤差明顯較 EV-I、Weibull 及 Lognormal 三種極值函數低，代表在推估年極值波高統計以 GEV 分布較適合。

在安平港以實測資料及半經驗模式推算各重現期波高分析中，極值函數使用 GEV 分布推估的數值皆擁有較低之 MIR 及 RMSE 值，因此推估之標準偏差最適當，安平港實測波高其  $\sigma$  值為 0.72m 至 0.96m，半經驗波浪推算模式為 0.55m 至 1m 之間，因此推算 50 年重現期波高之極值函數與月極值相同，也使用 GEV 分布，利用實測值推算各波高值為 5.48m 至 8.02m，利用半經驗波浪模式推算各波高值為 8.18m 至 11.6m。臺北港以實測資料及半經驗推算各重現期波高之分析中，極值函數使用 GEV 分布推估的數值皆擁有較低之 MIR 及 RMSE 值，因此推估之標準偏差最適當，臺北港實測波高其  $\sigma$  值為 0.5m 至 0.7m，半經驗波浪推算模式為 0.43 至 0.64 之間，因此推算 50 年重現期波高之極值函數與月極值相同，也使用 GEV 分布，利用實測值推算各波高值為 6.21m 至 9.77m，利用半經驗波浪模式推算各波高值為 6.77 m 至 9.05m。

表 3.35 推估臺北港各重現期波高及標準偏差

| Index  | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE  |         |      |      |
|--------|-----------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
|        |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m) |           | 0.78 | 0.68    | 0.53 | 0.30 | 0.78 | 0.68    | 0.53 | 0.30 |

|             |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RMSE(m)     |     | 0.20 | 0.18 | 0.16 | 0.15 | 0.22 | 0.18 | 0.16 | 0.16 |
| $X_e(m)$    |     | 0.27 | 0.22 | 0.09 | 0.11 | 0.15 | 0.22 | 0.13 | 0.06 |
| $x_R(m)$    | 10  | 6.19 | 6.21 | 6.24 | 6.16 | 6.34 | 6.16 | 6.19 | 6.05 |
|             | 25  | 6.89 | 6.76 | 6.84 | 6.53 | 7.11 | 6.70 | 6.76 | 6.40 |
|             | 50  | 7.40 | 7.13 | 7.25 | 6.75 | 7.68 | 7.07 | 7.15 | 6.60 |
|             | 100 | 7.91 | 7.47 | 7.65 | 6.92 | 8.24 | 7.40 | 7.53 | 6.76 |
| $\sigma(m)$ | 10  | 0.54 | 0.56 | 0.36 | 0.50 | 0.46 | 0.46 | 0.50 | 0.38 |
|             | 25  | 0.73 | 0.68 | 0.43 | 0.60 | 0.58 | 0.56 | 0.66 | 0.54 |
|             | 50  | 0.88 | 0.77 | 0.48 | 0.65 | 0.67 | 0.62 | 0.78 | 0.70 |
|             | 100 | 1.02 | 0.84 | 0.53 | 0.70 | 0.77 | 0.68 | 0.91 | 0.85 |

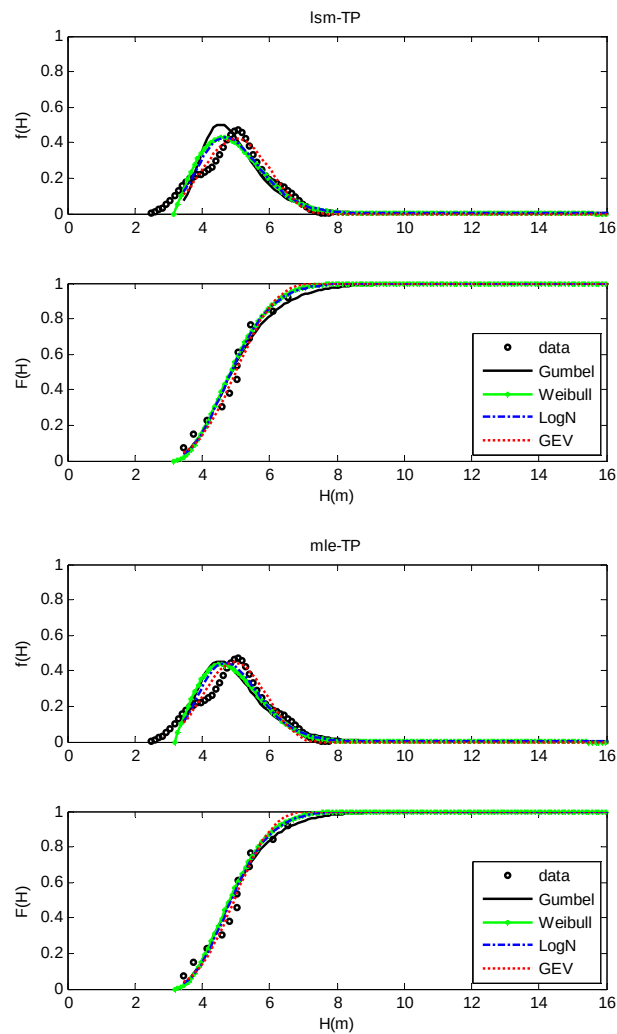


圖 3.30 推估臺北港波浪之機率密度函數圖

表 3.36 推估安平港各重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |      |      | MLE   |         |      |      |
|-------------|-----------|------|---------|------|------|-------|---------|------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN | GEV  | EV-I  | Weibull | LogN | GEV  |
| MIR(m)      |           | 0.84 | 0.65    | 0.64 | 0.28 | 0.84  | 0.65    | 0.62 | 0.28 |
| RMSE(m)     |           | 0.30 | 0.25    | 0.26 | 0.22 | 0.32  | 0.26    | 0.25 | 0.24 |
| $X_e(m)$    |           | 0.34 | 0.26    | 0.13 | 0.26 | 0.20  | 0.31    | 0.19 | 0.21 |
| $x_R(m)$    | 10        | 7.36 | 7.39    | 7.49 | 7.28 | 7.52  | 7.29    | 7.40 | 7.11 |
|             | 25        | 8.36 | 8.18    | 8.42 | 7.74 | 8.60  | 8.05    | 8.29 | 7.55 |
|             | 50        | 9.09 | 8.71    | 9.08 | 7.99 | 9.40  | 8.56    | 8.91 | 7.79 |
|             | 100       | 9.82 | 9.19    | 9.72 | 8.19 | 10.20 | 9.03    | 9.52 | 7.97 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.81 | 0.85    | 0.54 | 0.72 | 0.70  | 0.70    | 0.81 | 0.55 |
|             | 25        | 1.09 | 1.04    | 0.64 | 0.84 | 0.88  | 0.85    | 1.10 | 0.84 |
|             | 50        | 1.31 | 1.17    | 0.72 | 0.91 | 1.03  | 0.95    | 1.33 | 1.10 |
|             | 100       | 1.52 | 1.29    | 0.79 | 0.96 | 1.17  | 1.05    | 1.56 | 1.35 |

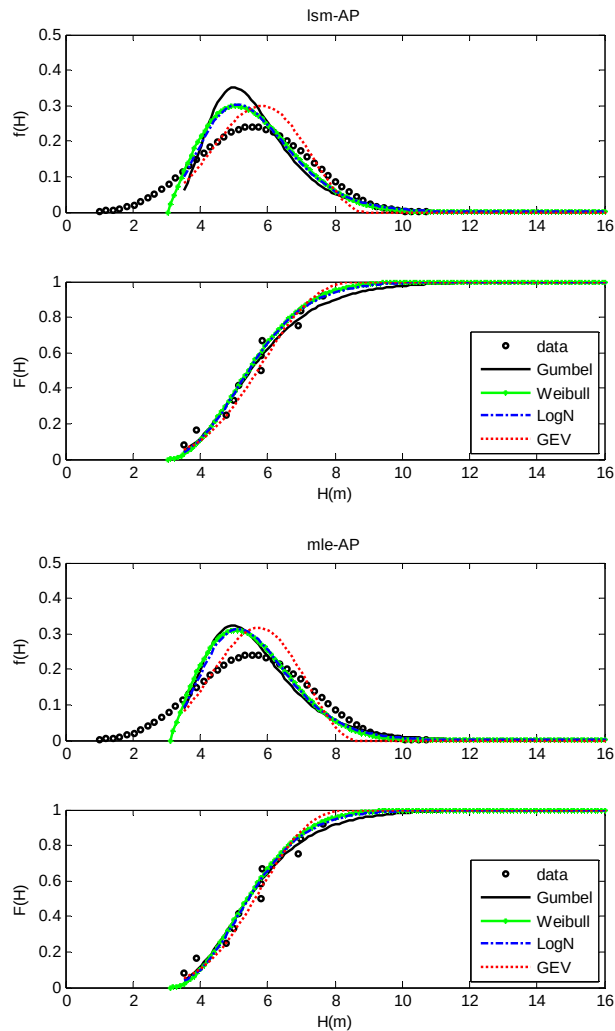


圖 3.31 推估安平港波浪之機率密度函數圖

表 3.37 臺北港井島模式最大波浪之重現期波高及標準偏差

| Index       | T<br>(yr) | LSM  |         |       |      | MLE   |         |       |      |
|-------------|-----------|------|---------|-------|------|-------|---------|-------|------|
|             |           | EV-I | Weibull | LogN  | GEV  | EV-I  | Weibull | LogN  | GEV  |
| MIR(m)      |           | 1.89 | 1.41    | 5.97  | 0.36 | 1.89  | 1.41    | 6.51  | 0.36 |
| RMSE(m)     |           | 0.38 | 0.27    | 0.86  | 0.23 | 0.48  | 0.28    | 1.00  | 0.24 |
| $X_e(m)$    |           | 0.41 | 0.37    | 0.38  | 0.59 | 0.02  | 0.47    | 0.33  | 0.54 |
| $x_R(m)$    | 10        | 6.35 | 6.45    | 7.15  | 6.40 | 6.78  | 6.40    | 7.39  | 6.34 |
|             | 25        | 7.69 | 7.54    | 9.34  | 7.33 | 8.34  | 7.46    | 9.77  | 7.25 |
|             | 50        | 8.69 | 8.27    | 11.10 | 7.91 | 9.50  | 8.16    | 11.70 | 7.82 |
|             | 100       | 9.68 | 8.93    | 12.9  | 8.40 | 10.65 | 8.81    | 13.8  | 8.30 |
| $\sigma(m)$ | 10        | 0.45 | 0.40    | 0.30  | 0.43 | 0.36  | 0.36    | 0.64  | 0.33 |
|             | 25        | 0.61 | 0.48    | 0.36  | 0.52 | 0.45  | 0.42    | 0.97  | 0.45 |
|             | 50        | 0.73 | 0.54    | 0.40  | 0.58 | 0.51  | 0.47    | 1.27  | 0.59 |
|             | 100       | 0.85 | 0.59    | 0.44  | 0.64 | 0.58  | 0.51    | 1.62  | 0.74 |

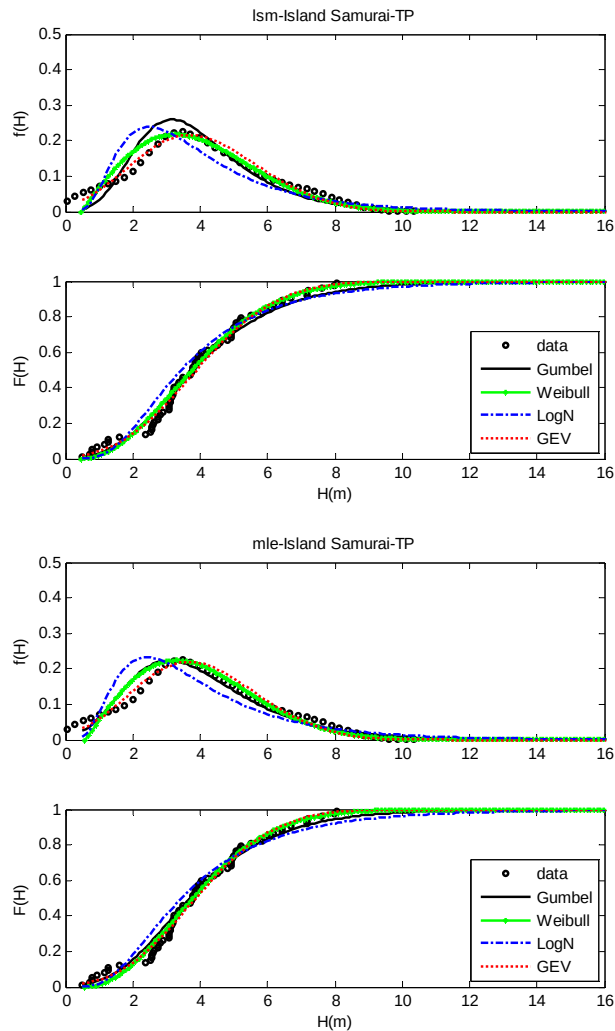


圖 3.32 臺北港井島模式最大波浪波高之機率密度函數圖

表 3.38 安平港井島模式最大波浪之重現期波高及標準偏差

| Index        | T<br>(yr) | LSM   |         |      |      | MLE   |         |       |       |
|--------------|-----------|-------|---------|------|------|-------|---------|-------|-------|
|              |           | EV-I  | Weibull | LogN | GEV  | EV-I  | Weibull | LogN  | GEV   |
| MIR(m)       |           | 0.88  | 1.16    | 1.42 | 0.63 | 0.88  | 1.16    | 1.48  | 0.63  |
| RMSE(m)      |           | 0.29  | 0.31    | 0.36 | 0.29 | 0.29  | 1.73    | 0.40  | 0.29  |
| Xe (m)       |           | 0.71  | 1.46    | 0.90 | 0.55 | 0.69  | 1.63    | 0.86  | 0.62  |
| $x_R(m)$     | 10        | 7.38  | 7.49    | 7.63 | 7.40 | 7.40  | 7.34    | 7.75  | 7.32  |
|              | 25        | 8.90  | 9.01    | 9.45 | 8.84 | 8.93  | 8.75    | 9.65  | 8.73  |
|              | 50        | 10.02 | 10.07   | 10.9 | 9.89 | 10.06 | 9.74    | 11.12 | 9.75  |
|              | 100       | 11.14 | 11.09   | 12.3 | 10.9 | 11.19 | 10.68   | 12.6  | 10.74 |
| $\sigma$ (m) | 10        | 0.50  | 0.55    | 0.34 | 0.55 | 0.43  | 0.50    | 0.55  | 0.47  |
|              | 25        | 0.68  | 0.71    | 0.40 | 0.73 | 0.56  | 0.66    | 0.80  | 0.72  |
|              | 50        | 0.81  | 0.83    | 0.45 | 0.87 | 0.65  | 0.78    | 1.01  | 0.97  |
|              | 100       | 0.95  | 0.94    | 0.49 | 1.00 | 0.75  | 0.89    | 1.25  | 1.28  |

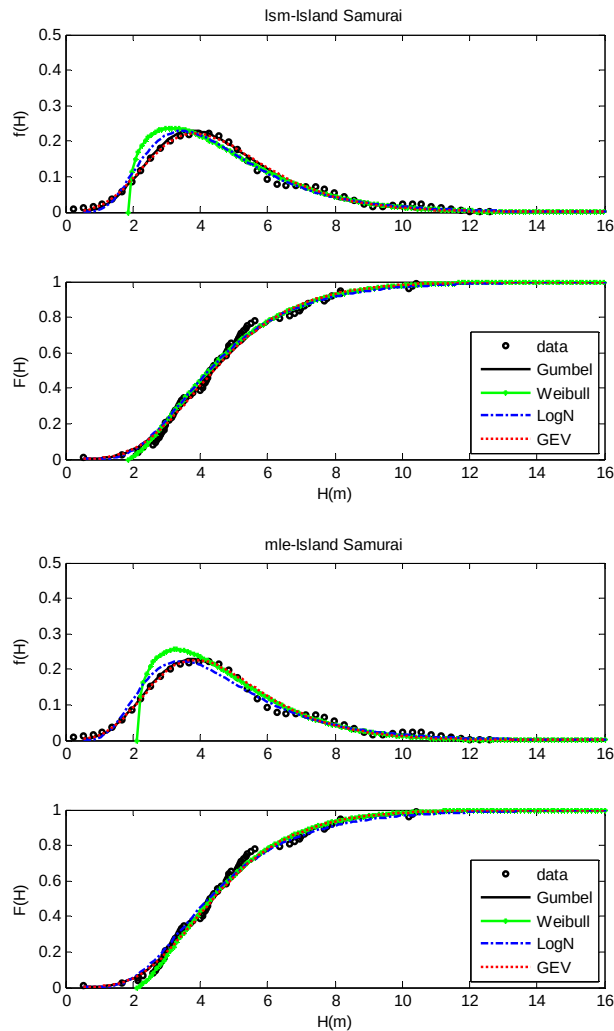


圖 3.33 安平港井島模式最大波浪波高之機率密度函數圖

## 第四章 港灣構造物維護管理系統建立

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。

本計畫應用於花蓮港建置外廓防波堤構造物維護管理資訊系統之經驗，針對高雄港第二港口防波堤辦理相關系統建置，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，最後提供一套包含檢測評估表單與維護工法的防波堤構造物維護管理資訊系統。期望未來能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。

### 4.1 防波堤圖像資料調查

#### 4.1.1 調查內容

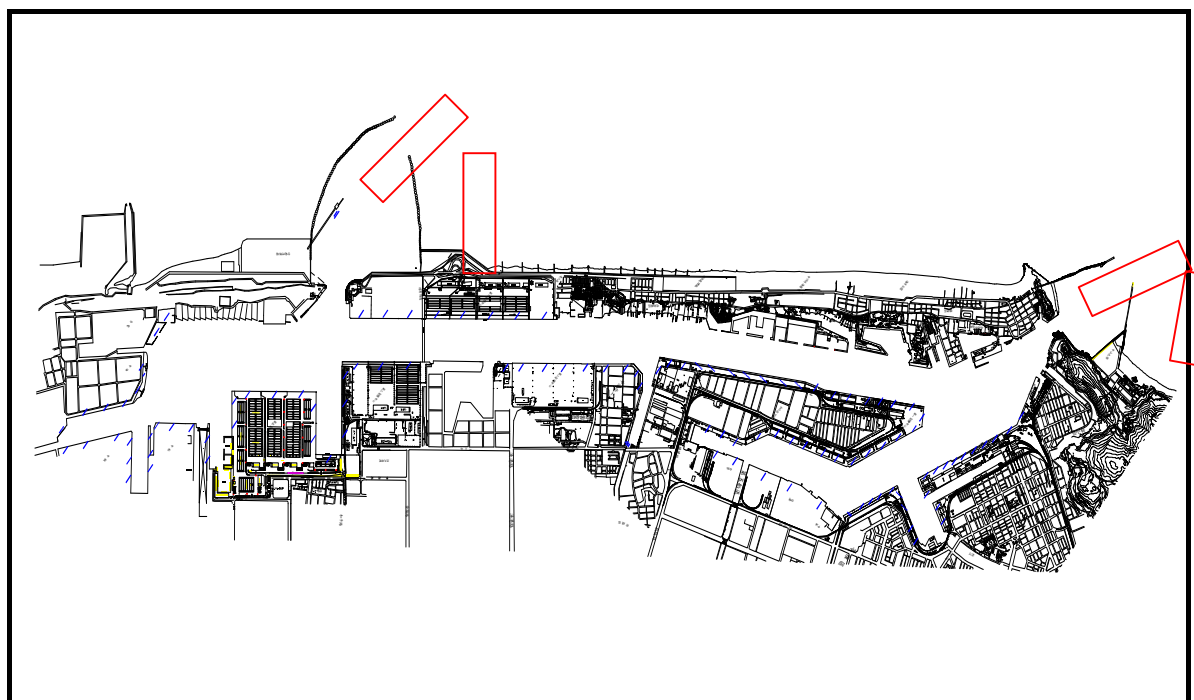
依循辦理花蓮港防波堤維護管理資訊系統之過程與經驗，本計畫本年度辦理高雄港第一、二港口防波堤現況圖像資料調查，以作為後續防波堤安全性評估及損壞維護方案研擬之依據。本工作項目與時程如表 4.1，調查範圍如圖 4.1。依據圖表所示，圖像資料調查主要為高雄港第二港口北防波堤沉箱 51 座、南防波堤 85 座；以及第一港口北防波堤自西子灣海堤鐵門起算至堤頭綠燈塔長約 485m，而南防波堤則



自旗后燈塔下方堤防鐵門起算至紅燈塔，長約 726m，相關多因束監測、水下攝影與結構物檢視成果如下所述。

**表 4.1 高雄港防波堤圖像調查項目與時程**

| 時間        | 地點              | 工作項目                       |
|-----------|-----------------|----------------------------|
| 100.09.上旬 | 第一、二港口<br>南北防波堤 | 多音束監測作業                    |
| 100.10.下旬 | 第一、二港口<br>南北防波堤 | 多音束監測作業<br>水下攝影<br>水上結構物檢視 |



**圖 4.1 高雄港第一、二港口防波堤圖像調查範圍示意圖**

#### 4.1.2 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、自動潮位儀、多音束測深儀、表面聲速儀、鹽溫深儀及動態運動姿態感測儀等，其

中，所採用多音束測深系統(Reson seabat 8125)，其解析度為 0.5 度，測帶角度 120 度，聲納一次拍發可得到 240 筆水深資料，測帶寬度約 3.5 倍水深；資料處理與計算軟體分別為 Reson 公司之海測軟體 PDS2000，及 CARIS 公司的 CARIS HIPS 模組。測量範圍包括高雄港第二港口南堤內外側 50m 帶寬、全長共約 2km，及北堤內外側 50m 帶寬、全長共約 1km；以及一港口北堤長度 0k+485 公尺，南堤長度 0k+726 公尺，水深至 3m 左右，相關實測航跡如圖 4.2。

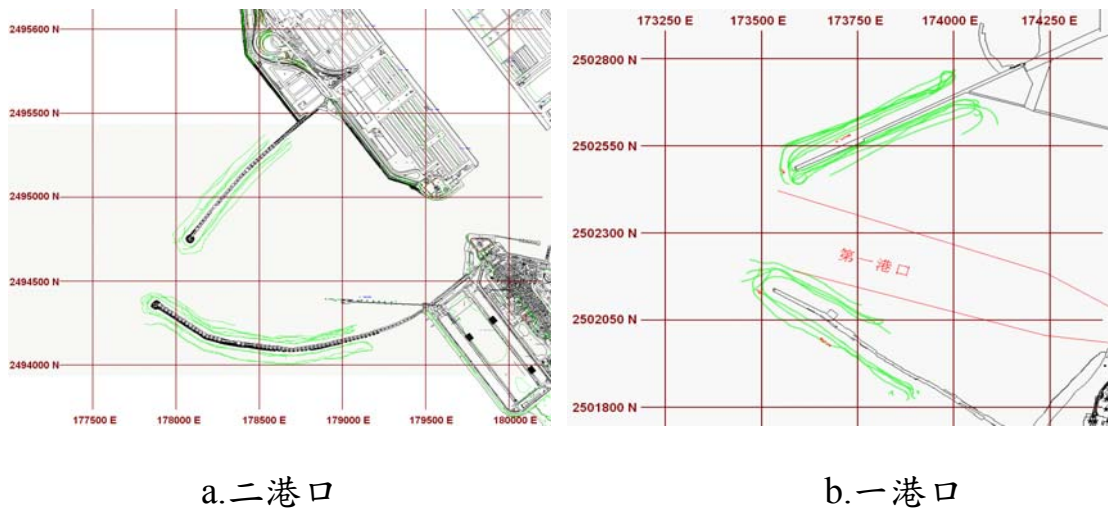


圖 4.2 多音束監測作業範圍與船跡圖

因篇幅關係，本項工作擷錄部份成果如圖 4.3 所示，其他工作成果可參考本所 100 年高雄港防波堤圖像資料調查成果報告書。由圖中之三維點雲可以看出，第一港口南防波堤外堤堤頭附近有小特徵物的散落如圖 4.3a 所示；北堤堤頭部分也有少許消波塊散落在海床上如圖 4.3b。在第二港口北防波堤堤頭附近之沈箱編號#51、#50 離堤腳約 5m 處有隆起之地形，如圖 4.3c 所示；南防波堤部份，#60~#65 沈箱、#44~#49 沈箱與#34~#29 沈箱外海地方有較多散落物在堤腳之外，如圖 4.3d 至圖 4.3f 所示。

