

100-89-7558
MOTC-IOT-99-H2DA001-3

臺灣港灣構造物動態資訊管理 系統建置之研究(2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 100 年 5 月

100-89-7558

MOTC-IOT-99-H2DA001-3

臺灣港灣構造物動態資訊管理 系統建置之研究(2/4)

著者：何良勝、林受勳、江玟德

交通部運輸研究所

中華民國 100 年 5 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(2/4)

/何良勝、林受勳、江玟德著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 100.05

面 ； 公分

ISBN 978-986-02-7753-1 (平裝)

1. 波動 2. 防波堤 3. 資訊管理系統

351.941029

100007547

臺灣港灣構造物動態資訊管理系統建置之研究(2/4)

著 者：何良勝、林受勳、江玟德

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(中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587176

出版年月：中華民國 100 年 5 月

印 刷 者：良機事務機器有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

GPN：1010000997

ISBN：978-986-02-7753-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

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

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(2/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-02-7753-1(平裝)	政府出版品統一編號 1010000997	運輸研究所出版品編號 100-89-7558	計畫編號 99-H2DA001-3
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：何良勝 研究人員：林受勳、江玟德、陳志弘、張惠華 聯絡電話：(04)26587121 傳真號碼：(04)26560661			研究期間 自 99 年 01 月 至 99 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： 本報告為四年期程之第二年研究報告，報告內容主要包括考慮風場受陸地阻擋及波浪受陸地遮蔽等衰減效應，用以建立高雄港域適用的颱風波浪推算模式。而波浪極值統計方面，則以箱型圖之初步分析取樣，再以極值分析的最佳推估方法，建立花蓮與高雄兩港海域之波浪極值統計推算模式。另外，應用防波堤水上、水下圖像調查結果與結構物堤體之安全性評估探討，進而研擬高雄港第二港口防波堤之損壞維護補強方案。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。 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。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
100 年 5 月	168	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Establishment of Dynamic Information Management System for Taiwan Harbor Facilities (2/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-7753-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010000997	IOT SERIAL NUMBER 100-89-7558	PROJECT NUMBER 99-H2DA001-3
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Y. F. Chiu PROJECT INVESTIGATOR: L.S. Ho PROJECT STAFF: S.S. Lin, W.D. Jiang, C.H. Chen, F.F. Chang PHONE: 04-26587121 FAX: 04-26560661			PROJECT PERIOD FROM January 2010 TO December 2010
KEY WORDS: BREAKWATER SAFEGUARD AND MANAGEMENT SYSTEM, EX-WAVE STATISTICS ESTIMATING MODEL, TYPHOON WAVES ESTIMATING			
ABSTRACT: This report is the second 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. 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.			
DATE OF PUBLICATION May 2010	NUMBER OF PAGES 168	PRICE 200	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中英文摘要表.....	I
目 錄.....	III
表目錄.....	VI
圖目錄.....	IX
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 半經驗颱風波浪推算模式	2-7
2.3 類神經颱風波浪推算模式	2-10
2.3.1 類神經網路架構	2-10
2.3.2 資料分類說明	2-14
2.3.3 模式輸入與輸入層轉換函數	2-16
2.4 推算結果與驗證	2-28
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 極值分布函數之選擇	3-1
3.1.2 極值分布參數之推定法	3-3
3.1.3 信賴檢定評估	3-7
3.2 資料來源與處理方式	3-9
3.2.1 資料來源	3-9
3.2.2 箱型圖分析資料樣本方法	3-11
3.2.3 重現期之極值波高估算	3-15
3.3 極值波高之分析結果	3-16
3.3.1 最佳極值統計方法之決定	3-17
3.3.2 參數迴歸	3-40
3.3.3 考慮參數迴歸的重現期極值波高估算	3-43
3.3.4 年最大法與月最大法季節性波高變化	3-44

3.4 設計波浪之推估	3-46
3.4.1 極值分布函數	3-46
3.4.2 極值分布參數推定	3-48
3.4.3 信賴檢定	3-50
3.4.4 推估值之標準偏差	3-52
3.4.5 各重現期波高推算結果	3-55
3.4.6 極值資料之選取方式	3-59
第四章 港灣構造物維護管理系統建立	4-1
4.1 高雄港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	4-3
4.1.3 水下攝影作業	4-5
4.1.4 水上結構物檢視作業	4-6
4.2 高雄港防波堤安全性評估探討	4-9
4.2.1 防波堤原有設計條件	4-9
4.2.2 重新計算之設計條件	4-10
4.2.3 原有與更新設計條件之比較	4-13
4.2.4 高雄港防波堤歷年維修情形	4-13
4.2.5 防波堤堤址波浪計算	4-17
4.2.6 第二港口防波堤原有設計概況	4-19
4.2.7 防波堤堤體安全性探討	4-21
4.2.8 計算結果與分析	4-28
4.3 防波堤損壞原因探討與補強方案研擬	4-35
4.3.1 防波堤損壞原因探討	4-35
4.3.2 防波堤變形分類	4-36
4.3.3 補強方案之工法研擬	4-37
4.4 高雄港第二港口防波堤維護方案研擬	4-38
4.4.1 防波堤現況損壞補強修護對策	4-38
4.4.2 防波堤維護檢測分類	4-39
4.4.3 防波堤檢測評估方法	4-41

4.5 防波堤構造物維護管理資訊系統之建置	4-52
4.5.1 表單資訊化	4-52
4.5.2 系統電腦化	4-54
第五章 結論與建議.....	5-1
5.1 結論與建議	5-1
5.2 成果效益及後續應用情形	5-4
參考文獻.....	6-1

表 目 錄

表 2.1	本計畫所選用颱風資料.....	2-2
表 2.2	民國前 15 年至民國 85 年颱風侵襲臺灣各月次數	2-4
表 2.3	建立颱風波浪模式的颱風選用表.....	2-6
表 2.4	輸入因子與波浪間的相關性分析.....	2-19
表 2.5	轉換後的輸入因子與波浪間的相關性分析.....	2-27
表 2.6	高雄港類神經颱風波浪推算結果.....	2-29
表 2.7	花蓮港與高雄港颱風波浪模式之推算能力比較.....	2-30
表 3.1	極值分布函數之相關統計量.....	3-3
表 3.2	計算樣本順位機率之 α 及 β 值.....	3-6
表 3.3	花蓮港每月最大波高資料表（單位:公尺）	3-10
表 3.4	高雄港每月最大波高資料表（單位:公尺）	3-10
表 3.5	花蓮港 1990~2008 年每月波高之箱型圖分析表（單位：公 尺）	3-13
表 3.6	高雄港 2001~2009 年每月波高之箱型圖分析表（單位：公 尺）	3-14
表 3.7	花蓮港 19 年重現期之極值推估波高.....	3-19
表 3.8	重現期 19 年最大值波高之殘差均方根比較表.....	3-21
表 3.9	LSM 法、Weibull 分布不同形狀參數下機率密度之殘差均 方根	3-22
表 3.10	MLE 推估 1 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-29
表 3.11	MLE 推估 2 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-30
表 3.12	MLE 推估 3 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-31
表 3.13	MLE 推估 4 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-32
表 3.14	MLE 推估 5 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-33
表 3.15	MLE 推估 6 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-34
表 3.16	MLE 推估 7 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-35
表 3.17	MLE 推估 8 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-36
表 3.18	MLE 推估 9 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差 ...	3-37

表 3.19	MLE 推估 10 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差	3-38
表 3.20	MLE 推估 11 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差	3-39
表 3.21	MLE 推估 12 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差	3-40
表 3.22	各極值分佈相關統計量	3-48
表 3.23	計算樣本順位機率之 α 及 β 值	3-50
表 3.24	相關係數殘差平均值公式之係數 $\bar{a}$, $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值	3-51
表 3.25	重現期推算量之標準偏差公式中之係數	3-54
表 3.26	以 MLE 推估花蓮港波浪之各重現期波高及其推算標準偏差	3-56
表 3.27	以 MLE 推估高雄港波浪之各重現期波高及其推算標準偏差	3-58
表 3.28	超量門檻選用法的極值分析結果	3-60
表 4.1	高雄港防波堤圖像調查項目與時程	4-2
表 4.2	99 年高雄港第二港口南北防波堤沉箱水下調查彙整表	4-5
表 4.3	高雄港第二港口沉箱原有設計波高表	4-10
表 4.4	高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表	4-11
表 4.5	高雄地區潮汐調和分析表	4-12
表 4.6	高雄港極端水位分析表	4-12
表 4.7	高雄港各迴歸期暴潮偏差分析表	4-12
表 4.8	高雄港深海颱風波浪推算波高與原有設計條件比對結果	4-13
表 4.9.1	高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表	4-14
表 4.9.2	高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表(續)	4-15
表 4.10	高雄港第二港口防波堤歷年維修工程主要工項數量表	4-16
表 4.11	防波堤堤址波場模式與波壓判斷式計算結果	4-18
表 4.12	防波堤堤址波高計算結果	4-18
表 4.13	防波堤消波塊重量計算結果	4-18
表 4.14	重力式結構物安全係數	4-29
表 4.15	計算分析種類一覽表	4-29
表 4.16	原有設計潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表	4-30
表 4.17	原有設計潮位結構體承载力檢核分析資料表	4-30

表 4.18	極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表.....	4-31
表 4.19	極端潮位結構體承载力檢核分析資料表.....	4-31
表 4.20	現況下極端潮位結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表	4-32
表 4.21	現況下極端潮位結構體承载力檢核分析資料表.....	4-32
表 4.22	現況下氣候變遷結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表	4-33
表 4.23	現況下氣候變遷結構體承载力檢核分析資料表.....	4-33
表 4.24	高雄港第二港口防波堤設計分析結果比較表.....	4-34
表 4.25	沉箱式防波堤定期檢測項目表.....	4-40
表 4.26	防波堤詳細檢測項目表.....	4-41
表 4.27	防波堤損壞程度及評估項標準.....	4-43
表 4.28	高雄港港灣設施平時巡查異常報告表.....	4-43
表 4.29	高雄港防波堤巡查紀錄表.....	4-44
表 4.30	沉箱式防波堤定期檢測評估(水上)表.....	4-45
表 4.31	沉箱式防波堤定期檢測評估(水下)表.....	4-46
表 4.32	沉箱式防波堤特別檢測評估表.....	4-47
表 4.33	沉箱式防波堤檢測劣化程度與評估值關係表.....	4-49
表 4.34	港灣設施專案檢測參考表.....	4-51
表 4.35	圓筒式直立堤定期檢測評估表.....	4-53

圖 目 錄

圖 2.1	影響臺灣地區之颱風路徑分類圖 (1897~2008 年)	2-4
圖 2.2	湯(1970)和井島(1972)之推算模式模擬範圍	2-10
圖 2.3	目標點對颱風中心的方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 示意圖	2-16
圖 2.4	氣旋中心附近風速風向分布示意圖	2-18
圖 2.5	颱風距離與目標點波高分布圖	2-20
圖 2.6	各距離範圍的 θ_1 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖	2-21
圖 2.7	利用 Derivative-based 搜尋法求得的 θ_1 轉換函數	2-22
圖 2.8	颱風在 900hPa 等壓面上內平均風速分布示意圖	2-23
圖 2.9	各距離範圍的 θ_3 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖	2-24
圖 2.10	利用 Derivative-based 搜尋法求得的 θ_2 轉換函數	2-25
圖 2.11	各距離範圍的 V_{deg} 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖	2-26
圖 2.12	利用 Derivative-based 搜尋法求得的 V_{deg} 轉換函數	2-27
圖 2.13	杜鵑颱風(2003)推算結果及颱風資訊	2-31
圖 2.14	艾利颱風(2004)推算結果及颱風資訊	2-32
圖 2.15	康柏斯颱風(2004)推算結果及颱風資訊	2-33
圖 2.16	凡那比颱風(2010)於花蓮港的颱風波浪推算結果	2-34
圖 2.17	凡那比颱風(2010)於高雄港的颱風波浪推算結果	2-35
圖 3.1	力矩法參數推估流程圖	3-4
圖 3.2	最大概似法參數推估流程圖	3-5
圖 3.3	最小二乘法參數推估流程圖	3-7
圖 3.4	箱型圖架構示意圖	3-11
圖 3.5	箱型圖分析流程圖	3-12
圖 3.6	花蓮港 1990~2008 年極值波高箱型圖	3-14
圖 3.7	高雄港 2001~2009 年極值波高箱型圖	3-15
圖 3.8	T 年重現期極值波高之估算流程示意圖	3-16
圖 3.9	年最大法 FT-I 型下不同參數推估法之波高與累積機率圖	3-18

圖 3.10	LSM 法 Weibull 分布月最大法 1 月 k_1 、 k_2 與實測值機率 密度圖	3-23
圖 3.11	LSM 法 Weibull 分布月最大法 1 月 k_3 、 k_4 與實測值機率 密度圖	3-24
圖 3.12	LSM 法 Weibull 分布月最大法 3 月 k_1 、 k_2 與實測值機率 密度圖	3-24
圖 3.13	LSM 法 Weibull 分布月最大法 3 月 k_3 、 k_4 與實測值機率 密度圖	3-25
圖 3.14	LSM 法 Weibull 分布月最大法 6 月 k_1 、 k_2 與實測值機率 密度圖	3-26
圖 3.15	LSM 法 Weibull 分布月最大法 6 月 k_3 、 k_4 與實測值機率 密度圖	3-26
圖 3.16	LSM 法 Weibull 分布月最大法 8 月 k_1 、 k_2 與實測值機率 密度圖	3-27
圖 3.17	LSM 法 Weibull 分布月最大法 8 月 k_3 、 k_4 與實測值機率 密度圖	3-27
圖 3.18	MLE 推估 1 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-29
圖 3.19	MLE 推估 2 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-30
圖 3.20	MLE 推估 3 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-31
圖 3.21	MLE 推估 4 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-32
圖 3.22	MLE 推估 5 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-33
圖 3.23	MLE 推估 6 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-34
圖 3.24	MLE 推估 7 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-35
圖 3.25	MLE 推估 8 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-36
圖 3.26	MLE 推估 9 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-37
圖 3.27	MLE 推估 10 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-38
圖 3.28	MLE 推估 11 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-39
圖 3.29	MLE 推估 12 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率 ...	3-40
圖 3.30	花蓮港 1990~2008 年每月最大觀測波高特性圖	3-41

圖 3.31	LSM 法推估 Weibull 分布、 $k=1.4$ 之每月尺度參數的曲線 配適圖	3-42
圖 3.32	LSM 法推估 Weibull 分布、 $k=1.4$ 之每月位置參數的曲線 配適圖	3-43
圖 3.33	LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 重現期 19 年每月極值波高關 係圖	3-44
圖 3.34	LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 下重現期 19 年之極值波高圖	13-45
圖 3.35	LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 修正參數推估 19 年重現期之 極值波高圖	3-45
圖 3.36	LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 之修正參數推估之極值波高圖	3-46
圖 3.37	以 MLE 推估花蓮港波浪之機率密度函數及機率函數	3-56
圖 3.38	以 MLE 推估高雄港波浪之機率密度函數及機率函數	3-58
圖 3.39	超量門檻選用法超過 3m 資料的各分布適用性	3-60
圖 3.40	超量門檻選用法超過 4m 資料的各分布適用性	3-61
圖 3.41	超量門檻選用法超過 5m 資料的各分布適用性	3-61
圖 4.1	高雄港第二港口圖像調查範圍	4-2
圖 4.2	多音束監測作業範圍與船跡圖	4-3
圖 4.3	98 及 99 年高雄港第二港口南北防波堤多音束監測成果 ...	4-4
圖 4.5.1	北堤沉箱#40 堤面現況	4-6
圖 4.5.2	北堤沉箱#33、#34 堤面現況	4-7
圖 4.5.3	北堤沉箱#41 堤面現況	4-7
圖 4.5.4	南堤沉箱#53 堤面現況	4-8
圖 4.5.5	南堤沉箱#54 堤面現況	4-8
圖 4.5.6	南堤沉箱#63、#64 堤面現況	4-9
圖 4.6	高雄港第二港口防波堤平面配置示意圖	4-20
圖 4.7	24m 圓形楔入式沉箱堤設計平面圖與斷面圖	4-21
圖 4.8	防波堤直立部份波壓分佈圖	4-23
圖 4.9	護基及堤址拋石之安定係數圖	4-26
圖 4.10	沈箱式防波堤損傷變形連鎖圖	4-37

圖 4.11	多層分散式架構圖.....	4-56
圖 4.12	系統登入頁面示意圖.....	4-57
圖 4.13	整體架構說明.....	4-57
圖 4.14	地理資訊系統功能架構圖.....	4-58
圖 4.15	檢測評估資料庫整體資料表關聯圖.....	4-59

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。

本研究報告內容主要包括，第二章為高雄港域之即時性颱風波浪

推算建置與探討；第三章是花蓮與高雄兩港域之波浪極值統計探討及特性分析；第四章則是高雄港防波堤沉箱安全性評估探討及維護管理資訊系統初步建置說明，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；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域颱風波浪推算模式之經驗，本計畫本年度擬為高雄港域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，提供高雄港務局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高雄港外海的觀測所得，有關測站設置及資料觀測方式可參考前第六章說明。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)。

本年度所選用波浪觀測記錄時間為 2001 年~2008 年，在選用資料中因觀測儀器進行維修或其他因素，致使欠缺部份月份資料。其中，2001 年波浪資料部份，缺 7 月、11 月與 12 月資料；2002 年缺 1 月至 5 月波浪資料；2003 年少了 1 月與 12 月波浪資料；2004 年少了 1 月與 2 月波浪資料；2005 年少了 4 月與 5 月波浪資料；2006 年少了 5 月至

8 月波浪資料(因高雄港務局在二港口南防波堤外堤挖泥濬沙影響)；2007 年少了 1 月與 2 月波浪資料；2008 年少了 12 月波浪資料。

本項工作所需之颱風資料則取自中央氣象局及 RSMC-Tokyo Center 的颱風氣象資料，颱風的名稱與發生時間採用 RSMC-Tokyo Center 發布的資料為準，時間格式統一以臺灣時間表示。颱風氣象資料每 6 小時一筆，波浪資料為每 1 小時一筆，為配合波浪資料的時間間距將颱風氣象資料利用 3 次多項式內插技術，將颱風氣象資料間距內插為 1 小時。依據中央氣象局公布 2001 年至 2008 年侵臺颱風共有 57 場，但需兼顧的資料完整性以及資料相關性，故本計畫僅選擇對高雄港有造成的影響且具有完整實測波浪資料的颱風共 41 場來進行資料分析，再評估是否適合進行颱風波浪推算模式的測試以及驗證，如表 2.1 所示。

表 2.1 本計畫所選用颱風資料

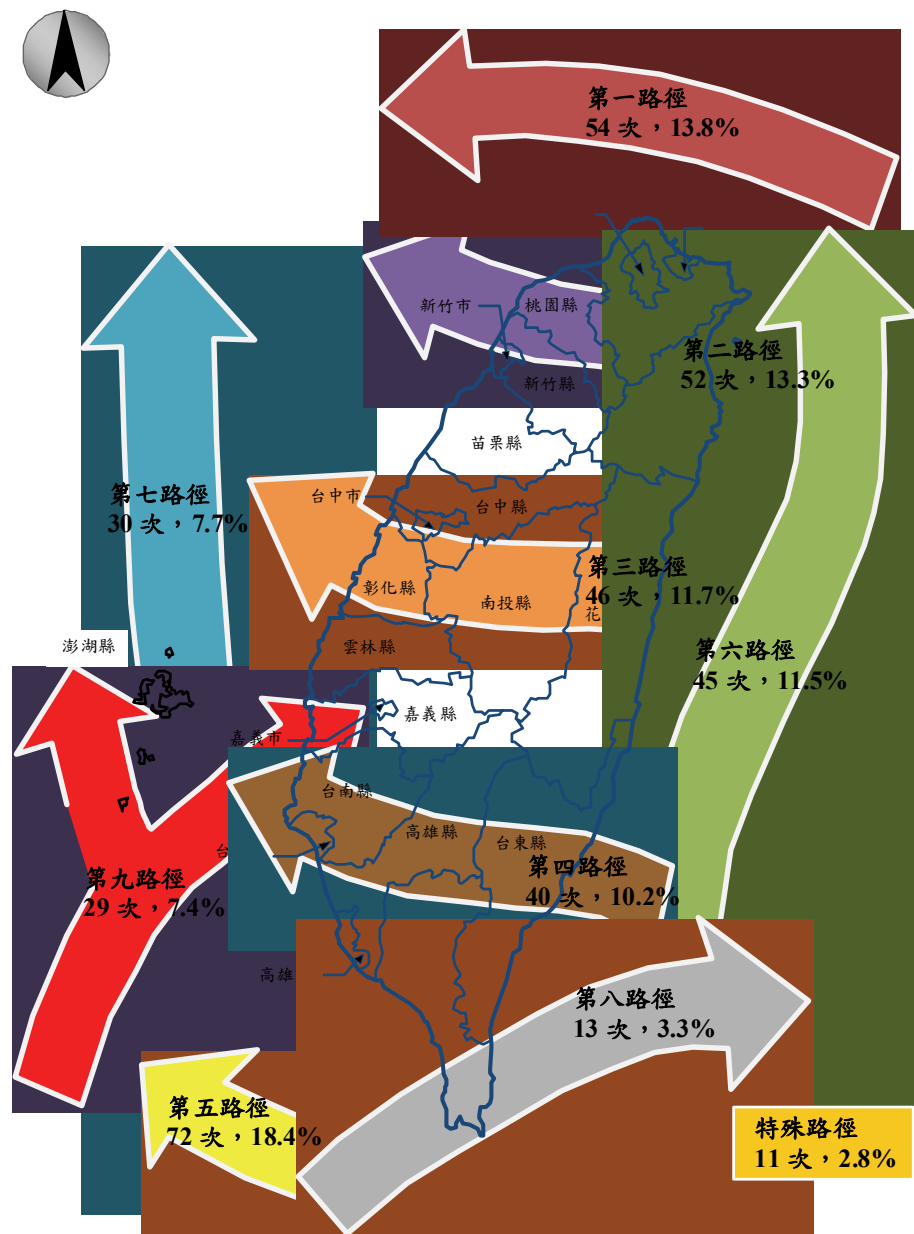
年份	颱風名稱	颱風名稱	最大波高(m)	路徑分類
2001	CIMARON	西馬隆	0.87	8
2001	CHEBI	奇比	7.95	7
2001	LEKIMA	利奇馬	3.77	4
2002	RAMMASUN	雷馬遜	1.97	--
2002	NAKRI	娜克莉	3.74	9
2002	SINLAKU	辛樂克	0.91	1
2003	KUJIRA	柯吉拉	0.98	--
2003	NANGKA	南卡	2.57	--
2003	SOUDELOR	蘇迪勒	2.16	--
2003	IMBUDO	尹布都	4.16	--
2003	MORAKOT	莫拉克	3.21	4
2003	KROVANH	柯羅旺	3.57	--
2003	DUJUAN	杜鵑	4.96	5
2003	MELOR	米勒	1.42	8
2004	CONSON	康森	2.13	--
2004	MINDULLE	敏督利	4.94	6
2004	KOMPASU	康柏斯	1.58	--
2004	RANANIM	蘭寧	2.32	--
2004	AERE	艾利	3.09	1

2004	HAIMA	海馬	3.08	6
2004	MEARI	米雷	1.45	--
2004	NOCK_TEN	納坦	1.88	6
2004	NANMADOL	南瑪都	4.06	9
2005	HAITANG	海棠	6.46	3
2005	MATSA	馬莎	3.13	1
2005	SANVU	珊瑚	4.75	--
2005	TALIM	泰利	4.94	3
2005	KHANUN	卡努	1.09	--
2005	DAMREY	丹瑞	3.84	--
2005	LONGWANG	龍王	2.79	3
2006	SHANSHAN	珊珊	1.91	--
2007	WUTIP	梧提	2.51	3
2007	WIPHA	韋帕	1.98	1
2007	KROSA	柯羅莎	4.18	2
2007	MITAG	米塔	1.83	--
2008	KALMAEGI	卡玫基	3.05	2
2008	FUNG_WONG	鳳凰	5.27	3
2008	NURI	如麗	6.12	--
2008	SINLAKU	辛樂克	3.53	2
2008	HAGUPIT	哈格比	3.53	--
2008	JANGMI	薔蜜	3.51	2

由表中可發現，雖然 2001~2008 年有 41 場颱風擁有完整的波浪資料可供模式進行建立波浪與颱風資料之間的關係，但各場颱風最大波高明顯偏小。41 場颱風中共有 18 場颱風其最大波高沒有達到 3m，而其最大波高小於 2m 者共有 12 場，最大波高小於 1m 的共 3 場。此現象顯示，雖然這些颱風都是由中央氣象局所發布的侵臺颱風，但以高雄港的波浪實測數據來說，這些颱風並沒有對波浪造成影響或是其影響非常的小。此外，依據中央氣象局統計民國前 15 年（1897 年）至民國 85 年（1996 年）共計 100 年的資料中，有 348 次颱風侵襲臺灣，以八月份最多，其次是七月及九月，所以每年七、八、九三個月為颱風侵襲臺灣最多的季節(如表 2.2)。而高雄港位於臺灣西南側海岸，夏季面臨西南季風的影響，其季節風波浪亦較高，使得部份資料難以判斷其波浪是由季節風所造成亦或是颱風所造成的。

表 2.2 民國前 15 年至民國 85 年颱風侵襲臺灣各月次數

月 份	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	全年
次 數	2	12	26	86	108	80	27	7	348
平 均	0.02	0.12	0.26	0.86	1.08	0.80	0.27	0.07	3.48
百分數	0.6	3.4	7.5	24.7	31.0	23.0	7.8	2.0	100



資料來源：中央氣象局

圖 2.1 影響臺灣地區之颱風路徑分類圖 (1897~2008 年)

另由圖 2.1 之颱風路徑分類圖顯示，1897~2008 年的 108 年中，直撲高雄港的第九類路徑僅 7.4%。而且大部分颱風皆為由東向西行進佔 49%，此類颱風若對高雄港造成影響，必定會先行經中央山脈的高山地形，當經過中央山脈時颱風結構會變得鬆散，也會因高山地形的屏障效應使得對高雄港的影響變小。對照表 2.1 之 2001~2008 年八年中，對高雄港產生較直接影響的颱風僅有奇比(2001)、娜克莉(2002)以及南瑪都(2004)等三個颱風，分別為路徑分類 7 與 9，在整體樣本中偏少。其餘颱風可由路徑分類號的部分發現其侵臺路徑皆會受陸地效應與高山地形的影響，在侵襲高雄港之前皆會減弱且幾乎可以不用考慮湧浪類的傳遞。此結果說明若欲建立高雄港的颱風波浪推算模式，其機制應與往昔所開發的花蓮港颱風波浪推算模式不同，往昔花蓮港的波浪推算模式主要是在於面對由東向西直撲花蓮港的颱風，以及颱風生成在外海時湧浪的傳遞。而以高雄港來說，在資料有限的狀況下本研究所建立的模式將面對大部分颱風都經陸地效應影響的狀況進行訓練與推算，模式的建立勢必較花蓮港難處理。

上述多場颱風其所造成的波高較小，其波高在 3m 以下與季節風浪接近，故本計畫在建立類神經波浪推算模式得過程中，更需嚴加評估所選用的颱風波浪資料是否真的是由該颱風所造成的波高增幅，避免在訓練階段給予模式不當的輸入資料。季節風浪與颱風波浪的生成機制不同，但當季節性波浪較大時，其尺度可能會近似颱風波浪，由於本研究所建立的颱風波浪模式需經過實測颱風波浪的訓練，故可能會因過大的季節性波浪造成錯誤的訓練會在網路建置時造成反效果。高雄港地區其颱風波浪偏小的原因主要為直撲高雄港的颱風較少，如圖 2.1 所示，直撲高雄港的颱風僅佔約 14%。

綜合以上說明，本計畫考量去除影響較小及雙颱交互影響的颱風後，選取了 30 場颱風進行模式的建立，如表 2.3 所示。

表 2.3 建立颱風波浪模式的颱風選用表

年份	颱風名稱	颱風名稱	最大波高(m)	資料分類
2001	CHEBI	奇比	7.95	L
2001	LEKIMA	利奇馬	3.77	T
2002	NAKRI	娜克莉	3.74	V
2003	IMBUDO	尹布都	4.16	L
2003	MORAKOT	莫拉克	3.21	L
2003	KROVANH	柯羅旺	3.57	T
2003	DUJUAN	杜鵑	4.96	L
2004	CONSON	康森	2.13	L
2004	MINDULLE	敏督利	4.94	V
2004	KOMPASU	康柏斯	1.58	T
2004	RANANIM	蘭寧	2.32	V
2004	AERE	艾利	3.09	L
2004	HAIMA	海馬	3.08	L
2004	NOCK_TEN	納坦	1.88	T
2004	NANMADOL	南瑪都	4.06	V
2005	HAITANG	海棠	6.46	L
2005	MATSA	馬莎	3.13	L
2005	SANVU	珊瑚	4.75	L
2005	TALIM	泰利	4.94	T
2005	DAMREY	丹瑞	3.84	V
2005	LONGWANG	龍王	2.79	L
2006	SHANSHAN	珊珊	1.91	L
2007	WIPHA	韋帕	1.98	V
2007	KROSA	柯羅莎	4.18	T
2008	KALMAEGI	卡玫基	3.05	T
2008	FUNG_WONG	鳳凰	5.27	V
2008	NURI	如麗	6.12	V
2008	SINLAKU	辛樂克	3.53	T
2008	HAGUPIT	哈格比	3.53	T
2008	JANGMI	薔蜜	3.51	L

註：L、V、T 分別代表三群均勻資料，其中 L、V 為學習資料，T 則為未參與學習的後續測試資料。

2.2 半經驗颱風波浪推算模式

國內外常見之半經驗颱風波浪推算模式約略有 Bretschneider 參數法(1958)、井島(1972)追蹤法、湯(1970)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 Bretschneider 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。本計畫後續擬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並加以改善而成，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_θ 將可寫成

$$H_\theta = H \cos \theta \quad (2.1)$$

式中 H 為前一推算點之波高， θ 為新風向與原風向之夾角。

2. 風與風浪之關係

(1) 深海波浪

深海情況時，依據 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

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \tanh \left[k_1 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right] \quad (2.2)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \tanh \left[k_2 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right] \quad (2.3)$$

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， α 、 β 、 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，1970)

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \tanh \left[k_3 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{k_1 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[k_3 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (2.4)$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = \beta \tanh \left[k_4 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{k_2 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[k_4 \left(\frac{gD}{U^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \quad (2.5)$$

式中 D 表示水深，常數 $k_3=0.578$ ， $k_4=0.520$ 。當 $D \rightarrow \infty$ 時，式(2.4)與(2.5)可簡化為式(2.2)與式(2.3)。

3. 湧浪之計算

當風向改變角度 θ 大於 60° 或風浪獲得能量較損失者為小時，均視為湧浪，其波高、週期與風浪之關係，依據 Bretschneider 之湧浪研究結果，可表示如下兩式

$$\frac{H_f}{H_d} = \cosh \left\{ 0.66 \left(\frac{F}{H_f} \right)^{0.06} \left(\frac{D}{F} \right)^{0.25} \tanh \left[3 \left(\frac{D}{F} \right)^{0.3} \right] \right\} \quad (2.6)$$

$$\frac{T_d}{T_f} = \cosh \left\{ 1.74 \left(\frac{2\pi F}{gT_f^2} \right)^{-0.05} \left(\frac{D}{F} \right)^{0.2} \tanh \left[1.02 \left(\frac{2\pi F}{gT_f^2} \right)^{-0.04} \left(\frac{D}{F} \right)^{0.32} \right] \right\} \quad (2.7)$$

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

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{u}_2 \quad (2.8)$$

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 $\vec{u}_2$ 之大小可由下兩式計算

$$u_1 = c_1 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2 - \frac{fr}{2}} \quad (2.9)$$

$$u_2 = c_2 \frac{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} e^{-\frac{r_0}{r}} + \left(\frac{fr}{2}\right)^2 - \frac{fr}{2}}}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{1}{e} + \left(\frac{fr_0}{2}\right)^2 - \frac{fr_0}{2}}} \quad (2.10)$$

式中 ρ_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 $= 2\omega \sin \varphi$ 、 ω 為地球自轉角速度、 φ 為計算點之緯度、 c_1 為地面風速與傾度風速之比值，在台灣地區風向與等壓線約成 30° 且反時針向內吹，一般 $c_1=0.6\sim0.7$ 、 c_2 為 0.6、 $\vec{u}_2$ 為方向同颱風之移動風向、 ΔP 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

$$P(r) = P_c + \Delta P e^{-\frac{r_0}{r}} \quad (2.11)$$

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° 、北至北緯 28° 、西至東經 116° 、東至東經 126° ，地形格網的解析精度為 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (約為 10×10 公里)，如圖 2.2 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 40×40 公里)，設定方式是以目標推算點為中心，東西南北各 0.2° 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。

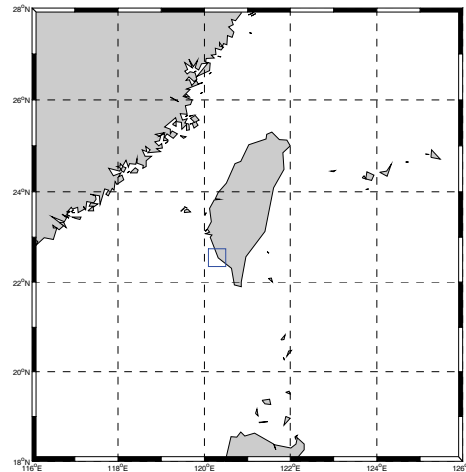


圖 2.2 湯(1970)和井島(1972)之推算模式模擬範圍

2.3 類神經颱風波浪推算模式

2.3.1 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：

$$Y_i = f\left(\sum_j W_{ij} X_j - \theta_i\right) \quad (2.12)$$

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

本計畫使用 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 θ_1 及 θ_2 ，輸入量為 X ，目標輸出量為 T ，轉換函數則採用雙曲函數(hyperbolic tangent function)，而網路輸出量為 Y ，網路的學習過程大致可分為下列幾個單元：

1. 計算隱藏層輸出量 Z 與網路輸出量 Y

$$net_1 = \sum_i W_{1i} X_i - \theta_1 \quad (2.13)$$

$$Z = f(net_1) = \frac{e^{net_1} - e^{-net_1}}{e^{net_1} + e^{-net_1}} \quad (2.14)$$

$$net_2 = \sum_j W_{2j} X_j - \theta_2 \quad (2.15)$$

$$Y = f(net_2) = \frac{e^{net_2} - e^{-net_2}}{e^{net_2} + e^{-net_2}} \quad (2.16)$$

2. 計算隱藏層差距量 δ_1 與輸出層差距量 δ_2

$$\delta_1 = Z(1-Z) \sum_j (W_{2j} \delta_j) \quad (2.17)$$

$$\delta_2 = (1+Y)(1-Y)(Z-Y) \quad (2.18)$$

3. 計算加權值矩陣的修正量 ΔW

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

$$E = \frac{1}{2} \sum_j (T_j - Y_j)^2 \quad (2.19)$$

此時加權值的修正量可表示為：

$$\Delta W = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = -\delta_j^n A_i^{n-1} \quad (2.21)$$

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

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

$$W_1 = W_1 + \Delta W_1 \quad (2.22)$$

$$\theta_1 = \theta_1 + \Delta \theta_1 \quad (2.23)$$

$$W_2 = W_2 + \Delta W_2 \quad (2.24)$$

$$\theta_2 = \theta_2 + \Delta \theta_2 \quad (12.25)$$

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：

$$O_{P \times 1} = f(W_{S \times R} I_{R \times 1} + b_{S \times 1}) \quad (2.26)$$

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(2.26)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

$$h = 2z + 1 \quad (2.27)$$

其中， z 為輸入層的神經元個數， h 為隱藏層神經元個數。

2.3.2 資料分類說明

本計畫於往昔相關計畫中已完成花蓮港類神經颱風波浪推算模式以及其使用者介面的開發研究，且於去年度之計畫工作中採用更完整的資料對花蓮港颱風推算模式進行改善，其方式為，不以 RMSE 當作目標或是以學習疊代次數當作限制的方法的訓練方式，而是把所有資料分成三部分，分別為：(1)訓練用資料群(Training Set)；(2)確認用資料群(Validation Set)；(3)檢驗資料群(Test Set)。其中訓練用資料群經由正規化等前置處理後直接進入網路進行訓練，訓練方式採用收斂較慢的 `trainscg`，在訓練的同時輔以確認用資料群進行網路的確認，隨著訓練次數的增加，模式對於訓練用資料群的 RMSE 會逐漸降低，但降低到一定程度後網路即停止訓練，這種稱之為提早停止的訓練方法可以使避免訓練出來的網路發生過度學習，讓網路對於其他未學習過的資料適用性更高，訓練結束後可利用檢驗資料群來二次確認模式的廣義性。由於上述三個資料群的目的不同，我們需要保持三個資料群的颱風特性的均勻性，避免造成訓練時神經網路模式接受的颱風特性與確認或檢驗階段的颱風特性不同。資料的分類採用 Camargo 等人(2007)

所採用的熱帶氣旋分類法，透過熱帶氣旋在地球表面的路徑來作分類，本計畫對將所有颱風分為四類，再各將這四類中的颱風個數等分為三組，故我們可以獲得三組特性均勻的颱風資料群，以進行模式的訓練、確認以及檢驗過程。

