

交通部中央氣象局
委託研究計畫(期末)成果報告

2010 年智利海嘯經太平洋侵襲台灣事件分析研究

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-99-O-05

執行期間：99 年 6 月 17 日至 99 年 12 月 31 日

計畫主持人：張國棟

執行機構：國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系

中華民國 99 年 12 月 31 日

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表

計畫中文名稱	2010 年智利海嘯經太平洋侵襲台灣事件分析研究		
計畫編號	MOTC-CWB-99-O-05		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系		
年度	99	執行期間	9906-9912
本期經費 (單位：千元)	365		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100	100	100
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	365	365	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	張國棟	無	謝佳紘
			李淑惠
報告頁數	151	使用語言	中文
中英文關鍵詞	海嘯；溢淹；預警		
研究目的	<p>2010 年 2 月 27 日台灣時間 14 時 34 分，智利外海發生規模 8.8 的地震，此重大地質活動在智利觀測到 2.34 公尺高的海嘯，同時國際海嘯中心也發佈海嘯警報，包含台灣在內的 52 個國家或地區都在海嘯警報的通報名單中，雖然此次的海嘯事件並未對台灣造成重大影響，但依據歷史記載，台灣曾於 1781 年及 1867 年分別在西南部的高屏地區及東北部的基隆地區發生嚴重的海嘯災害；而 1986 年花蓮外海產生的海嘯，在花蓮港海嘯的實測波高也達到 2 公尺左右。本研究蒐集歷史上太平洋地區地震所引發海嘯波高數據，以數值模式來模擬 2010 年經太平洋襲擊台灣之智利海嘯事件，了解在環太平洋沿岸各地傳播時間與波形分布的變化特性，此模式的成果將可應用於規劃台灣各地海嘯溢淹地圖，以減少海嘯所造成的傷亡及損失，並有助於海嘯災害的預警及應變。</p>		
研究成果	<p>本研究蒐集整理歷史上太平洋地區地震所引發海嘯事件，分析 2010 年智利海嘯事件在環太平洋的演變狀況，及台灣所有觀測到海嘯紀錄的特性，可瞭解海嘯事件對台灣可能造成的傷害。分析海嘯波由智利發生後傳遞至台灣不同地區</p>		

	<p>海水位變化關係，探討海嘯在台灣周圍的分布特性，可瞭解海嘯對台灣整體造成之影響範圍。由本次智利海嘯於台灣所測得水位紀錄得知，由太平洋地區越洋傳播而來之海嘯波，雖然直接衝擊台灣東部，但台灣東部海岸線平直而單調，海水又深，故雖有海嘯侵襲，但所測得的波高卻較後壁湖測站低。</p> <p>由本次智利海嘯所測得水位資料可知，海嘯波於台灣時間 15:30 傳遞抵達成功（約海嘯發生後 25 小時）、15:45 抵達花蓮、16:00 抵達蘇澳、16:15 抵達烏石/龍洞/後壁湖、16:30 抵達基隆/小琉球/東港、17:00 抵達高雄、17:15 抵達台北港，海嘯波先到達成功再分為沿順時針及逆時針方向繞行台灣四周，受到海嘯的影響於南部及東部各測站包括高雄/東港/後壁湖/成功/花蓮/蘇澳/烏石/龍洞/基隆潮位站皆有異常水位擾動現象，且於後壁湖/烏石/成功/花蓮潮位站觀測到較大的海嘯波高（約 0.66/0.52/0.46/0.38 m），海嘯波越過台灣東北及西南大陸棚時，週期可超過 30 至 40 min，但在部份測站受港池形狀影響，海嘯在港內會形成一些較高頻的振盪，且有時能持續達 1 天以上。本次海嘯事件均未達到發布海嘯警報的波高警戒值（1.0 m），部份測站水位有顯著的變動現象，與驗潮站於港內架設地點及港灣形狀有關，而蘭嶼、彭佳嶼、麟山鼻、竹圍、台北港及馬祖等站並未測到明顯的海嘯紀錄。</p> <p>本研究同時模擬近域海嘯在高雄及台南的變化及溯上特性，由此可知，台灣近海發生的近域海嘯，從地震發生源地到濱海地區若分別為 155 及 140 km，傳遞時間僅只有 20 至 30 min 左右，若發生地震位於更近岸處，海嘯波抵達海岸的時間也較短，通常只有數分鐘。模擬同一地區海嘯初始波高不同，將使得海嘯於近岸的溯上高度及溢淹程度在不同地區產生極大差異。依此建立海嘯作用時的海岸溢淹地圖（inundation map），即可提出適合當地之應變措施及海岸防災規劃參考。</p>
<p>具體落實應用情形</p>	<p>本研究完成智利海嘯模擬及台灣近域海嘯溢淹模擬，同時辦理一場次 4 小時研究成果教育研習會議，藉以提供中央氣象局作為規劃海岸防救災計畫之參考依據。並參考環太平洋各國之海嘯預警制度，規劃符合台灣海洋環境的海嘯預警機制與作業程序，提供中央氣象局作為緊急應變參考，同時提供未來與國際海嘯組織進行交流與合作的方式建議，對於遠地海嘯的預警，將可藉由加強國際合作加以防範，期使意外災害對生命財產安全之衝擊降至最低程度。並經由深入模擬海嘯在台灣西南外海發生時在高雄及台南的溢淹特性後，依此規劃溢淹地圖，未來特別針對沿海地區的居民，辦理各</p>

