

102-26-7675

MOTC-IOT-101-H3DB005c

提昇海岸及港灣海嘯模擬技術 之研究 (2/4)



交通部運輸研究所

中華民國 102 年 2 月

102-26-7675

MOTC-IOT-101-H3DB005c

提昇海岸及港灣海嘯模擬技術 之研究 (2/4)

著者：陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 102 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究. (2/4) / 陳冠宇
等著. -- 初版. -- 臺北市：交通部運研所，民 102.02
面；公分
ISBN 978-986-03-6153-7(平裝)

1.海嘯 2.生態模擬

351.9

102003183

提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究 (2/4)

著者：陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎
出版機關：交通部運輸研究所
地址：10458 臺北市敦化北路 240 號
網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)
電話：(04)26587176
出版年月：中華民國 102 年 2 月
印刷者：
版(刷)次冊數：初版一刷 80 冊
本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站
定價：300 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：1010200316

ISBN：978-986-03-6153-7 (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。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4)			
國際標準書號 ISBN978-986-03-6153-7 (平裝)	政府出版品統一編號 1010200316	運輸研究所出版品編號 102-26-7675	計畫編號 101-H3DB005c
主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：邱永芳 研究人員：蘇青和、單誠基 李俊穎 參與人員：馬維倫 聯絡電話：04-26587176	合作研究單位：國立中山大學 計畫主持人：陳冠宇、陳陽益 研究人員：姚建中、林敬樺、劉俊志 地址：804 高雄市鼓山區蓮海路 70 號		研究期間 自 101 年 02 月 至 101 年 12 月
關鍵詞：海嘯早期預警系統、臺中港、布袋港、海嘯溢淹			
摘要： 海嘯會在沿海地區引起巨大的破壞，而一個實用的海嘯預警系統的實施，將可減輕這毀滅性的災難。在 2004 年印度洋海嘯後，在印度洋周邊的國家已經建立海嘯預警系統。然而，最近發生的海嘯事件，如 2009 年美屬薩摩亞海嘯和 2010 年印尼海嘯之案例也曝露一些問題存在於目前海嘯預警系統。此外，臺灣、呂宋島、馬尼拉海溝、琉球群島和東太平洋的周邊地區地震頻繁，因此建構適用的海嘯預警系統是對臺灣特別重要的意義。 目前國外發佈海嘯警報時，只提供地震規模，未能提供海嘯波高；故臺灣港務公司及各港務分公司皆無所依循。為爭取時效並提高海嘯數值模擬之精度，本研究建構海嘯速報系統以及布袋、臺中兩港之子系統，使能自動擷取 USGS (United States Geological Survey) 網站來更新，再自動進行海嘯模擬。另一方面，本計劃利用機率之概念評估布袋港及臺中港在未來 50 年及 100 年所可能遭受之海嘯風險，其結果將對現有港灣結構物設計準則有所幫助。 成果效益與應用情形： 本研究成果可提供臺灣港務公司及各港務分公司對海嘯來襲時能充分了解狀況，並適時安排最妥善的應變。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
102 年 2 月	202	300	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: Advancing tsunami simulation technology in coastal and harbor areas (2/4)			
ISBN	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-03-6153-7 (pbk)	1010200316	102-26-7675	101-H3DB005c
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-Fang PROJECT STAFF: Su Ching-Ho, Shan Chen-Chi, Lee Chung-Ying, Ma Wei-Lun PHONE: 04 -26587176 FAX: 04-26564415			PROJECT PERIOD FROM February 2012 TO December 2012
DIVISION: NATIONAL SUN-YAT-SEN UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen Guan-Yu, Chen Yang-Yih PROJECT STAFF: Yao Chien-Chung, Lin Jing-Hua, Liu Chung-Chi ADDRESS : No.70, Lianhai Rd., Gushan District, Kaohsiung 804, Taiwan (R.O.C) PHONE : (07)5252000 ext.5353			
KEY WORDS: Tsunami Early Warning System, Taichung Harbor, Budai Harbor, Tsunami Inundation			
ABSTRACT: A tsunami can induce huge damage in the coastal areas and this devastating disaster will be mitigated if a practical tsunami warning system is implemented. After the Indian Ocean Tsunami of 2004, tsunami warning system has been established in the counties around the Indian Ocean. However, recent tsunami events such as the Samoa tsunami of 2009 and the Indonesia tsunami of 2010 showed that there are some problems in the present tsunami warning systems. Besides, for the neighboring areas of Taiwan, Ryukyu Islands, Manila trench, Luzon Island and the eastern Pacific Ocean all have frequent earthquakes and hence an applicable tsunami early warning system is of special importance to Taiwan. In the existing tsunami warning system of the Pacific Ocean, only the scale of earthquake, instead of the tsunami wave height, is provided. The information is not useful for harbor companies. In order to accelerate the warning process and improve the accuracy of the tsunami, the original tsunami early warning system is continuously improved and developed in this year. This system can automatically get the earthquake parameters of the United States Geological Society. Then, the tsunami warning system can automatically estimate the arrival time of leading wave and the maximum wave height after these parameters are obtained. Furthermore, the estimation of tsunami risk in future 50 and 100 years for Budai Harbor and Taichung Harbor are also determined. Based on the probability analysis, the tsunami induced inundation probability of Budai Harbor in the future 50 and 100 years are 0.1% and 0.2%, respectively. The values of Taichung are 0.18% and 0.33% in the future 50 and 100 years.			
DATE OF PUBLICATION February 2013	NUMBER OF PAGES 202	PRICE 300	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖 目 錄.....	VI
表 目 錄.....	XII
第一章 緒論	
1.1 前言.....	1-1
1.2 研究範圍與工作內容.....	1-2
1.3 工作項目及預期成就.....	1-2
1.4 前期成果.....	1-2
第二章 海嘯資料蒐集	
2.1 環太平洋地震帶及海嘯災害概述.....	2-1
2.2 臺灣鄰近海域之海嘯紀錄.....	2-5
2.3 遠域海嘯紀錄.....	2-11
第三章 海嘯速報系統之建置	
3.1 海嘯速報系統及海嘯預警系統.....	3-1
3.2 海嘯數值模式介紹.....	3-2
3.3 系統建構.....	3-11
3.4 海嘯初始水位之生成.....	3-25

3.5 自動化操作說明及實例運作.....	3-34
第四章 模式精進及實例探討	
4.1 精進系統數值模式之格林函數.....	4-1
4.2 臺中港域及布袋港域海嘯預警子系統.....	4-3
4.3 實例驗證.....	4-6
4.4 系統實例操作.....	4-23
4.5 系統作業化之運作情形.....	4-25
第五章 海嘯災害風險評估及教育推廣	
5.1 前言.....	5-1
5.2 海嘯地震發生次數期望值.....	5-2
5.3 臺中港及布袋港之溢淹模擬.....	5-8
5.4 教育推廣及成果.....	5-37
第六章 結論與建議	
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
參考文獻.....	參-1
附錄一 互逆格林函數之驗證與應用.....	附 1-1
附錄二 速算系統介面及操作說明.....	附 2-1
附錄三 環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數.....	附 3-1
附錄四 速算系統介面及操作說明(教育推廣)	附 4-1
附錄五 期末資料簡報檔.....	附 5-1

附錄六 期中報告審查意見回覆表.....附 6-1

附錄七 期末報告審查意見回覆表.....附 7-1

圖 目 錄

圖 2.1	環太平洋地震帶及海溝分佈.....	2-2
圖 2.2	1500-2012 年海嘯事件之地震規模分析.....	2-2
圖 2.3	1500-2012 年海嘯事件之震源深度分析.....	2-3
圖 2.4	臺中港之放大率及海嘯潛勢波源區.....	2-7
圖 2.5	板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖.....	2-7
圖 2.6	1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲.....	2-7
圖 2.7	臺灣海嘯事件之震源分佈.....	2-10
圖 2.8	1960 年基隆遭受智利海嘯襲擊之紀錄.....	2-12
圖 3.1	電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置.....	3-2
圖 3.2	交錯式有限差分網格.....	3-6
圖 3.3	移動邊界示意圖(a).....	3-8
圖 3.4	移動邊界示意圖(b).....	3-8
圖 3.5	模式計算區域水深地形圖.....	3-10
圖 3.6	模式計算區域水深地形剖面圖.....	3-10
圖 3.7	與馬爾地夫水位之比對.....	3-11
圖 3.8	海嘯速報系統之規劃圖.....	3-12
圖 3.9	現行海嘯數值模式之模擬程序.....	3-12
圖 3.10	傳統海嘯之模擬結果.....	3-14
圖 3.11	傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖.....	3-15
圖 3.12	美國 USGS 資料庫.....	3-18

圖 3.13	中央氣象局網站之即時地震資料.....	3-18
圖 3.14	遠端擷取 USGS 地震資料格式.....	3-19
圖 3.15	日本防災科學技術研究所 F-net 即時地震資料.....	3-19
圖 3.16	目前完成之即時地震擷取系統介面.....	3-20
圖 3.17	(a) M_S 規模轉換之 M_W 規模之對應圖(b) M_B 規模 轉換至 M_W 規模之對應圖.....	3-25
圖 3.18	斷層參數示意圖.....	3-26
圖 3.19	(a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像 斷層座標系統.....	3-29
圖 3.20	互逆格林函數與傳統海嘯模式之水位變化驗證.....	3-31
圖 3.21	GUI 程式設計環境.....	3-32
圖 3.22	視窗化操作系統之建立與排版.....	3-32
圖 3.23	視窗化介面之編譯完成圖.....	3-33
圖 3.24	(a)USGS 所公佈之地震參數(b)震央位址.....	3-35
圖 3.25	利用第一組參數所預估之結果及報告單(a)花蓮港 (b)高雄港(c)基隆港.....	3-36
圖 3.26	利用第二組參數所預估之結果及報告單(a)花蓮港 (b)高雄港(c)基隆港.....	3-37
圖 4.1	視窗化系統之計算範圍圖.....	4-2
圖 4.2	單點格林函數數值資料在時間上之分布型態.....	4-2
圖 4.3	(a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色 部分為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前	

	後之水位變化驗證.....	4-2
圖 4.4	布袋港區之平面圖.....	4-4
圖 4.5	臺中港區之平面圖.....	4-4
圖 4.6	臺灣海峽之水深分佈.....	4-5
圖 4.7	(a)臺中港(b)布袋港之預報點位.....	4-6
圖 4.8	交通部運輸研究所港灣中心基隆港觀測站儀器安裝位置...	4-8
圖 4.9	測站之實測水位.....	4-8
圖 4.10	分析用之實測水位資料.....	4-10
圖 4.11	經過濾潮汐後之水位.....	4-10
圖 4.12	由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)	4-11
圖 4.13	由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位....	4-11
圖 4.14	預報系統預測智利海嘯($M_w=8.6$)於基隆港之預報結果....	4-13
圖 4.15	預報系統計算結果($M_w=8.6$)與實測資料之比較圖.....	4-13
圖 4.16	預報系統預測智利海嘯($M_w=8.8$)於基隆港之預報結果....	4-15
圖 4.17	預報系統計算結果($M_w=8.8$)與實測資料之比較圖.....	4-15
圖 4.18	海嘯速報系統之介面.....	4-17
圖 4.19	(a)USGS 日本 311 宮城海嘯參數(b)臺北港系統模 擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較.....	4-18
圖 4.20	以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數 計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈.....	4-20
圖 4.21	以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公 佈之地震參數計算(a)基隆港(b)花蓮港(c)高雄港(d)安	

	平港(e)布袋港(f)臺中港及(g)臺北港水位時序分佈與 實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)	4-21
圖 4.22	以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所 公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w 8.9$)及新公佈之地 震參數(地震矩規模 $M_w 9.0$)計算蘇澳港水位時序分 佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)	4-22
圖 4.23	1994 年地震位址.....	4-24
圖 4.24	1994 年地震斷層參數.....	4-24
圖 4.25	利用系統及第一組參數所預估之外海水位 (a)布袋港(b)臺中港.....	4-24
圖 4.26	利用系統及第二組參數所預估之外海水位 (a)布袋港(b)臺中港.....	4-25
圖 4.27	港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面.....	4-26
圖 4.28	[近期海嘯查詢]之展示介面.....	4-27
圖 4.29	[近期海嘯查詢]之查詢結果展示.....	4-27
圖 4.30	水位歷線圖之展示介面.....	4-28
圖 4.31	[歷史海嘯查詢]之查詢結果.....	4-28
圖 4.32	水位歷線圖之文字資料.....	4-29
圖 5.1	海嘯風險評估流程圖.....	5-2
圖 5.2	(a)環太平洋地震數量分佈圖(b)太平洋區域之主要 海溝分佈及劃分建議.....	5-3

圖 5.3	(a)本研究主要海溝分佈圖及名稱(b)本研究之假設 震央點分佈.....	5-3
圖 5.4	USGS-NEIC 地震資料庫.....	5-5
圖 5.5	G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度， 北緯 34 到 36 度)	5-6
圖 5.6	計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度) 之淺層海源地震分佈.....	5-7
圖 5.7	臺灣 500m 解析度水深地形資料.....	5-9
圖 5.8	(a)臺中港(b)布袋港 5m 解析度數值地形檔.....	5-9
圖 5.9	(a)臺中港(b)布袋港整合海陸域後之數值地形檔.....	5-10
圖 5.10	週期 20 分鐘波高 4m 孤立波.....	5-11
圖 5.11	布袋港之溢淹圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺 (d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-15
圖 5.12	臺中港之溢淹圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺 (d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-19
圖 5.13	溢淹機率簡示圖.....	5-21
圖 5.14	布袋港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺 (c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-24
圖 5.15	臺中港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺 (c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺.....	5-28
圖 5.16	布袋港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-31
圖 5.17	臺中港在各種地震矩規模下之最大波高分佈.....	5-32

圖 5.18	布袋港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-33
圖 5.19	臺中港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈.....	5-34
圖 5.20	臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果.....	5-36

表 目 錄

表 2.1	2004~2012 年間重大海嘯事件.....	2-4
表 2.2	臺灣地區西元 1500~2012 年之海嘯事件.....	2-9
表 2.3	本年度發生之海嘯事件.....	2-12
表 3.1	本研究所使用之斷層參數.....	3-10
表 3.2	本系統主要地震資料之網址及對應之資料提供範圍.....	3-20
表 3.3	(3.30)及(3.31)式迴歸係數之建議值.....	3-27
表 4.1	美國國家地震資訊中心發布最初發布之智利地震 FMT 解..	4-12
表 4.2	美國國家地震資訊中心修正的智利地震 FMT 解.....	4-14
表 5.1	各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值.....	5-6
表 5.2	海嘯地震發生次數期望值.....	5-8
表 5.3	臺中港及布袋港各入射波高下對應之溢淹機率.....	5-29
表 5.4	不同週期波高 2 公尺溢淹臺北港之溢淹機率.....	5-35
表 5.5	101 年臺灣海氣象模擬技術及資訊查詢教育訓練議程表....	5-38

第一章 緒論

1.1 前言

本計畫配合交通部「交通政策白皮書-運輸」所揭櫫之「提供產業健全的物流環境」政策目標及「應用運輸科技，推動運輸智慧管理，加強資訊便民服務」與「檢討安全管理，加強運輸安全機制，全面維護運輸安全」之發展主軸及依據運輸資訊政策「建置資訊蒐集系統，發展標準作業環境，加速運輸資訊基礎建設及運輸安全政策」及「加強海上交通安全管理，進行法規與問題研究，促進海運安全等」事項辦理。本期計畫工作內容屬交通部運輸研究所「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術之研究」計畫規劃四年合作研究計畫之第二年。

一個實用且有效之海嘯早期預警系統/程序能有效地減少海嘯對近岸地區所造成之傷亡。2004 年南亞海嘯造成的重大傷亡，使得印度洋周邊國家開始設置海嘯預警系統。但近年來之數起海嘯事件，證明了現行之海嘯預警系統/程序仍有問題需要改進。2009 年薩摩亞海嘯事件顯示近域海嘯之破壞力；2010 年下半年北印尼海嘯事件，則是曝露了海嘯預警系統後續管理及維護等問題，今年(2012 年) 3 月初之東日本海嘯事件，則民眾對於海嘯所引起之嚴重災情留下深刻的印象。因此，一個具實用性可在海嘯發生初期即快速計算出到達時間及波高之海嘯早期預警系統對於近岸地區以及港口是有幫助的。另外，來自於琉球群島、馬尼拉海溝、呂宋島以及太平洋東部之海嘯對台灣地區而言是值得注意的。

目前國外發佈海嘯警報時，只提供地震規模，未能提供海嘯波高；故臺灣港務公司各港務分公司皆無所依循。為爭取時效並提高海嘯數值模擬之精度，本研究後續將建構海嘯預警系統以及臺中、布袋兩港之子系統，使能自動擷取太平洋海嘯預警中心 (Pacific Tsunami Warning Center) 的檔案，或是太平洋海嘯預警系統所根據的 USGS (United States Geological Society) 網站來更新，再自動進行海嘯模擬。另一方面，本計劃利用機率之概念評估臺中港及布袋港在未來 50 年及

100 年所可能遭受之海嘯風險，其結果將對現有港灣結構物設計準則有所幫助。除此之外，臺中與布袋兩港之海嘯早期預警子系統將於計畫結束以前辦理教育訓練並將技術移轉至兩港務單位。

1.2 研究範圍與工作內容

本研究屬交通部運輸研究所「提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4)」計畫規劃四年合作研究計畫之第二年，配合交通部「交通政策白皮書-運輸」所揭櫫之「提供產業健全的物流環境」政策目標及「應用運輸科技，推動運輸智慧管理，加強資訊便民服務」與「檢討安全管理，加強運輸安全機制，全面維護運輸安全」之發展主軸及依據運輸資訊政策「建置資訊蒐集系統，發展標準作業環境，加速運輸資訊基礎建設及運輸安全政策」及「加強海上交通安全管理，進行法規與問題研究，促進海運安全」等事項辦理。本期研究範圍則是臺中港區及布袋港區。

1.3 工作項目及預期成就

- 1.自動擷取太平洋海嘯預警中心(Pacific Tsunami Warning Center)或是 USGS 網站地震資料。
- 2.臺中港域及布袋港域未來50 年及100 年之海嘯災害風險評估。
- 3.精進臺中港域及布袋港域海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。
- 4.建立臺中港及布袋港海嘯模擬預警系統並進行教育推廣。

1.4 前期成果

- (1)有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等鄰國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度、減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。

- (2)傳統海嘯模式模擬時間受網格解析度、海嘯源位置、模擬時間等因素影響，需要相當長之計算時間；本系統應用格林函數之可逆性值，加速海嘯模擬之時間，以提供災防之參考依據，爭取海嘯侵襲時的警報時間。
- (3)100 年度計畫精進臺中港域及布袋港域海嘯數值模式之格林函數，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。
- (4)臺北港域未來 50 年及 100 年海嘯災害風險，評估結果分別為 2.79% 與 5.59%；基隆港域未來 50 年及 100 年海嘯災害風險，評估結果分別為 3.25%與 6.49%，分析結果代表「臺北港及基隆港面對所有潛勢震源點在未來 50 年及 100 年間發生超過地震矩規模 7 之海嘯且溢淹之或然率」，可提供相關單位港灣構造物設計基準之參考。

第二章 海嘯資料蒐集

2.1 環太平洋地震帶及海嘯災害概述

環太平洋地震帶(又稱環太平洋帶、環太平洋火山帶或火環；Circum-Pacific seismic zone)是一個圍繞太平洋經常發生地震和火山爆發的地區，全長40,000公里，呈馬蹄形，如圖2.1所示。環太平洋火山帶上有一連串海溝、列島和火山，板塊移動劇烈。其主要的國家及地區有：日本、臺灣、菲律賓、印尼、紐西蘭等。東岸由阿留申群島起，經北美、中美及南美，是一個環狀地帶。世界上約80%的震源深度小於70公里之地震、90%震源深度介於70公里和300公里間之地震和幾乎所有的震源深度大於300公里之地震都發生在這個地震帶上。

地震是海嘯成因之一，近年四起海嘯事件，南亞海嘯、薩摩亞海嘯、智利海嘯及去年3月份日本海嘯即是由強烈之海底地震所引起之海嘯。利用美國NOAA之海嘯災難資料庫可大略看出海嘯事件之特性，檢索結果顯示自1500~2012年共有2259起海嘯事件，約10%是由火山活動或其他因素所造成，50%以上是由地震所引起的，即是大部分之海嘯事件仍舊是由地震活動所造成的，其中地震規模多在4以上，多半集中於5~8.9之區間。

圖2.2為海嘯事件中之地震規模分佈圖，96%之海嘯事件之地震規模均達6.0以上，與一般認知引起海嘯之地震所需規模相符，該圖同時也顯示超大地震的發生率甚小。在891起樣本數中，僅有604起有紀錄震源深度，震源深度93%均發生在60公里以內，如圖2.3。

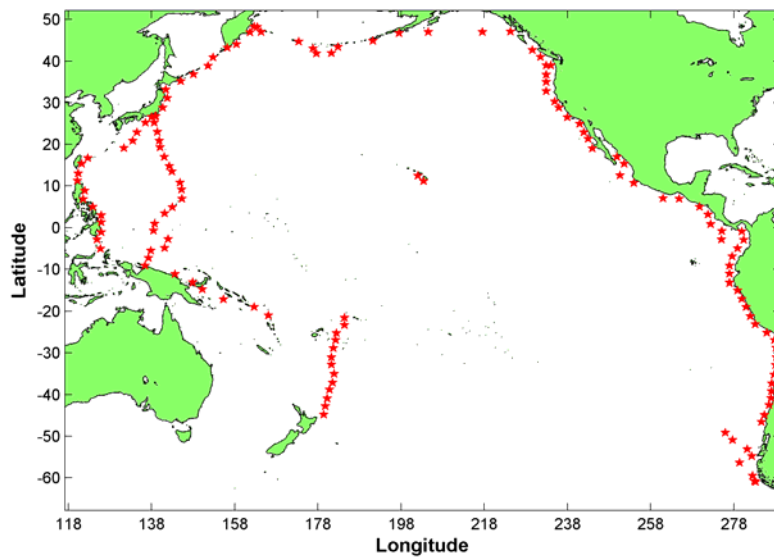


圖 2.1 環太平洋地震帶及海溝分佈(紅點即是海溝位置)

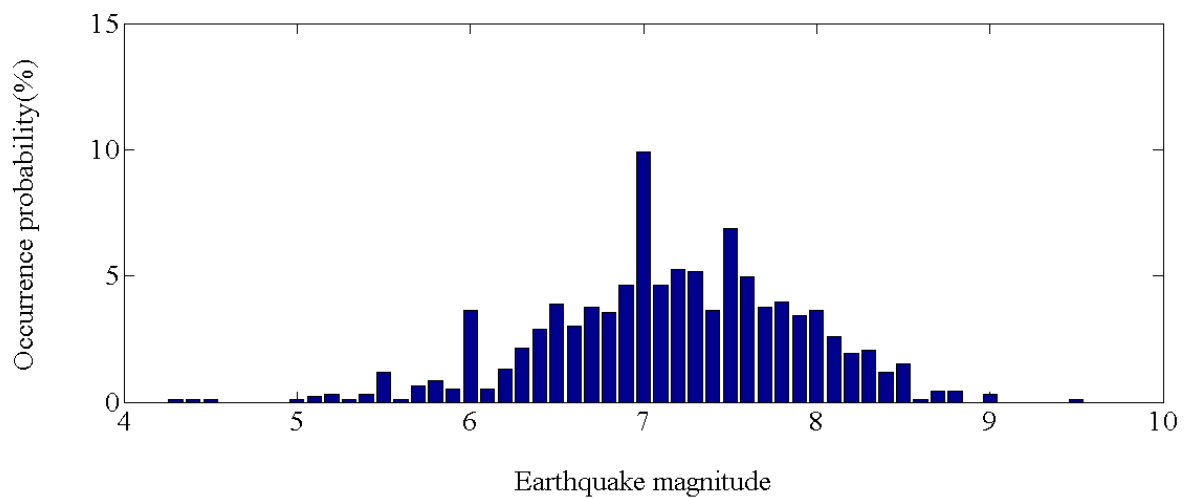


圖 2.2 1500-2012 年海嘯事件之地震規模分析

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

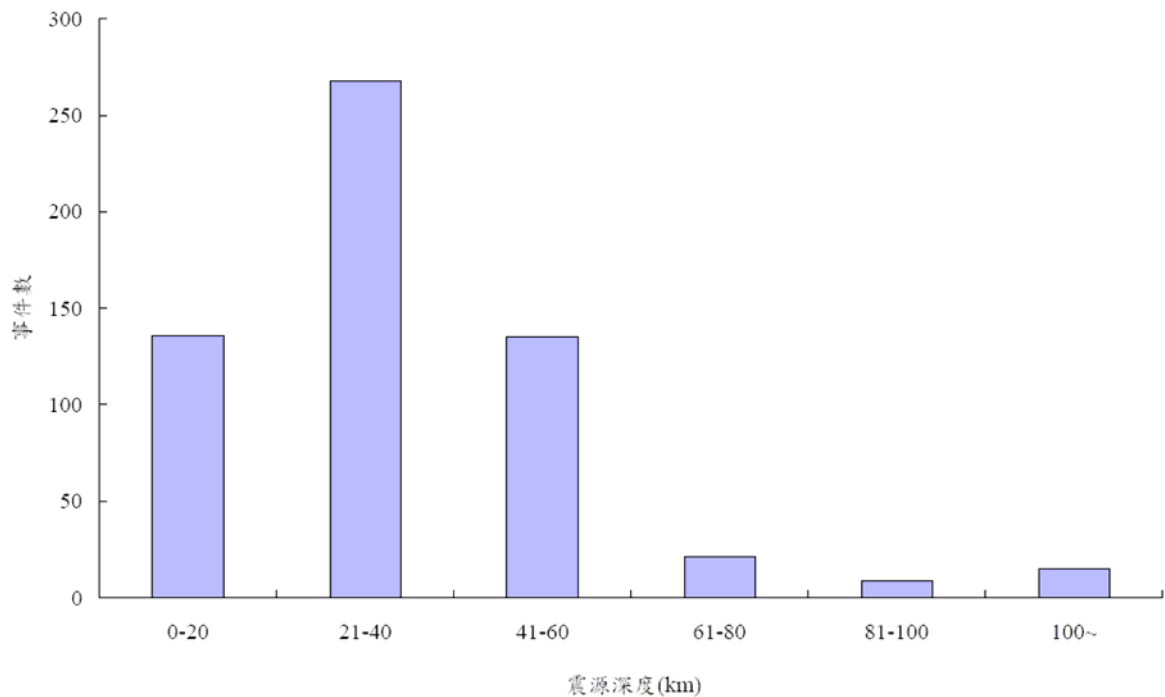


圖 2.3 1500-2012 年海嘯事件之震源深度分析

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

由於海嘯波在大洋傳遞時不易察覺，加以早期對於海嘯並無具體概念，往往在近岸抬升之過程中，造成許多傷亡。自2004年南亞海嘯事件後，至2012年10月為止，較具規模之海嘯事件共九起，如表2.1所示。

表 2.1 2004~2012 年間重大海嘯事件

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

Date	Country	Name	Max. wave height (m)	Death
2004/12/26(9.1)	Indonesia	Sumatra	50.9	226,898
2005/3/28(8.7)	Indonesia	Indonesia	3	10
2006/7/17(7.7)	Indonesia	Java	10	802
2007/4/1(8.1)	Solomon	Solomon	12.1	52
2007/4/21(6.2)	Chile	Chile	7.6	10
2009/9/29(8.0)	Samoa	Samoa	22.35	192
2010/2/27(8.8)	Chile	Chile	29	156
2010/10/25(7.8)	Indonesia	Sumatra	7	431
2011/3/11(9.0)	Japan	Honshu	55.88	15,749

海嘯所造成之災害不同於其他天然災害，由於海嘯是整個水體被帶動且波長甚長，故能攜帶之水體通常會造成大範圍之溢淹，以2004年南亞海嘯東斯里蘭卡為例，可造成長度約2.5km之溢淹；薩摩亞海嘯也有此一現象產生。後續衍生之衛生、心理及重建問題亦是甚為棘手之問題。其次是海嘯波之速度，2011年3月11日日本海嘯事件中，由現場實況及事後調查報告均顯示即使海嘯波已經造成溢淹，其殘餘速度仍足夠衝跨目前現有之結構物。因為海嘯具有強大破壞性但也具備高度不可預測性，故自南亞海嘯之後，印度洋周邊國家開始建立區域性海嘯預警系統；美日兩國也加強與周邊國家之資訊交流，但在薩摩亞海嘯事件中證明現有之海嘯預警系統/流程對於近域海嘯幾乎無事先預警之功能。日本先前所建立之海嘯預警系統及應變措施在這次的海嘯事件中有發揮其功效，有效降低傷亡之人數。

海嘯所造成之災害是全面性的，日本海嘯事件即是一個案例；海嘯震源區約位於伊豆小笠原海溝，日本東岸又屬於人口稠密區，沿岸有核電廠等重要結構物，海嘯過後所引發之火災及核電廠冷卻失靈也造成了嚴重災情及難以收拾之復建作業；雖然當地雖建有號稱海上長城之防波堤，在海嘯來襲之時其原先預期的防禦功能因已超過設計值而無法抵擋海嘯來襲時之波高，雖有效降低海嘯流速及溢淹面積，但兩座防波堤也完全毀損，地形之效應使得海嘯最大溯升高度約達40公尺左右；在太平洋東岸之加州、墨西哥一帶也能感受本次海嘯之威力。

2.2 臺灣鄰近海域之海嘯紀錄

因為臺灣西部沿岸各港口是呈帶狀分佈，因此，對臺北及高雄兩港較具威脅性之潛勢震源也會對臺中港及布袋港產生影響，東海、澎湖及西南海域之海嘯也會對兩港產生威脅；根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對臺中港及布袋港威脅性最大的是來自於發生在中國泉州附近海域之海嘯；如圖2.4所示，發生在中國泉州附近海域之海嘯對臺中港威脅性最大。

非天氣因素的海嘯發生成因甚多，例如強烈海底地震、海底火山爆發、海底邊坡滑動(landslide)或山崩、水下核爆；本研究僅探討由強烈海底較淺層地震所產生之海嘯，其生成機制如圖 2.5 所示(邱等，2005)。此種類型之海嘯之特點是通常地盤運動之垂直分量視同等於初始水位，海嘯波之能量不容易消散且能傳遞相當長之距離，而且具有方向性。

我國位於環太平洋地震帶，早期也有海嘯紀錄；在這些紀錄中，以發生在臺南(1721 年)、高雄(1781 年及 1866 年)、基隆(1867 年，如圖 2.6)及安平(1661 年)可信度較高(許明光、李起彤，1996)。以下摘錄歷史文件對古海嘯之文字記載(李昭興等，2006)：

(1)1661(清順治 17 年，明永曆 14 年)年(1 月 8/9 日~2 月 15 日)安平

「中國海嘯歷史年表」：「臺灣安平大海嘯。“海潮至，淹廬舍無算”」。

(2)1721 年(清康熙 59 年)1 月 5 日台南

明清史料戊篇（第 1 本，21 葉上）「去年（康熙五十九年，西元 1721 年 1 月 5 日）.....因地震，海水冷漲，眾百姓合夥謝神唱戲」

(3)1781 年(清乾隆 46 年)5 月間(4 月 24 日-6 月 21 日)高雄

「臺灣采訪冊」（頁 41）「祥異，地震」的記載。「(乾隆 46 年)鳳港西里有加藤港，多生加藤，可作澀，染工賴之，故名云。港有船通郡，往來潮汐無異。乾隆四十六年四、五月間，時甚晴霽，忽海水暴吼如雷，巨浪排空，水漲數十丈，近村人居被淹，皆攀援而上至尾，自分必死，不數刻，水暴退，人在竹上搖曳呼救，有強力者一躍至地，兼救他人，互相引援而下。間有牧地甚廣及附近田園句壑，悉是魚蝦，撥刺跳躍，十里內村民提籃契筒，往爭取焉。聞只淹斃一婦，婦素悍，事姑不孝，餘皆得全活。嗣聞是日有漁人獲兩，將歸，霎時間波濤暴起，二物竟趣，漁者乘筏從竹上過，遠望其家已成巨浸，至水汐時，茅屋數椽，已無有矣。」。

(4)1867 年(清同治 6 年)12 月 18 日基隆

「淡水廳志」，「（同治六年）冬十一月，地大震。.....二十三日，雞籠頭、金包里沿海，山傾地裂，海水暴漲，屋宇傾壞，溺數百人。」。

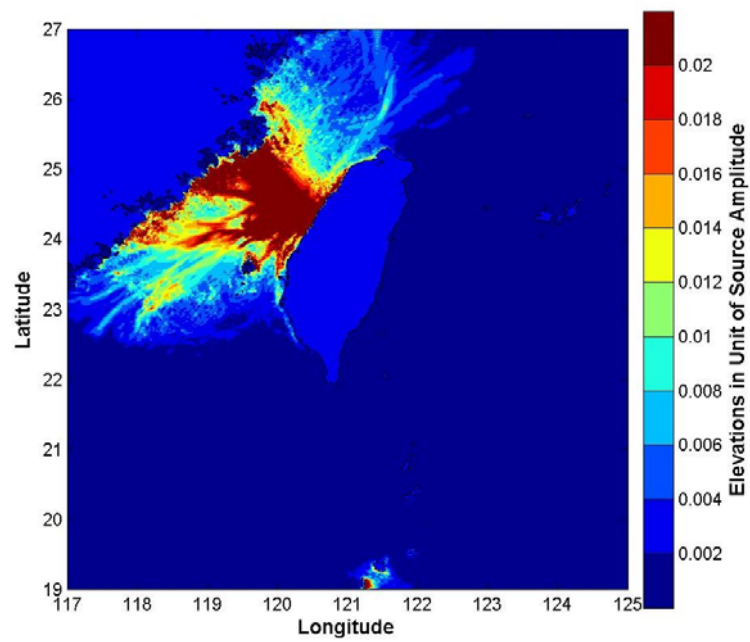


圖 2.4 臺中港之放大率及海嘯潛勢波源區



圖 2.5 板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖

(資料來源：邱等，2005)



圖 2.6 1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲

臺灣北部海域有琉球海溝，長期以來由於缺乏相關震災紀錄，故一般咸信不會發生大地震；日本學者經過 GPS 之檢測，發現琉球海溝有發生地震規模 8 之潛在危機；鄰近臺灣宜蘭海域之八重山群島、宮古島一帶，也被認為有發生海嘯之疑慮；臺灣西南海域之馬尼拉海溝，經美國地調所(Kirby et al., 2005)認為是下一個「海嘯危險區」，經過海嘯模擬顯示，馬尼拉海溝發生海嘯時，其海嘯波在 30-40 分鐘內即可到達恆春半島；加以西南海域地形較為平緩，有利於海嘯之溯上，此區人口密集，重要設施林立，若有海嘯引起之災情，其嚴重程度可見一斑。

臺灣對於海嘯之相關史料或紀錄甚多，但因早期欠缺科學概念，故這些歷史紀錄目前有許多學者正利用不同科學方式驗證其可信度，但從歷史紀錄來看，有許多史料記載臺灣地區也曾發生災害性之海嘯，造成不小之傷亡。

近百年來，臺灣地區雖有海嘯事件發生，但均未對臺灣造成大規模之災害，加上海嘯發生機率較地震低，是故缺乏國內相關災害統計資料可供研究；根據美國 NGDC 之天然災害資料庫顯示臺灣地區自西元 1500~2012 年共有 19 起海嘯事件，詳見表 2.2 及圖 2.7 所示。花蓮海嘯事件屬於近域海嘯，在花蓮港產生約 2 公尺之波高(張等，1999)；表 2.2 中最後一筆之海嘯紀錄即為 2006.12.26 屏東恆春海嘯，造成大約 0.6 公尺之水位變化，恆春半島陸地區域並未遭受產生太大之災情，但卻造成數條海底通訊電纜斷裂，使得對外連絡通訊蒙受嚴重之損失，其災損金額亦相當可觀。

表 2.2 臺灣地區西元 1500~2012 年之海嘯事件

發生時間	地震規模	國家	震央位址	
			緯度	經度
1661.1.8	6.4	臺灣	23.0	120.1
1661.2.15	6.0	臺灣	23.0	120.2
1721		臺灣	23.0	120.2
1792.8.9	6.0	臺灣	23.6	120.5
1853.10.29		臺灣		
1903.9.7		臺灣		
1917.5.6	5.8	臺灣	23.2	121.6
1922.9.1	7.6	臺灣	24.5	122.0
1951.10.22	7.3	臺灣	23.8	121.7
1963.2.13	7.3	臺灣	24.4	122.1
1966.3.12	7.6	臺灣	24.1	122.6
1972.1.25	7.5	臺灣	22.5	122.3
1978.7.23	7.4	臺灣	22.282	121.512
1986.11.14	7.8	臺灣	23.901	121.574
1990.12.13	6.3	臺灣	23.722	121.627
1998.5.3	7.5	臺灣	22.306	125.308
2001.12.18	6.8	臺灣	23.954	122.734
2002.3.31	7.1	臺灣	24.279	122.179
2006.12.26	7.0	臺灣	21.799	120.547

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database.

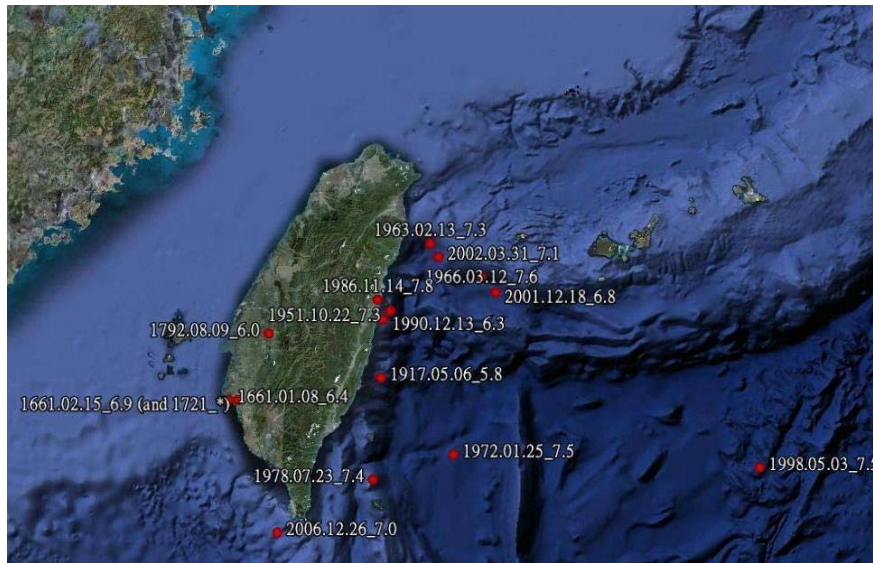


圖 2.7 臺灣海嘯事件之震源分佈

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

根據已知歷史文件記載，基隆於 1867 年發生過災難性海嘯；對於西南方而言，呂宋島、馬尼拉海溝是一個高風險之震源區域。東北方海域主要是在宜蘭龜山島附近海域、基隆外海之金山斷層及琉球海溝。蘭陽平原位於臺灣的東北部，外形為一個三角形向東開口的沖積盆地。由於沖繩海槽緊鄰在其東側，而且直觀上沖繩海槽與蘭陽平原間的地形特徵幾乎是相連接的，故研究認為蘭陽平原的構造成因應與沖繩海槽一致，即菲律賓海板塊沿著琉球弧溝系統向西北方向隱沒時，所引起沖繩海槽弧後張裂機制可往西延伸到蘭陽平原；其他的地質及地球物理觀測似乎也支持這一個模式(江，1976)。

臺灣西南方之馬尼拉海溝是研究海嘯學者認為是高風險之潛勢震源區。臺灣西南部與南部海域雖然較少活動斷層，地震頻率及規模均較少，但 2006 年兩起規模 6 以上之地震在此區產生，既有科學文獻也顯示臺灣西南海域有許多斷層帶。再加上位於臺灣南方的菲律賓與臺灣同屬於菲律賓海板塊與歐亞板塊的聚合帶，地震頻繁，呂宋島有許多活動斷層延伸至海域，大規模斷層活動可能引發海嘯，於數十分鐘至一小時即可到達臺灣西南部海域，衝擊臺灣南部及西南部海岸。地質文獻可以看出臺灣陸地斷層其實往南延伸至海底，故對某些海底斷

層，可以從陸地露頭推測之性質(陳等，2007)。

2.3 遠域海嘯紀錄

遠域海嘯部分需注意由日本北海道一帶以及由東太平洋傳遞而來之海嘯。但為利於資料之蒐集，本研究將以範圍擴展至整個環太平洋地震帶，如此上述兩個遠域海嘯之波源區亦可包含在其中(陳等，2010)。

在近幾年所發生之著名海嘯事件，當屬 2004 年南亞大海嘯、2009 年薩摩亞海嘯、2010 年海地及智利海嘯及 2011 年日本海嘯；南亞海嘯及日本海嘯對於當地造成相當慘重的災情及傷亡，其餘三起海嘯事件對於當地也產生不小之災情；1960 智利海嘯及南亞海嘯之案例證明了海嘯可傳遞相當遠的距離，對於遠海域的國家而言仍是不可輕忽；1960 年智利海嘯橫跨太平洋，連太平洋西岸之日本也遭受波及，基隆港約有 1.9 公尺之波高變化，所幸無具體之災情傳出，相關報導如圖 2.8 所示。2004 年南亞海嘯雖發生在印尼外海，海嘯波橫跨印度洋，2 小時後襲擊印度洋西岸各國，遠在 1600 公里外之斯里蘭卡也造成慘重之災情，此一案例也促成了印度洋周邊國家開始研擬海嘯預警作業；2011 年日本海嘯，對當地宮城縣、岩手縣沿海各地產生 5 至 15 公尺巨浪，日本受災地區約 400 平方公里，並造成多處火災災情，更影響沿海核能電廠安全，產生除了海嘯災情外的核災問題；東北沿岸地區各港口，如釜石港、仙台灣等地也蒙受不少之損失。

強烈之海底地震雖是發生海嘯之主因之一，但是否會引起具威脅性之海嘯仍需具備一定之條件；用 NOAA 之海嘯災害資料庫可搜尋到本年度至今總共發生 10 起小規模之海嘯，可發現其最大波高約在 0.08~0.2m 之間，因此對鄰近區域並無產生顯著之災情，如表 2.3。



圖 2.8 1960 年基隆遭受智利海嘯襲擊之紀錄

表 2.3 本年度發生之海嘯事件

Date						Tsunami Cause				Addl Tsu Info	Deposits	Tsunami Source Location				Tsunami Parameters			
						Val	Code	Earth- quake Mag	Vol- cano			Country	Name	Latitude	Longitude	Max Water Height	Num. of Runups	Magnitude Abe	Tsu Int
2012	2	2	13	34	40.6	4	1	7.0		*		VANUATU	VANUATU ISLANDS	-17.827	167.133	.08	1		
2012	3	14	9	8	35.1	4	1	6.9		*		JAPAN	HOKKAIDO ISLAND	40.887	144.944	.20	2		
2012	3	20	18	2	47.4	4	1	7.4		*		MEXICO	S. MEXICO	16.493	-98.231	.20	2		
2012	4	11	8	38	36.7	4	1	8.6		*		INDONESIA	OFF W. COAST OF N SUMATRA	2.327	93.063		20		
2012	4	11	10	43	10.8	4	1	8.2		*		INDONESIA	OFF W. COAST OF N SUMATRA	.802	92.463		4		
2012	4	14	22	5	26.4	4	1	6.3		*		VANUATU	VANUATU ISLANDS	-18.972	168.741		1		
2012	7	15				4	8			*		GREENLAND	ILULISSAT ICEFJORD	69.200	-51.300		0		
2012	8	27	4	37	20.0	4	1	7.3		*		EL SALVADOR	OFF THE COAST	12.278	-88.528	.10	6		
2012	8	31	12	47	34.0	4	1	7.6		*		PHILIPPINES	PHILIPPINE ISLANDS	10.838	126.704	.15	17		
2012	9	5	14	42	7.0	4	1	7.6		*		COSTA RICA	COSTA RICA	10.075	-85.309	.16	2		

資料來源：美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

第三章 海嘯速報系統之建置

3.1 海嘯速報系統及海嘯預警系統

自 2004 年南亞海嘯之後，各國有感於海嘯所帶來之天災，故開始致力研發或是佈置海嘯預警系統 (Tsunami warning system，簡稱 TWS)。經由發布警報以避免生命與財產的損失。主要由兩個元件所構成，一個是偵測海嘯的感測器，另一個是即時發布警報以疏散沿海區域避難的通信基礎設施。海嘯預警系統有區分為國際性及地域性，前者最著名的即是美國太平洋海嘯預警中心(PTWC)，環太平洋地區之海嘯警報大多數即是由該單位發布警報通知鄰近諸國，我國中央氣象局即是接收該單位所傳來的訊息進行海嘯警報發布，例如 2011 年 3 月 11 日東日本海嘯事件、2012 年 8 月 31 日菲律賓東方疑似海嘯事件；該單位會隨時發送最新訊息給鄰近國家；另一個即是印度洋海嘯預警系統。

地域性之海嘯預警系統最著名的範例即是日本，日本在沿海一帶佈設大量之監測器，可偵測異常之水位變化；一但有海嘯之疑慮，隨即利用廣播系統通知沿岸民眾盡速依指定路線往指定地點進行疏散作業；我國中央氣象局為強化東部外海地震之偵測能力，在東部外海利用長達 45 公里之海底光纖電纜連接地震儀及壓力計即時監測海底地震及海嘯，即是所謂 Marine Cable Hosted Observatory (MACHO；簡稱媽祖計劃)，其佈放位置圖如圖 3.1 所示。

媽祖計劃是屬於電纜式海底地震儀觀測系統，主要元件有寬頻地震儀(Broadband Sensor)、加速型地震儀(Accelerometer)、海嘯壓力計(Pressure Gauge)及陸上機房設施。

由於海嘯預警系統建置所需成本高昂，其所量測之訊號也需進一步判讀，且須包含通報程序及系統；依此定義而言，本計劃所開發之系統是一種「海嘯速報系統/預報系統」，其主要目的在於在海嘯發生初期即利用歷史參數或是即時地震參數計算各港口對應可能水位變化及到達時間，而後將資訊彙整至權責單位憑以進行後續程序；其優勢

為在有限之成本及時效，可得出實用性甚高之海嘯初期評估資料。

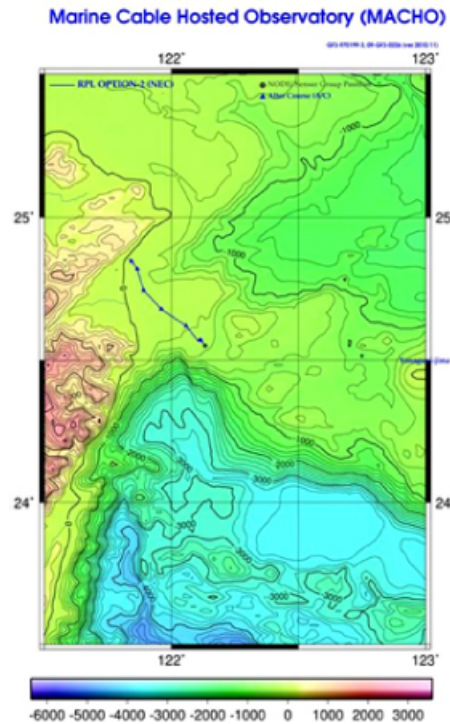


圖 3.1 電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置

3.2 海嘯數值模式介紹

海嘯由於與強烈之海底地震有關，所以地震預測技術尚未進入實際應用階段，是以海嘯也無法事先進行預測作業；但海嘯波之速度遠小於彈性波之波速；因此，海嘯相較於地震有更多之應變時間。海嘯模擬通常藉由海嘯數值模式在獲知地震訊息時進行運算，雖說海嘯有較多之應變時間，但依我國週遭之海嘯潛勢震源分布特性而言，近域海嘯在 20-30 分鐘即可到達陸地，應變時間略顯急迫；因此，若能以資料庫之概念製作海嘯波高資料庫，以期在海嘯發生初期即可利用資料庫得知各港口可能之水位變化及到達時間，可大幅地提高防災應變之時效性。

要建置波高資料庫、溢淹模擬及機率分析必需借重海嘯數值模式。模式依頻散有無可分為兩種，一種是常見的淺水長波方程式，由

於其方程式是假設流場於垂直方向為均勻分佈而忽略頻散效應；其二就是 Boussinesq 方程式，跟前者最大的差別，擁有波浪非線性項以及非靜水壓分佈。且由於模擬在大洋中的傳遞，其科氏力及地球曲面效應不可忽略，亦由於在大洋中振幅很小，非線性行為不明顯，故於大洋傳遞時，可考慮用球面座標下之淺水方程式；但在近岸時，由於波高放大及底床摩擦，使得非線性效應增加，此時科氏力及地球曲面效應相對較小，故應採用直角座標下之淺水方程式。

另一方面，模式的校驗及率定也是一個重要的考量；海嘯模式與其他水動力模式比較下，可供驗證之實際案例及資料較為不足；特別是臺灣本島之海嘯資料及案例多屬歷史文件記載，鮮少科學紀錄。故若引用國外已經發展完成之海嘯模式，則可免除許多模式校正及驗證之工作。

本計畫採用美國康乃爾大學土木與環境工程學系團隊發展出的 Cornell Multigrid Coupled Tsunami model (COMCOT) 模式作為主要模擬工具(Wang and Liu, 2007)。開發之初，經過智利海嘯、花蓮海嘯以及南亞海嘯之實例驗證，其成效尚稱滿意；其研究成果也常發表於國內外知名期刊，該模式也為國內其他相關學術單位所使用。故在臺灣地區海嘯實測資料缺乏情況之下，本計畫後續利用南亞海嘯之案例作為校正之用。

COMCOT 數值模式是以程式語言Fortran 撰寫，模式中提供計算由斷層錯動產生的海床垂直位移量以及海嘯波傳播的計算。與其它相似之模式相較之下，擁有下列之特點(張，2008)：

- (1)使用巢狀網格系統(multi-grid nested system)計算，可保持遠域及近岸之計算速度與精確度。
- (2)可依計算區域，選擇使用球狀或直角座標系統計算。
- (3)可依計算區域，選擇使用線性或非線性方程式計算。
- (4)使用蛙跳法(leap-frog)及有限差分方法來解淺水方程式(shallow water equation)。
- (5)提供不同初始波形之方式：(例如地震、海底山崩、人工造波或起始

水面資料檔等)。

球面座標下之淺水方程式可表示為

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right] = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{g h}{R \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} - f Q \\ &= \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left[\frac{h^3}{3 R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{g h}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} + f P \\ &= \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\frac{h^3}{3 R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{Q}{h} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

上式中 (ψ, φ) 表示在地球表面的經度及緯度；目前臺灣地區採用的是國際橫麥卡托二度分帶座標系統(UTM2)，以 (N, E) 來表示， N 為六位數， E 為七位數，由(3.1)式至(3.3)式消去 P 和 Q ，且略去科氏力項，並假設水深為一常數，則可得到以 ζ 代表的關係式。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{g h}{R^2 \cos^2 \varphi} \left[\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} + \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right] \\ &= \frac{g h^3}{3 R^4 \cos^4 \varphi} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial \psi^4} + \frac{g h^3}{3 R^4 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) \right\} \right] \\ &+ \frac{g h^3}{3 R^4 \cos^3 \varphi} \left[\frac{\partial^3}{\partial \psi^2 \partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} \right) + \cos^2 \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \psi^2} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

COMCOT 中以交錯式顯性蛙跳法(staggered explicit leap-frog scheme)來處理線性淺水方程式，如圖3.2所示，利用前一時刻之體積流量及自由表面水位，用連續方程式計算網格 (i, j) 點在第 $n+1/2$ 時刻之自由表面水位 $\zeta_{i,j}^{n+1/2}$ ，接著計算體積流量 $P_{i+1/2,j}^{n+1/2}$ 及 $Q_{i,j+1/2}^{n+1/2}$ ，體積流量和水位是由不同的位置分別計算，基本上即是在網格中央計算水位，而在網格四周計算體積流量。波高及體積通量的計算是在不同的時間步上，利用物理量在空間上的交錯(staggered)方式來計算，可以減少誤差及增加

數值穩定性。COMCOT 採用中央差分法，因此COMCOT具有二階的準確性及 $O((\Delta x)^2, (\Delta y)^2, (\Delta t)^2)$ 的截斷誤差(truncation error)。其離散式為(Liu et al., 1998)：

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gH \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2} - \zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (3.7)$$

若近岸地區時，改採直角坐標系統，考慮底部摩擦作用之非線性淺水方程式可以下列各式表示之(Liu et al., 1994)：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P^2}{H} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{PQ}{H} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fQ + \tau_x H = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{PQ}{H} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{Q^2}{H} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fP + \tau_y H = 0 \quad (3.10)$$

式中 t 為時間， ζ 為自由表面之變動水位， H 是全水深(即水深加上波高)， P 代表 x 方向之流量， Q 代表 y 方向之流量， g 是重力加速度常數， f 為科氏力參數， τ_x 與 τ_y 分別代表 x 及 y 方向剪應力。

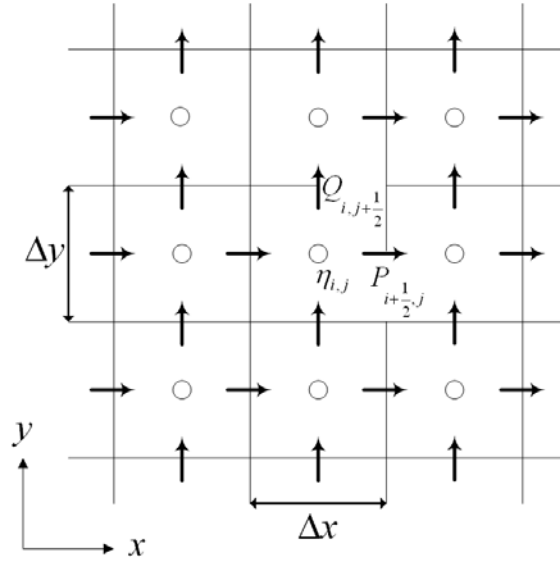


圖 3.2 交錯式有限差分網格

底部摩擦項可使用 Chezy 公式，

$$\tau_x = \frac{g}{C_f^2 H^3} P (P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{g}{C_f^2 H^3} Q (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.11)$$

或曼寧公式

$$\tau_x = \frac{g n^2}{H^{10/3}} P (P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{g n^2}{H^{10/3}} Q (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3.12)$$

上式中的 C_f 表示 Chezy 公式的摩擦係數，而 n 代表相對粗糙係數，與流動狀況及底部的表面粗糙度有關。

非線性方程式仍是採用蛙跳法為主，但此法對於對流項並不適用，故改採上風法(Upwind Scheme)處理，但精度僅達到空間網格大小的一階。

COMCOT 模式在近岸海陸(乾溼)交界處採用移動邊界條件；若波高足以進入陸地時，則容許海水進入陸地網格，則可模擬出長波於陸地上之溢淹範圍及溯上高度。移動邊界技巧可參考圖 4.10 及圖 4.11 所示，將沿岸地形以階梯形式表示之，在網格 $i-1$ 、 i 及 $i+1$ 處計算全水深，而在 $i-1/2$ 、 $i+1/2$ 及 $i+3/2$ 處計算流量；圖中 MWL 表示平均海水面(mean water level)， ξ 表示自由邊界之水位， h 為平均靜水位到陸地的

