

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

海嘯浪高波傳機率模型之建置研究

Development of a Probability Model on the Propagation of Tsunami Waves

計畫編號：1042001INER034

受委託機關(構)：財團法人成大研究發展基金會

計畫主持人：蕭士俊 教授

聯絡電話：(06) 275-7575 #63262

E-mail address：schsiao@mail.ncku.edu.tw

核研所聯絡人員：侯雨成

報告日期：104 年 12 月 15 日

目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
一、計畫緣起與目的.....	4
二、研究項目和內容.....	5
貳、研究方法與過程.....	8
一、海嘯概述.....	8
(一) 海嘯之生成、傳播與破壞.....	8
(二) 台灣海嘯記錄.....	10
二、國際現行之海嘯防災系統.....	14
(一) 美國.....	14
(二) 日本.....	19
(三) 案例探討－日本 311 地震與日本氣象廳之檢討[7]....	36
(四) 國際現行的海嘯防災系統結論.....	47
三、數值模式適用性探討.....	49

(一) 海嘯數值模式適用性探討	49
(二) 海嘯模式 (COMCOT)	54
四、機率式海嘯危害度分析 (PTHA) 模型.....	63
(一) 簡介	63
(二) 文獻回顧	64
(三) 機率計算與不確定性分析	65
(四) 機率式海嘯分析方法(PTHA)計算流程.....	72
(五) 海嘯危害度之應用	75
參、主要發現與結論.....	79
一、不確定性分析	79
(一) 偶然不確定性	79
(二) 認知不確定性	91
二、海嘯危害度分析結果	104
(一) 危害曲線	104
(二) 危害地圖	107
肆、結果與討論.....	111
伍、參考文獻.....	112

中文摘要

2011 年日本東北所發生之海嘯災害，使得沿海核電廠之安全性受到重視。台灣位於板塊之交界處且四面環海，若鄰近海域產生海嘯，可能會威脅核電廠之安全。為建立由海嘯源之波高到核能發電廠（核三廠）廠址外圍的機率式海嘯浪高波傳模型之研究，本計畫期程三年，以馬尼拉海溝錯動時所可能引發之海嘯，對海嘯波傳遞至核三廠廠址之波高進行研究，建立台灣核三廠之海嘯波波高機率模型，以提供核能電廠防範海嘯災害決策之參考。

本報告書為三年期計畫的第二年，本報告延續第一年之成果，建立核三廠區所需之機率式海嘯模型。由於 2006 屏東地震和 2011 日本東北地震的實測資料於台灣較為完整，故透過模擬這兩場歷史海嘯，藉以獲得偶然不確定性之標準偏差。認知不確定性來自對於自然現象的未充分瞭解，需透過邏輯樹狀圖並給予適當權重的方式來決定其標準偏差，而核能所提供的邏輯樹狀圖共有 72 組海嘯情境，目前已完成其中 50 組海嘯情境模擬，並製作海嘯危害曲線與海嘯危害地圖為初步成果。

關鍵字：海嘯、數值模擬、核電廠、機率式海嘯危害度分析模型

Abstract

On March 11th 2011, a seaquake-induced tsunami invaded the northeast coast of Japan. The potential threat of nearshore nuclear power plant (NPP) under tsunami attack has therefore been noted. Taiwan is an island located in the subduction zones around the Pacific Ocean rim, so it is of importance to understand how the tsunami will affect the NPPs close to the shoreline due to its potential threat. Consequently, a research project for three-year duration is presented in order to establish a probability model on predicting the propagation and inundation of possible seaquake-induced tsunami to the nearshore NPPs. The possible tsunami events are simulated numerically based on the fault movements of the Manila trench. The foci are mainly paid on evaluating the influence in term of wave height of tsunami wave propagating to the Maanshan NPP.

The second year project is devoted to establishing the Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (PTHA) model for the Maanshan NPP. In present report, the aleatory for tsunami is determined by comparing the tsunami wave height between the historical data and numerical results.

The 2006 Pingtung earthquake and 2011 Tōhoku earthquake were used since these two observed data sets are relatively complete in Taiwan. The epistemic comes from the uncertainties because of an incomplete understanding of natural processes and has to be determined via the logic tree. The logic tree used in this report is provided by the Institute of Nuclear Energy Research. There are 72 scenarios in the logic tree. Currently, a total of 50 scenarios were carried out and the corresponding hazard curves and hazard maps were plotted for the Maanshan NPP as preliminary results.

Keywords: Tsunami, Numerical simulation, Nuclear power plant, Probabilistic tsunami hazard assessment.

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起與目的

台灣位於板塊之交界處且四面環海，在台灣東北方和西南方分別有菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊下方而形成的琉球海溝和歐亞大陸板塊張裂形成的南中國海海洋地殼隱沒至菲律賓海板塊下方而形成的馬尼拉海溝。由此可知，台灣受到因斷層破裂所引致的海嘯襲擊機率相當的高。2011 年發生在日本東部海域地震矩規模 9.0 的大地震，引發嚴重海嘯，對日本本島東北部沿岸的區域造成極大的人民傷亡。更嚴重的是海嘯造成海水溢淹，造成日本福島核電廠的破壞，引發輻射外洩。現今的研究中，針對台灣核能廠區周圍海域的海嘯潛勢分析已漸成熟，卻很少將海嘯波高以機率和統計的方式來做呈現，建構海嘯波高機率模型可幫助決策者，進行防災的規劃和籌備，對核能廠在防災規劃上有其存在的必要性。

本研究以建立由馬尼拉海溝及琉球海溝錯動，可能引發之海嘯波到核能發電廠（核三廠）廠址外圍機率式海嘯波高模型為標的，以提供核能電廠防範海嘯災害決策之參考。其中將對海嘯給予簡單的概述並對國內外核能廠對於海嘯規範資料進行蒐集和彙整，並針

對數值模式的適用性和參數的不確定性做探討。最後，藉由數值計算結果進行分析並建立機率式海嘯波高模型。

二、研究項目和內容

第一年(民國 103 年) 之研究工作項目：

(一)分析方法及資料蒐集

蒐集國際且至少包含美國、日本及國內針對海嘯波傳遞及海嘯對核能設施影響之評估方法及規範，包括以防海嘯為目的之土木/水利設施的要求。

(二)評估適用性探討

探討二維及三維數值模擬等各種海嘯波傳評估方式在台灣海域地區(由板塊錯動等引發之可能海嘯源至台灣本島)之精確度、限制條件與適用性，包括模擬方法的驗證方式。

(三)國內海嘯波傳遞分析成果綜整

整合國內核能電廠之海嘯分析成果，作為後續機率式海嘯評估分析之參考資料，內容必須有海嘯源位置之震源設定、錯動引發之海嘯波波高、波速、海嘯波抵達核電廠廠外之最大波高等資料，並初步選定一海嘯事件提出合理之網格配置以及邊界條件設定。並由

蒐集之資料，協助本所人員於 SEC-HY21、FLOW-3D、COMCOT 等或其他海嘯模擬軟體之設定。

(四)海嘯模擬方法之建立與流程

利用本計畫蒐集之資料，建立以數值模式進行海嘯評估時之標準化流程及必須遵循之相關限制，並對選定之海嘯事件以數值模式進行二維以及三維之模擬比對，完成程序書以供國內規範擬定時之建議。

第二年(民國 104 年) 之研究工作項目

(一) 數值模式偶然不確定性

模擬台灣周圍有發生過之歷史海嘯(例如：日本 311 海嘯, 2011、屏東外海, 2006 和 花蓮外海, 2002)。探討馬尼拉海溝可能之錯動規模及型式，建置海嘯波傳數值模擬所需之震源參數。並配合模式之不同參數設定 來進行模擬，並和潮位站觀測資料做比較，並建構數值模式偶然不確定性(Modeling Aleatory)。

(二) 海嘯防災系統之相關文獻

蒐集國內(台灣)外(美國或日本)關於海嘯防災系統之相關文獻。

(三) 偶然不確定性之建置

海嘯機率模型偶然不確定性(包含 Modeling Aleatory 和 Parametric Aleatory) 之建構。

貳、研究方法與過程

一、海嘯概述

(一) 海嘯之生成、傳播與破壞

海嘯的英文在國際上稱為“tsunami”，而 tsunami 這個字是由日文而來，譯為津波，津有海港的意思，波則是波浪，而津波代表著在港口裡形成的大浪。海嘯是一種能量集中的重力長波，具有長週期和長波長的特性，波長約為數十至數百公里，週期約為數十至數百分鐘間。因為能量集中的關係，在其撞擊海岸結構物或海港時，會引起海面巨大的震盪現象，造成結構物的損壞。一般而言，海嘯大多隨著地震而產生，其因是由於海洋中發生大規模的地震，造成海洋底部板塊的隆起和突降，引起大規模的水體擾動而形成海水的波動。但值得注意的是，地震不一定會引發海嘯。海嘯的成因又大致可分為以下三種：

1. 板塊之間的斷層錯動而引發的地震

海底斷層錯動引發的地震是造成海嘯最為常見的一種。大部分

的地震都是由兩個板塊擠壓而成，但不一定每次地震都會造成海嘯，就如同先前所敘述，必須要一個板塊急速的上升，另一個急速的下降，而大量的推動海水，造成水體劇烈震盪，進而引發海嘯。

2. 海底火山爆發或海底山崩

海底火山爆發或海底山崩而引發的海嘯比起斷層錯動來的少見。然而，若是海底火山爆發噴出大量的岩漿，推擠、擾動海水也同樣會造成海嘯。

3. 陸地上大規模的土石崩落入海或巨大隕石落入海洋

大規模的土石（冰塊）崩落入海或巨大隕石落入海洋，傳遞大量的能量進入海洋，造成大量的海水擾動，進而引發海嘯傳遞至四周。

綜合上述，海嘯可由海底地震、火山爆發，陸地或海底大規模坍塌引起海面水位突然變化，隨即受到重力作用而以波動形態向外傳播所產生的重力長波。在傳播過程中可能因能量集中使水位升高，甚至沿著斜坡淺灘向岸推移，而造成極大的破壞（圖 1）。

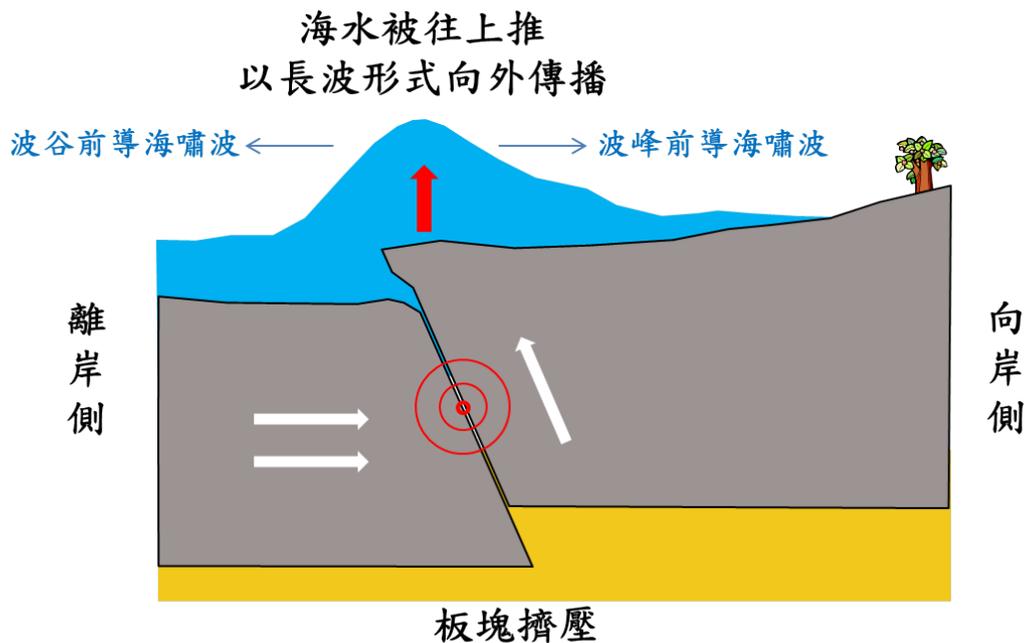


圖 1 海底地震引發海嘯生成示意圖

(二) 台灣海嘯記錄

依據歷史文獻記載，台灣自西元 1661 至 1867 年間，疑似海嘯紀錄就有高達六次之多，次數相當頻繁，由此可發現，台灣是海嘯發生的危險區域，因此事先建立完善的海嘯預警系統，對於減輕海嘯對台灣的災害影響是相當重要。以下為海嘯侵襲台灣的歷史資料：

1. 1661 年 1 月 8 日於安平

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。此日，發生地震的震級為 6.4，震央為東經 120.1°、北緯 23.0°（台南）。災情記述為「台灣安平大海嘯。海潮至，淹廬舍無算」；另外

鄭世楠等(1989)關於此次地震之記述為「地裂，餘震達六週，房倒23」。另外，德人海卜脫（Herport）著旅行記稱：「1661年1月某日晨6時開始地震，約歷30分，居民均以為地將裂開。安平房屋倒塌23棟，海地（今安平）城破裂多處。大震之後仍不斷有輕微地震，使人如置身舟中，約3小時，無一人能站穩。其時適有3船入港，在水中亦激烈震動，一若即將覆沒者。此次地震中，有一事最可驚奇，即海水曾被捲入空中，其狀如雲。此次地震，無論海中，在陸上，人身均能感覺，共歷6星期。」

2. 1721年1月5日於台南

王必昌，重修台灣縣志「雜誌·祥異」：「12月庚子（1721年1月5日），又震，凡震十餘日，日震數次，房屋傾倒，壓死居民。」。明清史料戊編載朱一貴供詞有云：「因地震，海水冷漲，眾百姓合夥謝神唱戲。」。由上述的「因地震，海水冷漲」看來，海水上漲可能與地震有關，有地震海嘯的可能。

3. 1754年4月於淡水

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。災情記述只提及「許多房屋被海嘯破壞」，並無其他詳細災情之描述。

4. 1781 年 4-5 月於高雄

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。5月22日，台灣地震，災情記述為「台灣海峽地震海嘯持續1-8小時，共死5萬多人」；另外日本海嘯歷史學家鳥羽德太郎也提及「台灣海峽海嘯。海水暴吼如雷，水漲持續1至8小時。海嘯吞沒村庄，無數人民在海嘯中喪生」；此次海嘯前蘇聯科學院通訊院士 Soloviev 和 Go 也根據 1952 年來自荷蘭及英國的資料「影響所及台灣全島的地震，且伴隨橫掃台灣西南沿海的海嘯，造成了巨大的破壞。幾乎全島海水溢 120 公里。地動與海嘯持續達 8 小時。該島的三個重鎮和二十餘個村莊，先是被地震破壞，隨後又為海嘯浸吞。海水退去後，在那些原是建築物的地方，充其量只剩下一堆瓦礫。幾乎無一人生還。40,000 多居民喪生。無數船沉沒或被毀……。安平鎮（即蘭遮）及赤崁城堡（台南市赤崁樓舊址）連同其坐落的山包均被沖跑了」。

5. 1792 年 8 月 9 日於彰化

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。此日，發生地震的震級為 6.75，震央為東經 121.7°、北緯 23.6°。徐泓（1983）引述「台灣采訪冊」「祥異，地震」中災情記述為「……

郡城地震，西定坊新街折一亭，隕一命。次日，聞嘉城地大震，店屋、民房倒壞，而繼之以火。一城惶恐無措，民房燒損過半，死者百餘人。壬子，將赴鄉闈，時六月望，泊舟鹿耳門，船常搖蕩，不為異也。忽無風，水湧起數丈，舟人曰：『地震甚。』又在大洋中亦然，茫茫黑海，搖搖巨舟，亦知地震，洵可異也。……」。

6. 1866 年 12 月 16 日於高雄

徐泓(1983)引述 Alvarez 著 Formosa 書中提及「晨 8 時 20 分，發生地震，約歷一分鐘，樹林、房舍及港中船隻，無不震動，河水陡落三尺，忽又上升，似將發生水災」。

7. 1867 年 12 月 18 日於基隆

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。此日，發生地震的震級為 7，震央為東經 121.7°、北緯 25.5°。災情記述為「台灣北部地震，是日有 15 次連續地震，基隆（雞籠頭，金包里）沿海山傾，地裂，全島震動，基隆全市房屋倒壞，死者數百人，基隆港海水向外海流出，港內海底露出，瞬間巨浪捲進，船隻被沖上市內，釀成重大災害，處處發生地裂，山腹大龜裂，噴湧泉水，淡水也有地裂，海嘯，數百人被淹死，房屋部分倒壞。」。

8. 1917 年 5 月 6 日於基隆

包澄瀾等(1991)引述楊華庭(1987)之「中國海嘯歷史年表」[1]。此日，發生地震的震級為 5.8，震央為東經 121.6°、北緯 23.2°。並且記述「基隆海嘯 1 米，周期 26 分」，並無其他災情相關之描述。

9. 1951 年 10 月 22 日於花蓮

徐明同（1981）[2]將此次芮氏地震規模定為 7.3，震央為東經 121.7°、北緯 23.8°。並且書中提及災情為「死者 68 人，傷者 856 人，房屋損害 2382 戶，花蓮驗潮儀有海嘯記錄，波高幾十公分而已。

二、國際現行之海嘯防災系統

(一) 美國

1. 預警系統

NOAA 與 USGS 兩個聯邦機構，透過利用地震和火山即時監控系統、深海的 DART® (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis; DART)系統和其他方法，盡可能收集潛在海嘯的位置與時間資訊。目前的 DART®測站分布，如圖 2。通過該系統可以及時

發現地震，發布海嘯警報，並及時送達政府機構、學校、家庭，向公民發布濱海旅行勸告等，使得易受海嘯襲擊的沿岸居民儘早得知破壞性海嘯的到來，及時做出適當的準備和反應。

DART®於 1995 年開發，並在 2003 年正式啟用，其資料的可信度超過 96%。DART®測站由兩個組件所構成，分別為底床壓力感測器（seafloor bottom pressure recording, BPR）和浮標[3]，如圖 3 所示。BPR 可偵測到最小達 1 公分的海嘯波，而浮標則用於將 BPR 之訊息透過 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES West)[13]衛星傳遞回陸地上的 NOAA 的海嘯警報中心（NOAA's Tsunami Warning Centers）和太平洋海嘯警報中心（Pacific Tsunami Warning Center, PTWC）。圖 4 為 DART® II 於 2005 年開始啟用[4]。除了具有更為方便安裝的特點之外，位於海面上的浮標不再只是單純傳遞 BPR 的資料，可直接操控修改 BPR 的設定，使其量測頻率依需求調整。

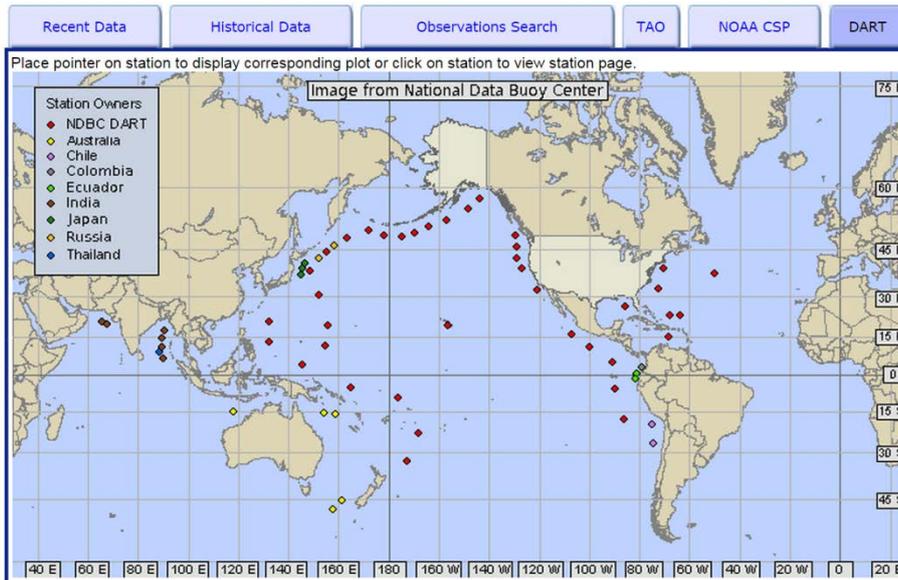


圖 2 海嘯深海評估及預警系統於全球的分佈位置 (資料來源：NOAA)

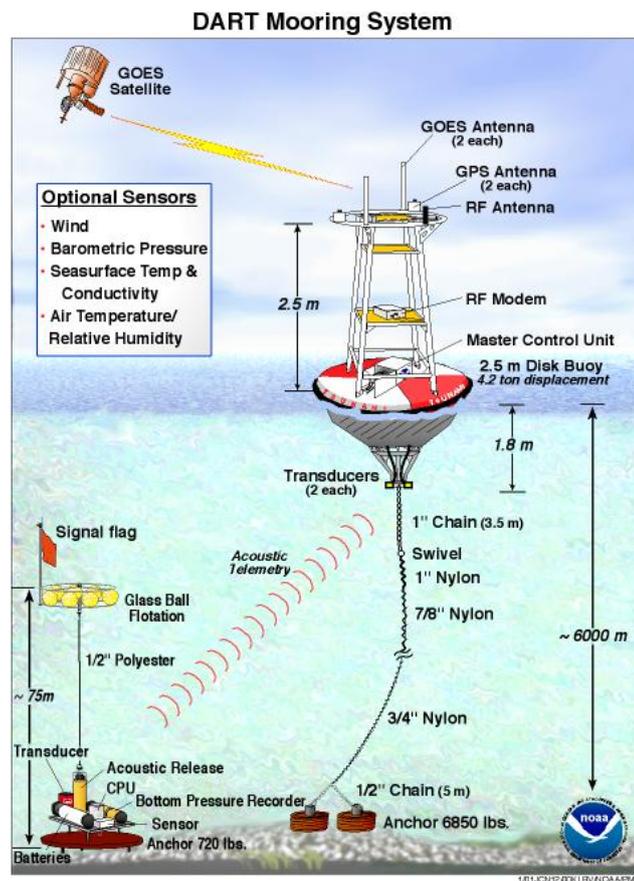


圖 3 海嘯深海評估及預警 (DART®) 系統 (資料來源：NOAA)

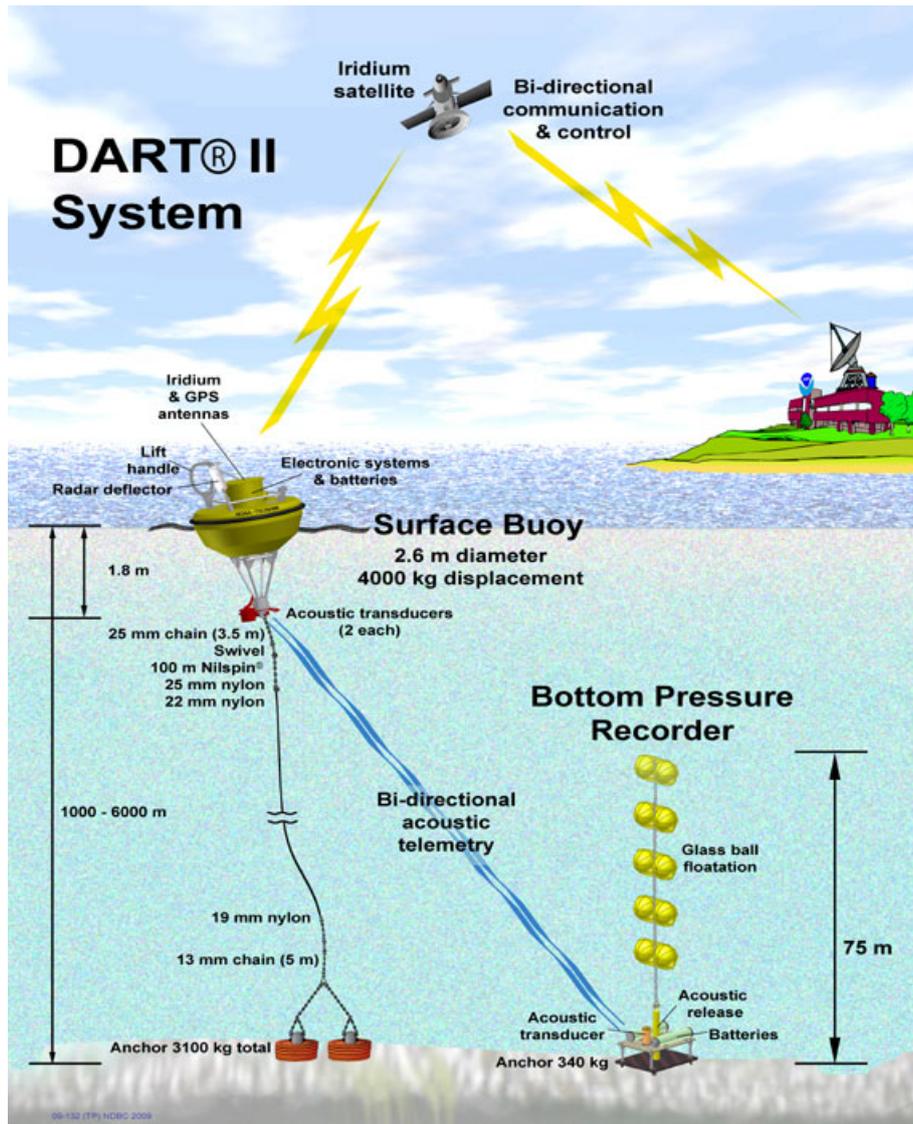


圖 4 海嘯深海評估及預警 (DART® II) 系統 (資料來源: NOAA)

2. 減災措施

基於海嘯風險評估，採取行動以減少或消除長期對人類生命或財產的危險。這代表計畫與都市區域劃分來管理發展地區，特別是針對海嘯的危險區域，發展加強抵抗海嘯的建設，同時也要保護重要設施與基礎建設。

所有擁有海嘯風險的社區，都應該要解海嘯危險的本質，理解需要執行長期的減災措施，以達到減少海嘯損失的風險。社區應採取新的海嘯防災建築技術、重要設施保護以及土地使用計劃，減少未來海嘯災害的影響。

3. 教育宣導

政府對民眾進行海嘯災害溝通和教育是極為重要，這有助於幫助民眾了解海嘯危險的本質，可進一步使民眾能夠採取適當行動，以減少海嘯損失，降低個人安全與財產的損失。風險溝通包含提升全民的防災意識以及減災與災前整備工作；部署安定、可性和有效的預警系統。

全民防災意識的提升措施包含：學校教育課程、公路與岸邊的警示招牌、旅館房間內的災害公告、定期報紙刊登的廣告、網路媒體以及其他資訊傳播方法。於所有被海嘯威脅的岸際地區，進行海嘯教育和認知方案，使民眾能夠採取適當的行動，以保護生命與財產。自從許多海岸地區吸引短期度假觀光客後，民眾教育應同時包含這些外來者。