	地區海嘯災害教育訓練及應變演練，提供民眾在海嘯發生時的撤離路線指示，宣導海嘯的危險性及海嘯災害應變處理方法，可作為教育民眾防災自救知識的教材。
計畫變更說明	無
落後原因	無
檢討與建議 (變更或落後 之因應對策)	無

目 錄

第一章 前言.....	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 工作項目及內容.....	6
1-3 執行期程.....	7
第二章 海嘯特性及預警.....	9
2-1 海嘯成因及特性.....	9
2-2 歷史太平洋地區海嘯.....	16
2-2-1 1960 年智利地震.....	17
2-2-2 1964 年阿拉斯加地震.....	27
2-2-3 1952 年前蘇聯堪察加地震.....	39
2-2-4 1906 年厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震.....	45
2-2-5 2010 年智利地震.....	46
2-3 海嘯預警.....	55
第三章 數值模式之建立.....	65
3-1 海嘯模擬理論.....	66
3-2 數值處理方法與多重網格模式.....	69
3-3 移動邊界.....	73
第四章 模擬狀況與條件.....	75
4-1 2010 年智利海嘯於台灣水位變化.....	75
4-2 模擬區域及水深地形.....	87
4-3 初始條件.....	95
第五章 海嘯模擬.....	100
5-1 遠域海嘯—2010 年智利海嘯模擬.....	100
5-2 近域海嘯—高雄海嘯模擬.....	114
5-3 近域海嘯—台南海嘯模擬.....	131
第六章 結論與建議.....	145
6-1 結論.....	145
6-2 建議.....	147

參考文獻..... 149

表目錄

表 1-1-1	台灣地區歷史疑似海嘯紀錄表.....	4
表 1-1-2	海嘯規模分級表.....	4
表 1-2-1	交付項目與驗收標準.....	6
表 1-3-1	預定工作進度表.....	7
表 2-2-1	1900 年以來有感地震規模排名.....	16
表 2-2-2	1960 年智利地震引發海嘯資訊表.....	17
表 2-2-3	1960 年智利海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表.....	18
表 2-2-4	1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄.....	21
表 2-2-5	1964 年阿拉斯加地震引發海嘯資訊表.....	27
表 2-2-6	1964 年阿拉斯加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表.....	28
表 2-2-7	1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄.....	32
表 2-2-8	1952 年前蘇聯堪察加地震引發海嘯資訊表.....	40
表 2-2-9	1952 年前蘇聯堪察加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表.....	40
表 2-2-10	1952 年前蘇聯堪察加海嘯於太平洋地區波高紀錄.....	41
表 2-2-11	2010 年智利外海地震引發海嘯資訊表.....	47
表 2-2-12	2010 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄.....	49
表 2-3-1	太平洋海嘯警報中心海嘯警報內容種類.....	58
表 2-3-2	日本氣象廳海嘯預報分類表.....	60
表 2-3-3	台澎金馬沿海地區海嘯危險性分級表.....	61
表 4-2-1	近二百年間中國海域附近發生的歷史海嘯紀錄.....	89
表 4-3-1	2010 年智利海底斷層參數設定表.....	97
表 4-3-2	高雄海底斷層參數設定表.....	98
表 4-3-3	台南海底斷層參數設定表.....	99
表 5-1-1	太平洋地區水位比對測站資訊.....	110