高度；在乾陸地(dry land)的網格中，總水深 $H = h + \xi$ 是為負值，於有水溢淹的溼陸地 (wet land)網格總水深以正值表示，位於乾網格與溼網格之間的交界則定義為海岸線。由連續方程式計算出全區域的自由表面水位，在陸地網格點的自由表面水位永遠為零，因為在鄰近網格點處流量為零，在此過程中須判斷網格點之全水深是否足以使水移往鄰近的陸地網格(即為移動邊界)。動量方程式則更新在水域部分之流量。波由外海計算到近陸區域，於海岸線交界處時，即 $H_i > 0$ 及 $H_{i+1} \leq 0$ 的條件下，則開始進行移動邊界計算。

起始體積通量為零，利用連續方程式並配合移動邊界計算來找下個時間步長的波高，波高在乾的陸域網格中的值為 0，這是因為在鄰近的流量都為 0。原本在第 i 個網格點的總水深需上傳到第 $i+1/2$ 個網格點，經由數值計算來決定總水深是否夠高足以溢淹到相鄰的乾陸域 (dry land)網格，並調整海岸線位置。如果某一點網格在各方向的總水深為零或負值，則此網格視為乾網格 (dry cell)，如圖 3.3 中，第 i 個網格為溼陸域，其總水深為正值，第 $i+1$ 個網格為乾陸域，其總水深為負值且體積通量為零，海岸線位於 i 與 $i+1$ 之間，而賦予第 $i+1/2$ 個網格點的體積通量為零。但在波高較高的例子中，如圖 3.4 所示，此時第 $i+1/2$ 個網格點的體積通量為非零，海岸線也往陸地方向移動一個格點，而總水深由連續方程式中被更新。以下的計算為用來判斷海岸線是否該移動，而先決條件在總水深由連續方程式更新後，即可由下列方式判斷海岸線是否會移動。

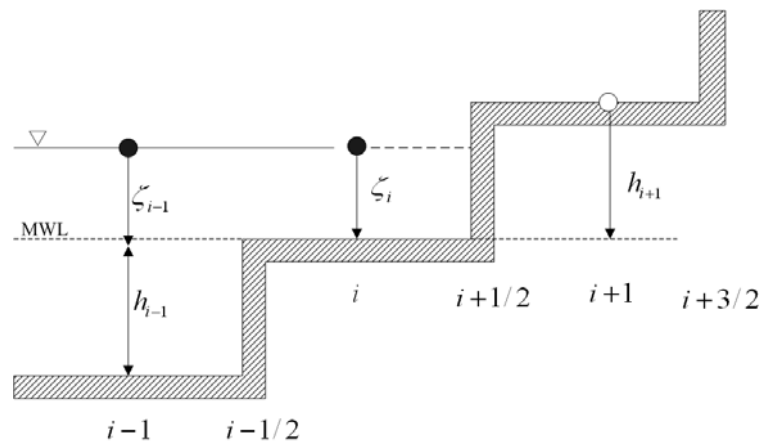


圖 3.3 移動邊界示意圖(a)

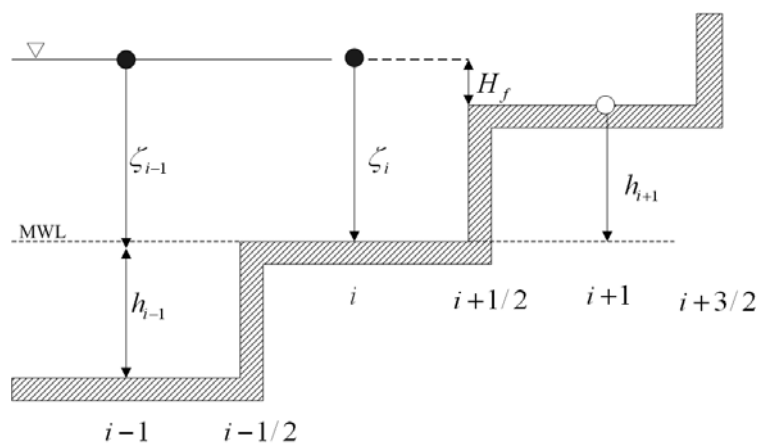


圖 3.4 移動邊界示意圖(b)

- (1)若 $H_{i+1} \leq 0$ 且 $h_{i+1} + \xi_i \leq 0$ ，則海岸線保持不動，流量 $P_{i+1/2}$ 亦為零。
- (2)若 $H_{i+1} \leq 0$ 且 $h_{i+1} + \xi_i > 0$ ，則海岸線移往 $i+1$ 和 $i+2$ 之間，流量 $P_{i+1/2} > 0$ 可能為非零值，但 $P_{i+3/2}$ 仍為零，溢淹之深度 H_f 為 $h_{i+1} + \xi_i$ 和 $h_{i+1} + \xi_{i+1}$ 二者之較大者。
- (3)若 $H_{i+1} > 0$ ，則海岸線移至 $i+1$ 和 $i+2$ 之間，流量 $P_{i+1/2} > 0$ 可能為非零值，但 $P_{i+3/2}$ 仍為零，溢淹深度 H_f 為 $h_{i+1} + \xi_i$ 和 $h_{i+1} + \xi_{i+1}$ 二者之較大者。

以上海岸線的移動過程中，不僅能滿足質量守衡，在移動邊界之處理亦能得到合理的結果。 H 在模式內是兩個網格之平均值，一般出現在海陸地形交界處，在多起模擬案例中，目前尚未遇到剛好等於 0 的情形。為避免模式產生計算誤差，可考慮在模式加入條件式，設定

$H=0$ 時，給予一極小值。

本模式在上下左右四側的邊界設定皆為幅射邊界條件，波浪傳遞至此處時，必須予以適當的計算處理，以消除波浪在此邊界產生之反射現象。計算過程中，假設網格邊界上之水流方向，令流出計算區域時之水位為負值，代表下降；流入計算區域時之水位為正值，代表上升，根據此方法來控制平衡網格邊界上之水位流量，順利解決此開放邊界上的干擾現象。

在模式計算中，為了差分模式的穩定性(C.F.L.條件)，必須採用相同的時間間隔 Δt ，其設定必須在每個網格計算中滿足此條件。

$$\Delta t < \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh_{\max}}} \quad (3.13)$$

其中， Δs 為網格間距， $h_{\max}$ 為各計算網格中最大水深值。

本計劃以2004年南亞海嘯作為進行模擬，其地震矩規模(Mw)為9.0，目的為驗證模式的可用性。由於蘇門達臘地震源區的海底地震板塊交界處以接近南北向的方式綿延一千多公里左右，因此模擬計算時，模式上共分成三段海底斷層(如表3.1所示)的方式來表示震源區域的海底斷層錯動。印度洋之地形資料來源為NOAA，如圖3.5、3.6所示。

模式中最重要之參數為斷層參數，本研究採用之參數如表4.1所列，並與馬爾地夫潮位站比對，與實測資料相比相當符合。如圖3.7所示。

表3.1 本研究所使用之斷層參數

Source parameters	Fault Plane 1	Fault Plane 2	Fault Plane 3
Fault depth	5 km	5 km	5 km
Length of fault plane	200 km	670 km	300 km
Width of fault plane	150 km	150 km	150 km
Strike/Dip/ Slip	300°/13°/90°	345°/13°/90°	365°/13°/90°
Dislocation	15 m	15 m	15 m

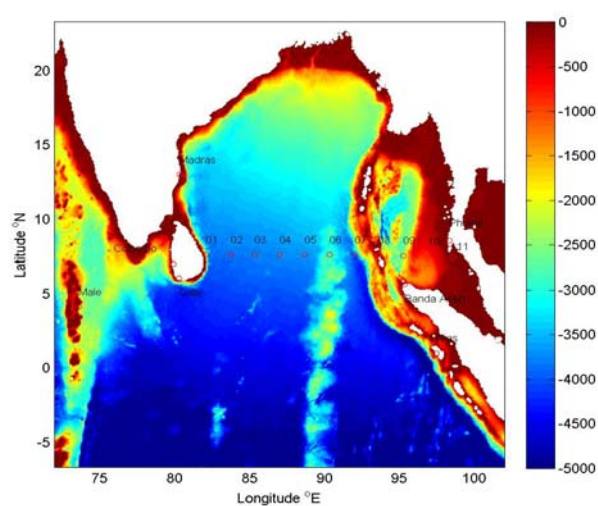


圖3.5 模式計算區域水深地形圖

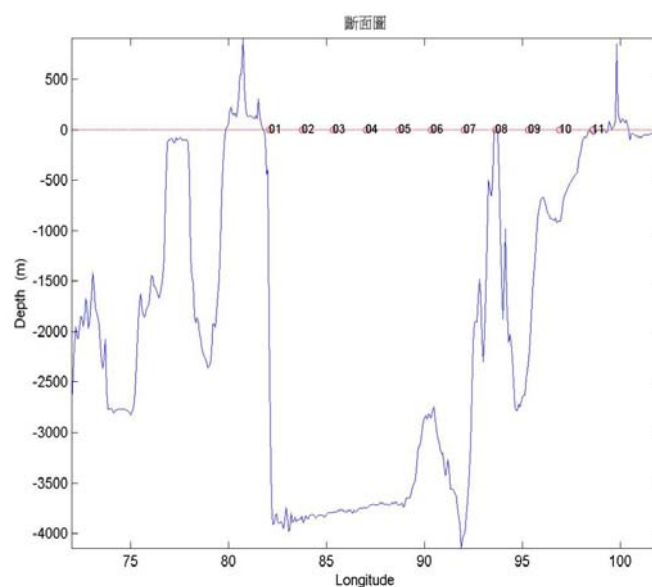


圖3.6 模式計算區域水深地形剖面圖

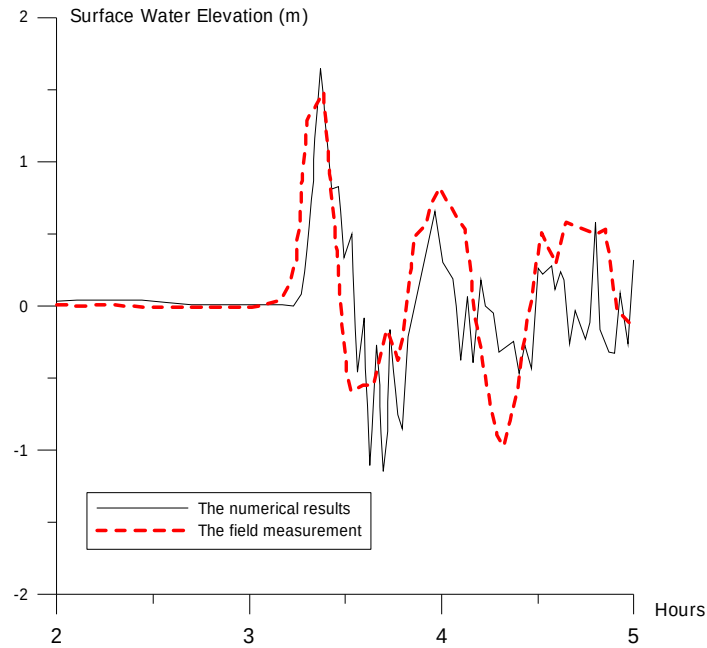


圖3.7 與馬爾地夫水位之比對

3.3 系統建構

本計劃海嘯波高資料庫之建置構想及初始概念，即是尋找一個方法能提高海嘯計算之效率，在遠/近域海嘯發生後，能夠快速掌握可能之最大波高以及到達時間，提供給港務公司及其分公司作為後續應變之作為之參考，並將各個港口之資料庫整合在單一操作界面之下，以方便使用者使用。其預警系統主要流程如圖 3.8 所示。本節將逐一介紹系統之建置方式。

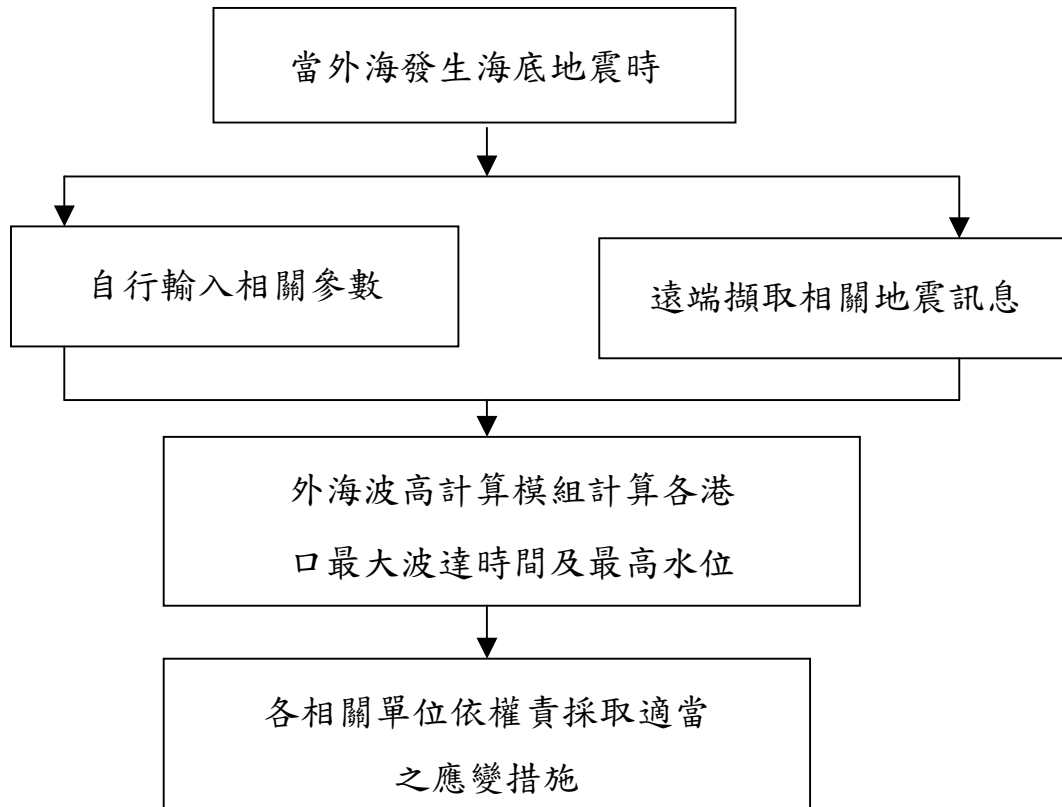


圖3.8 海嘯速報系統之規劃圖

3.3.1 資料庫之建置-互逆格林函數

現行之海嘯數值模式之模擬程序(如圖 3.9)及計算效率由於地震測報技術未得以進入應用階段以及計算方式之問題，故應用在海嘯測報及早期預警上仍有實際上之困難；由於不論是遠域或是近域海嘯，爭取應變時間、提升計算效率及獲取早期之海嘯資訊是目前海嘯模擬技術能進一步精進之項目。故本計畫以互逆格林函數以提升目前海嘯模擬之計算效率。

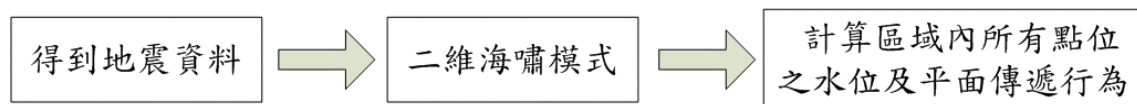


圖3.9 現行海嘯數值模式之模擬程序

一般常見之海嘯數值模式是利用淺水方程式(shallow water equation)作為基礎，當海嘯發生後，輸入必要之參數即可模擬出計算區域內所有的傳遞行為及水位變化。由於海嘯波在大洋中之傳遞，波高相對於波長甚小，非線性效應可以忽略，所以可視為一個「線性系統」，據此計算出各點之水位時序列變化，即稱為「格林函數」(Green's function)，如圖 3.10；以數學方式解釋，即是格林函數可視為是線性淺水方程式之基本解；由這個簡單之說明可知道這種計算方式很難應用在海嘯早期預警，因為必須「事前」得知一個可能之震源才得以模擬後續之傳遞行為；這種限制使得海嘯數值模擬必須依賴地震之初始條件，但目前地震是無法進行預測，因此這種方式有其限制；另一方面，海嘯防災以海嘯波源之生成與近岸時之波高變化最為重要，在大洋中之傳遞行為雖對於學術研究具有重要價值，但對於災害防治提供之訊息有限，計算過程也耗費太多之時間與儲存空間。上述的格林函數(Green's Function，以下以 GF 簡稱)是代表一個已知波源對區域內各點所產生的水位時序列變化。若 s 表示波源位置(source)，而 r 則為接收位置(receiver，即是計算點位)，其 GF 即是由 s 到 r 而其逆向的 GF 代表以 r 產生的單位波源振幅，在 s 所造成的反應。格林函數的運用在傳統上觀察線性系統中波源所造成的反應，而格林函數通常以波源振幅表示，如果區域內各點的格林函數已經求得，只要計算起始波源的水位與其格林函數的乘積後進行加總，便可得知波源對各點所引起的水位變化。

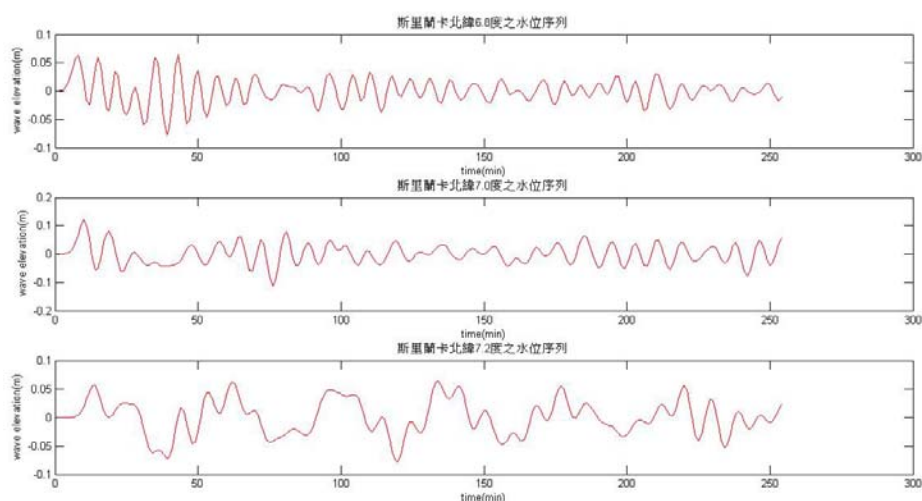


圖 3.10 傳統海嘯之模擬結果

線性系統之格林函數具有可逆性，這點就構成了互逆格林函數 (reciprocal Green's function, RGF) 之基本理論，其構想主要源自 Loomis (1979) 與 Xu (2007)；這個方式主要用來利用線性系統中之可逆性來改進上述海嘯模擬之缺點，降低對初始條件之依賴性及提高計算效率。儘管海嘯波靠近近岸時會呈現高度非線性變化，但在水深深於 50m 的海域，線性淺水方程式依舊能適用於描述其傳播過程(Shuto, 1991)，故線性系統之可逆性仍可適用。

Loomis(1979)觀察到 GF 及其互逆 GF 對於 s 和 r 是呈現對稱的形式，亦即相同的波源出現在 s 所造成對 r 的反應相當於出現在 r 所造成對 s 的反應，Loomis 所提的互逆特性可以提高計算各點 GF 的效益，只要計算 s 傳播後對所有 r 的 GF，等同於得知當任何 r 出現波源時對 s 造成的反應。

以上由圖 3.11 說明其概念，對某一個接收點 r 而言，由於可能有許多未知震源，故用 s_i 來表示所有可能之震源，其 GF 即是由 s_i 到 r 。由於格林函數具有可逆性，所以任一點 s_i 之單位振幅對 r 所造成之反應(即是格林函數)等於 r 之單位振幅對 s_i 所造成的反應；所以當海嘯發生時，僅需利用相關斷層參數得知起始水位後，做簡單之乘積加總後即可獲得與傳統海嘯模式運算後相同之結果。劉及陳(2008)即利用此一

概念用來快速預估高雄港受海嘯侵襲時之最大高度。Chen et al.(2009)亦利用互逆格林函數來建議海嘯感測器於台灣北海岸之最佳佈放位址。

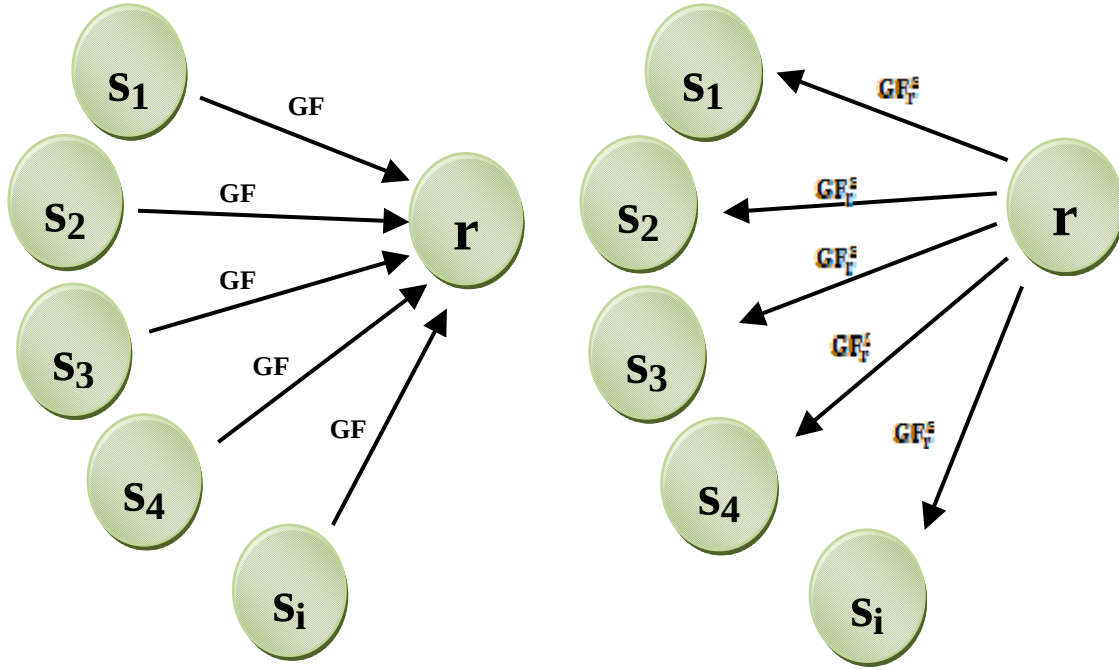


圖 3.11 傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖

簡易之理論說明如下：為了解區域內任何 s 點發生海嘯時，其當地水位將對 r 點位置的造成多大的水位高度，故先計算所有 r 點對應 s 點的 GF 。首先將某一時段內各 r 點的水位經(3.14)式正規化便是 r 點傳播至各點的 GF 值，又因波源振幅為 $1m$ ，所以模式計算後的水位值即為 GF 值。再根據 GF 的互逆性質， r 點對應 s 點的 GF 等同於 s 點對應 r 點的 GF (3.15)式。只要透過(3.16)式作簡單的乘積與加總就可到 s 點在海嘯發生後的該時段水位變化。

$$GF_r^s = \frac{r\text{點水位}}{\text{波源}s\text{之初始水位}} \dots\dots\dots (3.14)$$

$$GF_s^r(t) = GF_r^s(t) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$H_r(t) = \sum_{r=1}^N GF_r^s(t) \times H_s \dots\dots\dots (3.16)$$

其中(3.16)式的 $H_r(t)$ 為各接收點(或是預報點位) r 在時間 t 的水位變化， $GF_r^\delta(t)$ 為各 r 點在時間 t 的 GF， H_s 為各波源點的初始水位高度， N 為所有預報點 r 的總數。 $H_r(t)$ 即是傳統海嘯數值模式之結果，換句話說，(3.16)式可以得到與傳統海嘯模式相符之結果；對於(3.3)式而言， $GF_r^\delta(t)$ 可以用海嘯數值模式在各個接收點處以單位振幅之方式計算出，故是一個已知之時序列資料；唯一的未知是波源點之初始水位 H_s ，該項可由地震相關網站上即時擷取相關參數後帶入斷層模式中計算即可得到。透過互逆格林函數，由於水位基礎波形已經可以事前計算，可以以資料庫之方式先行計算單位波高之時序列變化，在海嘯發生後，即可初步了解最大波高及其到達時間，大幅度提升計算效率；由於僅儲存預報點位之時序列變化，因此也大幅度降低儲存空間之需求；這個優點也提供建置海嘯早期預警系統之有效方案。

格林函數之最適水深為 50m，但實際上受限於台灣東西兩岸地形不同，東岸陡峭西岸平緩，且離陸地亦不能過遠；故實務上之點位選擇仍須配合當地地形條件。另一方面，(3.16)顯示預報水位之好壞與初始水位生成之精度有相當大之關係，海嘯初始水位之生成模式目前僅有由斷層運動所產生之海面擾動有明確且常用之公式可資引用，其餘目前仍在研究中；因此，(3.16)式目前並不適用在非斷層運動所引起之海嘯。

互逆格林函數之應用及驗證案例，請詳見附錄一。

3.3.2 地震資料來源及擷取

由上節說明，本計劃所採用方法中，唯一的未知是波源點之初始水位 H_s ；這必須依靠可靠之斷層模式計算，而斷層模式所需之參數均來自於地震資料，故本小節將說明地震資料來源及擷取方式。

本計劃地震資料來源採用 [United States Geological Survey](https://www.usgs.gov/)(USGS)-National Earthquake Information Center(NEIC)中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2011 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，如圖 3.12 所示。地震紀錄採用下限為 4.5，地形資料則採用 NOAA-ETOPO1 之

數值資料。

USGS-NEIC 資料庫不同於 Harvard-CMT，在 NEIC 資料庫中含有 M_W 、 M_B 、 M_S ... 等不同地震規模的測值，可透過經驗式的轉換來彌補有些地震資料不足的情形。地震規模(earthquake magnitude)和地震震度(earthquake intensity)之表示略有不同。地震震度(earthquake intensity)是在地震儀發明之前，用來表示地震強度的指標。震度是指在發生地震時，人們所感受到震動大小的程度或者是物體受到地震震動所遭到的破壞程度，距離地震震央愈接近，其震度大小就愈大，破壞力也愈強；世界各國在使用地震強度分級上，會因環境、背景的差異，所訂定的標準也會不同；現今地震儀器已經能描述地震的加速度，所以震度亦可由加速度值來劃分。

USGS-NEIC 之地震資料庫範圍為全球，但其資料擷取約在地震發生後約 1 小時才可遠端擷取其參數，本計劃採用自動擷取方式擷取即時之資料，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業。對於震央發生在臺灣周邊海域恐有不及，因此在臺灣區附近(東經 119 度~123 度，北緯 21 度~26 度)採用中央氣象局之地震即時資料(<http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/CMT/quick/quick.html>，如圖 3.13 所示)，約在地震後 5 分鐘即可獲得相關訊息，而其他區域仍使用 NEIC 之資料。

擷取的方式為使用定時程式及 Matlab 裡面內附的 Java 套件，透過 http 的方式取得 USGS(或 F-net)的網頁資訊加以分析取得地震訊息，包括發生時間，震央以及震度等參數，如果發生時間較新且震央範圍在計劃範圍之內，便將該參數傳遞給系統做水位預報。其抓取後之格式，如圖 3.14 所示。

目前計畫完成之即時地震擷取系統之資料來源為 USGS、CWB，並增設日本防災科學技術研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention NIED)所提供之 F-net (Full Range Seismograph Network of Japan)，其範圍在東經 120 度到 156 度，北緯 20 度到 49 度，以供地震資料參考(圖 3.15)，三個主要之地震資訊來源及提供範圍如表 3.2 所示。圖 3.16 為目前完成之即時地震擷取系統介

面。在此要特別說明的是，實務上在擷取地震資料時會設定地震矩規模的下限，超過此一下限之資料，系統才會擷取；此舉是考量到地震必須有相當之強度才有發生海嘯之可能，此設定可避免過多之地震訊息所造成的誤解。



圖3.12 美國USGS資料庫

Quick CMT Reports:

Recent Cqmt Distribution In Taiwan

[Subscribe Quick CMT](#)

Date	Time(UT)	Lat.	Lon.	Dep.	Mw	Strike	Dip	Slip	Misfit	CMT	Detail
2010-11-10	9:36:58.70	22.87	121.26	18.00 18	3.70	216 344	39 63	135 60	0.504		Trace Map Image Solution
2010-11-09	18:30:52.90	24.55	121.82	9.80 12	3.70	96 6	71 89	1 161	0.581		Trace Map Image Solution
2010-11-08	13:1:21.30	23.22	120.41	19.90 17	4.50	337 218	42 67	37 126	0.584		Trace Map Image Solution
2010-11-06	0:22:6.50	24.04	121.93	57.30 59	3.40	127 27	64 69	23 152	0.651		Trace Map Image Solution
2010-11-04	18:22:25.50	22.05	121.61	42.20 44	3.60	257 11	33 75	153 60	0.712		Trace Map Image Solution

圖3.13 中央氣象局網站之即時地震資料

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/neic_b000d65a_fmt.php
 yr | mon | day | hr | min | sec | mw | lon | lat | dep | strike/dip/slip strike/dip/slip
 2012 10 15 17 52 2.160000e+001 5.5 -90.866 14.147 68 253/9/37 127/85/97

圖3.14 遠端擷取USGS地震資料格式

 F-net F-net HOME Questions&Comments User registration NIED NIED JAPANESE						
What is F-net Station Info Waveforms Access Count Renewal History Topics Moment Tensors Search for Mechanism FAQ Retrieval of Waveforms						
Earthquake Information 2011/04 (UT)						
2011 04 Search Introduction Information Publication What is M? Updated << Prev Next >>						
Origin Time(UT)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Region	Var Red
2011/04/18.19.14	39.6 N	140.4 E	20 km	Mj 4.8	SOUTHERN AKITA PREF	79.82
2011/04/18.17.37	35.5 N	139.6 E	90 km	Mj 4.1	KANAGAWA PREF	70.58
2011/04/18.17.26	41.5 N	142.0 E	50 km	Mj 4.0	E OFF AOMORI PREF	61.61
2011/04/18.08.16	35.4 N	136.3 E	40 km	Mj 3.5	SHIGA Gifu BORDER REGION	65.22
2011/04/18.02.08	37.1 N	140.7 E	20 km	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	77.38
2011/04/17.18.33	37.0 N	140.8 E	10 km	Mj 4.1	EASTERN FUKUSHIMA PREF	82.41
2011/04/17.18.09	35.8 N	140.1 E	80 km	Mj 4.4	NORTHERN CHIBA PREF	86.46
2011/04/17.15.47	37.1 N	141.3 E	30 km	Mj 4.8	E OFF FUKUSHIMA PREF	90.43
2011/04/17.14.46	37.1 N	140.8 E	shallow	Mj 4.4	EASTERN FUKUSHIMA PREF	79.88
2011/04/17.12.51	37.1 N	140.7 E	10 km	Mj 4.6	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.32
2011/04/17.08.03	37.1 N	140.8 E	10 km	Mj 4.2	EASTERN FUKUSHIMA PREF	89.40
2011/04/17.06.49	35.9 N	140.5 E	40 km	Mj 4.7	SOUTHERN IBARAKI PREF	89.94
2011/04/17.05.38	37.0 N	140.7 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	85.88
2011/04/17.04.39	35.9 N	140.6 E	40 km	Mj 4.5	SOUTHERN IBARAKI PREF	88.09
2011/04/17.01.38	38.7 N	142.3 E	40 km	Mj 4.6	E OFF MIYAGI PREF	85.75
2011/04/16.20.21	36.2 N	141.0 E	40 km	Mj 4.8	E OFF IBARAKI PREF	79.14
2011/04/16.20.19	37.1 N	140.9 E	10 km	Mj 4.5	EASTERN FUKUSHIMA PREF	71.96
2011/04/16.19.17	37.0 N	138.7 E	10 km	Mj 3.5	MID NIGATA PREF	75.37
2011/04/16.15.56	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID NIGATA PREF	85.74
2011/04/16.13.40	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW OFF ISHIGAKI JMA JS	79.47
2011/04/16.04.20	37.6 N	141.6 E	50 km	Mj 4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	89.52

圖3.15 日本防災科學技術研究所F-net即時地震資料

表3.2 本系統主要地震資料之網址及對應之資料提供範圍

	機構名稱	網址及資料提供範圍
美國	地質調查所 (USGS)	http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/ 資料提供範圍：全球
台灣	中央氣象局 (CWB)	http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/ 資料提供範圍：東經 119~123 度，北緯 21~26 度
日本	防災科學技術研究所 (NIED)	http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en 資料提供範圍：東經 120~156 度，北緯 20~49 度



圖3.16 目前完成之即時地震擷取系統介面

3.3.3 地震級數之轉換

一般地震報告中所指的地震規模(earthquake magnitude)是依據地震的威力大小，此和其釋放出的能量多寡有關，故每當有地震發生時，地震規模只有單一值，不會因為觀測的位置不同而產生不同的數值。我國常使用之芮氏地震規模(Richter magnitude scale)，亦稱為近震規模(local magnitude, M_L)，是在 1935 年為了研究美國加州地區發生的地震而制定，使用伍德-安德森扭力式地震儀(Wood-Anderson torsion seismometer)來測量。由於當初設計芮氏地震規模的限制，當芮氏地震規模大於某數值(約 7.5)以上時會有「飽和」現象，也就是計算出來的所有地震規模值都趨近相同。此外，觀測點距離震央超過約 600 公里以上時，芮氏地震規模的計算會產生極大誤差而不適用。於是地震學家發展出表面波規模(surface waves magnitude, M_S)和體波規模(body waves magnitude, m_B)來描述較遠距離的地震規模值，以地震波中特定波相的最大振幅來計算，但是這兩種計算規模的方法，對於大型地震也會有飽和的問題。

21 世紀初，地震學者採用更能直接反應地震破裂過程物理特性(如地層錯動的大小和地震的能量等)的表示方法即地震矩規模(Moment magnitude scale, M_w)來描述地震大小，地震矩規模的優點在於它不會發生飽和現象。亦即，大於某規模的所有地震之數值都相同的情況將不會發生。另外，此地震矩規模與震源的物理特性有較直接的聯繫。因此，地震矩規模已經取代芮氏地震規模成為全球地震學家估算大規模地震時最常用的尺度。以下為幾個常見的地震規模介紹：

(1) M_L ：芮氏地震規模(Richter magnitude)

此種地震規模的概念是由加州理工學院(Caltech)的 C. F. Richter 教授於 1935 年所提出的，稱為芮氏地震規模 M_L ，或近震規模(Local magnitude)。芮氏地震規模是以地震儀所記錄到的地震波振幅為基礎。倘落地震震源大小一定時，距離震源愈遠震波的振幅就愈小；而當與震源的距離一定時，則震波的振幅與震源的大小成正相關。

芮氏地震規模之定義為：一標準扭力式之伍德-安德生

(Wood-Anderson)式地震儀(自由週期 0.8 秒，倍率 2800 倍，阻尼常數 0.8)在距震央 100 公里處所記錄的最大振幅以微米 (μm) 記的對數值。其公式為：

$$M_L = \log(A / A_0) = \log A - \log A_0 \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

M_L ：芮氏(近震)地震規模。

A ：伍德-安得生(Wood-Anderson)式地震儀在測站所觀測之最大幅。

A_0 ：標準地震($M_L = 0$)時，同式地震儀在該測站所記錄之最大振幅。

地震規模是一個統一的數值，地震本身的大小與測站位置無關。但是地震並非都發生在距離測站 100 公里處，也因此計算地震規模時，必須考慮離震央距離(即震央與測站之距離)。若考慮震央距的修正，則上式可以修正為：

$$M_L = \log(A) + 2.56 \log(\Delta) - 5.12 \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

其中 A 為地震記錄最大振幅，以微米 (μm) 為單位， Δ 為距震央的距離，以度為單位。

(2) M_S ：表面波規模(surface waves magnitude)

此為根據 Gutenberg 教授和 Richter 教授的研究所訂，因芮氏地震規模僅適用在離震央距離小於 600 公里的地震，而當距震央距離大於 600 公里時，以表面波來求地震規模較恰當。表面波規模是根據表面波之振幅(A)及週期(T)而定的，在定義中不指定使用何種儀器，僅選用週期 20 秒左右的最大水準地動合成振幅 A (單位為 μ)來定義 M_S 。而在 1966 年蘇黎士國際地震學會上規定，除計算表面波規模(M_S)時，應考慮其最大振幅之外，還須考慮週期、振幅以及距離函數(亦稱檢定函數) σ ，即

$$M_S = \log(A / T) + \sigma(\Delta) \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\sigma(\Delta) = 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

上兩式可以合為：

$$M_s = \log(A/T) + 1.66 \log(\Delta) + 3.3 \dots\dots\dots (3.21)$$

對於週期 20 秒的表面波,上式可修正為：

$$M_s = \log(A20) + 1.66 \log \Delta + 3.3 \dots\dots\dots (3.22)$$

其中 A20 為週期 20 秒的表面波之最大振幅，值得注意的是須考慮實際地動的振幅量，即由記錄中的最大振幅量，再除去儀器的放大倍率，得到真正的地動量。表面波規模其優點為任何儀器皆可使用，缺點則為較深的地震則無法定出表面波規模。

(3) M_B ：體波規模(body waves magnitude)

此為 1945 年 Gutenberg 研究體波之振幅衰減曲線 $Q(\Delta)$ ，所定義出的遠地地震體波規模 M_B 。此定義根據體波之振幅(A)及週期(T)其為：

$$M_B = \log(A/T) + Q(\Delta) \dots\dots\dots (3.23)$$

由以上的地震規模(M_L 、 M_s 、 M_B)可用一個通式來表示之有

$$M = \log A + f(d, h) + C_s + C_R \dots\dots\dots (3.24)$$

其中 M 是規模， A 是除去儀器效應後所記錄到之地震波的真實振幅， $f(d, h)$ 是一些計算關於震央距離及震源深度的函數； C_s ， C_R 是測站(station)及區域(region)計算出的修正值。因所記錄的週期不夠長或是有儀器使用限制上的關係，所以以上的地震規模對於能量較大或深度較深的地震，無法完全定出其規模，也就是說上述對於規模較大的地震有所限制，無法表示出來。因此，發展出一地震矩之概念(Seismic Moment) 來輔助。

(4) M_w ：地震矩規模(Moment magnitude scale)

地震矩規模是由 Kanamori 教授所發展出的。因為芮氏地震規模(M_L)對於較大的地震有其界限且會受儀器的限制，故其對大地震無法正確描述，進而發展出由地震矩(M_0)來計算地震規模的方法。

地震的主要原因為地層的錯動，錯動處稱之為斷層。地震震源本

身之大小與造成地層錯動的作用力有著直接的相關。因此，總力矩為表示震源大小的一個很重要且直接的參數。而震源機制之總力矩稱為地震矩(Seismic Moment)，造成單一斷層之地震的地震矩可簡化為：

$$M_0 = \mu \times S \times \bar{D} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

其中 μ 為斷層上物質的剛硬係數(rigidity 或 shear modulus)， S 為斷層面積， $\bar{D}$ 為斷層的平均滑動量，地震矩(M_0)的單位為 dyne-cm(達因-公分)，一般地震的地震矩值約為 10¹²-10³⁰ dyne-cm。地震矩規模(M_w)是根據地震矩(M_0)所發展出的關係式為

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

即由計算所得的 M_0 得出其相對的 M_w ，就可適當的描述出地震的大小，此對大地震無界限限制的現象。

本研究出現最多資料的是 M_B (體波規模)，其他還有少數以 M_w 、 M_s 、 M_L 等者；另外，還有一個少見的單位 UK(在本研究不考慮此參數)。其本研究所採用之轉換公式為：Scordilis (2006)對地震規模轉換之經驗公式。

(1) M_s 轉換成 M_w 之迴歸公式(圖 3.17(a))：

$$\begin{aligned} M_w &= 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03) \\ 3.0 &\leq M_s \leq 6.1, \\ R^2 &= 0.77, \quad \sigma = 0.17, \quad n = 23,921 \quad \dots\dots\dots (3.27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_w &= 0.99(\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13) \\ 6.2 &\leq M_s \leq 8.2, \\ R^2 &= 0.81, \quad \sigma = 0.20, \quad n = 2,328 \quad \dots\dots\dots (3.28) \end{aligned}$$

(2) m_B 轉換至 M_w 之迴歸公式(圖 3.17(b))

$$M_w = 0.85(\pm 0.04)M_B + 1.03(\pm 0.23)$$

$$3.5 \leq M_B \leq 6.2,$$

$$R^2 = 0.53, \quad \sigma = 0.29, \quad n = 39,784 \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

雖然由相關系數 R 之 R^2 值顯示轉換公式間的相關性不很高、且僅在 6.2 以下適用。但在找到更好的經驗式之前，即在尚未找到相關性更高的經驗轉換公式之前，本計劃將以此作為轉換公式之用。

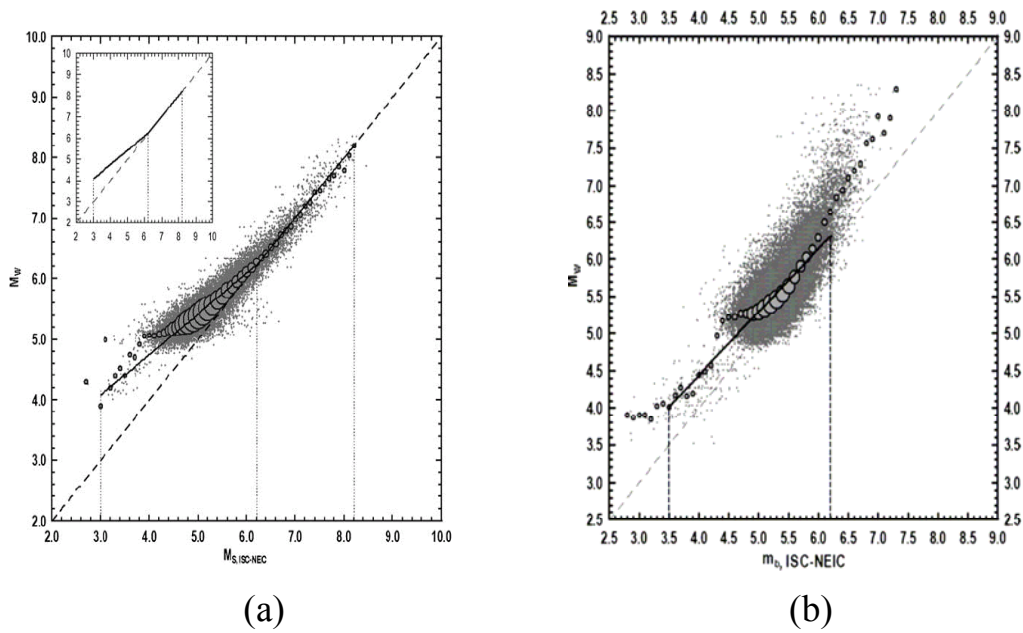


圖3.17 (a) M_S 規模轉換之 M_W 規模之對應圖(b) M_B 規模轉換至 M_W 規模之對應圖(Scordilis, 2006)

3.4 海嘯初始水位之生成

前節已說明互逆格林函數之基本理論及地震資料來源，初始水位(即是海嘯波源之水位)之設定與產生，一般而言與(1)斷層參數，(2)斷層長度、寬度、震源深度有關。本節將介紹海嘯初始水位 H_s 之生成、斷層參數之來源與設定方法。

3.4.1 斷層參數

圖3.18即是斷層參數之示意圖；strike角($0 \leq \theta \leq 360$)表示斷層之走向方向，為正北方順時針至斷層走向之夾角；dip角($0 < \delta < 90$)為傾斜角度，即是水平面與斷層面間的夾角，斷層面傾角 δ 與海嘯發生源擾動海水體積有關。slip角($0 \leq \lambda \leq 180$)表示斷層之滑動方向，代表斷層面上盤相對於下盤的滑動方向。

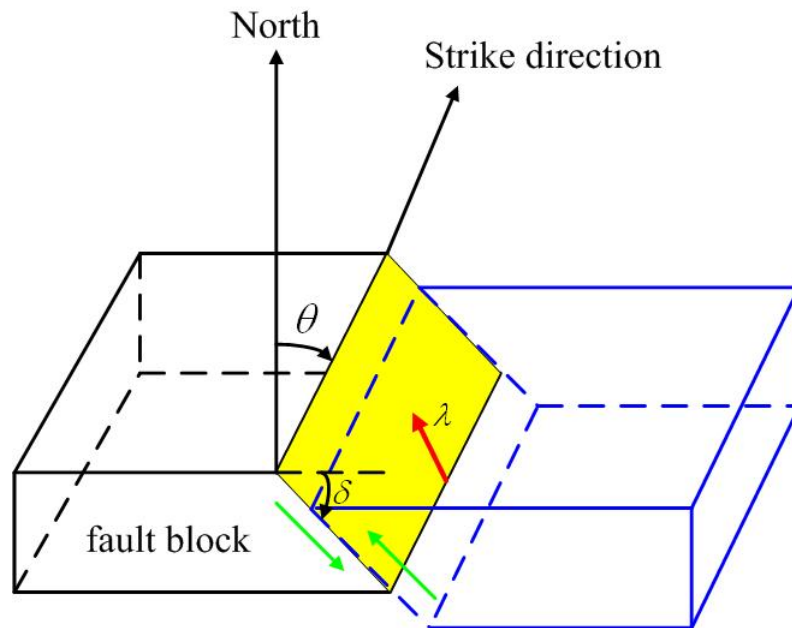


圖3.18 斷層參數示意圖

本項資訊在美國地調所 USGS 網站中 <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>，可在地震發生後公佈原始之斷層參數，提供全球之地震訊息；一般斷層參數會有兩組解；至於哪一組解之正確性較高，則必須視事後進行比較驗證才能得知。

3.4.2 斷層長寬及震源深度之設定

利用資料庫匯整斷層參數之歷史資料雖可得到各個所需要之角度；但是以實務上而言，斷層之長度與寬度是未知，也就無法計算斷層平均滑移量；故本研究利用 Wells and Coppersmith (1994) 蒐集 1857-1993 年間可信度較高之 244 起地震事件所歸納出之經驗公式(3.30)式

~(3.31)式，計算地震規模下的長度(L)及寬度(W)。

$$\log(L) = a_1 + b_1 \times M_w \quad (3.30)$$

$$\log(W) = a_2 + b_2 \times M_w \quad (3.31)$$

M_w 為地震矩規模(Moment magnitude of earthquake)； a_1 、 b_1 、 a_2 及 b_2 為迴歸係數，如表 3.3 所示，統計分析顯示其相關係數均在 0.81 以上，信賴區間為 95%；然後，再將斷層長度及寬度代入地震矩公式(3.32)及(3.33)式(Hanks et al, 1979)求得平均滑移量 D 。

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (3.32)$$

$$M_0 = \mu WDL \quad (3.33)$$

M_0 是地震矩大小(scalar moment of earthquake)， $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ 為剪力模數。得知斷層參數後即可利用彈性力學公式計算出海嘯初始水位。

表 3.3 (3.30)及(3.31)式迴歸係數之建議值

a_1	滑移走向 strike slip	-3.55	b_1	0.74
	逆斷層	-2.86		0.63
	正斷層	-2.01		0.50
	不分類	-3.22		0.69
a_2	滑移走向 strike slip	-0.76	b_2	0.27
	逆斷層	-1.61		0.41
	正斷層	-1.14		0.35
	不分類	-1.01		0.32

3.4.3 初始水位之生成

當斷層參數、斷層長寬及滑移量均求得後，就可利用斷層模式來生成海嘯波源區可能之初始水位。

由於大多數的海嘯成因起源於海底地震，所以一般海嘯數值模式之海嘯初始水位藉由海底斷層模式來驅動，基本上起始海水面的變動是利用海床位移量的計算來產生初始水位，假設海水為不可壓縮；當海床產生錯動，則垂直方向上的海水面也會產生瞬間的變動，亦即地震與海水面變動的發生視為同一時間。海床位移量是由走向滑距(strike-slip displacement)及傾向滑距(dip-slip displacement)所構成，本計劃使用的斷層模式是 Mansinha and Smylie(1971)的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。

簡單來說海床位移量是由走向滑距 (strike-slip displacement)及傾向滑距(dip-slip displacement)所構成，本研究所使用的斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。彈性錯移理論(elastic dislocation theory)，即斷層在j方向的錯動造成均質均向的彈性半空間所產生i方向的位移場 Δu_j ，並對整個矩形斷層錯動範圍積分；其關係式為：

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^l}{\partial \xi_l} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] v_k dS \quad (3.34)$$

其中 v_k 為 Σ 向外的垂直向量、 λ 與 μ 為拉梅常數(Lamé constants)、 u_i^j 為受到破裂面(ξ_1, ξ_2, ξ_3)上j方向單位應力作用而在地表(x_1, x_2, x_3)於i方向上的位移。

假設一矩形斷層座標系統如圖3.19(a)所示，其中 ξ 方向代表斷層傾角的正下方，而走向滑距(strike-slip displacement)和傾向滑距(dip-slip displacement)可分別用(3.35)與(3.36)式表示，其涵蓋範圍為 $-L \leq \xi_1 \leq L$ ，以及 $d \leq \xi \leq D$ ：有

$$u_{is} = \mu U_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \theta - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos \theta \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.35)$$

$$u_{id} = \mu U \int_d^D \int_{-L}^L \left[2 \left(\sin \theta \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi} - \cos \theta \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} \right) \right] d\xi_1 d\xi \quad (3.36)$$

其中， ξ = 震源深度($\sin \theta$) + 斷層寬度(w)、 ξ_1 = 斷層長度/2、 $\xi_2 = \xi \times \cos \theta$ 、 $\xi_3 = \xi \times \sin \theta$ 。由於斷層面是位於地底下，為了計算地下錯動對地面上位移的關係，則須將斷層面作座標轉換，如下圖3.19(b)所示，並有

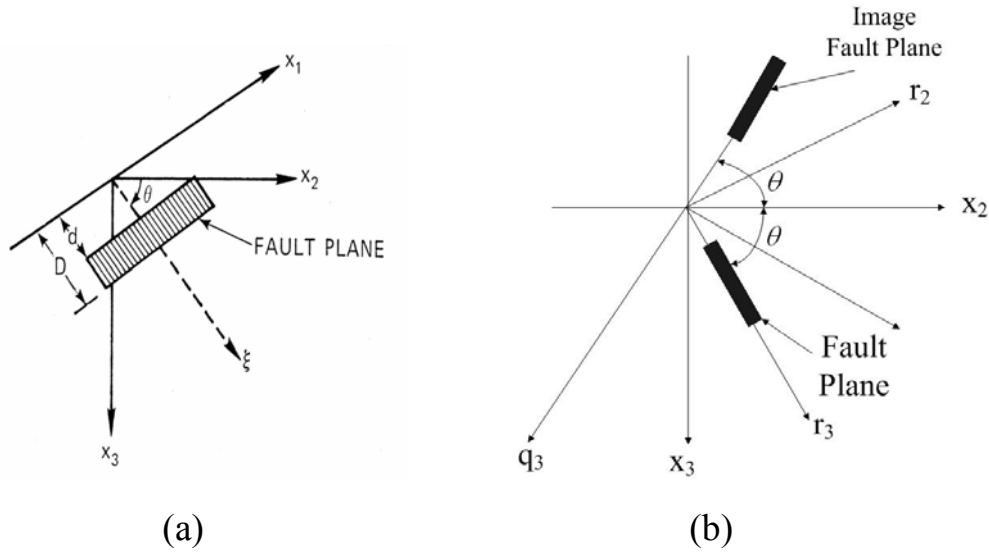


圖3.19 (a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像斷層座標系統

$$\begin{aligned} S &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\ R &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 \right]^{1/2} \\ r_2 &= x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, & r_3 &= x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta \\ q_2 &= x_2 \sin \theta + x_3 \cos \theta, & q_3 &= -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta \end{aligned} \quad (3.37)$$

其中， R 和 S 分別代表斷層面上的震源點(ξ_1, ξ_2, ξ_3)至地表(x_1, x_2, x_3)的距離，以及對映像斷層面上的震源點(ξ_1, ξ_2, ξ_3)至地表(x_1, x_2, x_3)的距離。 r_2 、 r_3 及 q_2 、 q_3 分別代表斷層面及映像面的垂直及向下傾斜之座標，由此可將 R 和 S 以新座標表示為：

$$\begin{aligned}
S &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + h^2 \right]^{1/2} = \left[k^2 + (q_3 + \xi)^2 \right]^{1/2} \\
R &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \xi)^2 \right]^{1/2} \\
h &= \left[q_2^2 + (q_3 + \xi)^2 \right]^{1/2} \\
k &= \left[(x_1 - \xi_1)^2 + q_2^2 \right]^{1/2}
\end{aligned} \quad (3.38)$$

其中，h是S在 $x_1 = 0$ 平面即地表切平面上的投影，而k是在 $q_3 = 0$ 平面上的投影。最後經過座標轉換後，計算出斷層傾向滑距及走向滑距在地面上產生的垂直位移分量如下：

走向滑距(strike-slip displacement)在 x_3 方向之位移量為：

$$\begin{aligned}
\frac{12\pi}{U_1} u_3 &= \cos \delta \left(a_1 + b_1 a_2 - b_2 a_4 \right) + \frac{b_3}{R} + 2 \sin \delta \frac{b_4}{S} \\
&\quad - \frac{b_5}{R \exp(a_1)} + \frac{b_7 - b_8}{S \exp(a_2)} + \frac{b_{10} b_{11}}{S^3} - \frac{b_{12} b_{13}}{b_{14}}
\end{aligned} \quad (3.39)$$

傾向滑距(dip-slip displacement)在 x_3 方向之位移量則為：

$$\begin{aligned}
\frac{12\pi}{U} u_3 &= \sin \delta (x_2 - \xi_2) \left[\frac{2(x_3 - \xi_3)}{R \exp(a_5)} + \frac{4(x_3 - \xi_3)}{S \exp(a_6)} - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
&\quad - 3 \sin \delta \left[2 \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{(h + x_3 + \xi_3)(S + h)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} \right] \right] \\
&\quad - 6 \sin \delta \tan^{-1} \left[\frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 S} \right] + \cos \delta \left[a_5 - a_6 - \frac{2(x_3 - \xi_3)^2}{R \exp(a_5)} \right] \\
&\quad - 4 \cos \delta \left[\frac{x_3^2 + x_3 \xi_3 + \xi_3^2}{S \exp(a_6)} + \xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \frac{S + \exp(a_6)}{S^3 (\exp(a_6))^2} \right] \\
&\quad + 3 x_3 \sin 2\delta \left[\frac{2(q_3 + \xi)}{S \exp(a_6)} + \frac{(x_1 - \xi_1)}{S \exp(a_2)} + \frac{q_2 \cos 2\delta}{S \exp(a_6)} \right] \quad (3.40)
\end{aligned}$$

一但初始水位 H_s 為已知，就可利用事先完成之互逆格林函數及(3.16)式得到與傳統海嘯模式相符之水位變化。故互逆格林函數可以在海嘯發生初期時即可獲得該點之時序列資料，可以得知最大波及到達時間；同時(3.16)式經與海嘯模式相互驗證下，可發現兩者甚為符合，如圖 3.20 所示。

