103-7-7722
MOTC-IOT-102-H3DB001b

海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究 (1/2)

交 通 部 運 輸 研 究 所

中 華 民 國 103 年 3 月

103-7-7722
MOTC-IOT-102-H3DB001b

海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究 (1/2)

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 103 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究. (1/2) /
陳冠宇等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所,
民 103.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-04-0456-2(平裝)

1.海嘯 2.風險評估

351.9791 103002097

海嘯隊港區及跨河橋梁之影響風險評估研究 (1/2)

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 103 年 3 月
印 刷 者：
版(刷)次冊數：初版一刷 75 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：1010300180　　ISBN：978-986-04-0456-2 (平裝)

103

海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究

(1/2)

交通部運輸研究所

GPN: 1010300180
定價 300 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

<table>
<tr><td colspan="4">出版品名稱：海嘯對港區及跨河橋梁之影響風險評估研究(1/2)</td></tr>
<tr><td>國際標準書號
ISBN978-986-04-0456-2 (平裝)</td><td>政府出版品統一編號
1010300180</td><td>運輸研究所出版品編號
103-7-7722</td><td>計畫編號
102-H3DB001b</td></tr>
<tr><td>本所主辦單位：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</td><td colspan="2">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、劉俊志、張義偉
地址：804 高雄市鼓山區蓮海路 70 號
聯絡電話：07-5252000-5353</td><td>研究期間
自 102 年 02 月
至 102 年 10 月</td></tr>
<tr><td colspan="4">關鍵詞：海嘯早期預警系統、高雄港、安平港、海嘯風險、橋樑沖刷</td></tr>
<tr><td colspan="4">摘要：

海嘯會在沿海地區的引起巨大的破壞，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 年印尼海嘯及 2011 年東日本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高雄、安平兩港之子系統，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高雄港及安平港在未來 50 年及 100 年所可能遭受之海嘯風險，以及建立跨河橋梁之海嘯模式，以模擬海嘯受淺化效應溯升對其跨河橋梁之影響，其結果將對現有港灣結構物設計準則有所幫助。

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。</td></tr>
<tr><td>出版日期</td><td>頁數</td><td>定價</td><td>本 出 版 品 取 得 方 式</td></tr>
<tr><td>103 年 3 月</td><td>268</td><td>300</td><td>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。</td></tr>
<tr><td colspan="4">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</td></tr>
<tr><td colspan="4">備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。</td></tr>
</table>

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

TITLE: Tsunami Risk Analysis on Harbor Areas and Bridges across the River (1/2)

ISBN	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER
978-986-04-0456-2 (pbk)	1010300180	103-7-7722	102-H3DB001b

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) 26564418

PROJECT PERIOD
FROM February 2013
TO October 2013

RESEARCH AGENCY: NATIONAL SUN-YAT-SEN UNIVERSITY
PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen Guan-Yu, Chen Yang-Yih
PROJECT STAFF: Yao Chien-Chung, Liu Chung-Chi, Chang Yi-Wei
ADDRESS: No.70, Lianhai Rd., Gushan District, Kaohsiung 804, Taiwan (R.O.C.)
PHONE: (07) 5252000 ext.5353

KEY WORDS: tsunami early warning system, Kaohsiung Harbor, Anping Harbor, tsunami risk, and bridge scouring.

Abstract

A tsunami can induce huge damage in the coastal area. This devastating disaster will be mitigated if a practical tsunami warning system is implemented. After the Indian Ocean Tsunami of Dec. 2004, tsunami-warning system has been established in counties around the Indian Ocean. However, recent tsunami events such as the Samoa tsunami of 2009 and the Indonesia tsunami of 2010 show that there are some problems in the present tsunami warning systems and/or processes. The huge Eastern Japan Tsunami of March 2011 also reminds us how serious the disaster can be. Besides, for the neighboring area 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 approximate scale, instead of the tsunami wave height, is provided. The information is not useful for harbor companies. In order to accelerate the warning process, improve the accuracy of the tsunami, the original tsunami early warning system is improved and developed in this project. 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 the leading wave and the maximum wave height after these parameters are obtained. Furthermore, the estimation of tsunami risk in future 50, 100 year for Kaohsiung Harbor and Anping Harbor are also determined in this project. Besides inundating the land, a tsunami can induce scour around bridge piers as it propagates upstream in a river. Pier scouring due to tsunamis in Gaoping River will also be investigated in the present study.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
March 2014	268	300	☐RESTRICTED ☐CONFIDENTIAL ☐SECRET ☐TOP SECRET ■UNCLASSIFIED

目 錄

圖 目 錄

表 目 錄

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；一：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。六：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」計畫規劃二年合作研究計畫之第一年。

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；2011 年東日本海嘯事件，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臺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高雄、安平兩港之子系統，使能自動美國地質調查局（United States Geological Survey）網站來更新地震資料，再自動進行海嘯模擬。本計劃利用機率之概念評估高雄港及安平港在未來 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；發展淹水潛勢分析與預警系統，

提供溢淹模型與風險評估，據以提高港灣防災能力及建立民眾自救知識與緊急逃生用。另一方面，海嘯傳到近岸時，因受到地形淺化效應溯升，由河口逆流而上，對河川中的跨河橋樑造成沖刷情形，本計畫將建立跨河橋樑海嘯數值模式及橋墩週遭受海嘯衝擊時之沖刷數值模式，評估高屏溪跨河橋樑可能遭受的威脅，供運輸單位參考。

1.2 研究範圍與工作內容

本研究屬交通部運輸研究所「海嘯對港區及跨河橋樑之影響風險評估研究(1/2)」計畫規劃二年合作研究計畫之第一年，本年度之主要目的為蒐集臺灣鄰近海域或遠區海域之可能發生海嘯隱沒帶、斷層(如馬尼拉海溝)等資料並進行分析、精進高雄港域及安平港域海嘯數值模式之格林函數、評估港區未來 50 年及 100 年之海嘯災害風險及高屏溪口跨河橋樑所受海嘯之衝擊力變化。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，進行相關配合研究。

1.3 工作項目

1.自動擷取美國地質調查局(United States Geological Survey)地震資料。
2.高雄港域及安平港域未來50年及100年之海嘯災害風險評估。
3.精進高雄港域及安平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.建立高雄港域及安平港域海嘯模擬預警系統並進行教育訓練。
5.模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊力。
6.模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑橋墩週遭之沖刷。
7.模擬潮汐影響下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊

力變化。

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) 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) 101 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，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海嘯資訊系統自動化之建置。

(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%；臺中港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率為 0.18%，100 年為 0.36%。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份震源及地震矩規模所產生之波高；也就是雖然部份震源雖對臺中港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。

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2011年3月東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1500~2013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。

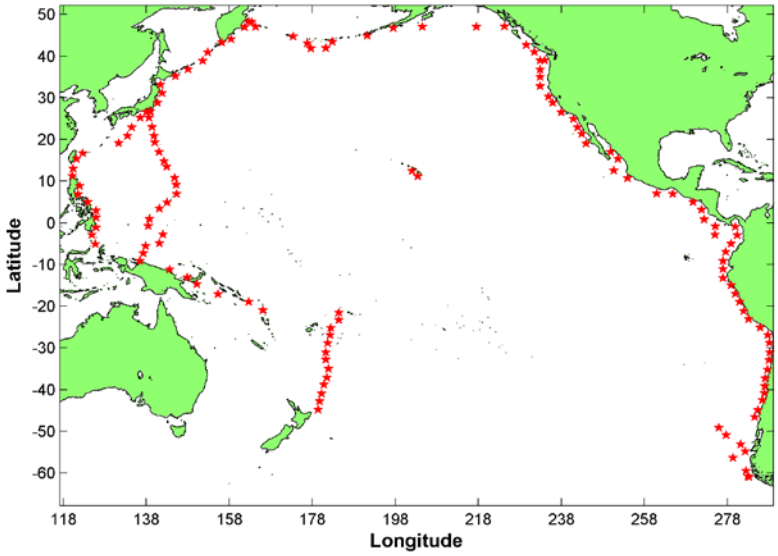


圖 2.1 環太平洋地震帶及海溝分佈(紅點即是海溝位置)

圖2.2為海嘯事件中之地震規模分佈圖，92%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1157起樣本數中，僅有764起有紀錄震源深度，震源深度90%均發生在60公里以內，如圖2.3。

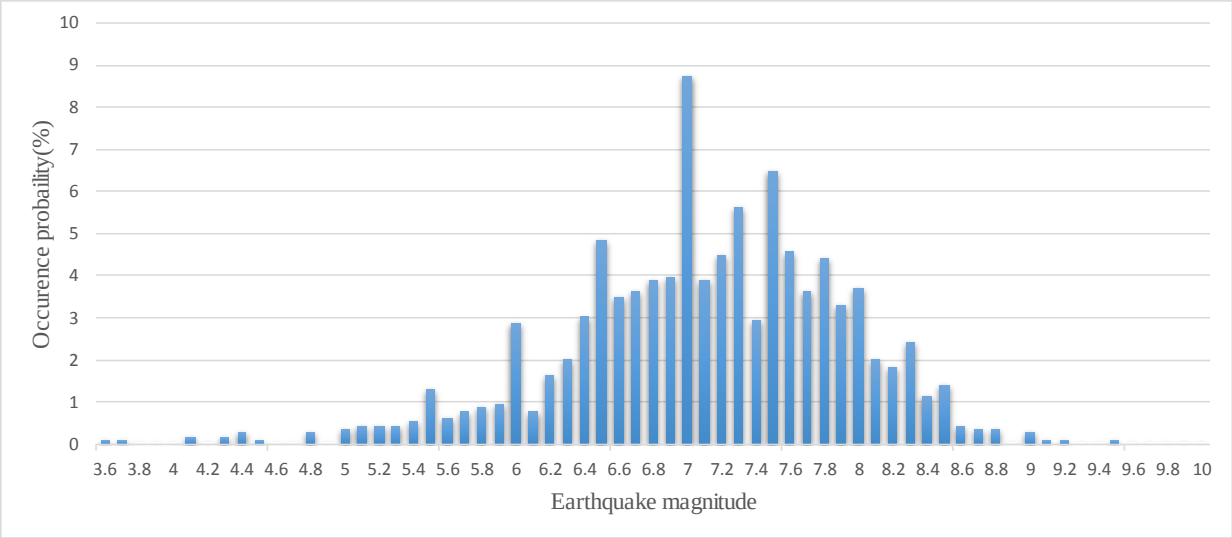


圖 2.2　1500-2013 年海嘯事件之地震規模分析

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

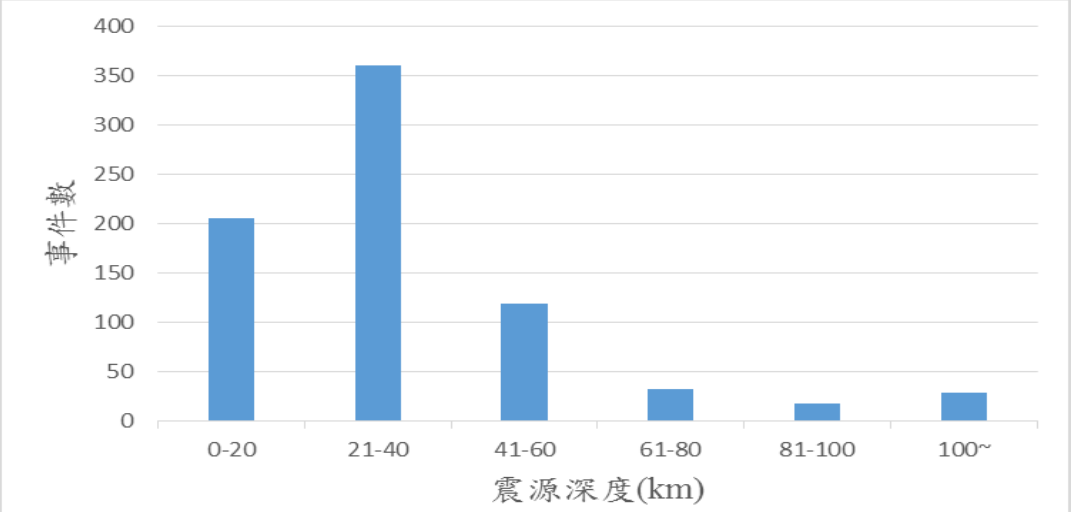


圖 2.3　1500-2013 年海嘯事件之震源深度分析

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2013年5月為止，較具規模之海嘯事件共九起，如表2.1所示。

表2.1　2004~2013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	38.9	15,854
2013/2/6(8.0)	Solomon	Solomon Islands		10

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日東日本海嘯事件中，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

有核電廠等重要結構物，海嘯過後所引發之大火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

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；依海嘯潛勢波源而言，西南外海之海底斷層系統連接馬尼拉海溝，此一區域被地質學者認為是海嘯之高風險區域。根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對高雄港及安平港威脅性最大的是來自於發生西南外海以及連接馬尼拉海溝的海底斷層系統；如圖2.4及圖2.5所示。

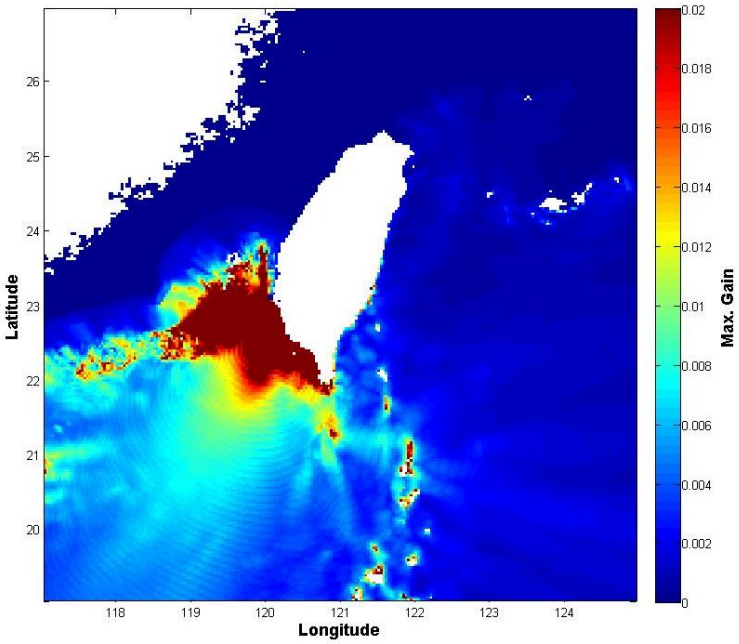


圖2.4 高雄港之放大率及海嘯潛勢波源區

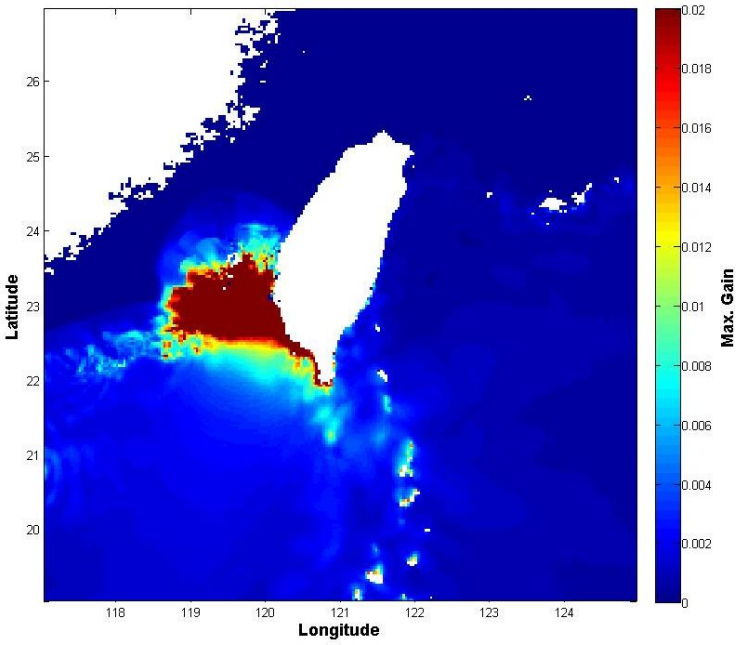


圖2.5 安平港之放大率及海嘯潛勢波源區

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 2.6 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 年(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」:「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 日臺南

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物，將歸，霎時間波濤暴起，二物竟去，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。」。

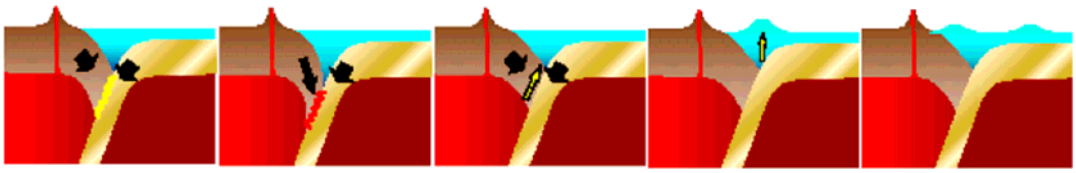


圖 2.6 板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖

(資料來源：邱等，2005)

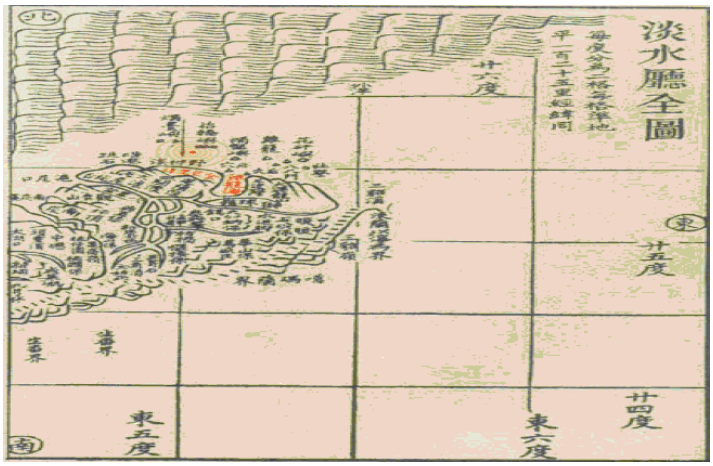


圖 2.7　1867 年基隆海嘯事件，雞籠頭沿海遭受海嘯之侵襲

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，其嚴重程度可見一般。

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 1500~2013 年共有 19 起海嘯事件，詳見表 2.2 及圖 2.8 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 1500~2013 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.

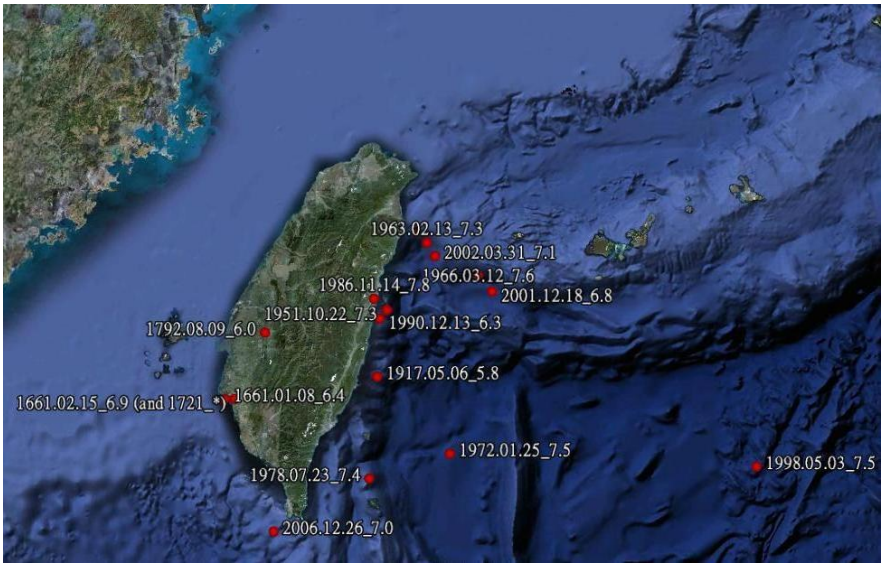


圖 2.8 臺灣海嘯事件之震源分佈

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，2011)。

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 2.9 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、仙臺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。

智利大地震引起海嘯

巨潮洶湧東來

本省有驚無險

各地昨均嚴密防範平安過渡

基港潮汐創一・九公尺紀錄

基尚智橋沖斷

四艘舢板覆沒

居民紛紛逃往高地

海潮瞬息退落未釀成災

太平洋兩岸

遭海嘯襲擊

日本夏威夷百餘人喪生

澳洲菲律賓均蒙受影響

地震與海嘯之後

智利一火山

昨又告爆發

蔡戶沖

定北

昨日

圖 2.9　1960 年基隆遭受智利海嘯襲擊之紀錄

表 2.3　2012-2013 年發生之海嘯事件

Date						Tsunami Cause				Addl Tsu Info	Deposits	Tsunami Source Location				Tsunami Parameters				
Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Sec	Val	Code	Earth-quake Mag	Vol-cano			Country	Name	Latitude	Longitude	Max Water Height	Num. of Runups	Magnitude Abe	Magnitude Iida	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	19.4	4	1	7.3		*		EL SALVADOR	OFF THE COAST	12.139	-88.590	.36	11			
2012	8	31	12	47	33.3	4	1	7.6		*		PHILIPPINES	PHILIPPINE ISLANDS	10.811	126.638	.15	17			
2012	9	5	14	42	7.8	4	1	7.6		*		COSTA RICA	COSTA RICA	10.085	-85.315	.16	2			
2012	10	28	3	4	8.8	4	1	7.7		*		CANADA	BRITISH COLUMBIA	52.788	-132.101	.76	110			
2012	11	7	16	35	46.9	4	1	7.3		*		GUATEMALA	GUATEMALA	13.988	-91.895		6			
2012	12	7	8	18	24.0	4	1	7.3		*		JAPAN	OFF EAST COAST OF HONSHU ISLAND	37.889	144.090		3			
2012	12	28				0	8			*		CHINA	ZHAOJUN BRIDGE, HUBEI PROVINCE	31.256	110.733		0			
2013	1	5	8	58	19.0	4	1	7.5		*		USA	SOUTHEASTERN ALASKA, AK	55.368	-134.621		8			
2013	2	6	1	12	27.0	4	1	8.0		*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.738	165.138		122			
2013	2	8	15	26	39.0	4	1	7.0		*		SOLOMON ISLANDS	SANTA CRUZ ISLANDS	-10.910	165.964		1			
2013	4	19	3	5	53.0	2	1	7.2		*		RUSSIA	S. KURIL ISLANDS	46.182	150.796	.20	1			

資料來源: 美國 NGDC 之 Natural Hazard Database

2.4 海嘯之風險

海底火山或山崩造成的海嘯十分罕見，因此本研究以探討斷層發生地震造成的海嘯為主。根據歷史資料，會產生海嘯的地震至少要 6.7

級以上，震源深度最多不超過 100 公里。地震時，斷層可能左右運動，也可能上下運動；目前一般的看法認為海底地震若是左右運動，對海水影響不大，但海底若是上下運動，可能引起海嘯。然而即使在斷層接近水平錯動的 2008 年海地地震，也有三位民眾因海嘯而死亡(Fritz 等人, 2012)；可見地震造成海嘯的可能性絕不能輕忽。

海嘯是海底地震、海底火山或海底山崩等作用造成的長週期波，小行星、彗星的撞擊也會產生海嘯；但一般以地震斷層運動造成的情形最常見。臺灣位於環太平洋地震帶，地震頻仍；較近的例子如 921 大地震，地表斷層上下運動(如圖 2.10)最大可達十公尺，同樣的斷層運動萬一發生在海上，將產生大海嘯，造成重大傷亡。因此吾人須正視臺灣可能的海嘯風險。

圖 2.10　921 大地震造成地表斷層上下錯動

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(Pacific Tsunami Warning Center)，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。

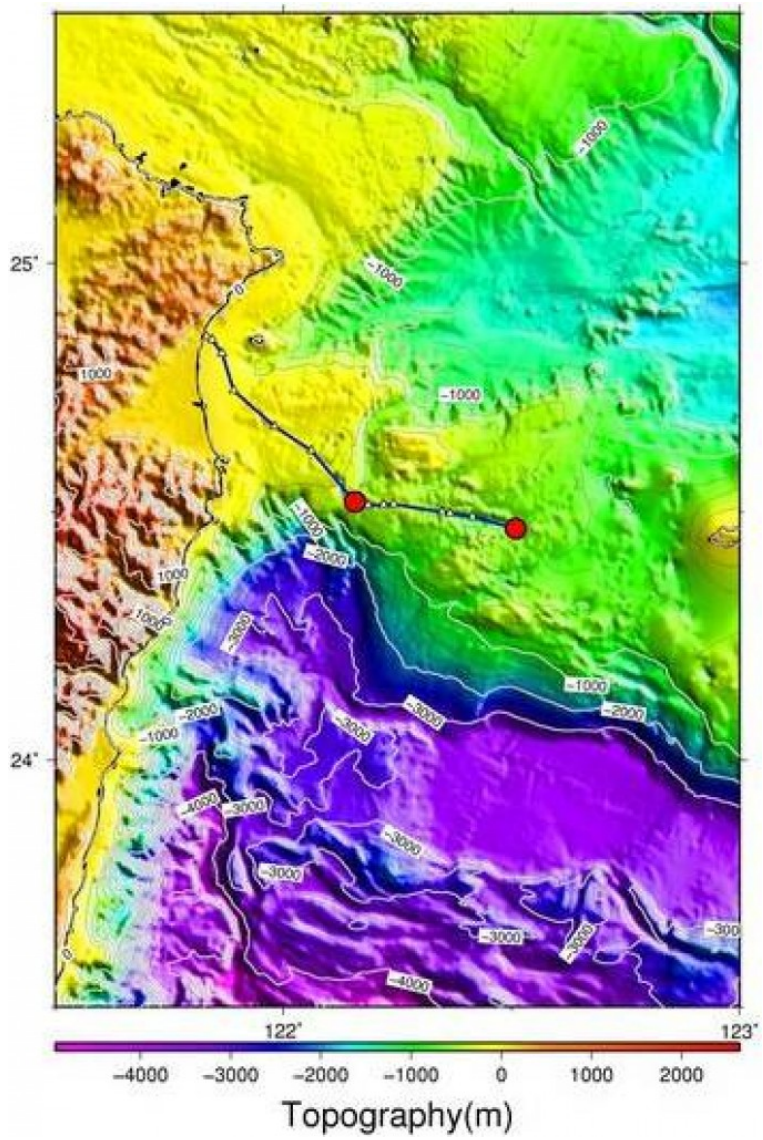


圖 3.1 電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置
(臺灣東部外海長達 45 公里)

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。其速報精度及效率，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模擬。

3.2.1 海嘯水動力數值模式

數值模式以數值方式解析物理方程式，其解析能力主要由物理方程式所決定。依物理方程式的解析能力來分，海嘯水動力數值模式可簡單分為一維、二維與三維三種類型。早期海嘯模擬採用類似於海岸工程之射線(ray)法的一維海嘯模式；一維模式在電腦普及後，因較費人工，且對繞射、邊緣波等現象無法處理，現已無人使用。

三維海嘯水動力模式最為全面、完整，但也最複雜、耗時。所幸最常見的海嘯成因--地震，其引致海嘯的機制是由斷層錯動推動海水面的升降，從而引發重力波所致。此重力波之波速遠小於地震的彈性波，故可假設水面是瞬間抬升或陷落；此種抬升或陷落之初始條件很容易在二維海嘯水動力模式給定，因此海嘯之波源、傳播及溯上、溢淹皆可以二維海嘯模式加以模擬。根據學者研究（Murty, 1979）也證明海水的層化效應對海嘯的影響甚微。因此就海嘯傳播而言，模擬的方式僅限於二維模式；除非探討細部的流況或受力，才有採用三維模擬的必要。由於上述的因素，一般所謂海嘯模式皆指二維模式，而本文也只討論二維海嘯模式。

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(陳等, 2011; 陳等, 2012)。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。

而 COMCOT 模式之基本理論是淺水方程組(shallow water equations)，由康乃爾大學劉立方教授領導建立(Liu 等人, 1998)，至今已進行多次改版。1 版到 1.4 版 之發展時間可上溯至 1993-2002，較新的 COMCOT 1.6 版發展時間則為 2003-2007；最新的 COMCOT 1.7 版發展時間由 2008 到現在。COMCOT 1.6 版與 1.7 版皆為康乃爾大學畢業生王曉民(Xia-ming Wang)博士發展與維護。我們研究團隊前期採用 COMCOT 1.6 版為基礎，加入 OpenMP 平行運算語法，檔案輸出由文字檔更動為 nc 檔(netcdf)；近期則採用 COMCOT 1.7 版(陳與陳, 2012; 陳等, 2013)。

除了 COMCOT 模式之外，日本東北大學的 TUNAMI(Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) 模式脫胎於 1991 開始的 TIME (Tsunami Inundation Modeling Exchange) 計畫，使用的機構遍佈全世界；NOAA 的 MOST (Method Of Splitting Tsunami) 模式也有不少使用者。模式之基本理論同樣是淺水方程組。在卡氏座標中非線性之淺水方程組可寫為：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \tag{3.1}$$

$$P_t + \left(\frac{P^2}{H}\right)_x + \left(\frac{PQ}{H}\right)_y + gH\eta_x - fQ + \tau_x H = 0 \tag{3.2}$$

$$Q_t + \left(\frac{PQ}{H}\right)_x + \left(\frac{Q^2}{H}\right)_y + gH\eta_y + fP + \tau_y H = 0 \tag{3.3}$$

式中 t 是時間，η 為自由表面之變動水位，H 為全水深，P 及 Q 分

別為 x 與 y 方向之流量，g 為重力加速度，$f = 2\omega \sin\Phi$ 為科氏參數(ω 為地球自轉角速度，Φ 為緯度)，τ_x、τ_y 分別為 x 與 y 方向底部摩擦力。

除淺水方程組外，Boussinesq 方程式也是二維，但比淺水方程組多出了非靜水壓的頻散(nonhydrostatic dispersion)效應。惟 Boussinesq 方程式為解析頻散(dispersion)效應，引入高階微分項，容易造成數值不穩定。再者，如陳(2007)所述，一般使用於海嘯傳播模擬的網格尺度並無法顯示頻散效應，因此無論使用哪一種方程式結果都差不多；故在深海的粗網格架構下使用 Boussinesq 方程式意義不大。

至於溯上、溢淹的模擬，Synolakis & Skjelbreia(1993)曾證明採用靜水壓近似的淺水方程組模式可以描述表面波與海底地形交互作用之碎波、溯上過程中的波高變化；這是由於斜坡距離有限，在短暫的溯上過程中，非靜水壓效應引起的頻散不足以發揮影響。故在近岸的溯上模擬使用 Boussinesq 方程式也無重要意義，使用非線性之淺水方程組即足以描述其過程。而模擬在大洋中的傳遞，其科氏力及地球曲面效應不可忽略，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。

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：

(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：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\varphi}\left[\frac{\partial P}{\partial \psi}+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\cos\varphi Q\right)\right]=0 \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{gh}{R\cos\varphi}\frac{\partial \zeta}{\partial \psi}-fQ\\&=\frac{1}{R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial \psi}\left[\frac{h^3}{3R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{\partial}{\partial \psi}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\cos\varphi\frac{Q}{h}\right)\right\}\right]\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{gh}{R}\frac{\partial \zeta}{\partial \varphi}+fP\\&=\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{h^3}{3R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{\partial}{\partial \psi}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\cos\varphi\frac{Q}{h}\right)\right\}\right]\end{aligned} \tag{3.6}$$

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(3.4)式至(3.6)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。

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}-\frac{gh}{R^2\cos^2\varphi}\left[\frac{\partial^2\zeta}{\partial\psi^2}+\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\cos\varphi\frac{\partial\zeta}{\partial\varphi}\right)\right]\\
&=\frac{gh^3}{3R^4\cos^4\varphi}\frac{\partial^4\zeta}{\partial\psi^4}+\frac{gh^3}{3R^4\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left\{\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\cos\varphi\frac{\partial\zeta}{\partial\varphi}\right)\right\}\right]\\
&+\frac{gh^3}{3R^4\cos^3\varphi}\left[\frac{\partial^3}{\partial\psi^2\partial\psi}\left(\cos\varphi\frac{\partial\zeta}{\partial\varphi}\right)+\cos^2\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left\{\cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\frac{1}{\cos^2\varphi}\frac{\partial^2\zeta}{\partial\psi^2}\right)\right\}\right]
\end{aligned}
\tag{3.7}
$$

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)：

$$
\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1}-P_{i+1/2,j}^{n}}{\Delta t}+gH\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x}=0 \tag{3.8}
$$

$$
\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1}-Q_{i,j+1/2}^{n}}{\Delta t}+gH\frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta y}=0 \tag{3.9}
$$

$$
\frac{\zeta_{i,j}^{n+1/2}-\zeta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t}+\frac{P_{i+1/2,j}^{n}-P_{i-1/2,j}^{n}}{\Delta x}+\frac{Q_{i,j+1/2}^{n}-Q_{i,j-1/2}^{n}}{\Delta y}=0 \tag{3.10}
$$

若近岸地區時，改採卡氏坐標系統，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)：

$$
\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0 \tag{3.11}
$$

$$\frac{\partial}{\partial t}P+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{P^2}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{PQ}{H}\right)+gH\frac{\partial\zeta}{\partial x}-fQ+\tau_x H=0 \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{PQ}{H}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{Q^2}{H}\right)+gH\frac{\partial\zeta}{\partial y}+fP+\tau_y H=0 \tag{3.13}$$

式中 t 是時間，ζ 為自由表面之變動水位，H 為全水深，P 及 Q 分別為 x 與 y 方向之流量，g 為重力加速度，f 為科氏力參數，τ_x、τ_y 分別為 x 與 y 方向底部摩擦力。

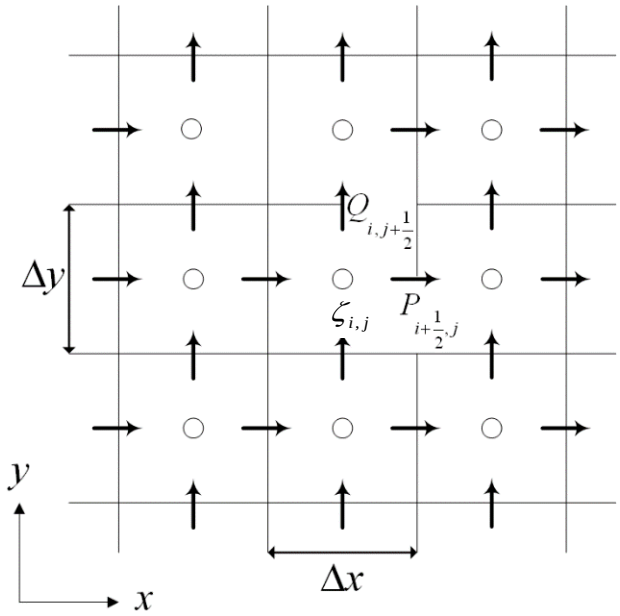


圖 3.2 交錯式有限差分網格

底部摩擦項可使用 Chezy 公式，

$$\tau_x=\frac{g}{C_f^2\,H^3}\;P(\,P^2+Q^2\,)^{1/2},\;\;\tau_y=\frac{g}{C_f^2\,H^3}\;Q(\;P^2+Q^2\;)^{1/2} \tag{3.14}$$

或曼寧公式

$$\tau_x=\frac{gn^2}{H^{10/3}}P\left(P^2+\mathrm{Q}^2\right)^{1/2},\tau_y=\frac{gn^2}{H^{10/3}}P\left(P^2+\mathrm{Q}^2\right)^{1/2} \tag{3.15}$$

(3.14)式中的C_f表示 Chezy 公式的摩擦係數，而(3.15)式 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)，ζ 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 $H = h + \zeta$ 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 $H_{i+1} \le 0$ 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。

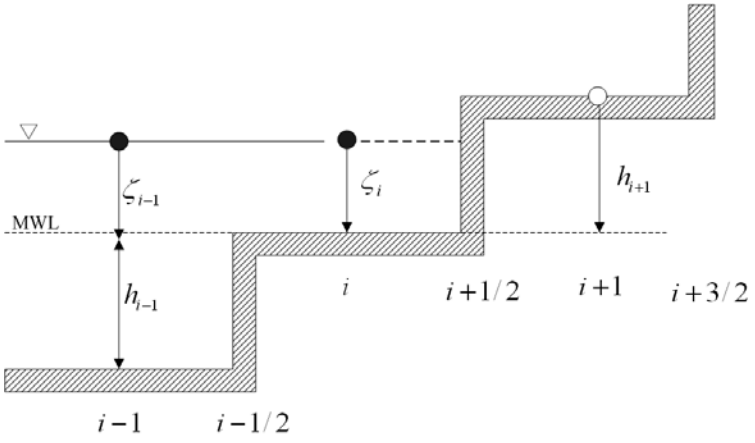


圖 3.3 移動邊界示意圖(a)

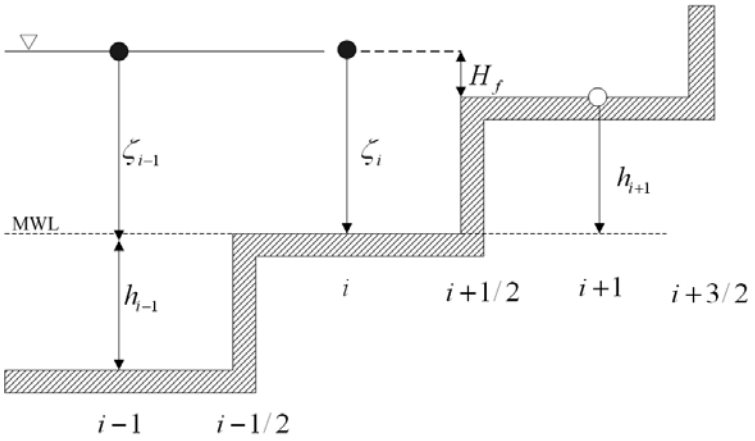


圖 3.4 移動邊界示意圖(b)

(1)若 $H_{i+1} \le 0$ 且 $h_{i+1} + \zeta_i \le 0$，則海岸線保持不動，流量 $P_{i+1/2}$ 亦為零。

(2)若 $H_{i+1} \le 0$ 且 $h_{i+1} + \zeta_i > 0$，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 $h_{i+1} + \zeta_i$ 和 $h_{i+1} + \zeta_{i+1}$ 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 $h_{i+1} + \zeta_i$ 和 $h_{i+1} + \zeta_{i+1}$ 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。

3.2.2 海嘯數值模擬與巢狀網格

海嘯在大洋的波長尺度較大，其模擬可容許使用較粗的網格；因此如果模式計算的區域相當大，通常會將網格數減少，網格間距加大，以節省模式的運算時間。到了近海，水深變淺，海嘯的波長尺度下降，其模擬必須使用較細的網格。故一般在大洋使用較粗的網格，到近海增加網格數、網格間格縮小，到近岸再用更細的網格；如此一層套疊一層，近似鳥巢般的網格配置，稱為巢狀網格(nested grid)。在計算及運作上則是在模式內設定好巢狀網格，模式會將第一層網格的水位帶進第二層計算以此類推，而巢狀網格可以滿足大小區域之需求，在遠洋區域及近岸區域選用不同的網格大小進行海嘯的傳播模擬，藉此細部描述海嘯於小區域之溯上計算，也提高海嘯模式的效率。以下以圖3.5為例說明，模擬海嘯在大洋中傳遞時所使用的大網格，共包括了第一與第二區域，且第二區域的網格是在第一區域的網格之中。由於第一區域計算範圍大，其中考慮了地球曲面效應及科氏力造成的偏轉效應，因此在此區

域所使用之座標系統為球面座標系統，而模式的計算是依據球面座標之線性淺水方程組(3.4式至3.6式)。第二區域使用的網格系統則改為直角座標系統，使用直角座標之線性淺水方程組(3.12至3.14式)。然而，當模擬海嘯於近岸第三與第四區域溯上時，則必須考慮到近岸的非線性效應與海底底部摩擦項的影響，模式的計算改為使用非線性淺水方程組(3.1至3.3式)。上述處理過程可分別滿足海嘯在大洋中傳遞，以及在近岸地區溯上的兩種需求。

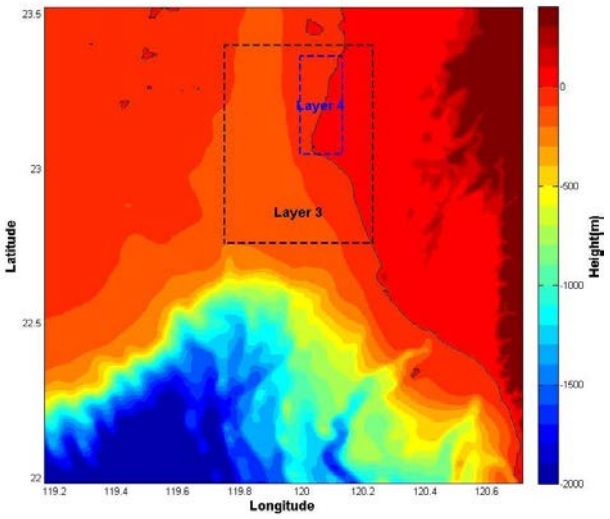


圖3.5 巢狀網格示意圖

模式的顯式數值積分必須滿足CFL(Courant, Friedrich, Levy)穩定條件，即物理速度小於等於數值訊號的傳播速度；對二維海嘯模式，此條件可表示為

$$\Delta t \le \frac{\sqrt{2}}{c}\Delta x = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{gh_{\max}}}\Delta x \tag{3.16}$$

其中Δt為時間步長(time step)，Δx為網格間距，$h_{\max}$為各計算網格中最大水深值。由以上可知數值積分之最大容許時間步長隨網格間距而改變，最細的網格模擬最耗時。

本研究以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3.6、3.7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3.1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3.8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

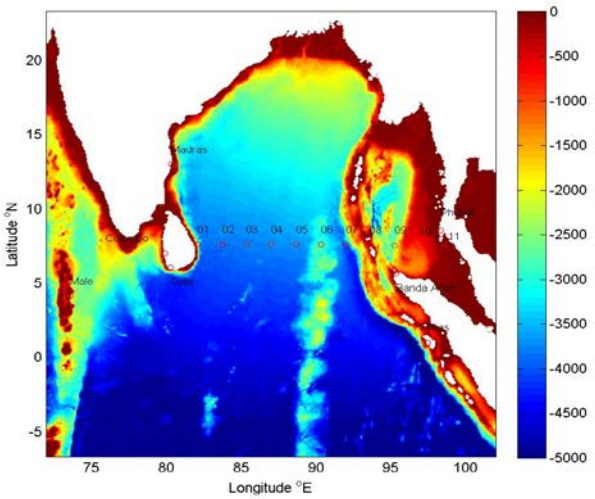


圖3.6 模式計算區域水深地形圖

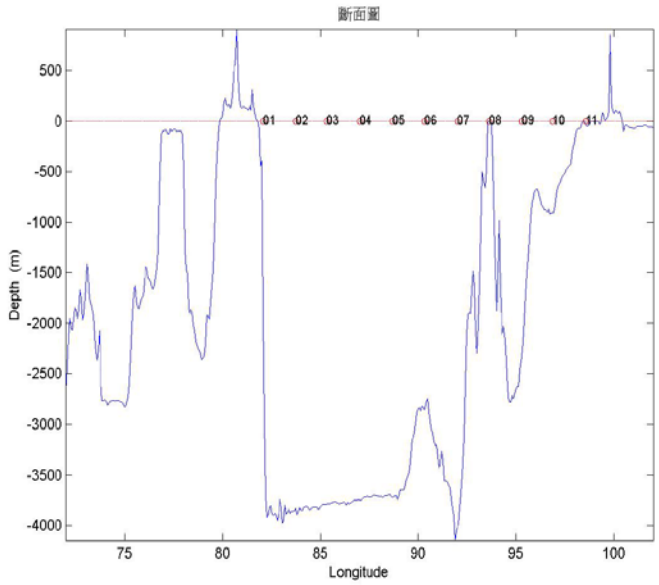


圖3.7 模式計算區域水深地形剖面圖

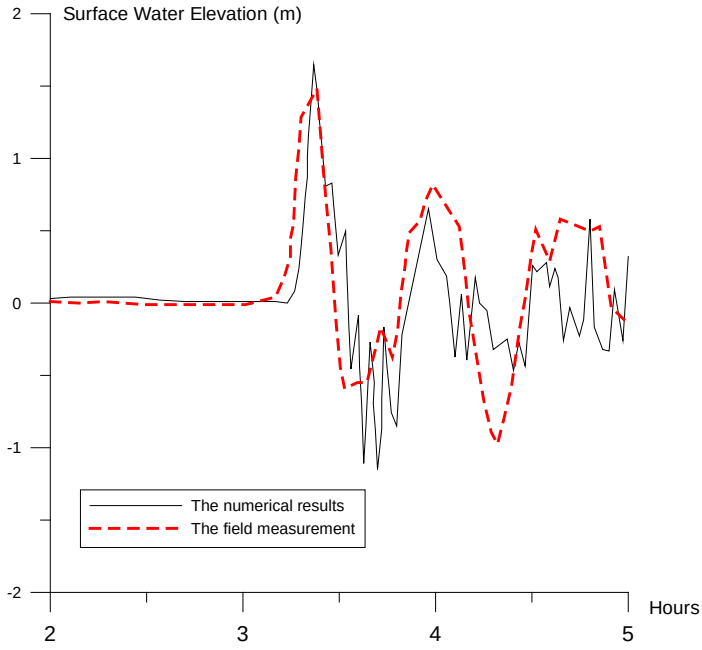


圖3.8 與馬爾地夫水位之比對

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，提供給各港務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 3.9 所示。本節將逐一介紹系統之建置方式。

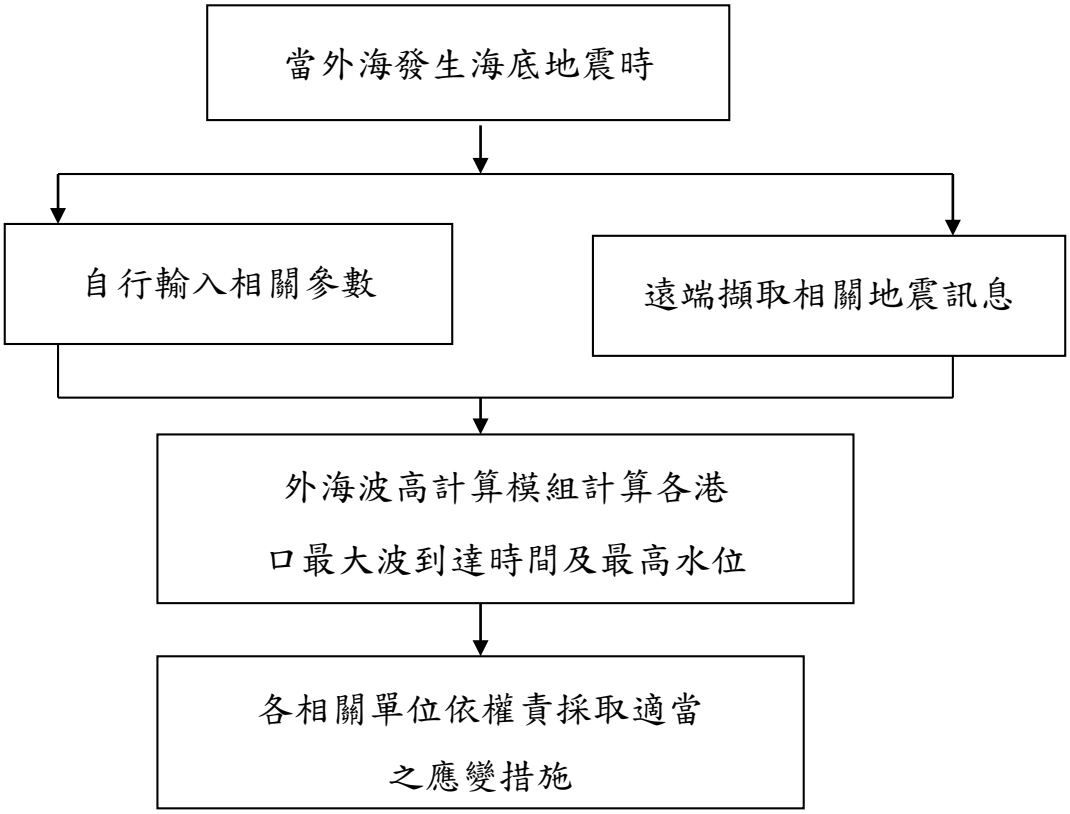


圖3.9 海嘯速報系統之規劃圖

3.3.1 地震資料來源與擷取

大多數的海嘯成因起源於海底地震，所以海嘯初始水位主要是計算斷層錯動推動海水面的升降；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(USGS)-National Earthquake Information Center(NEIC)中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2013 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，如圖 3.10 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。

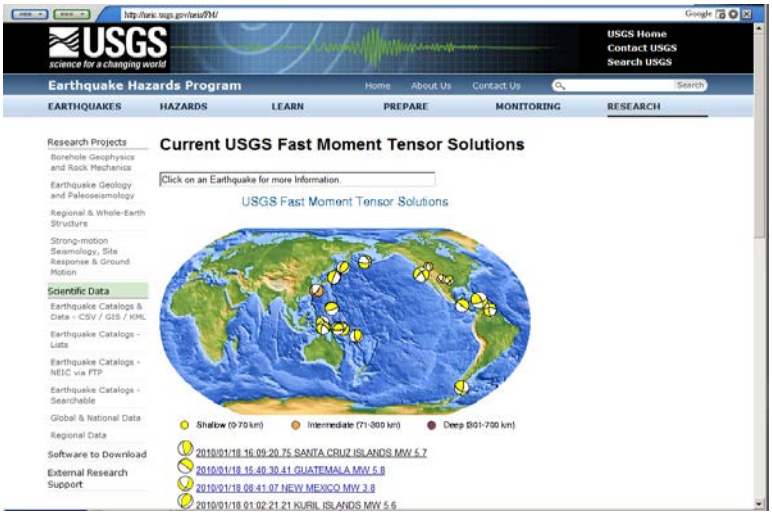


圖3.10 美國USGS資料庫

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 3.11 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3.12所示。

Quick CMT Reports:

Recent Qcmt 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3.11 中央氣象局網站之即時地震資料

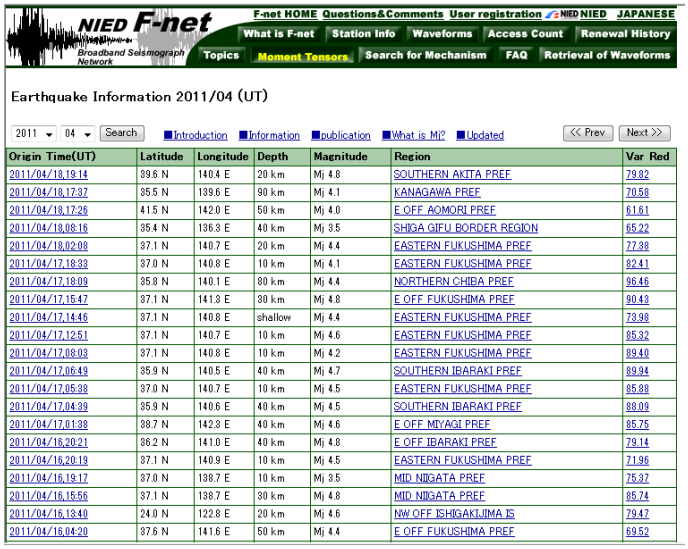
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/neic_b000d65a_fmt.php

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3.12 遠端擷取USGS地震資料格式

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 3.13)，三個主要之地震資訊來源及提供範圍如表 3.2 所示。圖 3.14 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。而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。



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	79.92
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	96.46
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	73.98
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 NIIGATA PREF	75.37
2011/04/16,15:56	37.1 N	138.7 E	30 km	Mj 4.8	MID NIIGATA PREF	85.74
2011/04/16,13:40	24.0 N	122.8 E	20 km	Mj 4.6	NW OFF ISHIGAKIJIMA IS	79.47
2011/04/16,04:20	37.6 N	141.6 E	50 km	Mj 4.4	E OFF FUKUSHIMA PREF	69.52

圖3.13 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)	該網站於 10 月後網只已更改為 http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/ 資料提供範圍：全球
臺灣	中央氣象局(CWB)	地震解提供來源為台灣寬頻地震網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS) http://bats.earth.sinica.edu.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 3.14　目前完成之即時地震擷取系統介面

3.3.2 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-安得生(Wood-Andersion)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：

$$M_L = \log\left(A / A_0\right) = \log A - \log A_0 \tag{3.17}$$

M_L：芮氏(近震)地震規模。

A：伍德-安得生(Wood-Andersion)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，也因此在計算地震規模時，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：

$$M_L = \log(A) + 2.56\log(\Delta) - 5.12 \tag{3.18}$$

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 Guttenburg 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μm)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

$$M_s = \log(A/T) + \sigma(\Delta) \tag{3.19}$$

$$\sigma(\Delta) = 1.66\log\Delta + 3.3 \tag{3.20}$$

上兩式可以合為：

$$M_S = \log(A/T) + 1.66\log\Delta + 3.3 \tag{3.21}$$

對於週期 20 秒的表面波,上式可修正為：

$$M_S = \log(A20) + 1.66\log\Delta + 3.3 \tag{3.22}$$

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 Guttenburg 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：

$$M_B = \log(A/T) + Q(\Delta) \tag{3.23}$$

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

$$M = \log A + f(d,h) + C_S + C_R \tag{3.24}$$

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的器限制，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：

$$M_0 = \mu \times S \times \bar{D} \tag{3.25}$$

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

$$M_W = 2/3 \log M_0 - 10.7 \tag{3.26}$$

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 3.15(a))：

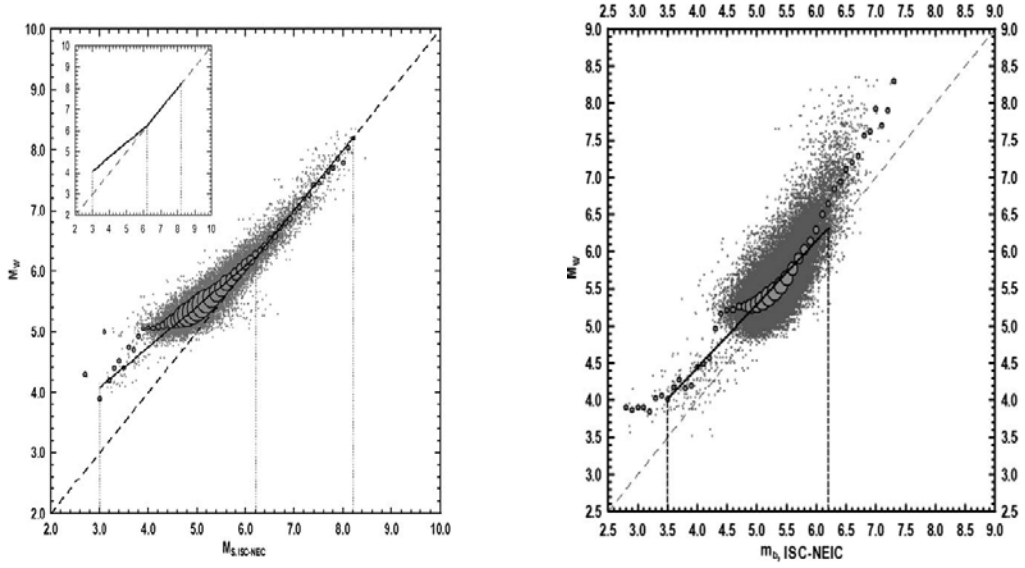
$$\begin{aligned} M_W &= 0.67(\pm 0.005) M_S + 0.27(\pm 0.03) \\ &\qquad 3.0 \le M_S \le 6.1, \\ R^2 &= 0.77, \quad \sigma = 0.17, \quad n = 23{,}921 \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned} M_W &= 0.99(\pm 0.02) M_S + 0.08(\pm 0.13) \\ &\qquad 6.2 \le M_S \le 8.2, \\ R^2 &= 0.81, \quad \sigma = 0.20, \quad n = 2{,}328 \end{aligned} \tag{3.28}$$

(2)M_B轉換至 M_w之迴歸公式(圖 3.15(b))

$$\begin{aligned} M_W &= 0.85(\pm 0.04) M_B + 1.03(\pm 0.23) \\ &\qquad 3.5 \le M_B \le 6.2, \\ R^2 &= 0.53, \quad \sigma = 0.29, \quad n = 39{,}784 \end{aligned} \tag{3.29}$$

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。



(a) (b)

圖3.15 (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)

3.3.3 斷層參數

圖3.16即是斷層參數之示意圖；strike角($0 \le \theta \le 360$)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($0 \le \lambda \le 180$)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。

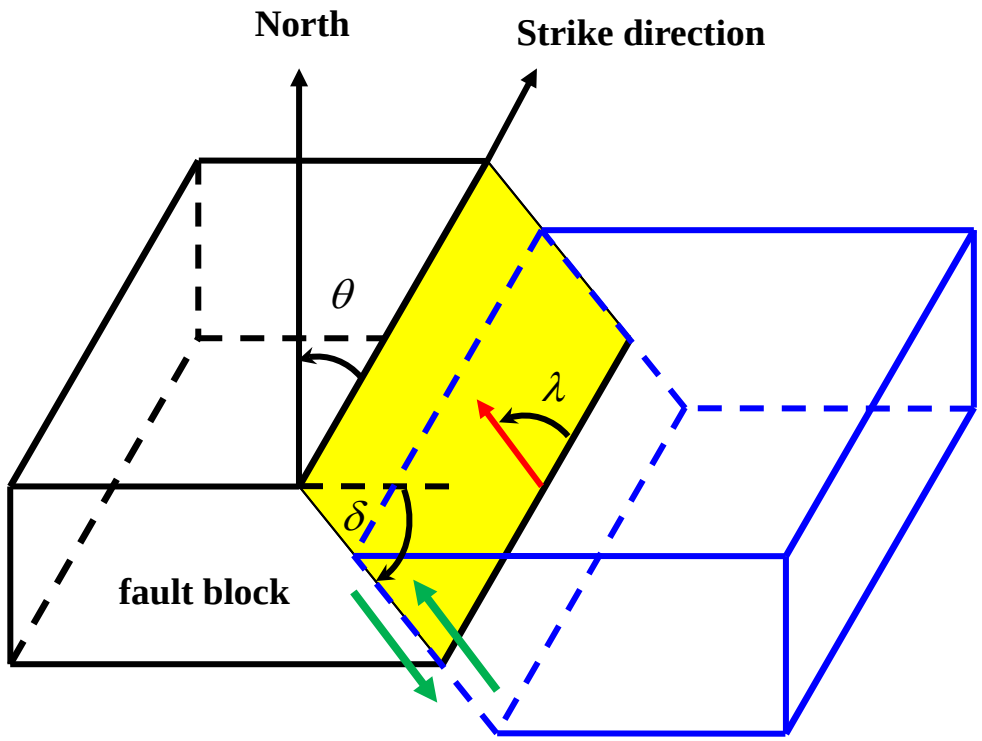


圖3.16　斷層參數示意圖

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。

3.3.4 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)。

$$\log(L)=a_1+b_1\times M_W \tag{3.30}$$

$$\log(W)=a_2+b_2\times M_W \tag{3.31}$$

M_w 為地震矩規模(Moment magnitude scale)；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。

$$M_W=\frac{2}{3}\log_{10}M_0-10.7 \tag{3.32}$$

$$M_0=\mu WDL \tag{3.33}$$

M_0 是地震矩大小(Scalar moment of earthquake)，$\mu=3\times10^{11}dyne/cm^2$ 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

3.3.5 海嘯初始水位之生成

前小節已說明地震資料的來源、擷取、地震級數轉換，當斷層參數、斷層長度及滑移量均求得後，就可以利用斷層模式來生成海嘯波源區可能的初始水位。

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：

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

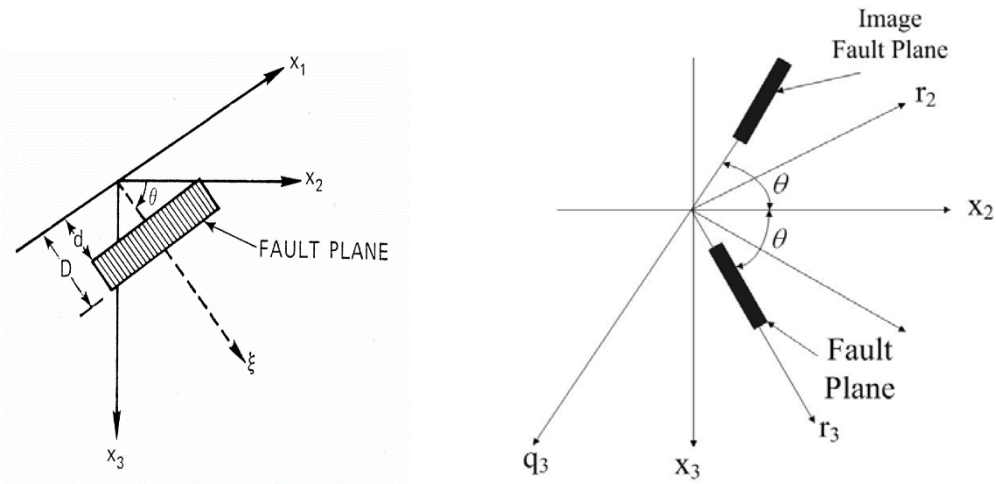
其中v_k為Σ向外的垂直向量、λ與μ為拉梅常數(Lamé constants)、u_i^j為受到破裂面(ξ_1, ξ_2, ξ_3)上j方向單位應力作用而在地表(x_1, x_2, x_3)於i方向上的位移。

假設一矩形斷層座標系統如圖3.17(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 (3.36) 與 (3.37) 式表示，其涵蓋範圍為 $-L \le \xi_1 \le L$，以及 $d \le \xi \le D$：有

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

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

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



(a) (b)

圖3.17 (a)斷層幾何形狀及座標系統(b)斷層及映像斷層座標系統

$$R=\left[\left(x_1-\xi_1\right)^2+\left(x_2-\xi_2\right)^2+\left(x_3-\xi_3\right)^2\right]^{1/2}$$
$$S=\left[\left(x_1-\xi_1\right)^2+\left(x_2-\xi_2\right)^2+\left(x_3+\xi_3\right)^2\right]^{1/2}$$
$$r_2=x_2\sin\theta-x_3\cos\theta,\qquad r_3=x_2\cos\theta-x_3\sin\theta$$

$$q_2=x_2\sin\theta-x_3\cos\theta,\qquad q_3=-x_2\cos\theta+x_3\sin\theta \tag{3.37}$$

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：

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

$$k=\left[q_2{}^2+\left(x_1-\xi_1\right)^2\right]^{1/2} \tag{3.38}$$

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：

$$\begin{aligned}\frac{12\pi}{U_1}u_3&=\cos\delta\left(a_1+b_1a_2-b_2a_4\right)+\frac{b_3}{R}+2\sin\delta\frac{b_4}{S}\\&\quad-\frac{b_5}{R\exp\left(a_1\right)}+\frac{b_7-b_8}{S\exp\left(a_2\right)}+\frac{b_{10}b_{11}}{S^3}-\frac{b_{12}b_{13}}{b_{14}}\end{aligned} \tag{3.39}$$

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

$$
\begin{aligned}
\frac{12\pi}{U_1}u_3 = \sin\delta(x_2-\xi_2)&\left[\frac{2(x_3-\xi_3)}{R\exp(a_5)}+\frac{4(x_3-\xi_3)}{S\exp(a_6)}-4\xi_3x_3(x_3+\xi_3)\frac{S+\exp(a_6)}{S^3(\exp(a_6))^2}\right]\\
&-3\sin\delta\left[2\tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(x_2-\xi_2)}{(h+x_3+\xi_3)(S+h)}\right]-\tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(r_3-\xi)}{r_2R}\right]\right]\\
&-6\sin\delta\tan^{-1}\left[\frac{(x_1-\xi_1)(q_3+\xi)}{q_2S}\right]+\cos\delta\left[a_5-a_6-\frac{2(x_3-\xi_3)^2}{R\exp(a_5)}\right]\\
&-4\cos\delta\left[\frac{x_3^2+x_3\xi_3+\xi_3^2}{S\exp(a_6)}+\xi_3x_3(x_3+\xi_3)^2\frac{S+\exp(a_6)}{S^3(\exp(a_6))^2}\right]\\
&+3x_3\sin2\delta\left[\frac{2(q_3+\xi)}{S\exp(a_6)}+\frac{(x_1-\xi_1)}{S\exp(a_2)}+\frac{q_2\cos2\delta}{S\exp(a_6)}\right]
\end{aligned}
\tag{3.40}
$$

3.4 數值模擬進行海嘯預警之方式

海嘯預警必須在海底地震發生後提供是否有海嘯發生、是否有威脅性、海嘯何時抵達等資訊；如何得到這些資訊，則可分為事先算好的海嘯預報系統資料庫以及海嘯的實時(real time)模擬兩種方式。海嘯預報系統資料庫統整模擬結果成一資料庫，在海嘯發生時運用此資料庫預測海嘯的大小，節省海嘯數值模擬所需之時間，使海嘯警報得儘快發佈。海嘯的實時模擬則是俟取得地震資料後，利用斷層模式求得海嘯初始水位，再進行海嘯模擬。

海嘯模擬資料庫的構成又可細分為三種方法，即海嘯情境的數值模擬、格林函數法與互逆格林函數法。海嘯情境的資料庫是在地震發生後，搜尋資料庫中與此地震最接近的情境作為海嘯的預測情況。格林函數與互逆格林函數則是在地震發生後，利用斷層模式求得波源區各點的海嘯初始水位，再分別乘上相對應的格林函數或互逆格林函數來求得海嘯的大小。

現行之海嘯數值模式之模擬程序(如圖 3.18)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。

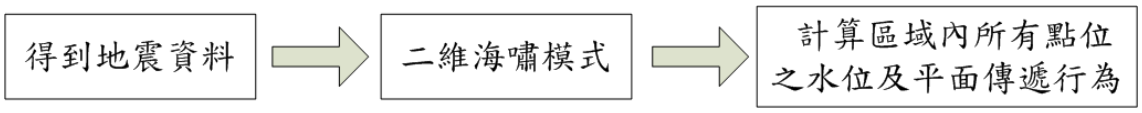


圖 3.18　現行海嘯數值模式之模擬程序

3.4.1 傳統格林函數

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，將(3.1) 式至(3.3)式之非線性淺水方程組，經線性化後簡化而成以下線性淺水方程組：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0 \tag{3.41}$$

$$P_t + gd\eta_x = 0 \tag{3.42}$$

$$Q_t + gd\eta_y = 0 \tag{3.43}$$

其中η為水面高，P與Q為x與y方向的單位寬度質量通量，d為平均水深，而下標代表偏微分。

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，以下以GF簡稱)，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；對線性淺水方程組的連續方程取時間微分，再對方程組的兩個

動量方程分別取空間x與y的微分，可消去質量通量，從而簡化線性淺水方程組成為以下之方程：

$$\eta_{tt} - g\left[\left(d\eta_x\right)_x + \left(d\eta_y\right)_y\right] = 0 \tag{3.44}$$

故格林函數$G_s^r = G\left(t, x_r, y_r; x_s, y_s\right)$即以下方程之解

$$\eta_{tt} - g\left[\left(d\eta_x\right)_x + \left(d\eta_y\right)_y\right] = \delta\left(t, x - x_s; y - y_s\right) \tag{3.45}$$

對實際的海洋地形，此方程無解析解，只能以數值方式求解，故此格林函數為滿足相關邊界條件的數值解，與一般邊界積分法常見的無限域下解析形式之基本解稍有差異，可稱之為數值格林函數；而δ函數亦須離散化，即於初始時間t=0時除$\left(x_s, y_s\right)$的初始水位為1之外，計算領域內之每一點的初始水位皆為零；而格林函數即為此單位初始水位引致的計算領域內每一點隨時間的震盪。此離散化δ函數其形式為

$$\tilde{\delta}\left(t, x - x_s; y - y_s\right) = \begin{cases} 1 & \text{for } t = 0, x = x_s \text{ and } y = y_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.46}$$

圖 3.19 即為以基隆為例之格林函數所對應的初始水位。

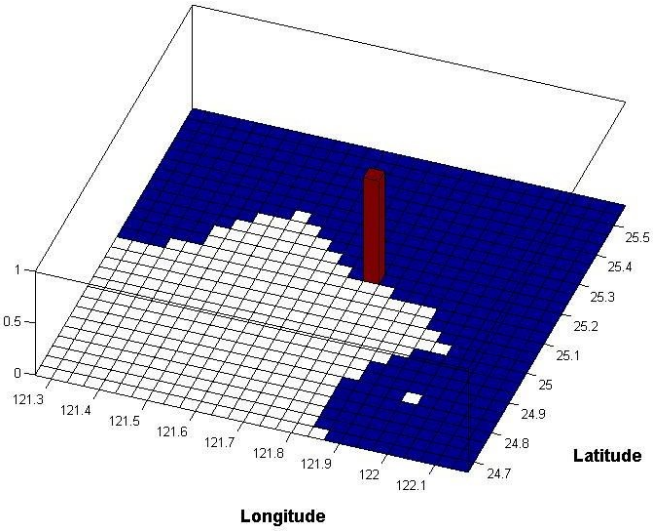


圖 3.19 以基隆為例之格林函數所對應的初始水位

若對所有波源區共N個點的每個點s予以編號$1, 2, 3, \cdots, N$，其對應之初始水位記為H^S，則一海嘯事件須包含此N個點的每個點造成的海嘯，而波源初始水位可以表為

$$\sum_{S=1}^{N} H^S \tilde{\delta}\left(t, x-x_s; y-y_s\right) \tag{3.47}$$

對每個點s及其初始水位H^S所引致的全域水位變化可以由下式求得

$$\eta^S{}_{tt} - g\left[\left(d\eta^S{}_x\right)_x + \left(d\eta^S{}_y\right)_y\right] = H^S \tilde{\delta}\left(t, x-x_s; y-y_s\right) \tag{3.48}$$

其中下標代表偏微分，$\eta^S(t,x,y)$表示s點的初始水位H^S造成的計算區域水位變化。由(3.45)、(3.48)兩式可知，對r點$(x=x_r, y=y_r)$而言，η^S相對於格林函數G_s^r之H^S倍，即

$$\eta^S\left(t, x_r, y_r\right) = G_s^r \times H^S \tag{3.49}$$

將編號1,2,3,⋯,N的每個點s對應之方程式(3.49)相加總，即

$$\sum_{S=1}^{N} \eta^S{}_{tt} - \sum_{S=1}^{N} g\left[\left(d\eta^S{}_x\right)_x + \left(d\eta^S{}_y\right)_y\right] = \sum_{S=1}^{N} H^S \tilde{\delta}\left(t, x-x_s; y-y_s\right) \tag{3.50}$$

連加符號Σ與時、空之偏微分運算可以互換，故得

$$\left(\sum_{S=1}^{N}\eta^S\right)_{tt} - g\left[\left(d\left(\sum_{S=1}^{N}\eta^S\right)_x\right)_x + \left(d\left(\sum_{S=1}^{N}\eta^S\right)_y\right)_y\right] = \sum_{S=1}^{N} H^S \tilde{\delta}\left(t, x-x_s; y-y_s\right) \tag{3.51}$$

此方程式左側為(3.44)式，右側則為海底地震錯動引起的初始水位變化(3.48)式，亦即引致海嘯的初始條件。因此(3.51)式的解

$$\eta\left(t, x, y\right) = \sum_{S=1}^{N} \eta^S \tag{3.52}$$

即為海底地震引起的海嘯。由以上 (3.49)式可知，對r點而言，η^S相對於格林函數G_s^r之H^S倍；故r點的海嘯水位H^r可表示為

$$H^r = \eta(t,x,y) = \sum_{S=1}^{N} \eta^S(t,x,y) = \sum_{S=1}^{N} G_S^r \times H^S \tag{3.53}$$

其中η^S表示s點的初始水位H^S造成全區水位變化，但是海嘯快速預報只需要r點的水位；所以格林函數G_s^r對r點而言只是一時間序列(time series)，利用此格林函數，事先計算完成並以資料庫方式儲存，即可進行海嘯快速預報(參見Wei等人, 2003; Sa´nchez & Cheung, 2007)。

大海嘯的波源區可能長達數百公里以上，海嘯可能的波源區更是涵蓋大多數海域，因此事先要算好的格林函數數目十分驚人，可能達百萬個以上。為減少格林函數的計算量及其儲存空間，有學者以減低波源區解析度的方式因應，此即所謂單位海嘯法(unit tsunami method)。目前中央氣象局即採用此法，可參見陳等人(2009)。格林函數或單位海嘯可在未確定初始水位前針對可能的波源區先行計算後並以資料庫方式儲存；當地震發生獲得地震參數後，利用斷層模式計算初始水位H^S，與格林函數(或單位海嘯)相乘之後即可得到與海嘯模式一致之結果。與情境分析方式相比，以格林函數或單位海嘯建立單位振幅下之海嘯波高資料庫顯然更為經濟方便，且是在地震參數取得後再根據2.3節的斷層模式計算所得之海嘯初始水位H^S所導得，因此不會被海嘯的情境分析所採用的地震斷層參數所限。