(二) 日本

1. 預警系統

日本的海嘯警報由日本氣象廳(JMA)所負責，藉由事先對地震資訊的分析，包括地震的規模、位置、深度與地震距海岸線的距離，可在地震發生後 3 分鐘內立刻估算海嘯資訊。系統運作的原理是預先對各種位置、深度、規模的地震做數值模擬，存入資料庫，當地震發生後能夠立即利用資料庫中的資料比對，快速預測是否海嘯產生，以及海嘯生成時的走勢與波高，迅速發布海嘯預報[5]。

自 1970 年開始，日本國土交通省港灣局整合全國相關單位共同合作，架構 NOWPHAS(Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS)，進行全國波浪、潮位等觀測分析，並持續導入新的觀測儀器與解析方法，其觀測分為三部分。由外海開始至岸邊，由以下之儀器來進行觀測：

1. GPS 波浪儀（具海岸大約 10~20 km、水深 100~400 m，以浮標搭載 GPS，如圖 5）
2. 近岸波高計（具海岸約 3 km 以內，在水深 30~50 m 之處，設置壓力式或超音波感應器）
3. 潮位儀（設置在碼頭岸邊的井筒內裝置數位式量測）

其中，GPS 波浪儀為 2008 年所導入的最新觀測儀器，到 2010 年 12

月為止，總共裝設了 12 台。GPS 波浪計採用 RTK 方式 (Real Time Kinematic 即時動態定位量測技術)，以事先掌握的正確高度為基準，量測 GPS 波浪儀的相對高度，並以每 1 秒為單位量測。若電波狀況良好，並可以得到 FIX 解的話，其垂直方向的量測誤差之標準偏差，在距岸 20 km 處僅僅只有幾公分。



圖 5 GPS 波浪儀系統概要 (資料來源：獨立行政法人 港灣空港技術研究所)

2. 減災措施

日本致力於海嘯災害的預防、彙整沿海城市的海嘯防災對策，並於 1997 年出版「加強海嘯對策的地區防災計畫」手冊，說明防災設施可防止海嘯侵入內陸以及減緩海嘯災害，如表 1。房屋和其他建築沒無法在短時間內避免海嘯的攻擊，因此阻止海嘯侵入內陸為

首要的減災措施。

到目前為止，大尺度的結構物如防海嘯牆和防海嘯堤已被建造。結構物可以減低海嘯的溯升高度和破壞能力，但因為建造硬體設施需要許多時間和金錢，所以不可能將其應用在所有可能發生災害的地區。除此之外，由於海嘯的發生機率不高，為維持防海嘯設施的效能，需要長時間持續地檢查和修護，故維護的成本也是需要考量的因素之一。

目前現有的防海嘯結構物：(1) Tsunami seawall 防海嘯牆 (2) Tsunami breakwaters (bay-mouth breakwater) 防海嘯堤(灣口防波堤) (3) Water gates and inland locks 防水門與禦潮閘 (4) River embankments 河道堤防 (5) Tide control forest 抗潮林與 (6) Breakwater buildings 防波堤建築：

(1) Tsunami seawall 防海嘯牆

一般而言，海嘯減災之硬體設施皆沿著海岸線建造。它們的功能主要是為了保護內陸地區，使其免於天文潮、風暴潮以及海嘯之侵襲。在這些設施之中，防海嘯牆（圖 6）就是以避免海嘯侵襲為主要用途而被建造的設施。為了防止海嘯溢流及侵犯內陸地區，防海嘯牆的高程會大於設計海嘯波高之高程。這意味著，當設計海嘯波高增加時，堤頂高程也就必須隨之增加，但如此一來，海嘯牆的

整體結構就會變得非常巨大。這會導致許多問題，舉例來說，由海濱通往內陸地區的路徑就會相當不便，且民眾的視野會被海嘯牆阻擋。由於海嘯的侵襲機率頗低，因此在減災設施的規劃上，就必須把海嘯牆後方地區的生活環境與遊憩納入考量。理論上，海嘯波高是有可能超過海嘯牆建造時設計的高度，在此情況下，海嘯會溢流過堤頂並導致後方地區溢淹。在規劃防海嘯牆時，也需考慮海嘯牆後方的排水系統是否可有效運作。另外，對海嘯牆本身結構而言，需審慎評估其結構強度是否足以承受海嘯波與地震之作用力。

(2) Tsunami breakwaters (bay-mouth breakwater) 防海嘯堤

防波堤（圖 7）通常建造於海灣之開口（mouth of a bay），主要是減少在海嘯侵襲時進入海灣內的海水流量，故可有效減低海灣內因海嘯波浪而上升的水位。然而，防波堤的建造仍需考慮許多因素，比如防波堤的功用會因為海灣之形狀、建造的位置、防波堤開口的寬度、海嘯波之週期或其他因素而有所改變。另外，因為防波堤會反射部分之海嘯波浪於海灣外，反射之波浪對鄰近海岸的影響也需先評估。最後，防波堤一般屬於在外海建造的大尺度結構物，其建造價格可說相當高昂，所以防波堤之有效使用年限也是必須考量的因素。

表 1 各類防海嘯設施與功能[6]

設施	其他功能	特色
防海嘯牆	預防海嘯波侵入內陸	沿著海岸線建築的大尺度結構物
防海嘯堤	減少波浪對海岸的衝擊	被建築在海中
防水門與禦潮閘	預防海嘯波侵入河道與內陸	1. 位於河口的可動式防水閘門 2. 位於海堤口的禦潮閘
河道堤防	阻止海嘯從河道溢出	必須增加河口堤防高度
抗潮林	減少海嘯波侵入後的潮升與溢淹的範圍	大範圍的樹林
防波堤建築	減少海嘯波在結構物後方的威力	可抵禦海嘯波的海岸結構物

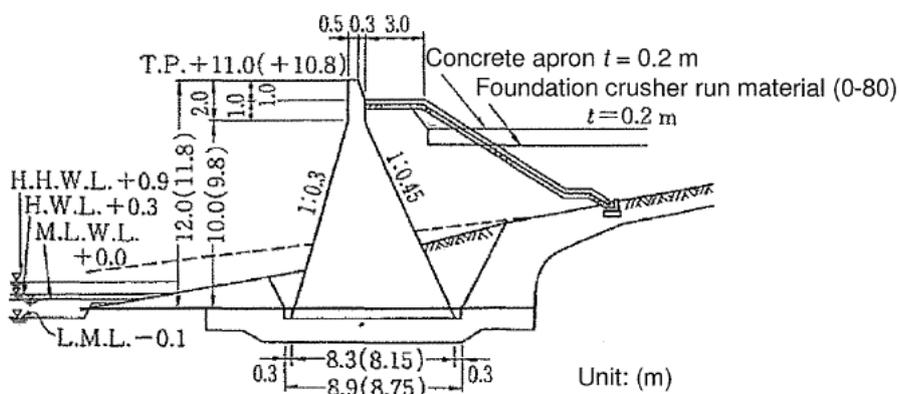


圖 6 日本奧尻島建造之防海嘯牆斷面[6]

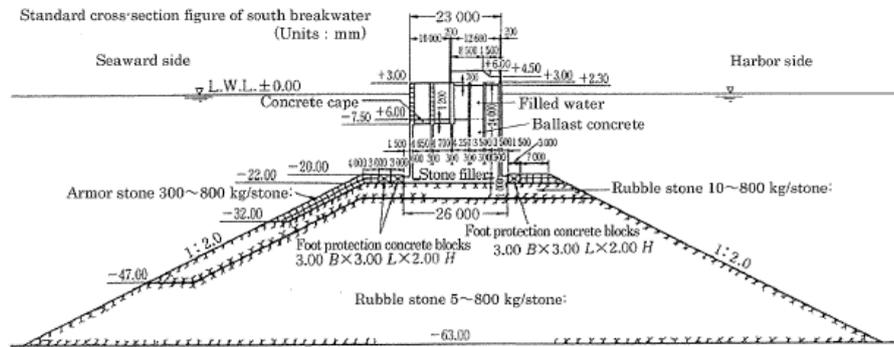


圖 7 日本釜石灣建造之防波堤斷面[6]

(3) Water gates and inland locks 防水門與禦潮閘

防水門（圖 8）通常建造在距離河口不遠處，其用途是為了防止海嘯來襲時沿著河道溯升而上。假如海嘯超過河岸而溢流的話，溢淹就會發生，但這種類型的洪水可藉由阻止海嘯沿河溯升來防範。於此情況下，防水門之設計必須足以承受海嘯的波浪作用力。另外，因為防水門也會反射波浪，在工程設計上仍需考慮反射波浪的波高與來襲的海嘯波高之疊加效應。

當防海嘯牆建造完成時，禦潮閘（圖 9）會被建置於各段海堤之間，如此可提供由內陸地區至海岸的路徑。一般來說，禦潮閘平時是開放的，但若有海嘯侵襲的可能性，禦潮閘就會關閉以避免海水由這些閘門衝向內陸地域。禦潮閘通常是由鄰近的政務機關人員負責關閉，但在緊急狀況時，也可經由受過適當訓練的志工人員負責此項工作。考慮到這些人員在關閉閘門時的安全，有些防水門及

禦潮閘採用了當偵測到地震發生時，可以自動關閉或是經由遙控關閉的設計方式。

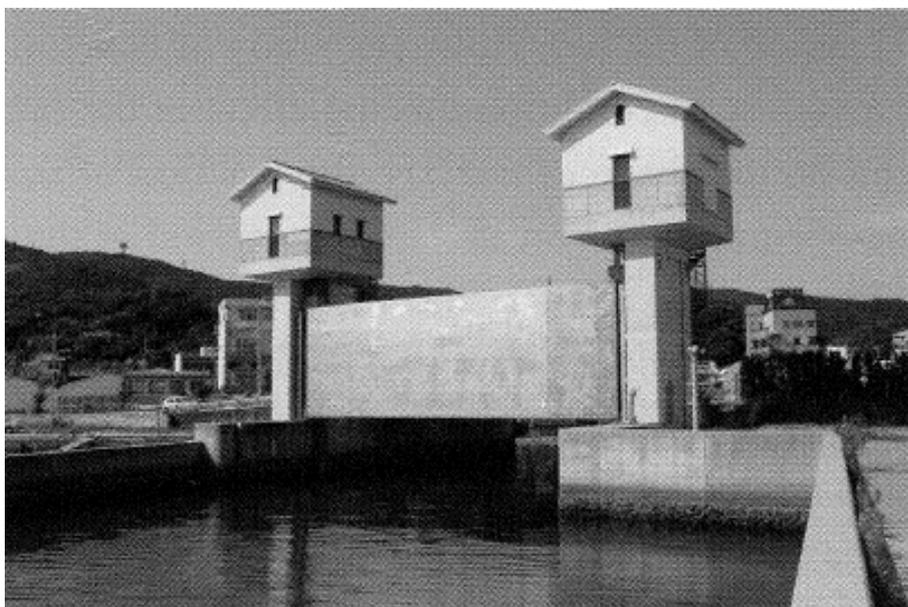
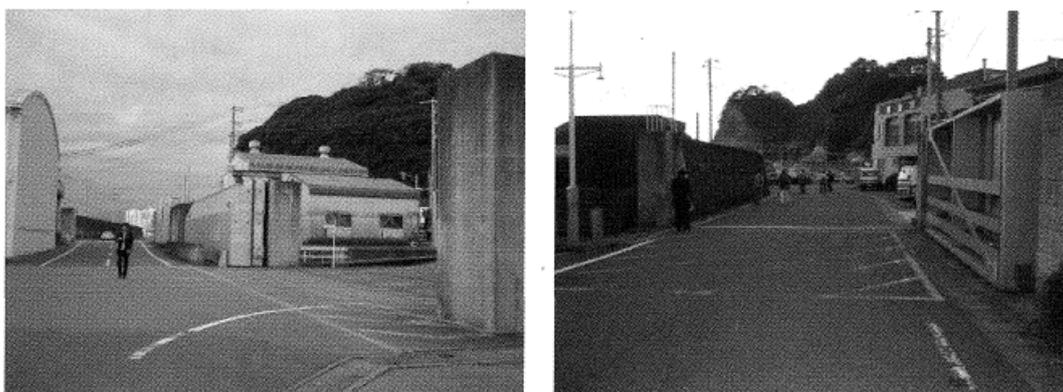


圖 8 日本南淡路市福良港之防水門[6]



(a)

(b)

圖 9 日本之禦潮閘[6] (a)沼津市靜內町之漁港，(b) 西伊豆町之仁科漁港

(4) River embankments 河道堤防

海嘯波侵入河道與河流相遇後，會有溢出河道的危險，河道堤防必須有足夠的高度抵擋海嘯波向外傳播，因反射波的作用，河道口的堤防必須要更加高大。

(5) Tide control forest 抗潮林

抗潮林有以下四種功能：(1)減緩海嘯波傳入的力量 (2)固砂、減少沙丘的流失 (3)阻止巨大漂流物進入內陸造成房屋損害 (4)減少因海嘯回流捲入海中的生命損失，提供樹幹當作救命的支撐物。

但抗潮林仍不能完全阻擋海嘯波的侵入，必須和城市的防災計畫有所配合。沿岸林除了可以減緩海嘯波傳入的力量，仍有其他附加功能，例如海嘯傳入後有漂流在水上的木頭可以幫助求生。



圖 10 抗潮林[6]

(6) Breakwater buildings 防波堤建築

防波堤建築位於海岸邊，以鋼筋混凝土和其他足以抵擋海嘯波的堅固的材料建置，可以阻止海嘯波侵入內陸，也可減少由海嘯波帶來的漂浮物、當作暫時的避難所。但有關此類建築的研究相當缺乏，像是如何找到抵禦海嘯的材料與結構設計仍是一大難題。

(7) 避難設施

及時的地震和海嘯警報，有助於增加人民逃難的反應時間，進而降低傷亡人數。首先，必須設有通訊設備提供避難路線和海嘯資訊，除了戶外的廣播，對於室內的電視或個體接收訊息的手機也是必要的。然而只有疏散訊息沒有危機意識是無法減少傷亡的，過去

有許多例子是人民接收到訊息後還是沒有逃生。因此，在平日必須訓練人民有準確的判斷力，在收到疏散警令後可以馬上疏散。為了達到這個目標，必須安排相關的災害防治教育、對地震海嘯的認識以及實際的災害演習，這些與軟體對策的配合有很大的關連，可見硬體和軟體的設備必須配合進行。

設計逃脫路線時，必須要考慮此路線在經歷過地震之後是否仍是疏通的，因地震往往先破壞了地表的建築，使房屋倒塌阻塞原本的道路，在設計逃脫路線時要排除這些脆弱地段，並且在沿路必須設有顯而易見、容易瞭解的引導路標，幫助居民不論是老人、小孩、外國旅客都能順利疏散。

(8) 海嘯危害地圖

如果居民能逃往安全的地帶，傷亡人數將會減少。因此，疏散工作是軟體對策的關鍵，由於海嘯會在地震幾分鐘後才發生，因此快速且有效率的疏散是重要。為了增加逃生的安全，必須優先提供預防海嘯災害的訊息，尤其是疏散路線跟避難場所的導引。其中，海嘯危害地圖可以直接觀察可能的危險地點，是預防災害的重要訊息。海嘯危害地圖通常是有政府單位提供，使用地圖來減緩傷亡是非常重要的軟體對策。日本政府印製海嘯危害地圖發給全國民眾，地方政府也根據其內容來提供預防海嘯災害的危害地圖給當地居

民。

海嘯危害地圖的資訊大略可分為以下兩類別：(1) 海嘯與陸地地形的關係，(2) 疏散。關於前者，最重要的資訊就是海嘯來襲時可能的溢淹分布，如海嘯流速、溢淹範圍和深度可協助建立有效的疏散計畫；後者是關於逃脫路線和避難區域的重要基本資訊，有明確的指令、預防措施和有效的撤離訊息，可以協助人民順利疏散。

要繪製一張海嘯危害地圖，需要數值模擬當地海嘯的最壞情境，但是海嘯數值模擬需要花上許多心力，像是地震模式的設定、地形資料、房屋建築和重要設備的位置，繁複的模擬工作需要很多金錢和時間成本。但若製作簡易的海嘯危害地圖只需參考過去的歷史海嘯，因簡化的危害地圖只展現了過去災害的溢淹範圍，還是要提醒使用者注意未來有可能會發生更大的海嘯。

(9) 教育宣導

民眾所需資訊根據不同職業和年齡有不同的需求，舉例來說，捕魚業需要知道他們使否能在海嘯抵達近岸前將漁船開往外海，如果可以的話，他們需要開多遠以及他們需要等待多久才可再回到港口。而一般民眾當中，老年人比年輕人需要更多的逃跑時間，所以設定兩種族群開始疏散的時刻和路線會有所不同。而一張危害地圖需要考慮大範圍居民的需求，過多的資訊會讓地圖變得複雜，海嘯

危害地圖可以做為防災前的預備。但在災害發生的緊急情況下卻很難馬上應用，換句話說，危害地圖包含了太多資訊，對緊急上的使用者是不方便的。因此防災資訊需要有所選擇，可以另外製作對災害發生時較容易閱讀的版本。

為了拯救更多生命，日本政府在近年來已經主動預備和製作海嘯地圖。然而，就算是簡單的海嘯危害地圖也不代表一定會被使用，民眾有危機意識是很重要的。地圖必須被張貼在家中的牆上或容易被拿出的地方，在社區、機構、學校、或其他團體也要有相關的防災教育和地圖的使用訓練。

最近，疏散的意願減少是一大問題，這表示越來越多的居民在海嘯警報響起時沒有馬上撤離，最大的原因是大多發布海嘯警報後並沒有海嘯來臨。有這樣反覆幾次的經驗，民眾會認為自己不會遇到災害，因此大家覺得就算有防災訊息也不需要逃跑。如果不撤離的趨勢增加，當海嘯真實來襲時會無法疏散。居民必須瞭解到他們有可能會成為受害者，政府相關單位也需要更多的努力，讓民眾不會置身事外。有兩點必須要告知居民：(1) 了解海嘯是如何影響他們的城鎮、(2) 實際演練與思考該如何應對，政府必須要安排相關的防災教育。

日本的海嘯防災計畫是透過工作坊進行（圖 11 和圖 12），在限定的時間內由團隊合作的方式討論出最為有效、合理的決定，參

與者必須先理解災害的範圍和思考防災的對策，工作坊的形式有以下優點：

- (1) 成員能共同理解該地區的危險情形。
- (2) 透過多人合作的方式較有可能討論出合理的對策。
- (3) 各人經過努力討論出來的對策，將有效提升計畫的實行率。

以下為工作坊討論的流程：

1. Know the enemy 了解對敵（海嘯）
2. Know the region 了解區域
3. Know the damage 了解災害
4. Thinking about countermeasures 思考對策
5. All participants share the results of the workshop 討論結果

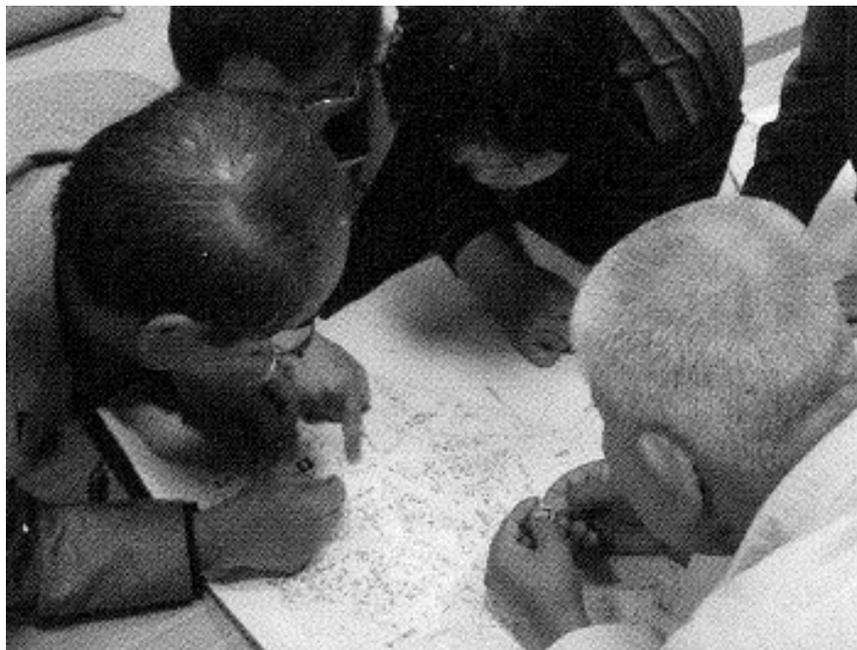


圖 11 工作坊討論情[6]

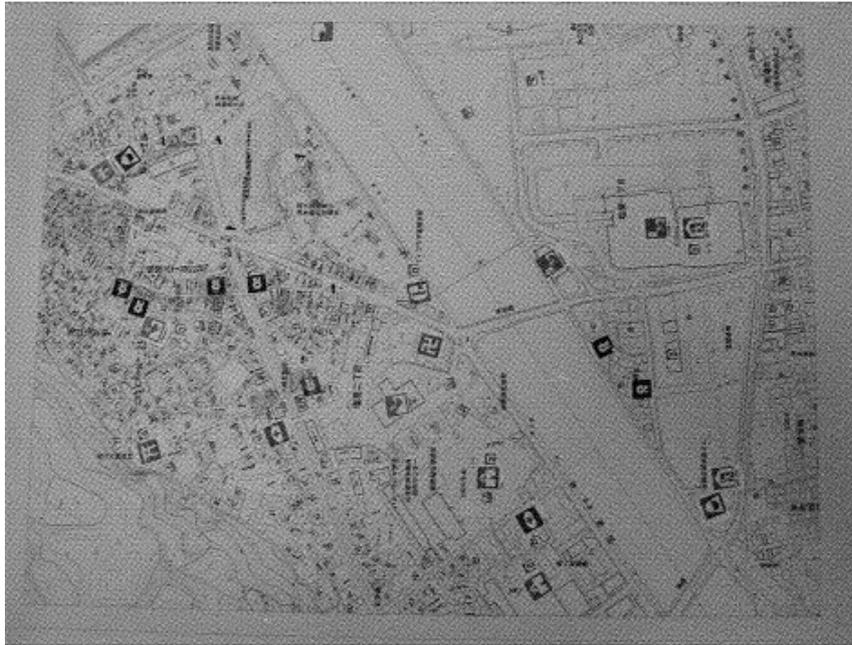


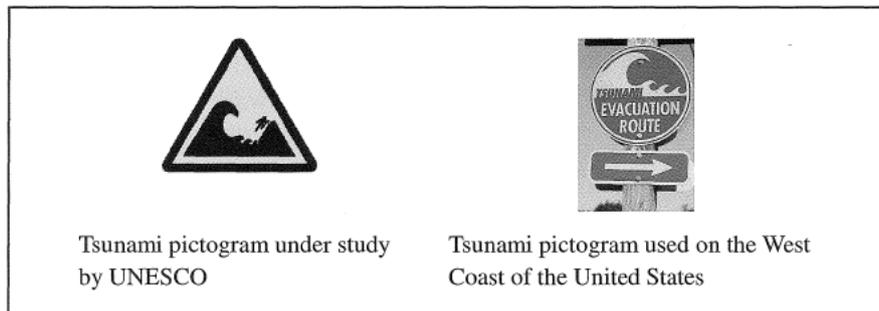
圖 12 工作團隊製作的海嘯危害地圖[6]

防災於保護生命、財產和生活條件三方面是最先被考慮的，一般來說其優先次序如下：生命>財產>生活條件，當海嘯來襲時，只仰賴軟體對策就要同時做到此三方面的救災相當困難。因此，為了更全面的了解與運用，必須要有技巧地結合軟體與硬體對策。

發布海嘯危害地圖是告知民眾危害地區的基本方法，但是不能確保所有人都能獲得資訊。例如：國外的旅客、在外地工作的當地人和對防災不感興趣的居民等。友善的疏散引導是使用圖像或標誌來告知該地區可能的海嘯風險、避難地點與逃生路線，讓人民在災害發生時得以挽救自己的性命。



圖 13 顯示超越海平面以上 4.2 公尺的標誌[6]



■ Tsunami alert



■ Tsunami refuge area



■ Tsunami refuge building



The color of these graphical symbols is specified in JIS Z 9101 ("Safety colors and safety signs-design principles for safety signs in workplaces and public areas").
Please refer to the following Munsell values:
Safety color Green: 10G 4/10,
yellow: 2.5Y 8/14
Color contrast Black: N1,
white: N9.5.