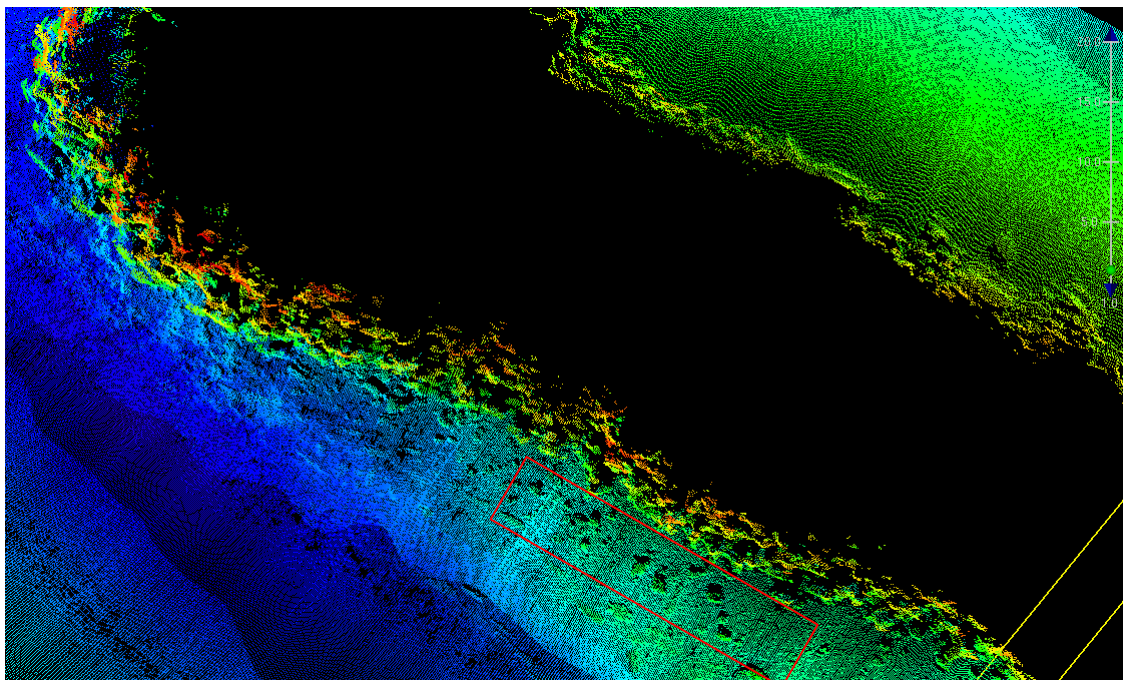


圖 4.3a 高雄港第一港口南防波堤堤頭多音束監測成果

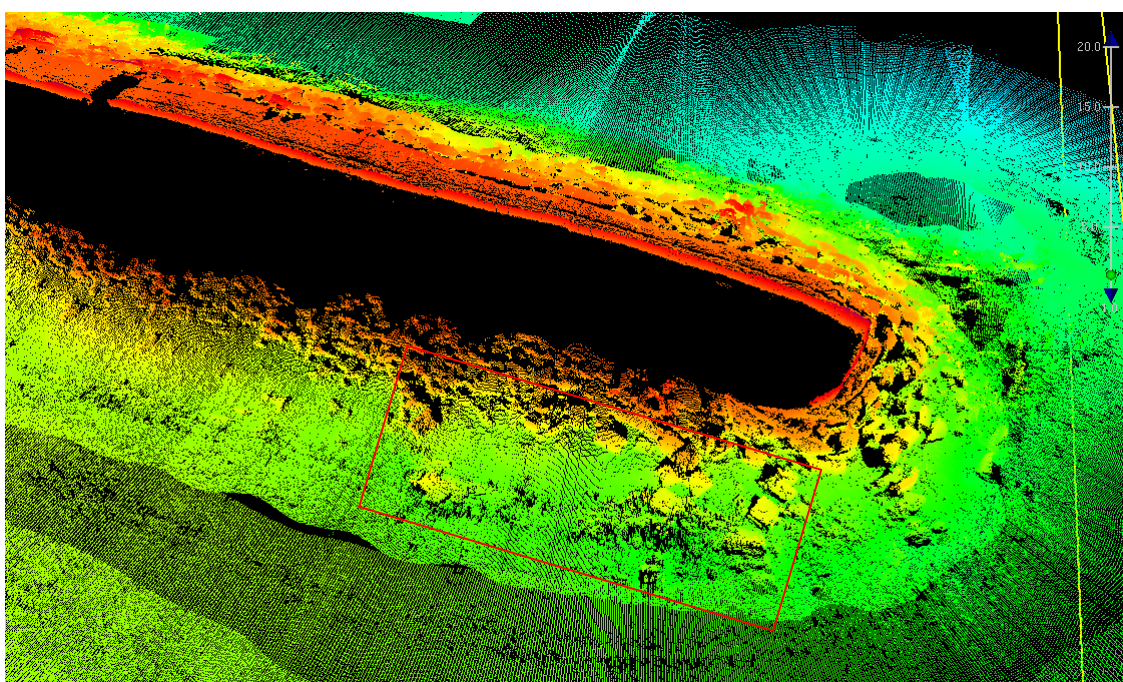


圖 4.3b 高雄港第一港口北防波堤堤頭多音束監測成果



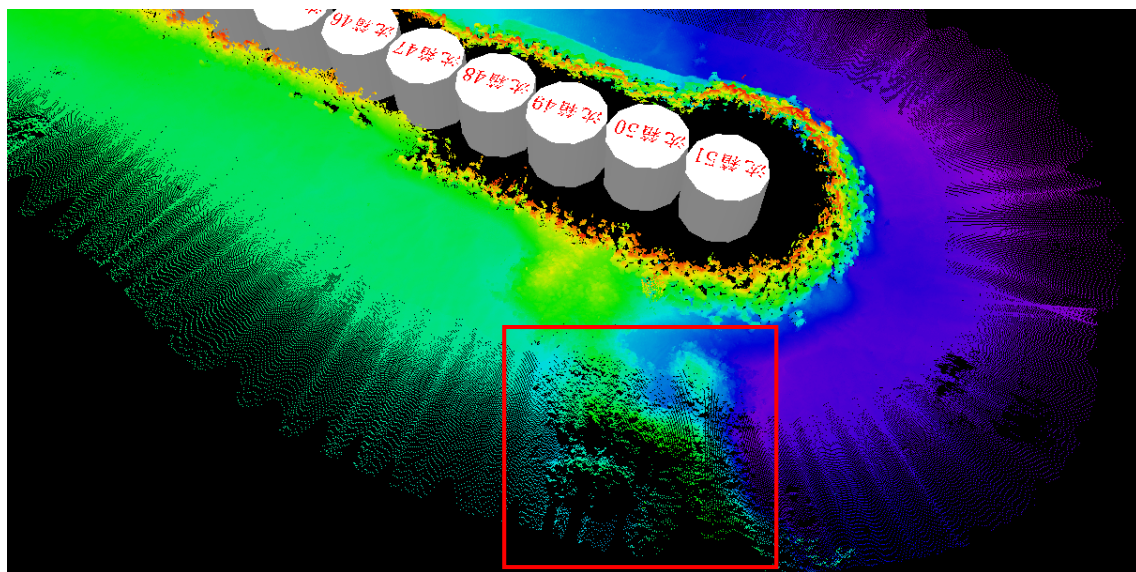


圖 4.3c 高雄港第二港口北防波堤堤頭附近多音束監測成果

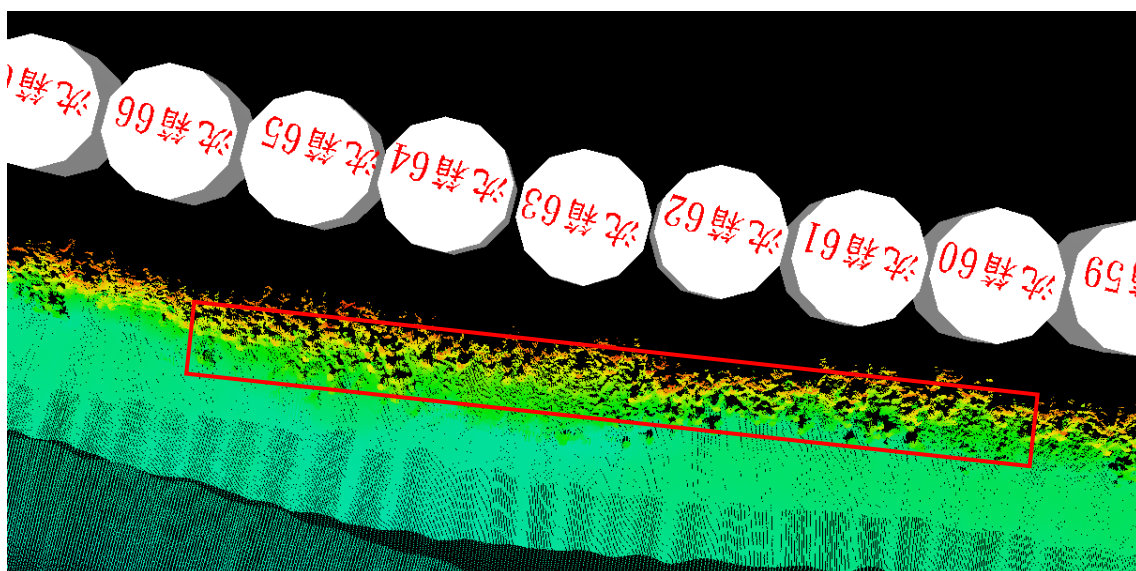


圖 4.3d 高雄港第二港口南防波堤#60~#65 沈箱外側多音束監測成果

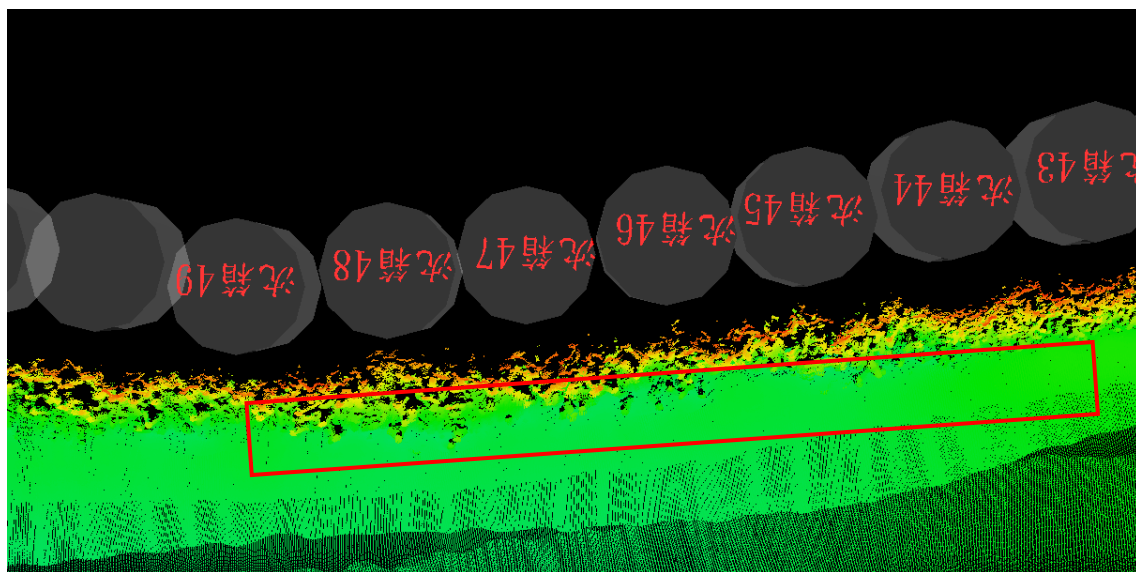


圖 4.3e 高雄港第二港口南防波堤#44~#49 沈箱外側多音束監測成果

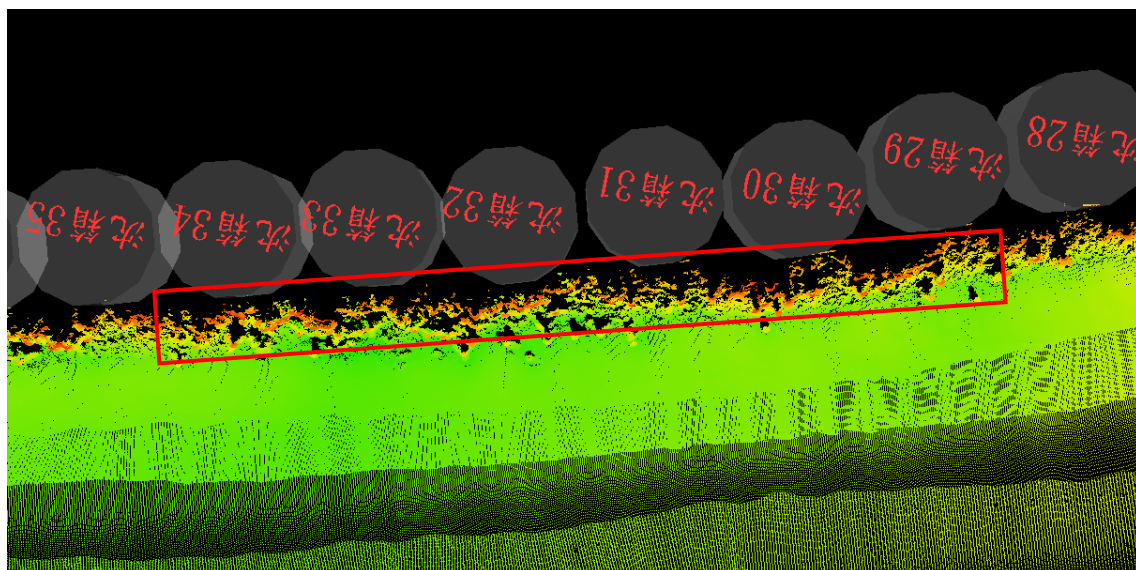


圖 4.3f 高雄港第二港口南防波堤#29~#34 沈箱外側多音束監測成果

#### 4.1.3 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，相關作業情形如表 4.2 與表 4.3 所示。由水下調查作業得知，本年度並未明顯發現高雄港第一、二港口

南北防波堤沉箱之基礎掏空、流失或海床地形明顯落差變化等異狀。

**表 4.2 高雄港第一港口南北防波堤水下調查彙整表**

| 北堤編號 | 結構物現況及異常說明 |
|------|------------|
| 485M | 護基方塊及塊石    |
| 400M | 消波塊及塊石     |
| 300M | 大型塊石、廢棄漁網  |
| 200M | 消波塊及塊石     |
| 100M | 消波塊、海床沙地   |
| 0M   | 消波塊、海床沙地   |
| 南堤編號 | 結構物現況及異常說明 |
| 726M | 消波塊、海床沙地   |
| 700M | 塊石堆        |
| 600M | 消波塊、海床沙地   |
| 500M | 消波塊、海床沙地   |
| 400M | 消波塊、海床沙地   |
| 300M | 消波塊、海床沙地   |
| 200M | 消波塊、海床沙地   |
| 100M | 消波塊、海床沙地   |
| 0M   | 消波塊、海床沙地   |

**表 4.3 高雄港第二港口南北防波堤沉箱水下調查彙整表**

| 北堤編號  | 結構物現況及異常說明    |
|-------|---------------|
| N50 內 | 消波塊及塊石        |
| N50   | 消波塊及塊石        |
| N45   | 消波塊及大型塊石      |
| N40   | 消波塊及塊石        |
| N35   | 消波塊及大型塊石、海床沙地 |
| N30   | 消波塊及塊石、海床沙地   |

|             |                       |
|-------------|-----------------------|
| N25         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| N20         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| N15         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| N10         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
|             | N09-N01 位於岸堤內         |
| <b>南堤編號</b> | <b>結構物現況及異常說明</b>     |
| S85 內       | 消波塊及塊石                |
| S85         | 消波塊及卵石、海床沙地           |
| S80         | 消波塊及卵石、海床沙地           |
| S75         | 消波塊及卵石、海床沙地           |
| S70         | 塊石、卵石、海床沙地            |
| S65         | 卵石堆                   |
| S60         | 塊石、卵石、廢棄漁網、海床沙地(水面檢視) |
| S55         | 塊石、海床沙地               |
| S50         | 消波塊及塊石                |
| S45         | 消波塊及塊石                |
| S40         | 消波塊及塊石堆               |
| S35         | 消波塊及塊石                |
| S30         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| S25         | 消波塊及海床沙地              |
| S20         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| S15         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
| S10         | 消波塊及塊石、海床沙地           |
|             | N09-N01 位於岸堤內         |

#### 4.1.4 水上結構物檢視作業

依據目視檢測結果，高雄港第一港口北防波堤除 0k+050 堤面附近有明顯裂痕外，其餘相對無毀損情形。在南防波堤方面，除在 0k+472 堤面處有明顯落差外，其餘各處堤面亦無毀損情形，相關檢視結果如



圖 4.4 與圖 4.5 所示。



圖 4.4 第一港口北防波堤 0k+050 堤面裂痕情形



圖 4.5 第一港口南防波堤 0k+472 堤面落差情形

高雄港第二港口防波堤結構物由一連串圓形沈箱串連而成，沈箱中間再鋪上一條 PC 通道，經現場目視檢測結果，沈箱體外觀大致完



好。其中，北防波堤沉箱#33、38、51 等堤面有破損情形；南防波堤則是沉箱#26、32、36、62 等堤面有破損情形，相關檢視結果如圖 4.6 與圖 4.7 所示。



圖 4.6a 第二港口北防波堤#33 沉箱堤面破損情形



圖 4.6b 第二港口北防波堤#38 沉箱堤面破損情形



圖 4.6c 第二港口北防波堤#51 沉箱堤面破損情形



圖 4.7a 第二港口南防波堤#26 沉箱堤面破損情形





圖 4.7b 第二港口南防波堤#32 沉箱堤面破損情形



圖 4.7c 第二港口南防波堤#36 沉箱堤面破損情形



圖 4.7d 第二港口南防波堤#62 沉箱堤面破損情形

## 4.2 防波堤設計條件檢討

本節中擬就高雄港第二港口防波堤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。

### 4.2.1 防波堤原有設計條件

#### 1. 原有設計潮位條件

依據「高雄港第二港口開闢工程竣工報告」之設計潮位(低潮系統)分別為(1)最高高潮位(H.H.W.L.) +2.60m；(2)最高潮位(H.W.L.) +1.65m；(3)平均高潮位(M.H.W.L.) +1.20m；(4)平均潮位(M.W.L.) +0.60m；(5)低潮位(L.W.L.) +0.00m，惟設計時係採平均高潮位+1.20m進行分析。

## 2. 原有設計波浪條件

依據「高雄港第二港口開闢工程竣工報告」報告顯示，原設計深海波浪條件如表 4.4 所示。

表 4.4 高雄港第二港口沉箱原有設計波高表

| 水深(m)     | 設計波高(m) |
|-----------|---------|
| -12.0     | 6.0     |
| -11.0     | 6.0     |
| -10.0     | 6.0     |
| -7.0~-9.0 | 6.0     |
| -6.0      | 5.5     |
| -5.0      | 5.0     |
| -4.0      | 4.5     |
| -3.0      | 3.5     |

註：1.週期  $T=12.0\text{sec}$ ；2.波向為 WSW~SSW。

## 3. 原有材料容許應力

高雄港第二港口防波堤之材料容許應力如下所述：

混凝土壓應力  $f_{ca} = 0.45 f'_c = 126\text{kg/cm}^2$  沉箱壁體結構

$f_{ca} = 0.45 f'_c = 94.5\text{kg/cm}^2$  沉箱以外結構物

鋼筋張應力  $f_s = 1410\text{kg/cm}^2$

結構物承受短期荷重時，容許應力得提高 30%。

## 4. 原有材料重量

無筋混凝土 2.30 T/m<sup>3</sup>

鋼筋混凝土 2.45 T/m<sup>3</sup>

沉箱填充沙重(濕) 1.95 T/m<sup>3</sup>

海水 1.03 T/m<sup>3</sup>

護基塊石(鬆方) 1.60 T/m<sup>3</sup>

## 4.2.2 重新計算之設計條件

### 1. 深海颱風波浪推算

本計畫以井島武士及湯麟武博士之理論，重新推算目標區之颱風波浪。選擇以通過高雄外海 120.26°E、22.47°N 為中心，於南北、東西各兩個經緯度範圍內，依據 1940~2009 年間颱風中心氣壓小於或等於 970mb 之颱風資料，篩選出 120 個對本計畫區影響較大者進行颱風波浪推算，並將各方向可能發生之最大示性波高，以極端值分佈法推算各迴歸期之波浪，如表 4.5 所示。由表中可知，侵襲高雄地區颱風波浪以 SSE 向波浪最大，並向 N 向逐漸減弱，惟可能影響本計畫區之波向為 NW 至 SSE 等 8 個方向。

表 4.5 高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表

| 迴歸期<br>(年)<br>波向 | 250  |      | 200  |      | 100  |      | 50   |      | 25  |      | 20  |      | 10  |      |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
|                  | Hs   | Ts   | Hs   | Ts   | Hs   | Ts   | Hs   | Ts   | Hs  | Ts   | Hs  | Ts   | Hs  | Ts   |
| NW               | 5.3  | 9.7  | 5.2  | 9.6  | 4.9  | 9.3  | 4.5  | 8.9  | 4.1 | 8.5  | 3.9 | 8.3  | 3.5 | 7.9  |
| WNW              | 6.2  | 10.5 | 6.1  | 10.4 | 5.7  | 10.0 | 5.3  | 9.7  | 4.8 | 9.2  | 4.6 | 9.0  | 4.1 | 8.5  |
| W                | 6.6  | 10.8 | 6.5  | 10.7 | 6.0  | 10.3 | 5.5  | 9.8  | 5.0 | 9.4  | 4.8 | 9.2  | 4.3 | 8.7  |
| WSW              | 8.9  | 12.5 | 8.6  | 12.3 | 7.8  | 11.7 | 6.9  | 11.0 | 6.0 | 10.3 | 5.7 | 10.0 | 4.8 | 9.2  |
| SW               | 10.0 | 13.3 | 9.7  | 13.1 | 8.7  | 12.4 | 7.7  | 11.7 | 6.7 | 10.9 | 6.3 | 10.5 | 5.2 | 9.6  |
| SSW              | 12.0 | 14.5 | 11.6 | 14.3 | 10.4 | 13.5 | 9.2  | 12.7 | 7.9 | 11.8 | 7.5 | 11.5 | 6.1 | 10.4 |
| S                | 13.0 | 15.1 | 12.6 | 14.9 | 11.5 | 14.2 | 10.3 | 13.5 | 9.0 | 12.6 | 8.5 | 12.2 | 7.1 | 11.2 |
| SSE              | 13.3 | 15.3 | 13.0 | 15.1 | 11.9 | 14.5 | 10.8 | 13.8 | 9.5 | 12.9 | 9.1 | 12.7 | 7.6 | 11.6 |

註：1. 依據 1940~2009 年間之颱風資料推算。

2. 推算目標區為 120.26°E，22.47°N。

3. 目標區水深為 192.45m。

4.  $Ts=4.2 \times Hs^{0.5}$ 。

5. Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

### 2. 暴潮位設計條件

本計畫利用高雄港務局 1984~2008 年的逐時潮位資料進行調和分析，所得之高雄地區主要分潮為 M2、K1、O1 及 SA，其相對之振幅分別為 0.175、0.166、0.151 及 0.114，並據此推算高雄地區天文潮之

各潮位值如表 4.6。

於設計海岸防禦系統時，必須估算極端水位值，其分析方法，須選取計畫區附近至少 10 年之潮位數據，於求出每年之最高高潮位後，再以適當之機率分佈函數，據以推求重現期  $N$  年之極端水位。本計畫選用高雄港第 10 號碼頭 1966~2009 年間各年之最高高潮位進行分析，發現極端值 II 型機率分佈最能滿足最高高潮位之分佈型態，藉由上述分析方法，求得本計畫區域各迴歸期之極端水位，如表 4.7 所示。由該表得知，迴歸期 50 年之極端水位為 +2.16m。

**表 4.6 高雄地區潮汐調和分析表**

| 水 準 系 統    |            | 高雄港低潮系統 |
|------------|------------|---------|
| 天文潮最高高潮位   | H.H.W.L.   | +1.51m  |
| 天文潮朔望平均高潮位 | H.W.L.     | +1.27m  |
| 天文潮平均較高高潮位 | M.H.H.W.L. | +1.10m  |
| 平均高潮位      | M.H.W.L.   | +0.95m  |
| 平均水位       | M.W.L.     | +0.73m  |
| 天文潮平均較低低潮位 | M.L.W.L.   | +0.51m  |
| 天文潮平均較低低潮位 | M.L.L.W.L. | +0.43m  |
| 天文潮朔望平均低潮位 | L.W.L.     | +0.33m  |
| 天文潮最低低潮位   | L.L.W.L.   | +0.09m  |

**表 4.7 高雄港極端水位分析表**

|          |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 迴 歸 期(年) | 25   | 50   | 100  | 150  | 200  | 250  |
| 極端水位(m)  | 1.98 | 2.16 | 2.41 | 2.58 | 2.73 | 2.85 |

註：1.分析資料為西元 1966 年至 2009 年，每年之最高高潮位。

2.機率分佈函數採用極端值 II 型( $K=2.5$ )。

另將先依 1984~2008 年之逐時潮位資料於扣除其調和分析所得之天文潮潮位後，進而取得每年之最大暴潮偏差值並據以進行分析統計，經測試發現極端值 II 型機率分佈最能滿足該項暴潮偏差數值之分析

型態，故藉由該分佈求得本計畫區於各迴歸期之暴潮偏差，如表 4.8 所示。由表中得知，迴歸期 50 年之暴潮偏差約為 0.96m。

**表 4.8 高雄港各迴歸期暴潮偏差分析表**

| 迴歸期(年) | 20   | 50   | 80   | 84   | 100  | 120  | 145  | 150  |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 暴潮偏差   | 0.73 | 0.96 | 1.10 | 1.12 | 1.18 | 1.26 | 1.34 | 1.35 |

註：1.分析資料為西元 1984 年至 2008 年，每年之最大暴潮偏差。

2.機率分佈函數採用極端值 II 型(K=2.5)。

#### 4.2.3 原有與更新設計條件之比較

經由前述分析可知，本計畫所選定之 121 個(1940~2009 年)對本區 影響較大之颱風進行颱風波浪推算，而由推算結果與原有設計波浪條件進行比對顯示，WSW、SW、SSW 向之波高均高於原設計波高(6.0m)，波高約增加 13%~53%；至於週期則除 SSW 向大於原設計週期外，增幅約 6%，其餘 SW、WSW 向週期則降低約 3%~8%，詳如表 4.9 所示。以高雄港第二港口防波堤歷年維護狀況顯示，原設計之波高條件有低估之虞。

**表 4.9 高雄港深海颱風波浪推算波高與原有設計條件比對結果**

|     | 原有設計波浪條件 |      | 本計畫颱風波浪推算 |      | 與原設計波浪比對結果 |     |
|-----|----------|------|-----------|------|------------|-----|
|     | Hs       | Ts   | Hs        | Ts   | Hs         | Ts  |
| WSW | 6.0      | 12.0 | 6.8       | 11.0 | 13%        | -8% |
| SW  | 6.0      | 12.0 | 7.7       | 11.7 | 28%        | -3% |
| SSW | 6.0      | 12.0 | 9.2       | 12.7 | 53%        | 6%  |

另由暴潮分析資料顯示，原有設計採用平均高潮位(MHWL)+1.20m 進行設計，並未考量暴潮偏差或極端水位之影響。若與天文潮最高高潮位(H.H.W.L.)+1.51m 再加上 50 年迴歸期之暴潮偏差 0.96m 後，所得之+2.47m 潮位比較顯示，原設計水位偏低量達 1.27m(減幅 106%)；倘與現有設計潮位+2.60m 比較，更少了 1.4m(減幅 117%)，顯示原設計水位採用+1.2m，係造成堤體於異常天候高水位下，穩定性不足之原因。



### 4.3 高雄港防波堤歷年維修情形

高雄港防波堤歷年維修情形如表 4.10 所示，主要以消波塊加拋方式最多，堤面修復次之，而沉箱修復則居末位。由於沉箱式防波堤並無法明確區分持續性變形或災害性損壞，且經比對防波堤之變形損壞情形，並無超出防波堤之變形連鎖範圍。

**表 4.10 高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表**

| 工程編號    | 編號                      | 維護項目       | 備註 |
|---------|-------------------------|------------|----|
| 67-修-19 | 二港口南堤 37-67 沉箱消坡塊吊放搶修工程 | 消波塊加拋      |    |
| 67-修-37 | 北堤 41 及 46 號沉箱整修工程      | 沉箱修復       |    |
| 67-事-53 | 二港口南堤 31-44 船撞沉箱修復工程    | 沉箱修復       |    |
| 67-事-67 | 六七年度二港口防坡堤維護工程          | 消波塊加拋      |    |
| 69-事-6  | 第一港口防坡堤修護工程             | 消波塊加拋      |    |
| 69-事-29 | 六十九年度二港口防坡堤維護工程         | 消波塊加拋      |    |
| 70-事-22 | 七〇年度二港口防坡堤維護工程          | 消波塊加拋      |    |
| 70-修-49 | 一港口南防坡堤堤面零星修復工程         | 堤面修復       |    |
| 71-事-14 | 七十一年度二港口防坡堤維護工程         | 堤面修復       |    |
| 72-事-9  | 七二年度二港口防坡堤維護工程          | 消波塊加拋、堤面修復 |    |
| 73-事-16 | 七十三年度二港口防坡堤維護工程         | 消波塊加拋      |    |
| 74-事-13 | 七四年度二港口防坡堤維護工程          | 消波塊加拋、堤面修復 |    |
| 75-事-12 | 七五年度二港口防坡堤維護工程          | 沉箱修復       |    |
| 76-事-9  | 第一港口南防坡堤艾貝颱風災修復工程       | 消波塊加拋、堤面修復 |    |

表 4.10(續) 高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表

| 工程編號      | 編 號                 | 維護項目            | 備 註 |
|-----------|---------------------|-----------------|-----|
| 76-事-12   | 七六年度二港口防坡堤維護工程      | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 77-事-12   | 七十七年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋、堤面修復、沉箱修復 |     |
| 78-事-14   | 78 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 79-事-11   | 79 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 79-修-14   | 二港口南堤 77 號沉箱壁破孔補修工程 | 沉箱修復            |     |
| 80-事-4    | 80 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 80-修-44   | 一港口南防坡堤局部維護工程       | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 81-事-資-4  | 81 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋           |     |
| 81-事-資-10 | 81 年度二港口防坡堤二期維護工程   | 消波塊加拋           |     |
| 82-事-資-4  | 82 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋           |     |
| 82-修 19   | 第一港口南防坡堤堤面修復工程      | 堤面修復            |     |
| 85-事-資-4  | 85 年度二港口防坡堤維護工程     | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 85-事-資-19 | 85 年度二港口防坡堤二期維護工程   | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 88-事-資-13 | 88 年度防波堤護坡改善工程      | 消波塊加拋、堤面修復      |     |
| 89-事-資-11 | 89 年度防波堤護坡改善工程      | 消波塊加拋           |     |
| 90-事-資-26 | 90 年度防坡堤護坡改善工程      | 消波塊加拋           |     |
| 90-修-20   | 90 年度防坡堤堤面維護工程      | 堤面修復            |     |
| 92-事-資-21 | 92 年度防波堤護坡改善工程      | 消波塊加拋、堤面修復      |     |

有關高雄港第二港口歷年防波堤維修工程之主要工項數量，如表 4.11 所示，由表中 72~85 年間第二港口防波堤之消波塊拋放資料顯示，73~76 年間最大拋放消波塊重量為 15T，而年拋放 2T~15T 消波塊總數約為 1,200 個；77~80 年間最大拋放消波塊重量為 20T，而年拋放 7.5T~20T 消波塊總數平均約為 720 個；81~85 年間最大拋放消波塊重量為 30T，而拋放消波塊總數為 9,704 個，除 3,000 個 5T 消波塊外，其餘 6,704 個均為 20T~30T 消波塊。

以防波堤之消波塊來說，採用較大噸數之消波塊已成功降低消波塊之更新頻率，由統計資料發現，第二港口防波堤自民國 86 年以後即未辦理大型之消波塊拋放工作。

**表 4.11 高雄港第二港口防波堤歷年維修工程主要工項數量表**

| 工程編號    | 編 號             | 主要工項數量                                                            | 備 註 |
|---------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 71-事-14 | 七十一年度二港口防坡堤維護工程 | 堤面修補31m <sup>2</sup>                                              |     |
| 72-事-9  | 七二年度二港口防坡堤維護工程  | 7.5T消波塊300塊<br>堤面修補206m <sup>2</sup>                              |     |
| 73-事-16 | 七十三年度二港口防坡堤維護工程 | 2T消波塊60塊<br>7.5T消波塊980塊<br>15T消波塊150塊                             |     |
| 74-事-13 | 七四年度二港口防坡堤維護工程  | 4T消波塊190塊<br>7.5T消波塊790塊<br>15T消波塊200塊<br>堤面修補594.5m <sup>2</sup> |     |
| 75-事-12 | 七五年度二港口防坡堤維護工程  |                                                                   |     |
| 76-事-12 | 七六年度二港口防坡堤維護工程  | 7.5T消波塊1140塊<br>15T消波塊150塊<br>堤面修補125m <sup>2</sup>               |     |
| 77-事-12 | 七十七年度二港口防坡堤維護工程 | 7.5T消波塊850塊<br>20T消波塊160塊<br>PC修補31m <sup>3</sup>                 |     |
| 78-事-14 | 78 年度二港口防坡堤維護工程 | 10T消波塊421塊<br>20T消波塊220塊<br>堤面修補12.6m <sup>2</sup>                |     |
| 79-事-11 | 79 年度二港口防坡堤維護工程 | 7.5T消波塊160塊<br>20T消波塊490塊<br>堤面修補15m <sup>2</sup>                 |     |
| 80-事-4  | 80 年度二港口防坡堤維護工程 | 20T消波塊575塊<br>堤面修補5.2m <sup>2</sup>                               |     |

|           |                   |                                      |  |
|-----------|-------------------|--------------------------------------|--|
| 81-事-資-4  | 81 年度二港口防坡堤維護工程   | 30T消波塊1156塊<br>20T消波塊450塊            |  |
| 81-事-資-10 | 81 年度二港口防坡堤二期維護工程 | 20T消波塊1118塊                          |  |
| 82-事-資-4  | 82 年度二港口防坡堤維護工程   | 20T消波塊1080塊<br>5T消波塊3000塊<br>石籠1728個 |  |
| 85-事-資-4  | 85 年度二港口防坡堤維護工程   | 20T消波塊2400塊<br>堤面修補30m <sup>2</sup>  |  |
| 85-事-資-19 | 85 年度二港口防坡堤二期維護工程 | 20T消波塊500塊<br>PC修補20m <sup>3</sup>   |  |