由此可知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GF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。

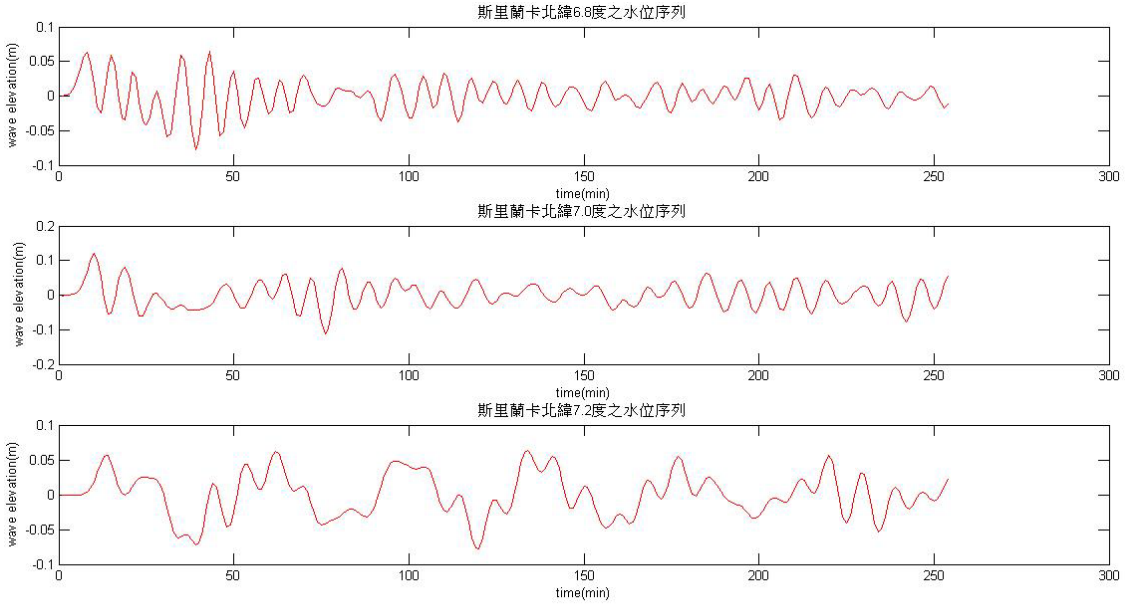


圖 3.20 傳統海嘯之模擬結果

3.4.2 互逆格林函數

傳統的格林函數和直接的海嘯模擬都可以給出全域的海嘯波分布；前者雖然較省時間，但耗費的計算量及儲存空間仍相當可觀，還可能發生計算區域未包括某次海嘯的波源區、抑或某次海嘯波源區的格林函數未事先計算等問題。另一方面，如果我們只需要某個位置的海嘯水位 (如(3.54)式所示)而不是全域的海嘯分布，這些格林函數的計算量及儲存空間則顯得多餘。而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，降低對地震斷層參數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。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。

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。

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(3.54)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(3.55)式。只要透過(3.56)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。

$$G_r^s = \frac{r\text{點水位}}{\text{波源}s\text{之初始水位}} \tag{3.54}$$

利用格林函數與互逆格林函數的互逆性

$$G_r^s = G_s^r \tag{3.55}$$

(3.53)式可改寫為

$$H^r = \eta\left(t, x, y\right) = \sum_{S=1}^{N} G_r^s \times H^S \tag{3.56}$$

以上由圖 3.21 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 *si* 來表示所有可能之震源，其 GF 即是由 *si* 到 *r*。由於格林函數具有可逆性，所以任一點 si 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 si 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臺灣北海岸之最佳佈放位址。

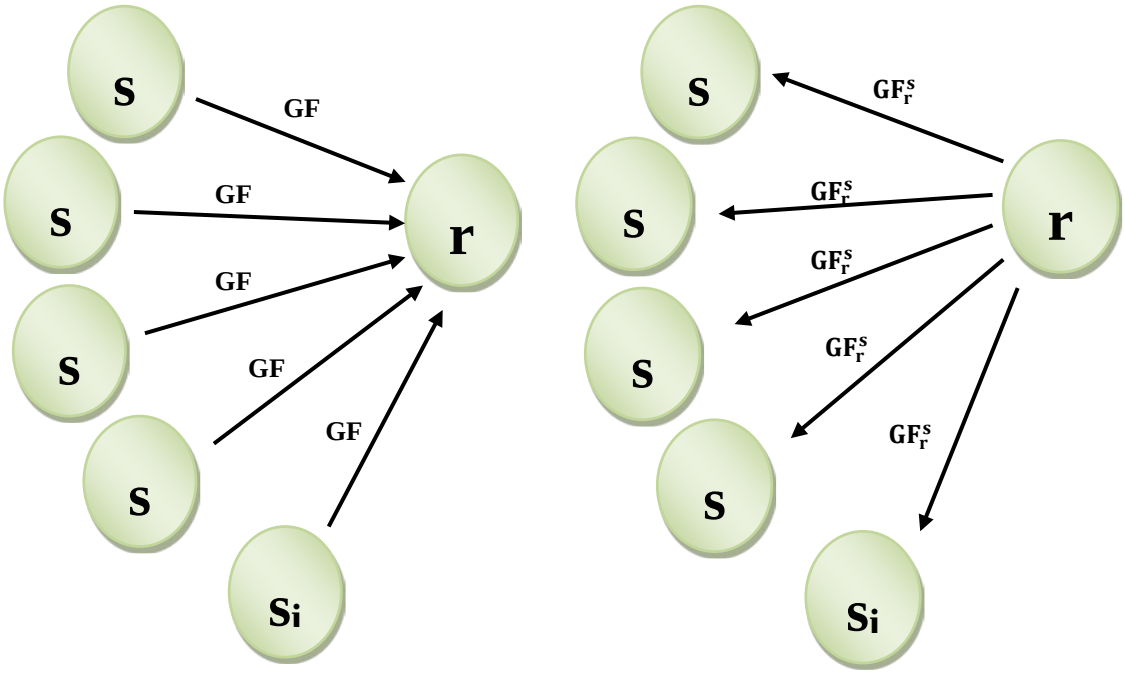


圖 3.21 傳統格林函數與互逆格林函數之示意圖

亦即對一接收點 *r*，只要一個互逆格林函數 即可快速計算其水位變化，故能大量減少計算量及儲存空間。此觀念由 Loomis (1979)所提出，我們研究團隊則實際將它應用在海嘯預警(參見劉與陳, 2008)。(3-56)式經與直接的海嘯模擬相互驗證下，可發現兩者甚為符合，如圖 3.22、3.23 所示

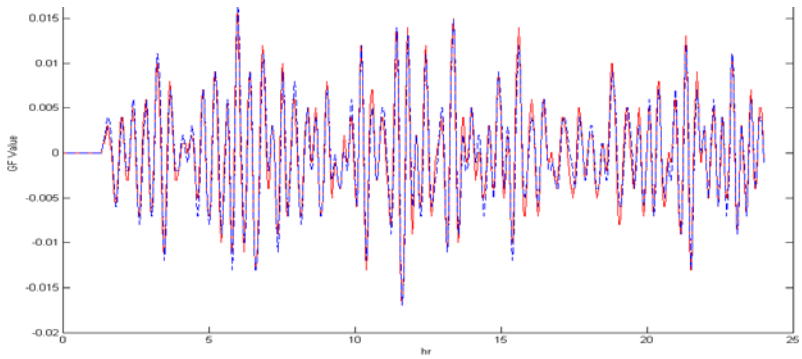


圖 3.22 海嘯模式所計算出之格林函數與互逆格林函數比較

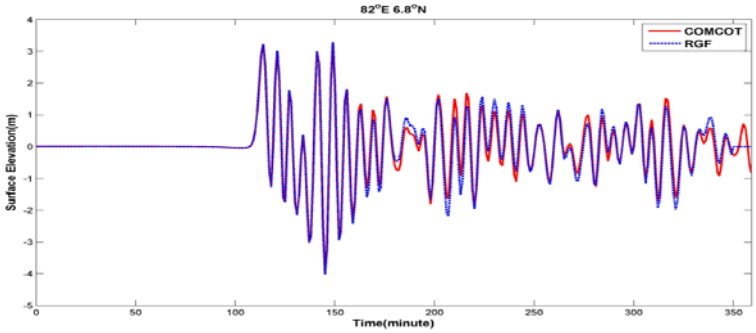


圖 3.23 互逆格林函數與直接的海嘯模擬之水位變化驗證

(3.56) 式唯一的未知是波源點之初始水位 H^S，該值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。故利用互逆格林函數，由於水位基礎波形已經可以事前計算，可以資料庫之方式先行計算單位波高之時間序列變化資料，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，但實際上受限於臺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，(3.56)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，(3.56)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。

3.4.3 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 3.24 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 3.25 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 3.26 所示。

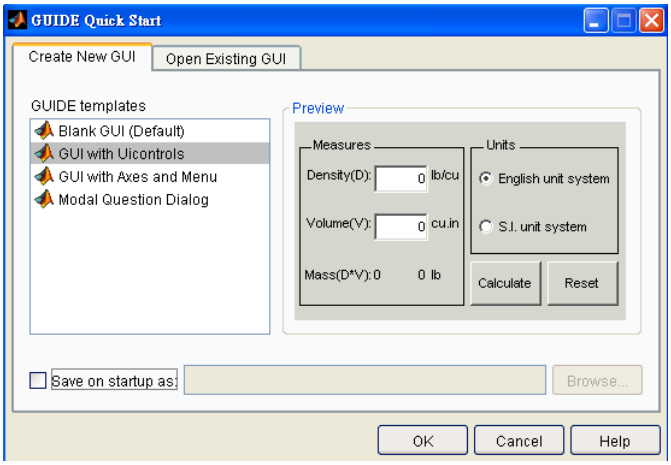


圖3.24　GUI程式設計環境

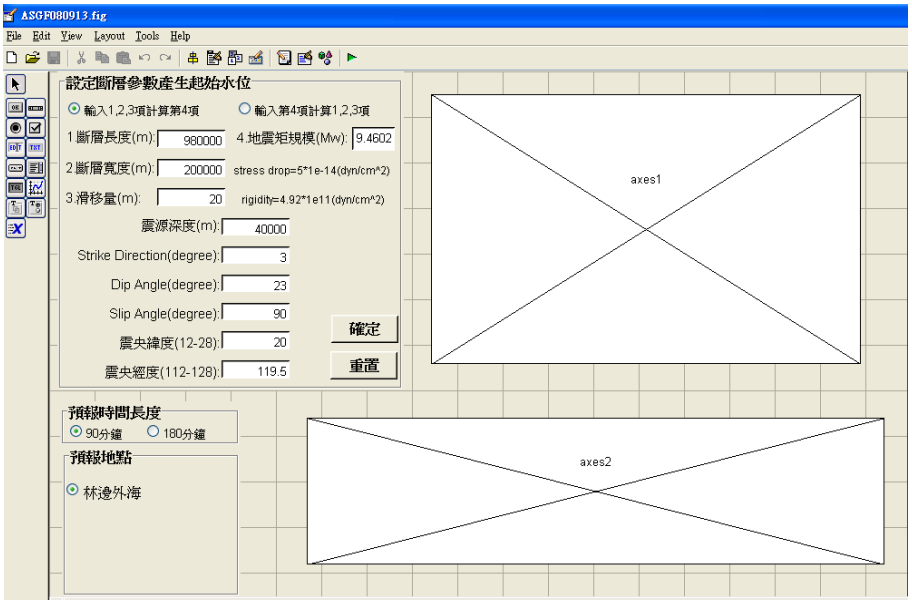


圖3.25 視窗化操作系統之建立與排版

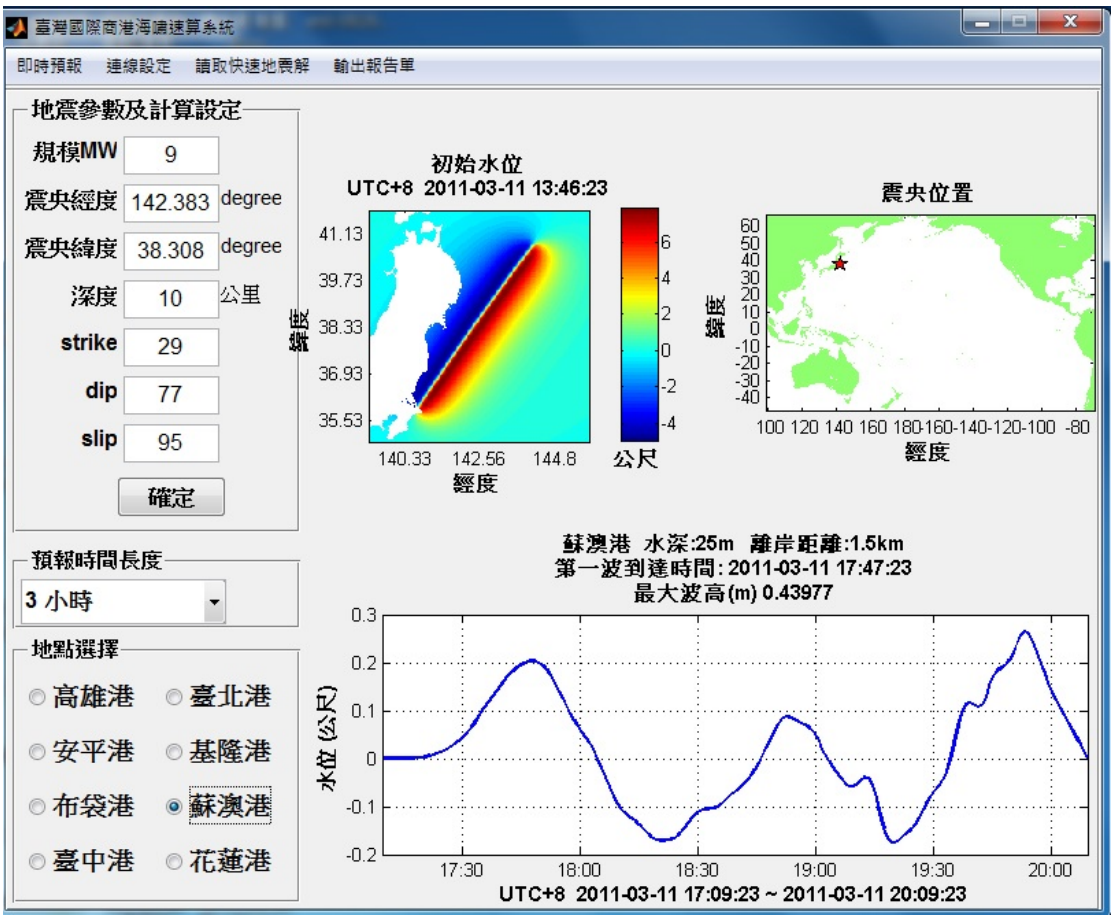


圖3.25 視窗化介面之編譯完成圖

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

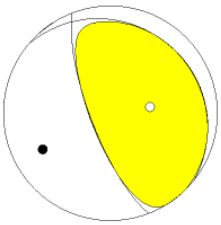
目前本系統採用全自動作業模式，可開啟即時預報選項後，進行海嘯預警作業；茲以在 2013 年 2 月 6 日早上於聖克魯斯群島(索羅門群島東南端的火山島)發生地震矩規模 8.0 之海底地震作為實際案例。

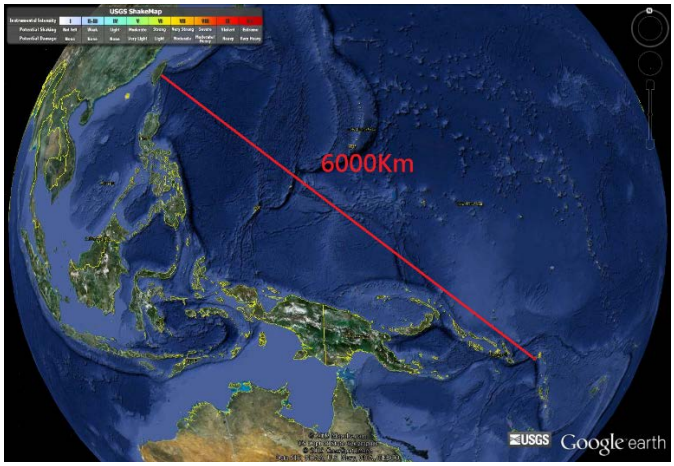
臺北時間 2013 年 2 月 6 日早上 09 點 12 分於聖克魯斯群島(東經 165.088 度，南緯 11.051 度)發生地震矩規模 8.0 之海底地震，深度為 15 公里，距離我國約 6000 公里；地震參數及震央位址分別見圖 3.27(a)(b)；系統於擷取 USGS 資料後進行蘇澳港、花蓮港、安平港及高雄港之最大波高及到達時間之預估，並輸出預估報告單至指定目錄中以方便查閱，各港之輸出結果如圖 3.28(a~d)；預估結果顯示雖然地震矩規模已達海嘯發生要因之標準，且雖震源深度甚淺、但因所發生之斷層走向為西北-東南走向，且距離尚遠，我國並非位處主要傳遞路徑之上，因此對四港並未造成任何威脅性。

USGS WPhase Moment Solution

SANTA CRUZ ISLANDS

```
13/ 2/ 6  1:12:23.00

Epicenter: -10.751  165.088
MW 8.0

USGS/WPHASE CENTROID MOMENT TENSOR
13/ 2/ 6  1:12:23.00
Centroid:  -11.051  165.088
Depth  15          No. of sta:112
Moment Tensor;   Scale 10**20 Nm
  Mrr= 6.03        Mtt=-2.19
  Mpp=-3.84        Mrt= 3.02
  Mrp=-9.42        Mtp= 2.96
 Principal axes:
  T  Val= 11.81  Plg=59  Azm= 81
  N     = -0.44       8      336
  P     =-11.37      29      242

Best Double Couple:Mo=1.2*10**21
 NP1:Strike=309 Dip=17 Slip=  61
 NP2:       159     75        99
```



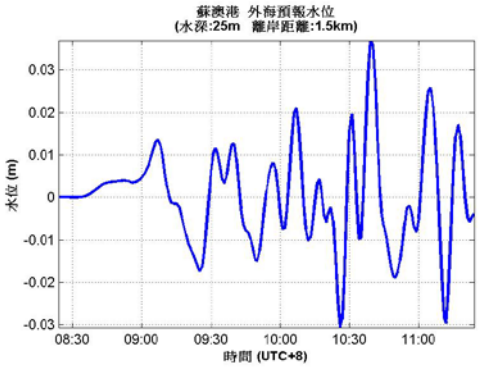


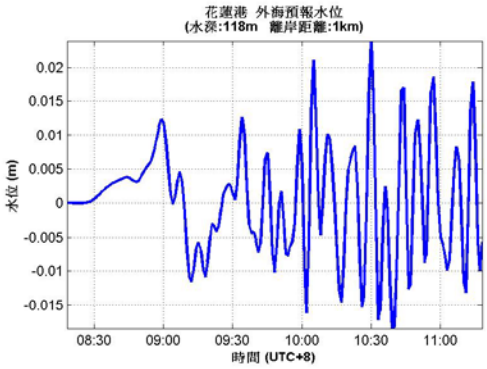
(a) **(b)**

圖 3.27 (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-10.751 經度165.088
地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
Strike=309 Dip=17 Slip=61
第一波到達時間:0000-01-00 09:07:00
最大波高(m):0.067436

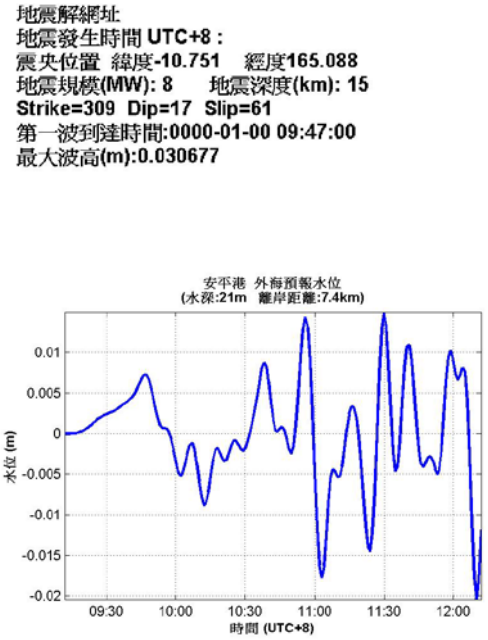
地震解網址
地震發生時間 UTC+8 :
震央位置 緯度-10.751 經度165.088
地震規模(MW): 8 地震深度(km): 15
Strike=309 Dip=17 Slip=61
第一波到達時間:0000-01-00 08:59:00
最大波高(m):0.040971

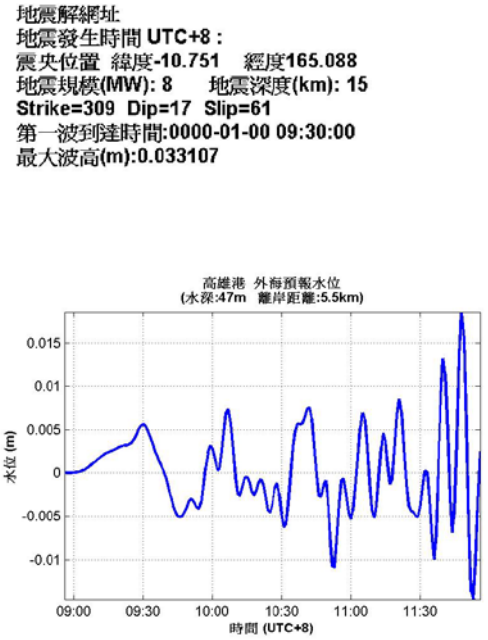




(a) **(b)**

圖 3.28 利用第一組參數所預估之結果及報告單(a)蘇澳港(b)花蓮港





(c) **(d)**

圖 3.28 利用第一組參數所預估之結果及報告單 (c)安平港(d)高雄港

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，系統約能於 1-2 分鐘之內完成單一點模擬。。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。

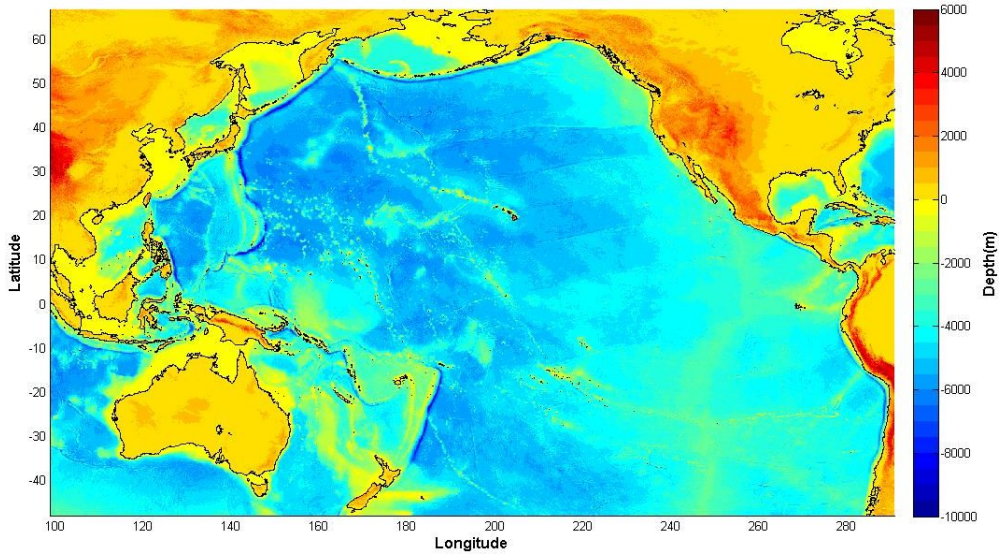


圖4.1 視窗化系統之計算範圍圖

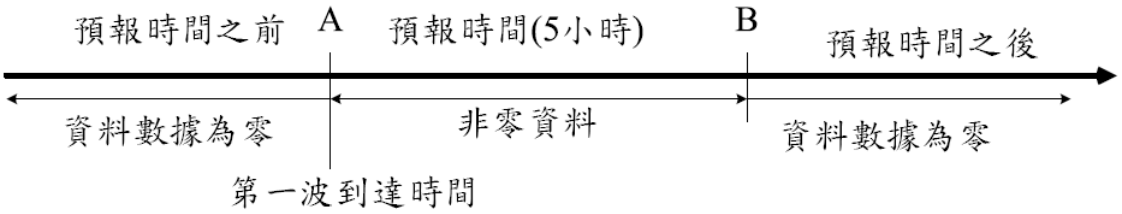


圖4.2 單點格林函數數值資料在時間上之分布型態

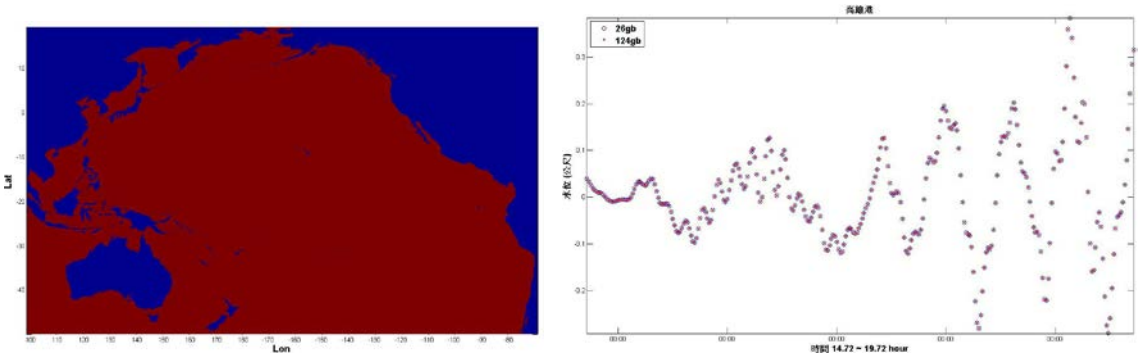


圖4.3 (a)單點格林函數數值資料在空間上之分布型態(紅色部分為水域，藍色為陸域)(b)高雄港格林函數變更前後之水位變化驗證

4.2 高雄港域及安平港域海嘯預警子系統

4.2.1 高雄及安平港域之潛在海嘯波源區

以互逆格林函數的最大絕對值來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；以此方法訂出南部各港之潛在海嘯波源區，如圖 2.4、圖 2.5。圖中顯示發生在連接馬尼拉海溝及西南外海之海底斷層系統對高雄港、安平港威脅性最大，根據歷史上的文獻紀載，臺灣西南部地區皆有疑似海嘯侵襲的記述(1661 年、1721 年、1792 年於臺南、1866 年於高雄及 1781 年於屏東)，若在西南方海域足以引發海嘯之地震，將造成嚴重損失，高雄港更為國際商港，因此，就防災考量而言，也不能排除海嘯之可能性。

另一方面，高雄港及安平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

高雄港位於臺灣西南部沿海，腹地廣大，地處臺灣海峽與巴士海峽航道交匯之要衝，是歐、美、亞海運必經之道，為臺灣進出口貨物之首要門戶與集散中心。高雄港共有兩個港口，第一港口位於東經 120°15'25"，北緯 22°37'01"；第二港口位於東經 120°18'26"，北緯 22°33'21"。亦即以旗後山上之燈塔為中心劃圈，半徑 3.22 公里範圍內之水域而言。港口北側有高雄山聳立，海拔約 350 公尺，形成天然之屏障，港口南側約 48 公尺處有旗後山對峙。港口居於兩山之間，水道狹窄，寬僅 105 公尺，主要部分之水深，退潮時平均 10 公尺，有時達到約 14 公尺，將來計畫拓建到 150 公尺寬。港口外之航道，寬 180 公尺，長 1045 公尺，水深約 7.5 公尺，可通行吃水約 7.5 公尺之船舶，將來計畫擴建為寬 300 公尺，長 1710 公尺，水深 11 公尺。中華民國政府正推

動發展高雄港為亞太海運轉運中心、全球運籌中心及自由貿易港區。圖 4.4 為目前港區之平面圖。

安平港南距高雄港約 40 公里，北距臺中港約 140 公里，為臺南地區之門戶，港內有完善良好之港埠設施及旅客服務中心，開發完成後，港區總面積達 445 公頃，陸域面積 180 公頃，水域面積 265 公頃，航道水深 11.5 公尺，可進泊 2 萬噸貨輪，碼頭總數為 32 座，總長度約 5566 公尺，貨物裝卸能量可達 1 千 600 百萬公噸。安平港為高雄港的輔助港，安平港由國內商港升格為國際商港。圖 4.5 為目前港區之平面圖。

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　高雄港區之平面圖(資料來源：高雄港務公司網頁)

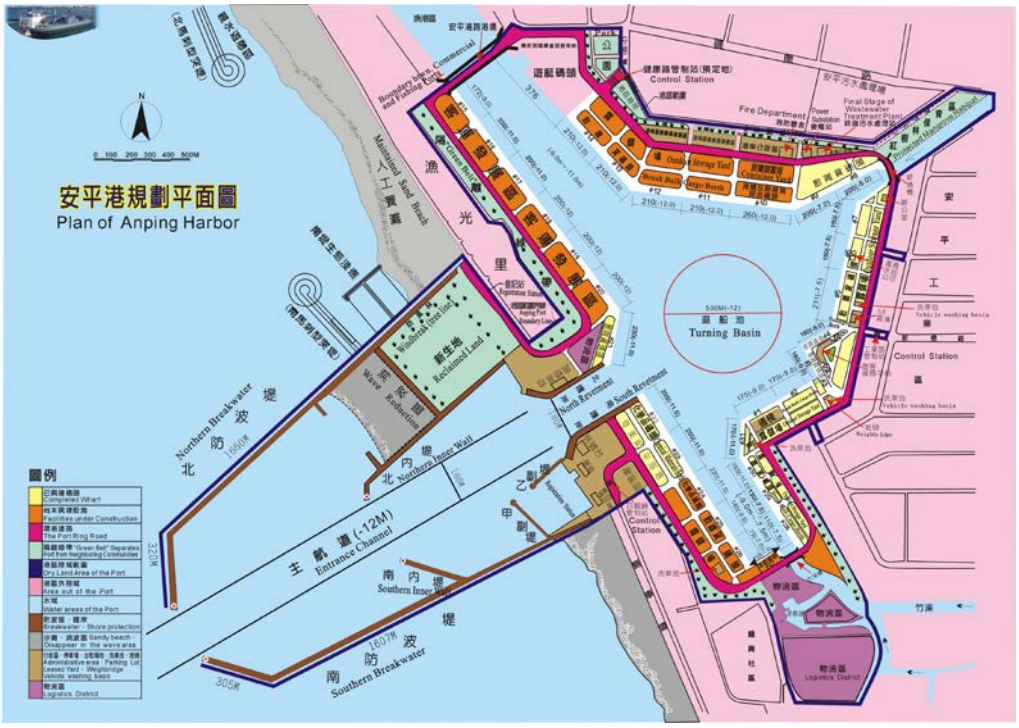


圖4.5 安平港區之平面圖(資料來源：高雄港務公司網頁)

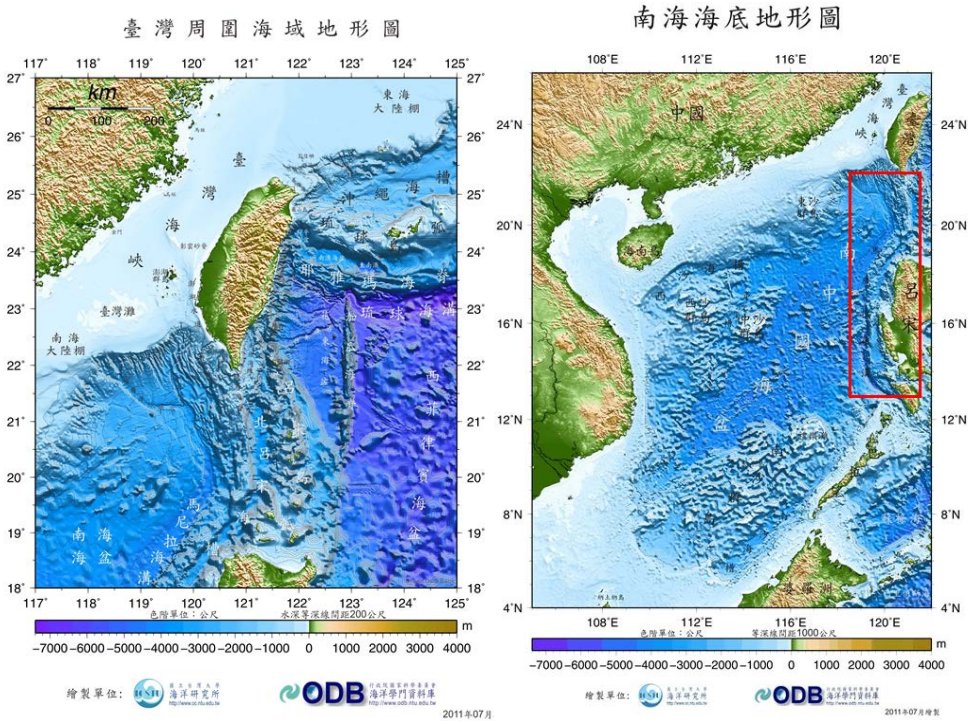


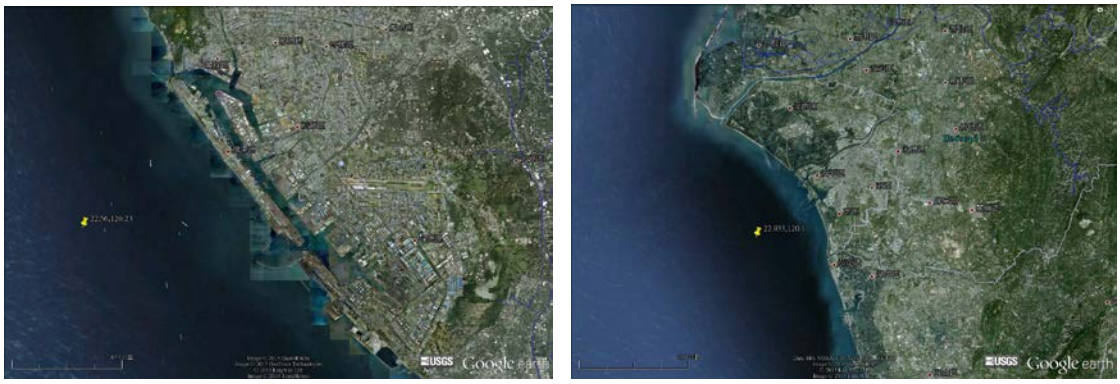
圖4.6 臺灣周圍及南海之水深分佈(紅色框：馬尼拉海溝)

圖片來源：行政院國家科學委員會海洋學門資料庫

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；高雄港之預報點位位於東經 120.23 度，北緯 22.57 度，水深 47 公尺，離岸約 5.5 公里；安平港之預報點位位於東經 120.1 度，北緯 22.93 度，水深 21 公尺，離岸約 7.4 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，操作介面與軟體設置適用於個人電腦。



(a) **(b)**

圖 4.7 (a)高雄港(b)安平港之預報點位

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臺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，藉以計算臺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運輸研究所港灣研究中心在基隆港外所佈放之ADCP系統所量測到2010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。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。

交通部運輸研究所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研中心基隆港觀測站儀器安裝位置

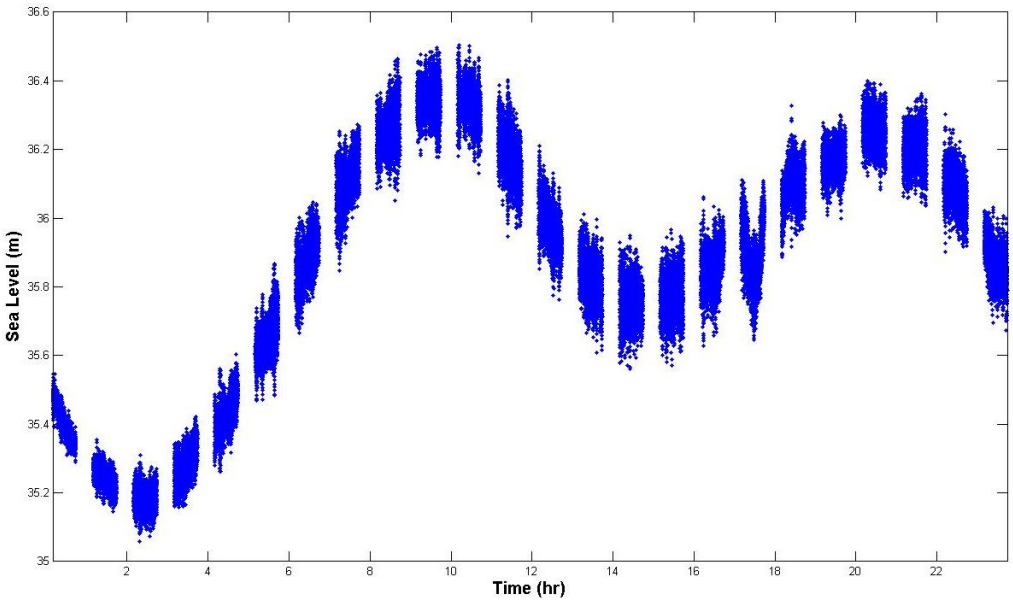


圖 4.9 測站之實測水位

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臺灣時，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。

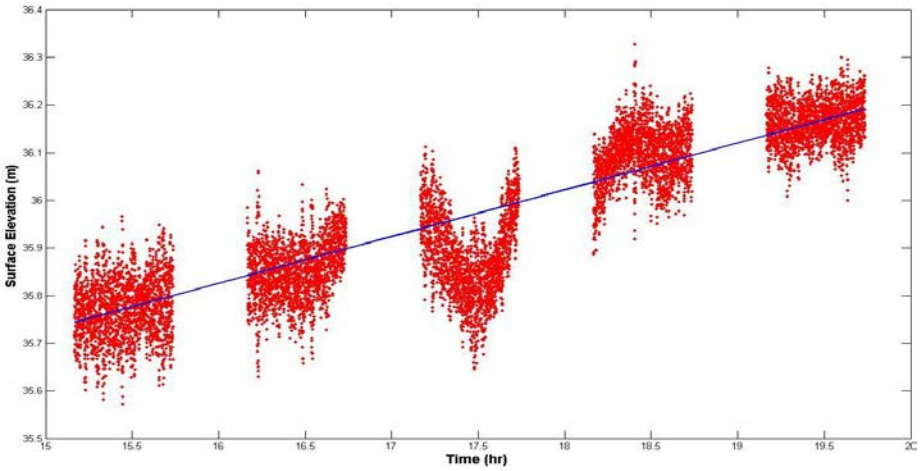


圖 4.10　分析用之實測水位資料

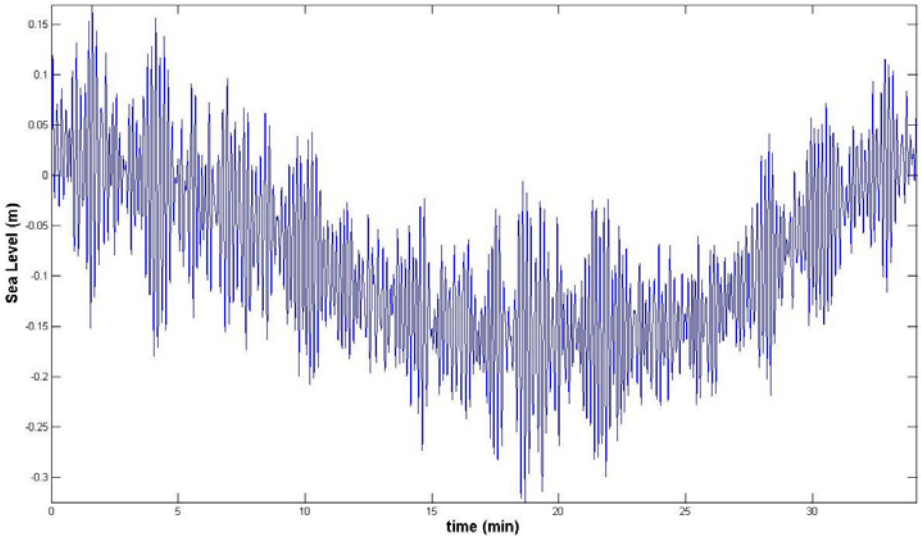


圖 4.11　經過濾潮汐後之水位

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。

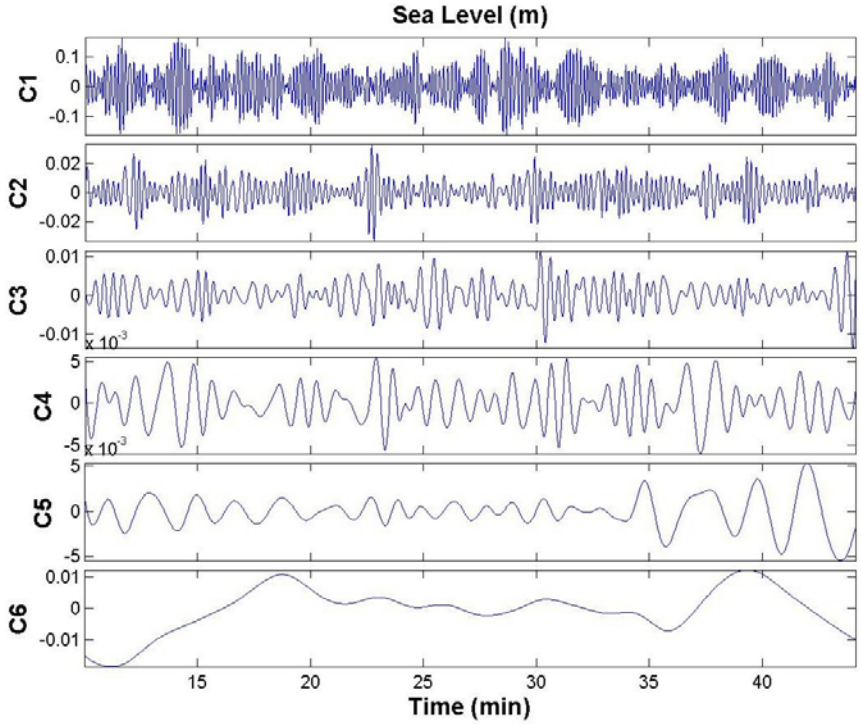


圖 4.12　由 EEMD 分解出較高頻的 IMF 分量(C1 至 C6)

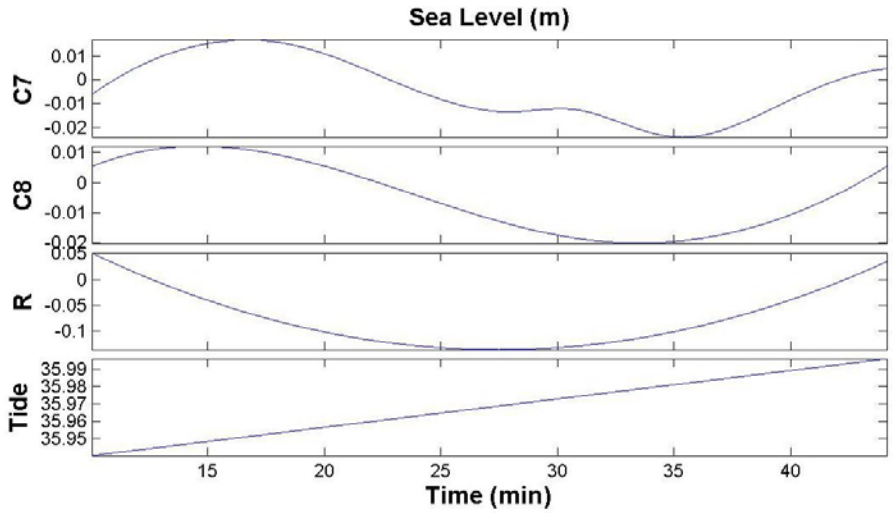


圖 4.13　由 EEMD 分解出較低頻的 IMF 分量、餘訊 R 及潮位

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
```

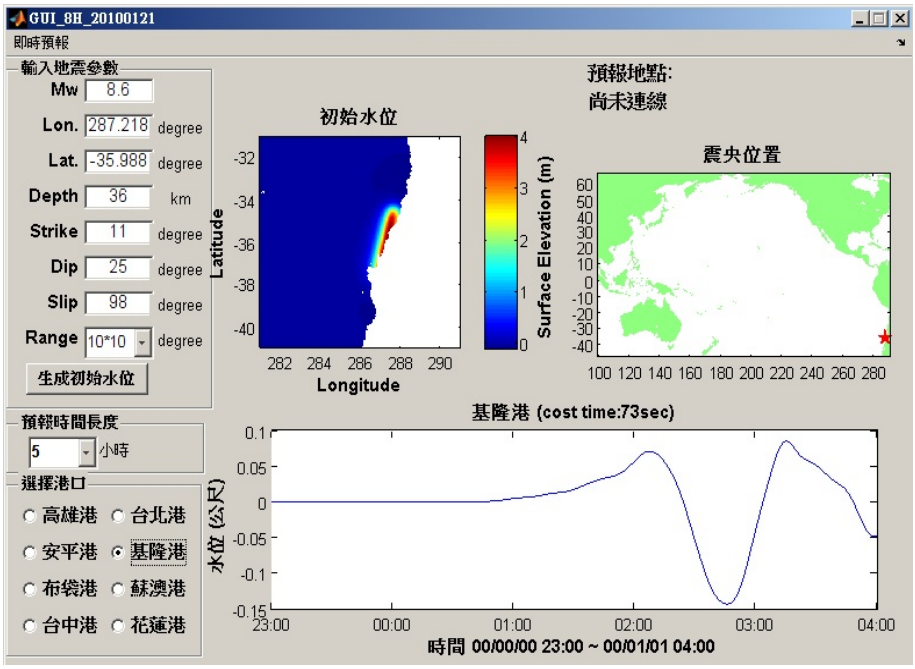


圖 4.14　預報系統預測智利海嘯(Mw=8.6)於基隆港之預報結果

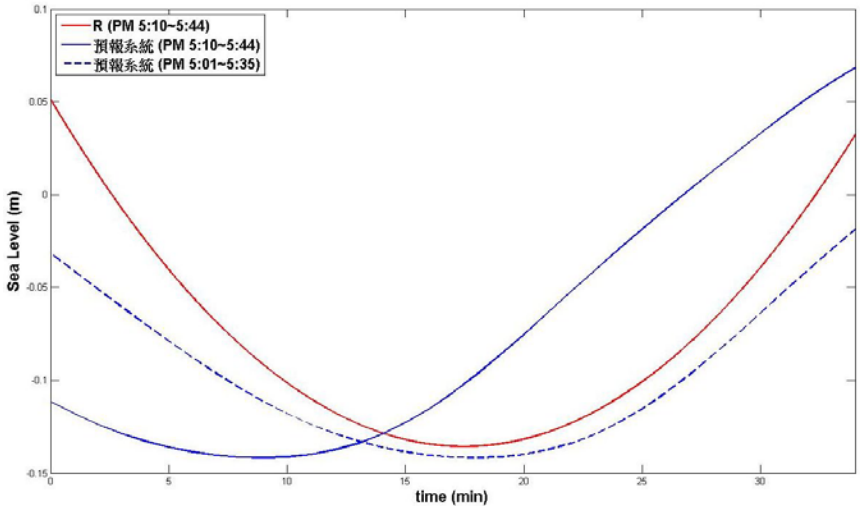


圖 4.15　預報系統計算結果(Mw=8.6)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

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，單機輸入參數所產生之結果，其結果為輸入參數後所產生之時間水位。)，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
```

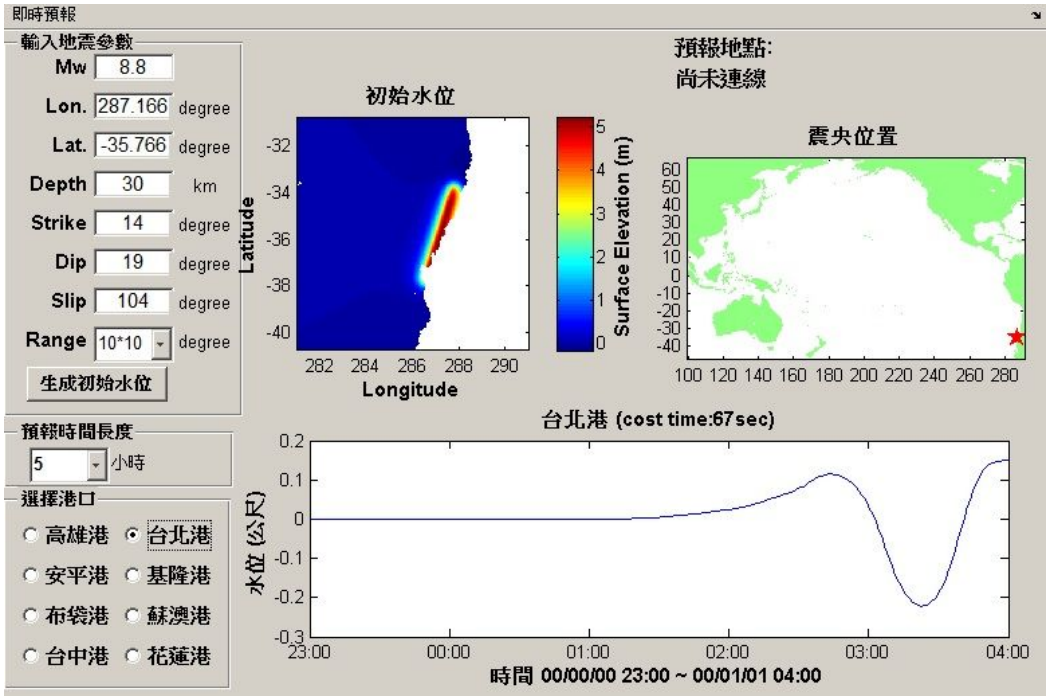


圖 4.16　預報系統預測智利海嘯(Mw=8.8)於基隆港之預報結果

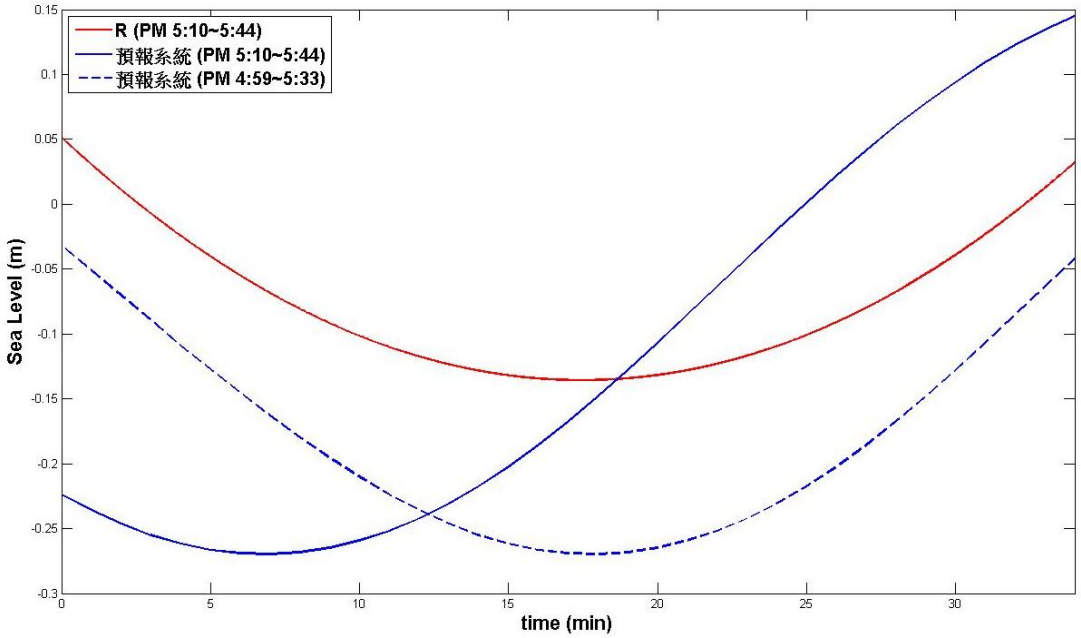


圖 4.17　預報系統計算結果(Mw=8.8)與實測資料之比較圖。(藍實線：下午 5 點 10~44 分預報系統計算結果；紅實線：EEMD 的海嘯餘訊；藍虛線：及下午 5 點 1~35 分預報系統計算結果)

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，交通部運輸研究所港灣研究中心以本系統提供災防中心海嘯在臺灣各大港口的水位變化，得到相當好的結果。本節利用交通部運輸研究所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(NEIC)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。

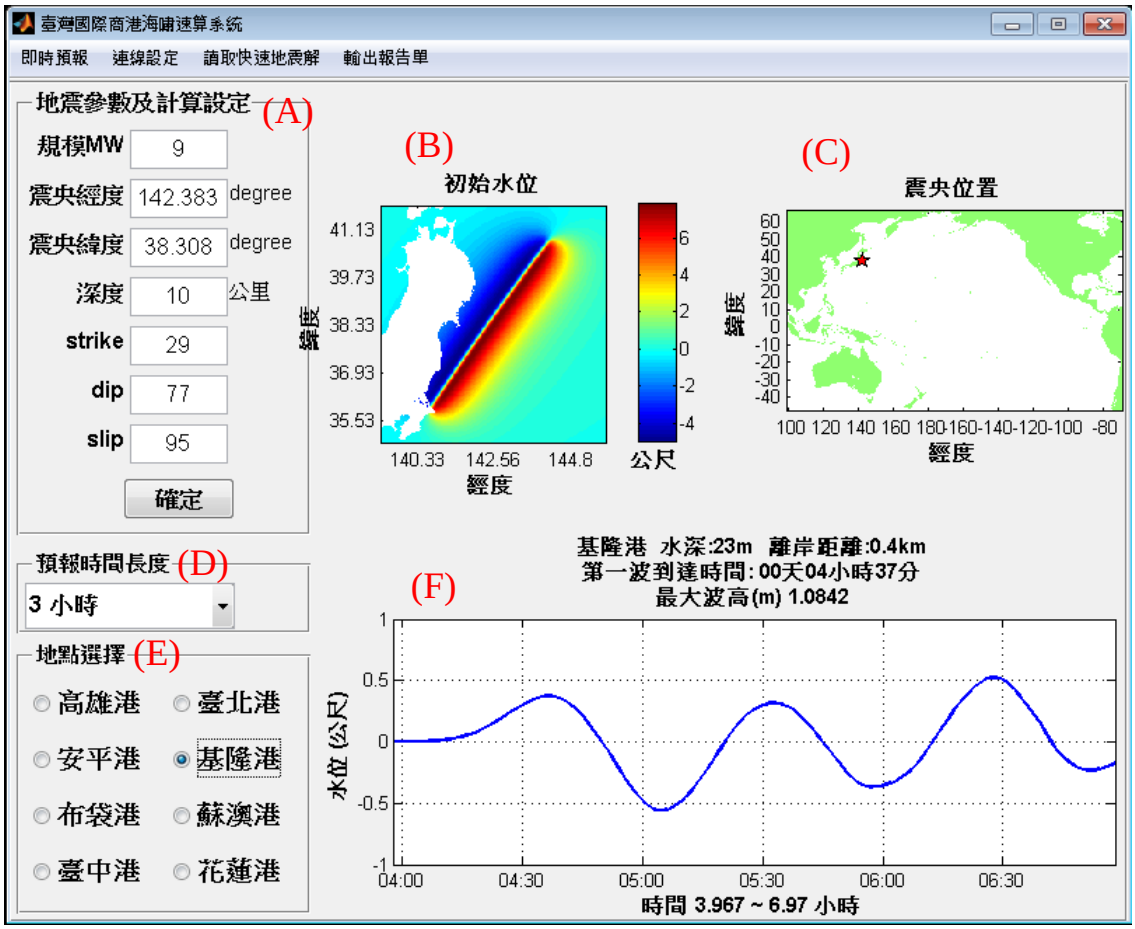


圖4.18　海嘯速報系統之介面

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。

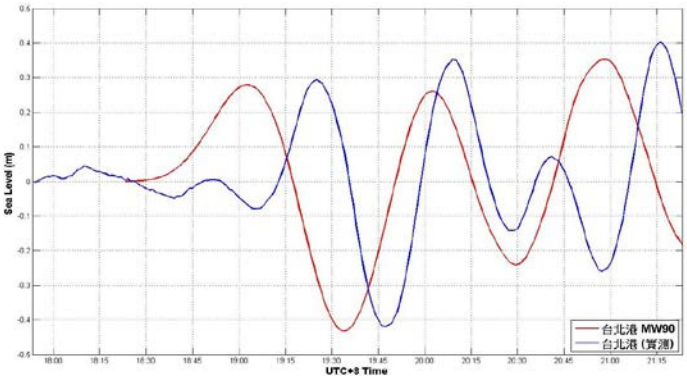
(D)選擇預報時間長度。

(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:Mo=4.5*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交通部運輸研究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。

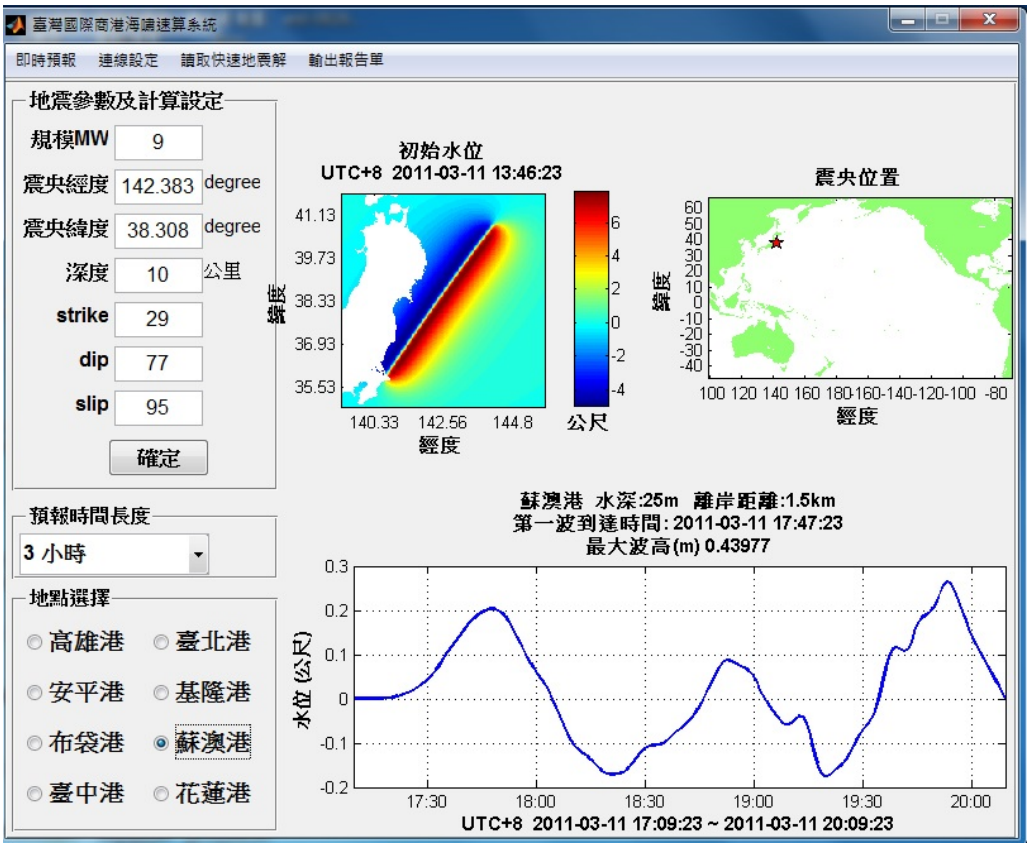
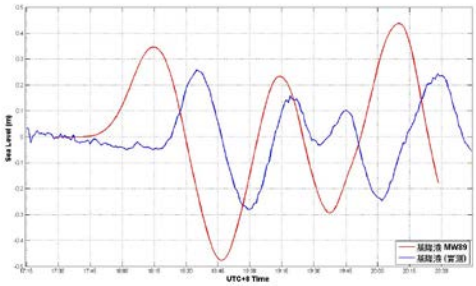
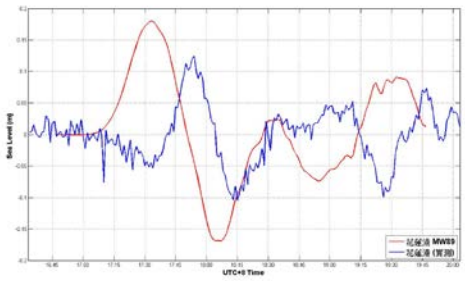


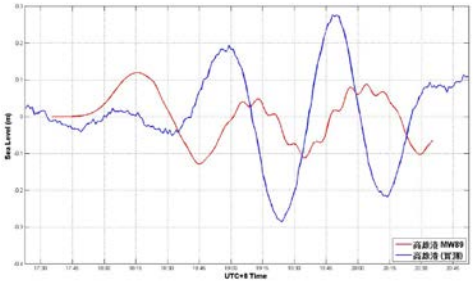
圖 4.20　以速算系統及新公佈之 0311 東日本海嘯之地震參數計算蘇澳港之海嘯波到達時間及水位時序分佈



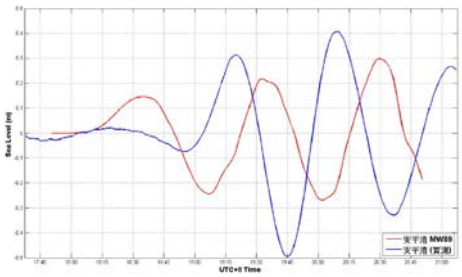
(a)



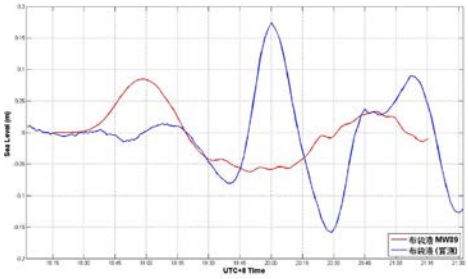
(b)



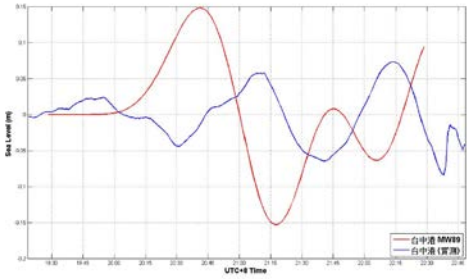
(c)



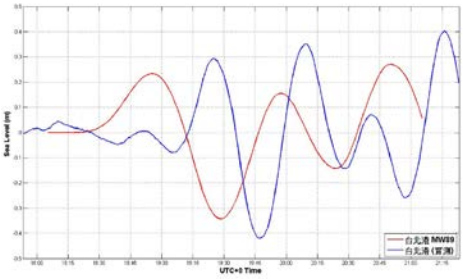
(d)



(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)台中港及(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)

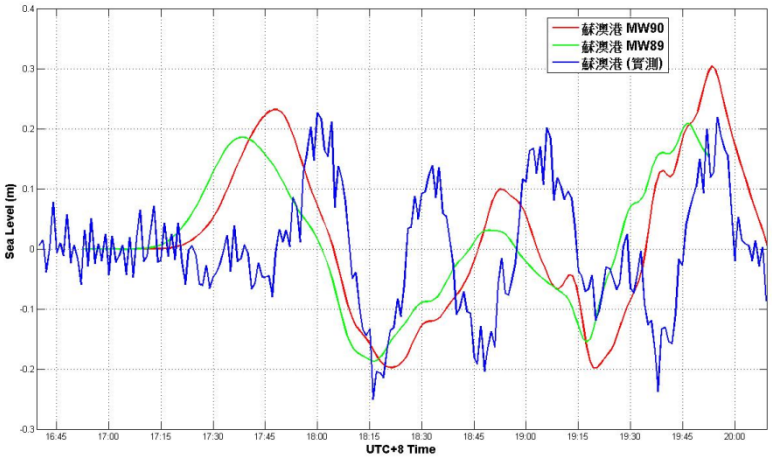


圖 4.22 以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模 Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模 Mw9.0)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較(0311 東日本海嘯事件)

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，臺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

第二章說明對高雄港及安平港最具威脅性之海嘯潛勢波源是來自馬尼拉海溝及西南外海之海底斷層系統，而臺灣又位處環太平洋地震帶上，地震發生次數頻繁，且西南方的馬尼拉海溝是學界目前公認對臺灣西南沿岸最具威脅性之震源區；故本節利用 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，實際模擬該起地震對高雄港及安平港之水位變化。

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)為系統計算之高雄港與安平港之預報水位，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；高雄港第一波約在地震發生後 41 分鐘後到達，最大波高約一小時後出現，其值約為 0.023 公尺；海嘯波約在地震發生後 53 分鐘後抵達安平港外，最大波高約一小時半才會產生，其值約為 0.032 公尺。兩港之第一波到達時間相差約 10 分鐘，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高雄港與安平港之預報水位，由圖可知，兩港之水位變化是波谷先至，第一波為最大波高；高雄港第一波約在地震發生後 37 分鐘後到達，其值約為 0.023 公尺；海嘯波約在地震發生後 50 分鐘後抵達安平港外，最大波高約 50 分鐘後產生，其值約為 0.024 公分。兩組參數計算結果並無太大之差異，初步研判結果對安平及高雄港應無具體之影響。但較為注意的是海嘯波在地震發生後 37 分鐘就抵達，若地震規模再大或海嘯源緊鄰臺灣，事前的海嘯災防顯得格外重要。

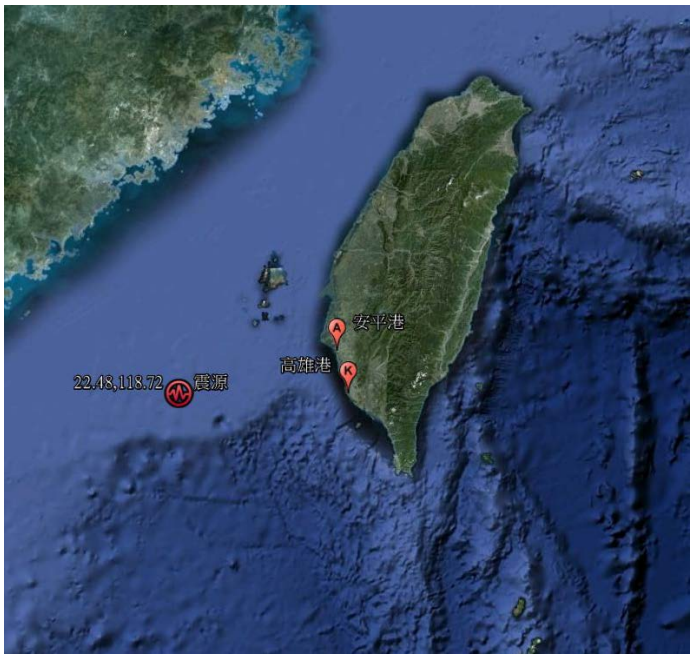
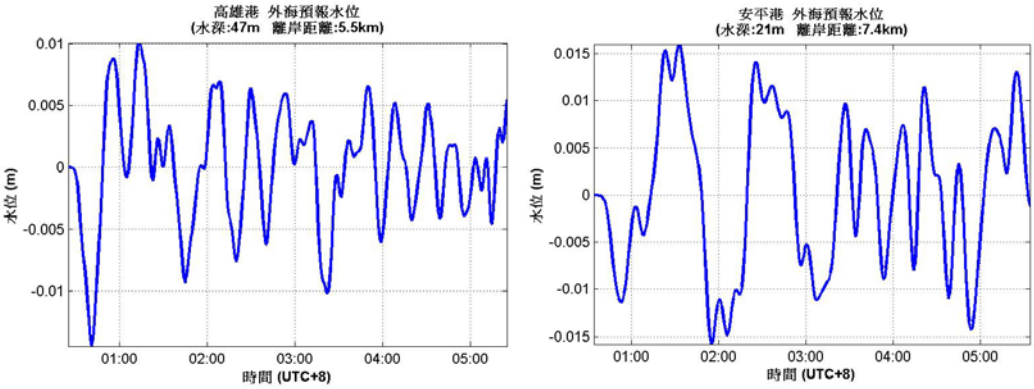