圖 14 海嘯的危險標誌與疏散引導[6]

歷史災害可作為未來防災與減災的經驗和教訓，海嘯曾經發生的地區與實際經歷都必須讓後代知道。例如居住在近岸的災民必定體會過海嘯前有地震的情形，若是有大規模的地震發生，必須能警覺到海嘯的危險。此外，海嘯波並不是只傳入一次，對於近岸地區可能會有第二波或第三波的侵襲。因此，將這些經驗記錄下來，有助於後代子孫更了解海嘯、減輕未來可能的災害。

然而，相比於地震和颱風，海嘯發生的機率極低。人們很容易就會忘記海嘯災害的經驗，將過去的經歷傳承下來並不容易。因此，必須努力留下相關的歷史資訊、告知居民此地有發生海嘯的危險。其中，海嘯波所帶來的巨石可以設立成紀念石碑，透過有形、可見的紀念石碑和紀念公園可以有效傳達災害的嚴重性。

在日本，過去歷史海嘯帶來的巨石有許多已經被建造成紀念石碑，所造成的重大災害和教訓都被刻在石頭上。雖然石碑傳達了災難的悲劇，但它們也提供了當時災害的寶貴訊息。文獻上沒有詳細記載的古代海嘯就可以透過這些石頭了解海嘯侵襲的區域與強度，巨石的蹤跡對於歷史海嘯研究有著重要的貢獻。



圖 15 位於日本釜石市岩手縣的海嘯紀念石碑[6]

(三) 案例探討－日本 311 地震與日本氣象廳之檢討[7]

1. 簡介

2011 年日本 311 地震規模達 9.0，是日本有地震儀觀測紀錄以來最大的地震，地震產生的海嘯造成重大傷害，有高達 20000 人死亡 (圖 16)。日本氣象廳 Japan Meteorological Agency (JMA) 在地震發生的三分鐘後發布第一個海嘯警報，但地震規模和海嘯高度都被過度低估了。地震發生後 28 分鐘，日本氣象局根據 GPS 波高計的最新消息更新了海嘯警報，此波高計距離海岸約有 10 公里，因為是位於遠域的外海，所以數據更新和預警的標準作業程序尚未確定，為了解決這個明顯的問題，日本氣象廳召集專家們組成調查委員會，邀請市政府和民眾一同確認作業內容和海嘯警報的公布時間，其最終目標為改善海嘯警報系統。2012 年 2 月日本氣象局彙整調查委員會的意見，並在 2013 年 3 月 7 日公布發表最新的海嘯警報系統。



圖 16 日本 311 大地震受海嘯損害的情形[7]

2. 日本氣象廳過去的海嘯監測與警報系統

在日本 311 海嘯發生之前，日本氣象廳統合全國 280 個地震儀組成了地震監測網，當地震發生時，日本氣象局可以透過監測網確定地震震源位置和是否需要海嘯警報的發布。為使蒐集的觀測時間和公布資訊可以更確實，日本氣象廳也和其他機構合作監測 220 個測站的海平面高度，當海嘯發生時，JMA 可透過觀測資料來更新海嘯抵達時間和最高的溯升高度(圖 17)。

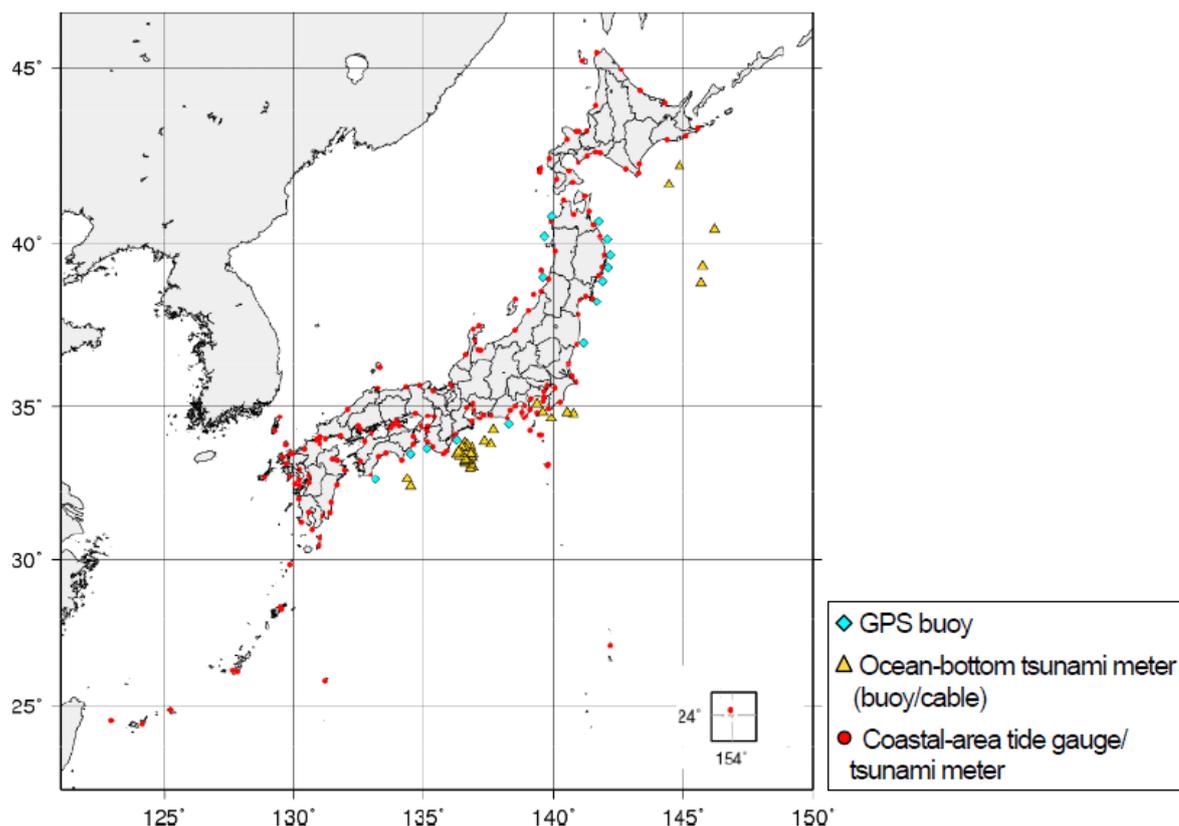


圖 17 海嘯觀測波高計與浮標分布[7]

為了發布即時的海嘯警報，日本氣象廳執行地震與海嘯的電腦模擬，模擬的計算需要有震源位置、規模等參數，並將各種情境的海嘯抵達時間儲存在資料庫裡。資料庫若事先計算好四周海岸的各種海嘯情境和結果，就可以針對不同的地震參數、在短時間內向民眾發布海嘯警報。

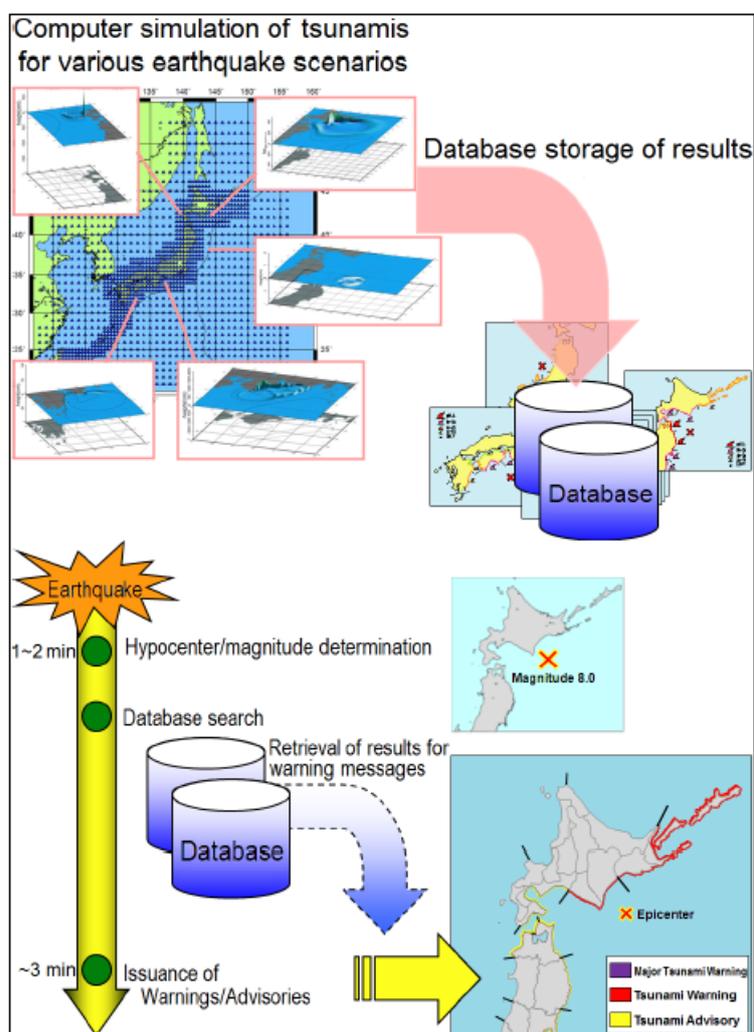


圖 18 海嘯警報系統之方法與流程[7]

3. 日本 311 地震與之海嘯預警發布

根據日本氣象廳的標準流程，在地震發生三分鐘之後會發布第一個海嘯警報，接著再詳細地計算地震參數，監測海平面高度，並且根據觀測資料來更新海嘯警報。當地震參數被更新後，會再次估計各地的海嘯高度和抵達時間，如果真的監測到海嘯波來臨，氣象廳也將根據觀測資料重新估計海嘯高度和抵達時間。但在日本 311 大地震發生後，為了在三分鐘內即時發布第一個海嘯警報，估算的海嘯波高最大只有六公尺，有嚴重低估的情形。

日本 311 大地震與海嘯發生時，氣象廳嘗試根據地震儀測得的地震波形來計算地震矩規模(Mw)，但強大的震波在寬頻的地震儀中容易達到飽和，因此日本氣象廳沒有在 15 分鐘以內精準計算出地震矩規模，也沒能更新海嘯警報。

於大地震發生後的下午 15:10，位於釜石市距離岩手縣約十公里處、由港口和碼頭局(Ports and Harbours Bureau, PHB)所管理的 GPS 浮標記錄到劇烈的海平面提升，這樣的數據使日本氣象廳可以更新海嘯波高度，發布第二個海嘯警報，此時警報的內容為宮城縣有到高達十公尺以上的海嘯，岩手縣和福島縣也有六公尺高的海嘯，日本氣象廳繼續更新這些高度，並且擴展海嘯警報發布的區域，這些警報都是根據浮標和波高計的觀測值來計算。

日本氣象廳在地震發生 50 分鐘後根據全球地震資料分析測定

地震矩規模為 8.8，因為警報已經根據觀測資料在 15:30 發布更大的海嘯高度，所以日本氣象廳沒再做更新地震矩規模被計算為 9.0，日本氣象廳於 311 大地震發布之海嘯警報如圖 19 所示。

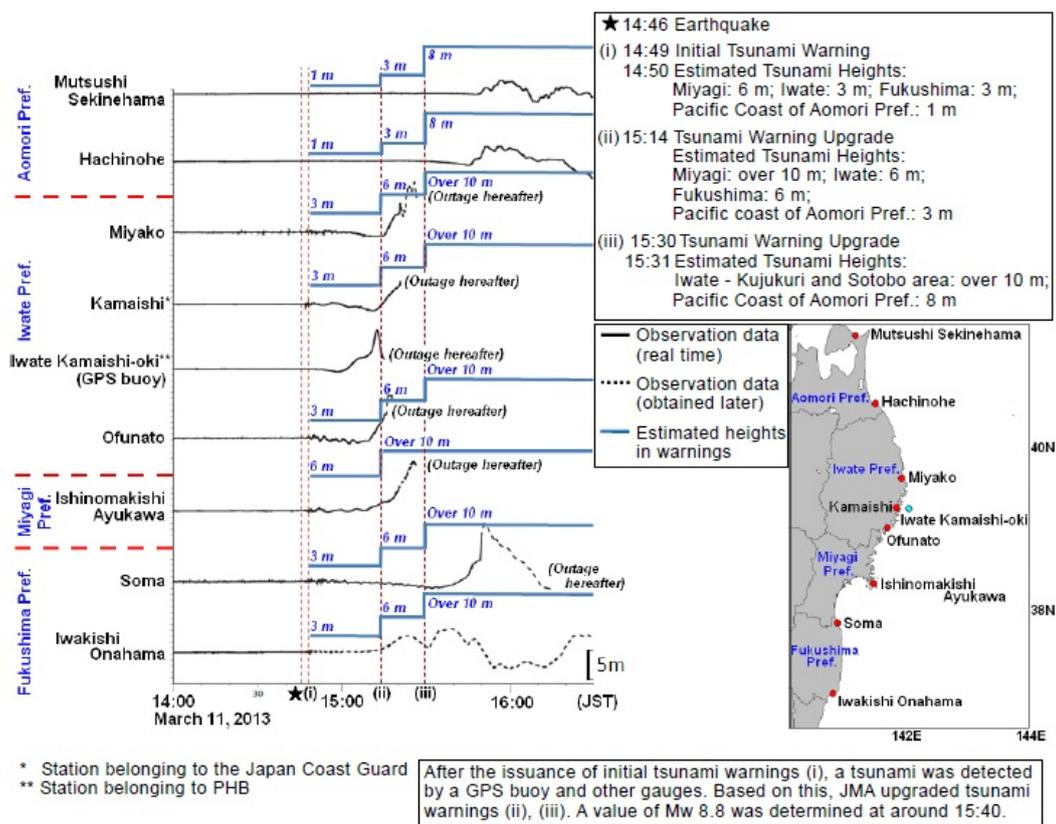


圖 19 日本氣象廳於 311 大地震之海嘯警報發布時間序列[7]

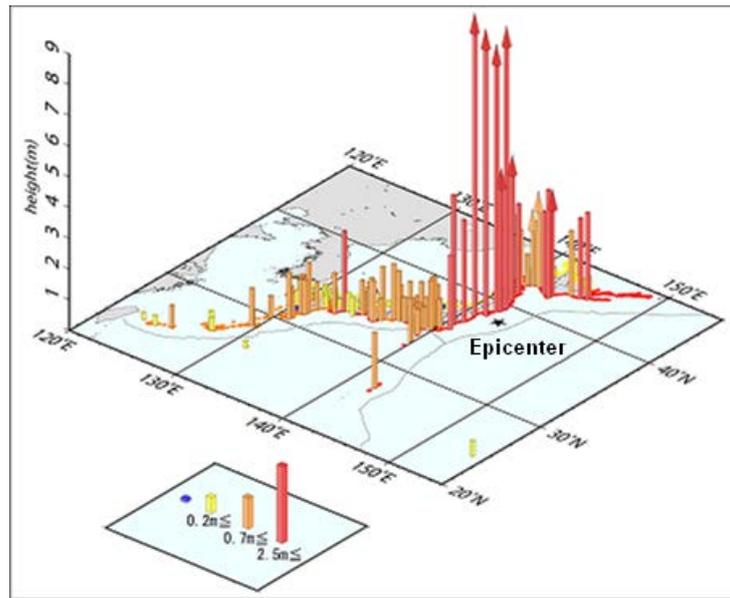


圖 20 根據觀測站所紀錄的最大海嘯波高[7]

(箭頭表示測站損壞，因此可能有更高的海嘯波高發生)

4. 改善海嘯預警系統

(1) 海嘯預警系統操作的問題

- a. 第一次海嘯警報發布低估地震規模為 7.9。
- b. 海嘯警報的海嘯最大波高也被低估，降低民眾危機意識。
- c. 因為寬頻率的地震測儀沒能精準量測，使地震規模無法在 15 分鐘內被更新。
- d. 最低海嘯波高的發布使人民誤認沒有嚴重的海嘯災害。

(2) 改善海嘯預警系統操作流程的方法

- a. 監測地震規模是否被低估

地震規模大於八的地震是很難在三分鐘內有精準的量測和計算，因此日本氣象廳引用如圖 21 的方法和流程，確認是否有低估地震規模的可能性，當低估的可能性被認可後，為了來避免海嘯波高被低估的情形，氣象廳會根據最大的地震斷層或重新評估的最大海嘯來發布第一個海嘯警報。

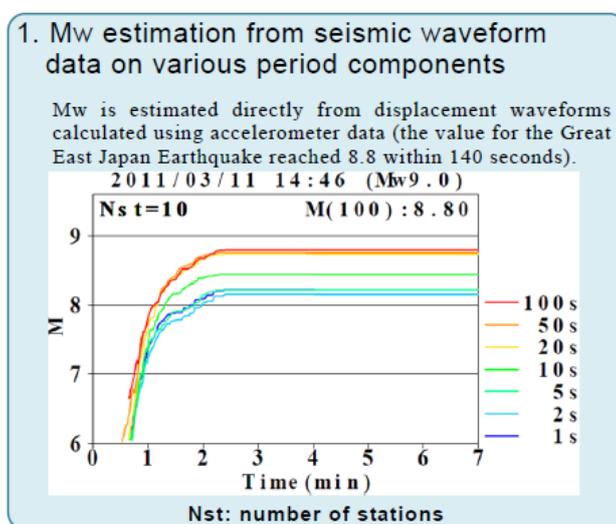
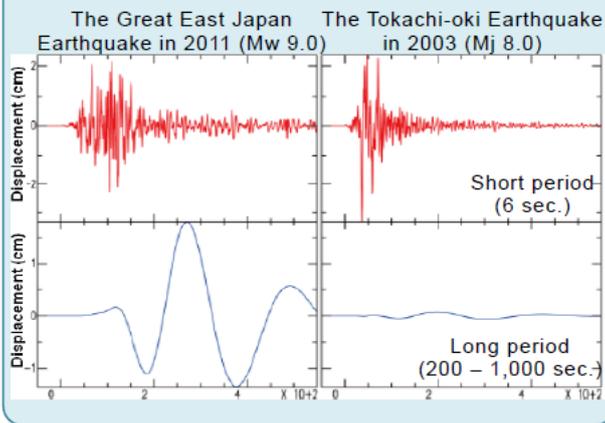


圖 21 檢查地震規模是否被低估之流程與方法[7]

2. Mw estimation from seismic waveform data on long-period components

Mw is roughly estimated in relation to the amplitude of long-period waveforms recorded by broad-band strong-motion seismometers.



3. Mw estimation from the size of the strong-motion area

Mw is estimated from the size of the strong-motion area as determined from the observed seismic intensity distribution.

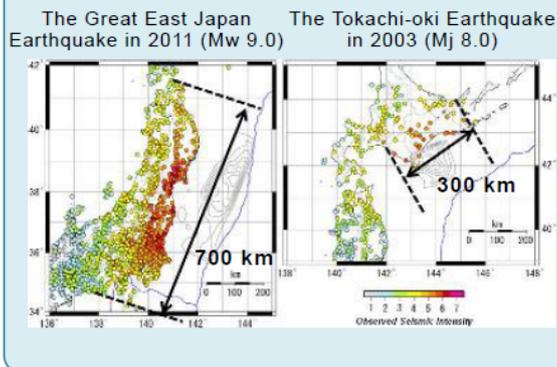


圖 21 檢查地震規模是否被低估之流程與方法[7] (續)

b. 更新海嘯警報與減少觀測儀器的損壞率

日本氣象廳會根據更精準、更新的觀測資料來更新海嘯警報。

為了能在 15 分鐘內更精確的評估地震的參數，日本於境內安裝了

80 個監測地震的裝置。並且安裝三個 DART 浮標(量測水壓力)以增

加更多的觀測資料。除了有足夠的設備可以在第一時間量測到海嘯相關的資料之外，設備亦可能因網路或是電力因海嘯中斷而無法回傳資料，因此，JMA 利用緊急備用電以及衛星資料傳輸的方式，防止觀測資料的遺失。

c. 通報內容和表達形式的改善

日本氣象廳根據五個海嘯波高值來發布海嘯警報分級，比起之前的八個波高要少，是因為考慮到估計的誤差和對防災對策的影響，為使民眾感受到災害的威脅性，只要超過個分級的海嘯波高值，就以其上限的類別來發布海嘯警報。

表 2 海嘯警報分級[7]

Category	Before review	Current (since March 7, 2013)		
	Estimated max. tsunami height	Criteria for Warning/Advisory issuance (h: estimated height)	Estimated max. tsunami heights	
			Quantitative	Qualitative
Major Tsunami Warning	10 m or more 8 m 6 m 4 m 3 m	10 m < h 5 m < h ≤ 10 m 3 m < h ≤ 5 m	Over 10 m 10 m 5 m	Huge
Tsunami Warning	2 m 1 m	1 m < h ≤ 3 m	3 m	High
Tsunami Advisory	0.5 m	0.2 m ≤ h ≤ 1 m	1 m	(N/A)

在災害發生後，若預計地震規模有被低估的情形，海嘯警報會以當時最大的地震斷層來計算海嘯波高，因地震規模已經被低估，

又不能即時確定海嘯波高的定值，為使民眾可以了解災害的嚴重性，海嘯警報使用量化災害的詞語（如：巨大 (huge)和高大的 (high)），而非海嘯的波高值來發布訊息。地震發生大約 15 分鐘後，日本氣象廳會根據更準確的地震矩規模(Mw)和海嘯觀測值更新海嘯警報，此時再以數值的形式來發布警報（如：五公尺），海嘯警報流程的發布如圖所示。

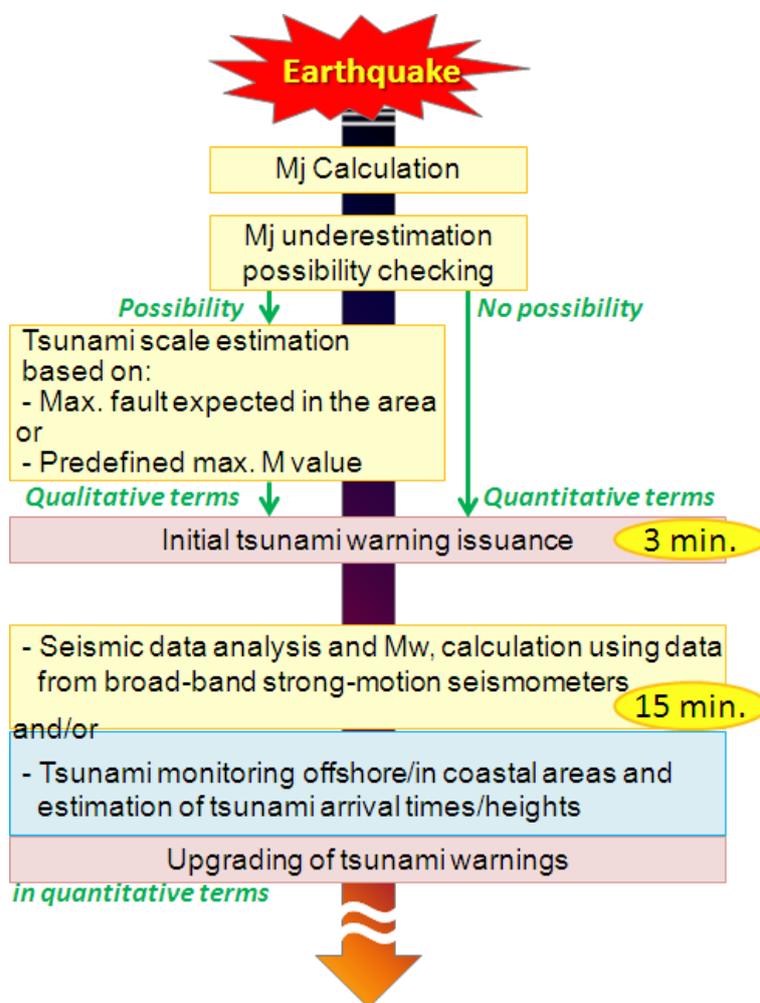


圖 22 海嘯警報發布流程圖[7]

d. 海嘯監測與沿岸波高計

經過日本 311 大地震證實了沿岸的觀測儀 GPS 浮標是可以利用來改善海嘯警報的。因此氣象廳根據沿岸波高計所偵測到的海嘯波來發布海嘯資訊，使民眾認知到海嘯波已逼近海岸且有發生災害的危險（表 3）。

表 3 透過沿岸波高計流偵測海嘯與發布警報[7]

Warnings/Advisories in effect	Estimated tsunami heights for coastal areas	Information bulletin expressions	
		Observed heights at offshore gauges	Estimated heights in coastal areas
Major Tsunami Warning	> 3 m	Actual values	Actual values
	≤ 3 m	<i>Currently Observing</i>	<i>Currently Investigating</i>
Tsunami Warning	> 1 m	Actual values	Actual values
	≤ 1 m	<i>Currently Observing</i>	<i>Currently Investigating</i>
Tsunami Advisory	(All cases)	Actual values (<i>Slight</i> for very small waves)	Actual values

5. 教育及喚醒民眾對於海嘯防災意識

即便有了萬全的海嘯警報措施，若民眾缺乏對於海嘯警報系統的認知，將大大降低原本擬定好的防災策略。因此，預警系統的警報流程、相關資訊以及海嘯的風險都必須要讓民眾徹底瞭解。除此之外，每一次的預警系統的修訂也必須能讓大眾瞭解。舉例來說：JMA 在 311 海嘯之前的預測和觀測海嘯波高皆以定值的方式描述，

相對地，修正後的海嘯波高在海嘯危機尚未解除以前，皆以定性的方式描述。

為了達成此目的，可透過發放傳單、張貼海報、舉辦演講及研討會。JMA 更進一步藉由影像的方式宣傳，製作「逃離海嘯 (Escape the Tsunami!)」和「海嘯前的準備工作 (Preparing for Tsunamis)」兩部影片，強調從 311 海嘯所學到的兩個寶貴經驗，透過學校教育以及網路的渲染力加深普羅大眾的危機意識。

6. 案例探討結語

雖然 JMA 的預警系統能夠快速地發佈海嘯警報，然而真實的海嘯波高依舊無法在短時間內預測出正確的數字，尤其是由地震或是海底崩移所引發的海嘯。因此，JMA 正著手發展能夠迅速從外海的量測資料，改善預測精度的方法。除此之外，研發各種不同快速判斷沿海地區海嘯波高的方法亦是十分重要的。

(四) 國際現行的海嘯防災系統結論

本研究報告國際現行的海嘯防災系統，針對美國和日本做描述和彙整。比較此三方的系統可知，美國具有先進的科學技術，在海嘯警報上提供了極重要的資訊。日本最大的特色則在於建置了許多

防海嘯的設施，此外，不只僅依靠美國 DART 系統警報，同時在日本近岸設置 GPS 波浪計，進一步掌握即時的海嘯動態。

防災需要謹慎評估其成效和所需之成本，使得在有限的資源和時間內達到最理想的成效。從軟體方面來看，防災意識的建立和避難時的規劃皆是相當重要的。無論多完美的抵禦海嘯設施和預警系統，若人們缺乏危機意識，將大大降低防災和減災的成效。

以日本 311 海嘯的檢討報告可知，日本往後對於海嘯的評估不只會持續建構防海嘯設施以抵禦高頻率的海嘯，亦會同時考量低頻率但會造成重大災情的海嘯。低頻率的海嘯則主要加強人民的防災意識並同時擬定災害發生時的避難及應變方法，以盡可能地降低傷亡人數。

除了改善海嘯設施與防災系統，對於不同情境的海嘯做機率探討和數值模擬也是減低海嘯災害的研究方法，若能針對該地區的地形、震源位置、引發海嘯的地震發生頻率做綜合考量，提供量化災害後的數據如危害曲線和危害地圖等，將對政府、核能電廠和相關防災機構有所助益。不同於傳統上較常使用的定率式海嘯危害度分析方法 (Deterministic Tsunami Hazard Analysis, DTHA)，本報告根據 PG&E (2010)和 Thio 等人(2010)建立機率式海嘯危害度分析方法 (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA) ，並且加入模式和震源參數的不確定性，使得結果能夠更為全面性，以下介紹本報告的

研究工具、方法與過程。

三、數值模式適用性探討

本研究計畫將利用數值模式模擬不同海嘯波高情境下，其海嘯波傳遞至核能設施周圍時，可能之溯升高度和溢淹範圍。以下以三種海嘯數值模式來做評估比較，並針對本計畫所使用的數值模式做介紹和適用性的評估。

(一) 海嘯數值模式適用性探討

由大型海底地震所引發的海嘯，會因為地殼的大規模變動(large spatial scale of seismic source)而具有極長的波長。這些海嘯的波長可長達數十至數百公里。與海洋的水深比較起來，海嘯波長是相當大的(海洋的最深處位於太平洋的馬里亞納海溝，其深度為10.9km)。因此，海嘯波浪又被稱為長波(long wave)或者是淺水波(shallow water wave)。海嘯波的傳遞過程是相當複雜的，需要依靠數值計算才能得到整體的海嘯波傳遞過程。然而海嘯傳遞是由遠域(水深大於200m)至近域(水深小於200m)，含蓋範圍非常廣，因此數值求解需要相當的計算時間。