圖目錄

圖 1-1-1	台灣及其鄰近地區之歷史地震分佈	2
圖 1-1-2	台灣明清歷史記載 1781 年及 1867 年海嘯分佈	3
圖 1-1-3	1986 年 11 月 15 日花蓮港內紀錄到的海嘯波形	4
圖 2-1-1	海底斷層引發海嘯示意圖	10
圖 2-1-2	海底地滑引發海嘯示意圖	10
圖 2-1-3	海面火山活動造成側腹滑落引發海嘯示意圖	10
圖 2-1-4	斷層的種類	12
圖 2-1-5	地震斷層海嘯隆起型模式圖	13
圖 2-1-6	地震斷層海嘯下降型模式圖	13
圖 2-1-7	海嘯的生成	13
圖 2-2-1	1960 年智利中部地震震央位置	17
圖 2-2-2	1960 年智利海嘯於夏威夷	19
圖 2-2-3	1960 年智利海嘯傳遞時序圖	20
圖 2-2-4	1960 年智利海嘯對 2 萬公里外的日本造成了破壞	20
圖 2-2-5	1964 年阿拉斯加威廉王子灣地震震央位置	27
圖 2-2-6	1964 年阿拉斯加海嘯淹沒 Valdez 地區鳥瞰圖	31
圖 2-2-7	1964 年阿拉斯加海嘯作用於木板刺穿卡車輪胎	31
圖 2-2-8	1964 年阿拉斯加海嘯於 Seward 地區造成破壞	31
圖 2-2-9	1964 年阿拉斯加海嘯傳遞時序圖	38
圖 2-2-10	1952 年前蘇聯堪察加地震震央位置	39
圖 2-2-11	1952 年前蘇聯堪察加海嘯傳遞時序圖	44
圖 2-2-12	1906 年厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震震央位置	45
圖 2-2-13	2010 年智利外海地震震央位置	47
圖 2-2-14	2010 年智利海嘯傳遞時序圖	48
圖 2-2-15	歷史智利地震規模及空間分布	53
圖 2-2-16	環太平洋地震帶分布圖	54
圖 2-3-1	太平洋海嘯測報系統	57
圖 2-3-2	中央氣象局近域海嘯發布作業流程圖	62