圖 4.23　1994 年地震位址

091694A TAIWAN REGION

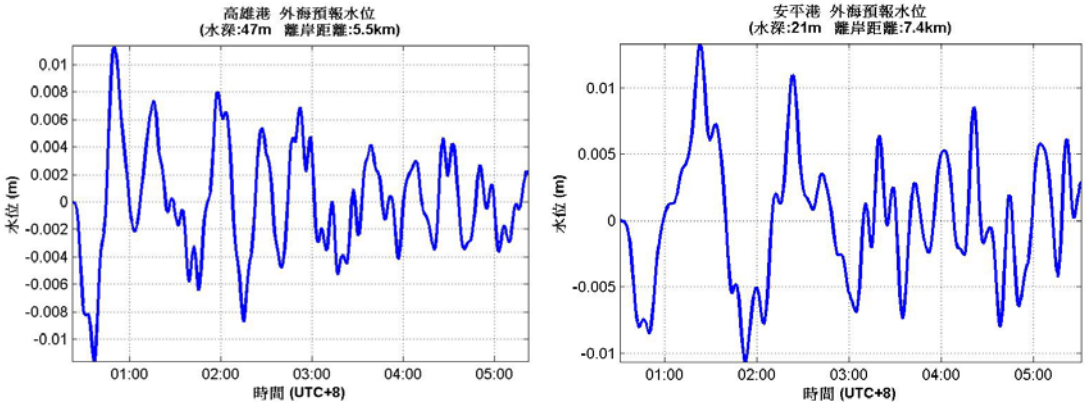
```
Date: 1994/ 9/16   Centroid Time:  6:20:23.1 GMT
Lat=  22.48  Lon= 118.72
Depth= 15.0   Half duration= 5.4
Centroid time minus hypocenter time:  4.8
Moment Tensor: Expo=26  -1.061 1.146 -0.085 -0.476 0.341 -0.028
Mw = 6.7    mb = 6.5    Ms = 6.7   Scalar Moment = 1.25e+26
Fault plane:  strike=256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



(a)　　**(b)**

圖 4.25 利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港



(a) **(b)**

圖 4.26 利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港

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

圖 4.28　[近期海嘯查詢]之展示介面

圖 4.29　[近期海嘯查詢]之查詢結果展示

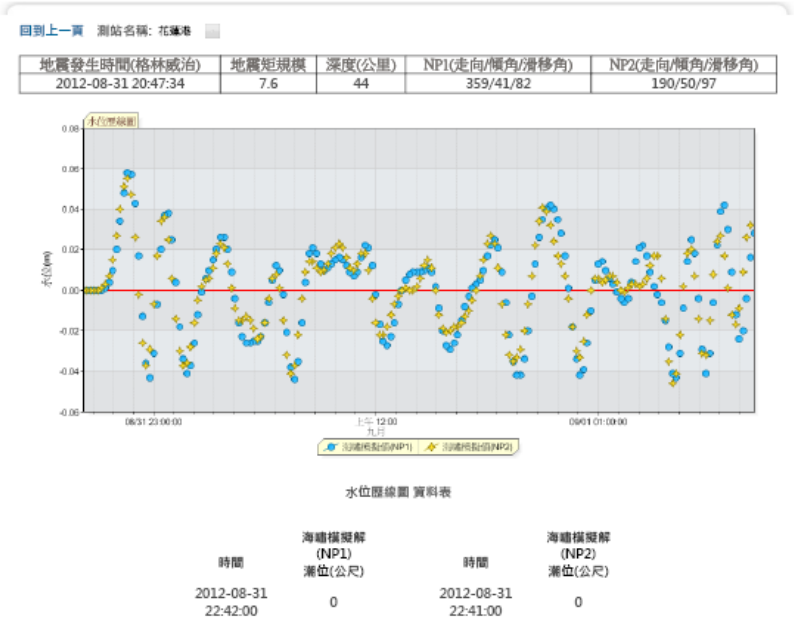


圖 4.30　水位歷線圖之展示介面

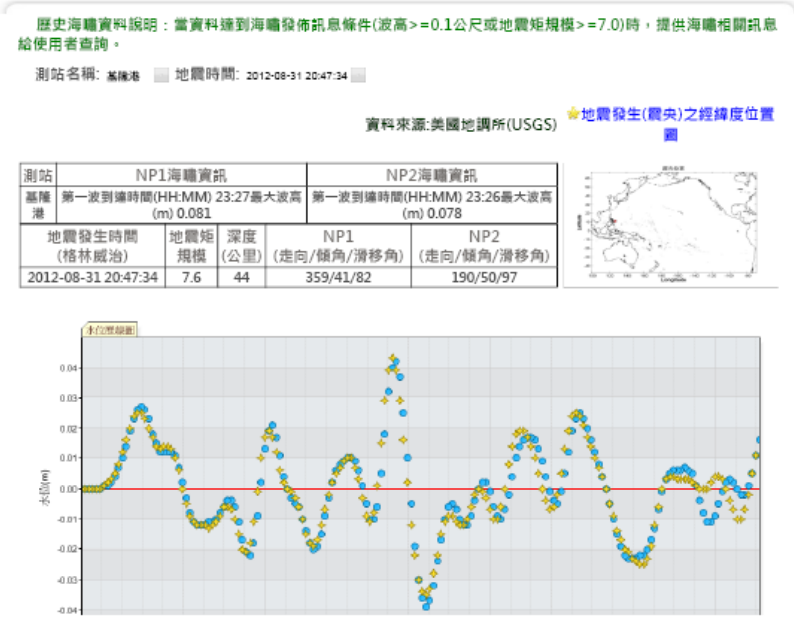


圖 4.31　[歷史海嘯查詢]之查詢結果

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

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

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，災害風險為災害破壞損失及社會經濟的破壞影響有多大，而在此將可能發生災害的地區、脆弱度、社會因子等其他因子統稱為曝險度，評估地震引發海嘯其曝險度、破壞發生的機率、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：

$$\sum_i \sum_j TEN_j^i TIP_j^i = \sum_i \sum_j EN_j^i P_{ocsh}^i TIP_j^i \tag{5.1}$$

$$TEN_j^i = EN_j^i P_{ocsh}^i \tag{5.2}$$

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。

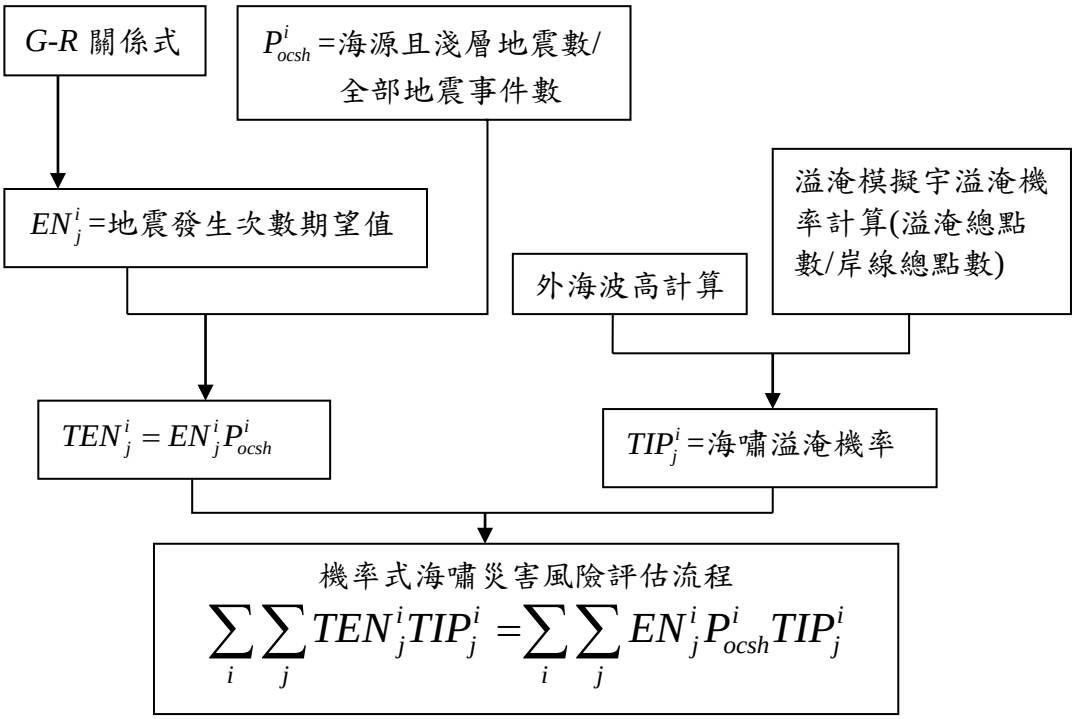


圖 5.1 海嘯風險評估流程圖

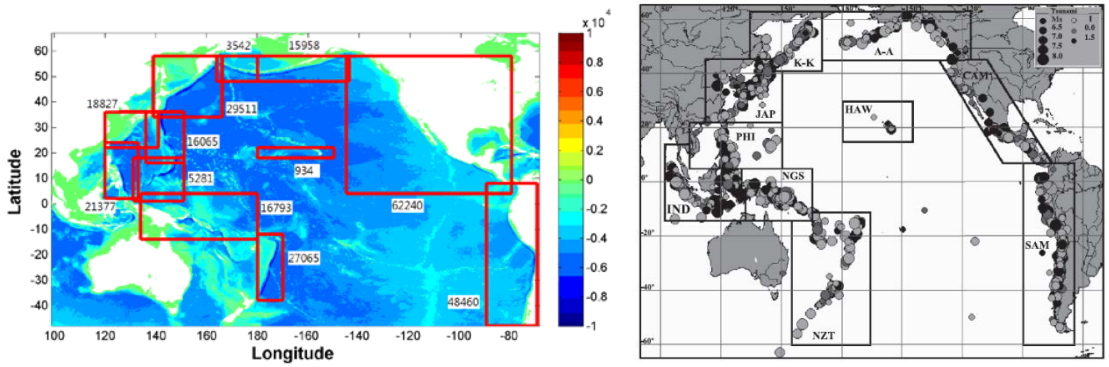
5.2 海嘯地震發生次數期望值

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 的 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

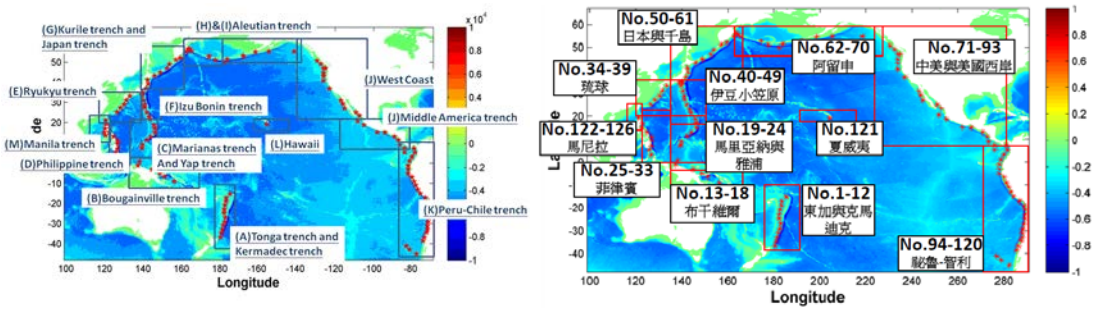
岸之海溝還是主要地震發生地。其次，由於各版塊及海溝地質條件各異，為便利後續海嘯模擬及溢淹機率計算，需將各海溝做適當之分塊，Gusiakov(2005)建議以各主要海溝做為分類之依據，如圖 5.2(b)所示。本研究之分類則如圖 5.3(a)所示。

根據上述之建議，本研究進一步以緯度 2 度為一單位，將各主要海溝做細部分區；主要目的為由於海溝一般甚長(例如馬尼拉海溝)，在選取可能震源及計算機率時，若將一海溝視為一整體，會減少可能之震源數。因此本研究依主要海溝分為數個大區域總共 126 個區域點位，圖 5.3(b)。



(a) **(b)**

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(Gusiakov, 2005)



(a) **(b)**

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

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(M_w)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(地震矩規模記錄、震源深度記錄、震央位置記錄等)。並利用地震資料庫其地震解平均計算出走向角(strike)與傾角(dip)，在此滑移角自訂為 90 度，但考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。

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：

$$\log(N) = a - bM \tag{5.3}$$

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≧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。

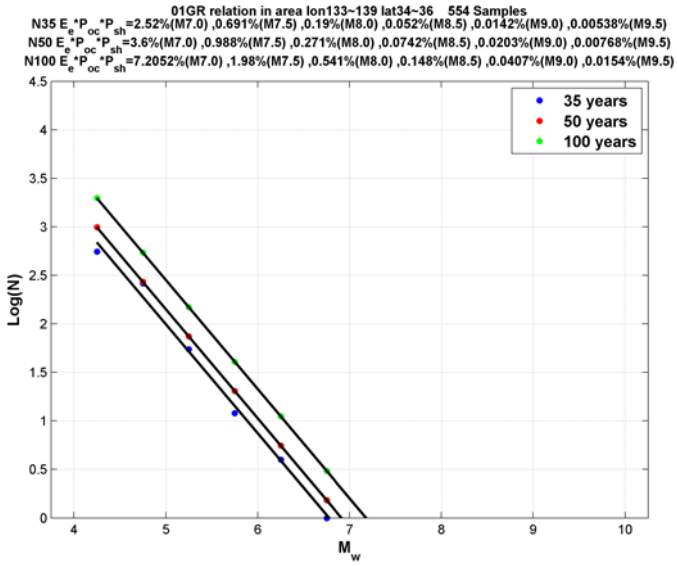


圖 5.5　G-R 關係式之計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)

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^i_{ocsh}，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(5.2)式中的 TEN；如下表 5.2。

由 NEIC 資料庫中所記錄地震資料，地震紀錄期間為自 1973 至 2013 年，搜尋範圍為整個太平洋區域，地震紀錄採用下限為 4.25，如圖 5.7 所示。

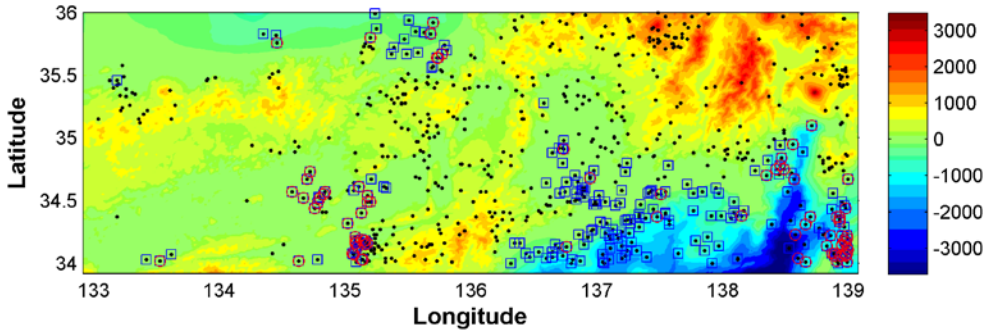


圖 5.6　計算範例(東經 133 到 139 度，北緯 34 到 36 度)之淺層海源地震分佈

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}

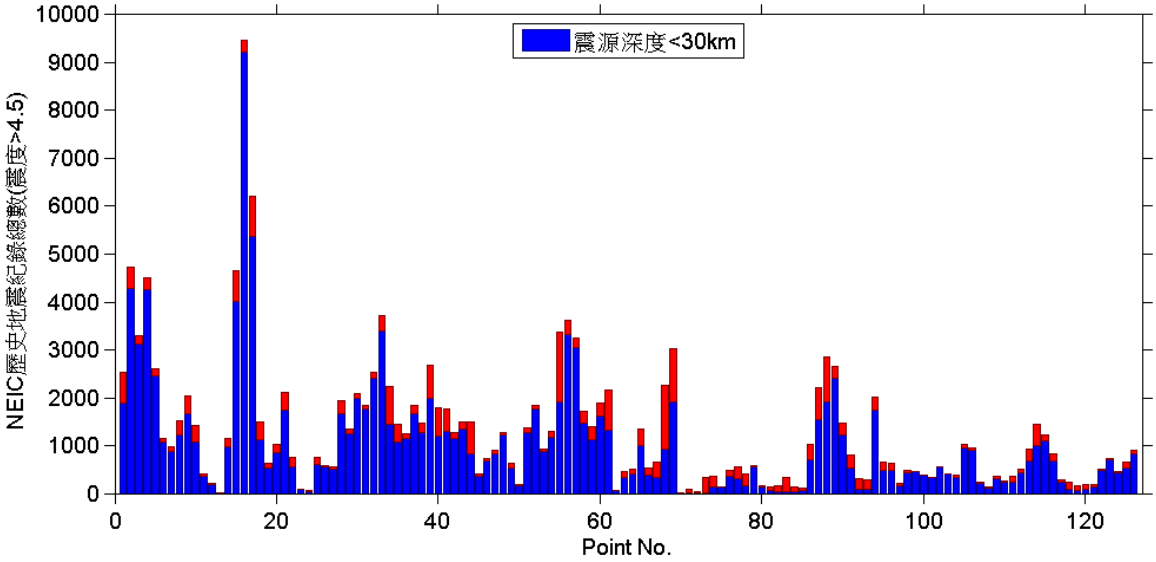


圖 5.7 NEIC 中環太平洋地震帶 126 區域點位之歷史地震資料

5.3 安平港之溢淹模擬

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 5.8；除了 TaiDBMV6 外，港區之水深亦採用港研中心所提供之船測資料加以校正。陸域地形資料是由內政部地政司所提供之 5m×5m 之 DSM 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 臺灣高程基準(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 5.9 為安平港之陸域數值地形。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 5.10 為海陸域整合後之數值地形檔。並將港研中心所提供之港內實測地形資料整併至數值地形圖 5.11。

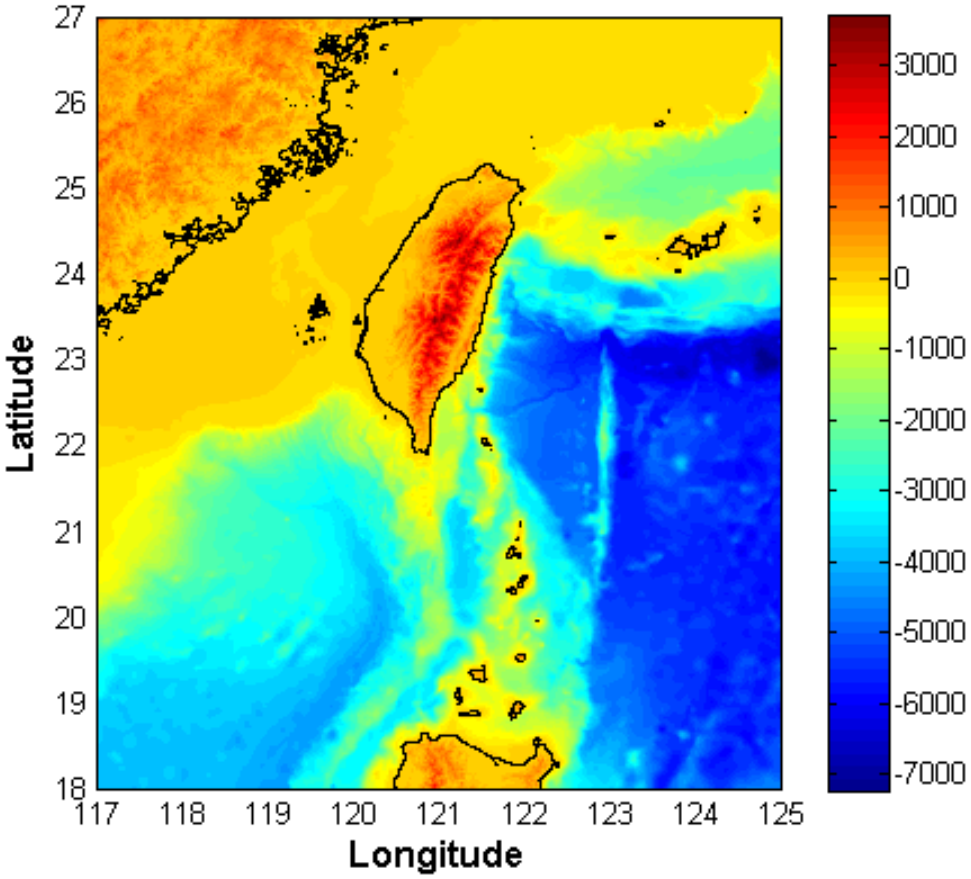


圖 5.8 臺灣 500m 解析度水深地形資料

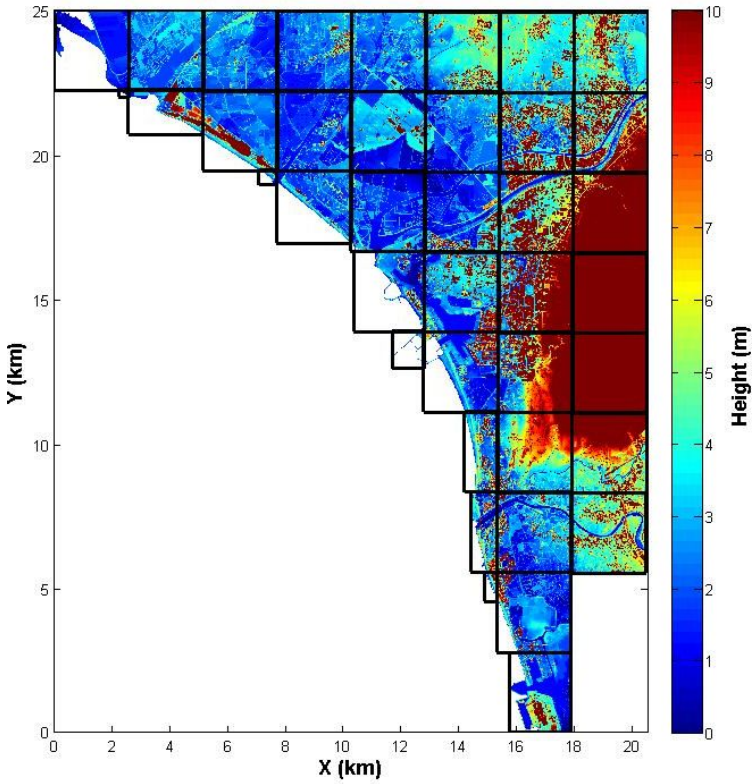


圖 5.9　安平港 5m 解析度數值地形檔

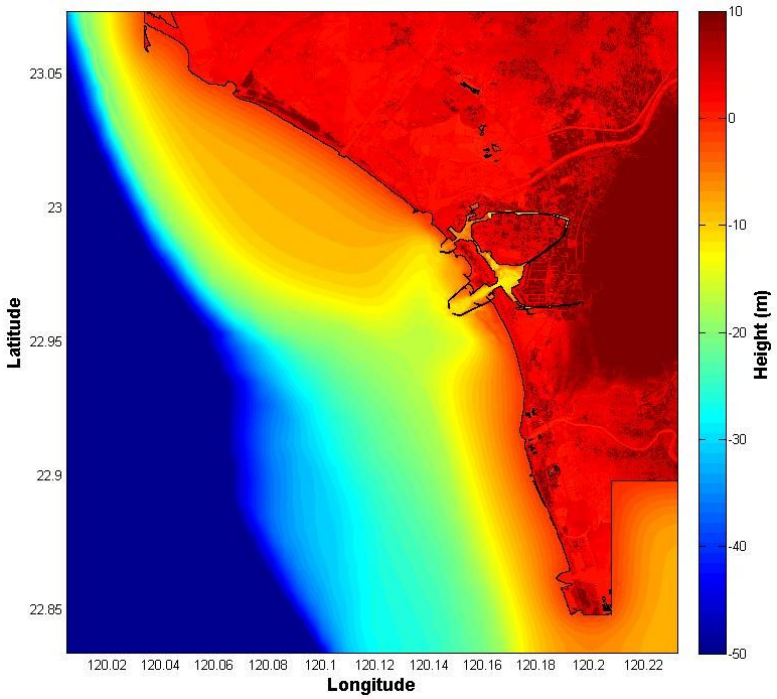


圖 5.10　安平港整合海陸域後之數值地形檔

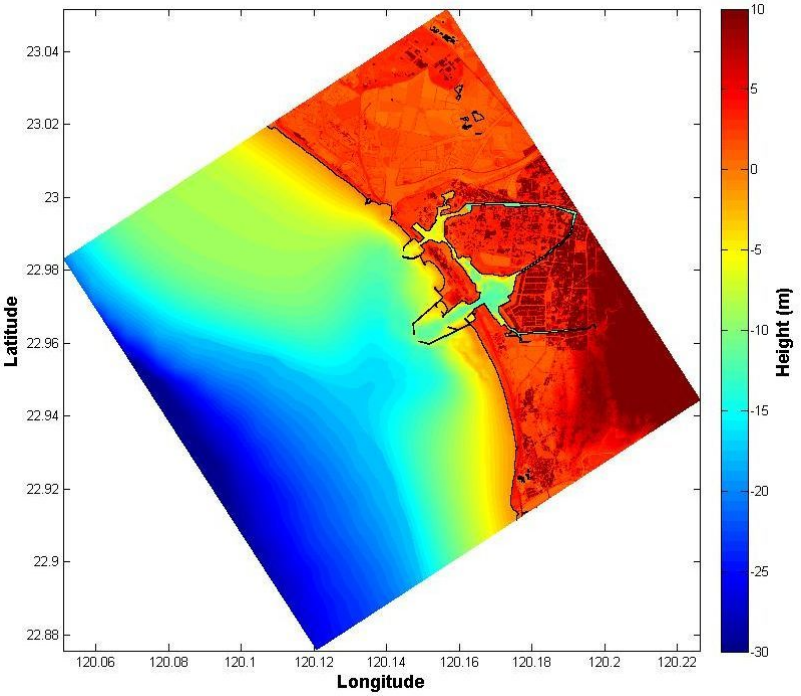


圖 5.11　安平港整併港內實際地形之數值地形檔

5.3.2 安平港之模擬結果

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，以不同波高之高斯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，其所攜帶之水量遠大於季風所引起之短週期風浪，而孤立波之高度及寬度有一固定關係，故本研究所稱之高斯波為說明其週期與波高的不同而定義，前期臺中港與布袋港之模擬為採用之週期為 20 分鐘，本計劃亦沿用此一週期；以安平港為例，海嘯波模擬採用之週期為 20 分鐘，圖 5.12 為波高 4m 週期 20 分鐘之高斯波，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。而計劃中所設定之海嘯潛勢波源區為整個環太平洋地震帶。

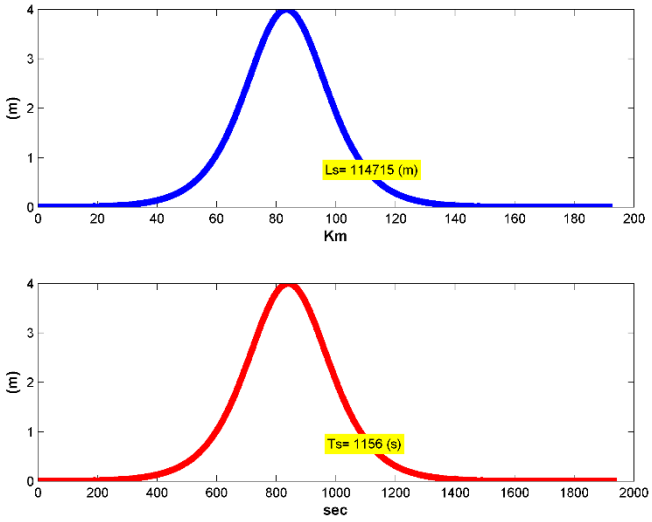
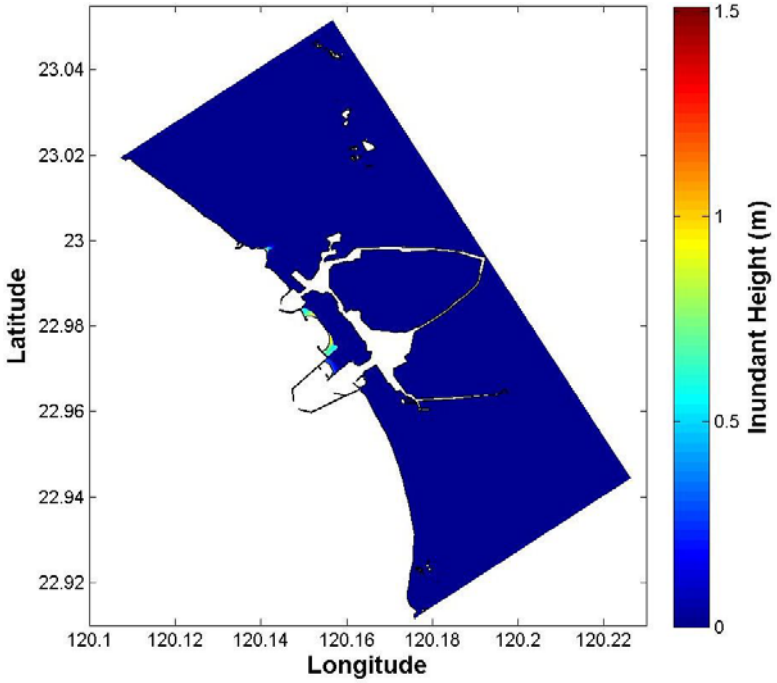
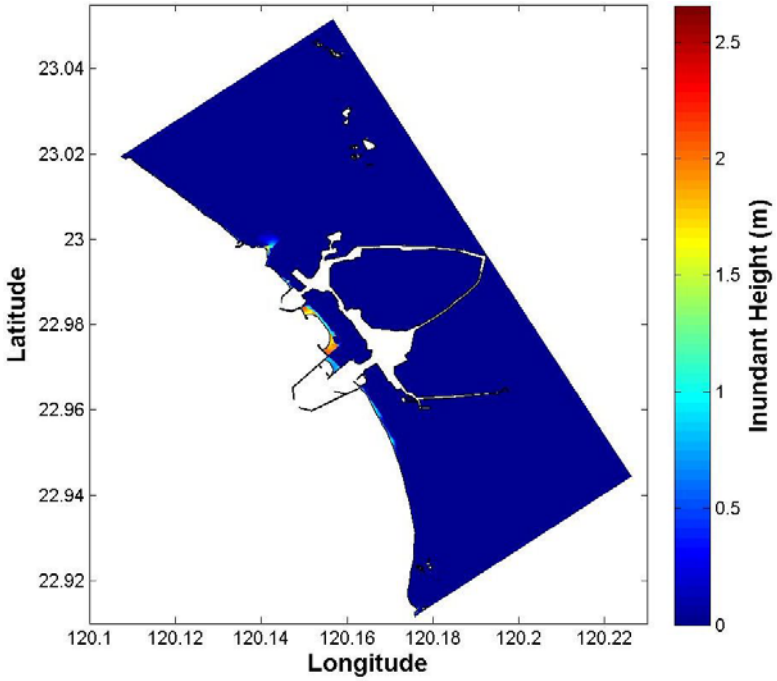


圖 5.12 週期 20 分鐘波高 4m 高斯波

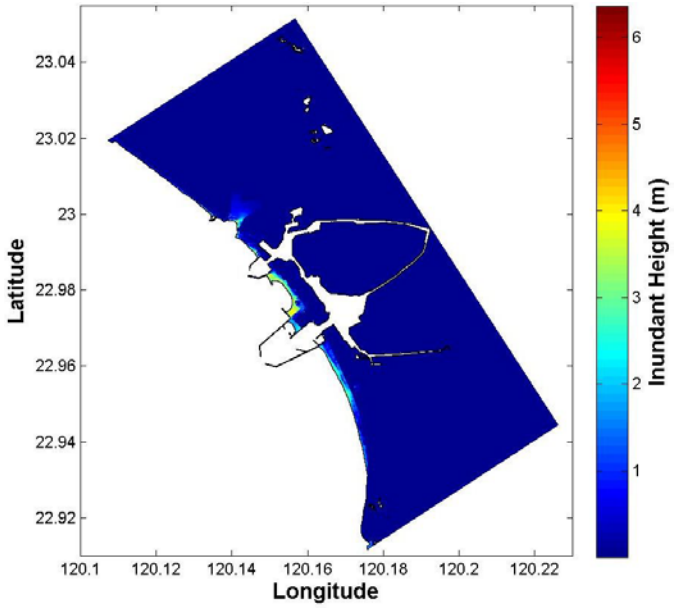
圖 5.13(a)~(g)為安平港在各種不同入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 3 公尺以下，溢淹範圍侷限於內港區之下方，溢淹高程約為 1.5 公尺以下。3 公尺以上之波高時，溢淹範圍會逐漸向內陸擴大，在內港區上下之溢淹高程也會提高至 8 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。



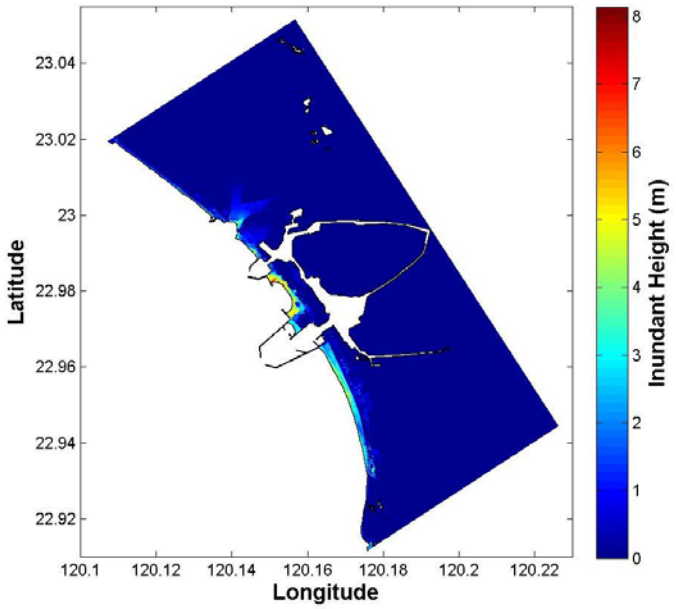
(a) 安平港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



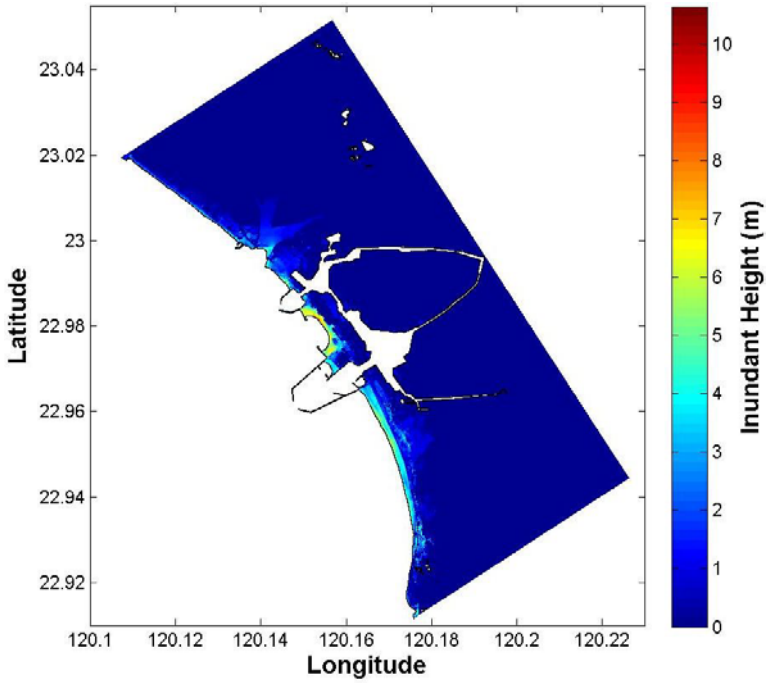
(b)安平港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



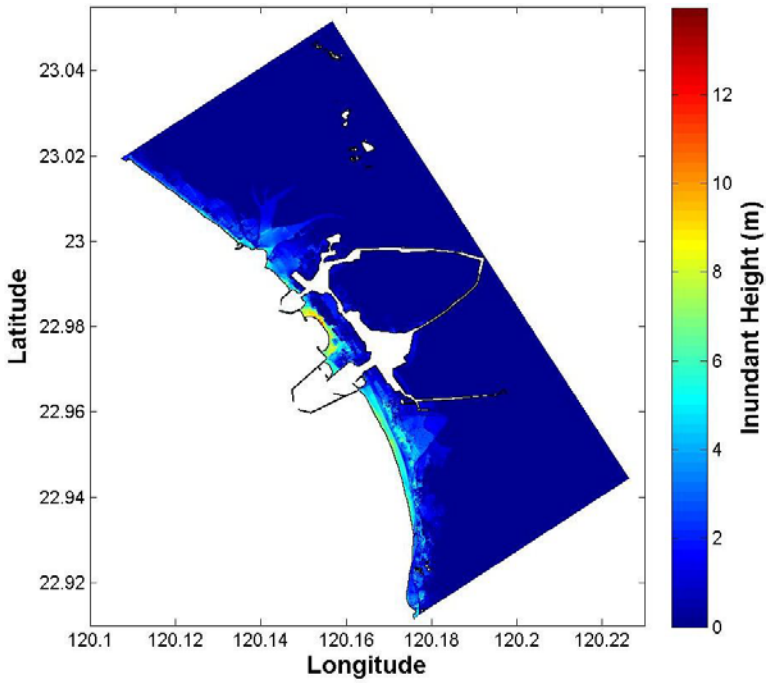
(c) 安平港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



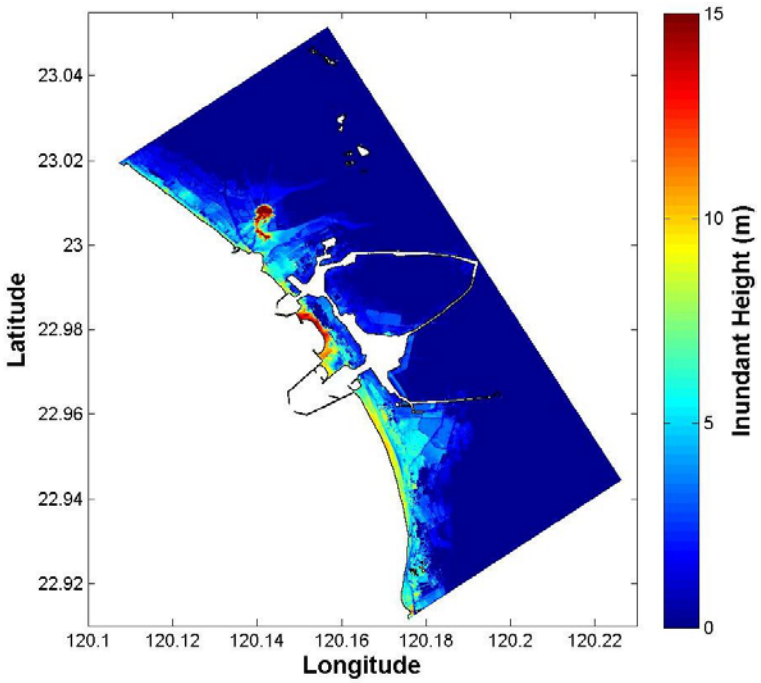
(d) 安平港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 安平港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 安平港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖



(g) 安平港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

圖 5.13 安平港之溢淹圖，入射波高：(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 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5.14 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。

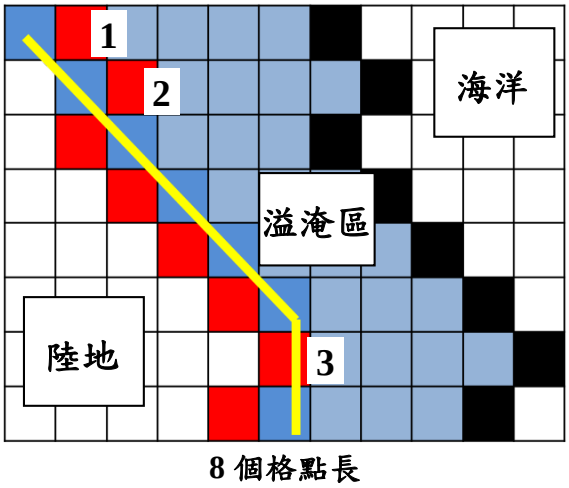
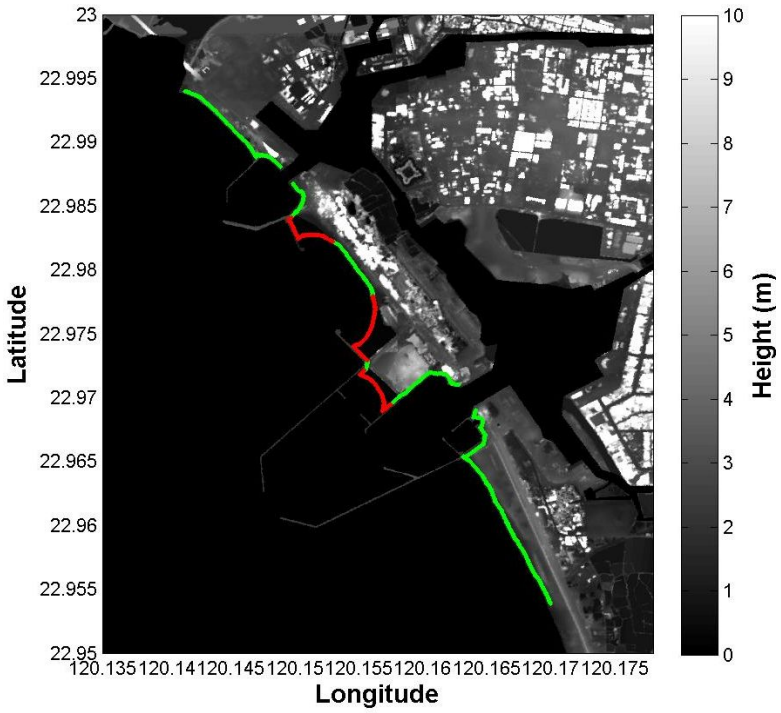


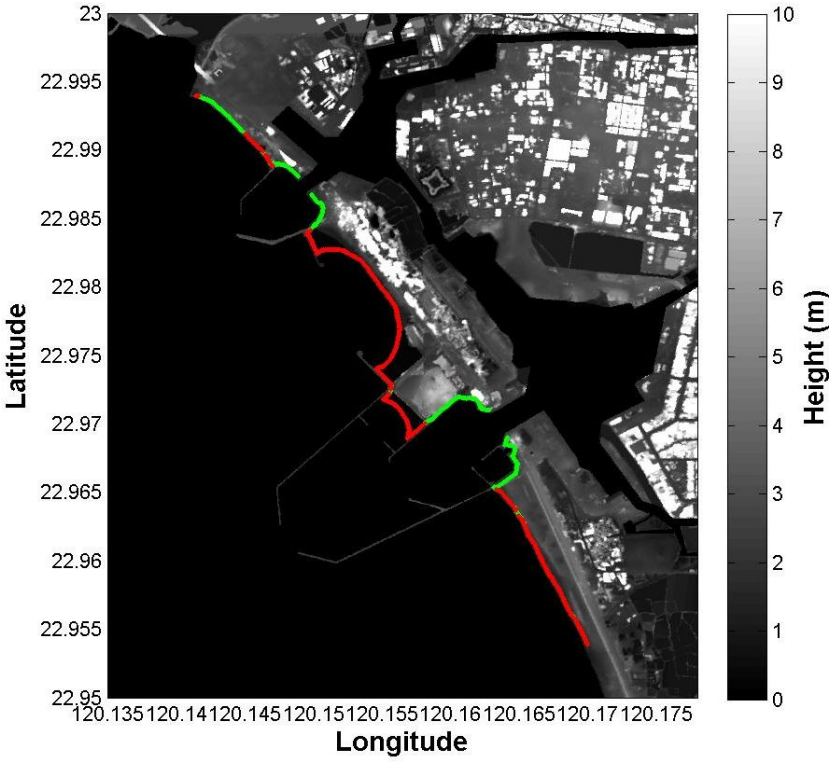
圖 5.14 溢淹機率簡示圖

5.3.4 安平港之溢淹點位分佈及機率

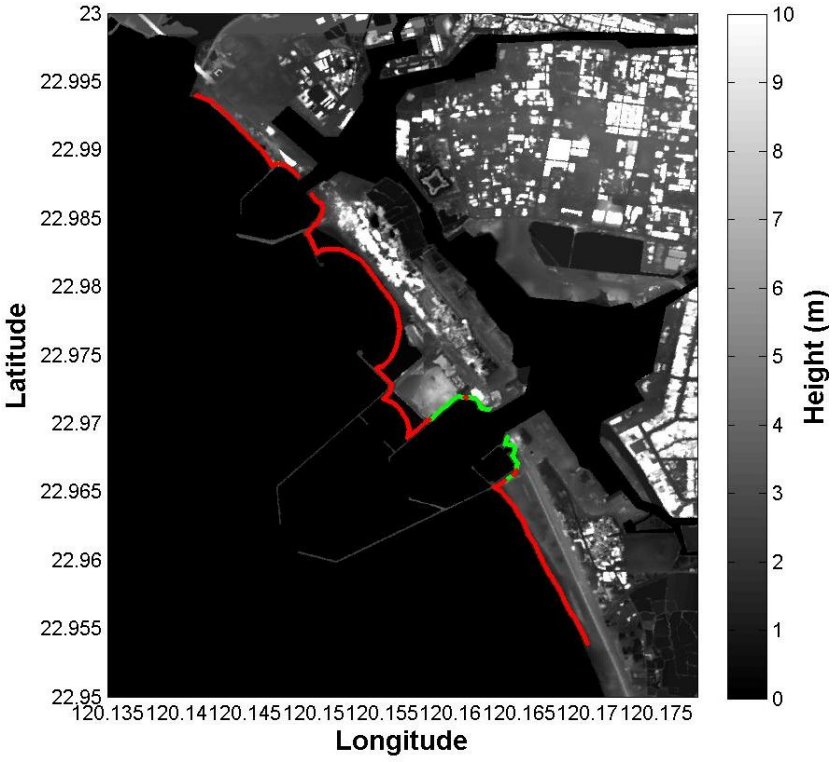
圖 5.15 為安平港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位，綠色點位為表示離岸 50 公尺但高程未達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.3 及圖 5.16，入射波高只要大於 1 公尺就會有 60%以上的溢淹機率。



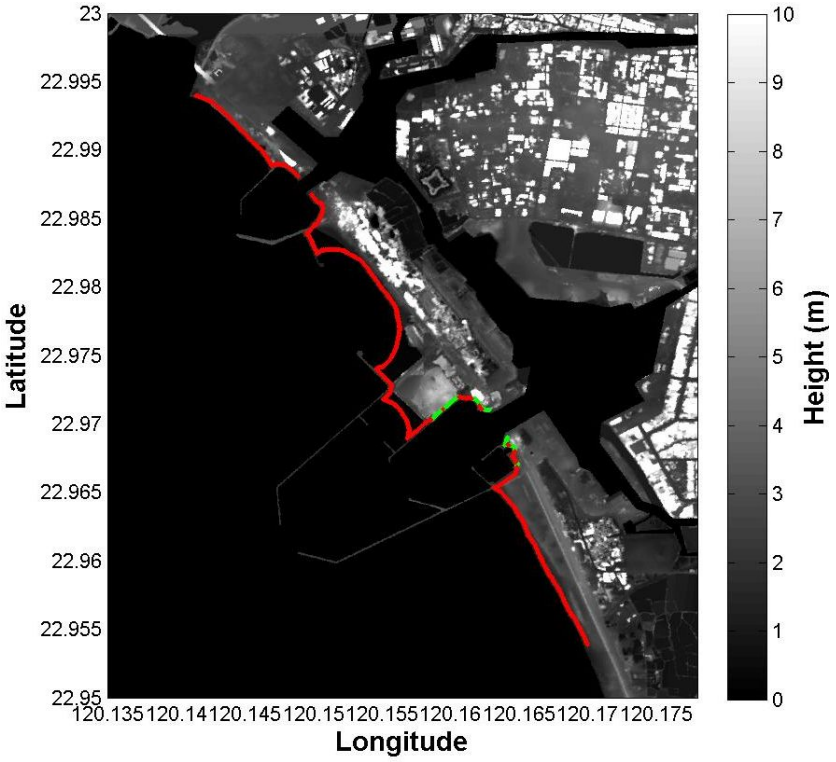
(a) 安平港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



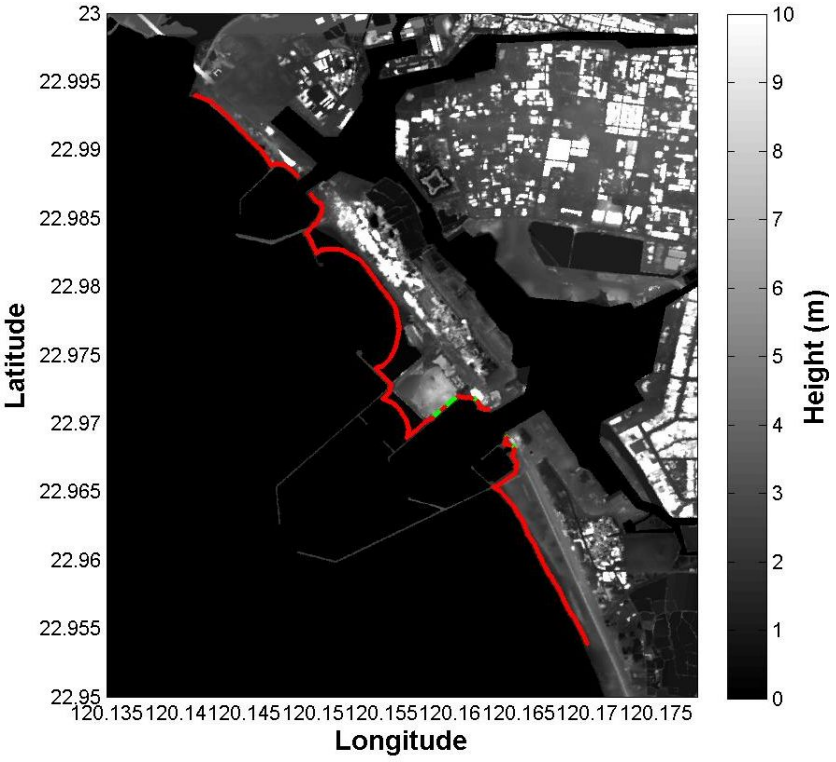
(b) 安平港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



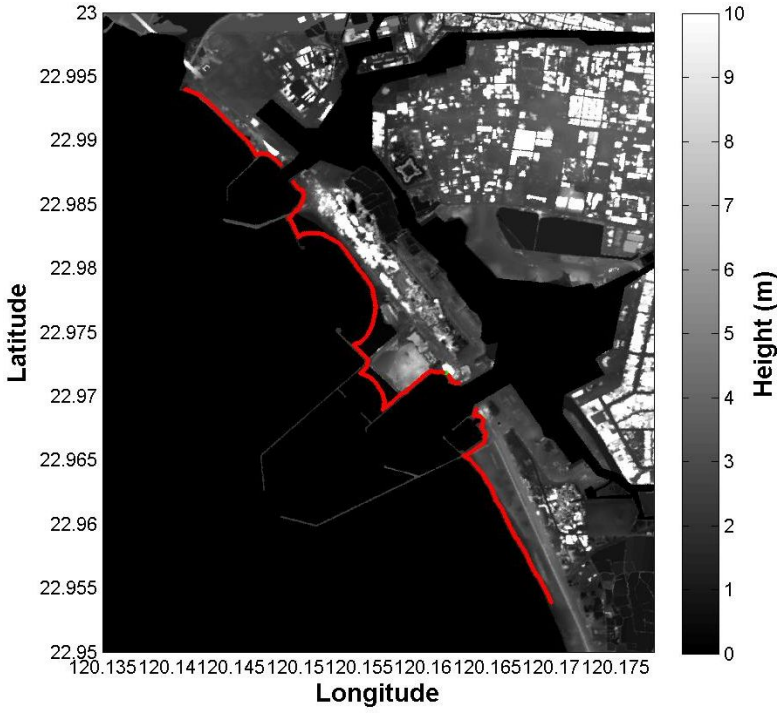
(c) 安平港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



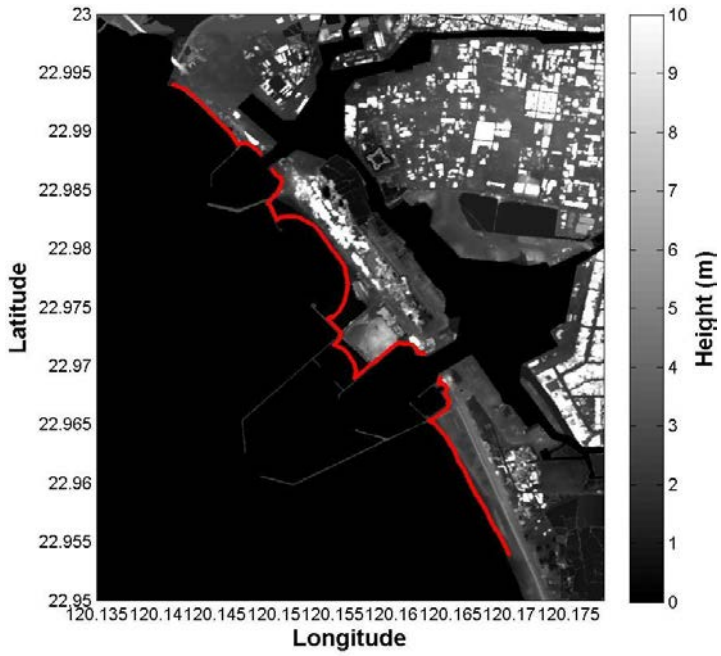
(d) 安平港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e)安平港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 安平港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 安平港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.15 安平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　安平港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	安平港		
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
0.5	1725	447	25.91%
1		1104	64.00%
2		1477	85.62%
3		1574	91.25%
4		1644	95.30%
6		1714	99.36%
10		1721	99.77%

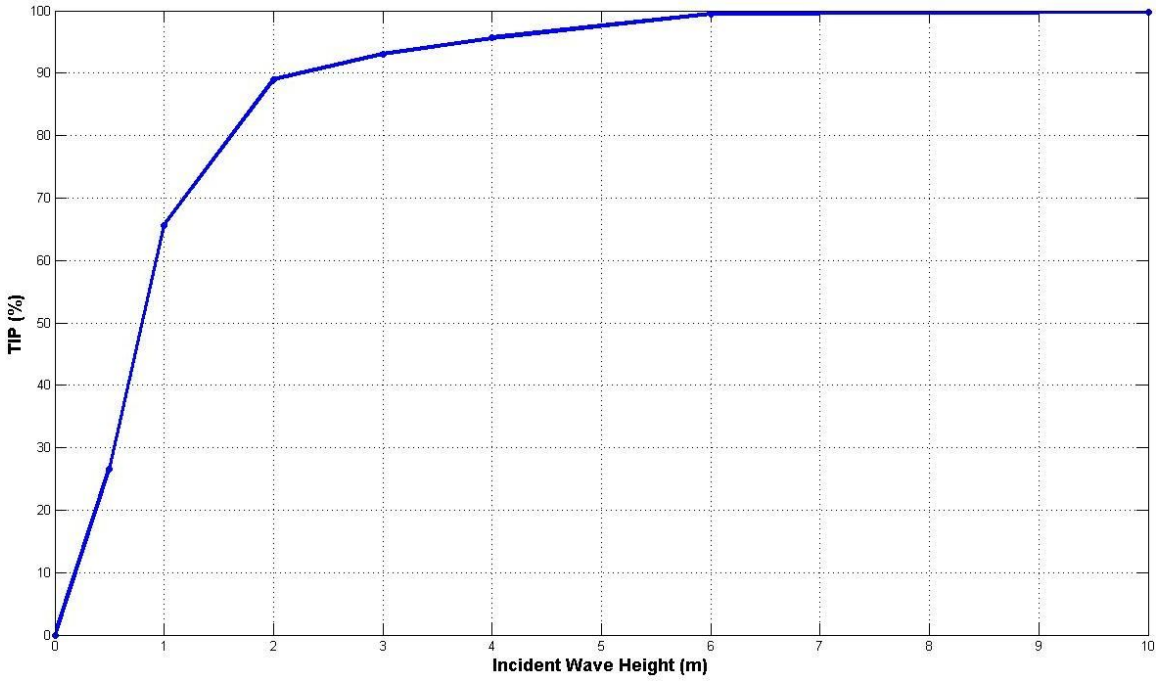


圖 5.16 安平港各入射波高下對應之溢淹機率圖

安平港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.17；安平港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 15 公分；在地震矩規模 8.0 以上則最大波高可達 2 公尺；地震矩規模為 8.5 以上時，

最大波高值超過 4 公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對安平港口產生較大之外海波高。

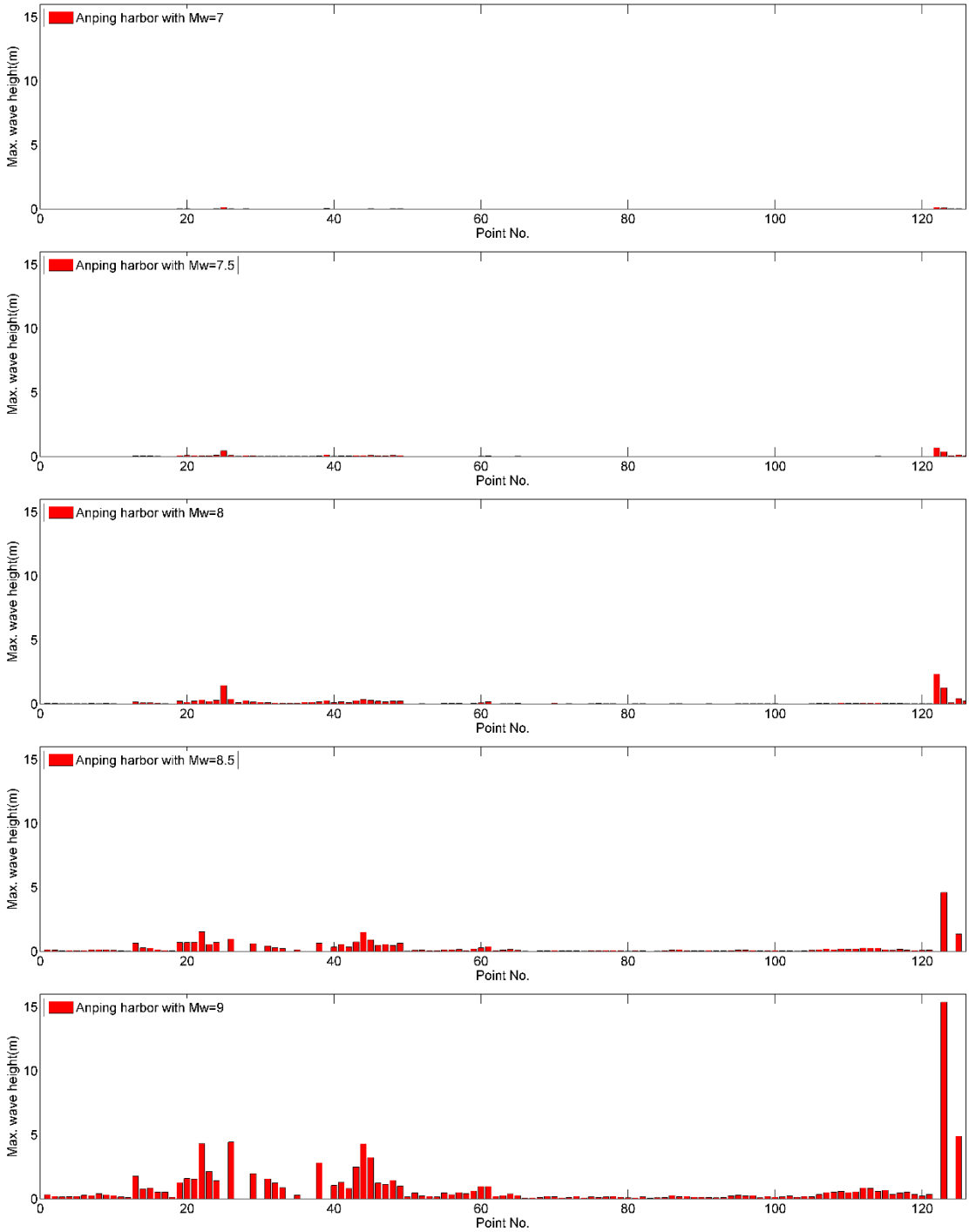


圖 5.17 安平港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

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 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，即使在地震矩規模超過 8.0 之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

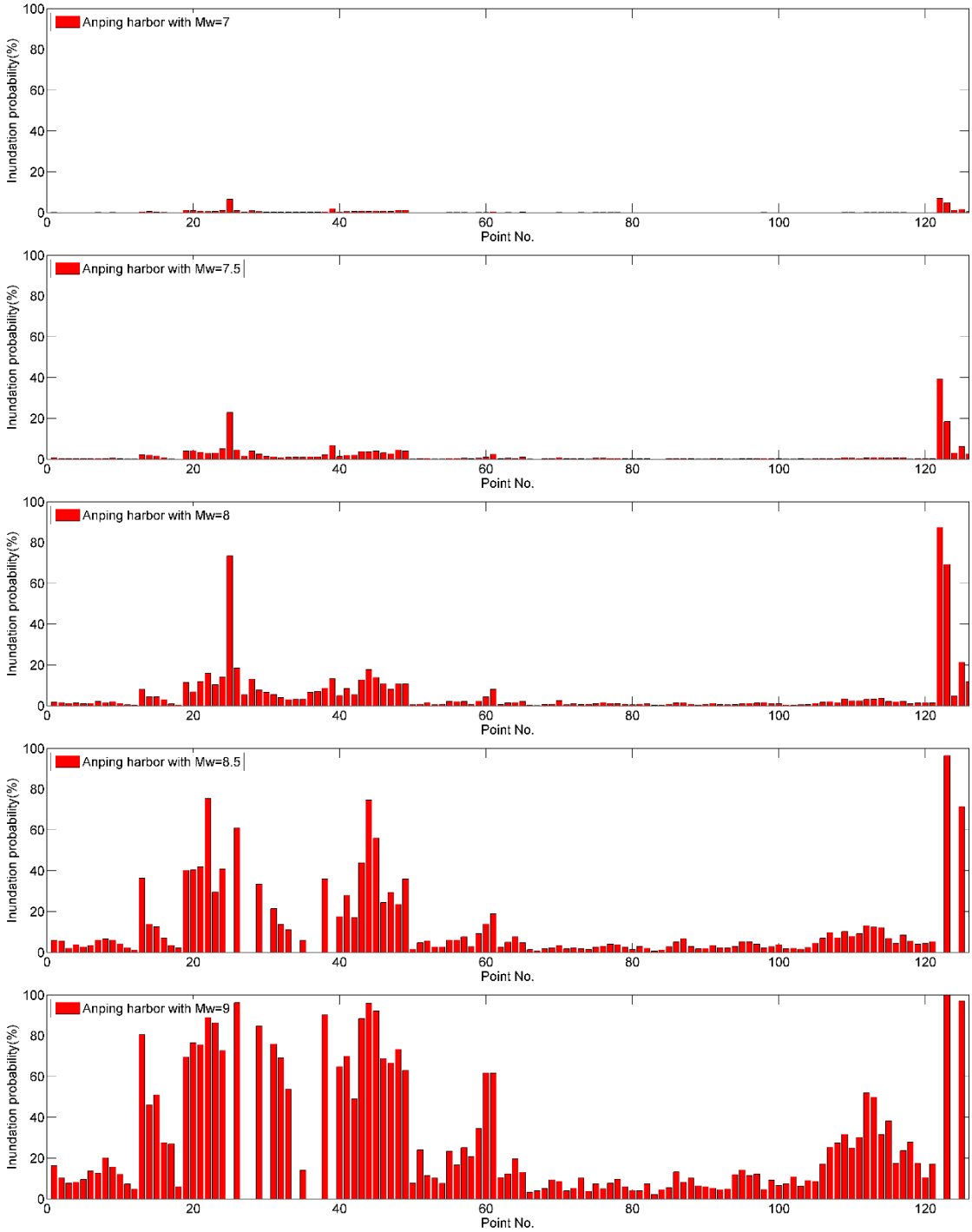


圖 5.18 安平港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

而利用 5.2.1 小節的歷史地震資料資料庫其地震解平均計算出之地震參數，將地震參數依附錄三設定為震央位址 120.8642 度，北緯

19.27471 度(編號 123)，利用此假設之參數計算出預測值，安平港預測最大波高水位為 0.6 公尺。(圖 5.19、圖 5.20)

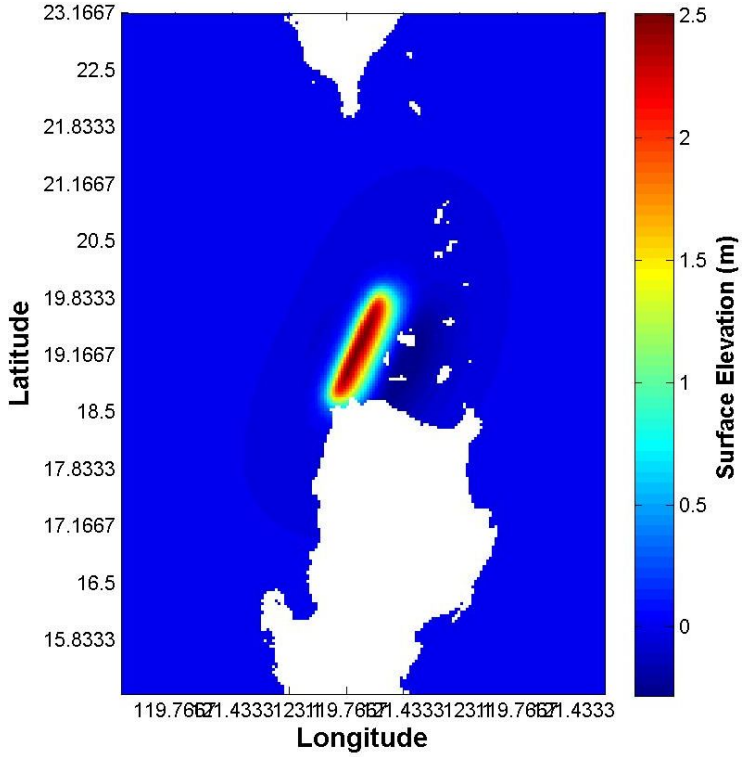


圖 5.19 馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位

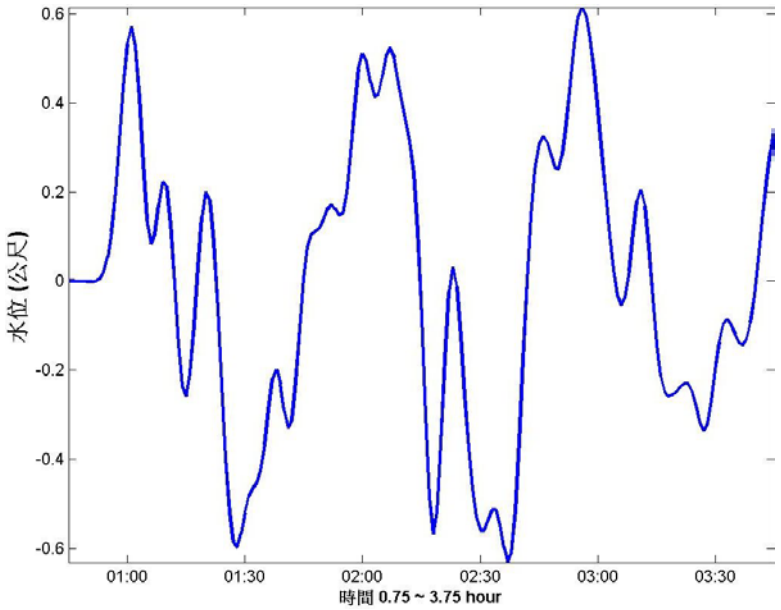


圖 5.20 安平港外海的預報水位

5.3.4.1 不同週期與入射波與溢淹機率

週期對於溢淹結果之影響已顯示於先前之成果報告中(陳等 2011)；在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，垂直入射臺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，從模擬的結果觀察 4 種週期的溢淹機率，由表 5.4 比較，其週期越長其溢淹機率有減小的趨勢，而原因為入射波與反射波互相影響關係，但差異度不大，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 5.21 為分別計算臺北港在 2 公尺波高不同週期入射波溢淹圖。於目前的研究中，在固定週期的條件下，不同波形中以高斯波產生之溯上結果較為嚴重。

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%

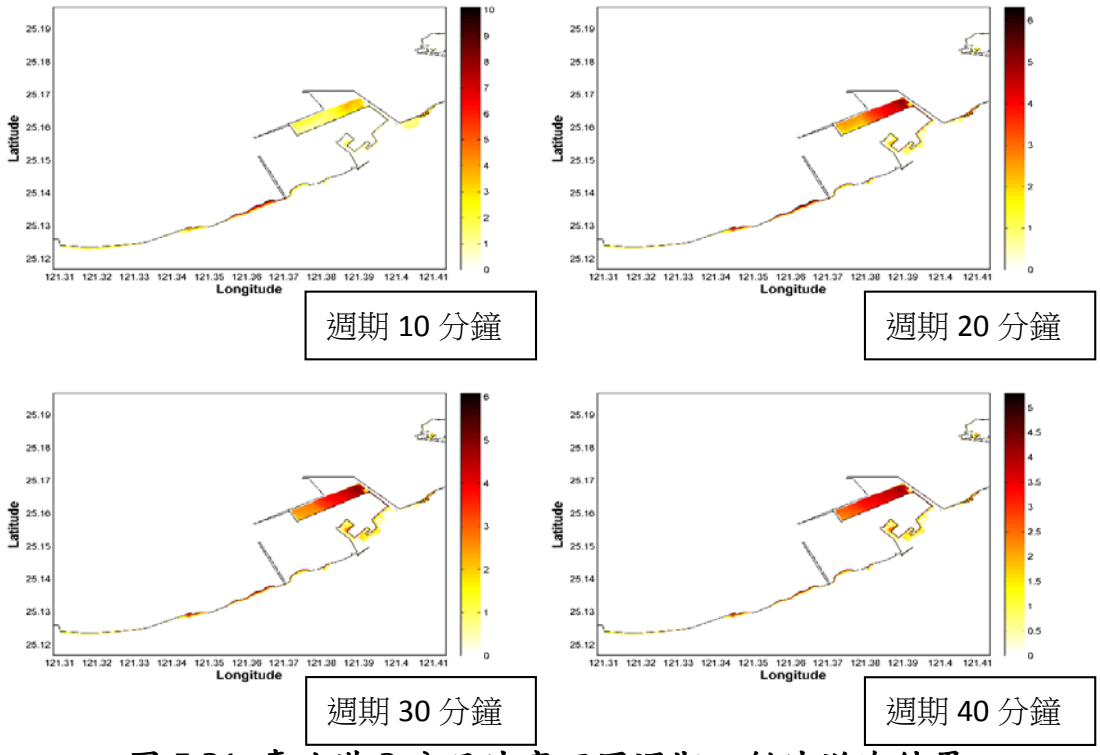


圖 5.21 臺北港 2 公尺波高不同週期入射波溢淹結果

5.3.5 海嘯地震且溢淹之機率

完成海嘯地震發生次數期望值之評估(圖 5.22(a)、(b))、海嘯對安平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，加總各分量即得安平港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率，如圖 5.23(a)、(b)；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」。評估結果為安平港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 9.84%，100 年為 19.43%。本研究並結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.24。

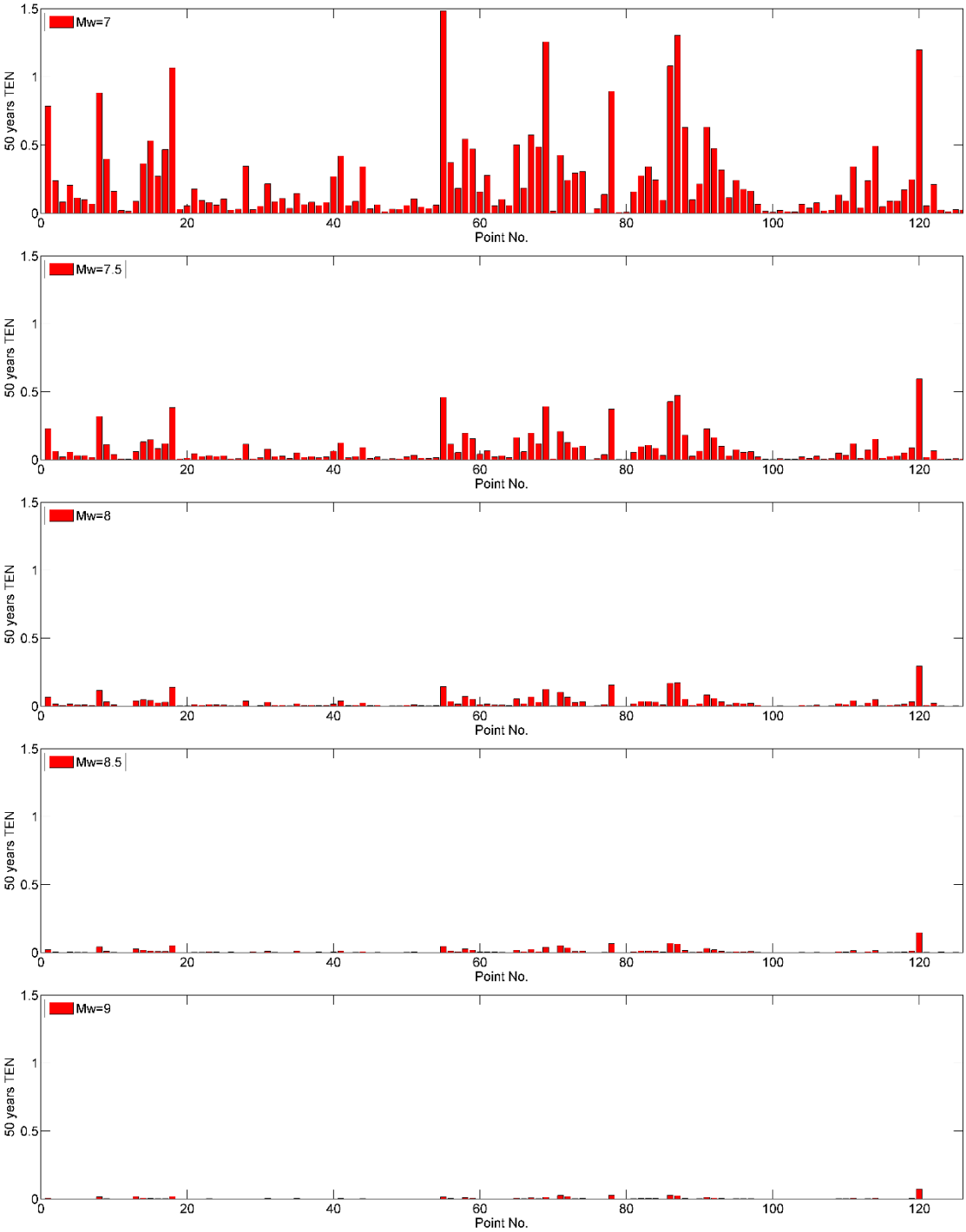


圖 5.22(a)　50 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

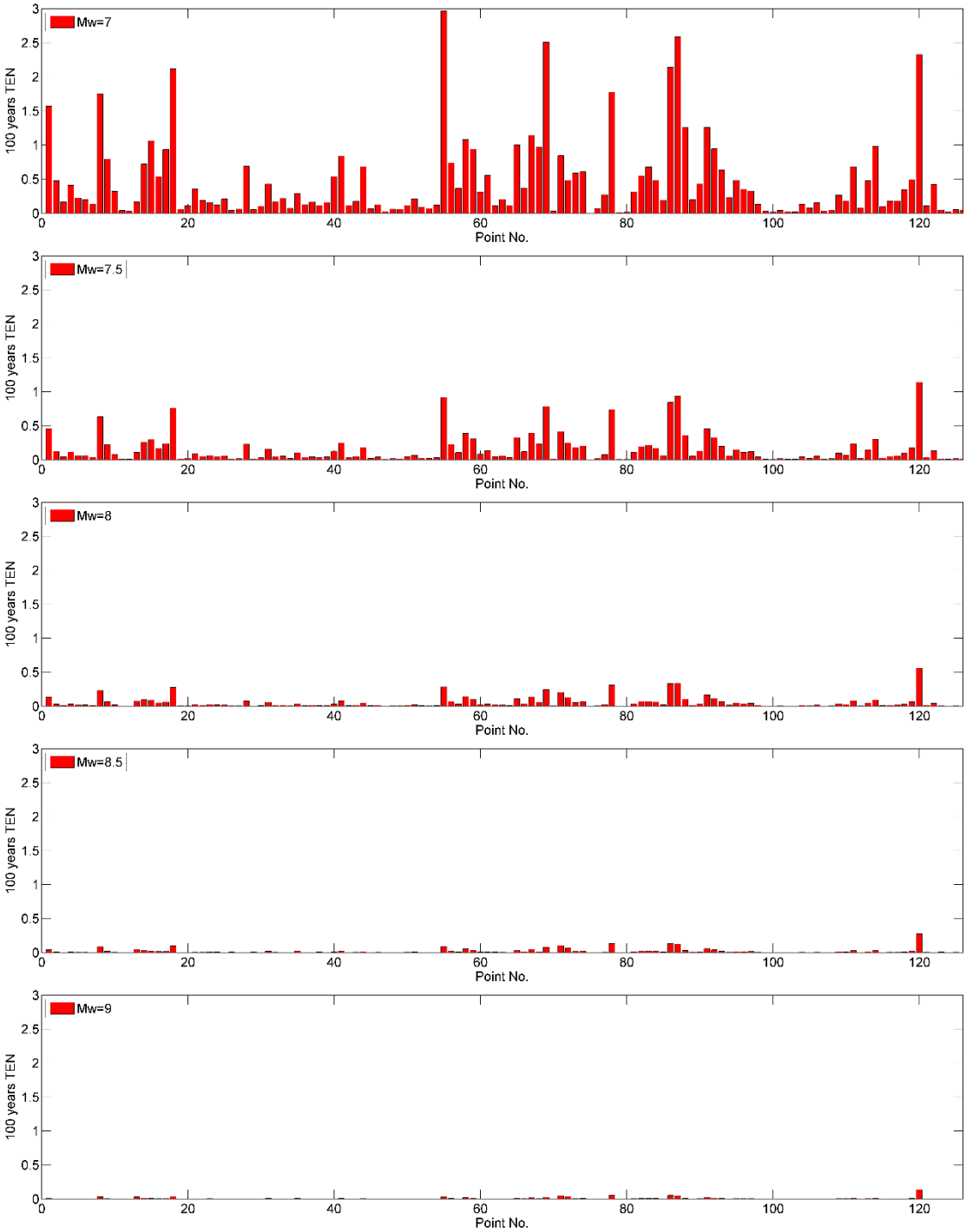


圖 5.22(b)　100 年海嘯地震發生次數之期望值(TEN)

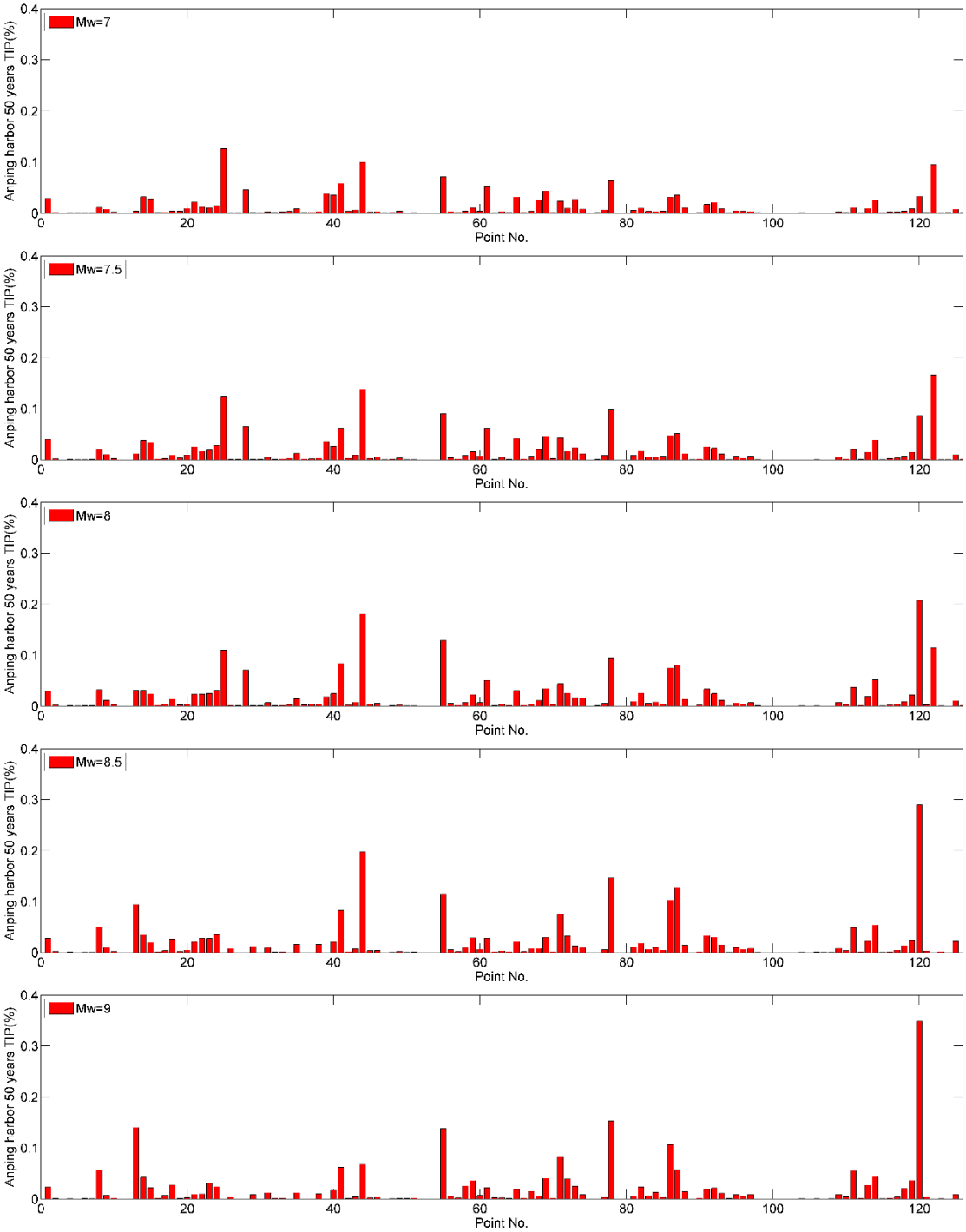


圖 5.23(a)　安平港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

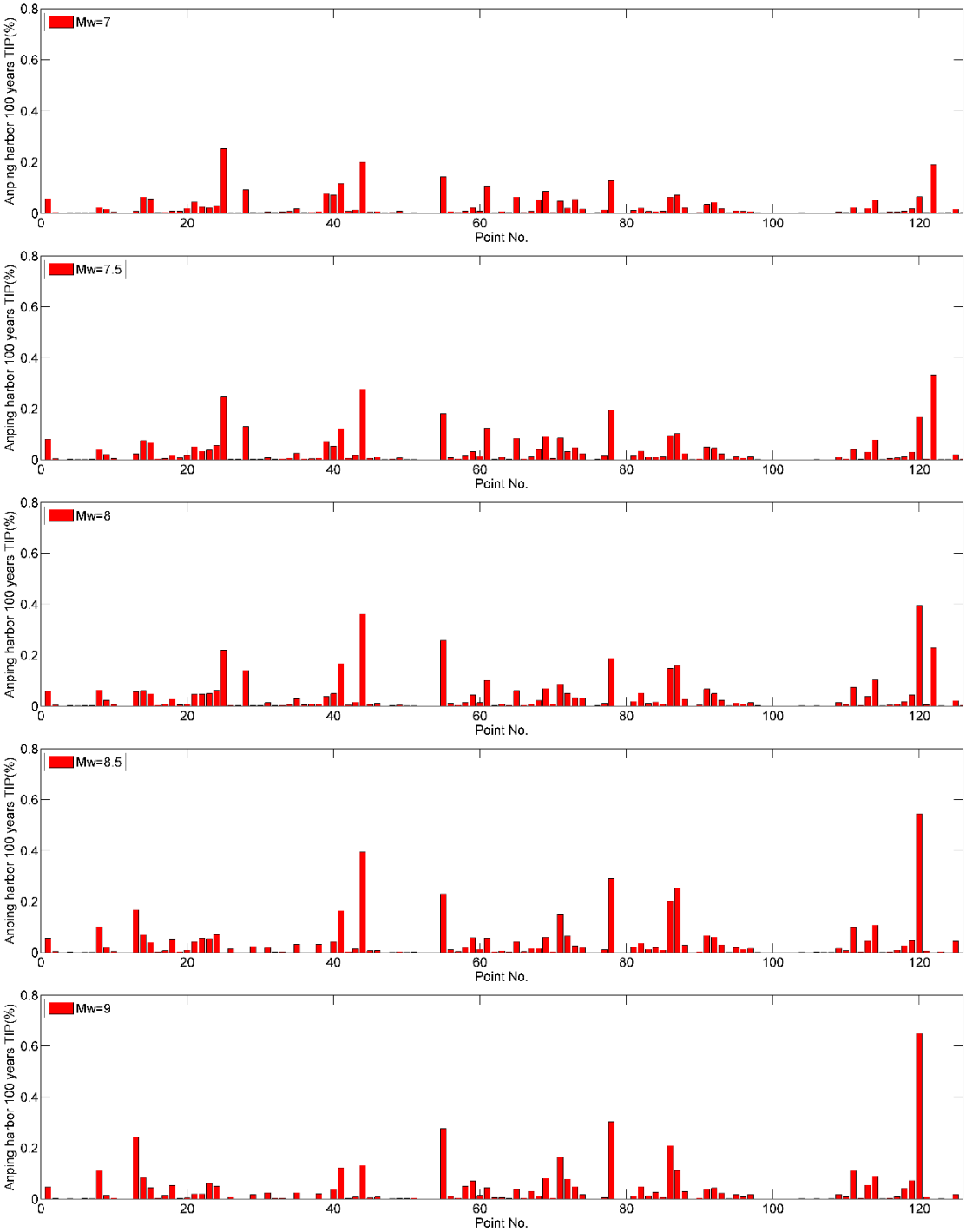
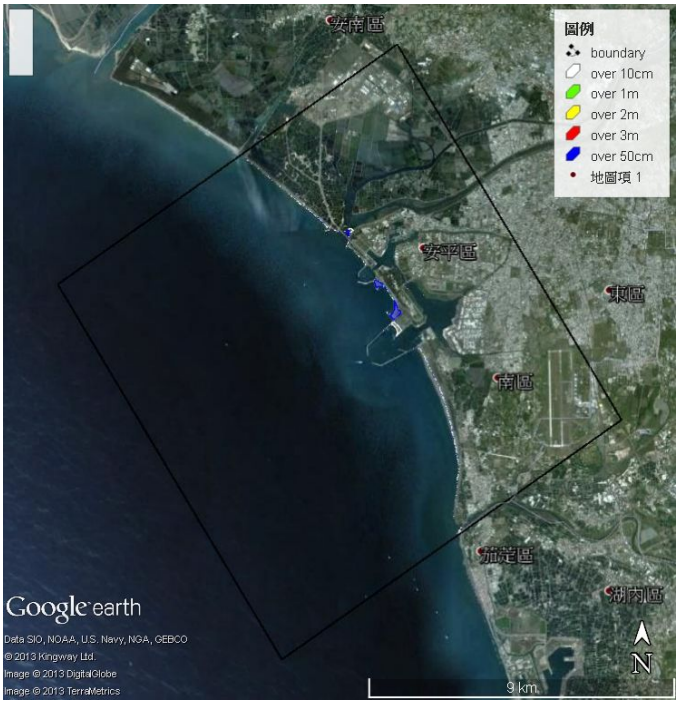
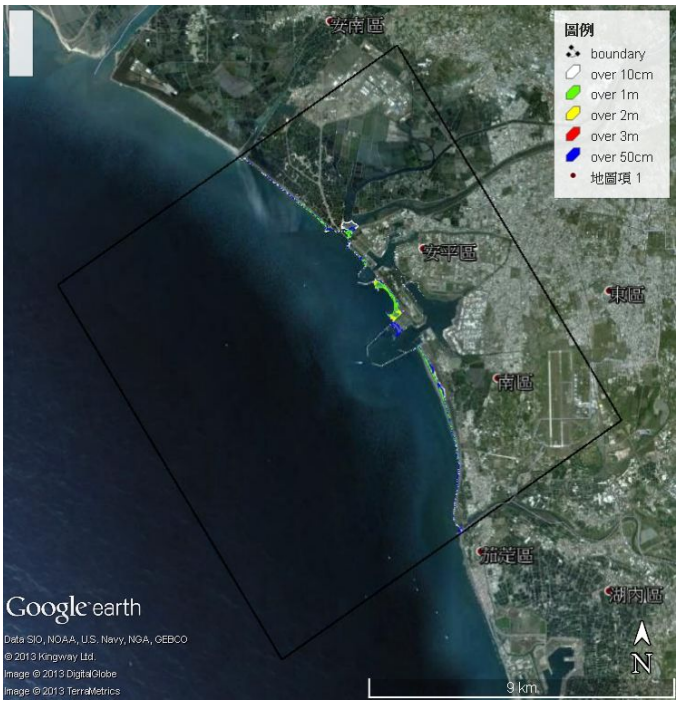


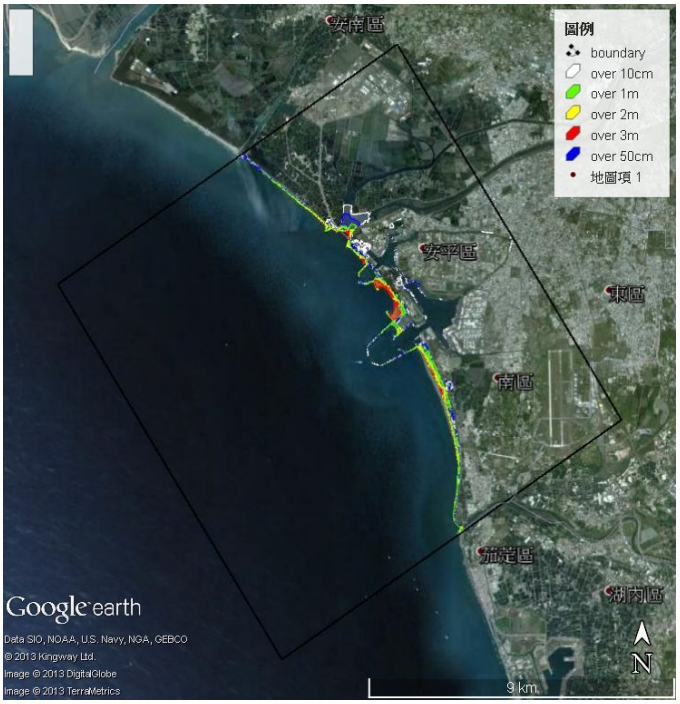
圖 5.23(b)　安平港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)



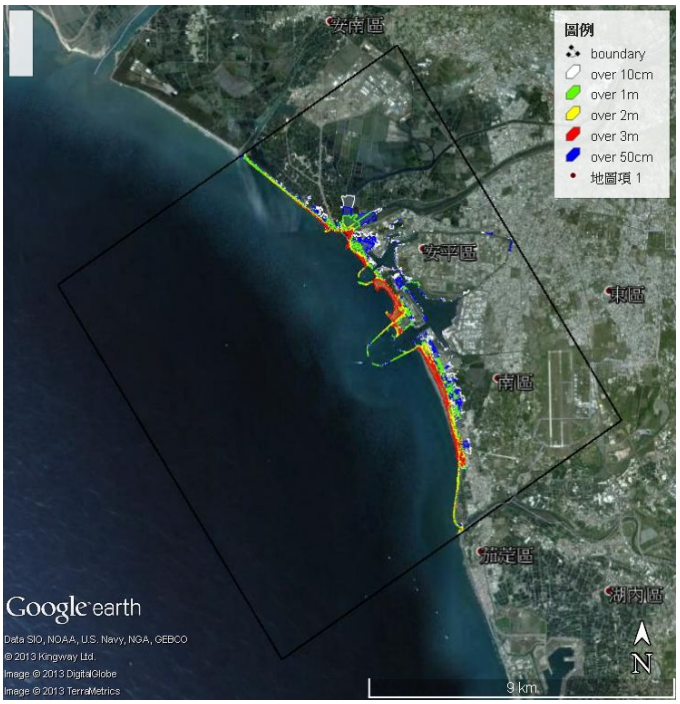
(a) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺**



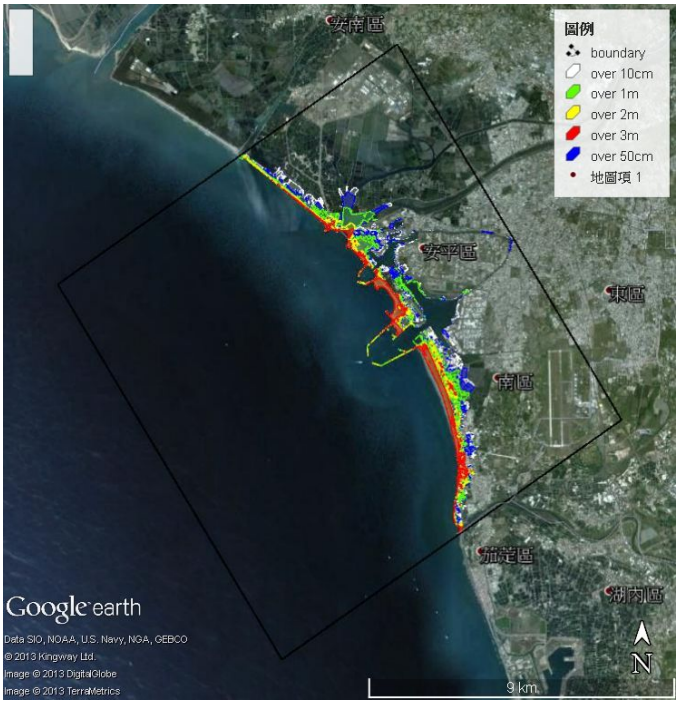
(b) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺**



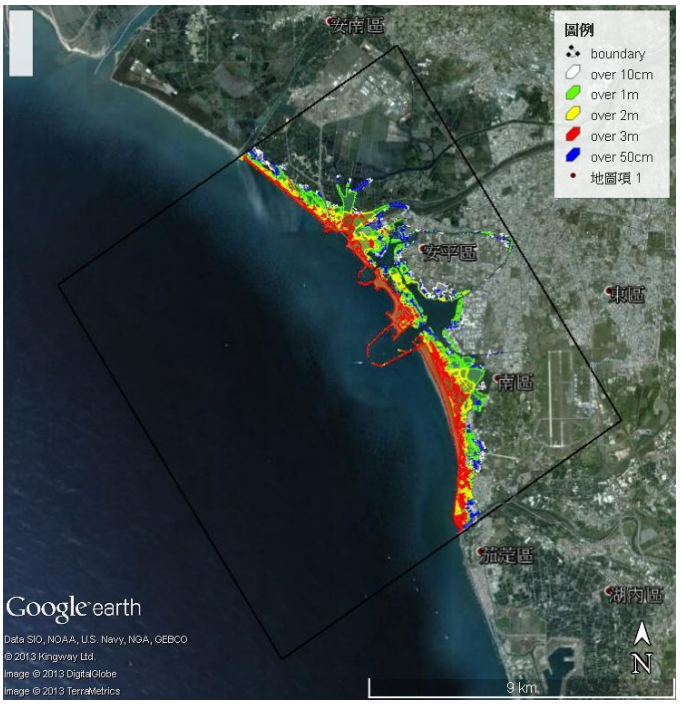
(c) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺**



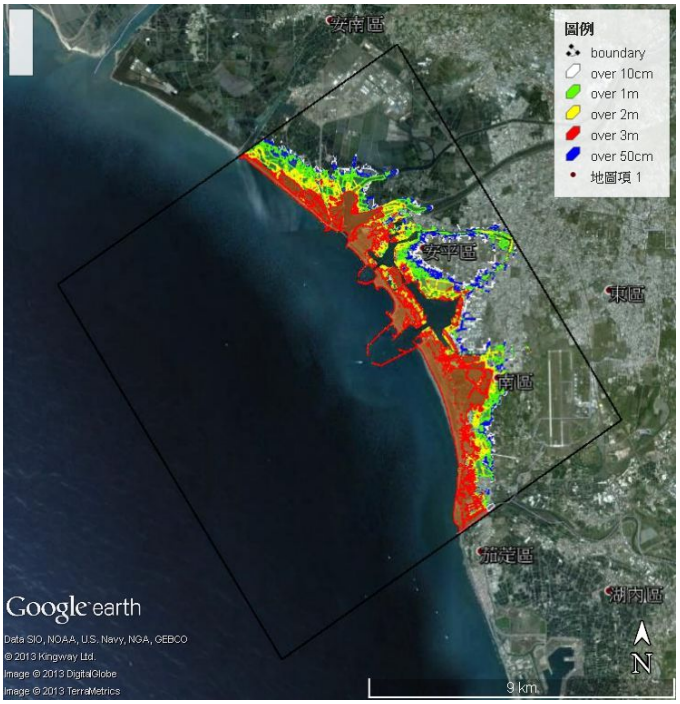
(d) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺**



(e) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺**



(f) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺**



(g) **安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺**

圖 5.24　安平港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高：(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