二維海嘯數值模式在進行尺度較大的模擬上有較佳的計算效

率，同時能準確的計算海嘯波傳遞過程。JSCE 整理了二維海嘯模式常用的兩種演算方法[8]，分別為 Goto 法和 Tanaka 法，詳細的比較如表 4 所示。本研究計畫所評估之目前常用的二維海嘯數值模式，即 MOST、TUNAMI 和 COMCOT，分別屬於 Tanaka 法、Goto 法和 Goto 法。以下，將概述這三種模式的特性並做一評估。

1. MOST

MOST (the Method of Splitting Tsunami) 是由南加州大學所發展的數值模式[9, 10]，之後由 NOAA 的海洋環境實驗室維護與改良[3]。MOST 是一個可以模擬海嘯因地震發生而生成、在海洋中傳遞與溯升的模式。此模式使用 Okada(1985) [11]的斷層模組模擬海嘯生成；採用球座標表示的非線性淺水波方程式，並考慮科氏力之影響；以 Shuto[4]建議之內含數值頻散效應的有限差分法離散。

2. TUNAMI

TUNAMI-N1, TUNAMI-N2 與 TUNAMI-N3 模式用於模擬近域的海嘯；TUNAMI-F1 與 TUNAMI-F2 則用於遠域[12]。這些模式被廣泛的應用在海嘯模擬，並且經由現有的海嘯資料做了進一步的修正與改良。此數值模式分別使用可模擬近域以及遠域海嘯的模組進行計算，這些模組在 UNESCO [5]及 Imamura, Yalciner [12]有較為詳

盡的描述。此模式中，近域海嘯模組使用卡氏直角座標系統，而遠域模組使用球座標系統。這兩個模組的控制方程式與 MOST 相似，皆是以非線性淺水波方程式為基礎；遠域模組中考慮了科氏力之效應。另外，近域以及遠域海嘯模組皆使用有限差分法進行計算。

3. COMCOT

COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 數值模式為美國康乃爾大學土木與環境工程學系劉立方教授團隊所研發。採用球座標與卡氏座標；利用巢狀網格之優點，可同時合併求解線性和非線性淺水波方程式，提升計算效率；以移動邊界的方式計算海嘯溢淹範圍。該模式已被使用於重現許多海嘯事件，如 1992 Flores Islands tsunami[13]、2003 Algeria Tsunami[14]和 2004 Indian Ocean tsunami[15]，均顯示 COMCOT 有可靠之準確性。

在海嘯波的計算上，非線性和頻散性的效應都必須含括在內才能較準確並完整的計算海嘯波由遠域至近域的演變和傳播行為。從上述海嘯模式簡介中，可知本計畫所採用的 COMCOT 模式在海嘯波的模擬計算上有其適用性。

表 4 二維海嘯模式採用之數值方法[8]

		Goto method	Tanaka method
Governing equation	Advection term	Conservation type	Non-conservation type
	Friction term	Manning type	General friction type
	horizontal eddy viscosity term	Introduced if necessary	Introduced

表 4 二維海嘯模式採用之數值方法(續)

		Goto method	Tanaka method
Numerical scheme	Alignment of variables	Staggered scheme	Staggered scheme
	Pressure term	Leapfrog	Leapfrog
	Advection term	1st-order upwind difference scheme with accuracy of 1st order	Lax-Wendroff scheme with accuracy of 2nd order
	Friction term	Approximated implicitly	Approximated explicitly (time forward)
	Horizontal eddy viscosity term	-	Approximated explicitly (time forward)

(二) 海嘯模式 (COMCOT)

1. 模式介紹

海嘯通常被視為淺水長波，在波浪理論中，淺水長波的定義為波長遠大於海水深度，波浪類型以無因次的頻散係數 kh 來表示，其中 k 為週波數定義為 $k = 2\pi/L$ ， L 為波長， h 為海水深度。 $kh < \pi/10$ 為淺水長波、 $kh > \pi$ 為深水短波而 $\pi \geq kh \geq \pi/10$ 為中間性波。

當海嘯的波高相對海水深度（非線性量）很小時，淺水波方程中的非線性對流項相對較小可忽略，而在水深較深的海域底部摩擦項影響較小亦可省略，視為無黏性流。則連續方程（式(1)）及動量守恆方程（式(2)和式(3)）：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

其中 η 為波高， P 、 Q 為 x 、 y 方向的體積通量($P=Hu$ ， $Q=Hv$)， u 、 v 分別為 x 、 y 方向平均深度的速度， H 為總水體高度($H=\eta+h$)， h 為水深， g 為重力加速度。

為了計算大尺度的海嘯模擬，因此需考慮地球曲面效應及科氏力的影響，故採用球座標之淺水波方程式來計算，其連續方程式及運動方程式分別可表示為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = 0 \quad (6)$$

其中 R 為地球半徑， φ 、 ψ 為經緯度， f 為科氏力係數($f=\Omega \sin \varphi$)

Ω 為地球自轉速率。

線性淺水波方程式只適用在水深較深的區域，然而當海嘯波傳遞至近岸，因為淺化效應作用，其非線性量增大，此時非線性對流項及底床摩擦力對波浪的影響漸大。此外，一般模擬近岸海嘯現象大多只在小區域範圍內，因此不需考慮地球曲面效應和科氏力的影響，此時可採用卡氏座標做計算，其連續方程式及動量方程式可表示如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \quad (9)$$

其中 τ_x 、 τ_y 為底部摩擦項中的剪應力，可由曼寧公式得：

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (10)$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (11)$$

其中， n 為曼寧相對粗糙係數，由底床粗糙度決定，為一經驗常數。

另外，COMCOT 以交錯式顯性蛙跳法 (staggered explicit leap-frog scheme) 有限差分來求解線性及非線性淺水波方程式，其離散式為：

$$\frac{P_{i+1/2,j}^{n+1} - P_{i+1/2,j}^n}{\Delta t} + gH \frac{\eta_{i+1,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^{n+1} - Q_{i,j+1/2}^n}{\Delta t} + gH \frac{\eta_{i,j+1}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (14)$$

其中， $\eta_{i,j}^{n+1}$ 表示在格點上且時間步為 $n+1$ 的波高 η ， Δx , Δy 為 x , y 方向上空間間格大小， Δt 為時間間格大小，在程式中波高 η 及水深皆位於網格中心， P , Q 為位於網格線上的體積流量。

為了清楚闡述移動邊界法處理過程，以一維階梯代表真實地形來描述移動邊界條件的運算(圖 24)，圖中 MWL 為平均海水面， H_f

代表洪氾高度。當格點位在陸地上，水深 h 為正值，定義為平均海水面到陸地的高度，在乾陸地的網格中，總水深 $H=h+\zeta$ 是為負值，而在有水淹溢的溼陸地網格中，總水深為正值，位於乾網格與溼網格之間的交界則定義為海岸線。波由外海計算到近陸地區，當遇到定義的海岸線，即 $H_i > 0$ 及 $H_{i+1} \leq 0$ 的條件成立，則開始使用移動邊界計算。

如圖 24 (a) 中，第 i 個網格為溼陸地，其總水深為正值，第 $i+1$ 個網格為乾陸地，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，而給予第 $i+1/2$ 個網格點的體積通量為零。但在波高較高的例子中，如圖 24 (b) 所示，此時第 $i+1/2$ 個網格點的體積通量非為零，海岸線也往陸地方向移動一個網格點，而總水深由連續方程式中被更新，以下的計算是用來判斷海岸線是否該移動，其先決條件是 $H_i > 0$ ，可能的情況如下：

1. 當 $H_{i+1} \leq 0$ 且 $h_{i+1} + \zeta_i \leq 0$ ，則海岸線仍位於第 i 與 $i+1$ 個格點之間，體積通量 $P_{i+1/2}$ 仍為零。

2. 當 $H_{i+1} \leq 0$ 且 $h_{i+1} + \zeta_i > 0$ ，則海岸線會移到第 $i+1$ 與 $i+2$ 個格點之間，體積通量 $P_{i+1/2}$ 此處不等於零， $P_{i+3/2}$ 值於零，洪氾高度為 $H_f = h_{i+1} + \zeta_i$ 。

3. 當 $H_{i+1} > 0$ ，則海岸線會移到第 $i+1$ 與 $i+2$ 個格點之間，體積通量 $P_{i+1/2}$ 此處不等於零，而 $P_{i+3/2}$ 值於零，洪氾高度為 $H_f =$

$$\max(h_{i+1} + \zeta_i, h_{i+1} + \zeta_{i+1})。$$

歸納上述，可知 COMCOT 具有以下幾個特點：

a. 結合球座標與卡氏座標之計算

如此可同時解析全球尺度與地方尺度的海嘯波浪。本特點可適用於馬尼拉斷層所引致的海嘯事件。係因馬尼拉斷層長達 1500 公里，此種海嘯長度屬於全球尺度，必須使用球座標計算，當海嘯波傳遞至台灣沿岸時，則需以小尺度之卡氏座標計算。因此本模式結合球座標與卡氏座標為一重要之能力。

b. 求解線性與非線性淺水波方程式

海嘯波屬於標準之淺水波，因此適用淺水波方程式描述。在深海區將使用線性淺水波方程式，在近岸或較內陸區域則適用非線性淺水波方程式。本計畫在遠域海嘯模擬將採用線性淺水波方程式描述，而近岸區則以非線性淺水波方程式加以計算。

c. 移動邊界

透過移動邊界，COMCOT 可處理海嘯波溯升時之乾濕邊界之問題。一般海嘯模式僅可計算線性淺水波方程式，對於邊界上則僅可處理固定邊界。換言之，一般模擬海嘯模式無法計算海嘯淹溢範圍。而本模式具備移動邊界功能，可準確計算海嘯波溯升後，於陸地所造成之淹溢範圍。

d. 動態連結之巢狀網格系統

海嘯波之傳遞為一複雜物理過程，在深海區屬於大尺度之運動行為，以較粗之網格即可描述。然而一旦海嘯進入近岸地區，其即轉換為小尺度運動，此時即需以細網格加以分析。因此欲完整計算海嘯之運動行為，數值模式需要具備能同時處理大小尺度之巢狀網格功能。本計畫將於深海處設置較粗網格，並於近岸區設置較細網格。而粗細網格間為動態連結，可得到更精準的計算結果。

2. 海嘯波生成方式

Okada [11]的理論模型經由計算海底位移量，由海底斷層錯動產生各方向之位移分量，來計算海水面變化以求得海嘯初始波形。此方法已廣泛應用在目前的海嘯模式之中。[16-19]使用此模型需給定以下參數，一般是透過地質調查所得的資料(如：USGS(United States Geological Survey, 美國地質調查局));或由專家學者所提出的情境條件。

1. 震央 (epicenter)：地震發生時，地震震源向上垂直投影至地面的位置，即地面距震源最近的地方。

2. 破裂深度 (focal depth, h): 震央至震源垂直距離。
3. 斷層長度 (L): 平行於走向角的斷層長。
4. 斷層寬度 (W): 垂直於走向角的斷層長。
5. 滑移量 (dislocation, D): 將已決定之地震矩規模 M_w 轉換為地震矩 M_0 ，再透過同一系列之地震定比定律[20]，可決定斷層之滑移量。
6. 走向角 (strike angle, θ): 斷層走向 (沿海溝破裂為主) 與北方的順時針夾角。
7. 傾角 (dip angle, δ): 若該海溝曾有詳細之地質結構調查，則可採用其傾角。如：南海海槽，其 35 公里深度內之傾角為 10 度。馬尼拉海溝則為 20 度。若無詳細資料，則以 20 度取代。一般而言，隱沒帶於 35 公里以內之傾角多介於 10 度至 20 度之間。
8. 滑移角 (rake angle, λ): 滑移方向與斷層走向之夾角。

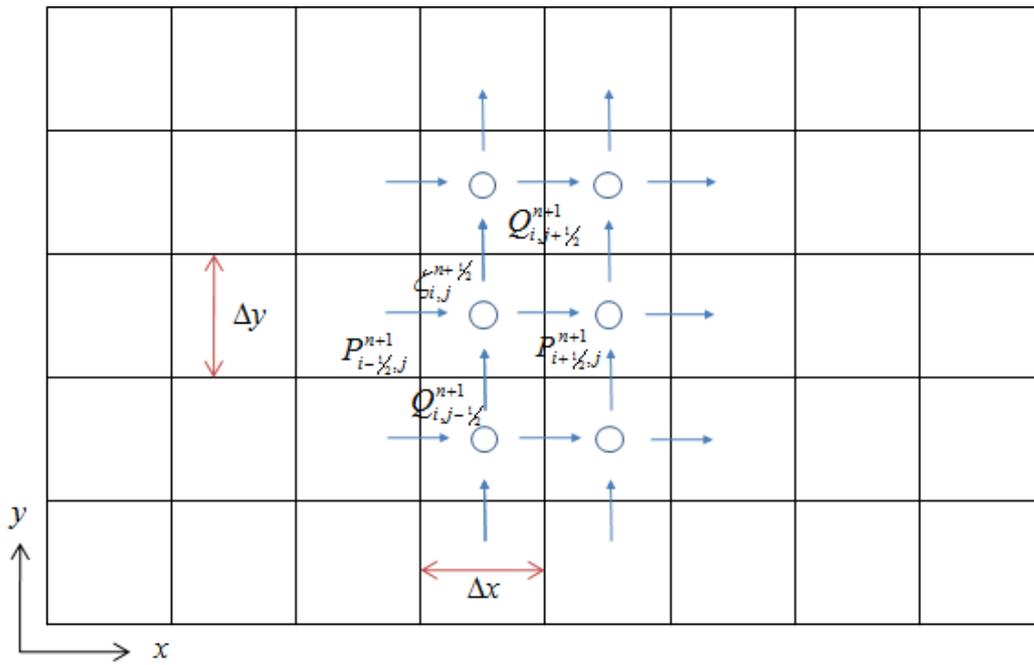


圖 23 交錯式有限差分網格系統 [21]

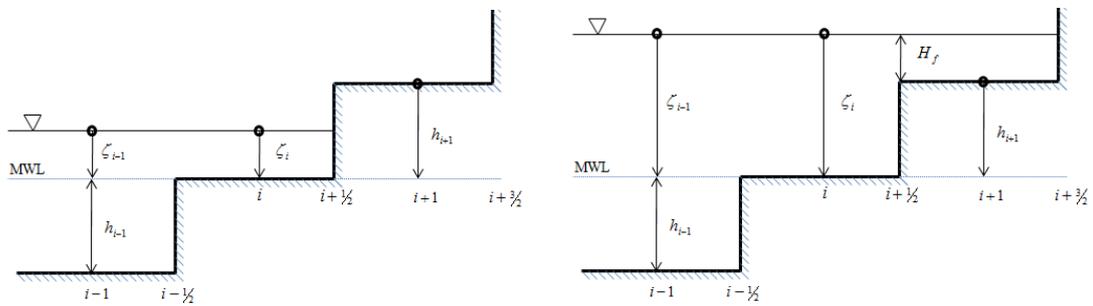


圖 24 移動邊界示意圖

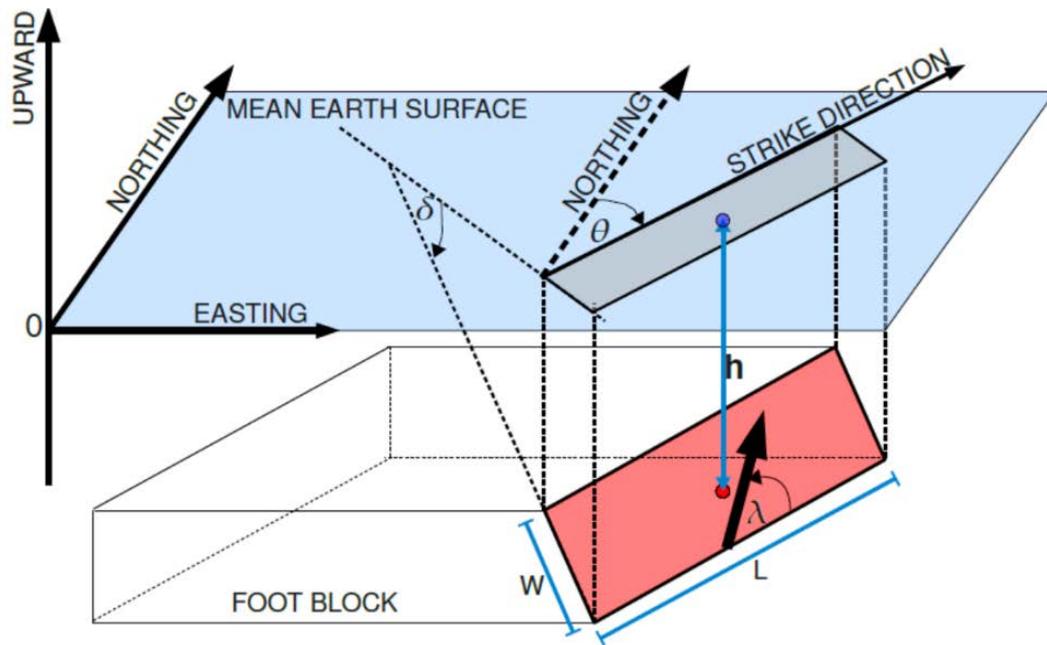


圖 25 參數示意圖[22]

表 5 彈性斷層模型參數

參數	單位
震央(經度、緯度)	度
破裂深度(h)	公尺
斷層長度(L)	公尺
斷層寬度(W)	公尺
滑移量(D)	公尺
走向角(θ)	度
傾角(δ)	度
滑移角(λ)	度

四、機率式海嘯危害度分析 (PTHA) 模型

(一) 簡介

機率式海嘯危害度分析 (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA) 在國外已有 30 幾年的歷史，然而國內相關的研究報告卻是相當少見。本報告以太平洋瓦電公司 (PG&E) 的研究報告為基礎，主要目的乃建立 PTHA 的計算方法和流程。PG&E [23] 將海嘯源的種類分成：遠域地震 (Distant Earthquakes)、近域地震 (Local Earthquakes)、崩移 (Landslides) 以及暴潮和潮汐 (Storms & Tides)，製作海嘯危害度曲線 (Tsunami hazard curve)，如圖 26 所示。本研究以建立 PTHA 之計算流程為主要目的，並針對地震所引發的海嘯建置計算。未來若需納入崩移或暴潮和潮汐的影響，則需要再進一步瞭解相關的模式設定、參數、計算方法.....等。

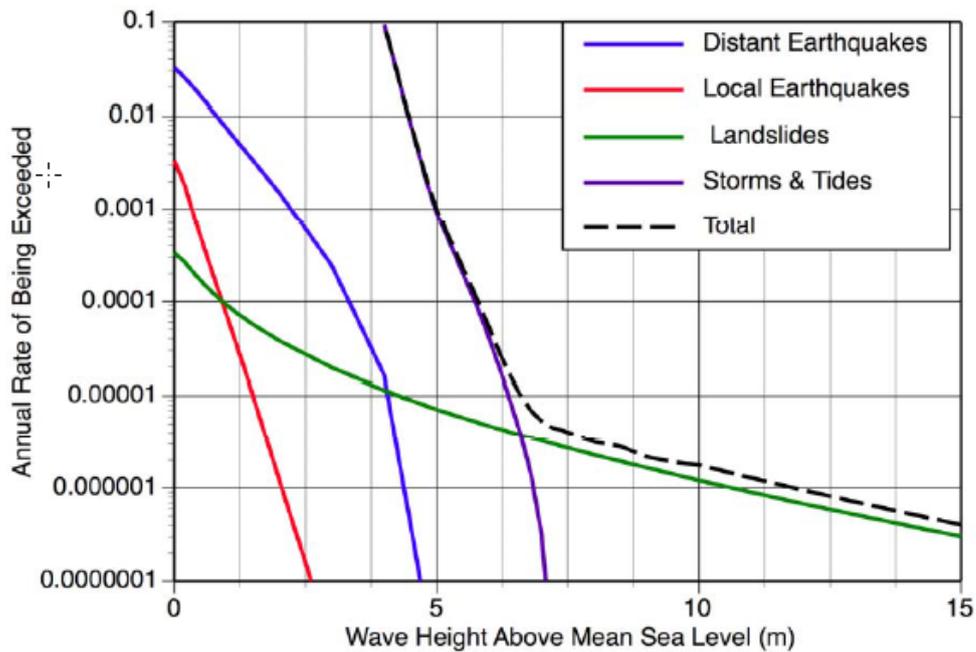


圖 26 考慮不同海嘯源對於 DCPD 抽水結構物的危害度曲線[23]

(二) 文獻回顧

機率式海嘯危害度分析(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA, 以下簡稱 PTHA) 方法，起源於機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, 以下簡稱 PSHA)，在國外已經發展近四十年，但在台灣相關的研究仍相當罕見。

PTHA 源起於機率式地震危害度分析 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)，Cornell [24]提出 PSHA 的概念，並發表於幾份報告中[25]。Lin and Tung [26]率先將 PSHA 與海嘯模擬做一結合，進而發展出 PTHA。PTHA 的計算可分為兩個步驟：第一步，

透過數值模式計算某一情境下的海嘯波高。第二步：將數值模式計算得到的海嘯波高，藉由統計的方法，進而得到一條連續曲線，透過該曲線可得知海嘯波高超越某一水位高度的發生機率。Rikitake and Aida [27]以 PTHA 計算出日本沿岸的海嘯波高超過特定高度的發生機率。然而，他們並未考慮到數值模式和震源參數的不確定性對於結果所造成的影響。Bommer and Abrahamson [28]在 PSHA 的研究中指出，若不考慮不確定性的影響，將會「低估」地震危害度的結果。同理，PTHA 也必須納入不確定性的影響[23, 29]。

美國太平洋瓦電公司(Pacific Gas & Electric Company, 2010) 研究報告以 Rikitake and Aida (1988)為理論基礎，建立 Diablo Canyon 核能電廠(Diablo Canyon Power Plant, DCP) 的機率式海嘯危害度分析，報告中將數值模式及震源參數等不確定性列入機率統計模式中，使結果更加完整。

本報告根據太平洋瓦電公司(Pacific Gas & Electric Company, 以下簡稱 PG&E)研究報告之 PTHA 理論與數值模擬的預測，建立核三廠遠域地震源的危害度曲線(Tsunami Hazard Curve)，作為核能電廠防範海嘯的參考依據。

(三) 機率計算與不確定性分析

海嘯模式的應用常以定率式(Deterministic Tsunami Hazard

Analysis, DTHA)做危害度分析，是使用數值模式來分析任一震源、任一特定的地震情境、在單一情況下對欲探討地區所造成的影響；而機率式(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA)則考慮各種可能發生的海嘯事件，並且加入模式、地震參數的不確定因素，推求不同重現期下的海嘯超越波高、溢淹範圍等危害度。

理論方法以 PG&E 研究報告為基礎，報告將引起海嘯的來源分為遠域地震、近域地震、海底崩移和暴潮及潮汐對 Diablo Canyon 核能電廠(Diablo Canyon Power Plant, DCP)的影響，並分別建立各種災害源的機率式危害度曲線[23]。

根據 PG&E 研究報告提出，若資料樣本數足夠，海嘯波高超越水位的年發生機率 $v_{EQK}(W_{tsu} > z)$ (Annual Rate of Being Exceeded，以下簡稱年超越率)計算如下：

$$v_{EQK}(W_{tsu} > z) = \sum_{i=1}^{N_{FLT}} N_i(M_{min}) \int \int_{mLoc} f_{m_i}(M) f_{Loc_i}(Loc) P(W_{tsu} > z | M, Loc) dM dLoc \quad (15)$$

其中 \hat{W}_{tsu} 為海嘯波高， N_{FLT} 為會造成海嘯的斷層數目， N_i 為第 i 個震源發生地震規模大於 M_{min} 的年發生率， f_{m_i} 和 f_{Loc_i} 分別為地震規模與斷層破裂位置的機率密度函數， $P(W_{tsu} > z | M, Loc)$ 為地震規模 M 及震源於 Loc 位置之條件下，海嘯波高大於水位 z 的機率，此機率可表示為：

$$P(W_{tsu} > z | M, Loc) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln z - \ln(\widehat{W}_{tsu}(M, Loc))}{\sigma_{EQK}}\right) \quad (16)$$

其中 Φ 代表累積常態分佈函數，根據 PG&E 研究報告提出，模式計算中的海嘯最大波高為分布的中值波高 \widehat{W}_{tsu} ，標準差 σ_{EQK} 則透過偶然不確定性的計算得到[23]。

若是資料樣本數較少，海嘯波高的年超越率可表示為：

$$v_{EQK}(W_{tsu} > z) = \sum_{i=1}^{N_{FLT}} \sum_{j=1}^{NS_i} rate_{ij} P(W_{tsu} > z | M_{ij}, Loc_{ij}) \quad (17)$$

其中 $rate_{ij}$ 為在第 i 個地震源所引發第 j 個情境的海嘯發生機率。

而馬尼拉海溝地震發生率(rate)可由 Jing 等人(2013) [30]提出針對馬尼拉海溝的經驗公式求得。

$$\log_{10} N = 8.92 - 1.09M \quad (18)$$

$$rate_{ij} = \frac{1}{P_M} = \frac{N}{T} \quad (19)$$

其中， M 為地震矩規模大小， N 為週期內發生地震矩規模超過 M 的次數， T 為地震紀錄時間，Jing 等人(2013) [30]地震紀錄時間為 38 年， P_M 為地震矩規模 M 的地震重現期。例如：地震矩規模 8.0 的地震，可由式(18)推算 N 為 1.5849，再由式(19)求得重現期 P_M 為 23.9764 年、發生率 $rate$ 為 0.0417。

PG&E [43]將不確定性的來源分為數值模式和震源參數，並再細

分為偶然 (aleatory) 造成的和認知不足 (epistemic) 所造成的。數值模式-偶然不確定性來自於未經解釋的隨機誤差 (例如：海嘯數值模式本身的方程式近似和假設、底床摩擦力參數、海域及陸域地形資料的品質、網格解析度……等等)；Gonzalez et al. [49]提到海洋地形之解析度於深海為 1 分 (約為 1.8km)，近岸為 1 秒和 1/3 秒，其地形解析度已足夠用於海嘯模式計算。然而，當海嘯溢淹入陸域時，在缺少結構物高程的情況下，會影響到溢淹結果之正確性。在某種程度上，此不確定性可藉由改變底床摩擦 (曼寧) 係數得到。一般而言，關於海嘯之模擬會採用之曼寧係數為 0.025。數值模式-認知不足不確定性，來自於不確定使用的數值模式是否能計算出正確的結果。