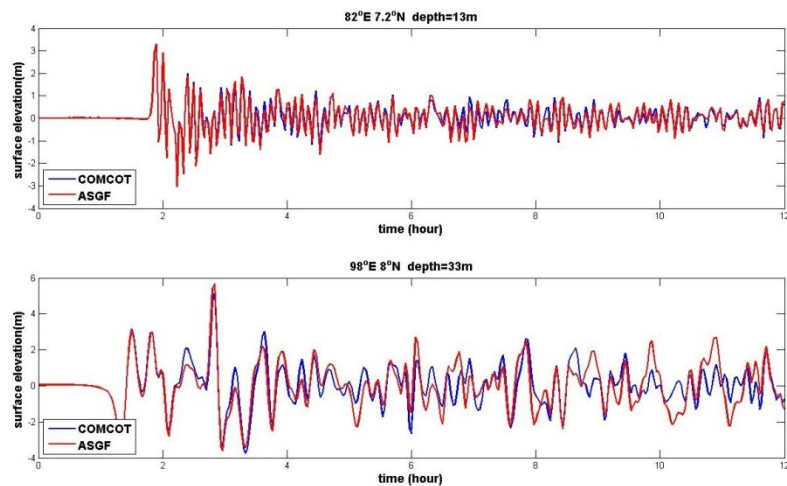


圖3.20 互逆格林函數與傳統海嘯模式之水位變化驗證

3.4.4 系統介面說明

本操作系統是由 Matlab 軟體所建構而成，該軟體提供了方便之數學運算指令及圖形繪製，更提供了內建之操作者介面設定程序；使用者本身不須安裝 Matlab 軟體，僅須下載編譯器等基本套件即可於個人電腦上執行查詢作業。本計畫利用 Matlab 內建的介面設計模組 GUIDE (Graphic User Interface Design Environment)，提供使用者一個設計「圖形使用者介面」(Graphical User Interface, GUI) 的程式設計環境，建立近域之海嘯預警系統。它可以產生每一個控制物件的標準反應函式，使用者只要填入所需的指令或敘述。並利用滑鼠快速地拖曳出所需的介面物件及其大小；類似 VB 的物件導向概念。其基本建立程序如下：

- (1)如圖 3.21 所示。在 Matlab 的命令視窗鍵入' guide' 便可啟動，GUIDE 設計模組並選擇起始介面的面板。
- (2)利用左列的物件選單將所需子面板及物件拖曳到面板並進行排版，在介面主程式內撰寫特定物件的介面互動程式。如圖 3.22 所示。
- (3)上圖為編譯完成後的執行畫面，於左上方的面板輸入相關斷層參數(斷層長度、寬度、滑移量等)。或是選擇直接輸入地震矩規模自動產生斷層經驗參數。

- (4)輸入完成後點選確定按鈕之後便會根據斷層參數計算起始波源，並於右上圖輸出波源的水位分佈。
- (5)起始波源設定完成後，在預報時間長度的面板(左中)選擇水位預報時間。
- (6)最後於左下角面板選擇預報地點進行水位預報。如圖 3.23 所示。

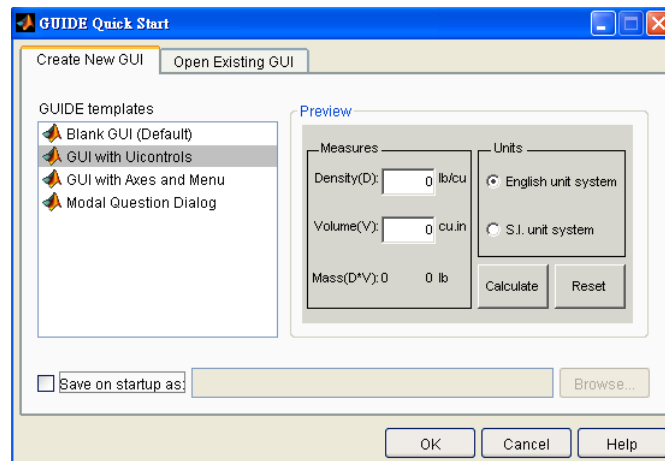


圖3.21 GUI程式設計環境

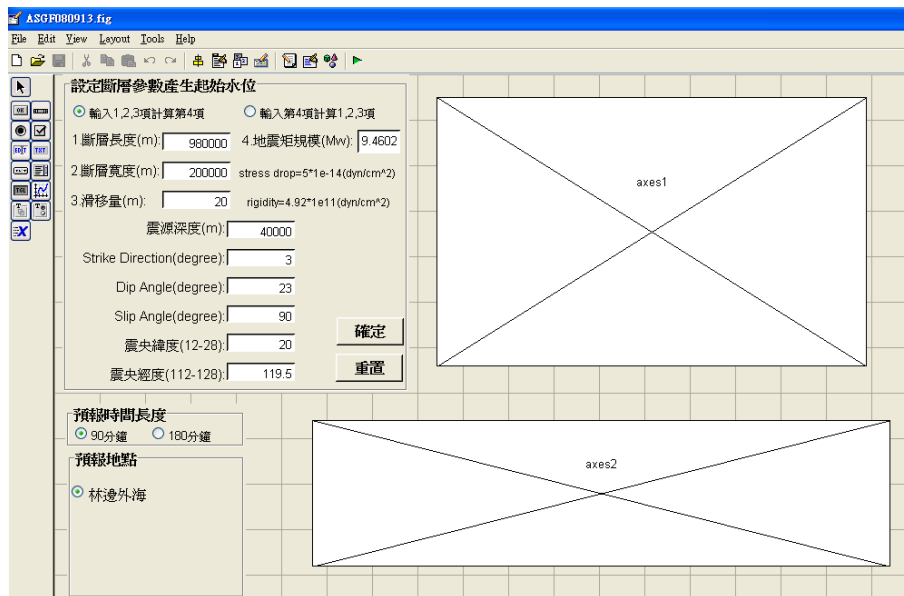


圖3.22 視窗化操作系統之建立與排版

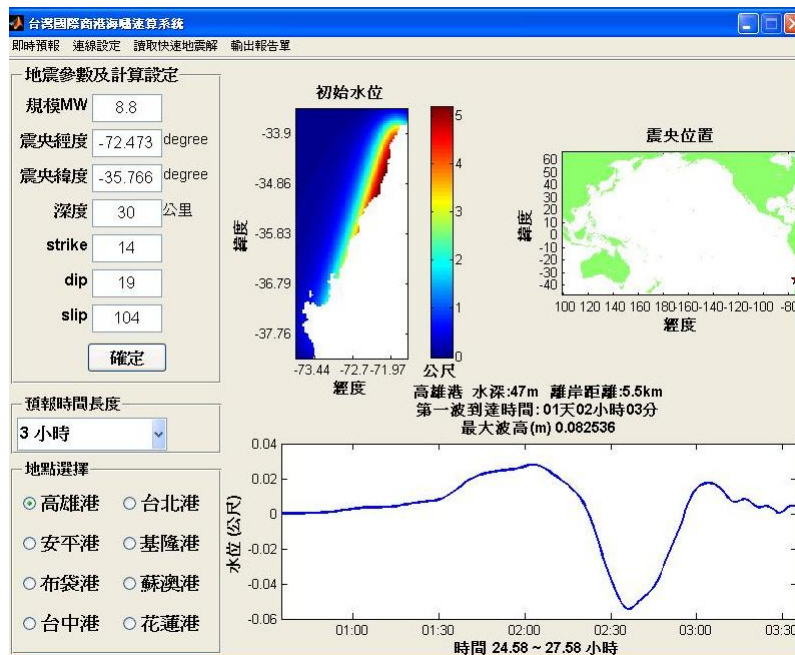


圖3.23 視窗化介面之編譯完成圖

本系統之參數輸入方式是直接輸入地震矩規模，反算斷層長度、寬度及滑移量。就地震警報而言，得知地震矩規模較為容易也較為一般人所接受；斷層長度等資料由於海底斷層探測比較不易，故斷層尺度之換算通常也經由經驗公式得出，其他之斷層參數(例如走向等)可參考 HarvardCMT 等網站得知。

海嘯成因眾多，本系統目前僅適用於因海底地震所產生之海嘯；在計算效率方面，以恆春地震為例，若不考慮近岸波浪非線性之模擬，則使用傳統海嘯數值模式進行全區域模擬且進行後續資料處理則約需1~2天；使用本系統計算相同案例，由於已事先完成資料庫運算及建置，故僅需於地震發生初期得知海嘯初始水位即可進行運算以及圖形畫輸出，僅需數秒到數分鐘即可完成計算作業。要特別強調的是，本系統斷層參數並非由系統自動計算張量解，而是利用網路擷取；因此，取得斷層參數之時效仍然取決於美國 USGS 及其他擷取來源。

詳盡之系統說明及操作方式請見附錄二。

3.5 自動化操作說明及實例運作

目前本系統採用全自動作業模式，可開啟即時預報選項後，進行海嘯預警作業；茲以在 8 月 31 日晚間於菲律賓外海發生地震矩規模 7.6 之海底地震作為實際案例。

臺北時間 2012 年 8 月 31 日晚間 8:47 於菲律賓東南方外海(東經 126.677 度，北緯 10.827 度)發生地震矩規模 7.6 之海底地震，深度為 50 公里，距離我國約 1400 公里；地震參數及震央位址分別見圖 3.24(a)(b)；系統於擷取 USGS 資料後進行高雄港、花蓮港及基隆港之最大波高及到達時間之預估，並輸出預估報告單至指定目錄中以方便查閱，各港之輸出結果如圖 3.25~圖 3.26；預估結果顯示雖然地震矩規模已達海嘯發生要因之標準，但由於震源深度過深、我國並非位處主要傳遞路徑之上，因此對三港並未造成任何威脅性。



Earthquake Hazards Program

USGS WPhase Moment Solution

PHILIPPINE ISLANDS REGION

12/ 8/31 12:47:34.00

Epicenter: 10.827 126.677
MW 7.6

USGS/WPHASE CENTROID MOMENT TENSOR

12/ 8/31 12:47:34.00

Centroid: 10.927 126.982

Depth 50 No. of sta:100

Moment Tensor: Scale 10^{20} Nm

Mrr= 2.69 Mtt= 0.47

Mpp=-3.16 Mrt=-0.85

Mrp=-0.17 Mtp=-0.22

Principal axes:

T Val= 2.98 Plg=71 Azm=177

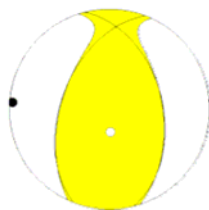
N = 0.20 18 4

P = -3.18 2 273

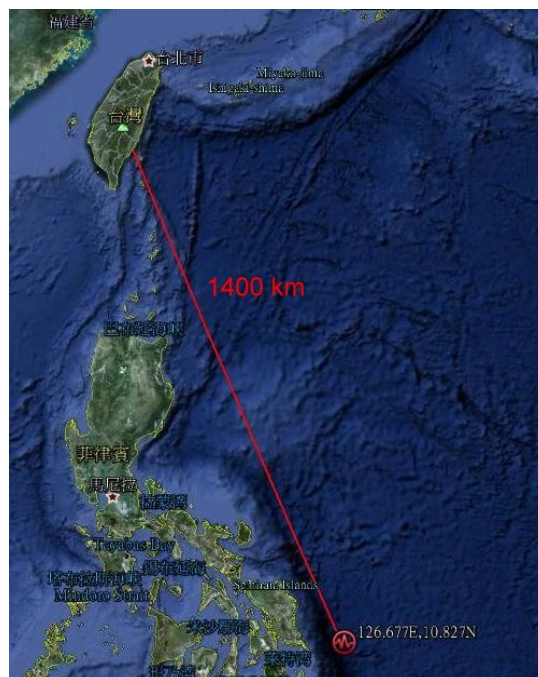
Best Double Couple:Mo= 3.1×10^{20}

NP1:Strike=346 Dip=46 Slip= 64

NP2: 201 50 114



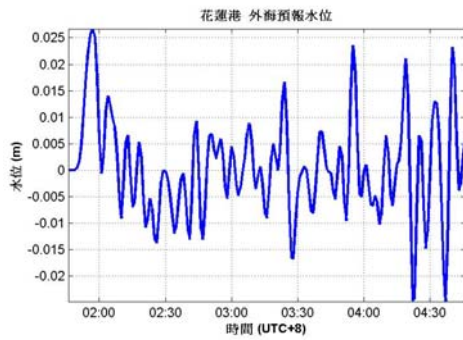
(a)



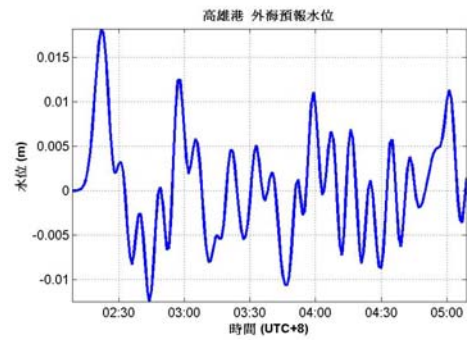
(b)

圖 3.24 (a)USGS 所公佈之地震參數(b)震央位址

地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度10.827 經度126.677
地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
Strike=346 Dip=46 Slip=64
第一波到達時間:0000-01-00 01:57:00
最大波高(m):0.035784



地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度10.827 經度126.677
地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
Strike=346 Dip=46 Slip=64
第一波到達時間:0000-01-00 02:22:00
最大波高(m):0.030603



地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度10.827 經度126.677
地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
Strike=346 Dip=46 Slip=64
第一波到達時間:0000-01-00 02:40:00
最大波高(m):0.066535

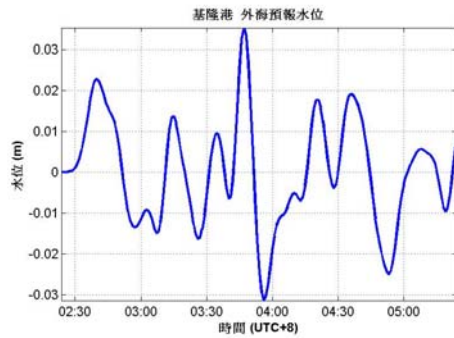
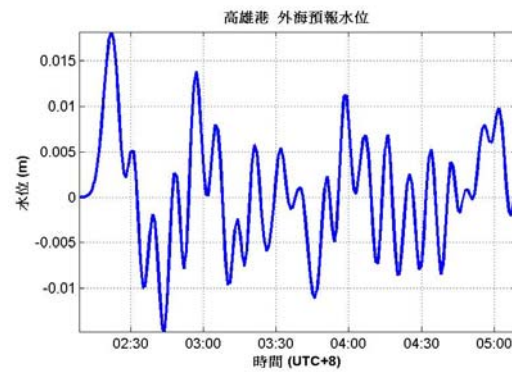
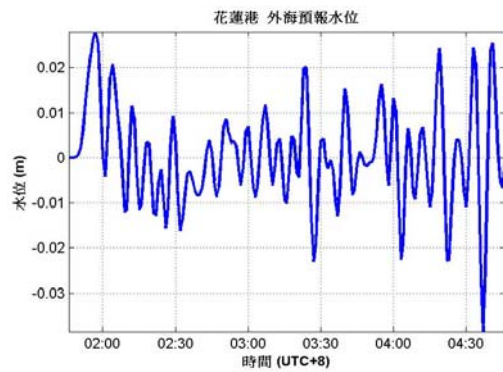


圖 3.25 利用第一組參數所預估之結果及報告單(a)花蓮港(b)高雄港
(c)基隆港

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度10.827 經度126.677
 地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
 Strike=201 Dip=50 Slip=114
 第一波到達時間:0000-01-00 01:57:00
 最大波高(m):0.063922

地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度10.827 經度126.677
 地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
 Strike=201 Dip=50 Slip=114
 第一波到達時間:0000-01-00 02:22:00
 最大波高(m):0.032928



地震解網址
 地震發生時間 UTC+8 :
 震央位置 緯度10.827 經度126.677
 地震規模(MW): 7.6 地震深度(km): 50
 Strike=201 Dip=50 Slip=114
 第一波到達時間:0000-01-00 02:40:00
 最大波高(m):0.065143

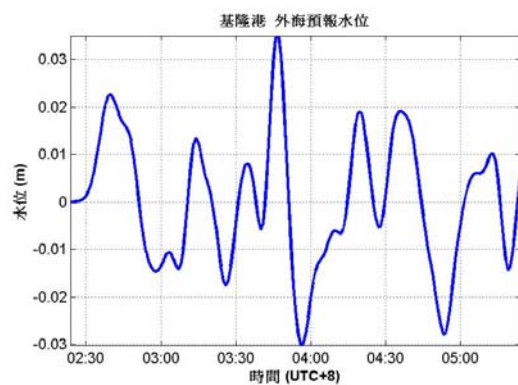


圖 3.26 利用第二組參數所預估之結果及報告單(a)花蓮港(b)高雄港
 (c)基隆港

第四章 模式精進及實例探討

4.1 精進系統數值模式之格林函數

本計畫已完成互逆格林函數之海嘯波高資料庫涵蓋範圍擴展至太平洋海盆地區，如圖 4.1。由於計算範圍涵蓋整個環太平洋地震帶且時間長度甚長，即使以較具效率之 nc 檔格式進行儲存，也需要數百 GB(Gigabyte)，故單港所需之硬碟空間甚大，對儲存空間需求甚高，故有必要進一步改良其儲存方式，同時也可進一步提升計算效率。

目前海嘯波高資料庫中有相當多零值之數值資料，以時間上來說則包含第一波到達時間之前以及預報時間之後，如圖 4.2 所示；以空間上來說，陸地及陸地上未流通之水域(例如湖)則是不必要之資料，如圖 4.3(a)所示。這些零值資料是造成資料庫龐大的原因。因此對於單一預報點而言，第一波到達時間之前之資料可省略不予儲存，待確定第一到達時間時即予用零補齊即可；因此，利用等值線之觀念可以得知每一預報點之第一波到達時間，這稱之為「時間索引」；當預報點之格林函數出現不為零時即定義到達時間。這種資料儲存概念可有效降低時間長度之資料儲存量，僅為原先容量之 1/4。

另一方面，非水域之空間點位也是會佔據大量之儲存空間，因此，本計劃將陸域之點位自資料庫中除去，可再降低約 10GB(Gigabyte)之容量；故時間及空間均作儲存方式及點位精進後，約可減少 80%之儲存空間，同時也提高約 30%之計算速率。以高雄港為例，可由原 124GB(Gigabyte)降為 26GB(Gigabyte)，其水位時序列變化(圖 4.3(b))是一致的，故可說明本法之可行性，並可大幅度降低儲存空間之需求。減少了海嘯波高資料庫單筆檔案的容量大小，一方面資料庫所需硬碟空間減少，另一方面系統在讀取資料庫時能夠更加快速讀取完成用以後續計算；精進後結果與精進前結果一致，使系統能更加便利及完善。

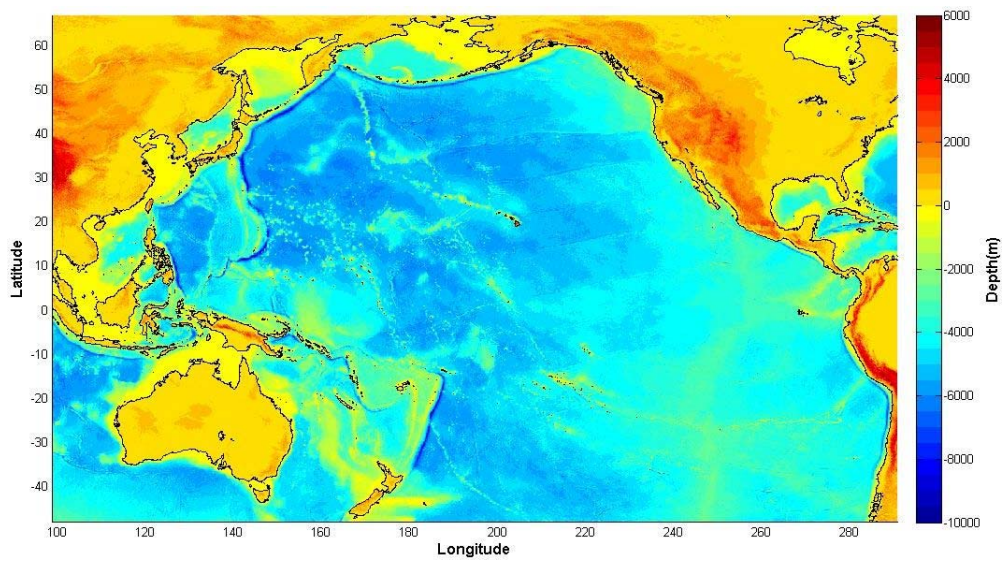


圖4.1 視窗化系統之計算範圍圖

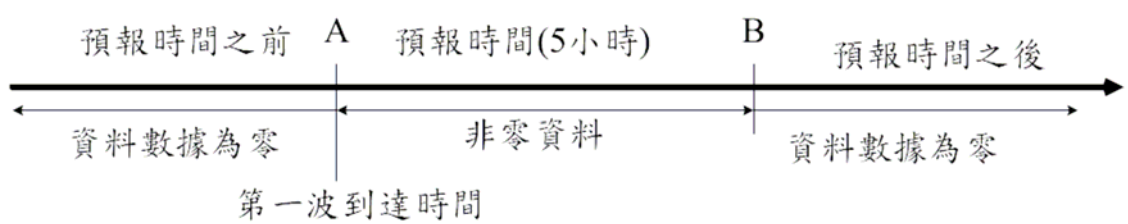


圖4.2 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態

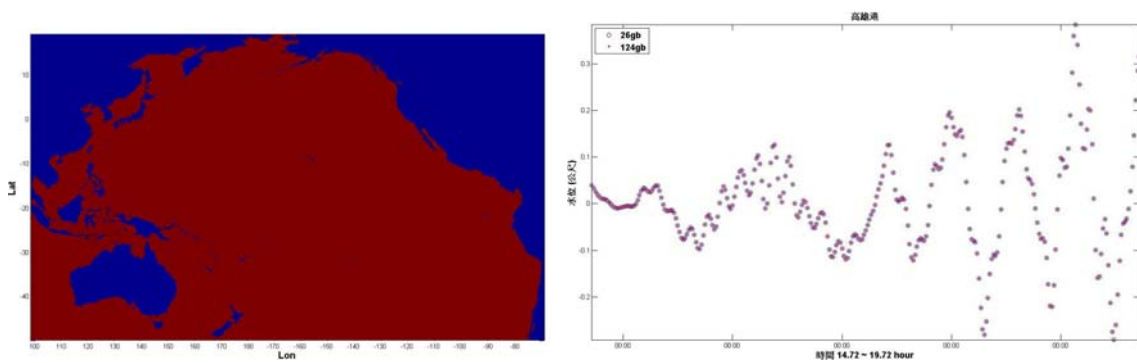


圖4.3 (a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證

4.2 臺中港域及布袋港域海嘯預警子系統

4.2.1 臺中港及布袋港域之潛在海嘯波源區

互逆格林函數的最大絕對值代表可能有影響該地之海嘯發生範圍及其危險程度，並稱此互逆格林函數的最大絕對值為最大放大率 (max gain)(陳等，2010)。求出在範圍內每個點的最大放大率，可得其最大放大率分佈圖，放大率若很大，即相對波高值很大；前期計畫中曾經以該法訂出中部各港之潛在海嘯波源區，如圖 2.4。圖中顯示發生在中國泉州附近海域之海嘯對臺中港威脅性最大，該地在宋代有過疑似海嘯之紀錄。因此，就防災考量而言，也不能排除海嘯之可能性。

另一方面，臺中港及布袋港之海嘯模擬有助於防災應變措施之整體考量，使得防救災指揮作業時有明確之科學依據及模擬結果，在第一時間內利用簡單之系統提供具有可信度之資料是本期計畫之重點。

4.2.2 海嘯預警子系統

布袋國內商港位於嘉義縣布袋鎮以西濱海地區，面臨臺灣海峽，北及西北方有統仙洲、箔仔寮洲、外傘頂洲所構成之狹長砂洲，形成天然屏障，港口經緯度為北緯二十三度二十二分，東經一百二十度七分；北距臺中港約 50 海浬，南距安平港約 30 海浬、高雄港約 50 海浬，西距澎湖馬公港約 40 海浬、金門約 130 海浬。目前由高雄港務局代管，圖 4.4 為目前港區之平面圖。

臺中港位在臺灣西海岸的中央，距離北部的基隆港約 110 浬；南部的高雄港約 120 浬航程。是臺灣西部平直沙岸上，由國人自行設計、施工的國際港。南防波堤 1,397 公尺，北防波堤 2,818 公尺，港口為朝西北西方向，港區總面積為 3,793 公頃，其中水域面積有 973 公頃，陸地面積有 2,820 公頃。港口段主航道為寬度 350 公尺，水深低潮位下 16 公尺；港內南北向主航道，寬度 400 公尺，水深低潮位下 16 公尺。港區平面圖如圖 4.5 所示。臺中港及布袋港皆位於台灣海峽中段，

其水深約在 100 公尺左右，如圖 4.6 所示，長波在此傳遞速度會變慢。

由於兩港之特性不同，故本計劃也預定分別建置適用於兩個港口之子系統，潛勢震源區包含整個環太平洋地震帶，並使用前小節所述之方式減少資料庫所需之空間；預報時間長度為自第一波到達時間起算 5 小時；至於震源參數之連線設定，遠端資料來源仍是即時擷取美國 USGS 之地震即時資料，當有地震資料時，系統可自動擷取即時資料進行後續預報作業。

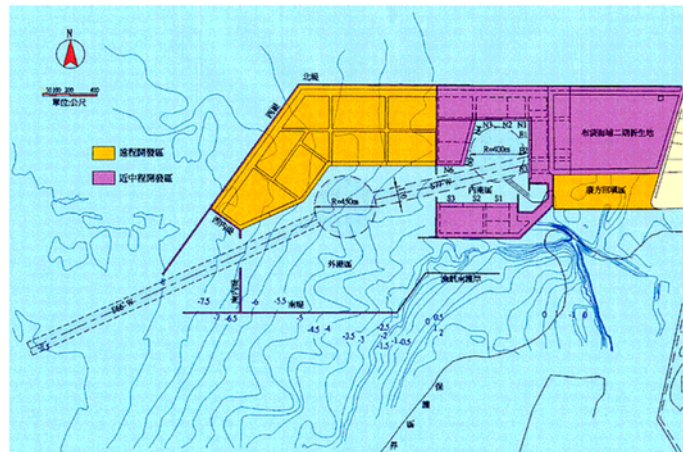


圖4.4 布袋港區之平面圖

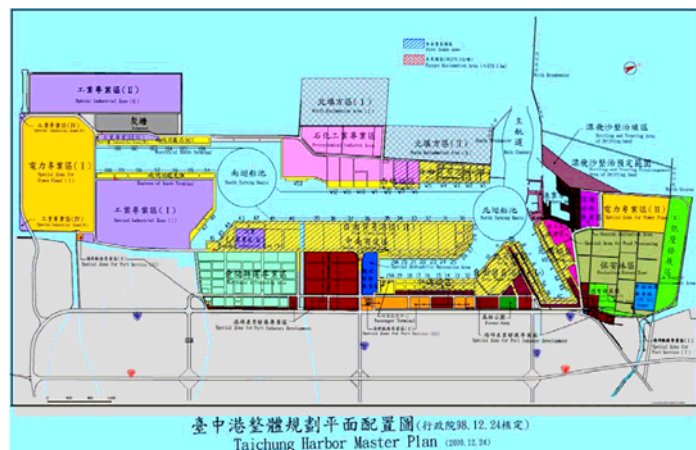


圖4.5 臺中港區之平面圖(資料來源：臺中及高雄港務公司網頁)

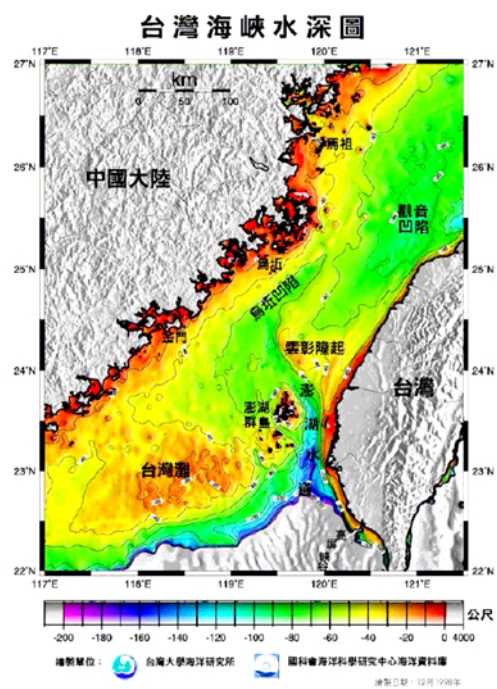


圖4.6 臺灣海峽之水深分佈

4.2.3 點位設定

互逆格林函數資料庫之建置，其預報點之位址需盡量滿足水深大於 50 公尺，但也不可離岸太遠；故實務上在配置預報點位時多盡可能接近岸邊，因此水深可能會較 50 公尺稍淺，但由於非線性效應並不強，故互逆格林函數仍然可以適用；臺中港之預報點位位於東經 120.43 度，北緯 24.3 度，水深 23 公尺，離岸約 7.5 公里；布袋港之預報點位位於東經 120 度，北緯 23.4 度，水深 27 公尺，離岸約 14 公里；如圖 4.7(a)(b)所示。

另一方面，由於本研究所發展之海嘯模擬預警系統其基本概念及精神迥異於其他海嘯模式，其操作介面與軟體設置雖適用於個人電腦，但仍需透過教育訓練移轉至使用者使用，故當編寫簡易之使用手冊及教育訓練將技術移轉至臺中及高雄港務分公司。

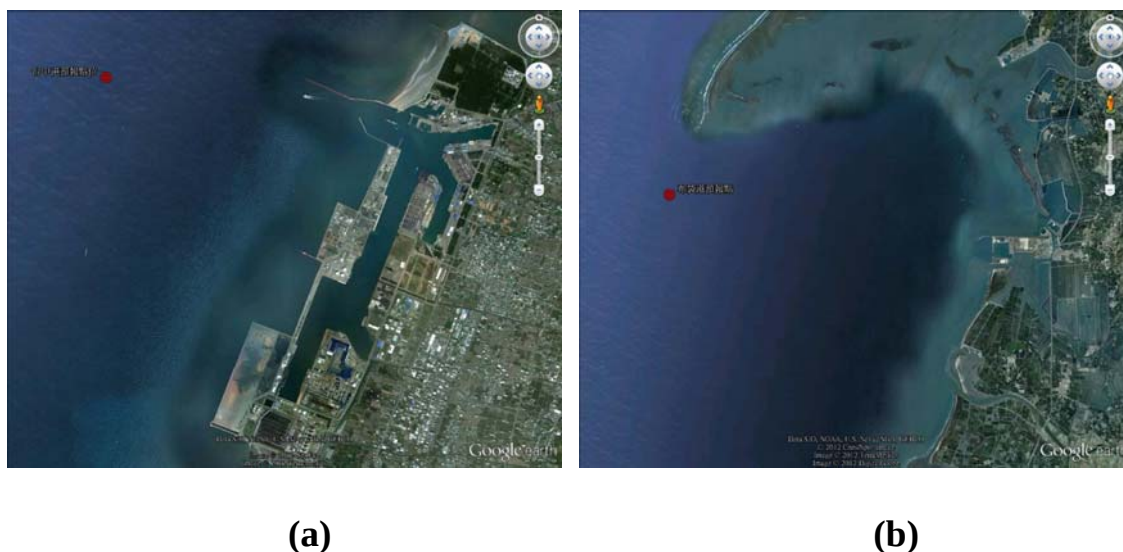


圖 4.7 (a) 臺中港(b)布袋港之預報點位

4.3 實例驗證

4.3.1 驗證方法-總體經驗模態分解法(EEMD)

驗證之方法利用總體經驗模態分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, 簡稱 EEMD) 的方式解析日本地震所引起海嘯傳達至台北港外的水位觀測資料，藉以了解海嘯到達時間以及海嘯高度。同時將美國國家地震資訊中心(U.S. ,National Earthquake Information Center)對日本地震估算的 FMT 解(Fast Moment Tensor solution)代入海嘯速報系統，藉以計算台北港附近海嘯的預報水位。最後比較海嘯速報系統產生的水位與 EEMD 解析出的海嘯水位兩者的差異。

傳統之經驗模態分解法(EEMD)會產生混模(mode mixing)問題，即在同一個 IMF 裡會有不同尺度的訊號混雜，或者是同一尺度的訊號出現在不同的 IMF。產生混模的主要原因是部分訊號在整段時序資料中呈現斷斷續續的分布，而非連續性分布；加以海面水位變化的資訊常是非線性(nonlinear)與非穩態(nonstationary)，所以不適合傅立葉系列的分析方法，故本研究利用 EEMD 分析法。此方法能將原始訊號分解成

多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function，簡稱 IMF)。EEMD 的基本作法就是把一組白噪序列(white noise series)加入目標訊號分解後可得到一組 IMF 分量，再將多組不同白噪序列分別加入目標訊號分解出各自的 IMF 分量組，分別將每個 IMF 分量組其相對應的 IMF 分量加總平均後求得一組 IMF 分量，此 IMF 組即為最終的結果。

4.3.2 EEMD 法之應用—2010/02/27 智利海嘯事件之水位驗證

本節將說明利用交通部港灣研究中心在基隆港外所佈放之 ADCP 系統所量測到2009年智利海嘯之水位變化，與本系統所計算之結果作為驗證。

臺灣時間2010年2月27日下午2點34分於智利發生芮氏規模8.8之大地震，夏威夷太平洋海嘯警報中心即針對智利與秘魯沿岸發布最高層級海嘯警報，另外環太平洋53個國家和地區，包括部分亞洲地沿岸區亦在警報範圍內。根據太平洋海嘯警報中心的紀錄智利沿海地區出現數十公分至2米多的海嘯高度，美國及墨西哥東海岸、夏威夷都觀測到數十公分的海嘯高度。而日本氣象廳的沿岸觀測紀錄有1米多的海嘯高度。

交通部港灣技術研究中心在基隆港東防波堤外水深44m處設置的剖面海流表面波浪與潮汐之監測系統(Acoustic Wave and Current Profile system，簡稱AWCP系統)，設置地點如圖4.8所示。儀器設定的觀測頻率為1Hz，紀錄每小時的第10至第44分鐘觀測水位及水分子運動速度。根據中央氣象局預測，海嘯波從智利外海約需經過26小時後抵達基隆，其時間為2010年2月28日下午四點多。故此研究取2010年2月28日的水位資料(圖4.9)來進行驗證海嘯的水位高度。



圖 4.8 交通部運輸研究所港灣中心基隆港觀測站儀器安裝位置

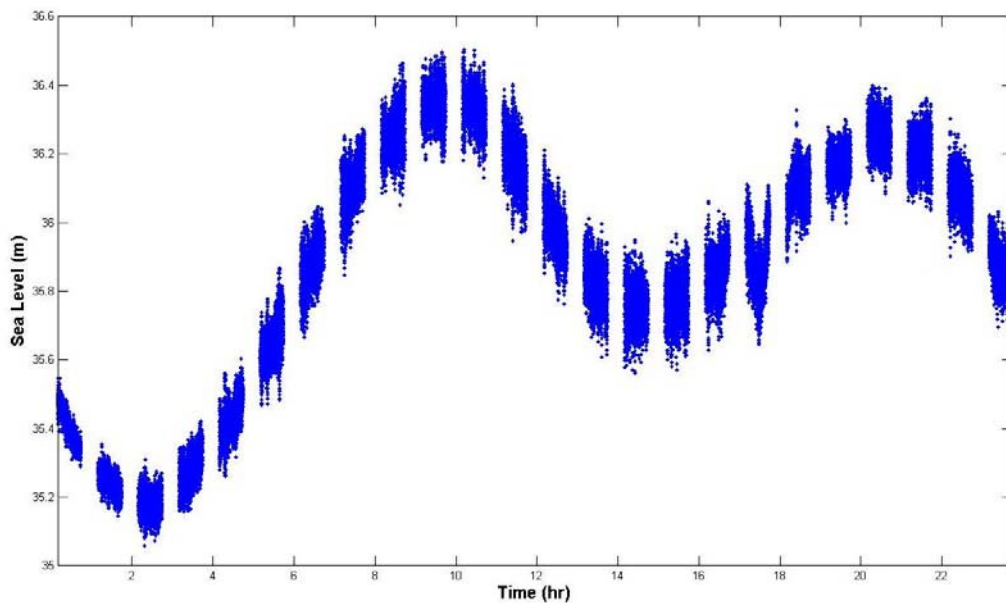


圖 4.9 測站之實測水位

傳統之經驗模態分解法會產生混模(mode mixing)問題，即在同一個 IMF 裡會有不同尺度的訊號混雜，或者是同一尺度的訊號出現在不同的 IMF。產生混模的主要原因是部分訊號在整段時序資料中呈現斷斷續續的分布，而非連續性分布；加以海面水位變化的資訊常是非線性

(nonlinear)與非穩態(nonstationary)，所以不適合傅立葉系列的分析方法，故本研究利用Wu and Huang(2008) 之EEMD分析法。此方法能將原始訊號分解成多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function，簡稱IMF)。EEMD的基本作法就是把一組白噪序列(white noise series)加入目標訊號分解後可得到一組IMF分量，再將多組不同白噪序列分別加入目標訊號分解出各自的IMF分量組，分別將每個IMF分量組其相對應的IMF分量加總平均後求得一組IMF分量，此IMF組即為最終的結果。本文使用國立中央大學數據分析方法研究中心所提供的EEMD分析程式，而加入的白噪組數設定為500組。

海嘯波自太平洋傳至台灣時，基隆港是由波谷先至；由水位資料(圖4.10)大略可看出第一波海嘯較明顯的波谷到達時間在2010年2月28日的下午5~6點之間，故取下午5點10~44分之水位來分析海嘯水位。由於海嘯波及潮汐同屬於長週期波，若考慮海嘯的周期大於資料觀測的時間長度34分鐘，則EEMD分解水位所得的海嘯分量容易和長周期的潮汐分量的訊號一起被分到餘訊(residual signal)，故有必要先濾除潮汐訊號。

由圖4.10可知下午3~7點大致處於漲潮時期，為避開海嘯的影響，在此僅用下午3點10~44分和下午6點10~44分兩個時段的水位資料求取線性迴歸參數，藉以計算潮位(圖4.10之藍線)。將5點10~44分時段之水位扣除潮位後可得到濾潮後之水位(圖4.11)，以該水位進行EEMD分析，此時的餘訊便可代表海嘯的訊號。

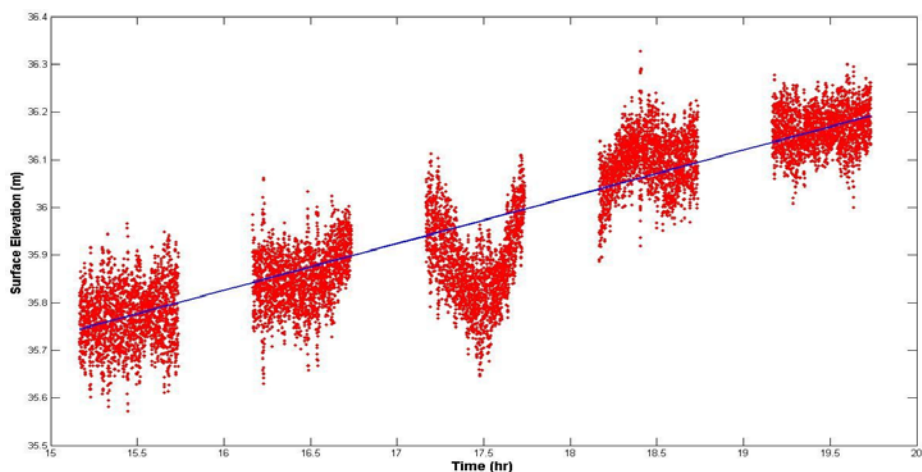


圖 4.10 分析用之實測水位資料

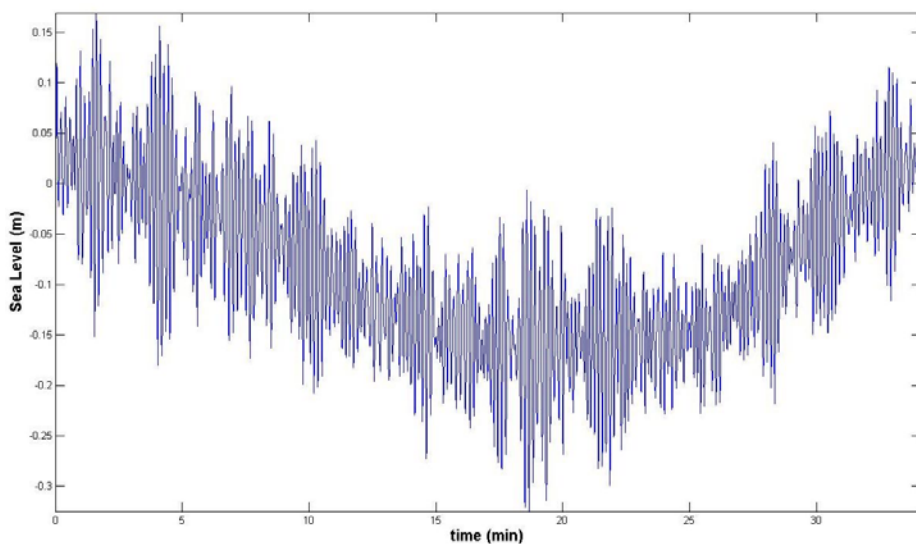


圖 4.11 經過濾潮汐後之水位

將濾潮後的水位經過 EEMD 分析的結果得到 8 個 IMF 分量和 1 個餘訊(C6、C7)，如圖 4.12 及圖 4.13 所示。由於海嘯屬於長周期的波動，故較高頻的 6 個 IMF 分量(C1 到 C6)應非海嘯的影響。另外低頻的兩個 IMF 分量 C7 和 C8，其周期約 20 分鐘，由於相位相近基本上可視為同一分量，兩者加乘的水位波高 2.8 公分，波谷 4.3 公分。與 C7、C8 相較起來，餘訊對水位的影響較大，其水位最大值 5 公分，最小值約 13.5 公分，基本上可視為海嘯造成的水位。

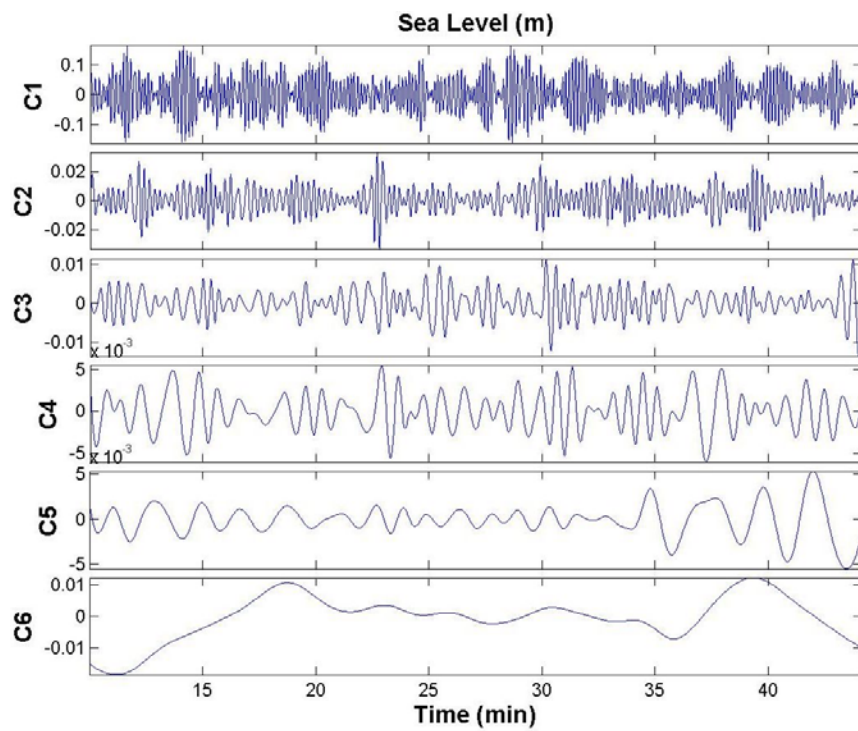


圖 4.12 由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)

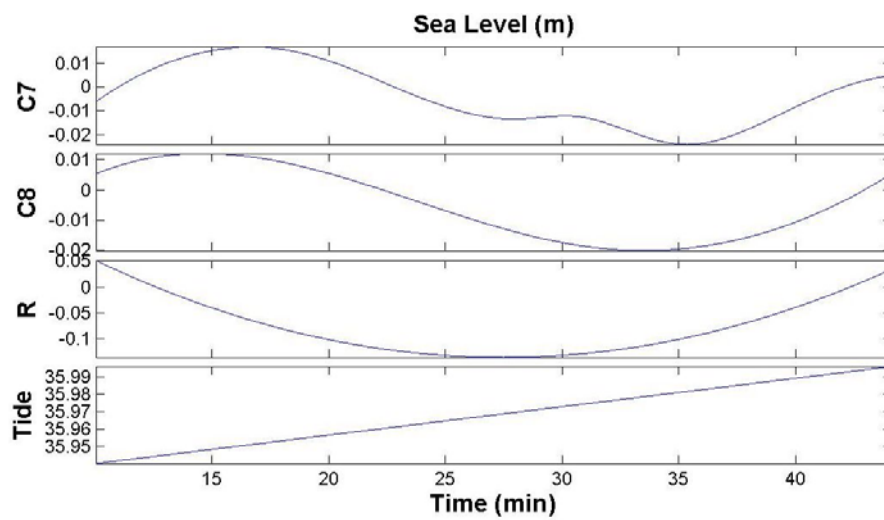


圖 4.13 由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位

本文利用海嘯預報系統產生的海嘯發生後水位與之前 EEMD 所分解的海嘯水位作比較。根據美國國家地震資訊中心發布最初發布的 FMT 解(表 4.1)，輸入地震參數後，選擇預報時間長度為 5 小時(2010/2/28 13:34 至 18:34)，預報地點為基隆港。輸入結果如圖 4.14，結果顯示海嘯第一波的波峰為 7.1 公分，波谷為 14.2 公分，取下午 5 點 10~44 分的預報系統水位與 EEMD 的海嘯餘訊，以及下午 5 點 1~35 分的水位作比較(圖 4.15)，能清楚的了解波谷之水位相近，而預報時間比實際波谷到達時間先到 9 分鐘。

表 4.1 美國國家地震資訊中心發布最初發布之智利地震 FMT 解

```

USGS Centroid Moment Tensor Solution
10/02/27 06:34:09.75
BIO-BIO, CHILE
Epicenter: -35.988 -72.782
MW 8.6

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
10/02/27 06:35:27.29
Centroid: -35.757 -72.389
Depth 36 No. of sta:189
Moment Tensor; Scale 10**21 Nm
Mrr= 7.40 Mtt=-0.53
Mpp=-6.87 Mrt= 0.06
Mrp=-5.95 Mtp=-0.76
Principal axes:
T Val= 9.57 Plg=69 Azm= 84
N -0.48 3 183
P -9.08 19 274

Best Double Couple:Mo=9.3*10**21
NP1:Strike= 11 Dip=25 Slip= 98
NP2: 182 65 86

```

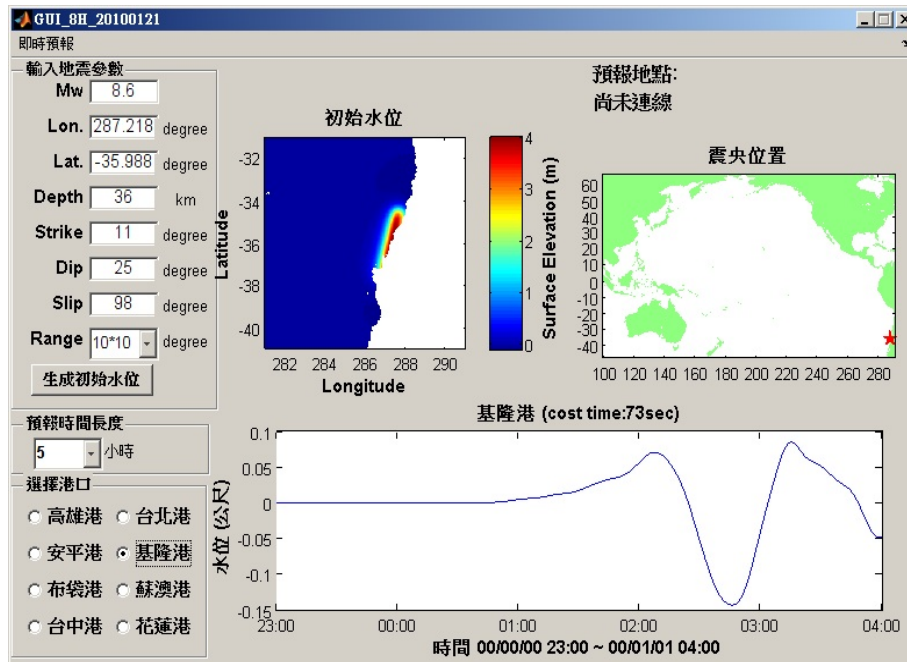


圖 4.14 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果

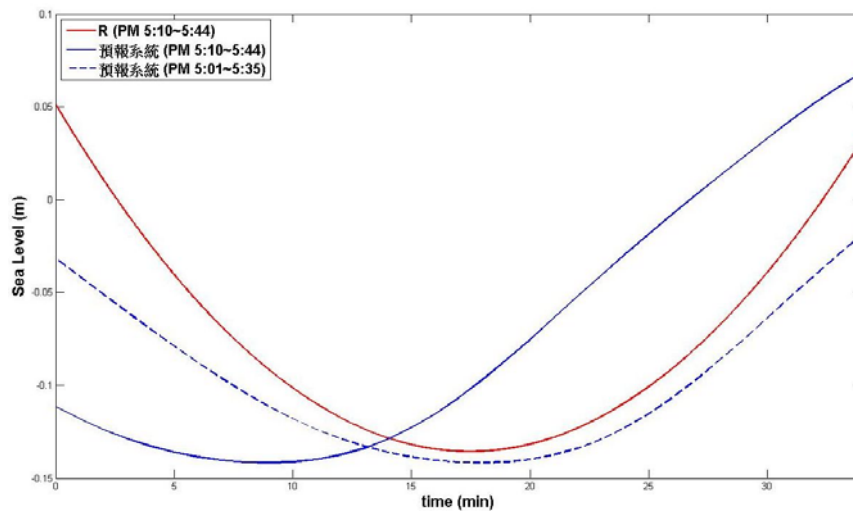


圖 4.15 預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

美國國家地震資訊中心事後將智利地震規模由 8.6 重新上修成 8.8，在此將修正後的 FMT 解(表 4.2)同樣帶入作計算(輸入如圖 4.16 所示)，結果顯示海嘯第一波的波峰由 7.1 公分增為 12.4 公分，波谷由 14.2 公分增為 27 公分，另外與下午 5 點 10~44 分海嘯餘訊水位的比較(圖 4.17)可看出波高相差 13 公分，而預報系統比海嘯餘訊的波谷到達時間先到 11 分鐘。

表 4.2 美國國家地震資訊中心修正的智利地震 FMT 解

```

10/02/27 06:34:08.34
OFFSHORE BIO-BIO, CHILE
Epicenter: -36.027 -72.834
MW 8.8

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
10/02/27 06:35:27.50
Centroid: -35.766 -72.473
Depth 30 No. of sta:187
Moment Tensor; Scale 10**22 Nm
  Mrr= 1.13 Mtt=-0.06
  Mpp=-1.07 Mrt= 0.09
  Mrp=-1.43 Mtp=-0.12
Principal axes:
  T Val= 1.84 Plg=63 Azm= 80
  N      -0.06      4    180
  P      -1.78     26    | 272

Best Double Couple:Mo=1.8*10**22
NP1:Strike= 14 Dip=19 Slip= 104
NP2:      179      71      85

```

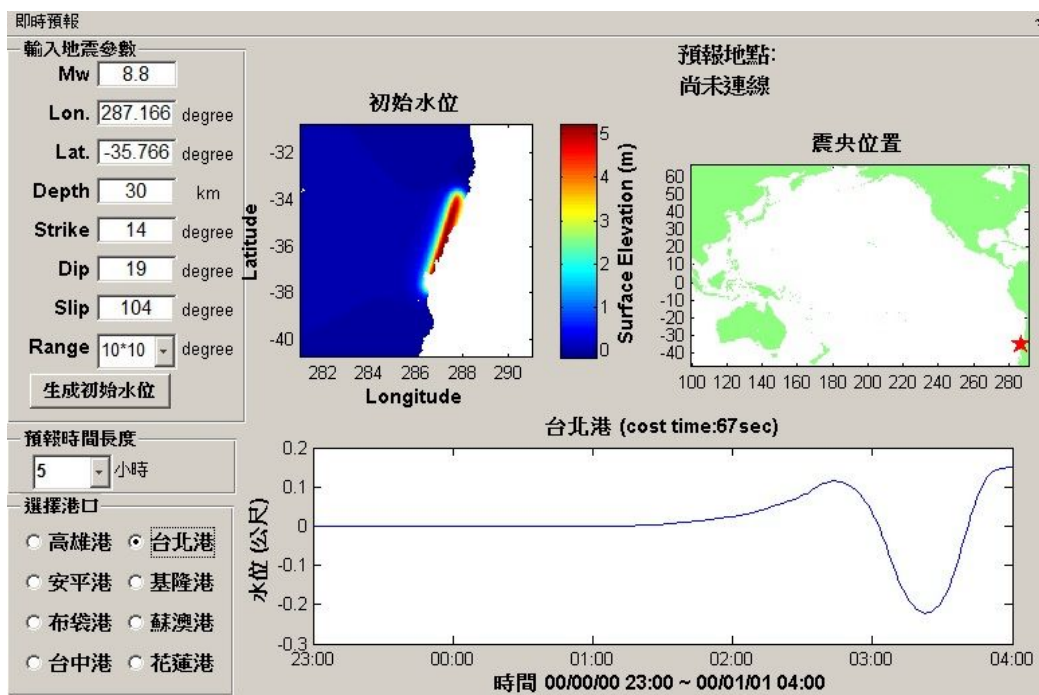



圖 4.16 預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於基隆港之預報結果

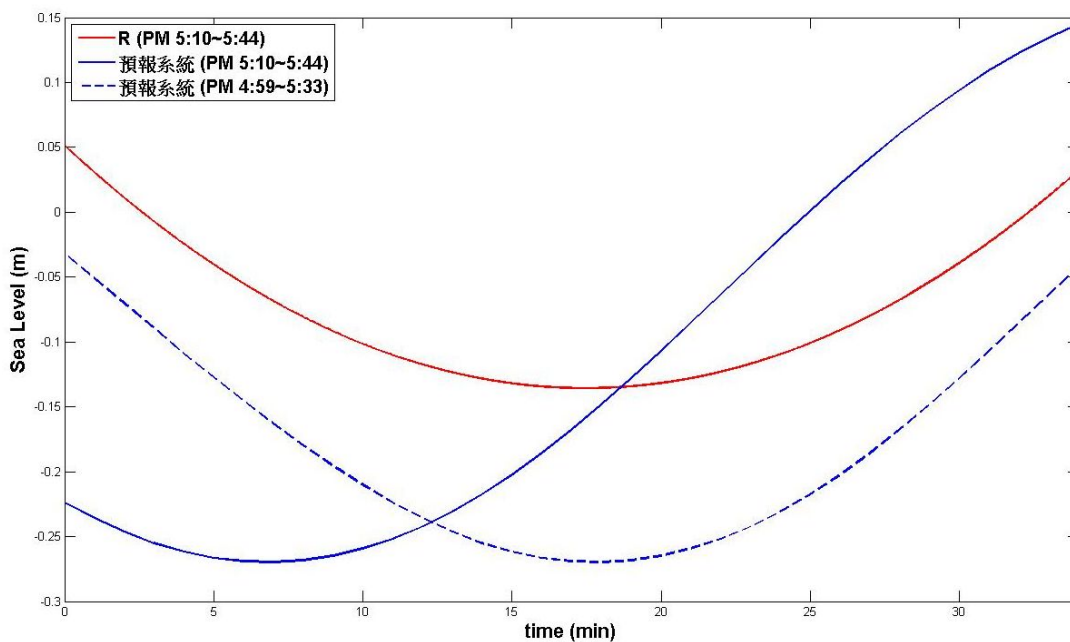


圖 4.17 預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

圖 4.17 中，可看出系統預測之水位較實測水位為高；而與圖 4.15 之結果比較下，顯然地震矩規模 8.6 之結果較為接近實測值；這是因為海嘯初始水位與地震矩規模成正相關，故在地震矩規模 8.8 時系統計算出之海嘯水位會較大。在防災角度而言，預測之水位高於實測水位，其結果雖偏向於保守，但也增加了安全性。