雖然上述的資料分類法經驗證後能夠提高花蓮港颱風波浪推算模式的廣義性，但在高雄港實測資料較少的狀況下，就較難以施行，原因在於此法必須將所有資料分成三等份，如此一來在樣本少的情況下各資料群的樣本可能就會不夠均勻，故若考慮僅以目前的資料進行訓練，應選用較多資料當作學習資料，較少資料當作模式驗證用應較為合適。本計畫採用 Camargo(2007)所提出的颱風分類法，本方法針對所有輸入的颱風的規模與路徑進行自動分類(共分為四種特性較為不同的類別)，之後再將此四類中皆均勻分成三等分再重新組合，即可將所有颱風分為三組資料群。這三組資料群在路徑或是規模等特性上皆為均勻。往昔在建立花蓮港颱風波浪推算模式時將三組資料群命名為學習資料群(Learning Set)、驗證資料群(Validation Set)與測試資料群(Test Set)，但本計畫將測試後發現高雄港颱風波浪資料較花蓮港資料為少，若僅取用三分之一的資料來做學習其成效不夠佳。故在高雄港颱風波浪模式的建立，本計畫取其中兩組(Learning Set 與 Validation Set)作為學習資料群，一類(Test Set)作為測試資料群，如此一來可以保持資料的均勻性並增加訓練資料。然而失去確認用的驗證資料群就必須使用傳統訓練方式以 RMSE、疊代梯度或訓練次數當作模式的目標，如此一來可能會發生過度學習的狀況，故本研究採用 trainbr (Bayesian regulation backpropagation)訓練方式來改進網路廣義性，trainbr 藉由自動調整網路偏權值及網路權重值間的比例參數來組成一目標值，比傳統僅以 RMSE 作為訓練目標的訓練方式更能避免網路訓練時的過度學習，30 場颱風的資料分類結果如前表 2.3 所示，L 表訓練用資料群；V 為確認用資料群及 T 為檢驗資料群。

2.3.3 模式輸入與輸入層轉換函數

高雄港波浪推算模式的輸入資料包括颱風經緯度以及中心最大風速，經由這兩項颱風資訊可計算：(1)颱風與目標點距離；(2)目標點對颱風中心的方位角；(3)颱風移動方位角；(4)目標點海面 10m 風速；(5)目標點上空風向等。其中前三項的距離與方位角僅需透過颱風中心座標點及目標點座標即可計算，而後兩項目標點的 10 米風速及風向就要透過風場模式進行估算。目標點對颱風中心的方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 ，如圖 2.3 所示。

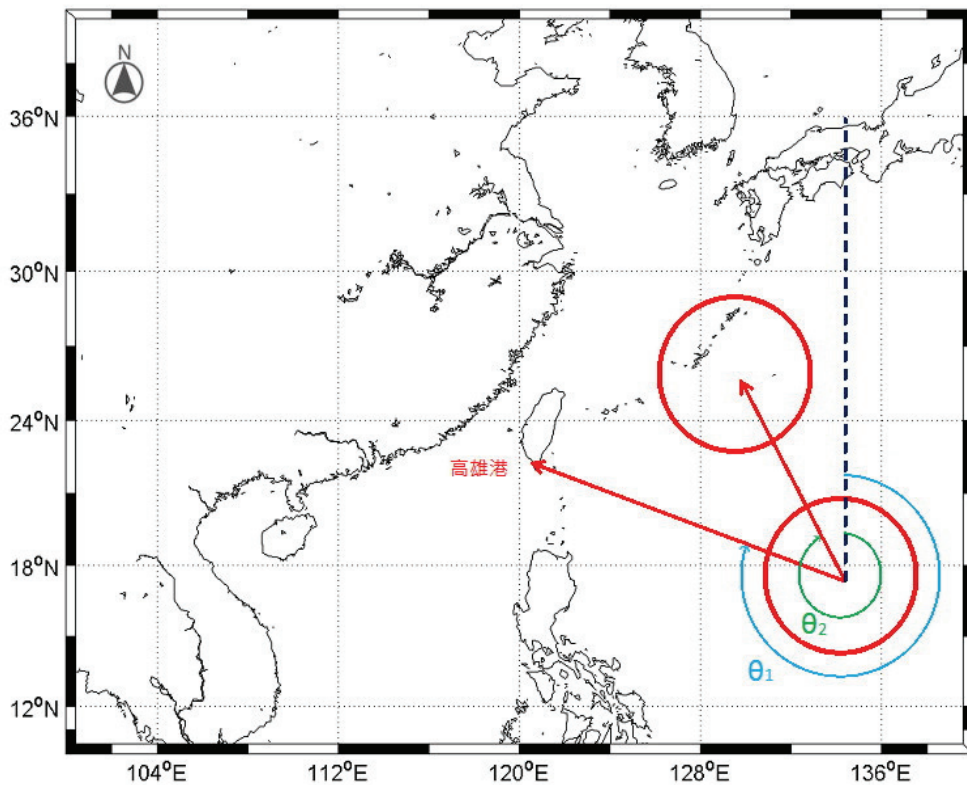


圖 2.3 目標點對颱風中心的方位角 θ_1 與颱風移動方位角 θ_2 示意圖

由於北半球的颱風為逆時鐘旋轉，以颱風前進方向為中心來看，其右半圓有較左半圓大的風力，故目標推算點所面臨的是颱風的左半圓或右半圓對於波浪推算來說也顯得相當重要。我們透過 $\theta_3 = \theta_1 - \theta_2$ 來定義目標推算點所面臨的颱風結構， θ_3 定義為颱風侵襲角，以圖 2.3 的狀況為例，颱風中心正由圖中右下往左上方移動，目標推算點高雄

港目前所面臨的是颱風的左半圓。由以上關係可知，若 θ_3 在 0° 至 180° 則目標推算點所面臨的是颱風的右半圓，反之，若 θ_3 在 0° 至 -180° 則目標推算點所面臨的是颱風的左半圓。圖中 θ_1 小於 θ_2 ，故 θ_3 為負值，顯示目標推算點高雄港面臨的是颱風的左半圓。

本計畫採用 RVM 模型颱風模式 (Rankin-Vortex Model) 作為推算模式之風場模擬，其模型架構概述如下：

RVM 係模擬颱風風場架構，在資料齊全的條件下，風場可由氣壓分布推算而得。然而，在絕大多數情形下，氣壓分布資料取得不易，由氣壓分布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布具有對稱性，故熱帶氣旋所造成之風場可利用風場模式推算之，本計畫採用 RVM 模型颱風模式進行風場模擬，以提供類神經模式計算所需之風場輸入參數。有關 RVM 模型颱風模式之理論說明如下：

$$V_r = \begin{cases} V_{\max} (R/R_m)^7 \exp(7(1-R/R_m)) & \text{for } R < R_m \\ V_{\max} \exp((0.0025R_m + 0.05)(1-R/R_m)) & \text{for } R \geq R_m \end{cases} \quad (2.28)$$

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：

$$R_m = 28.52 \tanh(0.0873(\phi - 28)) + 12.22 / \exp((P_\infty - P_c)/33.86) + 0.2V_f + 37.22 \quad (2.29)$$

其中， ϕ 為緯度， P_c 為中心氣壓，而 P_∞ 為距颱風中心無限遠處之氣壓，可設定為 1 大氣壓(1013.3mb)。旋轉風速係指純粹由氣壓差所產生之風速，當颱風中心靜止不動時，旋轉風速即為颱風中心附近之風速，當颱風在移動時，則應加上修正風速

$$V_t = 0.5 V_f \cos \varphi \quad (2.30)$$

其中， V_f 為颱風中心前進速度，而 φ 為至颱風中心連線與最大風速連線兩條線之間的夾角，其相互關係如圖 2.4 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 $V_r + V_t$ 。

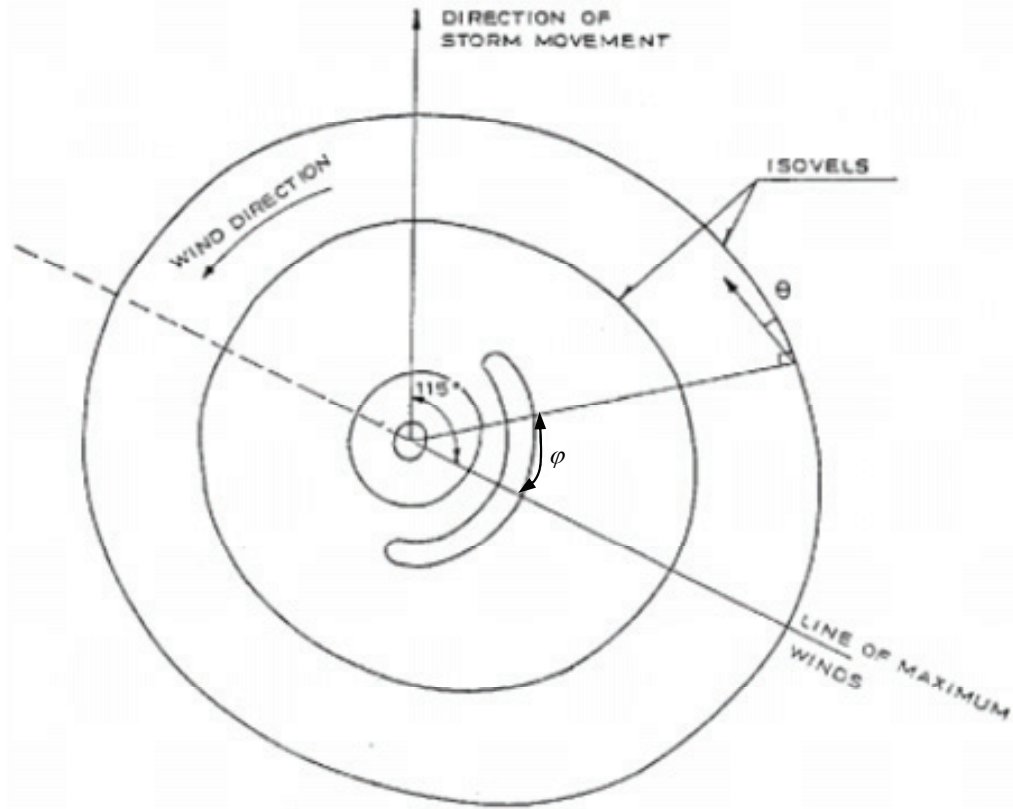


圖 2.4 氣旋中心附近風速風向分布示意圖

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：

$$\theta = \begin{cases} 10^\circ & \text{for } 0 < R \leq R_m \\ 10^\circ + 15^\circ(R - R_m)/(0.2R_m) & \text{for } R_m < R \leq 1.2R_m \\ 25^\circ & \text{for } 1.2R_m < R \end{cases} \quad (2.31)$$

由以上之說明可知，利用 RVM 模型颱風模式計算風場，颱風中心前進速度 V_f 與方向 φ 、中心氣壓 P_c 及近中心最大風速 V_{max} ，可由颱風記錄直接輸入，而後即可推算出目標點的海面 10m 風速 V 以及風向 V_{deg} ，配合颱風中心與目標點距離 D 、目標點對颱風中心的方位角 θ_1 、

颱風移動方位角 θ_2 等颱風資訊作為類神經網路輸入層。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 2.4 所示。

表 2.4 輸入因子與波浪間的相關性分析

輸入因子	相關性 R
V	0.425
D	-0.392
θ_1	-0.492
θ_3	0.014
V_{deg}	-0.458

表 2.4 中顯示，目前輸入因子中只有目標點 10m 風速相關性最高，為 0.425，其餘因子都偏低並且還有負相關的現象，以下針對各項輸入因子作一討論。

1. 目標點 10m 風速 V

颱風為一低氣壓場，其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，波浪之最主要驅動力為颱風風力，即由此而來。所以推算目標點當地的 10m 風速對於波浪推算來說必然是重要的因子之一。然而透過相關性分析發現與波高相關係數 R 僅有 0.425，是因為未考慮地形對波浪的遮蔽效應以及風場在陸地上受到山脈或建築物的阻隔造成的衰減，若要利用傳統統計方法或歸納的方式綜合考慮各項因子間的交互作用並不容易，所以本研究透過類神經網路輸入各相關因子來進行模式的訓練，以期能解決此複雜的交互作用。

2. 颱風與目標點距離 D

颱風的距離越近，對推算目標點當地波浪的影響就越大，因此在上述前表 2.4 的相關性分析中發現，距離與波高的相關性為負相關。以本計畫所收集的颱風資料與相對應的波浪資料來繪製距離-波高分布，如圖 2.5 所示。

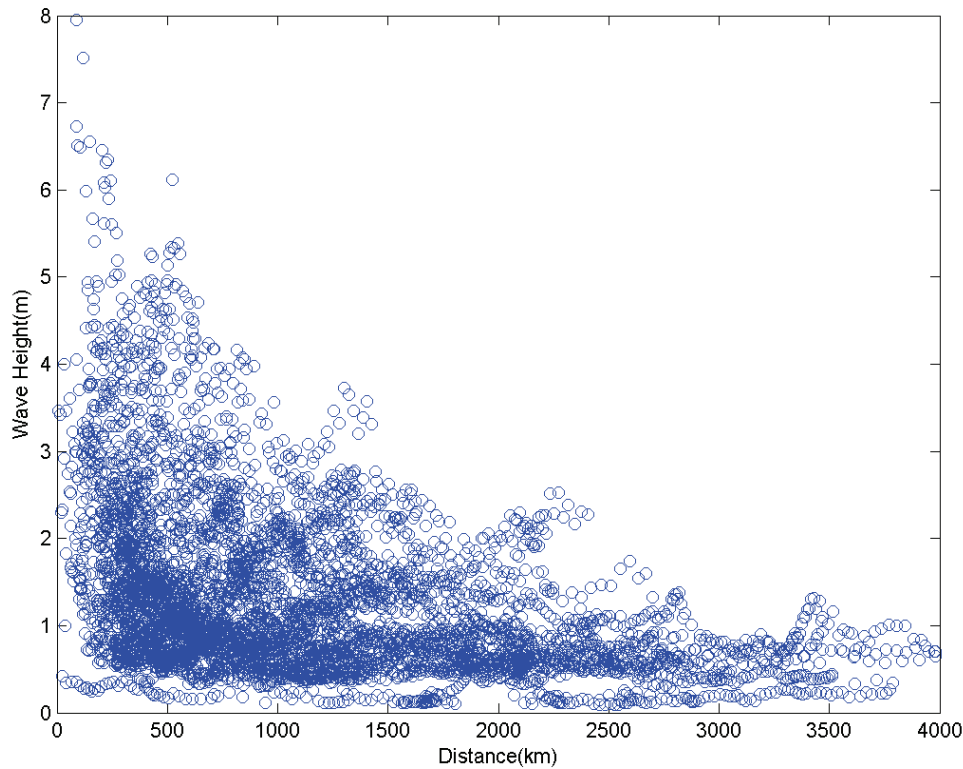


圖 2.5 颱風距離與目標點波高分布圖

圖 2.5 中，橫軸為颱風與推算目標點距離，縱軸則為推算點波高。圖中大致可看出，颱風距離與目標點波高是呈反比，但在距離小的時候仍發生許多波高小的狀況(圖中左下角密集區)，這些狀況可能是因為颱風已減弱、陸地遮蔽或陸域地形造成的風場衰減等因素而造成。另外圖中可以發現颱風在距離推算目標點 1500km 以上，推算目標點出現 3m 以上的波高機率明顯變小，故根據其反比關係，為了避免學習的資料中有較不相關的樣本，我們可考慮排除 1500km 以上的資料點，並將剩餘資料點距離除以 1500km 來作正規化再以 1 減之作為輸入值。

3. 目標點的方位角 θ_1

目標點的方位角可表示推算目標點是在颱風中心的哪一個方位，以正北為 0° ，若 θ_1 為 90° 表示颱風由西向東邊的目標點登陸，反之，若 θ_1 為 270° 則表示颱風由東向西自臺東登陸經中央山脈侵襲高雄

港。我們首先將所有的颱風資料點自距離 0 至 4000km 分為 20 份，再利用形狀係數為 30 而中心位置為 0° 至 360° 的 gauss 轉換結果，其結果與波高的相關性分布圖示如圖 2.6。

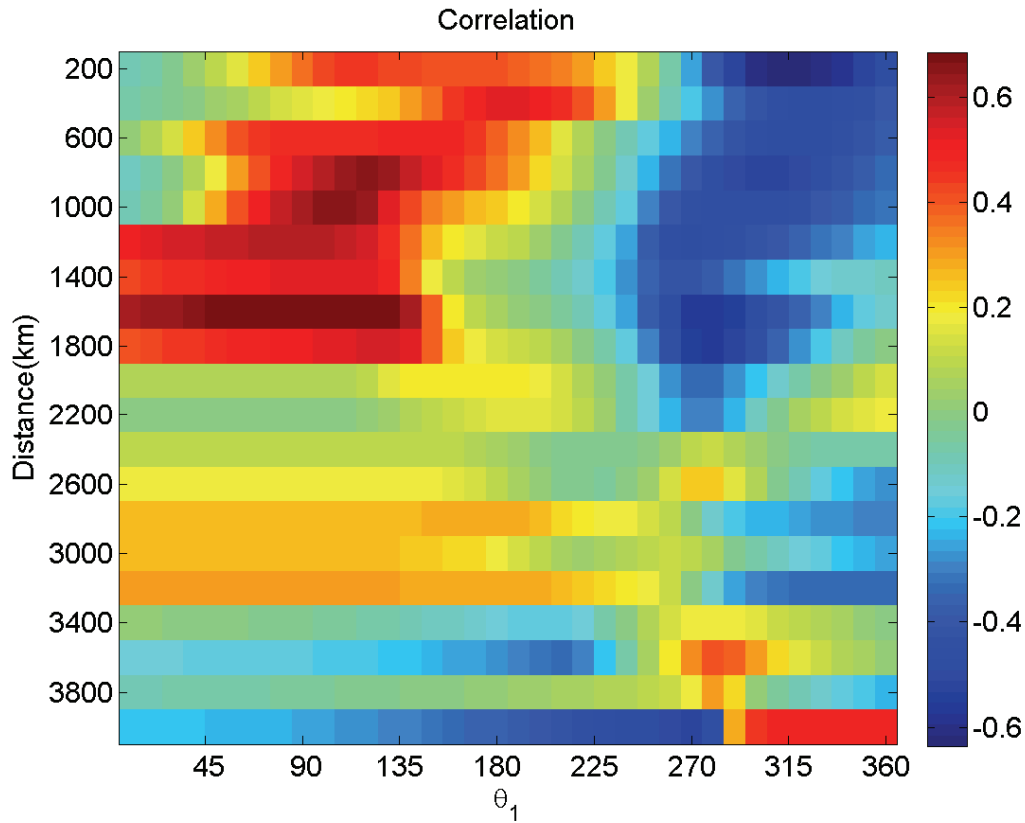


圖 2.6 各距離範圍的 θ_1 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖

由圖 2.6 可發現，在距離 1800km 以內，經高斯轉換後 θ_1 約以 220° 為分界，與波高間的相關性有空間上分布的特性，當高斯轉換函數的峰值在 220° 以下其轉換結果與波高的相關性高，反之當高斯轉換函數的峰值在 220° 以上則其結果與波高的相關性低。這種空間上的明顯特性說明我們可透過多變量的 Derivative-based 搜尋法找到最佳的高斯轉換函數，如圖 2.7 所示。

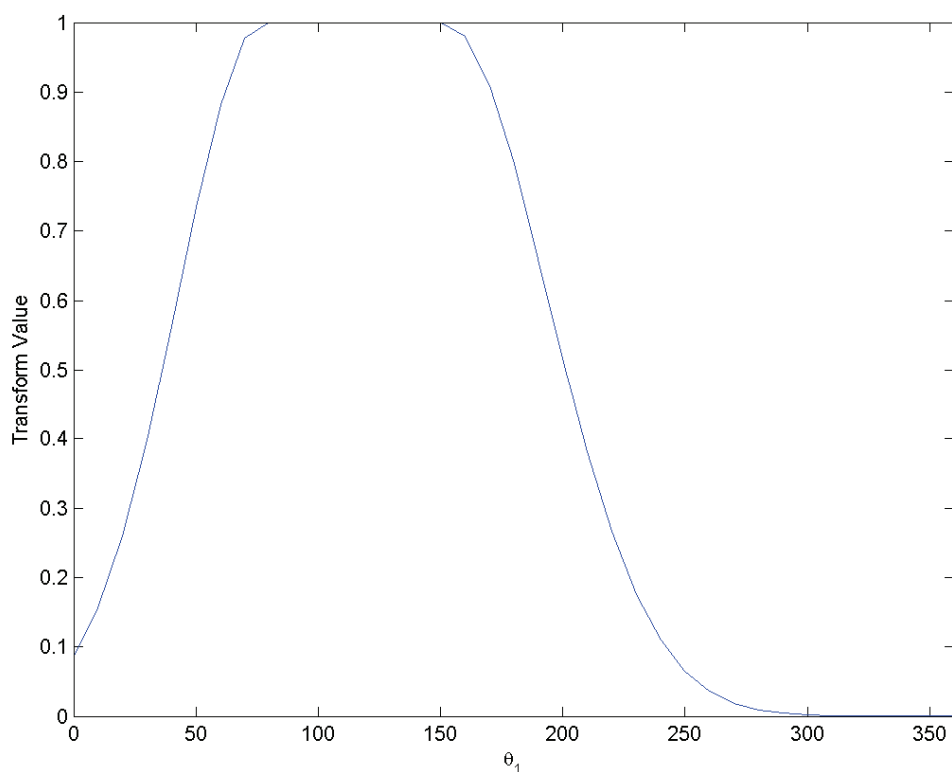
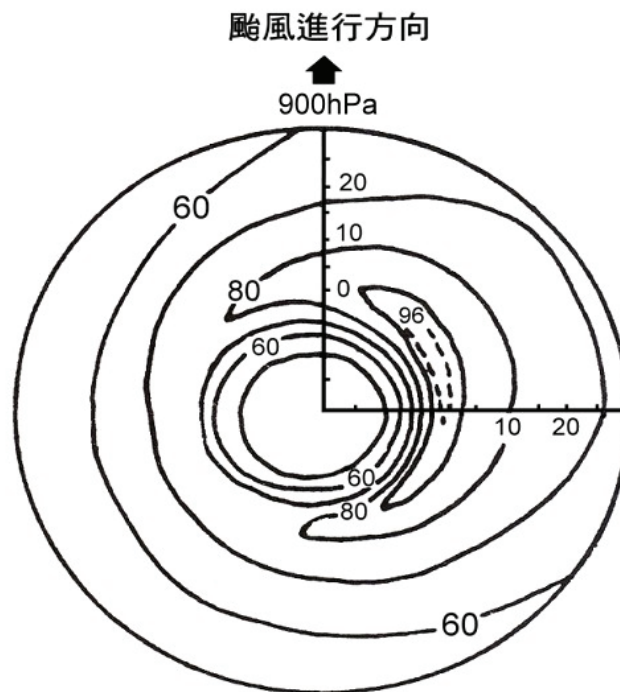


圖 2.7 利用 Derivative-based 搜尋法求得的 θ_1 轉換函數

4. 颱風侵襲角 θ_3

本計畫利用目標點的方位角 θ_1 與颱風前進方位角 θ_2 相減來描述侵襲目標點在颱風風場中的位置，以颱風前進方向為 0° ，侵襲目標點為 0° 至 180° 時代表颱風以左半圓侵襲目標點，反之 θ_3 為 0° 至 -180° 時，則以右半圓侵襲目標點，颱風風速結構圖如圖 2.8 所示。圖中顯示，颱風暴風範圍內的風速並非均勻分布的，如以象限劃分，在北半球行進中的颱風其右前方象限的風最大，因該象限颱風環流風向與導引氣流風向相同。如向西行進之颱風此象限吹東北風與夏季西太平洋的東北信風合併而增強了風速，至於右後方及左前方象限則是偏南的風與偏西的風，因與東北信風有抵消作用，風勢較小，在左後方象限的風最小，因該象限吹西南風恰與西太平洋的東北信風相反，故大量抵消，所以一般而言，颱風前半部風力大於後半部。此侵襲角與波高的相關性除了受到北半球颱風右前半圓結構較強的

因素外，地形遮蔽及風場衰減的影響也會造成差異性。此外依照上節所敘述侵襲高雄港的颱風大多經過陸地效應以及高山地形的影響，颱風在登陸後其結構會有大幅度的改變，垂直方向的作用會更強烈，高山或地形會使得結構變得鬆散。若要於高雄港波浪推算模式中建立完善的風浪機制，需同時考慮 θ_1 與 θ_3 兩種方位角的影響，即由 θ_1 轉換得遮蔽效應因子以及 θ_3 轉換得的颱風結構因子兩輸入項皆應一併輸入作為考慮。將所有的颱風資料點自距離0至4000km分為20份，再利用形狀係數為30而中心位置為 -180° 至 180° 的gauss轉換結果，其結果與波高的相關性分布圖示如圖2.9。



資料來源：中央氣象局

圖 2.8 颱風在 900hPa 等壓面上內平均風速分布示意圖

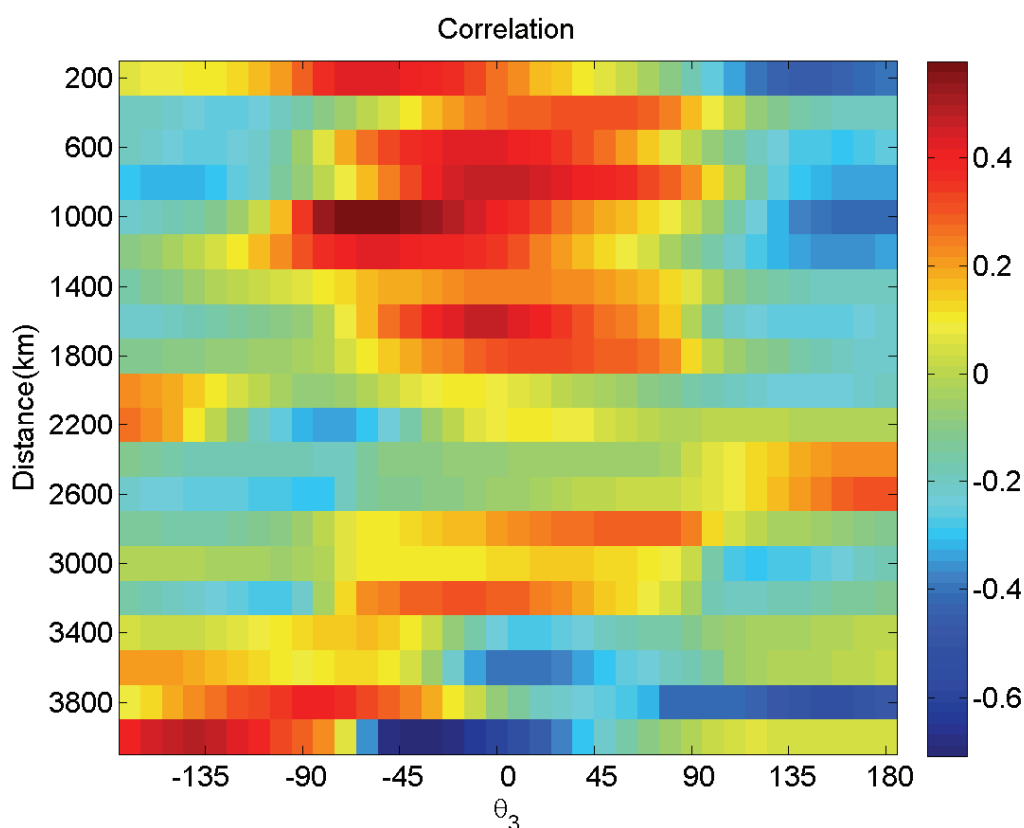


圖 2.9 各距離範圍的 θ_3 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖

圖 2.9 中，色調越暖的部分為 θ_3 後與波高相關性較高的部分，反之色調越冷的藍色部分則為負相關。由圖中結果顯示，在颱風距離 1800km 以內 -45° 至 120° 間的區域相關性較其他部分低，顯示颱風若受臺灣陸地所遮蔽的範圍內即使是以較強的颱風右半圓往高雄港前進，其所造成的波高影響也不大。由於圖 2.9 這種空間上的分布特性較類似有偏態的分布或是雙峰分布，故本計畫透過兩個 gauss 函數的線性組合來描述轉換函數，採用多變量的 Derivative-based 搜尋法找到最佳的轉換函數的四個變數，其結果如圖 2.10 所示。

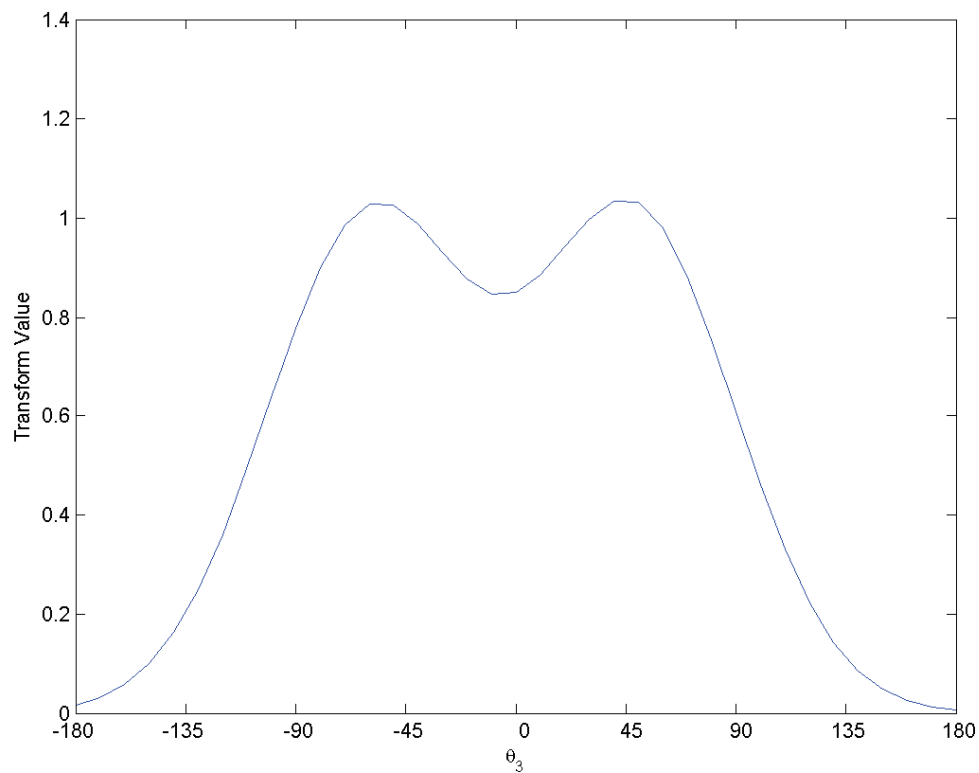


圖 2.10 利用 Derivative-based 搜尋法求得的 θ_2 轉換函數

5. 目標點 10m 風向 V_{deg}

目標點 10m 風向是由 RVM 模型風場模式中推算而得的，此處風向定義與一般不同，RVM 推算出來的結果為風的去向而非來向。將所有的颱風資料點自距離 0 至 4000km 分為 20 份，再利用形狀係數為 30 而中心位置為 0° 至 360° 的 gauss 轉換結果，其結果與波高的相關性分布圖，如圖 2.11 所示。

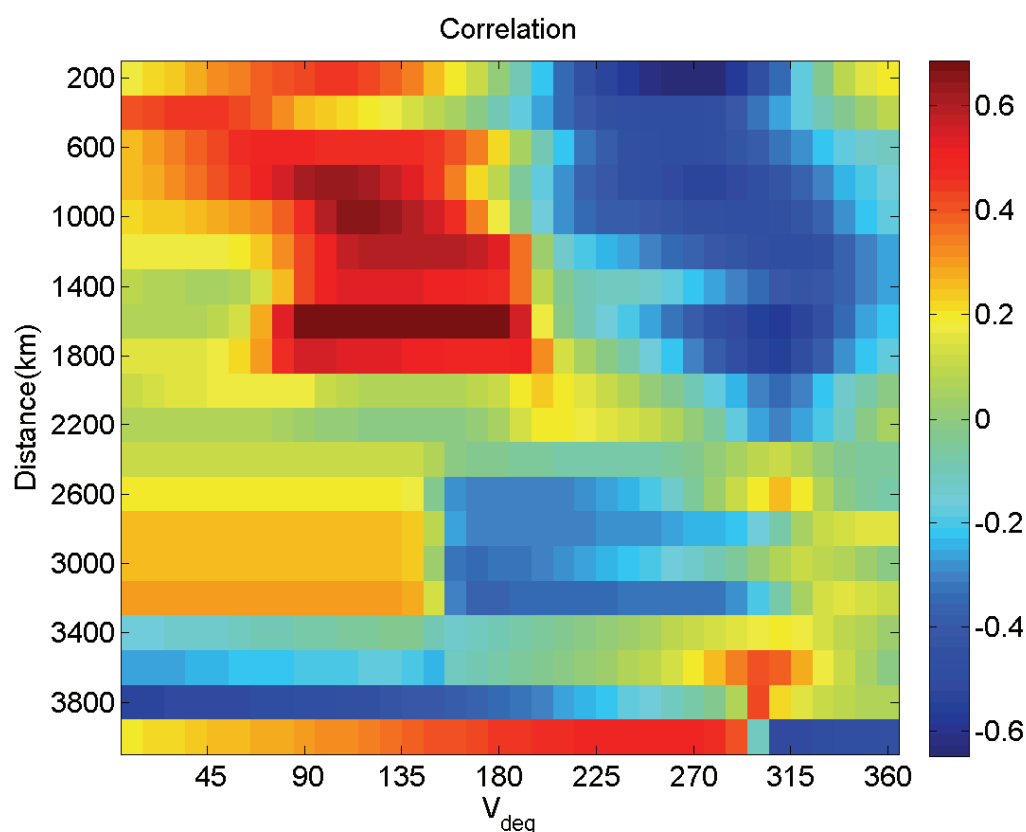


圖 2.11 各距離範圍的 V_{deg} 經高斯轉換後與波高的相關性分布圖

圖 2.11 與圖 12.6 的結果相近，但圖 2.11 中相關性最高的部分並不是在颱風距離較近的部分，且風的去向於 180 至 320 間明顯與波高相關性低，即表現出當風的驅動力隔著臺灣陸地區域往西邊吹時，對推算目標點高雄港的波浪生成並無影響。此現象即描述當颱風在臺灣東岸登陸時，隔著中央山脈其對高雄港的影響並不大，圖 2.12 為多變量的 Derivative-based 搜尋法找到最佳的高斯轉換函數。

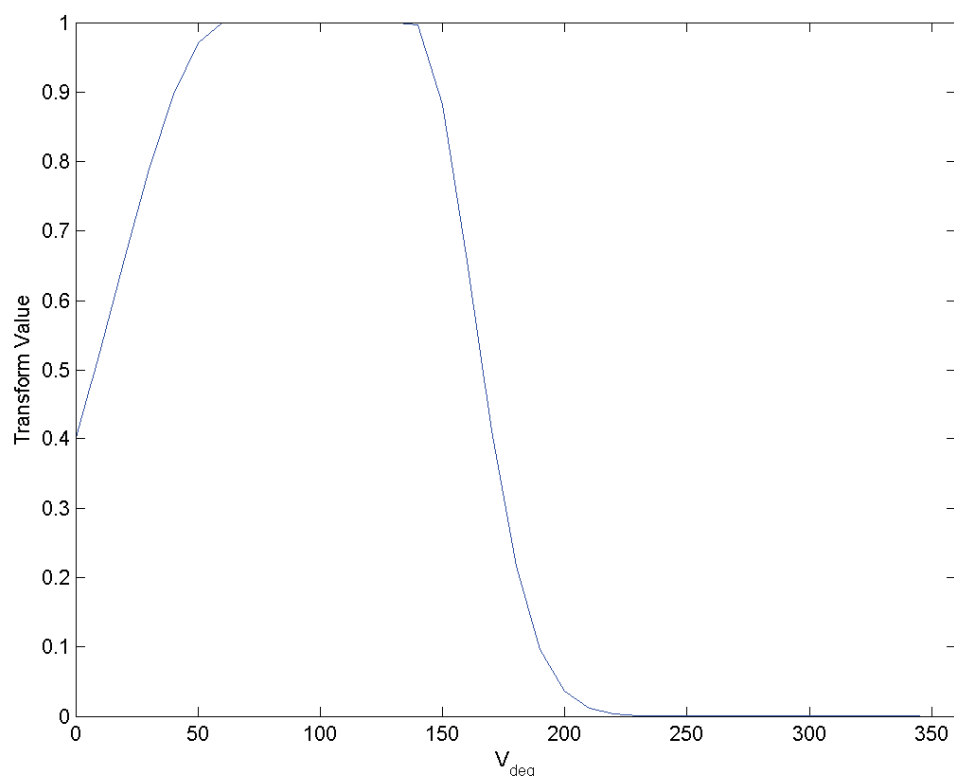


圖 2.12 利用 Derivative-based 搜尋法求得的 V_{deg} 轉換函數

以上各輸入因子透過轉換函數來作映射後，再與波高作相關性分析，其結果如表 2.5。表中顯示，風速因子與原來相同，距離因子則因調整而變成了正相關，遮蔽效應因子經過轉換後其相關性由-0.492 變成 0.597，颱風結構因子經轉換後其相關性由 0.014 提升為 0.440，而目標點風向因子則由-0.458 提升為 0.574。由此可知經過最佳化的 gauss 函數轉換後除了前兩項外其相關性與前表 2.4 比較，皆有大幅度提升，表示經過這三個轉換函數後各因子對模式建立的有更好的成效。