## 4.4 防波堤安全性評估探討

### 4.4.1 防波堤堤址波浪計算

本計畫利用 MIKE21 之 NSW 模組推算高雄二港口堤址波浪，在進行防波堤斷面設計時所採用之堤址波高值，與相對之波力、溯升及越波等推估所採用之深海波高，係為二維斷面波壓理論之結果，並未考量平面折繞射之影響因子，故在應用時，可採用 Goda 定義之等值深海波高  $H_o'$  觀念加以修正深海波高。由於  $H_o'$  僅考量淺化現象，因此，在實際應用  $H_o'$  時，必須加入折射係數( $kr$ )、繞射係數( $kd$ )修正後，即可得出等值深海波高  $H_o' = H_o \cdot kr \cdot kd$ ，以作為堤址波高設計之依據。

以平面波場分析之結果，求得海岸地形變化對波浪所造成之折射、繞射及淺化效應，再將海堤預定堤址位置之淺化係數扣除可得  $kr \cdot kd$ ，最後換算出等值深海波高  $H_o' = H_o \cdot kr \cdot kd$ ，以作為堤址波高設計之依據。

由於堤體設計係採用堤前波高計算，必須將深海波浪經由折射計算推估堤前波高，在斷面設計時應考慮該等折射之影響，同時由波向與海堤法線之夾角亦可折減堤體所受之波壓。其中[判斷式= $1/2 \times (1 + \cos \beta) H_{max}$ ]是參考波壓強度  $P$  與  $1/2 \times (1 + \cos \beta) H_{max}$  成一比例關係，所以在判斷各方向波浪對防波堤之最大作用力時是以  $1/2 \times (1 + \cos$

$\beta$ )Hmax 做為判斷之依據。

依據上述說明，高雄港第二港口影響較大的 3 個波浪入射方向之波場推算結果如表 4.12，防波堤之堤址波高計算結果如表 4.13，而各堤址水深之消波塊重量如表 4.14 所示。。

**表 4.12 防波堤堤址波場模式與波壓判斷式計算結果**

| 深海波向 | 堤址水深 d (m) | 堤址高程 (m) | 入射波高 Ho (m) | 週期 To (sec) | KrKd | 相當外海波高 (m)<br>Ho'=HoKrKd | 堤址波高 Hs (m) | 海底坡度 1 : S | Hmax  | 堤法線與入射角之夾角 $\beta_0$ | $\beta=\min(\beta_0-15, \beta_0+15)$ | 判斷式<br>$=H_{\max}*(1+\cos\beta)/2$ |
|------|------------|----------|-------------|-------------|------|--------------------------|-------------|------------|-------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| WSW  | 16.60      | -14.0    | 6.8         | 10.95       | 0.90 | 6.12                     | 5.63        | 50         | 10.09 | 39                   | 24                                   | 8.95                               |
| WSW  | 17.60      | -15.0    | 6.8         | 10.95       | 0.99 | 6.73                     | 6.19        | 50         | 11.10 | 42                   | 27                                   | 9.68                               |
| SW   | 16.60      | -14.0    | 7.7         | 11.65       | 0.99 | 7.63                     | 7.02        | 50         | 12.59 | 28                   | 13                                   | 11.87                              |
| SW   | 17.60      | -15.0    | 7.7         | 11.65       | 1.01 | 7.79                     | 7.17        | 50         | 12.85 | 28                   | 13                                   | 12.10                              |
| SSW  | 16.60      | -14.0    | 9.2         | 12.74       | 0.93 | 8.56                     | 7.88        | 50         | 13.53 | 18                   | 3                                    | 13.19                              |
| SSW  | 17.60      | -15.0    | 9.2         | 12.74       | 0.94 | 8.67                     | 7.97        | 50         | 14.23 | 17                   | 2                                    | 13.93                              |

註：設計潮位採高雄港低潮系統 CD.+2.6m

**表 4.13 防波堤堤址波高計算結果**

| 堤址高程     | 判斷式最大值 | 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 |
|----------|--------|------------|---------|--------------------------------------|-----|------------|----|
| -13~-14m | 13.19  | 8.56       | 7.88    | 3                                    | SSW | 12.74      |    |
| -14~-15m | 13.93  | 8.67       | 7.97    | 2                                    | SSW | 12.74      |    |

**表 4.14 防波堤消波塊重量計算結果**

| 水深 d(m)  | 堤址波高最大值 | 對應波向 | 斜面坡度 cot $\alpha$ | 消波塊重量(t) | 氣候變遷條件下之消波塊重量 (t) *註 |
|----------|---------|------|-------------------|----------|----------------------|
| -13~-14m | 7.88    | SSW  | 2                 | 39.95    | 55.17                |
| -14~-15m | 7.97    | SSW  | 2                 | 41.47    | 55.30                |

註：假設 Kd 值為 7.5 估計消波塊重量

依據歷年防波堤維護資料顯示，民國 73~76 年間最大拋放消波塊重量為 15T，77~80 年間最大拋放消波塊重量為 20T，81~85 年間最大拋放消波塊重量為 30T，第二港口防波堤自民國 86 年以後即未辦理大型之消波塊拋放工作。由前述資料可知消波塊重量有逐年加重之趨勢，惟依本計畫之堤頭消波塊重量分析顯示，堤頭消波塊重量應達 40T 以上方符需求。至於歷年加拋維護工程所用之消波塊重量不足，可能為當時所考量之設計波浪太小或當時施工機具限制所造成之現象。

#### 4.4.2 第二港口防波堤原有設計概況

依據「高雄港第二港口開闢工程」之竣工報告書說明，二港口兩側各建防波堤一道，以南堤為主，北堤為副，相關平面圖如圖 4.8 所示。南堤全長 2,189m，堤頭延至水深-12.5m 處，水深-3.0m 以下地段採用菱形塊護坡拋石式計 236m；水深-3m 以上地段均採用圓形楔入式沉箱堤，計 1,952m。其中-3~-6m 地段安放 17m 直徑圓形沉箱 18 座，長 310m；-6m 以上地段，安放 24m 直徑圓形沉箱 67 座，長 1,642m。

北堤全長 1,322m，堤頭延至水深-10.5m，水深-3m 以上地段，拋石堤長 206.5m；水深-3m 以下地段安放 17m 直徑圓形沉箱 19 座，長 329.9m；24m 直徑圓形沉箱 32 座，長 784m。

拋石堤堤心拋放咾咕塊石，塊石重 100~200kg，咾咕塊石兩側邊坡以 2 及 4 噸菱形塊護面，堤頂就地澆築厚 1m 寬、4m 長之混凝土堤面。

圓形楔入式沉箱堤所用沉箱水深不同分直徑 17m 與 24m 兩種，其中直徑 24m 圓形沉箱設計尺度為外徑 24m、內徑 13m，高度 16m，內孔無底，外孔有底，外孔以隔壁分隔為 16 格間，外孔底板版厚 25cm，下置高 1.6m 切牆，外壁最小厚度 25 cm，最大厚度 40 cm，內壁與隔壁厚度均為 20 cm，沉箱內孔底圈 9m，有長 2m 倒丁字樑 16 支，底板下設 9mm 厚鋼版切牆深 0.9m。沉箱直接沉放於海底，藉其自重及填充重量楔入砂層，相關設計平面圖與斷面圖如圖 4.9 所示。



#### 4.4.3 防波堤堤體安全性探討

依據前節高雄港域原有與更新設計波浪條件比較之說明，本節中將進行高雄港第二港口防波堤沉箱堤體之安全性探討如下。

##### 1. 入射波高決定

入射波高決定(含外海入射波高與堤前入射波高)係作為後續進行堤體波力計算的基礎，其中外海入射波高多係依據計畫區颱風波浪推算結果而決定，配合所屬計畫擬定之設計迴歸期(一般採用 50 年迴歸期，重要度甚高之設施，則考量 100 年以上)，以取得各入射方向之外海波高設計條件；而堤前設計波高則係配合前述外海入射波高進行計算，以估得堤前波向角，反算所謂之相當外海波高( $H_o'$ )，進而求得 Goda 波力計算公式中所需之相當外海入射波高條件。

堤前設計波高計算多以合田良實(Goda)由試驗成果所歸納之公式為計算準繩，惟一般海堤之穩定性評估，係採用最大波高  $H_{max}$  進行計算；而消波塊所需重量則採用堤前示性波高  $H_s$  進行推算，有關  $H_{max}$  及  $H_s$  之計算公式分別列述如下。

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

式中  $\beta_o = 0.028(H_o'/L_o)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta]$   
 $\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta]$   
 $\beta_{max} = \max\{0.92, 0.32(H_o'/L_o)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\}$

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



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

其中  $K_s$  值可由 Goda 所提供之非線性波浪淺化公式或圖求得。

## 2. 波力計算原則

如堤前波高計算採用合田良實(Goda)波壓公式，則各壓力分佈如圖 4.10 所示，計算步驟如下。

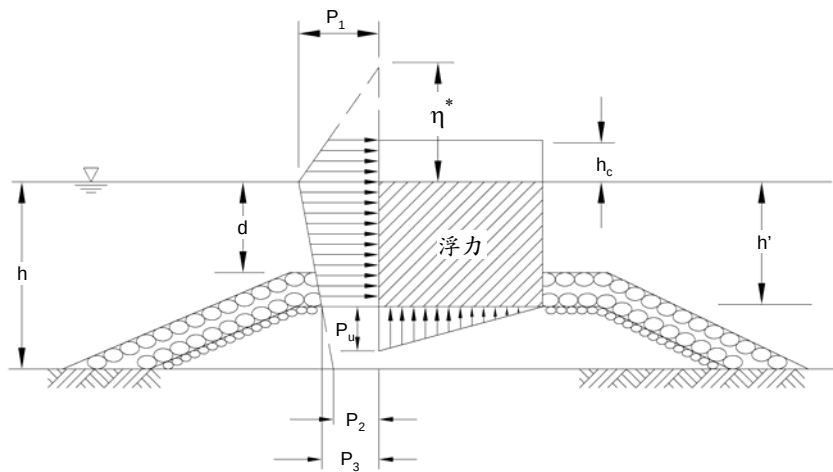


圖 4.10 防波堤直立部份波壓分佈圖

### (1) 波壓作用高程

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

$\eta$ ：波壓作用在靜水位以上高度(m)

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

$\lambda_1$ ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0，通常沉箱堤設計採用 1.0；拋石堤則採用 0.9。

## (2)波壓強度

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

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

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1$$

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

$\lambda_1$ ：緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0。

$\lambda_2$ ：碎波波壓項之修正係數

$\lambda_3$ ：上揚壓力項之修正係數

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

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

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

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

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

## (3)浮力及上揚力

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

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

#### (4)波力合成力及其力矩

基於上述計算，波力之合成力 P 及力矩  $M_p$  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：

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

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

式中  $\ell_u$ ：表示上揚力作用於堤底之範圍

若直立堤身位於設計水位之下，則  $\ell_u = B$  堤底寬

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

其中  $h'$ ：直立堤底部出水面之高度(取負值)

### 3.護基方塊護面石及堤址塊石重量計算

有關護基方塊係採用 Hudson 類型之公式計算如下：

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

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

式中  $W$ ：護面塊重量 (t)

$\gamma_s$ ：護面塊單位重 ( $t/m^3$ )

$H_s$ ：堤前設計波高 ( $H_{1/3}$ )

$S_r$ ：護面塊對海水比重

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

$\alpha$ ：斜面與水平面之夾角

依據谷本勝利(TANIMOTO) 之建議式為

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

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

$h'$ ：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)

$A$ 、 $m$ 、 $NSC$ 、 $B$ ：依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  $N_s$  圖表選取之方式，如圖 4.11 所示。

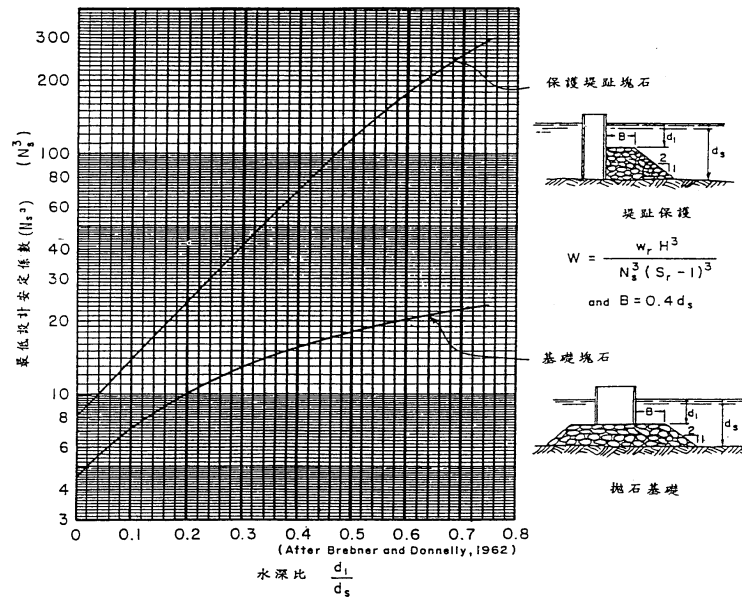


圖 4.11 護基及堤趾拋石之安定係數圖

#### 4.地震時之動水壓力計算

作用於直立壁之動水壓  $P_w$ ，可依下式計算。

$$P_w = \pm \frac{7}{8} K \omega_0 \sqrt{hy}$$

其中  $P_w$ ：水面下  $y$  處之動水壓( $t/m^2$ )

$K$ ：設計震度

$\omega_0$ ：單位體積水之重量( $t/m^3$ )

$y$ ：由水面至求動水壓點為止之深度(m)

$h$ ：水深(m)

#### 5.穩定分析

有關堤體穩定分析，分別依滑動與傾倒驗算如下：

##### (1)滑動驗算

$$SF_s = \frac{\mu(W - U)}{P}$$

式中  $SF_s$ ：滑動安全係數

$\mu$ ：摩擦係數

$W$ ：堤體重量

$U$ ：堤體所受之上揚力

$P$ ：堤體所受波浪之合力

如堤後有背填料，則  $\mu(W - U)$  項尚須包含被動土壓力項。

(2) 傾倒驗算

$$SF_0 = \frac{Mr - Mu}{M_p}$$

式中  $SF_0$ ：傾倒安全係數

$Mr$ ：由堤體自重、被動土壓力等產生之抗傾力矩

$Mu$ ：由堤體所受上揚力產生之力矩

$M_p$ ：由堤體所受波力產生之力矩

## 6. 海嘯波壓分析

依據日本 OCDI 規範「Technical Standards And Commentaries For Port And Harbour Facilities In Japan」所述，由於海嘯週期甚長，可視為一長波( $h/L < 0.4$ )現象，故防波堤受海嘯作用時，可假設於靜水位以上 3 倍海嘯水位抬升高度處之波力為 0，則堤前受波壓力之情形可以下式估計：(參考圖 4.12)

$$\eta^* = 3a$$

$$P_1 = 2.2 \omega_0 a$$

$$P_u = P_1$$

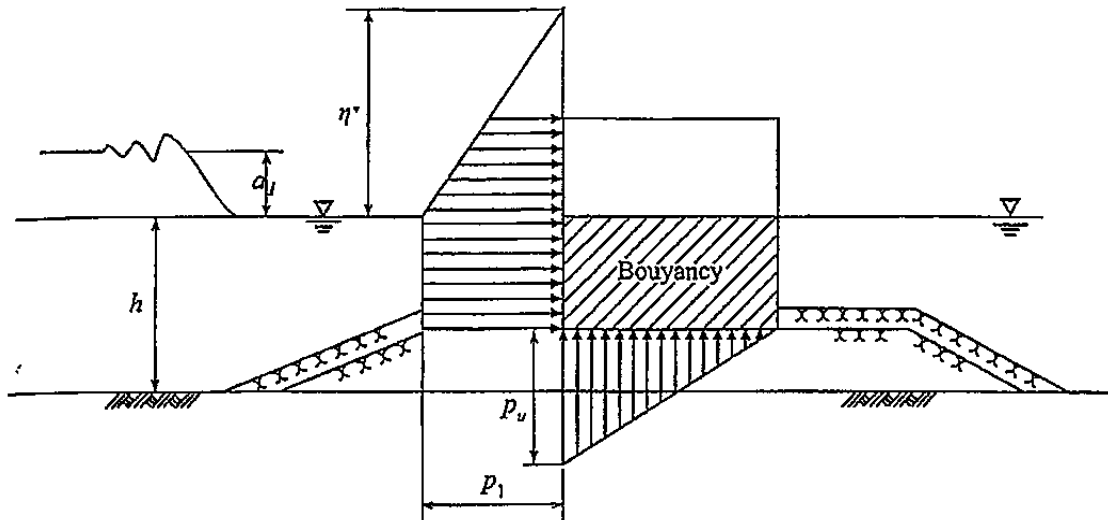
式中  $\omega_0$ ：海水密度 ( $t/m^3$ )

$a$ ：海嘯造成之水位抬升 (m)

$\eta^*$ ：靜水位以上之波壓影響高度 (m)

$P_1$ ：靜水位之波壓強度 ( $t/m^2$ )

$P_u$ ：堤底之上揚力 ( $t/m^2$ )



資料來源：Technical Standards And Commentaries For Port And Harbour Facilities In Japan, 2009

圖 4.12 海嘯作用時堤前波壓分佈圖

#### 4.4.4 計算結果與分析

依據前節所述，高雄港第二港口防波堤沉箱已歷經多次維修，維修工作包括消波塊加拋，堤面修復與沉箱修復等，且由現場圖像調查資料得知，第二港口防波堤結構物損害情況尚屬輕微。惟為顧及結構安全，本節中依據前節堤體安全性計算方式，重新檢驗高雄港第二港口原有設計條件與在極端異常時之堤體穩定安全性。本項工作以海氣象條件極端異常與海嘯條件作用等作為計算探討情況，相關設計條件設定及計算結果，如下分述。

1.設計水深：EL.-12.5m。

2.原有設計條件

原有設計高潮位 H.W.L +1.2m，低潮位 L.W.L +0.0m；設計示性

波高 6m，相當外海波高 6.36m，最大波高 10.5m，週期 12sec。

### 3.極端異常條件

異常高潮位 H.H.W.L +2.6m，異常低潮位 L.L.W.L -0.04m；設計示性波高 7.98m，相當外海波高 8.67m，最大波高 12.53m，週期 12.74sec。

### 4.海嘯條件

模擬馬尼拉海溝發生規模 9.0 之地震引發海嘯，於高雄港處之海嘯高度 4.5m。

5.安全係數：如表 4.15 所示。

6.計算分析種類：如表 4.16 所示。

**表 4.15 重力式結構物安全係數**

| 條件 | 滑動     | 傾倒     | 承载力    |
|----|--------|--------|--------|
| 波壓 | 1.2 以上 | 1.2 以上 | 2.5 以上 |
| 地震 | 1.0 以上 | 1.1 以上 | 2.5 以上 |

**表 4.16 計算分析種類一覽表**

| 種類 | 設計水位<br>(m)      | 相當外海波高<br>(m) | 設計堤址<br>示性波高<br>(m) | 週期<br>(sec) | 緩變波壓<br>修正係數 |             |             | 備註                               |
|----|------------------|---------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|----------------------------------|
|    |                  |               |                     |             | $\lambda_1$  | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ |                                  |
| 一  | H.W.L<br>+1.2m   | 6.36          | 6                   | 12          | 1            | 1           | 1           | 原有設計條件                           |
| 二  | H.H.W.L<br>+2.6m | 8.67          | 7.98                | 12.74       | 1            | 1           | 1           | 極端異常波浪條件                         |
| 三  | H.H.W.L<br>+2.6m | 8.67          | 7.98                | 12.74       | 0.8          | 0           | 0.8         | 極端異常波浪條件<br>+加拋消波塊現況             |
| 四  | H.H.W.L<br>+2.6m | -             | 4.50                | -           | -            | -           | -           | 馬尼拉海溝發生<br>Mw=9.0 地震時引<br>發海嘯之情境 |



## 7. 原有設計條件計算結果

高雄港第二港口原設計之設計示性波高為 6m，週期 12sec，高潮位取+1.2m，波力計算採用 Sainflou's Formula 並無考慮沉箱底部之揚壓力。依原設計成果資料顯示，每座沉箱承受 93.12t/m 波力，762.2t×m/m 波力矩，滑動安全係數 1.84，抗傾倒安全係數 5.4，地盤承载力安全係數 2.55。

考量原設計條件下，依據防波堤設計波高計算常用之合田良實 (Goda) 波壓公式，並考量堤底之揚壓力，重新檢核南堤深水地段直徑 24m 圓形沉箱之結構安全穩定性。分析得到之成果資料顯示為高潮波峰狀況控制，其每座沉箱承受 145.3t/m 波力，1,160t×m/m 波力矩，73.7t/m 揚壓力，1,180t×m/m 揚壓力矩，相關結構體滑動、傾倒與地盤承载力之安定檢核分析資料表詳表 4.17 及表 4.18 所示。由分析成果得知，波力約為原始設計之 1.56 倍，波力矩約為原始設計之 1.52 倍，滑動為安全主控因素，但安全係數已由原始之 1.84 降至高潮時之 1.12，低潮時之 1.19，略低於規範之要求。

表 4.17 原有設計潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮        |            | 低 潮        |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     |
| 波峰狀況                    | 1.12(N.G.) | 1.33(O.K.) | 1.19(N.G.) | 1.39(O.K.) |
| 波谷狀況                    | 3.97(O.K.) | 2.35(O.K.) | 4.91(O.K.) | 2.64(O.K.) |
| 地震狀況                    | 2.60(O.K.) | 1.89(O.K.) | 2.85(O.K.) | 2.04(O.K.) |

**表 4.18 原有設計潮位結構體承载力檢核分析資料表**

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        | 低 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        |
|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|
|                         | 海測                                     | 港測                     | 海測                                     | 港測                     |
| 波峰狀況(偏心荷重)              | -12.14<br>< 30.22(O.K.)                | 8.96<br>< 30.22(O.K.)  | -13.30<br>< 31.58(O.K.)                | 7.73<br>< 32.58(O.K.)  |
| 波谷狀況(無偏心荷重)             | -1.57<br>< 17.14(O.K.)                 | -7.44<br>< 17.14(O.K.) | -2.36<br>< 17.14(O.K.)                 | -6.97<br>< 17.14(O.K.) |
| 地震狀況(無偏心荷重)             | -4.63<br>< 17.14(O.K.)                 | -3.22<br>< 17.14(O.K.) | -4.73<br>< 17.14(O.K.)                 | -3.65<br>< 17.14(O.K.) |

註：表內正值反力為向上，負值為向下

### 8.極端異常波浪條件計算結果

依據目前最新統計之波浪與潮位資料，採用極端異常潮位時颱風作用下之波高與週期，分析波壓與揚壓力之公式採用合田良實(Goda)公式，分析得到之成果資料顯示為極端異常高潮波峰狀況控制，其每座沉箱承受 175t/m 波力，1,402t×m/m 波力矩，88.82t/m 揚壓力，1,421t×m/m 揚壓力矩，有關結構體滑動、傾倒與地盤承载力之安定檢核分析資料表詳表 4.19 及表 4.20 所示。由分析成果得知，波力約為原設計(Goda 公式)之 1.19 倍，波力矩約為 1.2 倍，高潮波峰時之滑動安全係數更是由 1.12 降至 0.78，低潮波峰時由 1.19 降至 1.07，嚴重不符合規範之要求。

**表 4.19 極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表**

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮        |            | 低 潮        |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     |
| 波峰狀況                    | 0.78(N.G.) | 1.16(N.G.) | 1.07(N.G.) | 1.33(O.K.) |
| 波谷狀況                    | 2.94(O.K.) | 2.09(O.K.) | 4.67(O.K.) | 2.65(O.K.) |
| 地震狀況                    | 2.32(O.K.) | 1.73(O.K.) | 2.85(O.K.) | 2.04(O.K.) |

表 4.20 極端潮位結構體承载力檢核分析資料表

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        | 低 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        |
|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|
|                         | 海測                                     | 港測                     | 海測                                     | 港測                     |
| 波峰狀況(偏心荷重)              | -9.45<br>< 21.55(O.K.)                 | 18.47<br>< 21.55(O.K.) | -12.76<br>< 29.29(O.K.)                | 10.34<br>< 29.29(O.K.) |
| 波谷狀況(無偏心荷重)             | -0.08<br>< 17.14(O.K.)                 | -8.54<br>< 17.14(O.K.) | -2.60<br>< 17.14(O.K.)                 | -7.05<br>< 17.14(O.K.) |
| 地震狀況(無偏心荷重)             | -4.56<br>< 17.14(O.K.)                 | -2.67<br>< 17.14(O.K.) | -4.76<br>< 17.14(O.K.)                 | -3.70<br>< 17.14(O.K.) |

註：表內正值反力為向上，負值為向下

由往昔高雄港第二港口南堤兩處嚴重損害情況證實，圓形沉箱堤曾受高於原設計之波壓力與揚壓力作用，導致沉箱外壁、隔壁與底版，因設計版厚或配筋不足，致使結構體承受之應力超過原始設計之容許應力而發生結構體破壞現象。因此，先前之防波堤維護工程須有執行消波塊加拋，堤面修復與沉箱修復等作業，以維護堤體之穩定性與安全性。

## 9.現況已加拋消波塊及極端異常波浪條件計算結果

依據目前堤址周圍大量拋放消波塊保護堤體之現況，計算波力與揚壓力之緩變波壓項修正係數 $\lambda_1$ 取 0.8，碎波波壓項係數 $\lambda_2$ 取 0.0，上揚壓力項係數 $\lambda_3$ 取 0.8，重新計算極端異常潮位時颱風作用下之波高與週期，分析波壓與揚壓力之公式採用合田良實(Goda)公式，分析得到之成果資料顯示為極端異常高潮波峰狀況控制，其每座沉箱承受 130t/m 波力，1,042t×m/m 波力矩，71.06t/m 揚壓力，1,137t×m/m 揚壓力矩，有關結構體滑動、傾倒與地盤承载力之安定檢核分析資料表詳表 4.21 及表 4.22 所示。由分析成果得知，波力約為原設計無執行拋放大量消波塊之 0.74 倍，波力矩約為 0.74 倍，揚壓力約為 0.8 倍，波力矩約為 0.8 倍，高潮波峰時之滑動安全係數則由 0.78 增至 1.14，低潮波峰時由 1.07 增至 1.56，高潮波峰滑動安全係數雖略低於 1.2，但安全係數仍大於 1，故仍有一定程度之安全性，且其餘安全係數均符合規範之要求，此結果與現況加拋消波塊後並無再發生破壞事件一致。

**表 4.21 現況下極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表**

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮        |            | 低 潮        |            |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     | 滑動安全係數     | 傾倒安全係數     |
| 波峰狀況                    | 1.14(N.G.) | 1.29(O.K.) | 1.56(O.K.) | 1.50(O.K.) |
| 波谷狀況                    | 2.94(O.K.) | 2.09(O.K.) | 4.67(O.K.) | 2.65(O.K.) |
| 地震狀況                    | 2.32(O.K.) | 1.73(O.K.) | 2.85(O.K.) | 2.04(O.K.) |

**表 4.22 現況下極端潮位結構體承载力檢核分析資料表**

| 防波堤深水地段<br>直徑 24 公尺圓形沉箱 | 高 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        | 低 潮<br>合成載重下之地盤反力<br>與容許承载力( $t/m^2$ ) |                        |
|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------------|
|                         | 海測                                     | 港測                     | 海測                                     | 港測                     |
| 波峰狀況(偏心荷重)              | -10.93<br>< 30.19(O.K.)                | 7.97<br>< 30.19(O.K.)  | -13.89<br>< 35.36(O.K.)                | 5.43<br>< 35.36(O.K.)  |
| 波谷狀況(無偏心荷重)             | -0.08<br>< 17.14(O.K.)                 | -8.54<br>< 17.14(O.K.) | -2.60<br>< 17.14(O.K.)                 | -7.05<br>< 17.14(O.K.) |
| 地震狀況(無偏心荷重)             | -4.56<br>< 17.14(O.K.)                 | -2.67<br>< 17.14(O.K.) | -4.76<br>< 17.14(O.K.)                 | -3.70<br>< 17.14(O.K.) |