圖 2-3-3	美國奧勒崗州海岸中部小鎮上之海嘯災害逃生警告標誌.....	62
圖 3-1-1	斷層參數.....	67
圖 3-2-1	交錯的有限差分格點系統.....	69
圖 3-2-2	多重網格系統.....	72
圖 3-3-1	移動邊界處理之示意圖.....	74
圖 4-1-1	中央氣象局海嘯消息一.....	76
圖 4-1-2	中央氣象局海嘯消息二.....	76
圖 4-1-3	智利海嘯於太平洋地區振幅分布.....	77
圖 4-1-4	中央氣象局海嘯潮位監測系統東岸測站位置圖.....	77
圖 4-1-5	中央氣象局海嘯潮位監測系統東岸潮位站水位觀測圖.....	78
圖 4-1-6	中央氣象局海嘯潮位監測系統測站位置圖.....	79
圖 4-1-7	中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖.....	80
圖 4-1-8	2010 智利海嘯繞行台灣傳遞時序圖.....	86
圖 4-2-1	ETOPO5 太平洋地區大域網格.....	88
圖 4-2-2	台灣周圍水深地形.....	90
圖 4-2-3	高雄海嘯模擬計算 region 1 水深地形.....	91
圖 4-2-4	高雄海嘯模擬計算 region 2 水深地形.....	92
圖 4-2-5	高雄海嘯模擬計算 region 3 水深地形.....	92
圖 4-2-6	台南海嘯模擬計算 region 1 水深地形.....	93
圖 4-2-7	台南海嘯模擬計算 region 2 水深地形.....	94
圖 4-2-8	台南海嘯模擬計算 region 3 水深地形.....	94
圖 4-3-1	改變斷層參數 (D、d、W 及 L) 後之波形演變.....	96
圖 4-3-2	模式計算 2010 年智利地震震央座標位置.....	97
圖 4-3-3	模式計算高雄地震震央座標位置.....	98
圖 4-3-4	模式計算台南地震震央座標位置.....	99
圖 5-1-1	智利海嘯初始波形分布.....	101
圖 5-1-2	智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形.....	102
圖 5-1-3	智利海嘯於台灣地區傳遞分布情形.....	108
圖 5-1-4	NOAA 安置 DART II 深海雙向通訊海嘯警告浮台位置.....	110
圖 5-1-5	2010 年智利海嘯於太平洋地區水位濾波.....	111

圖 5-1-6	2010 智利地震實際觀測之海嘯振幅及位置圖	111
圖 5-1-7	2010 年智利海嘯於太平洋地區水位比對	112
圖 5-1-8	2010 年智利海嘯於蟬廣嘴測站水位比對	113
圖 5-2-1	高雄海嘯狀況一 (Mw 7.0) 3D 初始波形	116
圖 5-2-2	高雄海嘯狀況一 (Mw 7.0) 初始波形剖面	116
圖 5-2-3	高雄海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形	117
圖 5-2-4	高雄海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形	119
圖 5-2-5	高雄海嘯狀況一：溢淹分布情形	121
圖 5-2-6	高雄海嘯狀況二 (Mw 7.2) 3D 初始波形	124
圖 5-2-7	高雄海嘯狀況二 (Mw 7.2) 初始波形剖面	124
圖 5-2-8	高雄海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形	125
圖 5-2-9	高雄海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形	127
圖 5-2-10	高雄海嘯狀況二：溢淹分布情形	129
圖 5-3-1	台南海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形	132
圖 5-3-2	台南海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形	134
圖 5-3-3	台南海嘯狀況一：溢淹分布情形	136
圖 5-3-4	台南海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形	139
圖 5-3-5	台南海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形	141
圖 5-3-6	台南海嘯狀況二：溢淹分布情形	143

第一章 前言

1-1 研究背景

人類歷史上最早有紀錄海嘯，是於西元前 1000 年前發生在地中海 Creta 島的海嘯，由大約 1000 年之後的記載為當時 Helis 村整個沈沒在 Colint 灣下，所有住民均溺死。在這 1000 年間，大海嘯大約發生 10 次（徐，1981）。而台灣附近地區的海嘯，是以西元 1076 年（宋熙寧 9 年）10 月 31 日至 11 月 28 日間，發生在泉州地區的海嘯事件為最早，宋史五行志曾有敘述「熙寧九年十月海陽、潮陽二縣海潮溢，壞廬舍，溺居民。」。