表 2.5 轉換後的輸入因子與波浪間的相關性分析

輸入因子經轉換後	相關性 R
風速因子	0.425
距離因子	0.392
遮蔽效應因子	0.597
颱風結構因子	0.440
目標點風向因子	0.574

2.4 推算結果與驗證

一般在進行使用年限較長的港灣結構物設計時，為了推估合適的設計波高，需要利用相當長的波浪實測資料方能分析，但實際上可能常因現有記錄的時間不足而無法達成。此時，需要藉由波浪推算模式來推估颱風造成的極值波浪，再利用極值統計方法，去推估重現期之波浪特性。針對國內工程界最常使用的湯(1970)和井島(1972)半經驗颱風波浪推算模式以及本計畫研發的類神經颱風波浪推算模式等兩種模式進行颱風波浪的推算，再與實測資料進行比較來評估這兩種資料來源的適用性。為瞭解各模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 4 個指標來評估各模式推算結果的優劣，分別為相關係數(R, correlation coefficient)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 及最大波高發生時間誤差 Δt_p 。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs}) ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - \bar{H}_{s,obs})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n ((H_{s,num})_{mn} - \bar{H}_{s,num})^2 \right)}} \quad (2.32)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_m \sum_n ((H_{s,obs})_{mn} - (H_{s,num})_{mn})^2} \quad (2.33)$$

$$\Delta H_{s,p} = MAX(H_{s,num}) - MAX(H_{s,obs}) \quad (2.34)$$

$$\Delta t_p = t_{p,num} - t_{p,obs} \quad (2.35)$$

其中 $H_{s,num}$ 為模式推算之颱風波浪示性波高； $H_{s,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高； $t_{p,num}$ 為模式推算之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。由式(2.34)可知，若 $\Delta H_{s,p}$ 為正值，表示模式推算的示性波高過於高估，若為負值則表示低估；由式(2.35)可知，若 Δt_p 為正值，表示模式推算的示性波高最大值發生時間較實測晚，若為負值則表示較實測早。

依據往昔所建立之類神經網路颱風波浪推算模式，在颱風期間配合 UNISYS 所提供的颱風即時動態資料對於颱風波浪有很好的推算結

果，並已實際完成視窗化介面應用於花蓮港務局。本計畫即以 Japan Meteorological Agency 所提供 1978 年至 2008 年的颱風資料進行波浪的推算，配合前節所選取的 30 場實測颱風波浪資料進行建立及驗證，其結果如下表 2.6 所示。

表 2.6 高雄港類神經颱風波浪推算結果

年份	颱風名稱	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMSE	R
2001	CHEBI(奇比)	-1.77	1.00	0.73	0.91
2001	LEKIMA(利奇馬)	0.24	-6.00	0.95	0.42
2002	NAKRI(納克力)	0.29	8.00	0.56	0.71
2003	IMBUDO(尹布都)	-0.28	-3.00	0.79	0.74
2003	MORAKOT(莫拉克)	0.00	-2.00	0.59	0.84
2003	KROVANH(科羅旺)	0.37	-4.00	0.64	0.24
2003	DUJUAN(杜鵑)	-0.23	21.00	1.43	0.15
2004	CONSON(康森)	-0.06	15.00	0.26	0.78
2004	MINDULLE(敏督利)	-1.05	-4.00	0.64	0.90
2004	KOMPASU(康柏斯)	2.68	5.00	1.81	0.59
2004	RANANIM(蘭寧)	-0.18	18.00	0.35	0.74
2004	AERE(艾利)	0.59	-40.00	0.31	0.87
2004	HAIMA(海馬)	-0.02	4.00	0.52	0.62
2004	NOCK_TEN(納坦)	0.66	9.00	0.52	0.72
2004	NANMADOL(南瑪都)	0.23	1.00	0.41	0.91
2005	HAITANG(海棠)	-1.60	2.00	0.80	0.95
2005	MATSA(馬莎)	-0.53	1.00	0.46	0.85
2005	SANVU(珊瑚)	-0.88	17.00	0.66	0.87
2005	TALIM(泰利)	-0.70	2.00	0.82	0.79
2005	DAMREY(丹瑞)	0.44	-8.00	0.44	0.87
2005	LONGWANG(龍王)	0.68	-1.00	0.62	0.93
2006	SHANSHAN(珊珊)	-0.38	-7.00	0.34	0.40
2007	WIPHA(韋帕)	0.66	21.00	0.61	0.64
2007	KROSA(柯羅莎)	-0.09	-1.00	0.91	0.47
2008	KALMAEGI(卡玫基)	-0.29	11.00	0.35	0.84
2008	FUNG_WONG(鳳凰)	-0.36	-17.00	0.39	0.95
2008	NURI(如麗)	-1.82	-14.00	0.65	0.96
2008	SINLAKU(辛樂克)	1.73	6.00	0.62	0.79
2008	HAGUPIT(哈格比)	0.96	-12.00	0.73	0.94
2008	JANGMI(薔蜜)	0.44	0.00	0.37	0.88
平均		0.67	8.70	0.64	0.74

由表 2.6 推算結果顯示，本模式 30 場颱風波浪推算結果與實測波高的比較，表中名稱加底色的颱風為完全沒有加入模式訓練的檢驗用颱風。以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 Δt_p 等四個指數來做評估。表中各場颱風波浪最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 以康柏斯颱風(2004)相差最大，其最大波高與實測資料相差了 2.68m；相差最小的則是莫拉克颱風(2003)，與實測最大波高符合；平均來說，颱風波浪最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 約為 0.67m。

模式推算之最大波高發生時間誤差 Δt_p 則以艾利颱風(2004)相差最多，與實測最大波高發生時間差了 40 小時；相差最小的則為薔蜜颱風(2008)其推算結果最大波高發生時間與實測完全符合；30 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 8.70 小時。

模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差最大為康柏斯颱風(2004)，其值為 1.81m，最小為康森颱風(2004)的 0.26m；30 場颱風波浪平均 RMSE 為 0.64m。推算波高結果與實測波高的相關性則以如麗颱風(2008)最佳，相關係數 0.96；最差為杜鵑颱風(2003)的 0.15；30 場颱風波浪與實測波高相關係數平均為 0.74。另外，以表 2.7 陳列去年度(2009 年)於花蓮港所完成之推算結果與上述高雄港結果的比較。

表 2.7 花蓮港與高雄港颱風波浪模式之推算能力比較

	$\Delta H_{s,p}$ (m)	Δt_p (hour)	RMS E	R
花蓮港	0.98	5.04	0.69	0.83
高雄港	0.67	8.70	0.64	0.74

由表 2.7 兩港域颱風波浪推算模式之推算能力比較顯示，颱風波浪最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 的部分，高雄港模式的誤差較小；而最大波高發生時間誤差 Δt_p 則以花蓮港的結果較佳；平均 RMSE 則以高雄港模式較低；各場颱風所造成波浪期推算值與實測值的相關係數則以花蓮港較佳。然而大部分颱風皆以直撲花蓮港為主，故花蓮港颱風波浪一般皆

較高雄港大，故其最大波高的誤差以及整體 RMSE 皆較大。由此結果顯示，花蓮與高雄港模式的推算能力接近。

本計畫以誤差較大的幾場颱風作一說明，如表 2.6 中的杜鵑(2003)、艾利(2004)、康柏斯(2004)等。圖 2.13 為杜鵑颱風的推算結果與颱風資訊圖，圖中左列三圖由上到下分別為波浪推算與實測結果、風速發展圖及颱風中心距離推算點變化圖，右圖則為颱風路徑資訊，波浪推算圖中粗線為模式推估值，細線為時測波浪值。由圖中結果得知，模式推算結果的最大值發生時間較實際發生時間為晚，是較大的推算誤差。我們透過比較風速發展圖與距離變化圖可以發現，實測數據中的發生最大波浪時間是在颱風風速最強時，但依據距離變化圖可發現實際最大波浪發生在颱風中心仍在臺灣東側的時候，通常颱風在臺灣東側的狀況風場結構與波浪傳遞都會受到地形的阻擋，故理論上不應那麼早發生最大波高。

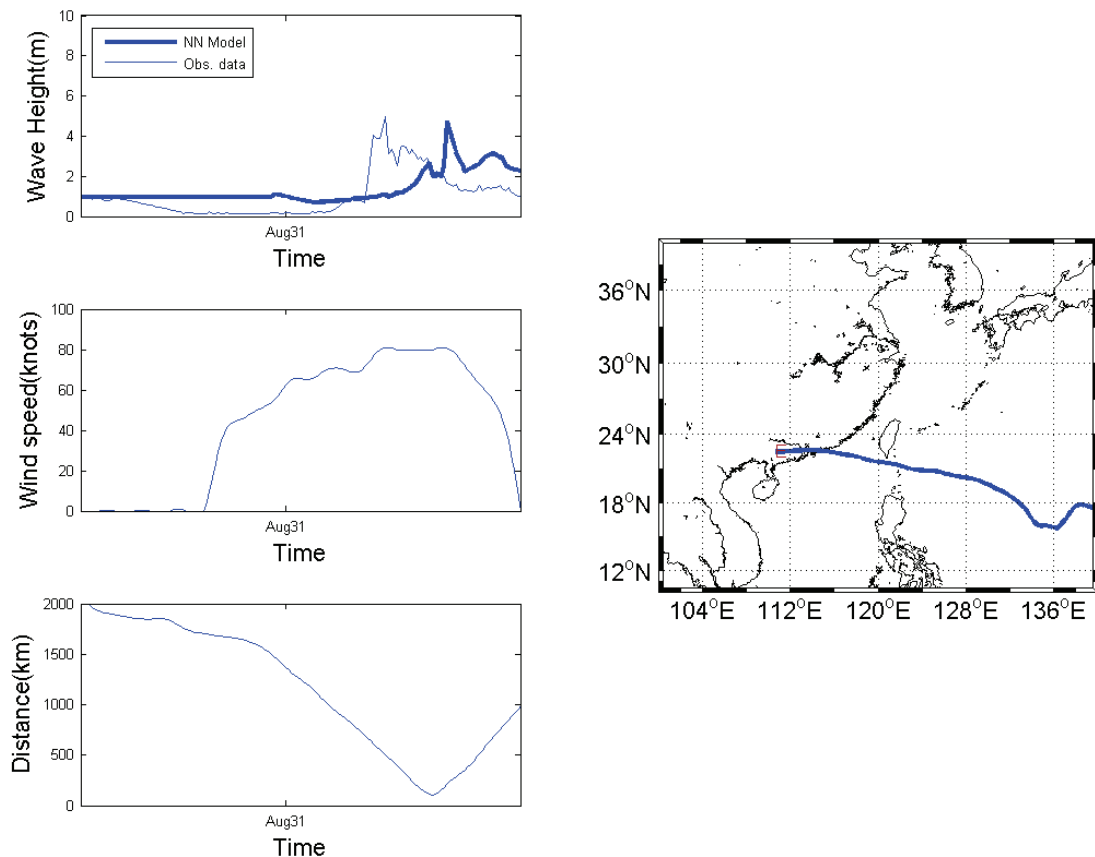


圖 2.13 杜鵑颱風(2003)推算結果及颱風資訊

圖 2.14 則是艾利颱風(2004)的推算結果與颱風資訊圖，由圖中可發現，實測波高發生最大值的時間與模式推算的大最大發生時間有很大的差距，但由 JMA 所提供的颱風資料顯示實測資料發生最大波浪的時間點颱風風速已經降低至接近消失的狀態，故此誤差必須確認是颱風資訊中風速的錯誤或是波浪實測資料中有非颱風造成的短時間異常波高變化。

圖 2.15 為康柏斯颱風(2004)的推算結果及颱風資訊，其推算結果顯示應有 4m 以上的波高，但實際測量情況顯示並未有明顯的波浪變化，以此現象來看颱風風力較弱而行經此類路徑的颱風可能會容易出現模式推估錯誤的狀況，可能需要更多的資料來進行學習與改善。

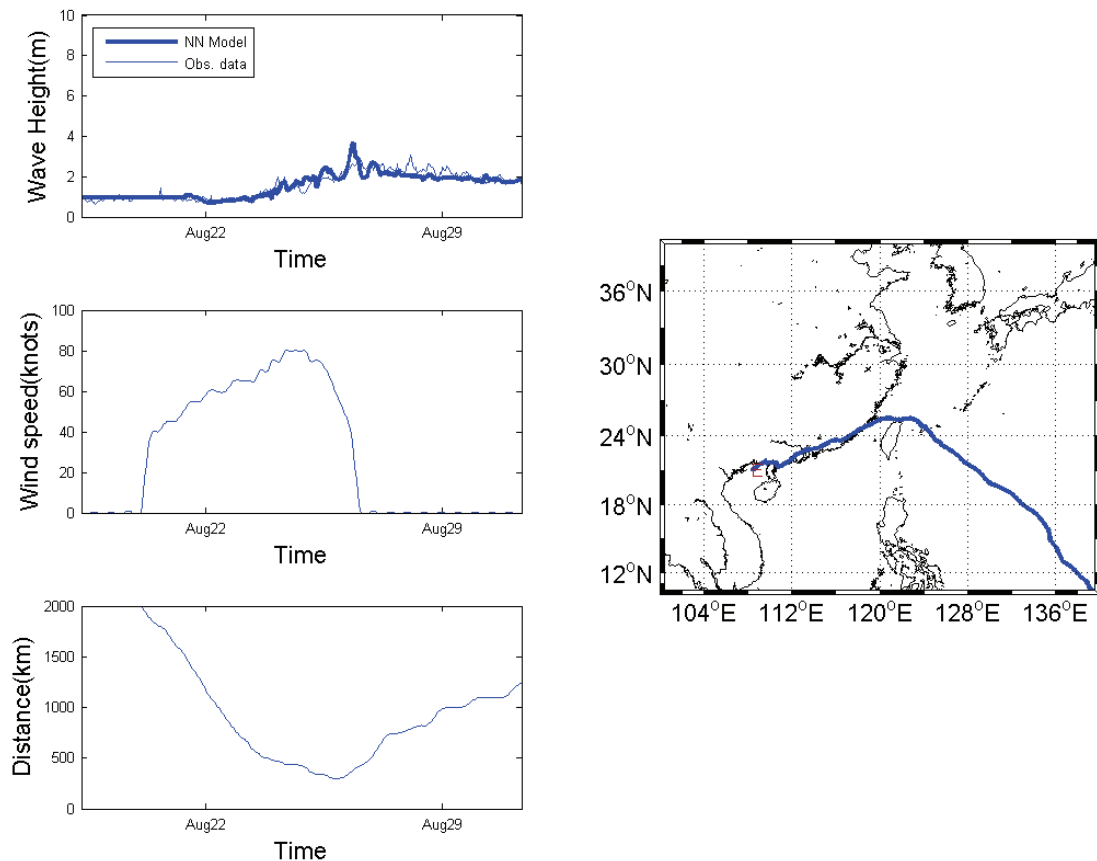


圖 2.14 艾利颱風(2004)推算結果及颱風資訊

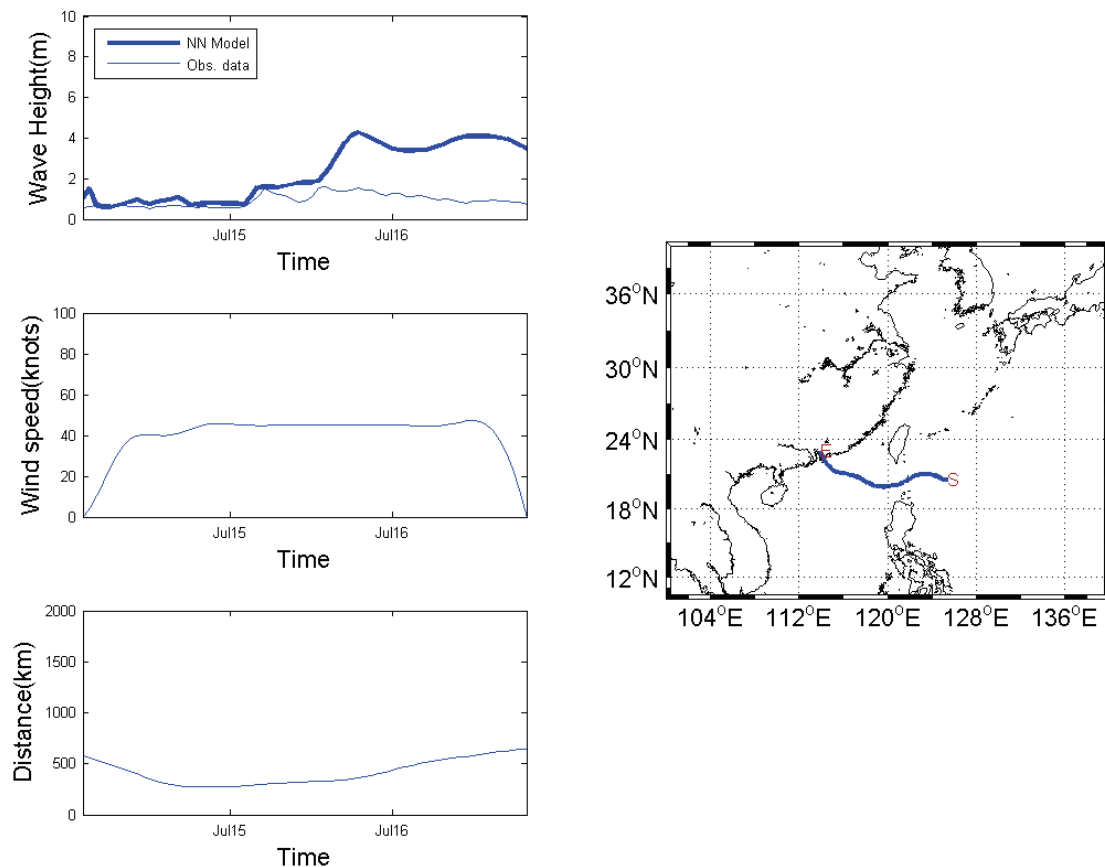


圖 2.15 康柏斯颱風(2004)推算結果及颱風資訊

另外，為驗證本項工作所建立颱風波浪推算模式之即時性預警功效，本計畫於今年 9 月 19 日對侵台之凡那比颱風 (FANAPI)進行預報性質的推算測試。凡那比颱風 9 月 15 日 20 時於琉球南方海面生成，向東北緩慢移動，16 日 20 時增強為中度颱風，並緩慢向北轉北北西移動，17 日 20 時轉為偏西至西北西移動，其暴風圈於 19 日 0 時左右接觸台灣東北部陸地，並因與地形交互作用，轉為向西南西至西南方向移動，其暴風圈逐漸籠罩全台。8 時 40 分在花蓮縣豐濱鄉附近登陸，強度略為減弱，11 時轉為向西移動，暴風圈逐漸進入澎湖地區，18 時左右颱風中心由台南進入台灣海峽，轉為偏西北西方向移動，暴風圈逐漸進入金門地區。20 日 6 時左右暴風圈脫離本島，7 時颱風中心由福建進入大陸，並轉為向西南西移動，11 時減弱為輕度颱風，暴風圈縮小。14 時轉為向西北西移動，暴風圈脫離金門近海，海上陸上颱風

警報同時解除，21 日 2 時減弱為熱帶性低氣壓。圖 2.16 與圖 2.17 為應用本計畫所建立颱風波浪推算模式，於花蓮港與高雄港的颱風波浪推算結果。

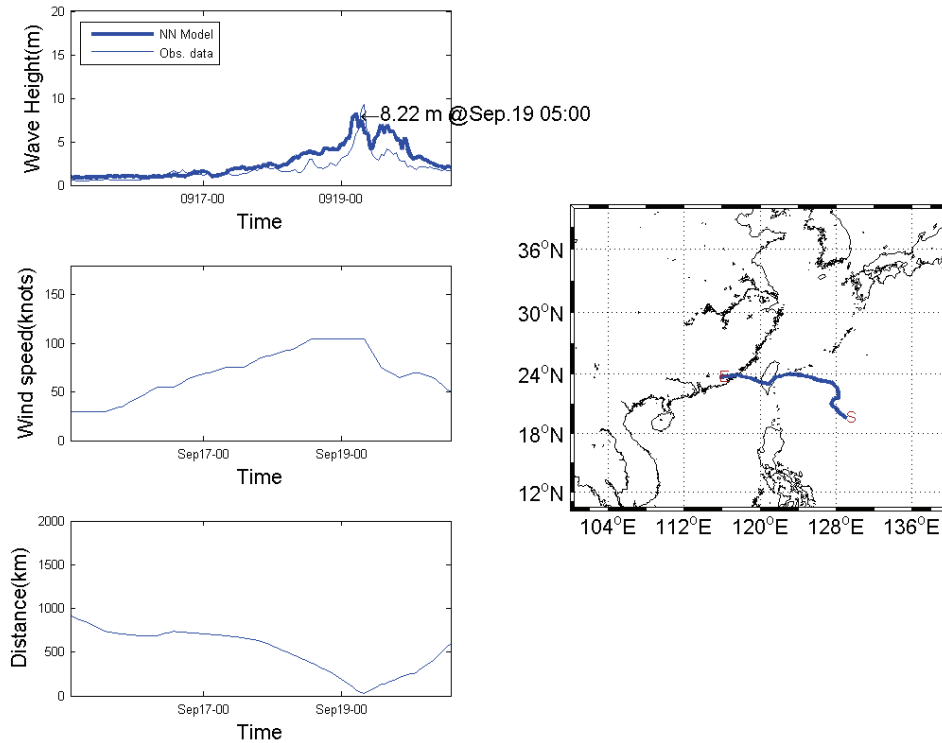


圖 2.16 凡那比颱風(2010)於花蓮港的颱風波浪推算結果

圖 2.16 為花蓮港的颱風波浪推算結果，圖中左邊由上而下分別為波高比較(粗線為推算值、細線則是實測值)、逐時風速變化與逐時距離變化，圖右則為颱風路徑圖。在波高比較圖中可發現模式推算最大波高發生於 9 月 19 日 5 時，波高為 8.22m，而實測資料顯示該時段最大波高發生於 9 月 19 日 7 時，波高為 8.99m，顯示模式預測最大波高發生時間有 2 小時誤差，波高則相近。

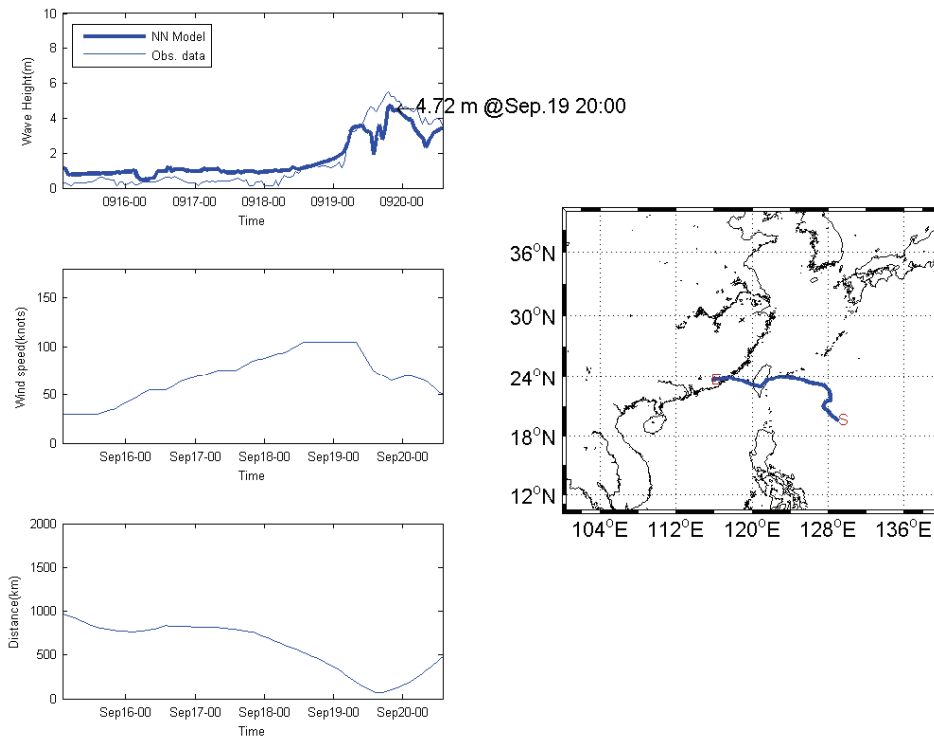


圖 2.17 凡那比颱風(2010)於高雄港的颱風波浪推算結果

圖 2.17 則是高雄港的颱風波浪推算結果，圖中標示說明和前圖相同。在波高比較圖中可發現模式推算最大波高發生於 9 月 19 日 20 時，波高為 4.72m，而實測資料顯示該時段最大波高發生於 9 月 19 日 21 時，波高為 5.80m，顯示模式預測最大波高發生時間有 1 小時誤差，波高則有近 1m 的誤差。

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。

本計畫去年度(2009 年)初步以利用 3 種所得資料為樣本來源，經由 3 種推估、4 種極值分布方法，分析探討花蓮與高雄兩港域之波浪極值統計特性結果，本年度再以更完整的分析方法，進一步獲致較佳之波浪極值統計分析結果，藉以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 極值分布函數之選擇

Fisher & Tippett (1928) 提出三種適合極值資料之機率分布函數，分別為極值 I 型(簡稱 FT-I)、極值 II 型(FT-II)和極值 III 型(FT-III)分布；另外，Weibull (1939) 研究材料破壞強度分布時所提出的 Weibull 分布和 Gauss 誤差分析試驗中所使用的對數常態分布，也是常用的極值分布函數。

由於波浪波高恆為正值的特性，上述的各種分布中，FT-I、FT-II、Weibull 及對數常態四種分布符合波高大於零的要求。又依據 Coastal

Engineering Manual (2002) 的建議，在長期波浪的條件下，適合使用的極值累積機率分布函數為 FT-I 和 Weibull 分布。因此，本項工作以極值 I 型 FT-I 與 Weibull 極值分布為討論的主題，此二種極值分布函數如式(3.1)~式(3.6)所示。

1.極值 I 型分布 (FT-I)

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

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, -\infty < x < \infty \quad (3.2)$$

2.Weibull 分布

二參數型式

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{A} \left(\frac{x}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (3.4)$$

三參數型式

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (3.6)$$

式中， x 為樣本變數； $f(x)$ 為機率密度函數； $F(x)$ 為累積機率函數；

A 為尺度參數，與樣本平均值有關； B 為位置參數，與樣本變異性有關； k 為形狀參數，與波峰偏態有關。合田(1990)建議，常用的四種 k 值為 0.75、1.0、1.4 和 2.0，因此推定三參數 Weibull 分布的參數時，常先假設形狀參數 k 的值，再推定其餘的尺度參數和位置參數。

3.1.2 極值分布參數之推定法

資料選取與極值分布函數決定後，對於極值分布中參數的推定有不同的方法。本計畫主要以使用最簡單的力矩法 (method of moment, 簡稱為 MOM)、樣本資料多時最具可靠度的最大概似法 (maximum likelihood estimates, 簡稱為 MLE) 及最常被使用的最小二乘法 (least square method, 簡稱為 LSM) 等三種作為極值分布參數推定法。

1. 力矩法 (MOM)

力矩法主要是利用極值分布函數和樣本資料之統計特性間的關係，求解極值分布函數中的參數。已知函數對原點的一階動差值為平均值，函數對平均值的二階動差值為變異數，而標準偏差為變異數的開方，因此可推求得樣本資料之平均值、標準偏差和不同極值分布函數中的參數間之關係如表 3.1 所示，表中 $\Gamma(\cdot)$ 為 Gamma 函數； $\gamma=0.5772\dots$ 為 Euler 數。

表 3.1 極值分布函數之相關統計量

極值函數	平均值	標準偏差
FT-I	$B + A\gamma$	$\pi A / \sqrt{6}$
Weibull (二參數)	$A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$A\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}$
Weibull (三參數)	$B + A\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$A\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}$

利用所有極值數據求出樣本平均值和標準偏差，再依上表中極值分布相關統計量特性之關係，可求出各種分布參數。利用力矩法推估

參數的過程，如图 3.1 所示。

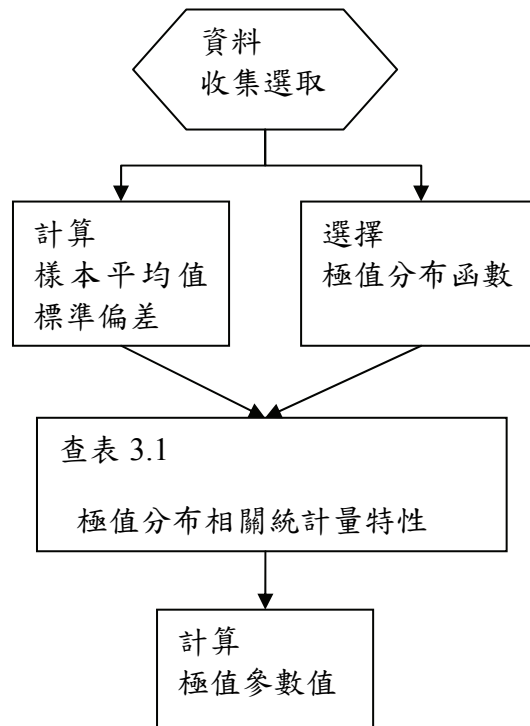


圖 3.1 力矩法參數推估流程圖

2. 最大概似法 (MLE)

最大概似法是先假設樣本的機率密度函數，再選擇該機率密度函數或對數機率密度函數為概似函數(likelihood function)。若機率密度函數中的參數值和資料的分布越符合時，則概似函數值會越大，因此可將概似函數分別對參數偏微分等於零，求出概似函數值最大時的參數值，而含此參數值的機率密度函數和樣本資料最為符合。

本計畫直接利用 Matlab 軟體內建的 mle 函數，求出樣本資料分別假設為 FT-I 和 Weibull 分布時的最大概似參數值。利用最大概似法推估參數的過程，如图 3.2 所示。

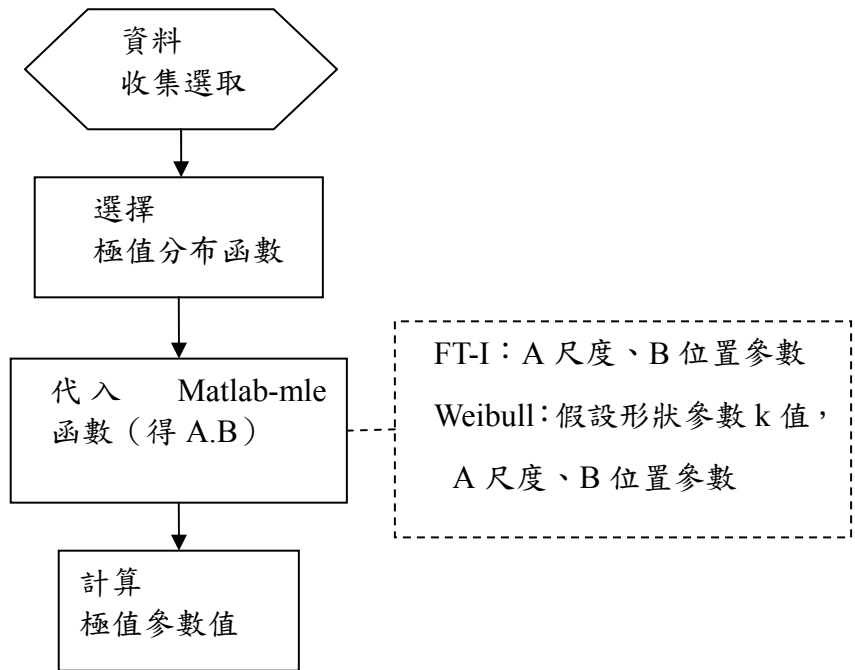


圖 3.2 最大概似法參數推估流程圖

3.最小二乘法 (LSM)

若將極值分布函數式(3.1)、(3.2)及式(3.5)、(3.6)中所含之變量定義為基準化變量 y ，如(3.7)式所示

$$y \equiv \frac{x - B}{A} \quad (3.7)$$

式中之 x 若以第 m 個順位的離散資料 x_m 代入時，可得相對應之 y 值為 y_m 。由(3.7)式可知， y_m 和 x_m 的關係如式(3.8)之線性關係，分布函數的位置參數 B 為其截距，而斜率則為分布函數的尺度參數 A 。

$$x_m = Ay_m + B \quad (3.8)$$

因此，當 y_m 和 x_m $m=1,2,\dots$ 值已知時，可利用最小二乘法求解式(3.8)的 A 、 B 參數值。

由式(3.2)與式(3.6)可得 y_m 和第 m 個順位的累積機率 F_m 的關係如下兩式：

$$y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (\text{FT-I 分布}) \quad (3.9)$$

$$y_m = [-\ln(1 - F_m)]^{1/k} \quad (\text{Weibull 分布}) \quad (3.10)$$

式(3.9)與式(3.10)中的 F_m 需由樣本資料推求。

一般極值參數的推定法，應該具有不偏性（unbiasedness）及有效性（efficiency）兩個條件，因此在 LSM 法中應該如何決定排序資料的機率而不導致偏態結果，亦即應該如何給予適當的劃位（plotting position），是極為重要的步驟。合田（1990）提出不同極值分布之劃位，當選取 N 個資料後，首先將 N 個資料由大到小按順序排列，再計算第 m 個順位的累積機率 F_m ，其計算公式如下：

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, m = 1, 2, \dots, N \quad (3.11)$$

式中的 α 及 β 值，依 Goda（2000）建議如表 3.2。

表 3.2 計算樣本順位機率之 α 及 β 值

分布函數	α 值	β 值
FT-I 分布	0.44	0.12
Weibull 分布	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$

表中的 k 為形狀參數，本計畫依合田(1990)建議，分別假設 k 值為 0.75、1.0、1.4 及 2.0 代入計算。利用最小二乘法推估參數的過程，如圖 3.3 所示。

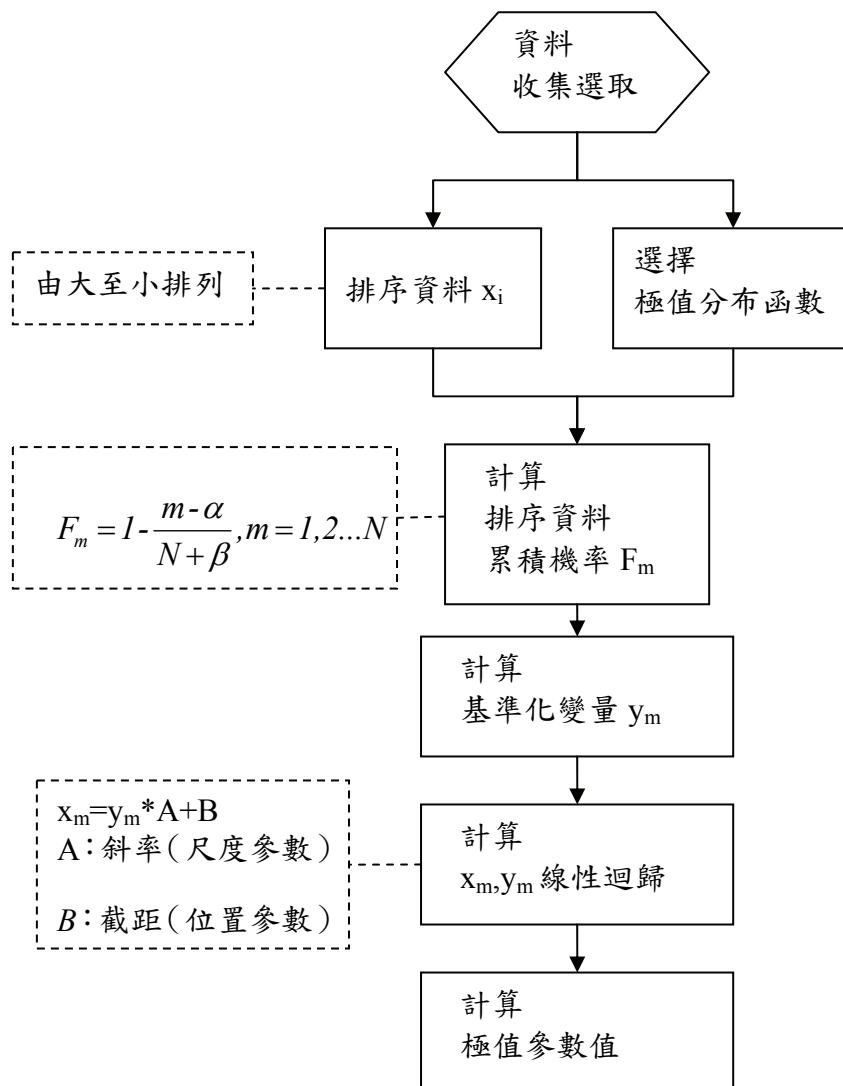


圖 3.3 最小二乘法參數推估流程圖

3.1.3 信賴檢定評估

模式是否具有可靠性，需要一個準則來衡量模式推估值與實際觀測值的殘差，檢定所選定的極值分布函數與推定的參數是否符合樣本的統計特性。理論上，誤差 ε_i 越小表示模式越精確，但 ε_i 為隨機變數，故只能計算殘差值 e_i

$$e_i = t_i - \hat{t}_i \quad (3.12)$$

式(3.12)中， t_i 為實際觀測值， $\hat{t}_i$ 為模式推估值。

當殘差小表示模式好，而 n 筆資料有 n 個殘差值，將之整合成一個量。因 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ ，當 σ^2 小時，則 ε_i 都接近零，故此整合的量即為 σ^2 的估計值。誤差項的變異數的估計量 $\hat{\sigma}^2$ ，是殘差平方和的平均，稱為殘差均方和（Mean Square due to Error, MSE）如下式。

$$\hat{\sigma}^2 = MSE = \frac{\sum e_i^2}{n} = \frac{\sum (t_i - \hat{t}_i)^2}{n} \quad (3.13)$$