註：表內正值反力為向上，負值為向下

## 10.馬尼拉海溝發生 $M_w=9.0$ 地震時引發海嘯條件計算結果

本條件為馬尼拉海溝發生  $M_w=9.0$  之地震，引發 4.5m 高之海嘯，其能量作用於堤體時，每座沉箱承受 154t/m 波力，1,236t×m/m 波力矩，124t/m 揚壓力，1,977t×m/m 揚壓力矩，受揚壓力大幅增加約 68%之影響，滑動安全係數僅 0.74，顯示高雄港二港口沉箱若遭受 4.5m 高之海嘯侵襲，將有發生堤體滑動破壞之虞。

依本計畫之檢核結果，在安全係數需大於 1.2 之條件下，高雄港二港口沉箱最大可抵擋 3.2m 高之海嘯，如表 4.23 所示。此時每座沉箱承受 113t/m 波力，879t×m/m 波力矩，88t/m 揚壓力，1,406t×m/m 揚壓力矩；若海嘯高度大於 3.7m 時，滑動安全係數則低於 1，沉箱恐有立即發生滑動破壞之可能。

**表 4.23 高雄港發生海嘯時之堤前波壓與原設計條件之比較**

| 計算項目<br>比較條件                                            | 總波力<br>(t/m)     | 總波力矩<br>(t×m/m)   | 揚壓力<br>(t/m)     | 揚壓力矩<br>(t×m/m)   | 滑動安全係數              | 傾倒安全係數              |
|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 原設計條件<br>( $H_0=6.36\text{m}$ ，<br>$T_s=12\text{sec}$ ) | 145.31           | 1,159.98          | 73.74            | 1,179.78          | <b>1.12</b><br>(NG) | <b>1.33</b><br>(OK) |
| 海嘯<br>(水位抬升 4.5m)                                       | 159.53<br>(+10%) | 1235.87<br>(+7%)  | 123.55<br>(+68%) | 1976.83<br>(+68%) | <b>0.73</b><br>(NG) | <b>1.09</b><br>(NG) |
| 海嘯<br>(水位抬升 3.7m)                                       | 131.16<br>(-10%) | 1015.99<br>(-13%) | 101.59<br>(+38%) | 1625.40<br>(+38%) | <b>0.99</b><br>(NG) | <b>1.19</b><br>(NG) |
| 海嘯<br>(水位抬升 3.2m)                                       | 113.42<br>(-22%) | 878.57<br>(-24%)  | 87.86<br>(+19%)  | 1405.75<br>(+19%) | <b>1.22</b><br>(OK) | <b>1.26</b><br>(OK) |

## 11.綜合計算結果

依據前述各種條件的計算分析結果彙整如表 4.24 所示，近年來臺灣防波堤之波壓計算均採合田 (Goda, 1985) 公式做為防波堤設計之基礎，原設計條件在合田公式之驗算之下，波力明顯較原設計採用之 Sainflou's Formula 為大，波峰之滑動安全係數也因此降至規範值 1.2 以下。由於現今之波浪條件已較當年之設計條件有所出入，在考量最新之波浪統計資料後，在最高潮位波峰時之滑動安全係數已低至 0.78，防波堤亦曾發生結構體承受之應力超過原始設計之容許應力而破壞之事件，可見當初之設計已不符合現今之要求，故歷年防坡堤維護工程均加拋大量消波塊以維護堤體之穩定性與安全性。雖加拋後之部份結果仍不符合規範，但其安全係數均大於 1，短期內應可維持其堤體之安全性。

表 4.24 高雄港第二港口防波堤設計分析結果比較表

| 情境  | 外海相對<br>波高 Ho/<br>海嘯計算<br>水位抬昇<br>(m) | 週期<br>(sec) | 沉箱承<br>受波力<br>(t/m) | 安全主控因素<br>(波峰滑動安全係數) |              | 備 註                                     |
|-----|---------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|--------------|-----------------------------------------|
|     |                                       |             |                     | 高潮                   | 低潮           |                                         |
| 一   | 6.36                                  | 12          | 145                 | 1.12<br>(NG)         | 1.19<br>(NG) | 原設計條件                                   |
| 二   | 8.67                                  | 12.74       | 175                 | 0.78<br>(NG)         | 1.07<br>(NG) | 極端異常波浪條件                                |
| 三   | 8.67                                  | 12.74       | 130                 | 1.14<br>(NG)         | 1.56<br>(OK) | 極端異常波浪條件+<br>加拋消波塊現況                    |
| 四.1 | 4.5                                   | -           | 160                 | 0.73<br>(NG)         | 1.09<br>(NG) | 馬尼拉海溝發生<br>Mw=9.0 地震時引發<br>海嘯之情境(H=4.5) |
| 四.2 | 3.7                                   | -           | 131                 | 0.99<br>(NG)         | 1.19<br>(NG) | 馬尼拉海溝發生海<br>嘯之情境 (H=3.7)                |
| 四.3 | 3.2                                   | -           | 113                 | 1.22<br>(OK)         | 1.26<br>(OK) | 馬尼拉海溝發生海<br>嘯之情境 (H=3.2)                |

本計畫參考吳祚任教授之研究成果，以馬尼拉海溝發生規模 9 地震時造成計畫區 4.5m 高之海嘯高度，探討高雄港二港口圓形沉箱受海嘯襲擊時之安全性。由計算結果可知，高雄港二港口沉箱將有滑動破壞之虞。另與現況設計條件相較，因海嘯造成之上揚力較大，故當海嘯高度大於 3.7m 時，堤體可能發生立即性滑動破壞，考量安全係數需大於 1.2，則高雄港二港口沉箱最大應可抵擋 3.2m 高之海嘯而不致發生破壞。

#### 4.5 防波堤損壞原因探討與補強方案研擬

港灣構造物之維護工法主要係考量損壞或變形原因而定，而各型港灣構造物的變形，經常是由多種原因所共同造成的，但從要素間的關聯性的觀點來看，可做大致上以下的區別：(1)構造物構成要素的變形有相互關連性，一個構成要素的變形會波及其他的要害，這種情形

是其變形現象的進行過程，依據構造物的不同而有差異，而且變形的規模有變大的趨勢；(2)另一種是鋼材的腐蝕、混凝土的龜裂、劣化等，這類型的變形幾乎與構造物的特性無關，主要是受到構成要素其特性的影響，此種材料的變形是相互獨立在進行，所以這類型的變形現象比較單純。

#### **4.5.1 防波堤損壞原因探討**

依據高雄港務局報告「港灣設施防災技術之研究(二)—港灣設施防災對策之研究」，可歸納出沉箱式防波堤可能的破壞原因如下：

##### **1.沉箱滑動**

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

##### **2.沉箱傾覆**

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

##### **3.沉箱下陷**

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

##### **4.沉箱結構體受損**

當越波（overtopping）的情形發生時，會使得胸牆及堤面混凝土受到波浪拍擊而受損。此外，當波浪作用導致消波塊或護基方塊

散落時，其散落時會與沉箱碰撞而造成沉箱側牆的受損破裂，進而引起內部填充材料的流失，造成隔牆受損發生結構不平衡的情況而使上部堤面和胸牆傾倒、塌陷。

## 5.材料劣化的破壞模式探討

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

### 4.5.2 防波堤變形分類

依據「港灣構造物の維持・補修マニュアル手冊」中將重力式防波堤相關破壞彙整成沉箱式防波堤變形連鎖過程(如圖 4.13 所示)，防波堤代表性變形現象之進行過程，根據波浪作用而有下列情形：

- 1.因波浪而導致堤基覆蓋部或拋石基礎之散亂、沉陷，引起沉箱傾斜、沉陷及堤面胸牆混凝土之破壞，導致頂高不足，消波塊或覆基方塊與沉箱碰撞使沉箱側牆受損，填充砂流出等。
- 2.設有消波塊時，因波力使消波塊散亂、沉陷，再者因消波塊之移動、沉陷所致作用於沉箱之波壓變大，形成沉箱滑動；無消波塊時，因波力之作用使拋石堤基海底地盤被沖刷，而致堤基斜面被破壞，隨此破壞使拋石堤基產生受損，導致主體之沉陷及傾斜。
- 3.沉箱受波力作用產生滑動，致法線凹凸，進而波力集中增大，造成嚴重滑動及其他相關破壞。

除此之外，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。



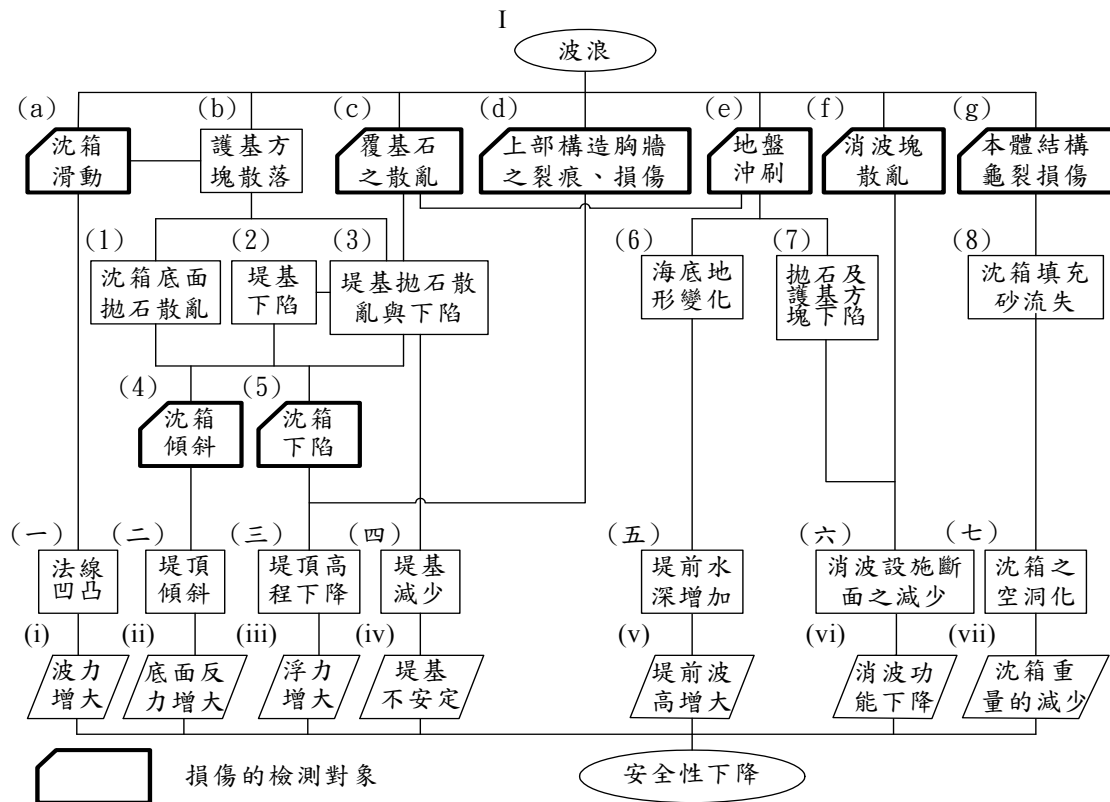


圖 4.13 沈箱式防波堤損傷變形連鎖圖

#### 4.5.3 補強方案之工法研擬

防波堤沉箱受損處理對策需針對各部位之受損與維持防波堤整體功能之前提下，對修補效果、經濟性、施工性等可行性綜合評估後再加以選擇，以下針對各種破壞模式及因應工法分述如下。

##### 1. 沉箱滑動情況

(1) 堤體發生滑動時，可考慮增加抵抗力之工法（基礎加寬）、減少波壓之工法，或兩種之組合法。

(2) 使用離岸潛堤，一般可有效減低波能約 40%，不過全面使用其費用較高，一般可配合水工模型決定其有效配置。

##### 2. 沉箱結構體受損情況

沉箱主體、上部結構等裂縫、剝離、破損一般皆採用灌入法加以修補至原狀。

### **3.消波設施情況**

(1)消波塊之受損，原則上以恢復原狀為主。

(2)若經費許可亦考慮採用增加消波塊之重量，但應考慮海流及波浪之交互作用，尤其是當消波塊重量增大後，其堆積之孔隙亦會相對增大，應考慮對抵抗波浪能量之作用並沒有實質之效果。

## **4.6 防波堤維護方案研擬**

依據前節高雄港第二港口防波堤現況圖像調查結果及防波堤損壞補強方案之探討，本節中將就現況損壞情況提供初步之補強修護對策；另依據辦理花蓮港防波堤維護檢測經驗，並依循建置檢測分類與檢測評估標準辦理，提供港務局作為定期維護防波堤之參考依據。

### **4.6.1 防波堤現況損壞補強修護對策**

#### **1.消波塊散落情況之處理**

由前節現場圖像調查結果可知，高雄港二港口北防波堤港外消波塊無散落情形，而南防波堤消波塊散落情形較明顯，此現象可能肇因於高雄港二港口南防波堤受夏季西南季風與颱風波浪影響，南防波堤為受力面，消波塊因拋放重量不足而散落，長期將對防波堤安全產生不良之影響。

再由第二港口防波堤歷年拋放之消波塊重量經本計畫驗算後有低估之虞，考量未來氣候變遷可能之影響，建議增加拋放之消波塊重量至55t以上，或是增加加大基礎寬度與拋放層數及減緩消波塊斜率，以有效減低沉箱所承受之波力大小。

#### **2.沉箱傾斜情況之處理**

由現場水上檢視結果發現，高雄港二港口南北堤少數沉箱體有傾斜現象，但水下攝影與多音束監測之結果則顯示未有明顯之基礎淘刷流失之情形。此現象可能因堤面連接之場鑄混凝土澆製不當，或是場鑄混凝土下方之塊石部分流失導致堤面不均勻沉陷所造成。

沉箱本體傾斜將造成底面反力增大，但由於水下攝影及多音束測量顯示基礎未有淘空之情形，故應不致影響沉箱本體之結構安全，建議持續對其進行監測，並加拋消波塊以降低沉箱承受之波力。

### 3.堤面破損及鋼筋外露情況之處理

由高雄港二港口南堤部份堤面損壞情形可知，堤面之破損現象可能由於大量之越波拍擊堤面使堤面受損，或是原沉箱製作或補強時保護層不足所致。

由於部份沉箱堤面有明顯破損，導致鋼筋有外露之情形，由於其損傷尚屬輕微，不致造成結構之破壞情形，建議針對受損部位補澆置混凝土補強即可。

#### 4.6.2 防波堤維護檢測分類

參考花蓮港防波堤保護工法研擬之方式，本計畫擬建置一套防波堤定期檢測與維護方法，以事先防範之策，用以減省維護費用。

依據港灣構造物檢測建議，除依港灣構造物維護管理準則(草案)分為平時巡查、定期檢測及特別檢測等三級外，因該三級之檢測項目以非破壞性檢測為主，當檢測項目無法確認實際破壞原因時，建議須大規模以破壞性檢測或其他專業檢測方能釐清時，應採專案方式委託相關機構辦理，相關檢測分級如下分述。

##### 1.平時巡查

參考「高雄港及附屬港港埠設施公共安全巡查責任區劃分要點」，巡查單位以目視為主。而發現構造物及設備有異常或損毀時，立即向工務權責單位提出通報。通報後之流程建議採特別檢測模式辦理。

##### 2.定期檢測

由高雄港務局相關人員組成「港埠設施定期檢測小組」分區進行檢測，檢測以目視或簡單工具為主，定期檢測項目則建議依「港灣設施防災技術研究(一)—港灣構造物維護管理準則之研究」所研訂項目，如表 4.25 所示。

**表 4.25 沉箱式防波堤定期檢測項目表**

| 檢查位置          | 檢查對象  | 檢 查 項 目      | 備註 |
|---------------|-------|--------------|----|
| 上部及沉箱<br>本體結構 | 胸 牆   | 剝離、龜裂、鋼筋外露   |    |
|               | 堤 面   | 龜裂損傷、鋼筋外露    |    |
|               | 沉 箱   | 龜裂損傷、鋼筋外露、變位 |    |
|               | 消 波 塊 | 沉陷、位移        |    |
| 水下結構          | 沉 箱   | 龜裂損傷         |    |
|               | 護基方塊  | 位移、散落        |    |
|               | 消 波 塊 | 沉陷、位移        |    |
|               | 基礎海床  | 沖刷           |    |

### 3.特別檢測

特別檢測仍前述「港埠設施定期檢測小組」負責辦理，除係於颱風、地震等災害後或船舶碰撞等人為破壞之後辦理外，增加平時巡查發現構造物及設備有異常或損毀通報時進行。

### 4.專案檢測

當前三級檢測結果無法確認實際破壞原因時，須進行開挖隱蔽部分破壞性檢測或其他專業檢測時辦理，原則上測量及鋼板樁厚度由局內檢測，其他需採用特殊儀器之檢測委外辦理。

依據前列四級檢測方式說明，其中當定期檢測或特別檢測無法掌握劣化原因及擬定適當維修對策時，則須進行第二階段之詳細檢測，有關防波堤主體結構之詳細檢測項目及方法，建議仍依「港灣設施防

災技術研究(一)—港灣構造物維護管理準則之研究」所研訂項目，如表 4.26 所示。

**表 4.26 防波堤詳細檢測項目表**

| 檢 查 項 目 | 檢 測 方 法                                                          |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| 堤體變位    | 1. 以水準儀或經緯儀進行測繪與原規劃設計圖比對。<br>2. 利用全球定位系統進行監測。<br>3. 裝設位移計或傾角計監測。 |
| 堤體沈陷    | 1. 進行水準測量。<br>2. 土層沈陷則以沈陷計探測之。                                   |
| 基礎沈陷位移  | 根據前述堤體變位及沈陷量測，配合水下潛水人員進行檢測                                       |
| 覆面層滑移   | 選定已知點位配合測量方法進行監測                                                 |
| 鋼筋腐蝕    | 1. 利用鋼筋腐蝕探測儀檢測或<br>2. 利用自然電位法探測                                  |
| 結構裂縫    | 無法以目視及尺規量測之裂縫，則配合透地雷達探測                                          |
| 混凝土劣化   | 以混凝土強度試錘進行檢測                                                     |

#### 4.6.3 防波堤檢測評估方法

進行上述之防波堤檢測工作後，須依防波堤損害、劣化狀況，評估防波堤的健全度及進行劣化分級，為使檢測單位及人員有所依據，本計畫嘗試研擬一套檢測評估方法。

##### 1.D.E.R.&U.評等法

本計畫建議依「港灣設施防災技術研究(一)—港灣構造物維護管理準則之研究」所提之 D.E.R.&U.評等法，並分為三個等級：，即評估時除區分為損壞程度(D)、損壞範圍(E)，及該構件損壞對整體結構之影響性(R)，並由檢測人員依據劣化構件維修的急迫程度(Urgency)作為維修對策之建議。

由港灣構造物檢測所得各構件的 D、E、R 值，可求得構造物的狀況指標 CI，定義如下：

$$CI = 100 - 12.5 \frac{\sum_i (D_i + E_i) R_i}{\sum_i R_i}$$

式中下標 i 表示第 i 個構件。完工後的 CI 值應為 100，使用期間受到所處環境的影響，構造物因各種外力作用產生的損傷，及材料的劣化，CI 將會隨使用時間的增加而降低。而狀況指標 CI 僅針對構造物主體構件的 D、E、R 值進行統計，分成三個等級：

- (1)A 級：85 ≤ CI ≤ 100，為安全無虞。
- (2)B 級：70 ≤ CI < 85，為結構物已受損傷，可進行詳細檢測，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。
- (3)C 級：CI < 70，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。

## 2.損壞程度標準

有關防波堤之損壞等級與功能標準分級，如表 4.27 所示。

**表 4.27 防波堤損壞程度及評估項標準**

| 評估位置及項目 |       | 損 壞 程 度   |         |           |
|---------|-------|-----------|---------|-----------|
|         |       | A         | B       | C         |
| 沉箱式     | 沉箱滑動  | < 20cm    | 20~30cm | > 30cm    |
|         | 沉箱傾覆  | < 5%      | 5%~10%  | > 10%     |
|         | 沉箱沉陷  | < 30cm    | 30~50cm | > 50 cm   |
|         | 基礎沖刷坑 | < 1m      | 1m~2m   | > 2m      |
| 拋石式     | 港側覆面塊 | 破壞率 < 20% | 20%~35% | 破壞率 > 35% |
|         | 海側覆面塊 | 破壞率 < 20% | 02%~35% | 破壞率 > 35% |
|         | 沖 刷 坑 | < 1m      | 1m~2m   | > 2m      |

註：A：正常、 B：須進行安全評估、 C：須進行補強

### 3.定期檢測評估表

有關定期檢測評估如表 4.28~表 4.34 所示。

**表 4.28 高雄港港灣設施平時巡查異常報告表**

|         |       |                                                                                                                  |
|---------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 設施基本資料  | 隸屬港口  | <input type="checkbox"/> 高雄港 <input type="checkbox"/> 安平港 <input type="checkbox"/>                               |
|         | 設施形式  | <input type="checkbox"/> 碼頭 <input type="checkbox"/> 防波堤 <input type="checkbox"/> 護岸 <input type="checkbox"/> 海堤 |
|         | 編號及區分 |                                                                                                                  |
|         | 巡查日期  |                                                                                                                  |
| 照片或簡圖繪示 |       |                                                                                                                  |
| 異常現象說明  |       |                                                                                                                  |

巡查員

單位主管

表 4.29 高雄港防波堤巡查紀錄表

|         |                                                   |         |  |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
|---------|---------------------------------------------------|---------|--|-----|--|-----|--|-----|--|-----|--|-----|--|
| 防波堤位置   |                                                   |         |  |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 檢查項目    |                                                   | 檢 查 結 果 |  |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
|         |                                                   | 月 日     |  | 月 日 |  | 月 日 |  | 月 日 |  | 月 日 |  | 月 日 |  |
| 胸牆      |                                                   | 無       |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  |
| 有無損害？   |                                                   | 有       |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  |
| 堤面混凝土   |                                                   | 無       |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  |
| 有無損害？   |                                                   | 有       |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  |
| 覆面消波塊外觀 |                                                   | 無       |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  | 無   |  |
| 有無異常短少？ |                                                   | 有       |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  | 有   |  |
| 檢查人簽名   |                                                   |         |  |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |
| 備<br>註  | 防波堤每年二次，原則於颱風季前後巡查，發現設施異狀或損壞時，，應另填具異常報告表通知定期檢測小組。 |         |  |     |  |     |  |     |  |     |  |     |  |

巡查員

單位主管



表 4.30 沉箱式防波堤定期檢測評估(水上)表

|             |                                                |                                                    |   |   |                                                                                                                                                  |   |   |      |      |  |  |  |
|-------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|------|------|--|--|--|
| 隸屬港口        |                                                |                                                    |   |   |                                                                                                                                                  |   |   |      |      |  |  |  |
| 防波堤位置<br>編號 |                                                |                                                    |   |   | 檢測單元編號                                                                                                                                           |   |   |      |      |  |  |  |
| 檢測項目位置      |                                                | 頻<br>率                                             | R | D | 劣化程度                                                                                                                                             | E | U | 異常位置 |      |  |  |  |
| 水上部分        | 胸牆<br>•<br>離<br>•<br>裂損傷                       | <input type="checkbox"/><br>一年                     | 2 |   | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 2 | <input type="checkbox"/> 輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落                                                                                |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 3 | <input type="checkbox"/> 明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 混凝土剝落<br><input type="checkbox"/> 胸牆損傷致高度不足                                            |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 4 | <input type="checkbox"/> 胸牆斷落                                                                                                                    |   |   |      |      |  |  |  |
|             | 堤面<br>•<br>裂損傷<br>•<br>陷                       | <input type="checkbox"/><br>一年                     | 3 | 1 | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 2 | <input type="checkbox"/> 輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落                                                                                |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 3 | <input type="checkbox"/> 明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 混凝土剝落<br><input type="checkbox"/> 輕微不均勻沈陷                                              |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 4 | <input type="checkbox"/> 明顯不均勻沈陷<br><input type="checkbox"/> 堤面混凝土斷裂                                                                             |   |   |      |      |  |  |  |
|             | 沈箱<br>•<br>位<br>•<br>斜<br>•<br>裂損傷<br>•<br>筋外露 | <input type="checkbox"/><br>一年                     | 4 | 1 | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 2 | <input type="checkbox"/> 堤體變位不明顯<br><input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露<br><input type="checkbox"/> 輕微傾斜 |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 3 | <input type="checkbox"/> 堤體變位明顯<br><input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露<br><input type="checkbox"/> 明顯傾斜        |   |   |      |      |  |  |  |
|             |                                                |                                                    |   | 4 | <input type="checkbox"/> 堤體嚴重變位<br><input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂<br><input type="checkbox"/> 嚴重傾斜                                             |   |   |      |      |  |  |  |
| 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。

表 4.31 沉箱式防波堤定期檢測評估(水下)表

| 檢測項目位置                                                                               |                   | 頻率      | R                                                  | D | 劣化程度                                                                  | E | U | 異常位置 |                                                                                                |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|----------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------|---|---|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 水下部分                                                                                 | 沈箱<br>• 龜裂<br>損傷  | □<br>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<br><input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露 |   |   |      |                                                                                                |  |
|                                                                                      |                   |         |                                                    | 4 | <input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂                                      |   |   |      |                                                                                                |  |
|                                                                                      | 護基方塊<br>• 變位      | □<br>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                                      |   |   |      |                                                                                                |  |
|                                                                                      | 消波塊<br>• 落<br>• 陷 | □<br>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                                   |   |   |      |                                                                                                |  |
|                                                                                      |                   |         |                                                    | 4 | <input type="checkbox"/> 消波斷面減少，堤體可能滑動                                |   |   |      |                                                                                                |  |
|                                                                                      | 基礎海床<br>• 沖刷      | □<br>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： <div style="border: 1px solid black; height: 150px; margin-top: 5px;"></div> |                   |         |                                                    |   |                                                                       |   |   |      |                                                                                                |  |
| 檢測時間                                                                                 |                   |         |                                                    |   | 檢測單位                                                                  |   |   |      | 檢測人員 <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin-top: 5px;"></div> |  |

註：D：破壞程度。E：破壞範圍。R：破壞影響性。U：急迫性。

表 4.32 沉箱式防波堤特別檢測評估表

| 隸屬港口        |                                                |             |   |   |                                                                                                                                                  |        |   |   |      |
|-------------|------------------------------------------------|-------------|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---|---|------|
| 防波堤位置<br>編號 |                                                |             |   |   |                                                                                                                                                  | 檢測單元編號 |   |   |      |
| 檢測項目位置      |                                                | 時機          | R | D | 劣化程度                                                                                                                                             |        | E | U | 異常位置 |
| 水上部分        | 胸牆<br>•<br>離<br>•<br>裂損傷                       | A<br>B<br>C | 2 | 1 | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 2 | <input type="checkbox"/> 輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落                                                                                |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 3 | <input type="checkbox"/> 明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 混凝土剝落<br><input type="checkbox"/> 胸牆損傷致高度不足                                            |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 4 | <input type="checkbox"/> 胸牆斷落                                                                                                                    |        |   |   |      |
|             | 堤面<br>•<br>裂損傷<br>•<br>陷                       | A<br>B<br>C | 3 | 1 | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 2 | <input type="checkbox"/> 輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 局部混凝土剝落                                                                                |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 3 | <input type="checkbox"/> 明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 混凝土剝落<br><input type="checkbox"/> 輕微不均勻沈陷                                              |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 4 | <input type="checkbox"/> 明顯不均勻沈陷<br><input type="checkbox"/> 堤面混凝土斷裂                                                                             |        |   |   |      |
|             | 沈箱<br>•<br>位<br>•<br>斜<br>•<br>裂損傷<br>•<br>筋外露 | A<br>B<br>C | 4 | 1 | <input type="checkbox"/> 無異狀                                                                                                                     |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 2 | <input type="checkbox"/> 堤體變位不明顯<br><input type="checkbox"/> 堤體輕微損傷<br><input type="checkbox"/> 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露<br><input type="checkbox"/> 輕微傾斜 |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 3 | <input type="checkbox"/> 堤體變位明顯<br><input type="checkbox"/> 堤體明顯損傷<br><input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露<br><input type="checkbox"/> 明顯傾斜        |        |   |   |      |
|             |                                                |             |   | 4 | <input type="checkbox"/> 堤體嚴重變位<br><input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂<br><input type="checkbox"/> 嚴重傾斜                                             |        |   |   |      |

表 4.32(續) 沉箱式防波堤特別檢測評估表

| 檢測項目位置                 |              | 時機          | R                                                  | D | 劣化程度                                                                  | E | U | 異常位置 |
|------------------------|--------------|-------------|----------------------------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------------|---|---|------|
| 水下部分                   | 沈箱<br>• 龜裂損傷 | A<br>B<br>C | 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<br><input type="checkbox"/> 壁體剝落致鋼筋外露 |   |   |      |
|                        |              |             |                                                    | 4 | <input type="checkbox"/> 堤體混凝土斷裂                                      |   |   |      |
|                        | 護基方塊<br>• 變位 | A<br>B<br>C | 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                                      |   |   |      |
|                        | 消波塊<br>• 落陷  | A<br>B<br>C | 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                                   |   |   |      |
|                        |              |             |                                                    | 4 | <input type="checkbox"/> 消波斷面減少，堤體可能滑動                                |   |   |      |
|                        | 基礎海床<br>• 沖刷 | A<br>B<br>C | 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：                |              |             |                                                    |   |                                                                       |   |   |      |
|                        |              |             |                                                    |   |                                                                       |   |   |      |
| 註：A：地震後。B：颱風後。C：船舶碰撞時。 |              |             |                                                    |   |                                                                       |   |   |      |
| 檢測時間                   |              |             |                                                    |   | 檢測單位                                                                  |   |   |      |
|                        |              |             |                                                    |   | 檢測人員                                                                  |   |   |      |