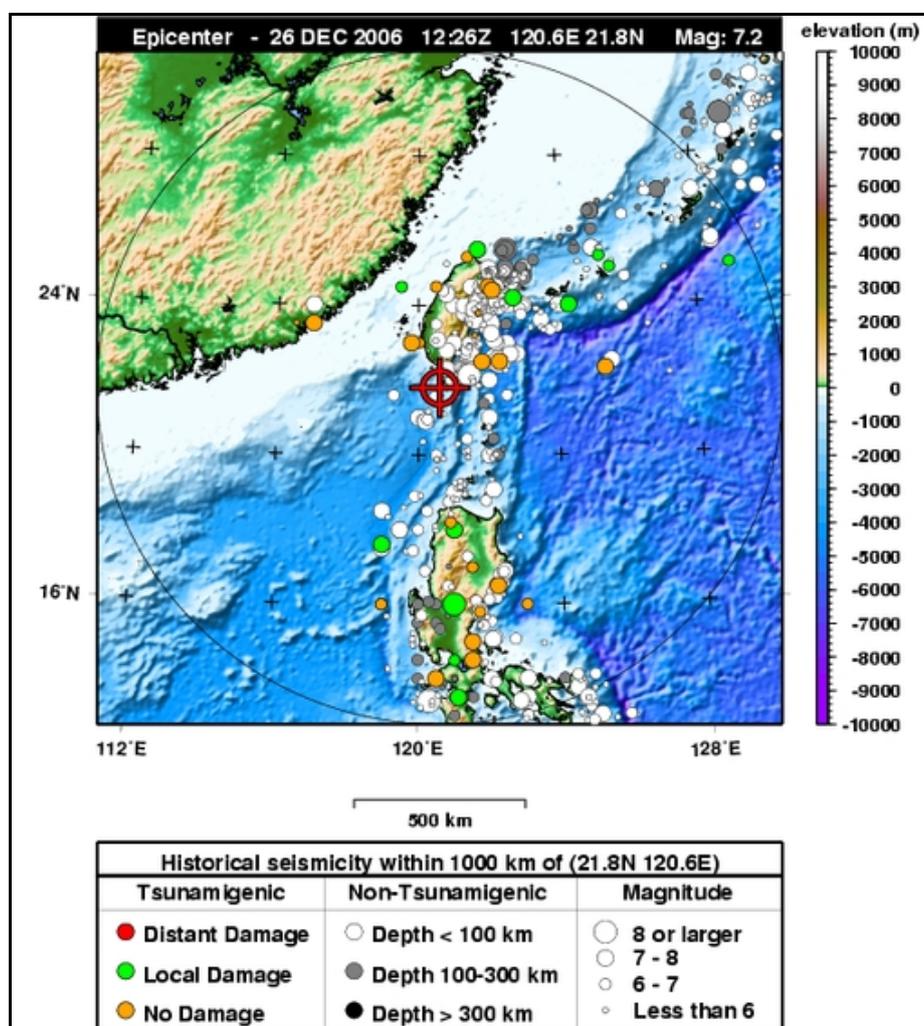
由現有的水位紀錄資料可知，1960 年的智利海嘯及 1964 年的阿拉斯加海嘯，在基隆及花蓮地區都受到海嘯的影響，智利海嘯也造成基隆市區田寮河橋墩被沖毀的損失（許及李，1996）。而源自於台灣附近海域的海嘯，對台灣沿岸地區的傷害是最直接且破壞能力最為強大。但令人憂心的是，雖然重大海嘯在未來威脅台灣的可能性相當高，然而目前一般國人甚至政府相關單位，對海嘯的特性及其對台灣地區可能造成的衝擊程度，以及對重大海嘯事件的因應處置等，都欠缺基本的認知與準備，台灣位處環太平洋地震帶，不僅地震頻繁，海嘯也經常發生（圖 1-1-1），歷史上部份海嘯事件對台灣所造成的傷害亦十分嚴重。

今（2010）年 2 月 27 日台灣時間 14 時 34 分 14 秒，智利外海發生規模 8.8 的地震，造成環太平洋地區生命及財產的損失，此重大地質活動在智利塔爾卡華諾觀測到 2.34 公尺高的海嘯，同時國際海嘯中心也發布海嘯警報，包含台灣在內的 52 個國家或地區都在海嘯警報的通報名單中。此次事件，中央氣象局海象中心事後分析所有沿海潮位站監測紀錄後，研判本次海嘯事件台灣地區測站於恆春/烏石/成功/花蓮潮位站觀測到較大的海嘯波高（0.66 公尺/0.52 公尺/0.46 公尺/0.38 公尺），均未達到發布海嘯報告的波高警戒值（1.0 公尺）。