比較不同的迴歸結果之優劣時，因迴歸函數中的參數數量不同，必須考慮自由度的影響，故評估所建立的推估公式之良窳時，常以誤差均方根(Root of Mean Square Error, RMSE)以及相關係數(Correlation Coefficient)作為依據，誤差均方根係指迴歸公式輸出變數的平均誤差均方根，其計算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum e_i^2)}{n-m-1}} \quad (3.14)$$

式(3.14)中， n 為觀測資料數， m 為迴歸參數個數。

設有 n 對 x, y 的資料， $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分別是變數 x 、 y 的平均值。其相關係數 R 為

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.15)$$

式(3.15)中， x_i 與 y_i 分別為母體中隨機抽取第 i 組樣本值。

由上述公式代入所得的 R ，其相關的度不是與 r 成正比，相關係數只是表示二變項之間關係密切與否的指標。

3.2 資料來源與處理方式

本節中說明所需資料的相關處理方式，其中，先說明遺漏資料之補齊方法，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，最後說明由樣本推估重現期極值波高的方法。

3.2.1 資料來源

本項工作所分析的波浪資料為本所港研中心於花蓮與高雄兩港之觀測所得，花蓮港的波浪記錄時間為1990年~2008年，而高雄港部分則是2001年~2009年，皆取每1小時一筆的示性波高與週期資料。再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（即每個月選一筆月最大波高及每年選一筆年最大波高），做為分析極值波高的樣本資料。

觀察兩個港域的波高資料，其中有若干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，本計畫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，以取每年相同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。以月最大法選取的花蓮港與高雄港每月最大波高資料，如表3.3與表3.4所示。

表 3.3 花蓮港每月最大波高資料表（單位:公尺）

月份 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
1990	3.62	3.21	2.43	2.83	2.50	10.19	1.91	4.67	7.60	3.83	4.81	3.26
1991	3.19	3.36	2.72	4.01	5.71	2.65	9.90	2.49	6.39	8.94	3.78	3.90
1992	3.09	4.03	2.49	3.44	1.67	5.28	2.60	4.30	6.95	3.82	4.55	3.18
1993	3.38	2.91	2.71	2.67	1.37	5.63	1.14	4.18	3.27	5.11	3.36	3.20
1994	2.69	2.74	2.93	2.08	1.70	1.64	10.48	7.62	7.08	8.32	2.73	3.18
1995	2.60	2.46	2.67	3.07	1.93	1.44	2.64	6.85	3.66	2.82	2.37	2.72
1996	2.88	3.09	2.31	2.69	3.26	1.24	4.64	7.46	4.68	3.01	2.25	2.50
1997	2.78	1.66	2.30	3.12	2.00	3.10	3.56	8.85	2.22	3.21	5.71	2.43
1998	2.63	2.26	2.40	2.75	2.10	2.51	1.92	6.70	3.38	7.45	3.20	3.45
1999	2.70	3.32	2.71	2.67	2.55	3.08	2.75	3.34	2.22	2.14	3.08	3.55
2000	2.96	2.58	2.61	2.47	0.95	2.95	5.75	8.96	3.01	2.55	6.07	2.70
2001	2.94	3.00	2.46	1.90	3.30	1.72	5.79	3.14	3.18	4.48	1.53	3.07
2002	3.30	3.15	3.27	2.58	2.43	1.63	8.18	3.33	4.53	2.82	2.90	3.54
2003	3.58	3.07	3.53	3.76	2.79	3.71	3.71	2.91	1.51	3.21	3.49	3.10
2004	3.16	3.21	2.77	2.41	2.43	3.69	5.50	3.68	2.88	5.72	2.55	4.38
2005	2.81	2.70	3.52	2.47	2.10	2.62	7.50	3.86	7.53	10.85	3.38	3.37
2006	3.32	3.23	3.62	2.31	2.89	1.35	5.25	5.25	4.24	2.89	3.53	3.19
2007	3.36	2.74	2.69	2.85	1.38	2.12	3.69	9.26	3.74	6.49	4.43	2.45
2008	2.73	3.14	2.17	2.09	2.73	1.92	7.32	2.97	6.00	2.05	3.56	1.19

表 3.4 高雄港每月最大波高資料表（單位:公尺）

月份 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
2001	1.30	1.18	1.36	0.91	2.23	7.95	3.32	2.50	3.77	1.09	0.72	1.10
2002	1.37	1.39	1.43	0.96	1.96	1.19	3.74	5.38	2.20	1.21	1.07	1.19
2003	1.45	1.59	1.50	1.01	1.69	2.62	4.16	3.57	4.96	1.00	1.42	2.63
2004	1.52	1.68	1.12	1.74	3.42	2.13	4.94	3.09	3.59	1.88	1.35	4.06
2005	1.59	1.77	1.55	1.64	5.05	3.82	6.46	4.75	4.94	2.64	1.12	1.34

2006	1.27	1.48	1.39	1.53	6.67	4.24	5.75	4.17	1.91	1.26	1.24	1.20
2007	1.27	1.44	1.42	1.32	1.00	1.95	2.16	2.91	1.98	4.18	1.83	1.24
2008	1.27	1.39	1.39	1.19	1.40	4.53	5.27	6.12	3.53	1.24	1.38	1.14
2009	1.28	1.19	1.56	1.14	1.15	6.41	3.55	0.93	4.17	3.08	1.42	1.09

3.2.2 箱型圖分析資料樣本方法

利用觀測儀器所蒐集資料的過程中，可能因儀器本身或其它不明原因而產生異常的雜訊，為確認所分析極值資料的合理性，本計畫引用統計學上的箱型圖（Box Plot）理論進行資料篩分，並佐以實測的海象資料，進一步進行資料之檢驗，相關箱型圖架構如圖 3.4 所示。

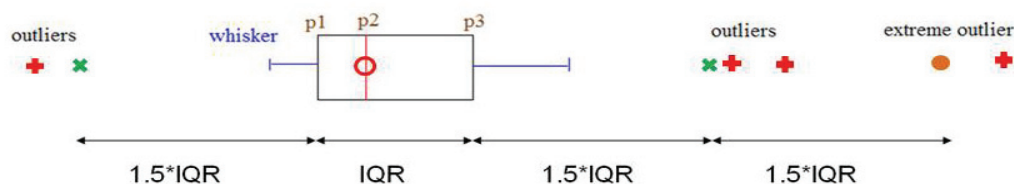


圖 3.4 箱型圖架構示意圖

由圖 3.4 顯示，三個四分位數(即圖上 p1、p2、p3 點位值)構成箱型圖主體，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，並利用下式判定四分位數值。

$$P_i = N * i / 4, \quad i=1,2,3,4 \quad (3.16)$$

式(3.16)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，稱為第 i 個四分位數。其中，估算第一個四分位數 (p1) 與第三個四分位數 (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；估算第二個四分位數 (p2) 時，取 i=2，為排序第 50%處的資料值，描述資料的中位數。

經由上式所計算出的四分位數，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，則以十字表示。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。

將前表 3.3 與表 3.4 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，其流程圖 3.5 所示。

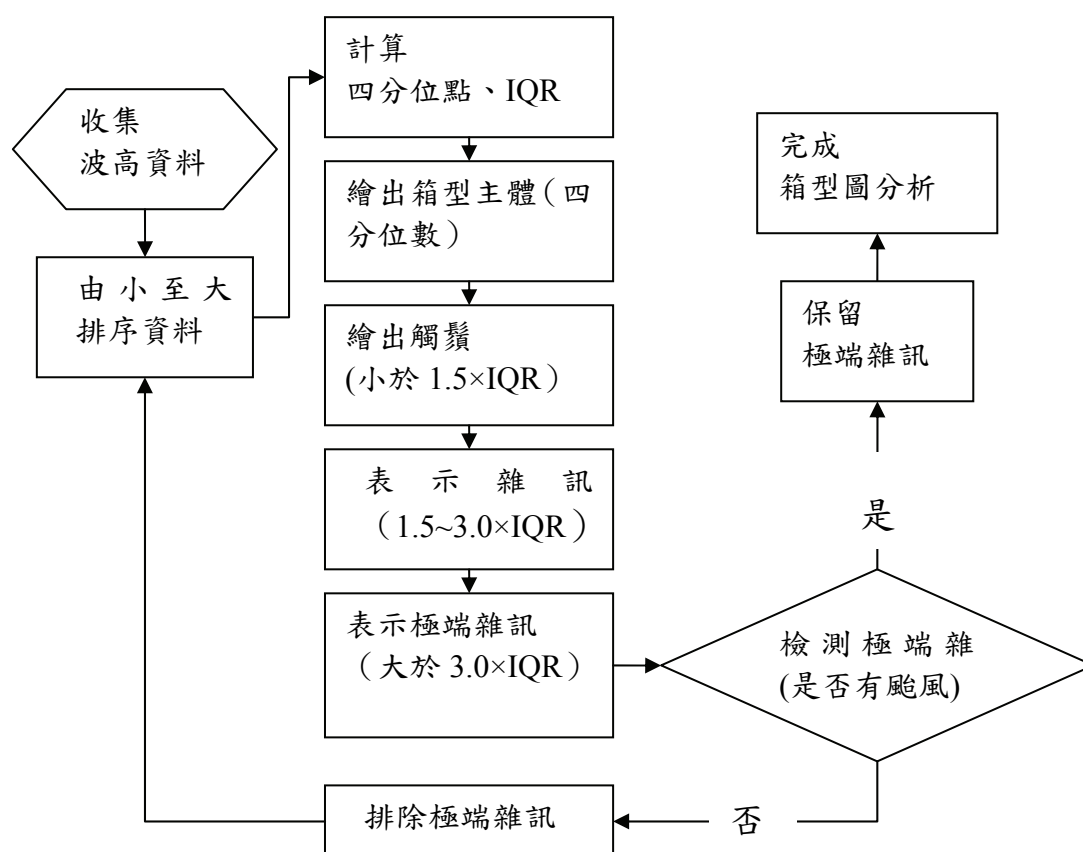


圖 3.5 箱型圖分析流程圖

經由箱型圖分析後，通常會將極端雜訊的樣本資料捨棄，但因計畫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。因此再引用中央氣象局

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 3.6 與圖 3.7 所示分別為花蓮港 1990~2008 年及高雄港 2001~2009 年每個月極值波高的箱型圖，圖中長形實線為箱型圖主體，空心圓點為中位數值，實心圓為觸鬚上界限，細虛線為 IQR 數值部份，虛線頂端為雜訊上界限。參照前述圖表可知，花蓮港 6 月份波高的雜訊上界限值為 9.84m，1990 年 6 月發生的 10.19m 極值波高，屬於極端雜訊波高，其餘 2、3、4、5 及 12 月的極值波高均屬於雜訊波高。另外，高雄港 12 月波高的雜訊上界限值為 1.94m，2004 年 12 月發生的 4.06m 極值波高，屬於極端雜訊波高，3 月的極值波高均屬於雜訊波高。

依中央氣象局提供的歷年颱風資訊，1990 年 6 月 21 日至 24 日間曾發生歐菲莉中度颱風，颱風路徑為第六類，屬於沿東岸或東部海面北上直接影響花蓮港的路徑。依箱形圖分析所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。

表 3.5 花蓮港 1990~2008 年每月波高之箱型圖分析表（單位：公尺）

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	2.73	2.70	2.43	2.41	1.70	1.64	2.64	3.33	3.01	2.82	2.73	2.70
中位數	2.96	3.07	2.69	2.67	2.43	2.62	4.64	4.30	3.74	3.82	3.38	3.18
第三四分位數	3.32	3.21	2.93	3.07	2.79	3.69	7.32	7.46	6.39	6.49	4.43	3.45
IQR	0.59	0.51	0.50	0.66	1.09	2.05	4.68	4.13	3.38	3.67	1.70	0.75
1.5*IQR	0.89	0.77	0.75	0.99	1.64	3.08	7.02	6.20	5.07	5.51	2.55	1.13
3*IQR	1.77	1.53	1.50	1.98	3.27	6.15	14.04	12.39	10.14	11.01	5.10	2.25
觸鬚上界限	4.21	3.98	3.68	4.06	4.43	6.77	14.34	13.66	11.46	12.00	6.98	4.58
雜訊上界限	5.09	4.74	4.43	5.05	6.06	9.84	21.36	19.85	16.53	17.50	9.53	5.70

表 3.6 高雄港 2001~2009 年每月波高之箱型圖分析表（單位：公尺）

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	1.27	1.19	1.36	1.01	1.15	2.13	3.55	2.50	2.20	1.21	1.12	1.14
中位數	1.28	1.39	1.39	1.19	1.69	3.82	4.16	3.09	3.59	1.26	1.35	1.20
第三四分位數	1.30	1.59	1.50	1.53	3.42	4.53	5.27	4.17	4.17	2.64	1.42	1.34
IQR	0.03	0.40	0.14	0.52	2.27	2.40	1.72	1.67	1.97	1.43	0.30	0.20
1.5*IQR	0.05	0.60	0.21	0.78	3.41	3.60	2.58	2.51	2.96	2.15	0.45	0.30
3*IQR	0.09	1.20	0.42	1.56	6.81	7.20	5.16	5.01	5.91	4.29	0.90	0.60
觸鬚上界限	1.35	2.19	1.71	2.31	6.83	8.13	7.85	6.68	7.13	4.79	1.87	1.64
雜訊上界限	1.39	2.79	1.92	3.09	10.23	11.73	10.43	9.18	10.08	6.93	2.32	1.94

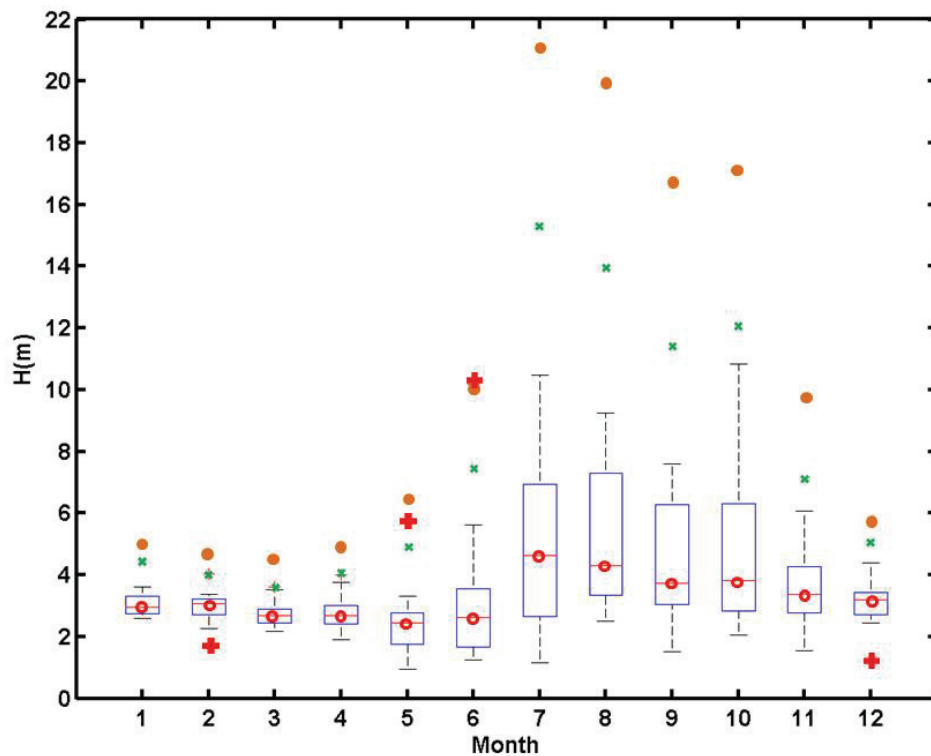


圖 3.6 花蓮港 1990~2008 年極值波高箱型圖

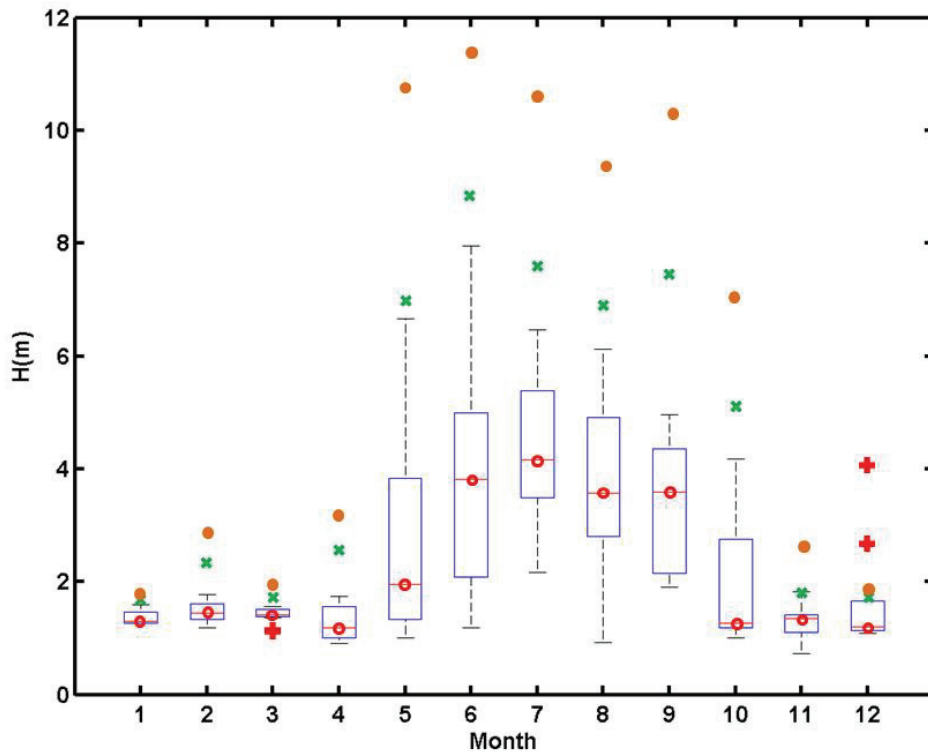


圖 3.7 高雄港 2001~2009 年極值波高箱型圖

3.2.3 重現期之極值波高估算

利用前 3.1.2 節所述之參數推定法推得不同分布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，代入式(3.17)中可計算 T 年重現期的可靠度累積機率 F_T

$$F_T = 1 - 1/T \quad (3.17)$$

將 F_T 取代式(3.9)及式(3.1)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 ，圖 3.8 為估算 T 年重現期之極值波高流程圖。

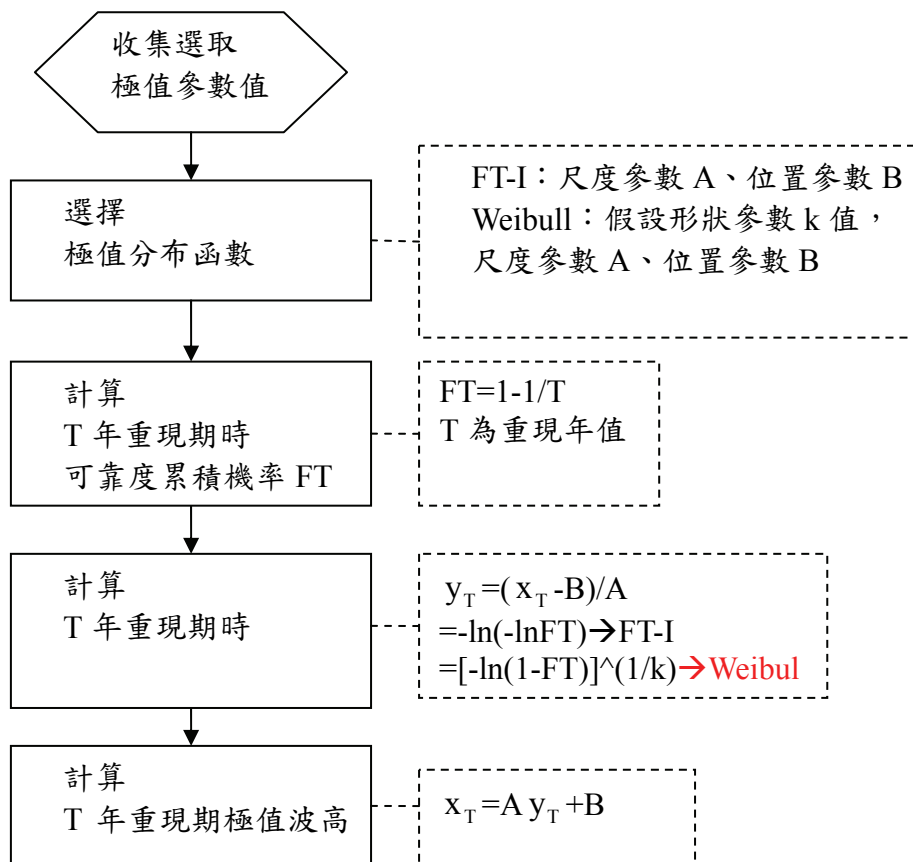


圖 3.8 T 年重現期極值波高之估算流程示意圖

3.3 極值波高之分析結果

經由前節說明，本節中將以兩種極值分布函數與三種參數推估法分析波高與機率密度圖，並依殘差均方根檢定，決定最佳的極值統計方法。隨後考慮參數季節性變化，提出參數迴歸公式，將代入迴歸公式修正後的參數，應用於極值波高的估算。最後，討論常見的年最大法及考慮季節性的月最大法，並比較重現期 19、50 年及參數迴歸修正前後的極值波高變化。

3.3.1 最佳極值統計方法之決定

極值統計的方法中包括許多的極值分布函數及各種參數推估方法，但目前為止仍未能找到一套適合所有的狀況，其適用程度視資料本身的特性而定，當選擇不同的極值分布函數與不同的參數推定方法，所推算出來的極值波高也不相同。

波高極值統計方法須先建立波高與累積機率、機率密度關係圖。由累積機率關係圖可推估各重現期下單一最大極值波高，機率密度圖可得知觀測資料與各重現期下整體的極值波高分布情況。而所謂的「重現期」，是指根據統計平均每隔若干年便會出現一次某程度事件，亦顯示發生某程度事故發生的機率，越長的重現期所對應的即為較罕見的事件。

在極值統計時，先判定在不同的資料選取方法下，決定某極值分布函數與參數推估法有最佳的情況，是討論最佳極值參數特性的首要目標。由前節所述，本計畫所引用之極值分布函數 Weibull 分布比 FT-I 型多了形狀參數，故本節中擬分成兩部份分析探討，第一部份比較波高的累積機率圖，由單一最大波高決定何種極值分布與極值方法有較佳的配適結果；第二部份討論整體波高機率密度圖。

檢定樣本的統計特性是否適合於所選極值方式，本計畫擬使用殘差均方根方式比較。當其值越小，表示函數與參數越能代表母體情況，其中，在年最大法有 1 種情況、月最大法十二個月份下有 12 種情況，考慮每種情況下最小的兩個殘差均方根，藉以判定何種極值分布函數與參數推估法，決定最佳方法為何。

1. 第一部份：三種參數推估方法與兩種極值分布下最佳情況之決定

由本所港研中心於花蓮港海域觀測所得 1990~2008 年共有 19 年的每月最大值波高為統計樣本，以 3 種參數推估法於 2 種選擇極值分布函數，推估出此樣本之波高與累積機率關係圖。本計畫在此僅列出年最大法，推算 FT-I 型累積機率分布為例。

圖 3.9 為極值分布函數為 FT-I 型下不同參數推估法之累積機率圖，由圖中可得知，年最大法中觀測資料的最大波高值，與 LSM 和 MOM 所推估之波高最接近，差異最大為 MLE。表 3.7 為花蓮港 19 年重現期之極值推估波高中 FT-I 型的推估 19 年重現期極值波高，由表中結果得知，MOM 法所得為 11.47m、LSM 法為 11.52m、MLE 法為 13.82m 與觀測值 10.85m 的結果，MOM 和 LSM 所推估之波高最接近觀測值，有相同的結果。在圖中大於 7.5m 的波高，其 FT-I 型下參數推估法以 MOM 和 LSM 最接近分布趨勢。而 MLE 因理論須符合大部分波高值出現的機率，可觀察到小於 7.5m 的波高較接近 MLE 趨勢。

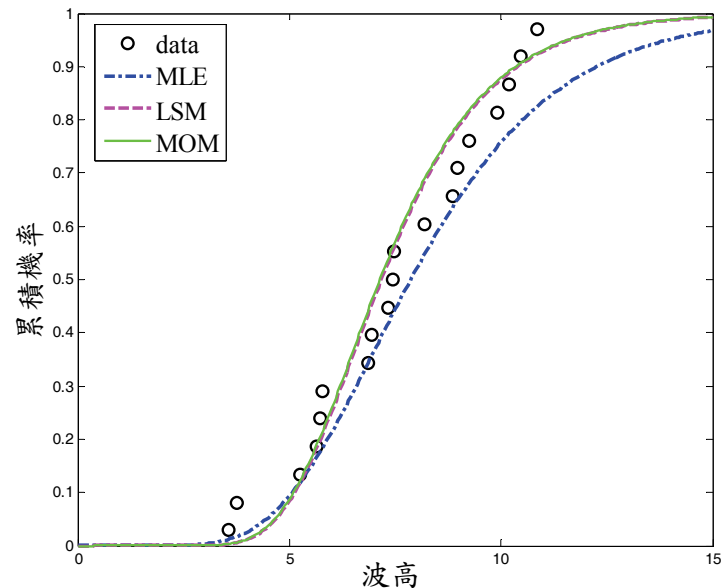


圖 3.9 年最大法 FT-I 型下不同參數推估法之波高與累積機率圖

表 3.7 花蓮港 19 年重現期之極值推估波高

極值分布函數		FT-I			Weibull												觀測值	
極值推估法	年最大法	MOM	LSM	MLE	MOM				LSM				MLE				k=2.0	觀測值
					k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0	k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0	k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0		
月最大法	一月	11.47	11.52	13.82	11.49	11.62	11.52	11.30	11.23	11.53	11.57	11.43	12.00	10.31	10.42	11.55	10.85	
	二月	3.63	3.65	3.70	3.63	3.65	3.64	3.60	3.64	3.67	3.66	3.63	3.67	5.30	3.57	3.58	3.62	
	三月	3.85	3.83	4.29	3.85	3.88	3.86	3.81	3.78	3.82	3.83	3.80	3.91	4.71	3.81	3.72	4.03	
	四月	3.55	3.57	3.41	3.55	3.58	3.56	3.51	3.59	3.62	3.59	3.53	3.60	4.47	3.37	3.46	3.62	
	五月	3.75	3.80	3.79	3.75	3.79	3.76	3.71	3.83	3.86	3.83	3.76	3.82	4.30	3.52	3.69	4.01	
	六月	4.28	4.31	4.06	4.28	4.35	4.30	4.19	4.45	4.45	4.34	4.19	4.46	2.83	4.05	4.10	5.71	
	七月	6.94	6.92	4.44	6.96	7.09	6.99	6.77	7.46	7.37	7.04	6.64	5.95	3.15	6.14	6.32	10.19	
	八月	10.20	10.41	10.19	9.94	10.11	9.98	9.70	10.21	10.43	10.30	9.97	7.87	5.55	9.67	9.50	10.48	
	九月	9.44	9.53	7.94	9.46	9.60	9.49	9.25	9.53	9.75	9.66	9.39	11.02	5.88	9.36	8.98	9.26	
	十月	8.13	8.17	8.56	7.96	8.08	7.99	7.79	7.95	8.16	8.12	7.93	8.18	4.95	6.83	7.71	7.60	
	十一月	9.40	9.58	6.92	9.41	9.57	9.45	9.19	9.90	9.99	9.75	9.34	6.18	4.86	8.93	8.78	10.85	
	十二月	5.65	5.76	5.91	5.66	5.73	5.68	5.56	5.79	5.86	5.80	5.66	5.92	4.63	4.76	5.61	6.07	
十二月	4.30	4.26	4.94	4.30	4.34	4.31	4.24	4.18	4.24	4.25	4.21	4.46	4.71	4.01	4.06	4.38		

由上圖 3.9 波高累積機率關係圖，分析花蓮港 19 年重現期累積機率 $F_m = 1 - 1/19$ 下的最大波高，如表 3.7 所示，而估算波高最大值與 19 年觀測最大值的殘差均方根，如表 3.8。

表中分析殘差均方根以總評估值及 RMSE 總和兩種方式作為討論比較，其中總評估值為在每種情況下出現最小殘差均方根值評分為 1，第二最小值評分為 $1 \times (\text{Min1}/\text{Min2})$ ，其餘皆評分為 0，只考慮每種情況下最接近觀測資料的兩種方法；總計每個極值分布與參數推估法所有情況下的評分後，得到總評估值。另一種 RMSE 總和方式為直接將各種情況下的殘差均方根相加，考慮每種情況下所有方法的影響，得 RMSE 總和；總評估值越大，RMSE 總和越小，代表其極值分布與參數推估法越佳。

由表 3.8 之分析結果顯示，19 年波高最大值以極值分布函數為 Weibull 分布、參數推估法為 LSM，是花蓮港最佳極值統計方法。但月最大法的十一月極值波高，並非在 Weibull 分布 LSM 法有最小的殘差均方根，而是在 Weibull 分布與 FT-I 型的 MLE 法，有更小的殘差均方根。由此可知，最佳的極值統計方法，並非適合所有月份情況，而是在大部分的極值波高有較接近的極值特性分布。

Weibull 分布 LSM 法 $k=1.0$ 有最小總評估值，Weibull 分布 LSM 法 $k=0.75$ 有第二小總評估值；Weibull 分布 LSM 法 $k=0.75$ 有最小 RMSE 總和，Weibull 分布 LSM 法 $k=1.0$ 有第二小 RMSE 總和。由上述兩評估方法，得知 LSM 法 Weibull 分布相較其他參數推法與極值分布有較佳的配適情況。後續第二部份，以整體的機率密度分布情況，判定何種形狀參數有較佳的配適結果。

表 3.8 重現期 19 年最大值波高之殘差均方根比較表

極值函數		FT-I			Weibull												Min1 /Min2
極值推估 法	MOM	LSM	MLE	MOM				LSM				MLE					
				k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0	k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0	k=0.75	k=1.0	k=1.4	k=2.0		
年最大法 月 最 大 法	0.624	0.674	2.965	0.637	0.772	0.671	0.447	0.384	0.677	0.723	0.585	1.15	0.545	0.434	0.703	0.8844	
	0.009	0.029	0.084	0.011	0.031	0.016	0.017	0.016	0.05	0.044	0.011	0.052	1.68	0.048	0.038	0.8263	
	0.181	0.2	0.257	0.178	0.147	0.17	0.222	0.254	0.208	0.204	0.232	0.118	0.68	0.221	0.306	0.7987	
	0.073	0.051	0.212	0.071	0.044	0.064	0.109	0.029	0.001	0.028	0.086	0.015	0.85	0.246	0.155	0.075	
	0.259	0.206	0.216	0.256	0.222	0.248	0.304	0.179	0.148	0.183	0.254	0.186	0.292	0.487	0.324	0.8281	
	1.434	1.404	1.652	1.428	1.364	1.412	1.517	1.255	1.258	1.367	1.521	1.246	2.884	1.664	1.613	0.9929	
	3.247	3.274	5.753	3.235	3.104	3.202	3.42	2.73	2.821	3.148	3.552	4.244	7.042	4.045	3.874	0.9678	
	0.285	0.066	0.286	0.541	0.373	0.499	0.779	0.272	0.054	0.179	0.509	2.612	4.934	0.809	0.979	0.8225	
	0.182	0.265	1.315	0.196	0.338	0.231	0.005	0.27	0.486	0.4	0.128	1.764	3.381	0.098	0.276	0.0517	
	0.534	0.57	0.957	0.363	0.483	0.394	0.194	0.351	0.559	0.522	0.326	0.576	2.648	0.765	0.11	0.5657	
	1.451	1.267	3.926	1.435	1.277	1.395	1.659	0.955	0.86	1.099	1.507	4.669	5.987	1.924	2.071	0.9004	
	0.418	0.311	0.158	0.411	0.339	0.393	0.512	0.28	0.205	0.268	0.408	0.149	1.438	1.31	0.464	0.9445	
0.085	0.123	0.563	0.081	0.039	0.07	0.139	0.2	0.135	0.129	0.166	0.083	0.329	0.366	0.322	0.5581		
總評估值	1	0.8225	0.9445	0.8263	1.7987	0.5581	1.5657	4.7214	4.9678	0	0	3.075	0	0.9361	1		
RMSE 總和	8.7822	8.4425	18.345	8.843	8.5333	8.7646	9.3247	7.1766	7.4633	8.2962	9.2853	16.866	32.69	12.419	11.235		

2.第二部份：整體波高機率密度圖之討論

表 3.9 為前第一部份分析所知，以最佳推估 LSM 法與分布函數 Weibull 分布計算不同形狀參數下，其機率密度之殘差均方根。

表 3.9 LSM 法、Weibull 分布不同形狀參數下機率密度之殘差均方根

資料選取		參數值			RMSE	資料選取		參數值			RMSE
		k	A	B				k	A	B	
年最大法		0.75	1.23	6.04	0.291	年最大法		1.4	3.26	4.53	0.059
		1	2.07	5.43	0.388			2	4.75	3.29	0.032
月最大法	一月	0.75	0.20	2.80	2.195	月最大法	七月	0.75	1.73	2.91	0.174
		1.00	0.32	2.71	1.571			1.00	2.81	2.16	0.160
		1.40	0.50	2.58	0.348			1.40	4.26	1.08	0.034
		2.00	0.71	2.40	0.164			2.00	6.04	-0.39	0.013
	二月	0.75	0.28	2.61	2.552		八月	0.75	1.41	3.59	0.261
		1.00	0.45	2.49	3.295			1.00	2.31	2.96	0.162
		1.40	0.71	2.30	0.447			1.40	3.52	2.05	0.032
		2.00	1.03	2.02	0.286			2.00	4.98	0.84	0.023
	三月	0.75	0.28	2.43	1.921		九月	0.75	1.16	3.05	0.328
		1.00	0.44	2.31	0.857			1.00	1.92	2.51	0.255
		1.40	0.67	2.14	0.147			1.40	2.95	1.74	0.042
		2.00	0.94	1.92	0.102			2.00	4.22	0.69	0.030
	四月	0.75	0.36	2.32	0.799		十月	0.75	1.70	2.71	0.256
		1.00	0.57	2.17	0.827			1.00	2.70	2.03	0.083
		1.40	0.86	1.96	0.143			1.40	4.02	1.07	0.016
		2.00	1.22	1.67	0.092			2.00	5.57	-0.21	0.034
	五月	0.75	0.67	1.61	0.481		十一月	0.75	0.74	2.67	0.423
		1.00	1.05	1.37	0.393			1.00	1.19	2.35	0.441
		1.40	1.54	1.00	0.099			1.40	1.81	1.90	0.066
		2.00	2.14	0.51	0.062			2.00	2.56	1.28	0.029
	六月	0.75	1.44	1.37	0.316		十二月	0.75	0.36	2.64	2.419
		1.00	2.20	0.88	0.076			1.00	0.60	2.47	3.237
		1.40	3.17	0.20	0.038			1.40	0.94	2.21	0.427
		2.00	4.29	-0.72	0.049			2.00	1.38	1.85	0.201

考慮颱風造成波高偏差變化，將月最大法分成颱風期（6-11 月）與季節風期（12-5 月）情況下的 A、B、k 值。由前表 3.9 可知，當 k 值越大，A 也隨之增加，而 B 會隨之減小。由合田（1990）建議 Weibull 分布常用四種不同 k 值（ $k_1=0.75$ 、 $k_2=1.0$ 、 $k_3=1.4$ 、 $k_4=2.0$ ）下，k 值越小，表示極值波高的範圍越窄，相對於所繪出的機率密度圖會越尖銳，故圖以 k_1 、 k_2 與 k_3 、 k_4 分群表示。

在季節風期下，無颱風影響，極值波高的範圍小，所對應的機率密度值相對增大。而季節風期下的機率密度圖，以月最大法之一、三月為例，不同形狀參數的理論值，大致接近觀測值的機率密度線分布，如圖 3.10~圖 3.13 所示。