5.4 高雄港之溢淹模擬

5.4.1 數值地形

圖 5.25 為高雄港之陸域數值地形。海域地形則採用海科中心網格間距為 500 公尺之水深資料，並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 5.26 為海陸域整合後之數值地形檔。

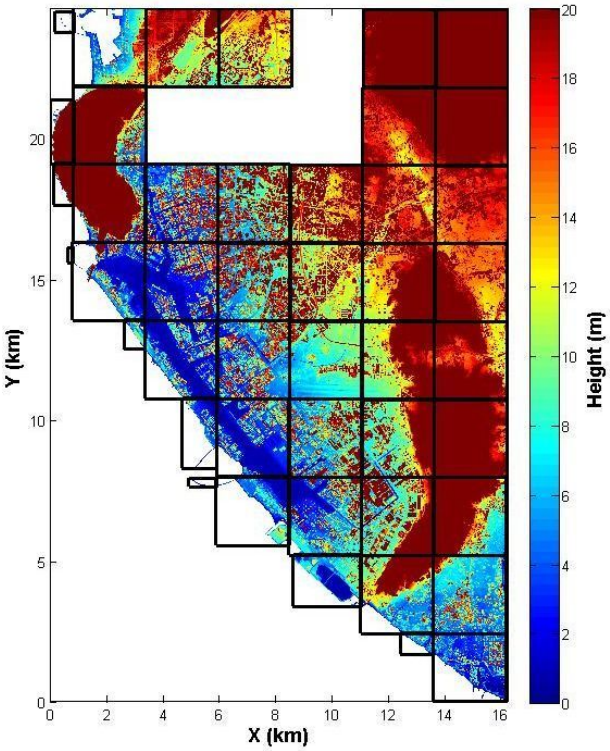


圖 5.25　高雄港 5m 解析度數值地形檔

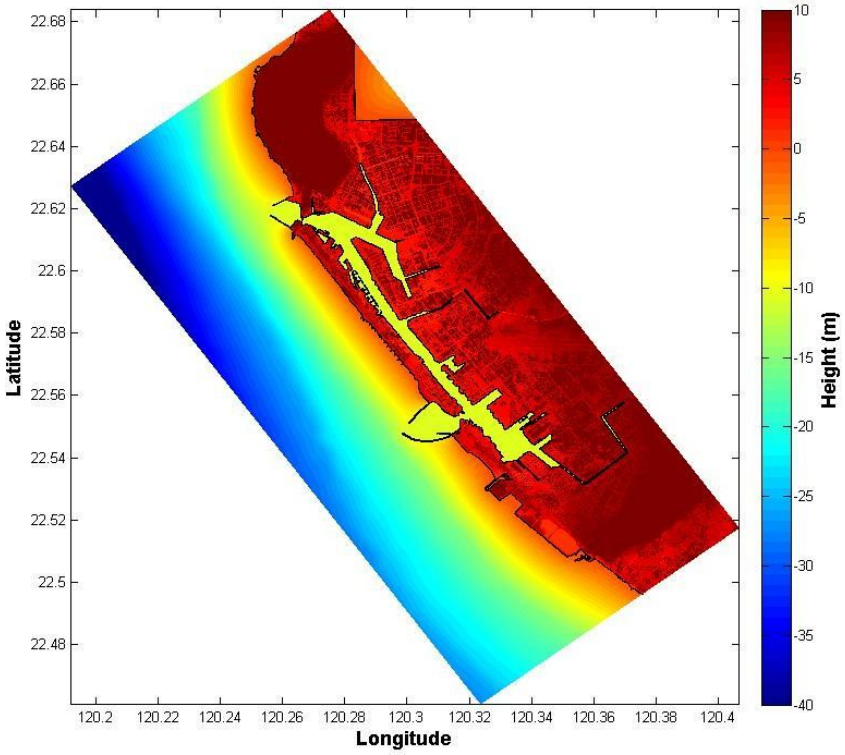
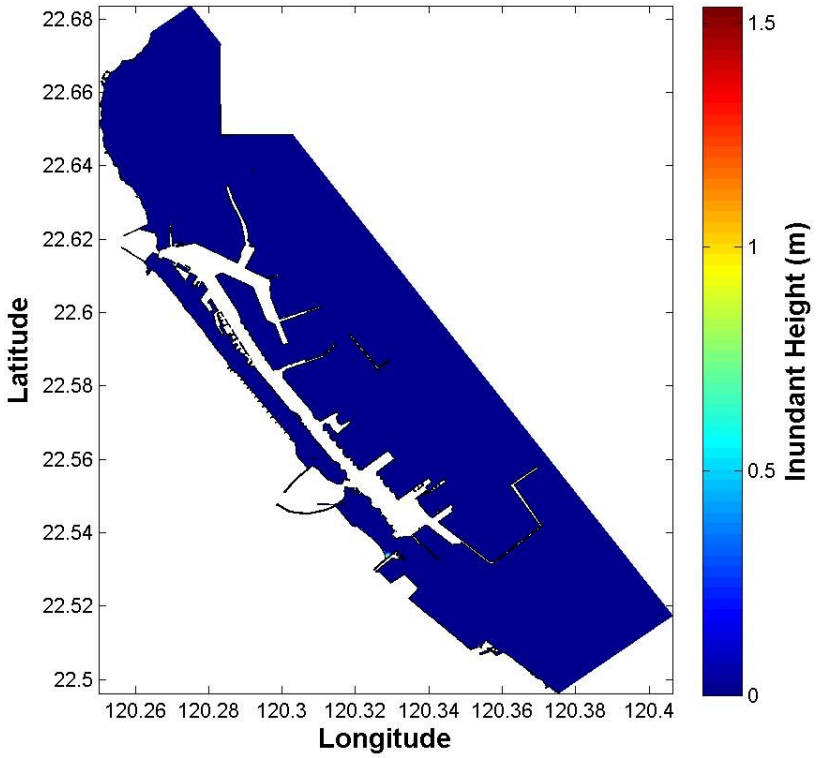


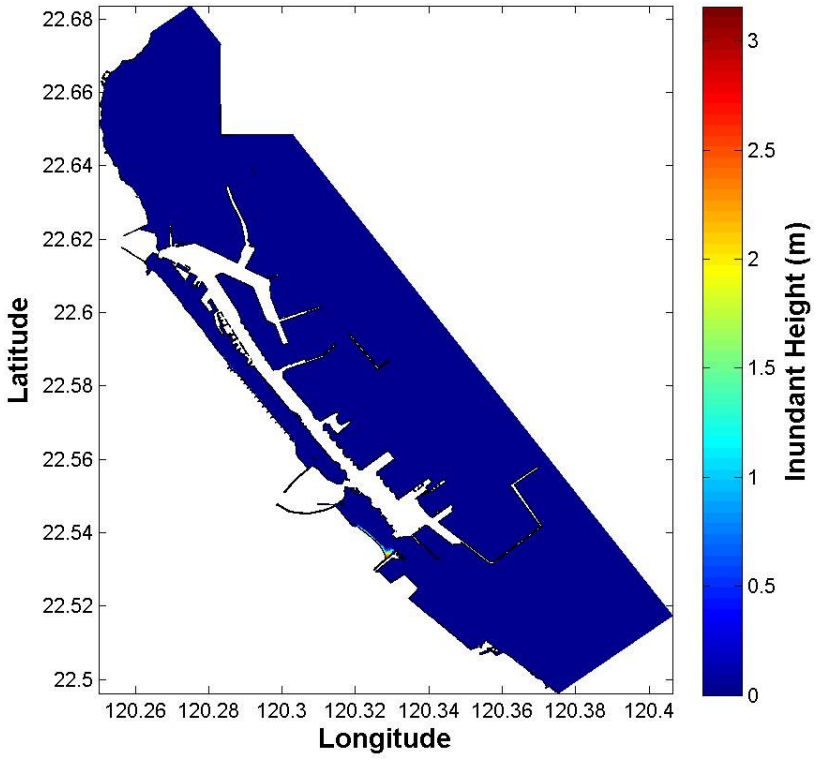
圖 5.26　高雄港整合海陸域後之數值地形檔

5.4.2 高雄港之模擬結果

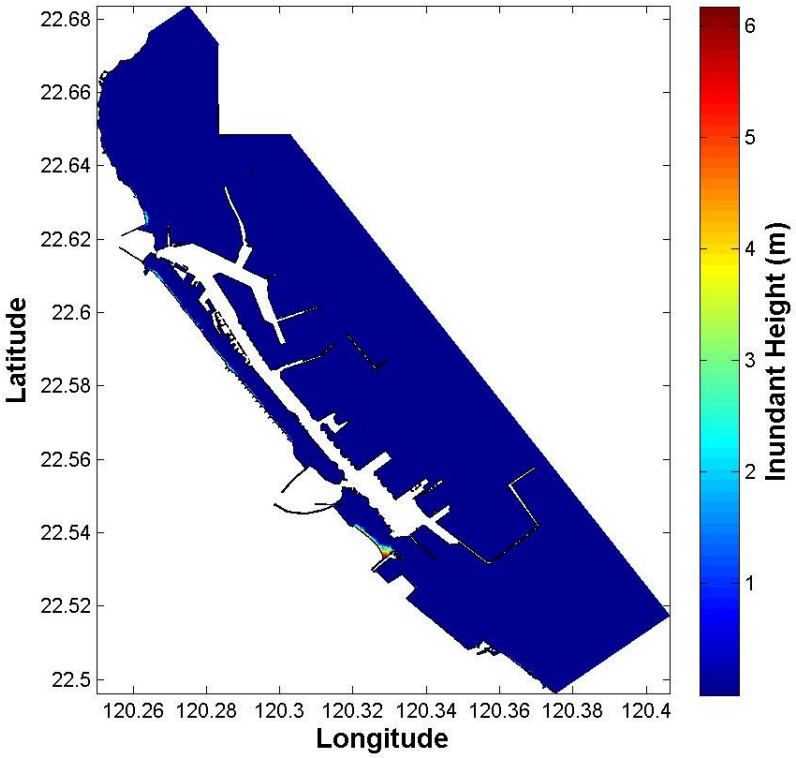
海嘯波模擬採用 5.3.2 小節所述之方式(如圖 5.12)為入射波，以此波形在模式地形邊界上入射，模擬此情境下陸地之溢淹狀況。圖 5.27(a)~(g)為高雄港在各種不同高斯波入射波高下之溢淹圖。在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹區域及溢淹高程分佈；分析顯示，在入射波高 2 公尺以下，溢淹範圍侷限於旗津堤外之沙洲。當 3 公尺之入射波高時，旗津區汕頭已有 50 公分的溢淹高程，而入射波高超過 4 公尺時，旗津區市區已有大範圍超過 50 公分的溢淹高程；在港內上下之溢淹高程也會提高至 6 公尺左右(入射波高為 6 公尺以上時)。



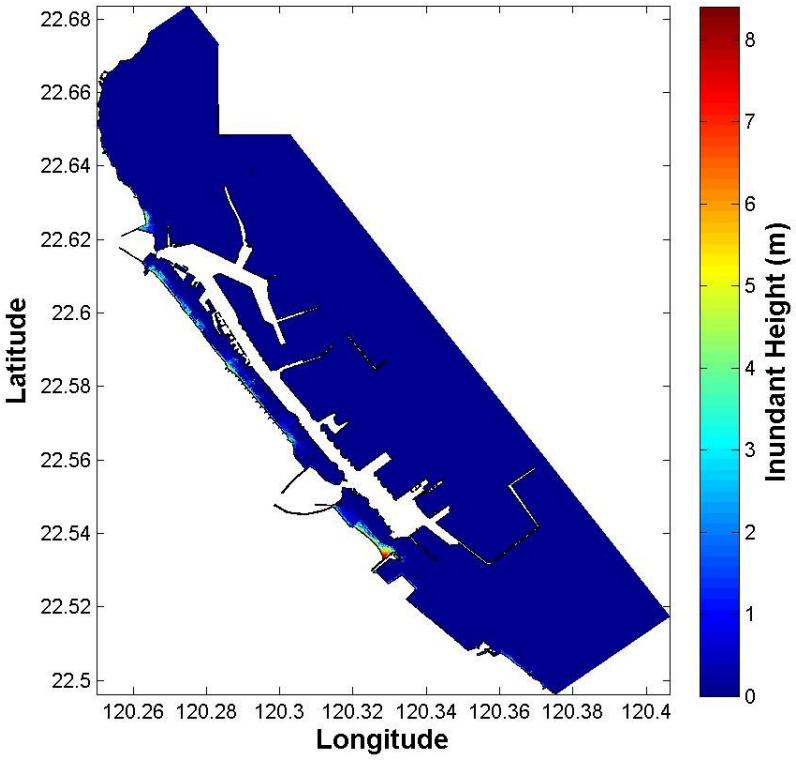
(a) 高雄港入射波高為 0.5 公尺之溢淹圖



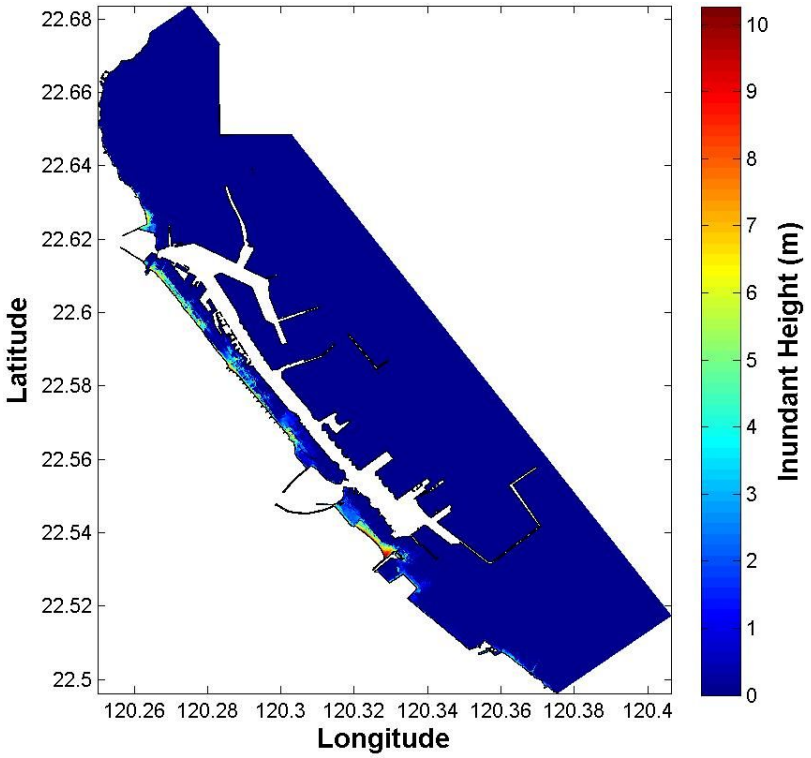
(b) 高雄港入射波高為 1 公尺之溢淹圖



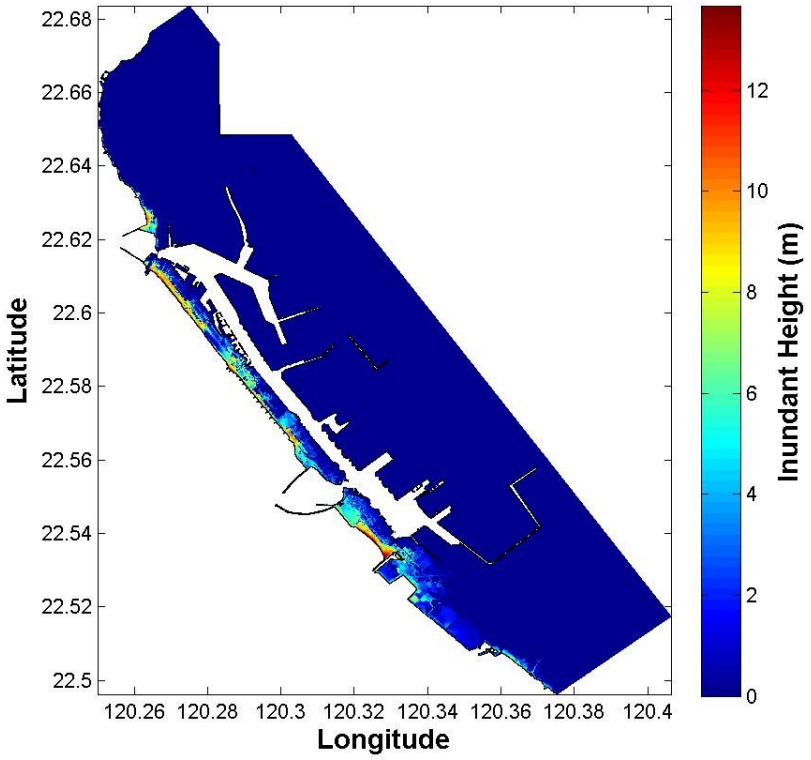
(c) 高雄港入射波高為 2 公尺之溢淹圖



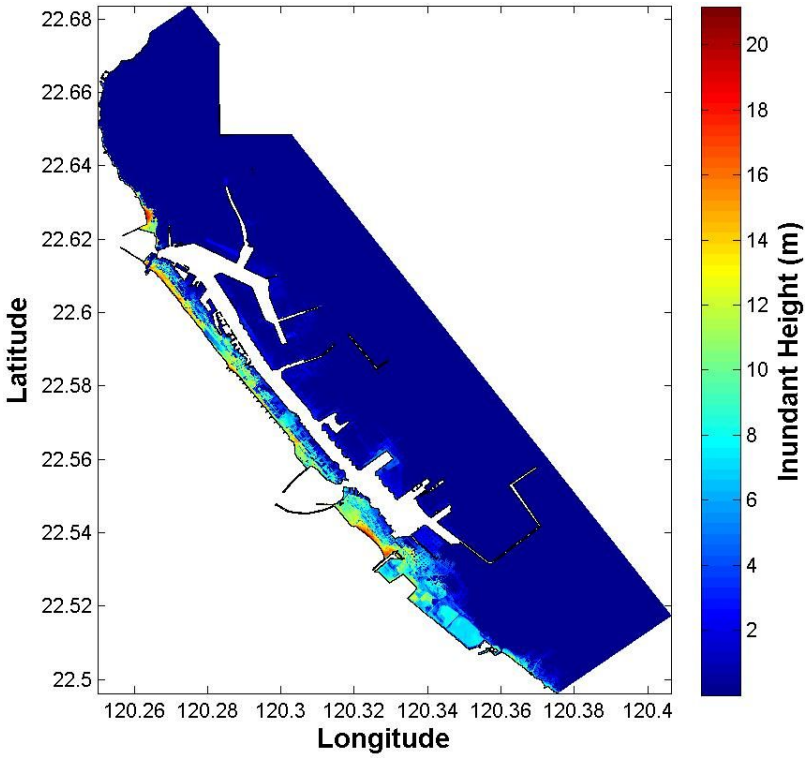
(d) 高雄港入射波高為 3 公尺之溢淹圖



(e) 高雄港入射波高為 4 公尺時之溢淹圖



(f) 高雄港入射波高為 6 公尺時之溢淹圖

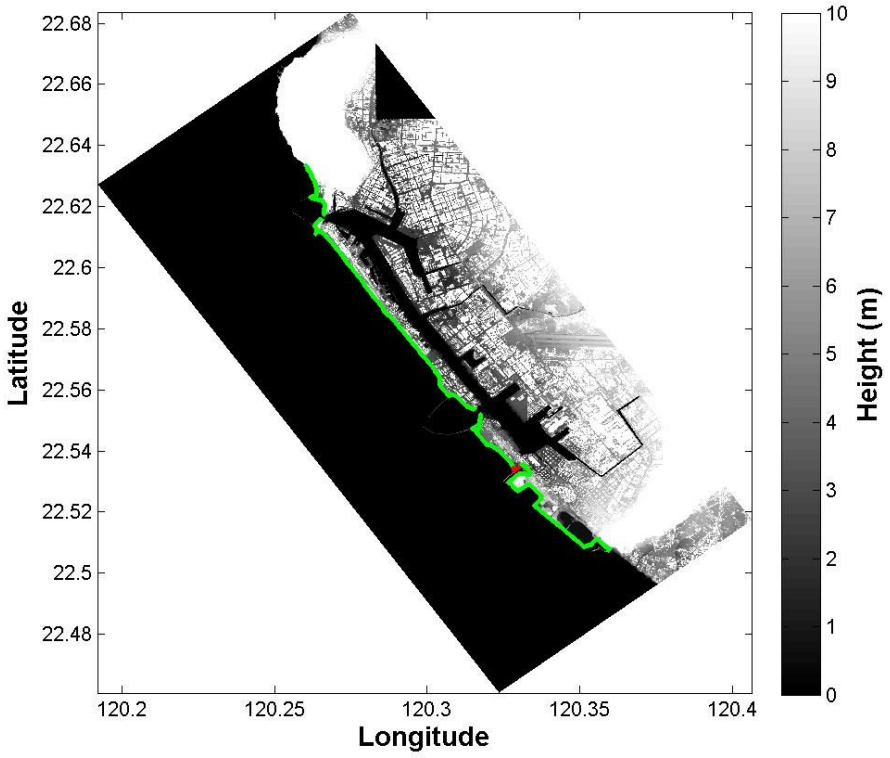


(g) 高雄港入射波高為 10 公尺時之溢淹圖

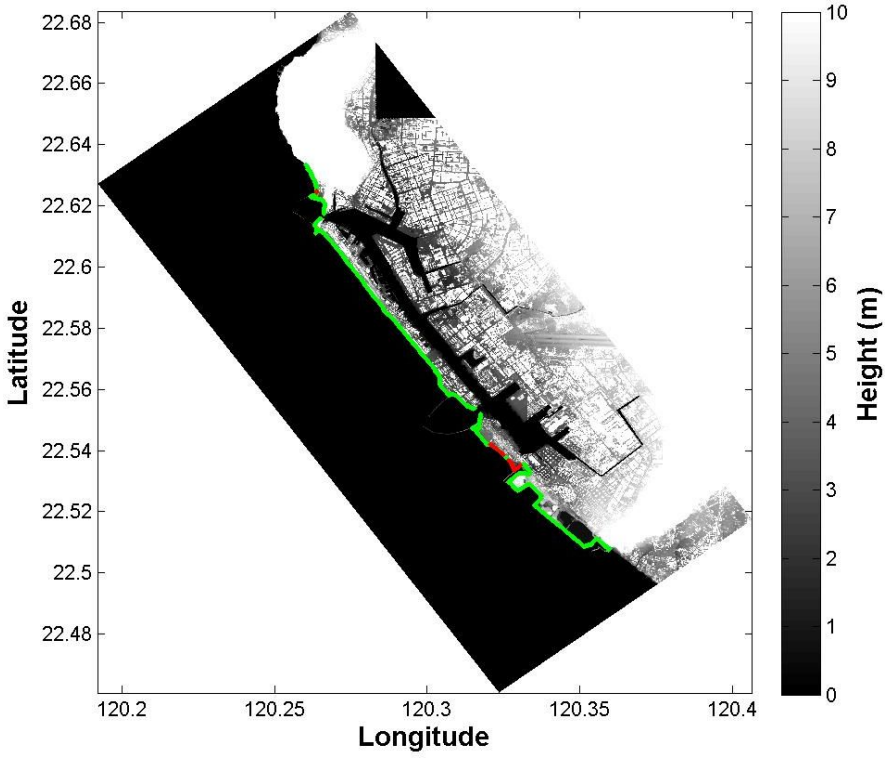
圖 5.27 高雄港之溢淹圖，入射波高：(a)0.5 公尺(b)1 公尺(c)2 公尺(d)3 公尺(e)4 公尺(f)6 公尺(g)10 公尺

5.4.3 高雄港之溢淹點位分佈及機率

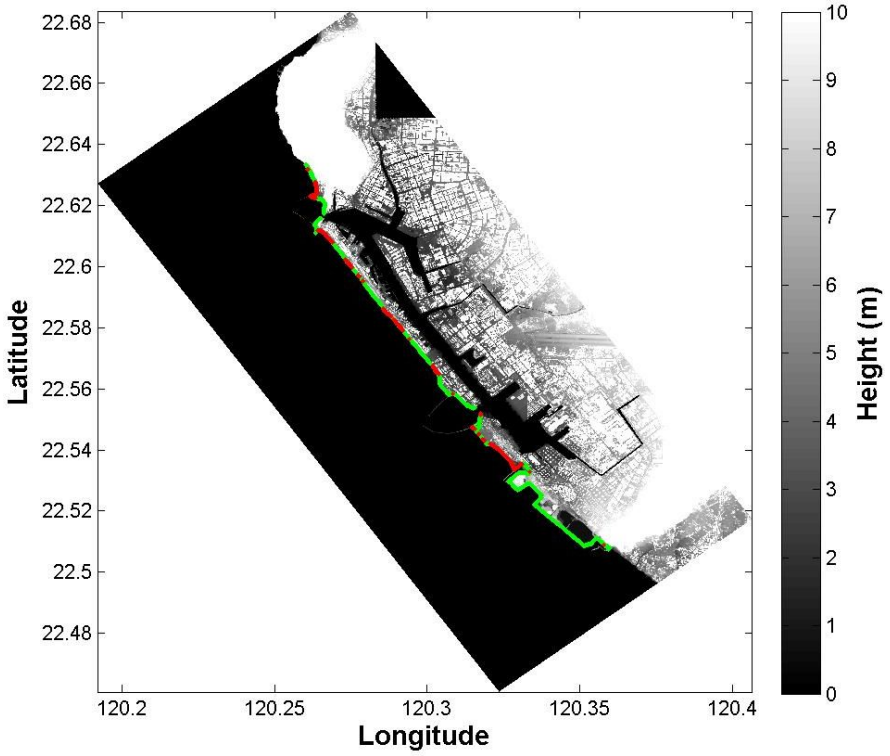
圖 5.28 為高雄港分別在入射波高 0.5~10 公尺時之溢淹點位分佈；紅色點表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點位。計算結果則列於表 5.5 及圖 5.29，入射波高只要大於 3 公尺就會有 50%以上的溢淹機率。



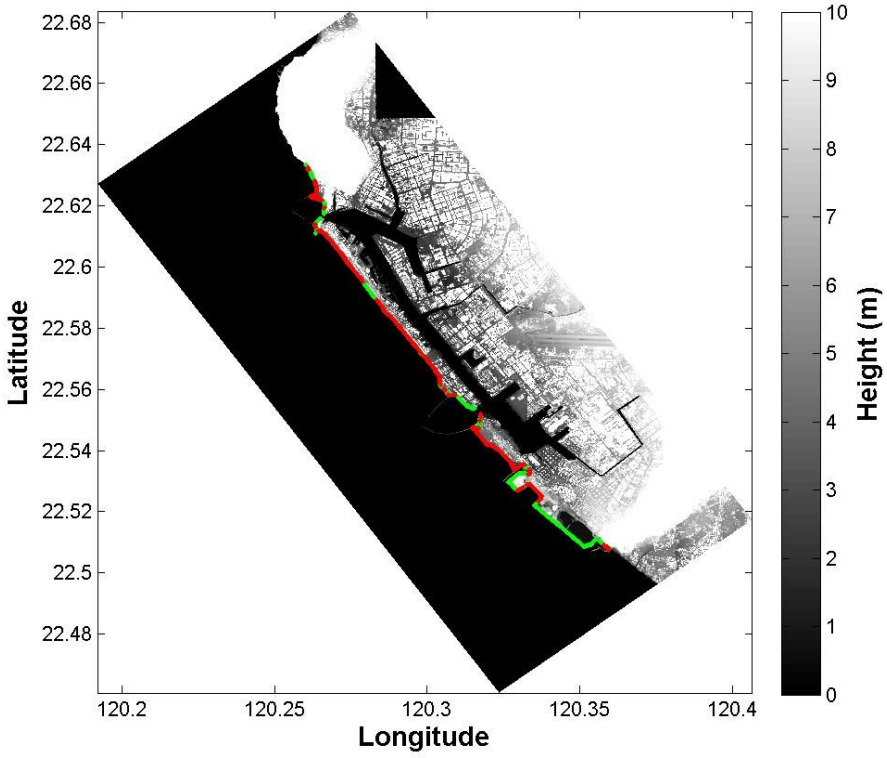
(a) 高雄港入射波高為 0.5 公尺時之溢淹點位分佈



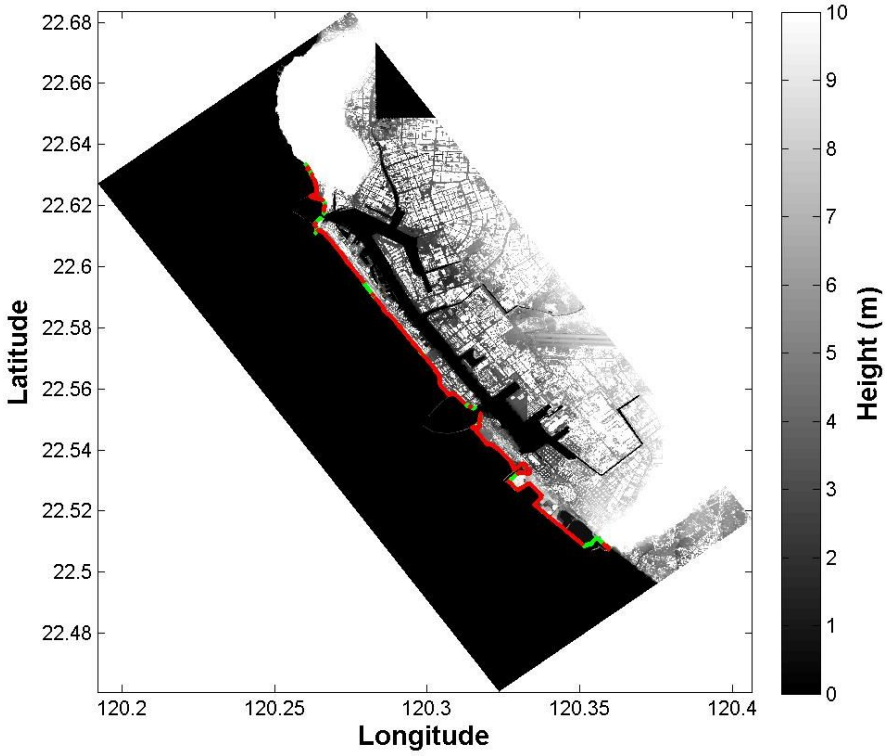
(b) 高雄港入射波高為 1 公尺時之溢淹點位分佈



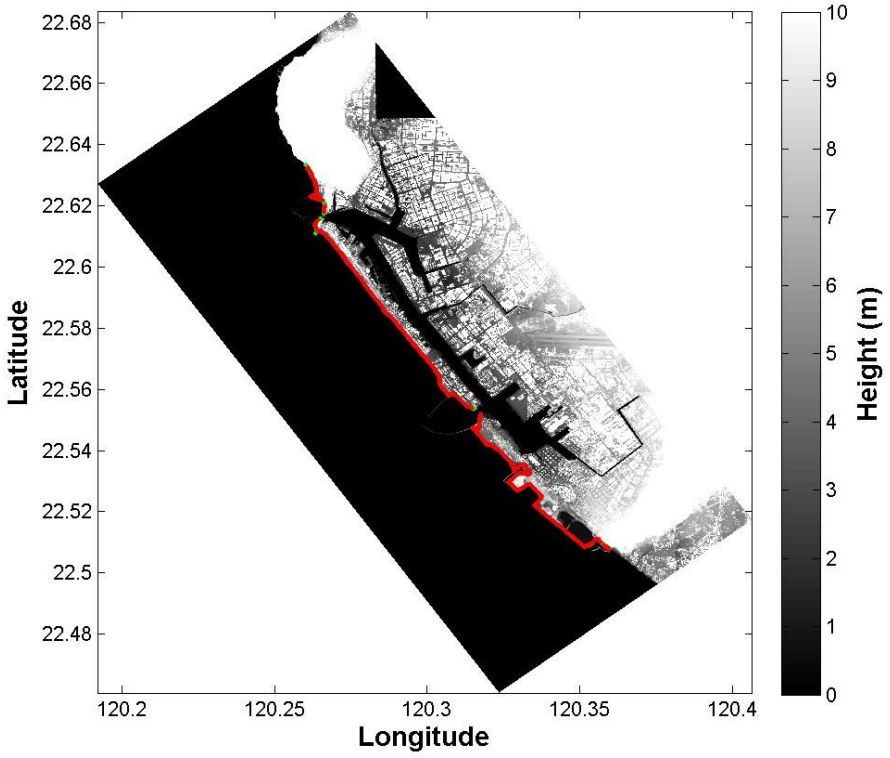
(c) 高雄港入射波高為 2 公尺時之溢淹點位分佈



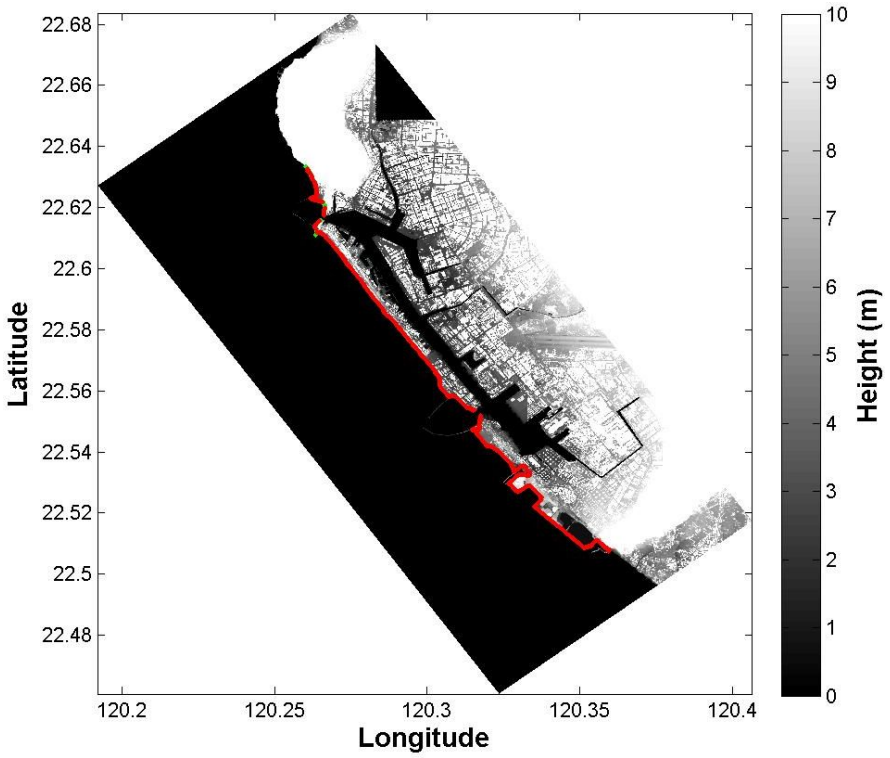
(d) 高雄港入射波高為 3 公尺時之溢淹點位分佈



(e) 高雄港入射波高為 4 公尺時之溢淹點位分佈



(f) 高雄港入射波高為 6 公尺時之溢淹點位分佈



(g) 高雄港入射波高為 10 公尺時之溢淹點位分佈

圖 5.28 高雄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 5.5　高雄港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	高雄港		
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
0.5	4165	64	1.54%
1		192	4.61%
2		836	20.07%
3		2163	51.93%
4		3169	76.09%
6		3864	92.77%
10		3994	95.89%

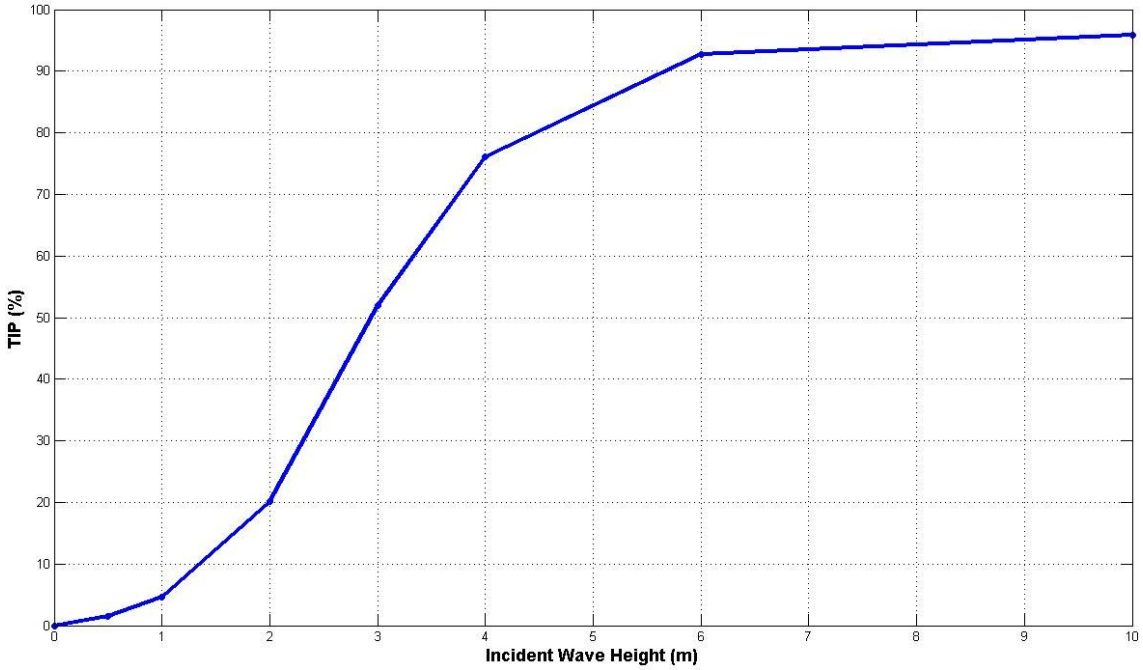


圖 5.29 高雄港各入射波高下對應之溢淹機率圖

高雄港在 126 個假設震央各地震矩規模下之最大波高分佈如圖 5.30；高雄港在地震矩規模 7.0 時，其最大波高值未超過 15 公分；在地震矩規模 8.0 以上則最大波高可達 1.5 公尺；地震矩規模為 8.5 以上時，最大波高值超過 3 公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對高雄港口產生較大之外海波高。

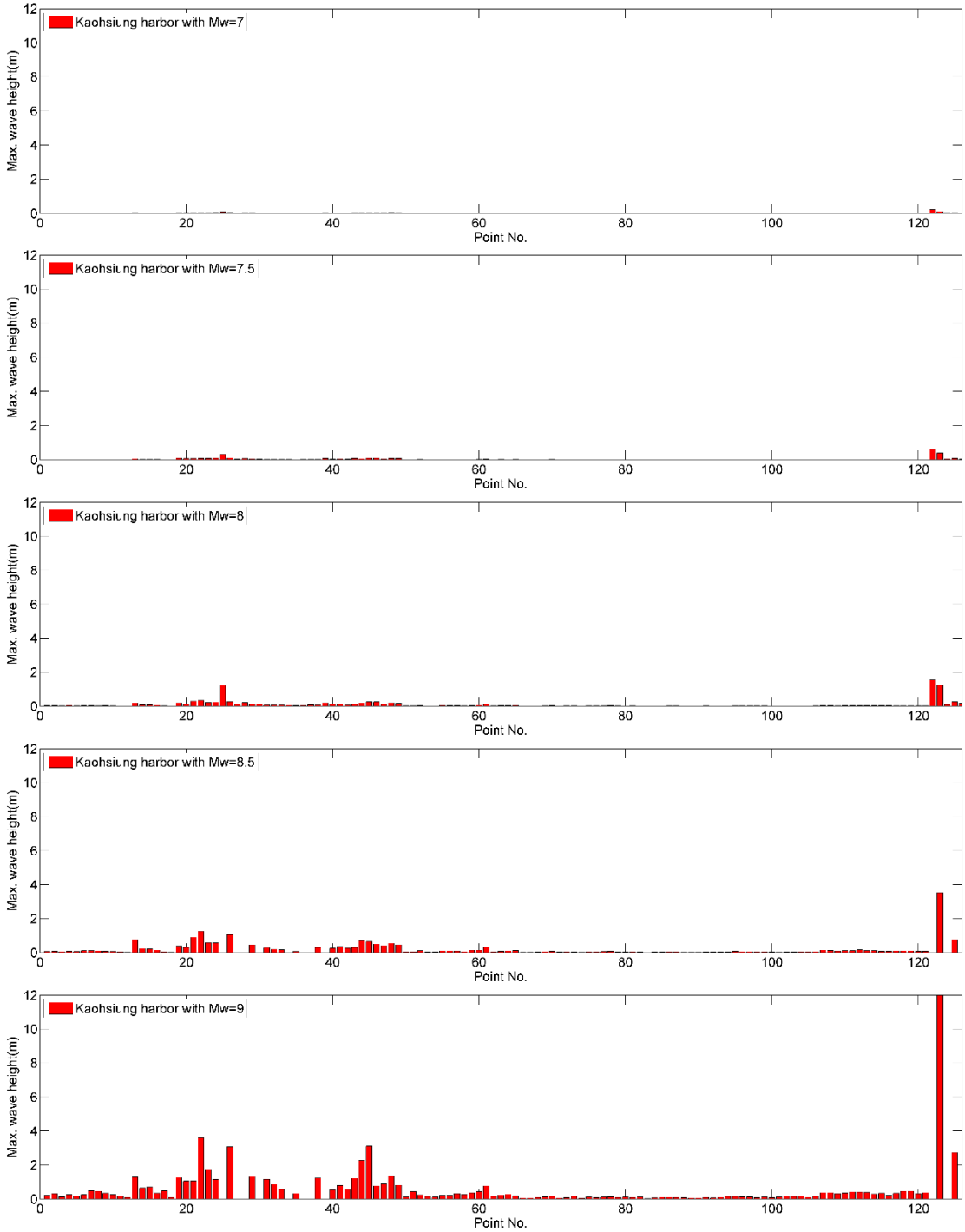


圖 5.30 高雄港在各種地震矩規模下之最大波高分佈

根據表 5.5 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 5.31 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，即使在馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)地震矩規模超過 8.0 之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

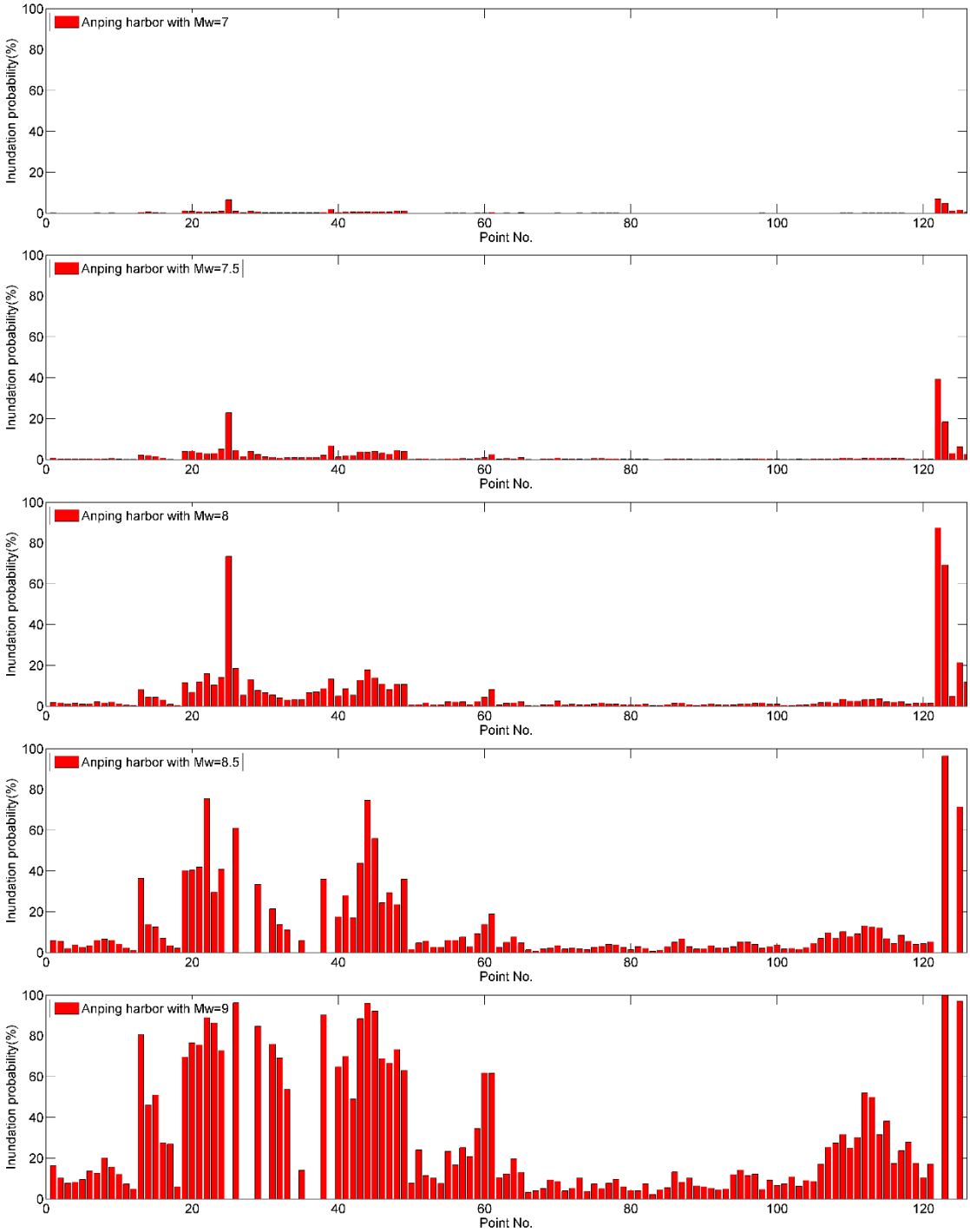


圖 5.31 高雄港在各種地震矩規模下之溢淹機率分佈

而利用 5.2.1 小節的歷史地震資料資料庫其地震解平均計算出之地震參數，將地震參數依附錄三(地震矩規模大於 8)設定為震央位址 120.7337 度，北緯 19.29939 度(編號 114)，利用此假設之參數計算出預測值，高雄港預測最大波高水位超過 8 公尺。(圖 5.32、圖 5.33)

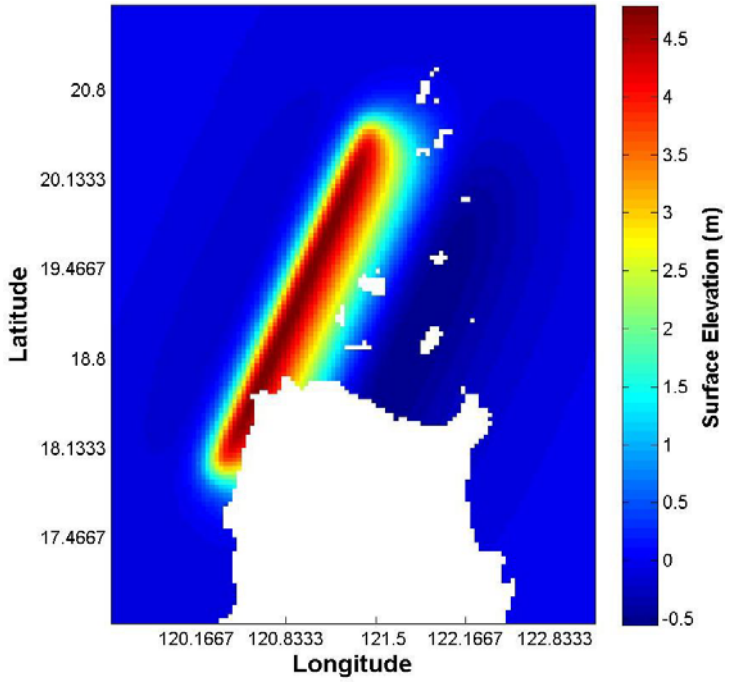


圖 5.32 馬尼拉海溝假設之地震參數後的初始水位

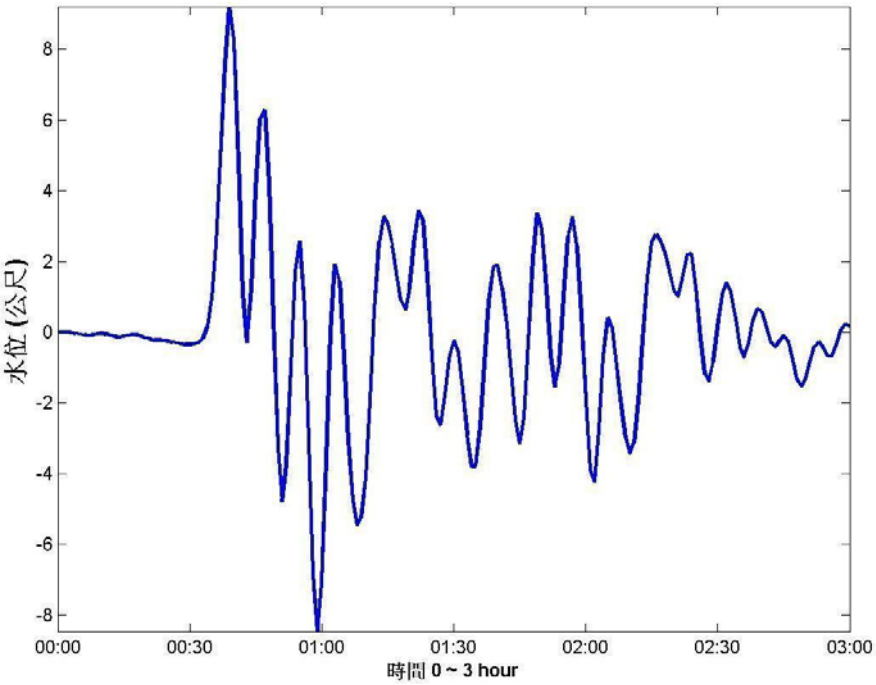


圖 5.33 高雄港外海的預報水位

5.4.4 高雄海嘯地震且溢淹之機率

根據 5.3.5 小節所評估之 50 年及 100 年海嘯地震發生次數的期望值(TEN)與海嘯對高雄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(圖 5.22(a)、(b))，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，加總各分量即得高雄港未來 50 年及 100 年發生海嘯且溢淹之機率，如圖 5.34(a1)(a2))、(b1)(b2)；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」。評估結果為高雄港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.55%，100 年為 1.09%。本研究並結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖，圖 5.35。

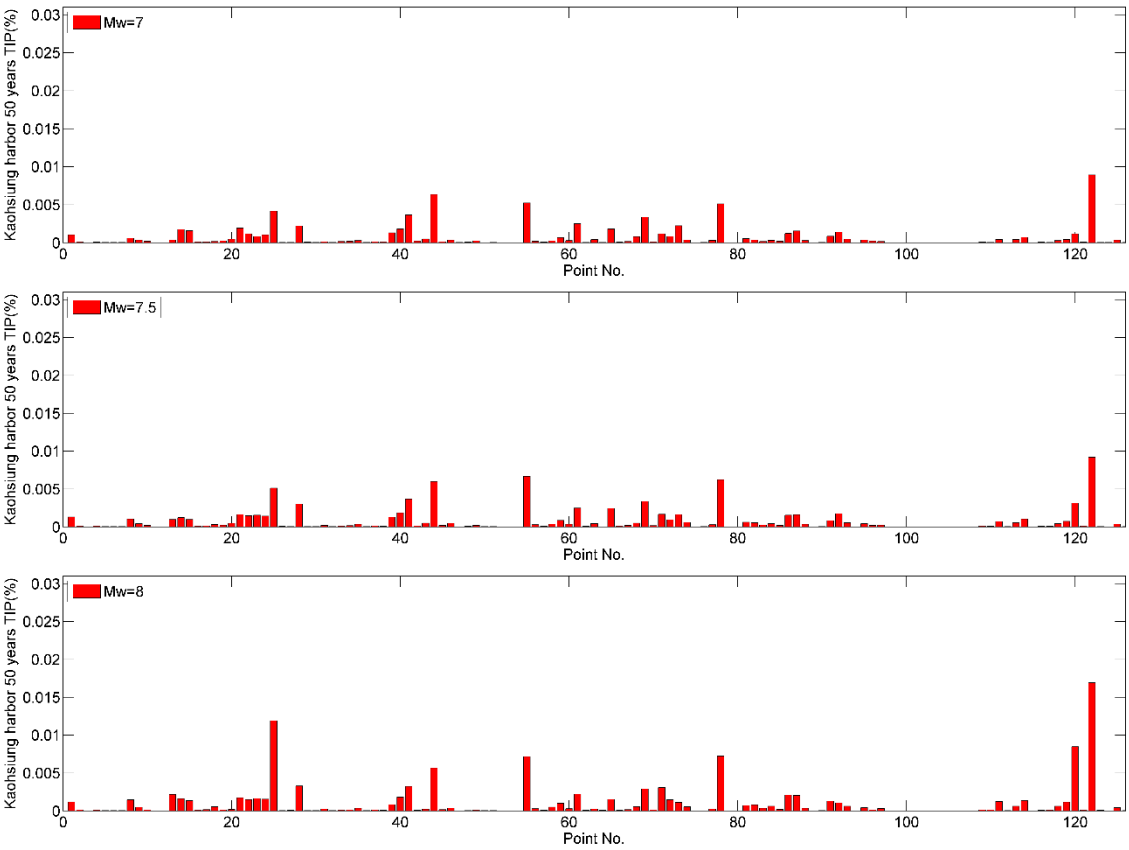


圖 5.34(a1)　高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

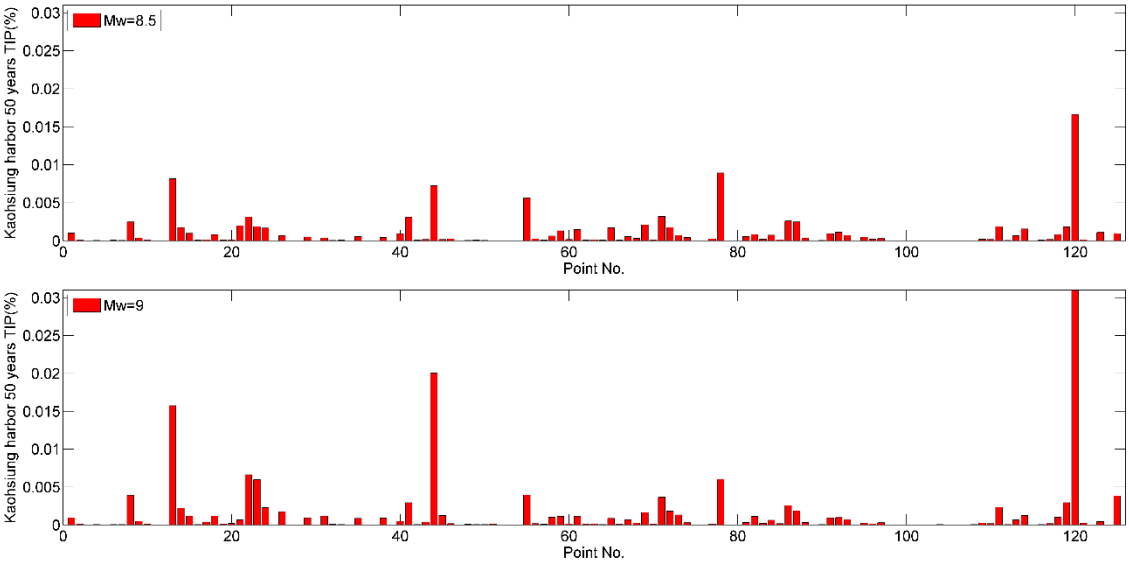


圖 5.34(a2)　高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

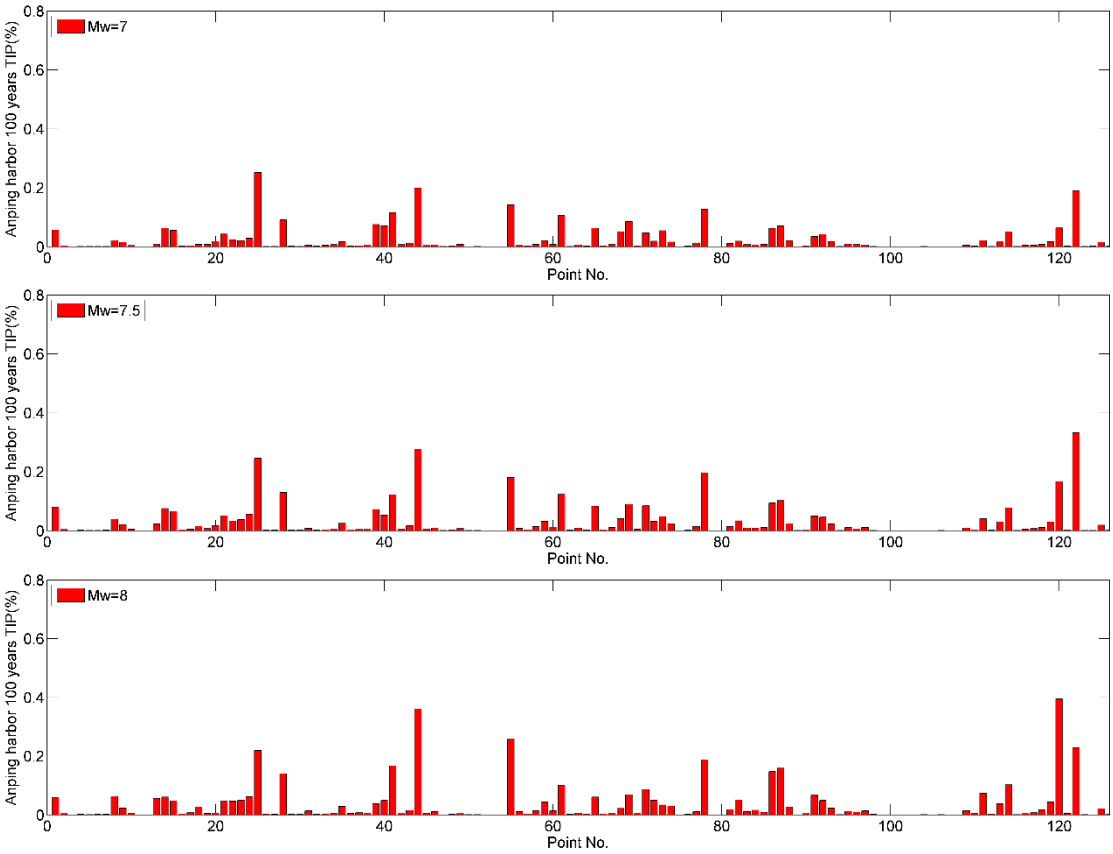


圖 5.34(b1)　高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)

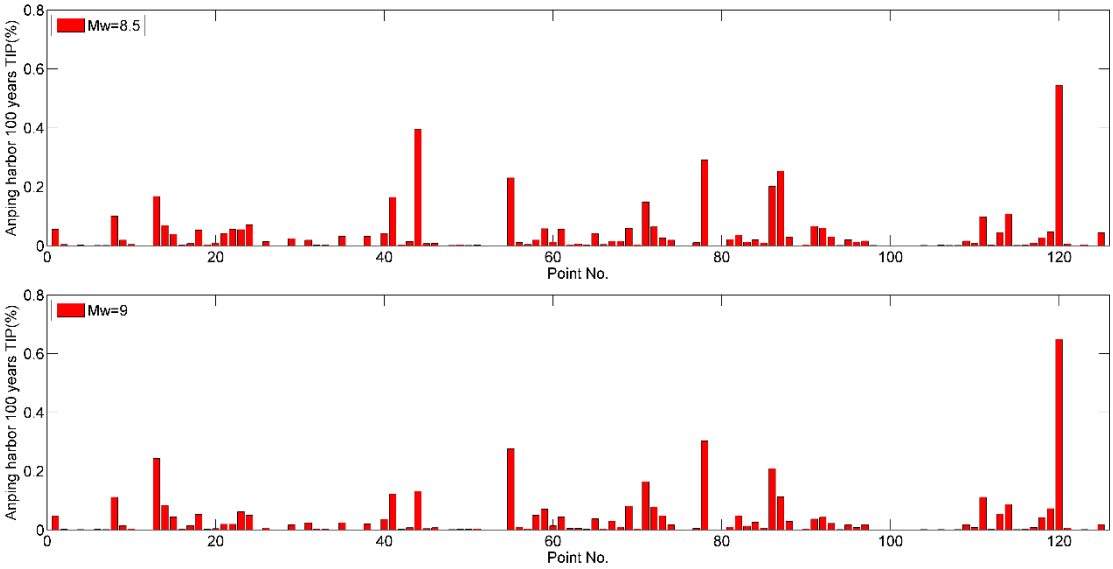
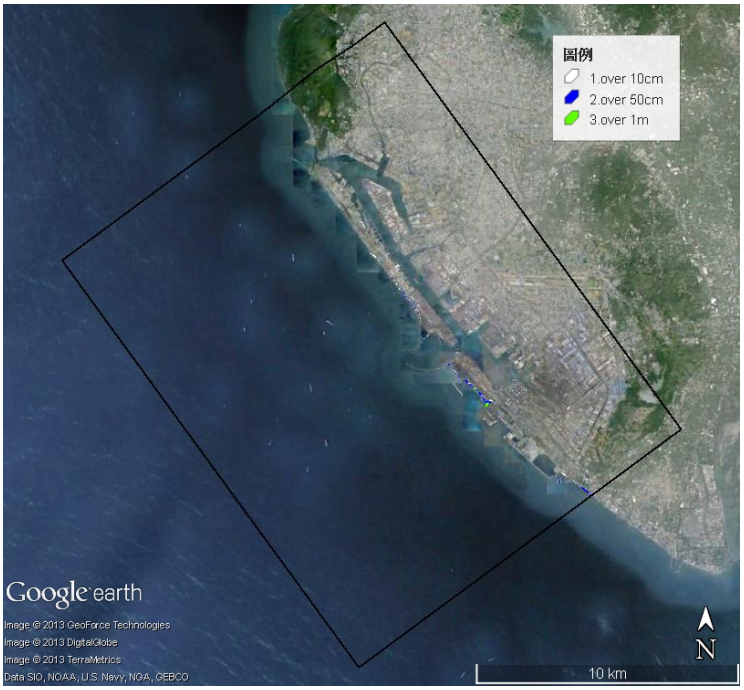
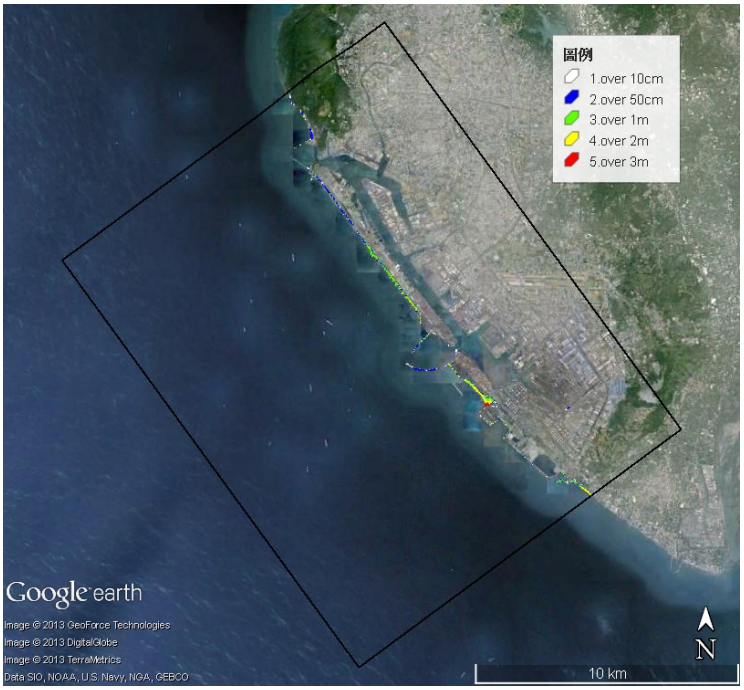


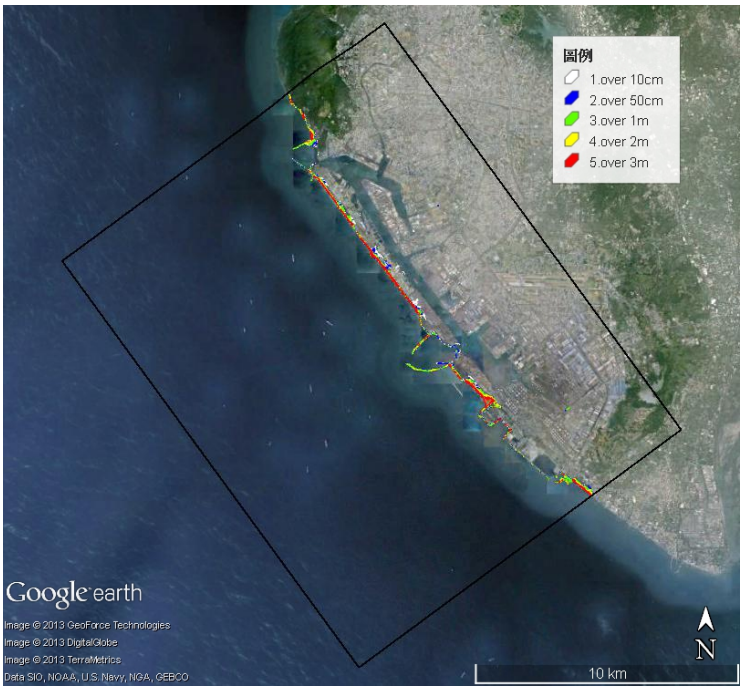
圖 5.34(b2)　高雄港未來 100 年間發生海嘯且溢淹機率(TIP)



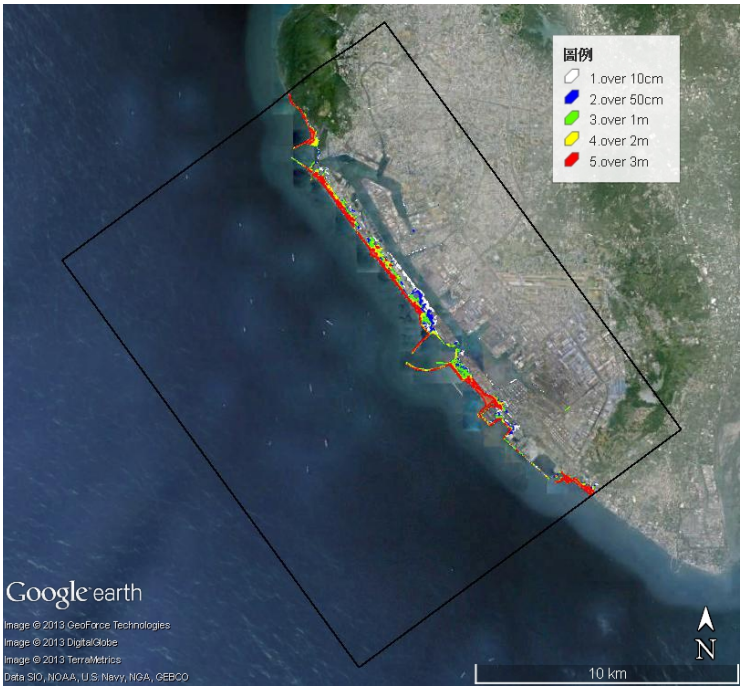
(a) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 0.5 公尺**



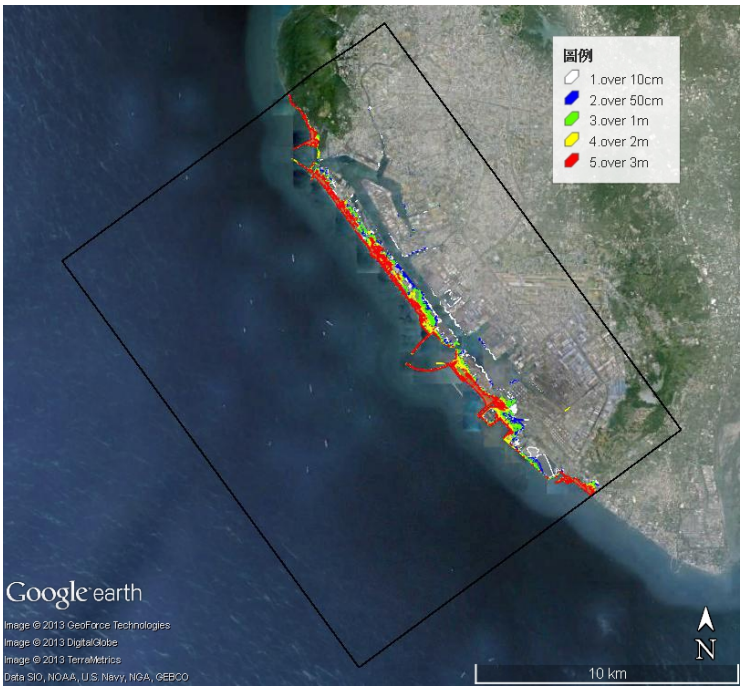
(b) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 1 公尺**



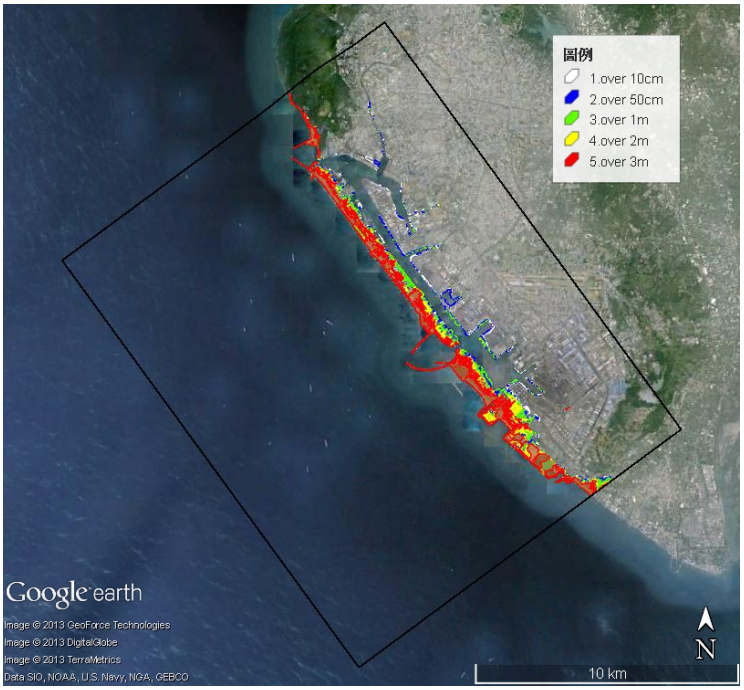
(c) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 2 公尺**



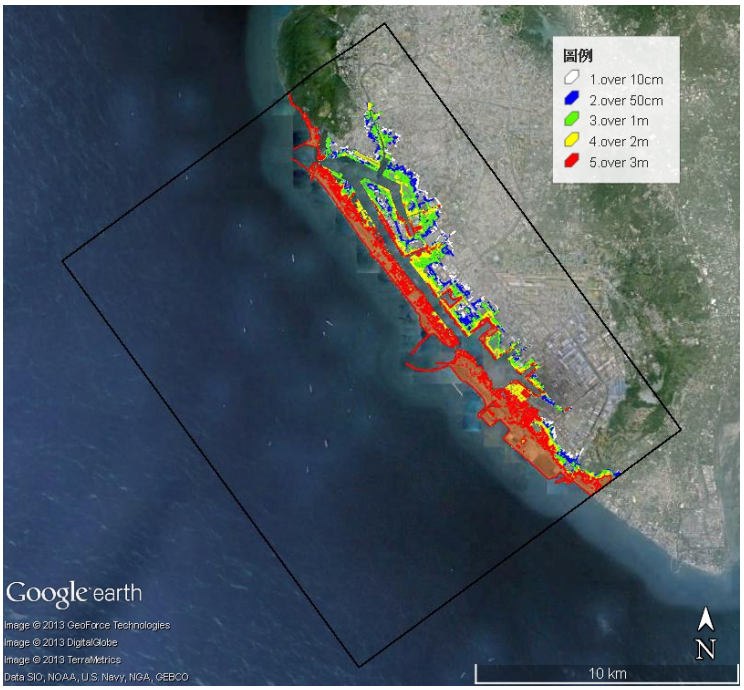
(d) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 3 公尺**



(e) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 4 公尺**



(f) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 6 公尺**



(g) **高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高 10 公尺**

圖 5.35　高雄港結合 Google Earth 之溢淹圖，入射波高：(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

第六章 海嘯對跨河橋梁之影響模擬分析

6.1 前言

海嘯與地震息息相關，但一般只有強烈之淺層地震方有引起海嘯之可能。根據中央氣象局及消防署所顯示的臺灣地區地震的歷史資料，其震央分佈如圖 2.7 所示。自 1900 年起至 2006 年，臺灣地區海底地震震央多半聚集於東部外海；陸地區域所產生最大地震為 1999 年集集大地震，規模 7.3；而海底地震則為 1910 與 1920 年分別發生在基隆外海與花蓮外海者，規模均為 8.3。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，且由歷史紀錄顯示此地帶的斷層活動引發海嘯的機率甚低。但是位於臺灣南方的菲律賓，其與臺灣都是同位於菲律賓海洋板塊與歐亞板塊的聚合帶處，地震頻繁，呂宋島有許多活動斷層延伸至海域，其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。美國地質調查所認為馬尼拉海溝是南中國海及呂宋海峽一帶危險性被低估之震源區，亦因此本研究將此地區列為主要海嘯產生波源區及主要地震搜尋範圍帶。

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，在溪溯升過程中，會產生強烈水流，會對河道產生沖刷與淤積的現象，並對河川中的結構物（如橋梁、攔砂壩或堤防等）之基底造成沖刷，對其橋梁造成安全上之威脅。本研究以模擬之結果探討溢淹範圍及溯上距離，並模擬有無潮汐影響的狀況，探討海嘯對跨河橋梁之影響。

6.2 高屏溪數值地形

當進行大區域模擬時，為了縮減模式運算時間，以減少網格數降低解析度；而若要觀察海嘯波於近岸之細微情形，則勢必增加網格數提高解析度。因此，模擬上採用巢狀網格，於大區域中使用低解析度的資料，部分區域套疊高解析度資料計算，兼顧此兩種需求。計算海嘯波於大洋中之傳播情形，隨著愈接近重點觀察區域，調整第二、三層網格大小增加解析度，計算上考慮了地球曲面效應、頻散效應和科氏力，選用線性淺水方程式及球座標系統；當波傳遞至河口，觀察海嘯波溯上情形，則需考慮近岸的非線性效應及海底底部摩擦之影響，故模式計算上則改使用非線性淺水方程式及卡式座標系統。此網格系統，可依需求調整網格大小、選用不同的淺水方程式（線性或非線性）及座標系統（球座標或卡式座標），增加海嘯模式之效率。本研究使用四層網格來模擬海嘯之傳遞，第一層網格為東經 115°至 124°、北緯 12°至 26°，ETOPE 解析度 1 分之數值地形(圖 6.1）；第二層網格為東經 118°至 121°、北緯 20°至 23°，海科中心解析度 0.25 分之數值地形(圖 6.2）；第三層網格為東經 120°至 121.7°、北緯 22.1°至 22.7°，海科中心解析度 0.03125 分之數值地形(圖 6.3)；第四層網格為東經 120.3844°至 121.4824°、北緯 22.4166°至 22.6637°，海科中心之海底地形及內政部 5 公尺陸地地形(DSM)之數值地形，解析度為 0.004 分(圖 6.4a、6.4b)。前三層使用線性淺水方程式、而第四層則使用非線性淺水方程式。期中內政部地形為臺灣水準點之高程採用正高系統;同時高程基準係定義在 1990 年 1 月 1 日標準大氣環境情況下，並採用基隆驗潮站 1957 年至 1991 年之潮汐資料化算而得，並命名為 2001 臺灣高程基準（TaiWan Vertical Datum 2001，簡稱 TWVD 2001 ）。而海科中心深度資料為利用儀器的聲波回波測定海面到海底所得到的距離。之後的潮位校正為使用最接近當航次之中央氣象局潮位站潮位資料，代表量測時之水位高程，以修正水深測值之水深面至基隆港平均潮位。而目前中央氣象局各潮位觀測站尚未統一修正為同一基準。所以兩者的高程系統和基準不一致。

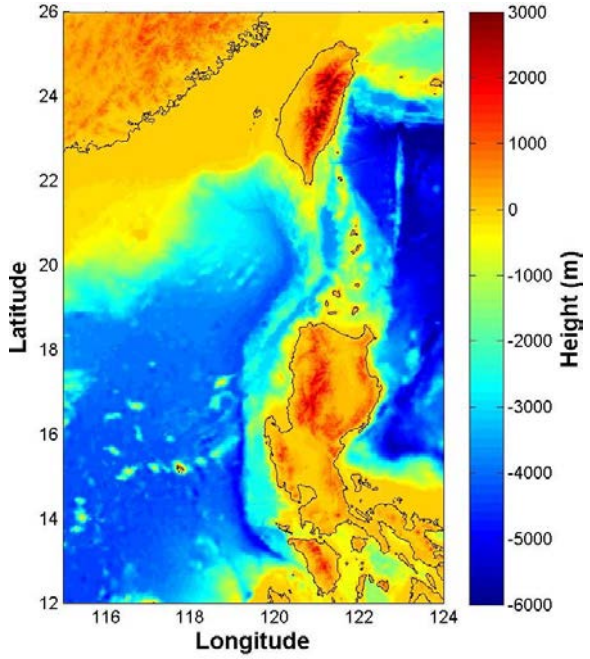


圖 6.1　海科中心解析度 1 分之數值地形

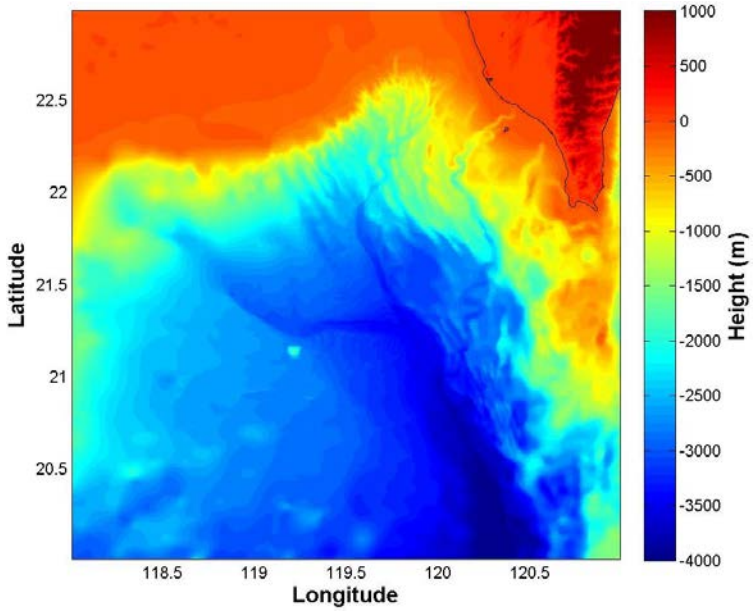


圖 6.2　海科中心解析度 0.25 分之數值地形

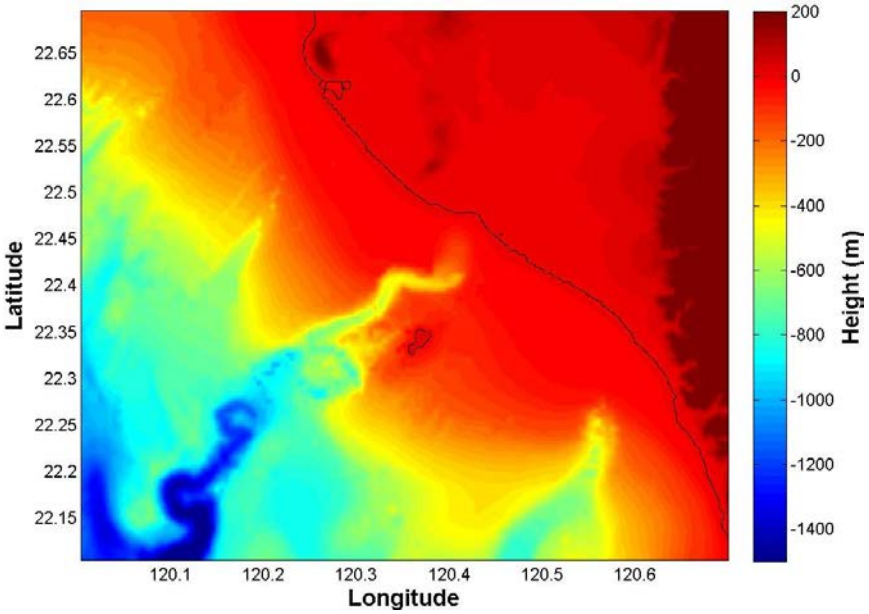


圖 6.3　海科中心解析度 0.03125 分之數值地形

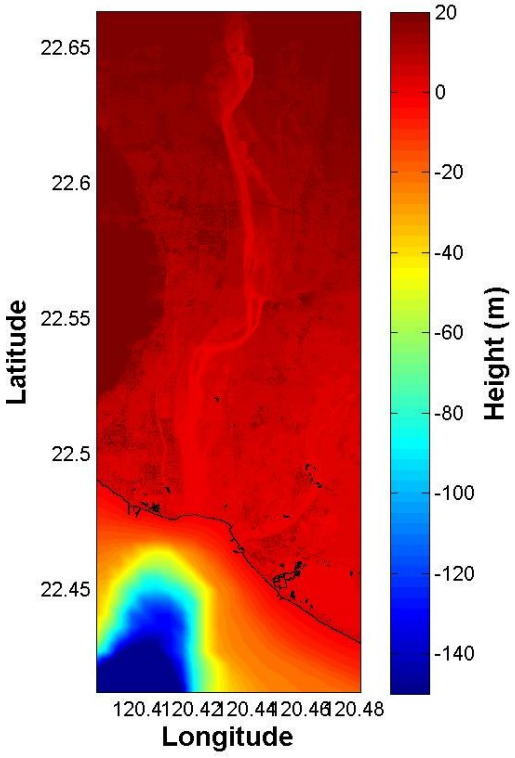


圖 6.4a　海科中心解析度 0.004 分之數值地形

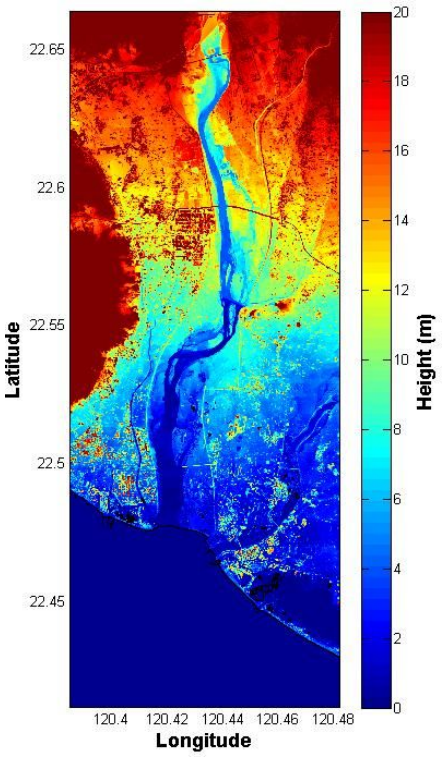


圖 6.4b　內政部 5 公尺陸地地形(DSM)

6.3 馬尼拉溝地震參數

臺灣附近雖然有很多海嘯及地震的波源區，例如日本及南太平洋海域，但皆距離臺灣甚遠，均屬遠域海嘯；且臺灣地理位置特殊，而不在海嘯傳遞的主要方向上；因此，對臺灣本島尤其是西南海域而言，波源區之遠近是一個影響的主要因子；離臺灣最近之波源區自是馬尼拉海溝。圖 6.5 為臺灣本島海域附近之斷層系統圖(Liu 等.1997)，圖 6.6 為臺灣西南海域附近之斷層分佈。臺灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海洋板塊之交接地帶上，是經由造山運動擠壓而成。地質上，臺灣南部至菲律賓呂宋島西方為呂宋島弧，馬尼拉海溝即在呂宋島之西方，為一隱沒帶系統，也是臺灣南端主要隱沒帶系統；它除南北兩段外，大抵為南北分佈；其最南端位於北緯 13 度的民多羅海峽(Mindoro Strait)，而沿著呂宋島的西側一路向北延伸，至臺灣南部海域到大約北緯 21.5 度附近。

由於菲律賓也近於板塊交接處，雖然地質活動不如臺灣北部之琉球海槽，但也是地震頻繁區域之一；呂宋島的地理位置恰巧與臺灣類似，南北各為民多羅海峽與呂宋海峽，東西兩端則有東呂宋海槽及馬尼拉海溝(如圖 6.7 所示)，所以常見地震及海嘯紀錄。圖 6.8 則為呂宋島地區自 1619 年-1997 年之地震紀錄。呂宋島發生海嘯紀錄也相當多：1924 年 4、5 月，呂宋島外海東經 119 度，北緯 18 度(恰巧是馬尼拉海溝之位置)相繼發生規模 6.5-7 之地震，在呂宋島西北方皆有海嘯之紀錄；1934 年 2 月，呂宋島外海東經 119 度，北緯 17.5 度，亦發生規模 7 之地震，在呂宋島西北方同樣有海嘯之紀錄；1994 年 11 月，菲律賓南部民多羅島發生規模 7.1 之地震，引發 7.1 公尺之波高。但以上海嘯事件，在臺灣並無紀錄。

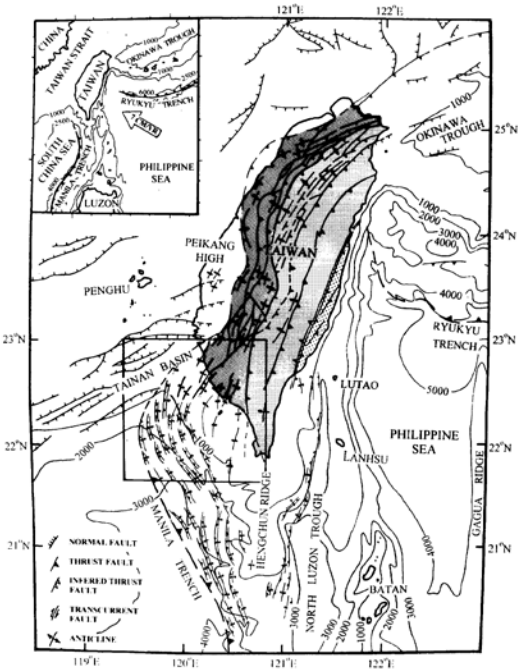


圖 6.5 臺灣本島海域附近之斷層分佈圖(取自 Liu 等.1997)

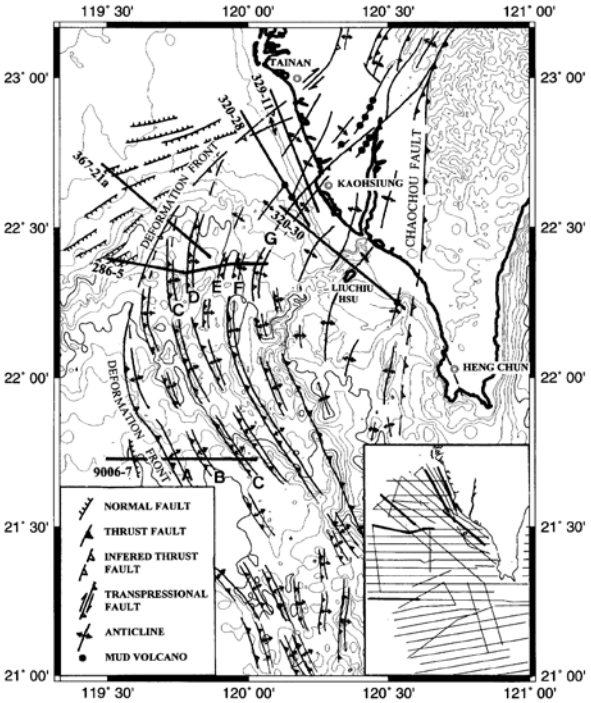


圖 6.6 臺灣西南海域附近之斷層分佈圖(取自 Liu 等.1997)

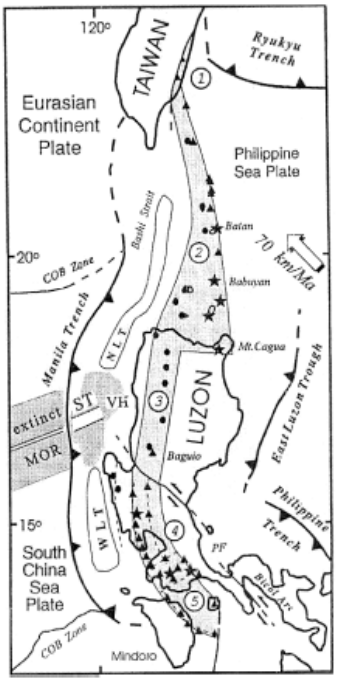


圖 6.7　呂宋島之地理位置圖(取自 Bautista et al. (2001))

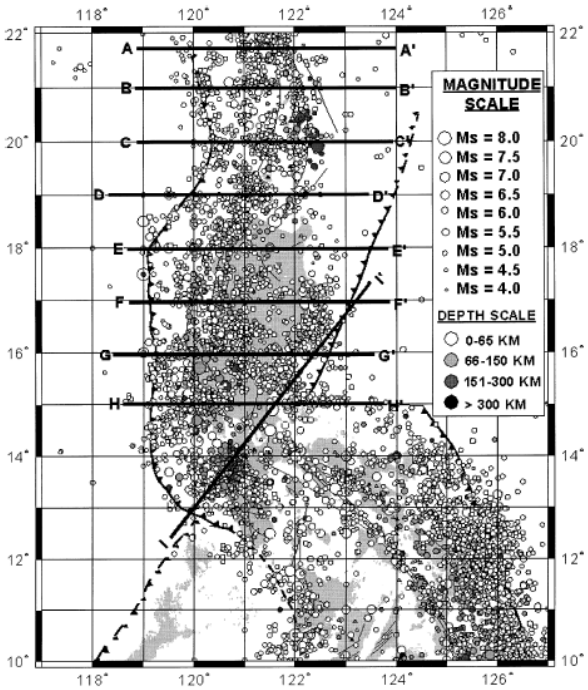


圖 6.8　呂宋島地區 1619 年-1997 年之地震紀錄

(取自 Bautista et al. (2001))

由圖 6.8 觀察可知，地震發生區域主要分佈於呂宋島東南端的東呂宋海槽與菲律賓海溝，以及西北端之馬尼拉海溝北端部分；如有海嘯產生，則由於呂宋島西南端面向太平洋，長軸方向有較大的出口可供給能量傳遞及消散；但是馬尼拉海溝面向南中國海，能量消散範圍小，且與臺灣南端之斷層帶有連帶關係，又加以此區海嘯與地震紀錄頗多，故此一區域發生海嘯之潛勢不容忽視。

Megawati et al. (2009)將馬尼拉海溝分為 33 段子區塊，如圖 6.9 所示。其中編號 15~18 之子斷層較為靠近臺灣。依該圖可將馬尼拉海溝分成 33 個子斷層帶，各子區塊之斷層參數表如表 6.1 所示。

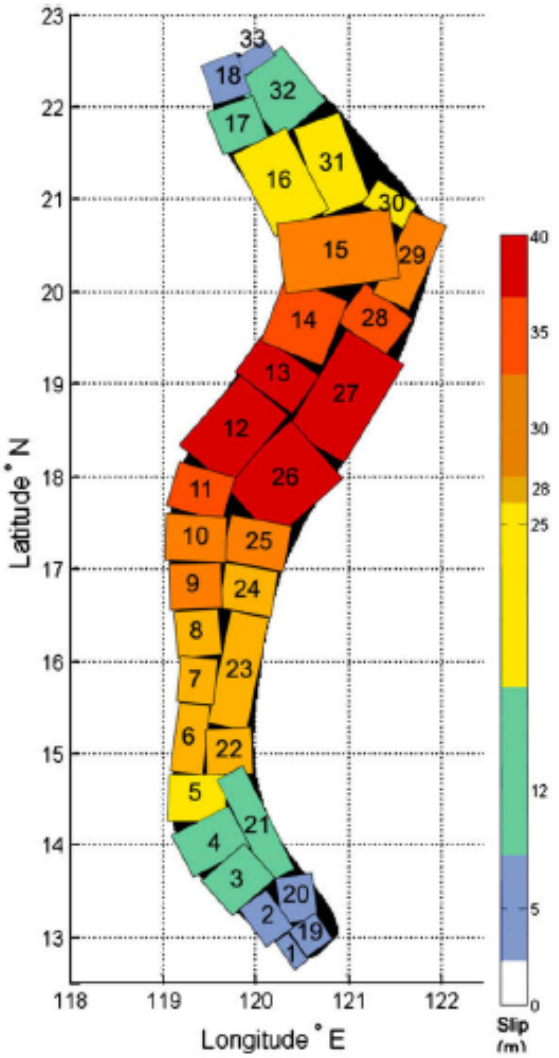


Fig. 5. The discretized model for computation of seafloor displacement.

圖 6.9　馬尼拉海溝 33 個子區塊分佈圖 Megawati et al. (2009)

表 6.1　馬尼拉海溝 33 個子斷層之斷層參數表 Megawati et al. (2009)

Depth (km)	Length (km)	Width (km)	Dislocation (m)	Epicenter (Longitude)	Epicenter (Latitude)	Moment Magnitude (Mw)
7.5	40.41	19.3	5	E120.4	N12.84	3.982091612
7.5	54.19	38.68	5	E120.12	N13.2	4.26833125
7.5	54.09	66.93	12	E119.8	N13.61	4.680026871
7.5	54	75.68	12	E119.52	N14.04	4.715118256
7.5	53.89	67.52	25	E119.36	N14.5	4.894001254
7.5	80.59	37.51	28	E119.28	N15.18	4.873138337
7.5	53.56	43.13	28	E119.34	N15.84	4.795266208
7.5	53.43	51.06	28	E119.38	N16.32	4.84343018
7.5	53.28	60.09	30	E119.36	N16.84	4.909739286
7.5	53.14	69.93	30	E119.36	N17.32	4.952885059
7.5	52.99	65.93	35	E119.4	N17.82	4.979644196
7.5	105.57	72.15	40	E119.76	N18.5	5.243972069
7.5	52.6	79.67	40	E120.24	N19.1	5.070974538
7.5	78.62	74.61	35	E120.52	N19.68	5.129679586
7.5	78.24	129.36	30	E120.6	N20.44	5.242980905
7.5	103.81	67.36	25	E120.28	N21.14	5.083135022
7.5	51.68	54.86	12	E119.8	N21.8	4.609253873
7.5	46.82	41.97	5	E119.68	N22.30	4.249641092
35	37.5	37.27	5	E120.6	N13.04	4.150987946
35	54.14	43.11	5	E120.42	N13.42	4.299458356
35	134.88	34.22	12	E120	N14.2	4.750353376
35	53.76	53.11	28	E119.72	N15	4.856609898
35	133.84	45.09	28	E119.8	N15.92	5.073296966