4.3.3 海嘯速報系統之驗證--2011/03/11 東日本海嘯事件

臺灣時間 2011 年 3 月 11 日下午 1 點 46 分於日本發生芮氏規模 9.0 之大地震，交通部港灣研究中心以本系統提供災防中心海嘯在台灣各大港口的水位變化，得到相當好的結果。本節利用交通部港灣研究中心提供臺北港 2011 年日本海嘯之水位變化，與本系統所計算之結果比較驗證。

日本氣象廳針對 311 東日本地震地震波等相關資料進行詳細分析後，發現這次地震的震央區域長達 500 公里，寬度約有 200 公里，地震斷層的破壞持續 5 分鐘以上。此地震造成數公尺高的巨浪，將沿岸許多房屋、汽車，夾雜大量碎片和土石沖進內陸數公里。至少 20 國政府和許多太平洋島嶼都發布海嘯警報。受海嘯威脅的國家和地區擴及俄羅斯、印尼、中南美洲國家如瓜地馬拉、薩爾瓦多和哥斯大黎加，以及美國領土夏威夷。

本文使用的海嘯速報系統(圖 4.18)基本運作分為地震引起初始波源生成與互逆格林函數計算預報水位兩部分。前者利用美國國家地震資訊中心(USGS)的 FMT 解代入 Mansinha and Smylie(1971)提出的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)，此斷層模式主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量，藉以獲得地震引發的海嘯初始水位。

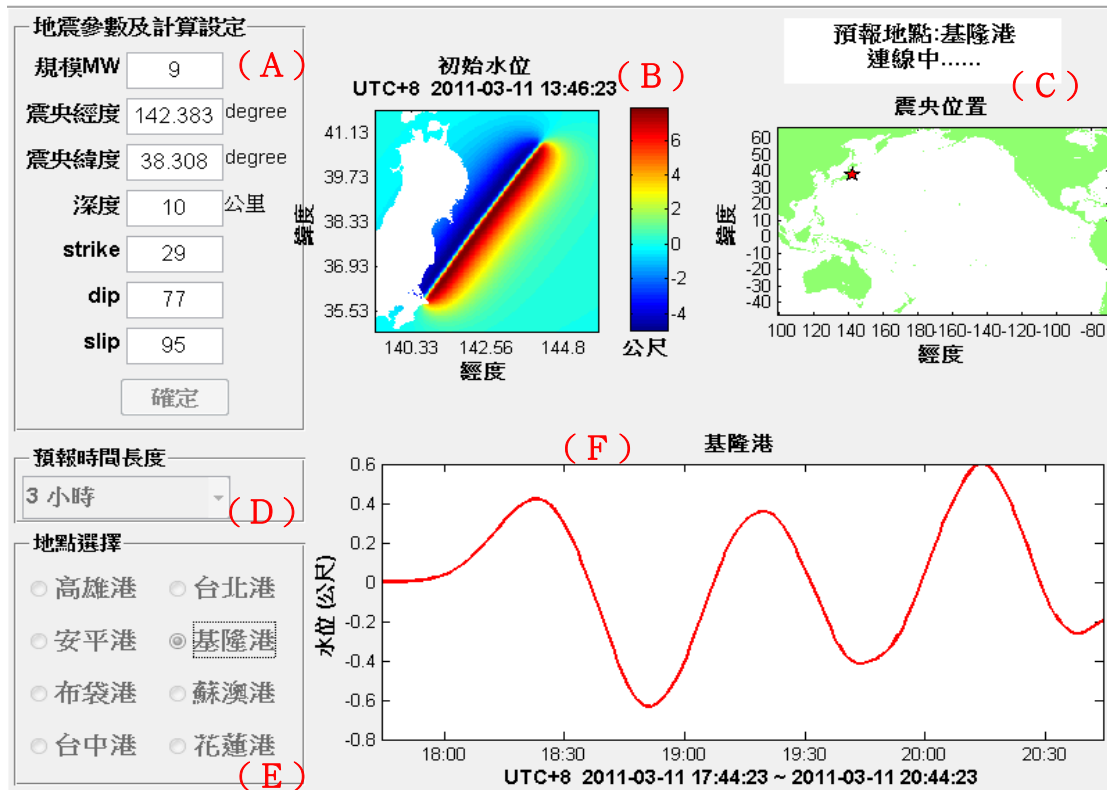


圖4.18 海嘯速報系統之介面

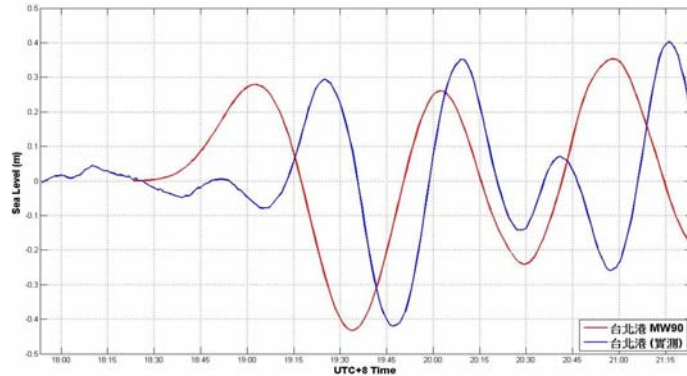
系統程序：

- (A)輸入地震解。
- (B)由經驗公式計算斷層長、寬及位移後，再代入斷層模式產生地震造成的初始水位。
- (C)同時標示震央位置。
- (D)選擇預報時間長度。
- (E)選擇模擬地點。
- (F)模擬海嘯抵達的水位結果。

使用 USGS 最新地震解帶入海嘯模擬預報系統中得到臺北港水位變化結果，與使用 EEMD 法濾潮後臺北港觀測水位資料比較，如圖 4.19(a)(b)。

Epicenter: 38.308 142.383
MW 9.0

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
11/03/11 05:47:47.20
Centroid: 38.486 142.597
Depth 10 No. of sta: 151
Moment Tensor; Scale 10^{22} Nm
Mrr= 2.03 Mtt=-0.16
Mpp=-1.87 Mrt= 2.06
Mrp= 3.49 Mtp=-0.60
Principal axes:
T Val= 4.57 Plg=58 Azm=306
N -0.05 5 208
P -4.52 32 115
Best Double Couple: $M_0=4.5 \times 10^{22}$
NP1: Strike= 29 Dip=77 Slip= 95
NP2: 187 14 68



(a)

(b)

圖4.19 (a)USGS日本311宮城海嘯參數(b)臺北港系統模擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較

此系統計算水位時間約數秒鐘到數分鐘，模擬結果臺北港部分波高大約一致，到達時間約提前十幾分鐘。系統為求快速預報，計算格林函數使用線性淺水方程，地形使用 2 分解析度的數值地形，及簡單的初始水位產生方式，都是產生誤差的可能原因，但其結果在運算速度與預報功能上應符合實際需求。

此次東日本大震災地震引發海嘯襲擊日本東北地區南部(宮城、仙台、千葉、福島一帶)；地震發生後一小時，美國地質調查所(USGS)公佈相關地震參數後，臺灣國際商港海嘯速算系統(以下簡稱速算系統)計算出海嘯波到達臺灣各國際商港之抵達時間與水位變化，如圖 4.20 所示即為蘇澳港之抵達時間與水位變化。

速算系統計算出之水位變化與運研所港研中心現場觀測結果之比較則如圖 4.21；圖中紅線為系統之預估值，藍線是現場實測資料利用 EEMD 法濾潮後後得出。其中速算系統計算出之抵達時間大致正確，基隆、花蓮、高雄、安平以及蘇澳之海嘯波形與現場觀測之波形相似，但有 15-20 分鐘的時間差。布袋港、臺中港及臺北港水位變化與現場觀測之波形相似度較差；由於三港皆位於臺灣海峽中間，此現象顯示臺

灣海峽較淺的水深造成海嘯波變短，因此需要更準確的海底地形才能準確模擬。在海嘯高度的比較上，除臺灣海峽中間三港之波形相似度較差不予討論外，速算系統計算出之基隆港、花蓮港以及安平港水位變化較現場之海嘯高度大。反之，高雄港波高較現場觀測之波高小；圖 4.12 所示蘇澳港之海嘯波高則與現場觀測之波高相當。

之後，美國地質調查所上修地震矩規模至 9.0 並及修正地震參數，速算系統計算所得之海嘯高度差異不大，波形也大同小異，如圖 4.22 為蘇澳港之例子。美國地質調查所在地震發生後一小時才公佈相關地震參數，之後又陸續修正，如上修地震矩規模至 9.0，震源深度也由 24km 修正為 20km，再修正為 10km。這些困難顯示地震參數並不易確定。

由(3.16)式可以知道系統預測水位之準確性與正確的地震參數及水深地形解析度有關。所以驗證時所發生之誤差之檢討作業也必須從這兩點著手，但實務上這兩點並不容易做到。以預報之觀點及東日本海嘯事件案例而言，氣象局能提供近域地震的參數，惟其正確性與對時效之掌握都必須十分可靠。而目前除了美國地質調查所外，並無早期遠域地震參數之可靠來源；另一方面，本研究所使用之初始水位驅動模式是假設斷層是均勻錯動，而據日本學者研究顯示東日本海嘯之斷層運動式較為不均勻之錯動，錯動之模式及參數之正確性都會影響初始水位之準確度。而使用測站水位藉由水動力模式及逆推程序反算真實初始水位之具體方式及程序，目前仍在發展中。

由於臺灣海峽中段較淺，海嘯波自臺灣海峽北端進入時，模擬顯示其前導波之波長約為 1.2 度長，海嘯波高資料庫之水深地形解析度為 2min，故地形解析度/海嘯波長約為 1/36；雖然比值稍大，但仍具有一定的影響量。目前水深地形資料來源及解析度十分有限，日後若能提出更為精細之斷層驅動模式藉以提高海嘯初始波形之準確性以及獲得高解析度之海底地形，應有助於提高實測之準確度。

不過，站在「料敵從寬」的立場，速算系統計算出之水位變化與現場之海嘯高度有差異並不是太嚴重的缺失；缺乏即時的地震參數也可以使用近似值，取其結果較嚴重者即可。此次日本海嘯事件，太平

洋海嘯預警中心發佈海嘯警報範圍包括臺灣；因此政府亦發佈海嘯警報。但是在實務上國外發佈海嘯警報常採用分級制度，將海嘯警報分為 1.馬上避難的海嘯警報(warning)、2.僅淨空沙灘與海岸地區的警戒勸阻(advisory)、以及 3.觀察中(watching)等三級。此次海嘯事件，根據速算系統計算出之水位變化，屬於警戒勸阻的範疇(波高 0.3m-1m)，應該淨空沙灘與海岸地區並加強警戒勸阻即可。

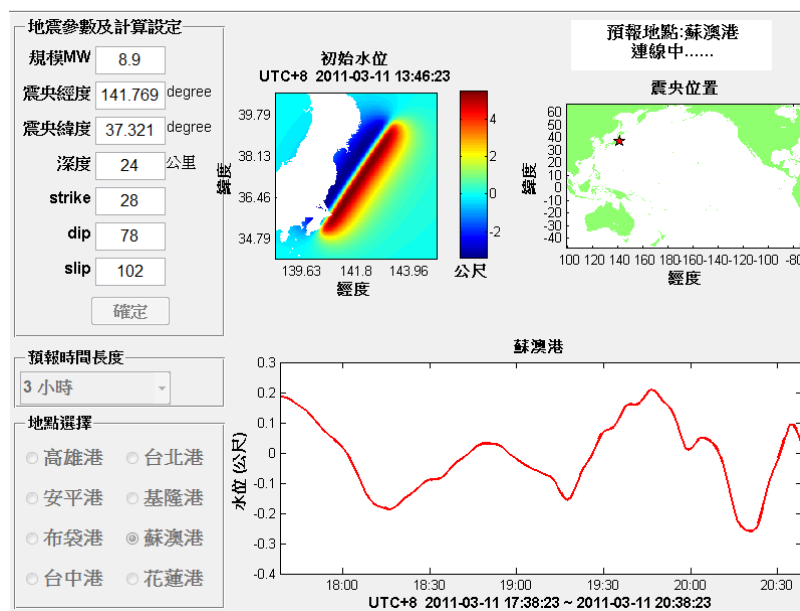
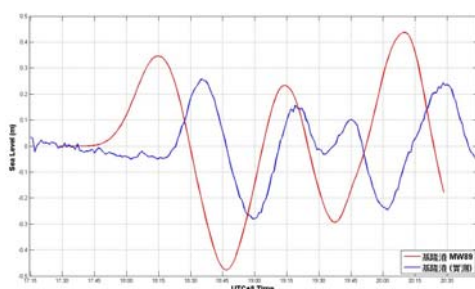
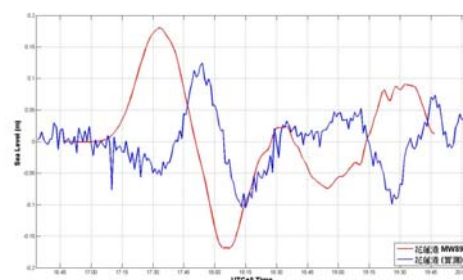


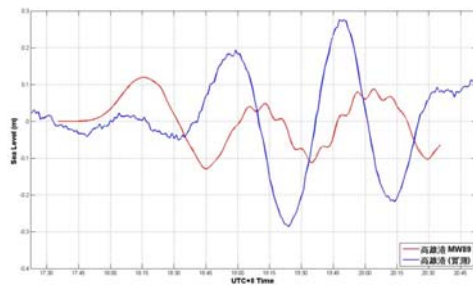
圖 4.20 以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈



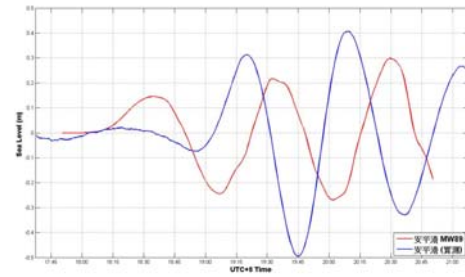
(a)



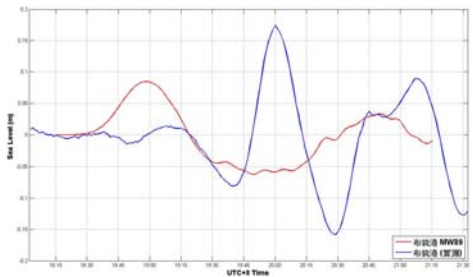
(b)



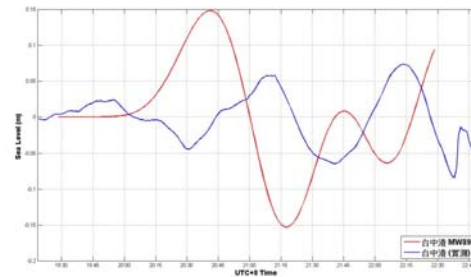
(c)



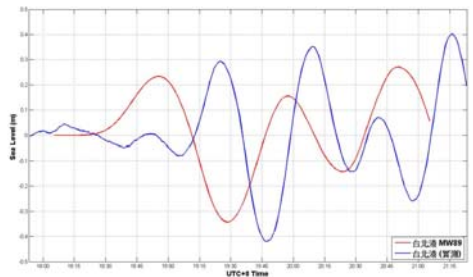
(d)



(e)



(f)



(f)

圖 4.21 以速算系統及地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震
參數計算(a)基隆港(b)花蓮港(c)高雄港(d)安平港(e)布袋港(f)臺
中港及(g)臺北港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海
嘯事件)

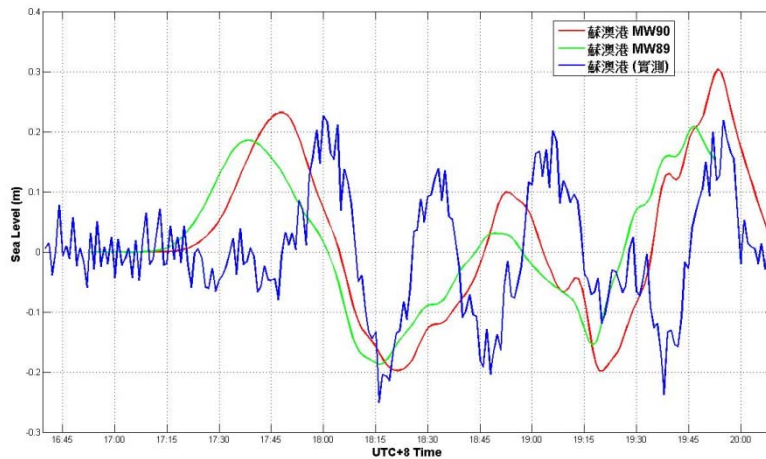


圖 4.22 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w 8.9$)及新公佈之地震參數(地震矩規模 $M_w 9.0$)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)

海嘯波高的預測常有誤差。有的強震造成了海嘯，但波高卻又甚小，使原先發佈的警報成了假警報(false alarm)。例如 2010 年智利 8.8 強震後，太平洋沿岸國家，從夏威夷到紐西蘭、日本，接連發佈海嘯警報，各國忙著疏散民眾，沒想到成了假警報。久而久之，民眾戒心降低，因為以前的經驗，反而認為是假警報，或是認定自己居住的縣市不會有海嘯；倘若真有大海嘯來襲，生命損失更大。所以政府提供的資料越詳細，越能減少假警報的發生。如果大大小小的海嘯都一視同仁，民眾無法判斷，反而把所有警報都當作是假警報。

本次海嘯事件，氣象局只發佈海嘯抵達時間，但是實際上如圖 4.22 所示，海嘯並非只有一個波，最大波可能在第一個波過後一段時間才到來。氣象局可能尚未建立海嘯預報系統，故未能提供第一個波過後之水位變化，提供的資料不夠詳細。此外，台灣各地海岸特性不同，對海嘯的地形放大效應也不同；海嘯預報系統應該分區發佈才合理。

4.4 系統實例操作

第二章說明對臺中港及布袋港最具威脅性之海嘯潛勢波源是來自於中國沿岸以及澎湖群島附近；本節利用一起位於澎湖群島附近之地震實際模擬該起地震對臺中港及布袋港之水位變化。

1994 年 9 月 16 日位於臺灣西南方 150 公里發生一起地震矩規模 6.8 級之海底地震，震央位址在北緯 22.48 度，東經 118.72 度，震源深度約 15 公里，震央位址與 Harvard CMT 之斷層資料參數如圖 4.23 及圖 4.24 所示。

(1)第一組參數之結果(strike=256，dip=35，slip=-116)

圖 4.25(a)(b)為系統計算之布袋港與臺中港之預報水位，由圖可知，兩港之水位變化是波谷先至，第一波也非最大波高；布袋港第一波約在地震發生後 1 小時 18 分鐘後到達，最大波高約兩小時後出現，其值約為 0.017 公尺；海嘯波約在地震發生後 3 小時 10 分鐘後抵達臺中港外，最大波高約 3 小時後才會產生，其值約為 0.013 公分。兩港之第一波到達時間相差約兩小時，應是臺灣海峽水深較淺，海嘯波傳遞速度較慢。

(2)第二組參數之結果(strike=107，dip=59，slip=-73)

圖 4.26(a)(b)為系統計算第二組之布袋港與臺中港之預報水位，由圖可知，兩港之水位變化是波谷先至，第一波也非最大波高；布袋港第一波約在地震發生後 1 小時 11 分鐘後到達，最大波高約兩小時後出現，其值約為 0.016 公尺；海嘯波約在地震發生後 3 小時 44 分鐘後抵達台中港外，最大波高約 3 小時後才會產生，其值約為 0.013 公分。兩組參數計算結果並無太大之差異。故初步研判結果對臺中及布袋港應無具體之影響。

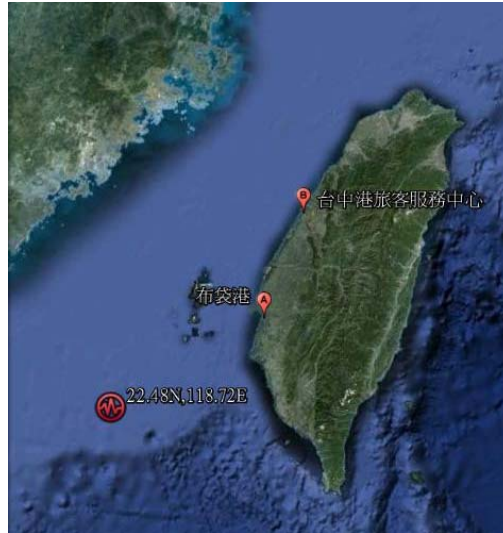


圖 4.23 1994 年地震位址

091694A TAIWAN REGION

Date: 1994/ 9/16 Centroid Time: 6:20:23.1 GMT
Lat= 22.48 Lon= 118.72
 Depth= 15.0 Half duration= 5.4
 Centroid time minus hypocenter time: 4.8
 Moment Tensor: Expo=26 -1.061 1.146 -0.085 -0.476 0.341 -0.028
 Mw = 6.7 mb = 6.5 Ms = 6.7 Scalar Moment = 1.25e+26
 Fault plane: strike=256 dip=35 slip=-116
 Fault plane: strike=107 dip=59 slip=-73

圖 4.24 1994 年地震斷層參數(資料來源：Harvard CMT)

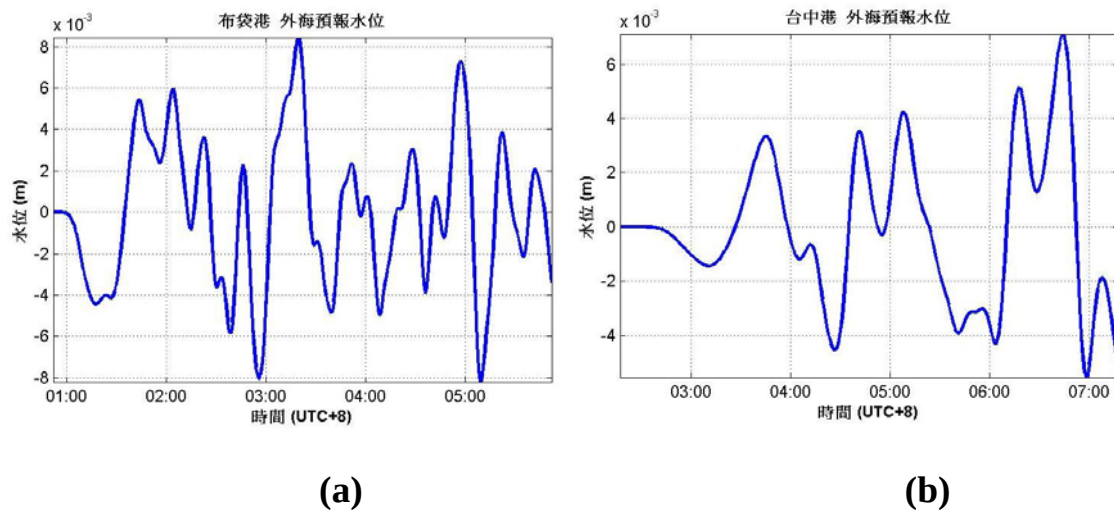


圖 4.25 利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)布袋港(b)臺中港

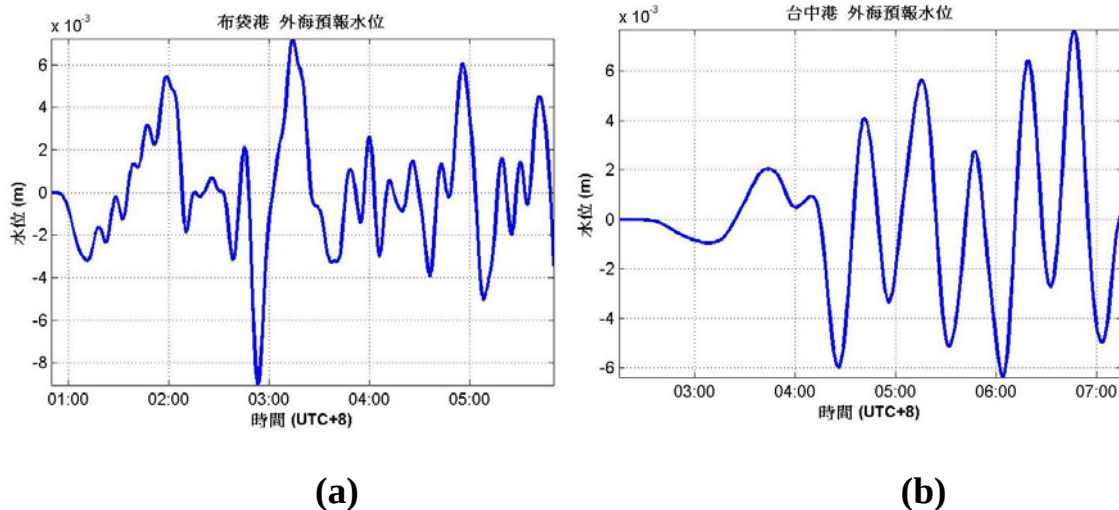


圖 4.26 利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)布袋港(b)臺中港

4.5 系統作業化之運作情形

本系統目前於港灣技術研究中心及中山大學均已架設完成，並提供即時運算，除定期軟硬體維護及更新外，其他時間均保持 24 小時全天候作業狀態；並設定地震矩規模之下限值，高於此一下限值之地震發生時，即時擷取環太平洋地震區之地震訊息進行後續計算作業，並將書面預估資料依程序送達相關單位做後續災情研判及應變做為之參考；依東日本海嘯事件之測試，單一預報點可在獲知地震參數後 1-2 分鐘之內得到初步之水位歷時變化。

本系統除了進行上述之精進措施外，為使該系統適合一般民眾使用及查詢，本系統業已併入港灣技術研究中心之港灣環境資訊網並進行全自動化作業；港灣環境資訊網為一網頁版，可供查詢項目甚多，[海嘯模擬資訊]為其中一項查詢項目；該功能主要有三選擇可供選擇，分別為[近期海嘯查詢]、[歷史海嘯查詢]及[海嘯系統簡介]，如圖 4.27 所列。

[近期海嘯查詢]之功能為自動化擷取地震資訊後，隨即計算各港口之最大水位及到達時間，並於介面中顯示相關資訊(震央位址及地震參數資料)；右邊為與 Google-Earth 之整合(如圖 4.28)，使用者在所查詢

之港口點兩下之後，隨即可顯示該港口可能之最大波高及到達時間(如圖 4.29)；若欲知更進一步之水位歷時變化，使用者可於[觀看水位歷線圖]點取後，會自動展示系統之預估結果(如圖 4.30)。目前該系統所呈現之資料為本年 8 月 31 日晚間之菲律賓疑似海嘯事件。在此要特別說明的是：

- (1) 為避免過多不具威脅性之海嘯預報，海嘯訊息發佈條件設定為當波高大於等於 0.1 公尺或地震矩規模大於等於 7.0。
- (2) 由於斷層參數一般會有兩組解，至於海嘯是由哪一組解所造成的並無法在第一時間進行確認；因此，系統會展示由分別由兩組解所推估之水位。
- (3) 本系統每日定時擷取海嘯資訊，且依資料達到海嘯發佈條件時，於網頁呈現其海嘯相關訊息。

[歷史海嘯查詢]之功能為展示近期較具規模之海嘯事件預估結果，在介面上方可選擇查詢較大之海嘯事件及測站名稱；選擇完畢之後，介面會顯示海嘯事件之資訊、震央位址及水位歷線圖(如圖 4.31)；水位歷線圖之下方會提供每分鐘一筆之水位紀錄(如圖 4.32)。

[海嘯系統簡介]之功能為以文字方式簡短說明本系統所使用之海嘯模式以供使用者參考。

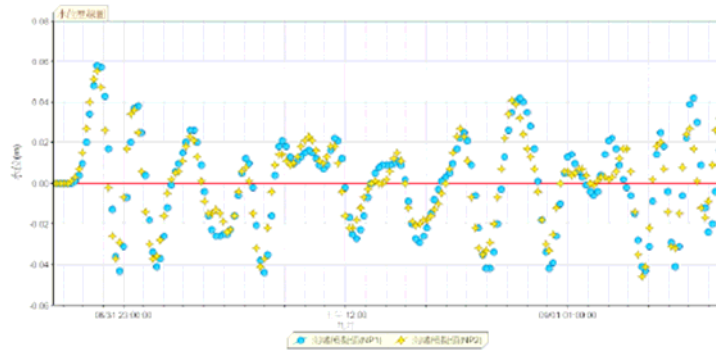


圖 4.27 港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面



回到上一頁 測站名稱: 花蓮港

地震發生時間(格林威治)	地震矩規模	深度(公里)	NP1(走向/傾角/滑移角)	NP2(走向/傾角/滑移角)
2012-08-31 20:47:34	7.6	44	359/41/82	190/50/97



水位歷線圖 資料表

時間	海嘯模擬解 (NP1) 單位(公尺)	時間	海嘯模擬解 (NP2) 單位(公尺)
2012-08-31 22:42:00	0	2012-08-31 22:41:00	0

圖 4.30 水位歷線圖之展示介面

歷史海嘯資料說明：當資料達到海嘯發佈訊息條件(波高 ≥ 0.1 公尺或地震矩規模 ≥ 7.0)時，提供海嘯相關訊息給使用者查詢。

測站名稱: 基隆港 地震時間: 2012-08-31 20:47:34

資料來源: 美國地調所(USGS) 地震發生(震央)之經緯度位置圖

測站	NP1海嘯資訊	NP2海嘯資訊
基隆港	第一波到達時間(HH:MM) 23:27最大波高(m) 0.081	第一波到達時間(HH:MM) 23:26最大波高(m) 0.078
地震發生時間(格林威治)	地震矩規模	深度(公里)
2012-08-31 20:47:34	7.6	44
	NP1 (走向/傾角/滑移角)	NP2 (走向/傾角/滑移角)
	359/41/82	190/50/97

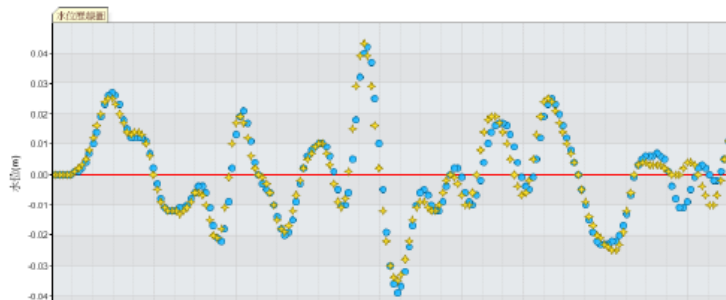


圖 4.31 [歷史海嘯查詢]之查詢結果

時間	海嘯模擬解 (NP1) 潮位(公尺)	時間	海嘯模擬解 (NP2) 潮位(公尺)
2012-08-31 23:12:00	0	2012-08-31 23:11:00	0
2012-08-31 23:13:00	0	2012-08-31 23:12:00	0
2012-08-31 23:14:00	0	2012-08-31 23:13:00	0
2012-08-31 23:15:00	0	2012-08-31 23:14:00	0
2012-08-31 23:16:00	0	2012-08-31 23:15:00	0
2012-08-31 23:17:00	0.001	2012-08-31 23:16:00	0
2012-08-31 23:18:00	0.001	2012-08-31 23:17:00	0.001
2012-08-31 23:19:00	0.002	2012-08-31 23:18:00	0.002

圖 4.32 水位歷線圖之文字資料

第五章 海嘯災害風險評估及教育推廣

5.1 前言

海嘯發生的主要原因為海底地震，雖然目前為止地震無法準確預測，地震發生後可能造成的災害評估技術也趨於成熟，在地震引發海嘯方面可包括(一)可能發生災害的地區(二)破壞發生的機率(三)破壞的程度等，對於提升救災效率、降低生命財產損失，有明顯的幫助，也是在目前最可預期的成效。

本研究採用 Chen et al.(2011)所建議之評估流程：「引發海嘯之地震期望數 Tsunamigenic Earthquake expectation Number, TEN」，其方法由歷史地震紀錄推算未來可能發生的地震次數，配合海嘯的發生條件：海源(震央位置位於海洋)，且震源深度小於 30 公里之條件；以此條件推算未來可能發生海嘯的次數期望值。接著提出「海嘯溢淹機率 Tsunami Inundation Probability, TIP」，其方法使用二維海嘯模式計算若發生不同規模海嘯地震時，對於臺灣東南沿岸各鄉鎮所產生的最大波高，以及此波高以模式模擬對於陸地所產生的溢淹狀況，取溢淹高度 50 公分且離岸 50 公尺為溢淹點，再與模式模擬數值地形岸線點位長度作比值，定義為溢淹機率。綜合海嘯發生次數期望值，與發生海嘯地震所產生的溢淹機率，可得到研究區域發生不同規模海嘯地震且溢淹的機率，將不同區域、不同規模得到的機率加總，則可得到評估區域內發生海嘯且溢淹的機率值。以作為發生海嘯地震且溢淹的災害評估。整體之機率評估方式可寫為如(5.1)~(5.2)式所示：

$$\sum_i \sum_j TEN_j^i IP_j^i = \sum_i \sum_j EN_j^i P_{ocsh}^i IP_j^i \dots\dots\dots(5.1)$$

$$TEN_j^i = EN_j^i P_{ocsh}^i \dots\dots\dots(5.2)$$

式中， EN_j^i 代表子震源區 i 發生 j 地震級距主要地震次數的期望值，

P_{ocsh}^i 則是指 EN_j^i 中發生震源深度小於 30 公里海底地震的機率。上標 i 代表子震源區之數目；下標 j 代表地震級距。圖 5.1 為此一概念之計算流程圖。

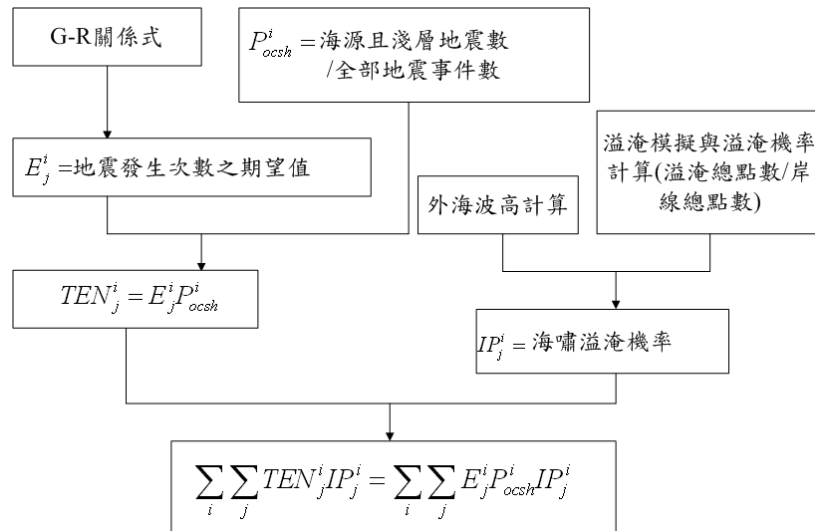


圖 5.1 海嘯風險評估流程圖

5.2 海嘯地震發生次數期望值

5.2.1 研究區域及地震資料

研究區域主要為環太平洋地震帶，全球有 80% 的地震發生在此，而歷史海嘯記錄則有 85% 發生在環太平洋地震帶的島弧-海溝地帶。環太平洋地震帶幅員廣闊，主要地震發生地大抵分為中央地區之南北太平洋及各版塊之海溝、島弧；自 USGS-NEIC 資料庫中所擷取之地震資料(含陸源及海源地震)總數約為十餘萬筆，其數量主要分佈概況如圖 5.2(a)所示，可以發現位於太平洋中央海底盆地之數量較少；東西兩岸之海溝還是主要地震發生地。其次，由於各版塊及海溝地質條件各異，為便利後續海嘯模擬及溢淹機率計算，需將各海溝做適當之分塊，Gusiakov (2005)建議以各主要海溝做為分類之依據，如圖 5.2(b)所示。本研究之分類則如圖 5.3(a)所示。

Figure 1 consists of two maps, (a) and (b), showing the distribution of 121 sampling stations in the Pacific Ocean. Map (a) is a global map of the Pacific Ocean, showing the distribution of sampling stations across the entire basin. Map (b) is a zoomed-in view of the western Pacific Ocean, focusing on the area around Japan and the Philippines. Both maps use a color scale from -1 to 1 to represent the distribution of the studied variable. The color scale is shown on the right side of each map, with values ranging from -1 (dark blue) to 1 (dark red). The maps also include labels for various trenches and regions, such as the Kurile trench, Japan trench, Ryukyu trench, Izu Bonin trench, Mariana trench, Yap trench, Bougainville trench, Tonga trench, Kermadec trench, West Coast, Middle America trench, and Peru-Chile trench. In map (b), specific sampling stations are labeled with numbers and names, such as No. 34-39 (琉球), No. 40-49 (伊豆小笠原), No. 50-61 (日本興千島), No. 62-70 (阿留申), No. 71-93 (中美與美國西岸), No. 94-120 (秘魯-智利), No. 1-12 (東加與克馬), No. 13-18 (布干維爾), No. 19-24 (馬里亞納與雅浦), No. 25-33 (菲律賓), No. 121 (夏威夷), No. 122-126 (馬尼拉), and No. 127-133 (菲律賓).

5-3

風險評估首先須由蒐集地震之資料開始，計算地震發生之期望數；本研究依主要海溝分為數個大區域總共 126 個區域點位，由美國地質調查所(U.S. Geological Survey, USGS) NEIC 資料庫，取得歷史地震資料，並依區域範圍與歷史年份等條件挑選地震資料，如圖 5.4。美國地質調查所 USGS 監測全球地震活動並發布地震消息，對於規模大於 3.5 的地震幾乎都已經使用地震矩規模來描述地震大小。因此在本研究主要以地震矩規模為挑選條件，若有其他地震規模則由先前章節介紹地震規模轉換經驗公式適當換算地震矩規模，以此條件取得記錄較完整之歷史地震資料(地震矩規模 M_w 記錄、震源深度記錄、震央位置記錄等)。慮較大規模海嘯在臺灣週遭斷層可能會出現不合理狀況，因此在規模 8.5 以上地震參數有重新考慮為 115 個區域點位，主要是在琉球海溝、菲律賓海溝與馬尼拉海溝考慮已知斷層狀況重新選取區預計算，以至於在規模 8.5、9 時點位較少；本研究所假設之震央位址及參數設定請見附錄三。

附錄三另外一個功用是在地震初期或是通訊中斷而資訊不明時，作為系統之參考輸入條件；實務上，地震之震央無法事先預知，會造成海嘯初始水位預測之困難，也影響系統預估水位之準確度；因此，在此一情況下，採用附錄三依不同地震矩規模輸入建議之地震參數作為替代條件，雖與實際狀況有所差異，但不失為一可行之方法；待取得表 4.2 中任一機構所公佈之地震參數後，系統可隨時修正相關之預測資訊。



NEIC: Earthquake Search Results

U. S. GEOLOGICAL SURVEY
EARTHQUAKE DATA BASE

FILE CREATED: Mon Sep 5 01:33:27 2011
Geographic Grid Search Earthquakes= 19437
Latitude: 36.000N - 22.000N
Longitude: 141.000E - 120.000E
Catalog Used: PDE
Data Selection: Historical & Preliminary Data

CAT	YEAR	MO	DA	ORIG TIME	LAT	LONG	DEP	MAGNITUDE	IEM	DISVNWG	DIST
									NFO		km
									TF		
PDE	1973	01	05	053105.80	33.47	140.87	56	4.5 mbGS	...		
PDE	1973	01	05	114837.50	33.16	140.91	33	3.9 mbGS	...		
PDE	1973	01	06	102116.30	33.49	140.85	33	4.2 mbGS	...		
PDE	1973	01	06	112154.70	33.27	140.93	46	4.5 mbGS	...		
PDE	1973	01	06	145552.80	33.15	140.71	61	4.7 mbGS	...		
PDE	1973	01	10	075113.60	33.62	140.51	103	4.1 mbGS	...		
PDE	1973	01	12	074443.90	33.11	140.98	20	3.9 mbGS	...		
PDE	1973	01	15	090258.30	27.08	140.10	477	6.0 UKBRK	1F.		
PDE	1973	01	15	091410.70	27.09	140.03	478	5.1 mbGS	...		

圖 5.4 USGS-NEIC 地震資料庫

當一般區域震源可用指數規模分佈模式來表示，而此模式中之地震規模與再現頻率關係式 (Gutenberg and Richter, 1944)，稱為 G-R 關係式，其形式為：

$$\log(N) = a - bM \quad (5.3)$$

G-R 關係式中，b 值是地震危害分析中一個極為重要的參數，其表示地震在某一地震規模內的大地震與小地震間的比例關係。b 值隨著研究區域內的地質分佈、構造、地溫與應力...等條件的不同而有所變化。此一回歸分析法，即是在一區域內對於地震規模 $\geq M_b$ (設定之地震下限) 而言的，式中 M 代表地震矩規模，並依小而大之順序排列，式中之 N 表示規模大於或是等於 M 之次數，在本研究中地震矩規模 M 的區間為 4.25、4.75、5.25、5.75、6.25、6.75、7.25、7.75、8.25、8.75、9.25 取各區間內累計數即為 N，而 a、b 則為線性迴歸係數。以日本東側東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度為例，圖 5.5 藍點為各地震矩累計次數，35 年為過去地震次數記錄的時間長度，將此回歸線上各點除以統計年

時間長度 35 乘上評估年時間長度 50、100 再轉換回 G-R 關係式，則可得到圖 5.5 上未來 50 年及未來 100 年的回歸係數與回歸線，紅點線(50 年)及綠點線(100 年)，此回歸線為評估未來 50 年及未來 100 年，可能發生之累計次數，進而可得到各地震矩規模區間的可能發生次數，如表 5.1 所示。

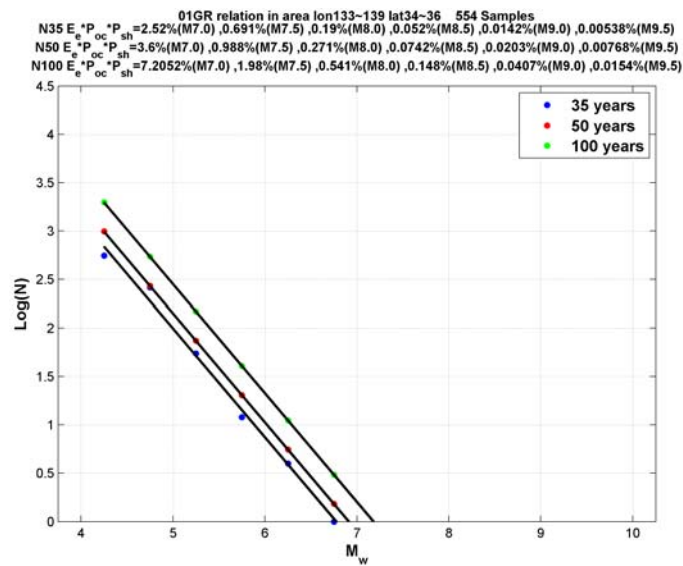


圖 5.5 G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)

表 5.1 各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值

M_w	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	4.0552	1.1116	0.3047	0.0835	0.0228	0.0062
100 年	8.1099	2.2231	0.6094	0.1670	0.0457	0.0125

5.2.2 海嘯發生條件

由統計資料可以發現，海嘯之發生並不一定與強烈之海底地震有必然之關係；因此，海嘯的發生是一種條件機率(conditional probability)；在討論地震引發海嘯時，一般會引發海嘯的地震震源通常發生在較淺層的海底斷層；G-R 關係式求得地震發生次數期望值，再給與海嘯發生條件 P_{ocsh}^i ，即是表示震央位置位於海洋且震源深度小於 30 公里才有引發海嘯之可能，以此方法求得在特定回歸期內可能發生海嘯次數之期望值。圖 5.6 為挑選海源地震，海源地震的定義為震央位置記錄在海洋，圖 5.6 中藍色方框點位置。接著在海源地震中挑選震源深度小於 30 公里條件下地震，圖 5.6 中紅色圈圈點位置。海源且極淺層數目除上統計總數，即可得海源且震源深度小於 30 公里比值。此區域地震資料總數為 702 筆，海源且震源深度在 30km 以內數為 83 筆，因此比值 $83/702=0.1182$ 。該值與表 5.1 各地震規模區間發生次數期望值相乘，即可得在未來 50 年及 100 年各地震矩規模區間發生由地震引發海嘯之可能發生次數，即是(4.2)式中的 TEN；如下表 5.2。

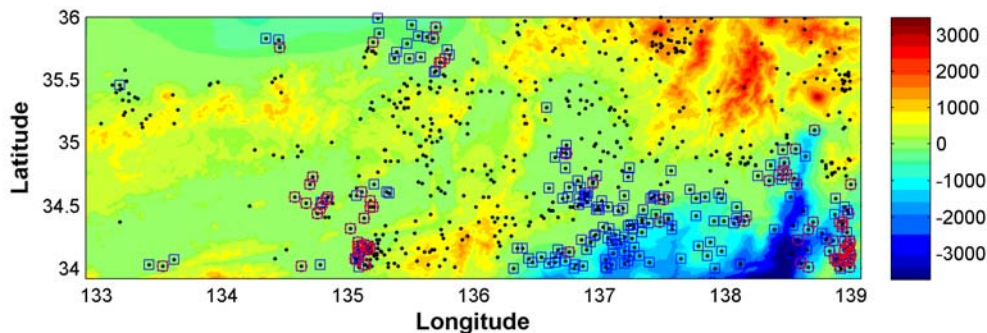


圖 5.6 計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)之淺層海源地震分佈

表 5.2 海嘯地震發生次數期望值

M_w	6.5	7	7.5	8	8.5	9
50 年	0.48	0.13	0.036	9.86×10^{-3}	2.69×10^{-3}	7.33×10^{-3}
100 年	0.96	0.26	0.073	0.0197	5.4×10^{-3}	1.48×10^{-3}

5.3 臺中港及布袋港之溢淹模擬

5.3.1 數值地形

海域地形主要是採用海科中心網格間距為 500 公尺之水深資料 (TaiDBMV6)，如圖 5.7；除了 TaiDBMV6 外，港區之水深亦採用港研中心所提供之實測資料加以校正及比對。陸域地形資料是由內政部地政司所提供之 5m×5m 之 DSM 及 DEM 數值地形資料，其中平面坐標採內政部 1997 臺灣大地基準(TWD97)，高程坐標採內政部 2001 台灣高程基準(TWVD2001)。即是定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境下，並採用基隆潮位站(基隆平均海水面)1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，即為中潮系統。每一網格點是一組 E、N、H 三個坐標值，組成右旋坐標系的三個 X、Y、Z 坐標(如 250000 2670000 123.0，坐標之間以一空格隔開)；遇到無法測製區及湖泊、水庫等水體區則以影像當時邊界線高度測製。無法測製區及水體區則依地形特徵資料檔格式加測並儲存記錄邊界線。海域水體部分以海岸線及圖幅邊界組成邊界線。陸域地形需轉成經緯度座標。5m×5m 數值地形資料之測繪在實務上實屬不易，雖然無法表示局部地區之建物構造特色與實際情況，但是此一解析度已可做為溢淹圖資之用，圖 5.8(a)(b)為臺中港及布袋港之陸域數值地形。由於兩者解析度不同，在無其他較為精細海底地形之來源時，將海域地形以內插之方式製作成與陸域地形資料相同解析度之數值地形。圖 5.9(a)(b)為海陸域整合後之數值地形檔。

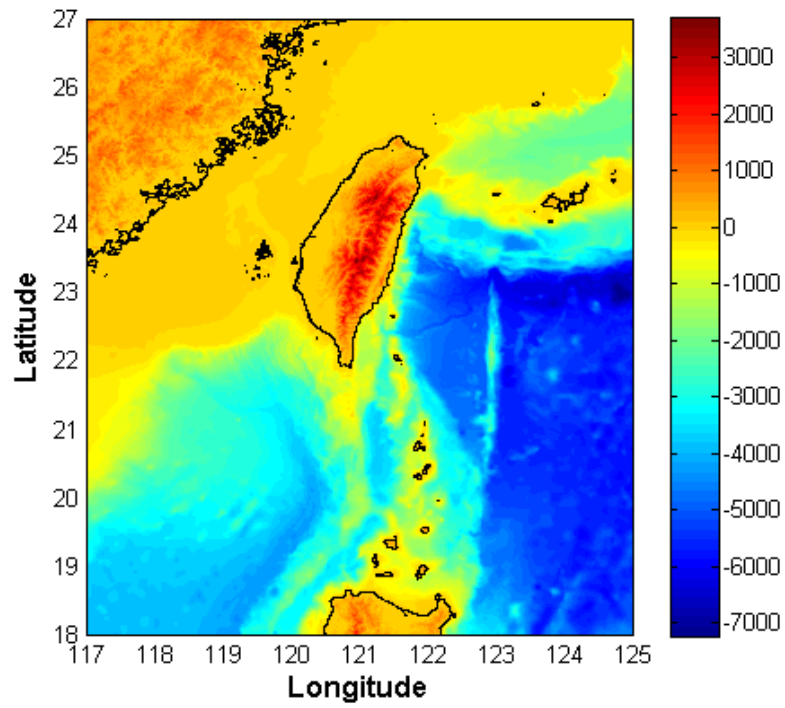


圖 5.7 臺灣 500m 解析度水深地形資料

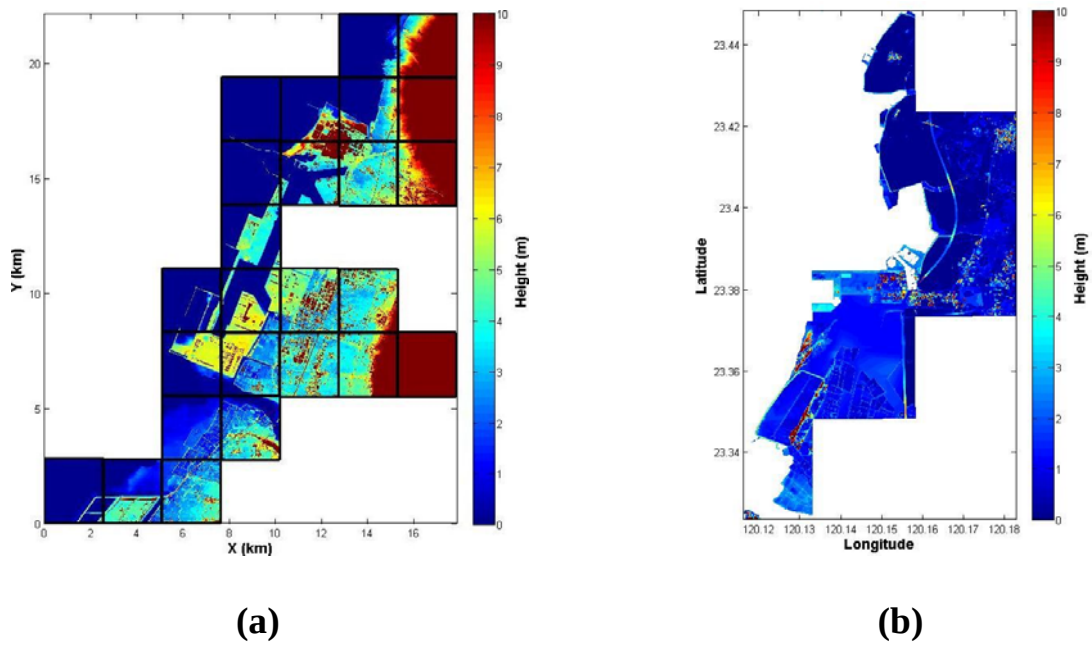


圖 5.8 (a)臺中港(b)布袋港 5m 解析度數值地形檔

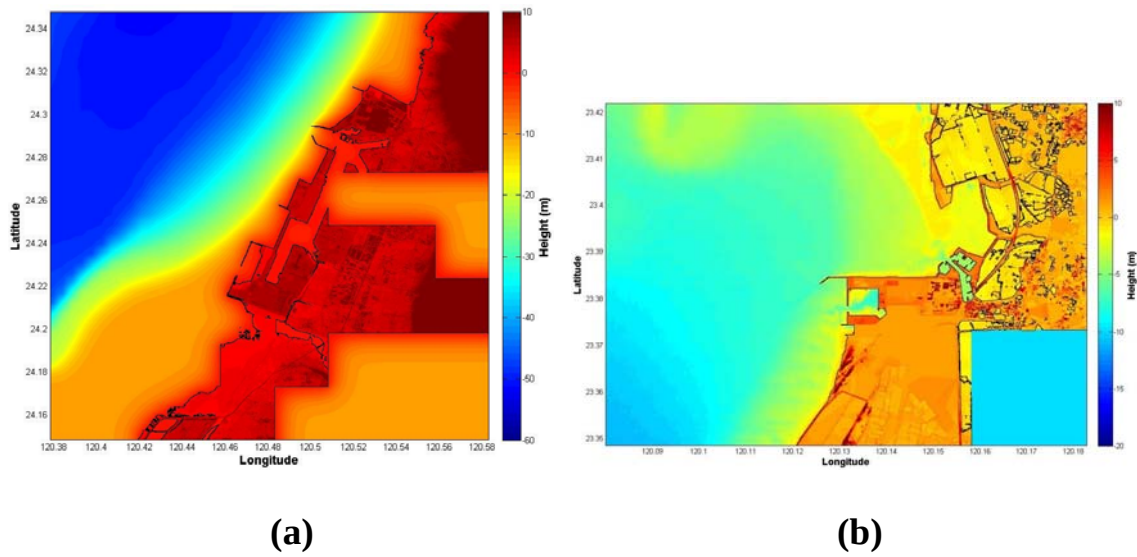


圖 5.9 (a)臺中港(b)布袋港整合海陸域後之數值地形檔

5.3.2 布袋港之模擬結果

海嘯溢淹模擬最佳之方式就是確切得知發生一已知之震源或是一組斷層參數，得知初始水位高度後據以模擬海嘯之溢淹行為及特性。但實務上，上述之方法有其困難度：

- (1)首先是震源位址，目前並無法準測預測地震之發生，故也就無法得知震央；其次，斷層參數之來源也極其有限，除了少數較為引人注目之斷層(例如馬尼拉海溝)有較為嚴密之地球科學探測資料外，其餘甚少有較為詳盡之參數資料；故在有限之條件下以實際海嘯波形進行海嘯溢淹模擬有其實務上之困難。
- (2)另一方面，目前也無法確知各個可能震源點所能產生之最大地震矩規模及海嘯波之來向。