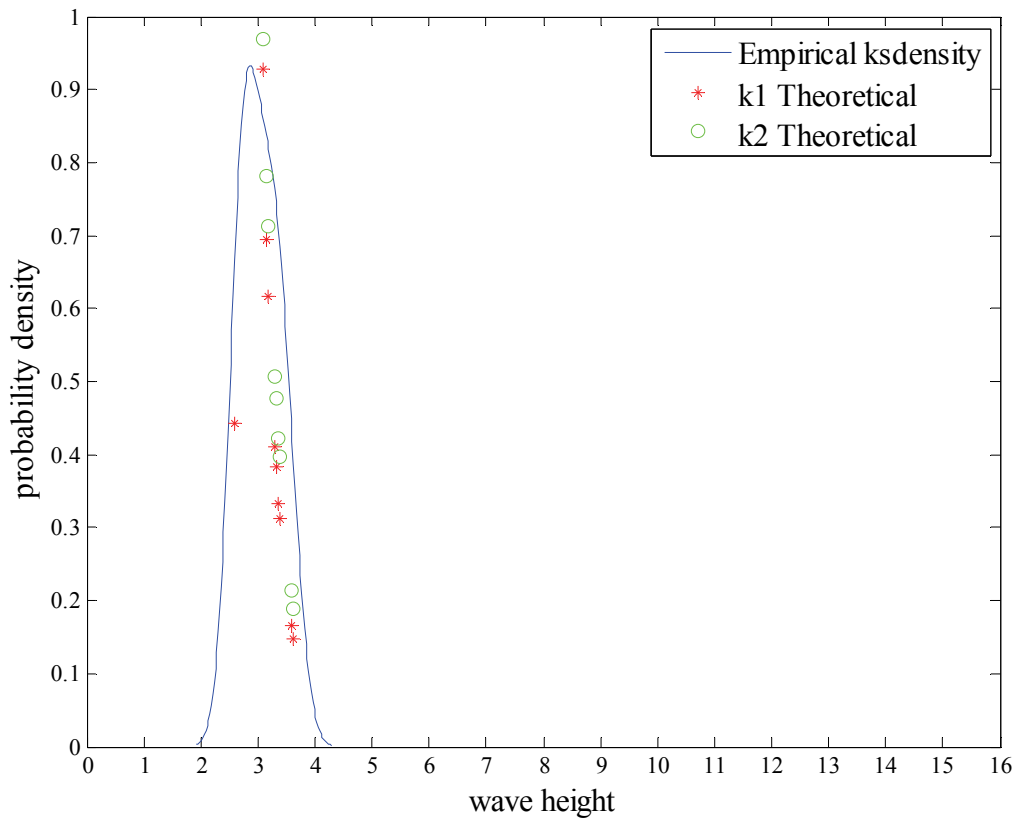


圖 3.10 LSM 法 Weibull 分布月最大法 1 月 k_1 、 k_2 與實測值機率密度圖

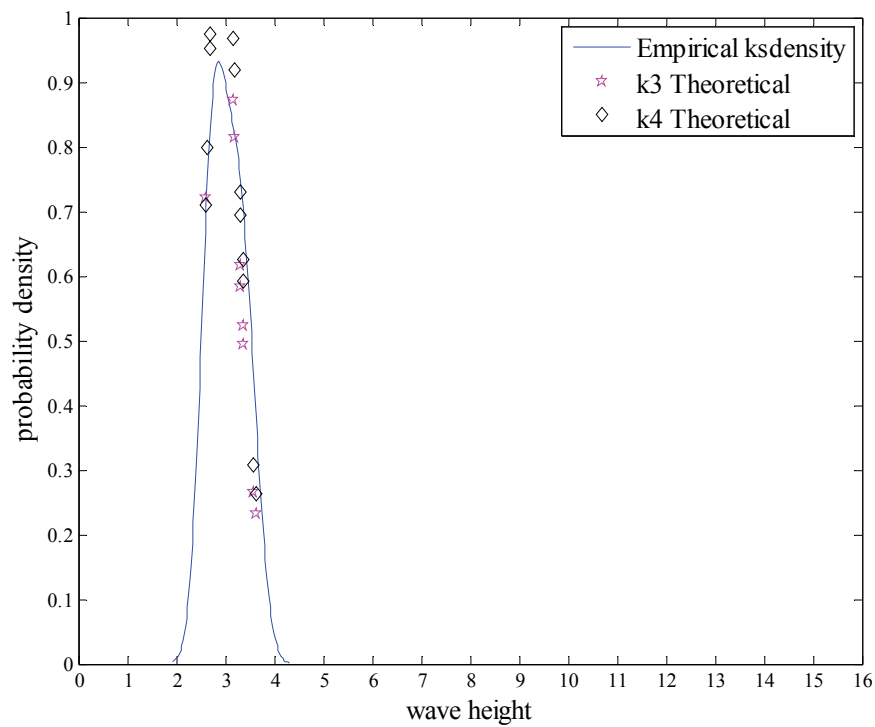


圖 3.11 LSM 法 Weibull 分布月最大法 1 月 k3、k4 與實測值機率密度圖

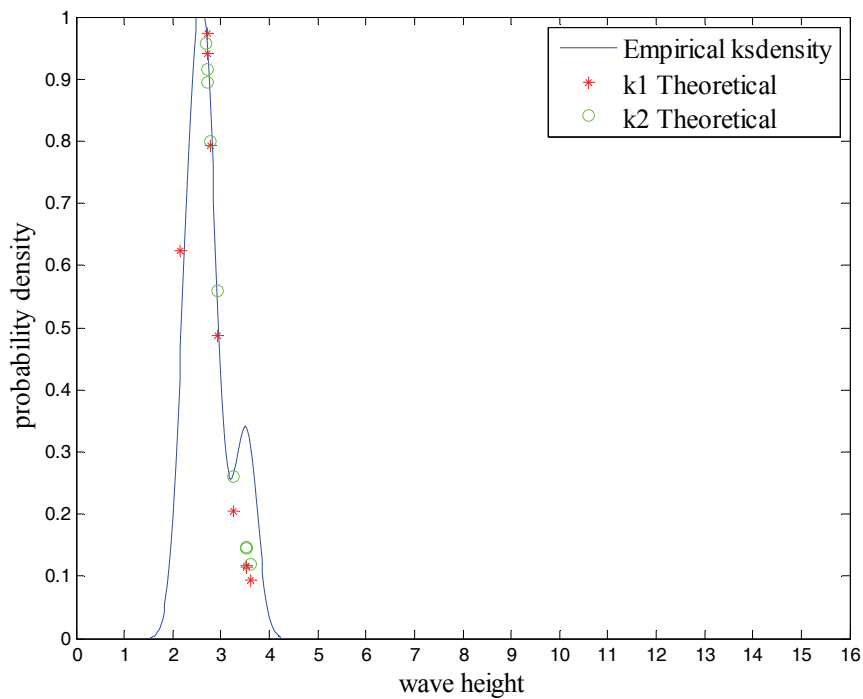


圖 3.12 LSM 法 Weibull 分布月最大法 3 月 k1、k2 與實測值機率密度圖

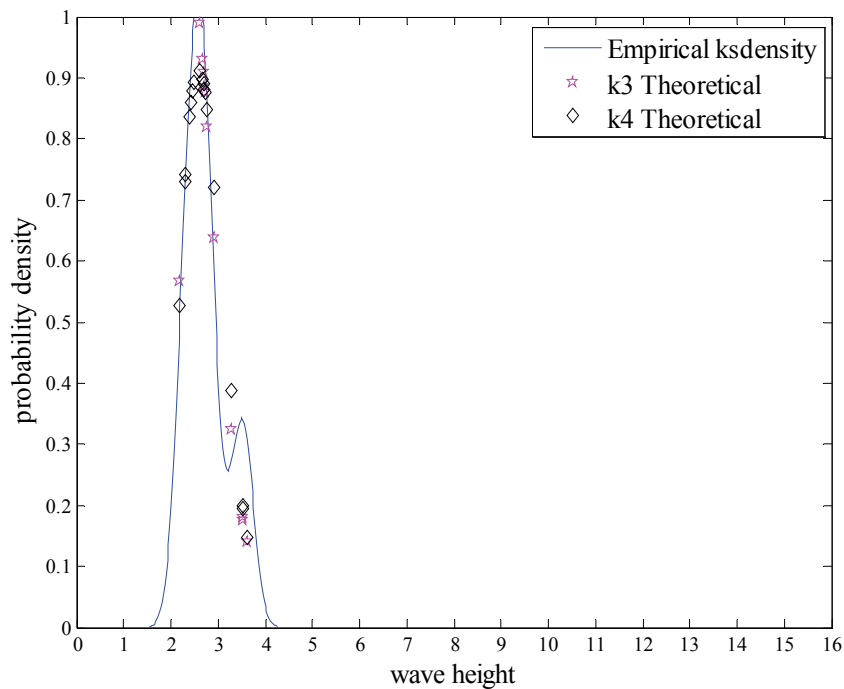


圖 3.13 LSM 法 Weibull 分布月最大法 3 月 k3、k4 與實測值機率密度圖

在颱風期下，受颱風影響大，所繪橫軸的極值波高範圍大，對應縱軸的機率密度相對變小，故所算得的殘差均方根會比季節風期來得小。以月最大法之六、八月為例(如圖 3.14~圖 3.17)，在 k1、k2 形狀參數下的機率密度分布相較於 k3、k4 的結果，遠離觀測的機率密度線分布，可得知在颱風期間形狀參數值 k3、k4 比 k1、k2 有較佳的模式配適。

故由上述，四種形狀參數值比較後，k3 最具有代表性，在 1990-2008 花蓮港極值波高資料結果，以 LSM 法 Weibull 分布形狀參數 $k=1.4$ 的方法作為最佳的參數推估法與極值分布函數。

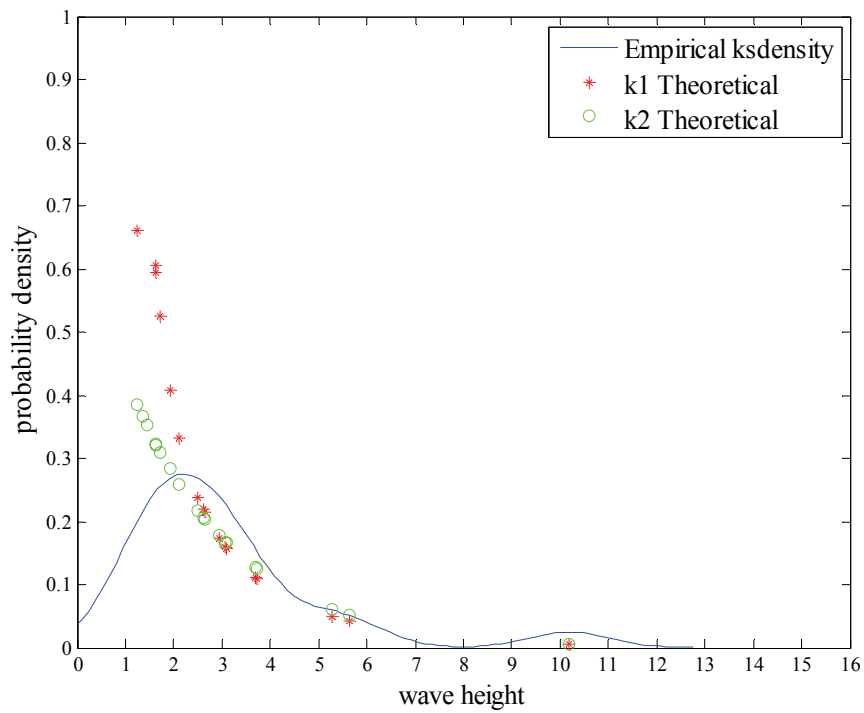


圖 3.14 LSM 法 Weibull 分布月最大法 6 月 k1、k2 與實測值機率密度圖

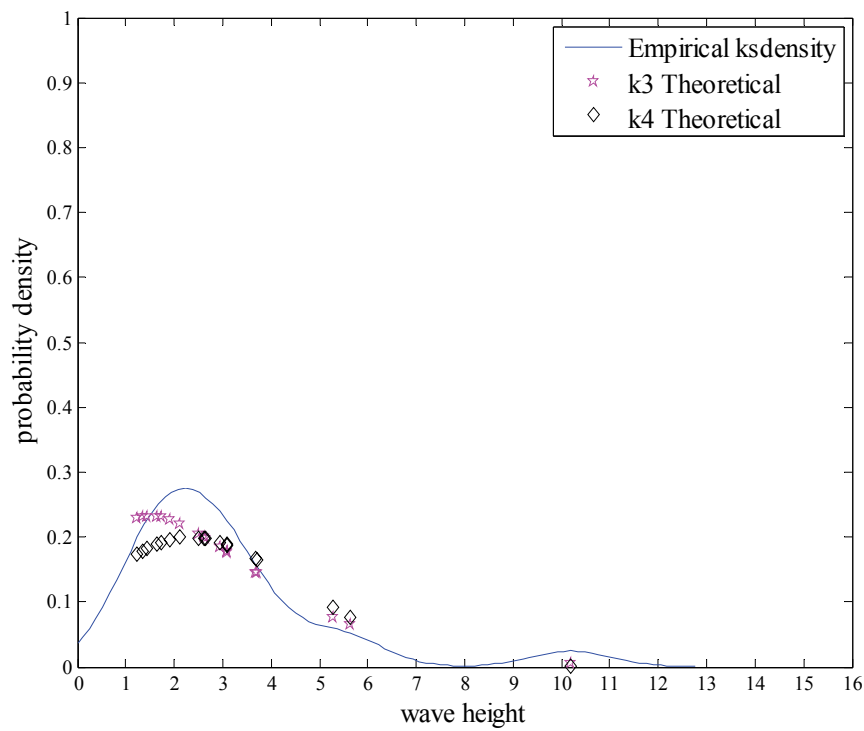


圖 3.15 LSM 法 Weibull 分布月最大法 6 月 k3、k4 與實測值機率密度圖

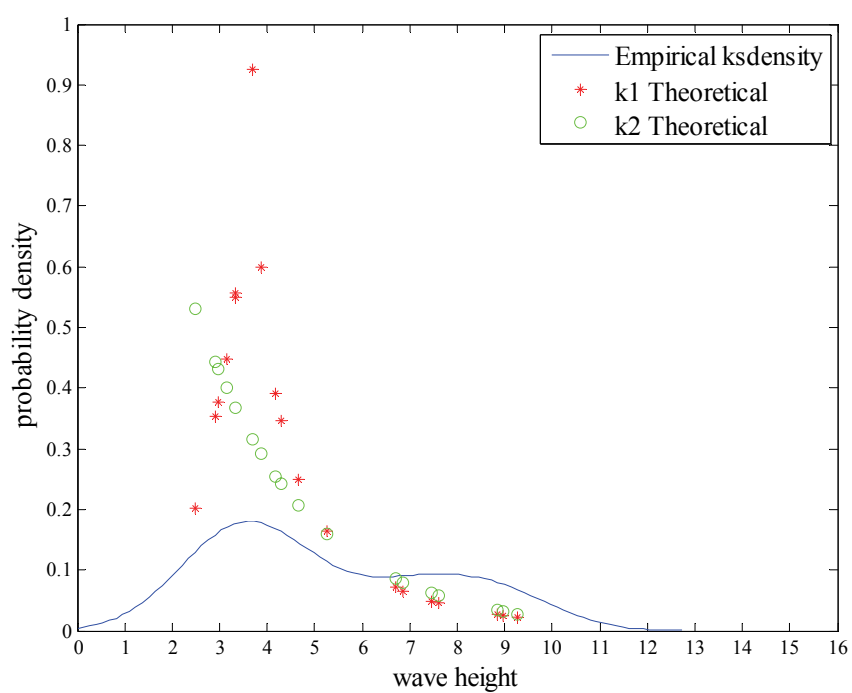


圖 3.16 LSM 法 Weibull 分布月最大法 8 月 k1、k2 與實測值機率密度圖

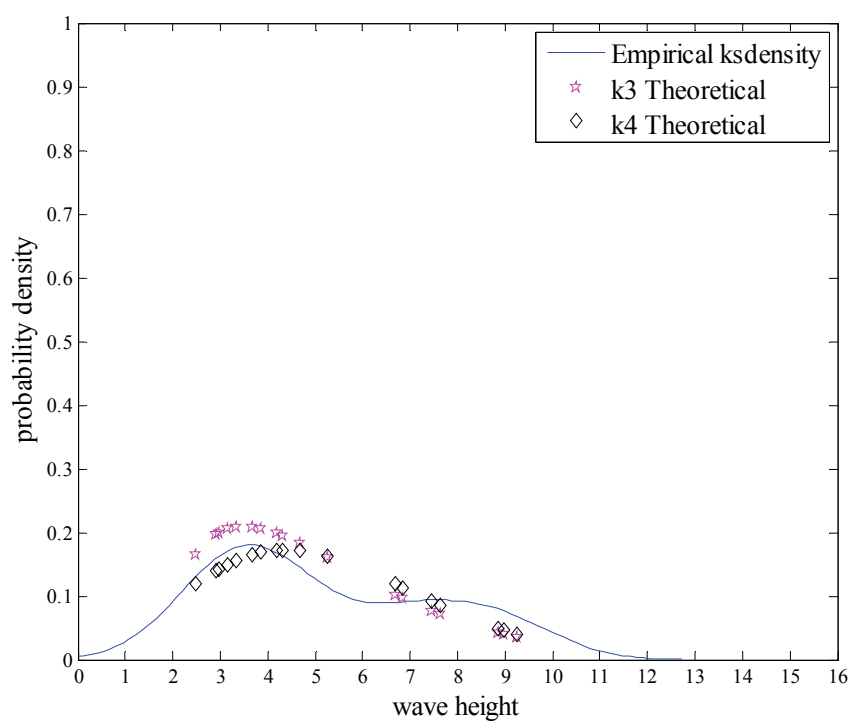


圖 3.17 LSM 法 Weibull 分布月最大法 8 月 k3、k4 與實測值機率密度圖

在高雄港部分，雖然實測波浪資料的長度較花蓮港短，但本計畫仍以此 9 年內的資料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，相關分析結果如下所述。

表 3.10~表 3.21 及圖 3.18~圖 3.29 分別代表 1 月到 12 月的重現期波高及其推算標準偏差，其中 Lognormal 分布佔了 7 個月份，最小 RMSE 值為 0.04~0.48m 之間；其他月份為 GEV 分布，RMSE 值為 0.04~0.29m 之間；而樣本最大值與推估值之誤差大多數月份也是 Lognormal 分布有最小值，在 0.01~1.09m 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(σ_{mle})顯示，1-3 月及 7-9 月為 GEV 分布有最小之 σ_{mle} ，其在 0~0.9 之間；而 4-6 月及 10-12 月為 Weibull 分布有最小之 σ_{mle} ，其在 0.11~2.31 之間。因此，以兩種分布分別推算 50 年重現期之波高時，若在 95%信賴度下，以 Weibull 分布推算各月份波高分別為一月 1.45~1.81m、二月 1.64 ~2.18m、三月 1.68m、四月 1.48~2.58m、五月 3.89~9.69m、六月 5.38~13.42m、七月 5.52 ~9.52m、八月 5.12~9.98m、九月 4.4 ~7.74m、十月 2.6 ~5.9m、十一月 1.53~2.07m，及十二月 2.2 ~4.66m。而 Lognormal 分布以 RMSE 值來看較佳，但推算標準偏差較上述兩種分布大，GEV 分布在推算重現期長的狀況下會有不適用的狀況，因此推算重現期波高方面以 Weibull 分布較佳。

表 3.10 MLE 推估 1 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.04	0.14	0.05	0.04
ER(m)		0.05	0.29	0.07	0.04
$x_R(m)$	10	1.50	2.40	1.51	1.53
	25	1.57	-	1.58	1.59
	50	1.63	-	1.63	1.63
	100	1.69	-	1.67	1.67
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.07	0.00	0.06	0.06
	25	0.09	-	0.08	0.08
	50	0.10	-	0.09	0.09
	100	0.12	-	0.11	0.10

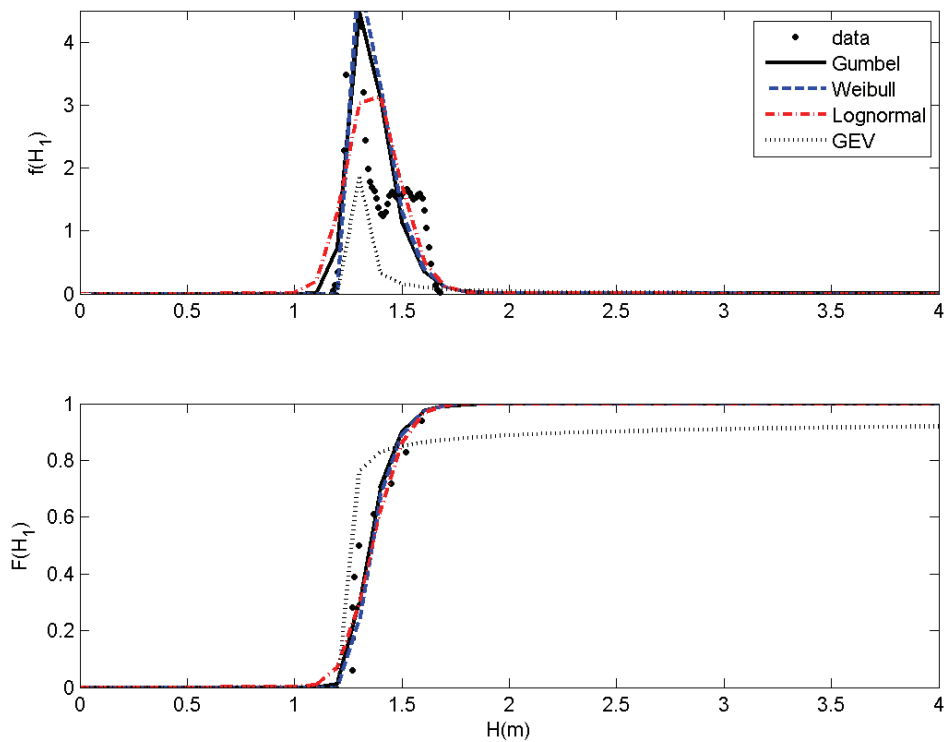


圖 3.18 MLE 推估 1 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.11 MLE 推估 2 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.04	0.04	0.04	0.04
ER(m)		0.07	0.01	0.03	0.01
$x_R(m)$	10	1.75	1.69	1.72	1.73
	25	1.91	1.76	1.83	1.84
	50	2.03	1.80	1.91	1.92
	100	2.15	1.83	1.97	2.00
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.13	0.07	0.11	0.11
	25	0.17	0.10	0.13	0.14
	50	0.20	0.13	0.14	0.17
	100	0.23	0.16	0.16	0.19

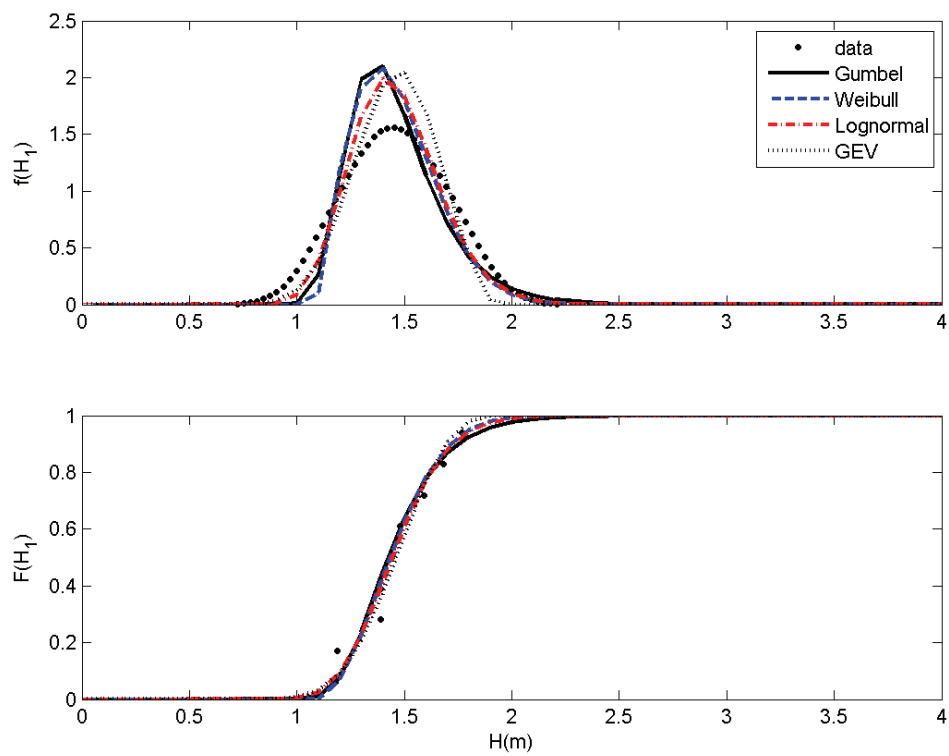


圖 3.19 MLE 推估 2 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.12 MLE 推估 3 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.08	0.04	0.06	0.05
ER(m)		0.19	0.00	0.06	0.07
$x_R(m)$	10	1.68	1.55	1.60	1.60
	25	1.82	1.55	1.68	1.67
	50	1.92	1.56	1.73	1.72
	100	2.02	1.56	1.78	1.77
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.11	0.00	0.03	0.07
	25	0.14	0.00	0.00	0.09
	50	0.16	0.00	0.00	0.11
	100	0.18	0.00	0.00	0.12

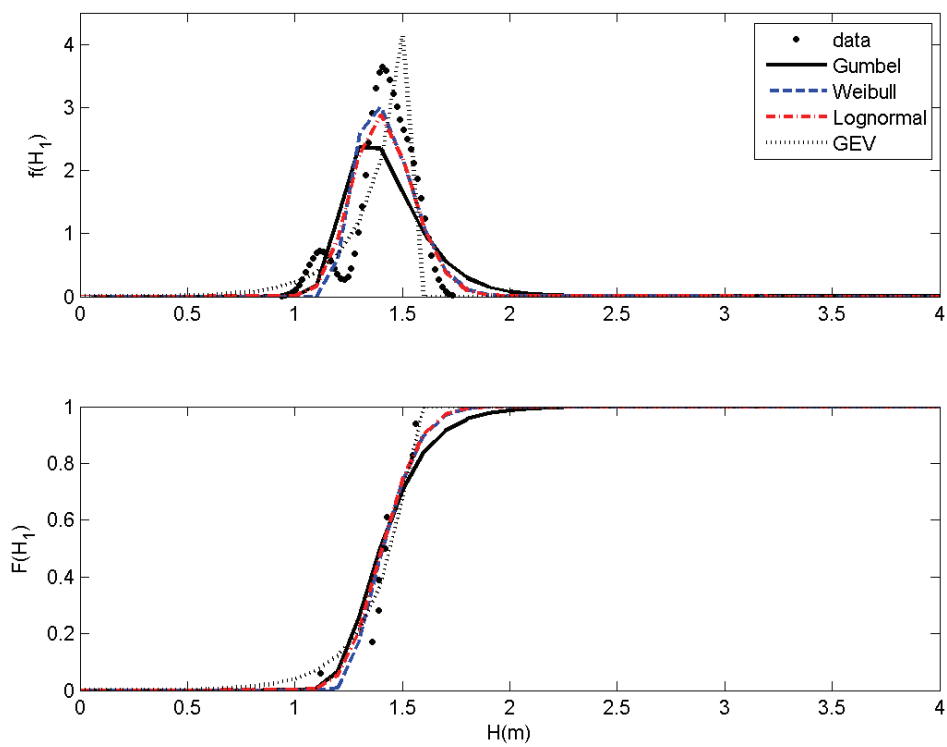


圖 3.20 MLE 推估 3 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.13 MLE 推估 4 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.07	0.07	0.08	0.06
ER(m)		0.03	0.05	0.04	0.03
$x_R(m)$	10	1.66	1.67	1.67	1.68
	25	1.88	1.92	1.88	1.88
	50	2.04	2.12	2.03	2.02
	100	2.20	2.32	2.18	2.16
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.19	0.26	0.19	0.19
	25	0.24	0.59	0.24	0.25
	50	0.28	0.96	0.28	0.30
	100	0.33	1.44	0.32	0.35

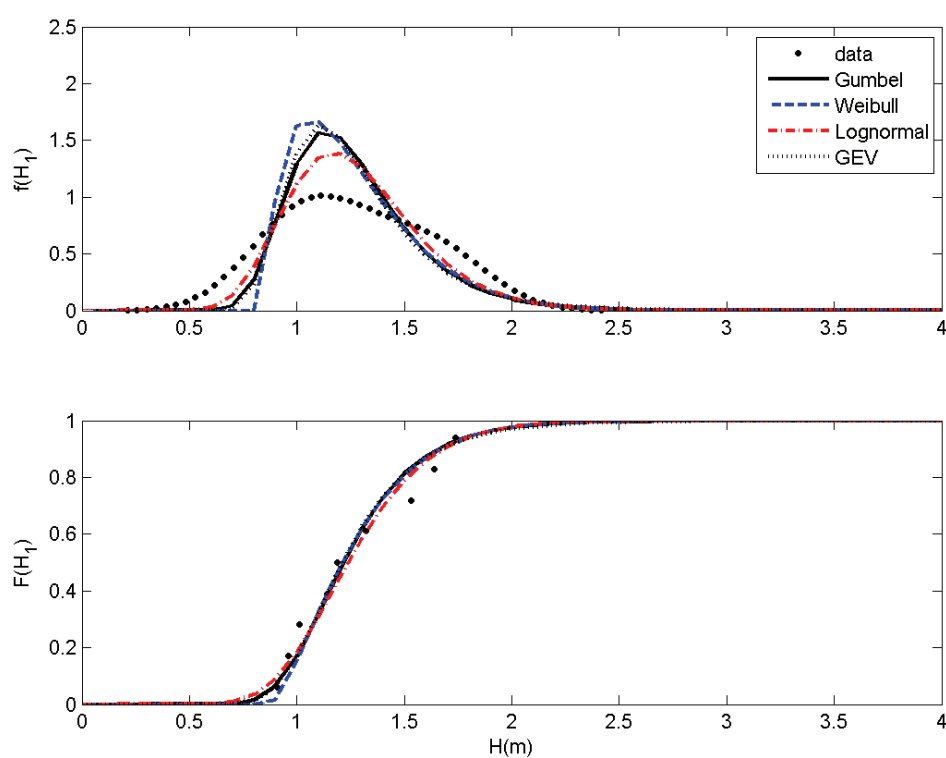


圖 3.21 MLE 推估 4 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.14 MLE 推估 5 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.67	0.62	0.73	0.44
ER(m)		1.43	0.59	1.61	0.72
$x_R(m)$	10	4.63	5.94	4.89	5.17
	25	5.77	11.65	6.01	7.04
	50	6.62	-	6.79	8.58
	100	7.46	-	7.54	10.27
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.99	3.87	1.00	1.59
	25	1.30	12.57	1.28	2.59
	50	1.54	-	1.48	3.53
	100	1.77	-	1.68	4.63

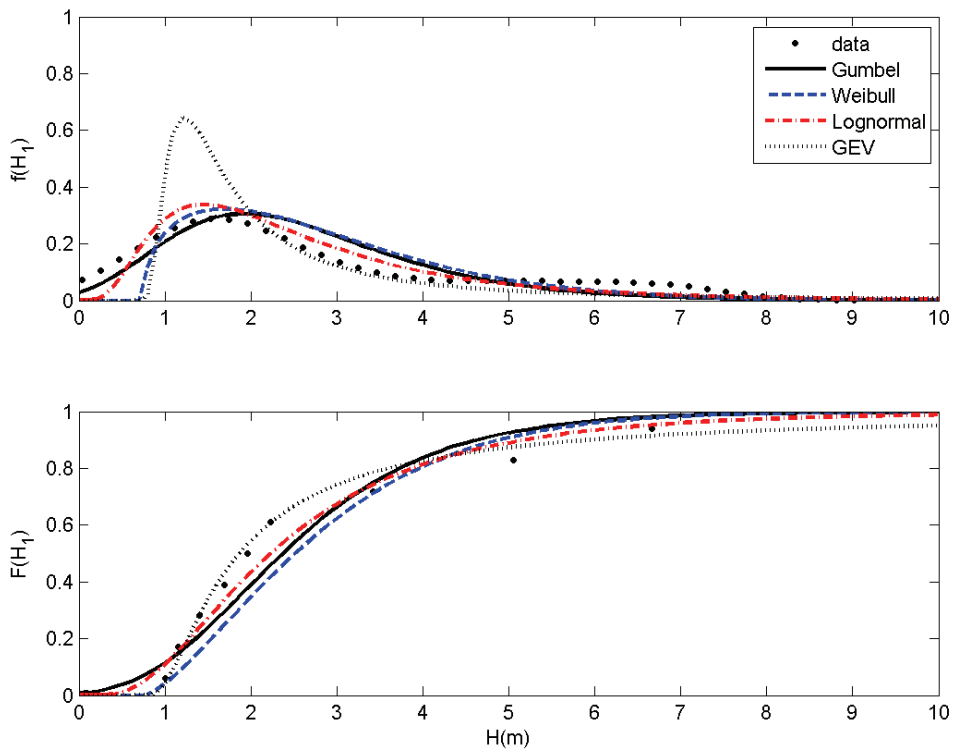


圖 3.22 MLE 推估 5 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.15 MLE 推估 6 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.40	0.38	0.50	0.31
ER(m)		0.57	0.36	0.96	0.28
$x_R(m)$	10	6.55	6.73	6.75	7.23
	25	8.09	8.66	8.31	9.62
	50	9.23	10.22	9.40	11.56
	100	10.36	11.88	10.44	13.65
$\sigma_{mle}(m)$	10	1.29	1.75	1.38	2.19
	25	1.67	3.47	1.77	3.77
	50	1.97	5.46	2.05	5.28
	100	2.27	8.09	2.31	7.06

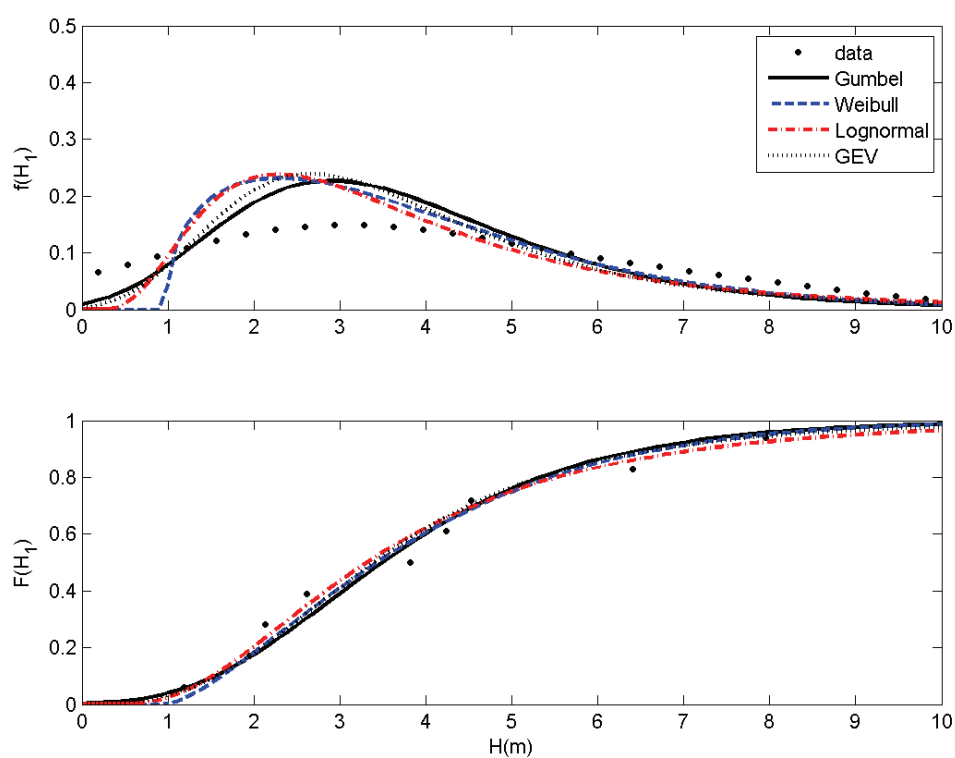


圖 3.23 MLE 推估 6 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.16 MLE 推估 7 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.28	0.24	0.25	0.26
ER(m)		0.55	0.11	0.08	0.43
$x_R(m)$	10	6.41	5.95	6.17	6.41
	25	7.54	6.39	6.98	7.51
	50	8.37	6.62	7.52	8.31
	100	9.20	6.79	8.01	9.11
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.90	0.44	0.75	1.01
	25	1.16	0.56	0.91	1.41
	50	1.36	0.72	1.02	1.75
	100	1.56	0.90	1.11	2.10

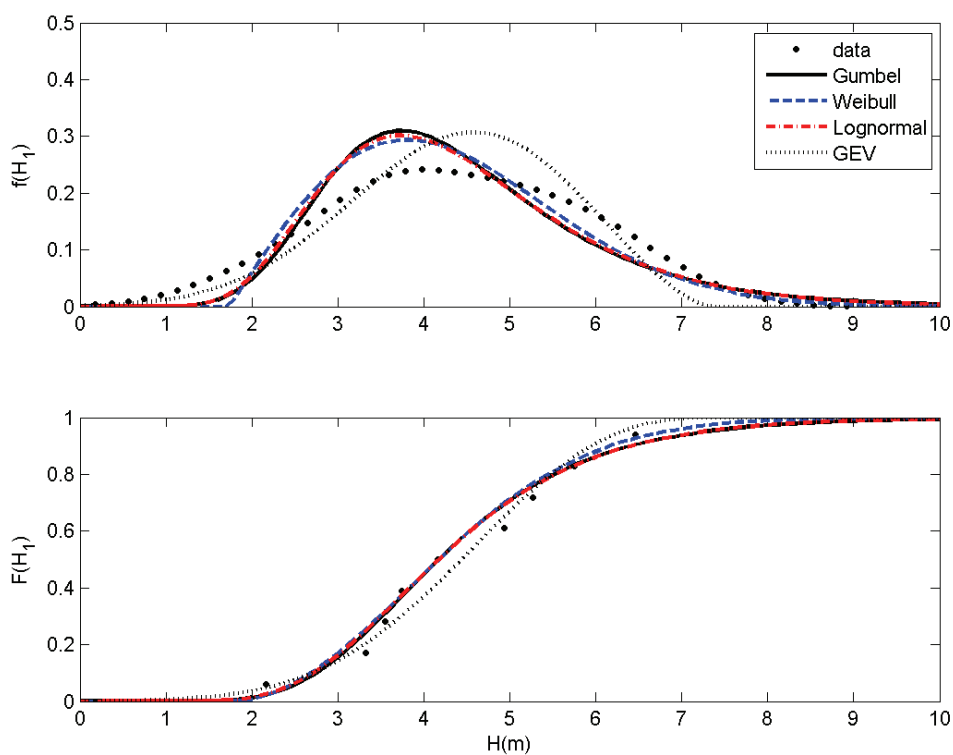


圖 3.24 MLE 推估 7 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.17 MLE 推估 8 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.39	0.29	0.32	0.62
ER(m)		0.87	0.12	0.03	1.55
$x_R(m)$	10	6.25	5.56	5.90	6.81
	25	7.64	6.02	6.89	8.85
	50	8.67	6.25	7.55	10.49
	100	9.69	6.42	8.15	12.23
$\sigma_{mle}(m)$	10	1.10	0.47	0.93	1.37
	25	1.41	0.55	1.12	3.76
	50	1.65	0.68	1.24	5.81
	100	1.89	0.83	1.36	8.16