震源參數-偶然不確定性來自於已知的隨機誤差，即地震相關的參數 (例如：震源的位置、滑移量、斷裂面大小……等等)。Wells and Coppersmith [50]提出滑移量是由斷層之長度及寬度所求得，而斷層之長、寬度卻無法經由量測得知，必須利用一系列經驗公式計算而得，在計算過程中勢必包含了不確定性，因此須將此項考慮進去。震源參數-認知不足不確定性，來自於對於物理現象認知不足所造成 (例如：機率分布、物理模型、地震相關經驗公式……等等)。

Thio 等人(2010)將 PTHA 不確定性因素分為偶然不確定性與認知不確定性，偶然的的不確定性主要來自於數值模式和震源參數中的

傾角和滑移量；認知不足的不確定性來自於滑移速率（slip-rate）、地震重現期模式（magnitude and distribution）、斷層幾何（fault geometry）、和滑移角（rake）。

本報告以 Thio 等人提出的理論為主，將模式標準差作為偶然不確定性的主要來源，震源參數納入認知不確定性的計算。認知不確定性是由對事物的認知不足所造成，可透過邏輯樹(Logic Tree)彙整各種地震情境；偶然不確定性來自資料本身的隨機誤差，經由數值模式模擬歷史海嘯事件，將該事件不同測站之實際觀測資料與模式模擬的最大波高相除、擬合成對數常態分布後，可得到數值模式的標準差。因馬尼拉海溝離核三廠較近，故以馬尼拉海溝為模擬對象。藉由模擬馬尼拉地震，可得到核三廠範圍之海嘯波高，並以機率模型計算該海嘯波高的年超越率，可得海嘯危害度曲線。

1. 偶然不確定性

偶然不確定性來自於資料本身的隨機誤差，在統計學中，標準差代表著數值分散的差異性大小，也可用來當作評估不確定性的判斷依據。標準差計算方式如式(20)，

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (20)$$

其中， σ 為標準差，本研究假設海嘯波高呈現對數常態分布，因此計算上， x_i 為各潮位站觀測最大波高和模擬最大波高之比值並且取對數， \bar{x} 為 x_i 之平均值， n 為樣本數目。

標準差越大表示波高比值和平均值的差異越大，換言之準確度越低、不確定性越大；反之，標準差越小，表示波高比值越接近平均值，準確度則越高、不確定性越小。因此接下來將利用標準差概念反映偶然不確定性。

Thio 等人 (2010) 將偶然不確定性細分為模式-偶然不確定性及震源參數-偶然不確定性，後來 Gonzalez 等人 (2013) 認為，由於斷層幾何學至今猶仍持續研究當中，尚未被完全了解，因此本研究將以模式不確定性當作為偶然不確定性的主要來源，而震源參數不確定性將納入認知不確定性計算。其中，造成模式-偶然不確定性可能來源有：數值方法、底床摩擦係數、網格大小、地形資料解析度……等，皆是有可能導致模擬結果和實測資料誤差的因素。這部分需經由數值模式模擬單一或多個歷史海嘯事件，進一步比較多個潮位站的實際觀測資料與模式模擬之水位時序列結果的最大波高比值，即可得到數值模式標準差(σ_{EQK})。

2. 認知不確定性

顧名思義，認知不確定性來自於對事物的認知不足，由於目前科學界對於地震發生的機制與過程仍持續研究中，因此不論是定率式或是機率式的海嘯危害度分析，皆會因為對於所使用的方法或是斷層參數瞭解不足而面臨難以決定的困境，而這部分不確定性處理方式不同於偶然不確定性，需透過邏輯樹 (logic trees) 來分析各個參數或不同理論方法的不確定性對結果的影響。

邏輯樹包含一連串的節點 (nodes) 與分支 (branches)，每一個節點代表某一參數或方法，而由此節點延伸出的每一分支，代表此參數或方法的不同可能性選擇，將各種選擇依據專家學者建議，分別適當的給予權重 (weighting)，使得各分支最後加總值為 1，每一條分支代表著不同的可能性組合，且皆可計算得到一條危害度曲線，最後依照個別權重大小加總後，最終即可獲得一條代表性的危害度曲線。舉例來說，圖 27 為 Horspool 等人[31]建立印尼海嘯危害度曲線所使用的邏輯樹架構及個別權重，共分為四個節點，分別為地震震源模式、地震重現期、斷層滑移速率及可能最大地震規模等。

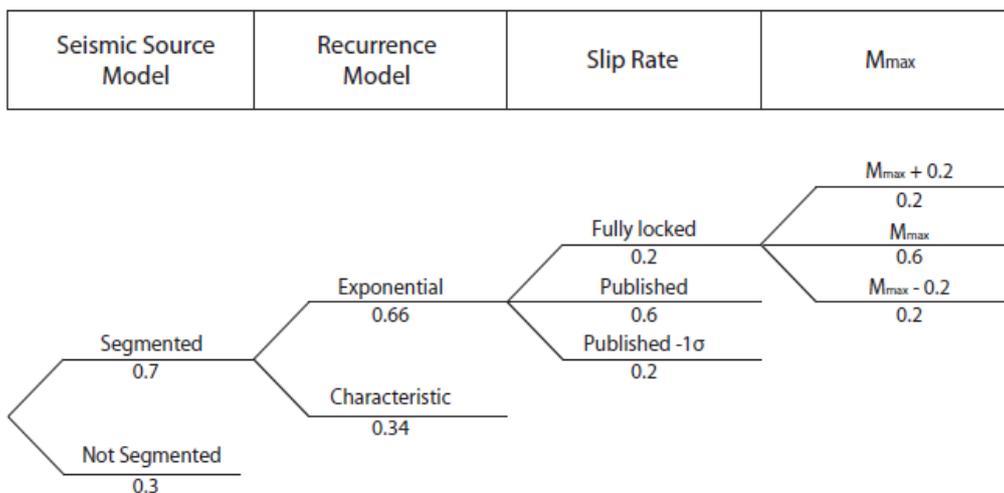


圖 27 邏輯樹架構圖[31]

(四) 機率式海嘯分析方法(PTHA)計算流程

歸納上述，機率式海嘯危害度分析步驟如下 (圖 28)：

1. 建立數值模式之偶然不確定性

模擬歷史海嘯事件，比對潮位站資料建立模式的不確定性，得到標準差 (σ_{EQK})。

2. 建立邏輯樹狀圖以及其對應之權重

需透過地震專家取得。

3. 建立海嘯危害度曲線

(1) 以數值模式模擬邏輯樹狀圖中不同的海嘯情境，得到模擬情境中於某地點產生之最大海嘯波高，並將之當作累積常態分佈函數的中值 (\hat{W}_{isu})，再由式 16 和式 17 計算海嘯波高與機率的關係、繪製不同海嘯情境下的危害度曲線。其中，累積

常態分佈函數的中值 (\hat{W}_{tsu}) 並非來自統計方式的計算，而是由各個模擬中的最大波高決定。

- (2) 將邏輯樹狀圖建立的各個海嘯危害度曲線乘以其權重、加總後可得到最終的機率式海嘯危害度曲線。

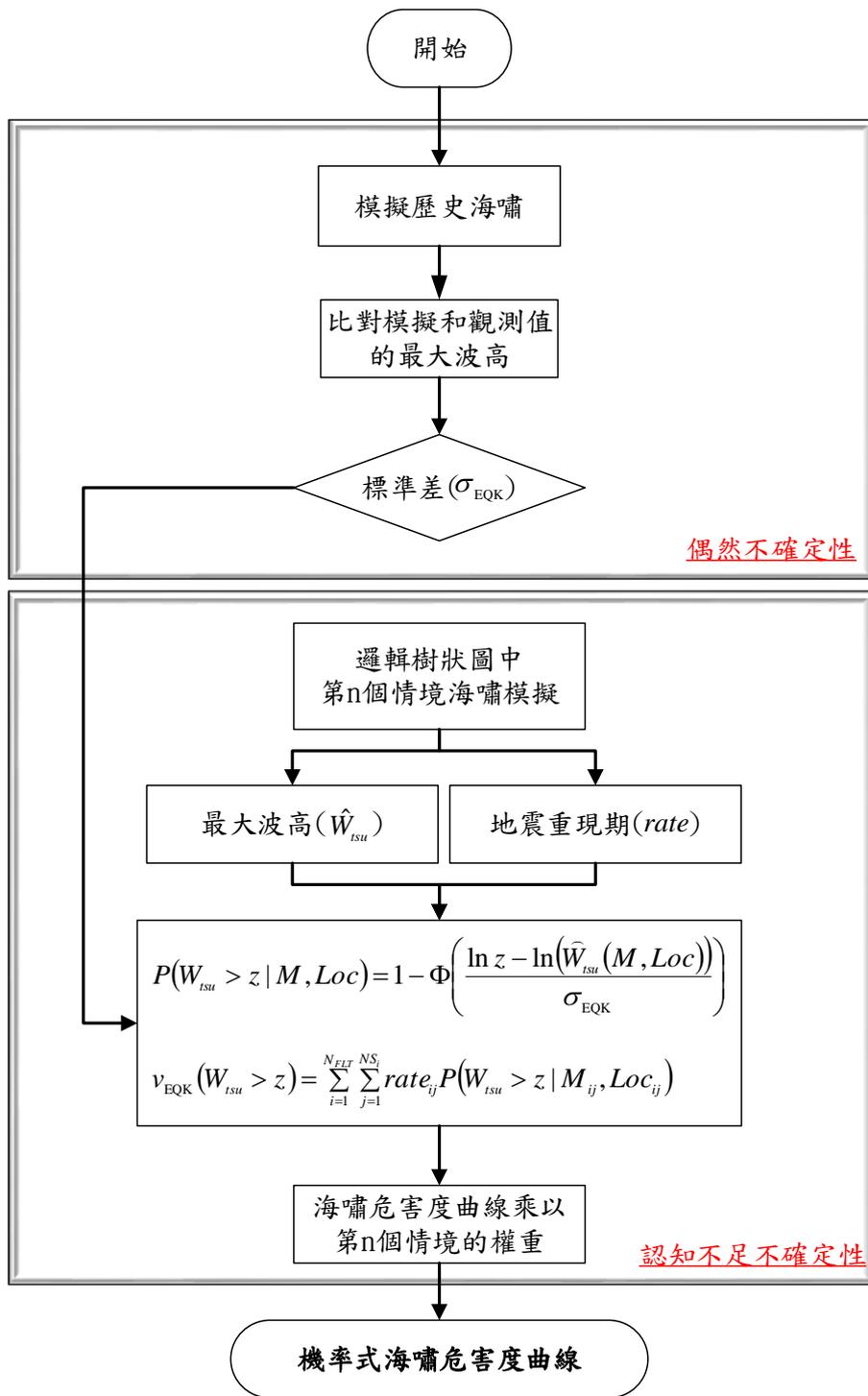


圖 28 機率式海嘯危害度分析流程圖

(五) 海嘯危害度之應用

透過本章第三節所述之方法可得到單一位置的海嘯危害度曲線，可得知波高在海嘯的作用之下，超過某水位的年發生機率。可作為特定場址或是設備在海嘯防災規劃設計時的一個重要資訊，例如：核電廠的抽水口的建置位置。PG&E [23]考慮不同條件的遠域地震所造成的海嘯，製作了對於抽水結構物的危害度曲線，如圖 29。

除了應用在單一位置之外，Gonzalez, LeVeque [29]、Geist and Parsons [32]、Gonzalez, Geist [33]計算多個單點，進一步製作數個在特定機率下的海嘯危害度地圖（probabilistic tsunami hazard map），可用於大範圍的防災規劃，如圖 30 和圖 31 所示。圖 30 和圖 31 代表在這個區域內，每個位置所對應的最大波高，而超過這個波高分布的機率為 1%和 0.2%。當考慮的海嘯重現期從 100 年變成 500 年時，除了沿岸波高的增加，溢淹範圍也會隨之增加。

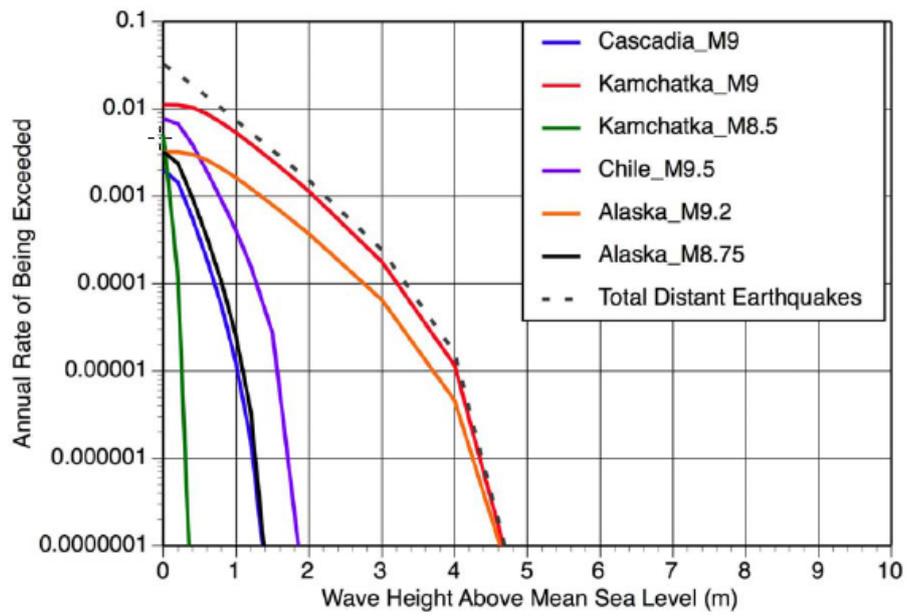


圖 29 考慮不同遠域地震所造成的海嘯對於 DCPD 抽水結構物的危害度曲線[23]

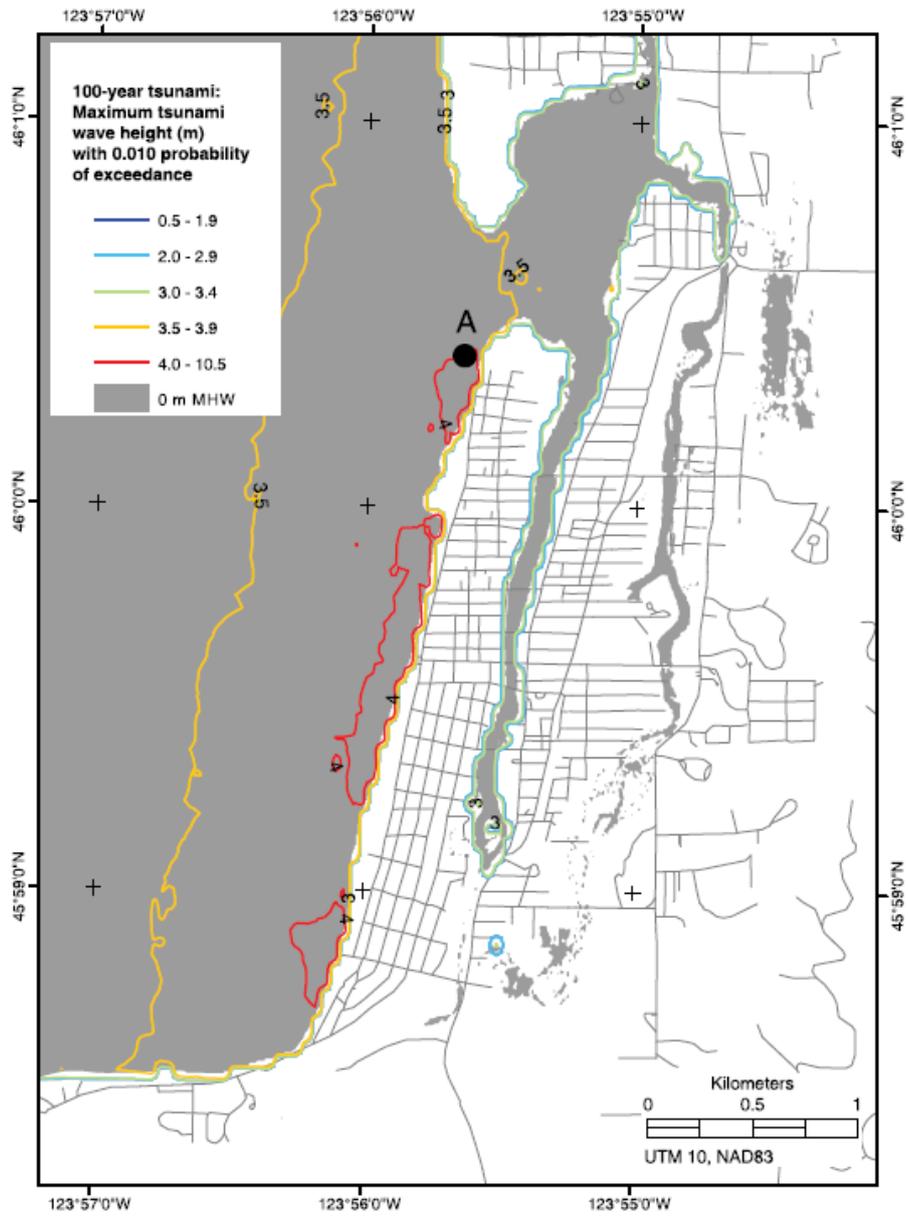


圖 30 Seaside, Oregon 於超越機率為 1% 的波高分布[33]

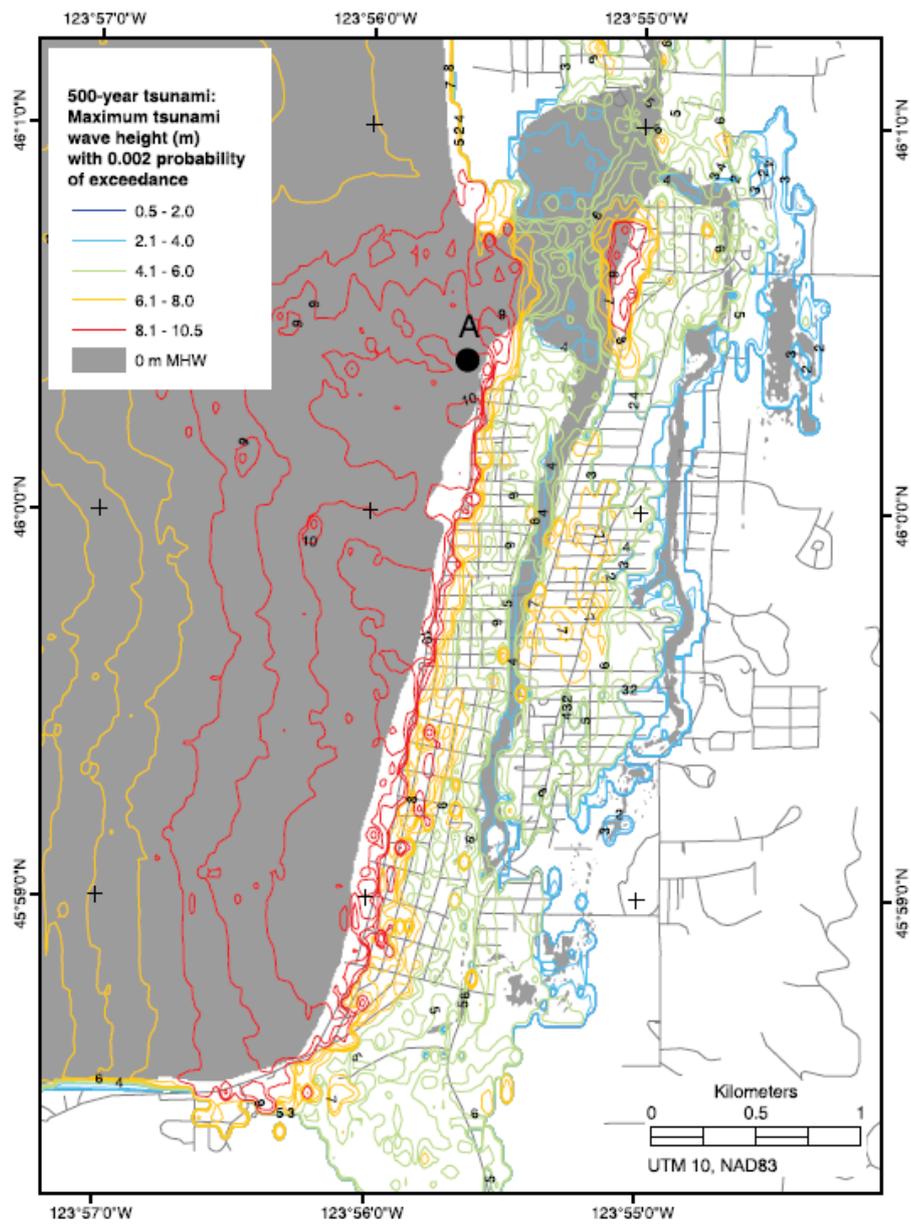


圖 31 Seaside, Oregon 於超越機率為 0.2% 的波高分布[33]

參、主要發現與結論

一、不確定性分析

(一) 偶然不確定性

為求得數值模式標準差 (σ_{EQK})，本研究選定兩個歷史地震海嘯事件，分別為 2011 年日本 311 地震和 2006 年屏東地震，利用 COMCOT 模式模擬這兩起歷史海嘯事件，並比對潮位站的實際觀測資料與模式模擬之水位的最大波高比值。

1. 低通濾波處理

潮位站測得的水位資料為合成水位，其中天文潮對於水位的影響最大，因此必須將天文潮扣除，才能得到海嘯波所造成的水位變化。一般來說，天文潮的週期是超過三小時以上。故以低通濾波 (low pass) 的方式，得到週期大於三小時的成分波。接著，再以原本的合成水位扣掉週期大於三小時的成分波，即可得海嘯波所造成的水位變化。以壁湖測站為例，如圖 32 所示。圖 32(a)為濾波後，地震發生前 24 小時與發生後 24 小時的水位變化；圖 32(b)為擷取地震

發生後 150 分鐘的水位資料，用來作為比對海嘯模擬結果的數據。

2. 網格大小配置

驗證所使用的是三層巢狀網格，為了將因為網格大小不同所造成的模式誤差降至最小，因此分別測試三組不同網格大小配置，如表 7 所列，藉由比較其模擬結果之差異性，選取適合的網格配置。此部分僅先以 2006 年屏東地震之第一場地震的斷層參數做測試，所採用的斷層參數設定參考自 Harvard CMT，斷層參數如表 6 所示。一般而言，網格大小配置將會盡量和地形解析度配合，然而若是網格大小和地形網格大小不一致，COMCOT 模式將會自行處理地形資料，將地形網格吻合於網格大小。

以後壁湖站和梗枋站為例，分布位置可參考圖 35，比較結果分別為圖 36，由結果發現，網格大小為 1 分、1/3 分和 1/6 分所模擬出來的結果與網格大小為 1 分、1/3 分和 1/9 分之模擬結果幾近相同，而網格大小為 1 分、1/2 分和 1/4 分的模擬結果與上述兩種配置結果有明顯差異性，因此本研究驗證事件皆使用之網格大小配置從第一層至第三層分別為 1 分（約為 1.8 公里）、1/3 分和 1/6 分。表 8 整理所使用模式設定及模擬範圍，其中曼寧係數 n 值將根據陳 (2008) [34]和 Wu (2008) [35]建議使用 0.013 計算。

3. 驗證結果及實測資料比對

表 9 是所有可採用的樣本的歷史最大波高和模擬最大波高，可以明顯看到 2011 日本 311 地震所採用的測站數明顯多於 2006 屏東地震。這是因為 2006 屏東外海地震引發之海嘯波較小，導致某些潮位站無海嘯波紀錄，故本計畫所使用的潮位站個數少於日本 311 地震事件。

2011 日本 311 海嘯和 2006 屏東地震所使用的模式設定如表 8，其中後壁湖站和梗枋站海嘯波時序列比對如圖 37 和圖 38，以兩次歷史海嘯共 35 筆潮位站資料比對結果如表 9，分別與觀測值比對、相除、擬合成對數常態分佈後，可計算標準差 (σ_{EQK}) 為 0.57。