表 4.33 沉箱式防波堤檢測劣化程度與評估值關係表

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

表 4.33(續) 沉箱式防波堤檢測劣化程度與評估值關係表

|      |      |       |                                                                                                                                                                                    |                  |
|------|------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 水上部份 | 沉箱   | 龜裂損傷  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 堤體輕微損傷(龜裂寬度目測約&lt;3mm, 龜裂長度目測約&lt;5cm)</li> <li>● 堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約&gt;3mm, 龜裂長度目測約&gt;5cm)</li> <li>● 堤體混凝土斷裂</li> </ul>     | 1<br>2<br>3<br>4 |
|      |      | 鋼筋外露  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露</li> <li>● 壁體剝落致鋼筋外露</li> <li>● 堤體混凝土破洞</li> </ul>                                                         | 1<br>2<br>3<br>4 |
| 水下部分 | 沉箱   | 龜裂損傷  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 堤體輕微損傷(龜裂寬度目測約&lt;3mm, 龜裂長度目測約&lt;5cm)</li> <li>● 堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約&gt;3mm, 龜裂長度目測約&gt;5cm)</li> <li>● 堤體混凝土斷裂(破洞)</li> </ul> | 1<br>2<br>3<br>4 |
|      | 護基方塊 | 變位    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 部分發生下陷位移(變位量約&lt;5cm)</li> <li>● 小規模下陷位移(變位量約 5~10 cm)</li> <li>● 大範圍下陷位移(變位量約&gt;10 cm)</li> </ul>                        | 1<br>2<br>3<br>4 |
|      | 消波塊  | 滑落與沈陷 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 部分消波塊移動或滾落</li> <li>● 消波塊散落沈陷達一層, 堤體滑動安全率有減低之虞</li> <li>● 消波斷面減少, 堤體滑動安全率已減低</li> </ul>                                    | 1<br>2<br>3<br>4 |
|      | 基礎海床 | 沖刷    | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 無異狀</li> <li>● 輕微沖刷(沖刷坑深度約&lt;50cm)</li> <li>● 大量沖刷(沖刷坑深度約 50~100cm)</li> <li>● 嚴重沖刷(沖刷坑深度約&gt;100cm)</li> </ul>                          | 1<br>2<br>3<br>4 |

表 4.34 港灣設施專案檢測參考表

|       |          |        |      |
|-------|----------|--------|------|
| 隸屬港口  |          |        |      |
| 設施位置  |          | 檢測單元編號 |      |
| 檢測材料  | 試驗方法     | 測試位置   | 試驗結果 |
| 混凝土   | 鑽心取樣抗壓試驗 |        |      |
| 混凝土   | 中性化檢測    |        |      |
| 混凝土   | 氯離子含量檢測  |        |      |
| 混凝土   | 紅外線熱感應法  |        |      |
| 混凝土   | 雷達試驗法    |        |      |
| 混凝土   | 衝擊彈性波法   |        |      |
| 混凝土/鋼 | 超音波檢測    |        |      |
| 混凝土/鋼 | 渦電流檢測法   |        |      |
| 混凝土/鋼 | 腐蝕檢測     |        |      |
| 混凝土/鋼 | 聲射法      |        |      |
| 鋼     | 液滲測試法    |        |      |
| 鋼     | 磁粒檢測法    |        |      |
| 鋼     | 射線檢測法    |        |      |
|       |          |        |      |

## 4.7 防波堤構造物維護管理資訊系統之建置

本節中將嘗試建置一套格式化與電腦化之維護管理資訊系統，提供高雄港務局簡便與快速之查詢及應用。擬建置之防波堤維護管理系統，是以資訊管理系統為平臺，建立防波堤結構物維護管理之資訊系統。其目的在於整合港務單位的維護管理作業體系，研擬一套標準作業流程，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系統，預防災害發生，加速維護作業之流程，使損失降至最低。

### 4.7.1 表單資訊化

針對防波堤堤體訂定防波堤構造物檢測項目、檢測頻率、劣化分級和檢測評估表單，最終建立港灣防波堤構造物的檢測作業評估表及劣化程度評估標準值，其特點係以條列式方式列出檢測項目，此即為現場檢查重點。如此對於新進或生手之檢查人員而言，可較具體明確瞭解應檢測項目的重點，同時對於檢測項目可作較標準化、一致性的規定，表單內應含有如下內容。

- 1.構造物之基本資料。
- 2.定期檢測評估紀錄表：包含檢測項目、檢測頻率、破壞程度、破壞範圍、破壞影響與處理方式，填表範例如表 4.35 所示。



表 4.35 圓筒式直立堤定期檢測評估表

|        |                             |              |      |   |                                                  |      |              |   |                    |
|--------|-----------------------------|--------------|------|---|--------------------------------------------------|------|--------------|---|--------------------|
| 基本資料   | 隸屬港口                        |              | 高雄港  |   | 堤防編號(區段)                                         |      | 南外防波堤 II     |   |                    |
|        | 堤防長度                        |              | 165m |   | 堤防寬度                                             |      | 10m          |   |                    |
|        | 上次檢測                        | 時間：無<br>單位：無 |      |   |                                                  | 上次維護 | 日期：無<br>項目：無 |   |                    |
| 檢測項目位置 |                             | 頻率           | R    | D | 劣化程度                                             |      | E            | U | 異常位置               |
| 水上部份   | 胸牆<br>• 陷<br>• 裂損傷<br>• 筋外露 | □ 一年         | 2    | 1 | □ 無異狀                                            |      |              |   |                    |
|        |                             |              |      | 2 | □ 輕微損傷<br>☑ 局部混凝土剝落<br>□ 輕微沉陷                    |      | 1            | 1 |                    |
|        |                             |              |      | 3 | □ 明顯損傷<br>□ 混凝土剝落致鋼筋外露<br>□ 胸牆損傷致高度不足<br>□ 小規模沉陷 |      |              |   |                    |
|        |                             |              |      | 4 | □ 胸牆斷落<br>□ 大規模沉陷                                |      |              |   |                    |
|        | 堤面<br>• 裂損傷<br>• 陷          | □ 一年         | 3    | 1 | □ 無異狀                                            |      |              |   |                    |
|        |                             |              |      | 2 | □ 輕微損傷<br>☑ 輕微沈陷                                 |      | 1            | 1 |                    |
|        |                             |              |      | 3 | □ 明顯損傷<br>□ 明顯沉陷                                 |      |              |   |                    |
|        |                             |              |      | 4 | □ 堤面混凝土斷裂<br>□ 嚴重沉陷                              |      |              |   |                    |
|        | 消波塊<br>• 落<br>• 陷           | □ 一年         | 4    | 1 | □ 無異狀                                            |      |              |   | 於+780m~<br>+830m 處 |
|        |                             |              |      | 2 | □ 部分消波塊輕微移動或滾落                                   |      |              |   |                    |
|        |                             |              |      | 3 | ☑ 消波塊明顯滾落，堤體有滑動之虞                                |      | 3            | 4 |                    |
|        |                             |              |      | 4 | □ 消波斷面減少，堤體可能滑動                                  |      |              |   |                    |

表 4.35(續) 圓筒式直立堤定期檢測評估表

| 檢測項目位置                                                    |      | 頻<br>率                         | R                                                       | D    | 劣化程度                                     | E    | U | 異常位置 |     |
|-----------------------------------------------------------|------|--------------------------------|---------------------------------------------------------|------|------------------------------------------|------|---|------|-----|
| 水下<br>部分                                                  | 海床沖刷 | <input type="checkbox"/><br>一年 | 4                                                       | 1    | <input type="checkbox"/> 無異狀或呈淤積狀態       |      |   |      |     |
|                                                           |      |                                |                                                         | 2    | <input checked="" type="checkbox"/> 輕微沖刷 | 1    | 1 |      |     |
|                                                           |      |                                |                                                         | 3    | <input type="checkbox"/> 大量沖刷            |      |   |      |     |
|                                                           |      |                                |                                                         | 4    | <input type="checkbox"/> 嚴重沖刷            |      |   |      |     |
| 性 能 指 標                                                   |      |                                | $CI = 100 - 12.5 \sum (D + E) \times R / \sum R = 62.5$ |      |                                          |      |   |      |     |
| 檢測人員意見：<br>+780m~+830m 處港側消波塊有明顯下滑，建議拋放消波塊至原設計斷面，並持續定期檢測。 |      |                                |                                                         |      |                                          |      |   |      |     |
| 檢測時間                                                      |      | 99.10                          |                                                         | 檢測單位 |                                          | 海洋大學 |   | 檢測人員 | 王星宇 |

## 4.7.2 系統電腦化

「港灣防波堤檢測評估資訊系統」將以資訊化後的防波堤檢測表單為基礎，設計成為資料庫。在硬體上導入平板式電腦或個人小筆電與衛星定位裝置，輔助檢測人員進行檢測評估作業並記錄其位置。在軟體上則導入地理資訊系統(GIS, Geographic Information System)，將空間資訊與檢測評估資料相關聯，使得防波堤檢測資料除傳統之屬性資料外，更能夠在空間關係上有更豐富的紀錄與呈現。

### 1.系統軟硬體架構

網際網路上作為伺服器端之主機，負責執行用戶端所提出之所有要求(request)，並將執行成果傳回用戶端電腦，因此伺服器端主機硬、軟體設備之良莠，充分影響到資料處理與傳送之速度與品質，除了需要

評估系統軟硬體之效能外，影響系統運作的因子尚有電腦硬體與作業系統，通常硬體越強的平台，在網路上執行效能也就越好。

本計畫港灣防波堤檢測評估網際網路地理資訊系統採用多層分散式(N-Tier)架構，設計開發網路版港灣防波堤檢測評估地理資訊系統系統，系統功能面說明如下：使用者(Client)端只需透過瀏覽器(Internet Explorer®, Firefox®, Safari™ 與 Google™ Chrome) 即可使用本計畫所完成之系統(Web Browser-Internet Explorer 7.0 以上版本)，本系統架構除可簡化業務相關人員之系統維護更新作業外，同時也讓使用者在安全機制保護下，透過網際網路於任何時間或地點登入本系統，即時進行所需相關作業，多層分散式架構(N-Tier)及實際登入頁面如圖 4.14 與圖 4.15 所示。

另外，本計畫之系統開發建置港灣防波堤檢測評估網際網路地理資訊系統，資料庫方面，將採用 MS SQL Server 來做為系統之資料庫；而在網際網路地理資訊系統中，為了符合開放式地理資訊系統架構，則採用 Autodesk MapGuide Enterprise 做為網際網路地理資訊圖形伺服器軟體，如此在用戶端則無需採購其他軟體，透過網際網路瀏覽器(Internet Explorer®, Firefox®, Safari™ 與 Google™ Chrome)，即可瀏覽查詢相關圖形資料與屬性資料；此外，亦可符合 OGC WFS 與 WMS 等相關規定及未來擴充之需求，整體架構說明如圖 4.16 所示。

## 2.系統功能架構

本計畫將依實際需要，開發以瀏覽器為基礎之防波堤檢測評估系統。本系統將提供給使用者與管理者不同之功能選項，系統會依據使用者功能權限之不同，提供對應之使用功能。本系統設計採取開放式地理資訊架構，為方便地圖之可讀性與節省經費，系統採整合現有之 Google Map 以提升地圖之解析性與可讀性，讓使用者可以透過圖層套疊，將向量式的地圖結合 Google Map 之街道圖與衛星影像圖，讓整體系統規劃更具全面性與延伸性，並且讓使用者可以清楚

了解港灣防波堤之相關位置。本系統將採取模組方式來進行開發，提供未來系統擴充更具彈性化與便利性，在整體決策分析管理上亦可透過模組之開發形式來進行系統整合。依據港灣設施維護管理的作業，其維護管理系統的功能架構，主要應包含港灣設施基本資料模組、檢測作業資料同步模組、檢測評估資料管理模組、及空間地理資訊管理模組等，如圖 4.17 所示。

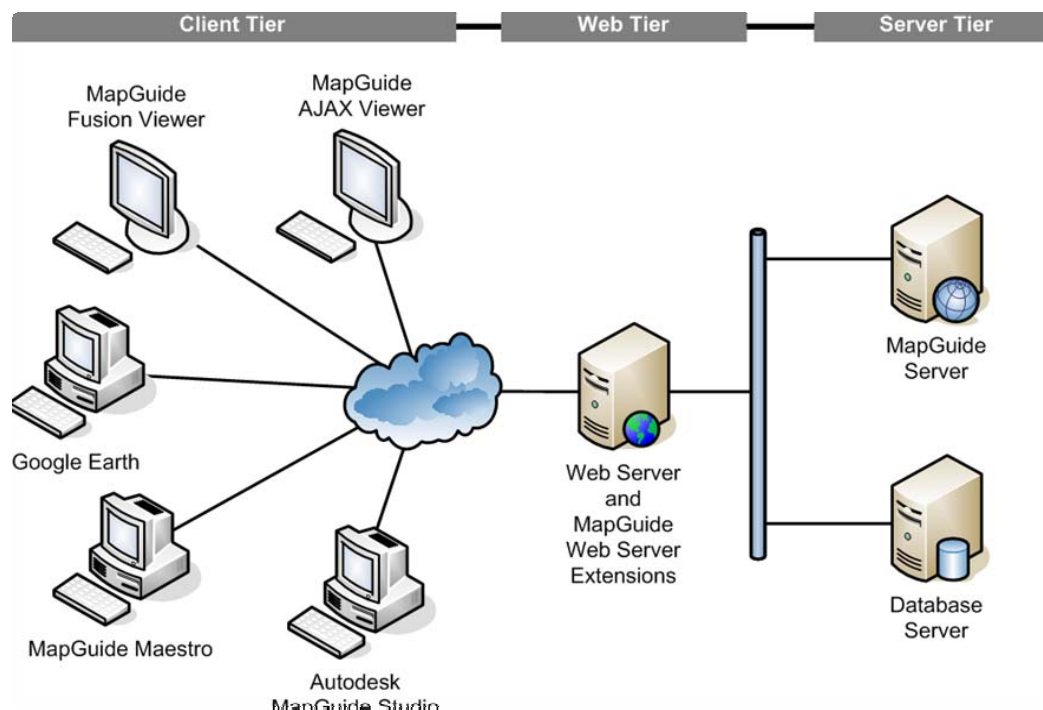


圖 4.14 多層分散式架構圖



圖 4.15 系統登入頁面示意圖

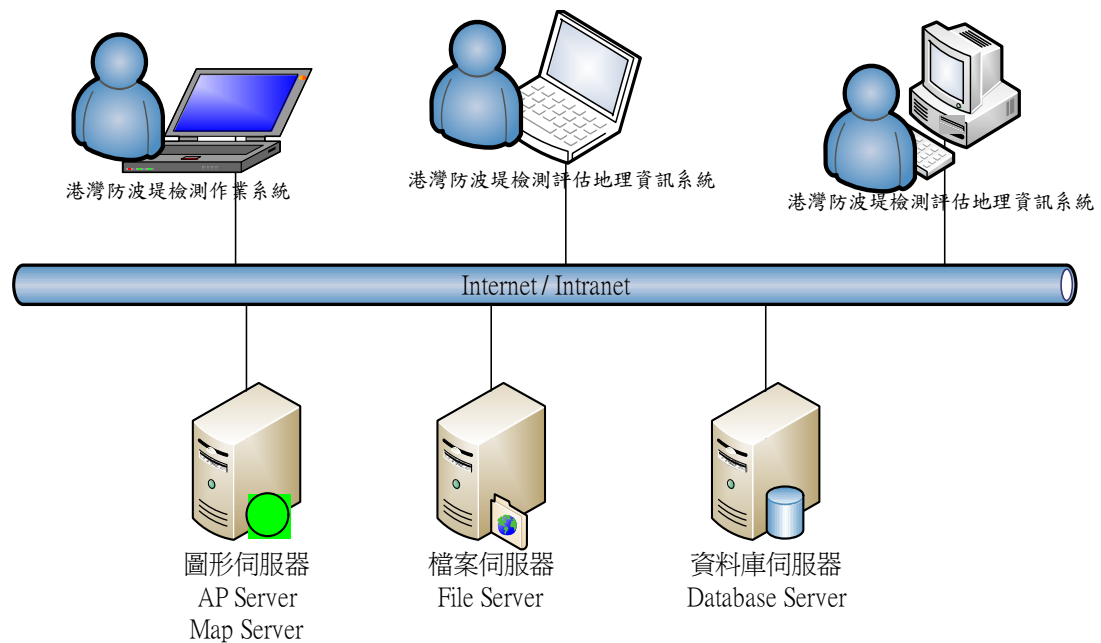


圖 4.16 整體架構說明

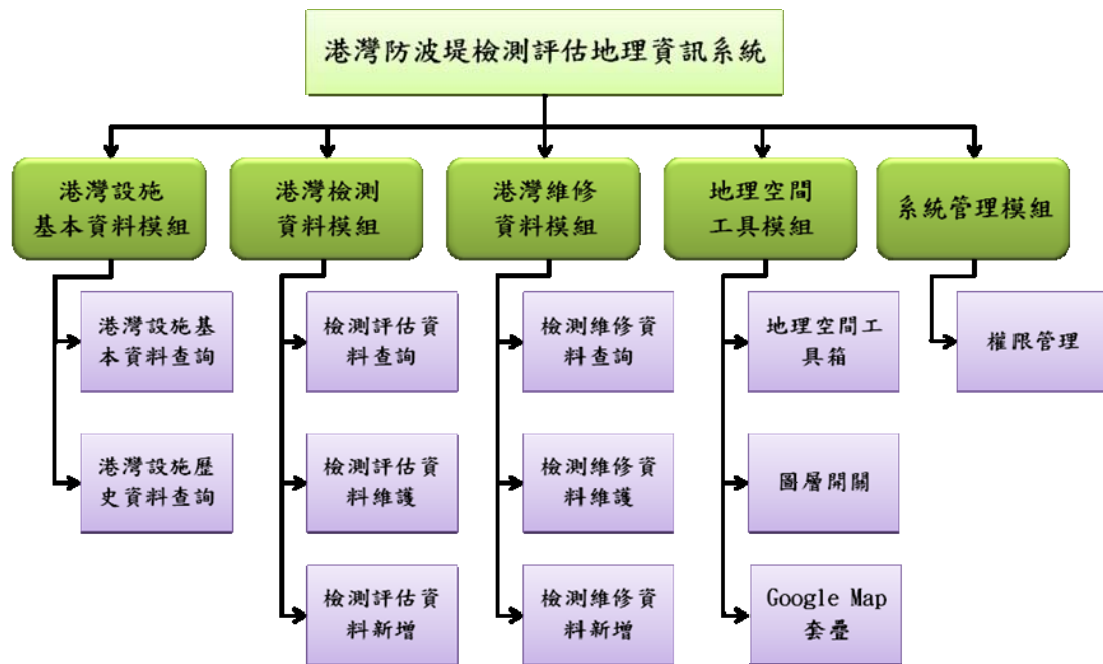


圖 4.17 地理資訊系統功能架構圖

### 3.系統資料庫設計

資料庫系統結構設計對於資訊系統建置與程式設計之理念有著相當大的影響，同時對於日後的擴充也有一定程度的關聯性；因此資料庫的設計必需考量使用者對於資料的需求，有效率地規劃組織原始資料以確保資料庫能滿足使用者的需要，達到系統效能最佳化與系統結構具擴充性等目標。資料庫的設計係一細緻繁瑣的複雜過程，設計之初要將原始資料分類，所需要考量的是使用者的需求。為了完成良好的資料庫設計，首要考慮的是使用者的輸入，設計資料庫的前端程式讓資料庫能方便使用者操作，一旦未將使用者之需求列入考量，在系統的操作上將很難達到最佳化與簡便化。

本計畫現根據防波堤檢測評估等維護管理的資料特性，並依關聯式資料庫之正規化理論進行資料鍵值分析與資料表分割；在資料庫架構的規畫方面，配合系統功能模組之需求，本計畫依據基本資料、檢測資料、維修資料及系統管理，說明資料庫規畫架構。圖 4.18 為防波堤維護管理資料庫整體資料表之關聯圖，由此圖中可以簡單了解資料

表單間的互相關聯性。

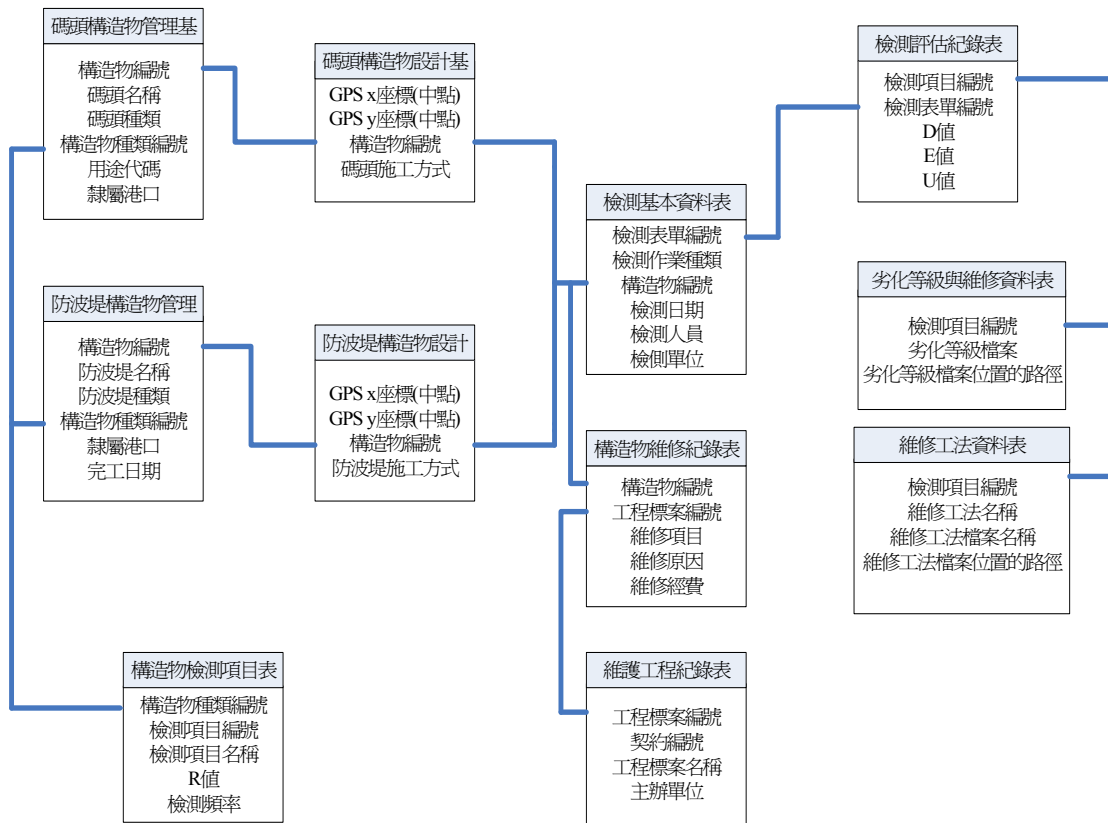


圖 4.18 檢測評估資料庫整體資料表關聯圖

### 4.7.3 資料庫建置

本研究防波堤構造物維護管理系統在資料庫設計，採用美國 Apache 公司所研發的開放式源碼(Java DB)進行建置。Java DB 除可執行用戶端的 SQL 程式，亦可編譯成為 Java bytecode，再以 Java 虛擬器執行。資料庫的置除一般應用程式所使用到的系統管理資料表外，可劃分成基本資料維護資料庫、工程資料維護資料庫、檢測資料維護資料庫等三類，各類資料庫的架構及功能說明如後：

#### 1. 基本資料維護資料庫

基本資料維護資料庫主要係紀錄防波堤構造物的基本屬性，諸如構造物清單、構造物基本資料、構造物檢測位置及檢測項目、劣化程度、損壞範圍分級、維修工法清單、對應維修工法及使用者帳戶管理；其資料表之關聯性及定義分如圖 4.19 及表 4.36~表 4.44 所示。

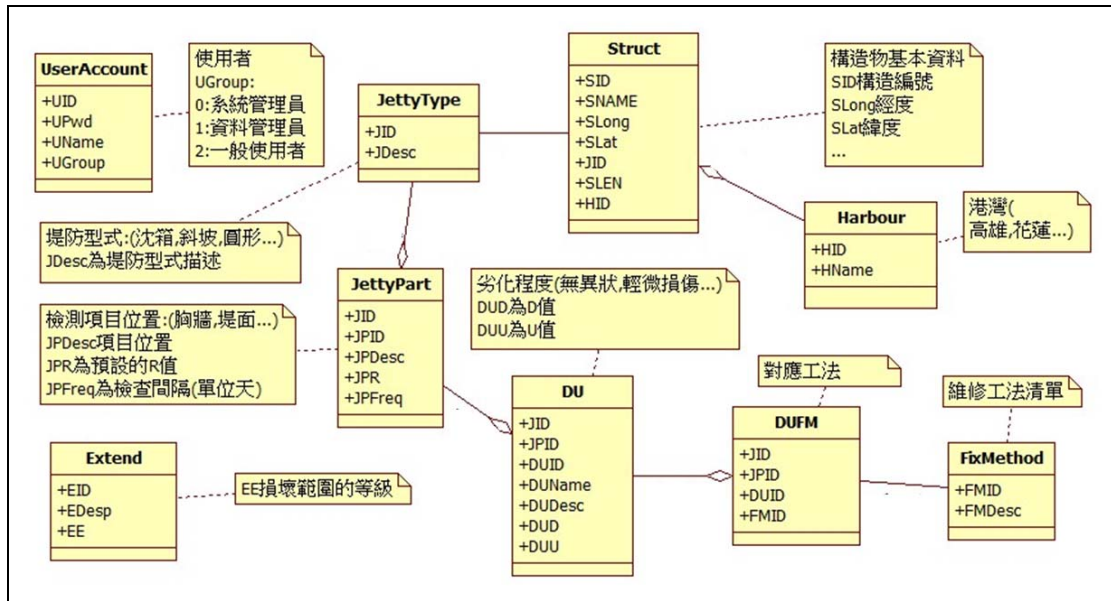


圖 4.19 基本資料維護類別圖



**表 4.36 使用者帳戶表**

|                   |             |                                 |
|-------------------|-------------|---------------------------------|
| 資料表名稱：UserAccount |             | 資料表定義：使用者帳戶表                    |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：UID                        |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱                         |
| UID               | VARCHAR(10) | 代號                              |
| Upwd              | VARCHAR(10) | 密碼                              |
| UName             | VARCHAR(50) | 使 用 者 名 稱                       |
| UG1               | Integer     | 基本資料模組，使用權 0:無法存取 1:可讀取 2:可修改。  |
| UG2               | Integer     | 工程資料維護，使用權 0:無法存取 1:可讀取 2:可修改。  |
| UG3               | Integer     | 檢測資料組護，使用權 0:無法存取 1:可讀取 2:可修改。  |
| UG4               | Integer     | 預留擴充用使用，使用權 0:無法存取 1:可讀取 2:可修改。 |

**表 4.37 堤防型式清單表**

|                   |             |               |
|-------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：JettyType   |             | 資料表定義：堤防型式清單表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：JID      |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄位名稱          |
| JID               | VARCHAR(2)  | 型式代號          |
| JDesc             | VARCHAR(50) | 型式說明          |

**表 4.38 堤防檢測位置及項目表**

|                   |             |                  |
|-------------------|-------------|------------------|
| 資料表名稱：JettyPart   |             | 資料表定義：堤防檢測位置及項目表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：JPNO        |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱          |
| JPNO              | VARCHAR(2)  | 代號               |
| JID               | VARCHAR(2)  | 堤防型式代號           |
| JPID              | VARCHAR(5)  | 檢測位置代號(BA101...) |
| JPDesc            | VARCHAR(50) | 檢測位置說明           |
| JPR               | Integer     | R 值(影響範圍)        |
| JPFreq            | Integer     | 檢測間隔時間(天)        |

**表 4.39 劣化程度清單表**

|                   |              |                  |
|-------------------|--------------|------------------|
| 資料表名稱：DU          |              | 資料表定義：劣化程度清單表    |
| 使用的索引：Primary Key |              | 索引欄位：DUNO        |
| 欄位代號              | 欄位型態         | 欄 位 名 稱          |
| DUNO              | VARCHAR(2)   | 代號               |
| JID               | VARCHAR(2)   | 堤防型式代號           |
| JPID              | VARCHAR(5)   | 檢測位置代號(BA101...) |
| DUID              | VARCHAR(2)   | 劣化程度代號           |
| DUName            | VARCHAR(50)  | 劣化程度名稱           |
| DUDesc            | VARCHAR(100) | 劣化程度描述           |
| DUD               | Integer      | D 值(劣化程度)        |
| DUU               | Integer      | U 值(急迫性指標)       |