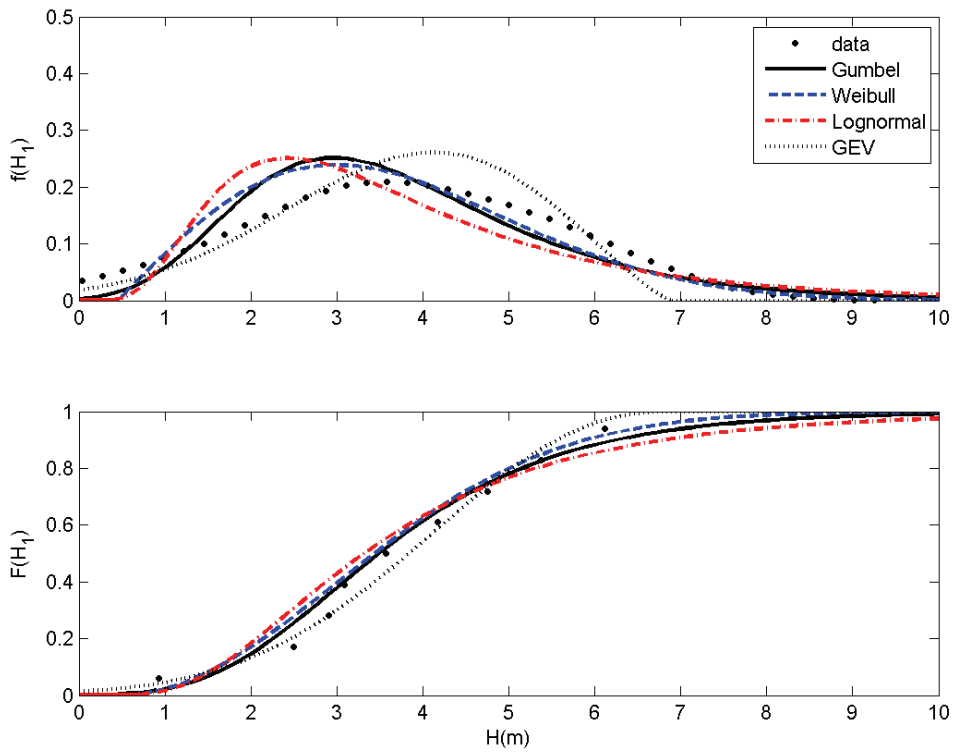


圖 3.25 MLE 推估 8 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.18 MLE 推估 9 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.40	0.59	0.35	0.40
ER(m)		0.74	0.01	0.17	0.75
$x_R(m)$	10	5.18	4.84	4.97	5.27
	25	6.15	4.92	5.63	6.29
	50	6.87	4.94	6.07	7.05
	100	7.58	4.95	6.47	7.81
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.80	0.18	0.62	0.93
	25	1.03	0.14	0.76	1.33
	50	1.21	0.12	0.85	1.66
	100	1.39	0.10	0.93	2.02

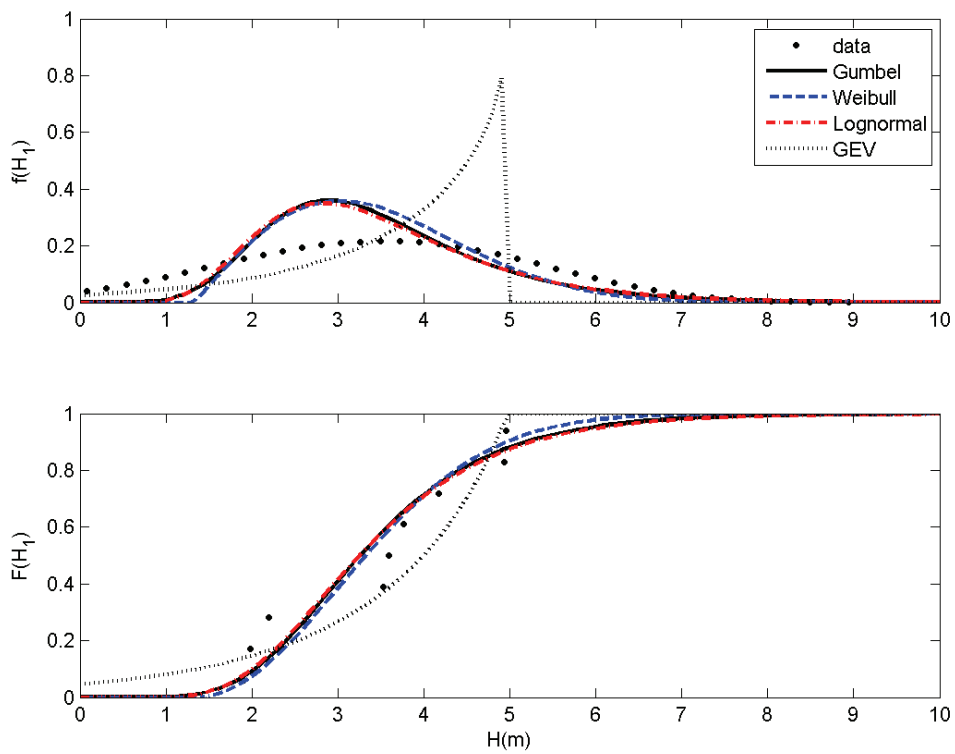


圖 3.26 MLE 推估 9 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.19 MLE 推估 10 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.38	0.44	0.42	0.28
ER(m)		0.76	0.28	0.90	0.45
$x_R(m)$	10	3.07	4.17	3.18	3.34
	25	3.73	9.45	3.81	4.26
	50	4.22	-	4.25	4.99
	100	4.71	-	4.68	5.74
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.58	3.01	0.56	0.81
	25	0.76	11.66	0.73	1.24
	50	0.90	-	0.84	1.62
	100	1.04	-	0.95	2.05

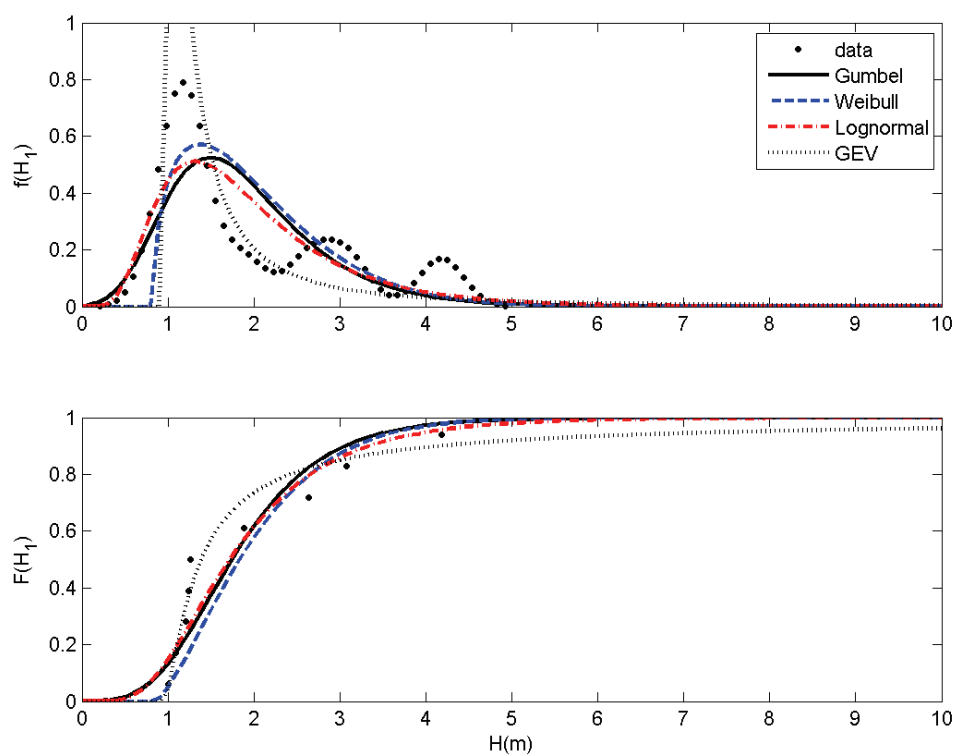


圖 3.27 MLE 推估 10 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.20 MLE 推估 11 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.11	0.08	0.15	0.09
ER(m)		0.11	0.07	0.19	0.01
$x_R(m)$	10	1.79	1.66	1.61	1.74
	25	2.07	1.78	1.73	1.96
	50	2.27	1.85	1.80	2.12
	100	2.47	1.90	1.87	2.28
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.21	0.11	0.11	0.21
	25	0.28	0.14	0.13	0.28
	50	0.32	0.16	0.14	0.34
	100	0.37	0.19	0.16	0.40

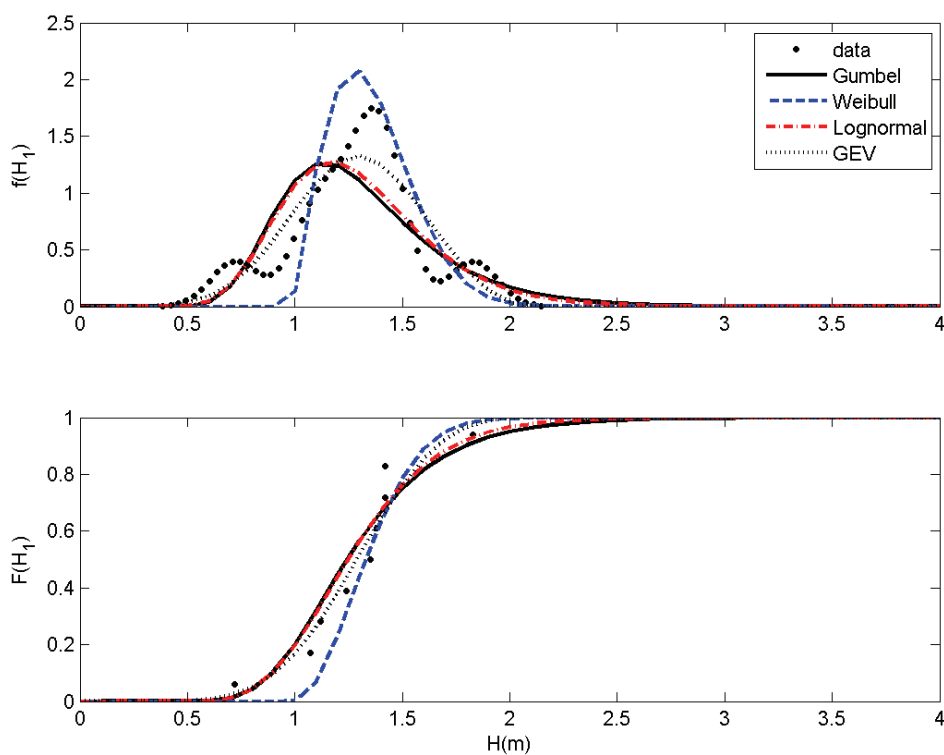


圖 3.28 MLE 推估 11 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

表 3.21 MLE 推估 12 月份高雄港波浪各重現期波高及標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.57	0.67	0.57	0.48
ER(m)		1.44	1.68	1.36	1.09
$x_R(m)$	10	2.38	3.40	2.63	2.69
	25	2.84	-	3.10	3.35
	50	3.18	-	3.43	3.85
	100	3.51	-	3.75	4.38
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.41	3.77	0.42	0.59
	25	0.55	-	0.54	0.87
	50	0.65	-	0.63	1.12
	100	0.76	-	0.72	1.40

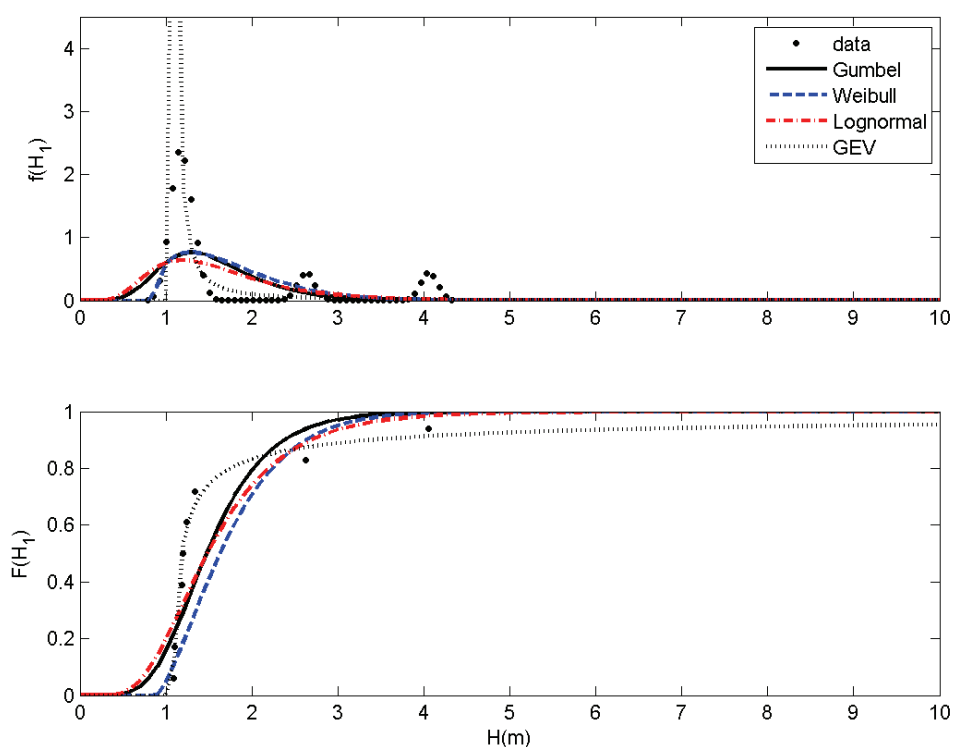


圖 3.29 MLE 推估 12 月份高雄港波浪機率密度函數及累積機率

3.3.2 參數迴歸

由前節分析中得知，以 LSM 法、Weibull 分布、形狀參數 $k=1.4$ 的方式可作為花蓮港推估極值波高的最佳極值統計方法。但因觀測資料中，受到洋流、四季變化與氣候變遷的影響，表現每月的極值波高

分布有明顯的季節性(如圖 3.30)，本節中擬考慮波高週期性的變化，將極值參數加入年週期與半年週期的特性，以獲得更合適的極值分布參數，有關迴歸方式所求得的修正參數如下所述。

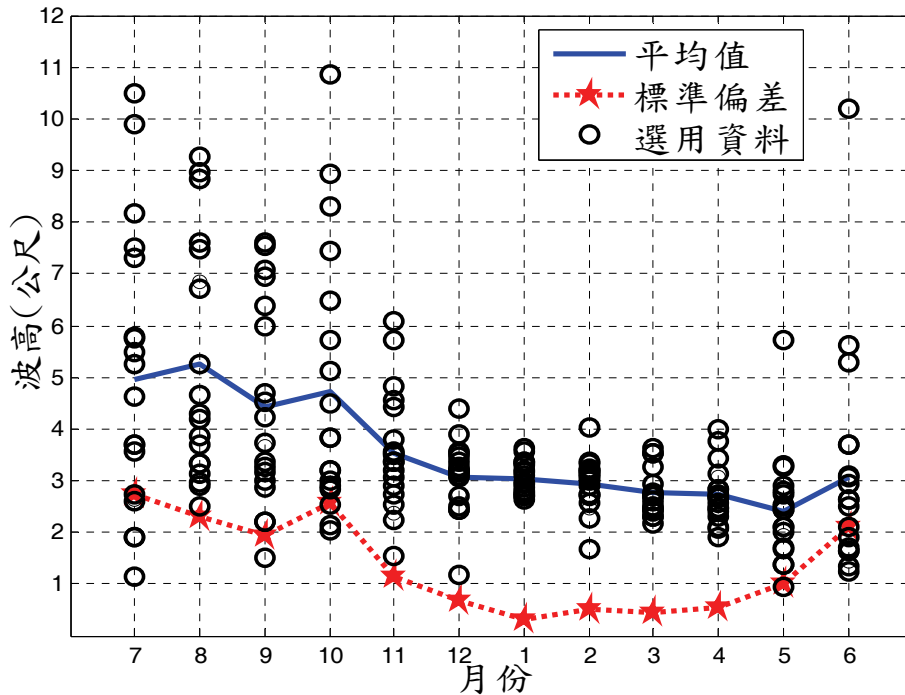


圖 3.30 花蓮港 1990~2008 年每月最大觀測波高特性圖

由花蓮港觀測資料，依月最大法資料選取，討論每個月份與極值參數關係，以七月 ($t=1$) 為最初月份，依序排列之月份為橫坐標，參數值為縱座標，本計畫考慮參數之平均特性，加入 Mendez 之迴歸函數，修正如下：

$$P(t) = \bar{P} + a_1 \cos\left(t \frac{\pi}{6}\right) + a_2 \sin\left(t \frac{\pi}{6}\right) + a_3 \cos\left(t \frac{\pi}{3}\right) + a_4 \sin\left(t \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.18)$$

式中 t 為時間項，以月份為單位， $\bar{P}$ 為一至十二月的參數平均值， a_i 為待定係數。第一項考慮平均特性，第二、三項考慮年週期，第四、五項考慮半年週期。 $P(t)$ 為 t 月份下的迴歸修正後參數值，為尺度、位置參數。利用最小二乘法所得的非線性曲線配適，計算待定係數，得參數迴歸式。

圖 3.31 為 LSM 法推估 Weibull 分布、 $k=1.4$ 之每月尺度參數的曲線配適，其週期函數迴歸線為考慮週期性的尺度迴歸公式：

$$P_A(t) = 2.0789 + 0.8479 \times \cos(t \times \pi/6) + 1.5767 \times \sin(t \times \pi/6) - 0.0016 \times \cos(t \times \pi/3) + 0.1101 \times \sin(t \times \pi/3) \quad (3.19)$$

式中 t 為時間（月份）， $P_A(t)$ 為 t 月份下尺度參數迴歸值。

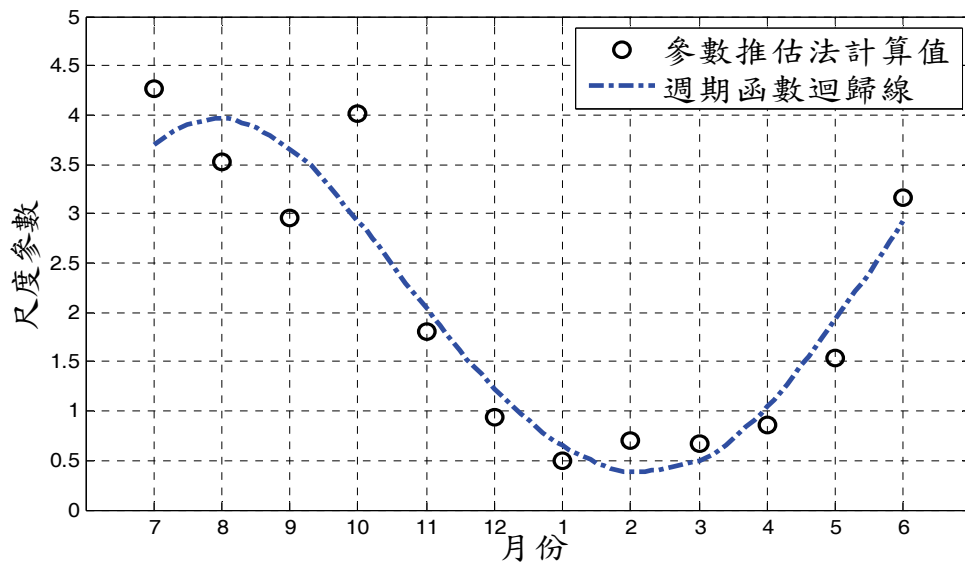


圖 3.31 LSM 法推估 Weibull 分布、 $k=1.4$ 之每月尺度參數的曲線配適圖

圖 3.32 為 LSM 法推估 Weibull 分布 $k=1.4$ 之每月位置參數的曲線配適，其週期函數迴歸線為考慮週期性的位置迴歸公式，如下：

$$P_B(t) = 1.6856 - 0.6287 \times \cos(t \times \pi/6) - 0.2831 \times \sin(t \times \pi/6) - 0.3128 \times \cos(t \times \pi/3) + 0.2999 \times \sin(t \times \pi/3) \quad (3.20)$$

式中 t 為時間（月份）， $P_B(t)$ 為 t 月份下位置參數迴歸值。

由圖 3.31 與圖 3.32 所得的迴歸公式，將時間項 t 月份，考慮週期性的季節變化影響，帶入式(3.19)及式(3.20)中，得到經迴歸修正後的新極值參數值。

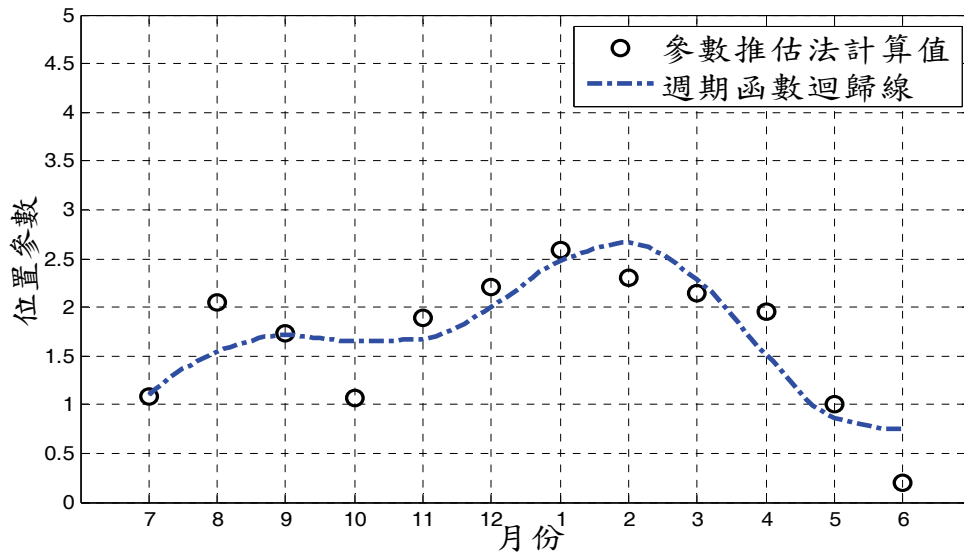


圖 3.32 LSM 法推估 Weibull 分布、 $k=1.4$ 之每月位置參數的曲線配適圖

3.3.3 考慮參數迴歸的重現期極值波高估算

依據前節所述，將 Weibull 分布函數、LSM 推估參數法及形狀參數 $k=1.4$ ，以平均累積機率 $F_m=1/T$ 與式(3.19)及式(3.20)估算新迴歸修正後的參數值，代入前圖 3.8 之計算流程中，可得各重現期下之修正極值波高。圖 3.33 為 LSM 法 Weibull 分布推估 19 年重現期下，比較直接由參數估算與參數經迴歸修正兩種方式下每月極值波高。

以 LSM 法 Weibull 分布下推估 19 年重現期極值波高，理論上選用資料與參數迴歸修正的波高應接近，例如花蓮 12 月到隔年 5 月為非颱風發生之季節風期，經迴歸修正與無迴歸的極值波高，與觀測值有一致的情況，極值波高變動小。但在 6 月到 11 月，正好是臺灣的颱風季節，所觀測到的極值波高變動劇烈不穩定，甚至 10 月最大觀測波高達到 10.85m，與推估的結果有明顯偏差，因取樣實際觀測取樣資料不確定性大，故考慮季節性變化之極值分析的變動趨勢，經參數修正來平滑季節性變化之極值波高變動趨勢，比直接由推估法計算的極值波高穩定平滑。

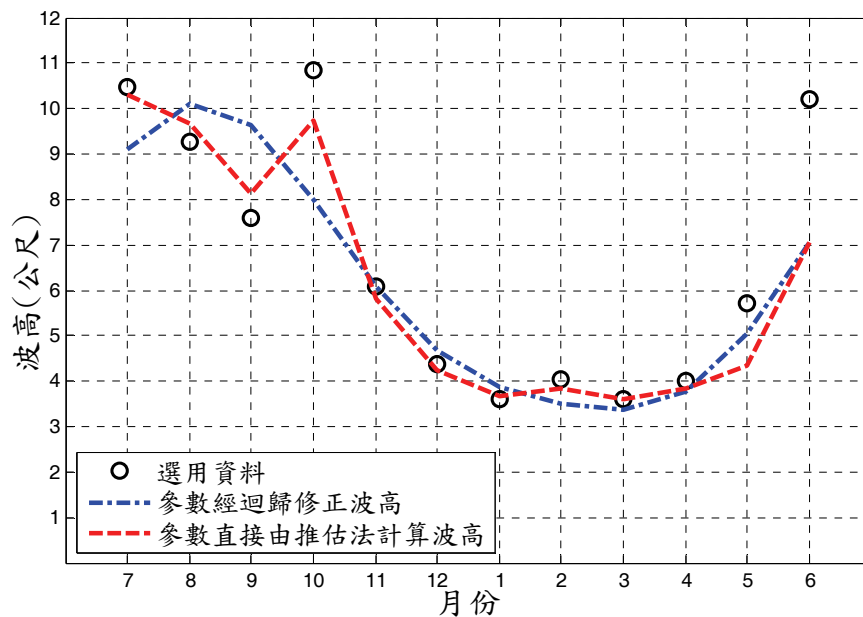


圖 3.33 LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 重現期 19 年每月極值波高關係圖

3.3.4 年最大法與月最大法季節性波高變化

本節中分別以極值參數經由推估法計算經迴歸修正，及參數直接由推估法計算代入無迴歸修正，比較年最大法與月最大法的季節性極值波高變化，相關分析結果如下。

圖 3.34 為比較颱風期（6 月至 11 月）與季節風期（12 月至隔年 5 月）的月最大法極值波高，季節風期相對於颱風期的極值波高變動小，且極值波高也較低。與前圖 3.30 比較顯示，季節風期間波高的標準偏差與平均值有較小的變化，有一致的結果，從圖中也看出年最大法皆大於月最大法每月極值波高。但在颱風期的極值波高變化大且不穩定，如月最大法下 9 月極值波高陡降，發生低於 8、10 月重現期極值波高，可知 9 月未經參數迴歸之月最大法極值波高，相較於其他月份的波高劇減，需考慮週期性的季節變化，將參數迴歸修正。

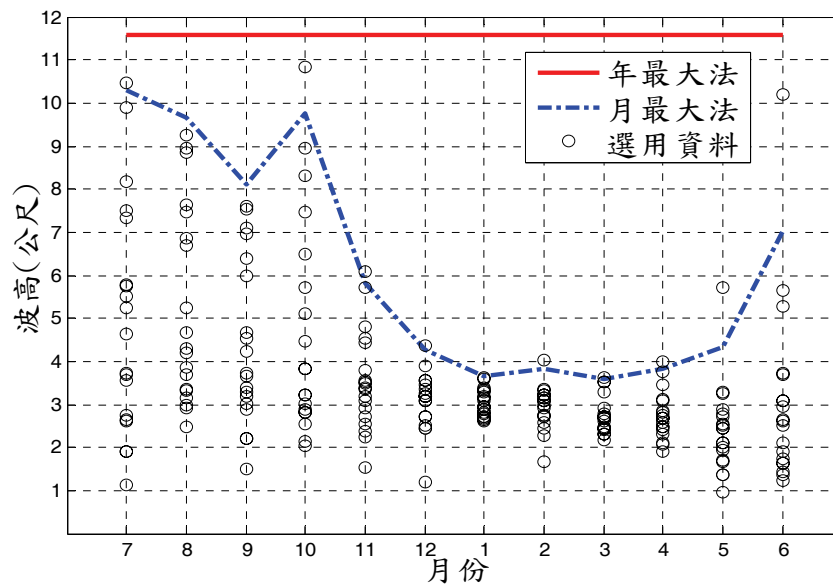


圖 3.34 LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 下重現期 19 年之極值波高圖

圖 3.35 為經迴歸極值參數修正後改善月最大法每月極值波高，與圖 3.34 比較，月最大法的 7、9 月的季節性波高趨於平滑穩定，極值參數經迴歸修正較符合實際季節變化影響。而月最大法中最大月份的極值波高仍小於年最大法，顯示使用月最大法推估極值波高，可減少相對於年最大法下高估極值波高的情況，不但能明確知道每個季節月份的極值波高變化，還能避免過保守的極值波高造成施工上的耗費。

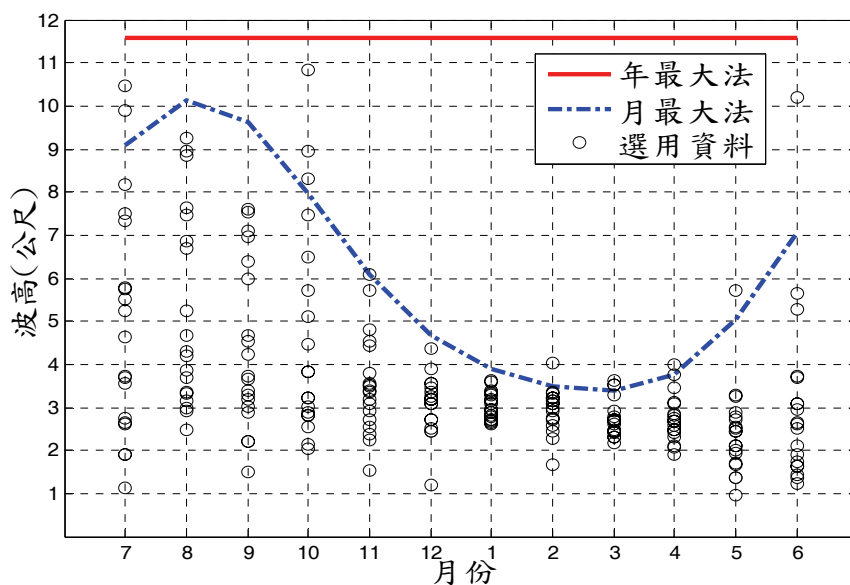


圖 3.35 LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 修正參數推估 19 年重現期之極值波高圖

綜合上述分析比較，使用月最大法與經迴歸修正後的極值參數為

適合工程考量與符合季節變化的方式。考量推估至長期極值波高，以花蓮港 19 年觀測資料，估算 50 年重現期的極值波高(如圖 3.36)，其中，月最大法推估 19、50 年極值波高值，相對颱風期變化大，而季節風期變化小，且在颱風期時的極值波高大於季節風期，與實際受到颱風影響相同。而使用年最大法推估長期重現期極值波高，恆為固定值，無法表現出季節性變化。

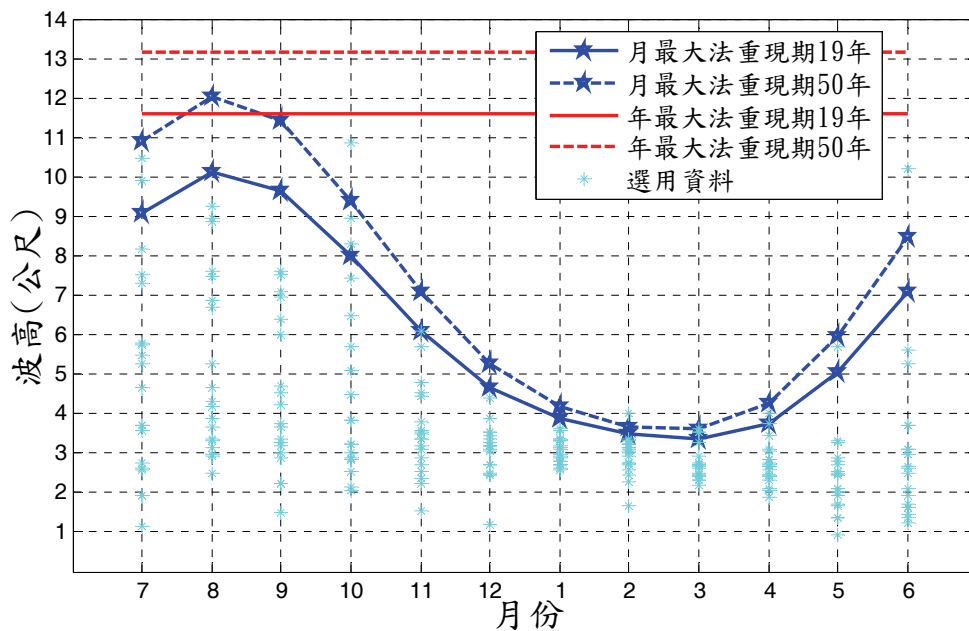


圖 3.36 LSM 法 Weibull 分布 $k=1.4$ 之修正參數推估之極值波高圖

3.4 設計波浪之推估

前節所述係考慮波浪季節性變化情況，推估各月之波高極值，而本節中將進行傳統年最大波高極值的推估結果。

3.4.1 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)

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-B}{A}}}, -\infty < x < \infty \quad (3.21)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} e^{-\frac{x-B}{A}} e^{-\frac{x-B}{A}} \quad (3.22)$$

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

$$F(x) = e^{-\left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{\frac{1}{k}}}, B - A/k \leq x < \infty \quad (3.23)$$

$$f(x) = \frac{1}{A} \left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{-\left(1+\frac{1}{k}\right)} e^{-\left(1+k\frac{x-B}{A}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (3.24)$$

3. Weibull 分佈

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}, B \leq x < \infty \quad (3.25)$$

$$f(x) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (3.26)$$

4. 對數常態分佈 (lognormal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - B}{\sqrt{2}A}\right)\right) \quad 0 < x < \infty \quad (3.27)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Ax}} e^{-\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2}} \quad (3.28)$$

其中 $erf(x)$ 為誤差函數(error function)，其定義

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.29)$$

式(3.21)至式(3.29)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。

3.4.2 極值分布參數推定

1. MOM 推定法

依 MOM 推定法可計算相關分布函數之統計量，如表 3.22 所示。

表 3.22 各極值分佈相關統計量

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}	$e^{\left(B + \frac{A^2}{2} \right)}$	$e^{\left(B + \frac{A^2}{2} \right)} (e^{A^2} - 1)^{1/2}$

表中， $\Gamma(\cdot)$ 為 Gamma 函數， γ 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

$$L(x; A, B) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{A} e^{-\frac{x_i - B}{A}} e^{-\frac{x_i - B}{A}} \quad (3.30)$$

$$l(x; A, B) = \sum_{i=1}^n -\frac{x_i - B}{A} - e^{-\frac{x_i - B}{A}} - n \ln(A) \quad (3.31)$$

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，將式(3.31)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

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.32)$$

α 及 β 值在不同分布函數其值不同如下表 3.23 所示。

表 3.23 計算樣本順位機率之 α 及 β 值

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

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。

3.4.3 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 為樣本及排序機率之推算值相關係數， $\Delta\bar{r}$ 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

$$x_m = ay_m + b \quad (3.33)$$

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

$$\text{Gumbel : } y_m = -\ln(-\ln F_m) \quad (3.34)$$

$$\text{GEV : } y_m = \frac{1}{k}[(-\ln F_m)^{-k} - 1] \quad (3.35)$$

$$\text{Weibull : } y_m = [-\ln(1 - F_m)]^{1/k} \quad (3.36)$$

$$\text{Lognormal : } y_m = \text{inverf}(F_m) \quad (3.37)$$

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

$$\Delta \bar{r} = e^{\bar{a} + \bar{b} \ln N + \bar{c} (\ln N)^2} \quad (3.38)$$

式(3.38)中， N 為樣本個數係數， $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 及 $\bar{c}$ 值依不同分佈分別示如表 3.24。

表 3.24 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。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2} \quad (3.39)$$

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，因此本計畫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

$$ER = |x_{MAX} - (x_{MAX})_m| \quad (3.40)$$

3.4.4 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

$$\sigma(x_R) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1 + 0.885(y_R - \gamma) + 0.6687(y_R - \gamma)^2 \right]^{1/2} \sigma_x \quad (3.41)$$

式中， σ_x 為樣本 x 之標準偏差， y_R 為重現期之基準化變量，即前式 (3.38) 中 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 σ_z 乘以樣本 x 之標準偏差 σ_x ，當做推算偏差量

$$\sigma(x_R) = \sigma_x \cdot \sigma_z \quad (3.42)$$

Gumbel、GEV 及 Weibull 分佈之標準偏差 σ_z 為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1.0 + \hat{A}(y_R - c)^2 \right]^{1/2} \quad (3.43)$$

而 $\hat{A}$ 值在 Gumbel 及 Weibull 分佈為：

$$\hat{A} = a_I e^{a_2 N^{-1.3}} \quad (3.44)$$

但 GEV 及 FT-II 之 $\hat{A}$ 值可表為

$$\hat{A} = a_I e^{a_2 \left[\ln \left(\frac{N}{N_0} \right) \right]^2 - \kappa \left[\ln \left(\frac{I}{v_0} \right) \right]^2} \quad (3.45)$$