35	53.29	61.36	28	E119.92	N16.76	4.895873571
35	53.15	70.96	30	E120.4	N17.28	4.957172923
35	105.9	88.63	40	E120.3	N17.92	5.304438637
35	131.68	75.92	40	E120.96	N18.84	5.322704842
35	52.41	67.88	35	E121.26	N19.7	4.984896862
35	104.39	44.85	30	E121.66	N20.36	5.019775903
35	51.99	31.66	25	E121.44	N20.96	4.664327994
35	103.67	55.05	25	E120.8	N21.38	5.024314457
35	77.33	67.83	12	E120.24	N22.12	4.787381552
35	21.26	41.86	5	E120	N22.48	4.020302495

6.4 海嘯沿高屏溪口溯上模擬

參考 Megawati et al. (2009)所建立之馬尼拉海溝 33 個子區塊地震參數(圖 6.9、表 6.1)，將此地震參數帶入模式中建立馬尼拉海溝斷層帶所產生之初始水位(圖 6.10)。模擬結果第一波海嘯約 20 分鐘抵達高屏溪口，模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈如圖 6.11(a)~(c)，海嘯波沿高屏溪河道上溯約 9 公里遠，溯上高度最高水位有 3 公尺高(圖 6.12(a)~(b))，並將模擬結果與 Google Earth 地圖疊加製成溢淹地圖，要注意的為高屏溪為南北走向，其首當其衝的為雙園大橋(圖 6.13(a)、(b))。但模擬結果內政部的河道地形與 Google Earth 2013 版本不太相符。其整合及結合 Google Earth 地圖之溢淹潛勢圖，並利用 Google Earth 圖資系統顯示出學校及醫療等救災所需資源(圖 6.14)，有助於研判海嘯發生時之安全地點及避難路徑。(陳和陳，2012)

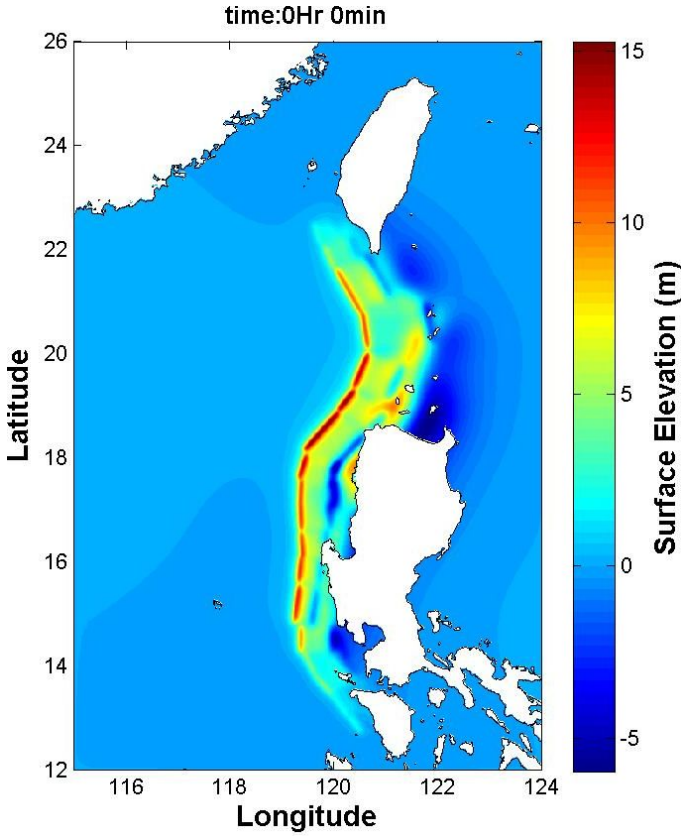


圖 6.10　參考 Megawati et al. (2009)之地震參數建立初始水位

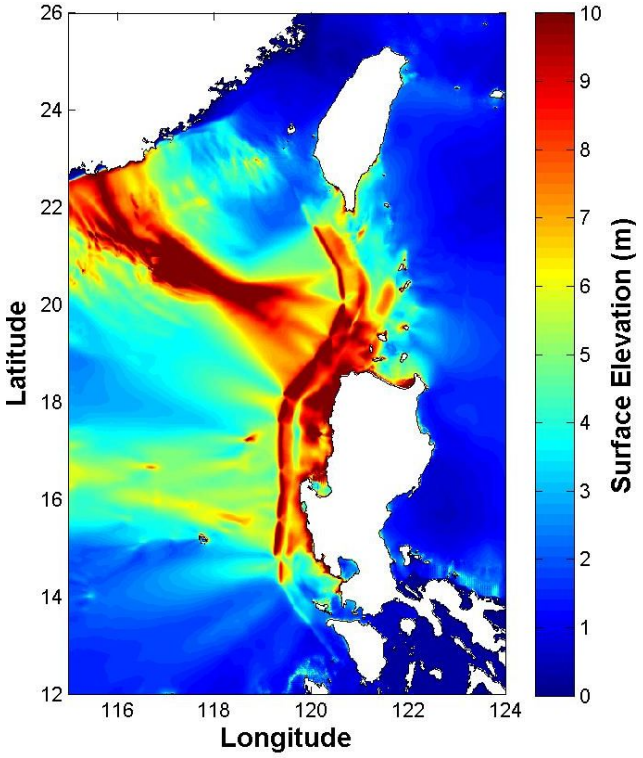


圖 6.11(a)　模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第一層網格)

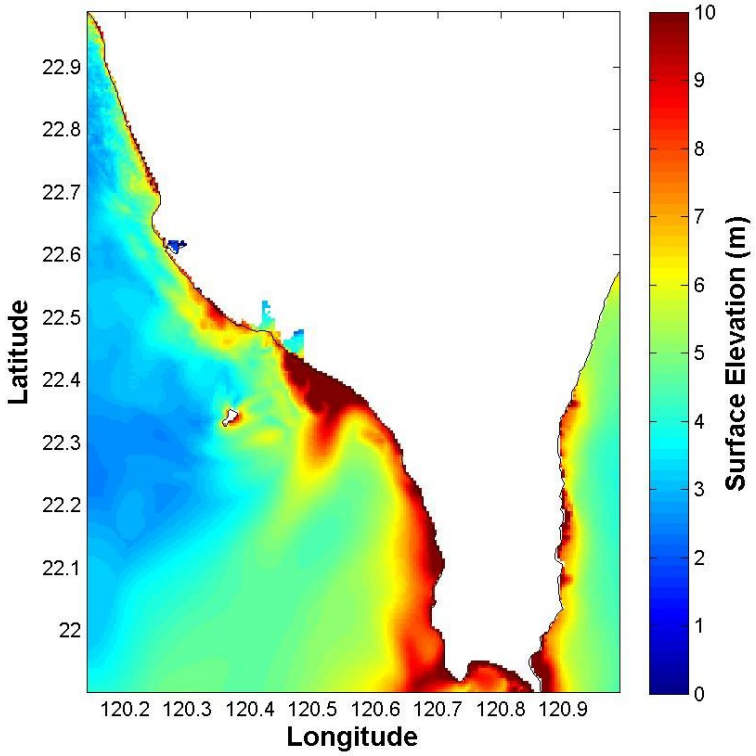


圖 6.11(b)　模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第二層網格)

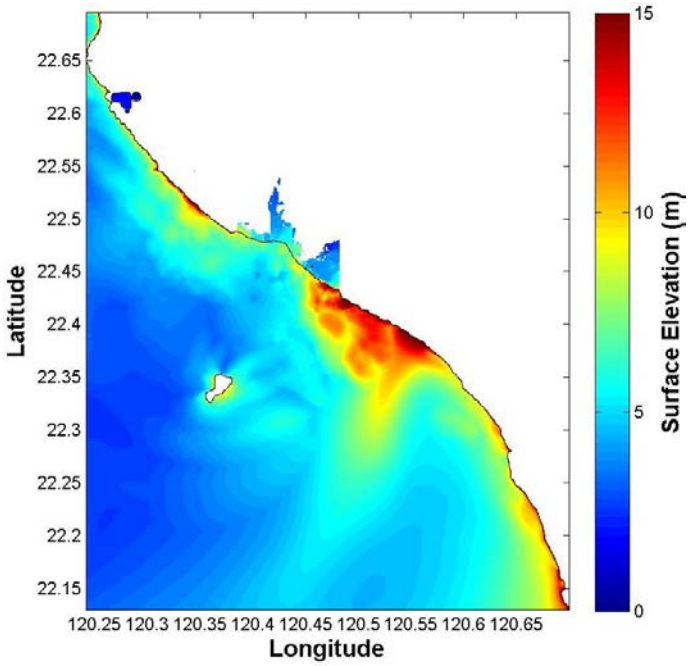
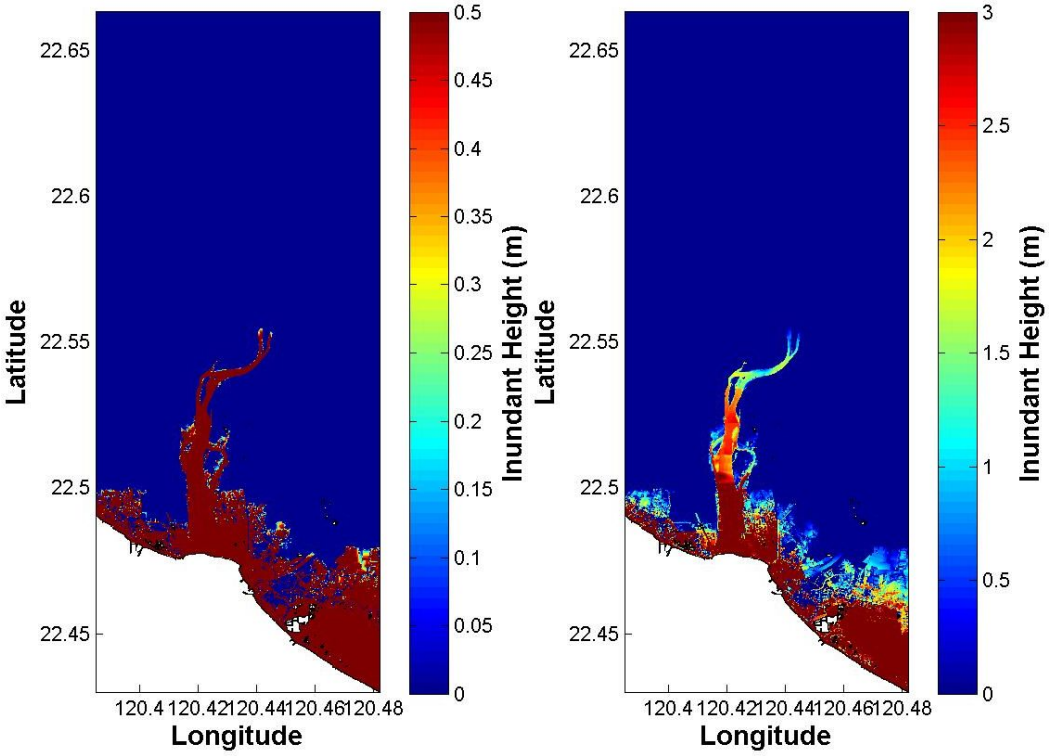


圖 6.11(c)　模擬三個小時期間各地的最大水位高度分佈(第三層網格)



(a)　　(b)

圖 6.12　模擬三個小時期間河道水位高度分佈(a)50cm(b)3m

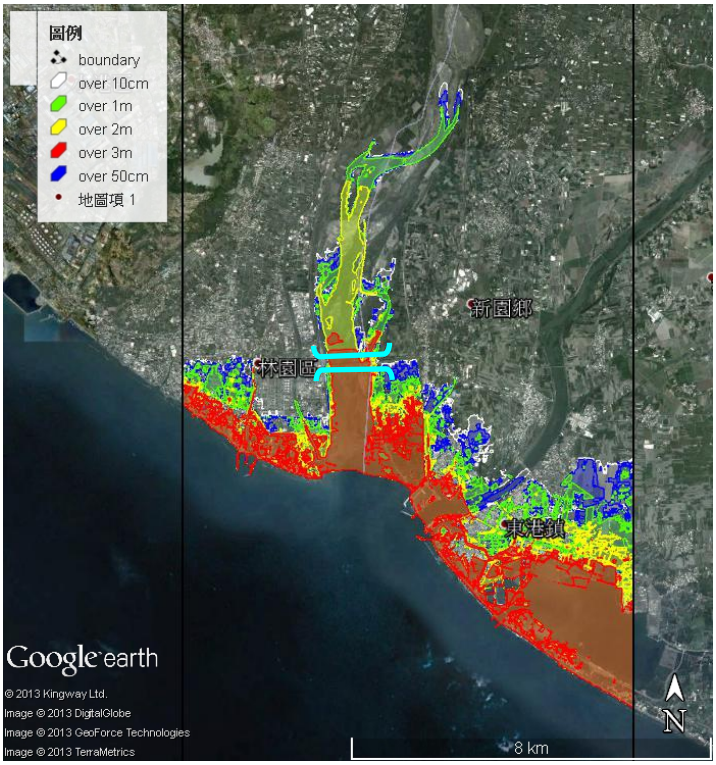


圖 6.13(a)　結合 Google Earth 之溢淹圖

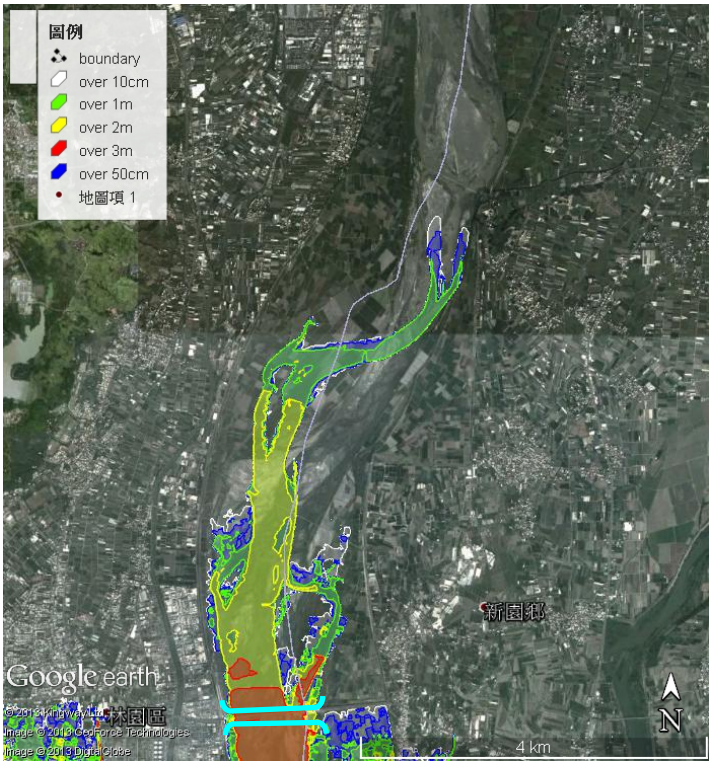


圖 6.13(b)　結合 Google Earth 之河道溢淹圖

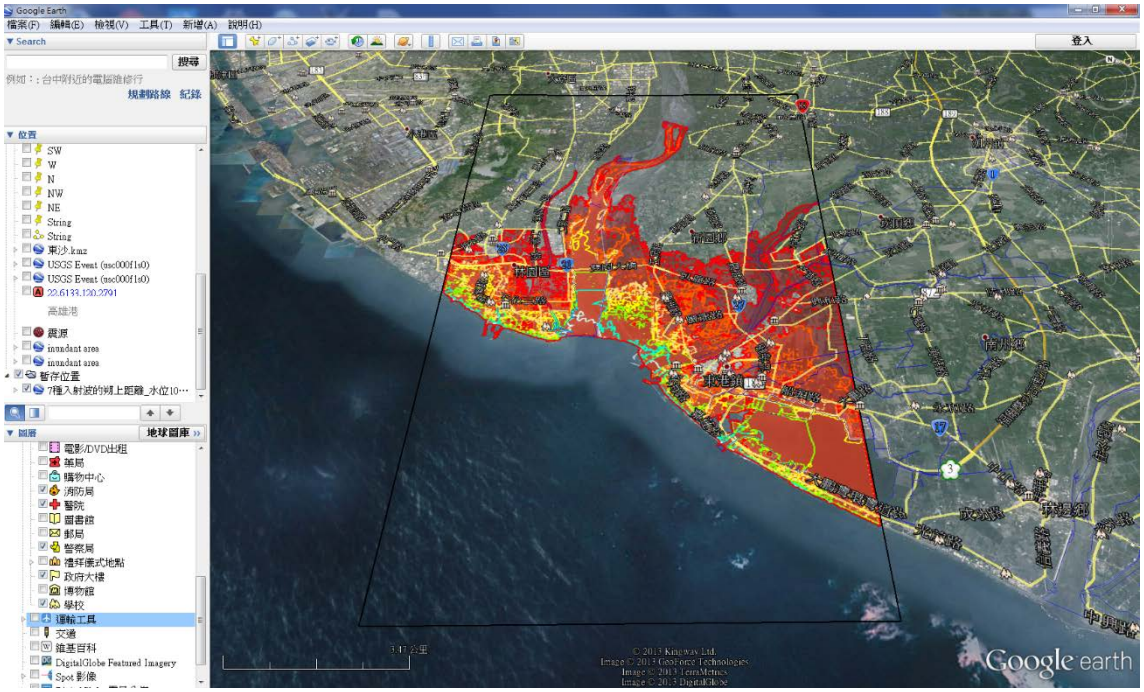


圖 6.14　利用 Google Earth 之疊加圖層選擇圖資

6.5 潮汐模擬分析

考慮潮汐水位是否影響海嘯沿高屏溪向上游傳遞，本研究利用交通部氣象局之潮位統計資料(圖 6.15)，取東港 2003 年至 2012 年潮位統計之年平均潮位水位，大潮平均高潮位為 0.843 公尺，大潮平均低潮位為-0.138 公尺，並以 COMCOT 模式模擬全日週期及半日週期的潮汐五天(圖 6.16(a)、(b))，其模擬邊界條件為南方邊界入射。將高屏溪設立 P1 至 P9 九個點位以紀錄潮汐影響的河川水位，其中 P1 為東港潮位站位置，P8 為雙園大橋附近(圖 6.17)，圖 6.18 為模擬全日潮其九個點位之水位紀錄，圖 6.19 為模擬半日潮其九個點位之水位紀錄，而雙園大橋(P8 點位)並無受到潮汐之影響。

月份	最高高潮位暴潮位(m)	最高天文潮(m)	大潮平均高潮位(m)	平均高潮位(m)	平均潮位(m)	平均低潮位(m)	大潮平均低潮位(m)	最低天文潮(m)	最低低潮位(m)
1	1.202	1.06	0.759	0.471	0.193	-0.09	-0.239	-0.4	-0.486
2	1.091	0.96	0.697	0.497	0.219	-0.069	-0.168	-0.34	-0.469
3	0.989	0.87	0.661	0.565	0.256	-0.045	-0.099	-0.25	-0.573
4	1.021	0.96	0.706	0.59	0.273	-0.027	-0.102	-0.24	-0.358
5	1.204	1.09	0.841	0.635	0.326	0.02	-0.127	-0.27	-0.362
6	1.288	1.18	0.958	0.666	0.362	0.043	-0.151	-0.31	-0.396
7	1.383	1.21	0.982	0.66	0.39	0.088	-0.1	-0.29	-0.334
8	1.565	1.21	1.019	0.738	0.433	0.105	0.003	-0.22	-0.391
9	1.16	1.11	0.895	0.75	0.422	0.081	0.022	-0.13	-0.311
10	1.172	1.07	0.865	0.719	0.389	0.05	-0.031	-0.23	-0.272
11	1.234	1.09	0.869	0.631	0.306	-0.021	-0.149	-0.32	-0.347
12	1.198	1.1	0.853	0.531	0.238	-0.058	-0.248	-0.39	-0.494
全年	1.565	1.21	0.843	0.613	0.288	-0.005	-0.138	-0.4	-0.573

圖 6.15　交通部氣象局東港潮位統計資料

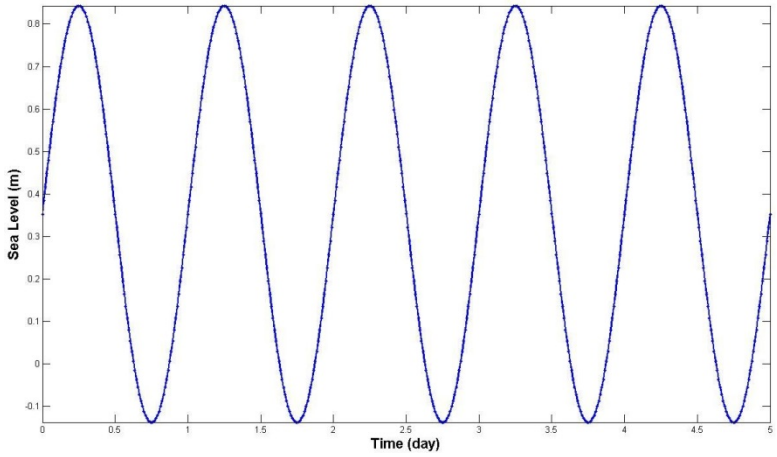


圖 6.16(a)　COMCOT 模擬全日週期潮汐之入射水位

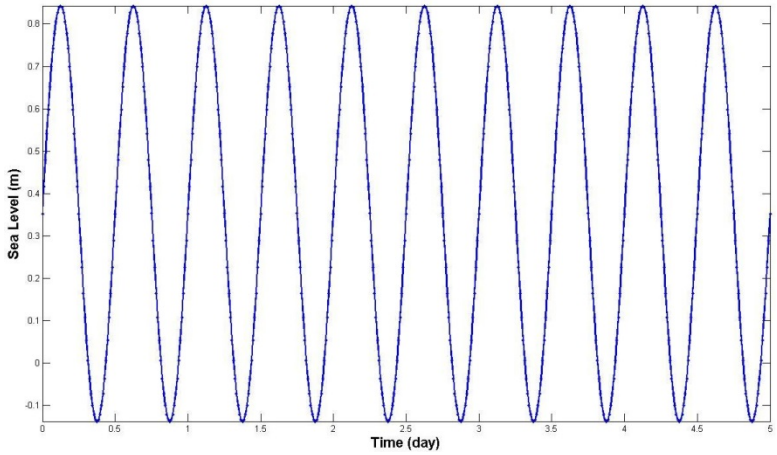


圖 6.16(b)　COMCOT 模擬半日週期潮汐之入射水位

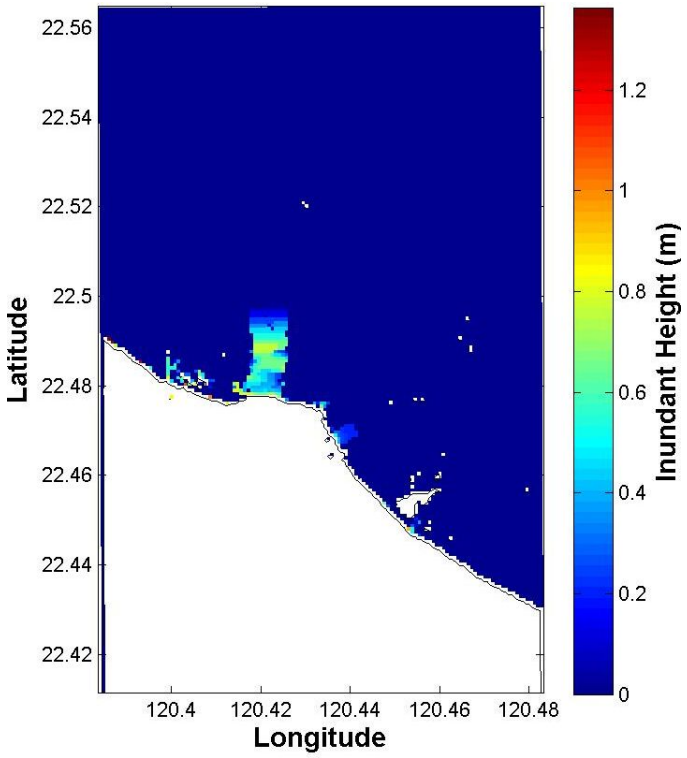


圖 6.16(c)　高屏溪全日週期潮汐最大溢淹水位

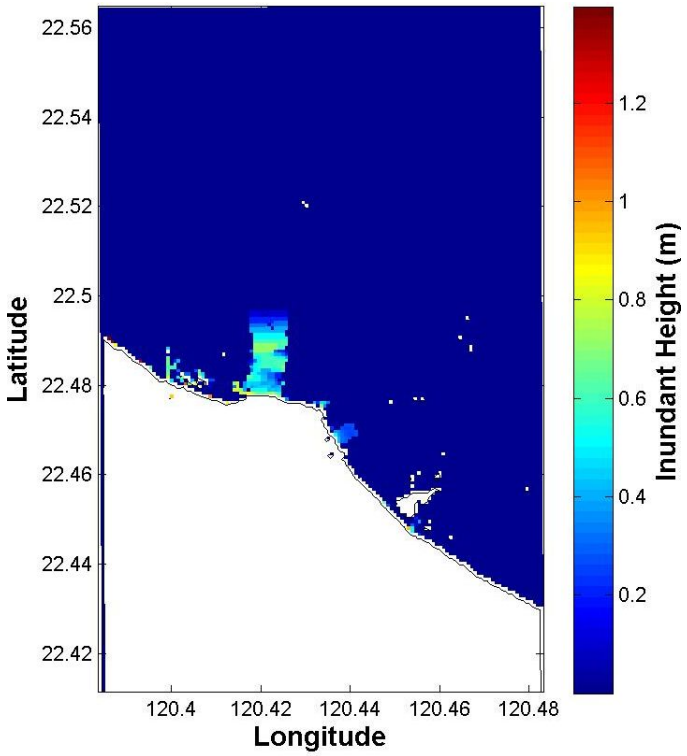


圖 6.16(d)　高屏溪半日週期潮汐最大溢淹水位

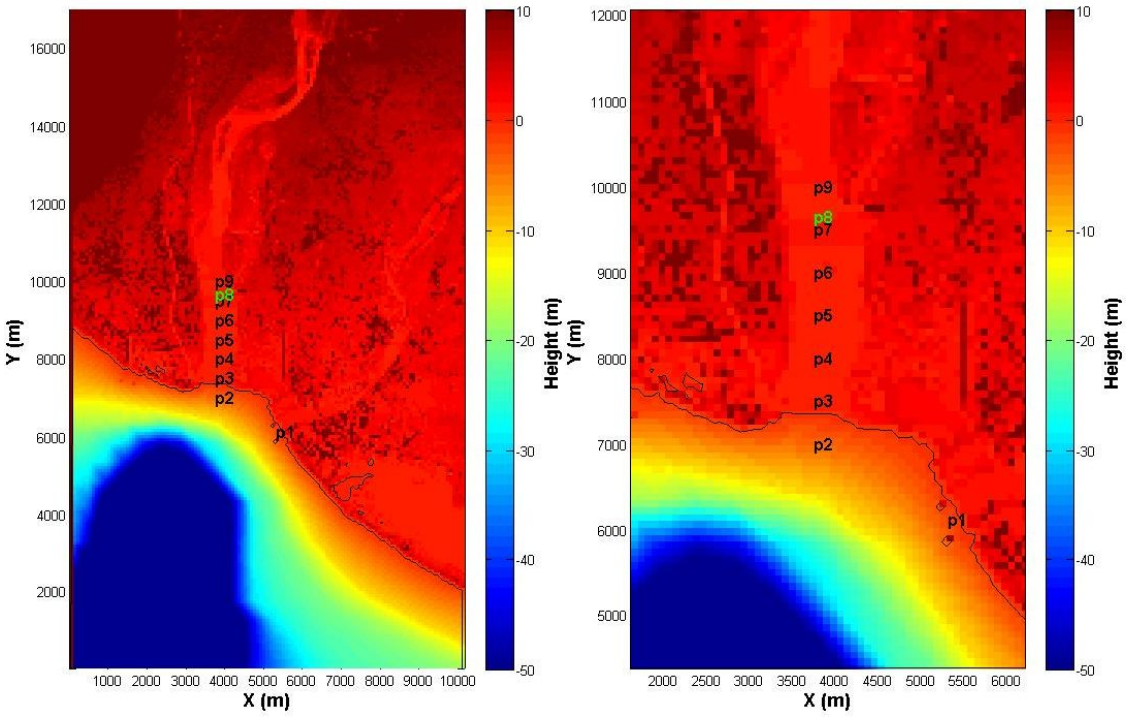


圖 6.17 高屏溪之地形及紀錄點位

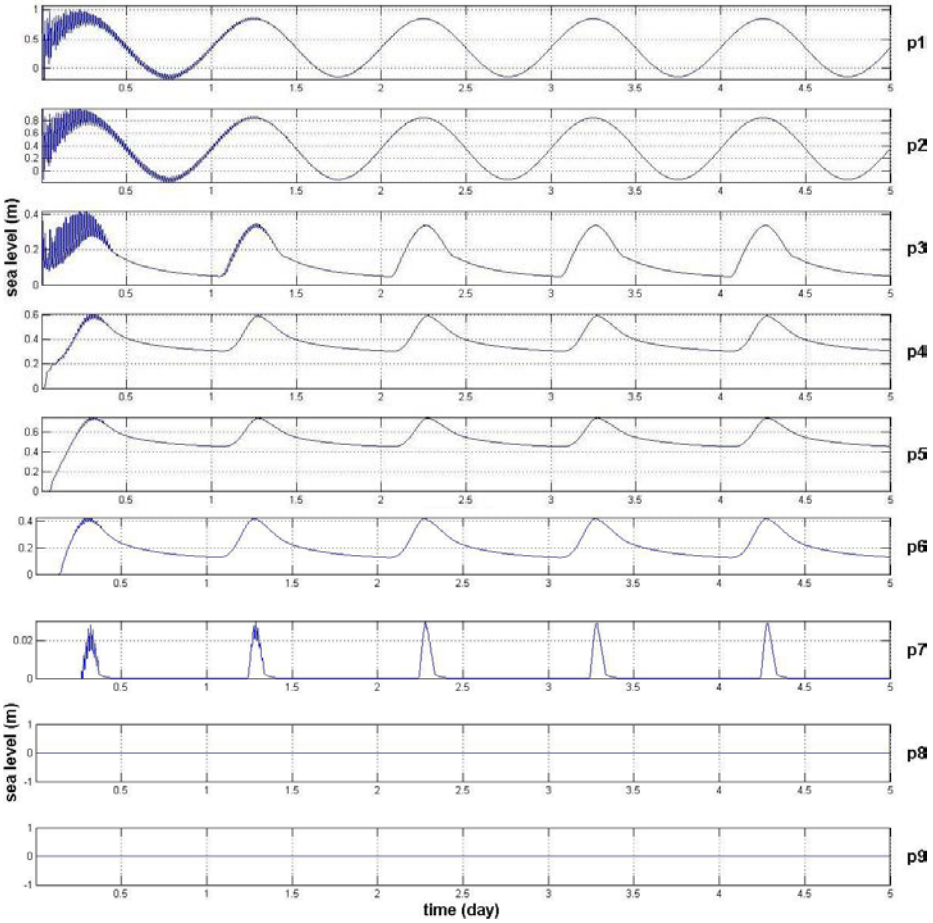


圖 6.18 模擬高屏溪全日潮之水位紀錄

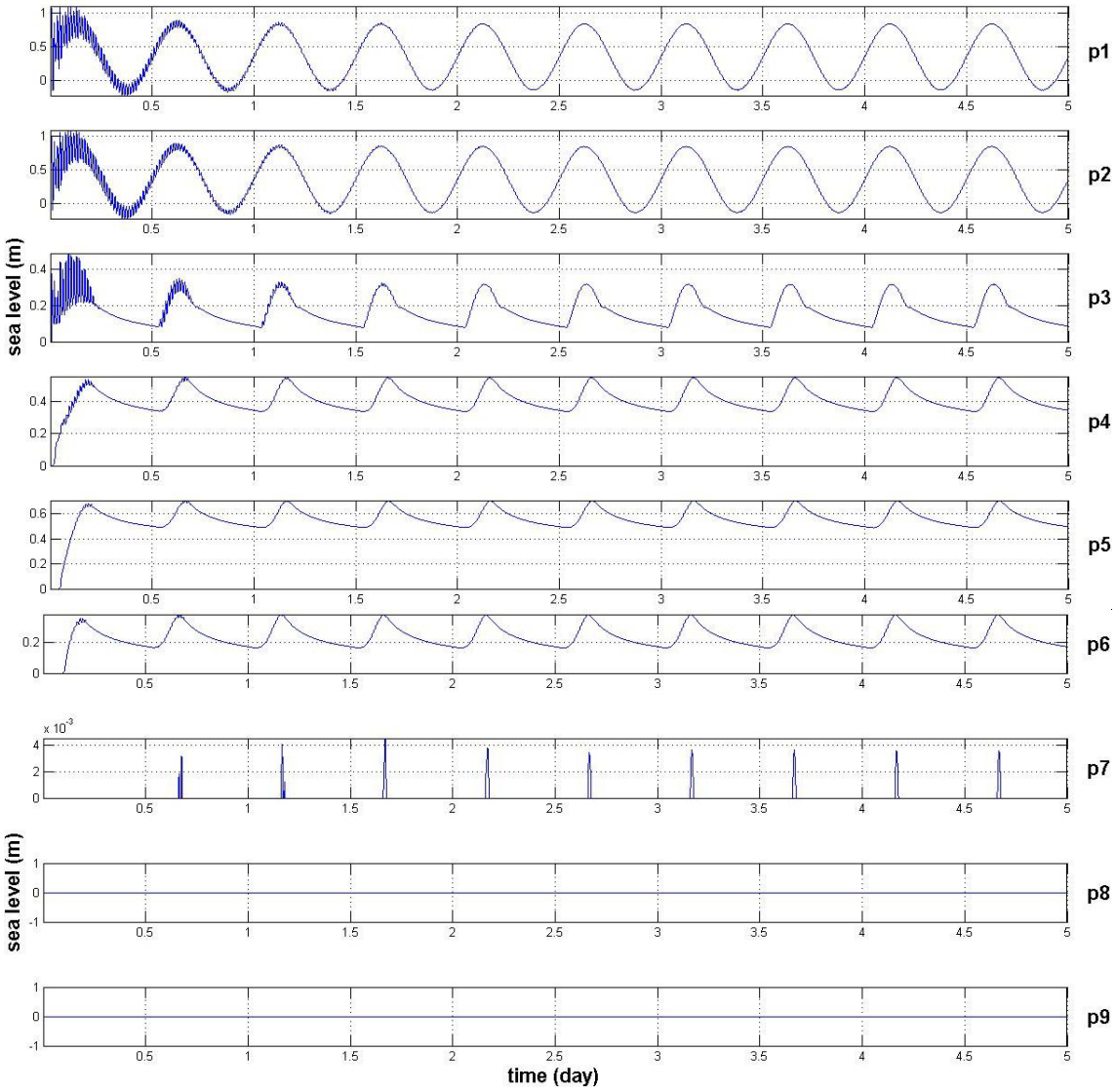


圖 6.19 模擬高屏溪半日潮之水位紀錄

6.6 跨河橋梁受海嘯波之衝擊力分析

6.6.1 雙園大橋及數值地形

雙園大橋，位於台 17 線道上，橫跨高屏溪之橋樑，其聯絡高雄市林園區至屏東縣新園鄉兩地。取名「雙園大橋」，因兩端地名皆有「園」字。2009 年 8 月被中度颱風莫拉克引發的高屏溪洪水沖毀而無法通行。隨後由交通部公路總局辦理改建工程，主橋以大跨徑設計，主跨徑 96~120 公尺，墩柱由原舊橋 67 墩減少至 19 墩，以增加通水斷面，

提高防洪能力，主橋全長 2178 公尺，於 2011 年 9 月 5 日完成上游側往高雄、林園方向之橋梁，先行啟用並以雙向單線方式通行，而下游側往新園、東港方向之橋梁亦已於 2011 年 12 月 23 日改建完成並全線通車。圖 6.20 為交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處之橋梁斷面圖，其橋墩寬度約 4.6 公尺，橋墩距約 6.7 公尺，圖 6.21 為工程位置圖，做為模式模擬設定之參考依據。

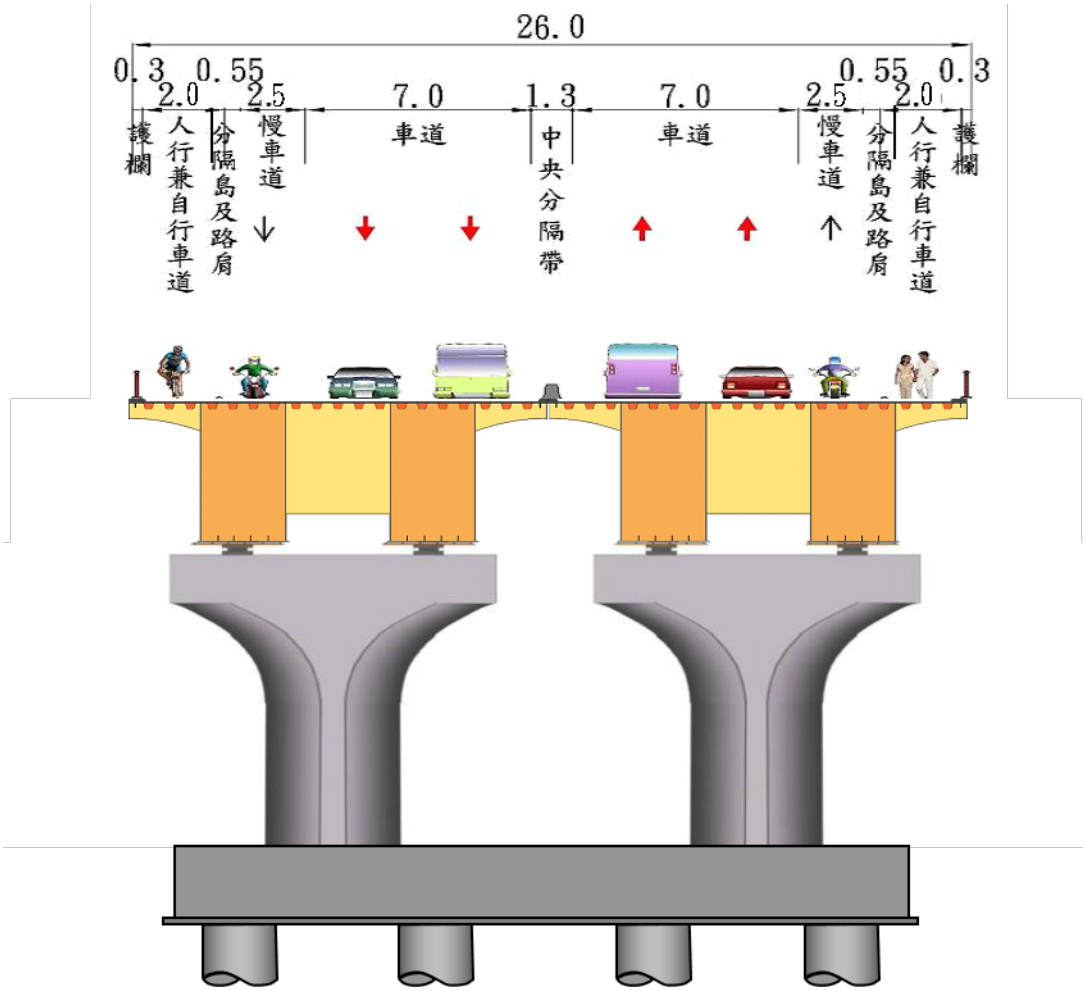


圖 6.20 雙園大橋橋梁斷面圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處

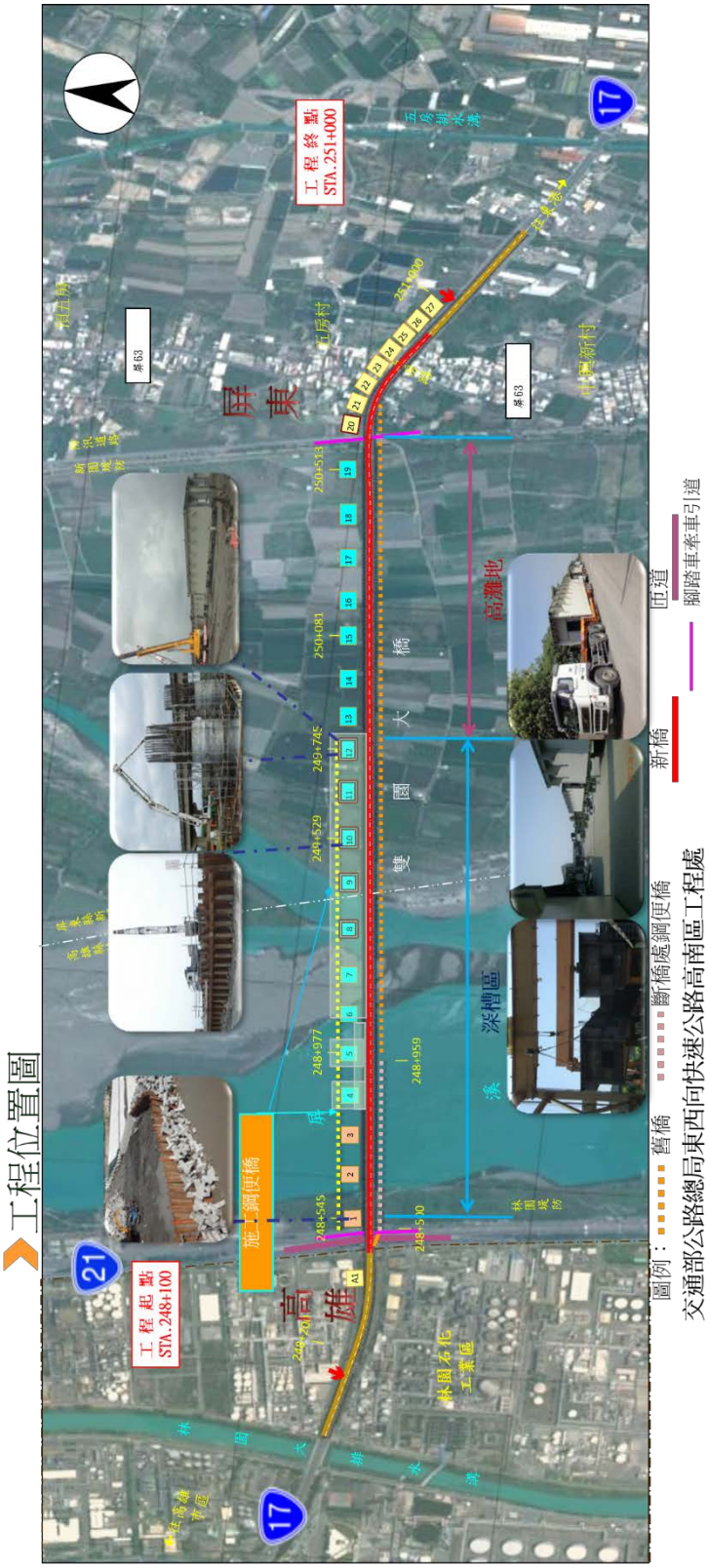


圖 6.21 雙園大橋工程位置圖

資料來源：交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處

參考交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處之工程位置圖之橋墩設置，於數值地形中加入 19 座橋墩，每座橋墩由兩支墩柱組成(圖 6.22(a)、(b))，其地形解析度為 5 公尺，並設定橋墩高度為 9 公尺(圖 6.23)，紅色區域為橋墩位置。

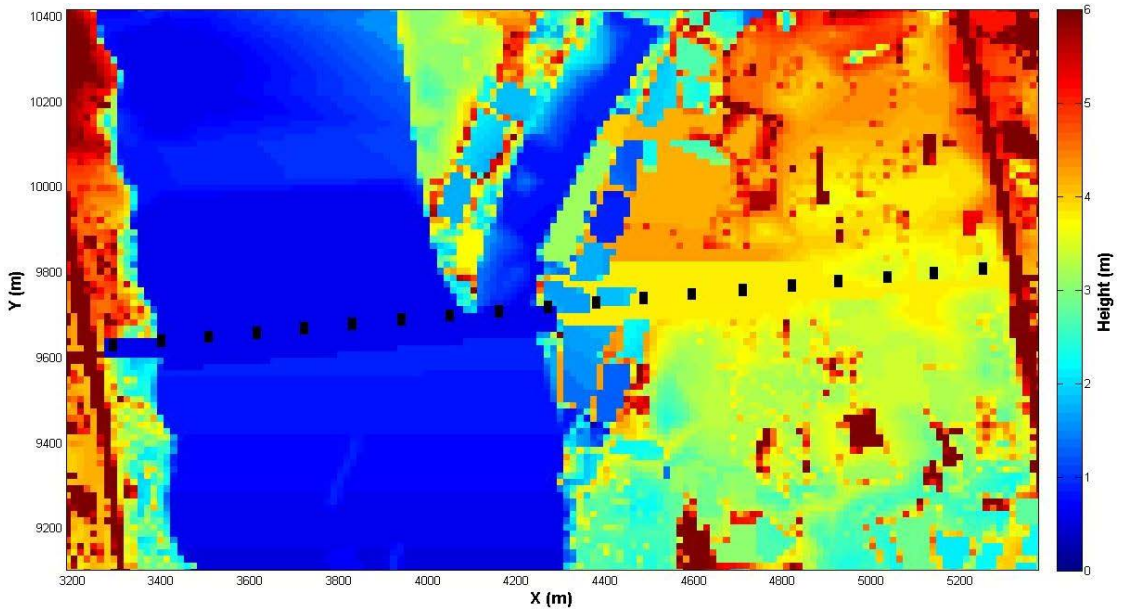


圖 6.22(a) 高屏溪數值地形及橋墩配置

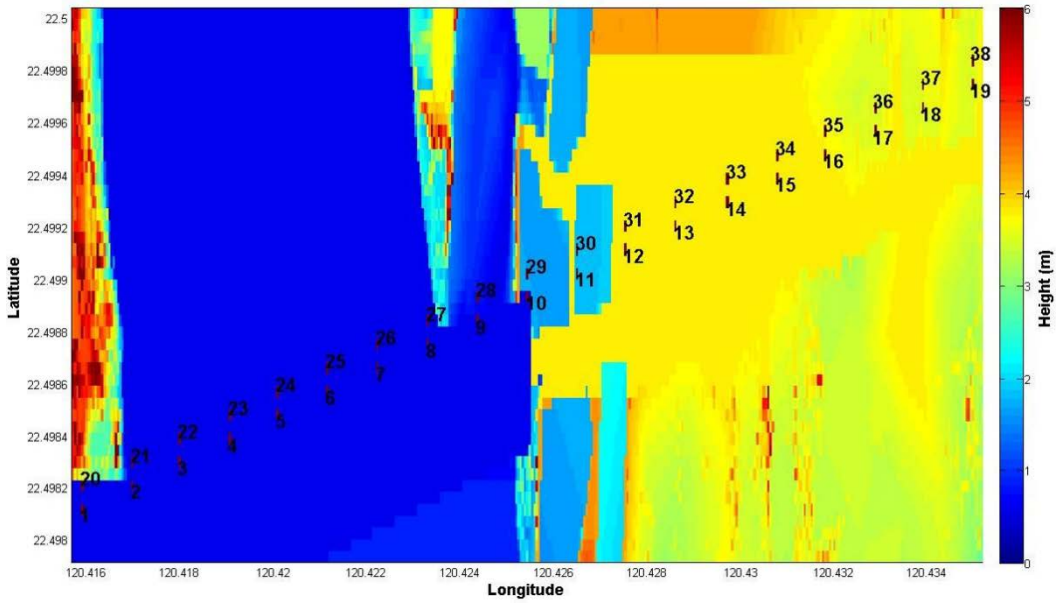


圖 6.22(b)高屏溪數值地形及橋墩配置

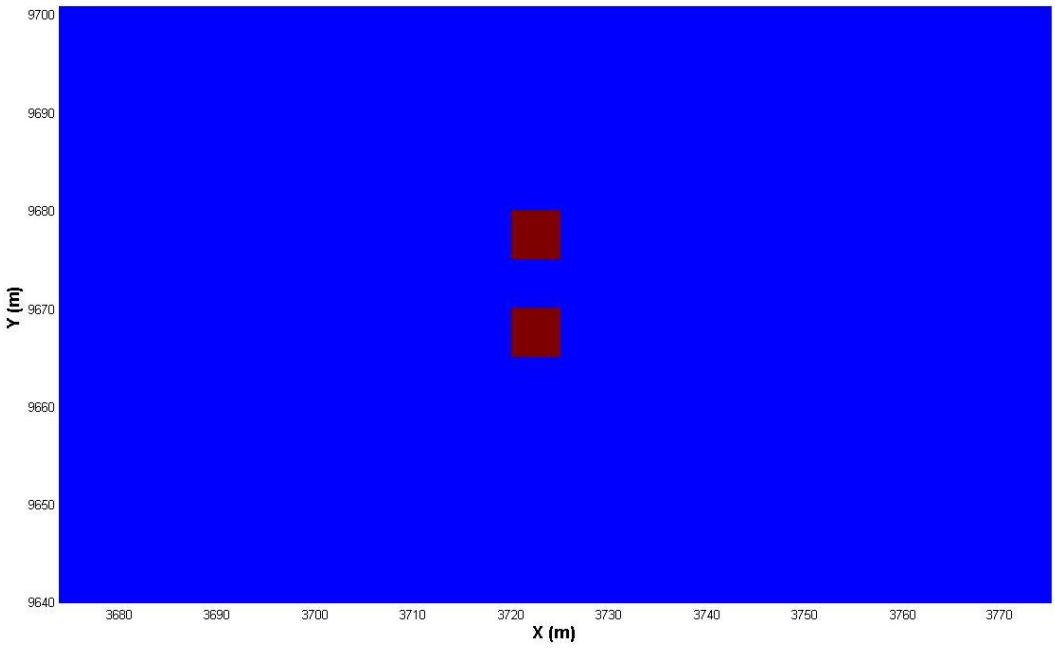


圖 6.23 雙園大橋橋墩墩柱配置

6.6.2 海嘯溯上引致作用力

本節參考交通部頒布之「公路橋梁設計規範」(交通部，2009)之公路橋梁橋墩設計為設計準則，並以該規範的適用性，探討雙園大橋橋梁橋墩所受海嘯沿河道溯上所承受之水流壓力，根據「公路橋梁設計規範」採用之計算橋梁受水流作用力，如下式所示：

$$P_{avg} = 515K(V_{avg})^2 \tag{6.1}$$

式中 P_{avg} ＝平均流水壓力(Pa)

V_{avg} ＝平均水流速m/sec，以流量速率除於流水面積計算之。

K ＝水流作用力常數。平頭墩用1.4，圓頭墩用0.7，尖頭墩其角度為30°或小於30°者用0.5。本研究K採用0.7。

最大流水壓 $P_{\max}$ 為上式計算得之平均流水壓力 P_{avg} 之兩倍。流水壓力以自水位面頂部為 $P_{\max}$ 變化到流線處為 0 之三角型方式分佈如圖6.24。

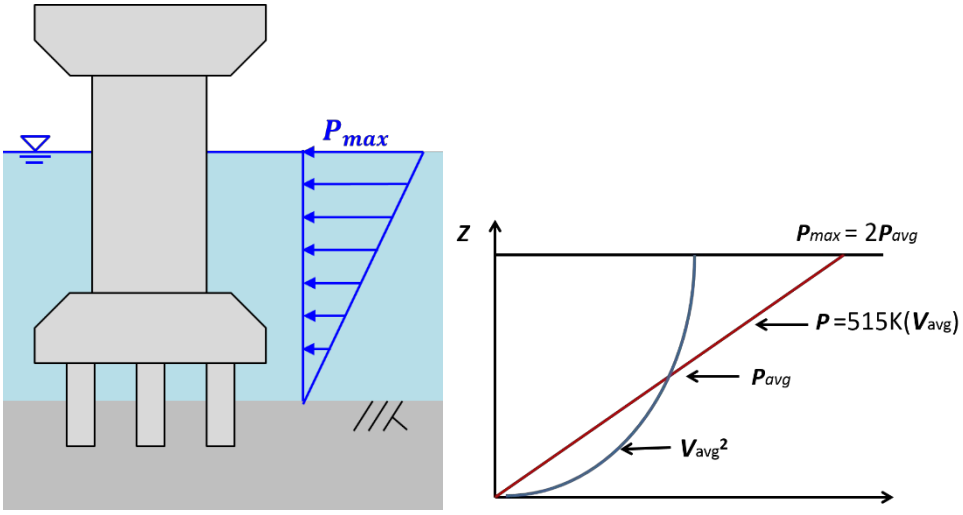


圖 6.24 墩柱受水流作用力之示意與流速與動壓力之關係

而靜壓力 $P_s = \rho gh$ 式中 ρ 為水密度 1000 kg/m^3，g 為重力加速度 9.8m/sec^2，h 為水深(m)，總壓(P_T)=動壓(P_d)+靜壓(P_s)來表示水流於橋墩墩柱上之壓力分佈，其 COMCOT 模擬之水位、流速，便可計算靜壓力(P_s)及動壓力(P_d)，進而求得水流於橋墩與墩柱上之總壓力分佈，圖 6.25 說明模式之計算點位，黑色網格為橋墩，以橋墩墩柱南面的壓力計算來說，其 Zs 的位置為計算靜壓力的水深，以 Vs 的位置為計算動態壓力的流速。

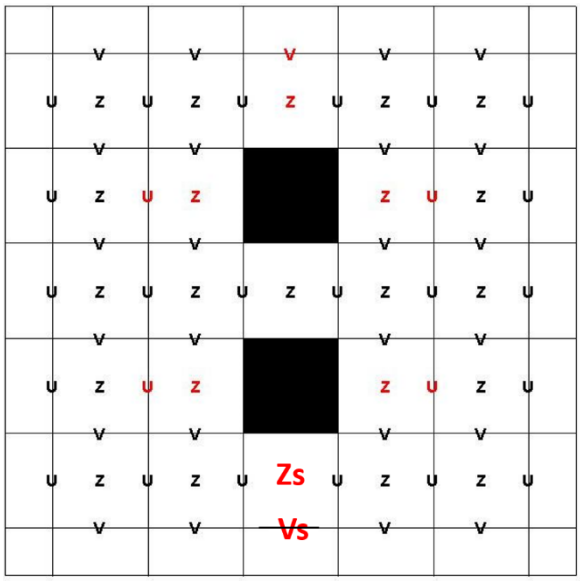


圖 6.25 計算壓力分佈之參數點位

計算結果分析，入射波高要大於三公尺，海嘯湧潮才會沿河道至雙園大橋，紀錄入射波高 3、4、6、10 公尺，其編號 1 至編號 38 橋墩墩柱各面向之最大靜壓力、最大平均動壓力及最大總壓力，圖 6.26(a)、(b)、(c)、(d)為最大總壓力紀錄，將最大靜壓力、最大平均動壓力及最大總壓力列表於附錄五，供相關單位參考。

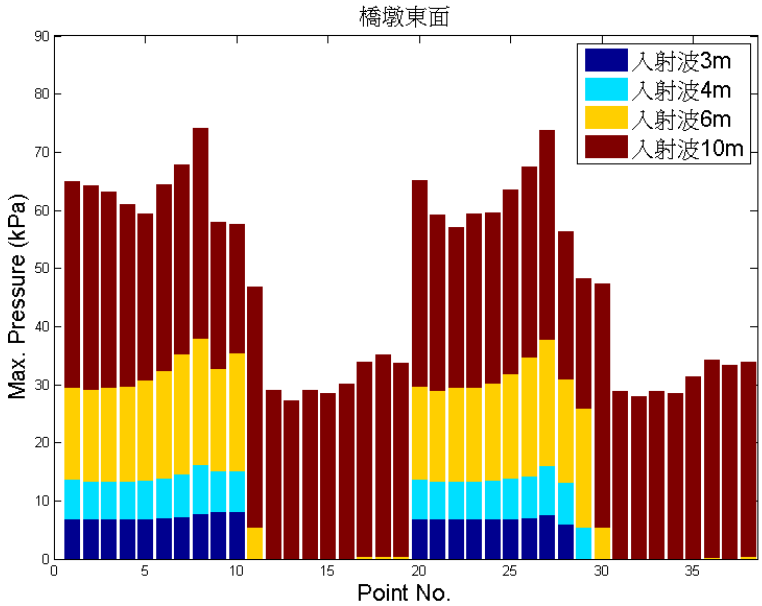


圖 6.26(a)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱東面之最大總壓力紀錄

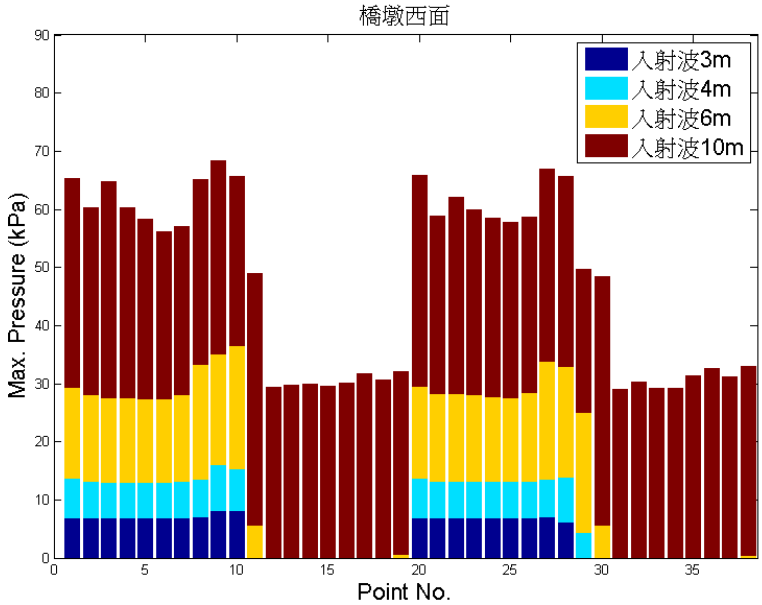


圖 6.26(b)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱西面之最大總壓力紀錄

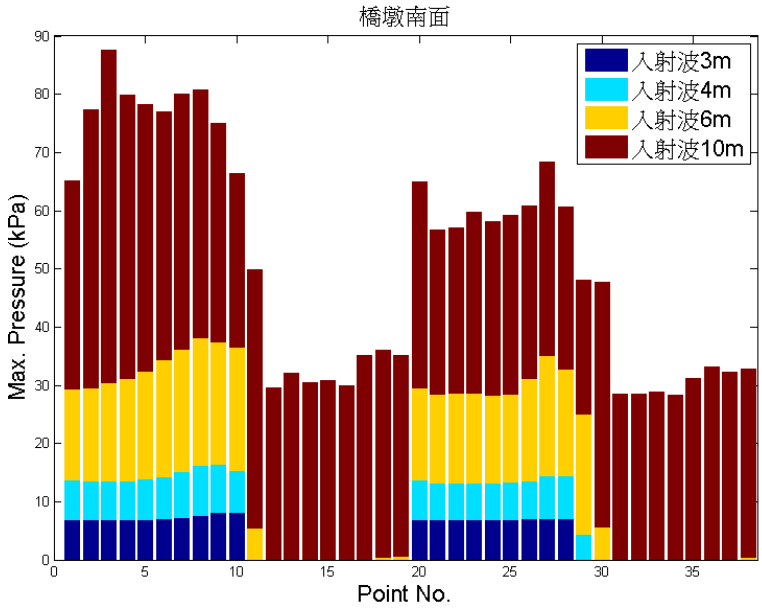


圖 6.26(c)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱南面之最大總壓力紀錄

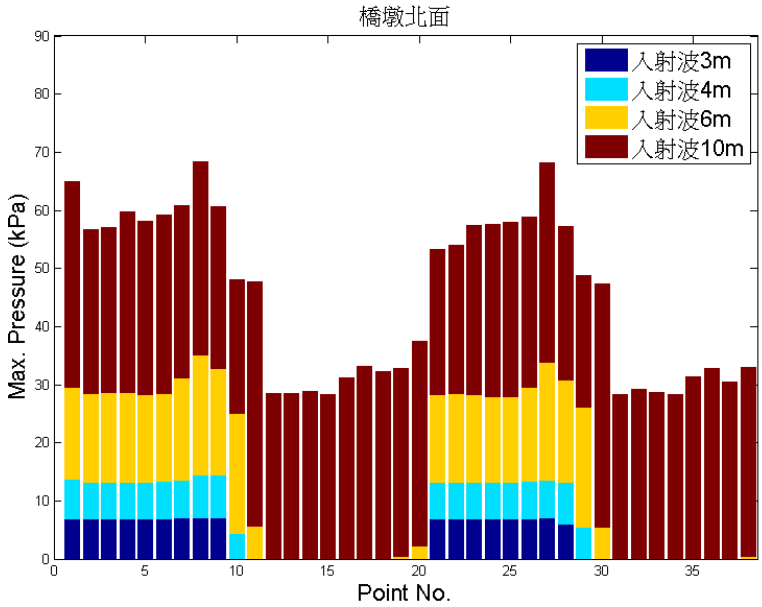


圖 6.26(d)入射波 3、4、6、10 公尺橋墩墩柱北面之最大總壓力紀錄

6.6.3 橋墩沖刷

本研究模式計算上將考慮高屏溪水域的沉積物的粒徑來對橋樑橋墩週遭的沖刷影響；當來自橋墩前方的水流因受到橋墩的阻擋，於橋

墩迎水面會產生停滯現象，但由於後方水流的繼續推擠，會分別朝上下兩側轉移，朝上的水流在橋墩前產生擁水，朝下產生向下射流衝擊底床，於底床和橋墩之間形成渦流系統，此渦流系統稱為馬蹄形渦流系統（horseshoe vortex system）。此渦流系統會對橋墩周圍底床產生淘刷作用形成沖刷坑，並隨時間而加深且擴大(圖 6.27)。

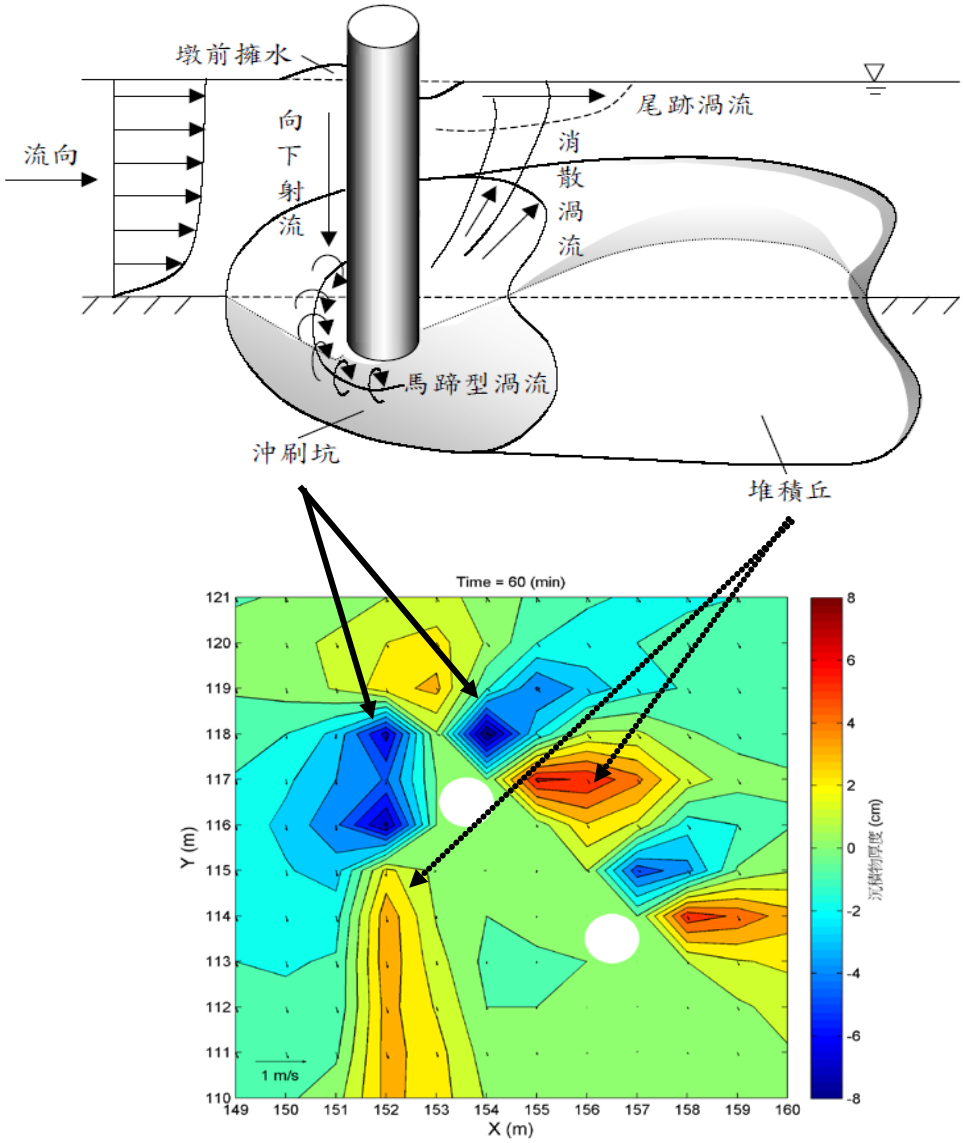


圖 6.27 馬蹄形渦流沖刷情形

而模式目前內建的沉積物模組控制方程式主要參考 Ribberink(1998)的

底床沉積物傳輸公式(半經驗公式)所發展的二維模組。其模式形式如下式 6.2：

$$q_s = \Phi_b \sqrt{\Delta g D_{50}^3}$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

$$\Phi_b = m(\theta - \theta_c)^n \qquad (6.2)$$

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g D_{50}}$$

其中q_s：傳輸速率、Δ：相對密度、g：重力加速度、D_{50}：粒徑中值(median grain diameter)，ρ_s：沙的密度、ρ：水的密度、θ：Shields 參數、θ_c：Shields 參數臨界值、τ_b ：底床剪應力；而(19)式中的τ_b值以模式計算所計算的摩擦力項τ_x 、τ_y來代入。m、n 為回歸係數，根據 Ribberink(1998)將穩流(steady flow)、震盪流(oscillatory flow)以及震盪流結合淨流(oscillatory flow with current)的三種實驗資料一起回歸的結果(圖 6.28)，沉積物模組採用的回歸值為 m=11 和 n=1.65。

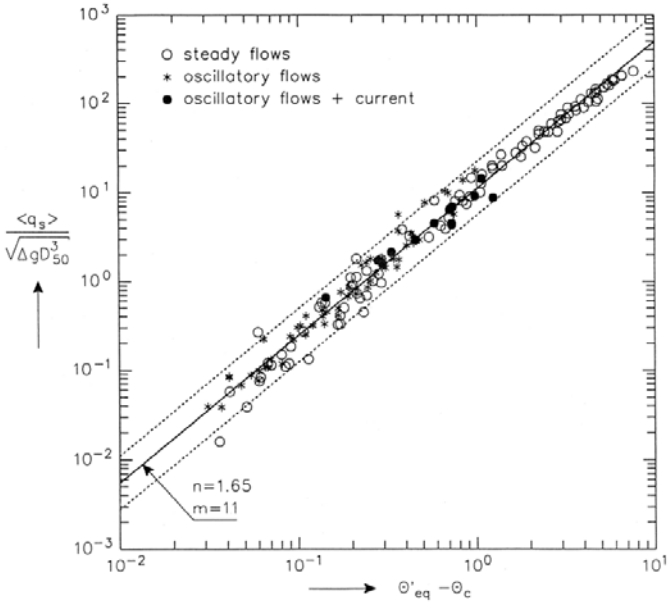


圖 6.28 穩流、震盪流以及震盪流結合淨流之回歸數據值

(Ribberink,1998)

Rance 於 1980 年曾對於矩形的橋墩的沖刷情形進行探討，動力條

件為水波加上水流，在位於矩形直角的附近有較為明顯的淘刷現象；而沉積物堆積位置部分，也都是發生在橋墩後方。橋墩局部淘刷深度方面，可由 Colorado State University equation (Richardson, Dillon, & McKnight, 1993)，即方程式(6.3)進行計算：

$$\frac{Y_{se}}{a} = 2K_1K_2K_3\left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.65} F_r^{\,0.43} \tag{6.3}$$

其中，Y_{se}為局部沖刷深度，Y_1為橋墩上游水深，K_1為橋墩形狀修正係數，K_2為橋墩與流向偏角修正係數，K_3為河床條件修正係數，a 為橋墩迎水面寬度，F_r為橋墩上游福祿數，定義為：

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY_1}} \tag{6.4}$$

將各項參數值代入方程式(6.3)後，可求得局部淘刷深度。因此藉由模式可計算出最大淘刷深度。圖 6.29

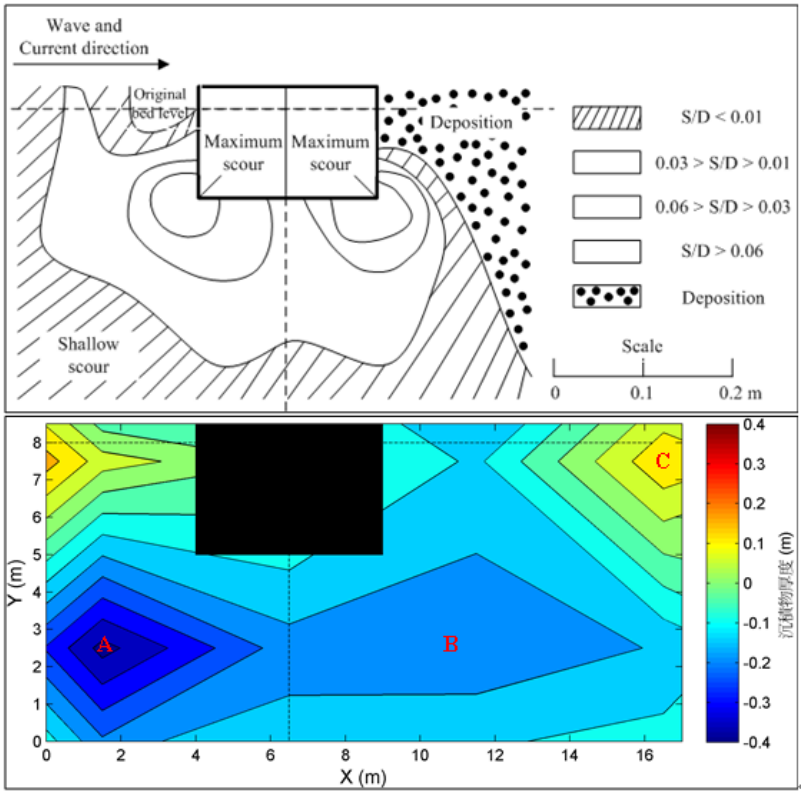
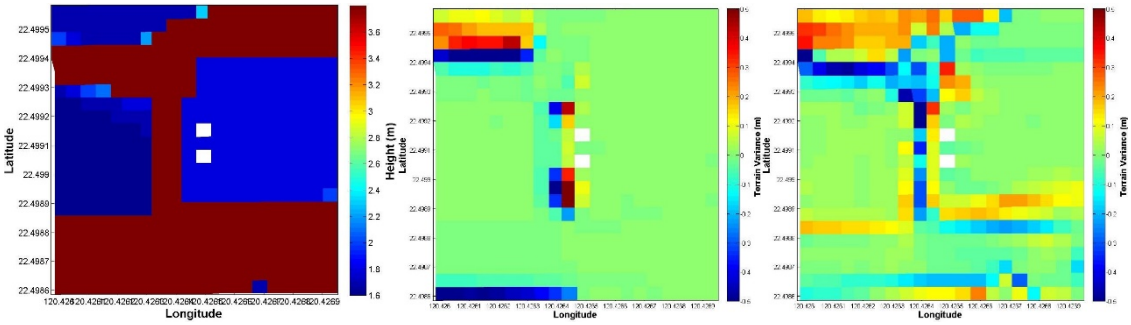
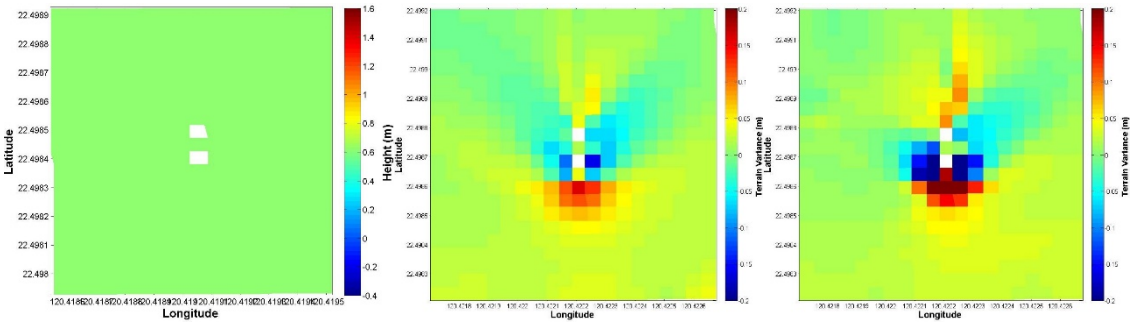


圖 6.29 模式結果比較圖。(上圖)Rance（1980）、(下圖)模式結果

將兩並聯之橋墩墩柱為一組如圖 6.22，編號 1 及編號 20 墩柱為組號 1，依此類推，計算入射波高 3、4、6、10 公尺，取橋墩鄰近一格之格點其最大值(最大堆積)及最小值(最大侵蝕)如圖 6.30，圖中白色區域為橋墩，色階分別代表地形上升及地形下降，計算結果分析整段橋梁之最大堆積及最大侵蝕如表 6.2，其不同入射波高度(3、4、6、10 公尺)之各橋墩組最大堆積及侵蝕如圖 6.31(a)、(b)、(c)、(d)。入射波高 6 米的情況，水位主要由橋墩的西側傳入，而西側有較高的地形，在水體傳入的短時間，容易形成較大的水位差，進而出現較強的流量進行侵蝕作用。而入射波高 10 米的情況則主要由橋墩的南側傳入，南側的地形相對東側較為平坦。不易因地形的因素形成較大的水位高低差。亦即當橋墩附近為平坦地形的時候(第 2 到 7 組)，10 米產生的堆積量會大於 6 米。如果附近地形變化較大的情況下，可能產生如此例相反的結果。



圖左:地形，圖中:6 米入射地形變化，圖右:10 米入射地形變化



圖左:地形，圖中:6 米入射地形變化，圖右:10 米入射地形變化

圖 6.30 (上圖)第 11 組橋墩之沖刷模擬

(下圖)第 4 組橋墩之沖刷模擬

表 6.2 不同入射波最高堆積及最大侵蝕

入射波高度	3 公尺	4 公尺	6 公尺	10 公尺
最大堆積(m)	0.0043 (第 8 組)	0.0162 (第 3 組)	0.3326 (第 11 組)	0.2067 (第 5 組)
最大侵蝕(m)	-0.0071 (第 3 組)	-0.0363 (第 3 組)	-0.1991 (第 5 組)	-0.5389 (第 3 組)

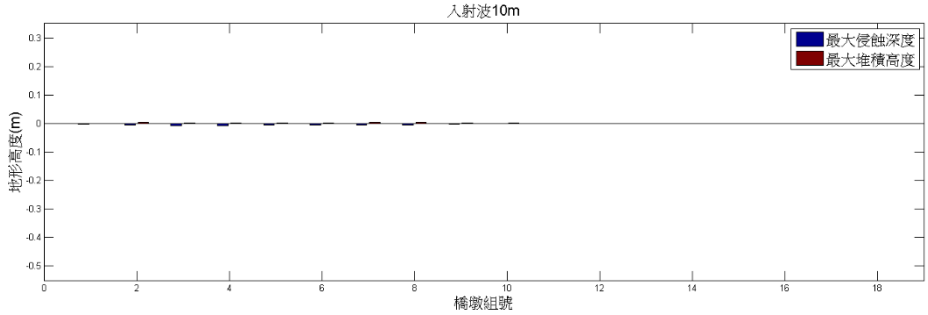


圖 6.31(a)入射波 3 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

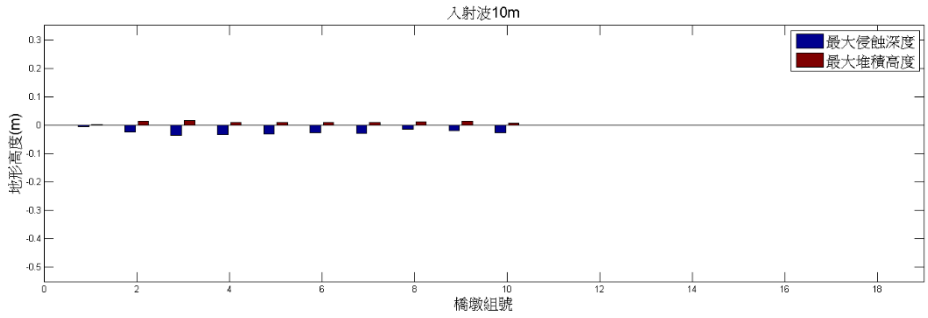


圖 6.31(b)入射波 4 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

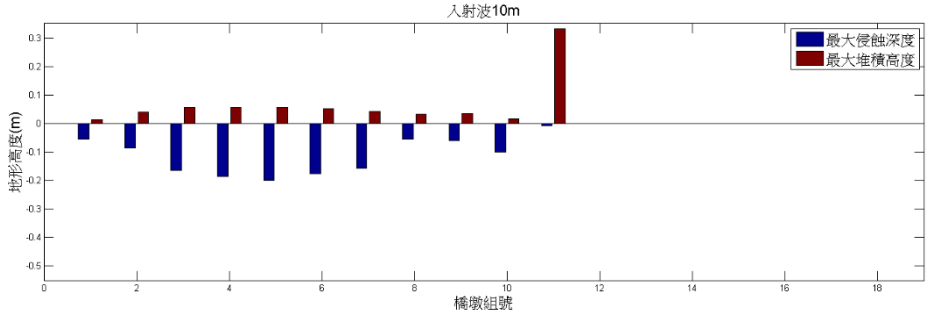


圖 6.31(c)入射波 6 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

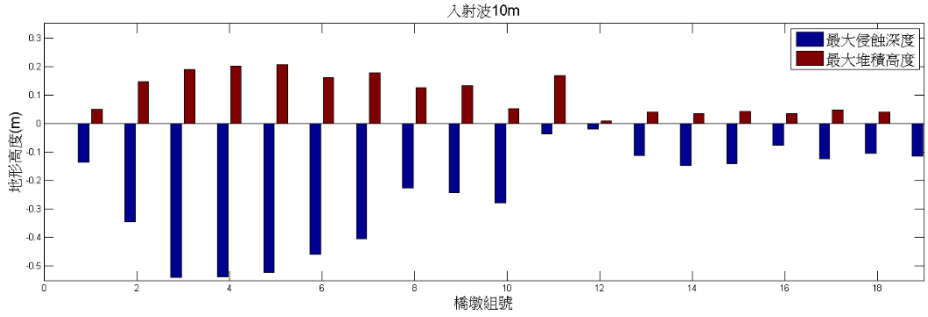


圖 6.31(d)入射波 10 公尺，1~19 組橋墩之最大堆積及侵蝕高度

第七章　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，並加入海嘯沿河道溯上對跨河橋梁之模擬評估，得到部分成果，可供為臺灣港務公司及高雄港務分公司之海嘯來襲應變參考。茲將本研究所獲致之結論與建議分成兩節來陳述。

7.1 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. 精進安平港域及高雄港域海嘯數值模式之互逆格林函數資料庫並建　立子系統，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。
3. 計算結果為安平港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 9.84%，100 年為 19.43%；高雄港未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為 0.55%，100 年為 1.09%。其分析結果安平港風險值高於高雄港，主要原因為安平港之地形大多為沙洲為主；而高雄港現有高程可抵擋大部份震源及地震矩規模所產生之波高，不至於產生溢淹，故其風險值甚低。
4. 參考 Megawati et al.所建立之馬尼拉海溝的地震參數，第一波海嘯約 20 分鐘抵達高屏溪口，海嘯波沿高屏溪河道上溯約 9 公里遠，溯上高度最高水位有 3 公尺高，雙園大橋首當其衝；模擬潮汐為高潮位及低潮位兩種不同邊界之條件並對其溯上之水位無較大影響；當入射波高大於 3 公尺，其海嘯波才會沿高屏溪河道上溯至雙園大橋，其水流對橋墩、墩柱引致作用力，對橋墩受水流衝擊面(南面)之最大總壓力為 87.5kPa。橋墩之鄰近地形最高堆積為 0.21 公尺，最大侵蝕為 0.53 公尺。

7.2 建議

1. 蘇澳港域及花蓮港域 50 年及 100 年之海嘯災害風險評估。
2. 精進蘇澳港域及花蓮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。
3. 模擬海嘯沿高屏溪口向上游傳遞之溯上距離、跨河橋梁橋墩附近水位變化、流速及衝擊力等特性。
4. 模擬海嘯沿高屏溪向上游傳遞時跨河橋梁橋墩週遭之沖刷特性。
5. 建立對於臺灣本島 8 個主要商港港域及高屏溪海嘯模擬成果進行教育訓練。