**表 4.40 維修工法清單表**

|                   |             |               |
|-------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：FixMethod   |             | 資料表定義：維修工法清單表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：FMID     |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱       |
| FMID              | VARCHAR(5)  | 維修工法代號        |
| FMDesc            | VARCHAR(50) | 維修工法名稱        |
| FMGuide           | BLOB        | 相關規範說明        |

**表 4.41 維修工法對應表**

|                   |            |                  |
|-------------------|------------|------------------|
| 資料表名稱：DUFM        |            | 資料表定義：維修工法對應表    |
| 使用的索引：Primary Key |            | 索引欄位：DUFMNO      |
| 欄位代號              | 欄位型態       | 欄 位 名 稱          |
| DUFMNO            | VARCHAR(2) | 代號               |
| JID               | VARCHAR(2) | 堤防型式代號           |
| JPID              | VARCHAR(5) | 檢測位置代號(BA101...) |
| DUID              | VARCHAR(2) | 劣化程度代號           |
| FMID              | VARCHAR(5) | 維修工法代號           |

**表 4.42 損壞範圍分級表**

|                   |             |               |
|-------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：Extend      |             | 資料表定義：損壞範圍分級表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：EID      |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱       |
| EID               | VARCHAR(2)  | 損壞範圍分級代號      |
| EDesp             | VARCHAR(50) | 損壞範圍說明        |
| EE                | Integer     | 損壞範圍指標值       |

**表 4.43 港灣清單表**

|                   |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|
| 資料表名稱：Harbour     |             | 資料表定義：港灣清單表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：HID    |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱     |
| HID               | VARCHAR(2)  | 港灣代號        |
| HName             | VARCHAR(50) | 港灣名稱        |

**表 4.44 構造物基本資料表**

|                   |             |                |
|-------------------|-------------|----------------|
| 資料表名稱：Struct      |             | 資料表定義：構造物基本資料表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：SID       |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱        |
| HID               | VARCHAR(2)  | 港灣代號           |
| SID               | VARCHAR(5)  | 構造物代號          |
| SName             | VARCHAR(50) | 構造物名稱          |
| SLong             | DOUBLE      | 經度             |
| Slat              | DOUBLE      | 緯度             |
| JID               | VARCHAR(2)  | 堤防型式代號         |
| SFDate            | TIMESTAMP   | 完工日期           |
| SJElev            | DOUBLE      | 堤防高程           |
| SJLen             | DOUBLE      | 堤防長度           |
| SJWidth           | DOUBLE      | 堤防寬度           |

## 2.工程資料維護資料庫

工程資料維護資料庫主要係紀錄防波堤構造物的歷史維護資料，諸如維護工程紀錄、維修紀錄及維修項目清單等，其中之關聯性與定義分如圖 4.20 及表 4.45~表 4.47 所示。

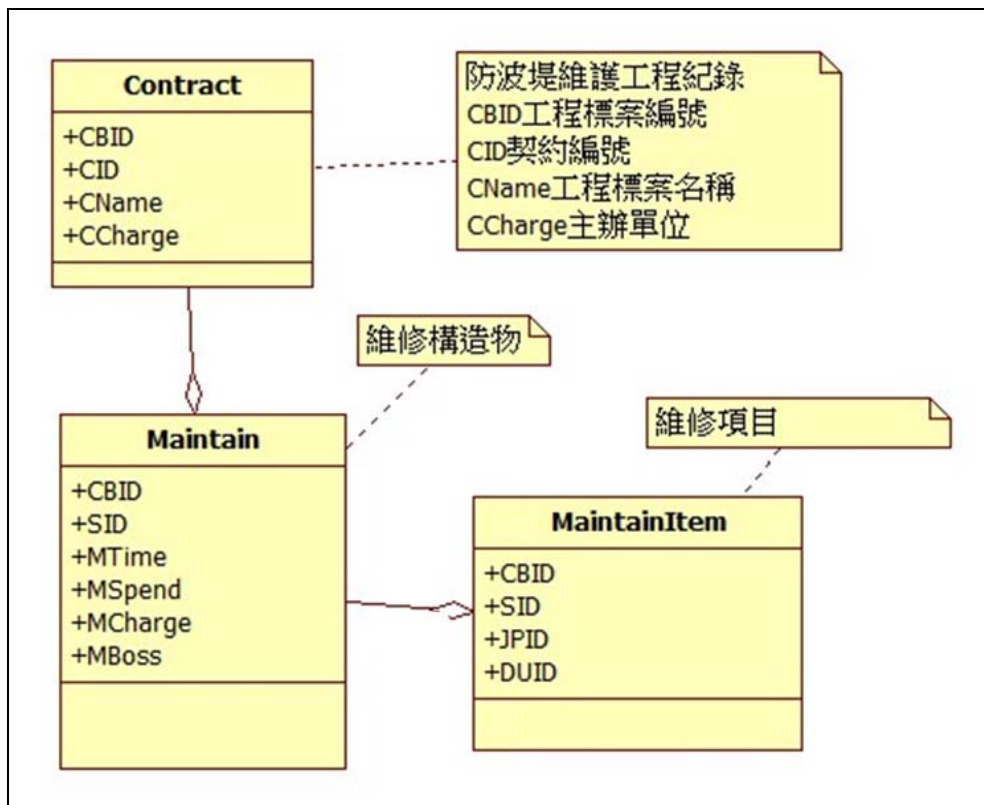


圖 4.20 工程資料維護資料庫類別圖

**表 4.45 構造物基本資料表**

|                   |              |                 |
|-------------------|--------------|-----------------|
| 資料表名稱：Contract    |              | 資料表定義：防波堤維護工程記錄 |
| 使用的索引：Primary Key |              | 索引欄位：CBID       |
| 欄位代號              | 欄位型態         | 欄 位 名 稱         |
| CBID              | VARCHAR(30)  | 工程標案編號          |
| CID               | VARCHAR(30)  | 契約編號            |
| CName             | VARCHAR(200) | 工程標案名稱          |
| CCharge           | VARCHAR(100) | 主辦單位            |
| CPLANE            | VARCHAR(100) | 規畫設計單位          |
| CCONST            | VARCHAR(100) | 施工廠商            |
| CBOSS             | VARCHAR(20)  | 單位主管            |
| CMAN              | VARCHAR(20)  | 負責人             |
| CYEAR             | Integer      | 預算年度(民國)        |
| CBUDGET           | DOUBLE       | 預算金額            |
| CLASTP            | DOUBLE       | 總決算金額           |
| CSTD              | TIMESTAMP    | 開工日期            |
| CLTD              | TIMESTAMP    | 完工日期            |
| CCD               | TIMESTAMP    | 契約工期            |
| CCOMM             | BLOB         | 工程概要            |

**表 4.46 維修紀錄表**

|                   |             |                   |
|-------------------|-------------|-------------------|
| 資料表名稱：Maintain    |             | 資料表定義：維修紀錄表       |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：MNO          |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱           |
| MNO               | VARCHAR(2)  | 代號                |
| CBID              | VARCHAR(30) | 工程標案編號            |
| SID               | VARCHAR(5)  | 構造物代號             |
| MTIME             | TIMESTAMP   | 維修時間(預設為 CSTD)    |
| MBUD              | DOUBLE      | 維修經費(預設為 CBUDGET) |
| MMAN              | VARCHAR(20) | 負責人               |
| MBOSS             | VARCHAR(20) | 單位主管              |

表 4.47 維修項目清單表

|                    |             |               |
|--------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：MaintainItem |             | 資料表定義：維修項目清單表 |
| 使用的索引：Primary Key  |             | 索引欄位：MINO     |
| 欄位代號               | 欄位型態        | 欄 位 名 稱       |
| MINO               | VARCHAR(2)  | 代號            |
| CBID               | VARCHAR(30) | 工程標案編號        |
| SID                | VARCHAR(5)  | 構造物代號         |
| JPID               | VARCHAR(5)  | 檢測位置代號        |
| DUID               | VARCHAR(2)  | 劣化程度代號        |

### 3.檢測資料維護資料庫

檢測資料維護資料庫係紀錄防波堤構造物的歷史檢測資料維護記錄，分為檢測工作及檢測項目記錄等兩種資料表；其中這兩種資料表關聯性如圖 4.21 所示，資料表定義則分如表 4.48 與表 4.49 所示。

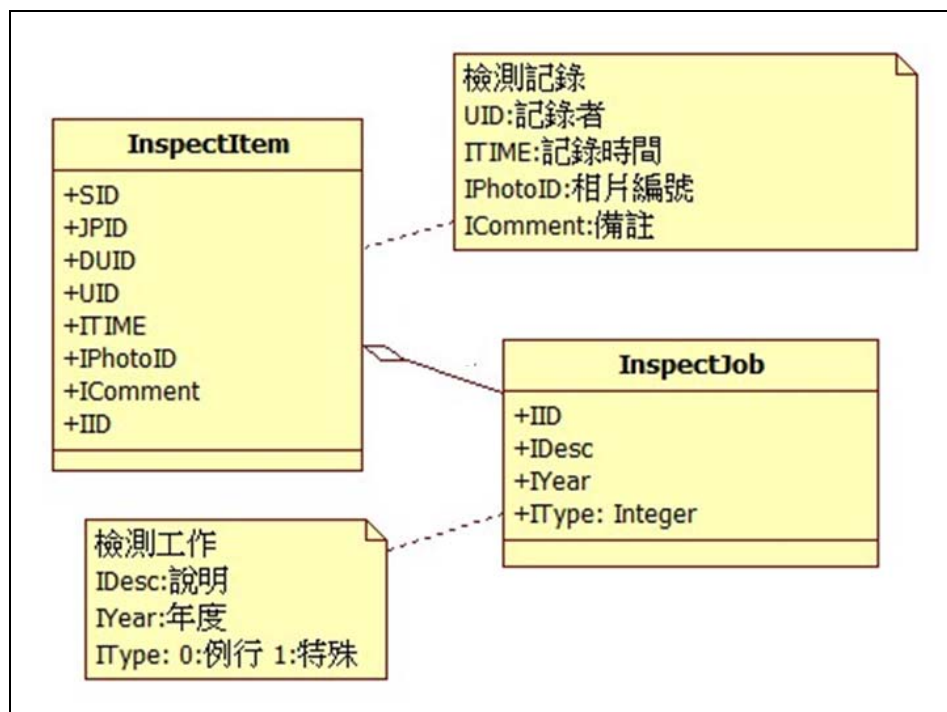


圖 4.21 檢測資料維護資料庫類別圖

**表 4.48 檢測工作記錄表**

|                   |             |               |
|-------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：InspectJob  |             | 資料表定義：檢測工作記錄表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：IID      |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱       |
| IID               | VARCHAR(10) | 檢測工作代號        |
| IDesc             | VARCHAR(50) | 工作說明          |
| IYear             | Integer     | 工作年度(民國)      |
| IType             | Integer     | 0:例行 1:特殊     |

**表 4.49 測項目記錄表**

|                   |             |               |
|-------------------|-------------|---------------|
| 資料表名稱：InspectItem |             | 資料表定義：檢測項目記錄表 |
| 使用的索引：Primary Key |             | 索引欄位：INO      |
| 欄位代號              | 欄位型態        | 欄 位 名 稱       |
| INO               | VARCHAR(2)  | 代號            |
| IID               | VARCHAR(10) | 檢測工作代號        |
| SID               | VARCHAR(5)  | 構造物代號         |
| JPID              | VARCHAR(5)  | 檢測位置代號        |
| DUID              | VARCHAR(2)  | 劣化程度代號        |
| UID               | VARCHAR(10) | 使用者代號         |
| ITIME             | TIMESTAMP   | 記錄時間          |

#### 4.7.4 維護管理資訊系統示範

##### 1. 港灣設施基本資料模組

防波堤基本資料查詢為「港灣設施基本資料查詢」，系統將會依據構造物編號，串聯結構物基本資料及歷年各次檢測及維修紀錄，提供使用者(承辦人員及主管人員)選取所欲查詢設施項目之相關基本資料。如下圖示，設施基本資料查詢(如圖 4.22)，可點選圖面上之設施編號，此時被選取的各該項設施會被標示起來，後可於屬性視窗中看到該項設施的基本屬性資料(如圖 4.23)。另，設施基本資料維護歷程

查詢功能會顯示各項設施資料的異動資訊，查看設施基本資料於何時被修正過。



圖 4.22 防波堤基本資料查詢示意圖

系統登入 高雄港港灣維護 構造物基本資料 檢測系統查詢 新增檢測記錄 系統清單 使用者查詢 維護工程資料查詢

N-01:北外防波堤  
BD  
N-02:北外防波堤  
BD  
N-03:北外防波堤  
BD  
N-04:北外防波堤  
BD  
N-05:北外防波堤  
BD  
N-06:北外防波堤  
BD  
N-07:北外防波堤  
BD  
N-08:北外防波堤  
BD  
N-09:北外防波堤  
BD  
N-10:北外防波堤  
BD  
N-11:北外防波堤  
BD  
N-12:北外防波堤  
BD  
N-13:北外防波堤  
BD  
N-14:北外防波堤  
BD

設施基本資料

構造物編號: N-03 防波堤名稱: 北外防波堤

防波堤種類: BD: 特殊防波堤 完工日期: 2011-11-16

經度(度): 120.3078669 緯度(度): 22.55800742 堤防高程: 0

隸屬港口: 01:高雄港 堤防寬度: 0 堤防長度: 0

新增 修改

圖 4.23 防波堤基本資料屬性表單示意圖



## 2. 港灣設施檢測模組

防波堤檢測資料記錄之功能，可劃分為兩部分，其一為新增檢測資料依據平時巡查、定期檢查及特別檢測等實際內容之對應，以提供巡查及檢測承辦人員完成工作後，各評估結果之填報介面，表單內容依檢測工作項目不同而有差異，主要欄位包含：防波堤編號、檢測項目、檢測日期、檢測內容、劣化程度及檢測人員等，系統將提供自動計算性能指標功能，針對平時巡查發現異常狀況，亦可由平板電腦拍攝異常位置之相片上傳至系統以利判斷。其二為設施檢測資料查詢係以提供條件式查詢功能為主，使用者可透過選定檢測類別、檢測項目或利用輸入設施名稱關鍵字、檢測時間區間等條件，針對設施檢測資料進行交叉查詢，查詢結果列出符合條件，可以使用者權限的不同提供瀏覽、修改、刪除等功能。

## 3. 港灣設施維護模組

維護資料紀錄模組之功能，在於管理及監控維修工作之進度。同時亦可由維修資料之累積，發現劣化之趨勢，若發現維修工作之頻率異常，或服務年限過短，管理單位便可針對此現象深入探討其成因，做出適當決策，避免非必要之花費。以下針對港口之使用單位及管理監控單位所設計之維修資料表詳述如下。

### (1) 港灣設施維修紀錄表

港灣設施維修紀錄表(如表 4.50)，可用於同一工程標案下，受檢構造物在進行檢測評估之後，檢測作業人員可針對單一防波堤，建立各別維修紀錄表，除可讓使用者對修復的項目內容有初步的認識，亦可由歷史維修紀錄表了解過去該防波堤所做過的維修項目。

表 4.50 港灣設施維修紀錄表

|                             |           |                                                       |                               |      |
|-----------------------------|-----------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|------|
| 工程標案編號                      |           |                                                       | 防波堤編號(區段)                     |      |
| 維修時間                        |           | 年 月 日                                                 | 維修經費                          |      |
| 負責人                         |           |                                                       | 單位主管                          |      |
| 維修項目                        |           | 是否維修                                                  |                               | 維修原因 |
| 水上部分                        | 開孔胸牆/消波槽室 | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷 |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 剝離   |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露 |      |
|                             | 堤面混凝土     | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷 |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露 |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 沉陷   |      |
|                             | 沉箱本體結構    | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷 |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露 |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 傾斜   |      |
| <input type="checkbox"/> 變位 |           |                                                       |                               |      |
| 水下部分                        | 沈箱        | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷 |      |
|                             | 護基方塊      | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 變位   |      |
|                             | 消波塊       | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 沉陷   |      |
|                             |           |                                                       | <input type="checkbox"/> 滑落   |      |
|                             | 基礎海床      | <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 無 | <input type="checkbox"/> 沖刷   |      |

(2)港灣設施維護工程紀錄表

港灣設施維護工程紀錄表(如表 4.51),可用於管理及監控構造物維修工作之進度。結構物開始進行修復,便可由工程標案對應紀錄其維修工作規劃設計單位、承包商名稱、負責人、預算決算金額、實際維修數量及完成日期,管理者可由此紀錄表進行維修工作的管理,可輕易辨識整體結構物維修工作是否完成。

表 4.51 港灣設施維護工程紀錄表

|        |               |                                |                                     |                               |                             |
|--------|---------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 工程標案編號 |               | 契約編號                           |                                     |                               |                             |
| 工程標案名稱 |               | 主辦單位                           |                                     |                               |                             |
| 規劃設計單位 |               | 施工廠商                           |                                     |                               |                             |
| 單位主管   |               | 負責人                            |                                     |                               |                             |
| 預算年度   |               | 預算金額                           |                                     |                               |                             |
| 決標金額   |               | 變更設計金額                         |                                     |                               |                             |
| 總決算金額  |               |                                |                                     |                               |                             |
| 開工日期   | 年 月 日         | 契約工期                           | 年 月 日                               |                               |                             |
| 完工日期   | 年 月 日         |                                |                                     |                               |                             |
| 上次維修日期 | 年 月 日         | 上次維修項目                         | <input type="checkbox"/> 開孔胸牆/ 消波槽室 |                               |                             |
|        |               | <input type="checkbox"/> 堤面混凝土 | <input type="checkbox"/> 沉箱         |                               |                             |
|        |               | <input type="checkbox"/> 護基方塊  | <input type="checkbox"/> 消波塊        |                               |                             |
|        |               | <input type="checkbox"/> 基礎海床  |                                     |                               |                             |
| 本次維修項目 | 維 修 原 因       |                                |                                     |                               |                             |
| 水上部分   | 開孔胸牆/<br>消波槽室 | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷  | <input type="checkbox"/> 剝離         | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露 |                             |
|        | 堤面混凝土         | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷  | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露       | <input type="checkbox"/> 沉陷   |                             |
|        | 沉箱本體結構        | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷  | <input type="checkbox"/> 鋼筋外露       | <input type="checkbox"/> 變位   | <input type="checkbox"/> 傾斜 |
| 水下部分   | 沈 箱           | <input type="checkbox"/> 龜裂損傷  |                                     |                               |                             |
|        | 護基方塊          | <input type="checkbox"/> 變位    |                                     |                               |                             |
|        | 消 波 塊         | <input type="checkbox"/> 沉陷    | <input type="checkbox"/> 滑落         |                               |                             |
|        | 基礎海床          | <input type="checkbox"/> 沖刷    |                                     |                               |                             |
| 工程概要   |               |                                |                                     |                               |                             |

#### 4.港灣設施系統管理模組

本系統依實際執行之需要，針對系統中使用者管理機制及權限管制作業進行設計。本系統各作業權責要點成果，建置權限授權方式分如下述。

- (1)授權邏輯：系統管理者可依據不同屬性授予使用者系統功能之使用權限。
- (2)權限設定：本研究所擬維護管理相關作業要點授予單位業務權責，各單位及依據各別業務權責應可操作之系統權限。
- (3)群組權限之差異主要位系統頁面是否可透視及是否編輯之管控，例如一般使用者僅能瀏覽系統查詢頁面，不可編輯。
- (4)使用者權限管理：建立基本資料時，即編制所屬單位，依單位所具有權限授予同仁操作權限。
- (5)系統預設群組單位：一般單位、巡查單位、檢測單位、維修單位、管理階層及系統管理等群組。

#### 4.7.5 平板電腦系統建置及展示

本研究利用以 Linux 為基礎開放原始碼的 Android 作業系統，進行港灣構造物維護管理資訊系統在平板電腦等行動裝置上的開發及應用工作。當港灣構造物維護管理資訊系統使用於行動裝置上，檢測人員即可攜帶平板電腦至現場進行檢測資料蒐集作業，並可即時透過網際網路將完成巡檢工作後檢測資料上傳至主機，然後就可進入管理端系統查閱檢測完成的相關資料，系統流程圖如圖 4.24 所示。

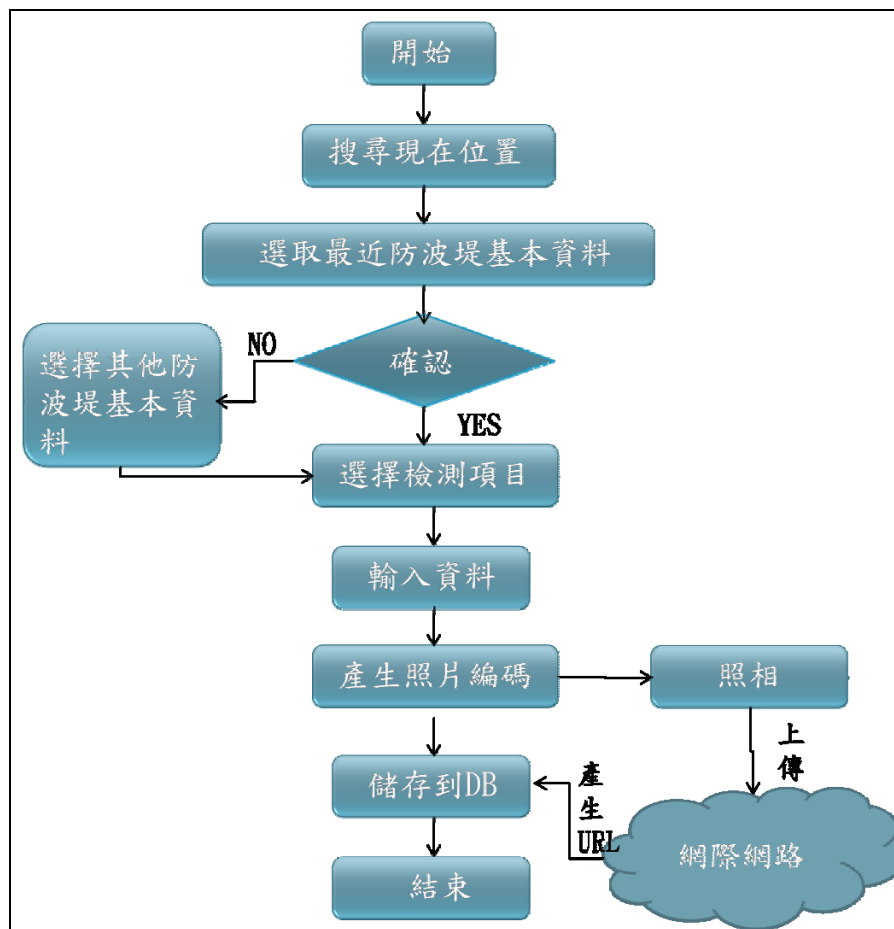


圖 4.24 系統作業流程圖

巡查作業人員可利用將防波堤構造物維護管理資訊系統延伸至平板電腦之管理系統，以進行港灣構造物檢測作業。除方便提供現場作業人員進行檢測資料之上傳/下載資料同步等功能，亦可進行相關檢測評估資料之查詢作業、檢測評估數值統計、檢測評估結果展示查詢與檢測維修方式等。相關平板電腦使用展示分如圖 4.25 至圖 4.33 所示，經登入畫面後可藉由接收 GPS 搜尋現在位置，亦可由巡查人員自行選擇待檢構造物。當確認防波堤構造物編號後，即可開始填寫表單，並可由平板電腦所拍攝異常位置之相片與檢測表單一併回傳於 Java DB 資料庫中儲存，以利系統資料之一致性與整合性。