雖然此次的海嘯事件並未對台灣造成重大的影響，但依據歷史記載，台灣曾於 1781 年（清乾隆 46 年）及 1867 年（清同治 6 年）分別在西南部的高屏地區及東北部的基隆地區發生嚴重的海嘯災害（圖 1-1-2）；近年來台灣所記錄到的最大海嘯波高為 1986 年 11 月 15 日發生於花蓮外海（121.85°E / 23.97°N）芮氏規模 6.8（圖 1-1-3），花蓮港內紀錄到海嘯波高接近 2 公尺（許，2005），因為東

部海岸陡峭，道路及陸上設施均高出海面甚多，並未造成重大災害，此等規模的海嘯如果發生在台灣西部海岸，海嘯溯上（run-up）高度可能達到 20 公尺左右，因此所造成的災害將極為慘重（張，2007），然而此部份也未引起國人的重視。

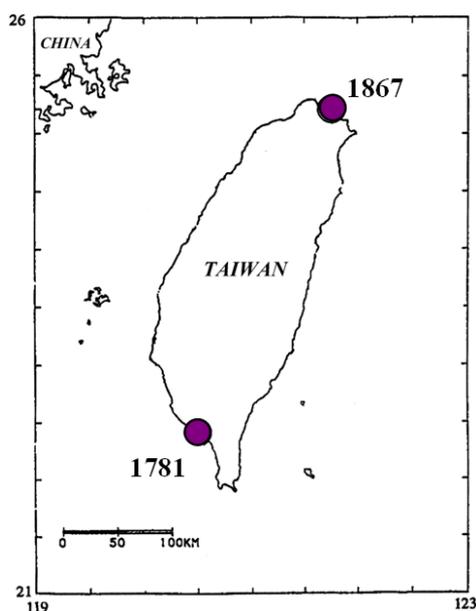
表 1-1-1（海嘯規模分級參考表 1-1-2）可看出在台灣西部沿岸海嘯發生機率相當高，顯示台灣地區早期的海嘯紀錄大多發生在台灣西部沿岸，但事實也可能並非如此，台灣發展史中，東部地區的開發最晚，即使有海嘯發生，也是鮮為人知的。因此，由調查東部海岸地區的沈積物資料，可進一步查証過去某些時間在東部地區是否曾經有重大海嘯發生，並可研判海嘯之規模及影響範圍（張，2007）。由上述可知台灣地區過去曾遭受破壞性海嘯的傷害，顯示著臺灣沿海確實有海嘯威脅的潛在可能。



資料來源：NOAA, 2010.