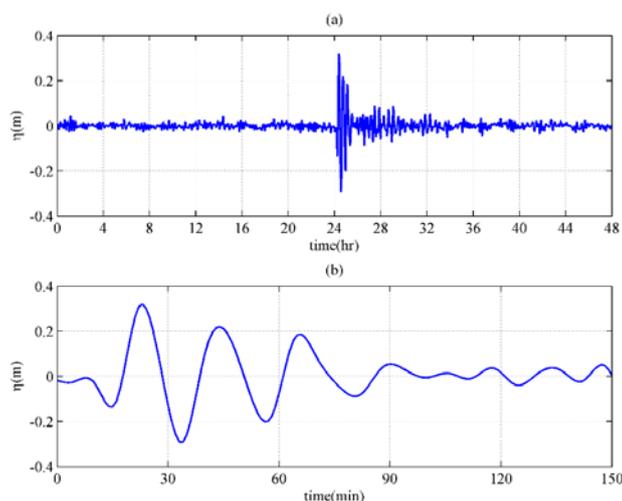


圖 32 後壁湖潮位站資料濾波後於 2006 屏東地震時的 (a)地震發生前後 24 小時水位結果；(b)地震發生後 150 分鐘水位結果

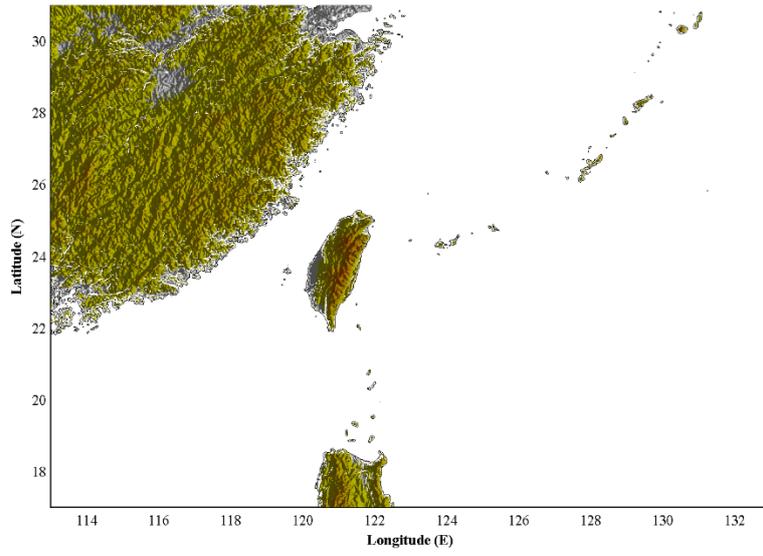


圖 33 驗證使用之第一層模擬範圍

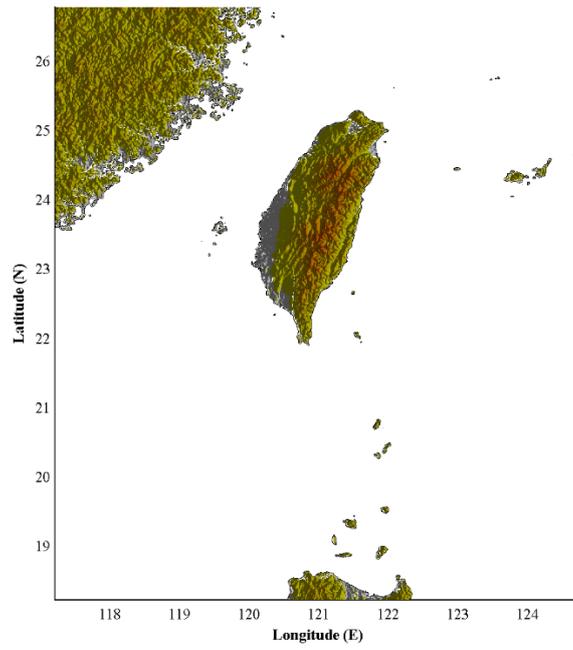


圖 34 驗證使用之第二層模擬範圍

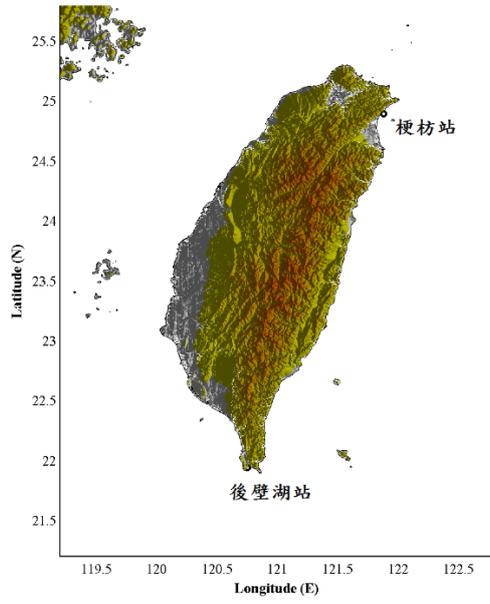


圖 35 驗證使用之第三層模擬範圍

表 6 2006 屏東地震和 2011 日本 311 地震之斷層參數

	2006 屏東地震[35]		2011 日本 311 地震 (資料來源：Havard CMT)
	第一場地震	第二場地震	
震央(經度)	120.31°E	120.25°E	143.05°E
震央(緯度)	21.36°N	21.76°N	37.52°N
震源深度(h)	19600 公尺	33800 公尺	20000 公尺
斷層長度(L)	37400 公尺	34100 公尺	450000 公尺
斷層寬度(W)	18700 公尺	17000 公尺	150000 公尺
滑移量(D)	1.2 公尺	1.1 公尺	18 公尺
走向角(θ)	165 度	151 度	203 度
傾角(δ)	30 度	48 度	10 度
滑移角(λ)	-76 度	2 度	88 度

表 7 網格大小測試配置

	第一層	第二層	第三層
Case 1	1 分	1/2 分	1/4 分
Case 2	1 分	1/3 分	1/6 分
Case 3	1 分	1/3 分	1/9 分

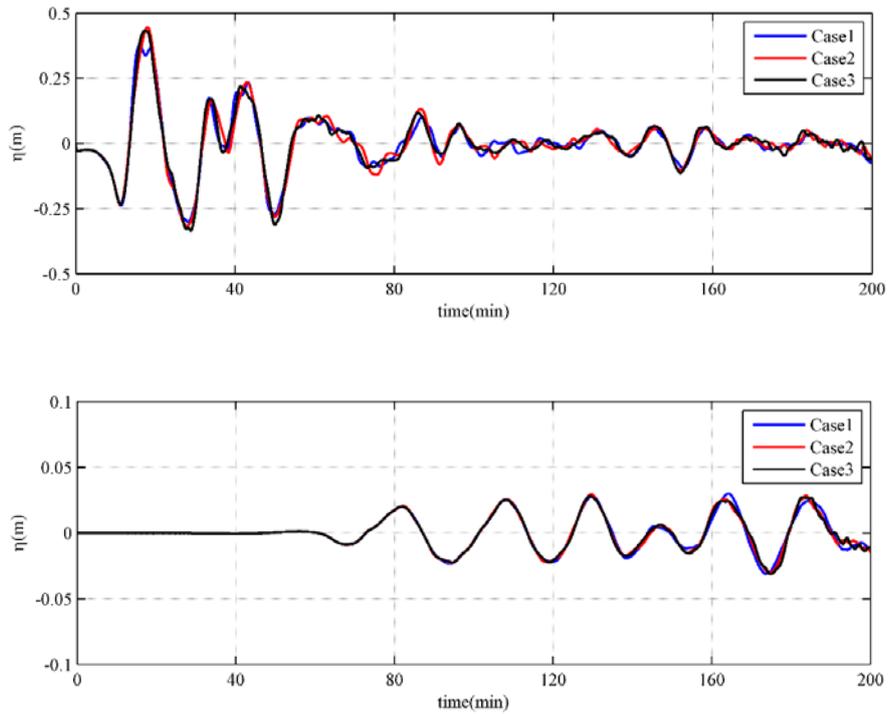


圖 36 網格大小測試結果(a)後壁湖站(b)梗枋站

表 8 2006 屏東地震和 2011 日本 311 地震之模式設定

第 N 層	地形 解析度(m)	模擬範圍 (經度、緯度)	淺水波 方程式	網格 (m)
2006 屏東地震				
1	1800	115.0000°E~133.0000°E 17.0000°N~31.0000°N	線性	1800
2	500	117.2000°E~124.8000°E 18.2000°N~26.8000°N	非線性	600
3	200	120.6400°E~120.9200°E 21.8400°N~22.2100°N	非線性	300
2011 日本 311 地震				
1	1800	115.0000°E~159.0000°E 16.0000°N~50.0000°N	線性	1800
2	500	117.2000°E~124.8000°E 18.2000°N~26.8000°N	非線性	600
3	200	120.6400°E~120.9200°E 21.8400°N~22.2100°N	非線性	300

表 9 潮位站比對結果

潮位站	2006 屏東地震		2011 日本 311 地震	
	觀測最大波 高(m)	模擬最大波 高(m)	觀測最大波 高(m)	模擬最大波 高(m)
外埔	-	-	0.1440	0.1146
成功	0.1134	0.1434	0.2098	0.1966
竹圍	-	-	0.3891	0.2014
烏石	0.0792	0.0896	0.5405	0.4409
高雄	0.1746	0.1014	0.2654	0.1697
基隆	-	-	0.5434	0.3957
將軍	-	-	0.2919	0.1027
淡水	-	-	0.2802	0.1211
塭港	0.0668	0.0283	0.1519	0.2729
新竹	-	-	0.0674	0.1025
福隆	-	-	0.3525	0.2687
箔子寮	-	-	0.2020	0.1506
台中港	-	-	0.1919	0.0639

表 9 潮位站比對結果 (續)

潮位站	2006 屏東地震		2011 日本 311 地震	
	觀測最大波 高(m)	模擬最大波 高(m)	觀測最大波 高(m)	模擬最大波 高(m)
台北港	-	-	0.6246	0.2358
澎湖馬公	-	-	0.1240	0.0974
梗枋	0.0560	0.0571	-	-
麟山鼻	-	-	0.2328	0.1790
小琉球	0.0211	0.0553	0.1612	0.1442
東港	0.2660	0.1053	0.3372	0.3501
花蓮	0.0323	0.1015	0.2278	0.1552
後壁湖	0.5949	0.4293	0.5566	0.6040
龍洞	0.0336	0.0242	0.3281	0.2270
蘇澳	0.0631	0.0688	0.3172	0.3603
蘭嶼	0.0301	0.1075	0.2438	0.1571

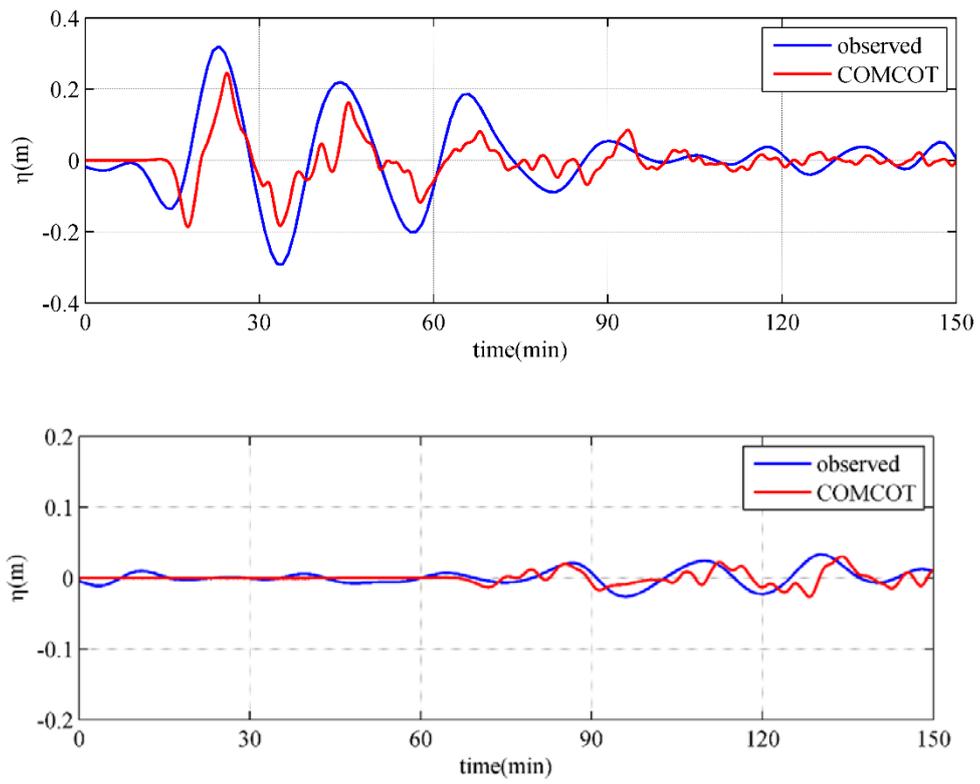


圖 37 2006 年屏東地震海嘯波時序列比對圖(a)後壁湖站(b)梗枋站
(藍線觀測值，紅線模擬值)

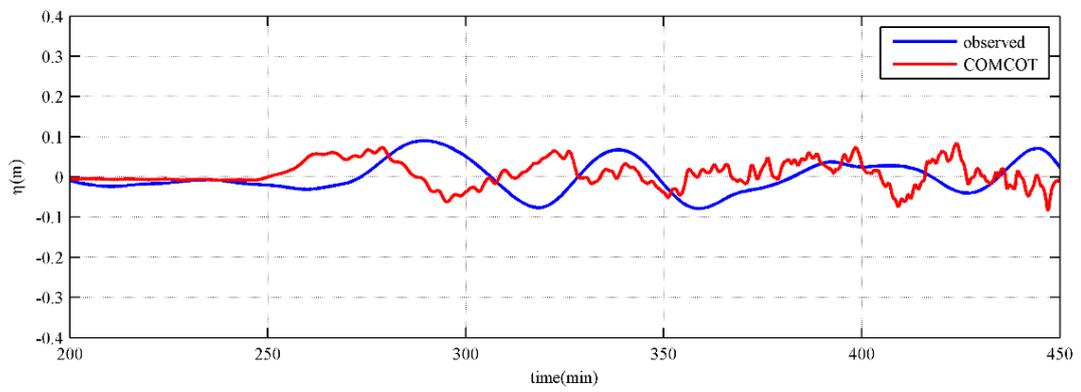
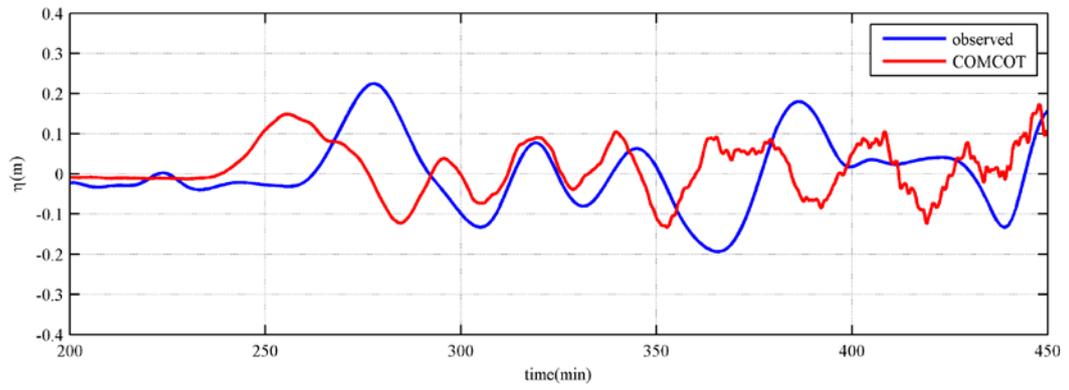


圖 38 日本 311 地震海嘯波時序列比對圖(a)福隆站和(b)小琉球站

(藍線觀測值，紅線模擬值)

(二) 認知不確定性

台灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊交界處，在台灣周邊海域分別有琉球海溝 (Ryukyu Trench) 和馬尼拉海溝 (Manila Trench) 等兩個隱沒帶，如圖 39 所示。琉球海溝位於台灣東北方，形成原因為菲律賓海板塊向北隱沒入歐亞大陸板塊之下；馬尼拉海溝則位於台灣西南方，形成原因為歐亞大陸板塊向東沒入菲律賓海板塊之下。若以核三廠址為探討對象，以相對位置和地形來說，馬尼拉海溝所引發的海嘯波對於核三廠有較為直接的影響。此外，美國地質調查局 (USGS) 將馬尼拉海溝評估為引發海嘯的高風險區域[36]。因此，本研究主要將探討馬尼拉海溝發生地震後，所造成的海嘯波對核三廠的機率危害度分析。

1. 邏輯樹狀圖之建置

邏輯樹狀圖的建置及其分支的權重是影響機率式海嘯危害度結果之重要因素，無法任意給定。一般而言，需透過地震專家學者依照斷層的特性，經過詳細的討論而形成，以彌補學理上認知不足之處。

本研究所使用的邏輯樹乃針對馬尼拉海溝建立，由核能所提供，如圖 40。邏輯樹共有八種地震參數，分別為斷層分段破裂模式、

最大可能地震規模、破裂位置、震源深度、斷層長度、斷層寬度、斷層傾角和滑移量，其中最大可能地震規模(M_w)和滑移量(D)經由 Wells & Coppersmith (1994) 提出的經驗公式計算求得：

$$1.02 \times \log A = M_w - 3.98 \quad (21)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \times (\log M_o - 9.1) \quad (22)$$

$$M_o = \mu WDL \quad (23)$$

其中， A 為斷層面積， L 為斷層長度， W 為斷層寬度， D 為滑移量， M_o 為地震矩， M_w 為地震規模， μ 為介質的剛性係數 (rigidity)，此處使用值為 $3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。決定斷層面積後，可利用式(21)求得最大可能地震規模(M_w)，接著再藉由式(22)和式(23)即可計算滑移量(D)。

行政院原子能委員會核能研究所地震專家提供之邏輯樹總計 104 個分支，破裂位置和走向角如表 11 和圖 42 所示。而各分支權重尚須透過專家學者建議或地質調查才能給予適當的權重大小。然而，目前尚未有詳細的地質調查結果，故以平均權重的方式呈現於期末報告。

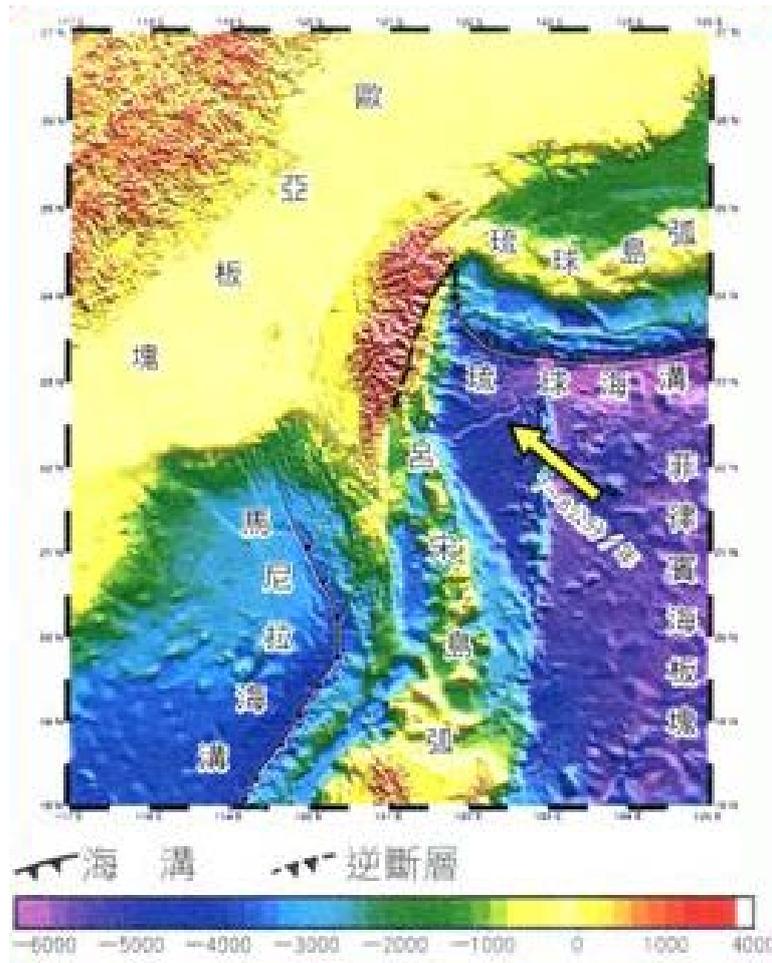


圖 39 台灣附近海底地形與主要斷層分布圖 (資料來源:
http://www.phyworld.idv.tw/EARTH/991_earth/6-4.htm)

斷層分段破裂模式	最大可能地震(Mw)	破裂位置	震源深度	斷層長度	斷層寬度	斷層傾角	滑移量
segment2 NO.1-4	8.0	NO.1-4	10 km	200 km	50 km	20	4.1964 m
			15 km				
segment3 NO.5-9	8.0	NO.5-8	10 km	200 km	50 km	20	4.1964 m
		NO.6-9	15 km				
	8.16	NO.5-9	10 km	250 km	50 km	20	5.834 m
			15 km				
segment4 NO.10-19	8.0	NO.10-13	10 km	200 km	50 km	20	4.1964 m
		NO.11-14	15 km				
		NO.12-15					
		NO.13-16					
		NO.14-17					
		NO.15-18					
		NO.16-19					
	8.2	NO.10-15	10 km	300 km	50 km	20	5.582 m
		NO.11-16	15 km				
		NO.12-17					
		NO.13-18					
		NO.14-19					
	8.4	NO.10-18	10 km	450 km	50 km	20	7.425 m
		NO.11-19	15 km				
	8.47	NO.10-19	10 km	500 km	50 km	20	8.5102 m
			15 km				
segment5 NO.20-22	7.9	NO.20-22	10 km	150 km	50 km	20	3.9611 m
			15 km				

圖 40 馬尼拉海溝邏輯樹架構圖

segment3+segment4 NO.5-19	8.0	NO.5-8	10 km	200 km	50 km	20	4.1964 m
		NO.6-9	15 km				
		NO.7-10					
		NO.8-11					
		NO.9-12					
		NO.10-13					
		NO.11-14					
		NO.12-15					
		NO.13-16					
		NO.14-17					
		NO.15-18					
		NO.16-19					
	8.2	NO.5-10	10 km	300 km	50 km	20	5.582 m
		NO.6-11	15 km				
		NO.7-12					
		NO.8-13					
		NO.9-14					
		NO.10-15					
		NO.11-16					
		NO.12-17					
		NO.13-18					
		NO.14-19					
	8.4	NO.5-13	10 km	450 km	50 km	20	7.425 m
		NO.6-14	15 km				
		NO.7-15					
		NO.8-16					
		NO.9-17					
		NO.10-18					
		NO.11-19					
	8.6	NO.5-18	10 km	700 km	50 km	20	9.5238 m
		NO.6-19	15 km				
	8.65	NO.5-19	10 km	750 km	50 km	20	10.5645 m
			15 km				

圖 41 馬尼拉海溝邏輯樹架構圖 (續)

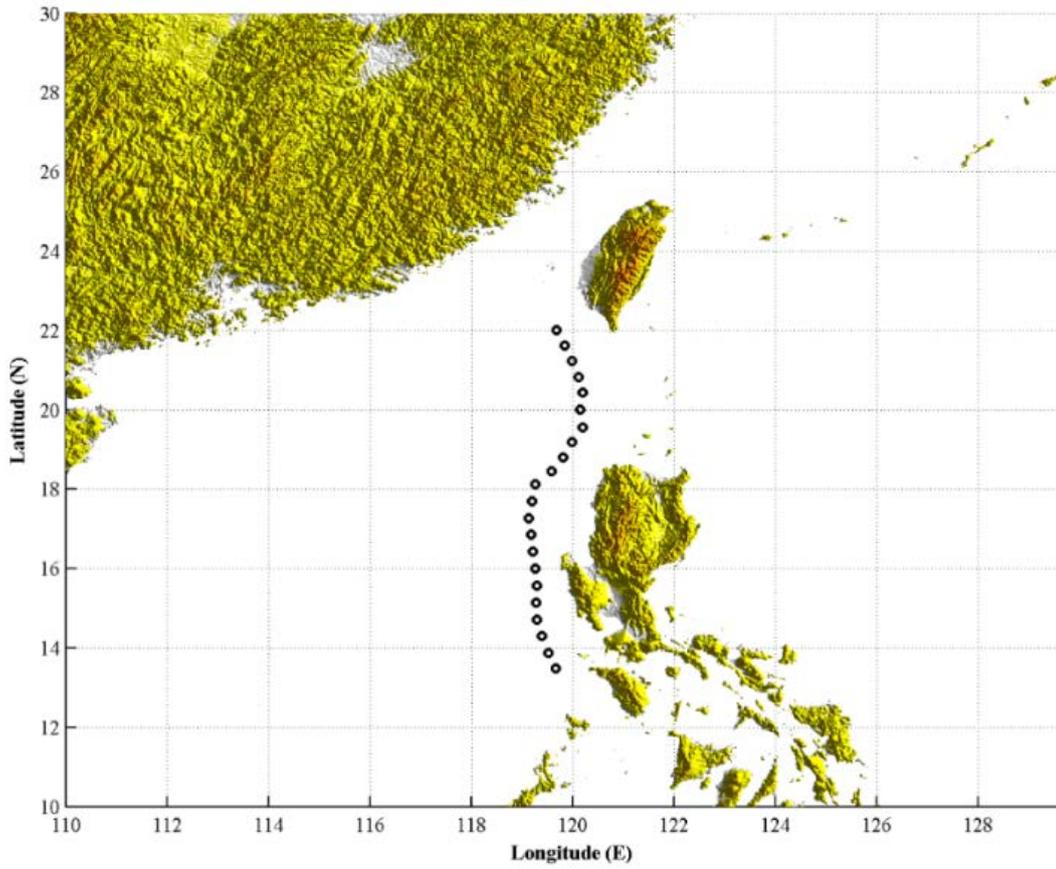


圖 42 馬尼拉海溝破裂位置分布圖（黑色圓圈為破裂位置，由上至下分別為編號 1 至 22）

表 10 馬尼拉海溝破裂位置及走向角

編號(No.)	經度(°E)	緯度(°N)	走向角(°)
1	119.675	22.012	185.325
2	119.842	21.622	158.325
3	119.987	21.239	164.092
4	120.111	20.833	164.092
5	120.194	20.435	185.382
6	120.151	20.013	185.382
7	120.188	19.565	206.406
8	119.987	19.190	206.406
9	119.801	18.806	210.509
10	119.573	18.446	210.509
11	119.260	18.120	187.533

表 10 馬尼拉海溝破裂位置及走向角 (續)

編號(No.)	經度(°E)	緯度(°N)	走向角(°)
12	119.201	17.697	187.533
13	119.133	17.276	174.573
14	119.176	16.851	174.573
15	119.218	16.426	174.573
16	119.261	16.001	174.573
17	119.295	15.577	182.935
18	119.272	15.150	182.935
19	119.288	14.717	167.053
20	119.389	14.301	167.053
21	119.511	13.880	161.505
22	119.654	13.477	161.505

2. 海嘯模型之建立

為了考量以馬尼拉海溝為震源區的邏輯樹狀圖造成的海嘯波傳遞至核三廠區的海嘯波高危害度，本研究報告以 COMCOT 模擬海嘯波的生成和傳遞至核三廠區，計算核能所提供之對馬尼拉海溝邏輯樹其中 50 組海嘯情境(今年度之目標)，使用五層巢狀網格，如表 12 所示。

第一層地形資料由 NOAA 提供，地形解析度為 1 分，範圍為 $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 、 $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ，如圖 43。第二層地形資料向行政院國家科學委員會海洋學門資料庫購買而得，地形解析度為 500 m，範圍為 $117^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 、 $18^{\circ}\text{N}\sim 27^{\circ}\text{N}$ ，涵蓋台灣全島陸域和周邊海域，如圖 44。第三層地形資料也是向行政院國家科學委員會海洋學門資料庫購得，地形解析度為 200 m，範圍為 $119.00^{\circ}\text{E}\sim 122.10^{\circ}\text{E}$ 、 $21.80^{\circ}\text{N}\sim 25.40^{\circ}\text{N}$ ，涵蓋台灣全島陸域及台灣沿海海域，如圖 45。第四層地形由第三層地形內插而得，範圍為 $120.65^{\circ}\text{E}\sim 120.90^{\circ}\text{E}$ 、 $21.85^{\circ}\text{N}\sim 22.00^{\circ}\text{N}$ ，涵蓋南部部分陸域及周邊海域，如圖 46。第五層地形資料是由核能所提供的陸域和海域數值高程資料與核三廠區詳細高程資料合併而成，地形解析度為 10m，範圍為 $120.7010^{\circ}\text{E}\sim 120.8790^{\circ}\text{E}$ 、 $21.8805^{\circ}\text{N}\sim 21.9595^{\circ}\text{N}$ ，涵蓋台灣南部部分陸域和周邊海域，如圖 47。其中，核三廠區範圍為