圖 4.25 系統登入畫面圖

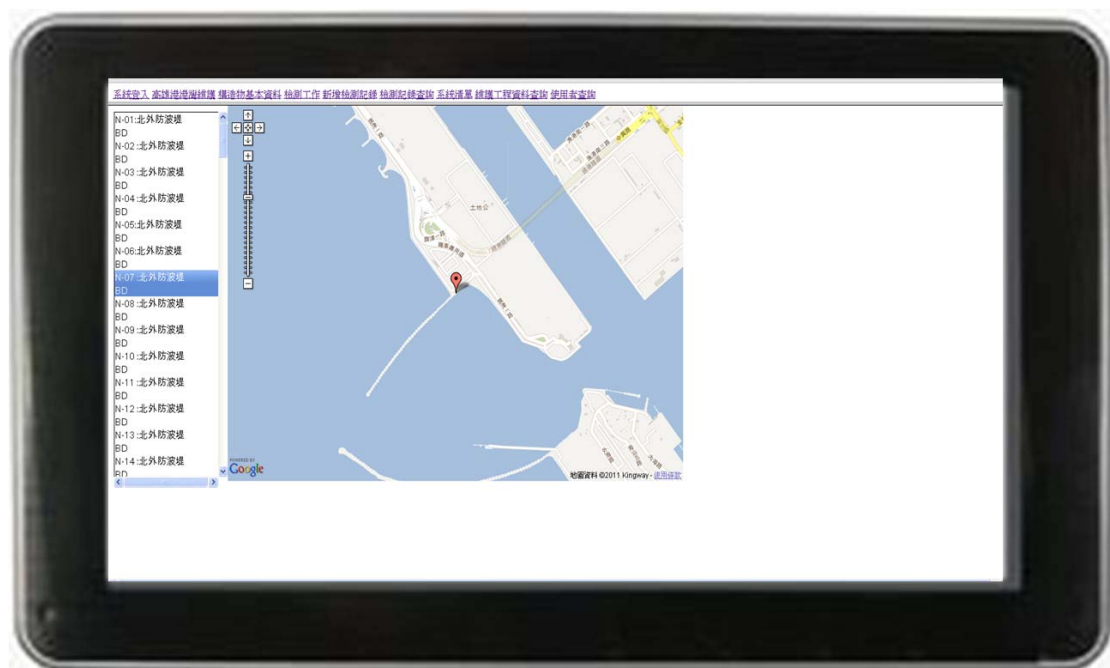


圖 4.26 自動搜尋位置圖



圖 4.27 設施基本資料查詢圖



圖 4.28 檢測系統清單圖

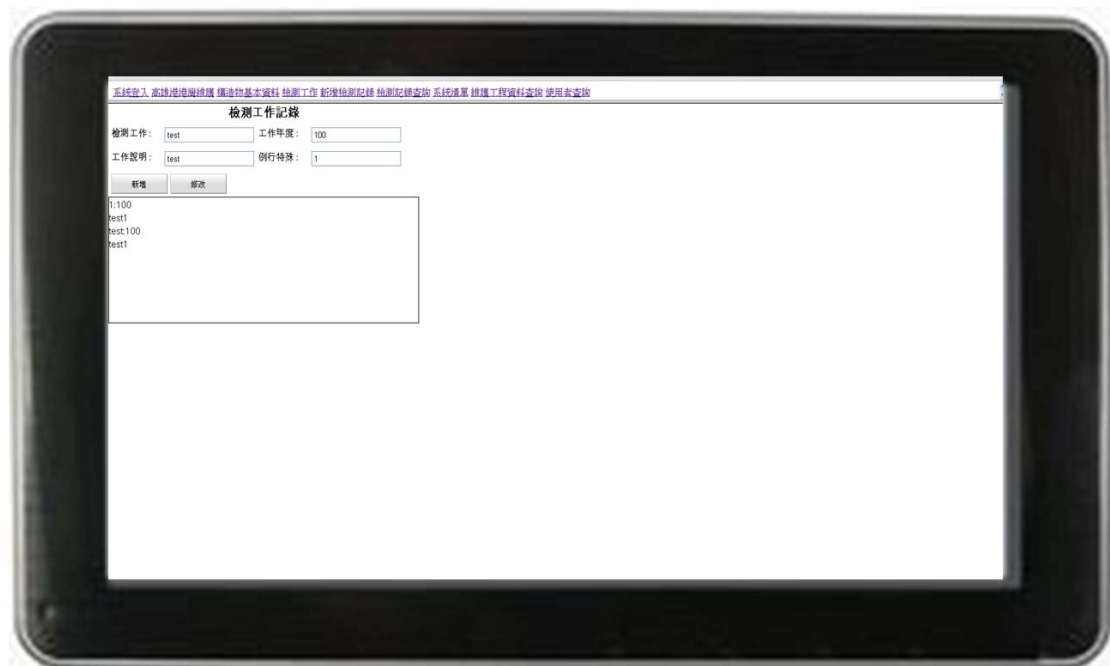


圖 4.29 檢測工作查詢圖



圖 4.30 新增檢測記錄圖



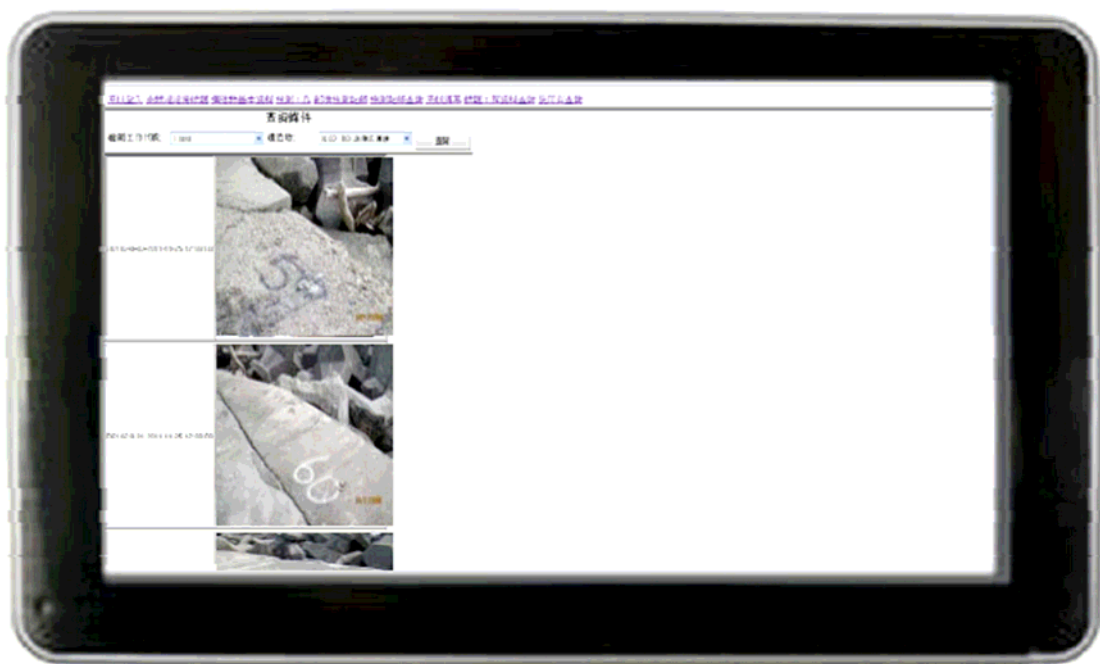


圖 4.31 檢測記錄查詢圖



圖 4.32 維護記錄查詢圖

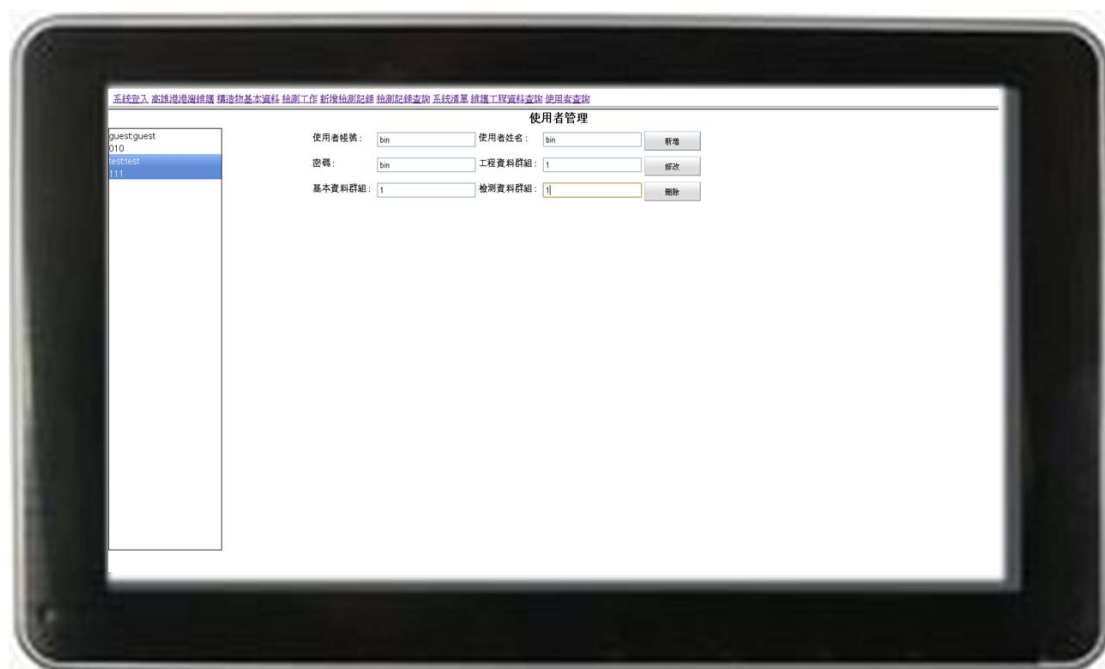


圖 4.33 使用者管理圖

## 第五章 海嘯對防波堤構造物之影響探討

近年來海嘯造成之災難事件頻傳，如 2004 年南亞海嘯、2011 年日本海嘯等，均造成各地無數生命財產之嚴重損失，故海嘯漸成為近年除氣候變遷外另一熱門之課題。近百年來臺灣雖無災難性海嘯記錄，但未雨綢繆，仍有必要對臺灣幾個主要港口進行海嘯對外闊防波堤構造物之影響探討，本計畫於本年度首先針對高雄港辦理初步的研究分析。高雄港位於臺灣海峽大陸棚邊緣，水深較淺且地勢平緩，有助於海嘯能量堆積；且臺灣南部緊鄰馬尼拉海溝，有潛在發生大規模地震之可能，萬一因強裂地震引發大規模海嘯，將可能造成結構物承受之波壓增加，超出原設計條件而造成破壞，故有必要針對此部份問題進行進一步之探討，以避免更嚴重之災損發生。

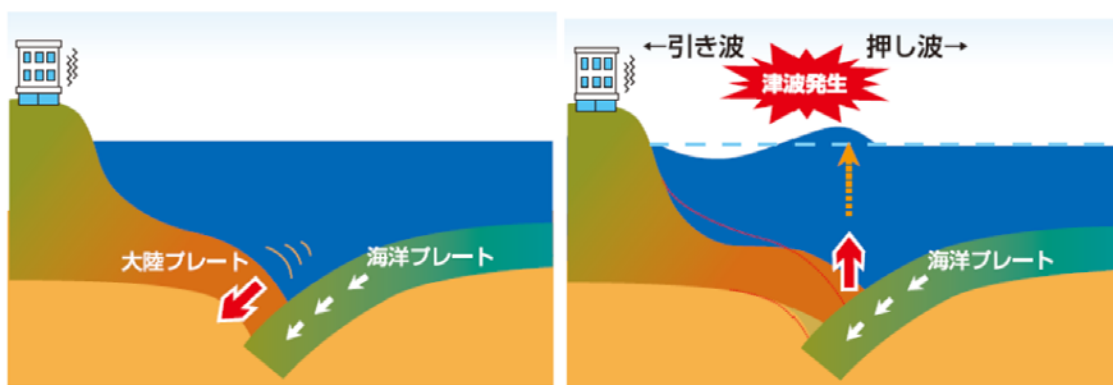
### 5.1 海嘯成因

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

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

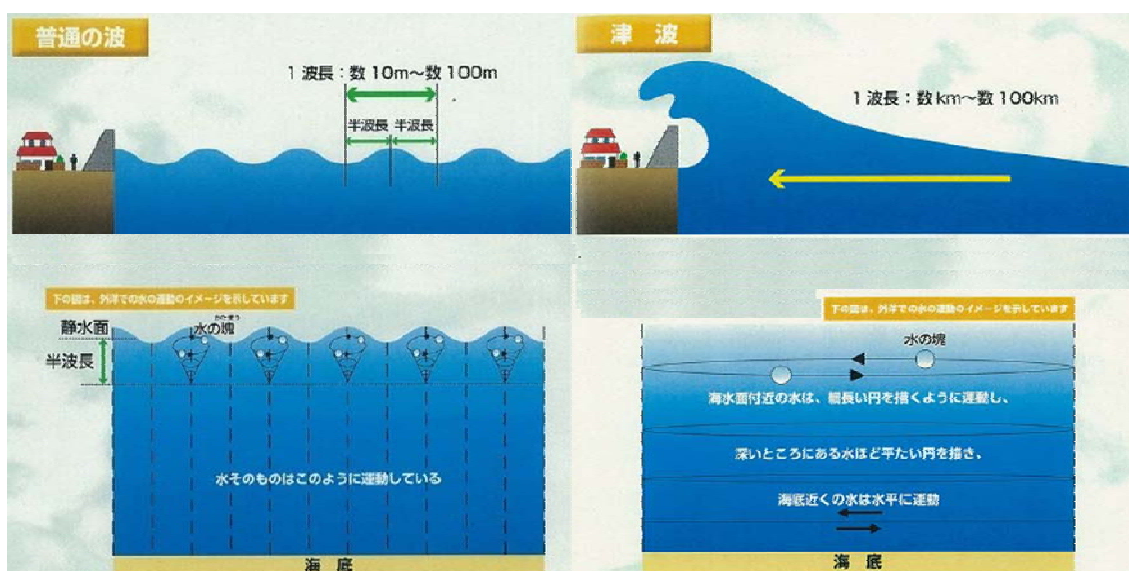
### 5.2 海嘯強度與規模

現有海嘯強度(intensity)等級與海嘯規模(magnitude)乃類似地震強度等級與地震規模大小，將海嘯強度的等級以海嘯的影響程度作定性上的區別，而海嘯規模則是以具有物理意義之參數如海嘯波高等將海嘯的影響作量化的區別。Sieberg(1927)仿照地震強度分級之概念，依據海嘯對人類及目標物(如船隻及建築物等)巨觀的影響程度，將海嘯強度分為非常輕微的，輕微的，略強烈的，強烈的，非常強烈的以及災難性的等六個等級。之後，Ambraseys (1962)針對 Sieberg 海嘯強度分級提出較詳細的描述，修正後的版本稱之為 Sieberg-Ambraseys 或修正版的 Sieberg 六等級之海嘯強度，如表 5.1 所示。



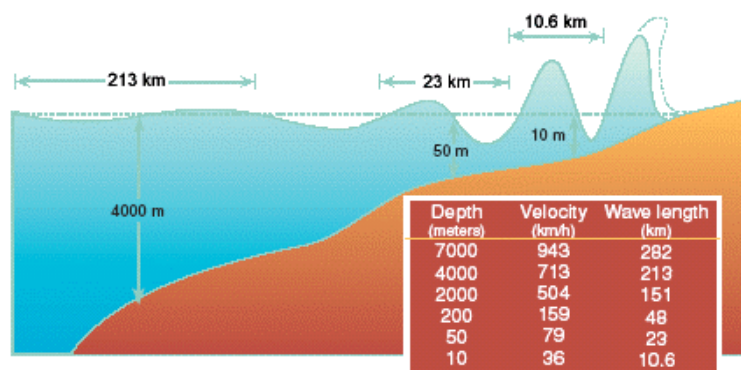
資料來源：日本港湾空港技術研究所

圖 5.1 海嘯生成之示意圖



資料來源：日本港湾空港技術研究所

圖 5.2 一般波浪與海嘯之比較圖



資料來源：國立中央大學水文與海洋科學研究所

圖 5.3 海嘯抵達岸邊之放大效應

表 5.1 Sieberg-Ambraseys 海嘯強度等級分類

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

|    |                      |                                                            |
|----|----------------------|------------------------------------------------------------|
|    |                      | 港灣設施損毀，人員亦被淹死，海嘯波並伴隨巨大之呼嘯轟鳴聲。                              |
| VI | 災難性的<br>(Disastrous) | 部份或全部之結構物被推移至離海岸處相當距離遠，近岸處淹水嚴重，大型船隻損毀解體，樹木被連根拔，並造成嚴重之人員傷亡。 |

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

在日本，Imamura(1942,1949)首先根據海嘯波高之大小將海嘯規模大小量化描述，並將海嘯規模(m)分為 0~4 級。之後，Iida(1956,1967)進一步在海嘯規模 0 級之下增加一個-1 等級，成為-1~4 六個等級，稱為今村-飯田(Imamura-Iida)海嘯規模，如表 5.2 所示，並定義為：

表 5.2 Imamura-Iida 海嘯規模分級表

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

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

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

式中  $H_{\max}$  為海岸上觀測到的或潮位計記錄的最大海嘯波高。然而，以海嘯波高對海嘯規模大小量化，並無法做到如地震模規分級般之具體化，因此 Soloviev (1970)認為若以地震學專門術語觀點而言，今村-飯田海嘯規模分級實際上仍屬於海嘯強度分級的一種。至此，除了

今村與飯田之分級外，相類似之定義均稱為“海嘯強度”。而 Soloviev (1970)提出以平均海嘯波高定義海嘯強度如下：

$$I_s = \log_2 \cdot \sqrt{2} \cdot H \quad (5.2)$$

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

$$i_s = \log_2 \cdot H \quad (5.3)$$

並將海嘯強度分為 0~5 六個等級，其中  $i_s=0$  代表海嘯波高小於 1.0m， $i_s=5$  代表海嘯波高大於 32.0m。Shoto (1994)綜整了海嘯災害所引致建築物受損程度之分類(如圖 5.4)，其中黑色標註為 1993 年 Okushiri 海嘯帶來之災損資料，至於空白標註則為 1993 年前之海嘯災損經驗資料。Papadopoulos 及 Imamura (2001)進一步提出新的 12 級海嘯強度分級，如表 5.3 所示，新的海嘯規模分級觀念主要依據海嘯對人類、含船隻在內之物體以及建築物等的影響程度進行詳細的分類，同時與海嘯波高大小作一粗略的關連性描述。其中海嘯強度 I~V 級代表海嘯波高小於 1.0m，海嘯強度 VI 級之海嘯波高等於 2.0m，海嘯強度 VII~VIII 等級相當於海嘯波高等於 4.0m，海嘯強度 IX~X 等級相當於海嘯波高等於 8.0m，海嘯強度 XI 及 XII 等級分別相當於海嘯波高等於 16.0m 及 32.0m 之威力。

表 5.3 海嘯強度等級分類(2001)

| 強度  | 海嘯描述                                    | 海嘯可能的影響之描述                                                                                                                                |
|-----|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I   | 完全無感的<br>(Not felt)                     | (1)無感覺。<br>(2)無影響性。<br>(3)無災損。                                                                                                            |
| II  | 幾乎無感的<br>(Scarcely felt)                | (1)僅少數人坐在小船上可感受到，但沿海近岸區無任何人觀察到。<br>(2)無影響性。<br>(3)無災損。                                                                                    |
| III | 弱的<br>(Weak)                            | (1)多數人坐在小船上可感受到，沿海近岸區有少數人觀察到。<br>(2)無影響性。<br>(3)無災損。                                                                                      |
| IV  | 大到可被觀察的<br>(Largely bserved)            | (1)所有人坐在小船上與少數人坐在大船上可感受到，沿海近岸區有大多數人觀測到。<br>(2)一屆小型船隻會慢慢受海嘯波影響往近岸移動。<br>(3)無任何人員傷亡及結構物損壞。                                                  |
| V   | 強烈的<br>(Strong)<br>(波高約 1m)             | (1)坐在大船上可感受到，沿海近岸區所有人可觀測到，少數人並驚慌害怕的往高處地方跑動。<br>(2)大多數小型船隻會劇烈的往近岸移動，少數船隻並互相撞擊甚至翻覆，近岸底床砂層運移，陸域地區有局部性之淹水情形。<br>(3)戶外設施(如公園)與近岸之海岸結構物有局部淹水情形。 |
| VI  | 輕微災害型的<br>(Slightly maging)<br>(波高約 2m) | (1)大多數人驚慌害怕的往高處地方跑動。<br>(2)大多數小型船隻非常劇烈得往近岸移動、互相撞擊與翻覆。<br>(3)一屆木製結構物或設施有損毀或淹水情形，大多數之石造結構物尚經得起海嘯波侵襲。                                        |

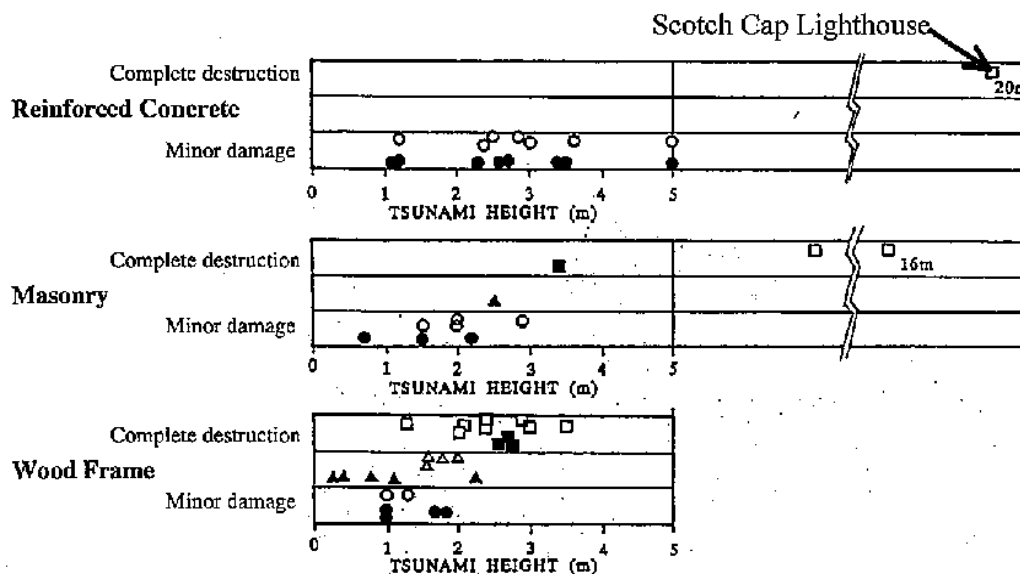


| 強度   | 海嘯描述                                   | 海嘯可能的影響之描述                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VII  | 災害型的<br>(Damaging)<br>(波高約 4m)         | <p>(1)大多數人驚慌害怕並往更高處地方跑動。</p> <p>(2)大多數小型船隻損毀，少數大型船隻劇烈振盪搖擺，部份船隻因而翻覆與漂移遠去，近岸底床砂層與小卵石道路等將被海嘯波衝擊而移至它處，一起養殖平台設施亦將被沖走。</p> <p>(3)大多數木製結構物或設施損毀，少數翻覆並隨海嘯波被沖走，損壞等級為 1 而少數石造結構物有淹水情形。</p>                                                              |
| VIII | 嚴重災害型的<br>(Heavily maging)<br>(浪高約 4m) | <p>(1)所有人驚慌害怕往高處地方逃跑，一起人並會被水流沖走。</p> <p>(2)大多數小型船隻損毀，另有多數船隻將被沖走，一些大型船隻往近岸漂移並互相撞擊，大型物品將被海嘯波衝擊而移至它處，但若遇到森林樹木阻擋則可停止漂移。海岸地形將產生侵蝕現象，大多數養殖平台設施亦將被沖走，少數因而損毀。</p> <p>(3)大多數木製結構物或設施損毀或被沖走，少數石造結構物受損等級為 2。大多數鋼筋混凝土結構物可承受受損，少數受損程度為 1 並有大範圍區域之淹水現象。</p> |
| IX   | 破壞性的<br>(Destructive)<br>(波高約 8m)      | <p>(1)大多數人被水流沖走。</p> <p>(2)大多數小型船隻損毀解體並被水流帶走，大多數大型船隻往近岸漂移並互相撞擊，少部份則有損壞情形。海岸地形將擴大侵蝕範圍，大多數養殖平台設施損壞與被水流沖走。</p> <p>(3)大多數石造結構物受損等級為 3，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 2 之損毀。</p>                                                                                  |
| X    | 嚴重破壞性的<br>(波高約 8m)                     | <p>(1)引起大恐慌，大多數人被水流沖走。</p> <p>(2)大多數大型船隻劇烈往近岸漂移並互相撞擊，有許多船隻因而破裂解體並撞擊陸域結構物。小型圓卵石將從海床上被沖擊至岸上，汽車翻覆並隨之漂移，石油氣溢出並造成火災，大範圍之陸地有下陷之情形。</p> <p>(3)大多數石造結構物受損等級為 4，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 3 之損毀，人造堤防倒塌，港灣防波堤損毀。</p>                                              |

| 強度  | 海嘯描述                                            | 海嘯可能的影響之描述                                                                                                                            |
|-----|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| XI  | 毀滅性的<br>(devastating)<br>(波高約 16m)              | (2)維生系統被打斷阻隔，大範圍區域產生火災，海嘯引起之下刷水流將汽車與其它物品沖移至海上，而大型圓卵石將從海床上被水流拍擊至岸上。<br>(3)大多數石造結構物受損等級為 5，少數鋼筋混凝土結構物可承受等級 4 之損毀，許多鋼筋混凝土結構物可承受等級 3 之損毀。 |
| XII | 完全毀滅性的<br>(Completely devastating)<br>(波高約 32m) | (3)所有石造結構物損壞解體，大多數鋼筋混凝土結構物可承受等級 3 之損毀。                                                                                                |

註：(1)對人類、(2)對含船隻在內之物體、(3)對建築物等影響程度之描述

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



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

圖 5.4 Shuto(1994)所整理之海嘯災害與建築物受損程度分類

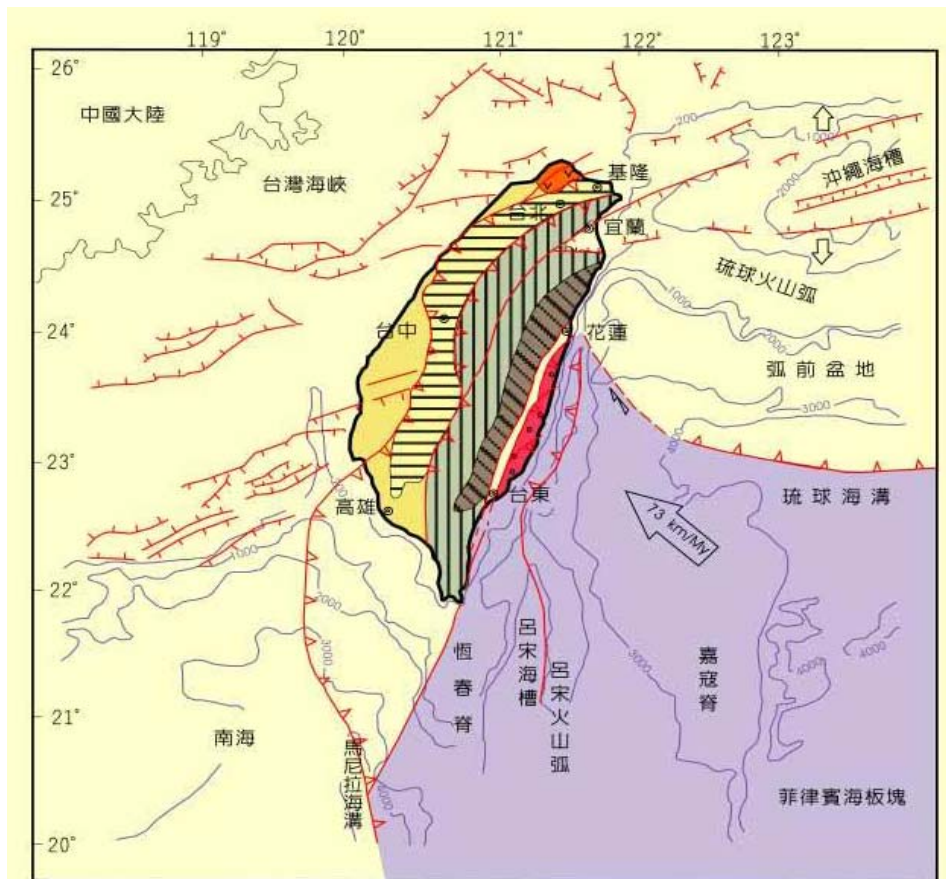
### 5.3 國內外海嘯資料蒐集與分析

2004 年於印尼發生之大海嘯造成印度洋沿岸國家數十萬人之傷亡，並促使各大濱海國家建立海嘯防災及預警機制以儘可能減低災

損。但 2011 年 3 月 11 日時，日本外海發生規模 9.0 之地震，引發大規模海嘯重創日本東北與關東地區，其驚人之破壞與災損影像透過各類媒體傳播震驚全世界，並再次引起國際間對海嘯與防災課題之重視，故此類異常氣候所造成之影響實有探討之必要。

### 5.3.1 國內海嘯資料蒐集與分析

臺灣位處太平洋板塊及歐亞板塊之交界地帶，東側有沖繩海槽與琉球海溝，南側則有馬尼拉海溝(如圖 5.5 所示)，易產生斷層滑動而導致地震活動，故有發生大規模地震之潛在危機；另依氣象局統計 1991～2006 年 16 年的觀測資料顯示，臺灣地區平均每年約發生 18,500 次地震，其中約有 1,000 次為有感地震，可見地震頻率相當頻繁，因此臺灣遭受海嘯侵襲之潛在威脅仍不可忽視。



資料來源：中央地質調查所

圖 5.5 臺灣鄰近海域斷層分佈

參考中央氣象局報告及近年學者整理野史資料，表列臺灣地區近年疑似及未有實測紀錄之海嘯及有實測記錄之海嘯如表 5.4 及表 5.5 所示。由表可知，臺灣近百年來雖未有災難性海嘯之記錄，但依照野史資料分析可知，臺灣海域亦可能曾發生多次災害性的海嘯，雖多無觀測數據記錄可供佐證，且年代久遠，其可信度尚須驗證，但仍可發現臺灣南、北及東部均有發生海嘯之潛在危機，故仍有發生海嘯之可能。

表 5.4 臺灣近岸疑似及未有實測紀錄之海嘯列表

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

資料來源：中央氣象局，本研究整理

表 5.5 臺灣近岸有實測記錄之海嘯列表(1951~2006)

| 時 間     | 震央位置 | 台灣之海嘯記錄                                                                                   | 備註/資料來源                                                |
|---------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1951.10 | 花蓮外海 | 花蓮驗潮儀有海嘯記錄，波高幾十公分                                                                         | 地震規模 7.3<br>徐明同（1981）                                  |
| 1960.5  | 智利   | 基隆、花蓮、南方澳、恆春等均有水位異常記錄，高度約數十公分~2 公尺不等                                                      | 地震規模 9.5，史上規模最強之地震<br>徐明同（1981）<br>聯合報/中央日報(民 49.5.25) |
| 1963.10 | 千島   | 花蓮有十幾公分海嘯                                                                                 | 地震規模 7.0<br>徐明同（1981）                                  |
| 1964.3  | 阿拉斯加 | 花蓮 15cm                                                                                   | 地震規模 8.4<br>徐明同（1981）                                  |
| 1986.11 | 花蓮外海 | 花蓮 2m/台東富崗 13cm                                                                           | 地震規模 8.4<br>許明光(1994)/陳建宏(1994)<br>羽鳥德太郎（1994）         |
| 1993.8  | 關島   | 花蓮 29cm/成功 27cm                                                                           | 地震規模 8.0<br>陳建宏(1994)中央氣象局海象中心                         |
| 1996.2  | 印尼   | 成功 55cm/基隆 25cm/鹽寮 30cm                                                                   | 地震規模 8.1<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 1996.9  | 蘭嶼南方 | 梗枋 6cm/蘇澳 8cm/成功 22cm                                                                     | 地震規模 7.1<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 1998.5  | 花蓮東南 | 蘭嶼 7.4cm                                                                                  | 地震規模 7.0<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 1999.9  | 南投   | 花蓮 21.4cm/成功 5.9cm                                                                        | 地震規模 7.3(921 大地震)<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心               |
| 1999.11 | 萬那度  | 富基 18cm/鼻頭 19cm/馬岡 38cm/蘇澳 11cm                                                           | 地震規模 7.1<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 2001.12 | 花蓮東南 | 梗枋 14.2cm/蘇澳 16.2cm/和平港/10cm                                                              | 地震規模 6.7<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 2002.3  | 花蓮東南 | 梗枋 16.5cm/蘇澳 27.3cm/和平港 18.6cm/花蓮 18.5cm/成功 22.6cm                                        | 地震規模 6.8 (331 大地震)<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心              |
| 2002.12 | 台東   | 成功 59.3cm/大武 22.8cm/後壁湖 20.7cm/蘇澳 15.6cm/將軍 15.4cm/永安 14.2cm/安平 13.8cm/東港 11.9cm/梗枋 9.6cm | 地震規模 6.4<br>林欽隆(2006)/中央氣象局海象中心                        |
| 2003.12 | 臺灣南方 | 後壁湖 30cm                                                                                  | 地震規模 6.8<br>林欽隆(2008)/中央氣象局海象中心                        |
| 2006.12 | 台東外海 | 成功 60cm                                                                                   | 地震規模 6.4<br>林欽隆(2008)/中央氣象局海象中心                        |

資料來源：中央氣象局，本研究整理

### 5.3.2 國外海嘯資料蒐集與分析

整理近年(1900~2011 年)國際間造成重大傷亡之海嘯列表如表 5.6 所示。近年來著名之海嘯事件，則當屬 2004 年發生於印尼之南亞大海嘯以及 2011 年日本三陸沖大地震引發之海嘯，均造成當地嚴重之傷亡與災損。其中 2004 年南亞大海嘯因其屬淺層地震，且規模達史上第四大( $M_w=9.1$ )，在地形之影響下，所波及之國家遍及印度洋沿岸各國，範圍達到六個時區之廣，顯示海嘯波浪之能量可造成距離海嘯發生地數千公里外之海水面不正常之升降，甚至發生災損之情形。而 2011 年 3 月 11 日於日本仙台東方約 130km 處發生規模達 9.0 之大地震，在宮古市造成海嘯潮上高度 40.4m，造成日本東北部份城市毀滅性之破壞，海嘯之破壞力實不容忽視。