由以上兩點可知，在許多必要條件均缺乏之情況下進行海嘯於近岸地區之數值模擬是相當不便的，加以防災需求宜作較為保守之推估；因此，利用單一波形及情境模擬方式來進行溢淹模擬除了可獲得較為保守之結果外，更可匯集成一資料庫，在實際海嘯事件發生時，得知外海波高後，即可得知對應可能之海嘯資訊。

本研究使用 COMCOT 溢淹模式，以不同波高之鐘型波模擬海嘯波垂直岸線入射(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、10m)；海嘯波為長週期之重力波，一般週期約為 15~30 分鐘，前期基隆港與臺北港之模擬為採用之週期為 20 分鐘，本計劃亦沿用此一週期；以臺中港為例，海嘯波模擬採用之週期為 20 分鐘，圖 5.10 為波高 4m 週期 20 分鐘之鐘型波波形，以此波形在模式地形邊界上入射，模擬此情境下陸地之溢淹狀況。圖 5.11(a)~(g)為布袋港在各種不同鐘型波入射波高下之溢淹圖。計劃中所設定之海嘯潛勢波源區為整個環太平洋地震帶；另外要特別說明的是，本研究僅限於由海嘯造成溢淹模擬，利用 COMCOT 並無法適當模擬臺灣海峽中之震盪行為。

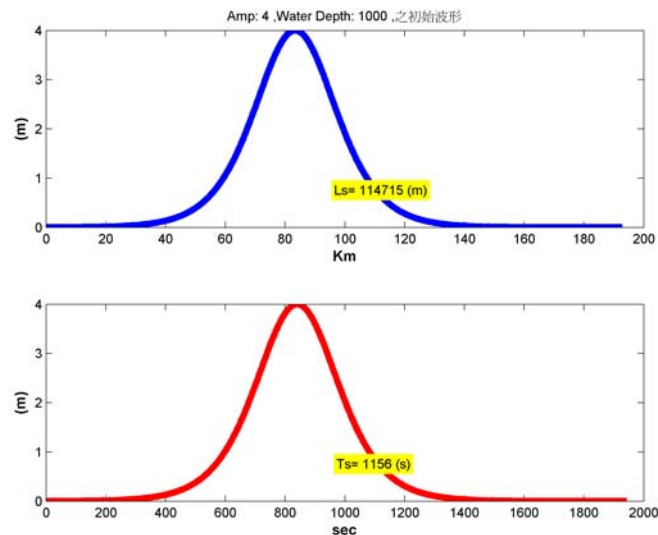
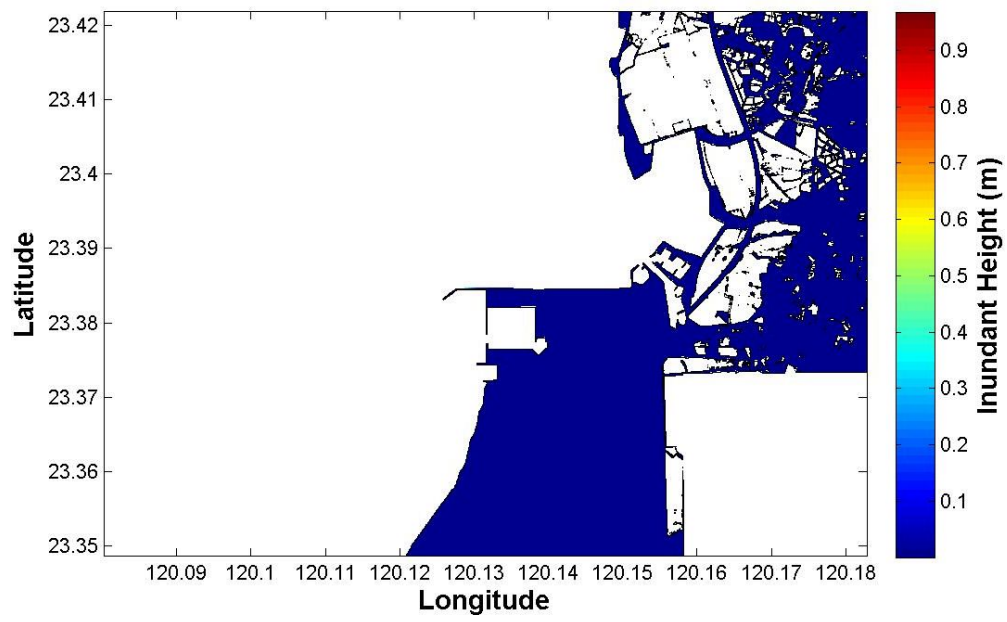
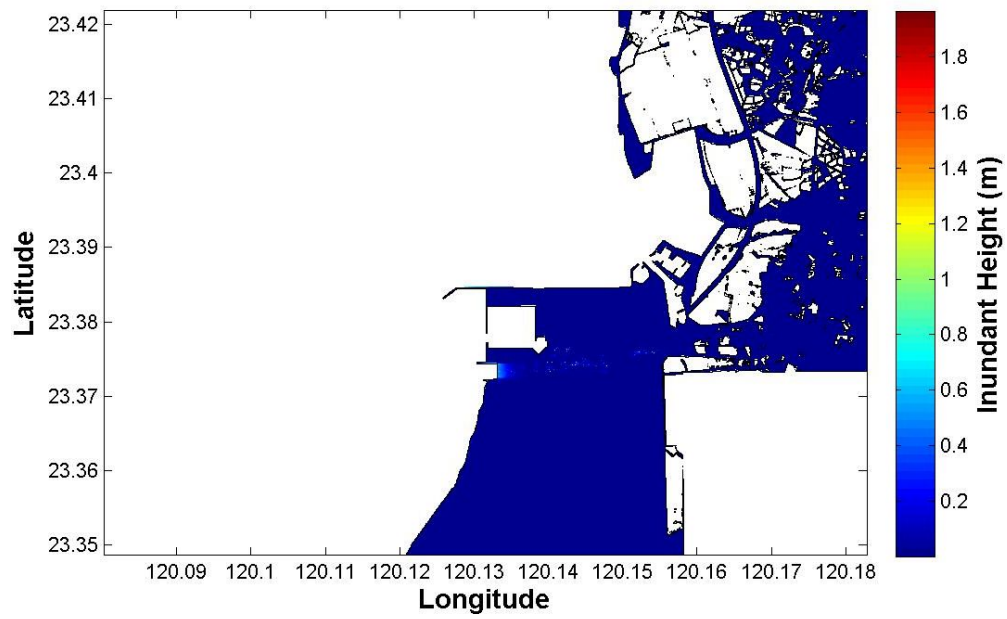


圖 5.10 週期 20 分鐘波高 4m 孤立波

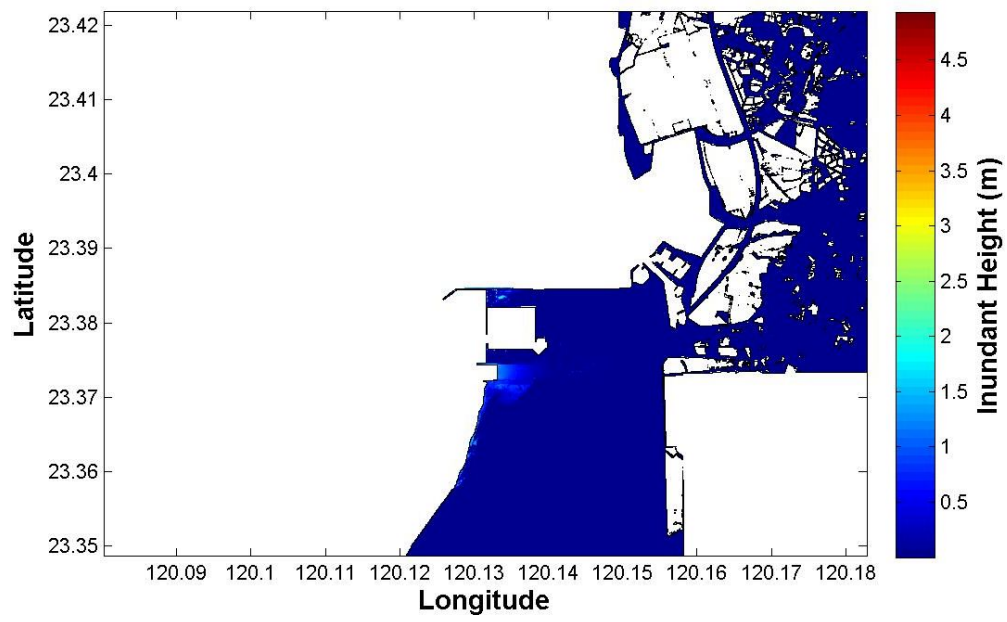
圖 5.11 為布袋港區在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於內港區之下方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下。3 公尺以上之波高時，溢淹範圍會逐漸向內陸擴大，在內港區上下之溢淹高程也會提高至 8 公尺左右(入射波高為 10 公尺時)。



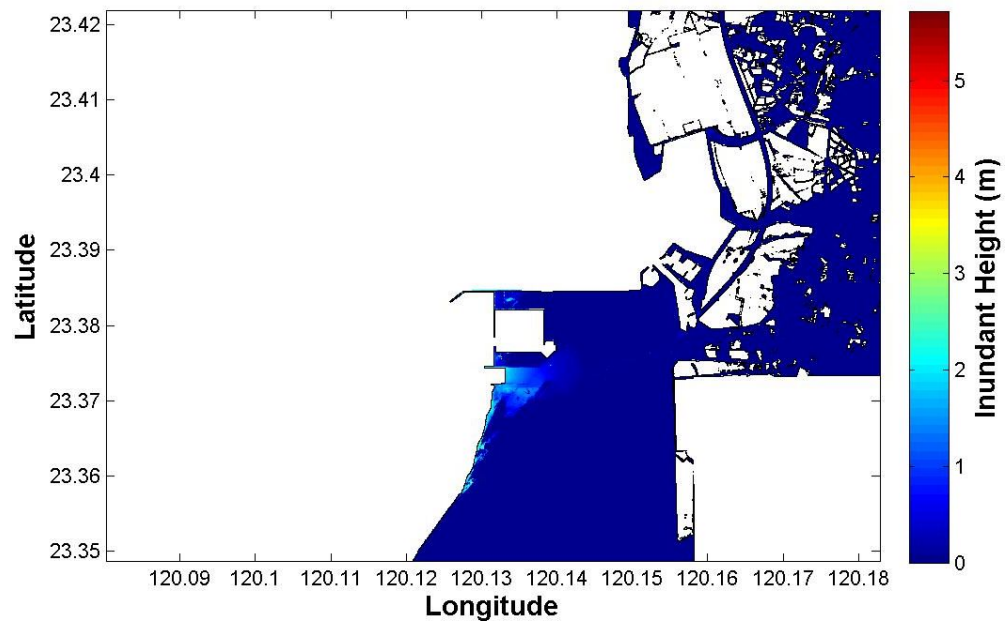
(a)



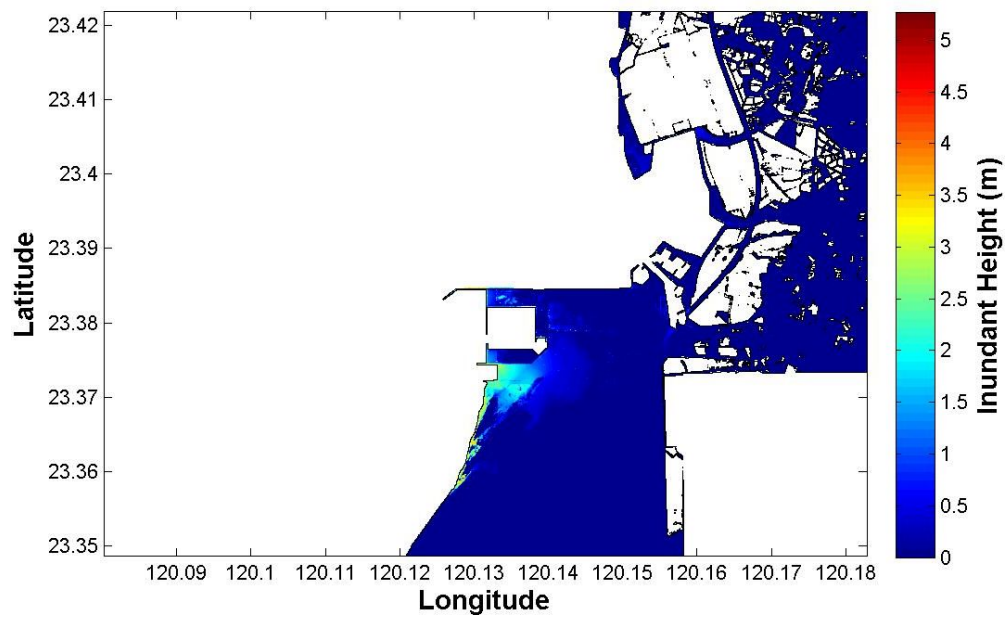
(b)



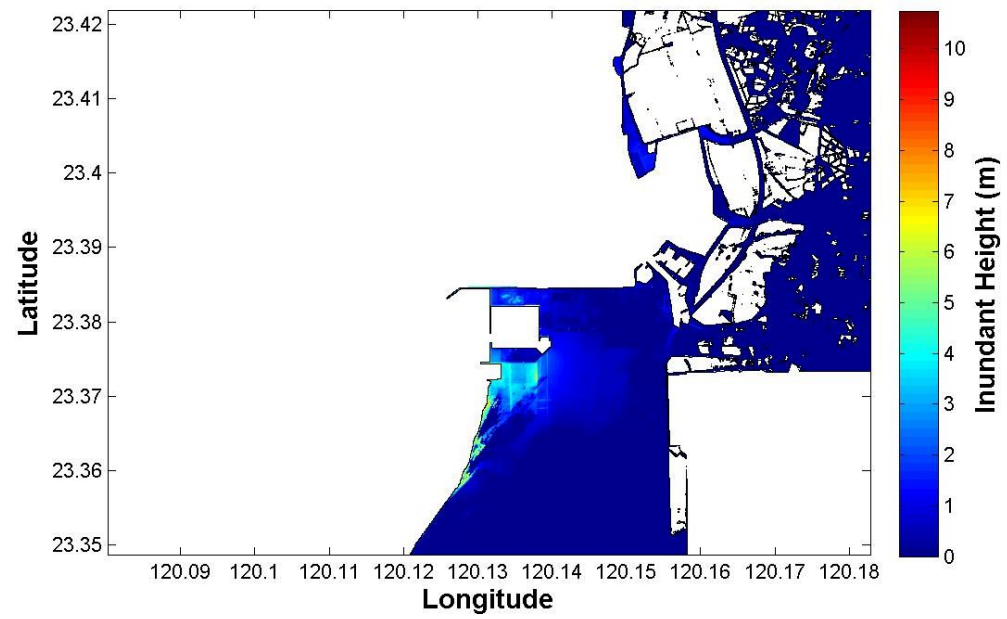
(c)



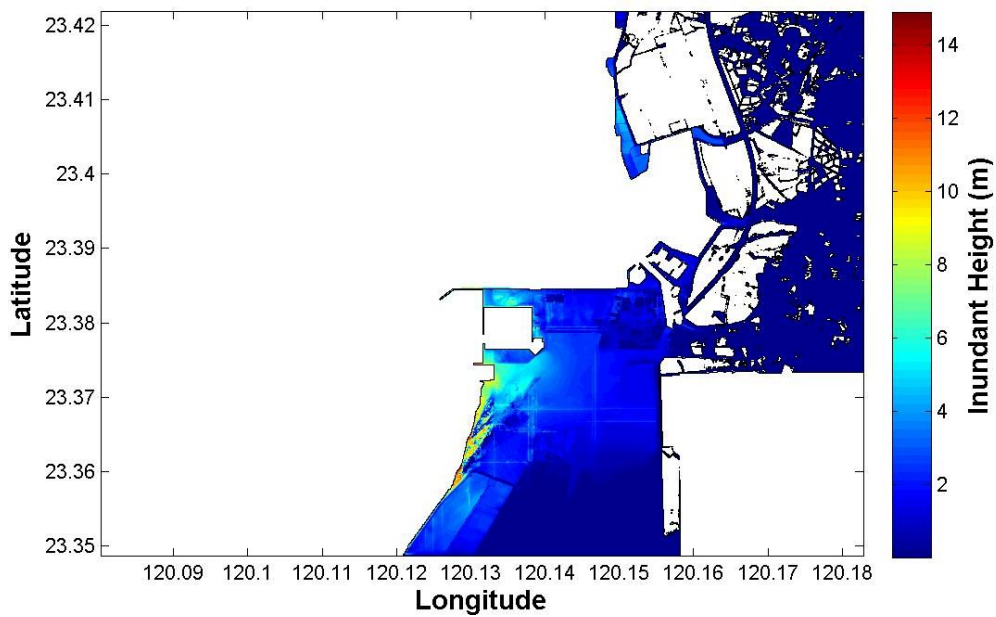
(d)



(e)



(f)

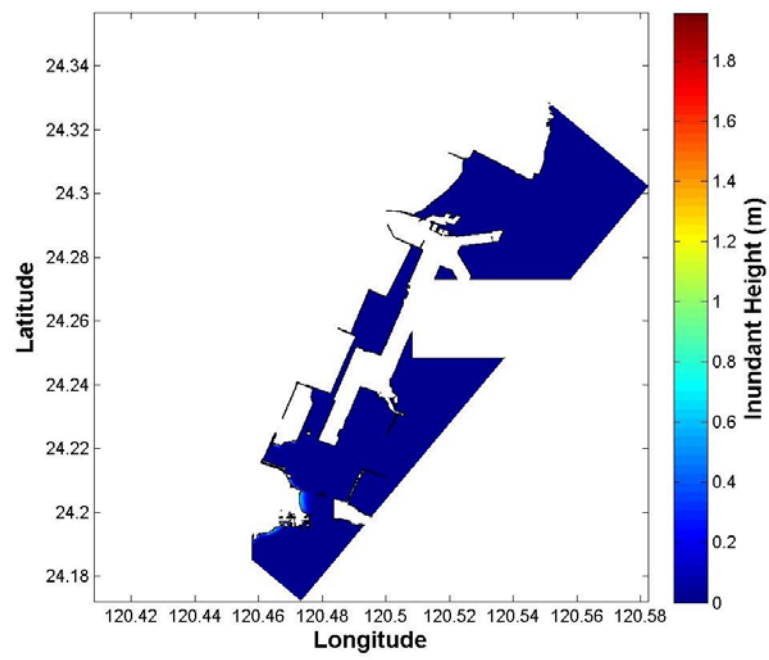


(g)

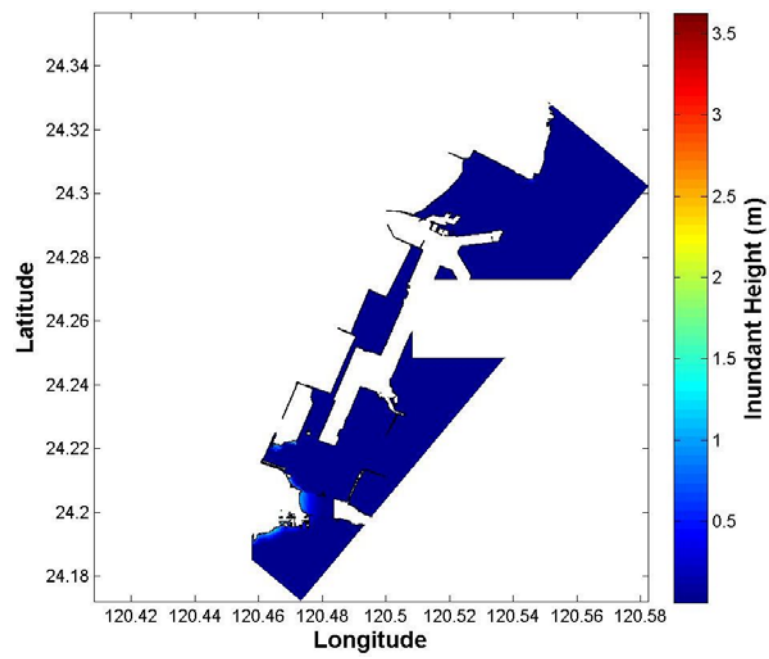
圖 5.11 布袋港之溢淹圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺
(f)6 公尺(g)10 公尺

5.3.3 臺中港之模擬結果

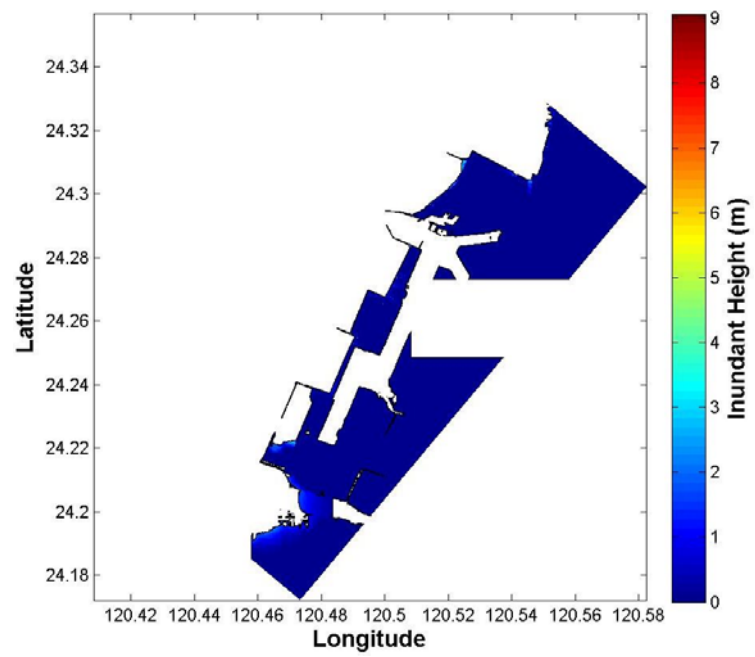
圖 5.12 為臺中港區在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於港區南方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下，對主要港區威脅性不大。4 公尺以上之波高時，主要港區會受到影響，其溢淹高程約 8 公尺左右(入射波高為 10 公尺時)；由於內陸部份地形資料未取得，因此無法準確預估溢淹範圍為何。



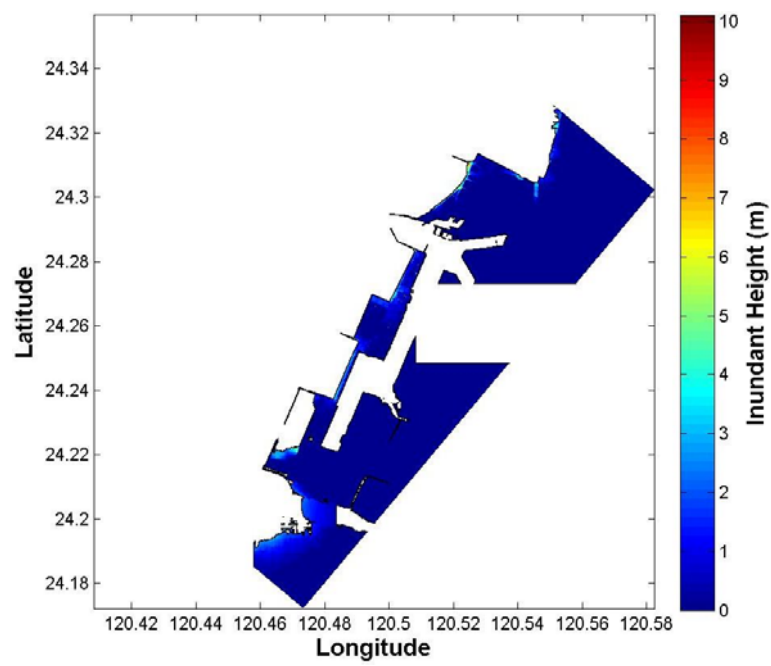
(a)



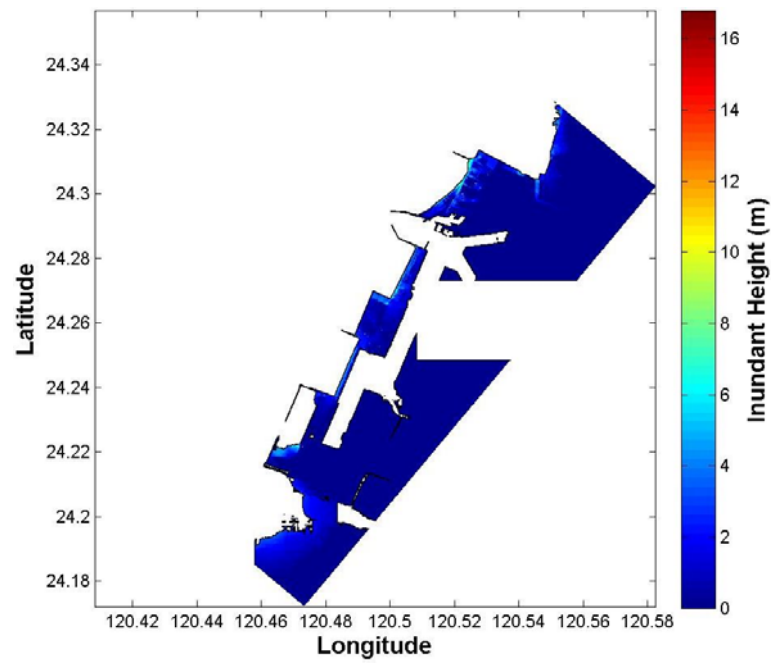
(b)



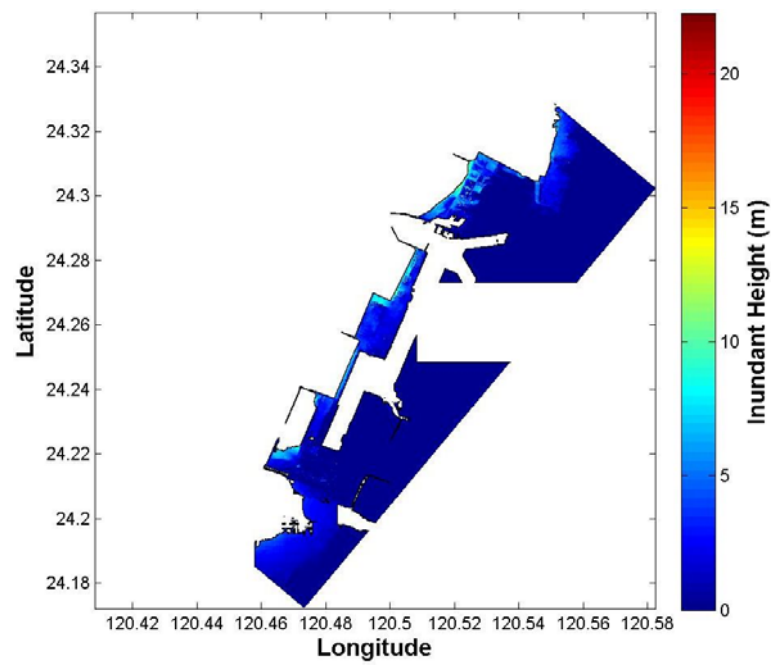
(c)



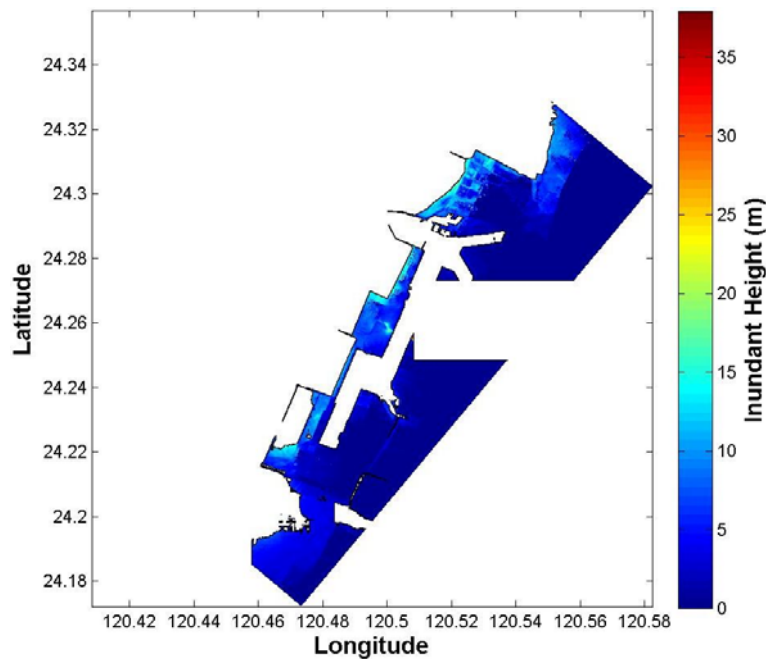
(d)



(e)



(f)



(g)

圖 5.12 臺中港之溢淹圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺
(f)6 公尺(g)10 公尺

5.3.4 溢淹機率

當大洋中發生海嘯時，對於近岸及內陸未必會造成災情，是否對陸域造成顯著影響端視最大波高與當地高程之關係。波高因緩坡地形而產生波高沿陸地方向急遽抬升之現象，稱為淺化效應(shoaling effect)；對應之海嘯波高稱為溯上高度(Run-up height)。如果溯上高度小於當地陸地高程或是海岸保護結構物，就可能不造成溢淹；也可能是溯上波高僅在內陸小範圍內造成數公分之溢淹情況，造成些許的災情。因此，對內陸地區而言，是否會造成溢淹是一種條件機率也是一種危害度；常見之危害度或是或然率分析可用機率來表示，例如地震危害度分析或是氣象預報中之降雨機率等等。

本節所提出之海嘯溢淹機率(Tsunami induced inundation probability)，意指海嘯發生後所造成之陸地溢淹機率，；若發生有如南亞海嘯或是日本海嘯規模之海嘯時，海嘯所攜帶之水體及漂流物可長

驅直入至內陸達數公里之遙。在此要特別說明的是，海嘯具有強大的動量，因此即使在海岸地區發生小規模之溯上或是溢淹，仍可能造成人命之損失。

由實務案例可以發現，即使外海的海嘯波高甚小，到達近岸時仍舊有可能越過堤防，惟小波高所造成之溢淹範圍及溢淹深度也較小；有鑑於此，本研究之海嘯溢淹機率(TIP)定義為當海嘯溢淹超過離岸50公尺，溢淹高度超過50公分時，即表示該處為發生溢淹。取50公尺是因為港區沿海地帶有較緩坡度之沿海沙灘或是礫灘地形，而在海堤地區若造成海水高過防波堤而溢淹，往往都會溢淹超過50公尺，因此本研究定義以50公尺為溢淹災害發生應當合適。由於目前為止並無類似之定義，依國內不同港區海岸特性可做適當之調整。

本研究定義溢淹條件為溢淹高度超過50公分，主要考量到海水溢淹陸地後要產生危害需要一定的溢淹高度與強度，因此在定義選取溢淹的條件下，以溢淹入陸地50公尺且溢淹高度超過50公分為溢淹條件。此兩條件與模式模擬地形的離岸50公尺岸線網格數長度比值，定義為溢淹機率，圖5.13 為溢淹機率定義之簡示圖：黑點為岸線，紅點為離岸50公尺線，藍點為水溢淹的點位，黃線為溢淹範圍線，此例紅點與藍點相疊的點位總計有3點，紅點總數為8點，因此溢淹機率為 $3/8=0.375$ 。本研究中溢淹機率之定義不採用面積之主因在於每個港區之面積均不一，有可能產生每個港區皆會得出相同之溢淹機率，會無法反映實際上海嘯之溢淹風險；而用海岸線作為溢淹機率之定義，主因是本研究認為此種方式較能反映出海嘯是否造成內陸溢淹仍須視當地高程而定之物理意義。

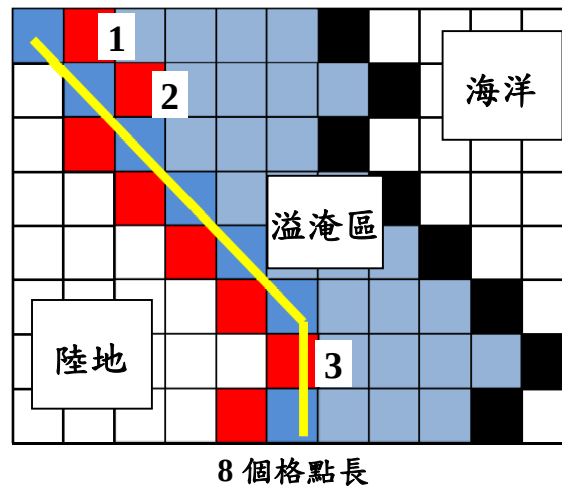
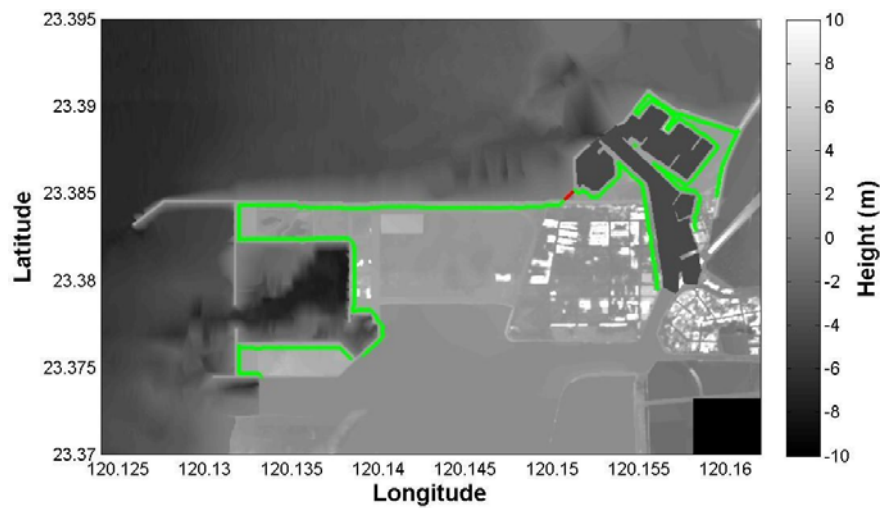


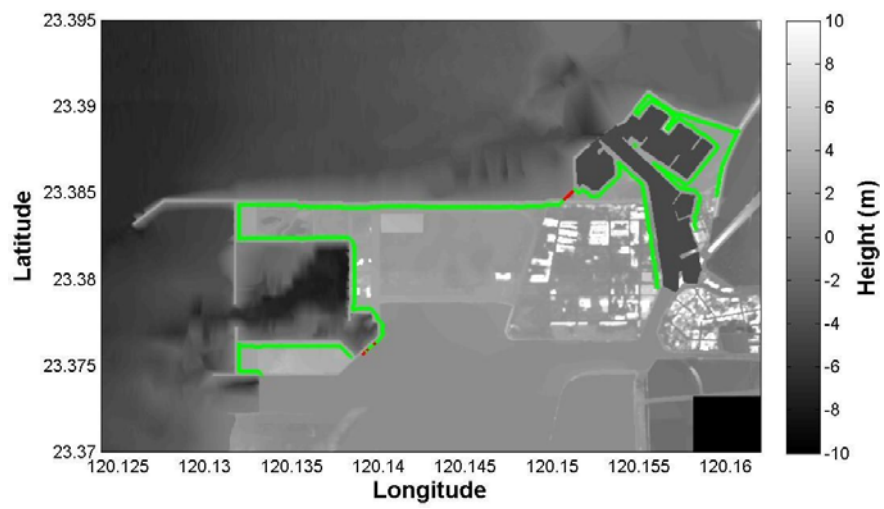
圖 5.13 溢淹機率簡示圖

5.3.4 布袋港及臺中港之溢淹點位分佈及機率

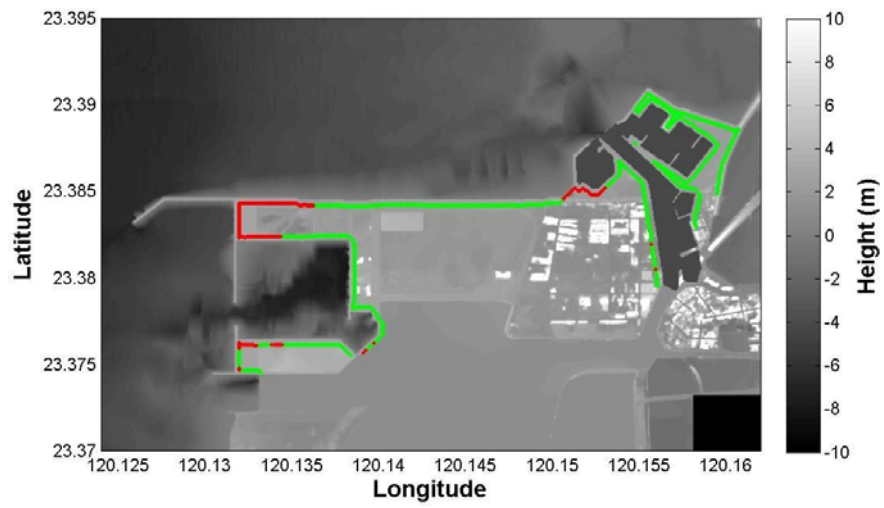
圖 5.14 及圖 5.15 分別為布袋港及臺中港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.3。



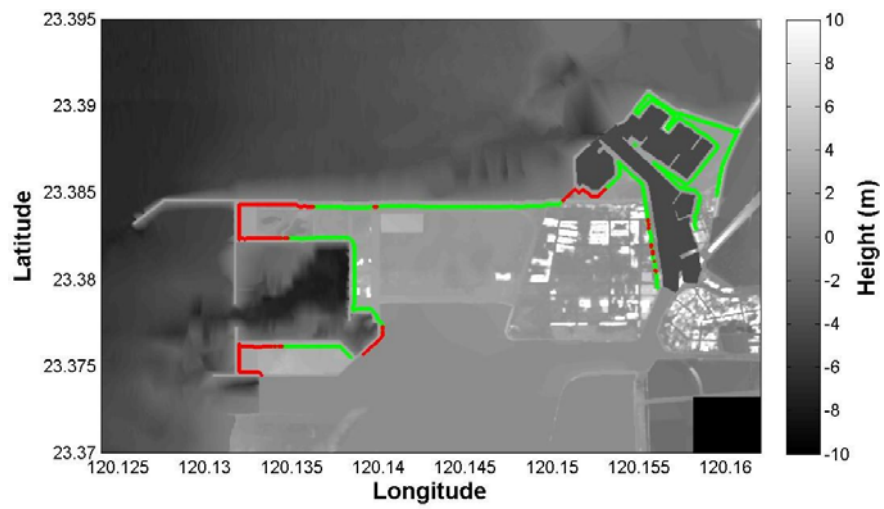
(a) 布袋港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



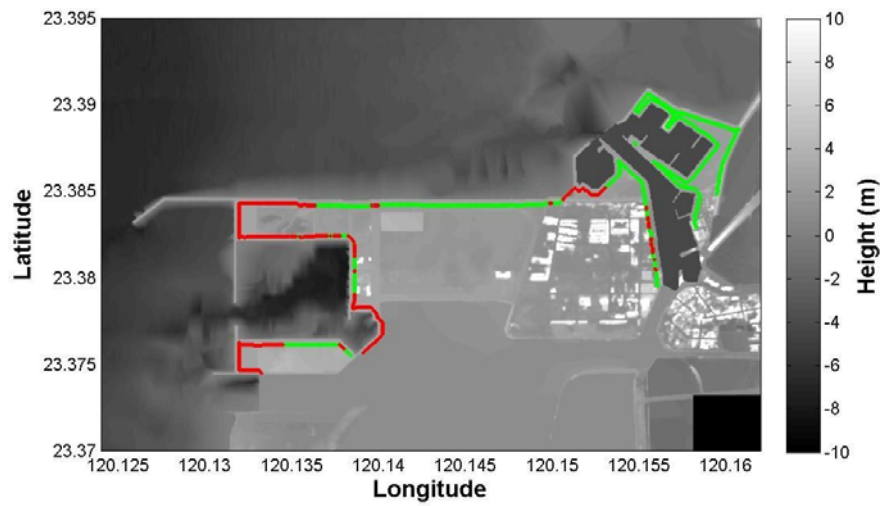
(b) 布袋港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



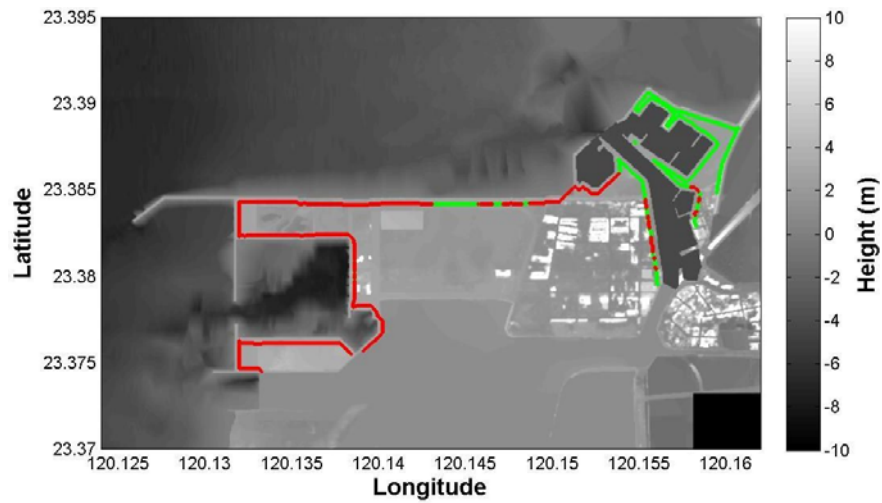
(c) 布袋港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



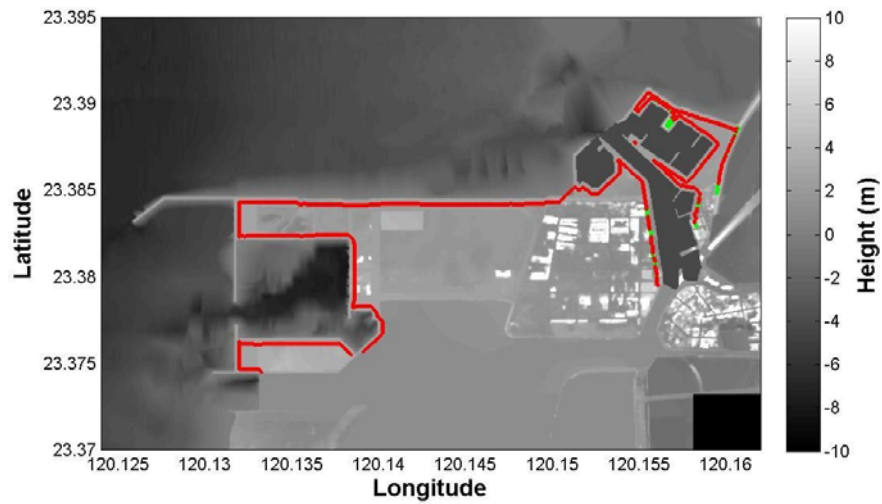
(d) 布袋港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e) 布袋港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈

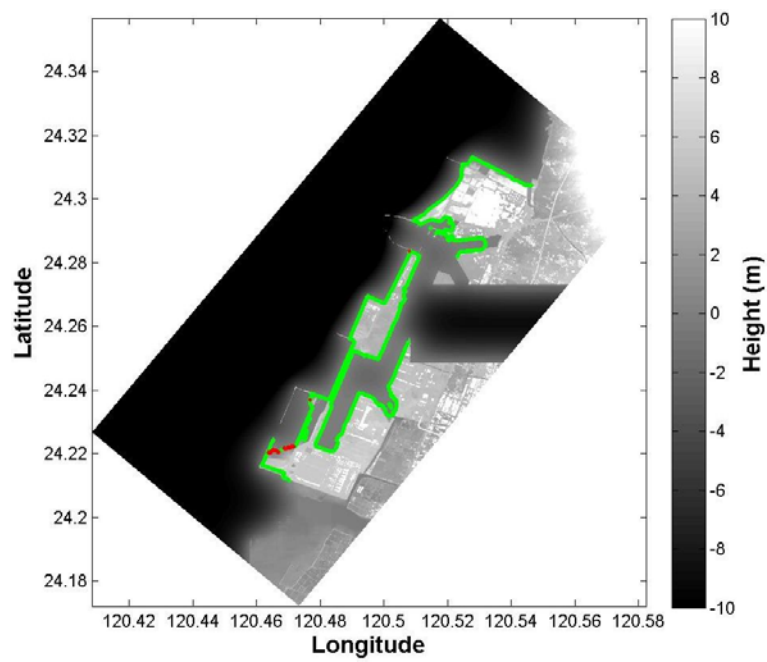


(f) 布袋港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈

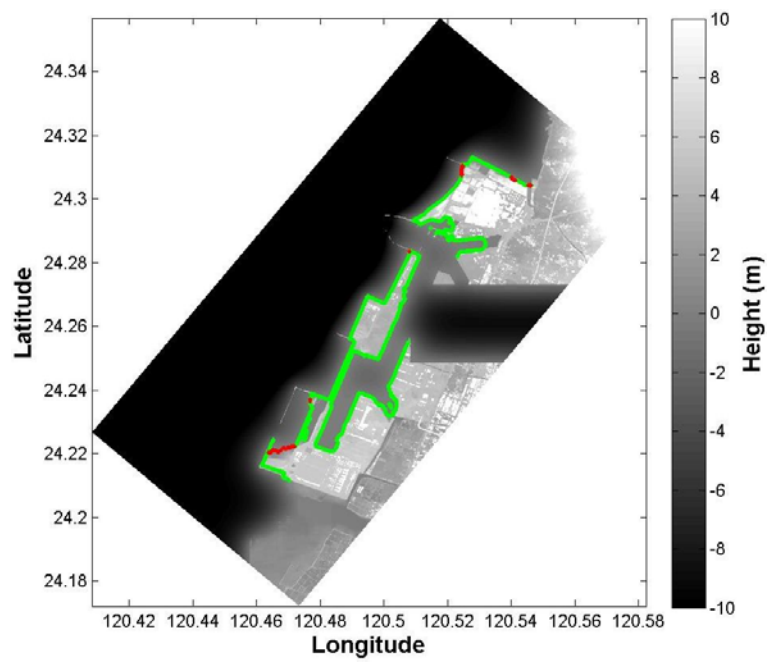


(g) 布袋港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

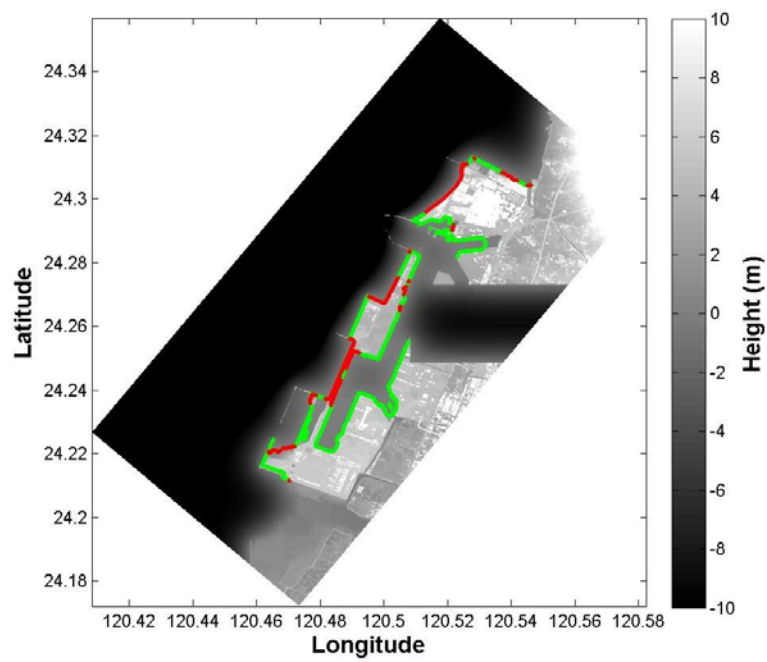
圖 5.14 布袋港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺



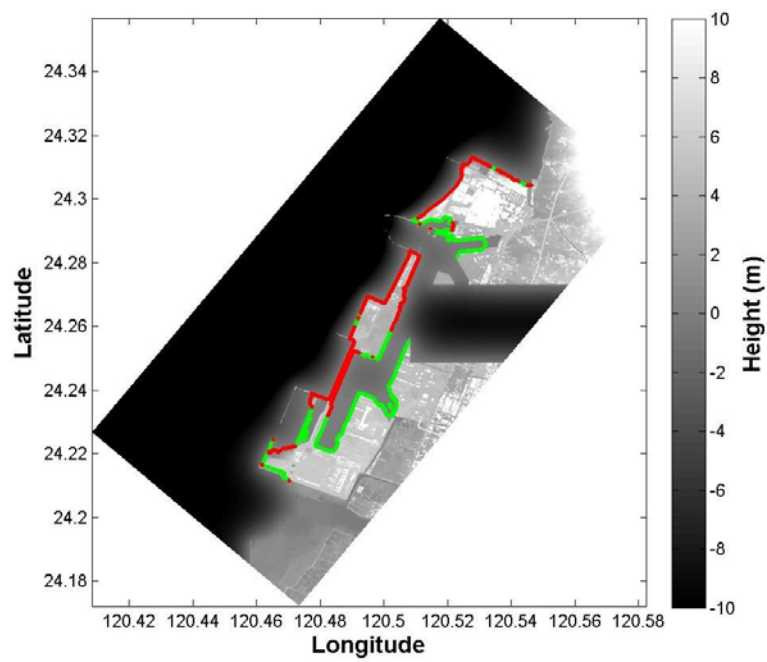
(a) 臺中港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



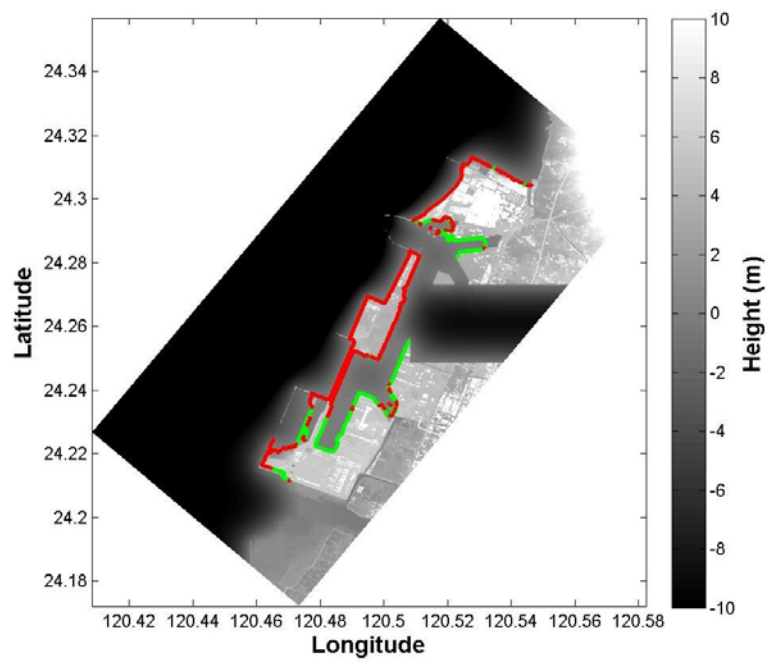
(b) 臺中港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



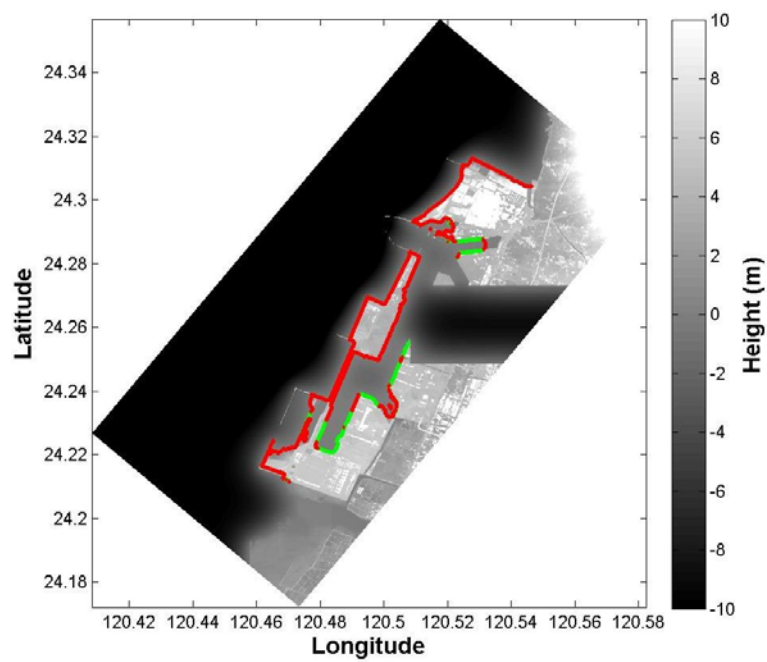
(c) 臺中港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



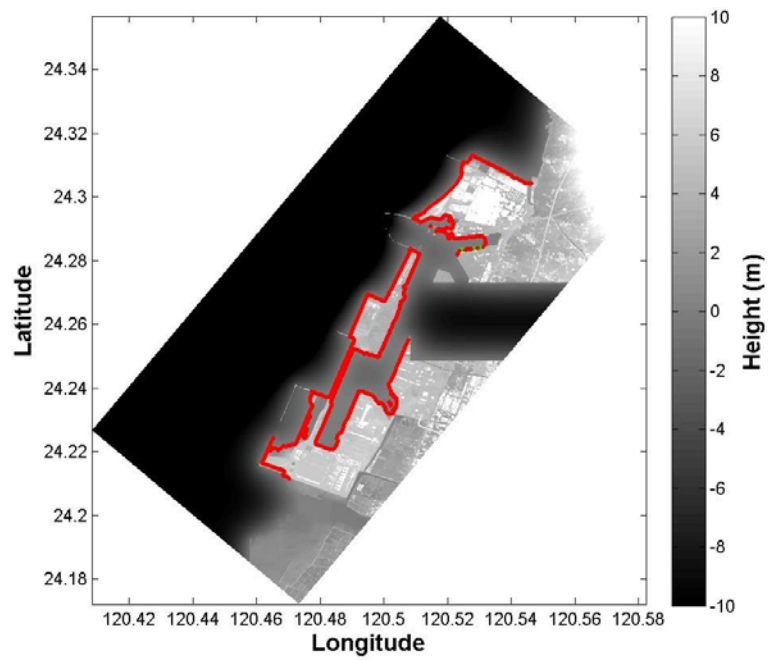
(d) 臺中港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e) 臺中港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 臺中港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 臺中港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.15 臺中港之溢淹點位分布圖(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