120.7481°E~120.7585°E、21.9509°N ~21.9591°N，如圖 48。

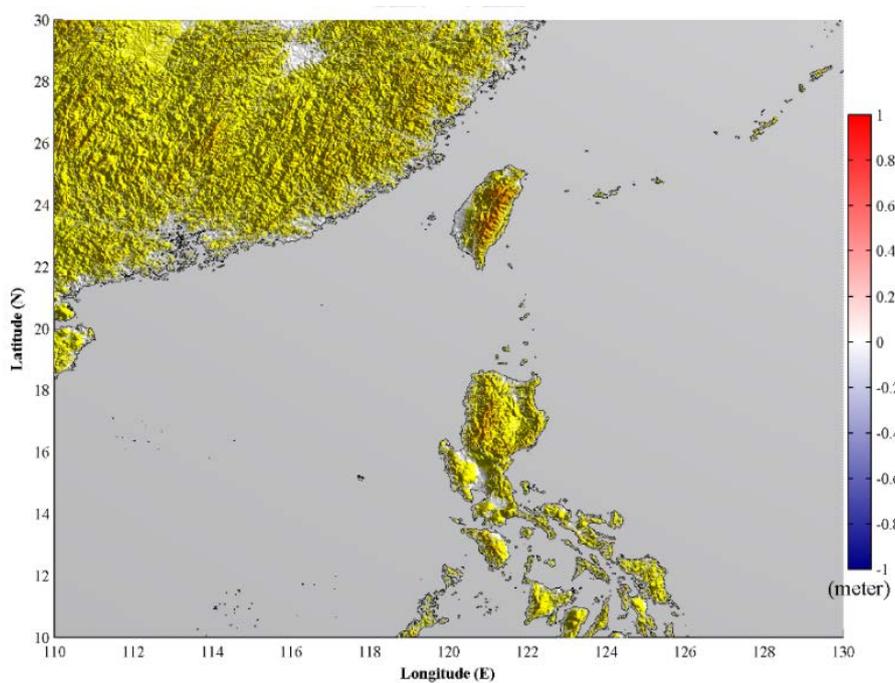


圖 43 第一層計算範圍

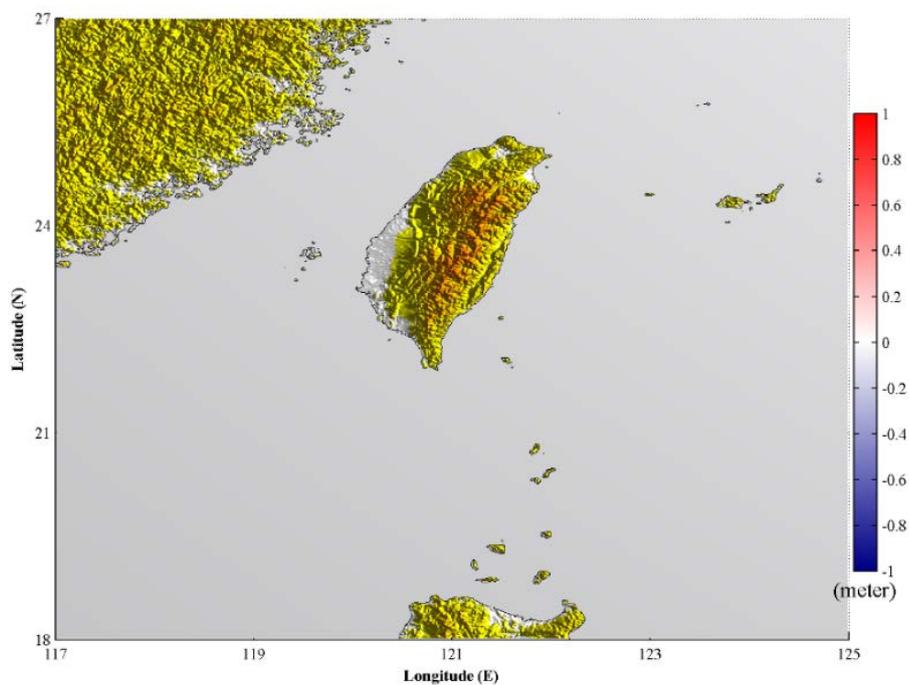


圖 44 第二層計算範圍

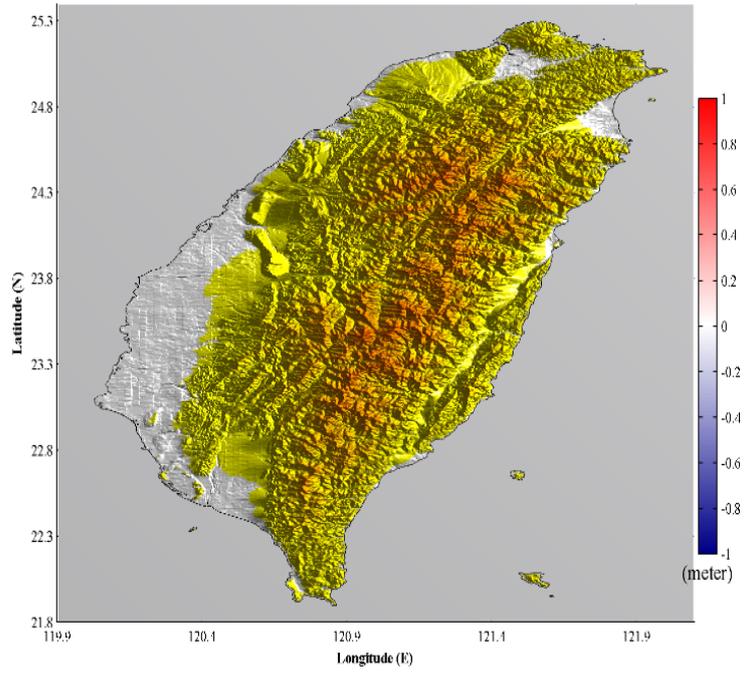


圖 45 第三層計算範圍

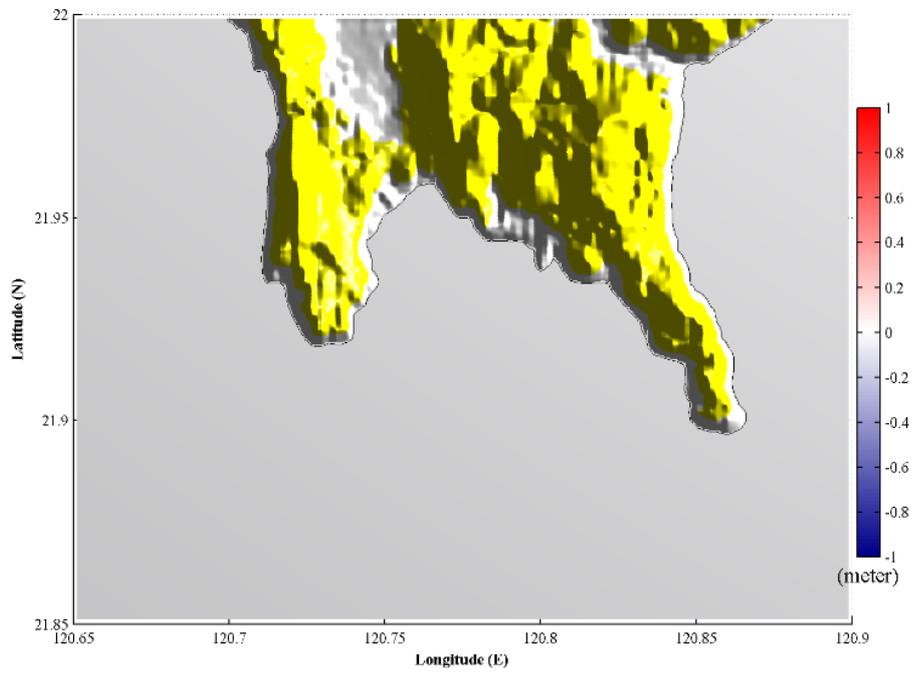


圖 46 第四層計算範圍

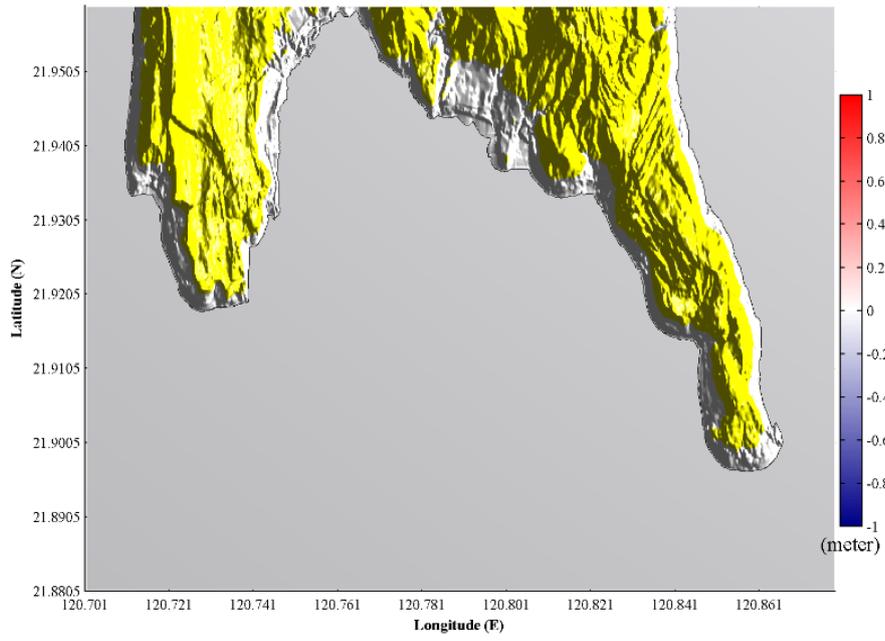


圖 47 第五層計算範圍

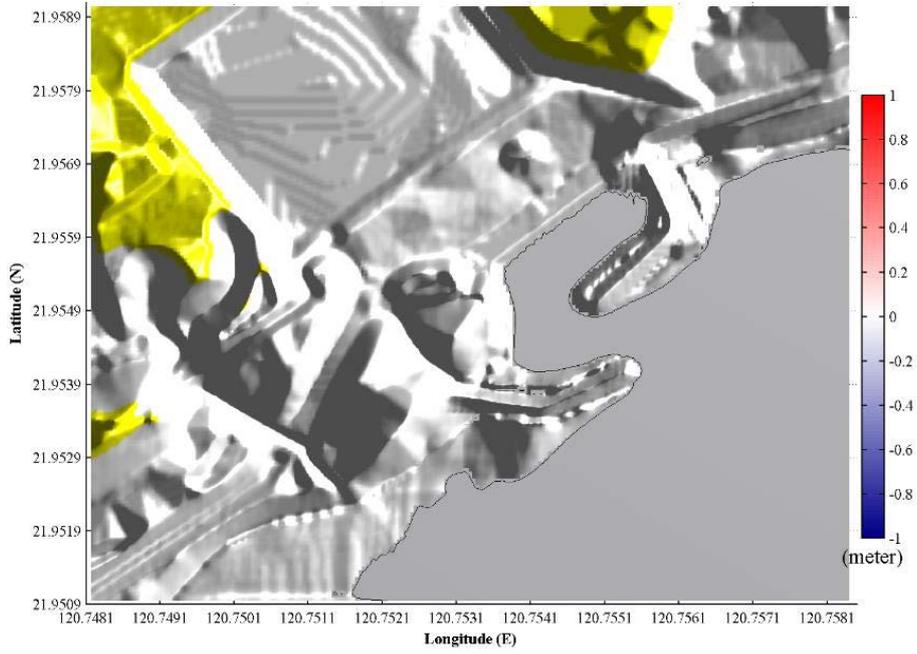


圖 48 核三廠區範圍

表 11 馬尼拉海溝情境模擬之設定

第 N 層	地形解析度 (m)	模擬範圍 (經度、緯度)	淺水波方程式	網格 (m)
1	1800	110.0000°E~130.0000°E 10.0000°N~30.0000°N	線性	1800
2	500	117.0000°E~125.0000°E 18.0000°N~27.0000°N	線性	600
3	200	119.0000°E~122.1000°E 21.8000°N~25.4000°N	非線性	200
4	200	120.6500°E~120.9000°E 21.8500°N~22.0000°N	非線性	50
5	10	120.7010°E~120.8790°E 21.8805°N~21.9595°N	非線性	10

二、海嘯危害度分析結果

驗證計算得到數值模式標準差以及完成模擬 50 組海嘯情境後，將該模擬情境所計算之海嘯最大波高值，和數值模式標準差 (σ_{EQK}) 代入式(16)，可以得到海嘯波高超越某水位高度(z)的機率。然而，使用原始的對數常態分布會出現不合理的極端值，本報告根據 Thio (2010) 建議截斷大於平均值三個標準差以上的機率密度函數值，改善危害度被高估的狀況。最後計算式(17)，將截斷後的機率密度函數乘上對應的地震發生率，可獲得該最大海嘯波高之年超越機率。

(一) 危害度曲線

選定核三廠區外海水深約 30m 處為波高計一，近岸水深約 5m 處為波高計二，位置如圖 49 所示，將邏輯樹中 50 組模擬情境所計算出的海嘯波高年超越機率 $v_{EQK}(W_{tsu} > z)$ 乘上各自的權重值，並加總起來，即可得到馬尼拉海溝發生地震所引發之海嘯對於某特定位置的機率式危害度曲線(圖 50、圖 51)，其數據知詳細資料如附錄 B 之表格所示，各分支的權重值的大小需透過專家學者的建議或地質調查決定，然而目前尚未有詳細的地質調查結果，故以平均權

重的方式呈現於期末報告，如邏輯樹狀圖中共 50 組情境，則每一組情境的權重為 0.02。由危害曲線的呈現，可得知馬尼拉海溝發生地震所造成的海嘯波於該特定位置的波高超越機率。

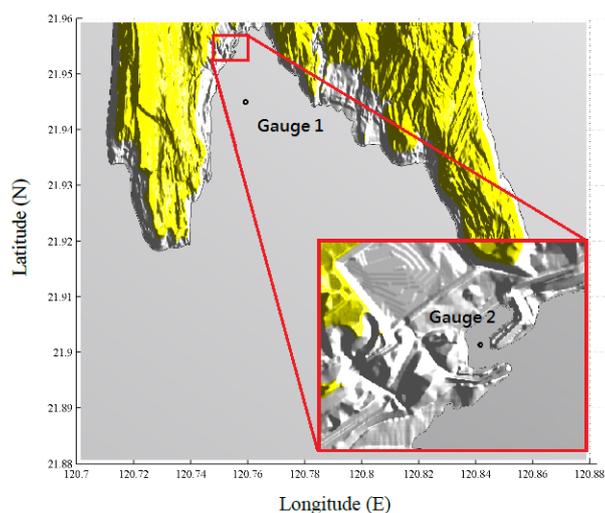


圖 49 波高計位置圖，波高計 1(120.7592°E、21.945°N)與波高計 2(120.754372°E、21.954929°N)

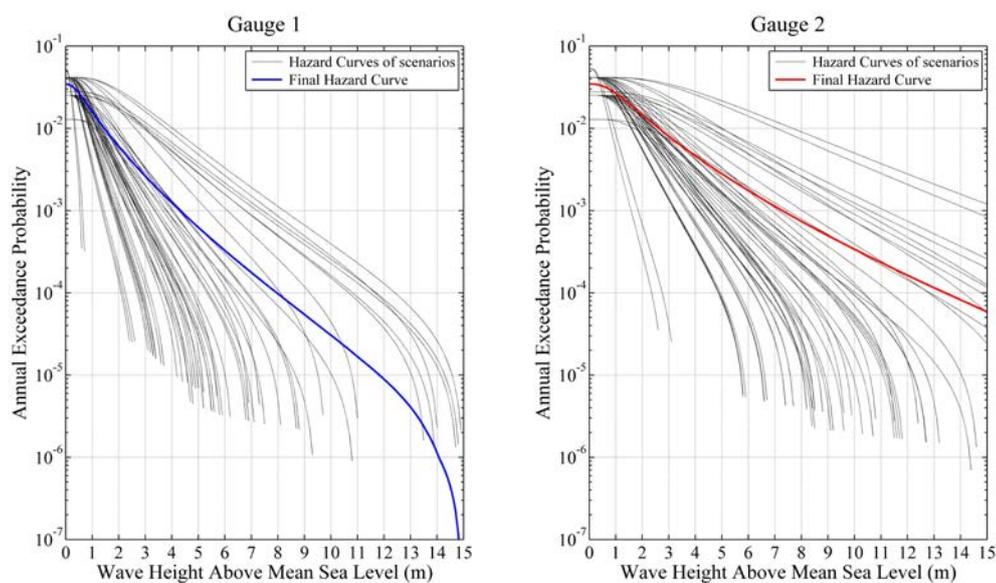


圖 50 個別情境之海嘯危害曲線（黑）與加權後之危害曲線（50 組情境之結果）（藍：波高計 1，紅：波高計 2）

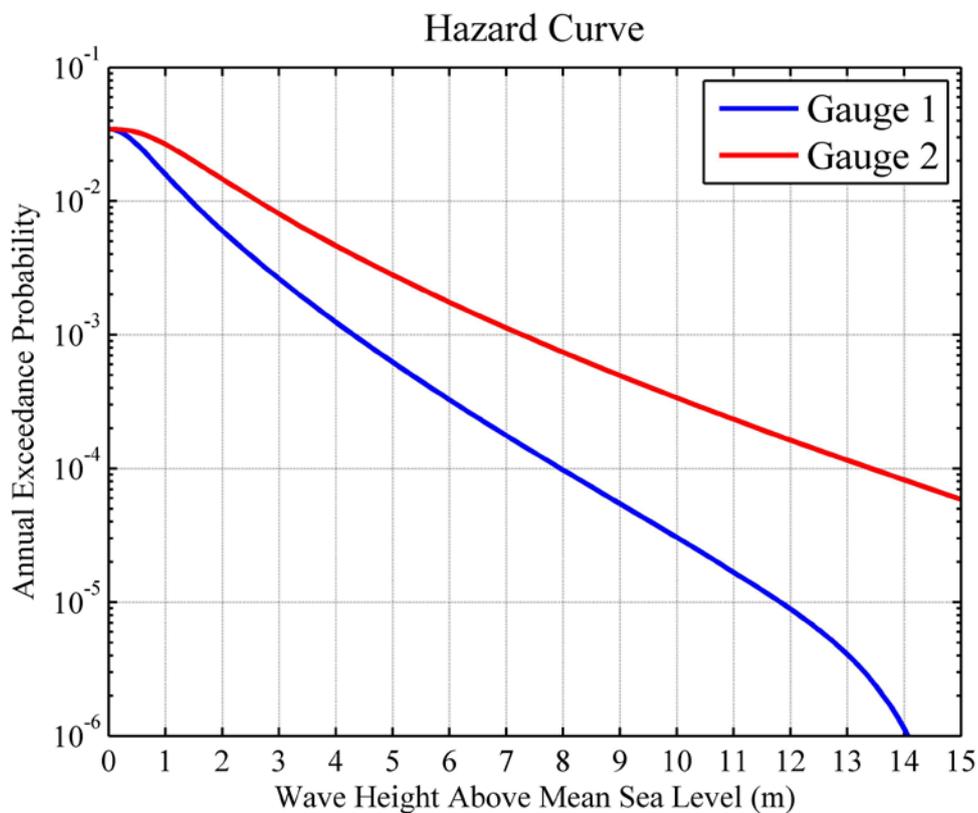


圖 51 波高計 1（藍）與波高計 2（紅）之海嘯危害曲線

(二) 危害度地圖

除了單一位置的危害度曲線外，本研究也將其應用至二維空間分布，危害度地圖是由危害度曲線(圖 51)讀取相同年超越機率下之最大海嘯波高所繪製而成，海嘯水位過大可能導致核能設備損壞，水位過低也會造成冷卻系統故障引發核能危機，基於防範災害，分別製作年超越機率 2%、1% 和 0.2% 的海嘯最大與最低水位之危害度地圖於核三廠區域，如圖 52 至圖 57 所示。其中，危害地圖是以 COMCOT 巢狀網格中第五層 10 公尺的網格作計算，其地點眾多，故僅以圖 51 兩個波高計的危害度曲線為例，而其他地點的最大海嘯波高也是用同樣的方式計算，因此不再多作敘述。

由機率式危害度地圖中也可以發現，海嘯最大水位和海嘯最低水位將會隨著重現期越大而分別有越大和越小的水位值，如此可做為大範圍之防範災害規劃之參考。然而欲得到完整的機率式危害度分析結果必須模擬 72 組海嘯情境，本報告目前僅模擬其中 50 組，並建立機率是海嘯危害度分析方法的流程與計算方法。