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、蘇青和、單誠基(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。
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. 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。
9. 交通部(2009)，公路橋梁設計規範。
10. 莫拉克災害台 17 線 248k+100~251k+000 雙園大橋緊急改建工程竣工圖(2009)，交通部公路總局東西向快速公路高南區工程處。
11. 陳伯飛、蕭乃祺、林伯佑 (2009)，利用單位海嘯模擬來建立臺灣海域近海海嘯預警系統,交通部中央氣象局研究成果報告。
12. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基(2011) ，「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。

13. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎(2012) ，「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。

14. 陳冠宇、陳陽益(2012)，東北海岸海嘯溢淹潛勢圖製作之研究，經濟部水利署合作研究計畫期末報告。

15. 陳冠宇、陳陽益、邱永芳、蘇青和、單誠基、李俊穎(2013)，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。

16. 陳譽宗(2012) ，「淺水數值模式在海嘯溢淹範圍與橋樑沖刷之應用」，國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所碩士論文。

17. 柯永彥、邱俊翔、蔡煜青、陳正興(2012)，「受沖刷橋梁耐洪能力評估方法」，國家地震工程研究中心報告(NCREE-12-020)。

18. 全球地震矩網頁 Global CMT http://www.globalcmt.org/.

19. 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/

20. 中央氣象局 http://www.cwb.gov.tw/.

21. 美國 NGDC 資料庫 http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/hazards.shtml.

22. 美國地調所 USGS 資料庫 http://www.usgs.gov/.

23. 美國地調所 USGS 國家地震訊息中心 NEIC 資料庫 http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/.

24. 台灣港務股份有限公司/高雄港務分公司 http://www.khb.gov.tw/

25. 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

26. Chen, G. Y. and C. C. 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).

27. Chen, G. Y., C. C. Liu and C. H. 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.

28. Fritz, H. M., J. V. Hillaire, E. Molière, Y. Wei and F. Mohammed (2012), “Twin tsunamis triggered by the 12 January 2010 Haiti earthquake,” Journal of Pure Applied Geophysics, pp. 1-12, doi:10.1007/s00024-012- 0479-3

29. Gusiakov, V. K. (2005), “Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific,” Marine Geology, 215, pp.3-9.

30. Gutenberg, B. and C. F. Richter (1944), “Frequency of earthquake in California,” Bulletin of the Seismological Society of America, 34, pp.185-188.

31. Hanks, C. T. and H. Kanamori (1979), “A Moment Magnitude Scale,” Journal of Geophysical Research, 84(85), pp.2348-2350.

32. 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.

33. Liu, C. S., I. L. Huang and L. S. Teng (1997), “Structral features off Southwestern Taiwan,” Marine Geology, 137, 305-319.

34. 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.

35. Liu, P. L. F., S. B. Woo and Y. S. Cho (1998), Computer programs for tsunami propagation and inundation., Cornell University.
36. Loomis, H. G. (1979), “Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions,” Marine Geology, 2(1), pp.27-39.
37. Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971), “The displacement fields of inclined faults,” Bulletin of the Seismological Society of America, 61(5), pp.1433-1440.
38. Megawati, K., F. Shaw, K. Sieh, Z. H. Huang, T. R. Wu, Y. Lin, S. K. Tan and T. C. Pan (2009), “Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami”. Journal of Asian Earth Sciences, Vol.36, Issue 1, p.13 - 20. Elsevier
39. Murty, T. S. (1979), Seismic Sea Waves-Tsunamis, Fishery Research Board of Canada.
40. Rance, P.C.（1980）, The potential for scour around large objects. Scour Prevention In：Techniques Around Offshore Structures. Society for Underwater Technology, London, pp.41-53.
41. Richardson J., Dillon, A., & McKnight, C.（1993）, Space － The Final Chapter Why Physical Representations are not Semantic Intentions. A Psychological Perspective, pp.169-191.
42. Ribberink, J.S. (1998), Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. Journal of Coastal Engineering, Vol. 34, pp. 59-82.
43. Sa´nchez, A. and K. F. Cheung (2007), “Tsunami forecast using an adaptive inverse algorithm for the Peru-Chile source region,”

Geophysical Research Letters, Vol. 34, pp. 15, L13605, doi:10.1029/2007GL030158.

44. Scordilis, E. M. (2006), “Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude,” Journal of Seismology, 10(2), pp.225-236.
45. Shuto, N. (1991), “Numerical Simulation of Tsunamis－Its Present and Near Future,” Natural Hazards 4, pp.171-191.
46. Synolakis, C. E. and E. J. Skjelbreia (1993), “The four zones in the evolution of solitary waves on plane beaches,” Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 118(3), pp. 252-266.
47. Wang, X. M. and P. L. F. Liu (2007), Cornell Multigrid Coupled Tsunami model COMCOT) User Manual, Cornell University.
48. Wei, Y., K. F. Cheung, G. D. Curtis and C. S. McCreery (2003), “Inverse algorithm for tsunami forecast,” Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 129(2), pp. 60-69.
49. 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, Vol. 84(4), pp. 974-1002.
50. Wu, Z. and N. E. Huang (2008), “Ensemble empirical mode decomposition: anoise assisted data analysis method,” Advances in Adaptive Data Analysis, Vol. 1(1), pp. 1-41.
51. Xu, Z. (2007), “The All-source Green's Function and its Applications to Tsunami,” Science of Tsunami Hazards, Vol. 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

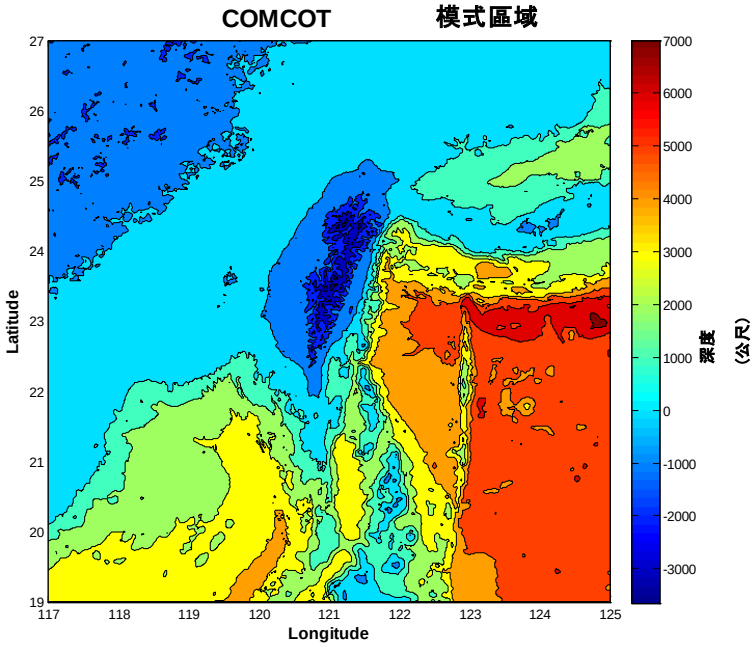
本計劃使用海嘯數值模式COMCOT (Liu et al., 1998)計算水位傳播，模式可選用的淺水方程式包含線性或非線性兩者；本案例採用線性淺水方程式用以描述海嘯波在海域深度超過 50m的變化，不考慮非線性及摩擦力的影響。模式區域範圍在東經 117◦ 至 125◦ ，北緯 19◦ 至 27◦ (圖A1)，網格點 481*481，解析度 1 分。以高雄為例，首先在高雄港外水深 50m的定點s(圖A2)，並且給予水位高度 1m當成波源振幅，經模式計算水位傳播 3 小時(圖A3-A5)，除s點之外，所有的點皆視為接收點r，而s點即為之後海嘯高度預報的水位點。

$$S_t + Q_x + R_y = 0 \tag{A1}$$

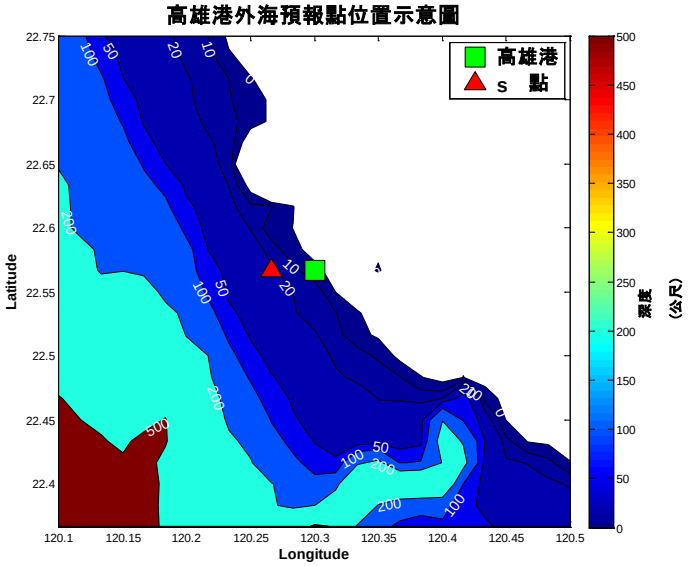
$$Q_t + gdS_x = 0 \tag{A2}$$

$$R_t + gdS_y = 0 \tag{A3}$$

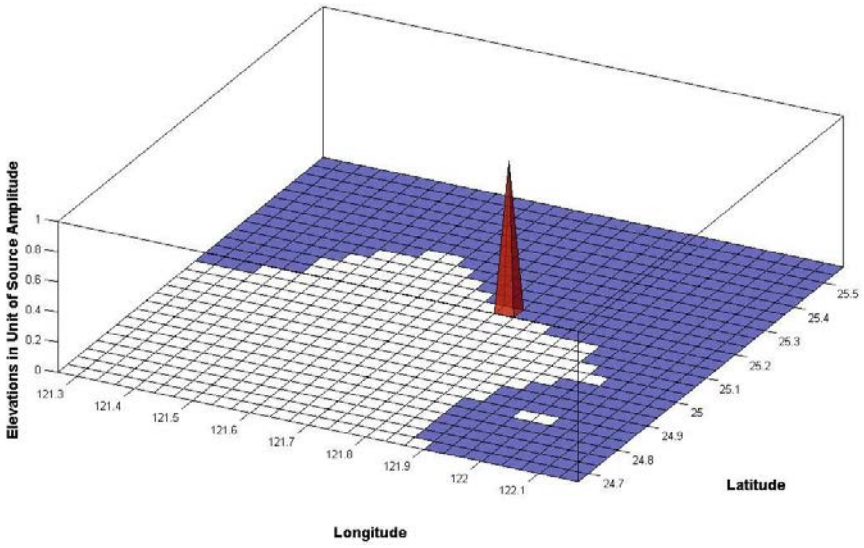
(A1)~(A3)式即是線性淺水方程式；其中 S 為水位高度，Q、R 各為 x、y 方向的流量，d 為總水深，g 為重力加速度。故對於接收點而言，其互逆格林函數值可事先建立資料庫，當地震發生時，僅需知道初始水位後，即可預測當地之實際水位。



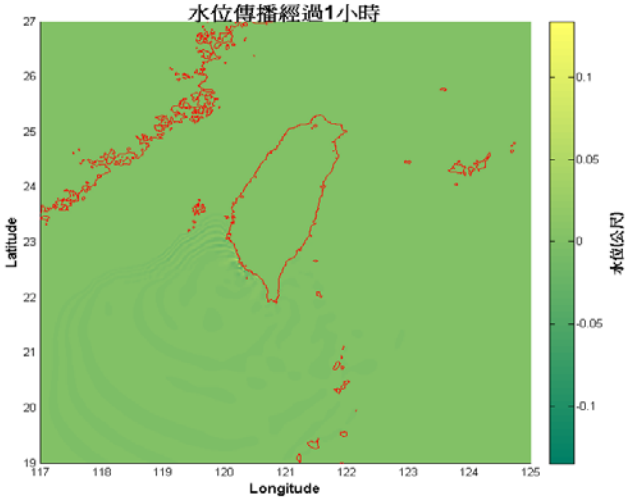
圖A1　互逆格林函數驗證之計算區域圖



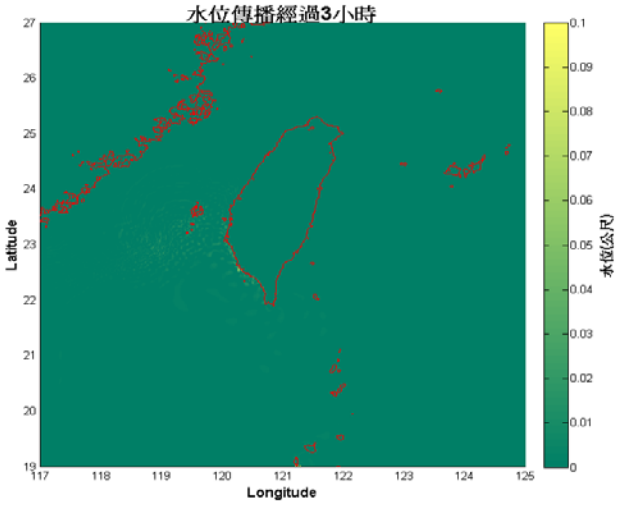
圖A2　海嘯高度預報點(r點)位置圖



圖A3　模式在r點設定1m初始水位



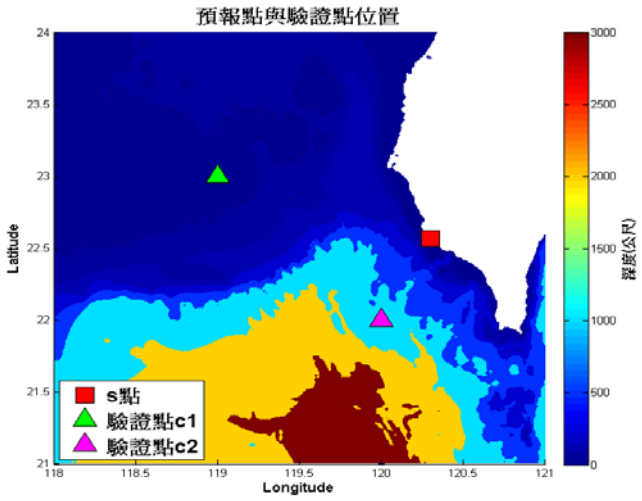
圖A4　r點初始水位傳播1小時後



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

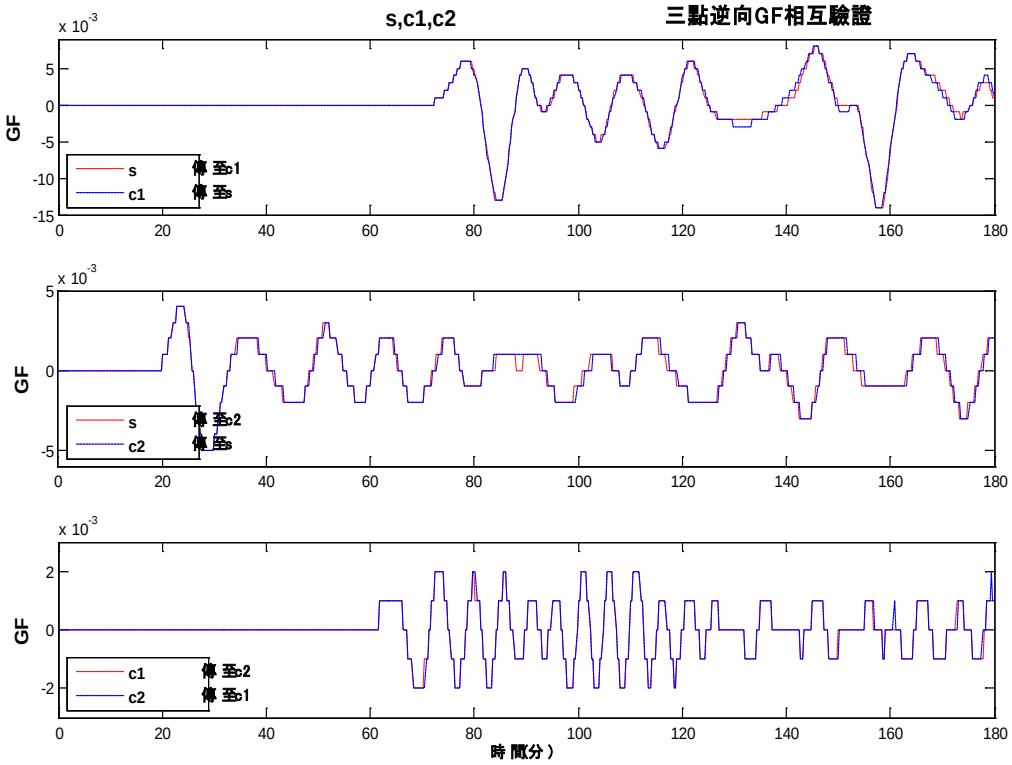


圖 A7　GF 與互逆 GF 一致性之驗證

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。

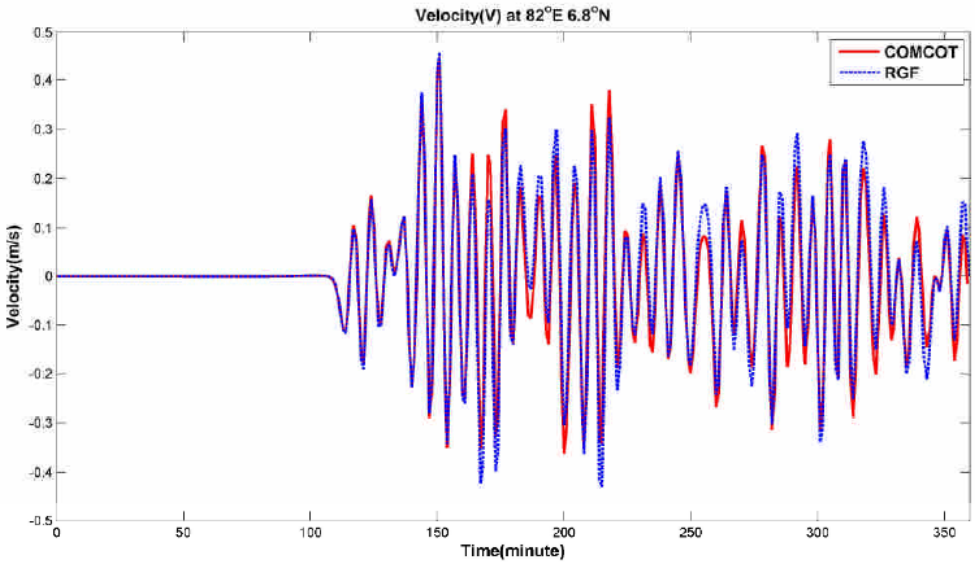


圖 A9　COMCOT 海嘯模式結果與互逆格林函數之比較
(斯里蘭卡　東經 82 度　北緯 6.8 度)

■　外海海嘯預報的格林函數應用(以高雄為例)

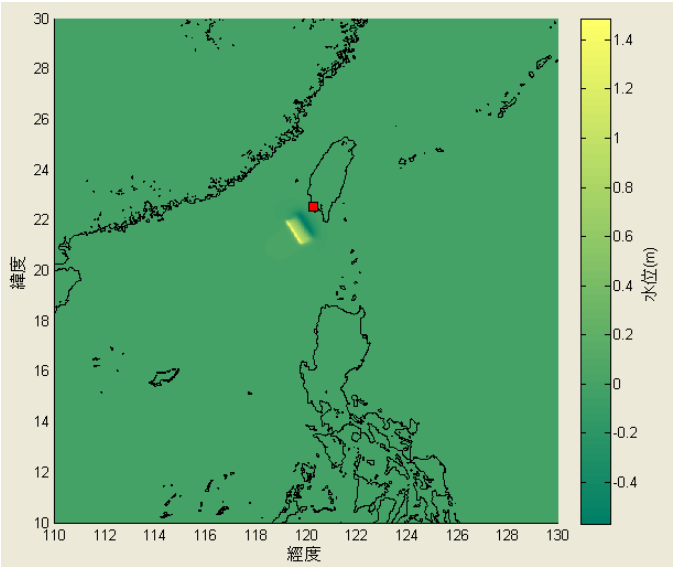
將波源區的所有格林函數乘上當地海床的垂直位移後相疊加，即可求出海嘯高度與到達時間。以下進行案例測試來了解發生海嘯對接收點r的水位影響，第一次試驗代入斷層模式所用的參數同陳(2007) 引用的 2006 年屏東大地震斷層參數，其參數來源為Harvard CMT世界地

震網，使用的地震規模為Kanamori(1977)提出的地震矩規模(moment magnitude，Mw)，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。

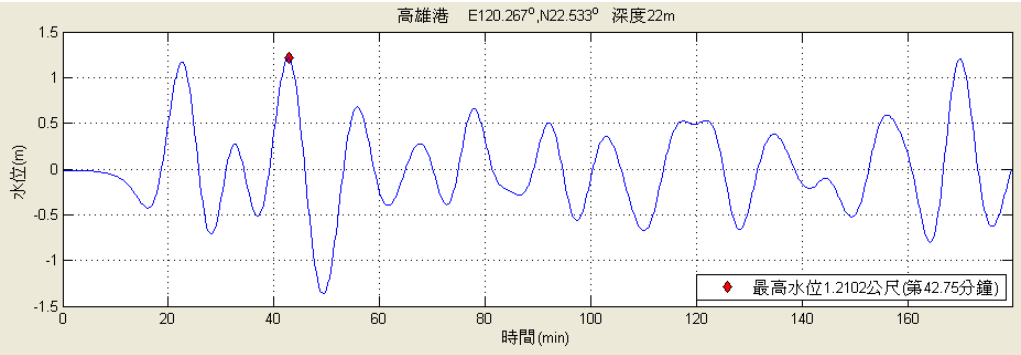
表A1 的參數代入斷層模式所得的海嘯起始水位如圖A10。經由互逆格林函數計算出的s點預報水位結果如圖A11。預報結果顯示在接收點r處受海嘯作用引起的水位最大值達 1.2102m(接近第 42 分)，對高雄港近岸有明顯之影響。

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

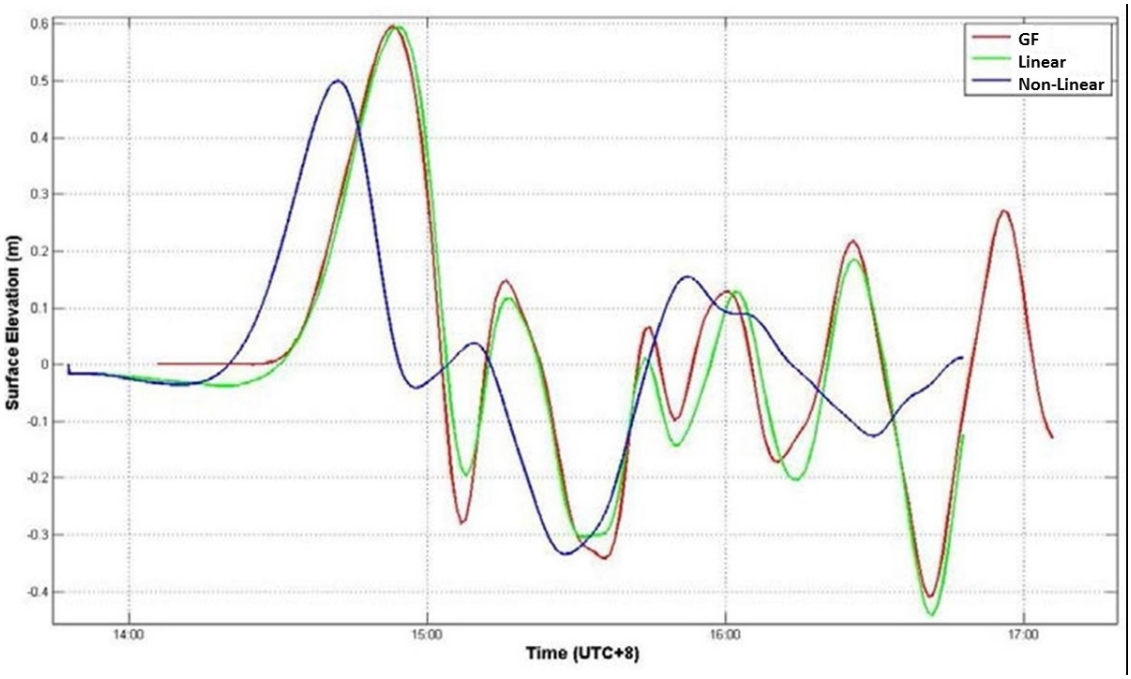


圖A11　於高雄港接收點r的海嘯高度預報

■ 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(以臺中港為例)

在本節中，我們在臺中港外海虛擬一個地震矩規模 Mw7.5，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臺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 格林函數、COMCOT線性模式及非線性模式在臺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

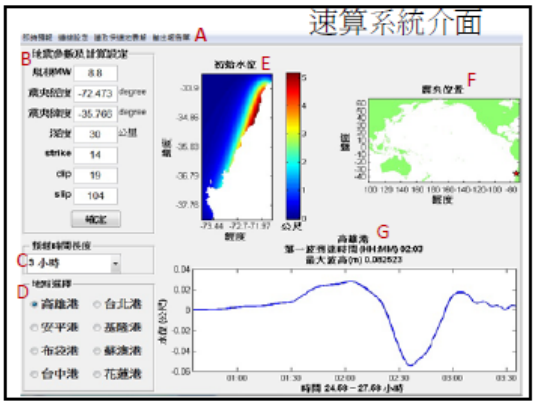
1. 速算系統介面介紹
2. 輸入地震參數操作示範
3. 即時預報設定介紹
4. 即時預報操作示範

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

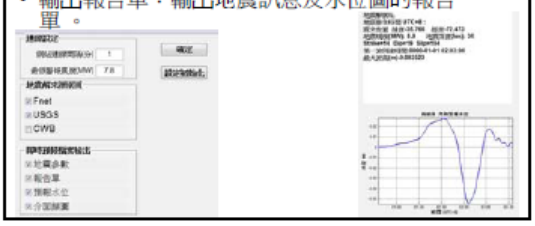
速算系統介面



頂部選單(A)

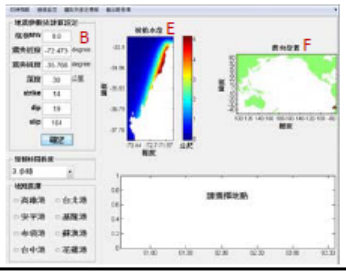
即時預報 連線設定 讀取快速地震解 輸出報告單 A

- 即時預報：開啓(或關閉)即時預報。
- 連線設定：開啓連線設定介面(左下圖)。
- 讀取快速地震解：讀取即時預報儲存的地震參數檔(mat)輸入地震參數面板(B) 。
- 輸出報告單：輸出地震訊息及水位圖的報告單 。



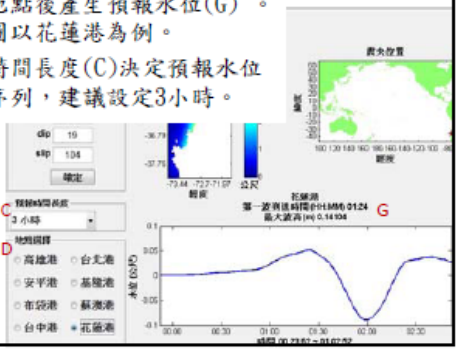
地震參數面板(B)

- 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) 。



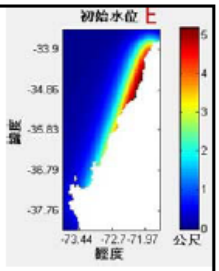
地點選擇面板(D)

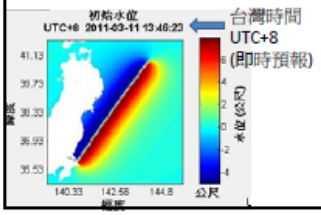
- 選擇地點後產生預報水位(G) 。右下圖以花蓮港為例。
- 預報時間長度(C)決定預報水位的時序列，建議設定3小時。



初始水位(E)

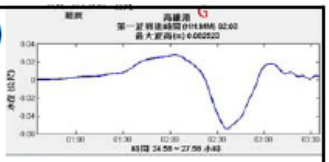
- 地震發生時所引發的海面水位變化。顏色代表水位高度(m)。



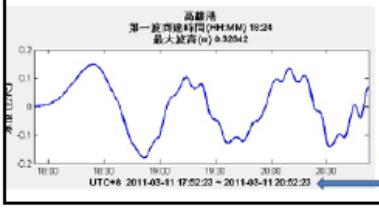


預報水位(F)

- 3小時水位時序列
- 第一波到達時間(HH:MM)
- 最大波高(m)



地震發生後的24.58到27.68小時水位



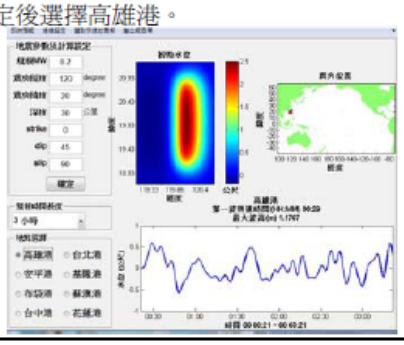
台灣時間 UTC+8
(即時預報)

目前進度

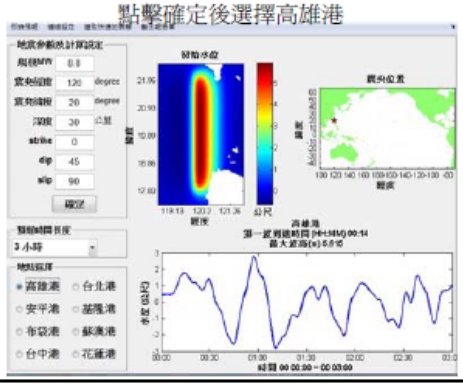
- 台灣國際商港海嘯速算系統

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

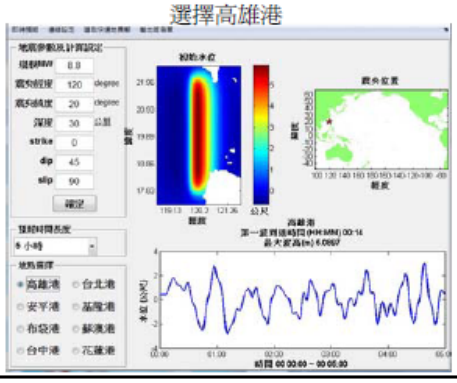
- 地震參數面板輸入MW8.2、經度120、緯度20、深度30、strike/dip/slip 0/45/90 點擊確定後選擇高雄港。



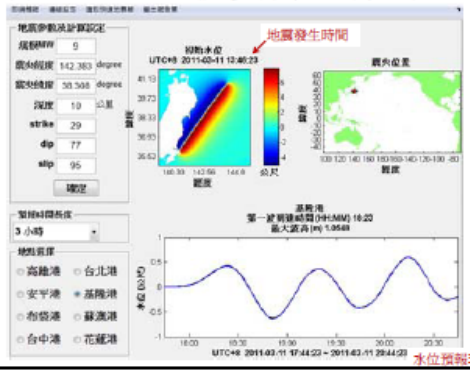
MW更改為8.8
點擊確定後選擇高雄港



預報時間長度更改爲5小時
選擇高雄港



讀取日本311地震參數後選擇基隆港



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

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。

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 Bureu)

台灣寬頻地震網資訊系統

http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/

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)。

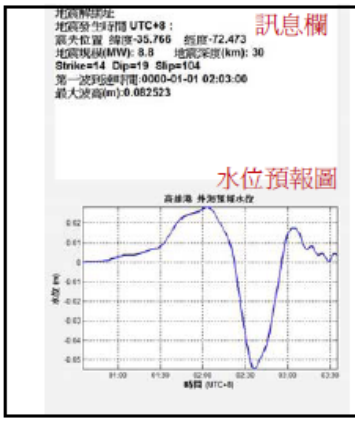
地震參數

http://www.fnet.bosai.go.jp/event/tdmt.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 36 00 4 141.5 37.5 65 22/75/78 241/19/128

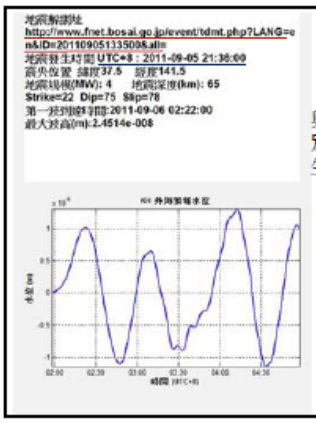
報告單 (非即時預報)



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：記錄地震解參數來源網頁。
- 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。

報告單 (即時預報)



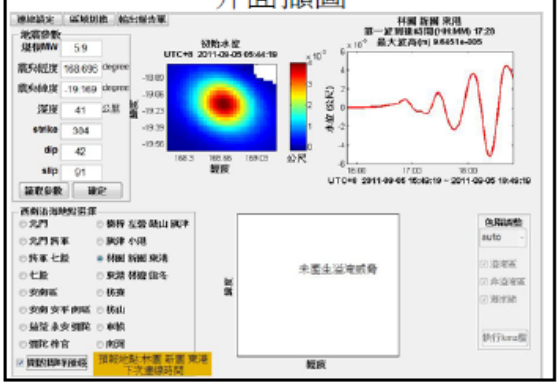
與非即時預報的報告單差別在地震解網址跟地震發生時間(UTC+8)的記錄。

預報水位輸出檔

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

七欄位依序為年、月、日、時、分、秒和水位(m)

介面擷圖

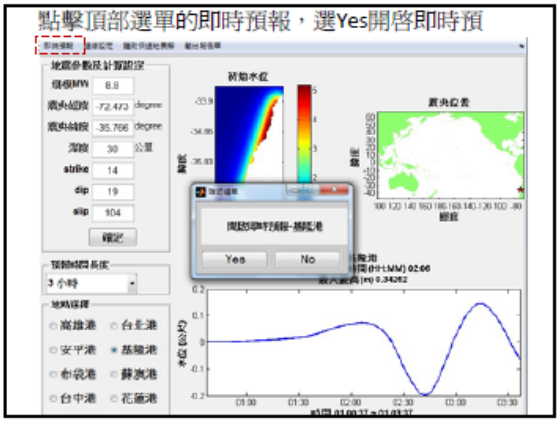


目前進度

- 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

點擊頂部選單的即時預報，選Yes開啓即時預



- 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

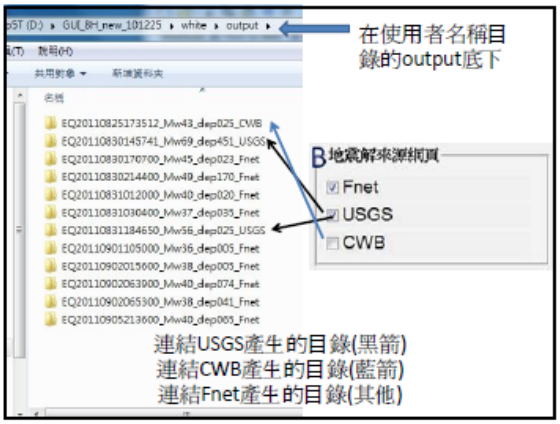
  .\tony\output\EQ20110907015500_Mw51_dep032_Fnet

- 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)

USGS Centroid Moment Solution

NORTHERN SUMATRA, INDONESIA

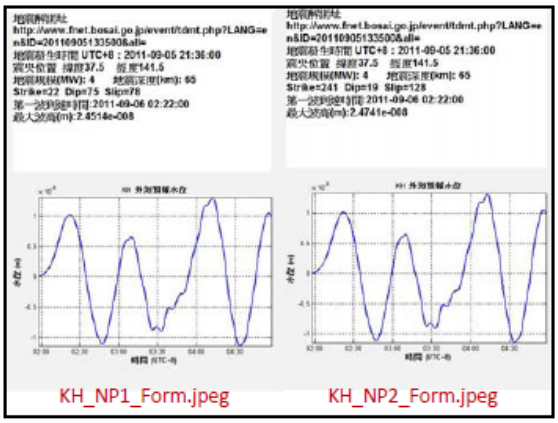
USGS網頁的
地震解表單