表 5.3 臺中港及布袋港各入射波高下對應之溢淹機率

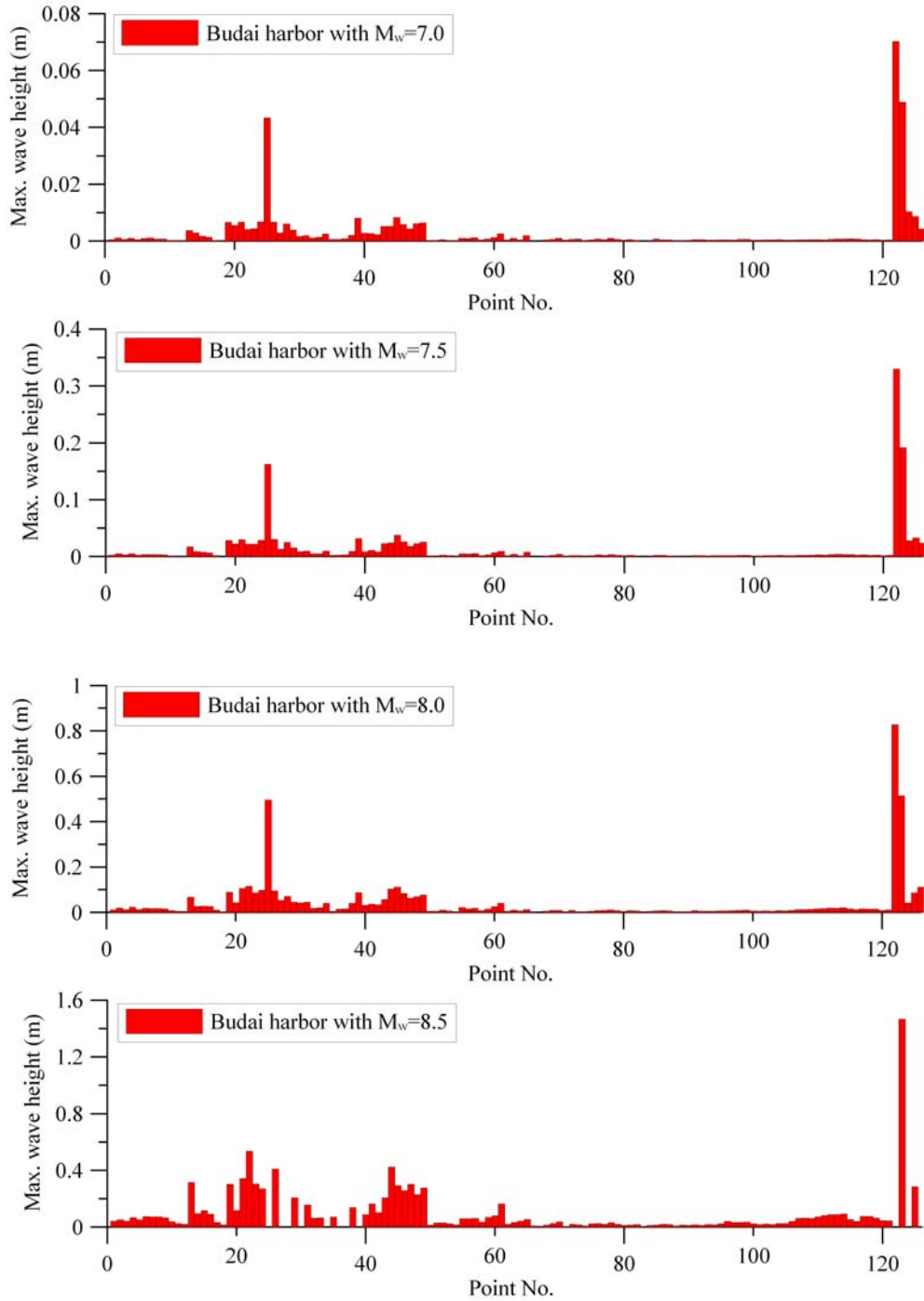
地點	臺中港			布袋港		
入射波波高(m)	離海 50 米的岸線點數	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	離海 50 米的岸線點數	溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5	10730	205	1.91%	2422	14	0.58%
1		420	3.91%		20	0.83%
2		2883	26.85%		415	17.13%
3		2883	46.12%		415	24.32%
4		6377	59.39%		833	34.39%
6		8327	77.55%		1404	57.97%
10		10593	98.66%		2275	93.93%

布袋港及臺中港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.16 及圖 5.17；布袋港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值不會超過 10 公分；在地震矩規模 7.5 以上則最大波高可達 6 公尺以上(地震矩規模 9.0 時)；分析結果顯示馬里亞納海溝(含亞普海溝)、伊豆小笠原海溝會對中部兩港口產生較大之外海波高；2011 年 3 月 11 日之東日本海嘯位於東經 142.597 度，北緯 38.486 度，地震矩規模 9，布袋港實測最大波高約為 0.35 公尺，臺中港實測最大波高約為 0.16 公尺，與本計畫假設震央位址 142.88 度，北緯 39.06 度(編號 59)，利用假設之參數計算出預測值，布袋港預測最大波高為 0.2 公尺，臺中港預測最大波高為 0.27 公尺，相較之下仍屬相當吻合。

另外，評估結果也顯示臺中港在大地震矩規模下外海最大波高不超過 2 公尺；雖然遠低於溢淹潛勢圖之入射波高，但因考量防災需求及建立各港統一之標準評估程序，故在本研究中臺中港之溢淹潛勢圖及相關分析，仍與布袋港一致，採用較高之入射波高作為模擬之條件。

根據表 5.3 之計算結果，可以以內插方式計算本計算假設地震矩規

模下及斷層參數所產生之最大波高對應之溢淹機率，其分佈如圖 5.18 及圖 5.19 所示。是否造成溢淹仍然要視外海波高及現地高程而定，由計算結果顯示，即使在地震矩規模 9 之情況下，溢淹範圍及機率仍非常有限。



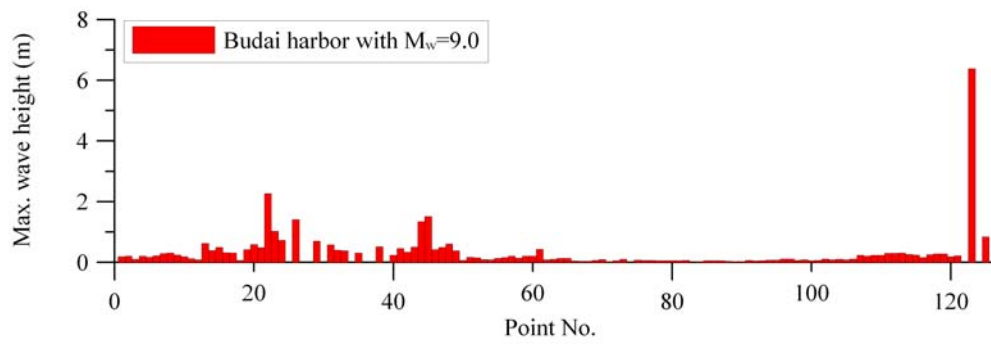
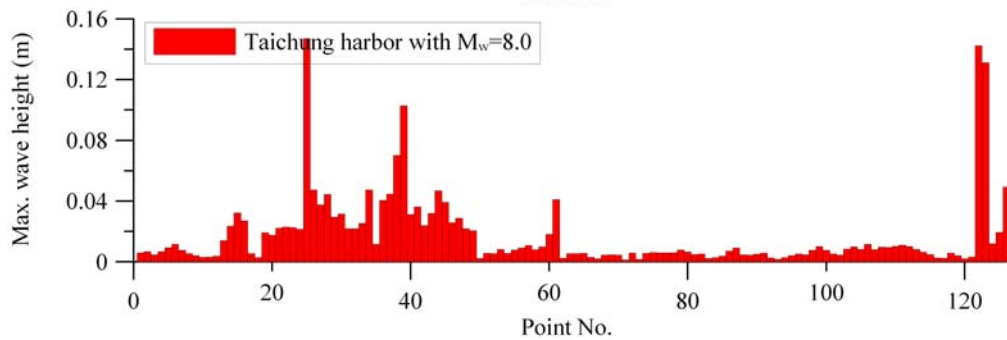
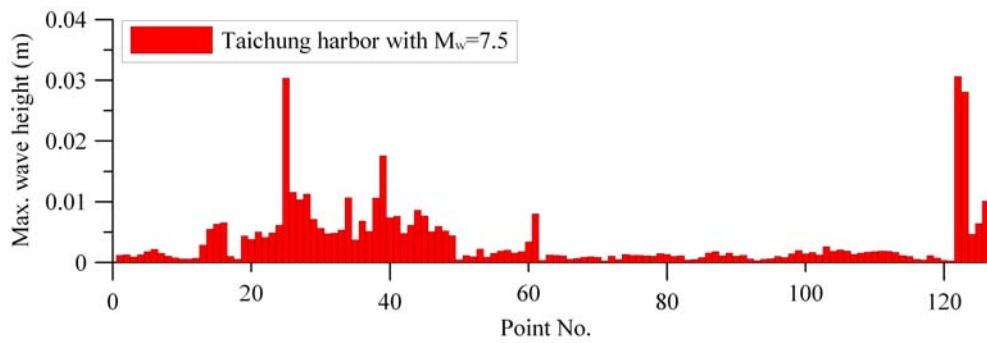
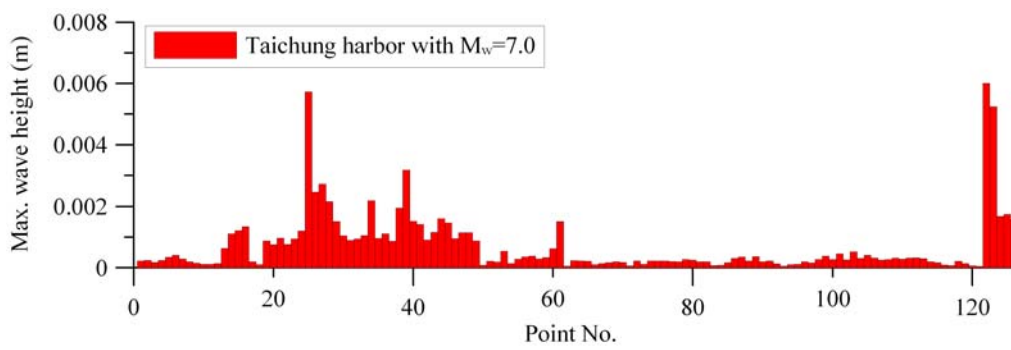


圖 5.16 布袋港在各種地震矩規模下之最大波高分佈



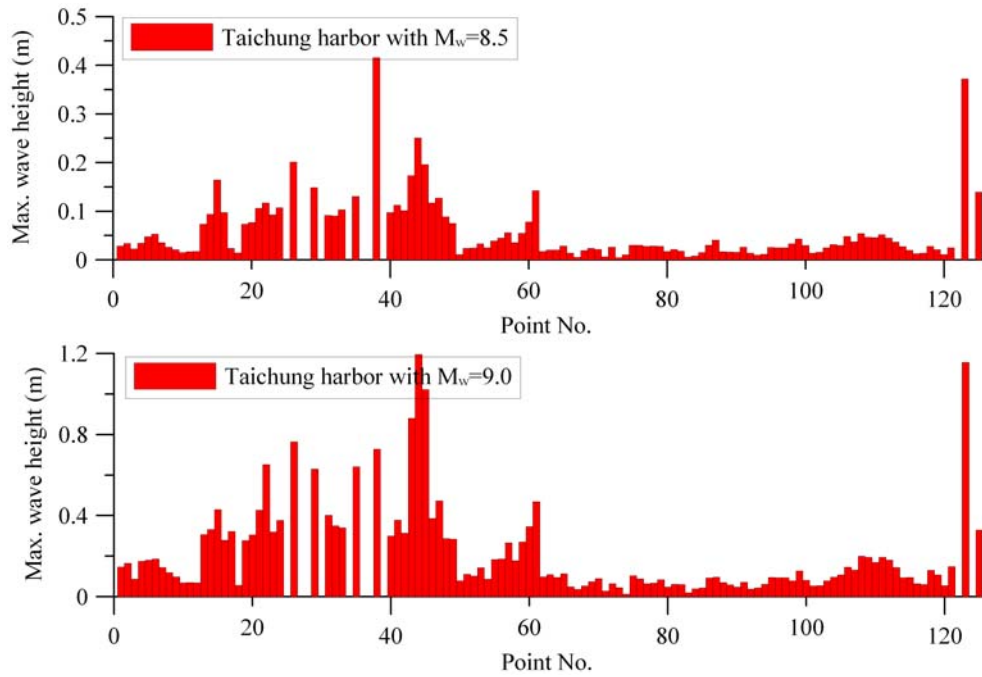
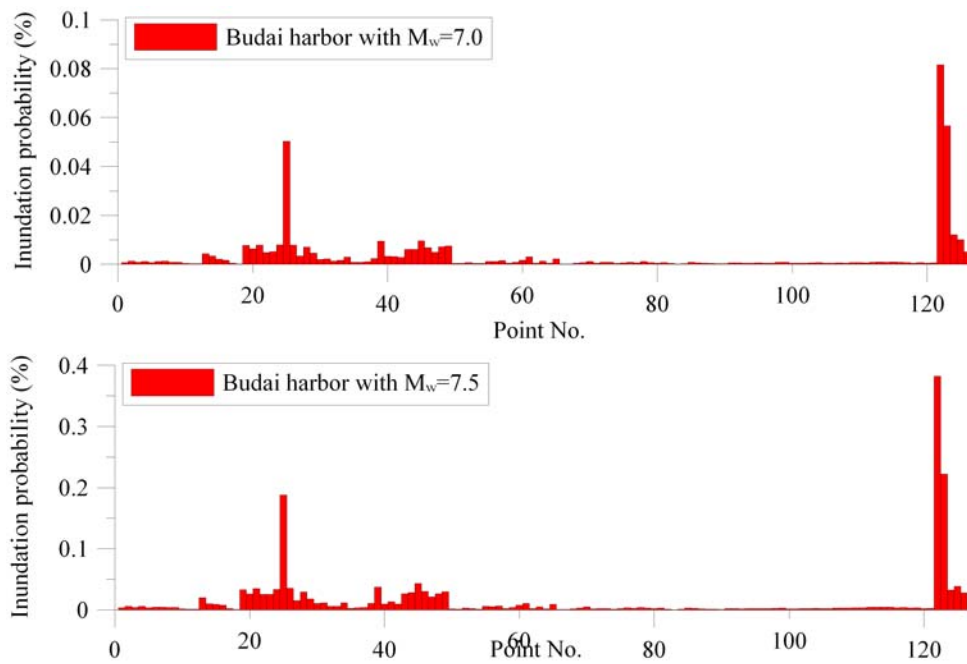


圖 5.17 臺中港在各種地震矩規模下之最大波高分佈



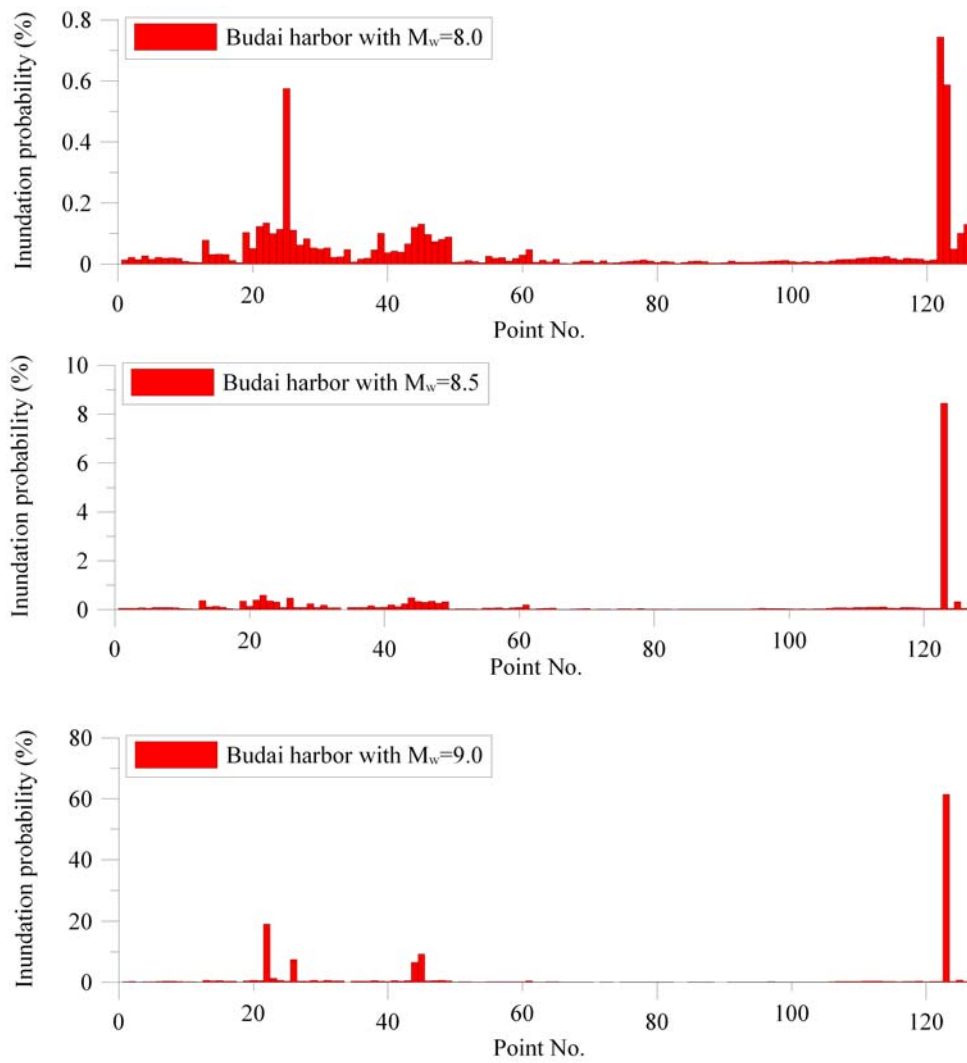
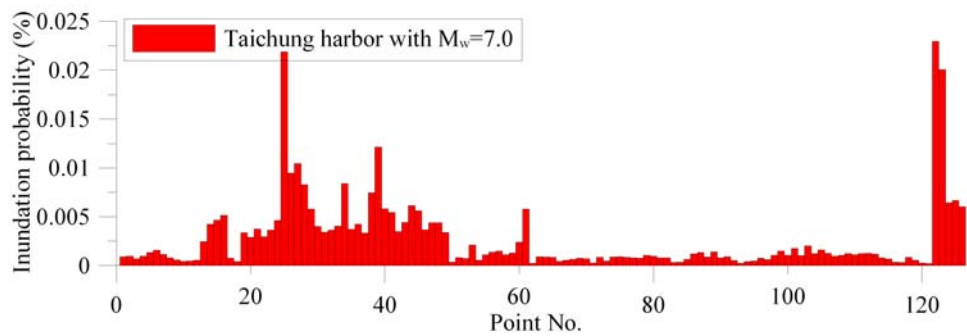


圖 5.18 布袋港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈



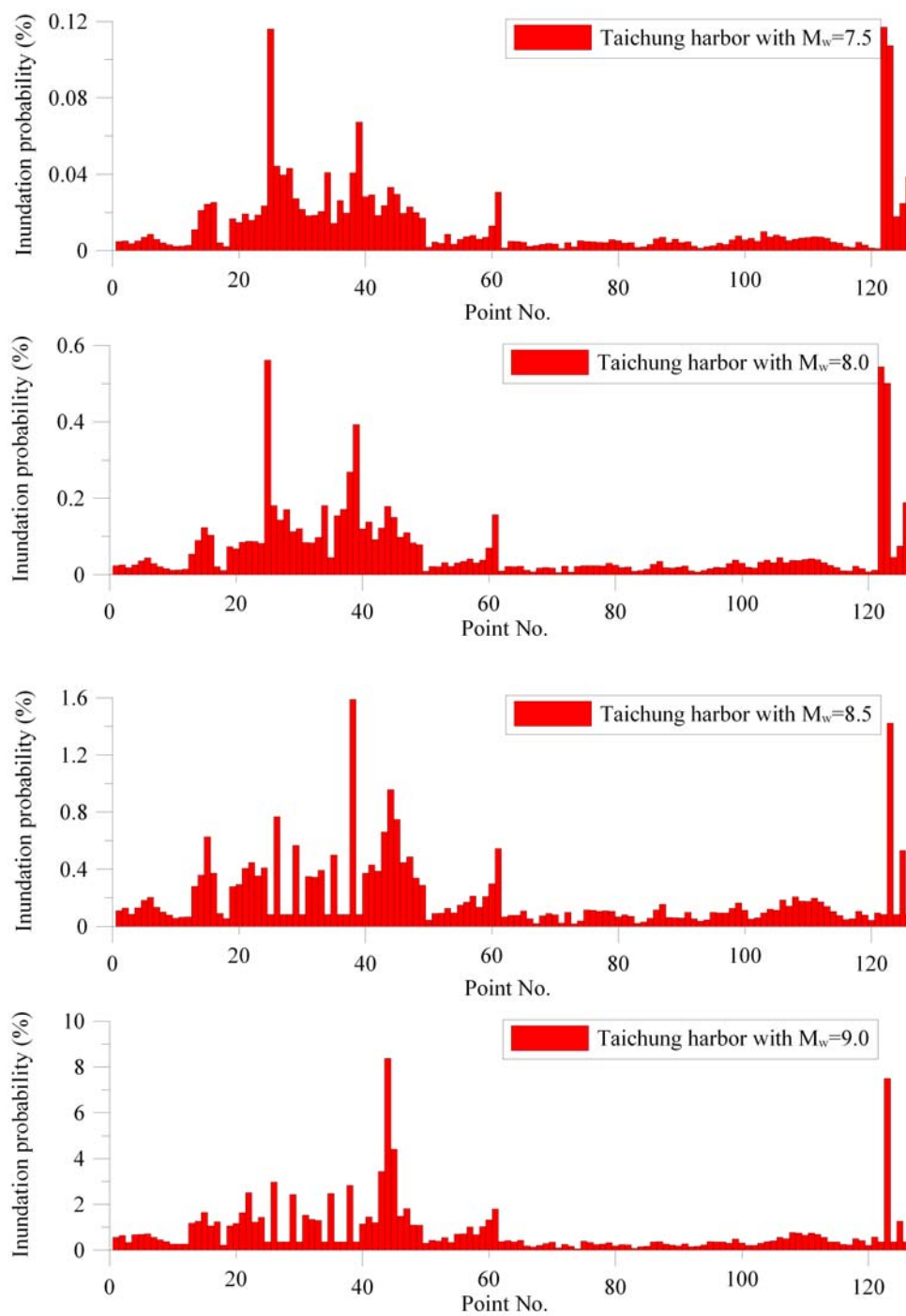


圖 5.19 臺中港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

另外，週期對於溢淹結果之影響已顯示於去年之成果報告中(陳等 2011)；再此節錄其內容以說明週期之影響。以臺北港為例，分別使用 10、20、30、40 分鐘週期之外海 2 公尺波高入射波，垂直入射台北港比較不同週期之溢淹機率結果，分別計算結果為下表 5.4。一般常見海嘯波波長為 10 分鐘到 30 分鐘，但也可能長達 1 小時，由表 5.3 可知本節比較 10 分鐘到 40 分鐘結果，差異度不大，但從 4 種週期溢淹結果觀察，週期越長其溢淹機率有減小趨勢。目前所計算之溢淹機率使用 20 分鐘做為溢淹模擬之條件。圖 5.20 為臺北港在臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果。

在這邊要特別說明的是，雖然溢淹模擬可以了解溢淹概況，但在模擬的過程中，並沒有考慮海嘯波與結構物互制的問題；換句話說，本計劃模擬過程中都假設現有結構物並未遭受破壞；理論上利用一維動量方程式 $\sum F_x = \rho Q(\bar{V}_{out} - \bar{V}_{in})$ 應可概估結構物所受之外力；但是在實務上由於流速仍需要做進一步之驗證，故本計劃並未估算海嘯波所產生之動量。

表 5.4 不同週期波高 2 公尺溢淹臺北港之溢淹機率

週期	10 分鐘	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘
溢淹機率	43.5%	43.05%	42.49%	40.4%

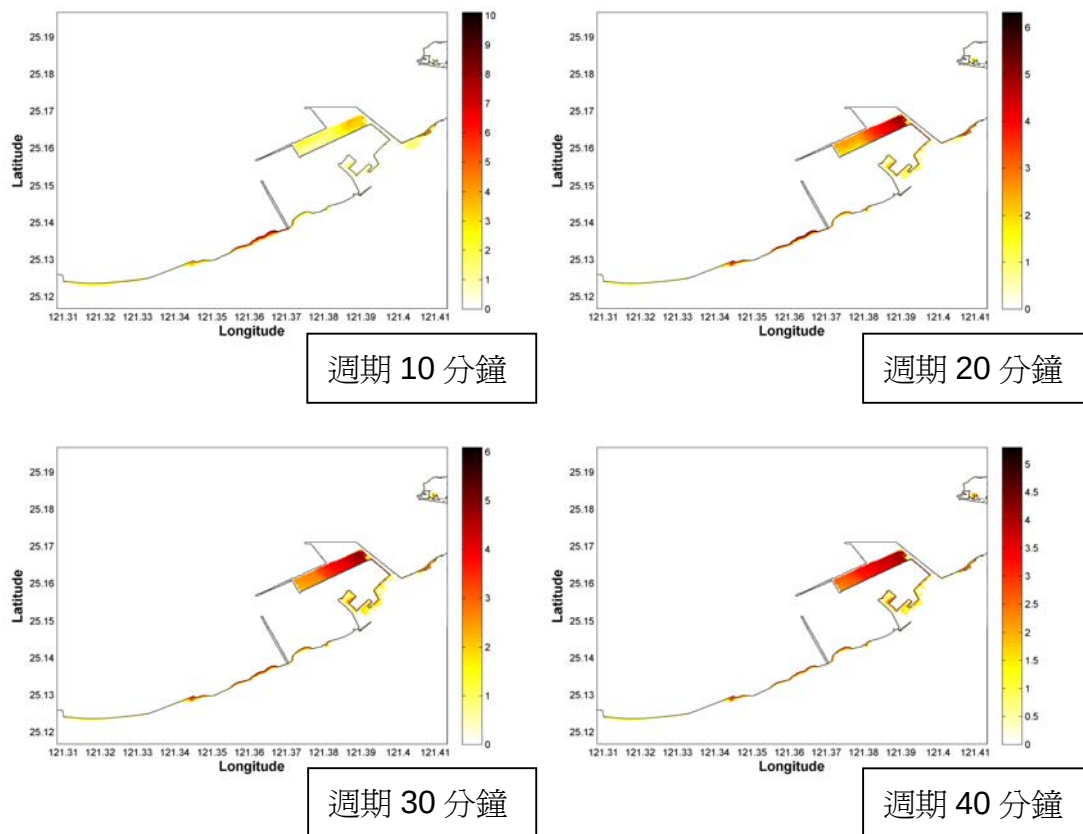


圖 5.20 臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果

5.3.5 海嘯地震且溢淹機率

完成各區域海嘯地震發生次數期望值之評估、海嘯對臺中港及布袋港產生之水位變化及使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率後，最後將五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上淺層海源地震機率及五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總各分量即得臺中及布袋港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率；其統計上之意義即是「某個特定點位面對所有潛勢震源點在未來 50 年及 100 年間發生超過地震矩規模 7 之海嘯且溢淹之或然率」。計算結果為布袋港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.1%，100 年為 0.2%；臺中港未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.18%，100 年為 0.33%。分析結果遠小於基隆港及臺北港之風險值，主要是因為台

中港及布袋港現有之高程可抵擋大部分震源及地震矩規模所產生之波高；也就是暗示雖然部份震源雖對臺中及布袋港之外海產生較大之波高，但因為高程之影響不至於產生溢淹，故其風險值甚低。

5.4 教育推廣及成果

為介紹及推廣說明交通部運輸研究所港研中心101年度「港灣環境資訊系統整合與應用研究」及「整合臺灣海岸及港灣海氣地象模擬技術」之研究相關計畫。包括「提昇海岸及港灣海域波浪模擬技術之研究」、「提昇海岸及港灣海域水位與海流模擬技術之研究」、「提昇海岸及港灣海嘯模擬之技術」、「港灣環境資訊服務系統整合及建置」及「港灣防波堤堤頭沖蝕特性及防制機制之研究」等5項計畫。特於101年12月7日（星期五）上午 10 時於交通部運輸研究所港灣技術研究中心二樓簡報室辦理「101年港灣海氣象模擬技術及資訊查詢教育訓練」；本計畫成果「海嘯預警系統介紹及操作說明」訂於當日11:00~11:20分由計劃主持人國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所副教授陳冠宇進行簡報及教育推廣，當日議程如表5.5所列。教育推廣之簡報說明請詳見附錄四。本年度計畫期末報告之簡報檔請詳見附錄五。

表5.5 101年港灣海氣象模擬技術及資訊查詢教育訓練議程表

項次	主 題	時 間	主講人	主持人
1	報到	9:30~10:00		
2	開幕典禮	10:00~ 10:10	林所長志明致詞	
3	TaiCOMS 風浪模擬 改善評估	10:10~ 10:30	劉正琪博士	邱永芳主任
4	布袋港、臺中港潮流模 擬及作業化預測評估	10:30~ 10:50	李兆芳教授	邱永芳主任
5	休息	10:50~ 11:00		
6	海嘯預警系統介紹及操 作說明	11:00~ 11:20	陳冠宇教授	簡仲璟科長
7	港灣環境資訊服務系 統介紹	11:20~ 11:40	林廷燦經理	簡仲璟科長
8	防波堤堤頭沖蝕特性 分析	11:40~ 12:00	廖奕鈞博士	簡仲璟科長
9	午餐	12:00~ 12:30		

第六章 結論與建議

本研究探討海嘯模擬技術為主軸，經由前期成果、海嘯資料蒐集、海嘯速報系統之建置、海嘯數值模式精進及實例探討和海嘯災害風險評估，得到部份成果，可供為臺灣港務公司及臺中港務分公司之海嘯來襲時應變參考。茲將本研究所獲致的結論與建議分成兩節來陳述。

6.1 結論

1. 有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等鄰國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度、減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。
2. 本年度完成海嘯模擬預警即時地震資料擷取系統，並增加日本防災科學技術研究所(NIED)所提供之 F-net 即時地震資料庫，以供與 USGS 與 CWB 資料庫結果比較。
3. 本計畫精進臺中港域及布袋港域海嘯數值模式之格林函數，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度；並與港灣環境資料庫進行整合以達全自動化操作需求。
4. 臺中港域及布袋港域計算結果，布袋港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.1%，100 年為 0.2%；臺中港未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.18%，100 年為 0.33%。分析結果遠小於基隆港及臺北港之風險值，主要是因為臺中港及布袋港現有之高程可抵擋大部分震源及地震矩規模所產生之波高；也就是暗示雖然部份震源雖對臺中及布袋港之外海產生較大之波高，但因為高程之影響不至於產生溢淹，故其風險值甚低。

6.2 建議

1. 根據既有歷史文獻紀錄，高雄及安平兩地曾有疑似海嘯之紀錄，可信度甚高；依海底地形而言，西南外海地形較緩有利於海嘯等長波溯上發展；依海嘯潛勢波源區而言，西南外海之海底斷層系統連接至馬尼拉海溝，此一區域被地質學者認為是海嘯之高風險區域。綜合以上諸點，實有需要對高雄及安平兩港進行海嘯災害風險評估。
2. 根據數值模擬顯示，由馬尼拉海溝所引起之海嘯，最快可於 20~30 分鐘抵達我國西南部之陸地；因此，爭取有限之應變時間對高雄及安平兩港甚為重要；現有之格林函數資料庫可提供兩港海嘯早期水位及到達時間之資訊，港區溢淹範圍模擬有助於相關單位劃定風險區及制訂應變措施之參考。
3. 海嘯早期之應變措施有助於降低海嘯可能發生之災損程度；港務機關人員之海嘯災防之觀念建立及系統之操作精熟程度，皆是有效率之海嘯災防軟性措施；因此，建議未來研究成果應定期與相關單位進行訊息之交流與整合。
4. 海嘯波傳遞至水深較淺的近岸時，受到淺化效應的影響，波高放大進而入侵沿岸地區不僅造成溢淹；當海嘯波遇海陸交界上的河口地形，所攜帶的龐大水體除了會跨過河道溢淹至內陸外，也會隨著河道繼續逆流而上，對河川中的結構物（如橋樑、攔砂壩或堤防等）之基底造成衝擊及沖刷，致使橋樑橋墩受損，所以橋樑橋墩可能遭受到之威脅評估也甚為重要，對疏散時路線的考量有所幫助。

參考文獻

1. 江新春(1976)“宜蘭平原之震測”，礦業技術第 14 卷，第 6 期，pp.215-221。
2. 許明光、李起彤(1996)「台灣及其臨近地區之海嘯」，台灣海洋學刊，第 35 期，第 1 號，pp.1-16。
3. 張國棟、許明光、Philip.L.-F. Liu、S.B. Woo(1999)，「東台灣海嘯溢淹模擬」，第 21 屆海洋工程研討會論文集。
4. 邱永芳、王慶福、富田孝史(2005)「海嘯發生與傳播特性之研究」，港灣報導，72 期，pp.13-22。
5. 李昭興、許明光、鄭文彬、蕭士俊、林欽隆、郭鎧紋、陳致宏(2006)「我國東北角海嘯警報系統建立之初始研究」，中央氣象局研究報告。
6. 陳陽益、陳冠宇、陳文山(2007)「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(1/4)」，交通部運輸研究所合作研究計畫期末報告。
7. 陳韻如(2007)，「屏東外海地震引發海嘯的數值模擬探討」，國立中央大學水文科學研究所碩士論文。
8. 張孟挺(2008)「台灣的海嘯威脅與高雄市溢淹之模擬」，國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所碩士論文。
9. 劉俊志、陳冠宇(2008)「以格林函數快速預報高雄港外海嘯高度」，中華民國第 30 屆海洋工程研討會。
10. 陳冠宇、陳陽益(2010)「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析(4/4)」，交通部運輸研究所合作研究計畫期末報告。
11. 陳冠宇、陳陽益(2011)「提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(1/4)」，交通部運輸研究所合作研究計畫期末報告。

12. Global CMT <http://www.globalcmt.org/>.
13. 日本防災科學技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED) <http://www.bosai.go.jp/>
14. 中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/>.
15. 美國 NGDC 資料庫 <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml>.
16. 美國地調所 USGS 資料庫 <http://www.usgs.gov/>.
17. 美國地調所 USGS 國家地震訊息中心 NEIC 資料庫
<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
18. 台灣港務股份有限公司/高雄港務分公司 <http://www.khb.gov.tw/>
19. 台灣港務股份有限公司/台中港務分公司
<http://www.tchb.gov.tw/ch/Index.aspx>
20. Cho, Y.-S. (1995), "Numerical Simulations of Tsunami Propagation and Run-up," Ph. D. Thesis, Cornell University.
21. Chen, Guan-Yu, and Chin-Chu Liu (2009), "Evaluating the Location of Tsunami Sensors: Methodology and Application to the Northeast Coast of Taiwan," Terr. Atmos. Ocean. Sci., 20(4), pp.563-571, doi: 10.3319/TAO.2008.08.04.01(T).
22. Chen, Guan-Yu, Chin-Chu Liu, and Chia-Hao Lin (2011), " Probabilistic Forecast of Tsunami Inundation (PFTI) and Earthquake-induced Tsunami Inundation Probability (ETIP) — Algorithm and Application to the Southwest Coast of Taiwan," Tsunami Simulation for Impact Assessment, pp.74-83.
23. Gutenberg, B., and C.-F. Richter(1944), "Frequency of earthquake in California," Bull. Seismol. Soc. Am., 34, pp.185-188.

24. Gusiakov, V. K. (2005), "Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific," *Marine Geology*, 215, pp.3-9.
26. Kirby, S., E. Geist, William H. K. Lee, David Scholl, and Richard Blakely (2005), "Tsunami Source Characterization for Western Pacific Subduction Zones: A Preliminary Report," USGS Tsunami Subduction Source Working Group, pp.21.
27. Hanks, C. T. and H. Kanamori (1979), "A Moment Magnitude Scale," *Journal of Geophysical Research*, 84(85), pp.2348-2350.
28. Loomis, H.G. (1979), "Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions," *Mar. Geod.*, 2(1), pp.27-39.
29. Liu, P. L.-F., Y.-S. Cho, S.-B. Yoon, and S.-N. Seo (1994), "Numerical Simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii, " In *Recent development in tsunami research*, edited by M.I. El-Sabh, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp.99-115.
30. Liu, P. L.-F., S.-B. Woo and Y.-S. Cho (1998), *Computer programs for tsunami propagation and inundation.*, Cornell University.
31. Mansinha, L. and Smylie, D. E.(1971), "The displacement fields of inclined faults,"*Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), pp.1433-1440.
32. Shuto N. (1991) , "Numerical Simulation of Tsunamis — Its Present and Near Future," *Natural Hazards* 4, pp.171-191.
33. Scordilis, E. M. (2006), "Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude," *J. of Seismology*, 10(2), pp.225-236.

34. Wells, D.L., and K. J. Coppersmith (1994), “New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, ” Bulletin of the Seismological Society of America.
35. Wang, X. M. and P. L.-F., Liu (2007), Cornell Multigrid Coupled Tsunami model COMCOT) User Manual, Cornell University.
36. Xu, Z. (2007), “The All-source Green's Function and its Applications to Tsunami,” Science of Tsunami Hazards, 26(1), pp.59-69.

附錄一 互逆格林函數之驗證與應用

■ 以實例說明互逆格林函數的計算模式設定與驗證

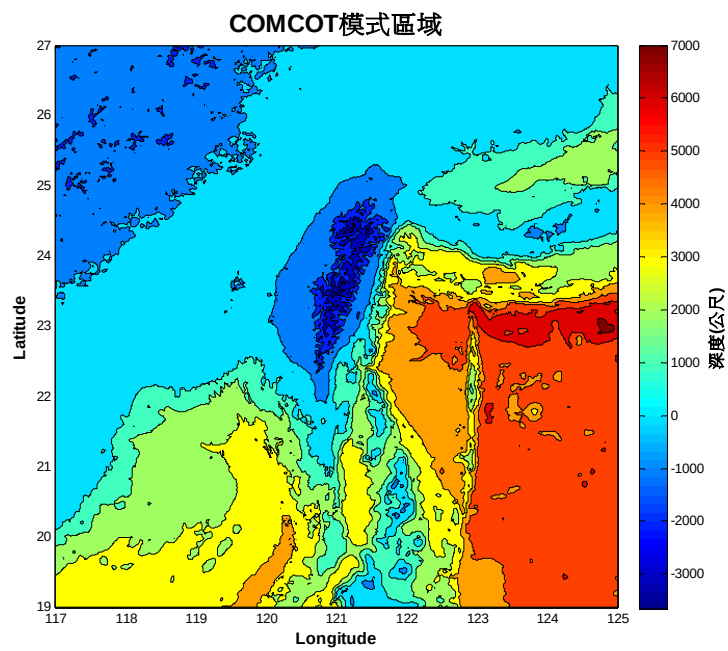
本計劃使用海嘯數值模式COMCOT (Liu et al., 1998)計算水位傳播，模式可選用的淺水方程式包含線性或非線性兩者；本案例採用線性淺水方程式用以描述海嘯波在海域深度超過 50m的變化，不考慮非線性及摩擦力的影響。模式區域範圍在東經 117° 至 125°，北緯 19° 至 27° (圖A1)，網格點 481*481，解析度 1 分。以高雄為例，首先在高雄港外水深 50m的定點s(圖A2)，並且給予水位高度 1m當成波源振幅，經模式計算水位傳播 3 小時(圖A3-A5)，除s點之外，所有的點皆視為接收點r，而s點即為之後海嘯高度預報的水位點。

$$S_t + Q_x + R_y = 0 \quad (A1)$$

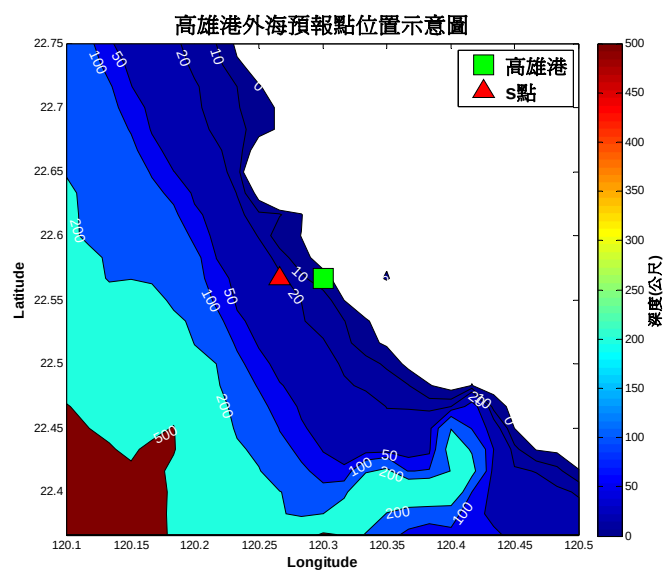
$$Q_t + gdS_x = 0 \quad (A2)$$

$$R_t + gdS_y = 0 \quad (A3)$$

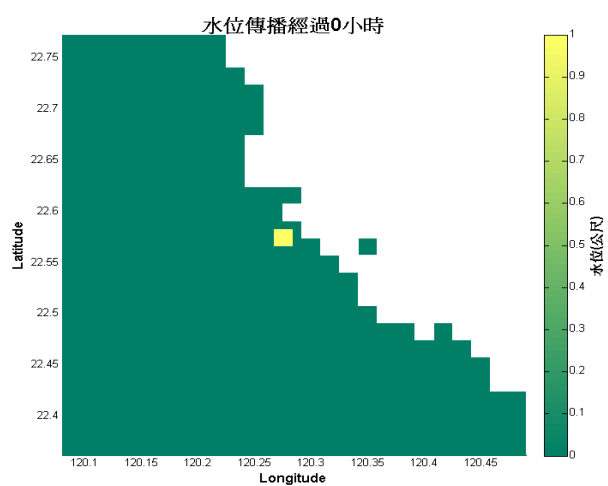
(A1)~(A3)式即是線性淺水方程式；其中 S 為水位高度，Q、R 各為 x、y 方向的流量，d 為總水深，g 為重力加速度。故對於接收點而言，其互逆格林函數值可事先建立資料庫，當地震發生時，僅需知道初始水位後，即可預測當地之實際水位。



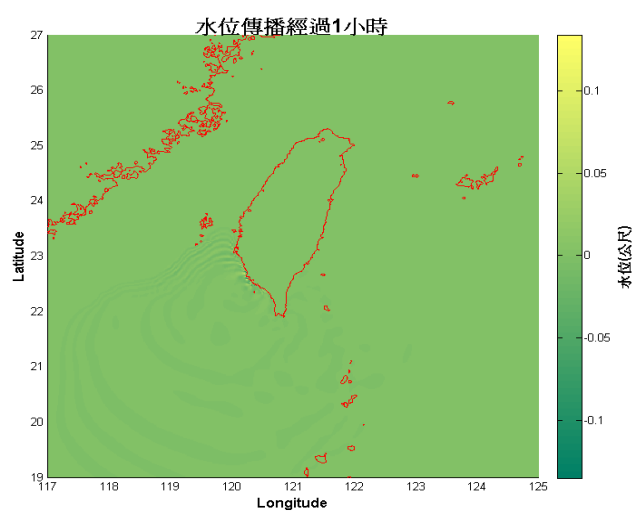
圖A1 互逆格林函數驗證之計算區域圖



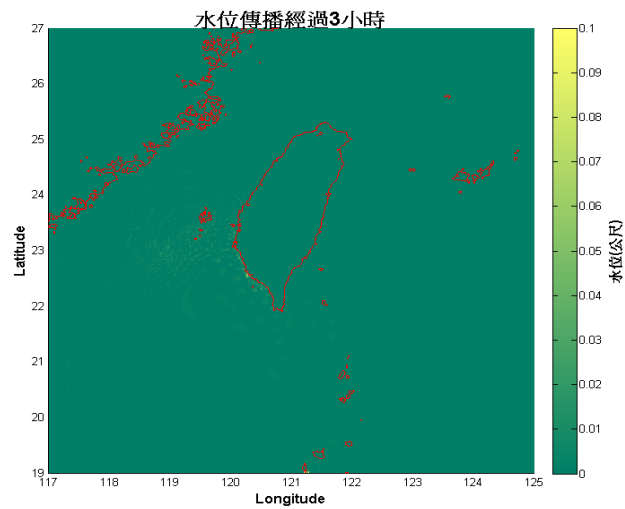
圖A2 海嘯高度預報點(r點)位置圖



圖A3 模式在r點設定1m初始水位



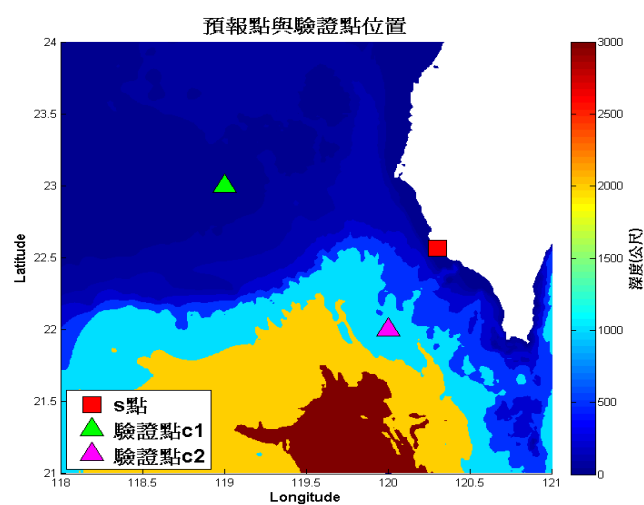
圖A4 r點初始水位傳播1小時後



圖A5 r點初始水位傳播3小時後

■ 互逆格林函數的驗證

為了驗證由模式所計算結果之正確性，在此選擇 s 點設置起始波源進行模式水位傳播，之後各別在 c1 與 c2 點(圖 A6)設置同樣波源進行傳播，由這三次模擬可得到 s、c1、c2 三點相互傳播的 GF (圖 A7)，基本上互傳的結果相一致，儘管由數值模式計算產生的誤差導致了微小差異。



圖A6 互逆GF驗證點的位置圖

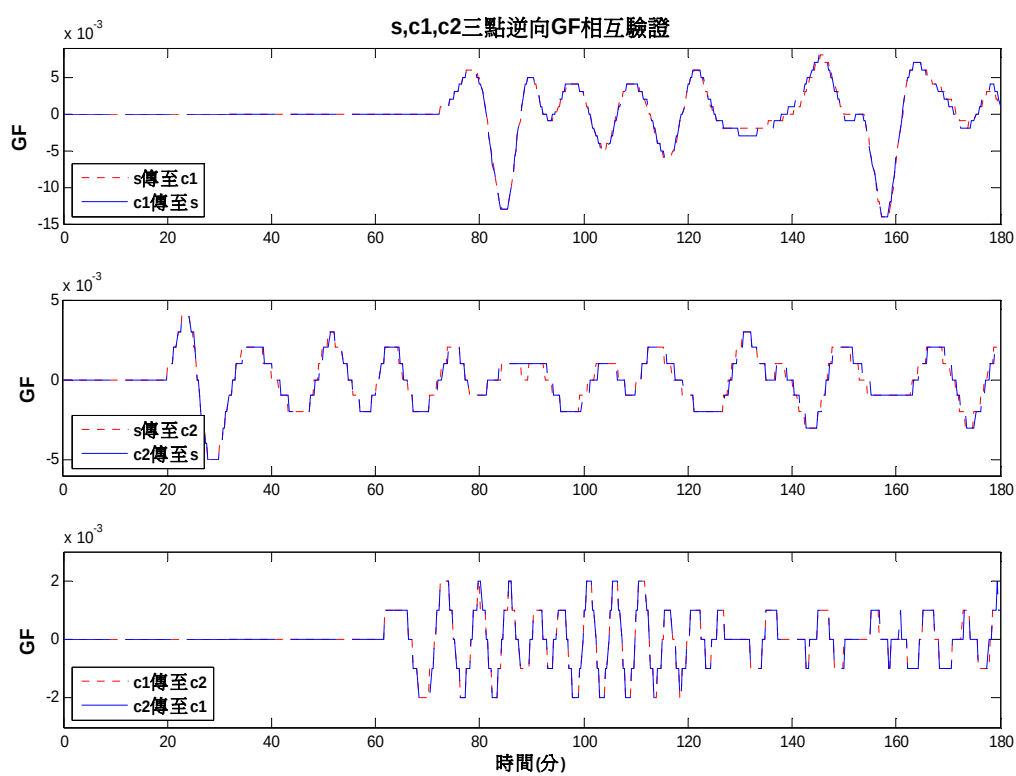


圖 A7 GF 與互逆 GF 一致性之驗證

另外，也利用南亞海嘯之案例，將互逆格林函數之結果與海嘯數值模式之結果比較，如圖 A8 所示。結果顯示，兩者甚為相符。在此必須強調的是，格林函數之概念雖可以提高海嘯模式計算效率等諸多優點，但不代表不需要海嘯數值模式；後續之海嘯早期預警系統資料庫之建立，仍舊依賴海嘯數值模式；此外，互逆格林函數之概念即是應用線性系統之可逆性，故在選擇接收點位時，就必須仔細考慮該點之水深是否符合線性之要求；如要計算港內之波高時，則必須使用其他方式加以估算。

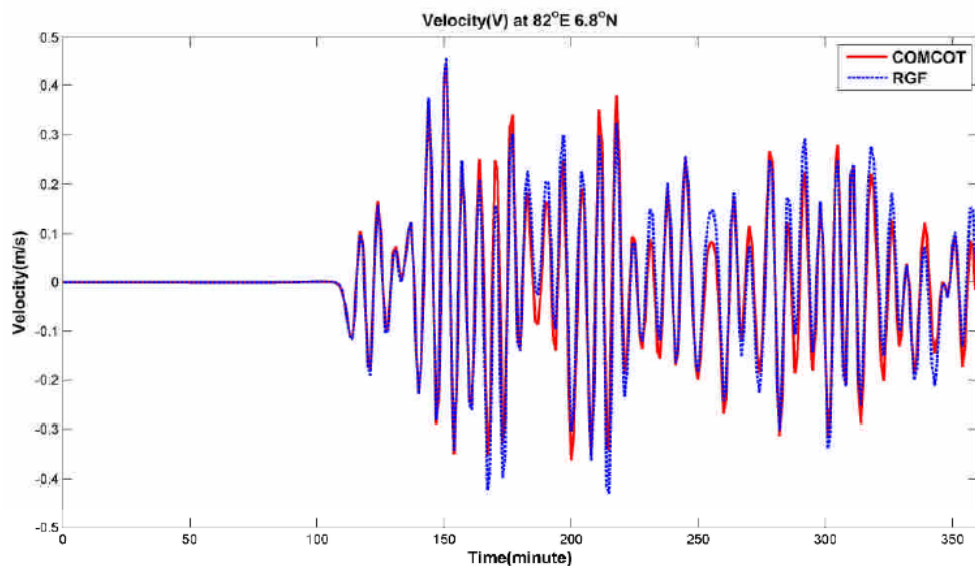


圖 A9 COMCOT 海嘯模式結果與互逆格林函數之比較
(斯里蘭卡 東經 82 度 北緯 6.8 度)

■ 外海海嘯預報的格林函數應用(以高雄為例)

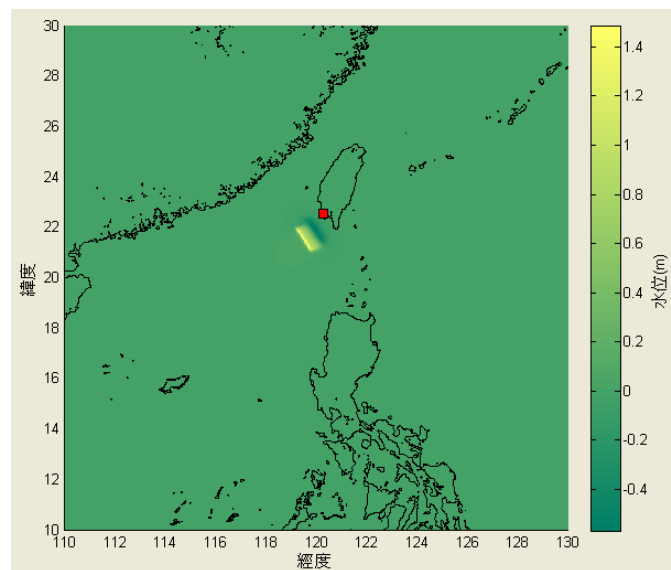
將波源區的所有格林函數乘上當地海床的垂直位移後相疊加，即可求出海嘯高度與到達時間。以下進行案例測試來了解發生海嘯對接收點r的水位影響，第一次試驗代入斷層模式所用的參數同陳(2007) 引用的 2006 年屏東大地震斷層參數，其參數來源為Harvard CMT世界地

震網，使用的地震規模為Kanamori(1977)提出的地震矩規模(moment magnitude, M_w)，因第二場地震對水位影響不大(陳, 2007)，所以僅採用第一場地震的斷層參數。案例假設震央在東經 119.5° 、北緯 21.5° 發生地震矩規模高達 8 的海底地震所引發的海嘯，斷層參數如表A1。

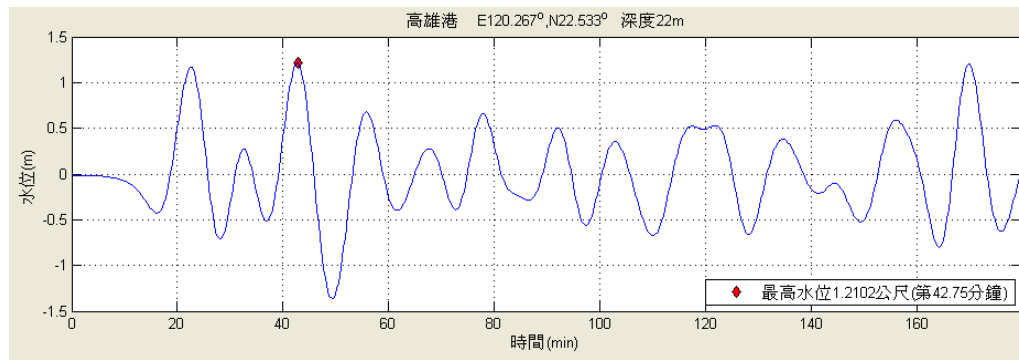
表A1 的參數代入斷層模式所得的海嘯起始水位如圖A10。經由互逆格林函數計算出的s點預報水位結果如圖A11。預報結果顯示在接收點r處受海嘯作用引起的水位最大值達 1.2102m(接近第 42 分)，對高雄港近岸有明顯之影響。

表A1 互逆格林函數模擬案例之斷層參數表

震央位置	東經 119.5° 北緯 21.5°
震源深度	5000mm
斷層長度	119735mm
斷層寬度	59867.4mm
平均滑移量	3.53mm
strike direction	329 度
dip angle	15 度
slip angle	110 度
地震矩規模	8.0