式(3.43)至式(3.45)中之係數如表 3.25 所示

表 3.25 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	κ	c	N_0	v_0
Gumbel	0.64	9.0	0.93	0		
GEV ($1/k=2.5$)	1.27	0.12	0.24	0.3	23	1.34
($1/k=4.33$)	1.23	0.09	0.36	0.2	25	0.66
($1/k=5.0$)	1.34	0.07	0.41	0.1	35	0.45
($1/k=10.0$)	1.48	0.06	0.47	0.0	60	0.34
Weibull ($k=0.75$)	1.65	11.4	-0.63	0.0		
($k=1.0$)	1.92	11.4	0.00	0.3		
($k=1.4$)	2.05	11.4	0.69	0.4		
($k=2.0$)	2.24	11.4	1.34	0.5		

至於對數常態函數之 σ_z 則為：

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1.2 + 0.65(y_R - 0.2)^{2.0} \right]^{1/2} \quad (3.46)$$

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

$$IE = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 l}{\partial A^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial A \partial B} \\ -\frac{\partial^2 l}{\partial A \partial B} & -\frac{\partial^2 l}{\partial B^2} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

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

$$x_R = B - A \ln(F_R) \quad (3.48)$$

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

$$\nabla x_R = \left[\frac{\partial x_R}{\partial A}, \frac{\partial x_R}{\partial B} \right] = [-\ln F_R, 1] \quad (3.49)$$

估算值之變異數則為

$$Var(x_R) = \nabla x_R V (\nabla x_R)^T \quad (3.50)$$

將上式取開根號則為估算值之標準偏差量。

3.4.5 各重現期波高推算結果

由去年(2009 年)進行相關分析經驗中得知，以 MLE 及 LSM 方法推估結果比較可靠，以此二者所推估之各重現期之值也接近也相近，因此本年度亦僅以 MLE 推估法於 4 種選擇極值分布所推估出此樣本之檢定標準。若選擇重現期為 T=10、25、50 及 100 年 4 種。將各極值分布函數及獲得之推估參數以平均機率 $F=1/T$ 代入式(3.33)~式(3.37)後，即可獲得各重現期下之波高。因為波高樣本有 19 年，一般較為可靠之推估重現期為資料之 2~3 倍長度，亦即 38~57 年，雖然本計畫推估至 100 年的重現期波高，主要是考慮到港灣工程一般使用之設計年限，以及比較其他資料長度不同之所造成推估重現期之值是否有所差異。以下利用花蓮港實測波浪資料進行推估之結果，表 3.26 為 MLE 推估 4 種極值分布的結果，而其機率密度分布與累積機率分布如圖 3.37 所示。

表 3.26 以 MLE 推估花蓮港波浪之各重現期波高及其推算標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.77	0.37	0.50	0.65
ER(m)		2.78	0.02	1.13	2.17
x_R (m)	10	11.04	10.07	10.56	10.84
	25	12.98	10.59	11.94	12.62
	50	14.42	10.83	12.86	13.92
	100	15.86	11.00	13.71	15.21
σ_{mle} (m)	10	1.07	0.38	0.89	1.11
	25	1.37	0.40	1.07	1.53
	50	1.61	0.49	1.19	1.87
	100	1.84	0.59	1.31	2.24

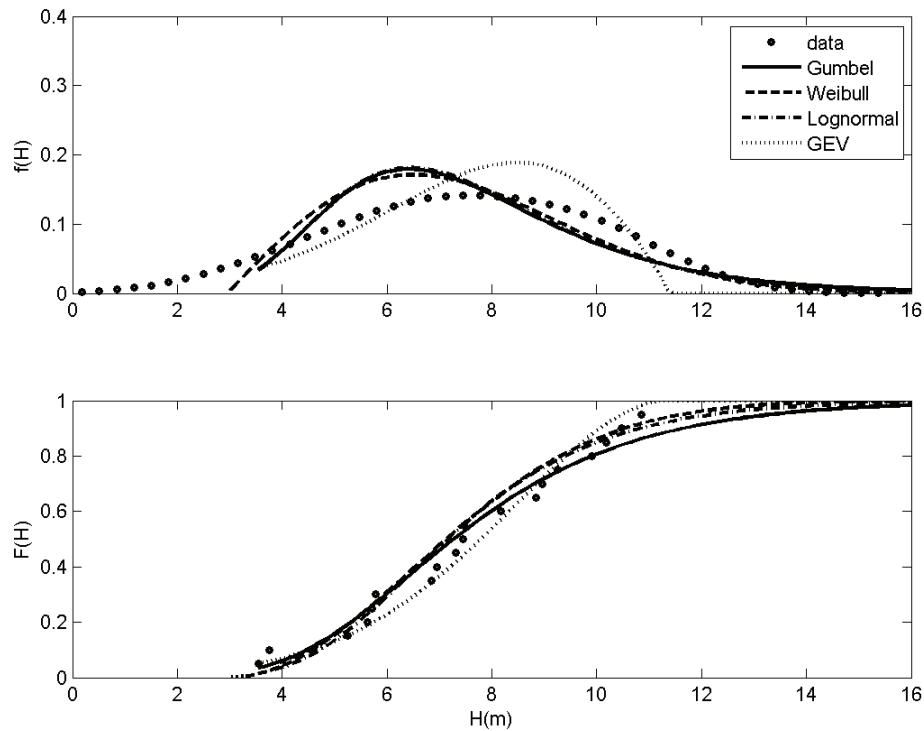


圖 3.37 以 MLE 推估花蓮港波浪之機率密度函數及機率函數

由表 3.26 之 x_R 顯示，以 MLE 推估參數法計算 4 種極值分布之各重現期波高中，以 Gumbel 及 Lognormal 分布所計算出各重現期波高相近，而 Weibull 分布所計算出 50 年重現期波高約小於前二者約 1.5m。針對推估各重現期波高之推算標準偏差量來看，以式(3.50)方法計算 Weibull 分布所得較 Lognormal 及 Gumbel 分布為小。就以 MLE 推估

Weibull 極值分布而言，50 年重現期之波高為 12.86m，而推算標準偏量為 1.19m，若假設推算標準偏量符合正常分布且考慮 95%信賴度，則推算 50 年重現期之波高在 $12.86 \pm 1.96 \times 1.19\text{m}$ 間，即 10.53~15.19m。

從圖 3.37 可知，GEV 分布之機率密度函數及累積機率函數描述此樣本極為吻合，但在波高大於 11.2m 之機率密度為零而累積機率為 1，此因為所推估形狀參數為負值，依 GEV 分布理論，此時 GEV 分布會轉為極值 III 型，波高機率密度則需小於某值，若大於此值則機率密度為零，雖然 GEV 分布描述此樣本極為吻合，但推估高重現期則有其限制。另外，第一種波高樣本之機率密度分布明顯相當寬散，有些接近於正常分布，至於樣本之累積機率接近於直線變化，導致以曲線之機率函數僅能部份吻合，而無法整體吻合描述。

由於高雄港觀測波高樣本僅有 9 年，一般較為可靠之推估重現期為資料之 2~3 倍長度，亦即 18~27 年，雖然本計畫推估至 50 年，甚至 100 年的重現期波高主要是考慮到港灣工程一般使用之設計年限，以及比較其他資料長度不同之所造成推估重現期之值是否有所差異，以下利用高雄港實測波浪資料進行推估。若由表 3.27 推估各分布樣本機率之波高與樣本之 RMSE 值顯示，Lognormal 分布具有最小之 RMSE，其為 0.21m，而樣本最大值與推估值之誤差 Gumbel 分布為 0.06m，是最小值。從圖 3.38 之機率密度分布與樣本吻合度顯示，四種分布的結果為極為接近。GEV 及 Gumbel 分布有相近次小之 RMSE 值分別為 0.22m 及 0.23m，而最大者為 Weibull 分布的 0.25m。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(σ_{mle})之整體結果顯示，四種分布所計算出各重現期波高相近，以 50 年重現期而言差值約 0.94m，而 Gumbel 及 Lognormal 分布計算結果較 GEV 及 Weibull 分布高。針對推算標準偏差(σ_{mle})來看，GEV 分布是 4 種中有最小之 σ_{mle} ，其在 0.5~1.2m 之間；其次為 Weibull 分布，最大者為 Gumbel 分布。整體而言，以 GEV 分布來推估各重現期之波高為較適合之分布；因此以 GEV 分布推算 50 年重現期之波高為 8.16m，標準偏量為 0.94m，若在 95%信賴度下，此推算值應在 $8.16 \pm 1.96 \times 0.94\text{m}$ 之

間，即 6.32~10m。

表 3.27 以 MLE 推估高雄港波浪之各重現期波高及其推算標準偏差

Index	T(yr)	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
RMSE(m)		0.22	0.25	0.21	0.23
ER(m)		0.25	0.41	0.18	0.06
$x_R(m)$	10	7.30	7.38	7.45	7.52
	25	7.83	8.03	8.17	8.43
	50	8.16	8.46	8.67	9.10
	100	8.44	8.86	9.14	9.77
$\sigma_{mle}(m)$	10	0.51	0.61	0.69	0.74
	25	0.72	0.74	0.90	0.95
	50	0.94	0.82	1.06	1.11
	100	1.20	0.90	1.23	1.28

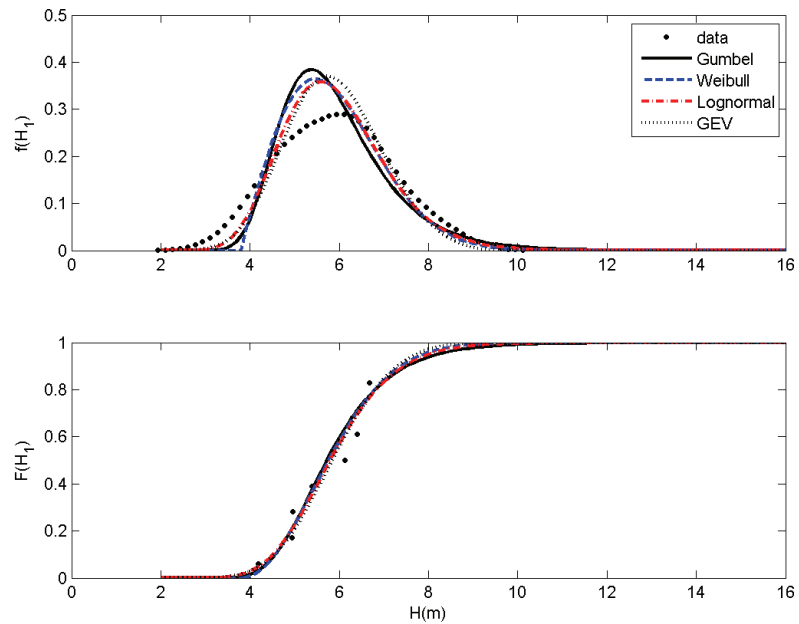


圖 3.38 以 MLE 推估高雄港波浪之機率密度函數及機率函數

3.4.6 極值資料之選取方式

本計畫選取 H_S (示性波)作為樣本資料， 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。極值分佈的推算，首先必須將原始資料做基本的選取與排序，其選取的方式有極端值選用法與超量選用法兩種，分述如下

1.極端值選用法

決定單位時距，在每一個單位時距內僅選取一個最大值的資料作為樣本，來進行統計分析。如果單位時距為一年，即稱之為年最大法；單位時距為一月，則稱為月最大法。

2.超量門檻選用法

決定一基礎超越量的值，不考慮所選取的資料其發生時間間隔的長短，將值大於基礎超越量的資料，皆選取出來進行統計分析。

本計畫之極值分析資料的選取採用極端值選用法之年最大法與月最大法，但針對超量門檻選用法也以高雄港資料提出操作範例。本計畫使用不同年份及月份之高雄港最大示性波浪資料共 108 筆，使用超量選用法取出較大波高部份，進一步去探討其最適累積機率密度分布函數，選擇 Gumbel、G.E.V.、Weibull 與 Log-Normal 四種分布模式，探討其吻合度情況。

如表 3.28 所示，超過 3m 以上的 31 筆波高以及超過 5m 以上的 9 筆波高以 GEV 分布描述高雄港較大波浪部份，吻合度情況比其它三種分布來得好，其 RMSE 值分別為 0.182m 與 0.177m，而如果是超過 4m 以上的 20 筆波高以 Gumbel 分布描述有較佳的符合程度，RMSE 值為 0.227m。另外，從表中可以顯示 Weibull 分佈在討論較大波浪時，

RMSE 值跳動幅度非常大，約 0.6m。並由圖 3.39~圖 3.41 發現，Weibull 分佈的曲線跟其他分布較為不同，整體來說，利用超量選用法探討極值波高的時候以 GEV 分布較佳。

表 3.28 超量門檻選用法極值分析結果

	資料筆數	Gumbel	G.E.V.	Weibull	LogN
超過 3m	31	0.191	0.182	0.837	0.207
超過 4m	20	0.227	0.281	0.251	0.251
超過 5m	9	0.185	0.177	0.821	0.204

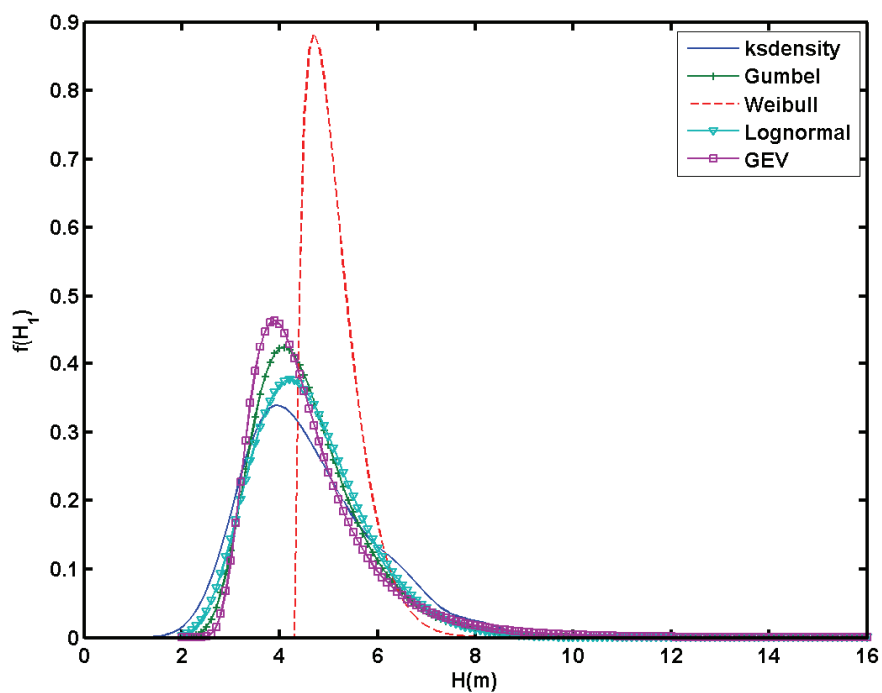


圖 3.39 超量門檻選用法超過 3m 資料的各分布適用性

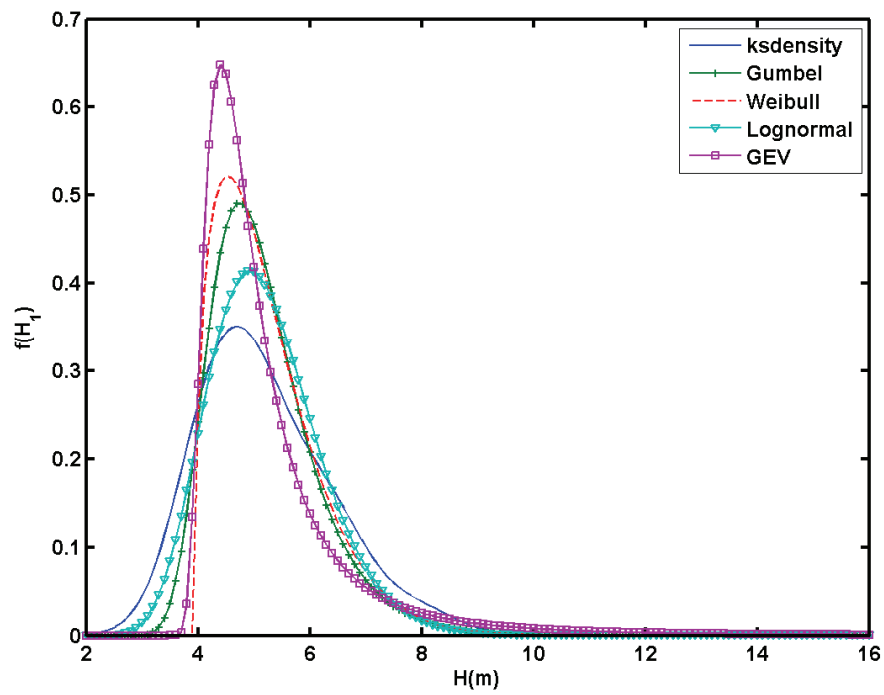


圖 3.40 超量門檻選用法超過 4m 資料的各分布適用性

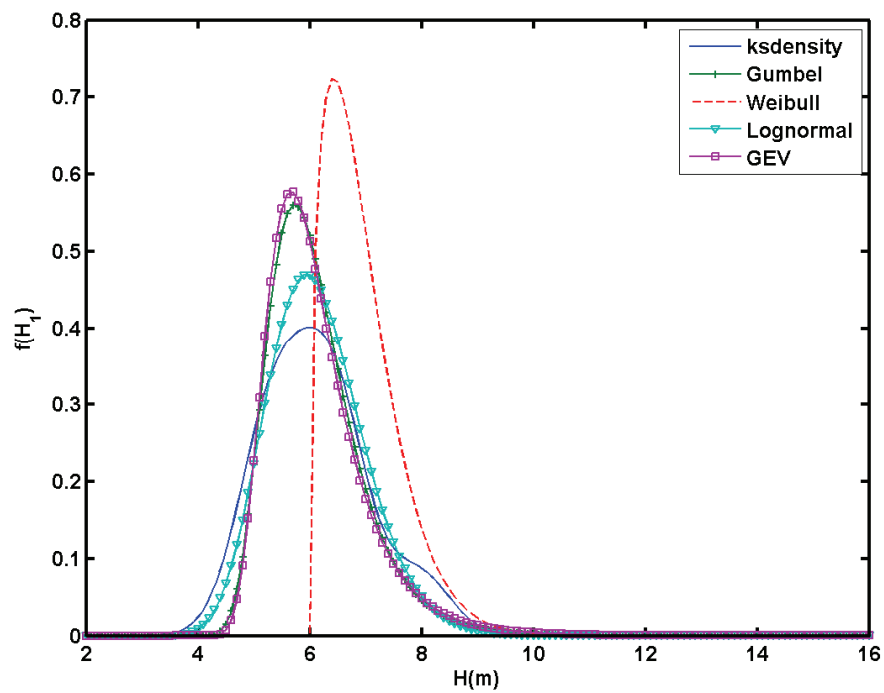


圖 3.41 超量門檻選用法超過 5m 資料的各分布適用性

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。

本計畫及往昔相關計畫於 96~98 年間對花蓮港外廓防波堤辦理水上、水下之圖像監測調查，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，最後提供花蓮港務局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。

應用上述防波堤構造物監測、安全性評估探討與維護方案研擬的步驟及方法，本計畫於去年(2008 年)首次辦理高雄港第二港口防波堤之現場圖像監測工作與防波堤沉箱之安全性評估初探，本年度延續進行現場圖像監測調查及進一步之防波堤沉箱安全性評估探討；另外，並初步研擬受損結構物之補強方案及建置相關維護管理資訊系統。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 高雄港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

先行辦理高雄港第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。本年度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，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
98.07.上旬	第二港口 南北防波堤	多音束監測作業 水下攝影
98.10.中旬	第二港口 南北防波堤	多音束監測作業 水下攝影 水上結構物檢視

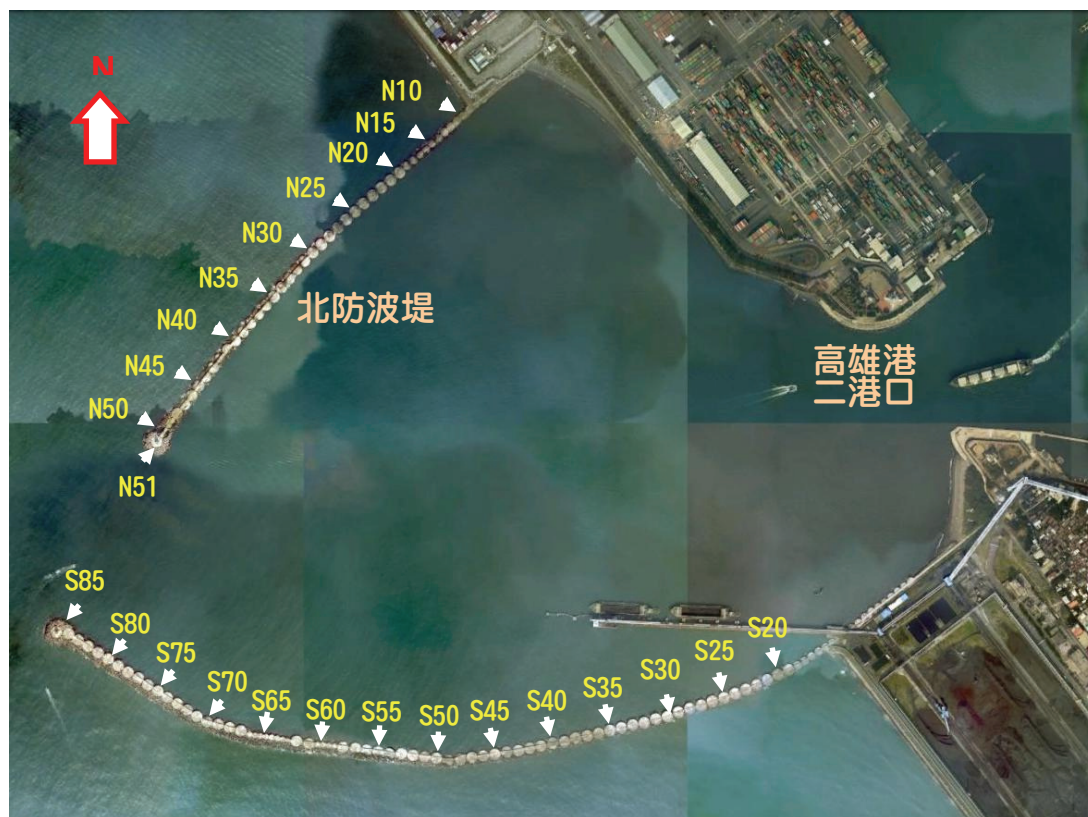


圖 4.1 高雄港第二港口圖像調查範圍

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 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，實測航跡如圖 4.2。

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 99 年高雄港防波堤圖像資料調查成果報告書。圖中比較去年(98 年)與本年度結果，北防波堤在沈箱#47~49 離堤腳約 5m 處有隆起之地形；#24 以內之沉箱外堤地形有淤積之情形。南防波堤外堤在沈箱#60~65、44~49、34~32 之間有較多破碎的小特徵物散落在堤腳之外。整體而言，南北防波堤外堤堤腳部分無明顯淘深現象，沉箱均被消波塊包覆且無較大的縫隙；北防波堤港外消波塊無散落情形，南防波堤消波塊散落情形較明顯，在堤尾靠近岸邊的地方，消波塊則有被砂覆蓋之情形。

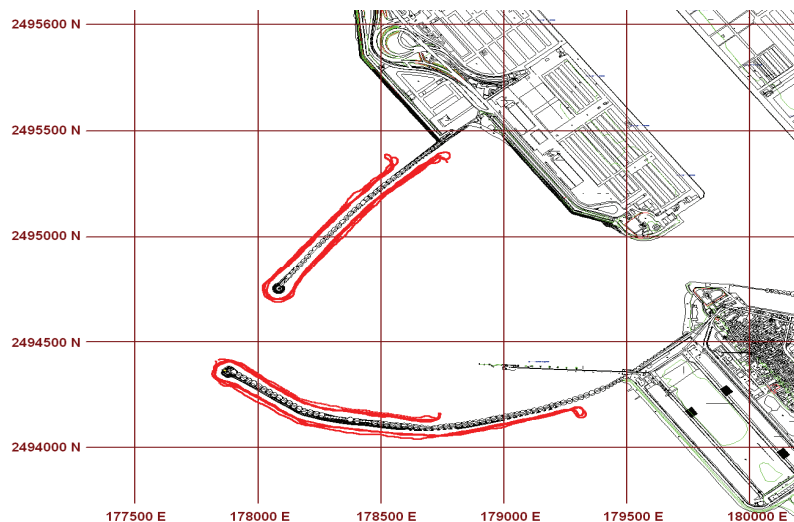
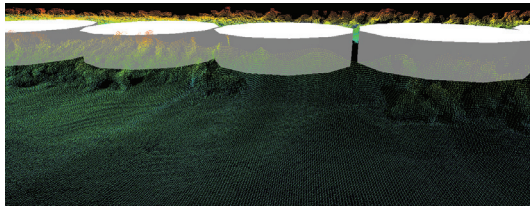
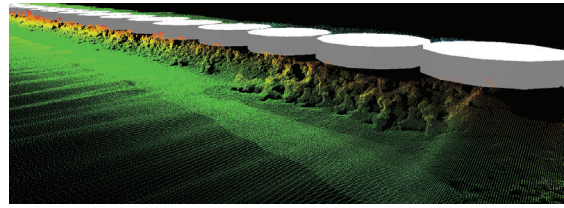


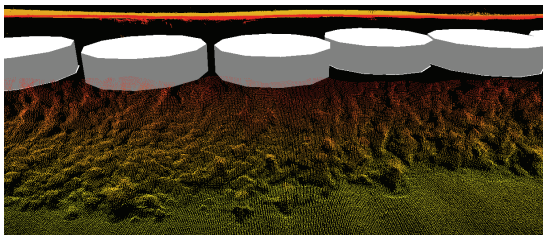
圖 4.2 多音束監測作業範圍與船跡圖



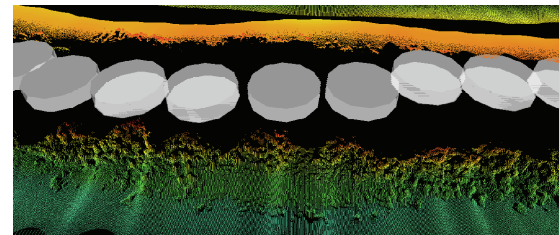
北堤沉箱#47(外，98 年)



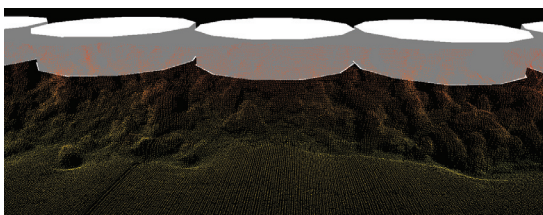
北堤沉箱#47(外，99 年)



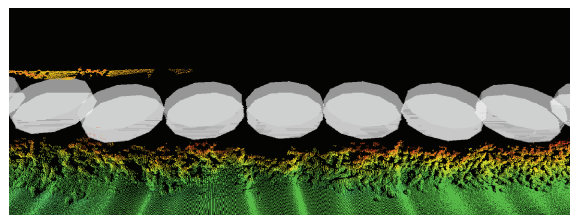
南堤沉箱#63(外，98 年)



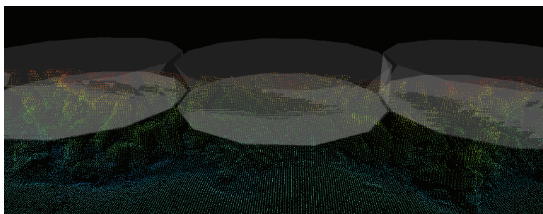
南堤沉箱#63(外，99 年)



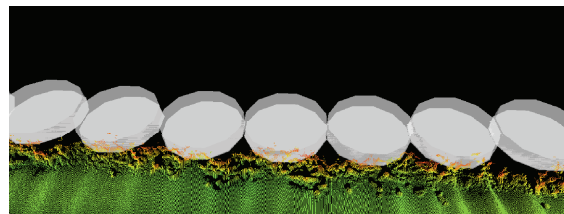
南堤沉箱#46(外，98 年)



南堤沉箱#46(外，99 年)



南堤沉箱#33(外，98 年)



南堤沉箱#33(外，99 年)

圖 4.3 98 及 99 年高雄港第二港口南北防波堤多音束監測成果

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 所示。由水下調查作業得知，本年度並未明顯發現高雄港第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 99 年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	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
N50	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地(水面檢視)
N45	T 型消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
N40	T 型消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
N35	T 型消波塊及塊石、海床沙地
N30	T 型消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
N25	T 型消波塊、塊石及沉箱壁、海床沙地
N20	T 型消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
N15	T 型消波塊及塊石、海床沙地
N10	T 型消波塊及塊石、海床沙地(到達定點浮出水面)
	N09-N01 位於岸堤內
南堤編號	結構物現況及異常說明
S85 內	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
S85	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
S80	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地(水面檢視)
S75	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
S70	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地(水面檢視)
S65	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地
S60	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地(水面檢視)
S55	消波塊及底部基礎卵石、海床沙地

S50	消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
S45	消波塊及塊石、海床沙地
S40	消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
S35	消波塊及塊石、海床沙地
S30	消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
S25	消波塊及塊石、海床沙地
S20	消波塊及塊石、海床沙地(水面檢視)
S15	消波塊及塊石、海床沙地
S10	消波塊及塊石、海床沙地(作業完成)
	N09-N01 位於岸堤內

4.1.4 水上結構物檢視作業

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，北防波堤沉箱#31、33、34、37、41、47、48 等堤面破損。南防波堤沉箱#53 堤面破損，#64 堤面破損且鋼筋裸露，S54～S57 沈箱有傾斜情形，相關檢視結果如圖 4.5 所示。



圖 4.5.1 北堤沉箱#40 堤面現況



圖 4.5.2 北堤沉箱#33、#34 堤面現況



圖 4.5.3 北堤沉箱#41 堤面現況



圖 4.5.4 南堤沉箱#53 堤面現況



圖 4.5.5 南堤沉箱#54 堤面現況



圖 4.5.6 南堤沉箱#63、#64 堤面現況

4.2 高雄港防波堤安全性評估探討

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 4.3 所示。

表 4.3 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。

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 4.4 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 4.4 高雄港外海各方向各迴歸期設計波浪分析表

迴歸期 (年) 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。

4. $Ts=4.2 \times Hs^{0.5}$ 。

2.推算目標區為 120.26°E，22.47°N。

5.Hs 單位為 m，Ts 單位為 sec。

3.目標區水深為 192.45m。

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 4.5。

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 4.6 所示。由該表得知，迴歸期 50 年之極端水位為 +2.16m。

表 4.5 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 4.6 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 4.7 所示。由表中得知，迴歸期 50 年之暴潮偏差約為 0.96m。

表 4.7 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 4.8 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 4.8 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，故而有後續加固維護之措施。

4.2.4 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 4.9 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 4.9.1 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 4.9.2 高雄港沉箱式防波堤歷年維修分類表(續)

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 4.10 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 4.10 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 ²	
72-事-9	七二年度二港口防坡堤維護工程	7.5T消波塊300塊 堤面修補206m ²	
73-事-16	七十三年度二港口防坡堤維護工程	2T消波塊60塊 7.5T消波塊980塊 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 7.5T消波塊790塊 15T消波塊200塊 堤面修補594.5m ²	
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 15T消波塊150塊 堤面修補125m ²	
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 20T消波塊160塊 PC修補31m ³	
78-事-14	78 年度二港口防坡堤維護工程	10T消波塊421塊 20T消波塊220塊 堤面修補12.6m ²	
79-事-11	79 年度二港口防坡堤維護工程	7.5T消波塊160塊 20T消波塊490塊 堤面修補15m ²	
80-事-4	80 年度二港口防坡堤維護工程	20T消波塊575塊 堤面修補5.2m ²	

81-事-資-4	81 年度二港口防坡堤維護工程	30T消波塊1156塊 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 5T消波塊3000塊 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 堤面修補30m ²	
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 PC修補20m ³	

4.2.5 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、溯升及越波等物理量之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(k_r)、繞射係數(k_d)修正後，即可得出等值深海波高 $H_o' = H_o \cdot k_r \cdot k_d$ ，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 $k_r \cdot k_d$ ，最後換算出等值深海波高 $H_o' = H_o \cdot k_r \cdot k_d$ ，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 $1/2 \times (1 + \cos \beta) H_{max}$ 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 4.11，防波堤之堤址波高計算結果如表 4.12，而各堤址水深之消波塊重量如表 4.13 所示。。

表 4.11 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) 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 β_0	$\beta = \min(\beta_0 - 15, \beta_0 + 15)$	判斷式 $= H_{\max} * (1 + \cos\beta) / 2$
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 4.12 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	13.93	8.67	7.97	2	SSW	12.74	
-14~-15m	13.93	8.67	7.97	2	SSW	12.74	

表 4.13 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 α	消波塊 重量(t)	氣候變遷條件 下之消波塊重 量 (t) *註
-13~-14m	7.97	SSW	2	41.47	55.30
-14~-15m	7.97	SSW	2	41.47	55.30

註：1. 假設 Kd 值為 7.5 估計消波塊重量

2. 考量增加 10% 相當外海波高 Ho'=9.54m，堤址波高 Hs=8.78m

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。

4.2.6 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 4.6 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 4.7 所示。

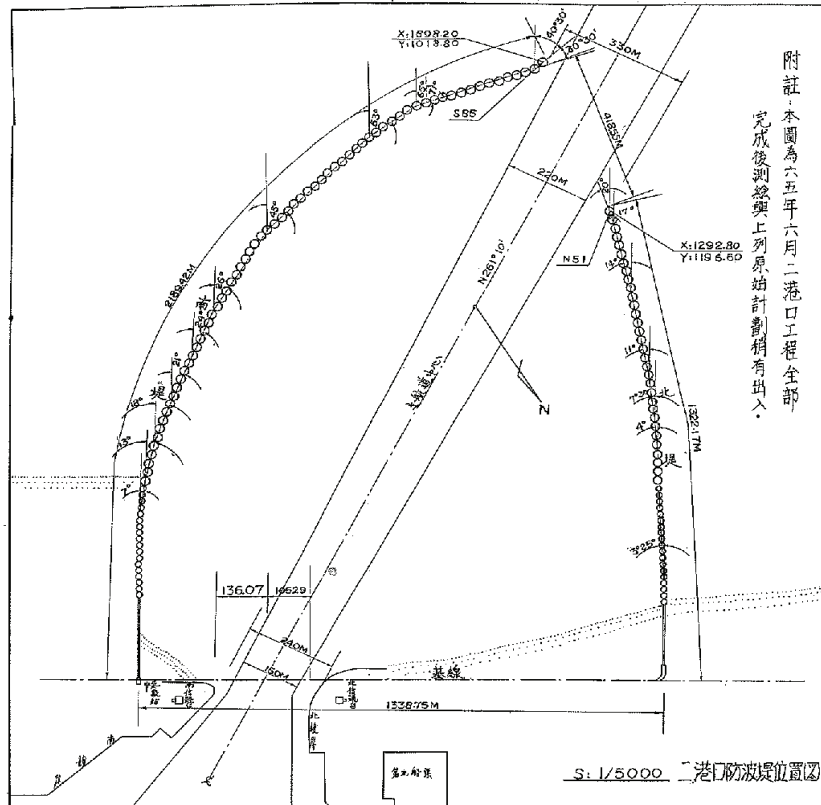


圖 4.6 高雄港第二港口防波堤平面配置示意圖

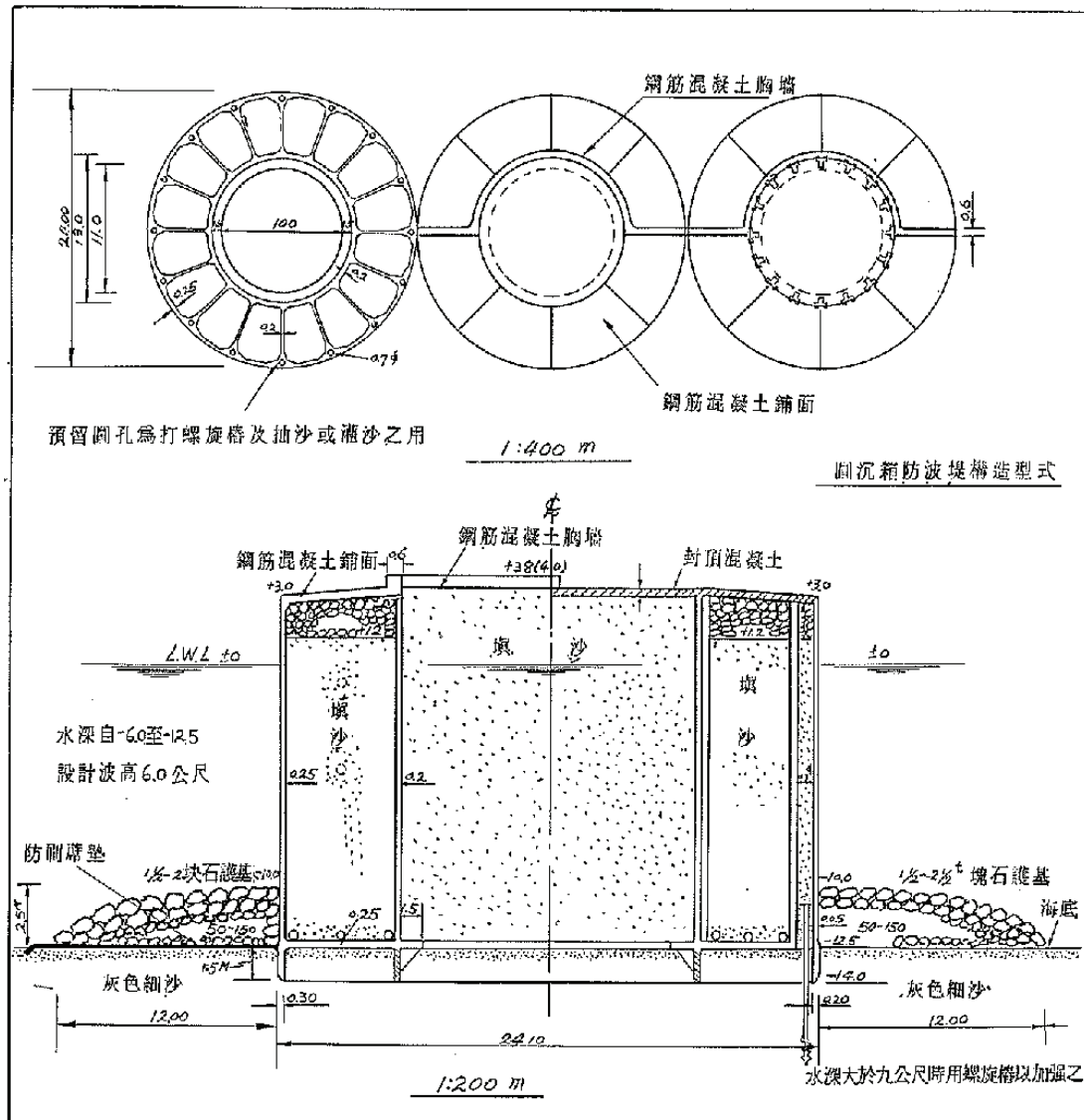


圖 4.7 24m 圓形楔入式沉箱堤設計平面圖與斷面圖

4.2.7 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 4.8 所示，計算步驟如下。

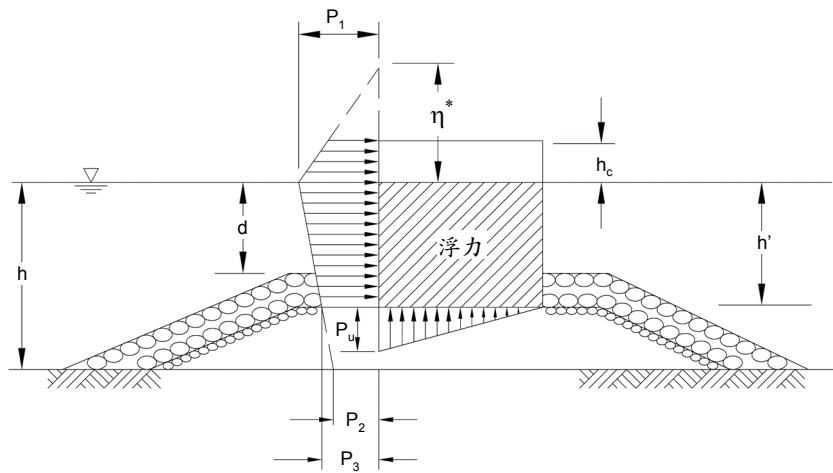


圖 4.8 防波堤直立部份波壓分佈圖

(1)波壓作用高程

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

η ：波壓作用在靜水位以上高度(m)