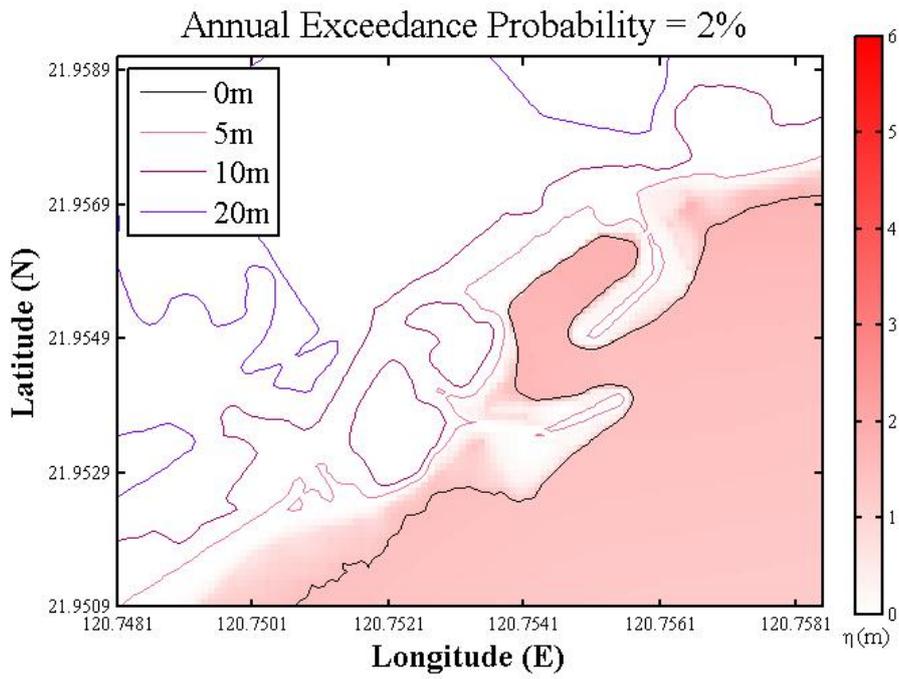


圖 52 年超越機率 2% 之海嘯最高水位分布

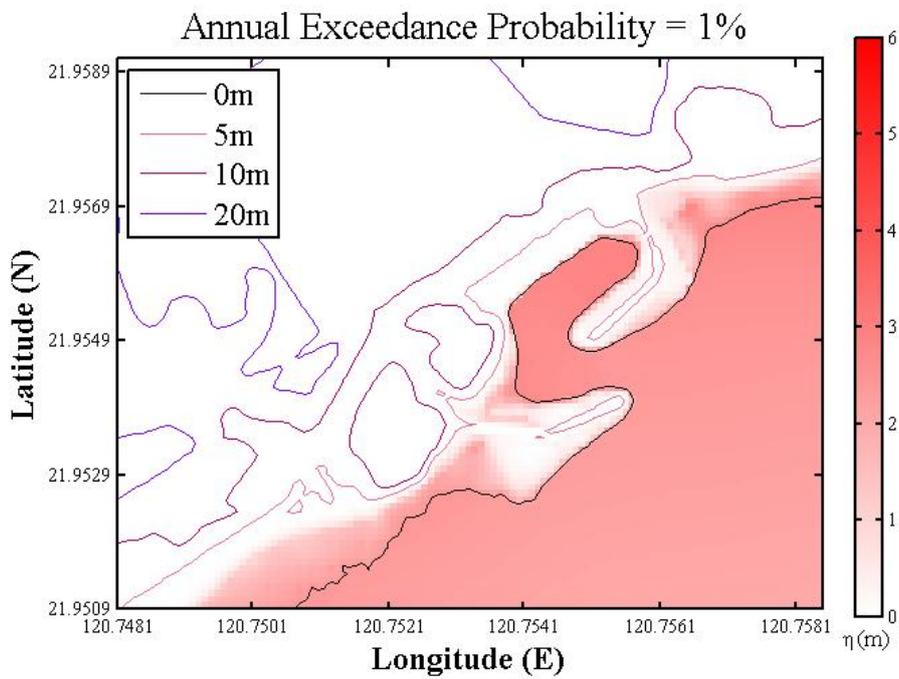


圖 53 年超越機率 1% 之海嘯最高水位分布

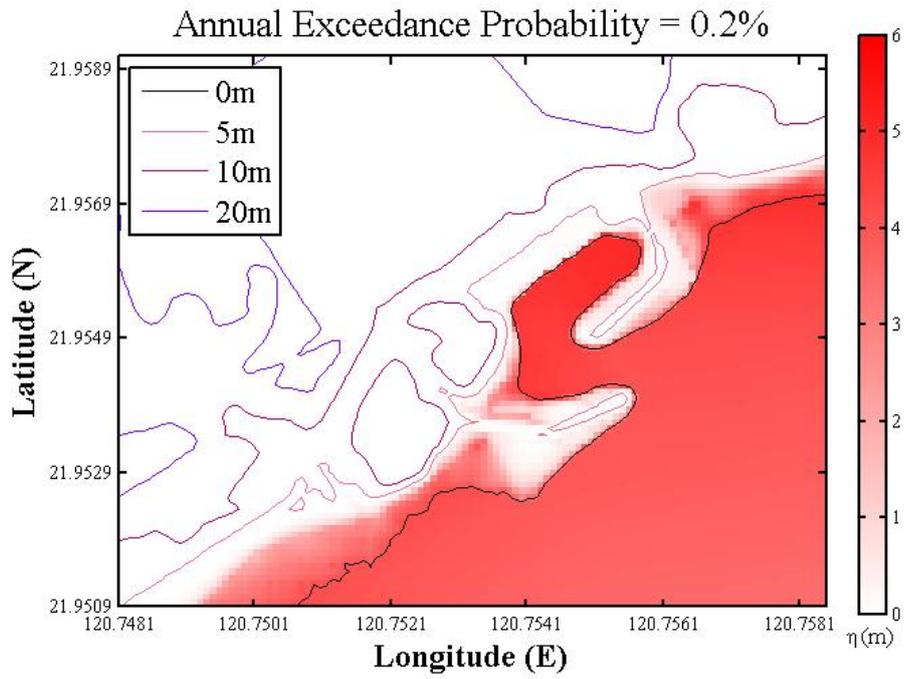


圖 54 年超越機率 0.2% 之海嘯最高水位分布

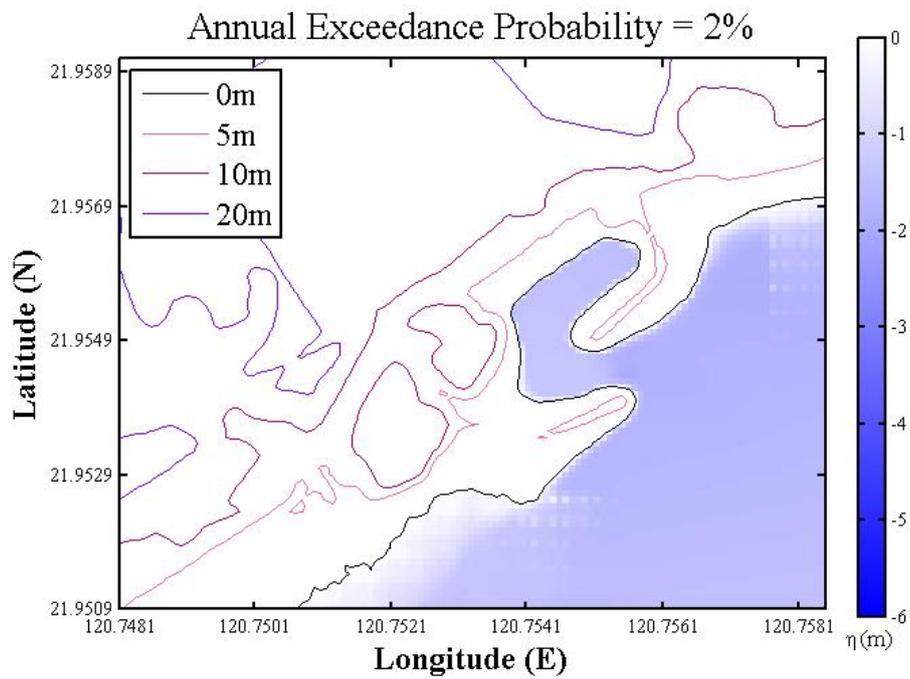


圖 55 年超越機率 2% 之海嘯最低水位分布

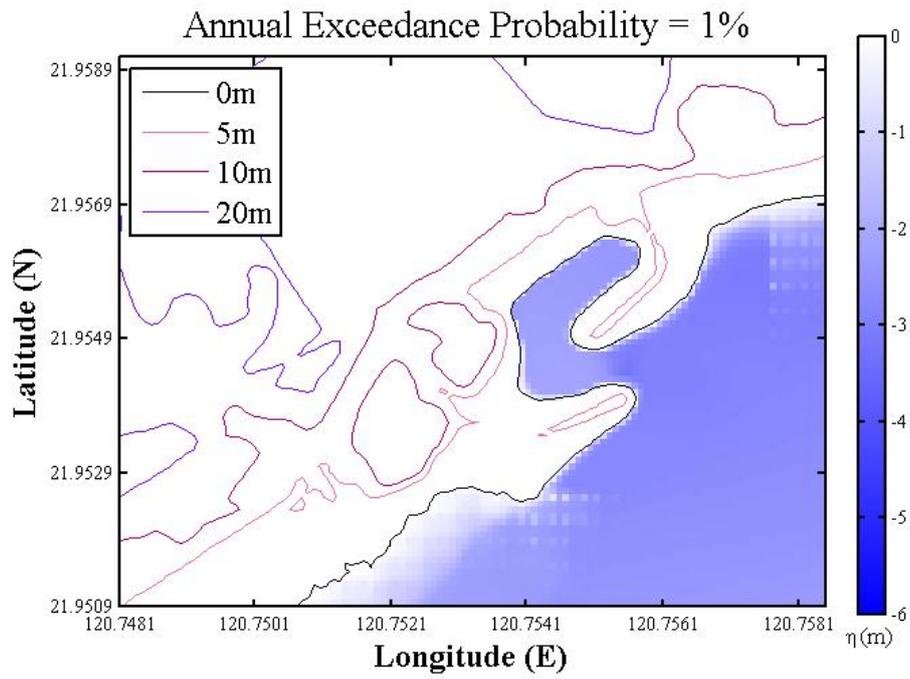


圖 56 年超越機率 1% 之海嘯最低水位分布

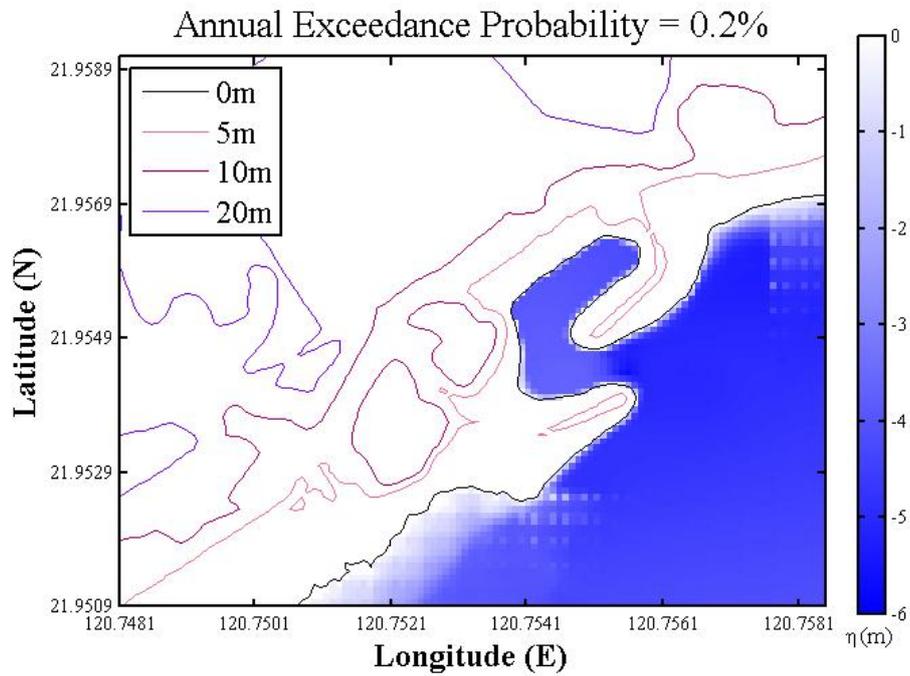


圖 57 年超越機率 0.2% 之海嘯最低水位分布

肆、結果與討論

本研究計畫延續「行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告計畫 103 年海嘯浪高波傳機率模型之建置研究」之成果，並依照核三廠的需求進行調整，建立機率式海嘯危害度模型。

此機率式海嘯危害度分析方法分別透過數值模擬結果、歷史海嘯波高的比對和地震參數的邏輯樹狀圖，考慮偶然不確定性和認知不確定性。以 2006 屏東地震和 2011 日本 311 地震事件的潮位資料，完成 35 組模擬與歷史波高比對的結果，模擬邏輯樹狀圖中 50 組情境，並以海嘯危害度曲線與海嘯危害度地圖為分析結果，建立可應用於核三廠之機率式海嘯危害度分析方法。

此危害度分析方法未完成邏輯樹狀圖中所有情境，且僅考慮地震所造成的影響，未來可繼續完成其餘 22 組情境，並增加其他災害源，如海底崩移、暴潮、潮汐和海水面變化等影響也納入考量，使機率式海嘯危害度分析更加全面性。

伍、參考文獻

1. 包澄瀾, *海洋災害及其預報*. 1991.
2. 徐明同, *海嘯所引起之災害*. 中央氣象局氣象學報第二十七卷第一期, 1981.
3. Titov, V.V. and F.I. González, *Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model*. 1997, NOAA technical memorandum ERL PMEL-112, Pacific marine environmental laboratory, Seattle, Washington.
4. Shuto, N., *Numerical simulation of tsunamis*. Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, , 1991: p. 171-191.
5. UNESCO, *Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme*, in *International union of geodesy and geophysics/International oceanographic commission (IUGG/IOC) Time panel, IOC manuals and guides No. 35, IOC*. 1997, United nations educational, scientific and cultural organization (UNESCO).
6. Murata, S., et al., *Tsunami: To survive from tsunami*. Advanced Series on Ocean Engineering. Vol. 32. 2010: World Scientific.
7. *Lessons learned from the tsunami disaster caused by the 2011 Great East Japan Earthquake and improvements in JMA's tsunami warning system*. p. 1-13.
8. JSCE, *Tsunami assessment method for nuclear power plants in Japan*. 2006, Japan Society of Civil Engineers (JSCE).
9. Titov, V.V., *Numerical modeling of long wave runoff*. 1977, University of Southern California, Los Angeles, California.
10. Titov, V.V. and C.E. Synolakis, *Extreme inundation flows during*

- the Hokkiado-Nansei-Oki tsunami*. Geophysical research letters, 1997. **24**(11): p. 1315-1318.
11. Okada, Y., *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985. **75**(4): p. 1135-1154.
 12. Imamura, F., A.C. Yalciner, and G. Ozyurt, *Tsunami modelling manual (TUNAMI model)*. 2006, Tohoku University, Sendai, Japan and Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
 13. Liu, P.L.F., et al., *Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii*, in *Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning*, Y. Tsuchiya and N. Shuto, Editors. 1995, Springer Netherlands. p. 99-115.
 14. Wang, X.M. and P.L.F. Liu, *Preliminary simulation of 1986 & 2002 Taiwan Hualien tsunami*. Cornell University, Ithaca., 2005.
 15. Wang, X.M. and P.L.F. Liu, *An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami*. Journal of Hydraulic Research, 2006. **44**(2): p. 147-154.
 16. Liu, P.L.F. and X.M. Wang, *Tsunami source region parameter identification and tsunami forecasting*. Journal of Earthquake and Tsunami, 2008. **2**(2): p. 87-106.
 17. Watts, P., et al., *Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003. **3**(5): p. 391-402.
 18. Liu, P.L.F., X.M. Wang, and A.J. Salisbury, *Tsunami hazard and early warning system in South China Sea*. Journal of Asian Earth Sciences, 2009. **36**(1): p. 2-12.
 19. Synolakis, C.E. and E.N. Bernard, *Tsunami science before and*

- beyond Boxing Day 2004*. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2006. **364**(1845): p. 2231-65.
20. Yen, Y.T. and K.F. Ma, *Source-Scaling Relationship for M 4.6-8.9 Earthquakes, Specifically for Earthquakes in the Collision Zone of Taiwan*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011. **101**(2): p. 464-481.
 21. Liu, P.L.-F., S.B. Woo, and Y.S. Cho, *Computer programs for tsunami propagation and inundation*. Cornell University, 1998.
 22. Wang, X.M., *User manual for COMCOT version 1.7*. 2009.
 23. PG&E, *Methodology for probabilistic tsunami hazard analysis: Trial application for the Diablo Canyon power plant site*. 2010, Pacific Gas & Electric Company.
 24. Cornell, C.A., *Engineering seismic risk analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968. **58**(5): p. 1583-1606.
 25. Senior Seismic Hazard Analysis Committee, S., *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts*. 1997, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Main Report.
 26. Lin, I. and C.C. Tung, *A preliminary investigation of tsunami hazard*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982. **72**(6): p. 2323-2337.
 27. Rikitake, T. and I. Aida, *Tsunami hazard probability in Japan*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988. **78**(3): p. 1268-1278.
 28. Bommer, J.J. and N.A. Abrahamson, *Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates?* Bulletin of the Seismological Society of America, 2006. **96**: p. 1976-1977.
 29. Gonzalez, F.I., R.J. LeVeque, and L.M. Adams, *Probabilistic*

- tsunami hazard assessment (PTHA) for Crescent City, CA*. 2013, University of Washington.
30. Jing, H.H., et al., *A Revised Evaluation of Tsunami Hazards along the Chinese Coast in View of the Tohoku-Oki Earthquake*. Pure and Applied Geophysics, 2013. **170**(1-2): p. 129-138.
 31. Horspool, N., et al., *A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014. **14**(11): p. 3105-3122.
 32. Geist, E.L. and T. Parsons, *Probabilistic analysis of tsunami hazards*. Natural Hazards, 2006. **37**(3): p. 277-314.
 33. Gonzalez, F.I., et al., *Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources*. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2009. **114**.
 34. 陳韻如, *2006 年屏東外海地震引發海嘯的數值模擬探討*. 中央大學水文與海洋科學研究所學位論文, 2008: p. 1-68.
 35. Wu, T.R., et al., *Numerical Study on Tsunamis Excited by 2006 Pingtung Earthquake Doublet*. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2008. **19**(6): p. 705-715.
 36. Kirby, S., *Tsunami source characterization for Western Pacific subduction zones*. USGS Tsunami Source Working Group, 2006.

附錄 A 濾波過程介紹

如陳(2008)[34]研究論文指出，模式在驗證過程中，氣象局的實測的潮位資料需要經過濾波處理，濾波主要是過濾掉天文潮的影響，因海嘯波的週期約為 20 分鐘至三小時，而一般天文潮的週期多大於三小時，因此選擇三小時作為濾波依據。

本報告濾波是利用 Matlab 中 filter 指令，濾波前先將原始六分鐘一筆的潮位資料內插為一分鐘一筆，再將資料通過三小時低通濾波(low pass)，得到週期大於三小時的水位時序列資料，再將實測之潮位資料扣除週期大於三小時的水位，所得即為週期小於三小時之波浪時序列，然而所得結果仍存在明顯週期大於三小時之波浪，因此本文重複上述步驟兩次。以 2006 年屏東地震事件之後壁湖站為例，濾波過程可參考圖 58 至圖 60。

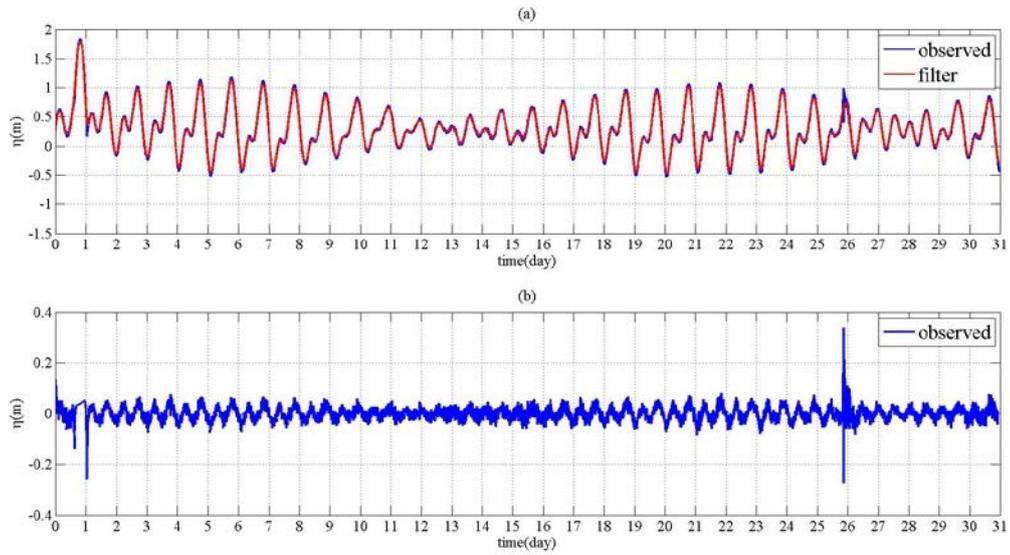


圖 58 2006 年 12 月屏東地震事件之後壁湖第一次濾波過程，(a) 觀測資料與週期大於三小時的水位資料 (b)第一次濾波處理

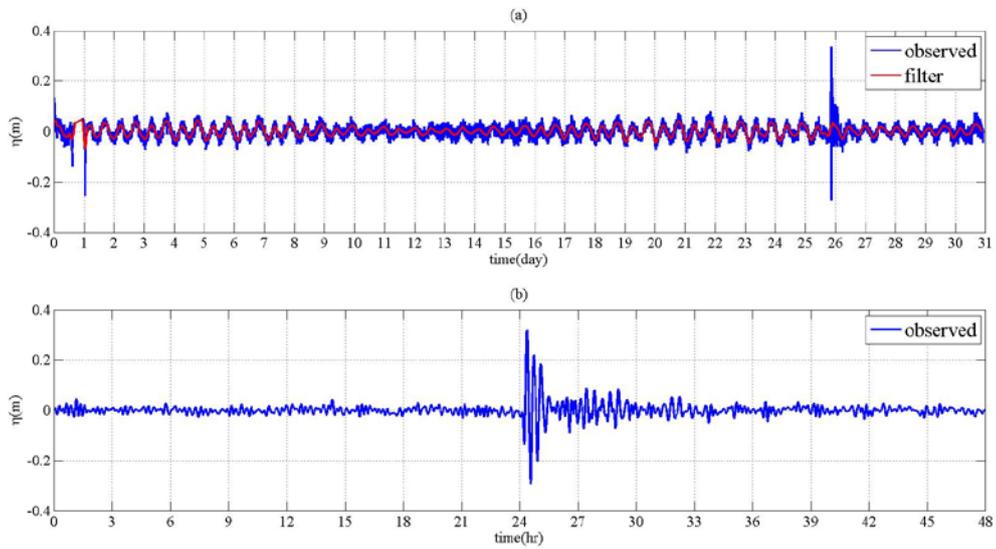


圖 59 2006 年 12 月屏東地震事件之後壁湖第二次濾波過程(a)第一次濾波處理與週期大於三小時的水位資料 (b)第二次濾波處理、地震發生前後各 24 小時的水位變化

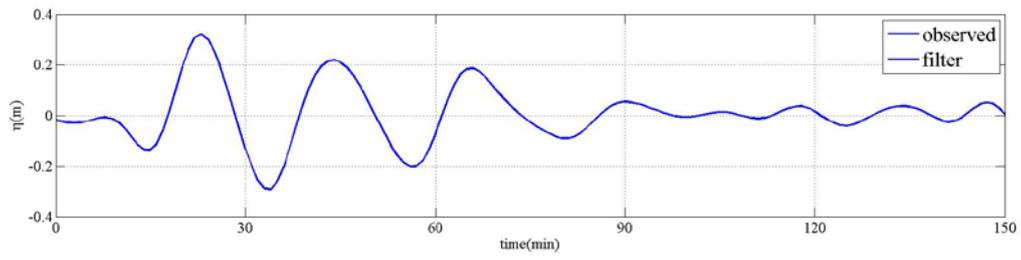


圖 60 2006 年 12 月屏東地震事件之後壁湖第二次濾波處理、地震發生後 150 分鐘水位變化

```

%% matlab filter code

ws1=load('後壁湖站潮位資料.dat');

a = [1];

b(1:180)= 1/180;

t_shift = 91;

yt=ws1(:,1)-t_shift;

y = filter(b, a, ws1(:,2));

ws2(:,2) = ws1(1:end-t_shift,2)-y((t_shift+1):end);

ws2(:,1) = yt((t_shift+1):end);

ytt=ws1(:,1)-t_shift-t_shift;

yy = filter(b, a, ws2(:,2));

%% plot figure

subplot(411)

plot(ws1(:,1)/60/24,ws1(:,2)/1000,'b-'); hold on

plot(yt/60/24,y/1000,'r-')

axis([0 31 -1.5 2.0])

set(gca,'xtick',[0:1:31]);set(gca,'ytick',[-1.5:0.5:2.0]);

xlabel('time(day)');ylabel('\eta(m)')

legend('observed','filter')

title('(a)');grid on

```

```

subplot(412)

plot(ws2(:,1)/60/24,ws2(:,2)/1000,'b-'); hold on

plot(ytt((t_shift+1):end)/60/24,yy/1000,'r-')

axis([0 31 -0.5 0.5])

set(gca,'xtick',[0:1:31]);set(gca,'ytick',[-0.5:0.1:0.5]);

xlabel('time(day)');ylabel('\eta(m)')

legend('observed','filter')

title('(b)');grid on

subplot(413)

plot((ytt((1+t_shift+t_shift):end)-35786)/60,(ws2(1:end-t_shift,2)-yy((t_
_shift+1):end))/1000,'b-');

axis([0 48 -0.4 0.4])

set(gca,'xtick',[0:3:48]);set(gca,'ytick',[-0.4:0.2:0.4])

xlabel('time(hr)');ylabel('\eta(m)')

title('(c)');grid on

subplot(414)

plot((ytt((1+t_shift+t_shift):end)-37226),(ws2(1:end-t_shift,2)-yy((t_shi
ft+1):end))/1000,'b-');hold on

axis([0 150 -0.4 0.4])

set(gca,'xtick',[0:30:150])

```

```
set(gca,'ytick',[-0.4:0.2:0.4])  
  
xlabel('time(min)');ylabel('\eta(m)')  
  
title('(d)');grid on
```

附錄 B 最終危害度曲線資料 (圖 51)

Wave Height Above Mean Sea Level (m)	Annual Exceedance Probability of Gauge1	Annual Exceedance Probability of Gauge2
0	0.034550704	0.034550704
0.1	0.034199964	0.034538702
0.2	0.033075074	0.034420208
0.3	0.031259056	0.034082549
0.4	0.029016319	0.033503568
0.5	0.026567165	0.032704017
0.6	0.024103362	0.03171278
0.7	0.021750536	0.030565464
0.8	0.019574432	0.029302023
0.9	0.017600285	0.027962292
1	0.015829581	0.026582327
1.1	0.014251336	0.025192464
1.2	0.012873728	0.023816782
1.3	0.011647624	0.022473441
1.4	0.010542723	0.021175449

1.5	0.009560141	0.019931561
1.6	0.008684859	0.01874716
1.7	0.007903588	0.017625034
1.8	0.007204707	0.01656603
1.9	0.006578123	0.015569579
2	0.006015097	0.014634118
2.1	0.005508073	0.013757408
2.2	0.005050518	0.012936776
2.3	0.00463677	0.012169302
2.4	0.004261919	0.011451947
2.5	0.003921447	0.010781654
2.6	0.00361206	0.010155412
2.7	0.003330441	0.009569941
2.8	0.003073995	0.009023444
2.9	0.002839721	0.008512582
3	0.002625422	0.008034869
3.1	0.002429153	0.007587972
3.2	0.002249001	0.007169457
3.3	0.002083811	0.00677801

3.4	0.001931869	0.006411237
3.5	0.001792713	0.006067395
3.6	0.001665078	0.005744866
3.7	0.001547277	0.005442154
3.8	0.001438717	0.005157873
3.9	0.001338662	0.004890744
4	0.001246157	0.004639584
4.1	0.001160573	0.004403297
4.2	0.001081339	0.004180875
4.3	0.0010079	0.003971381
4.4	0.000939985	0.003773951
4.5	0.000876953	0.003587786
4.6	0.00081859	0.003412147
4.7	0.000764358	0.003246347
4.8	0.000714087	0.003089752
4.9	0.000667394	0.002941775
5	0.000624138	0.002801868
5.1	0.000583968	0.002669526
5.2	0.000546655	0.002544278

5.3	0.000511851	0.002425687
5.4	0.000479563	0.002313348
5.5	0.000449418	0.002206881
5.6	0.000421261	0.002105934
5.7	0.000395082	0.002010181
5.8	0.000370668	0.001919314
5.9	0.00034793	0.001833045
6	0.000326706	0.001751416
6.1	0.000306889	0.00167394
6.2	0.000288324	0.001600281
6.3	0.000270925	0.001530226
6.4	0.000254669	0.001463575
6.5	0.000239421	0.001400139
6.6	0.000225114	0.001339744
6.7	0.000211685	0.001282224
6.8	0.000199076	0.001227602
6.9	0.000187234	0.001175629
7	0.000176159	0.001126073
7.1	0.000165883	0.001078806

7.2	0.000156216	0.001033709
7.3	0.000147169	0.000990671
7.4	0.000138653	0.000949585
7.5	0.000130715	0.000910353
7.6	0.000123237	0.000873039
7.7	0.000116235	0.000837384
7.8	0.000109634	0.000803304
7.9	0.000103408	0.000770878
8	9.75353E-05	0.000739864
8.1	9.19933E-05	0.000710194
8.2	8.67621E-05	0.000681803
8.3	8.18691E-05	0.000654629
8.4	7.72473E-05	0.000628759
8.5	7.28806E-05	0.000603983
8.6	6.87538E-05	0.000580366
8.7	6.48526E-05	0.000557917
8.8	6.11638E-05	0.000536396
8.9	5.77166E-05	0.000515759
9	5.44953E-05	0.000496035

9.1	5.14459E-05	0.000477112
9.2	4.85585E-05	0.000458956
9.3	4.58239E-05	0.000441571
9.4	4.32333E-05	0.000424922
9.5	4.07987E-05	0.000408937
9.6	3.84911E-05	0.000393586
9.7	3.63032E-05	0.000378842
9.8	3.42282E-05	0.000364782
9.9	3.23211E-05	0.00035127
10	3.05111E-05	0.000338283
10.1	2.87928E-05	0.00032586
10.2	2.71613E-05	0.000313915
10.3	2.56119E-05	0.000302427
10.4	2.414E-05	0.000291378
10.5	2.27416E-05	0.000280785
10.6	2.14127E-05	0.000270593
10.7	2.01495E-05	0.000260785
10.8	1.89486E-05	0.000251344
10.9	1.78066E-05	0.000242291

11	1.67374E-05	0.000233629
11.1	1.572E-05	0.000225288
11.2	1.48077E-05	0.000217253
11.3	1.3939E-05	0.000209514
11.4	1.31116E-05	0.000202056
11.5	1.23236E-05	0.000194871
11.6	1.15727E-05	0.000187945
11.7	1.08572E-05	0.000181355
11.8	1.01753E-05	0.000175033
11.9	9.52518E-06	0.000168968
12	8.90535E-06	0.00016315
12.1	8.31427E-06	0.000157537
12.2	7.75048E-06	0.00015212
12.3	7.21265E-06	0.000146893
12.4	6.69947E-06	0.000141848
12.5	6.20974E-06	0.000136978
12.6	5.74229E-06	0.000132327
12.7	5.29604E-06	0.000127836
12.8	4.86995E-06	0.000123499

12.9	4.46304E-06	0.000119368
13	4.07438E-06	0.000115378
13.1	3.70309E-06	0.000111522
13.2	3.34832E-06	0.000107796
13.3	3.0093E-06	0.000104195
13.4	2.68525E-06	0.000100743
13.5	2.37549E-06	9.7406E-05
13.6	2.07919E-06	9.41796E-05
13.7	1.82625E-06	9.10599E-05
13.8	1.58429E-06	8.80432E-05
13.9	1.35279E-06	8.51257E-05
14	1.13117E-06	8.23038E-05
14.1	9.45477E-07	7.95742E-05
14.2	8.11322E-07	7.69337E-05
14.3	6.82831E-07	7.4379E-05
14.4	5.59746E-07	7.19071E-05
14.5	4.41822E-07	6.95151E-05
14.6	3.28826E-07	6.72135E-05
14.7	2.20537E-07	6.49856E-05

14.8	1.16649E-07	6.28545E-05
14.9	4.28773E-08	6.07912E-05
15	0	5.87933E-05