表 5.6 1900~2011 年造成重大傷亡之海嘯一覽表

| 年    | 月  | 日  | 海 嘯 源                 |                                      | 地震<br>規模 |
|------|----|----|-----------------------|--------------------------------------|----------|
|      |    |    | 國 家                   | 位 置                                  |          |
| 1906 | 1  | 31 | ECUADOR               | OFF COAST                            | 8.8      |
| 1923 | 9  | 1  | JAPAN                 | SAGAMI BAY                           | 7.9      |
| 1930 | 5  | 5  | MYANMAR<br>(BURMA)    | MYANMAR COAST                        | 7.3      |
| 1933 | 3  | 2  | JAPAN                 | SANRIKU                              | 8.4      |
| 1941 | 6  | 26 | INDIA                 | ANDAMAN SEA, E. COAST<br>INDIA       | 7.6      |
| 1944 | 12 | 7  | JAPAN                 | OFF SOUTHEAST COAST KII<br>PENINSULA | 8.1      |
| 1945 | 11 | 27 | PAKISTAN              | MAKRAN COAST                         | 8.0      |
| 1946 | 8  | 4  | DOMINICAN<br>REPUBLIC | NORTHEASTERN COAST                   | 7.8      |
| 1946 | 12 | 20 | JAPAN                 | HONSHU: S COAST                      | 8.1      |
| 1951 | 8  | 3  | NICARAGUA             | COSIGUINA VOLCANO                    | 6.0      |

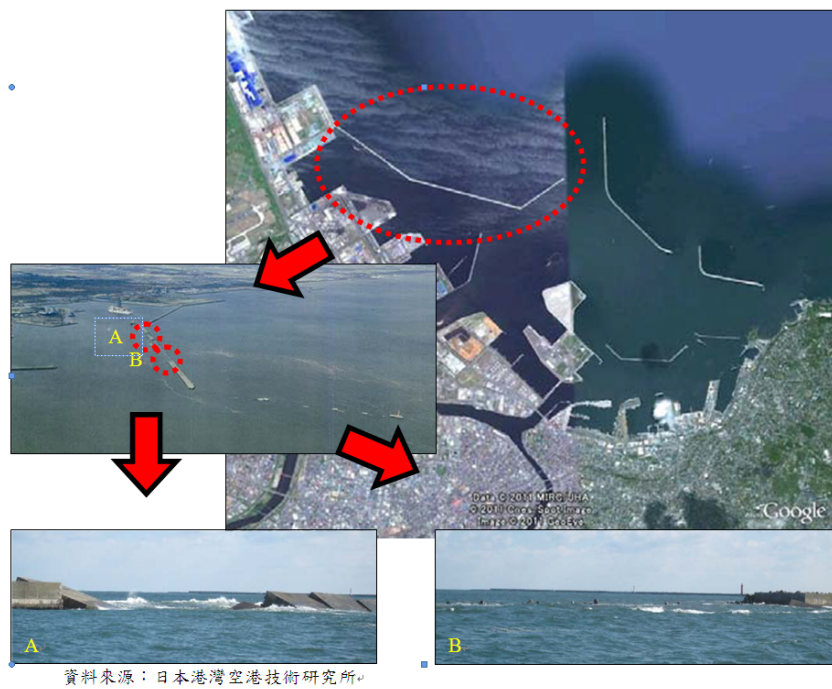
|      |    |    |                     |                                       |     |
|------|----|----|---------------------|---------------------------------------|-----|
| 1952 | 11 | 4  | RUSSIA              | KAMCHATKA                             | 9.0 |
| 1960 | 5  | 22 | CHILE               | CENTRAL CHILE                         | 9.5 |
| 1969 | 2  | 23 | INDONESIA           | MAKASSAR STRAIT                       | 6.9 |
| 1976 | 8  | 16 | PHILIPPINES         | MORO GULF                             | 8.1 |
| 1979 | 7  | 18 | INDONESIA           | LEMBATA ISLAND                        | -   |
| 1979 | 12 | 12 | COLOMBIA            | COLUMBIA: OFF SHORE,<br>PACIFIC OCEAN | 7.7 |
| 1992 | 12 | 12 | INDONESIA           | FLORES SEA                            | 7.8 |
| 1998 | 7  | 17 | PAPUA NEW<br>GUINEA | PAPUA NEW GUINEA                      | 7.0 |
| 2004 | 12 | 26 | INDONESIA           | OFF W. COAST OF SUMATRA               | 9.1 |
| 2006 | 7  | 17 | INDONESIA           | JAVA                                  | 7.7 |
| 2011 | 3  | 11 | JAPAN               | HONSHU ISLAND                         | 9.0 |

資料來源：NOAA/WDC Global Historical Tsunami Database at NGDC(National Geophysical Data Center)

#### 5.4 港灣結構物受海嘯侵襲之破壞案例

大海嘯傳遞至近岸時，並不一定以巨浪之形式出現，而是如同快速上升之潮汐般，挾帶著奔流洪水侵襲海岸與構造物。故海嘯對港灣結構物之破壞，主要以海嘯波壓所造成之沉箱滑動、傾倒，或是因流速甚快之洪水對堤腳及堤後背填淘刷，以及洪水載運大型物體(如船隻等)撞擊結構物等為主，可能造成沉箱翻覆、碼頭法線變位，岸壁破損及沉陷等等情形。2011 年 3 月 11 日東日本三陸沖大地震發生後，於日本東北各港口產生高度不等之海嘯，最大朔上高度達 40.4m(岩手縣宮古市)，造成東日本各港埠嚴重之破壞。圖 5.6 至圖 5.13 為 2011 年日本三陸沖大地震所產生之海嘯對東日本沿岸各港所造成之災損情形。





資料來源：日本港湾空港技術研究所

圖 5.6 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(八戶港)



圖 5.7 防波堤沉箱遭海嘯破壞後受損情形(釜石港)



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.8 碼頭與岸壁遭海嘯淘刷後受損情形(左：鹿島港，右：相馬港)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.9 碼頭與岸壁遭海嘯破壞後受損情形(左：相馬港，右：茨城港)**



資料來源：日港灣空港技術研究所

**圖 5.10 防潮堤堤前淘刷(大船渡市)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.11 碼頭堤面破壞(女川港)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.12 漁船漂流撞擊(小名浜港)**



資料來源：日本港灣空港技術研究所

**圖 5.13 碼頭堤面沉陷(釜石港)**

## 5.5 海嘯對高雄港之影響初探

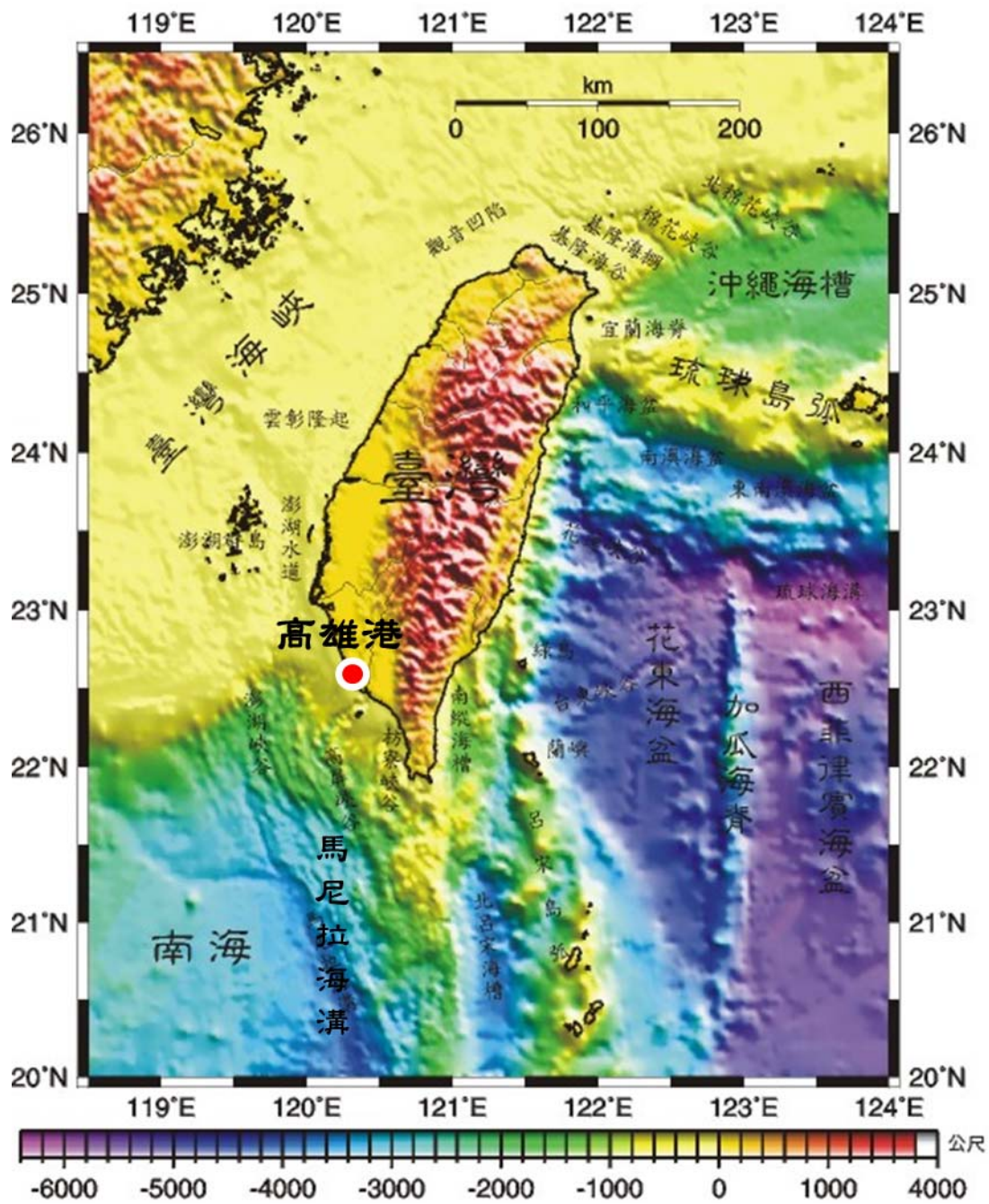
影響海嘯高度之主要原因有二：(1)大範圍、大規模之海底底床垂直錯動，(2)傳播過程中海底地形之影響。而高雄港南側之馬尼拉海溝為一歐亞板塊隱沒於菲律賓海板塊之隱沒帶，若發生地震時，易因推擠效應使板塊向上推擠而造成水位抬昇；且其長度達 1500km，具有發生規模 8~9 地震之潛力。根據美國地質調查局(USGS) 先進國家地震系統(ANSS)於 1963~2006 年馬尼拉海溝之地震資料，馬尼拉海溝發生  $M_w=8.0$  地震之重現期為 63 年， $M_w=8.5$  為 205 年， $M_w=9.0$  則約為 667 年；且依 GPS 量測結果，該處每年板塊約以 0.87 公分錯動，而台灣近年之監測並無較大規模地震之記錄宣洩其能量，故未來極有發生大規模地震之可能。

以地形而言，台灣東側海域 (太平洋) 之近岸地形為陡峭斜坡，西側海域 (台灣海峽)則為水深小於-100m 之大陸棚，台灣海峽與南海間則有一平緩之大斜坡，緊鄰高屏外海，若海嘯波浪傳遞至此，有利於海嘯能量堆積，造成海嘯波高於近岸處迅速提昇，如圖 5.14 所示。

中央大學吳祚任教授於「2011 日本福島海嘯之研究與省思」一文中，以馬尼拉海溝發生規模 9.0 之地震為初始條件，計算海嘯傳遞至台灣時之波高與朔上情形，其模擬之初始條件，如圖 5.15 所示。

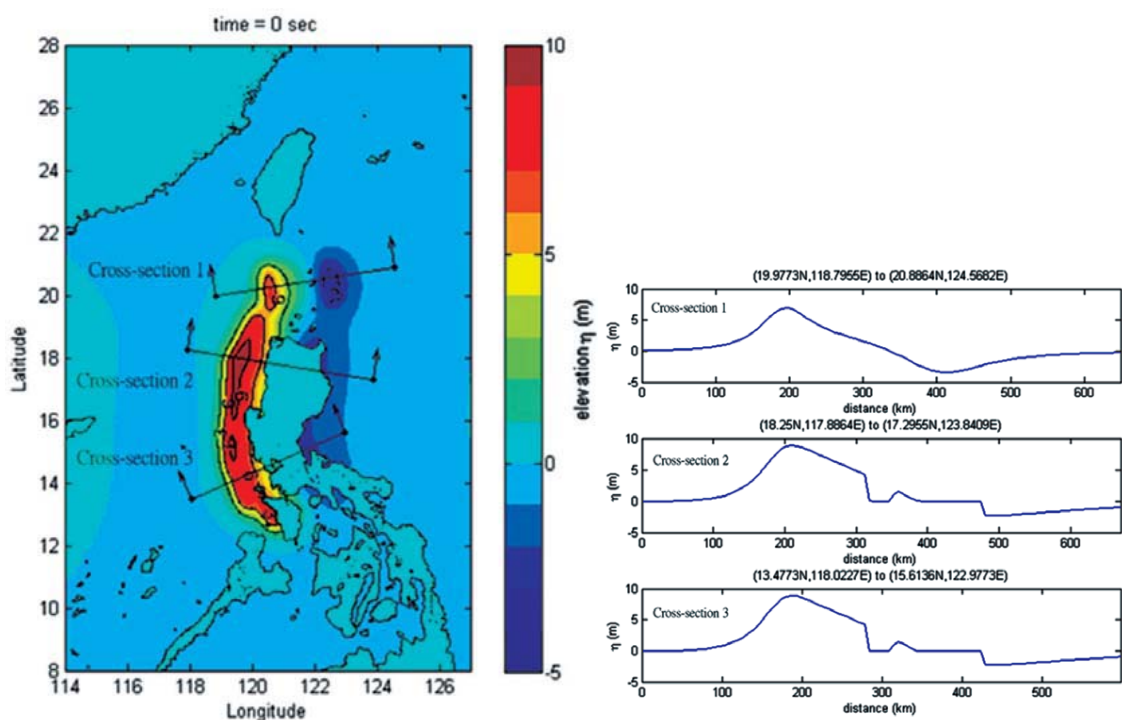
依據吳教授之海嘯推算結果，當鄰近台灣南部之馬尼拉海溝發生規模 9.0 之大地震時，海嘯將於地震發生 13 分後抵達核三廠，15 分後抵達墾丁，並於高雄港產生約 4.5m 之海嘯高度，已達 Papadopoulos 及 Imamura (2001)12 級海嘯強度分級中之 VII~VIII 級，可能造成沿岸之災損，故有針對海嘯分析對設計條件影響之必要，如圖 5.16 所示。





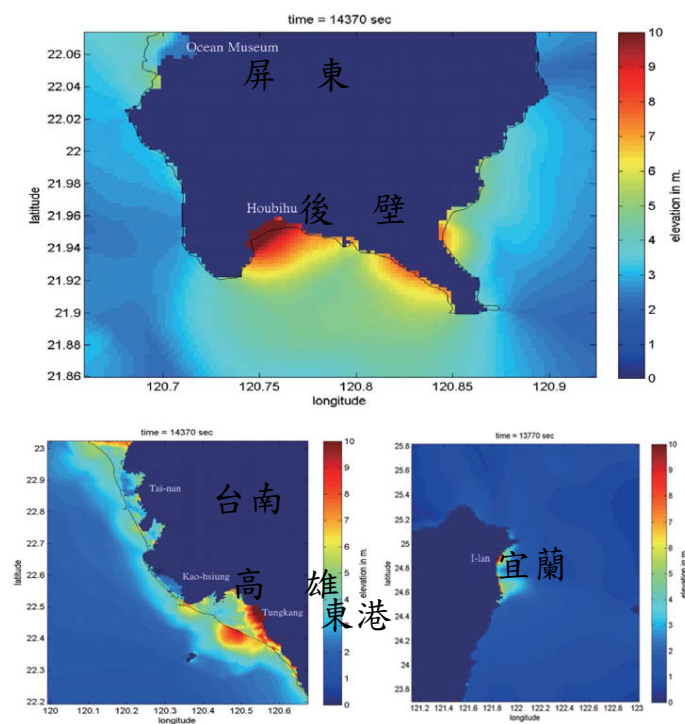
資料來源：國家海洋科學研究中心

圖 5.14 台灣鄰近海域海底地形圖



資料來源：吳祚任「2011 日本福島海嘯之研究與省思」，中國土木水利工程學刊第 38 卷第 2 期

圖 5.15 規模 9.0 之馬尼拉海溝地震之初始波高



資料來源：吳祚任「2011 日本福島海嘯之研究與省思」，中國土木水利工程學刊第 38 卷第 2 期

圖 5.16 馬尼拉海溝發生規模 9 地震時所引發之海嘯波高分析圖

節錄前章有關防波堤堤體安全評估的計算結果，以假設馬尼拉海溝發生  $M_w=9.0$  地震，引發 4.5m 高之海嘯，其能量作用於高雄港第二港口防波堤堤體時，其每座沉箱承受 154t/m 波力，1,236t×m/m 波力矩，124t/m 揚壓力，1,977t×m/m 揚壓力矩，受揚壓力大幅增加約 68% 之影響，滑動安全係數僅 0.74，顯示高雄港二港口沉箱若遭受 4.5m 高之海嘯侵襲，將有發生堤體滑動破壞之虞。

依前章所述之檢核結果，在安全係數需大於 1.2 之條件下，高雄港二港口沉箱最大可抵擋 3.2m 高之海嘯，如表 5.7 所示。此時每座沉箱承受 113t/m 波力，879t×m/m 波力矩，88t/m 揚壓力，1,406t×m/m 揚壓力矩；若海嘯高度大於 3.7m 時，滑動安全係數則低於 1，沉箱恐有立即發生滑動破壞之可能。

本計畫參考吳祚任教授之研究成果，以馬尼拉海溝發生規模 9 地震時造成計畫區 4.5m 高之海嘯高度，探討高雄港二港口圓形沉箱受海嘯襲擊時之安全性。由計算結果可知，高雄港二港口沉箱將有滑動破壞之虞。另與現況設計條件相較，因海嘯造成之上揚力較大，故當海嘯高度大於 3.7m 時，堤體可能發生立即性滑動破壞，考量安全係數需大於 1.2，則高雄港二港口沉箱最大應可抵擋 3.2m 高之海嘯而不致發生破壞。

**表 5.7 高雄港發生海嘯時之堤前波壓與原設計條件之比較**

| 計算項目<br>比較條件                                            | 總波力<br>(t/m)     | 總波力矩<br>(t×m/m)   | 揚壓力<br>(t/m)     | 揚壓力矩<br>(t×m/m)   | 滑動安全<br>係數          | 傾倒安全<br>係數          |
|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 原設計條件<br>( $H_0=6.36\text{m}$ ，<br>$T_s=12\text{sec}$ ) | 145.31           | 1,159.98          | 73.74            | 1,179.78          | <b>1.12</b><br>(NG) | <b>1.33</b><br>(OK) |
| 海嘯<br>(水位抬升 4.5m)                                       | 159.53<br>(+10%) | 1235.87<br>(+7%)  | 123.55<br>(+68%) | 1976.83<br>(+68%) | <b>0.73</b><br>(NG) | <b>1.09</b><br>(NG) |
| 海嘯<br>(水位抬升 3.7m)                                       | 131.16<br>(-10%) | 1015.99<br>(-13%) | 101.59<br>(+38%) | 1625.40<br>(+38%) | <b>0.99</b><br>(NG) | <b>1.19</b><br>(NG) |
| 海嘯<br>(水位抬升 3.2m)                                       | 113.42<br>(-22%) | 878.57<br>(-24%)  | 87.86<br>(+19%)  | 1405.75<br>(+19%) | <b>1.22</b><br>(OK) | <b>1.26</b><br>(OK) |

## 5.6 綜合分析結果

依前節所述，影響海嘯高度之主要原因為海底地形之變化，以及大規模之海底底床垂直錯動，如地震形式、規模以及震源深度等均會對其造成極大影響。台灣東側海域之地震雖甚多，但因地勢陡峭，離岸數公里至數十公里水深即迅速增加至千米以上。除不利海嘯能量於近岸處堆積外，亦對遠洋傳來之海嘯能量有反射之效果，故近百年來未有災難性海嘯發生之記錄。然而對台灣西南側海岸而言，其海底地形為一向南之平緩斜坡，有利於海嘯於近岸處堆積；南側之馬尼拉海溝則被美國地質調查所 (U.S. Geological Survey, USGS) 評定為全球最活躍之海溝，而近年來並無發生大規模地震之記錄，在未有正常釋放板塊運動能量之情形下，未來極有可能發生大規模之地震。

高雄港緊鄰前述之西南側海底緩坡，海嘯來時將首當其衝，若依中央大學吳教授之研究成果，倘若馬尼拉海溝發生規模 9.0 之地震，海嘯將於地震發生 13 分後抵達核三廠，15 分後抵達墾丁，並於高雄港產生約 4.5m 之海嘯高度，依前述 Papadopoulos 及 Imamura (2001) 針對海嘯強度之分級，已有造成沿岸破壞之虞，故有針對海嘯分析對設計條件影響之必要。

日本因位處地震活動帶，加上東北側外海地勢平緩，歷年來經歷過數次大海嘯侵襲，如 1896 年明治三陸沖海嘯、1933 年昭和三陸沖海嘯、1993 年北海道海嘯等，均造成當地嚴重之傷亡與災損，台灣與日本同屬島國，環境亦與日本類似，其海嘯經驗頗有借鑒之處。本計畫後續亦將引用日本對海嘯波壓之計算規範，做為高雄港沉箱結構物對海嘯耐受力之參考。



## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論與建議

綜合前述各項研究工作包含颱風波浪推算建置與探討、波浪極值統計特性分析，及防波堤沉箱安全性評估探討與維護管理資訊系統的建置說明，歸納重要結論如下：

1. 本研究本年度針對安平港與臺北港兩港域建置颱風波浪推算模式，由於區域特性關係，推算模式考量波浪受陸地遮蔽及風場受陸地阻擋而衰減的兩個特性加以模擬。經由推算結果與驗證得知，安平港各場颱風波浪最大波高誤差取絕對值後平均約為 1.03m，最大波高發生時間誤差取絕對值後平均約 10.06 小時；模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差平均為 0.72m，推算波高結果與實測波高的相關性則平均為 0.73。而臺北港各場颱風波浪最大波高誤差取絕對值後平均約為 1.02m，最大波高發生時間取絕對值後誤差平均約 14.81 小時；模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差平均為 0.59m。推算波高結果與實測波高的相關性則平均為 0.73。
2. 有關港域波浪極值統計特性分析方面，本年度亦針對安平港與臺北港兩港域辦理季節性變化之月極值及年極值兩方面之統計特性探討。本研究之極值分析方法，首先應用箱型圖分析檢核取樣，再進一步討論極值分析之最佳方法。在季節性變化之月極值統計特性分析結果方面，以 LSM 推估法所推估出來的各極值函數下之波高與樣本間之 RMSE 較 MLE 推估法低，因此極值推估法以 LSM 推估臺北及安平港較佳。從各檢定指標來說，臺北港 8 月及 10 月因其各年最大波高的變動程度較大，除了 4、8 及 10 月為 Weibull 分布誤差較小之外，其餘大部分月份皆可以 GEV 分布來代表其適合之極值函數。安平港除了 4 月、5 月及 9 月以 GEV 分布作為較適合之極值函數外，其實月份皆以 Weibull 分布配合 LSM 推估法所推估的數值誤差較小，6 至 8 月因其最大波高變動程度較大，此三個月份使用 GEV 分

布所推算波高與樣本間之 RMSE 皆超過 1，與其他極值函數 RMSE 值差距非常大，其餘月份的各種分布所推算出來的 RMSE 相當接近。整體來說，臺北港月極值統計分布大部分月份適合 GEV 分布，而安平港為 Weibull 分布，恰為兩種不同性質的統計特性，因此各港口不同月份均有其較適合之極值分布。

3. 本計畫以臺北港 12 年及安平港 11 年波高實測資料，並與 1940 年至 2010 年共 71 年時間使用井島武士模式所推算之臺北港及安平港每年最大波高作為年極值統計特性分析比較，其結果顯示期較合適的參數推估方法與月極值統計相同，四種極值分布函數皆以 LSM 法來推估會擁有較佳的相關性。而臺北港與安平港之實測資料樣本與半經驗波浪推算模式的樣本皆是以 GEV 分布來推估年極值波高統計較適合。半經驗波浪模式的資料樣本與實測資料的比較中，臺北港的 50 年重現期波高接近，但應用於安平港則有較大的差異，半經驗波浪模式的樣本所推估的 50 年重現期波高較大。
4. 在港灣構造物維護管理系統建置方面，本年度主要針對高雄港第二港口防波堤辦理包含現場圖像監測調查、防波堤沉箱之安全性評估探討、研擬結構物損壞的補強方案及建立防波堤構造物維護管理資訊系統。在防波堤沉箱安全性評估探討方面，經由波壓修正計算後，即使採用原設計條件計算下，其滑動安全係數為 1.12 低於規範 1.2 之要求，但若考量安全係數以大於 1.0 為判定堤體破壞之依據，則估計原有防波堤尚可承受原設計波浪；而傾倒安全係數經修正後，其安全係數約為 1.33，其值已符合規範需求。另外，依據目前最新統計之波浪與潮位資料重新計算堤址波高比對後可知，原設計  $H_{1/3}$  由 6m 增加至 8m，波高增加約達 33%；經採用 Goda 波壓修正係數檢核後，總波力由 93.12t/m 增加至 145.3t/m，增加幅度達 56%，其滑動安全係數為 0.88 遠低於規範 1.2 之要求，顯示原設計條件偏危險。主要原因係為原設計條件偏低所致，由歷年沉箱維修情況得以佐證。而傾倒安全係數經修正後，其安全係數約為 1.22，其值已符合規範需求。若再考量現有防波堤已加拋相當數量消波塊，堤體型態形同具有斜坡堤之消波功能，因此，另依據前述極端異常條件下之

驗算模式重新估算，並依 Goda 波壓修正係數檢核，得知該總波力已由圓形直立堤之 145.3t/m 降至具有消波斜坡堤功能之 130t/m，其滑動安全係數約為 1.14，雖未達規範 1.2 之要求，但若考量安全係數以大於 1.0 為判定堤體破壞之依據，則估計目前已加拋消波塊之防波堤堤體，尚可承受極端異常條件下之波浪條件。而傾倒安全係數經修正後，其安全係數約為 1.29，其值則已符合規範需求。

5. 本計畫本年度針對高雄港初步辦理海嘯對防波堤構造物的影響探討，若以馬尼拉海溝發生規模 9 地震時造成計畫區 4.5m 高之海嘯高度時，高雄港二港口沉箱將有滑動破壞之虞。另與現況設計條件比較，因海嘯造成之上揚力較大，故當海嘯高度大於 3.7m 時，堤體可能發生立即性滑動破壞，考量安全係數需大於 1.2，則高雄港二港口沉箱最大應可抵擋 3.2m 高之海嘯而不致發生破壞。
6. 有關防波堤構造物維護管理資訊系統建置方面，本計畫所建置之防波堤檢測評估網際網路地理資訊系統，以 GIS 系統為基礎，並以 Linux 為基礎開放原始碼的 Android 作業系統，進行港灣構造物維護管理資訊系統在平板電腦等行動裝置上的開發及應用工作。結合資料庫及地理資訊系統，將空間資訊與檢測評估資料相關聯，當港灣構造物維護管理資訊系統使用於行動裝置上，檢測人員即可攜帶平板電腦至現場進行檢測資料蒐集作業，並可即時透過網際網路將完成巡檢工作後檢測資料上傳至主機，於任何時間與地點進行相關之管理與維護，俾使颱風侵襲前後之應變措施更臻完備。

## 6.2 成果效益及後續應用情形

本研究所完成之防波堤損壞原因探討及維護補強方案，可提供高雄港務局作為第二港口防波堤維護之辦理依據。而所建置「防波堤構造物維護管理資訊系統」可和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，所完成安平港與臺北港兩

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. 谷本勝利等，1981，「不規則波實驗混成堤被覆材之所要重量」，第28回海岸工學演講會論文集。
3. 合田良實，1990，「港灣構造物的耐波設計」，鹿島出版社。
4. 「高雄港第二港口開闢工程竣工報告書」，交通部高雄港務局。
5. 郭一羽，2001，「海岸工程學」，文山書局。
6. 「港灣設施防災技術之研究(一)—港灣構造物維護管理準則之研究」，2004，交通部運輸研究所。
7. 「港灣設施防災技術之研究(二)-- 港灣設施防災對策之研究」，2005，交通部運輸研究所。
8. 「港灣設施維護管理制度」，2006，交通部高雄港務局。
9. 「100年高雄港防波堤構造物安全評估探討及維護管理資訊系統建置」，2011，交通部運輸研究所。
10. 「100年高雄港防波堤圖像資料調查」，2011，交通部運輸研究所。
11. 「2011日本福島海嘯之研究與省思」，中央大學水文與海洋科學研究所，2011年4月。
12. 「2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」，日本港湾空港技術研究所，2011年4月。
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.