```
11/09/05 17:55:11.46

Epicenter:   2.996   97.986
MW 6.8

USGS CENTROID MOMENT TENSOR
11/09/05 17:55:34.70
Centroid:   2.545   97.848
Depth  50          No. of sta: 115
Moment Tensor:     Scale 10**15 Nm
  Mrr=-0.45        Mtt= 0.33
  Mpp= 0.13        Mrt= 1.37
  Mrp=-1.53        Mtp=-0.31
 Principal axes:
  T  Val= 2.00  Plg=30  Azm= 46
  N      -0.06     4      140
  P      -2.02    52      235

Best Double Couple:Mo=2.0*10**15
 NP1:strike=107 Dip= 8 Slip=-122
 NP2:       320    83      -86
```

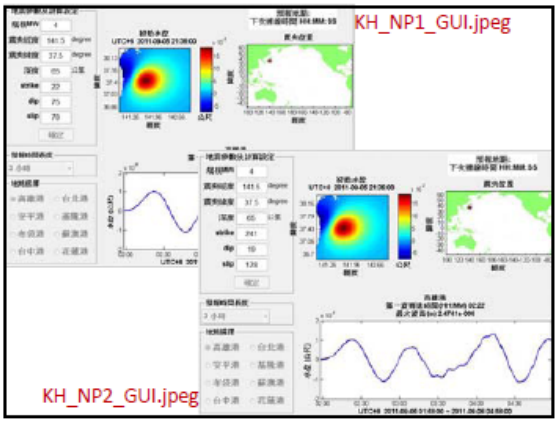
兩組strike/dip/slip
NP1 107/ 8/-122
NP2 320/83/-86

F-net網頁的
地震解表單

兩組 strike/dip/slip
NP1 22/75/ 78
NP2 241/19/128
rake即爲slip



KH_NP1_Form.jpeg KH_NP2_Form.jpeg

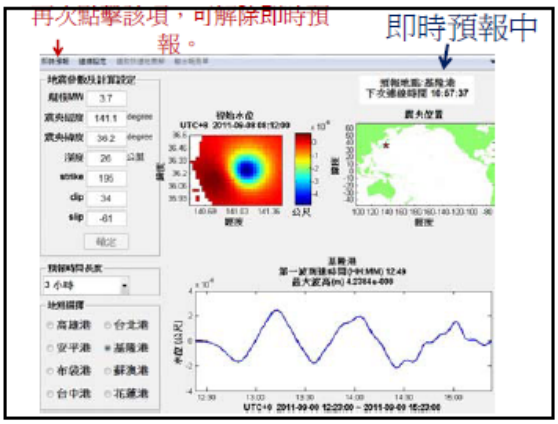


KH_NP1_GUI.jpeg

KH_NP2_GUI.jpeg

再次點擊該項，可解除即時預報。

即時預報中



注意事項

- 螢幕解析度需在1024*768以上。
- 如在windos xp系統執行即時預報，建議每兩天重新執行介面。


連線設定
H
網站連線間隔(分)
1
最低警報震度(MW)
7.8
確定
設定初始化
地震解來源線圖
I
Fnet
USGS
CWB
即時預報檔案輸出
J
地震參數
報告單
預報水位
介面插圖

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&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	祕魯-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

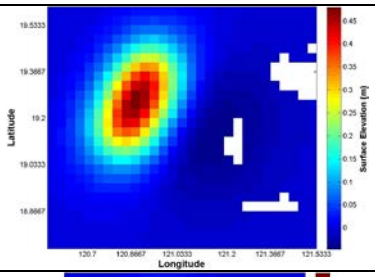
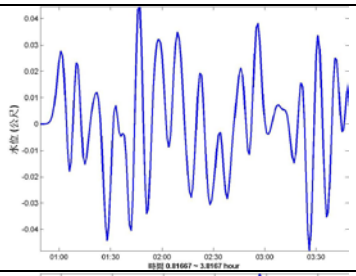
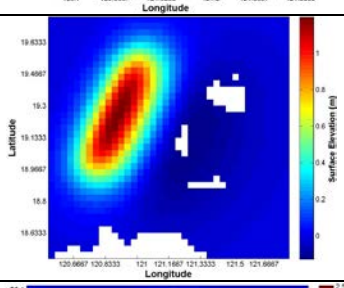
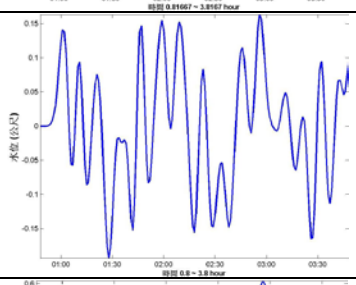
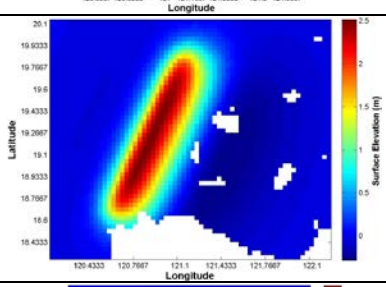
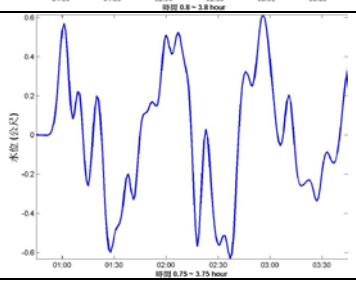
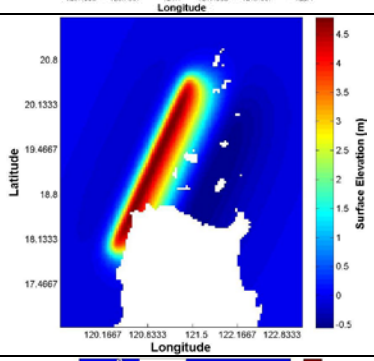
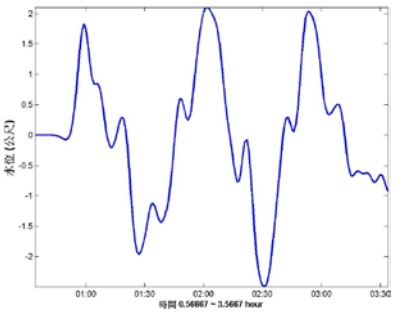
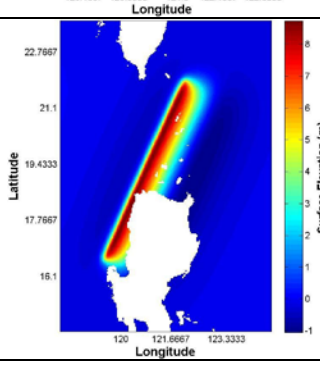
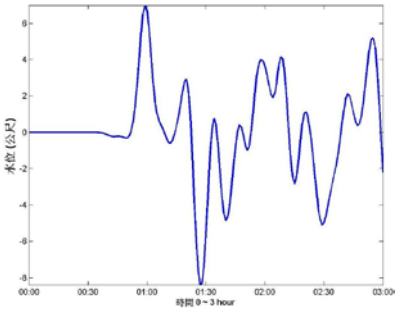
27		127	6.9	15000	-68.0583	39.84444	90
28		125.99	5.12	15000	78.12844	36.55519	90
29		126.83	2.92	15000	36.56601	36.54962	90
	琉球海溝						
30		134.2388	32.95372	15000	77.60519	73.19008	90
31		128.8532	27.57966	15000	52.24941	69.8255	90
32	伊豆小笠原海溝	139.95	34.71	15000	-12	39.03196	90
33		139.77	33.2	15000	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	千島海溝&日本海溝	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&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	祕魯-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

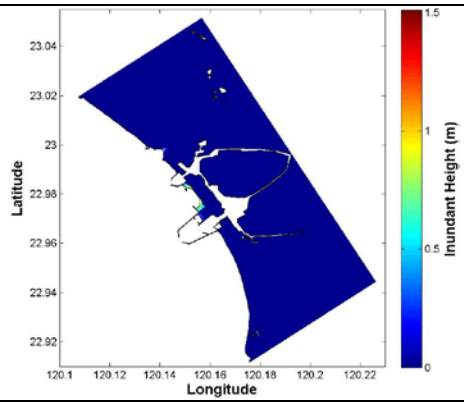
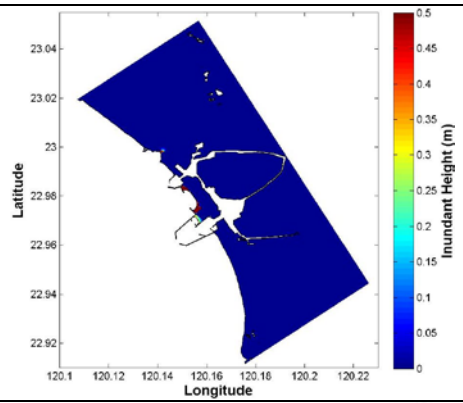
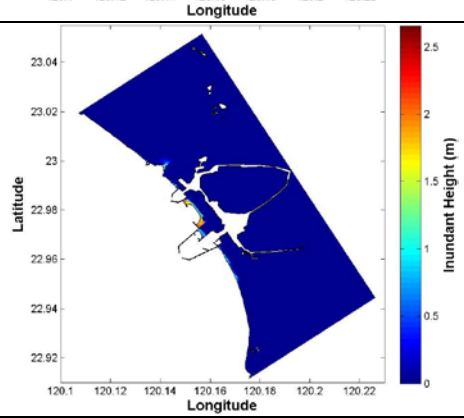
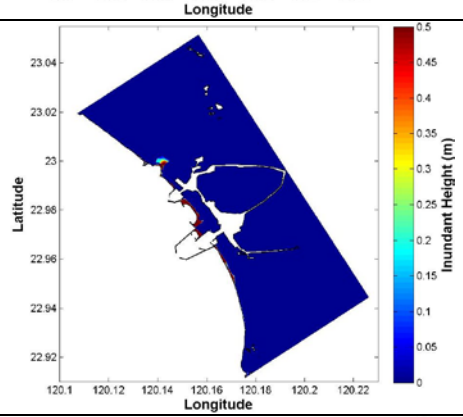
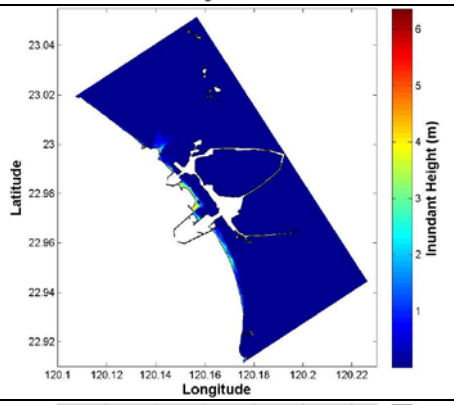
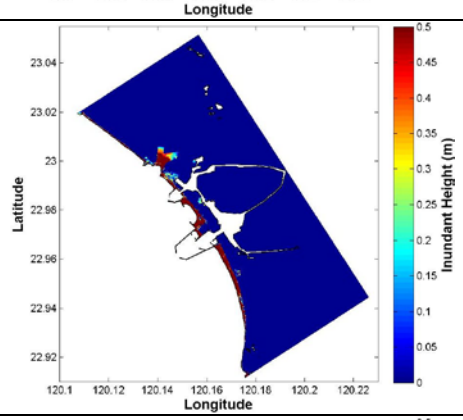
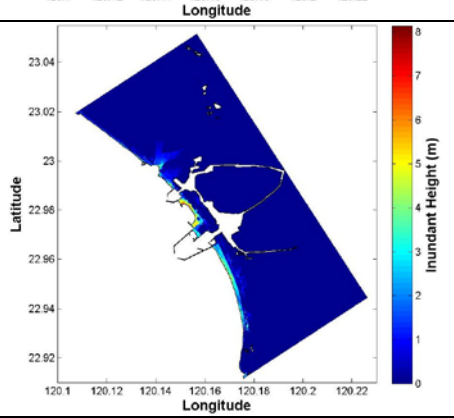
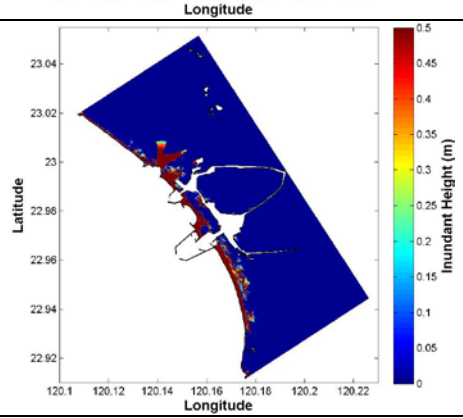
93		-80	-6.95	15000	51.72814	30.53333	90
94		-79	-9.07	15000	38.22244	32.85915	90
95		-78	-10.95	15000	58.62027	35.38095	90
96		-77	-13.14	15000	42.5585	31.82456	90
97		-75.76	-15.09	15000	71.84839	35.97638	90
98		-73.03	-17.12	15000	-89.4824	32.20408	90
99		-71.21	-18.95	15000	28.81873	32.14286	90
100		-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
	馬尼拉海溝						
114		120.7337	19.29939	15000	15.72075	38.07018	90
115		120.3473	14.14368	15000	-7.46601	40.17293	90

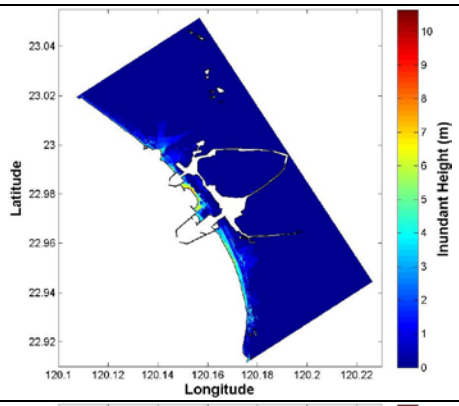
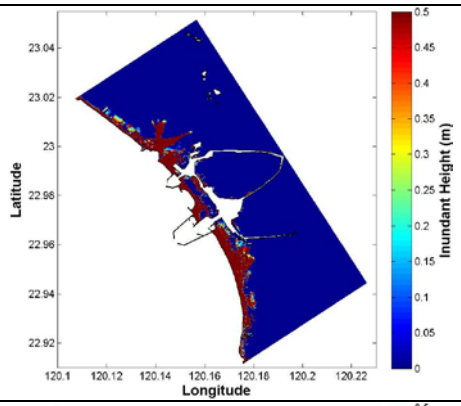
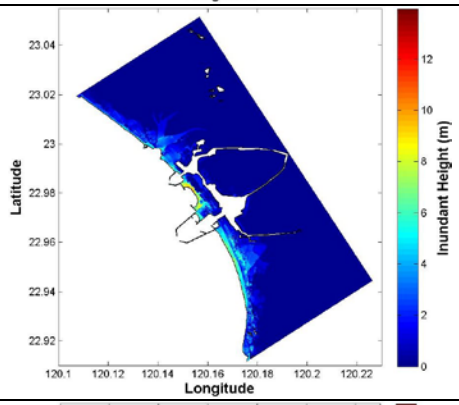
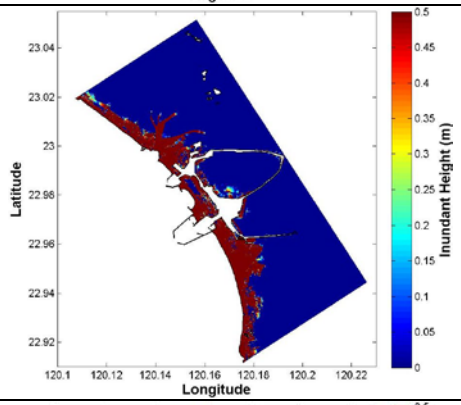
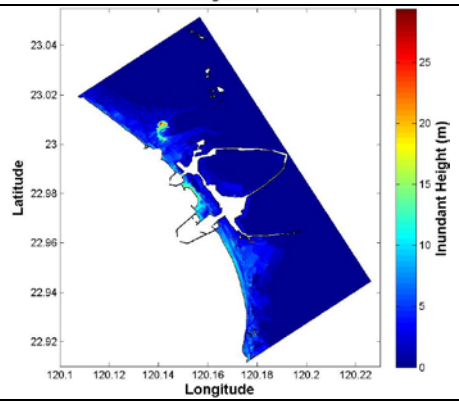
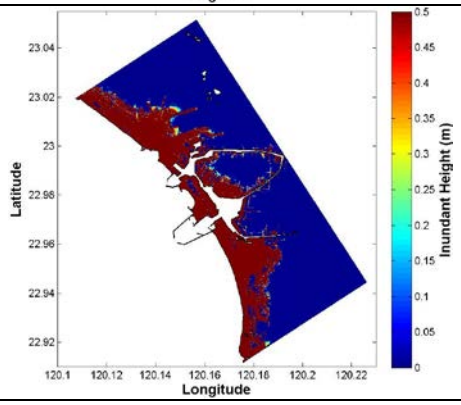
附錄四　地震矩規模與水位關係及溢淹圖

安平港

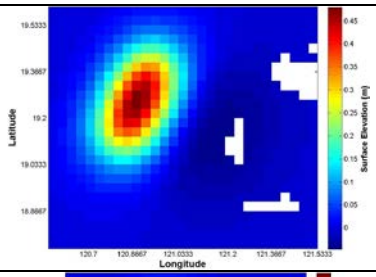
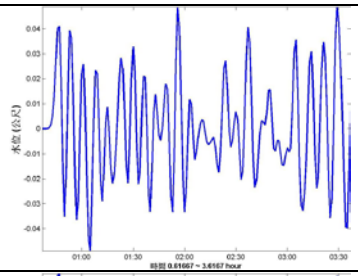
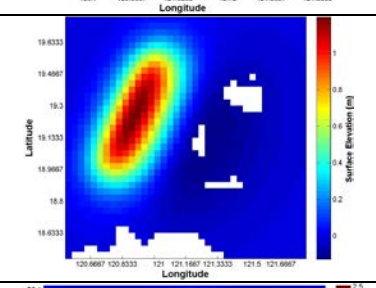
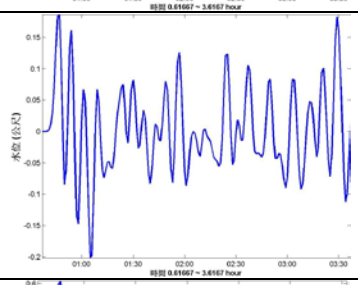
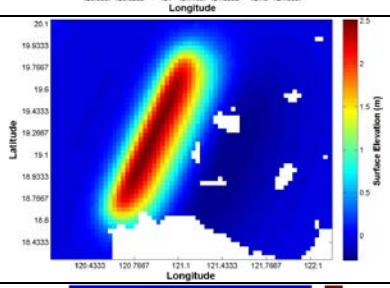
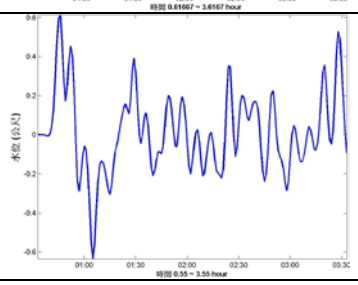
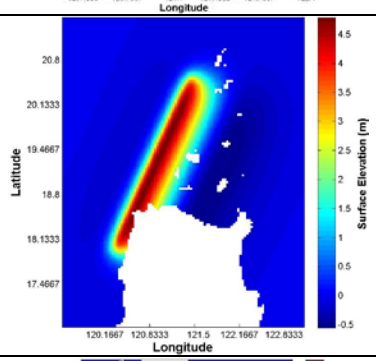
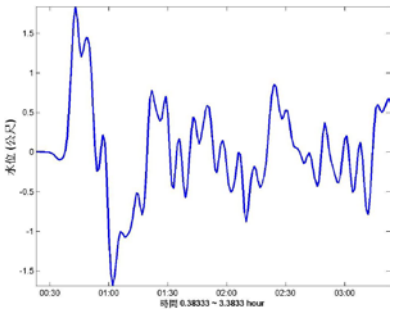
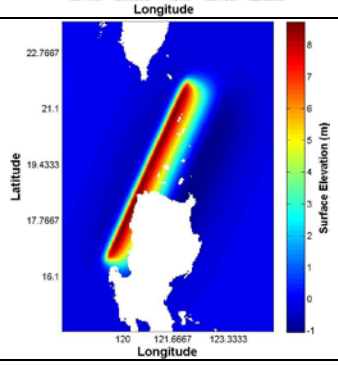
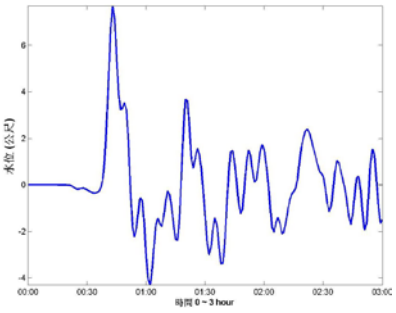
地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.04		
Mw=7.5 Max. wave=0.15		
Mw=8.0 Max. wave=0.6		
Mw=8.5 Max. wave=2		
Mw=9.0 Max. wave=7		

安平港

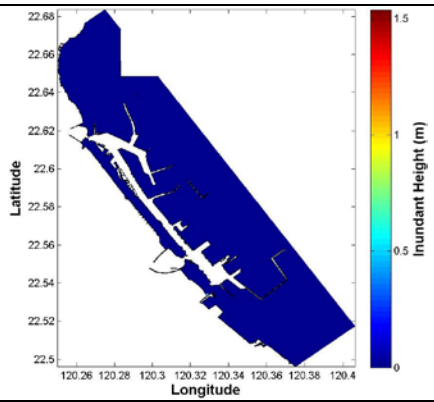
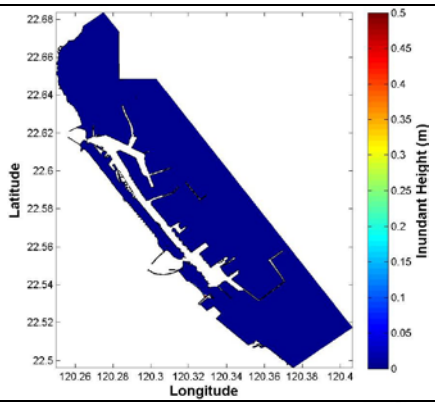
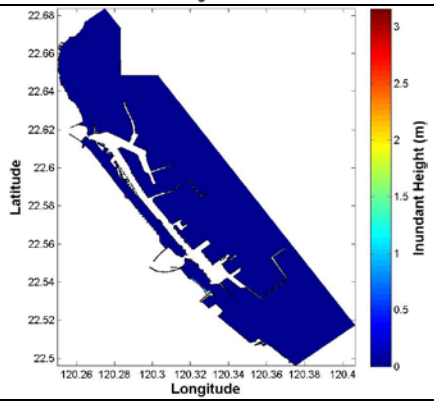
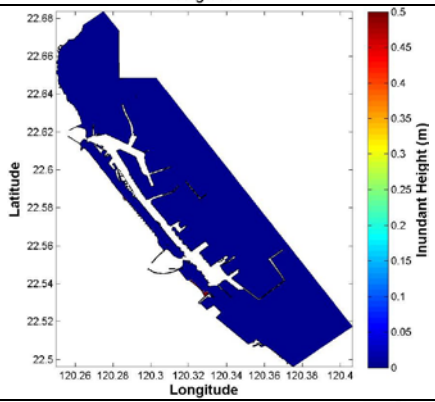
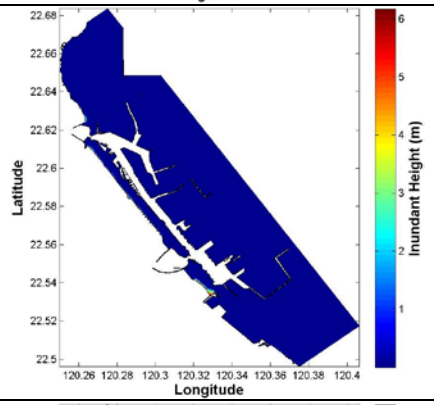
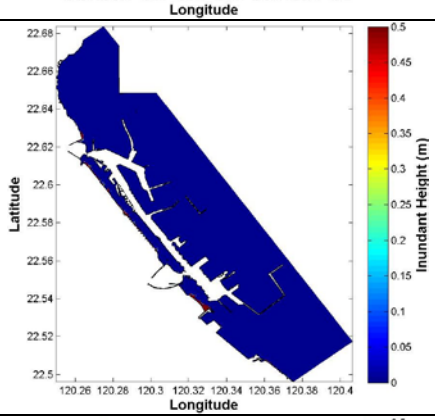
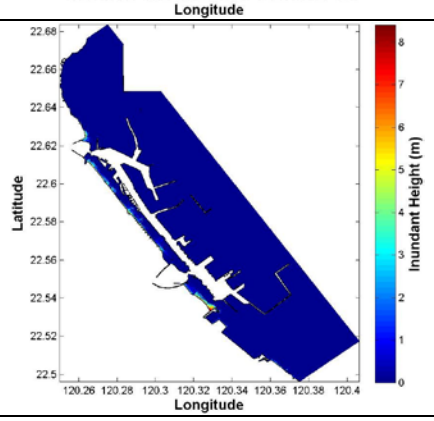
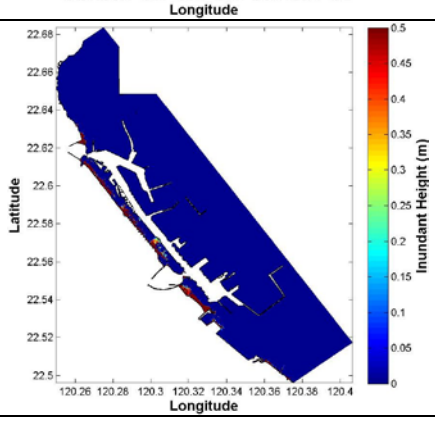
入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
0.5(m)		
1(m)		
2(m)		
3(m)		

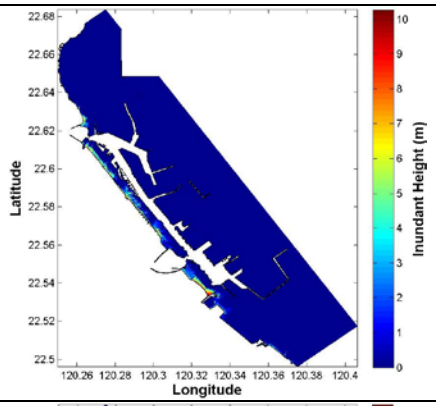
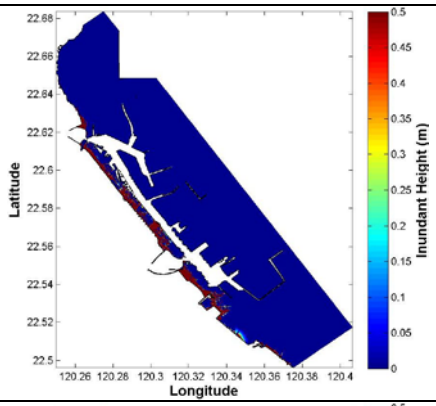
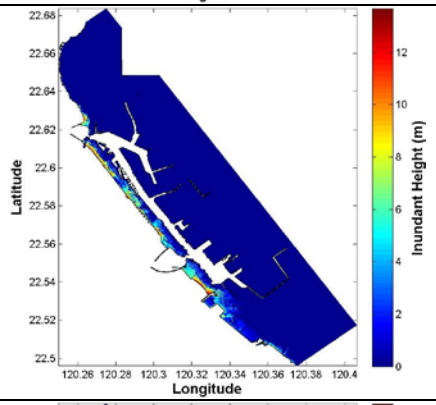
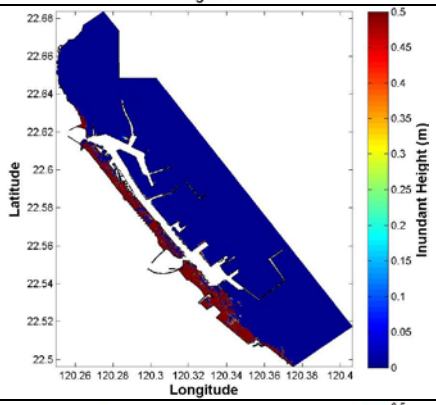
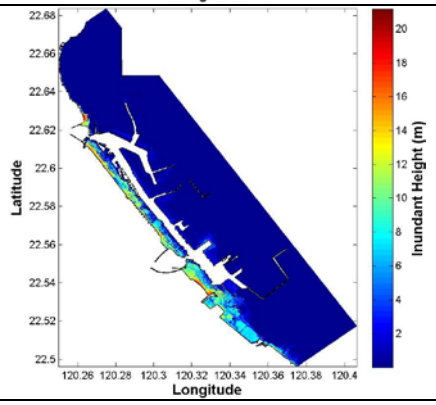
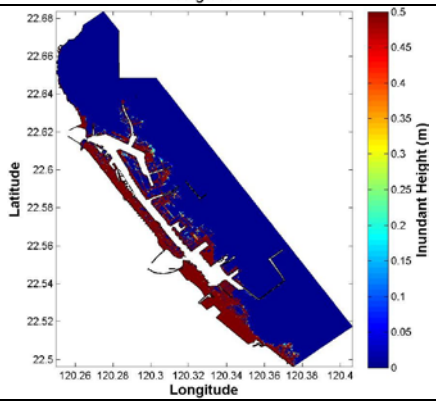
入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
4(m)		
6(m)		
10(m)		

高雄港

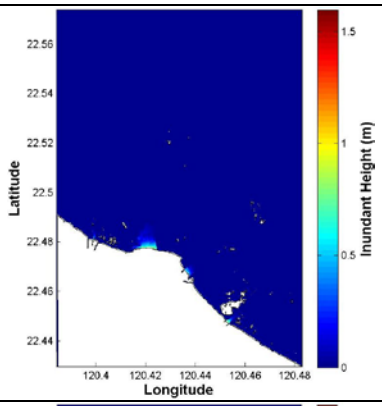
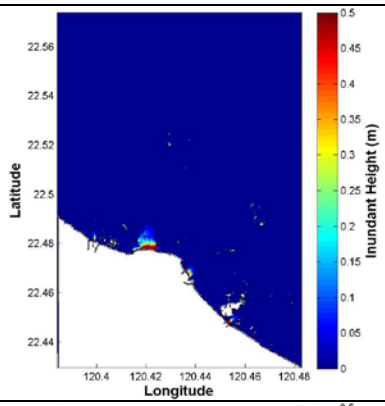
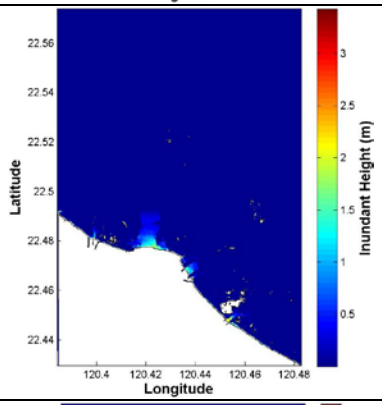
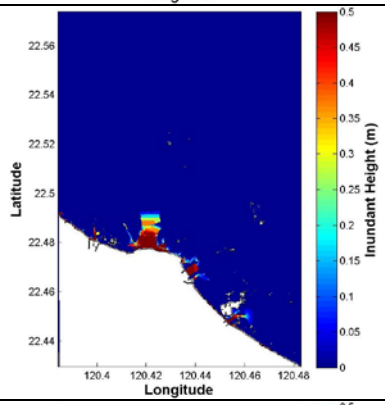
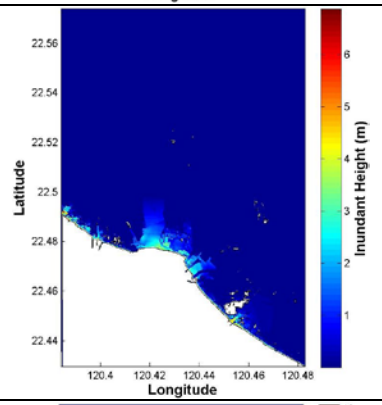
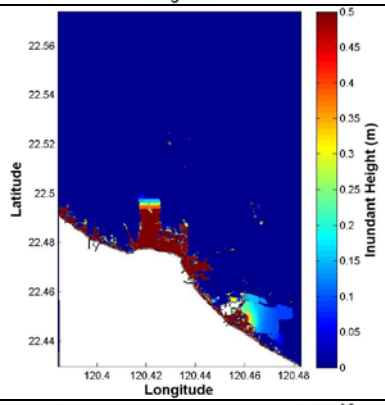
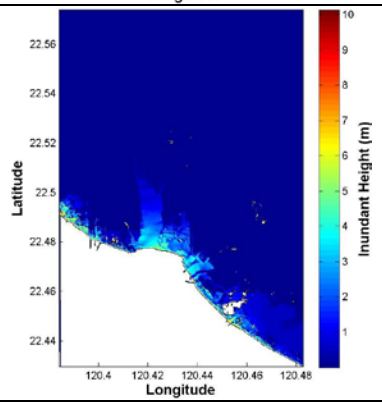
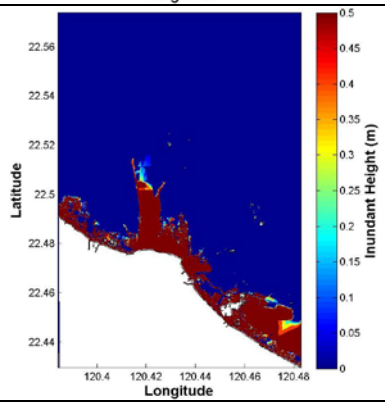
地震矩規模 最大波高(公尺)	初始水位	外海預報水位
Mw=7.0 Max. wave=0.048		
Mw=7.5 Max. wave=0.18		
Mw=8.0 Max. wave=0.61		
Mw=8.5 Max. wave=1.8		
Mw=9.0 Max. wave=7.2		

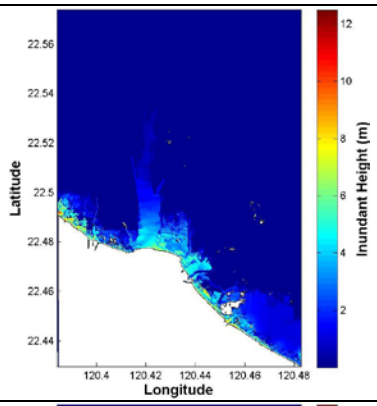
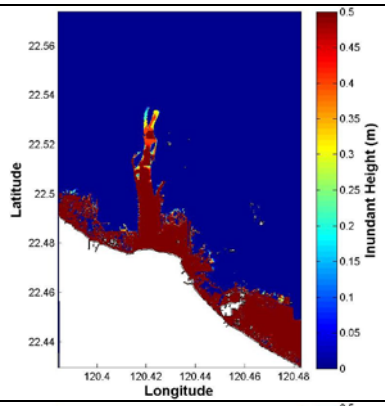
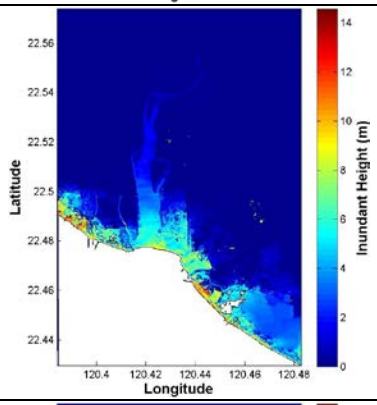
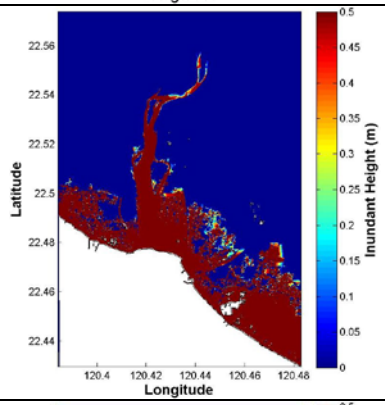
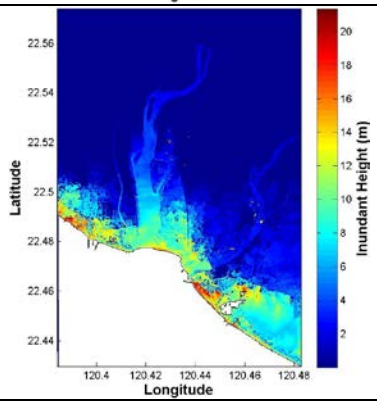
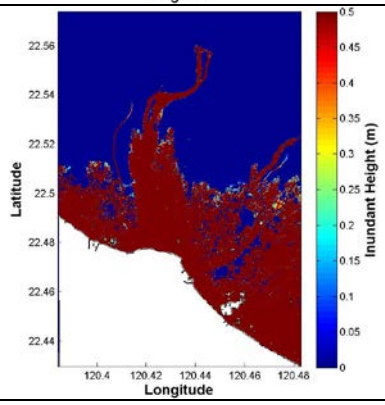
高雄港

入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
0.5(m)		
1(m)		
2(m)		
3(m)		

入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
4(m)		
6(m)		
10(m)		

高屏溪

入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
0.5(m)		
1(m)		
2(m)		
3(m)		

入射波高(m)	溢淹圖	水位>50 公分溢淹圖
4(m)		
6(m)		
10(m)		

附錄五　模擬橋墩墩柱受水流之壓力及沖刷結果

(橋墩墩柱東面 1 小時內之最大壓力分佈)單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**
1	6.948	13.700	29.545	65.012	0.094	0.220	0.974	4.240	6.948	13.700	29.545	65.012
2	6.902	13.434	29.246	64.266	0.016	0.115	0.372	1.167	6.902	13.434	29.246	64.266
3	6.919	13.328	29.622	63.124	0.005	0.017	0.104	0.707	6.919	13.328	29.622	63.124
4	6.945	13.453	29.784	60.935	0.002	0.008	0.067	0.191	6.945	13.453	29.784	60.935
5	6.971	13.613	30.775	59.285	0.003	0.016	0.103	0.451	6.971	13.613	30.775	59.285
6	7.008	13.987	32.395	64.440	0.003	0.013	0.140	0.215	7.008	13.987	32.395	64.440
7	7.193	14.604	35.327	67.858	0.007	0.022	0.113	0.326	7.193	14.604	35.327	67.858
8	7.868	16.344	38.035	74.153	0.035	0.053	0.144	1.050	7.868	16.344	38.035	74.153
9	8.098	15.223	32.848	58.008	0.020	0.071	0.128	0.634	8.098	15.223	32.848	58.008
10	8.182	15.173	35.507	57.495	0.000	0.034	0.422	1.151	8.182	15.173	35.507	57.495
11	0.000	0.000	5.493	46.802	0.000	0.000	0.061	0.589	0.000	0.000	5.493	46.802
12	0.000	0.000	0.000	29.057	0.000	0.000	0.000	0.217	0.000	0.000	0.000	29.057
13	0.000	0.000	0.000	27.207	0.000	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000	0.000	27.207
14	0.000	0.000	0.000	28.962	0.000	0.000	0.000	0.251	0.000	0.000	0.000	28.962
15	0.000	0.000	0.000	28.424	0.000	0.000	0.000	0.215	0.000	0.000	0.000	28.424
16	0.000	0.000	0.000	30.058	0.000	0.000	0.000	0.467	0.000	0.000	0.000	30.058
17	0.000	0.000	0.403	33.948	0.000	0.000	0.009	0.102	0.000	0.000	0.403	33.948
18	0.000	0.000	0.462	35.118	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000	0.000	0.462	35.118
19	0.000	0.000	0.524	33.689	0.000	0.000	0.000	0.171	0.000	0.000	0.524	33.689
20	6.951	13.727	29.686	65.143	0.093	0.215	1.683	7.577	6.951	13.727	29.686	65.143
21	6.897	13.353	29.008	59.117	0.010	0.089	0.322	0.937	6.897	13.353	29.008	59.117
22	6.917	13.300	29.555	57.027	0.003	0.010	0.078	0.528	6.917	13.300	29.555	57.027
23	6.941	13.411	29.598	59.450	0.002	0.005	0.024	0.143	6.941	13.411	29.598	59.450
24	6.965	13.512	30.180	59.559	0.002	0.006	0.027	0.152	6.965	13.512	30.180	59.559
25	7.000	13.856	31.858	63.418	0.003	0.009	0.034	0.168	7.000	13.856	31.858	63.418
26	7.151	14.303	34.801	67.447	0.008	0.020	0.056	0.108	7.151	14.303	34.801	67.447
27	7.615	15.994	37.823	73.807	0.054	0.258	0.427	0.394	7.615	15.994	37.823	73.807
28	6.094	13.214	30.962	56.357	0.015	0.033	0.052	0.331	6.094	13.214	30.962	56.357
29	0.000	5.458	25.916	48.257	0.000	0.041	0.329	1.151	0.000	5.458	25.916	48.257
30	0.000	0.000	5.466	47.267	0.000	0.000	0.035	0.357	0.000	0.000	5.466	47.267
31	0.000	0.000	0.000	28.870	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000	28.870
32	0.000	0.000	0.000	27.991	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	27.991
33	0.000	0.000	0.000	28.884	0.000	0.000	0.000	0.177	0.000	0.000	0.000	28.884
34	0.000	0.000	0.000	28.388	0.000	0.000	0.000	0.096	0.000	0.000	0.000	28.388
35	0.000	0.000	0.000	31.275	0.000	0.000	0.000	0.234	0.000	0.000	0.000	31.275
36	0.000	0.000	0.187	34.138	0.000	0.000	0.006	0.103	0.000	0.000	0.187	34.138
37	0.000	0.000	0.000	33.352	0.000	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000	33.352
38	0.000	0.000	0.505	33.899	0.000	0.000	0.000	0.053	0.000	0.000	0.505	33.899

(橋墩墩柱西面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**
1	6.950	13.696	29.447	65.258	0.029	0.050	0.352	2.051	6.950	13.696	29.447	65.258
2	6.895	13.185	28.171	60.212	0.032	0.165	0.613	1.766	6.895	13.185	28.171	60.212
3	6.884	13.073	27.628	64.708	0.011	0.062	0.357	1.336	6.884	13.073	27.628	64.708
4	6.906	13.062	27.564	60.214	0.004	0.036	0.201	1.116	6.906	13.062	27.564	60.214
5	6.928	13.065	27.310	58.244	0.004	0.020	0.164	1.202	6.928	13.065	27.310	58.244
6	6.949	13.100	27.353	56.126	0.006	0.025	0.126	1.206	6.949	13.100	27.353	56.126
7	6.969	13.191	28.027	57.056	0.013	0.043	0.161	0.761	6.969	13.191	28.027	57.056
8	7.067	13.621	33.398	65.191	0.025	0.084	0.132	1.004	7.067	13.621	33.398	65.191
9	8.148	16.053	35.074	68.437	0.017	0.020	0.099	0.319	8.148	16.053	35.074	68.437
10	8.137	15.359	36.478	65.610	0.068	0.199	0.425	1.929	8.137	15.359	36.478	65.610
11	0.000	0.000	5.729	48.994	0.000	0.000	1.979	3.121	0.000	0.000	5.729	48.994
12	0.000	0.000	0.000	29.361	0.000	0.000	0.000	0.619	0.000	0.000	0.000	29.361
13	0.000	0.000	0.000	29.810	0.000	0.000	0.000	0.205	0.000	0.000	0.000	29.810
14	0.000	0.000	0.000	29.823	0.000	0.000	0.000	0.514	0.000	0.000	0.000	29.823
15	0.000	0.000	0.000	29.504	0.000	0.000	0.000	0.204	0.000	0.000	0.000	29.504
16	0.000	0.000	0.000	30.117	0.000	0.000	0.000	0.477	0.000	0.000	0.000	30.117
17	0.000	0.000	0.000	31.665	0.000	0.000	0.000	0.264	0.000	0.000	0.000	31.665
18	0.000	0.000	0.164	30.652	0.000	0.000	0.007	0.253	0.000	0.000	0.164	30.652
19	0.000	0.000	0.557	32.137	0.000	0.000	0.000	0.161	0.000	0.000	0.557	32.137
20	6.954	13.709	29.484	65.861	0.027	0.175	0.849	0.859	6.954	13.709	29.484	65.861
21	6.885	13.216	28.337	58.796	0.003	0.028	0.214	0.902	6.885	13.216	28.337	58.796
22	6.887	13.141	28.206	62.006	0.001	0.013	0.146	0.856	6.887	13.141	28.206	62.006
23	6.908	13.119	28.048	59.854	0.001	0.006	0.063	0.411	6.908	13.119	28.048	59.854
24	6.930	13.124	27.684	58.389	0.001	0.004	0.022	0.391	6.930	13.124	27.684	58.389
25	6.952	13.154	27.642	57.731	0.001	0.004	0.023	0.554	6.952	13.154	27.642	57.731
26	6.976	13.274	28.430	58.587	0.003	0.008	0.038	0.410	6.976	13.274	28.430	58.587
27	7.063	13.642	33.861	66.867	0.012	0.045	0.060	0.291	7.063	13.642	33.861	66.867
28	6.183	13.876	33.014	65.608	0.013	0.087	0.088	0.082	6.183	13.876	33.014	65.608
29	0.000	4.411	25.127	49.623	0.000	0.004	0.005	0.706	0.000	4.411	25.127	49.623
30	0.000	0.000	5.621	48.435	0.000	0.000	1.815	3.560	0.000	0.000	5.621	48.435
31	0.000	0.000	0.000	28.963	0.000	0.000	0.000	1.087	0.000	0.000	0.000	28.963
32	0.000	0.000	0.000	30.349	0.000	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	30.349
33	0.000	0.000	0.000	29.256	0.000	0.000	0.000	0.211	0.000	0.000	0.000	29.256
34	0.000	0.000	0.000	29.203	0.000	0.000	0.000	0.145	0.000	0.000	0.000	29.203
35	0.000	0.000	0.000	31.300	0.000	0.000	0.000	0.398	0.000	0.000	0.000	31.300
36	0.000	0.000	0.000	32.591	0.000	0.000	0.000	0.087	0.000	0.000	0.000	32.591
37	0.000	0.000	0.000	31.197	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	31.197
38	0.000	0.000	0.504	32.905	0.000	0.000	0.000	0.090	0.000	0.000	0.504	32.905

(橋墩墩柱南面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**
1	6.945	13.689	29.429	65.147	0.002	0.019	0.407	1.780	6.945	13.689	29.429	65.147
2	6.932	13.616	29.522	77.334	0.269	1.026	4.743	23.654	6.932	13.616	29.522	77.334
3	6.936	13.528	30.409	87.585	0.253	1.289	6.950	21.528	6.936	13.528	30.409	87.585
4	6.962	13.542	31.114	79.915	0.286	1.186	6.660	21.034	6.962	13.542	31.114	79.915
5	6.984	13.866	32.386	78.147	0.287	1.331	6.437	21.812	6.984	13.866	32.386	78.147
6	7.018	14.200	34.316	76.958	0.296	1.489	9.049	19.357	7.018	14.200	34.316	76.958
7	7.207	15.199	36.256	80.041	0.288	1.418	7.825	40.057	7.207	15.199	36.256	80.113
8	7.676	16.197	38.166	80.696	0.291	1.486	5.374	28.335	7.676	16.197	38.166	80.696
9	8.195	16.450	37.406	75.030	0.327	1.920	3.843	24.851	8.195	16.450	37.406	75.030
10	8.156	15.354	36.480	66.300	0.011	0.022	0.267	3.826	8.156	15.354	36.480	66.300
11	0.000	0.000	5.517	49.888	0.000	0.000	0.013	0.482	0.000	0.000	5.517	49.888
12	0.000	0.000	0.000	29.580	0.000	0.000	0.000	0.258	0.000	0.000	0.000	29.580
13	0.000	0.000	0.000	32.082	0.000	0.000	0.000	4.279	0.000	0.000	0.000	32.082
14	0.000	0.000	0.000	30.384	0.000	0.000	0.000	3.268	0.000	0.000	0.000	30.384
15	0.000	0.000	0.000	30.846	0.000	0.000	0.000	1.977	0.000	0.000	0.000	30.846
16	0.000	0.000	0.000	29.907	0.000	0.000	0.000	0.960	0.000	0.000	0.000	29.907
17	0.000	0.000	0.000	35.161	0.000	0.000	0.000	3.796	0.000	0.000	0.000	35.161
18	0.000	0.000	0.433	35.968	0.000	0.000	0.002	3.318	0.000	0.000	0.433	35.968
19	0.000	0.000	0.597	35.107	0.000	0.000	0.026	9.617	0.000	0.000	0.597	35.107
20	6.951	13.695	29.467	65.020	0.000	0.000	0.000	0.000	6.951	13.695	29.467	65.020
21	6.895	13.289	28.522	56.715	0.000	0.000	0.000	0.000	6.895	13.289	28.522	56.715
22	6.901	13.208	28.687	56.999	0.000	0.000	0.000	0.000	6.901	13.208	28.687	56.999
23	6.923	13.190	28.638	59.773	0.000	0.000	0.000	0.000	6.923	13.190	28.638	59.773
24	6.944	13.256	28.241	58.036	0.000	0.000	0.000	0.000	6.944	13.256	28.241	58.036
25	6.966	13.369	28.541	59.139	0.000	0.000	0.000	0.000	6.966	13.369	28.541	59.139
26	7.010	13.640	31.209	60.875	0.000	0.000	0.000	0.000	7.010	13.640	31.209	60.875
27	7.163	14.501	35.179	68.389	0.000	0.000	0.000	0.000	7.163	14.501	35.179	68.389
28	7.141	14.520	32.797	60.651	0.000	0.000	0.000	0.000	7.141	14.520	32.797	60.651
29	0.000	4.384	25.016	48.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.384	25.016	48.134
30	0.000	0.000	5.601	47.628	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.601	47.628
31	0.000	0.000	0.000	28.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.448
32	0.000	0.000	0.000	28.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.531
33	0.000	0.000	0.000	28.772	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.772
34	0.000	0.000	0.000	28.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.315
35	0.000	0.000	0.000	31.171	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.171
36	0.000	0.000	0.000	33.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	33.137
37	0.000	0.000	0.000	32.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.167
38	0.000	0.000	0.512	32.703	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	32.703

(橋墩墩柱北面 1 小時內之最大壓力分佈) 單位:kPa

柱號	最大靜壓力				最大平均動壓力				最大總壓力			
	3m	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**	**3m**	**4m**	**6m**	**10m**
1	6.951	13.695	29.467	65.020	0.000	0.000	0.000	0.000	6.951	13.695	29.467	65.020
2	6.895	13.289	28.522	56.715	0.000	0.000	0.000	0.000	6.895	13.289	28.522	56.715
3	6.901	13.208	28.687	56.999	0.000	0.000	0.000	0.000	6.901	13.208	28.687	56.999
4	6.923	13.190	28.638	59.773	0.000	0.000	0.000	0.000	6.923	13.190	28.638	59.773
5	6.944	13.256	28.241	58.036	0.000	0.000	0.000	0.000	6.944	13.256	28.241	58.036
6	6.966	13.369	28.541	59.139	0.000	0.000	0.000	0.000	6.966	13.369	28.541	59.139
7	7.010	13.640	31.209	60.875	0.000	0.000	0.000	0.000	7.010	13.640	31.209	60.875
8	7.163	14.501	35.179	68.389	0.000	0.000	0.000	0.000	7.163	14.501	35.179	68.389
9	7.141	14.520	32.797	60.651	0.000	0.000	0.000	0.000	7.141	14.520	32.797	60.651
10	0.000	4.384	25.016	48.134	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.384	25.016	48.134
11	0.000	0.000	5.601	47.628	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.601	47.628
12	0.000	0.000	0.000	28.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.448
13	0.000	0.000	0.000	28.531	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.531
14	0.000	0.000	0.000	28.772	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.772
15	0.000	0.000	0.000	28.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	28.315
16	0.000	0.000	0.000	31.171	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	31.171
17	0.000	0.000	0.000	33.137	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	33.137
18	0.000	0.000	0.000	32.167	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	32.167
19	0.000	0.000	0.512	32.703	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.512	32.703
20	0.000	0.000	2.160	37.383	0.000	0.000	0.000	2.444	0.000	0.000	2.160	37.383
21	6.878	13.175	28.234	53.287	0.041	0.246	1.629	14.810	6.878	13.175	28.234	53.287
22	6.890	13.134	28.406	53.985	0.043	0.192	1.041	11.835	6.890	13.134	28.406	53.985
23	6.911	13.127	28.288	57.426	0.044	0.143	0.694	5.182	6.911	13.127	28.288	57.426
24	6.934	13.171	27.941	57.568	0.041	0.135	0.585	6.927	6.934	13.171	27.941	57.568
25	6.957	13.212	27.927	57.945	0.044	0.135	0.572	9.679	6.957	13.212	27.927	57.945
26	6.989	13.405	29.553	58.802	0.042	0.141	0.506	3.305	6.989	13.405	29.553	58.802
27	7.034	13.551	33.898	68.147	0.102	0.599	3.133	26.408	7.034	13.551	33.898	68.147
28	6.086	13.280	30.778	57.145	0.020	0.292	0.602	3.088	6.086	13.280	30.778	57.145
29	0.000	5.503	26.072	48.692	0.000	0.031	0.382	2.576	0.000	5.503	26.072	48.692
30	0.000	0.000	5.548	47.363	0.000	0.000	0.019	0.279	0.000	0.000	5.548	47.363
31	0.000	0.000	0.000	28.287	0.000	0.000	0.000	0.313	0.000	0.000	0.000	28.287
32	0.000	0.000	0.000	29.164	0.000	0.000	0.000	0.764	0.000	0.000	0.000	29.164
33	0.000	0.000	0.000	28.680	0.000	0.000	0.000	1.034	0.000	0.000	0.000	28.680
34	0.000	0.000	0.000	28.336	0.000	0.000	0.000	0.515	0.000	0.000	0.000	28.336
35	0.000	0.000	0.000	31.404	0.000	0.000	0.000	1.160	0.000	0.000	0.000	31.404
36	0.000	0.000	0.000	32.824	0.000	0.000	0.000	0.980	0.000	0.000	0.000	32.824
37	0.000	0.000	0.000	30.405	0.000	0.000	0.000	0.671	0.000	0.000	0.000	30.405
38	0.000	0.000	0.506	33.016	0.000	0.000	0.034	0.929	0.000	0.000	0.506	33.016

(不同入射波高各組橋墩最大侵蝕及最大堆積) 單位:m

組號	墩柱號	最大侵蝕(地形下降)				最大堆積 (地形上升)			
		入射波高度				入射波高度			
		3m	4m	6m	10m	3m	4m	6m	10m
1	1、20	-0.0017	-0.0055	-0.0538	-0.1363	0.0005	0.0017	0.0132	0.0494
2	2、21	-0.0054	-0.0246	-0.0861	-0.3439	0.0039	0.0131	0.0409	0.1477
3	3、22	-0.0071	-0.0363	-0.1638	-0.5389	0.0032	0.0162	0.0568	0.1905
4	4、23	-0.0067	-0.0338	-0.1865	-0.5363	0.0026	0.0090	0.0565	0.2014
5	5、24	-0.0061	-0.0300	-0.1991	-0.5236	0.0022	0.0093	0.0560	0.2067
6	6、25	-0.0057	-0.0266	-0.1757	-0.4594	0.0021	0.0102	0.0521	0.1605
7	7、26	-0.0052	-0.0292	-0.1576	-0.4043	0.0035	0.0094	0.0422	0.1767
8	8、27	-0.0053	-0.0151	-0.0558	-0.2251	0.0043	0.0107	0.0332	0.1246
9	9、28	-0.0026	-0.0198	-0.0607	-0.2417	0.0016	0.0134	0.0355	0.1316
10	10、29	0.0000	-0.0276	-0.0989	-0.2772	0.0010	0.0079	0.0157	0.0510
11	11、30	0.0000	0.0000	-0.0066	-0.0368	0.0000	0.0000	0.3326	0.1689
12	12、31	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0202	0.0000	0.0000	0.0000	0.0098
13	13、32	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0413
14	14、33	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1480	0.0000	0.0000	0.0000	0.0349
15	15、34	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1397	0.0000	0.0000	0.0000	0.0437
16	16、35	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0764	0.0000	0.0000	0.0000	0.0347
17	17、36	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1244	0.0000	0.0000	0.0000	0.0463
18	18、37	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0412
19	19、38	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0398

附錄六　期末報告簡報資料

MOTC-IOT-102-H3DB001b

海嘯對港區及跨河橋樑之影響風險評估研究(1/2)

Tsunami Risk Analysis on Harbor Area and Bridges across Rivers (1/2)

計畫主持人：陳冠宇

協同主持人：陳陽益

■研究內容與工作項目

本年度之工作內容為：

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. 高雄港域及安平港域未來50年及100年之海嘯災害風險評估。
3. 精進高雄港域及安平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. 建立高雄港域及安平港域海嘯模擬預警系統。
5. 模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊力。
6. 模擬無潮汐影響的狀況下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑橋墩週遭之沖刷。
7. 模擬潮汐影響下，海嘯沿高屏溪口向上游傳遞時跨河橋樑所受之衝擊力變化。

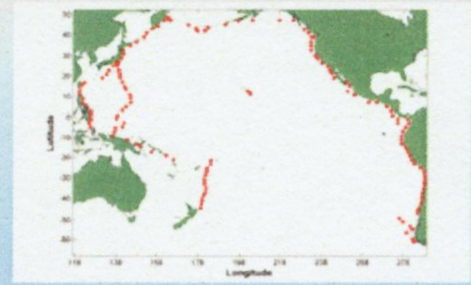
■前期成果

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. 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. 101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，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%；臺中港在未來50年間發生海嘯且溢淹機率為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份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。

■海嘯資料蒐集-環太平洋地震帶及海嘯災害概述

環太平洋地震帶，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，其主要的國家及地區有：日本、台灣、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，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公里間之地震及幾乎所有深度大於300公里之地震都發生在這個地震帶上。

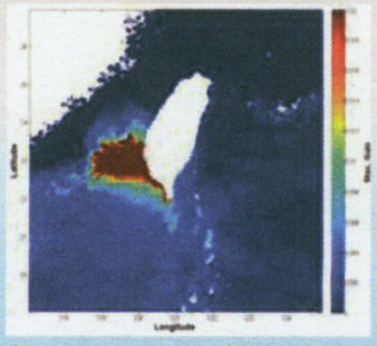
地震是海嘯成因之一，近年的海嘯事件，南亞海嘯、薩摩亞海嘯、智利海嘯及2011年3月東日本海嘯即是由強烈之海底地震所引起之海嘯。利用美國NOAA之海嘯災難資料庫可大略看出海嘯事件之特性。



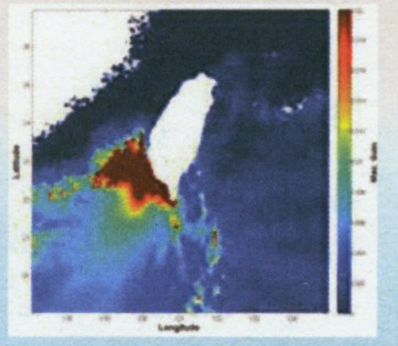
環太平洋地震帶及海溝分佈
(紅點即是海溝位置)

■海嘯資料蒐集-臺灣鄰近海域之海嘯紀錄

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坡溯上發展；依海嘯淺勢波源而言，西南外海之海底斷層系統連接馬尼拉海溝，此一區域被地質學者認為是海嘯之高風險區域。根據互逆格林函數之放大率圖顯示，對高雄港及安平港威脅性最大的是來自於發生西南外海以及連接馬尼拉海溝的海底斷層系統。



安平港之放大率及海嘯潛勢波源區

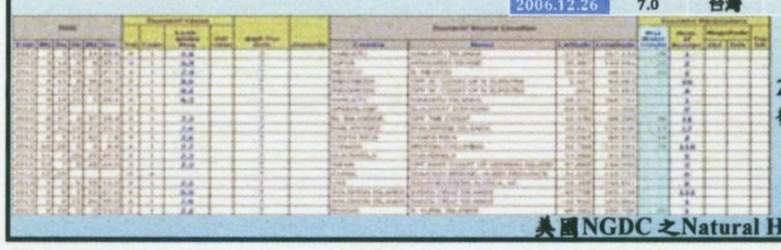


高雄港之放大率及海嘯潛勢波源區

■海嘯資料蒐集

臺灣海嘯事件之震源分佈

發生時間1	地震規模	國家	震央位址	
			緯度	經度
1661.1.8	6.4	台灣	23.0	120.1
1661.2.15	6.0	台灣	23.0	120.2
1721		台灣	23.0	120.2
1792.8.9	6.0	台灣	23.6	120.5
1853.10.29		台灣		
1903.9.7		台灣		
1917.5.6	5.8	台灣	23.2	121.6
1922.9.1	7.6	台灣	24.5	122.0
1951.10.22	7.3	台灣	23.8	121.7
1963.2.13	7.3	台灣	24.4	122.1
1966.3.12	7.6	台灣	24.1	122.6
1972.1.25	7.5	台灣	22.5	122.3
1978.7.23	7.4	台灣	22.282	121.512
1986.11.14	7.8	台灣	23.901	121.574
1990.12.13	6.3	台灣	23.722	121.627
1998.5.3	7.5	台灣	22.306	125.308
2001.12.18	6.8	台灣	23.954	122.734
2002.3.31	7.1	台灣	24.279	122.179
2006.12.26	7.0	台灣	21.799	120.547

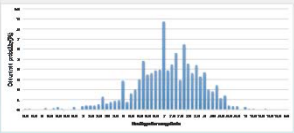


2012-2013年
發生之海嘯事件

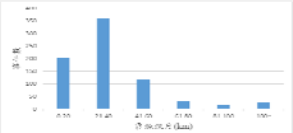
美國NGDC之Natural Hazard Database

■海嘯資料蒐集-遠域海嘯紀錄

NOAA海嘯災難資料庫檢索結果顯示自1500~2013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，92%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1157起樣本數中，僅有764起有紀錄震源深度，震源深度90%均發生在60公里以內



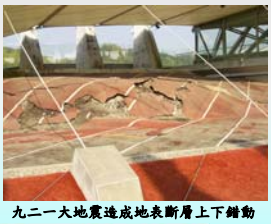
1500-2013年海嘯事件之地震規模分析



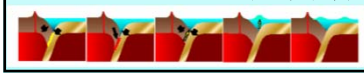
1500-2013年海嘯事件之震源深度分析

■海嘯資料蒐集-海嘯之預警與溢淹潛勢圖之必要性

海嘯是海底地震、海底火山或海底山崩等作用造成的長週期波，小行星、彗星的撞擊也會產生海嘯；但一般以地震斷層運動造成的情形最常見。臺灣位於環太平洋地震帶，地震頻仍；較近的例子如九二一大地震，地表斷層上下運動(如圖2.9)最大可達十公尺，同樣的斷層運動萬一發生在海上，將產生大海嘯，造成重大傷亡。因此須正視臺灣可能的海嘯風險。



九二一大地震造成地表斷層上下錯動

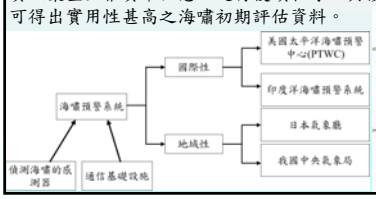


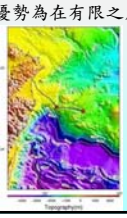
板塊交界處發生錯動後引起海嘯之示意圖(邱等，2005)

■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。

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。





電纜式海底地震儀觀測系統(媽祖計劃)之佈放位置

■海嘯數值模式介紹

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。

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。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。故在台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及以2011東日本海嘯驗證。

■海嘯數值模式介紹-海嘯水動力數值模式

COMCOT 數值模式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：

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：

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

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{gh}{R\cos\varphi}\frac{\partial \zeta}{\partial \psi}-fQ=\frac{1}{R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial \psi}\left[\frac{h^3}{3R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{\partial}{\partial \psi}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\cos\varphi\frac{Q}{h}\right)\right\}\right]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{gh}{R}\frac{\partial \zeta}{\partial \varphi}+fP=\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\frac{h^3}{3R\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{\partial}{\partial \psi}\left(\frac{P}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\cos\varphi\frac{Q}{h}\right)\right\}\right]$$

ψ、φ 和 t 各代表經度、緯度和時間，ζ 為水面高，P 與 Q 為經度方向與緯度方向的質量通量，h為平均水深。

■海嘯數值模式介紹-海嘯水動力數值模式

若近岸地區時，改採卡氏坐標系統，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

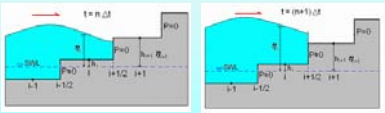
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial y}=0$$

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

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

式中 t 是時間，ζ 為自由表面之變動水位，H為全水深，P 與 Q 為x方向與y方向的流量，g為重力加速度，f為科氏力參數，τ_x、τ_y分別為x與y方向底部摩擦力。

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。

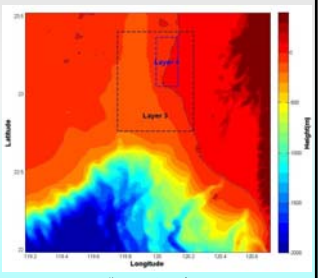


移動邊界示意圖

■海嘯數值模式介紹-巢狀網格

一般在大洋使用較粗的網格，到近海增加網格數、網格間格縮小，到近岸再用更細的網格；如此一層套疊一層，近似鳥巢般的網格配置，稱為巢狀網格(nested grid)。巢狀網格可以滿足大小區域之需求，在遠洋區域及近岸區域選用不同的網格大小進行海嘯的傳播模擬，藉此細部描述海嘯於小區域之溯上計算，也**提高海嘯模式的效率**。

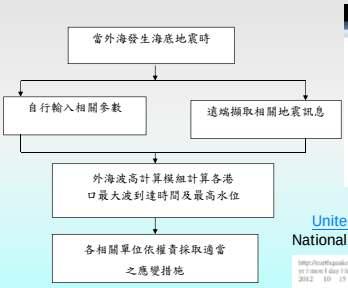
- ◈ 第一區域計算範圍大，並考慮地球曲面效應及科氏力造成的偏轉效應，在此區域所使用球面座標系統之淺水方程組
- ◈ 第二區域的網格系統則改為直角座標系統，使用直角座標之線性淺水方程組
- ◈ 模擬海嘯於近岸第三與第四區域溯上時，必須考慮到近岸的非線性效應與海底底部摩擦項的影響，模式的計算改為使用非線性淺水方程組



巢狀網格示意圖

■系統建構-地震資料來源與擷取

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，提供給各港務局作為後續應變之作為之參考。



海嘯速報系統之規劃圖

美國USGS資料庫

United States Geological Survey(USGS)-National Earthquake Information Center(NEIC)

透過遠端擷取USGS地震資料格式

■系統建構-地震資料來源與擷取

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。

	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/eqinthenews/ 資料提供範圍：全球(2013/10網址更新)
台灣	中央氣象局(CWB) 2013/07 停止更新	http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/ (http://bats.earth.sinica.edu.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

本系統主要地震資料之網址及對應之資料提供範圍

目前完成之即時地震擷取系統介面

■系統建構-地震資料來源與擷取(補充說明)

- 中央氣象局(CWB)地震網資訊系統於2013年7月底停止更新(http://cwbsnbb.cwb.gov.tw/)其過去地震解提供來源為台灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS) http://bats.earth.sinica.edu.tw/

故目前擷取目標由氣象局網站更改為BATS網站
http://bats.earth.sinica.edu.tw/Quick_CMT/cmtQ.html
(中研院地科所寬頻地震網)

- **美國地調所**(USGS)

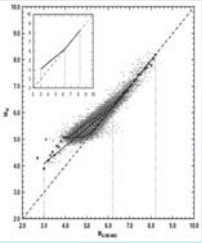
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/fm/
該網站於十月初之後，網址更改為
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/
範圍：全球

■系統建構-地震級數之轉換

地震資料來源採用USGS-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。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。

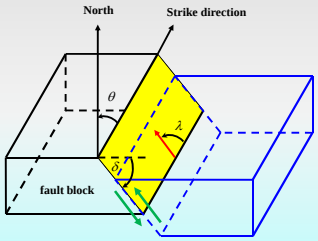
(1)M_L：芮氏地震規模(Richter magnitude)
(2)M_S：表面波規模(surface waves magnitude)
(3)M_B：體波規模(body waves magnitude)
(4)M_W：地震矩規模(Moment magnitude scale)



M_S規模轉換之M_W規模之對應圖 (Scordilis 2006)

■系統建構-斷層參數

strike角($0\leq\theta\leq360$)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($0\leq\lambda\leq180$)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。



斷層參數示意圖

●斷層參數用來計算海嘯之初始水位，但實務上不可能知道所有海溝之參數

■系統建構-斷層長寬及震源深度之設定

●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%

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

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

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

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

$$M_w = \frac{2}{3}\log_{10} M_0 - 10.7 \quad \Rightarrow \quad M_0 = \mu LWD$$

$$\mu = 3\times10^{11} dyne/cm^2$$

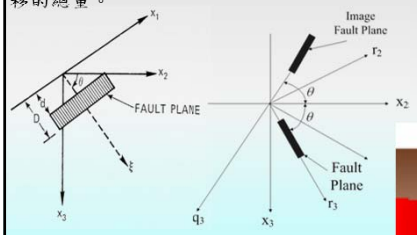
斷層長度(L)、寬度(W)及滑移量(D)均已求得，就可以應用前頁之理論計算初始水位

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

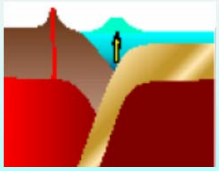
■系統建構-海嘯初始水位之生成

●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。

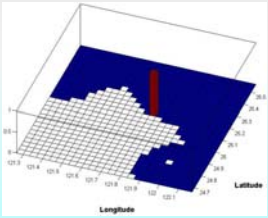


斷層幾何形狀及座標系統



■傳統格林函數

- 海嘯波在大洋中之傳遞，可視為一個「線性系統」，一般數值模式中可以用線性淺水方程式(Linear shallow water equation)來描述傳遞行為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)。
- 線性系統中之可逆性(Loomis , 1979、Xu , 2007)可以提高計算效率。
- 在本研究中也可降低對初始條件之依賴性。



以基隆為例之格林函數所對應的初始水位

■傳統格林函數

所謂格林函數，線性淺水方程組之基本解：

$$\eta_t + P_x + Q_y = 0$$

$$P_t + gd\eta_x = 0$$

$$Q_t + gd\eta_y = 0$$

其中 η 為水面高，P與Q為x與y方向的質量通量，d為平均水深，而下標代表偏微分。將其式轉為球座標系統：

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gd}{R\cos\varphi}\frac{\partial\eta}{\partial\psi} - fQ = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gd}{R}\frac{\partial\eta}{\partial\varphi} - fP = 0$$

ψ、φ 和 t 各代表經度、緯度和時間，η 為水面高，P 與 Q 為x方向與y方向的質量通量，d為平均水深。

■傳統格林函數

在不考慮科式力的情形下，取經度及時間微分，可消去質量通量。故格林函數 $G_s^r = G(t,\psi_r,\varphi_r,\psi_s,\varphi_s)$ 方程解:

$$\frac{\partial^2\eta}{\partial t^2} - \frac{gd}{R^2\cos^2\varphi}\left[\frac{\partial\eta}{\partial\psi^2} + \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\cos\frac{\partial\eta}{\partial\varphi}\right)\right] = \delta(t,\psi-\psi_s,\varphi-\varphi_s)$$

對實際的海洋地形，此方程無解析解，只能以數值方式求解，而δ函數亦須離散化，即除 (ψ_s,φ_s)的初始水位為1之外，計算領域之每一點的初始水位皆為零；而格林函數即為此單位初始水位引致的計算領域內每一點隨時間的震盪。此離散化δ函數於初始時間t=0與有限元素法常用之形函數(shape function) 具相同的形式

$$\delta(t,\psi-\psi_s,\varphi-\varphi_s) = \begin{cases} 1 & \text{for t=0 }, \psi=\psi_s \text{ and } \varphi=\varphi_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

■傳統格林函數

若對所有波源區的N個點每個點s予以編號1, 2, 3, …, N，其傳遞至r點的N個格林函數以及其初始水位 都已知曉，則水位可以下式求得

$$\frac{\partial^2\eta^s}{\partial t^2} - \frac{gd}{R^2\cos^2\varphi}\left[\frac{\partial\eta^s}{\partial\psi^2} + \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\cos\frac{\partial\eta^s}{\partial\varphi}\right)\right] = H_s\delta(t,\psi-\psi_s,\varphi-\varphi_s)$$

其中η^s表示s點的初始水位H_s造成的計算區域水位變化。對r點而言，η^s相當於格林函數之H_s倍。將編號1, 2, 3, …, N的每個點s對應之方程式相加總即

$$\sum_{s=1}^{N}\frac{\partial^2\eta^s}{\partial t^2} - \frac{gd}{R^2\cos^2\varphi}\left[\sum_{s=1}^{N}\frac{\partial\eta^s}{\partial\psi^2} + \cos\varphi\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\cos\sum_{s=1}^{N}\frac{\partial\eta^s}{\partial\varphi}\right)\right] = \sum_{s=1}^{N}H_s\delta(t,\psi-\psi_s,\varphi-\varphi_s)$$

連加符號∑與時、空之偏微分運算可以互換，故得

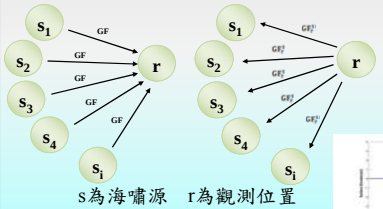
$$\left(\sum_{s=1}^{N}\eta^s\right)_{tt} - \frac{gd}{R^2\cos^2\varphi}\left[\left(\sum_{s=1}^{N}\eta^s\right)_{\psi\psi} + \cos\varphi\left(\cos\varphi\left(\sum_{s=1}^{N}\eta^s\right)_{\varphi}\right)_{\varphi}\right] = \sum_{s=1}^{N}H_s\delta(t,\psi-\psi_s,\varphi-\varphi_s)$$

$\sum_{s=1}^{N}\eta^s$ 即為海底地震引起的海嘯

■互逆格林函數

對點而言，η^s相當於格林函數G_s^r之H_s倍；故r點的水位H_r

- 利用互逆格林函數的互逆性 $H_r = \sum_{s=1}^{N} G_s^r * H_s$
- 一般海嘯模擬計算時間受震央位置、網格解析度與模擬時間等因素影響
- 應用格林函數可逆性減少模式計算時間(數小時縮短為數秒)

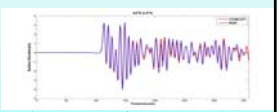


s為海嘯源　r為觀測位置

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

$$GF_s^r(t) = GF_r^s(t)$$

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



逆格林函數與直接的海嘯模擬之水位變化驗證

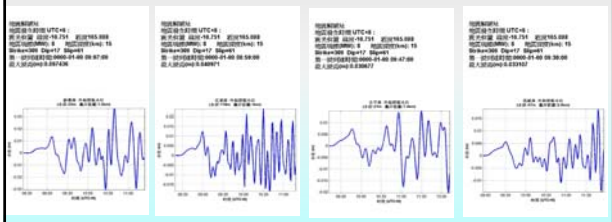
■自動化操作說明及實例運作

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；以在台北時間2013年2月6日早上09點12分於聖克魯斯群島(索羅門群島東南端的火山島)(東經165.088度，南緯11.051度)發生地震矩規模8.0之海底地震，深度為15公里，作為實際案例。

USGS所公佈之地震參數及震央位址

■自動化操作說明及實例運作

系統於擷取USGS資料後進行蘇澳港、花蓮港、安平港及高雄港之最大波高及到達時間之預估，預估結果顯示雖然地震矩規模已達海嘯發生要因之標準，且雖震源深度甚淺、但因所發生之斷層走向為西北-東南走向，且距離尚遠，我國並非位處主要傳遞路徑之上，因此對四港並未造成任何威脅性。

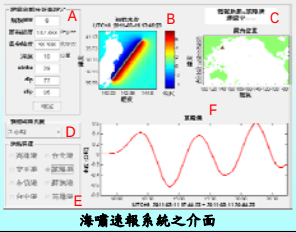


(a)蘇澳港　(b)花蓮港　(c)安平港　(d)高雄港

利用USGS地震參數所預估之結果及報告單

■海嘯速報系統之驗證-2011/03/11東日本海嘯事件

台灣時間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。海嘯速報系統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。



海嘯速報系統之介面

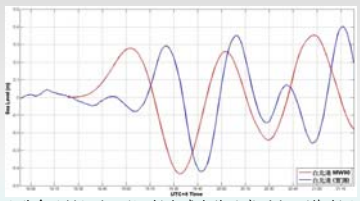
A. 輸入地震解。
B. 由經驗公式計算斷層長、寬及位移後，再代入斷層模式產生地震造成的初始水位。
C. 同時標示震央位置。
D. 選擇預報時間長度。
E. 選擇模擬地點。
F. 模擬海嘯抵達的水位結果。

■海嘯速報系統之驗證-2011/03/11東日本海嘯事件

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。