圖A10 RGF測試案例在s點的海嘯起始高度

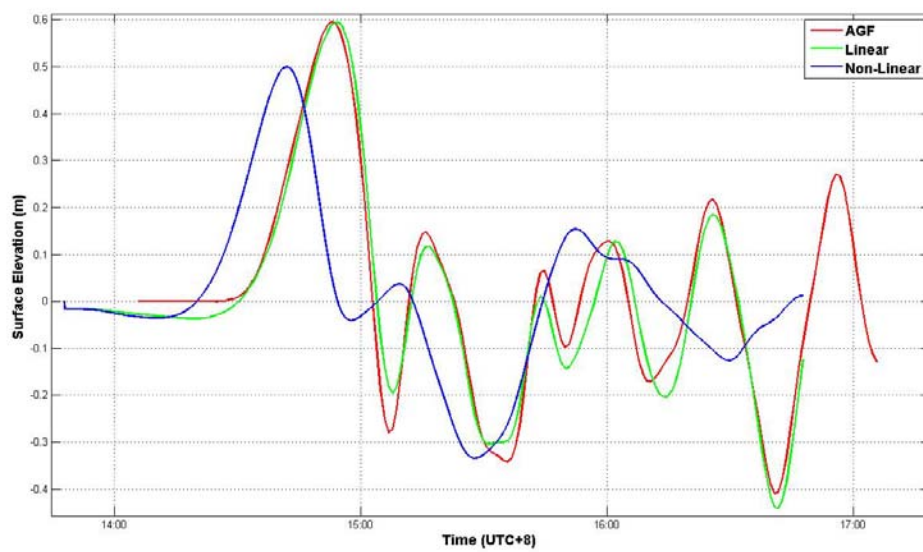


圖A11 於高雄港接收點r的海嘯高度預報

■ 以虛擬震源驗證互逆格林函數、COMCOT 線性模式與非線性模式之差異(以台中港為例)

在本節中，我們在台中港外海虛擬一個地震矩規模 $M_w 7.5$ ，深度為 10km 之海底地震，虛擬震央位址為東經 119.7 度，緯度 24.8 度，斷層參數 strike/dip/slip 分別為 30/45/90，利用互逆格林函數、COMCOT 線性模式及非線性模式再次比較三者在水位時序列上之變化；至於空間之傳播行為則因互逆格林函數與傳統海嘯模擬之計算程序相反，因此並無法比較三者之間之差異。

圖 A12 為互逆格林函數、COMCOT 線性模式及非線性模式在台中港預報點位之水位變化；由圖可以知道互逆格林函數及線性模式相當吻合，非線性模式則是相位約略早於前二者之結果，其波高亦較線性模式為低。



圖A12 互逆格林函數、COMCOT線性模式及非線性模式在台中港預報點位之水位變化

附錄二 速算系統介面及操作說明

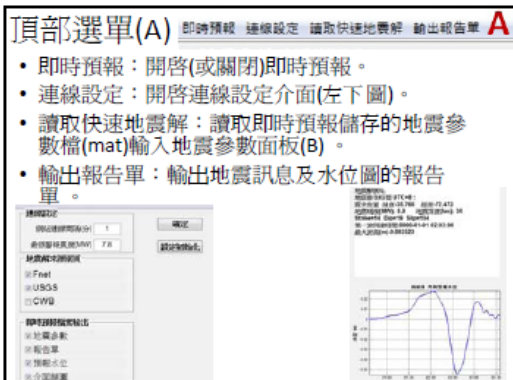
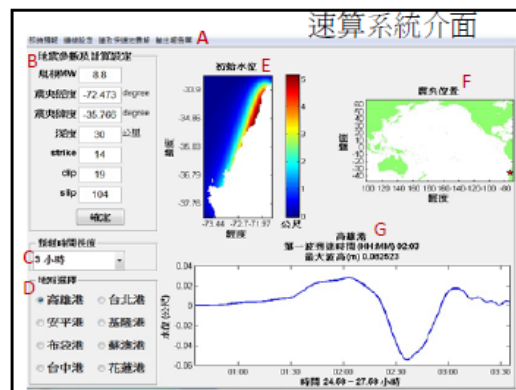
台灣國際商港海嘯速算系統

教學大綱

1. 速算系統介面介紹
2. 輸入地震參數操作示範
3. 即時預報設定介紹
4. 即時預報操作示範

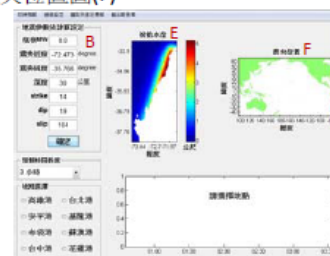
目前進度

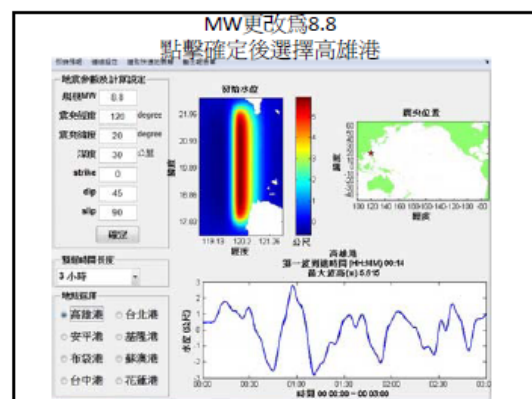
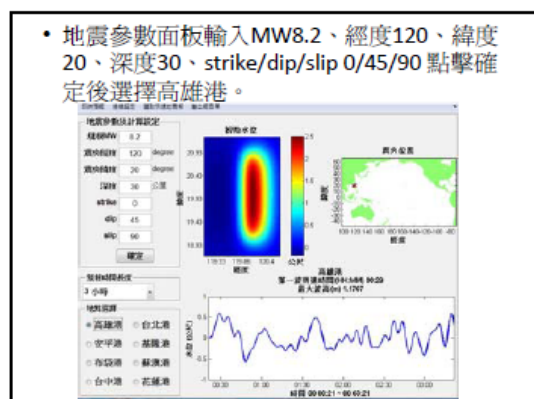
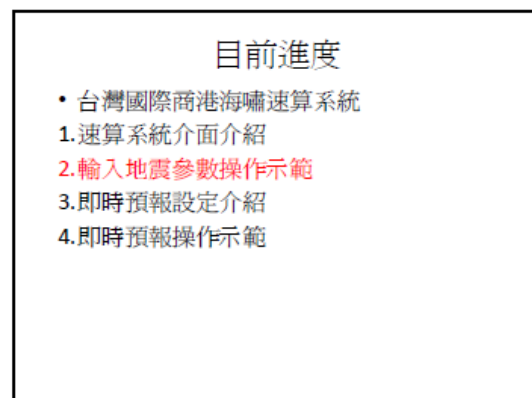
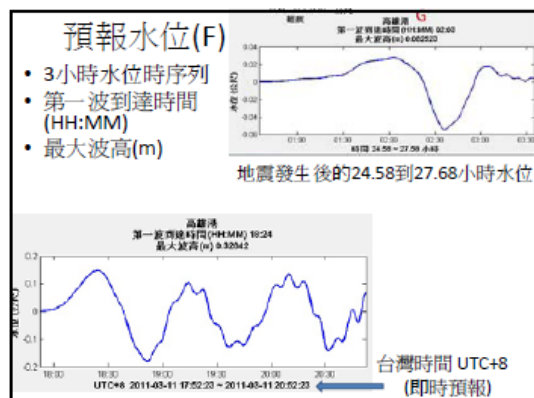
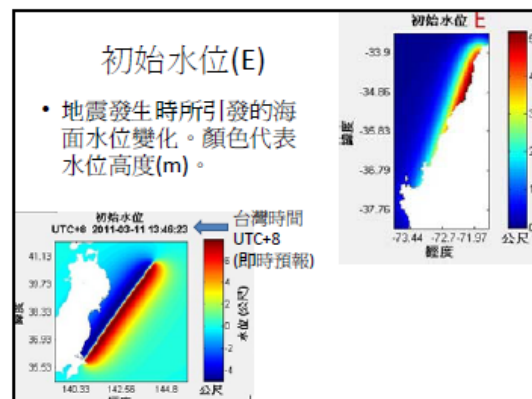
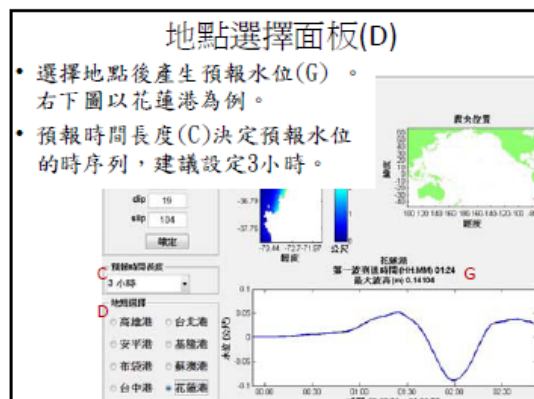
- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1. 速算系統介面介紹
- 2. 輸入地震參數操作示範
- 3. 即時預報設定介紹
- 4. 即時預報操作示範

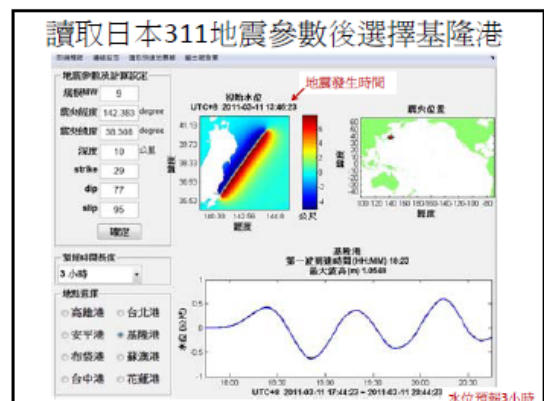
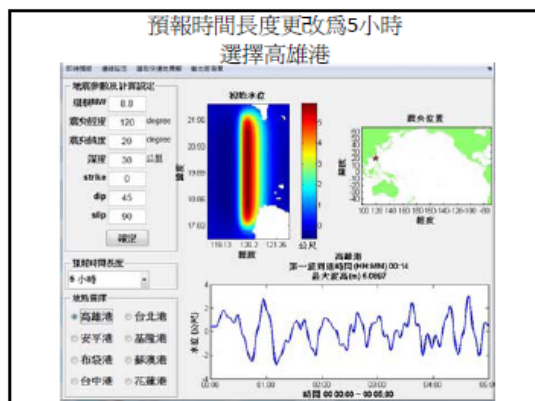


地震參數面板(B)

- 手動輸入矩震級(MW)、震央位置、深度等地震參數，輸入後點擊**確定**來產生初始水位圖(E)與震央位置圖(F)。







目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1.速算系統介面介紹
- 2.輸入地震參數操作示範
- 3.即時預報設定介紹
- 4.即時預報操作示範

連線設定畫面

A 連線設定

網站連線間隔(分): 1

最低警報震度(MW): 7.8

B 地震解來源網頁

☒ Fnet

☒ USGS

☐ CWB

C 即時預報檔案輸出

☒ 地震參數

☒ 報告單

☒ 預報水位

☒ 介面圖

點選主介面的頂部選單的連線設定進入本畫面。此處調整即時預報的相關設定。

連線設定面板(A)

- 網站連線間隔(分): 設定連線至地震解網站的時間間隔。
- 最低警報震度(MW): 當震度大於音效警告設定值, 就會出現警報視窗, 並發出音效, 音效將持續5分鐘, 關掉警報視窗可停止音效。

A 連線設定

網站連線間隔(分): 1

最低警報震度(MW): 7.2

地震解來源網頁面板(B)

- Fnet(Full Range Seismograph Network of Japan)
<http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/event/joho.php?LANG=en>
- USGS(U.S. Geological Survey)
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>
- CWB(Central Weather Bureau)
台灣寬頻地震網資訊系統
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>

B 地震解來源網頁

☒ Fnet

☒ USGS

☐ CWB

即時預報檔案輸出面板(C)

- 地震參數：將網頁擷取的地震參數輸出成文字檔與mat檔，後者提供頂部選單讀取快速地震解。
- 報告單：輸出地震訊息及預報水位的報告單(jpg)。
- 預報水位：將預報水位輸出成文字檔(txt)。
- 介面擷圖：將預報主介面輸出成圖檔(jpg)。

即時預報檔案輸出

- ☒ 地震參數
- ☐ 報告單
- ☐ 預報水位
- ☐ 介面擷圖

地震參數

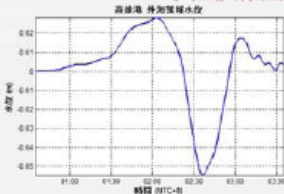
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&all=yr|mon|day|hr|min|sec|mw|lon|lat|dep|strike/dip/slip|strike/dip/slip>
2011 09 05 13 35 00 4 141.5 39.5 65 22/75/104 241/19/128

地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度-35.766 經度-72.473
地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30
Strike=14 Dip=19 Slip=104
第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00
最大波高(m):0.082523

訊息欄

報告單 (非即時預報)

水位預報圖



地震解網址

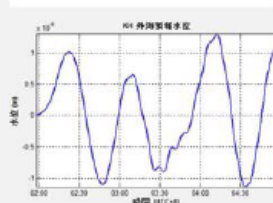
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度-35.766 經度-72.473
地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30
Strike=14 Dip=19 Slip=104
第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00
最大波高(m):0.082523

- 地震解網址：記錄地震參數來源網頁。
- Strike、dip、slip：走向、傾角、滑移角。
- 第一波到達時間：第一個波峰(或波谷)的到達時間，此例為地震發生後經過1分鐘抵達。
- 最大波高：於預報水位分析取的最大波高。

地震解網址
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/dmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&all=yr|mon|day|hr|min|sec|mw|lon|lat|dep|strike/dip/slip|strike/dip/slip>
地震發生時間 UTC+8 : 2011-09-05 21:35:00
震央位置 緯度37.5 經度141.5
地震規模(MW): 4 地震深度(km): 65
Strike=22 Dip=75 Slip=19
第一波到達時間:2011-09-06 02:22:00
最大波高(m):2.4514e-008

報告單 (即時預報)

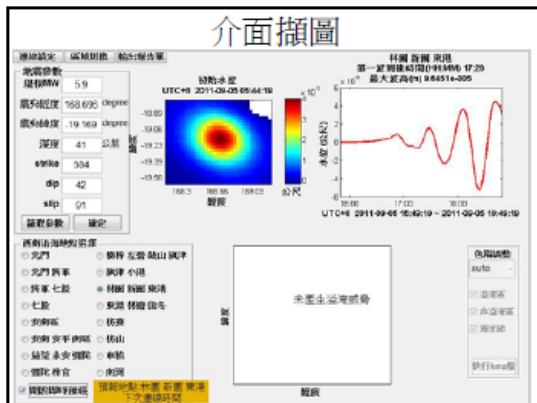
與非即時預報的報告單差別在**地震解網址**跟地震發生時間(UTC+8)的記錄。



預報水位 輸出檔

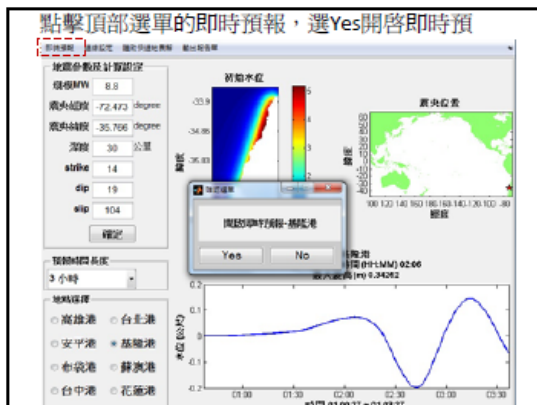
2011	9	11	17	52	23	0.001
2011	9	11	17	53	23	0.001
2011	9	11	17	54	23	0.001
2011	9	11	17	55	23	0.002
2011	9	11	17	56	23	0.003
2011	9	11	17	57	23	0.004
2011	9	11	17	58	23	0.005
2011	9	11	17	59	23	0.007
2011	9	11	18	0	23	0.009
2011	9	11	18	1	23	0.011
2011	9	11	18	2	23	0.014
2011	9	11	18	3	23	0.018
2011	9	11	18	4	23	0.021
2011	9	11	18	5	23	0.026
2011	9	11	18	6	23	0.032
2011	9	11	18	7	23	0.038
2011	9	11	18	8	23	0.046
2011	9	11	18	9	23	0.054
2011	9	11	18	10	23	0.061
2011	9	11	18	11	23	0.069
2011	9	11	18	12	23	0.076
2011	9	11	18	13	23	0.084
2011	9	11	18	14	23	0.092
2011	9	11	18	15	23	0.101
2011	9	11	18	16	23	0.110
2011	9	11	18	17	23	0.117
2011	9	11	18	18	23	0.124

七欄位依序為年、月、日、時、分、秒和水位(m)

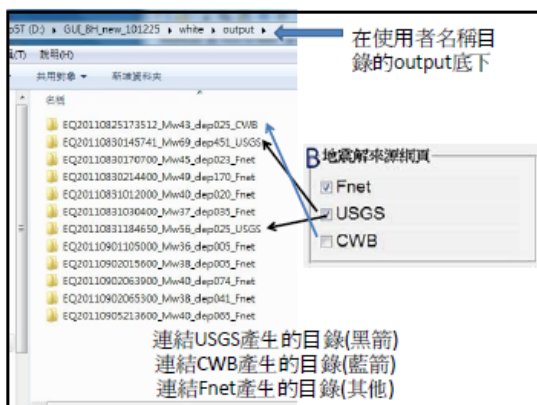


目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1. 速算系統介面介紹
- 2. 輸入地震參數操作示範
- 3. 即時預報設定介紹
- 4. 即時預報操作示範

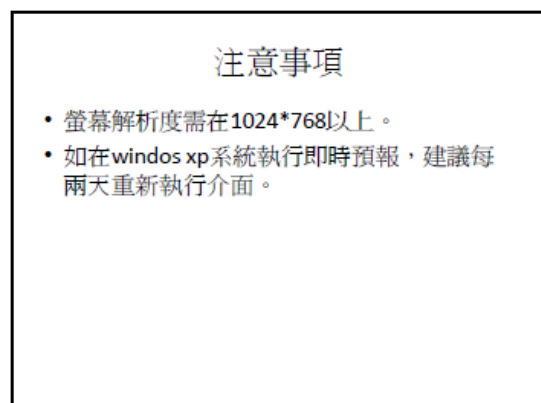
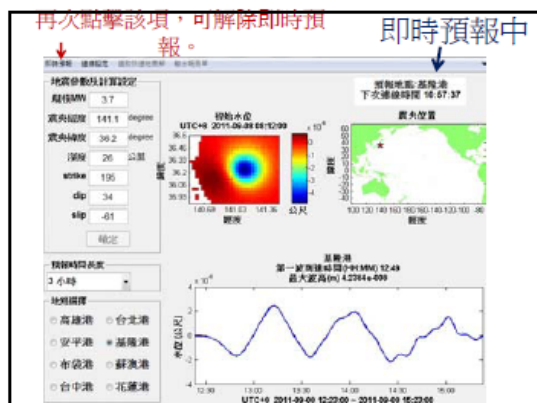
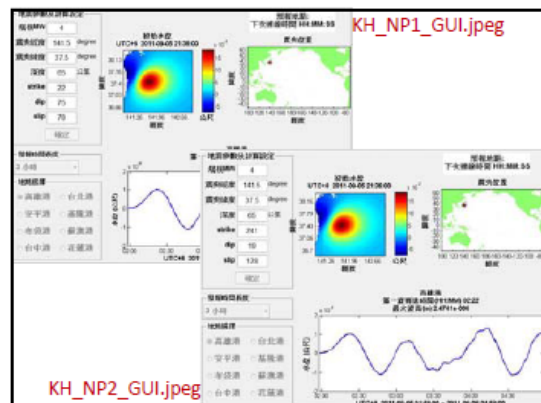
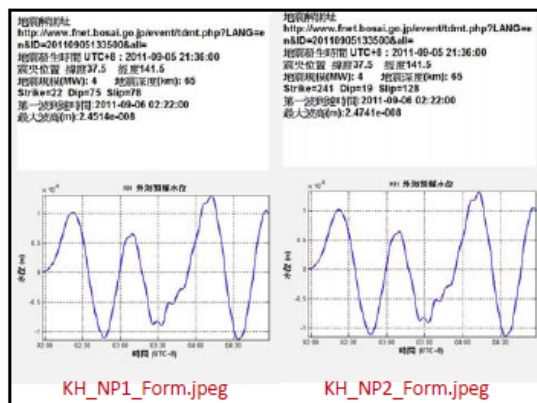
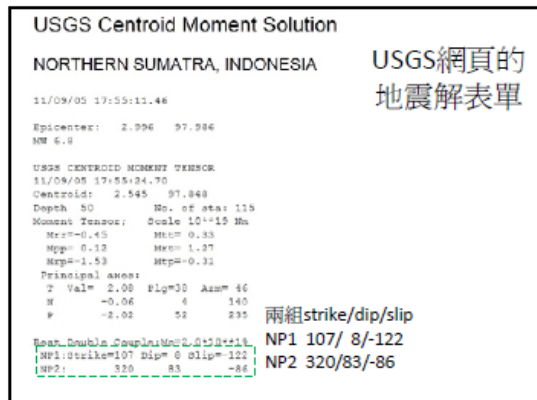


- 即時預報產生的檔案置於系統執行檔路徑的.\使用者名稱\output\地震事件目錄下。例如以下路徑
 .\tony\output\EQ20110907015500_Mw51_dep032_Fnet
- 地震事件目錄名稱規則
 20110905054419：時間 yyyymmddHHMMSS
 Mw51：矩震級5.1 dep032：深度32km
 Fnet：地震解來源網站



- Earthquake_Parameter.mat <= 地震參數
- Earthquake_Parameter.txt <= 地震參數
- KH_NP1.txt <= 預報水位
- KH_NP1_Form.jpeg <= 報告單
- KH_NP1_GUI.jpeg <= 介面擷圖
- KH_NP2.txt <= 預報水位
- KH_NP2_Form.jpeg <= 報告單
- KH_NP2_GUI.jpeg <= 介面擷圖

每個地震有兩組節面(Nodal Plane)以NP1, NP2區分。節面有各自的走向/傾角/滑移角(strike/dip/slip)



連線設定

網站連線間隔(分)

1

最低警報震度(MW)

7.8

地震解來源網頁

☒ Fnet

☒ USGS

☐ CWB

即時預報檔案輸出

☒ 地震參數

☒ 報告單

☒ 預報水位

☒ 介面顯示圖

確定

設定初始化

附錄三 環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數

(地震矩規模小於等於 8)

環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數(地震矩規模小於等於 8)							
規模小於等於 8 使用參數							
點位	地點	經度	緯度	深度(m)	strike	dip	slip
1	湯加海溝 克瑪迪克海溝	-174.54	-15.32	15000	-84	43.88649	90
2		-176.51	-17.24	15000	-74.2543	38.72711	90
3		-176.64	-18.92	15000	-51.0241	37.08086	90
4		-177.26	-20.88	15000	-77.9875	28.44976	90
5		-177.64	-23.04	15000	77.62623	28.81268	90
6		-177.72	-24.8	15000	54.95969	32.08721	90
7		-177	-27	15000	42.22768	35.43684	90
8		-177.43	-29.14	15000	36.77013	28.5233	90
9		-178.14	-30.84	15000	34.02716	31.6	90
10		-178.67	-32.93	15000	36.27189	27.72589	90
11		-179.15	-34.78	15000	33.4214	29.09804	90
12		-179.55	-36.87	15000	22.1959	35.27778	90
13	布干維爾海溝	138.36	0.7	15000	16	67.75	90
14		137.49	-1.18	15000	-34	43.15328	90
15		144.76	-3.2	15000	-24.8266	54.12878	90
16		148.95	-5.16	15000	-13.294	38.24032	90
17		151.29	-6.67	15000	-26.9695	36.68821	90
18		156.38	-9.12	15000	-21.4182	44.56311	90
19	馬里亞納海溝	146.28	17.08	15000	-56	36.80597	90
20		146.35	14.93	15000	-30	34.07895	90
21		144.07	12.86	15000	-22.584	38.57009	90
22		142.27	11.35	15000	33.67052	39.00909	90
23		139.85	8.92	15000	-10.7156	45.36364	90
24		139.53	7.2	15000	-3.77473	46.125	90
25	菲律賓海溝	121.23	19.28	15000	30.6111	39.11475	90
26		123	16.8	15000	20.93416	42.54054	90
27		122.68	14.81	15000	25.58782	45.61538	90
28		125	12.96	15000	158.7407	39.58442	90

29		127	10.91	15000	163.035	37.47368	90
30		127	9.31	15000	176.9124	35.12821	90
31		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
32		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
33		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
34	琉球海溝	139.07	34.62	15000	-12	45.49444	90
35		133.4038	33.13188	15000	163.3966	73.875	90
36		131.46	31.02878	15000	47.16612	69.82927	90
37		130.3494	28.92551	15000	47.13275	69.44928	90
38		128.5244	27.13333	15000	70.37409	71.30556	90
39		126.6147	25.13265	15000	38.39664	66.35294	90
40	伊豆小笠原海溝	139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
41		139.77	33.2	15000	68.5	40.08125	90
42		140.44	30.95	15000	15.32191	31.18487	90
43		140.92	28.82	15000	-0.5113	32.40244	90
44		141.1	27.3	15000	-8.75775	35.39744	90
45		142.11	25	15000	-25.4358	44.88	90
46		143.33	22.77	15000	-50.2585	30.36508	90
47		144	21.42	15000	-44.5816	41.10959	90
48		145.88	18.82	15000	-47.4296	37.07477	90
49		146.28	17.09	15000	-44.5816	36.80597	90
50	千島海溝 日本海溝	163.74	56.28	15000	-61	58.85185	90
51		162.75	54.93	15000	-73.5	40.19444	90
52		159.48	52	15000	81.77024	31.32948	90
53		157.25	51.16	15000	61.50597	29.33333	90
54		153.9	48.86	15000	47.00168	31.25287	90
55		152.67	46.86	15000	64.74577	35.29487	90
56		149.14	44.83	15000	62.32607	30.72664	90
57		146.08	43.16	15000	61.10713	32.17284	90
58		142.49	41.11	15000	58.34534	26.43128	90
59		142.88	39.06	15000	56.87765	26.23034	90
60		141.76	36.82	15000	51.58504	25.57143	90
61		140.15	34.74	15000	46.99059	37.56593	90
62		164.46	56.2	15000	-61	70.94444	90
63		165.39	55.03	15000	71	59.57143	90

64	阿留申海溝	174.49	52.68	15000	88.40403	36.23881	90
65		177.9	51	15000	85.46259	29.91176	90
66		-154.41	55	15000	49	33.66071	90
67		-161.39	54.68	15000	40.5	28.14634	90
68		-167.66	52.91	15000	50.30824	30.11858	90
69		-176.1	51.37	15000	61.13007	27.47837	90
70		-177.68	49.88	15000	61.13007	27.47837	90
71	美國西岸與中美海溝	-141.36	55	15000	-88	70.28571	90
72		-127.41	49	15000	-55.114	40	90
73		-129.39	50.67	15000	-67.6916	75.27907	90
74		-124.91	47	15000	-50.932	75.8	90
75		-126	46.94	15000	-36.9641	50	90
76		-126	44.73	15000	-44.9768	54.69231	90
77		-126	43.01	15000	-61.8287	63.9	90
78		-126	40.72	15000	-80.8914	66.86567	90
79		-123	36.81	15000	-80.7721	59.5	90
80		-117	30.87	15000	-87.1168	56.6	90
81		-116	29.29	15000	-78.8788	71.54545	90
82		-115	27	15000	-68.8777	63.625	90
83		-109.06	24.96	15000	-85.4023	65.92	90
84		-107.33	23.29	15000	-76.9324	76.59259	90
85		-108.317	20.55	15000	-76.7153	56	90
86		-105	18.72	15000	-73.5823	54.52096	90
87		-98	15	15000	-82.6458	37.85321	90
88		-94.05	14.93	15000	86.71764	30.47511	90
89		-89.15	12.95	15000	-84.2209	31.42857	90
90		-87.12	11.15	15000	-78.5672	34.79747	90
91		-86.5	8.78	15000	-88.5435	46.68548	90
92		-83.85	7.16	15000	81.43292	69.36207	90
93		-83.9	5.08	15000	83.1608	77.48438	90
94	秘魯智利海溝	-79	7.01	15000	42	54.47945	90
95		-78.54	4.99	15000	-22.5	62.73043	90
96		-80.03	3.02	15000	53.3824	49.53226	90
97		-81.36	1.02	15000	75.42348	58.08163	90
98		-82	-1.2	15000	-67.6323	28.45902	90

99		-82	-3.08	15000	-73.4386	41.26866	90
100		-82	-5.23	15000	81.13619	33.68421	90
101		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
102		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
103		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
104		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
105		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
106		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
107		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
108		-70.76	-20.75	15000	13.60428	31.71429	90
109		-70.73	-23.08	15000	9.42305	22.63333	90
110		-70.9	-24.92	15000	15.02206	23.95122	90
111		-71.31	-27.2	15000	11.20131	25.83051	90
112		-71.8	-29.33	15000	-0.42917	30.86957	90
113		-71.92	-31.21	15000	-0.35287	28.37681	90
114		-71.98	-32.88	15000	-0.60149	27.64948	90
115		-72.43	-34.48	15000	-8.37442	27.325	90
116		-73.6	-36.89	15000	-7.20716	23.875	90
117		-74.34	-38.62	15000	-10.767	36.1	90
118		-83.01	-41.2	15000	-9.93414	59.13699	90
119		-81.27	-42.97	15000	-2.85874	49.43243	90
120		-77.75	-45.13	15000	-2.27616	64.89231	90
121	夏威夷	-155.5	19.16	15000	42.5	21.875	90
122	馬尼拉海溝	120.7568	20.9668	15000	-10.0829	39.89333	90
123		120.8642	19.27471	15000	22.9525	34.9902	90
124		120.4388	16.89667	15000	11.99269	41.54902	90
125		119.9961	15.06286	15000	-0.46894	40.46429	90
126		120.6027	13.47519	15000	0.599891	39.96104	90

(地震矩規模大於 8)

環太平洋地震帶 126 區域點位地震參數(地震矩規模大於 8)							
規模大於 8 使用參數,因已知無如此大破裂面							
	地點	經度	緯度	深度(m)	strike	dip	slip
1	湯加海溝 克瑪迪克海溝	-174.54	-15.32	15000	-84	43.88649	90
2		-176.51	-17.24	15000	-74.2543	38.72711	90
3		-176.64	-18.92	15000	-51.0241	37.08086	90
4		-177.26	-20.88	15000	-77.9875	28.44976	90
5		-177.64	-23.04	15000	77.62623	28.81268	90
6		-177.72	-24.8	15000	54.95969	32.08721	90
7		-177	-27	15000	42.22768	35.43684	90
8		-177.43	-29.14	15000	36.77013	28.5233	90
9		-178.14	-30.84	15000	34.02716	31.6	90
10		-178.67	-32.93	15000	36.27189	27.72589	90
11		-179.15	-34.78	15000	33.4214	29.09804	90
12		-179.55	-36.87	15000	22.1959	35.27778	90
13	布干維爾海溝	138.36	0.7	15000	16	67.75	90
14		137.49	-1.18	15000	-34	43.15328	90
15		144.76	-3.2	15000	-24.8266	54.12878	90
16		148.95	-5.16	15000	-13.294	38.24032	90
17		151.29	-6.67	15000	-26.9695	36.68821	90
18		156.38	-9.12	15000	-21.4182	44.56311	90
19	馬里亞納海溝	146.28	17.08	15000	-56	36.80597	90
20		146.35	14.93	15000	-30	34.07895	90
21		144.07	12.86	15000	-22.584	38.57009	90
22		142.27	11.35	15000	33.67052	39.00909	90
23		139.85	8.92	15000	-10.7156	45.36364	90
24		139.53	7.2	15000	-3.77473	46.125	90
	菲律賓海溝						
25		123	16.8	15000	6.137199	40.36806	90
26		127	10.91	15000	165.5459	37.58696	90

27		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
28		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
29		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
30	琉球海溝	134.2388	32.95372	15000	77.60519	73.19008	90
31		128.8532	27.57966	15000	52.24941	69.8255	90
32		139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
33		139.77	33.2	15000	68.5	40.08125	90
34		140.44	30.95	15000	15.32191	31.18487	90
35		140.92	28.82	15000	-0.5113	32.40244	90
36		141.1	27.3	15000	-8.75775	35.39744	90
37		142.11	25	15000	-25.4358	44.88	90
38		143.33	22.77	15000	-50.2585	30.36508	90
39		144	21.42	15000	-44.5816	41.10959	90
40		145.88	18.82	15000	-47.4296	37.07477	90
41		146.28	17.09	15000	-44.5816	36.80597	90
42		163.74	56.28	15000	-61	58.85185	90
43		162.75	54.93	15000	-73.5	40.19444	90
44		159.48	52	15000	81.77024	31.32948	90
45		157.25	51.16	15000	61.50597	29.33333	90
46		153.9	48.86	15000	47.00168	31.25287	90
47		152.67	46.86	15000	64.74577	35.29487	90
48		149.14	44.83	15000	62.32607	30.72664	90
49		146.08	43.16	15000	61.10713	32.17284	90
50		142.49	41.11	15000	58.34534	26.43128	90
51		142.88	39.06	15000	56.87765	26.23034	90
52		141.76	36.82	15000	51.58504	25.57143	90
53		140.15	34.74	15000	46.99059	37.56593	90
54	阿留申海溝	164.46	56.2	15000	-61	70.94444	90
55		165.39	55.03	15000	71	59.57143	90
56		174.49	52.68	15000	88.40403	36.23881	90
57		177.9	51	15000	85.46259	29.91176	90

58		-154.41	55	15000	49	33.66071	90
59		-161.39	54.68	15000	40.5	28.14634	90
60		-167.66	52.91	15000	50.30824	30.11858	90
61		-176.1	51.37	15000	61.13007	27.47837	90
62		-177.68	49.88	15000	61.13007	27.47837	90
63	美國西岸與中美海溝	-141.36	55	15000	-88	70.28571	90
64		-127.41	49	15000	-55.114	40	90
65		-129.39	50.67	15000	-67.6916	75.27907	90
66		-124.91	47	15000	-50.932	75.8	90
67		-126	46.94	15000	-36.9641	50	90
68		-126	44.73	15000	-44.9768	54.69231	90
69		-126	43.01	15000	-61.8287	63.9	90
70		-126	40.72	15000	-80.8914	66.86567	90
71		-123	36.81	15000	-80.7721	59.5	90
72		-117	30.87	15000	-87.1168	56.6	90
73		-116	29.29	15000	-78.8788	71.54545	90
74		-115	27	15000	-68.8777	63.625	90
75		-109.06	24.96	15000	-85.4023	65.92	90
76		-107.33	23.29	15000	-76.9324	76.59259	90
77		-108.317	20.55	15000	-76.7153	56	90
78		-105	18.72	15000	-73.5823	54.52096	90
79		-98	15	15000	-82.6458	37.85321	90
80		-94.05	14.93	15000	86.71764	30.47511	90
81		-89.15	12.95	15000	-84.2209	31.42857	90
82		-87.12	11.15	15000	-78.5672	34.79747	90
83		-86.5	8.78	15000	-88.5435	46.68548	90
84		-83.85	7.16	15000	81.43292	69.36207	90
85		-83.9	5.08	15000	83.1608	77.48438	90
86	秘魯智利海溝	-79	7.01	15000	42	54.47945	90
87		-78.54	4.99	15000	-22.5	62.73043	90
88		-80.03	3.02	15000	53.3824	49.53226	90
89		-81.36	1.02	15000	75.42348	58.08163	90
90		-82	-1.2	15000	-67.6323	28.45902	90
91		-82	-3.08	15000	-73.4386	41.26866	90
92		-82	-5.23	15000	81.13619	33.68421	90

93		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
94		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
95		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
96		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
97		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
98		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
99		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
100		-70.76	-20.75	15000	13.60428	31.71429	90
101		-70.73	-23.08	15000	9.42305	22.63333	90
102		-70.9	-24.92	15000	15.02206	23.95122	90
103		-71.31	-27.2	15000	11.20131	25.83051	90
104		-71.8	-29.33	15000	-0.42917	30.86957	90
105		-71.92	-31.21	15000	-0.35287	28.37681	90
106		-71.98	-32.88	15000	-0.60149	27.64948	90
107		-72.43	-34.48	15000	-8.37442	27.325	90
108		-73.6	-36.89	15000	-7.20716	23.875	90
109		-74.34	-38.62	15000	-10.767	36.1	90
110		-83.01	-41.2	15000	-9.93414	59.13699	90
111		-81.27	-42.97	15000	-2.85874	49.43243	90
112		-77.75	-45.13	15000	-2.27616	64.89231	90
113	夏威夷	-155.5	19.16	15000	42.5	21.875	90
114	馬尼拉海溝	120.7337	19.29939	15000	15.72075	38.07018	90
115		120.3473	14.14368	15000	-7.46601	40.17293	90

附錄四 海嘯預警系統介紹及操作說明(教育推廣)

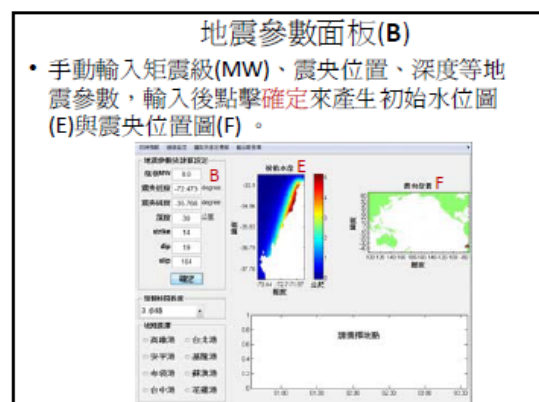
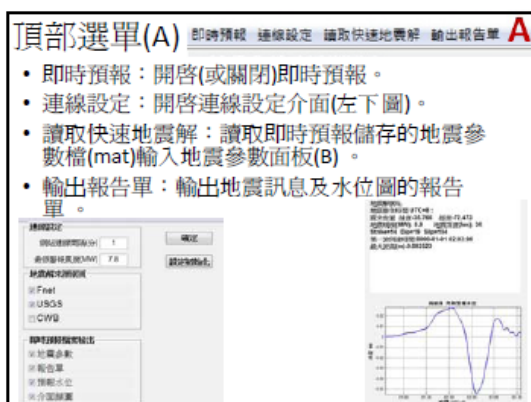
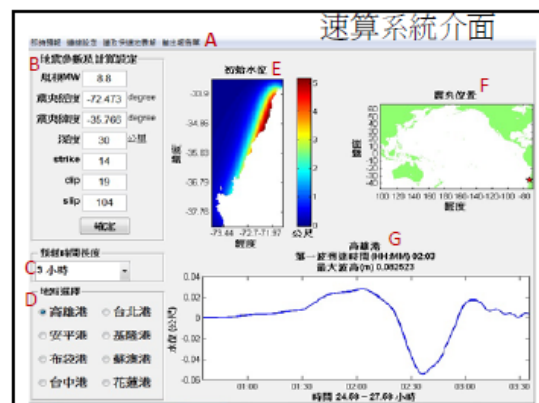
台灣國際商港海嘯速算系統

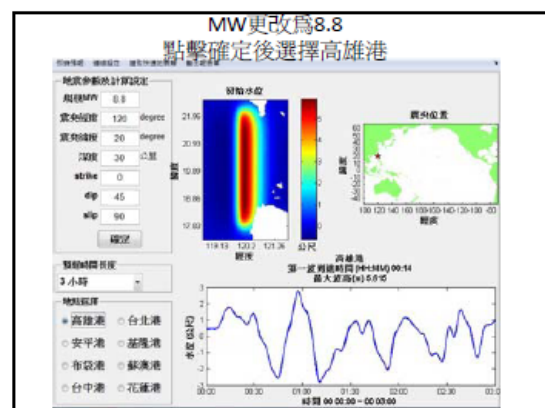
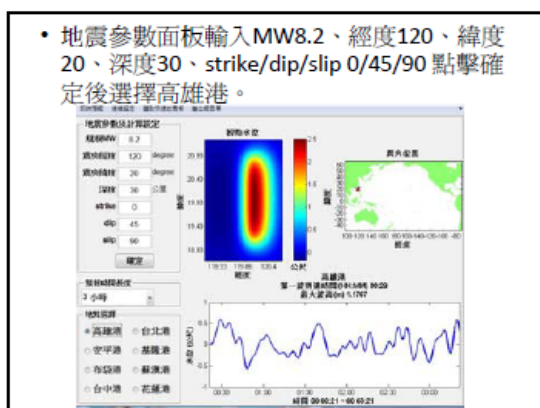
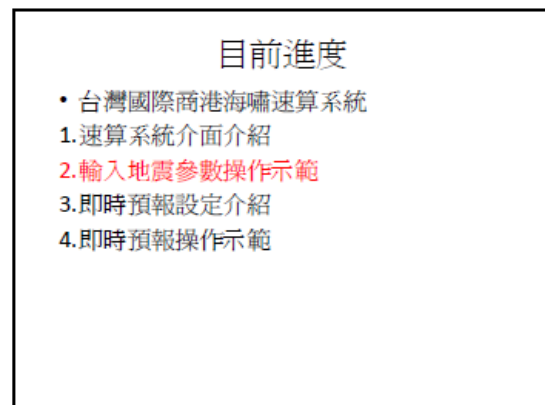
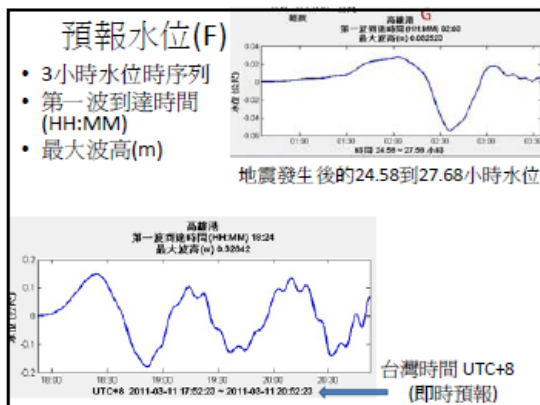
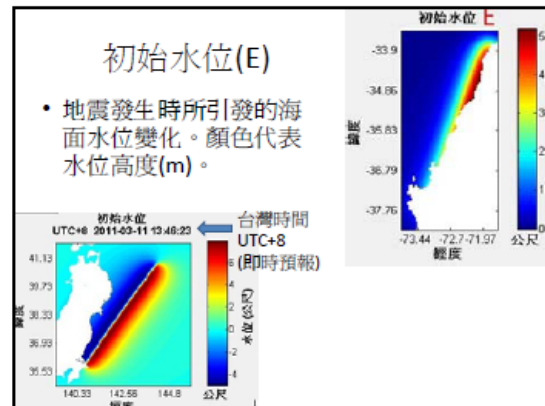
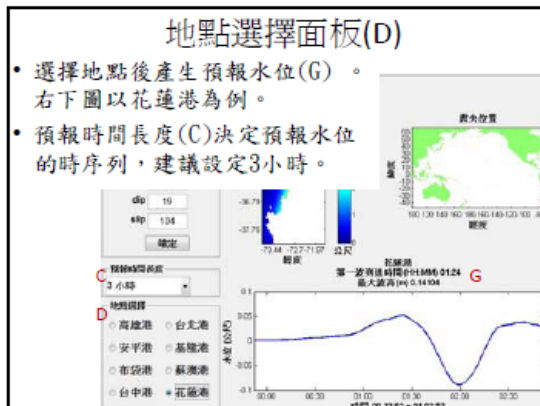
教學大綱

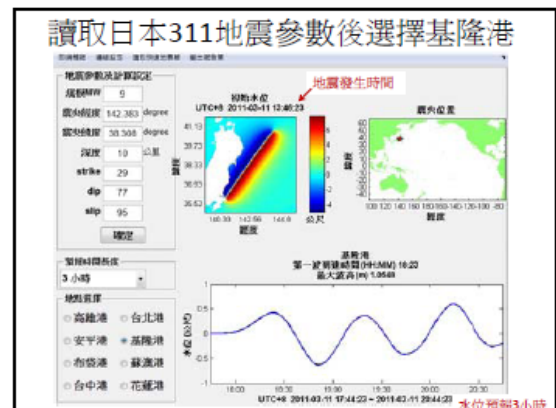
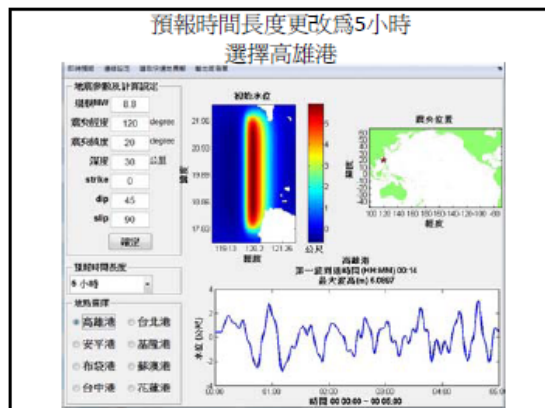
1. 速算系統介面介紹
2. 輸入地震參數操作示範
3. 即時預報設定介紹
4. 即時預報操作示範

目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1. 速算系統介面介紹
- 2. 輸入地震參數操作示範
- 3. 即時預報設定介紹
- 4. 即時預報操作示範







目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1.速算系統介面介紹
- 2.輸入地震參數操作示範
- 3.即時預報設定介紹
- 4.即時預報操作示範

連線設定畫面

A 連線設定

網站連線間隔(分)

最低警報震度(MW)

B 地震解來源網頁

☒ Fnet
☒ USGS
☐ CWB

C 即時預報檔案輸出

☒ 地震參數
☒ 報告單
☒ 預報水位
☒ 介面操圖

點選主介面的頂部選單的
連線設定進入本畫面。
此處調整即時預報的相關
設定。

連線設定面板(A)

- 網站連線間隔(分)：設定連線至地震解網站的時間間隔。
- 最低警報震度(MW)：當震度大於音效警告設定值，就會出現警報視窗，並發出音效，音效將持續5分鐘，關掉警報視窗可停止音效。

A 連線設定

網站連線間隔(分)

最低警報震度(MW)

地震解來源網頁面板(B)

- Fnet(Full Range Seismograph Network of Japan)
<http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/event/joho.php?LANG=en>
- USGS(U.S. Geological Survey)
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>
- CWB(Central Weather Bureau)
台灣寬頻地震網資訊系統
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/>

B 地震解來源網頁

☒ Fnet
☒ USGS
☐ CWB

即時預報檔案輸出面板(C)

- 地震參數：將網頁擷取的地震參數輸出成文字檔與mat檔，後者提供頂部選單讀取快速地震解。
- 報告單：輸出地震訊息及預報水位的報告單(jpg)。
- 預報水位：將預報水位輸出成文字檔(txt)。
- 介面插圖：將預報主介面輸出成圖檔(jpg)。

即時預報檔案輸出

- ☒ 地震參數
- ☒ 報告單
- ☒ 預報水位
- ☒ 介面插圖

地震參數

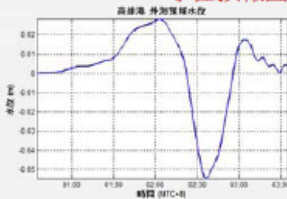
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&all=yr|mon|day|hr|min|sec|mww|lon|lat|dep|strike/dip/slip|strike/dip/slip>
2011 09 05 13 36 00 4 141.5 39.5 65 22/75/78 241/19/128

地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度-35.766 經度-72.473
地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30
Strike=14 Dip=19 Slip=104
第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00
最大波高(m):0.082523

訊息欄

報告單
(非即時預報)

水位預報圖



地震解網址

地震發生時間 UTC+8 :

震央位置 緯度-35.766 經度-72.473

地震規模(MW): 8.8 地震深度(km): 30

Strike=14 Dip=19 Slip=104

第一波到達時間:0000-01-01 02:03:00

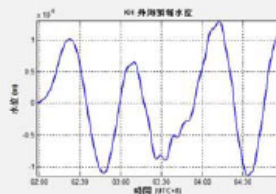
最大波高(m):0.082523

- 地震解網址：記錄地震參數來源網頁。
- Strike、dip、slip：走向、傾角、滑移角。
- 第一波到達時間：第一個波峰(或波谷)的到達時間，此例為地震發生後經過1分鐘抵達。
- 最大波高：於預報水位分析取的最大波高。

地震解網址
<http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.php?LANG=en&ID=20110905133500&all=yr|mon|day|hr|min|sec|mww|lon|lat|dep|strike/dip/slip|strike/dip/slip>
地震發生時間 UTC+8 : 2011-09-05 21:36:00
震央位置 緯度37.5 經度141.5
地震規模(MW): 4 地震深度(km): 65
Strike=22 Dip=75 Slip=78
第一波到達時間:2011-09-06 02:22:00
最大波高(m):2.4514e-008

報告單
(即時預報)

與非即時預報的報告單差別在地震解網址跟地震發生時間(UTC+8)的記錄。



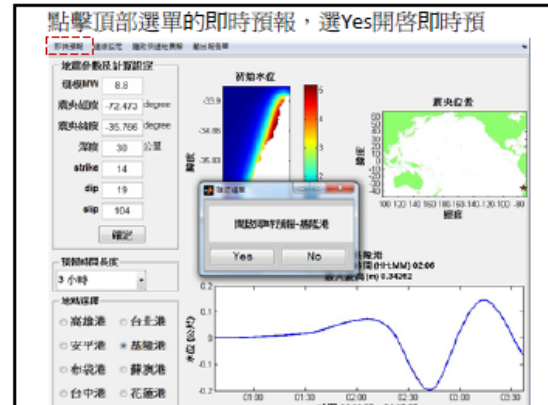
2011	9	11	17	52	23	0.001
2011	9	11	17	53	23	0.001
2011	9	11	17	54	23	0.001
2011	9	11	17	55	23	0.002
2011	9	11	17	56	23	0.003
2011	9	11	17	57	23	0.004
2011	9	11	17	58	23	0.005
2011	9	11	17	59	23	0.007
2011	9	11	18	0	23	0.009
2011	9	11	18	1	23	0.011
2011	9	11	18	2	23	0.014
2011	9	11	18	3	23	0.018
2011	9	11	18	4	23	0.021
2011	9	11	18	5	23	0.026
2011	9	11	18	6	23	0.032
2011	9	11	18	7	23	0.038
2011	9	11	18	8	23	0.046
2011	9	11	18	9	23	0.054
2011	9	11	18	10	23	0.061
2011	9	11	18	11	23	0.069
2011	9	11	18	12	23	0.076
2011	9	11	18	13	23	0.084
2011	9	11	18	14	23	0.092
2011	9	11	18	15	23	0.101
2011	9	11	18	16	23	0.110
2011	9	11	18	17	23	0.117
2011	9	11	18	18	23	0.124

預報水位
輸出檔

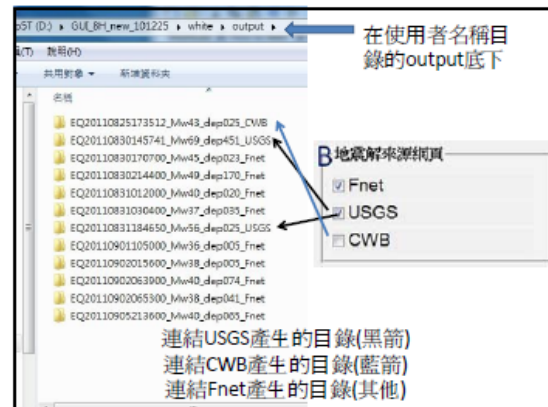
七欄位依序為年、月、日、時、分、秒和水位(m)

目前進度

- 台灣國際商港海嘯速算系統
- 1.速算系統介面介紹
- 2.輸入地震參數操作示範
- 3.即時預報設定介紹
- 4.即時預報操作示範



- 即時預報產生的檔案置於系統執行檔路徑的.\使用者名稱\output\地震事件目錄下。例如以下路徑
.\tony\output\EQ20110907015500_Mw51_dep032_Fnet
- 地震事件目錄名稱規則
20110905054419：時間 yyyymmddHHMMSS
Mw51：矩震級5.1 dep032：深度32km
Fnet：地震解來源網站



- Earthquake_Parameter.mat <= 地震參數
- Earthquake_Parameter.txt <= 地震參數
- KH_NP1.txt <= 預報水位
- KH_NP1_Form.jpeg <= 報告單
- KH_NP1_GUI.jpeg <= 介面擷圖
- KH_NP2.txt <= 預報水位
- KH_NP2_Form.jpeg <= 報告單
- KH_NP2_GUI.jpeg <= 介面擷圖

儲存預報值輸出

- ☒ 地震參數
- ☒ 報告單
- ☒ 預報水位
- ☒ 介面擷圖

每個地震有兩組節面(Nodal Plane)以NP1,NP2區分。節面有各自的走向/傾角/滑移角(strike/dip/slip)

USGS Centroid Moment Solution

NORTHERN SUMATRA, INDONESIA

USGS網頁的地震解表單

11/09/05 17:55:11.46
Epicenter: 2.596 97.946
Mw 6.8

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
11/09/05 17:55:24.70
Centroid: 2.545 97.948
Depth: 30 Mo. of sta: 115
Moment Tensor: Scale 10¹⁴ N·m
Mxx=-0.45 Mxy=0.33
Myy=0.13 Mxz=1.37
Mzz=-1.53 Mzy=-0.31

Principal axes:
1 Val= 2.00 P1=30 Az= 46
2 Val= -0.06 N= 6 Dip= 140
3 Val= -2.02 N= 52 Dip= 235

Best double couple fit: 0.958+0.19
NP1: strike=107 Dip= 8 slip=122
NP2: strike=320 Dip= 83 slip=-86

兩組strike/dip/slip
NP1 107/ 8/-122
NP2 320/83/-86

附錄五 期末報告簡報資料

MOTC-IOT-101-H3DB005c

提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4)

Advance tsunami simulation technology in coastal and harbor area(2/4)



計畫主持人：陳冠宇
協同主持人：陳陽益

本期工作目標

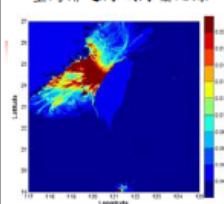
- 1.自動擷取太平洋海嘯預警中心(Pacific Tsunami Warning Center)或是USGS 網站地震資料。
- 2.台中港域及布袋港域未來50年及100年之海嘯災害風險評估。
- 3.精進台中港域及布袋港域海嘯數值模式之格林函數，評估港區影響可能範圍及危險程度之潛勢分析。
- 4.建立台中港及布袋港海嘯模擬預警系統並進行教育推廣。

前期成果

- 1.有鑑於近來太平洋區域發生多起重大之海嘯事件，且現今預報機制多依賴美日等鄰國之資訊，為增進臺灣海嘯警報之可信度，減少假警報以及提供較充裕之預警時間及海嘯資訊，將近岸海嘯預警系統拓展至遠海區域，並建立子系統已達到強化應變海嘯風險之能力。
- 2.傳統海嘯模式模擬時間受網格解析度、海嘯源位置、模擬時間等因素影響，需要相當長之計算時間；本系統應用格林函數之可逆性值，加速海嘯模擬之時間，以提供災防之參考依據，爭取海嘯侵襲時的警報時間。
- 3.精進基隆港域及台北港域海嘯數值模式之格林函數，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。
- 4.台北港域未來50年及100年海嘯災害風險，評估結果分別為2.79%與5.59%；基隆港域未來50年及100年海嘯災害風險，評估結果分別為3.25%與6.49%，以提供相關單位港灣構造物設計基準之參考。