β : 入射波向與海堤垂線之夾角 $\pm 15^\circ$ ，取其大者

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

(2)波壓強度

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

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

$$P_3 = \alpha_3 \cdot P_1$$

$$P_4 = \alpha_4 \cdot P_1$$

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

λ_1 : 緩變波壓項之修正係數，通常為 0.8~1.0。

λ_2 : 碎波波壓項之修正係數

λ_3 : 上揚壓力項之修正係數

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

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

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

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

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

(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：

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

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

式中 ℓ_u ：表示上揚力作用於堤底之範圍

若直立堤身位於設計水位之下，則 $\ell_u = B$ 堤底寬

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

其中 h' ：直立堤底部出水面之高度(取負值)

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)

γ_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($N_s^3 = K_d \cot \alpha$)

α ：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 4.9 所示。

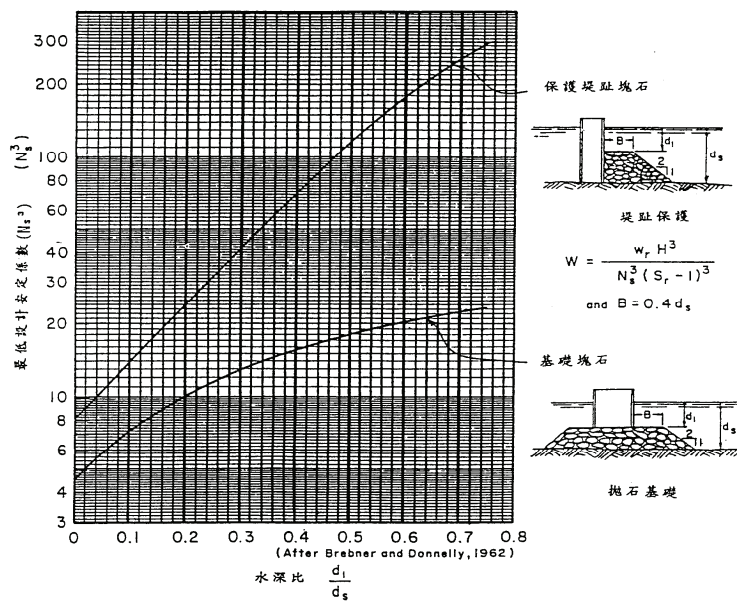


圖 4.9 護基及堤趾拋石之安定係數圖

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

ω_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

μ ：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

4.2.8 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氣候變遷影響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.氣候變遷條件

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 8.78m，相當外海波高 9.54m，最大波高 12.82m，週期 13.38sec。

5.安全係數：如表 4.14 所示。

6.計算分析種類：如表 4.15 所示。

表 4.14 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 4.15 計算分析種類一覽表

種類	設計水位 (m)	相當外海 波高 (m)	設計堤址 示性波高 (m)	週期 (sec)	緩變波壓 修正係數			備註
					λ_1	λ_2	λ_3	
一	H.W.L +1.2m	6.36	6	12	1	1	1	原有設計條件
二	H.H.W.L +2.6m	8.67	7.98	12.74	1	1	1	極端異常波浪條件
三	H.H.W.L +2.6m	8.67	7.98	12.74	0.8	0	0.8	極端異常波浪條件+ 加拋消波塊現況
四	H.H.W.L +2.6m	9.54	8.78	13.38	0.8	0	0.8	極端異常波浪條件 +氣候變遷條件+加 拋消波塊現況

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 4.16 及表 4.17 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 4.16 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 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 4.17 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 直徑 24 公尺圓形沉箱	高 潮 合成載重下之地盤反力 與容許承载力(t/m ²)		低 潮 合成載重下之地盤反力 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 < 30.22(O.K.)	8.96 < 30.22(O.K.)	-13.30 < 31.58(O.K.)	7.73 < 32.58(O.K.)
波谷狀況(無偏心荷重)	-1.57 < 17.14(O.K.)	-7.44 < 17.14(O.K.)	-2.36 < 17.14(O.K.)	-6.97 < 17.14(O.K.)
地震狀況(無偏心荷重)	-4.63 < 17.14(O.K.)	-3.22 < 17.14(O.K.)	-4.73 < 17.14(O.K.)	-3.65 < 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 4.18 及表 4.19 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 4.18 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 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 4.19 極端潮位結構體承载力檢核分析資料表

防波堤深水地段 直徑 24 公尺圓形沉箱	高 潮 合成載重下之地盤反力 與容許承载力(t/m^2)		低 潮 合成載重下之地盤反力 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 < 21.55(O.K.)	18.47 < 21.55(O.K.)	-12.76 < 29.29(O.K.)	10.34 < 29.29(O.K.)
波谷狀況(無偏心荷重)	-0.08 < 17.14(O.K.)	-8.54 < 17.14(O.K.)	-2.60 < 17.14(O.K.)	-7.05 < 17.14(O.K.)
地震狀況(無偏心荷重)	-4.56 < 17.14(O.K.)	-2.67 < 17.14(O.K.)	-4.76 < 17.14(O.K.)	-3.70 < 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 λ_1 取 0.8，碎波波壓項係數 λ_2 取 0.0，上揚壓力項係數 λ_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 4.20 及表 4.21 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 4.20 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 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 4.21 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 直徑 24 公尺圓形沉箱	高 潮 合成載重下之地盤反力 與容許承载力(t/m ²)		低 潮 合成載重下之地盤反力 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 < 30.19(O.K.)	7.97 < 30.19(O.K.)	-13.89 < 35.36(O.K.)	5.43 < 35.36(O.K.)
波谷狀況(無偏心荷重)	-0.08 < 17.14(O.K.)	-8.54 < 17.14(O.K.)	-2.60 < 17.14(O.K.)	-7.05 < 17.14(O.K.)
地震狀況(無偏心荷重)	-4.56 < 17.14(O.K.)	-2.67 < 17.14(O.K.)	-4.76 < 17.14(O.K.)	-3.70 < 17.14(O.K.)

註：表內正值反力為向上，負值為向下

10.現況已加拋消波塊及極端異常與氣候變遷因素條件計算結果

為考量現況是否足以因應未來氣候變遷造成之衝擊，特以目前堤址已拋放大量消波塊之現況，並依據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，根據前節因

應氣候變遷之建議，將等值深海波高增加 10% ($H_o'=9.54\text{m}$)，週期增加 5% (13.38sec)，以合田良實 (Goda) 之公式重新分析結構體所受之波壓及揚壓力。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 136t/m 波力，1,086t×m/m 波力矩，75.13t/m 揚壓力，1,202t×m/m 揚壓力矩，有關結構體滑動、傾倒與地盤承载力則詳表 4.22 及表 4.23 所示。由分析成果可知，波力、波力矩、揚壓力均約為前節計算現況之 1.05 倍，高潮波峰時之滑動安全係數則由 1.14 降至 1.07，低潮波峰時由 1.56 降至 1.48，顯示氣候變遷與極端颱風波高的增加將造成高雄港防波堤所受波力上升，各項安全係數下降。高潮波峰滑動安全係數不符規範所須之 1.2 以上，雖其值 1.07 仍大於 1，暫可抵擋目前所預估之氣候變遷幅度，但倘若氣候變遷之幅度與速度超過預期，沉箱堤仍有受波浪作用而破壞之可能。

表 4.22 現況下氣候變遷結構體滑動與傾倒安定檢核分析資料表

防波堤深水地段 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	1.07(N.G.)	1.26(O.K.)	1.48(O.K.)	1.47(O.K.)
波谷狀況	2.91(O.K.)	2.09(O.K.)	4.62(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 4.23 現況下氣候變遷結構體承载力檢核分析資料表

防波堤深水地段 直徑 24 公尺圓形沉箱	高 潮 合成載重下之地盤反力 與容許承载力(t/m^2)		低 潮 合成載重下之地盤反力 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)	-10.59 < 28.91(O.K.)	8.88 < 28.91(O.K.)	-13.85 < 34.88(O.K.)	5.80 < 34.88(O.K.)
波谷狀況(無偏心荷重)	-0.06 < 17.14(O.K.)	-8.59 < 17.14(O.K.)	-2.59 < 17.14(O.K.)	-7.08 < 17.14(O.K.)
地震狀況(無偏心荷重)	-4.56 < 17.14(O.K.)	-2.67 < 17.14(O.K.)	-4.76 < 17.14(O.K.)	-3.70 < 17.14(O.K.)

註：表內正值反力為向上，負值為向下

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	外海相對波高 Ho'(m)	週期 (sec)	沉箱承受波力 (t/m)	安全主控因素 (波峰滑動安全係數)		備註
				高潮	低潮	
一	6.36	12	145	1.12 (NG)	1.19 (NG)	原有設計條件
二	8.67	12.74	175	0.78 (NG)	1.07 (NG)	極端異常波浪條件
三	8.67	12.74	130	1.14 (NG)	1.56 (OK)	極端異常波浪條件+加拋消波塊現況
四	9.54	13.38	136	1.07 (NG)	1.48 (OK)	極端異常波浪條件+氣候變遷條件+加拋消波塊現況

基於種種證據顯示，地球暖化、海平面上升等情形正在悄悄地改變地球之自然環境，氣候變遷亦因此成為近年之熱門課題，為因應其未來可能帶來之衝擊，參考國際航海協會之氣候變遷報告中針對海事工程設計之建議，增加設計波高與週期 10%及 5%來重新檢討防波堤現況，分析結果顯示，極端高潮位波峰時之滑動安

全係數仍不符合規範，雖其值大於 1 應可保持短期內之穩定及安全性，但目前氣候變遷之研究眾說紛云，暫無明確之定論，但建議仍需持續追蹤後續狀況與研究以確認氣候變遷可能造成之確切影響。

4.3 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要素，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。

4.3.1 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。

4.3.2 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 4.10 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，消波塊或護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。

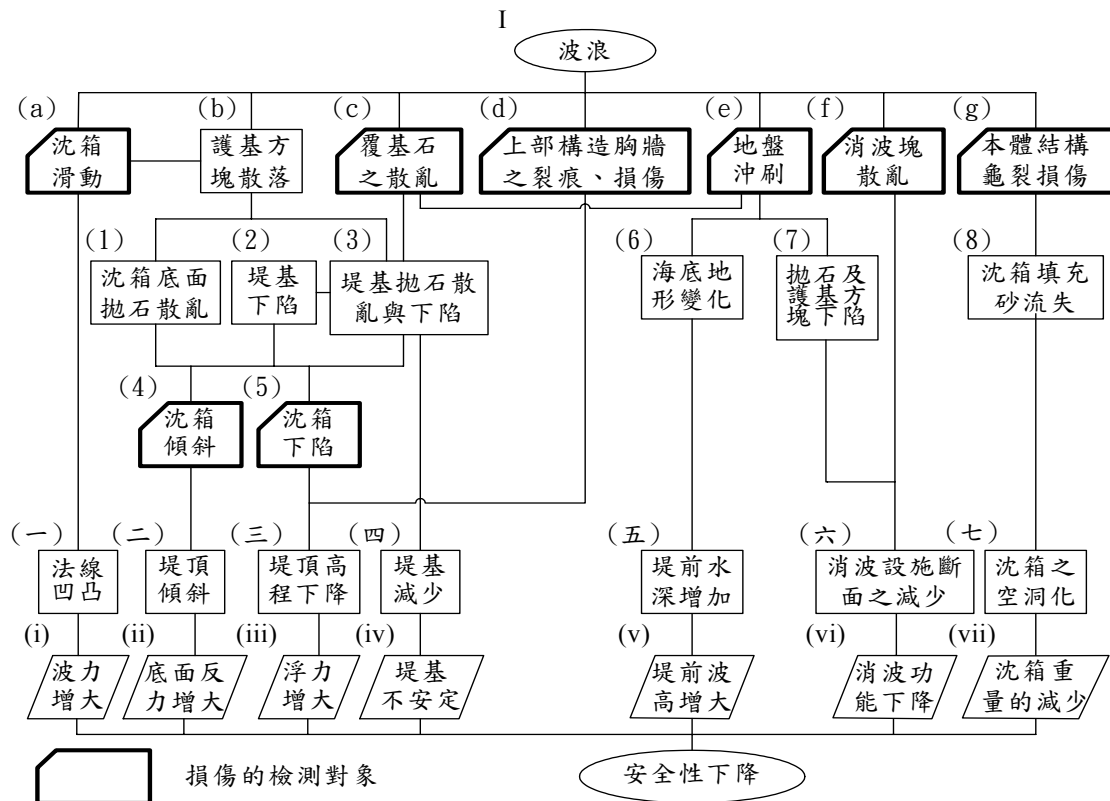


圖 4.10 沈箱式防波堤損傷變形連鎖圖

4.3.3 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。

4.4 高雄港第二港口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。

4.4.1 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。

4.4.2 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
上部及沈箱 本體結構	胸 牆	剝離、龜裂、鋼筋外露	
	堤 面	龜裂損傷、鋼筋外露	
	沈 箱	龜裂損傷、鋼筋外露、變位	
	消 波 塊	沈陷、位移	
水下結構	沈 箱	龜裂損傷	
	護基方塊	位移、散落	
	消 波 塊	沈陷、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。 2. 利用全球定位系統進行監測。 3. 裝設位移計或傾角計監測。
堤體沈陷	1. 進行水準測量。 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 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

4.4.3 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	☐ 高雄港 ☐ 安平港 ☐
	設施形式	☐ 碼頭 ☐ 防波堤 ☐ 護岸 ☐ 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 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 編號					檢測單元編號							
檢測項目位置		頻 率	R	D	劣化程度	E	U	異常位置				
水上部分	胸牆 • 離 • 裂損傷	☐ 一年	2		☐ 無異狀							
				2	☐ 輕微損傷 ☐ 局部混凝土剝落							
				3	☐ 明顯損傷 ☐ 混凝土剝落 ☐ 胸牆損傷致高度不足							
				4	☐ 胸牆斷落							
	堤面 • 裂損傷 • 陷	☐ 一年	3	1	☐ 無異狀							
				2	☐ 輕微損傷 ☐ 局部混凝土剝落							
				3	☐ 明顯損傷 ☐ 混凝土剝落 ☐ 輕微不均勻沈陷							
				4	☐ 明顯不均勻沈陷 ☐ 堤面混凝土斷裂							
	沈箱 • 位 • 斜 • 裂損傷 • 筋外露	☐ 一年	4	1	☐ 無異狀							
				2	☐ 堤體變位不明顯 ☐ 堤體輕微損傷 ☐ 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 ☐ 輕微傾斜							
				3	☐ 堤體變位明顯 ☐ 堤體明顯損傷 ☐ 壁體剝落致鋼筋外露 ☐ 明顯傾斜							
				4	☐ 堤體嚴重變位 ☐ 堤體混凝土斷裂 ☐ 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 • 龜裂 損傷	□ 二年	4	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 堤體輕微損傷			
				3	☐ 堤體明顯損傷 ☐ 壁體剝落致鋼筋外露			
				4	☐ 堤體混凝土斷裂			
	護基方塊 • 變位	□ 二年	3	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 部分發生下陷位移			
				3	☐ 小規模下陷位移			
				4	☐ 大範圍下陷位移			
	消波塊 • 落 • 陷	□ 二年	3	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 部分消波塊移動或滾落			
				3	☐ 消波塊散落沈陷達一層			
				4	☐ 消波斷面減少，堤體可能滑動			
	基礎海床 • 沖刷	□ 二年	4	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 輕微沖刷			
				3	☐ 大量沖刷			
				4	☐ 嚴重沖刷			
性能指標		$CI = 100 - 12.5 \sum (D + E) \times R / \sum R =$						
檢測人員意見：								
檢測時間				檢測單位				檢測人員

註：D：破壞程度。E：破壞範圍。R：破壞影響性。U：急迫性。

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 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 • 離 • 裂損傷	A B C	2	1	☐ 無異狀				
				2	☐ 輕微損傷 ☐ 局部混凝土剝落				
				3	☐ 明顯損傷 ☐ 混凝土剝落 ☐ 胸牆損傷致高度不足				
				4	☐ 胸牆斷落				
	堤面 • 裂損傷 • 陷	A B C	3	1	☐ 無異狀				
				2	☐ 輕微損傷 ☐ 局部混凝土剝落				
				3	☐ 明顯損傷 ☐ 混凝土剝落 ☐ 輕微不均勻沈陷				
				4	☐ 明顯不均勻沈陷 ☐ 堤面混凝土斷裂				
	沈箱 • 位 • 斜 • 裂損傷 • 筋外露	A B C	4	1	☐ 無異狀				
				2	☐ 堤體變位不明顯 ☐ 堤體輕微損傷 ☐ 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 ☐ 輕微傾斜				
				3	☐ 堤體變位明顯 ☐ 堤體明顯損傷 ☐ 壁體剝落致鋼筋外露 ☐ 明顯傾斜				
				4	☐ 堤體嚴重變位 ☐ 堤體混凝土斷裂 ☐ 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 • 龜裂損傷	A B C	4	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 堤體輕微損傷			
				3	☐ 堤體明顯損傷 ☐ 壁體剝落致鋼筋外露			
				4	☐ 堤體混凝土斷裂			
	護基方塊 • 變位	A B C	3	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 部分發生下陷位移			
				3	☐ 小規模下陷位移			
				4	☐ 大範圍下陷位移			
	消波塊 • 落陷	A B C	3	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 部分消波塊移動或滾落			
				3	☐ 消波塊散落沈陷達一層			
				4	☐ 消波断面減少，堤體可能滑動			
	基礎海床 • 冲刷	A B C	4	1	☐ 無異狀			
				2	☐ 輕微冲刷			
				3	☐ 大量冲刷			
				4	☐ 嚴重冲刷			
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）	2
			● 明顯不均勻沈陷（嚴重積水）	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
	沈箱	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	● 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	沈箱	龜裂損傷	● 無異狀 ● 堤體輕微損傷(龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm) ● 堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm) ● 堤體混凝土斷裂	1 2 3 4
		鋼筋外露	● 無異狀 ● 壁體側牆混凝土剝落但鋼筋未外露 ● 壁體剝落致鋼筋外露 ● 堤體混凝土破洞	1 2 3 4
水下部分	沈箱	龜裂損傷	● 無異狀 ● 堤體輕微損傷(龜裂寬度目測約<3mm, 龜裂長度目測約<5cm) ● 堤體明顯損傷(龜裂寬度目測約>3mm, 龜裂長度目測約>5cm) ● 堤體混凝土斷裂(破洞)	1 2 3 4
	護基方塊	變位	● 無異狀 ● 部分發生下陷位移(變位量約<5cm) ● 小規模下陷位移(變位量約 5~10 cm) ● 大範圍下陷位移(變位量約>10 cm)	1 2 3 4
	消波塊	滑落與沈陷	● 無異狀 ● 部分消波塊移動或滾落 ● 消波塊散落沈陷達一層, 堤體滑動安全率有減低之虞 ● 消波斷面減少, 堤體滑動安全率已減低	1 2 3 4
	基礎海床	沖刷	● 無異狀 ● 輕微沖刷(沖刷坑深度約<50cm) ● 大量沖刷(沖刷坑深度約 50~100cm) ● 嚴重沖刷(沖刷坑深度約>100cm)	1 2 3 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		

4.5 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。

4.5.1 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 單位：無				上次維護	日期：無 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 • 陷 • 裂損傷 • 筋外露	□ 一年	2	1	□ 無異狀				
				2	□ 輕微損傷 ☑ 局部混凝土剝落 □ 輕微沉陷		1	1	
				3	□ 明顯損傷 □ 混凝土剝落致鋼筋外露 □ 胸牆損傷致高度不足 □ 小規模沉陷				
				4	□ 胸牆斷落 □ 大規模沉陷				
	堤面 • 裂損傷 • 陷	□ 一年	3	1	□ 無異狀				
				2	□ 輕微損傷 ☑ 輕微沈陷		1	1	
				3	□ 明顯損傷 □ 明顯沉陷				
				4	□ 堤面混凝土斷裂 □ 嚴重沉陷				
	消波塊 • 落 • 陷	□ 一年	4	1	□ 無異狀				於+780m~ +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 率	R	D	劣化程度	E	U	異常位置	
水下 部分	海床沖刷	☐ 一年	4	1	☐ 無異狀或呈淤積狀態				
				2	☒ 輕微沖刷	1	1		
				3	☐ 大量沖刷				
				4	☐ 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： +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

4.5.2 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 4.11 與圖 4.12 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 4.13 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 4.14 所示。

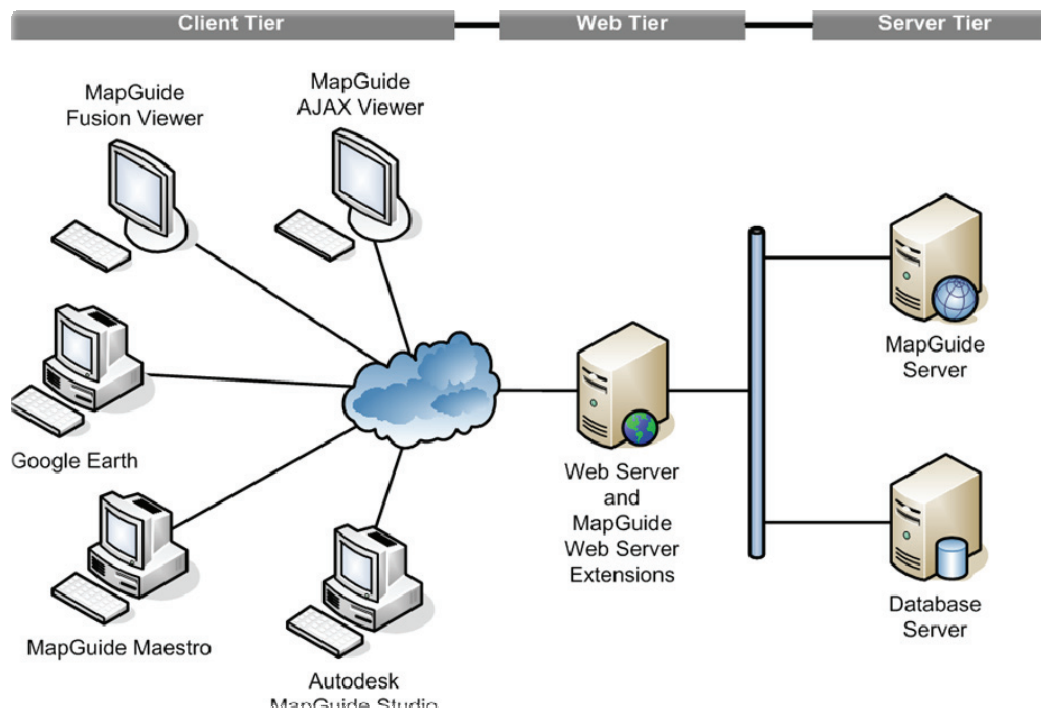


圖 4.11 多層分散式架構圖



圖 4.12 系統登入頁面示意圖

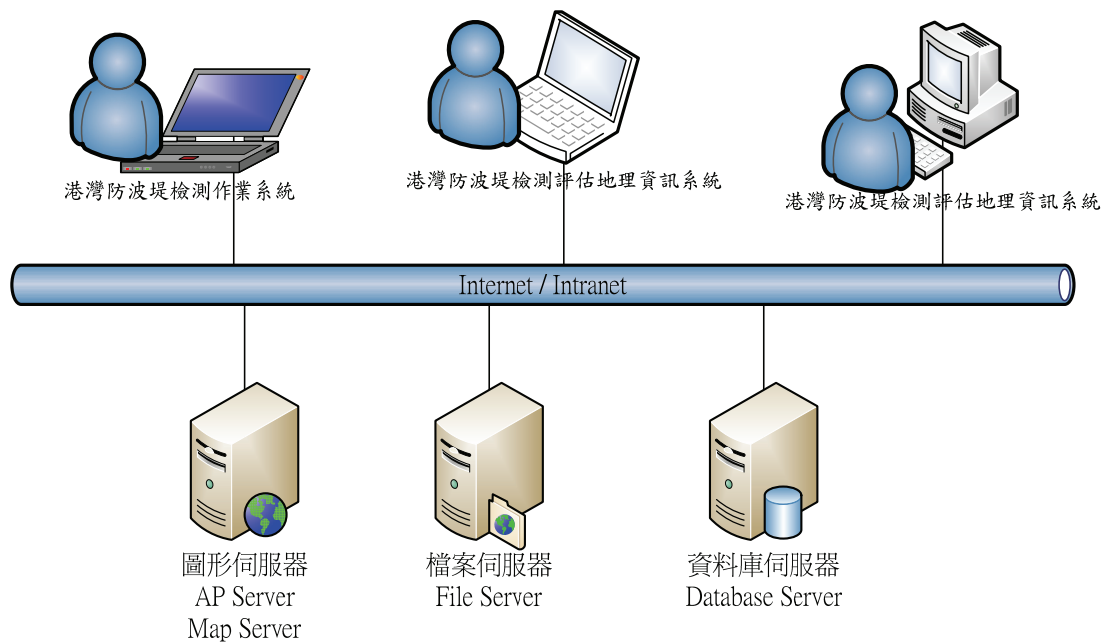


圖 4.13 整體架構說明

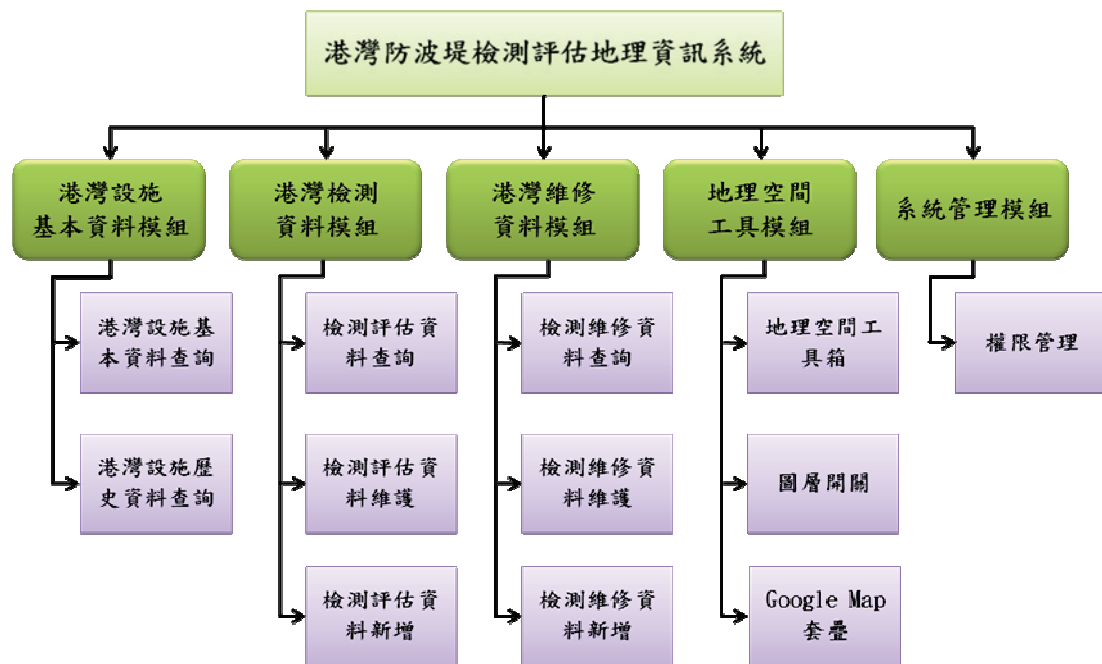


圖 4.14 地理資訊系統功能架構圖

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 4.15 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。

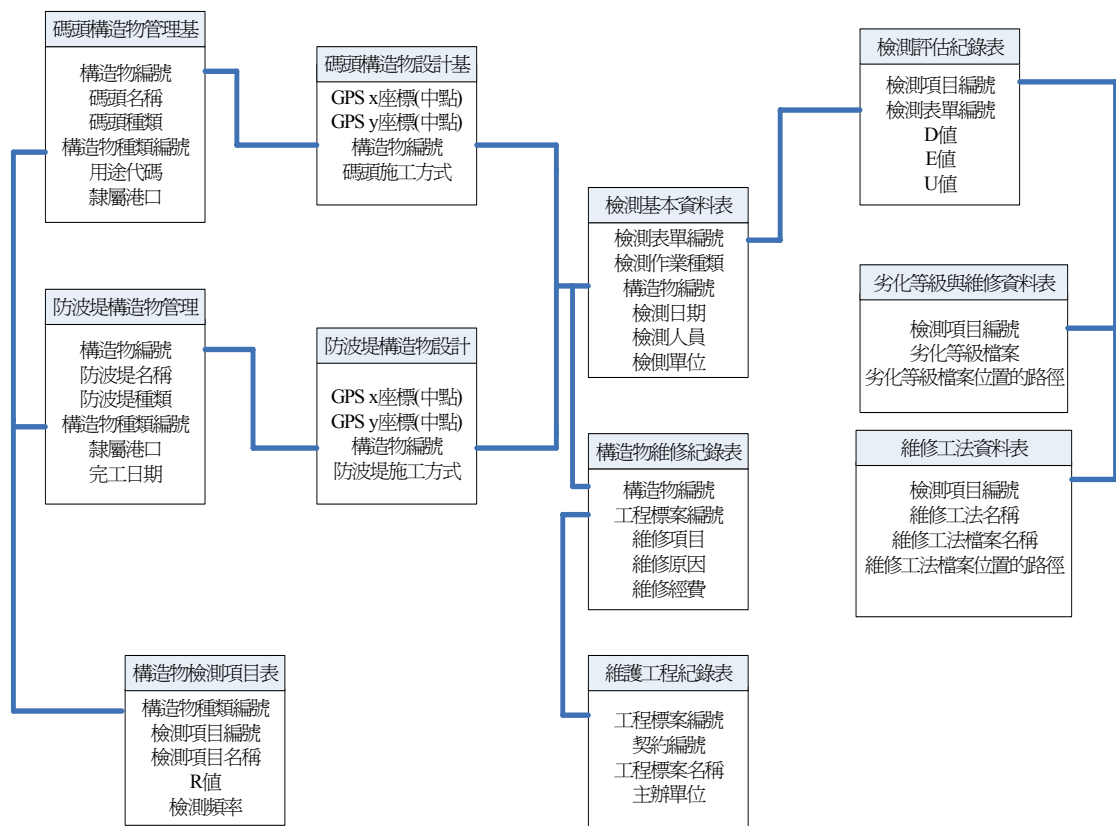


圖 4.15 檢測評估資料庫整體資料表關聯圖

第五章 結論與建議

5.1 結論與建議

綜合前述各項研究工作包含即時性的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. 有關港域颱風波浪推算模式建置方式，針對去年(2009 年)初步建構的高雄港域颱風波浪推算模式進行改善，本年度增加考慮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。由模式推算結果得知，各場颱風波浪最大波高誤差平均約為 0.67m，而最大波高發生時間誤差平均約 8.70 小時；模式推算颱風波浪與實測波浪均方根誤差平均為 0.64m，推算波高結果與實測波高的相關性則平均為 0.74。同時並針對推估結果較差的颱風進行討論，若有更新的波浪資料或颱風資訊可供學習或驗證可再提升模式之可靠度。
2. 有關港域波浪極值統計特性分析方面，本年度以更完整的極值分析方法，由箱型圖初步分析取樣，再進一步討論極值分析之最佳方法，最後考慮季節性變化之極值參數迴歸，計算得到季節性波高。當考慮極值波高之季節性變化時，其位置參數 B 及尺度參數 A 與時間之關係，可利用正、餘弦之週期函數表示。花蓮港季節風期（12~5 月）的極值波高分佈範圍小，對應的機率密度值相對增大，合田(1990)所建議之四種形狀參數的理論機率密度和觀測值都很接近；颱風期（6~11 月）的極值波高分佈範圍大，對應的機率密度值相對減小， $k=1.4$ 、 2.0 的理論機率密度和觀測值較為接近， $k=0.75$ 、 1.0 的理論機率密度則會有高估的現象。另外利用傳統年最大法推估所得之年最大極值波高較利用月最大法推估所得的年最大極值波高為大，此顯示若採用傳統年最大法的推估結果做設計時，可能有超設計現象。而高雄港的月極值波高統計的結果顯示，Lognormal 分布以 RMSE 值來看較佳，但推算標準偏差較上述兩種分布大，GEV 分布

在推算重現期長的狀況下會有不適用的狀況，因此推算各重現期波高方面建議以選用 Weibull 分布較為合適。

3. 有關花蓮與高雄港的設計波浪推估結果方面，以花蓮港實測 19 年之年最大值波高為樣本，以 MLE 推估參數法於 Weibull 分布最適合於此樣本之機率分布。以 MLE 推估 Weibull 分布，50 年重現期波高為 13.16m，若考慮 95%信賴度之偏差量，則此值會在 10.63~15.69m 之間。而高雄港 9 年之年最大值波高為樣本，以 MLE 推估 GEV 分布為最佳組合，推算 50 年重現期之波高為 8.16，標準偏量為 0.94，若在 95%信賴度下，此推算值應在 6.32~10m。
4. 經由重新分析探討高雄港第二港口設計波浪條件的結果得知，其原設計 $H_{1/3}$ 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；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。若考量極端異常條件下之驗算模式重新估算，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。而若考慮氣候變遷之影響，將深海颱風推算波高增加 10%與週期增加 5%重新計算，總波力由現況之 130t/m 增加至 136t/m，增加幅度約 5%；其滑動安全係數自 1.14 略降至 1.07。
5. 由高雄港第二港口防波堤現況圖像調查與防波堤安全性評估結果得知，二港口南北防波堤沉箱體大致完好，僅部分堤址消波塊有散落，及堤面破損或堤體稍有傾斜情況。本年度本計畫針對第二港口防波堤消波塊重量不足與沉箱堤體現況情況，初步研擬補強修復對策，同時並建置防波堤維護檢測分類、檢測評估方法，及防波堤構造物維護管理資訊系統。

5.2 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，所完成花蓮與高雄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. 「99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」，2010，交通部運輸研究所。
10. 「99年高雄港防波堤圖像資料調查」，2010，交通部運輸研究所。
11. Coastal engineering manual (2002) “Hydro-dynamic analysis and design conditions,” Chapter 8.
12. Ferreira, J.A., Guedes Soares, C., (1998) “An application of the peaks over threshold method to predict extremes of significant wave height”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 120 (3), 165- 176.
13. Ferreira, J.A., Guedes Soares, C., (2000) “Modelling distributions of significant wave height”, Coastal Engineering 40, 361-374.
14. Goda, Y., (2000) “Random Seas and Design of Maritime Structures”, In: Liu, P.L.-F. (Ed.), Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 15. World Scientific, Singapore.
15. Muir, J.R., El Shaarawi, A.H., (1986) “On the calculation of extreme wave heights”, Ocean Engineering 13, 93-118.