```
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:Mo=4.5*10**22
 NP1:Strike= 29 Dip=77 Slip=  95
 NP2:       187    14       60
```

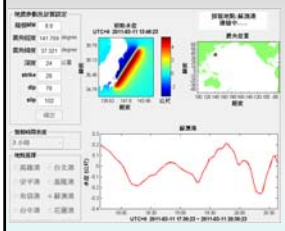
USGS日本311宮城海嘯參數



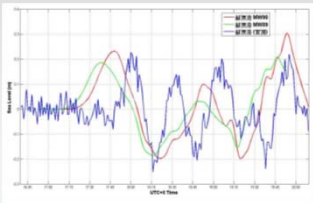
台北港系統模擬水位(紅線)與濾潮後的實測水位(藍線)比較

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。

■海嘯速報系統之驗證-2011/03/11東日本海嘯事件



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



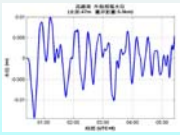
以速算系統根據地震發生後一小時美國地質調查所公佈之地震參數(地震矩規模Mw8.9)及新公佈之地震參數(地震矩規模Mw9.0)計算蘇澳港水位時序分佈與實測資料比較

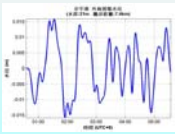
■系統實例操作

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，震央位址在北緯22.48度，東經118.72度，震源深度約15公里

```
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
```

1994年地震斷層參數 (strike=256，dip=35，slip= -116)
(資料來源：Harvard CMT)

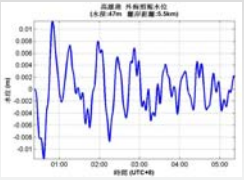


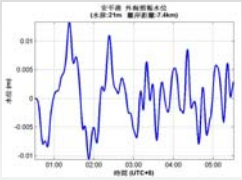


利用系統及第一組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港

■系統實例操作

第二組參數之結果(strike=107，dip=59，slip=-73)



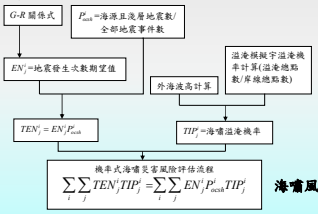


利用系統及第二組參數所預估之外海水位(a)高雄港(b)安平港

兩港之水位變化是波谷先至，第一波為最大波高；高雄港第一波約在地震發生後37分鐘後到達，其值約為0.023公尺；海嘯波約在地震發生後50分鐘後抵達安平港外，最大波高約50分鐘後產生，其值約為0.024公分。兩組參數計算結果並無太大之差異，初步研判結果對安平及高雄港應無具體之影響。但較為注意的是海嘯波在地震發生後37分鐘就抵達，若地震規模再大或海嘯源緊鄰台灣，事前的海嘯災防顯得格外重要。

■海嘯災害風險評估

- 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。
- 「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，對於台灣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

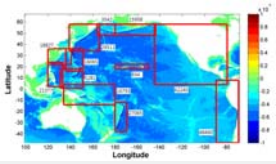


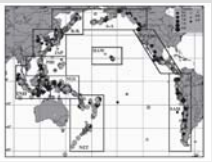
海嘯風險評估流程圖

式中，EN_i^j 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_i^j 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。上圖為此一概念之計算流程圖。

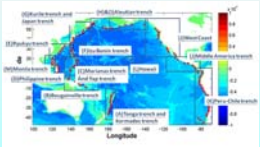
■海嘯地震發生次數期望值-研究區域及地震資料

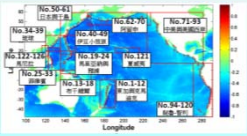
地震資料取自USGS-NEIC資料庫





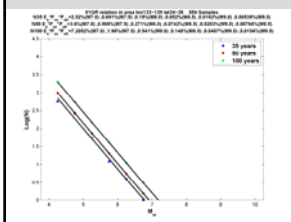
(a)環太平洋地震數量分佈圖(b)太平洋區域之主要海溝分佈及劃分建議(Gusiakov,2005)





(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

地震規模與再現頻率關係式 (Gutenberg and Richter, 1944)，G-R關係式



G-R關係式之計算範例
(東經133到139度，北緯34到36度)

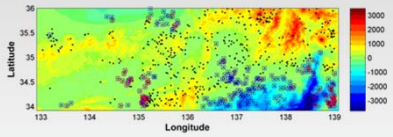
以日本東側東經133到139度，北緯34到36度；右圖藍點為各地震矩累計次數，35年為過去地震次數記錄的時間長度，將此回歸線上各點除以統計年時間長度35乘上評估年時間長度50、100再轉換回G-R關係式，則可得到圖4.5上未來50年及未來100年的回歸係數與回歸線，紅點(50年)及綠點線(100年)，此回歸線為評估未來50年及未來100年，可能發生之累計次數，進可得到各地震矩規模區間的可能發生次數，如下表所示。

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

各地震規模區間未來預估年可能發生之次數值

■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



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

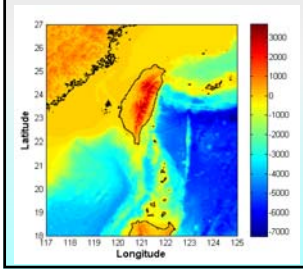
✓此區域地震資料總數為702筆，海源且震源深度在30km以內數為83筆，因此比值83/702=0.1182。

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}

海嘯地震發生次數期望值

■安平港之溢淹模擬-數值地形

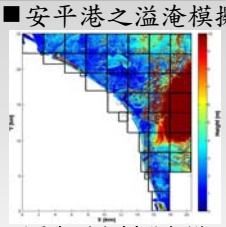
- 陸域資料：內政部地政司所提供之5mx5m之DSM及DEM數值地形資料
- 海域資料：海科中心網格間距為500公尺之水深資料(TaiDBMV6)



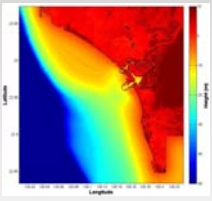
平面坐標採內政部1997 台灣大地基準(TWD97），高程坐標採內政部 2001 台灣高程基準(TWVD2001)。即是定義在1990年1 月1 日標準大氣環境下，並採用基隆潮位站(基隆平均海水面)1957 年至1991 年之潮汐資料化算而得，即為中潮系統。

國科會海科中心TaiDBMV6
台灣附近海域海底地形(500m解析度)

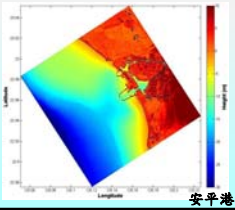
■安平港之溢淹模擬



安平港5m解析度數值地形檔



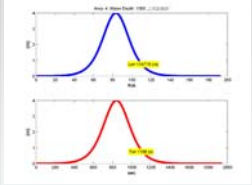
安平港整合海陸域後之數值地形檔



安平港整併港內實際地形之數值地形檔

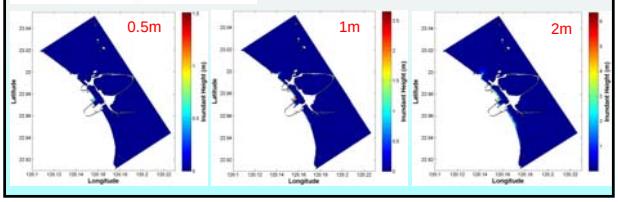
■安平港之模擬結果

本研究使用COMCOT溢淹模式，以不同波高之鐘形波模擬海嘯波垂直岸線入射(0.5m、1m、2m、3m、4m、6m、10m)

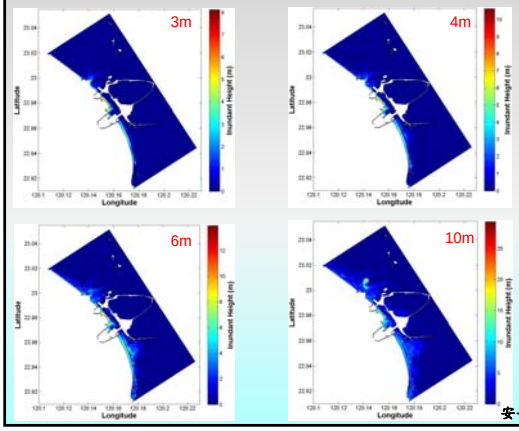


週期20分鐘波高4m鐘形波

採用鐘形波方式是因在相同波高之情況下具有較多之水體，在正向入射之情況下，會具有較大之溢淹範圍及溯上高度，所得之結果會偏向保守側。

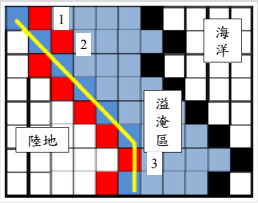


■安平港之模擬結果



安平港之溢淹圖

■溢淹機率

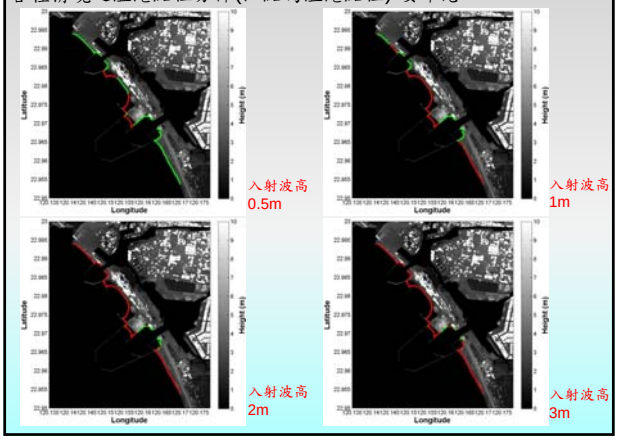


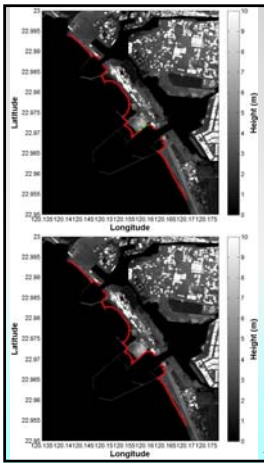
- 定義溢淹條件為溢淹高度超過50公分，主要考量到海水溢淹陸地後要產生危害需要一定的溢淹高度與強度
- 黑點為岸線，紅點為離岸50公尺線，藍點為水溢淹的點位，黃線為溢淹範圍線
- 此例紅點與藍點相疊的點位總計有3點，紅點總數為8點，因此溢淹機率為3/8=0.375。

■海嘯地震且溢淹機率

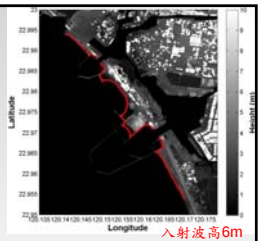
完成各區域海嘯地震發生次數期望值之評估、海嘯對安平港產生之水位變化及使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率後，最後將五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總點位與規模得此區發生海嘯且溢淹之機率。

各種情境之溢淹點位分佈(紅點為溢淹點位)-安平港





入射波高4m



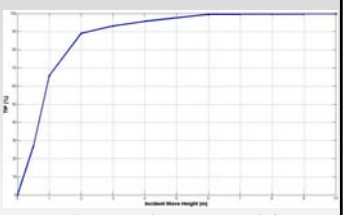
入射波高6m

紅色點表示離岸50公尺且溢淹高程達50公分之點位。

入射波高10m

安平港各入射波高下對應之溢淹機率

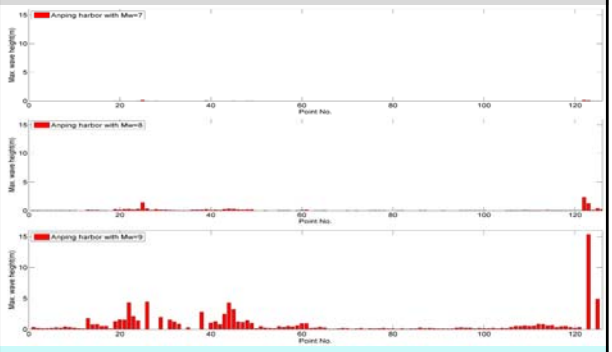
地點	安平港		
入射波波高(m)	離海50米的岸線點數	溢淹高度大於0.5m的點數	溢淹機率
0.5	1725	447	25.91%
1		1104	64.00%
2		1477	85.62%
3		1574	91.25%
4		1644	95.30%
6		1714	99.36%
10		1721	99.77%



安平港各入射波高下對應之溢淹機率圖

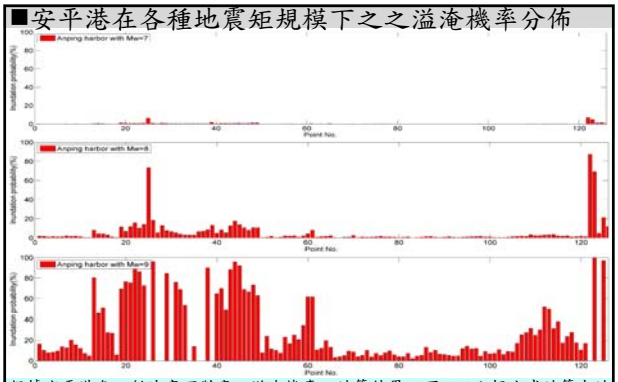
計算結果如上表及上圖，入射波高只要大於1公尺就會有60%以上的溢淹機率。

■安平港在各種地震矩規模下之最大波高分佈



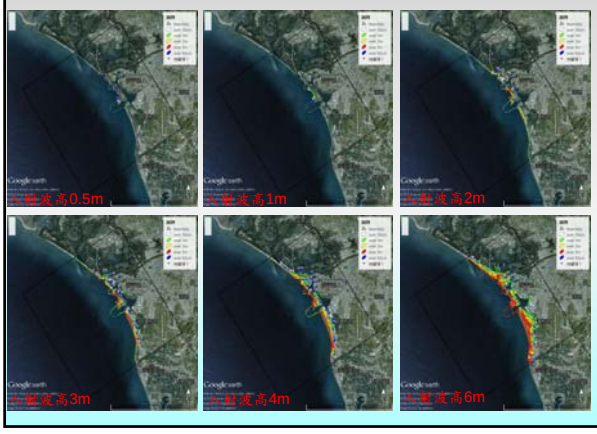
安平港在地震矩規模7.0時，其最大波高值未超過15公分；在地震矩規模8.0以上則最大波高可達2公尺；地震矩規模為8.5以上時，最大波高值超過4公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對安平港口產生較大之外海波高。

■安平港在各種地震矩規模下之之溢淹機率分佈



根據安平港各入射波高下對應之溢淹機率之計算結果，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，其分佈如本頁圖所示。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，即使在地震矩規模超過8.0之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

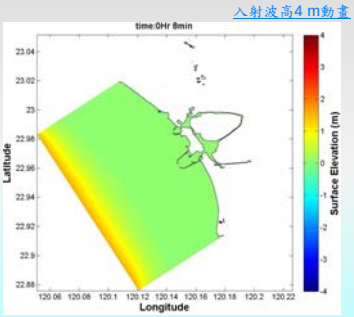
■安平港結合Google earth之溢淹圖



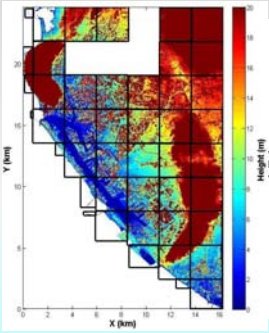
■安平港結合Google earth之溢淹圖

入射波高10 m

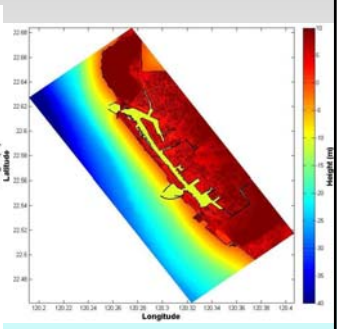
入射波高4 m動畫



■高雄港之溢淹模擬

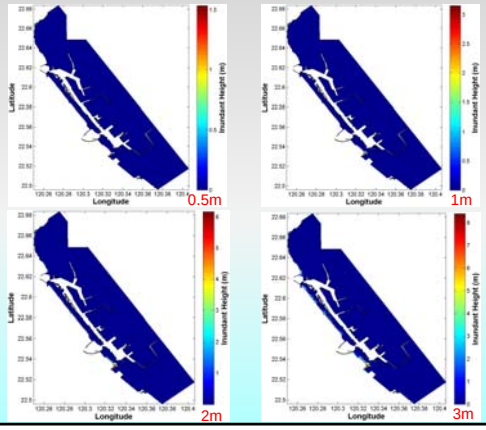


高雄港5m解析度數值地形檔

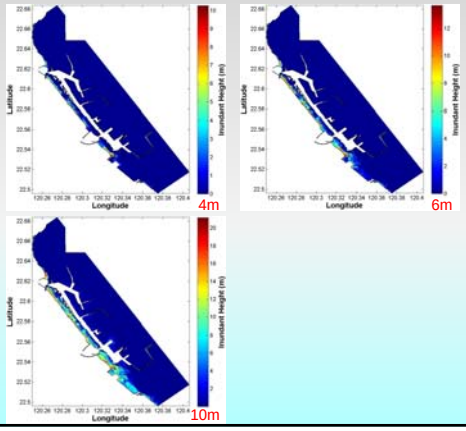


高雄港整併港內實際地形之數值地形檔

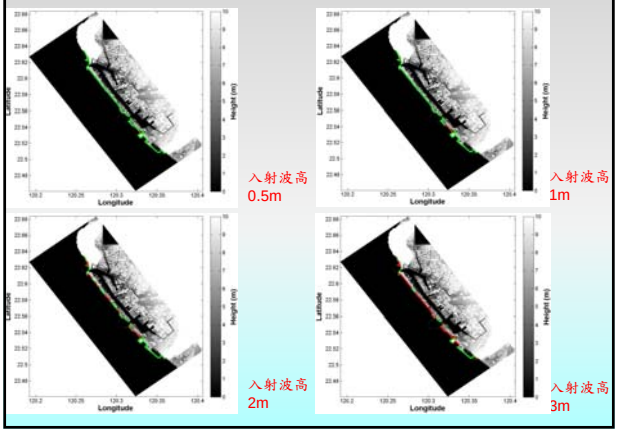
■高雄港之模擬結果

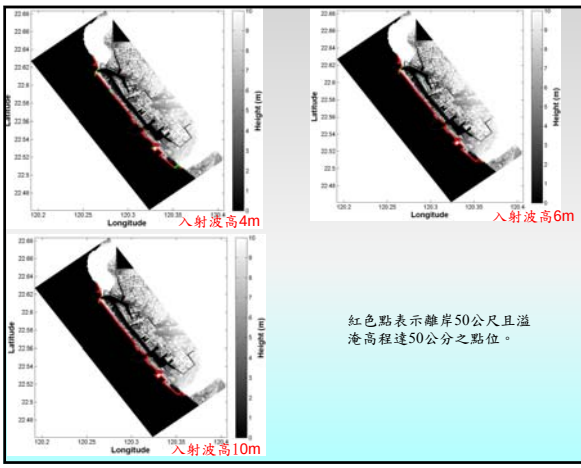


■高雄港之模擬結果



溢淹點位分佈(紅點為溢淹點位)-高雄港

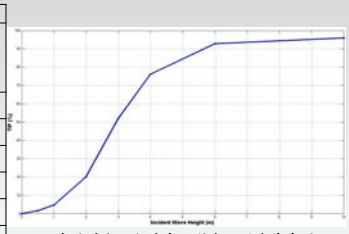




紅色點表示離岸50公尺且溢淹高程達50公分之點位。

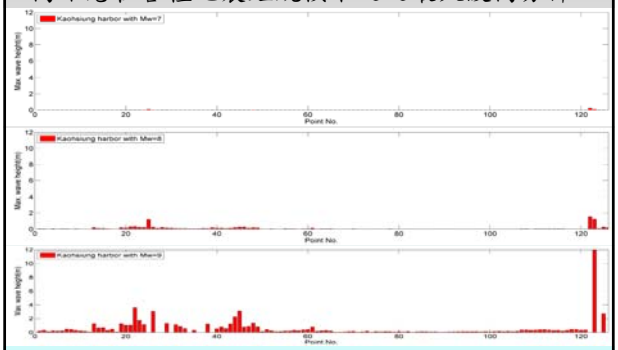
高雄港各入射波高下對應之溢淹機率

地點	高雄港		
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
0.5	4165	64	1.54%
1		192	4.61%
2		836	20.07%
3		2163	51.93%
4		3169	76.09%
6		3864	92.77%
10		3994	95.89%



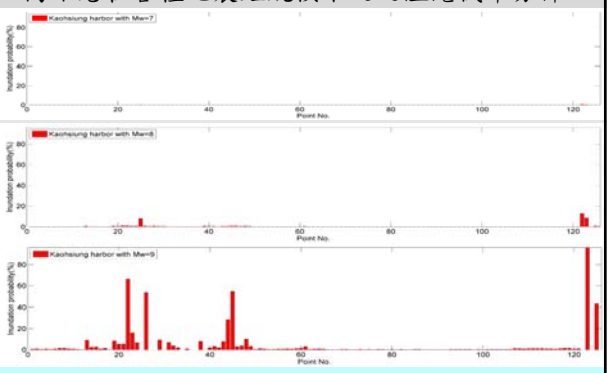
高雄港各入射波高下對應之溢淹機率圖

■高雄港在各種地震矩規模下之之最大波高分佈



高雄港在地震矩規模7.0 時，其最大波高值未超過15 公分；在地震矩規模8.0 以上則最大波高可達1.5 公尺；地震矩規模為8.5 以上時，最大波高值超過3 公尺；而分析結果顯示馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)會對高雄港口產生較大之外海波高。

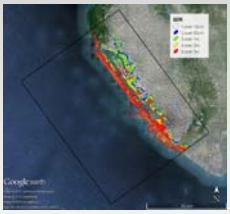
■高雄港在各種地震矩規模下之之溢淹機率分佈



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，即使在馬尼拉海溝、菲律賓海溝及馬里亞納海溝(含亞普海溝)地震矩規模超過8.0 之情況下，造成溢淹範圍及機率相當高。

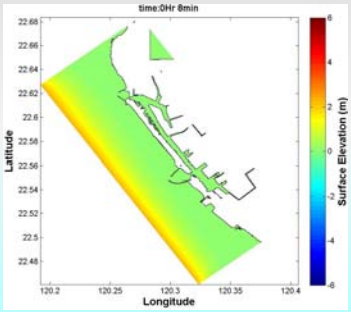
■高雄港結合Google earth之溢淹圖

■高雄港結合Google earth之溢淹圖



入射波高10 m

入射波高6m動畫



■海嘯地震且溢淹之機率

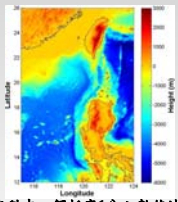
完成安平港域及高雄港域海嘯地震發生次數期望值之評估，海嘯對安平港高雄港產生之水位變化及使用模式模擬不同程度波高溢淹各鄉鎮之狀況並定義溢淹機率後，最後將五個規模(7、7.5、8、8.5、9)海嘯地震次數期望值，乘上淺層海源地震機率及五個規模發生海嘯產生之溢淹機率，加總各分量即得兩港未來50年及100年發生海嘯且溢淹之機率。

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」。

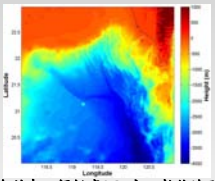
評估結果:
安平港在未來50年間發生海嘯且溢淹之機率為9.84%，100年為19.43%。

高雄港在未來50年間發生海嘯且溢淹之機率為0.55%，100年為1.09%

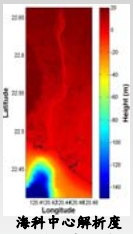
■高屏溪數值地形



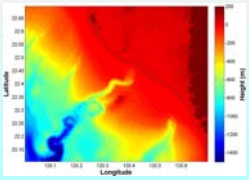
海科中心解析度1分之數值地形



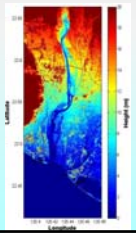
海科中心解析度0.25分之數值地形



海科中心解析度
0.004分之數值地形



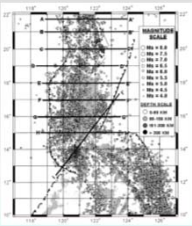
海科中心解析度0.03125分之數值地形



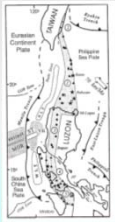
內政部5公尺
陸地地形(DSM)

■馬尼拉溝地震參數及地震紀錄

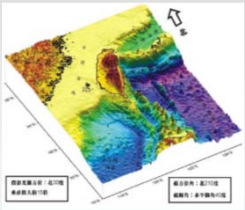
馬尼拉海溝北起呂宋海峽中端，與台灣西南海域斷層帶連接，南迄民多羅海峽



呂宋島地區1619年-1997年之地震紀錄
(取自Bautista et al. (2001))



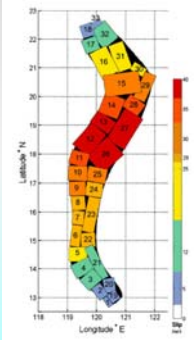
呂宋島之地理位置圖
(取自Bautista et al. (2001))

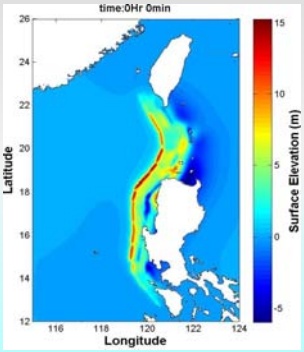


馬尼拉海溝之立體圖
(取自海科中心)

■海嘯沿高屏溪口溯上模擬

參考Megawati et al. (2009)所建議之馬尼拉海溝33個子區塊地震參數，將此地震參數帶入模式中建立馬尼拉海溝斷層帶所產生之初始水位

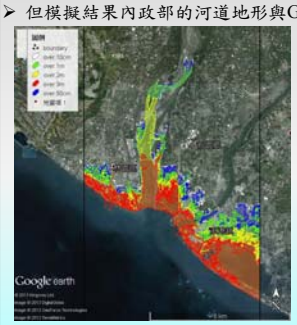




參考Megawati et al. (2009)建議之地震參數建立初始水位

■海嘯沿高屏溪口溯上模擬

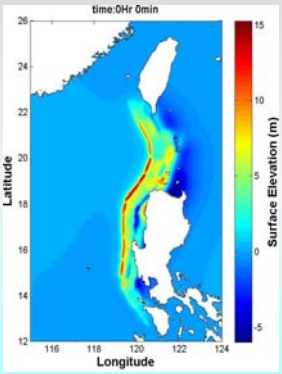
- 將模擬結果與Google Earth地圖疊加製成溢淹地圖，高屏溪為南北走向，其首當其衝的為雙園大橋。
- 但模擬結果內政部的河道地形與Google Earth 2013版本不太相符。



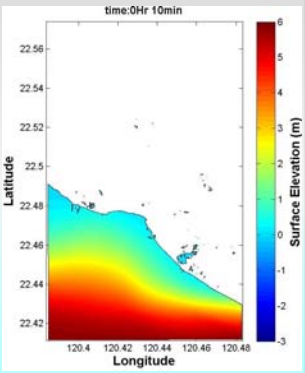
結合Google Earth之溢淹圖

■海嘯沿高屏溪口溯上模擬

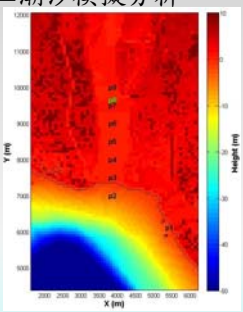
使用地震參數產生

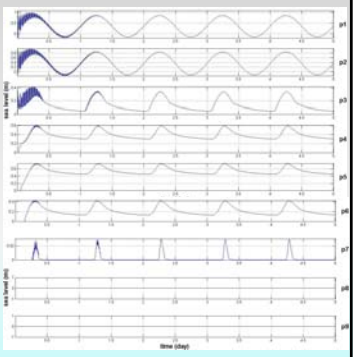


6m鐘形波入射



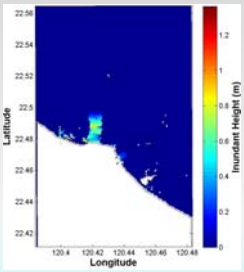
■潮汐模擬分析

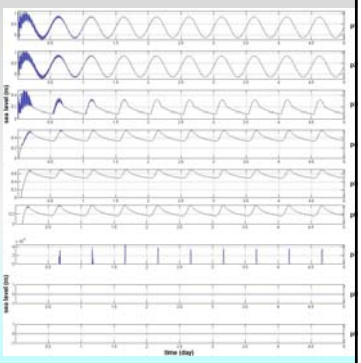




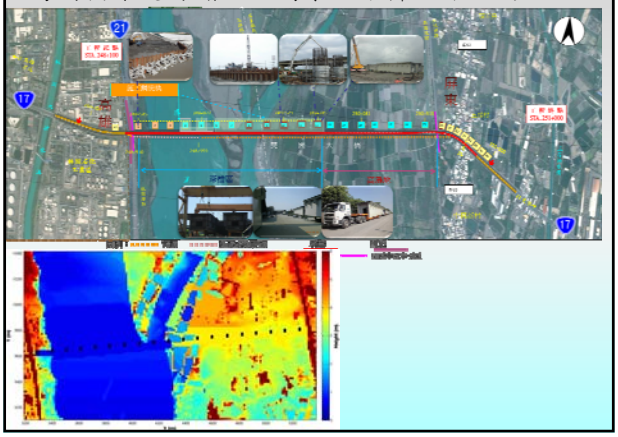
利用交通部氣象局之潮位統計資料，取東港2003年至2012年潮位統計之年平均潮位水位，大潮平均高潮位為0.843 公尺，大潮平均低潮位為-0.138 公尺，其中P1 為東港潮位站位置，P8為雙園大橋附近，模擬全日潮其九個點位之水位紀錄，雙園大橋(P8 點位)並無受到潮汐之影響。

■海嘯沿高屏溪口溯上模擬





■跨河橋梁受海嘯波之衝擊力分析-數值地形



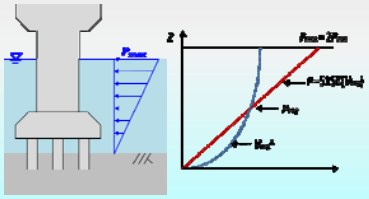
■海嘯湖上引致作用力

根據「公路橋梁設計規範」採用之計算橋梁受水流作用力，如下式所示：

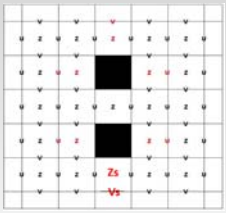
$$P_{avg} = 515K(V_{avg})^2$$

P_{avg} ＝平均流水壓力(Pa)　V_{avg} ＝平均水流速m/sec，以流量速率除於流水面積計算之。

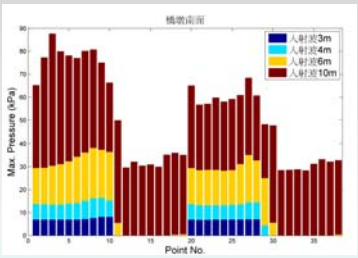
K ＝水流作用力常數。平頭墩用1.4，圓頭墩用0.7，尖頭墩其角度為30°或小於30°者用0.5。



■海嘯湖上引致作用力



黑色網格為橋墩，以橋墩墩柱南面的壓力計算來說，其Zs的位置為計算靜壓力的水深，以Vs的位置為計算動態壓力的流速。



而靜壓力 $P_s = \rho g h$ 式中 ρ 為水密度1000kg/m³，g 為重力加速度9.8m/sec²，h 為水深(m)，總壓(P_t)=動壓(P_v)+靜壓(P_s)來表示水流於橋墩墩柱上之壓力分佈其 COMCOT 模擬之水位、流速，便可計算靜壓力(P_s)及動壓力(P_v)，進而求得水流於橋墩與墩柱上之總壓力分佈

■橋墩沖刷

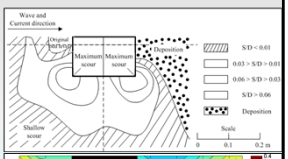
Rance於1980年曾對於矩形的橋墩的沖刷情形進行探討，動力條件為水波加上水流，在位於矩形直角的附近有較為明顯的淘刷現象；而沉積物堆積位置部分，也都是發生在橋墩後方。橋墩局部淘刷深度方面，可由Colorado State University equation (Richardson, Dillon, & McKnight, 1993)方程式進行計算：

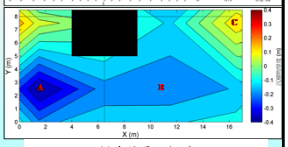
$$\frac{Y_{se}}{a} = 2K_1K_2K_3\left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.65} F_r^{0.43}$$

Y_{se}為局部沖刷深度，Y_1為橋墩上游水深，K_1為橋墩形狀修正係數，K_2為橋墩與流向偏角修正係數，K_3為河床條件修正係數，a為橋墩迎水面寬度，F_r為橋墩上游福祿數，定義為：

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY_1}}$$

因此藉由模式可計算出最淘刷深度



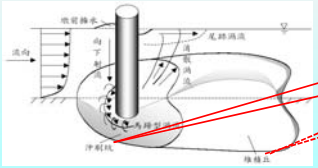


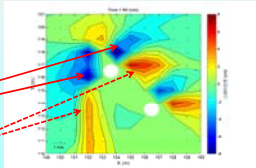
模式結果比較圖
(上圖)Rance（1980）、(下圖)模式結果

■橋墩沖刷

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，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）之基底造成沖刷。

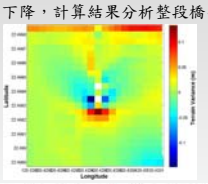
- 考慮高屏溪水域的沉積物的粒徑來對橋樑橋墩遇遭的沖刷影響；當來自橋墩前方的水流因受到橋墩的阻擋，於橋墩迎水面會產生停滯現象，但由於後方水流的繼續推擠，會分別朝上下兩側轉移，朝上的水流在橋墩前產生擁水，朝下產生向下射流衝擊底床，於底床和橋墩之間形成渦流系統，此渦流系統稱為馬蹄形渦流系統（horseshoe vortex system）。此渦流系統會對橋墩周圍底床產生淘刷作用形成沖刷坑，並隨時間而加深且擴大

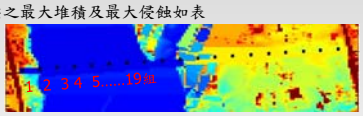




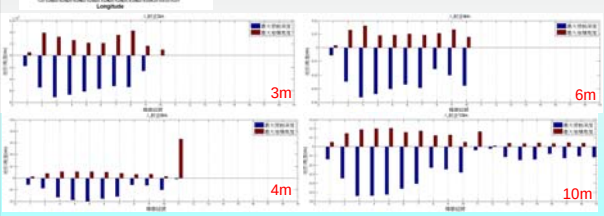
■橋墩沖刷

將兩並聯之橋墩墩柱為一組，計算入射波高3、4、6、10公尺，取橋墩鄰近一格之格點其最大值(最大堆積)及最小值(最大侵蝕)，分別代表地形上升及地形下降，計算結果分析整段橋梁之最大堆積及最大侵蝕如表





人射波高度	3公尺	4公尺	6公尺	10公尺
最大堆積(m)	0.0043	0.0162	0.3326	0.2067
最大侵蝕(m)	-0.0071	-0.0363	-0.1991	-0.5389



■結論與建議

- ◆ 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。
- ◆ 精進安平港域及高雄港域海嘯數值模式之互逆格林函數資料庫並建 立子系統，達到減少系統檔案大小並增進系統運算速度。
- ◆ 計算結果為安平港在未來 50 年間發生海嘯且溢淹之機率為9.84%，100 年為19.43%；高雄港未來50 年間發生海嘯且溢淹之機率為0.55%，100 年為1.09%。其分析結果安平港風險值高於高雄港，主要原因為安平港之地形大多為沙洲為主；而高雄港現有高程可抵擋大部份震源及地震矩規模所產生之波高，不至於產生溢淹，故其風險值甚低。
- ◆ 參考Megawati et al.所建立之馬尼拉海溝的地震參數，第一波海嘯約20分鐘抵達高屏溪口，而其海嘯波沿高屏溪河道上溯約9公里遠，溯上高度最高水位有3公尺高，雙園大橋首當其衝。模擬潮汐為高潮位及低潮位兩種不同邊界之條件並對其溯上之水位無較大影響；當入射波高大於3公尺，其海嘯波才會沿高屏溪河道上溯至雙園大橋，其水流對橋墩、墩柱引致作用力，對橋墩受水流衝擊面(南面)之最大總壓力為87.5kPa。橋墩之鄰近地形最高堆積為0.21公尺，最大侵蝕為0.53公尺。

謝謝聆聽　　歡迎提問

附錄七　■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：海嘯對港區及跨河橋樑之影響風險評估研究(1/2)

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. 蔡清標 委員	**意見答覆**	
1.本計畫開發之系統主要係能達到速報及預報目的，有其重要意義。建議對速報之精度及效率，可予著重說明。	感謝委員的肯定及建議。其速報精度及效率，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模擬。請詳見期末報告第三章3.1、3.2節p3-3頁及第四章4.3.3節p4-16頁。	同意
2.本研究所謂之鐘型波形是否即孤立波，文中請有所說明。而溢淹模擬計算網格及乾濕邊界之處理，建議亦有所說明。	感謝委員的指教。孤立波之高度及寬度有一固定關係，而本研究所稱之鐘型波為了說明其週期與波高的不同而定義，但仍會統一為高斯波以利理解。請詳見期末報告5.3.2節p5-12頁。溢淹模擬計算網格及乾溼邊界之處理已於3.2.1節說明。請詳見期末報告 3.2.1節p3-9頁。	同意
3.一般之風險度除考量破壞機率、破壞度之外，通常還有其他因子，如脆弱度、社會因子等。本計畫	感謝委員的指教。其風險評估將其因子統稱為曝險度，評估其可能發生災害的地區。請詳見期末報告第五	同意

主要以溢淹機率代表風險評估，是否足以表示其風險，文中請有所說明。	章 5.1 前言 p5-1 頁說明。	
4.未來對跨河橋樑之衝擊力，將如何評估？高潮位之下，對橋樑的上揚力是否包括於其中？	感謝委員的指教及建議。本研究將以委員之建議，考慮高潮位及低潮位兩個不同邊界條件作為模擬條件及分析。將溯上之水位高低及流量計算其流速。詳見期末報告第六章 6.5 節與 6.6 節說明 p6-15 頁。	同意
二. 蔡政翰 委員	**意見答覆**	**意見答覆**
1.此報告書寫得頗詳細，尤其是加入前期計畫成果概述。	感謝委員的肯定。	同意
2.(3.19)式請改正。	感謝委員指教。已更正。	同意
3.圖 5.15 看不出溢淹點位分佈。	感謝委員指教。圖 5.15 溢淹點為紅色點為表示離岸 50 公尺且溢淹高程達 50 公分之點為；綠色點位為表示離岸 50 公尺但高程未達 50 公分之點位。已加註說明。請詳見期末報告 5.3.4 節 p5-18 頁。	同意
4.雙園大橋須於圖 6.11 或 6.12 標出。	感謝委員建議。已將雙園大橋標示於圖中。請見期末報告 p6-14 頁，圖 6.13(a)、(b)。	同意

5.此計畫要如何定義對跨河橋樑之影響？	感謝委員的指教及建議。本研究將以委員之建議，考慮高潮位及低潮位兩個不同邊界條件作為模擬條件及分析。將溯上之水位高低及流量計算其流速。詳見期末報告第六章 6.5 節與 6.6 節說明 p6-15 頁。	同意
6.p6-14 圖 6.11 應為 6.12，還有(a)與(b)圖之條件為何？	感謝委員指教。誤植部分已更正。圖 6.13(b)為河道局部放大圖。已加註條件及說明，並增加雙園大橋之標示。請見期末報告 p6-14 頁，圖 6.13(a)、(b)。	同意
7.p3-20, 單位為 μ 是否應為單位為 μm。	感謝委員指教。振幅單位為 μm。已更正。請見期末報告 p3-20 頁。	同意
8. p5-24, 之圖例次序有些不順。	感謝委員指教。5-24 頁之圖例次序已重新安排並增加圖說。請見期末報告 p5-23、p5-24 頁，圖 5.17、圖 5.18。	
9.請加入接續的工作項目。	感謝委員指教。將於期末報告結論與建議章加入後續之工作項目。請見期末報告第七章 p7-1 頁	

三. 岳景雲 委員	意見答覆	
1.資料蒐集豐富、分析嚴謹，值得肯定。	感謝委員的肯定。	同意
2.p3-2 佈放位置？加上地點。	感謝委員建議。媽祖計畫相關位置已加註。請見期末報告第p3-2頁，圖3.1。	同意
3.p5-23 建議縱座標比例一致→地震矩大→波高大。	感謝委員建議。原圖5.17、5.18已將縱座標比例統一。請見期末報告p5-23、p5-24頁，圖5.17、圖5.18。。	同意
4.p5-13 圖 5-13 與 p5-33 圖 5-24 (a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)加上說明。	感謝委員建議。原圖5.13、圖5.24(a)~(f)，已分別加註條件及說明。請見期末報告p5-13至p5-16頁及p5-32至p5-35頁，圖5.13、圖5.24。	同意
5.5m 解析度地形：對安平港馬刺突堤有否考慮。	感謝委員指教。本研究所取得之內政部地政司5m解析度DSM及DEM數值地形，已將馬刺突堤列入計算。請見期末報告p5.11頁，圖5.11。	同意
6.p5-18 安平港入射波>1m 60%溢淹機率。入射波定義？與季節風有關否？	感謝委員指教。季風所引起之1m風浪與海嘯之1m特性不同，風浪週期短，而海嘯週期屬於長週期之重力波，本研究模擬採用20分鐘	同意

	為週期之海嘯波，而其海嘯波所攜帶的水量遠大於季風引起之風浪。請見期末報告5.3.2小節說明p5-12頁。	
7.p5-28 臺北港溢淹機率：週期越長機率有減少驅勢與圖 5-21 色階表示是否一致？	感謝委員指教。以10分鐘到40分鐘為週期之結果比較，差異度不大，而目前的相關研究中，不同的波形中以高斯波產生之溯上結果較為嚴重，請見期末報告5.3.4.1小節之說明p5-16頁。	同意
8.p7-1 初步結論(4)有無考慮潮汐？後續期末有無計算流速？作用力(衝擊力)？及橋墩沖刷？	感謝委員的指教及建議。本研究將以委員之建議，考慮高潮位及低潮位兩個不同邊界條件作為模擬條件及分析。將溯上之水位高低及流量計算其流速。請見期末報告第六章6.5節與6.6節說明p6-15頁。	同意
四. 蕭松山 委員	**意見答覆**	
1.海嘯資料蒐集完整，且對已建置之海嘯速報系統之模式精進，並能與港灣環境資料庫整合，肯定其期中研究成果。	感謝委員的肯定。	同意
2.p3-14 圖 3.9 中“最大波達時間”應更為“最大	感謝委員指教及建議。已更正。已列出「自行輸入相關	同意

波到達時間”，另自行輸入相關參數，建議能列出。	參數」之說明。請詳見期末報告 3.3.1 節 p3-15 頁。	
3.海嘯影響風險評估，本計畫係以溢淹機率為評估指標，是否考量港區設施及橋樑受海嘯波衝擊力損壞程度評估。	感謝委員指教。本計畫模擬過程都假設現有結構物並未遭受破壞；理論上利用動量方程式概估結構物所受之外力；目前正逐步進行研究中。請見期末報告第六章 6.6 節說明 p6-18 頁。	同意
4.第六章標題建議加上“模擬”。	感謝委員指教。已更正。	同意
5.建議計畫主持人以往執行水利署相關計畫之經驗、成果提供本計畫精進參用。	感謝委員建議。執行水利署相關計畫之經驗，整合及結合 Google Earth 作為海嘯溢淹潛勢圖；將學校及醫療等救災所需資源一併顯示，於災害發生時做綜合研判之用。請詳見期末報告 6.4 節 p6-15 頁，圖 6.14。	同意
五. 簡仲璟 委員	**意見答覆**	
1.建議在第 4.2 節配合第二章之圖 2.4 及圖 2.5 作潛在海嘯波源區之詳細說明。未來除了各港區潛在海嘯波源區之探討外，也可針對國內核能電廠進行分析。	感謝委員建議。已於第 4.2.1 節配合第二章之圖 2.4 及圖 2.5 作潛在海嘯波源區之詳細說明，請詳見期末報告 4.2.1 節 p4-3 頁。國內核能電廠部份,將與主辦單位磋商後,列入後續計劃項目。	同意

2.有關溢淹，海嘯波之假設可否參照實際情況(例如多波峰)進行模擬。此外表5.4 顯示台北港海嘯波週期愈長其溢淹機率愈小，此與直覺認知不同，請再檢視比較。	感謝委員指教。以10分鐘到40分鐘為週期之結果比較，差異度不大，而目前的相關研究中，不同的波形中以高斯波產生之溯上結果較為嚴重，請見期末報告5.3.4.1小節之說明p5-16頁。	同意
3. 有關海嘯波沿高屏溪口溯上模擬部份，海嘯波在高屏溪河口處之大小是多少？是否有考量潮位？報告中所述之溯上高度最高水位有 3 公尺，是否即海嘯波受河川地形影響後水位抬升高度？河道地形可洽河川局取得？	感謝委員指教。此次高屏溪口溯上模擬部份，其高屏溪河口處因受地形影響後水位抬升約三公尺；但尚未考慮潮位；本研究將以委員之建議，考慮高潮位及低潮位兩個不同邊界條件作為模擬條件及分析。將溯上之水位高低及流量計算其流速。請見期末報告第六章6.5 節與 6.6 節說明 p6-15頁。河川地形將與貴中心協調取得。	同意
4. 建議後續報告書稿中之圖請以容易判讀之彩色印製。	感謝委員指教。期末報告中各圖均已利用彩色呈現。	同意
六. 蘇青和 委員	**意見答覆**	**意見答覆**
1.第三章海嘯數值模式，大尺度及小尺度模式如何整合運作，建議增加補充說明。	感謝委員指教。大尺度及小尺度模式為巢狀網格，藉此細部描述海嘯於小區域之溯上計算，也提高海嘯模式的效率。請詳見期末報告第	同意

	3.2.2 節 p3-11 頁。	
2.第四章模式精進或提昇技術方面之論述，建議做詳細說明。	感謝委員建議。以增加精進及提升技術方面之論述。請詳見期末報告第 4.1 節 p4-1 頁。	同意
3.第五章海嘯災害風險評估，評估條件有關地震矩規模與入射波之關係，建議增加作比對表，港區各種入射波(地震矩規模)之溢淹圖可彙整置於附錄。	感謝委員建議。地震矩規模與入射波之關係及港區各種入射波(地震矩規模)之溢淹圖，已彙整及製表放於附錄四。	同意
4.海嘯對港區及跨河橋樑之影響及風險評估，有關潮位、水位、流速、作用力及橋墩沖刷等現象影響，建議做較詳細說明。	感謝委員的指教及建議。本研究將以委員之建議，考慮高潮位及低潮位兩個不同邊界條件作為模擬條件及分析。將溯上之水位高低及流量計算其流速。請見期末報告第六章 6.5 節與 6.6 節說明 p6-15 頁。	同意
5.報告撰寫內容請依本所規定，期末報告增加納入中、英文摘要。	感謝委員指教。均按規定撰寫並增加中英文摘要。	同意

附錄八　□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：海嘯對港區及跨河橋樑之影響風險評估研究(1/2)

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. 蔡政翰 委員	**意見答覆**	
1.P.2-11 2.4 節之內容與標題不太合。	感謝委員的指教。已將標題改為海嘯之風險。	同意
2. P.3-35 圖 3-20 不清楚。	感謝委員的指教。已將圖 3-20 放大。	同意
3.P.4-13 圖 4.14 與圖 4.16 右下圖之時間軸與文內之時間不合。	感謝委員的指教。圖 4.14 與圖 4.16 為單機輸入參數所產生之結果，其結果為輸入參數後所產生之時間水位。	同意
4. P.4-23 第 3 段最後一行之 10 小時應該 10 分鐘吧!	感謝委員的指教。此處筆誤已更正。兩港之第一波到達時間相差約 10 分鐘。	同意
5.P.5-12 波高值 0.5m-10m 之水深是 1000m 嗎？(圖 5.12)若是，在 1000m 水深處有 10m 波高是否太高？	感謝委員的指教。水深是建立圖 5.12 高斯波形的公式參數之一，其此意為波形在 1000m 的平坦地形傳播時，也能維持該波形不變。而安平港外海水深不到 100m，公式的深度參數代 1000m，取其入射波形，10m	同意

	波高的確是極端的例子。	
6. P.5-16 與 P.5-35 圖 5.13 與圖 5.24 有何不同？	感謝委員的指教。僅為展示方是不同。	同意
7.P.6-11 至 P.6-156.4 節之結果是否假設馬尼拉海溝 33 個斷層皆錯動？	感謝委員指教。此處為假設馬尼拉海溝 33 個斷層皆錯動。	同意
8.P.6-23 至 6-31 請說明使用之 D50 值即河床的沉積物的粒徑，是否有實際的粒徑值作參考。	感謝委員指教。D50 目前是設定值為 0.2mm。如有找到相關調查結果，將予以修正。	同意
三. 岳景雲 委員	**意見答覆**	
1. 計畫具有實用性，資料蒐集多，簡報動畫清晰。	感謝委員的肯定。	同意
2. P.6-19 至 P.6-21 橋墩寬 4.6 米、高為 9 米(距水面？米)、墩距 6.7 米。地形解析度為 5 米，是否考慮較小網格提高精度。	感謝委員指教與建議。如果有解析度更高之數值地形，有考慮提高網格精度。	同意
3. P.6-24 流水壓力自頂部 Pmax 變化到 0 呈三角形分佈是否合適？總力是否偏小？	感謝委員指教與建議。目前是參考高公局的公路橋梁設計規範，如後有找到更好的資料將予以修訂。	同意
4. P.6-25 圖 6.26(a)~(d)縱座標建議一致，方便判讀，	感謝委員指教與建議。已修正。	同意

比較 P.6-31 圖 6.31(a)~(d) 縱座標建議一致，方便判讀。		
5. P.6-30 表 6.2 最大堆積、侵蝕，建議與附錄 5 結合，加上橋墩柱號。其中入射波高 6 米、堆積 0.3326 米大於入射波高 10 米時堆積量 0.2067 米，是否有誤？	感謝委員指教與建議。入射波高6米的情況，水位主要由柱體的西側傳入，而西側有較高的地形，在水體傳入的短時間，容易形成較大的水位差，進而出現較強的流量進行侵蝕作用。而入射波高10米的情況則主要由柱體的南側傳入，南側的地形相對東側較為平坦。不易因地形的因素形成較大的水位高低差。亦即當橋墩附近為平坦地形的時候，10米產生的堆積量會大於6米。如果附近地形變化較大的情況下，可能產生如此例相反的結果。請見報告6-30頁	同意
6. 附 4-4 Max wave=0.48 是否為 0.048。	感謝委員指教。此處為筆誤，已修正。	同意
8. 是否考慮上舉力？漂流物對橋墩之影響？Surge Force?	感謝委員指教。因沿河道之海嘯入射波波高未大於橋樑下高度，故未考慮上舉力，其漂流物、Surge Force 為更複雜之計算，目前模式尚無此計算模組。	同意

四. 蕭松山 委員	意見答覆	
1.期中審查意見已回覆、修正。持續資料蒐集、更新及使用模式驗証、精進成果值得肯定。	感謝委員的肯定。	同意
2.安平港、高雄港、高屏溪等模擬使用之數值地形係由內政部 DSM(陸地)及海科中心或港研中心海圖(海底地形)組成，建議再確認二種圖資之高程系統是否一致。	感謝委員指教。內政部: 臺灣水準點之高程採用正高系統;海科中心深度資料為利用儀器的聲波回波測定海面到海底所得到的距離。所以兩者的高程系統和基準不一致。請見報告 6.2 節。	同意
3. 本計畫分別針對港區及跨河橋梁探討海嘯之影響風險。本年度對港區海嘯災害風險評估，已具成效，但橋梁受海嘯影響之災害風險評估，尚需加強、探討。	感謝委員指教。會持續加強及探討橋梁受海嘯影響之災害風險評估。	同意
五、楊德良 委員	**意見答覆**	
1. 期末報告十分完整,大致已達成既定目標，給予高度肯定。	感謝委員的肯定。	同意
2. P.3-4 eq(3.2)與(3.3)中+τx H+τy H 應為-τx H-τy H？	感謝委員指教。在海嘯進入淺水地區實由於受到淺化效應影響，水深趨淺及波高變大的情況下，海嘯波通過	同意

	因起海水擾動與海底底床間的摩擦作用也會大幅提高。τx H、τy H 因移項至左側項，故為正號。	
3. P.3-5 f 為科氏參數，請填 f=2ωsinΦ，ω為地球自轉角速度，Φ為緯度？同頁頻散請附加英文 dispersion。	感謝委員指教及建議。已增加 f 科氏參數及頻散之說明，請見報告 3-5 頁。	同意
4. P.3-55 圖 3.20 不清楚，而且太小，請改正之。	感謝委員指教及建議。已將圖 3-20 放大。請見報告 3-55 頁。	同意
5. P.4-18 圖 4.19，沒有彩色圖，紅線、藍線無法辨別。	感謝委員指教及建議。已修正。請見報告 4-18 頁。	同意
6. P.6-19 最後第 2 行，射計請改為設計。	感謝委員指教。此處為筆誤，已改正。	同意
7. P.6-20 第 1 行，堤高(提高？)，這些筆誤請改正之，其他可能仍有，請詳細 proofread!	感謝委員指教。此處為筆誤，已改正。	同意
8. P.6-23 至 P.6-24 請定義動壓(Pd)與方程式(6.1)與圖 6.24 相互間如何連接？	感謝委員指教。動壓(Pd)即為報告 6-23 頁所提的流水壓力，Pd =最大流水壓 P max*深度/總水深，請見圖 6.24。	同意

五. 簡仲璟 委員	意見答覆	
1. 報告中4.2節之高雄港及安平港海嘯預警子系統有那些功能？是否有母(主)系統之架構？未來是否會再新增其他港口？建議對海嘯預警系統有較詳細之架構及功能說明。	感謝委員指教。高雄港及安平港之子系統將與港灣環境資訊網進行整合，並不適用於其他港口，因資料庫不同。其餘港口(蘇澳港、花蓮港)將於未來計劃期程內，依進度持續進行精進作業。請見期末報告 4-25 頁第 4.5 節之說明。	同意
2. 不同的溢淹高度及距離設定會有不同的風險評估結果，其差異性如何？建議可進一步探討。	感謝委員指教及建議。其溢淹高度數公分的情況就可能造成些許災情，故將使用 Google Earth 的圖層來觀察所溢淹範圍。也將於未來計畫中結合地理資訊系統的研究來進一步探討。	同意
3. 第七章之建議部份請再加強說明，非僅簡單條列後續工作內容而已。	感謝委員指教及建議。已增加及加強說明。請見期末報告 7-1 頁。	同意
4. 部份圖表內容說明請再補充，例如圖 6.23 與圖 6.30；第 4-3 及 4-4 頁有關高雄港及安平港之水域說明，請再檢視修正並附資料來源。	感謝委員指教。已將圖 6.23 及 6.30 增加說明；其第 4-3 及 4-4 頁高雄港及安平港說明為筆誤，已依照港務分公司之兩港沿革介紹做修正，請見報告 4-3、4-4 頁。	同意

六. 李俊穎 委員	意見答覆	
1. 有關擷取地震資訊網頁變動，請補充於表 3-2 內，並請同步協助中心更新相關程式。	感謝委員指教及建議。已將更改後之網址補充於表 3-2；已將修改後程式送至貴中心測試及更新。	同意
2. 請補充說明第五章所模擬港區溢淹條件入射波起始位置為何？	感謝委員指教。此模擬以巢狀網格最終層之地形解析度為入射波入射之邊界，其入射波位置約距港區 9 公里。	同意
3.建議合作單位考量未來模擬港區溢淹時，是否可增加非僅單一入射波情形？	感謝委員指教。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；請見報告 5-11 頁 5.3.2 之說明。	同意