■海嘯資料蒐集與地震規模表示法

2.1 臺灣鄰近海域海嘯紀錄



●台中港之海嘯潛勢震源分佈

因台灣西部沿岸各港口呈帶狀分佈，因此，對台北及高雄兩港較具威脅性之潛勢震源也會對台中港及布袋港產生影響，東海、澎湖及西南海域之海嘯也會對兩港產生威脅；根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對台中港及布袋港威脅性最大的是來自於發生在中國東川附近海域之海嘯。

非天氣因素的海嘯生成原因甚多，例如強烈海底地震、海底火山爆發、海底連坡滑動(landslide)或山崩、水下核爆；本研究僅探討由強烈海底較淺層地震所產生之海嘯



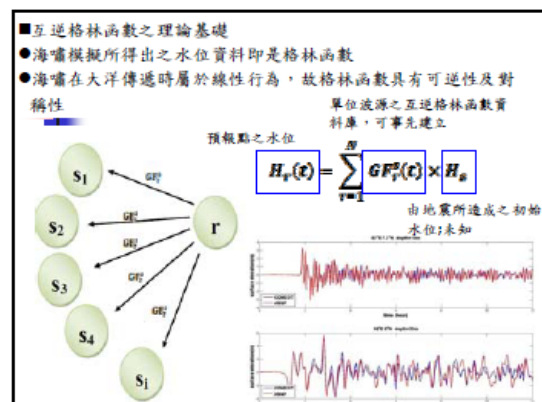
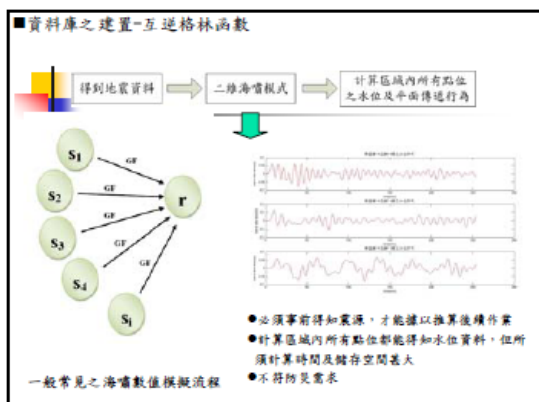
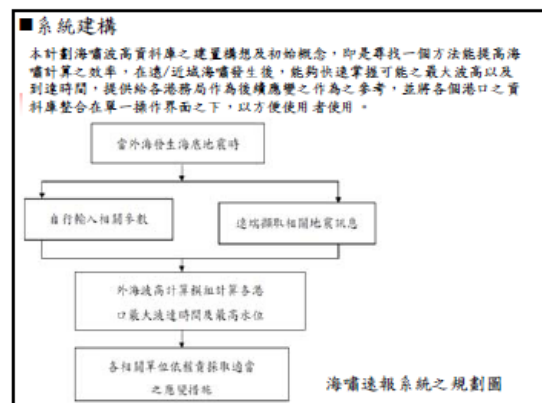
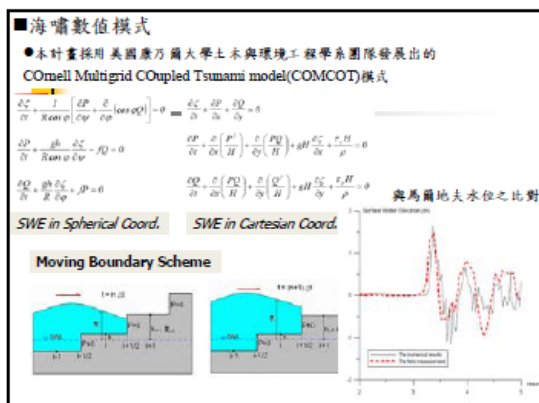
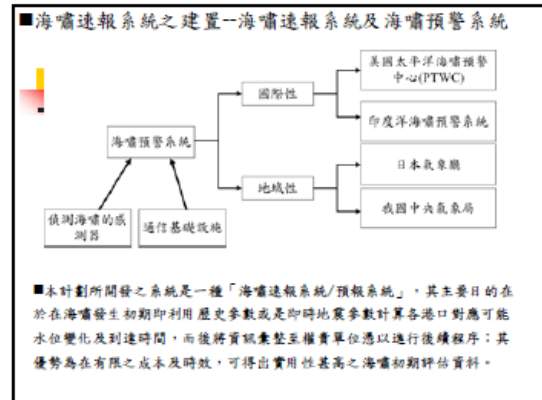
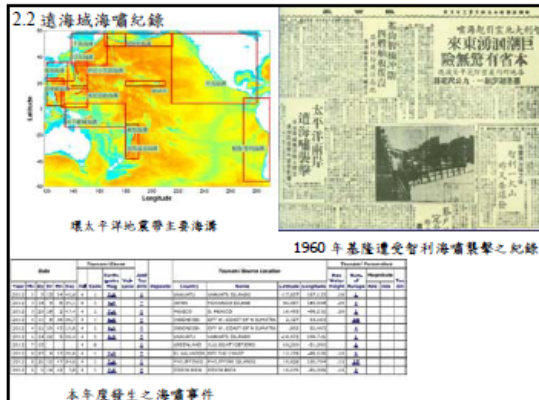
歷史文件對古海嘯之文字記載(李國興等, 2006):

- (1)1661(清順治17年, 明永曆14年)(1月8/9日~2月15日)安平
「中國海嘯歷史年表」:「台灣安平大海嘯。『海潮至, 淹廢舍無算』」。
- (2)1721年(清康熙59年)1月5日台南
明清史料戊辰(第1本, 21卷上)「去年(康熙五十九年, 西元1721年1月5日).....因地震, 海水湧漲, 原百姓合夥謝神唱戲」
- (3)1781年(清乾隆46年)5月間(4月24日~6月21日)高雄
「台灣採訪冊」(頁41)「梓異, 地震」的記載。「(乾隆46年)鳳城西里有加藤港, 多生加藤, 可作鹽, 張工賴之, 故名云。港有船連鄰, 往來潮沙無異。乾隆四十六年四、五月間, 時暮晴霽, 忽海水暴吼如雷, 巨浪排空, 水漲數十丈, 近村人居被淹, 皆舉援而上至尾, 自分必死, 不數刻, 水暴退, 人在竹上搖曳呼救, 有強力者一躍至地, 兼救他人, 互相引援而下, 間有牧地甚廣及附近田園勾壘, 於是魚蝦, 撿則跳躍, 十里內村民提籃聚閱, 狂爭取焉。聞只淹斃一婦, 婦素悍, 事始不孝, 餘皆得全活。嗣聞是日有漁人獲兩, 將歸, 霎時間波湧基起, 二物竟離, 漁者衆從從竹上過, 適望其家已成巨塚, 至水沙時, 草屋數棟, 已無有矣。」
- (4)1867年(清同治6年)12月18日基隆
「淡水廳志」,「(同治六年)冬十一月, 地大震。.....二十三日, 雞籠頭、金包里沿海, 山傾地裂, 海水暴漲, 屋宇傾壞, 溺數百人。」。

表 2-1 臺灣地區西元 1500-2011 年之海嘯事件

發生時間	地震規模	國家	震源深度	緯度	經度
1661.3.8	6.4	台灣	台灣	23.0	120.1
1661.2.15	6.0	台灣	台灣	23.0	120.2
1721		台灣	台灣	23.0	120.2
1792.8.9	6.0	台灣	台灣	23.6	120.5
1833.10.20		台灣	台灣		
1903.9.7		台灣	台灣		
1917.5.6	5.8	台灣	台灣	23.2	121.6
1922.9.1	7.6	台灣	台灣	24.5	122.0
1931.10.22	7.3	台灣	台灣	25.8	121.7
1963.2.13	7.3	台灣	台灣	24.4	122.1
1966.3.12	7.6	台灣	台灣	24.1	122.6
1972.1.25	7.5	台灣	台灣	22.5	122.3
1978.7.25	7.4	台灣	台灣	22.242	121.512
1986.11.14	7.8	台灣	台灣	23.994	121.574
1990.12.13	6.3	台灣	台灣	23.722	121.627
1998.5.3	7.5	台灣	台灣	22.386	120.508
2001.12.18	6.8	台灣	台灣	23.954	122.794
2002.3.31	7.1	台灣	台灣	24.279	122.179
2006.12.26	7.0	台灣	台灣	21.799	126.547

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database



地震資料來源及擷取

地震資料來源採用 United States Geological Survey(USGS)-National Earthquake Information Center(NEIC)中所紀錄地震資料，地震紀錄期間為自1973至2011年，搜尋範圍為整個太平洋區域。地震紀錄採用下限為4.5，地形資料則採用 NOAA-ETOPO1之數值資料。

●USGS-NEIC資料庫不同於Harvard-CMT，在NEIC資料庫中含有MW、MB、MS...等不同地震規模的測值，可透過線性的轉換來彌補有些地震資料不足的情形。

(1) M_L ：芮氏地震規模(Richter magnitude)
 (2) M_s ：表面波規模(surface waves magnitude)
 (3) M_b ：體波規模(body waves magnitude)
 (4) M_w ：地震矩規模(Moment magnitude scale)

Figure 3.4 is a scatter plot showing the relationship between different earthquake magnitude scales. The x-axis is labeled 'Richter' and the y-axis is labeled 'M'. The plot shows a positive linear correlation between the two scales.

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/ncic_b000036u_fint.php
 yr | mon | day | hr | min | sec | lon | lat | dep | strike | dip | slip | strike/dip/slip
 2012 10 15 17 52 2.160000e+001 55 -90.866 14.147 68 253/9/37 127/85/97

遠端擷取USGS地震資料格式

美國USGS資料庫

中央氣象局網站之即時地震資料

日本防災科學技術研究所F-net即時地震資料

表4-2 本計畫主要地震資料之網址及利用之資料提供範圍

機構名稱	網址及資料提供範圍
美國USGS	http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/ 資料提供範圍：全球
中央氣象局	http://www.cwb.gov.tw/ 資料提供範圍：東經 119~125 度，北緯 21~25 度
防災科學技術研究所	http://www.f-net.bosai.go.jp/top.php?LANG=en 資料提供範圍：東經 129~155 度，北緯 29~49 度

海嘯初始水位之生成Hs

初始條件(即海嘯波源之水位)之設定與產生，一般而言與(1)斷層參數，(2)斷層長度、寬度、震源深度有關。

圖3.4即是斷層參數之示意圖；strike角($0 \leq \theta \leq 360$)表示斷層之走向，為正北方順時針至斷層走向之夾角；dip角($0 < \delta < 90$)為傾斜角度，即是水平面與斷層面間的夾角，斷層面傾角 δ 與海嘯發生源擾動海水體積有關。Slip角($0 \leq \lambda \leq 180$)表示斷層之滑動方向，代表斷層面上盤相對於下盤的滑動方向。

本項資訊在美國地調所USGS網站中，可在地震發生後公佈原始之斷層參數，提供全球之地震訊息；一般斷層參數會有兩組解。

Figure 3.4 is a 3D diagram illustrating fault parameters. It shows a fault block with strike direction, dip angle, and slip direction. The diagram is labeled '斷層參數示意圖'.

●斷層參數中，斷層長寬仍是未知量，利用 Wells and Coppersmith(1994)之經驗公式計算地震規模下的長度及寬度相關係數0.81以上，信賴區間為95%

$$\log(L) = a_1 + b_1 \times M_w$$

$$\log(W) = a_2 + b_2 \times M_w$$

斷層參數	經驗公式	相關係數	信賴區間
斷層長度	$\log(L) = a_1 + b_1 \times M_w$	0.81	95%
斷層寬度	$\log(W) = a_2 + b_2 \times M_w$	0.81	95%

●然後，平均滑移量可以由下列公式計算出(Hanks et al.,1979)

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \Rightarrow M_0 = \mu L W D$$

斷層長度(L)、寬度(W)及滑移量(D)均已求得，就可以應用前頁之理論計算初始水位

● M_w 為地震矩規模(Moment magnitude of earthquake)， M_0 為地震矩大小(scalar moment of earthquake)

●初始水位生成—Mansinha and Smylie(1971)的彈性半空間錯移模型(elastic half-space dislocation model)

主要是計算走向滑距及傾向滑距在垂直地表方向的分量，即垂直位移的總量。

Figure 3.4 is a diagram showing the geometry of a fault plane and the resulting displacement components. The diagram is labeled '斷層幾何形狀及座標系統'.

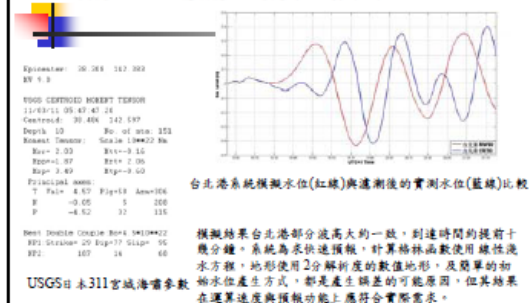
系統介面說明

本計畫利用 Matlab 內建的介面設計模組GUIDE (Graphic User Interface Design Environment)，提供使用者一個設計「圖形使用者介面」(Graphical User Interface, GUI)的程式設計環境，建立近域之海嘯遠報系統。

目前完成之即時地震擷取系統介面

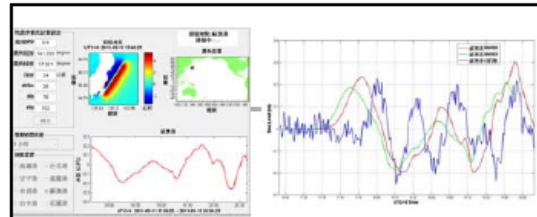
視窗化介面之編譯完成圖

●使用 USGS 最新地震解帶入海嘯模擬預報系統中得到台北港水位變化結果，與使用 EEMD 法濾潮後台北港觀測水位資料比較



台北港系統模擬水位(紅線)與漲潮後的實測水位(藍線)比較

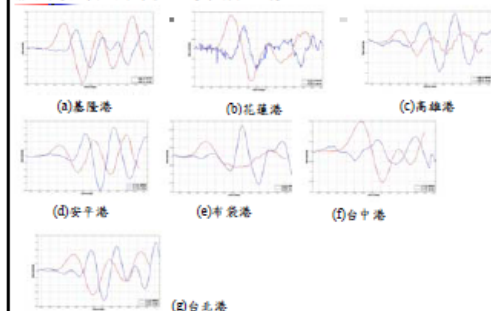
模擬結果台北港部分波高大約一致，到達時間均提前十幾分鐘。系統為求快速預報，計算格林函數使用線性淺水方程，地形使用2分解網度的數值地形，及簡單之初始水位產生方式，都是產生偏差的可能原因，但其結果在運算速度與預報功能上應符合實際需求。



以速算系統及新公佈之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈	以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模Mw9.0)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較
------------------------------------	--

■海嘯事件檢討

東日本大震災地震引發海嘯襲擊日本東北地區南部(宮城、仙台、千葉、福島一帶)；地震發生後一小時，美國地質調查所(USGS)公佈相關地震參數後，本系統計算出海嘯波到達台灣各國際商港之抵達時間與水位變化



■ 系統實例操作

1994年9月16日位於台灣西南方150公里發生一起地震矩規模6.8級之海底地震，震央位置在北緯22.48度，東經118.72度，震源深度約15公里。

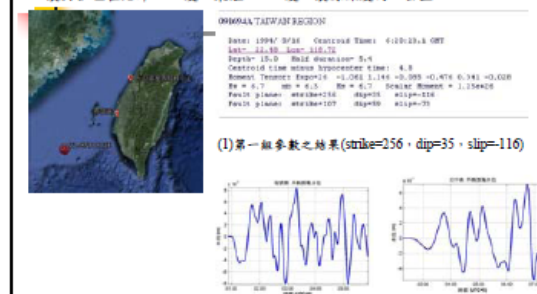


圖3.32 利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)布袋港(b)台中港

(2) 第二組參數之結果(strike=107, dip=59, slip=-73)

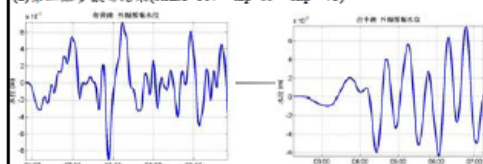


圖3.33 利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)布袋港(b)台中港

兩港之水位變化是波谷先至，第一波也非最大波高；布袋港第一波約在地震發生後1小時11分鐘後到達，最大波高約兩小時後出現，其值約為0.016公尺；海嘴波約在地震發生後3小時44分鐘後抵達台中港外，最大波高約3小時後才會產生，其值約為0.013公尺。兩組參數計算結果並無太大之差異。故初步研訂結果對台中及布袋港無具體之影響。

■系統作業化之運作情形

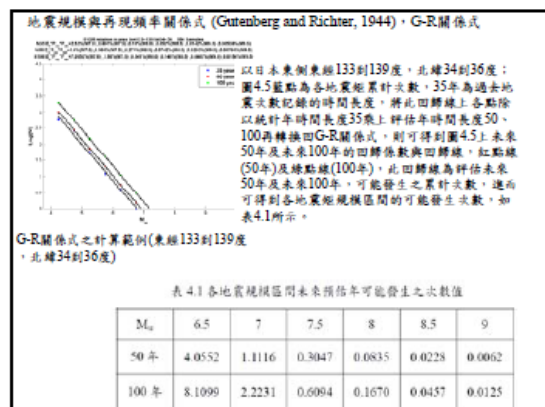
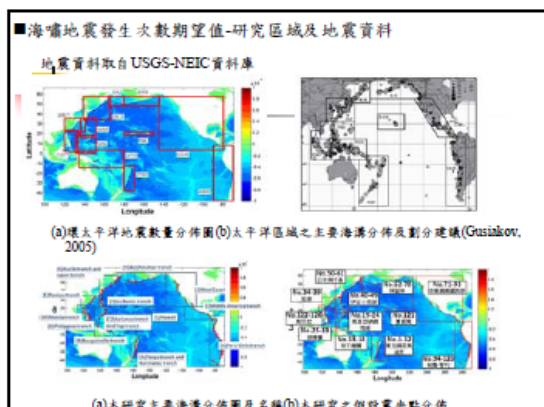
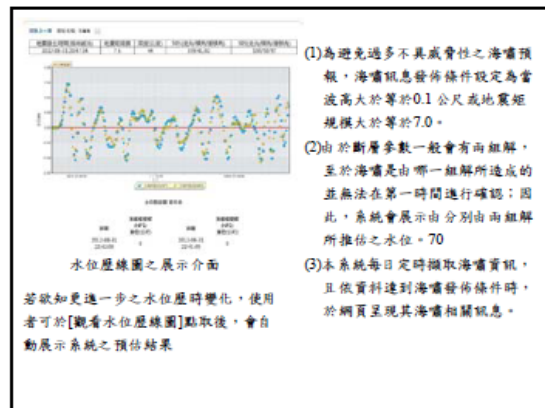
本系統目前於臺灣技術研究中心及中山大學均已架設完成，並提供即時運算，除定期軟體維護及更新外，其他時間均保持作業狀態；並即時擷取環太平洋地區震之地震訊息進行計算作業，依東日本海嘯事件之測試，單一預報點可獲知地震參數後1-2分鐘之內得到初步之水位歷時變化。

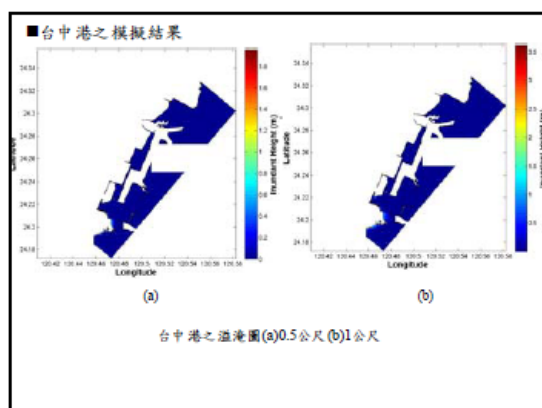
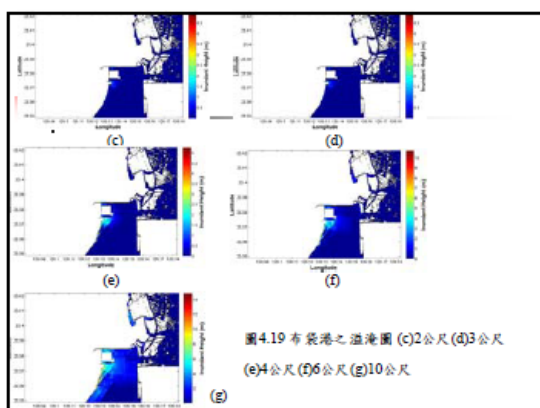
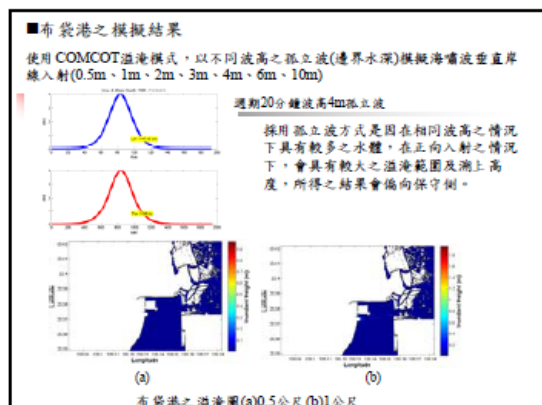
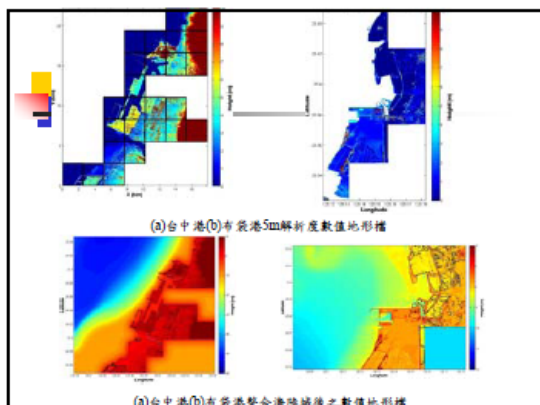
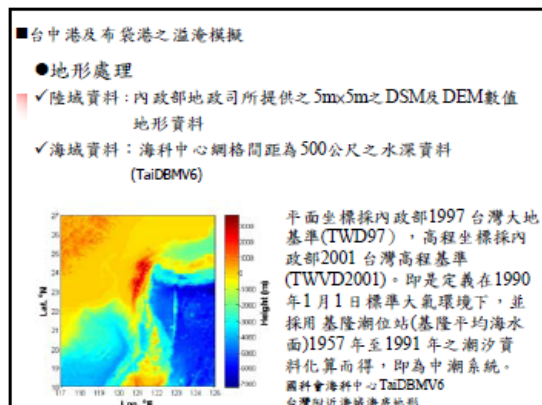
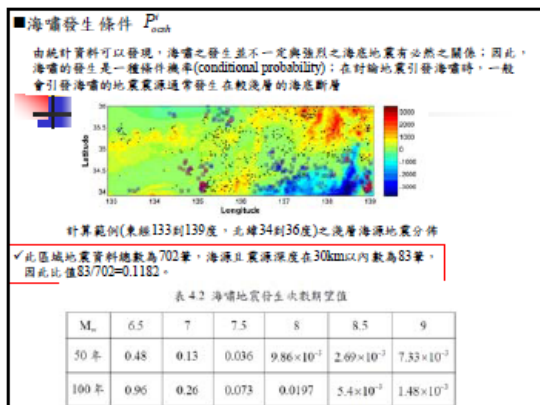
為使該系統適合一般民眾使用及查詢，本系統業已併入港灣技術研究中心之港灣環境資訊網並進行全自動化作業

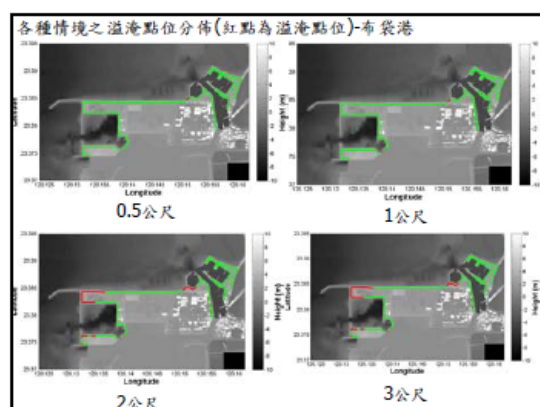
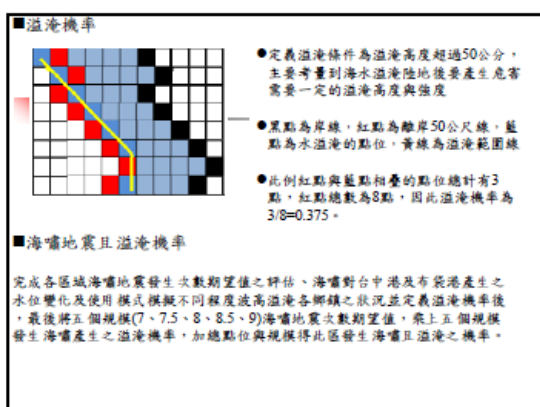
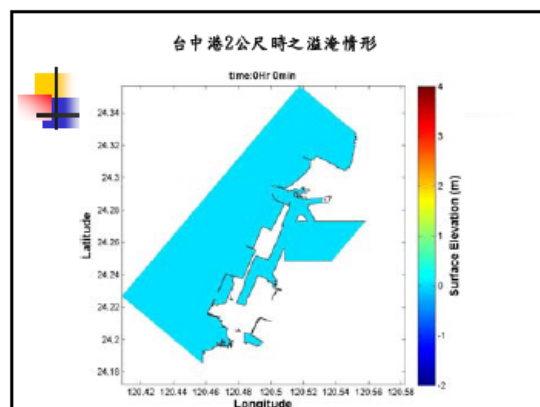
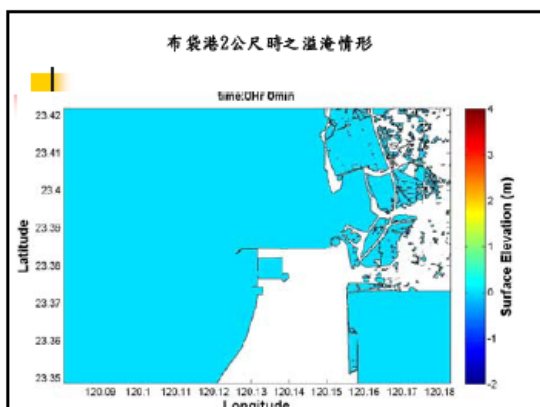
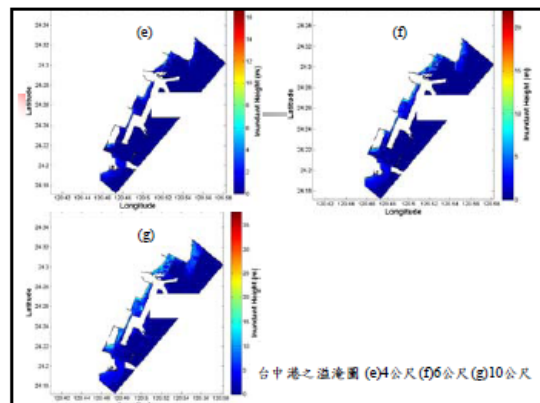
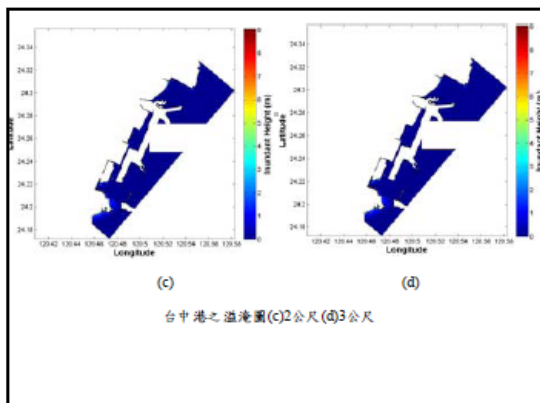
[\[近期海嘯查詢\]](#)、[\[歷史海嘯查詢\]](#)及[\[海嘯系統簡介\]](#)

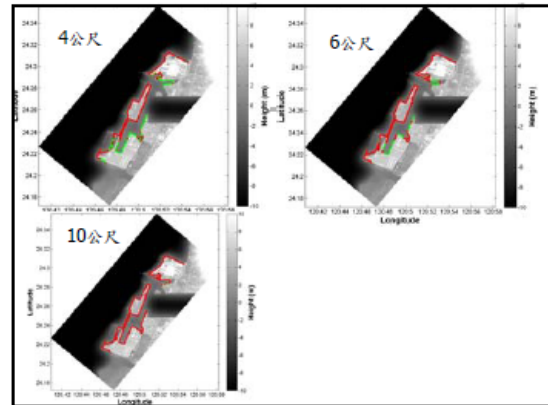
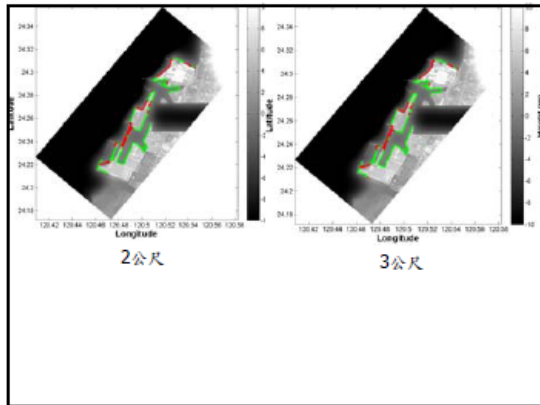
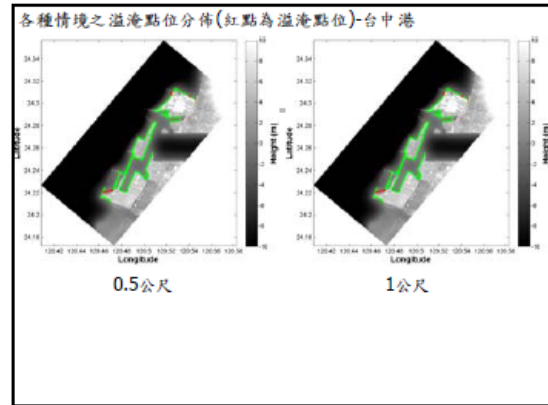
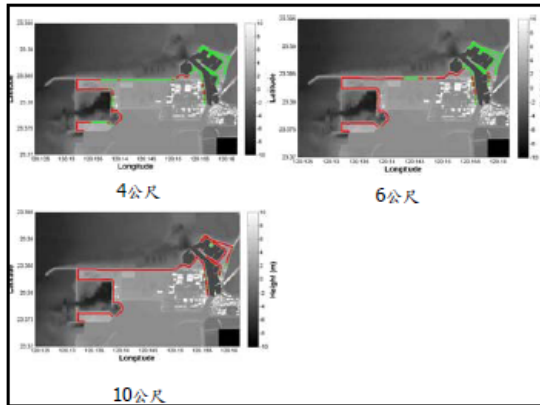


圖 4.17 港灣環境資訊網之[海嘯模擬資訊]介面

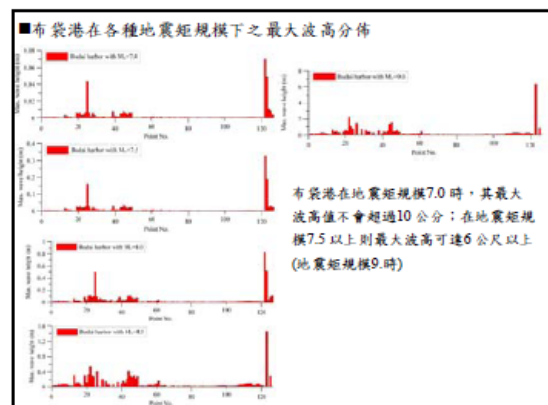


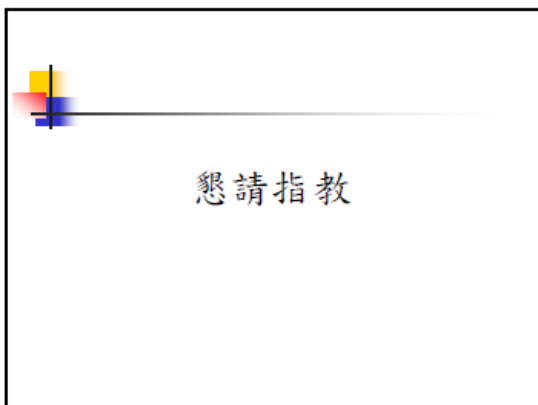
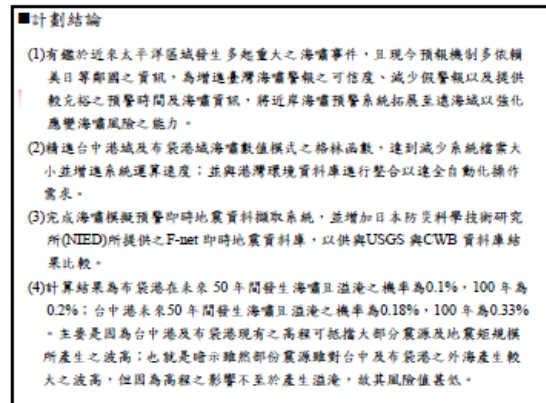
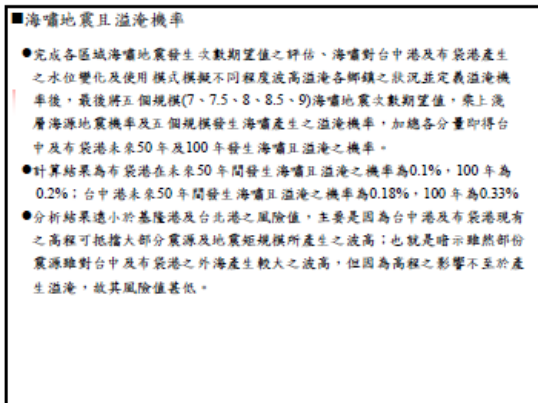
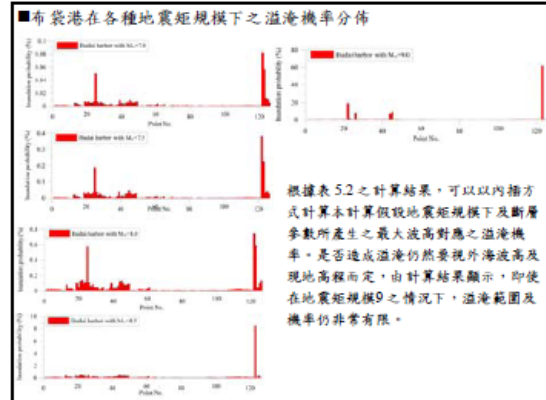
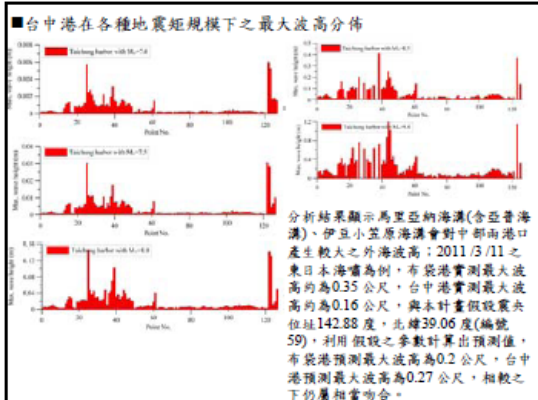






地點	離海 50 公尺的岸線點數	台中港 溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率	離海 50 公尺的岸線點數	布袋港 溢淹高度大於 0.5m 的點數	溢淹機率
0.5		205	1.91%		14	0.58%
1		420	3.91%		20	0.83%
2		2883	26.85%		415	17.13%
3	10730	2883	26.85%	2422	415	17.13%
4		6377	59.39%		833	34.39%
6		8327	77.55%		1404	57.97%
10		10593	98.66%		2275	93.93%





附錄六 ■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4)

執行單位：中山大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
一.翁文凱委員 1.部份文章內容有誤或誤植，請更正。 2.本計畫目的之一為提昇海嘯模擬技術，但以目前計畫結果，如圖 3.28~3.29 中實測結果，其預測與實測間結果尚有相位與水位高之差異，水位差雖然因以往記錄水位高不大，導致差異不大，但相位差有將近 30 分鐘，此可能不利預警系統之建立。 3.目前可能實際可能海嘯溢淹之高度影響，台中、布袋港溢淹範圍應儘可能說明，而不是以孤立波假設高度評估溢淹範圍。	1.感謝委員指教。已更正相關內容。 2.感謝委員指教。海嘯模擬之準確性與初始水位之建立及海底地形有關；若能取得較高解析度之海底地形應能有效提高模擬準確度。請見期末報告 p.4-19 第 11~16 行之說明。 3.感謝委員指教。由於震央位址及實際斷層參數無法準確預知，為了得到可能之最大溢淹範圍，而使用情境模擬及鐘型波方式取代實際海嘯之情境，此一方式應能滿足防災之需求。請見期末報告 P.5-10 第 5.3.2 節之說明。	同意 同意

二.林昭圭委員		
1.海嘯模擬及預警系統之建立，應設立完成計算時間，以及目標預警起動時間。	1.感謝委員之建議。目前系統是 24 小時進行全自動作業化作業，並設定地震矩規模之下限值，超過此一下限值，系統於擷取參數後自動運算作業，依東日本海嘯之實例測試顯示，系統能於 1-2 分鐘之內完成單一點之模擬。請見期末報告 P.4-25 第 4.5 節第 3~9 行之說明。	同意
2.自動擷取 PTWC 或 USGS 網站資料為工作項目之報告應就這些單位之資料格式，如何擷取及如何轉至系統作一說明。	2.感謝委員建議。本計劃是擷取 USGS 之即時地震資料，並使用 Matlab 內建之 Java 套件進行擷取作業，詳盡之說明及資料格式，請見期末報告 P.3-17 第 19~23 行之說明。	同意
3.對台中港及布袋港之風險評估不宜僅以大陸地區或澎湖所發生之海嘯為討論對象，應考慮其他海嘯來源所可能引起之海峽振盪。	3.感謝委員建議。本 COMCOT 並不適合計算台灣海峽中之震盪現象。	同意
4.海嘯溢淹機率以超過離岸 50 公尺，溢淹高度超過 50 公分之標準如何決	4.感謝委員之建議。此一標準值係考量當海嘯來襲時，需明確定義出可能之	同意

定？因以 $c = \sqrt{gh}$ 計算波速，以 $h=20\text{m}$ 計算，只需約 3 秒，海嘯波就行進超過 50m。 5. 速算系統之推算水位與實測不合，應再檢討。	影響範圍及溢淹高程；由於並無前例建立類似之概念，故經由類似案例(例如南亞海嘯之檳城)之情境定意此一標準。請見期末報告 P.5-20 第 4-23 行之說明。 5.感謝委員指教。海嘯模擬之準確性與初始水位之建立及海底地形有關；若能取得更準確之地震參數，應能提高水位模擬之準確性；依目前震源參數之來源，現模擬之誤差尚屬合理範圍。請見期末報告 P.4-19 第 11-16 行之說明。	同意
三.楊德良委員 1.P2.1，請說明為何本期計畫選取台中港與布袋港？ 2.P3.1，請再詳細「格林函	1.感謝委員指教。由於台中港及布袋港臨近中國沿海，根據歷史記錄，該區域在宋代有過疑似海嘯之紀錄，故未能排除發生海嘯之疑慮；且若能進一步建立兩港之風險值，更能在防災應變策略上做更有效之決策。請詳見期末報告 P.4-3 之 4.2.1 節說明。 2.感謝委員建議。互逆格林	同意

數」與「互逆格林函數」如何使用在本研究計畫，請以一範例，放再附錄，詳細說明以利閱讀與了解。	函數之驗證及建置方式以擇選一發表過之案例進行說明，請見期末報告之附錄一。	
3.P3.29，請說明圖 3.28 預測與實測為何差異有許不同？請在文內說明如何獲得這些圖。	3.感謝委員指教。圖 4.11(即原圖 3.28)之實測水位均是利用 EEMD 法濾除潮汐後取得(請見 P.4-7 第 4.3.2 節之說明)，其與預估值之差異原因，據推測應為震源參數及海底地形之解析度所致。	同意
4.P4.22，圖 4.20 3 之紅色格子左邊白色格子是否為藍色格子之筆誤？	4.感謝委員指教。圖 5.13(即原圖 4.20)之白色格子為反白，便於指示溢淹點位之用。請見期末報告 P.5-21 之圖 5.13。	同意
5. P4.12，方程式(4.12)與(4.13) H 不可為 0，如何處理 $H=0$ 之情景？	5.感謝委員指教。H 在模式內是兩個網格之平均值，一般出現在海陸地形交界處，在多起模擬案例中，目前尚未遇到剛好等於 0 的情形。為避免模式產生計算誤差，可考慮在模式加入條件式，設定 $H=0$ 時，給予一極小值。請見	同意

	期末報告P.3-8第8-10行之說明。	
6. P4.12，(4.13)方程式-fp 應為+fp。	6.感謝委員指教。已更正，請見期末報告P.3-5之(3.10)式。	同意
7.P4.19，圖 4.24 應為圖 4.18 之筆誤？	7.感謝委員指教。原圖4.24 已更正為圖5.10，請見期末報告P.5-11之圖5.10。	同意
8.參 1，參 2，參 3 請詳細再查是否所提到的文獻皆有列入？格式請統一。所有有彩色圖，請以彩色圖為之。期中簡報資料，請放大 4 倍並使用彩色，以利閱讀。	8.感謝委員指教。參考文獻已更正。期末報告中各圖均以利用彩色呈現。	同意
8.C.F. Richter 教授前面仍應補上加州理工學院 (Caltech)字語，因 Caltech 是美國研究地震之發源地？	8.感謝委員建議。已加註。請見期末報告P.3-21第20行之說明。	同意
9.P4.21，海嘯具有強大的動量，是否計算其對港口或海堤之潛在破壞力(用簡單一維 momentum principle 即可，$PQ(V_{out} - V_{in}) = \sum F_x$？)	9.感謝委員建議。本計劃模擬過程中都假設現有結構物並未遭受破壞；理論上利用一維動量方程式應可概估結構物所受之外力；但是在實務上由於流速仍	同意

10. P4.12 方程式(4.11) ξ 為 ζ 之筆誤？	需要做進一步之驗證，故本計劃並未估算海嘯波所產生之動量。請見期末報告P.5-35第10~16行之說明。 10.感謝委員指教。已更正，請見期末報告P.3-5之(3.10)式。	同意
四.簡仲璟委員 1.報告中第二章內容有新的資料彙入或更新？請補充說明。 2.「海嘯預報」與「海嘯預警」本質上不同，因此，建議分別作說明。 3.依目前第三章內容似乎較偏向為海嘯預報，海嘯預警建議另章作說明。 4.台中港及布袋港海域海嘯預報子系統是否可適用於其他港口？若否則其他港口何時精進？目	10.感謝委員指教。第二章中另行更新本年度新發生之海嘯事件及遠域海嘯之紀錄，請見期末報告P.2-12 圖 2.8 及表 2.3。 2.感謝委員建議。「海嘯預報」與「海嘯預警」之說明請見期末報告 P.3-1 之 3.1 節。 3.感謝委員建議。「海嘯預報」與「海嘯預警」之說明請見期末報告 P.3-1 之 3.1 節。 4.感謝委員指教。布袋港及台中港之子系統並不適用於其他港口，因資料庫不同。其餘港口(除了基隆、	同意 同意 同意 同意

前精進成果除了減少資料儲存之硬碟空間及快速完成資料讀取提昇計算速率外，是否還有其他精進成果？	台北、布袋及台中外)將於未來計劃期程內，依進度持續進行精進作業。另一項精進作業則是將本系統與港灣環境資訊網進行整合。請見期末報告 P.4-25 第 4.5 節之說明。	
5.海嘯波波長與台灣海峽之地形水深相較，較準確之地形水深資料是否能改善海嘯波預報？建議再評估。	5.感謝委員指教。經模擬分析顯示，波長與地形解析度之比值約為 36；仍具有一定之影響量。請見期末報告 P.4-19 第 21-26 行之說明	同意
6.海嘯預警系統目前在本所海情中心運作之情形請補充說明。	6.感謝委員建議。目前該系統已與港灣環境資料庫進行整合，請見期末報告 P.4-25 第 4.5 節之說明。	同意
五. 蘇青和委員 1. 建議期中報告第三章之前，增加「海嘯速報系統」一章，內容包括 1.數值模式介紹；2.系統建置(包括自動擷取地震資料、不同地震級數轉換、資料庫建置、系統介面說明...等)；3.自動化操作說明...等。	1.感謝委員建議。「海嘯速報系統」已調整至第三章。	

2.第三章改為第四章並進行模式驗證及提昇技術或精確度之論述。日本 311 海嘯，本研究提供中央災害應變中心即時海嘯相關預警資訊，以災害預警效益而言成果甚佳，建議針對模擬成果與觀測值之相位或波高偏差，作較深入分析。	2.感謝委員建議。期末報告第四章已更正為「模式精進及實例探討」。模式與東日本海嘯事件差異之討論，請詳見期末報告 P.4-16 第 4.3.2 節之說明。	同意
3.預報系統展示地點建議增加標示水深及離岸距離。海嘯速報系統，僅顯示各港區較外海海嘯引起之水位變化，本研究目前溢淹模擬結果，或可增加提供部份港區道路，水位淺化或極端朔上之資訊。	3.感謝委員建議。展示介面已加註預報點水深及離岸距離，請見期末報告 P.3-33 之圖 3.23。其餘建議之精進項目，目前正逐步進行研究中。	同意
4.海嘯引起之溢淹分析除考慮不同波高，不同週期效應如何？溢淹離岸距離 50M 或可機動依不同港區作適當調整。	4.感謝委員建議。週期之效應已於去年計劃中進行測試；本研究所定之溢淹機率，其定義尚屬少見，主要目的為表示該區受到海嘯溢淹風險之高低；離岸距離當可視地域特性而略作調整。請詳見期末報告 P.5-20 第 10-11 行之說明。	同意

5.報告撰寫題目內容請依 本所規定，期末報告增加 納入中英文摘要。	5.感謝委員指教。已增加中 英文摘要。	
---	------------------------	--

附錄七 ☐期中☒期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：提昇海岸及港灣海嘯模擬技術之研究(2/4)

執行單位：中山大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
楊德良委員： 1.PA-1 可否利用 COMCOT 及格林函數模式，做一個台中港或布袋港為範例，比較 COMCOT 線性、COMCOT 非線性及格林函數三個模式所得海嘯波傳播過程？ 2.期末報告有些筆誤，請修正之；今舉例如下： (1).P1 中文摘要 USGS (Society)應該為 (Survey)。 (2).英文摘要第一段與中文原段翻譯不相等。 (3).PII area 應該為 areas, continuity 應該為 continuously, show 應該為 showed。 (4).P16 Marine 應該為 Marine。 (5).P11(張等，1999)文獻請列出參考文獻。其他仍有類似情形，參考文獻卻沒有。 (6).P108 只有結論，沒有建議？可否加加上一段	1.感謝委員之建議。附錄一已於台中港外海虛擬一地震，比較 COMCOT 線性、COMCOT 非線性及格林函數三個模式之水位時序列變化；請見附錄一之附 1-18 頁之說明。 2.感謝委員之指教。 (1)已更正。 (2)已更正。 (3)已更正。 (4)已更正。 (5)已補列於參考文獻中。 (6)已增列建議事項於 6.2 節。 (7)參考文獻均以列出。	同意 同意

建議？ (7). P109 參考文獻：請一列出，不要遺失。		
林焯主委員： 1.有關期中報告意見回覆部份：(1).由於海嘯預警作業有必然之前置作業程序與必要時間，本計畫因需要建置預警系統，仍請就作業上所需之目標預警啟動時間協助評估。(2).D-2 頁第 3 項之答覆與問題不合。是否本計畫所用之模式不能計算海峽中之灣水振盪？(3).D-3 頁與 5 項問題仍可用逆算法進行檢討與修正。 2.P64 及 P65，速算系統之推算與實測有很明顯的時間差，應該檢討與修正。(圖 4.11 及 4.12) 3.TaiDBMV6 在港灣附近之水深地形並不正確(太深)會影響淺化效應。	1.感謝委員之指教。 (1)由於海嘯發生與地震有關，以目前科學技術並無法事前準確預測地震之發生時間，因此也無法藉此評估系統預警啟動時間。因而系統係採用 24 小時全天候作業，以確保可隨時接受地震之訊息，減少對預警前置作業之依賴。請詳見 P.4-25 4.5 節第 3-9 行之說明。 (2)利用 COMCOT 計算台灣海峽之震盪並不適合。 (3)利用水動力觀點使用逆推程序探討海嘯初始波源之水位目前仍在發展中，但此一建議是檢討海嘯初始水位可行方式之一。 2.感謝委員之建議。未來將從提高地形之解析度及海嘯初始水位作適當之檢核。請詳見 P.4-19 第 11-26 行之說明。 3.感謝委員之指教。本研究海域地形除了採用 TaiDBMV6 外，在港灣部	同意 同意 同意

4.海嘯波之週期可參考日本 311 海嘯之觀測資料 (大於 20 分鐘)。	份另採用港研中心所提供之實測地形進行修正。 4.感謝委員之建議。海嘯之週期一般多約為 15-30 分鐘；本年度計畫乃配合前期計畫採用同一評估標準；請見 P.5-11 第 2-4 行之說明。	同意
蔡政翰委員： 1.報告中請加入前期成果。 2.圖 4.11 之速報系統水位與實測水位有些差距，報告人認為海底水深資料不夠詳細所致。不知可否計算一下海嘯波波長與水深資料 resolution 的比值，若此比值很大，可能 resolution 就不是問題。 3.因 4.11 與 4.12 之圖說請加註那一個地震之海嘯。 4.P.45 圖 3, 195 為圖 19 之誤，P77 文中之圖 4.5 改為圖 5.5。 5.溢淹機率可能會誤導，溢淹面積百分比可能較好。	1.感謝委員之建議。請見 P.1-2 頁 1.4 節之說明。 2.感謝委員之建議。經模擬分析顯示，波長與地形解析度之比值約為 36；仍具有一定之影響量。請見 P.4-19 第 21-26 行之說明。 3.感謝委員之指教。兩圖均已加註 0311 東日本海嘯事件，請詳見 P.4-21~4-22 之圖 4.21~4.22。 4.感謝委員之指教。兩圖均已更正；請見 P.3-29 之圖 3.19 及 P.5-6 頁之圖 5.5。 5.感謝委員之建議。本研究溢淹機率之定義主要欲反映該港對海嘯溢淹之風險	同意 同意 同意 同意 同意

	值，因此採用海岸線之長度作為定義之標準；請詳見 P.5-20 第 19-23 行之說明	
翁文凱委員： 1.在系統驗證與海嘯事件檢討，數值模擬之相位與實測值相位相較有較大的差異，時間上差異由 10 分至 30 分不等。由於波高較小，影響亦不大，但若波高較大時，則將影響撤退災區時間，建議此部份應再加強檢討。 2.台中港在各震矩下波高並不大，最大震矩約 1 米左右；但台中港溢淹圖(模擬結果)內為何會有 10 米，6 米等，其意義為何？ 3.建議針對台灣地區受破壞可能性較高，破壞性較大的來向、震度、海嘯進行檢討。	1.感謝委員之建議。由 (3.16)式發現誤差之可能來源為地形解析度及初始水位之正確性，未來之檢討作業應從此兩點著手；詳見P.4-19第11-16行之說明。 2.感謝委員之指教。雖然遠低於溢淹潛勢圖之入射波高，但因考量防災需求及建立各港統一之標準評估程序，故在本研究中台中港之溢淹潛勢圖及相關分析，仍與布袋港一致，採用較高之入射波高作為模擬之條件。請詳見P.5-29 第11-14行之說明。 3.感謝委員之建議。考量海嘯侵襲時許多必要條件均無法得知，故本研究採用單一波形及入射方向進行模擬；請詳見P.5-10第5.3.2節之說明。	同意 同意 同意

李忠潘委員： 1.P.12 表 2.2，震央位址請改為實際位置。 2.RGF 的預報決定於 Hs 的準確與否，即決定於海嘯震源處的斷層參數，由於大地震發生處的參數常屬未知，因此，如何增進預報的準確性呢？ 3.非斷層地震造成的海嘯，如何由 RGF 方法來預報呢？	1.感謝委員之指教。該表已更正；請詳見 P.2-9 之表 2.2。 2.感謝委員之指教。附錄三為當斷層參數在未知之情況下之參考值，可供在海嘯發生初期資訊未明之情況做初期預估之用；請詳見 P.5-4 第 15-21 行之說明。 3.感謝委員之指教。目前除了由地震引起之海嘯初始水位有公認之模式可供引用外，其他水位之驅動方式仍在發展中；因此，本研究僅能用來預估由地震所造成之海嘯；請詳見 P.3-16 第 15-19 行。	同意 同意 同意
蘇青和委員： 1.報告撰寫內容請依本所規定，如中英文摘要之格式，增加圖表目錄，頁碼依章編號。 2.正式報告應增加教育推廣之成果。 3.第一章緒論 P3 最後一段“---海嘯災害風險，評估結果分別為 2.79%---”，百	1.感謝委員之指教。均已按規定撰寫。 2.感謝委員之建議。請詳見 P.5-37 頁第 5.4 節「教育推廣及成果」。 3.感謝委員之指教。本研究風險值量化結果之意義為「某個特定點位面對所有	同意 同意 同意

分比代表何意義？	潛勢震源點在未來 50 年及 100 年間發生超過地震矩規模 7 之海嘯且溢淹之或然率」；請詳見 P.1-3 頁第 9-11 行之說明。	
4.第二章圖 2.9，應改為表 2.3，統計今年發生海嘯事件，其選取標準為何，引自何處？	4.感謝委員之指教。該圖已更正為表 2.3；該表資料來源為美國 NOAA 之海嘯災害資料庫，檢索條件為 2012 年於全球發生之海嘯事件。	同意
5.第三章中之表 4.1 及表 4.2，應改為表 3.1 及表 3.2。	5.感謝委員之指教。已更正；請詳見 P.3-10(表 3.1) 及 P.3-20(表 3.2)。	同意
6.第四章名稱建議改為“模式精進及實例探討”，以彰顯模式提昇術或精確度之論述。	6.感謝委員之指教。已更正為「模式精進及實例探討」。	同意
7.P59 建議增加海嘯速報系統計算與 EEMD 之比對例子。	7.感謝委員之指教。已增加 2010 智利海嘯之驗證案例；請詳見 P.4-7 頁第 4.3.2 節之說明。	同意
8.第五章溢淹離岸距離 50M，或可機動依國內不同港區海岸特性作適當調整。	8.感謝委員之指教。本研究所定之溢淹機率，其定義尚屬少見，主要目的為表示該區受到海嘯溢淹風險之高低；離岸距離當可視地域特性而略作調整。請詳見 P.5-20 第 10-11 行之	同意

9.第六章名稱建議改為“結論與建議”。	說明。 9.感謝委員之建議。已更正。	
----------------------------	----------------------------------	--