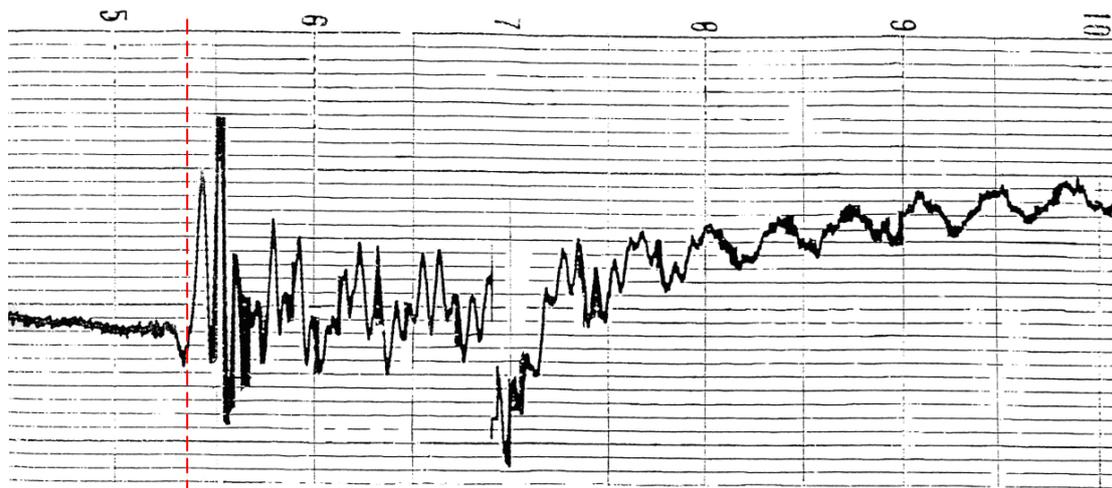
圖 1-1-1 台灣及其鄰近地區之歷史地震分佈

近數十年來全球重大海嘯事件有明顯增加的趨勢，台灣地區人口稠密，對海岸開發利用的需求程度甚高，在陸地近海岸處，一般住宅及各種親水遊憩設施隨處可見，並有許多大型工廠、電廠、石化廠等緊靠海濱設置，台灣地區在過去二百多年內，也遭受至少兩次重大海嘯災害的紀錄，如果有類似 1867 年基隆海嘯或 1781 年高雄海嘯再度發生，其後果將是不堪想像。中央大學地球物理系馬國鳳教授認為：「即使只多出幾分鐘，可以讓海邊的人跑到高處，或原來可能因此死亡的人減輕為只是受傷，建立預警系統也是值得的」(邱，2005)。中央氣象局為海嘯觀測與警報發布的政府主管單位，應對台灣周圍可能發生的海嘯特性有所瞭解，並規劃完整的海嘯預警機制，提昇海嘯觀測、分析、預警方面的作業能力，提供政府決策參考，在重大海嘯災害發生時，能降低海嘯帶來的災害。認識並瞭解台灣四周可能發生的海嘯，以及海嘯在近岸地區的變化特性，將有助於海嘯災害的預警及應變，以減少海嘯發生所產生的災害及損失。



圖片修改自：游明聖，1994。

圖 1-1-2 台灣明清歷史記載 1781 年及 1867 年海嘯分佈



花蓮外海地震發生於 1986 年 11 月 15 日台北時間上午 5:20

資料來源：交通部花蓮港務局。

圖 1-1-3 1986 年 11 月 15 日花蓮港內紀錄到的海嘯波形

表 1-1-1 台灣地區歷史疑似海嘯紀錄表

時間	可能震央	規模	災區	海嘯分級
1661 年 1 月 (永曆十四年十二月中)	台南	6.4	台南	0
1721/01/05 (康熙 59 年 12 月 8 日)	嘉義	6.0	台南	-1
	台南	6.5		
1781/04/24 至 6/21 (乾隆 46 年 4、5 月間)	遠震	6.4	高雄	2
			屏東	
1792/08/09 (乾隆 57 年 6 月 22 日)	雲林	6.75	台南	2
	嘉義	7.1		
1866/12/16 (同治 5 年 11 月 10 日)	遠震	6.4	高雄	0
1867/12/18 (同治 6 年 11 月 23 日)	基隆	6.0	基隆	2
		7.0		

資料來源：游明聖，1994。

表 1-1-2 海嘯規模分級表

規模	波高	說明
4	>30 公尺	被害區域達到沿岸 500 公里以上者
3	10-20 公尺	被害區域達到沿岸 400 公里以上者
2	4-6 公尺	可使部分房屋流失人畜溺死者
1	2 公尺左右	損害海濱的房屋帶走船舶的程度
0	1 公尺左右	可能造成小災患者
-1	<0.5 公尺	通常無災患者

資料來源：徐明同，1981。

為了讓國人及政府相關單位了解當越洋傳播海嘯發生時，可能造成的影響，所以本研究將蒐集歷史上太平洋地區地震所引發海嘯波高數據，以數值模式模擬 2010 年太平洋襲擊台灣之智利海嘯事件，瞭解在環太平洋沿岸各地傳播時間與波形分布的變化特性，並比較環太平洋國家建議之預警作業程序，提供海嘯預警機制作業程序，將有助於海嘯災害的預警及應變。除了執行遠域海嘯模式外，另外針對台灣近域地區若發生海嘯事件，臨海都會區高雄市及台南市受海嘯攻擊可能造成的影響進行模擬，模式的成果將可應用於規劃台灣各地海嘯溢淹地圖，以減少海嘯發生所造成的傷亡及損失。

1-2 工作項目及內容

中央氣象局 99 年度委託研究計畫

計畫名稱：2010 年智利海嘯經太平洋侵襲台灣事件分析研究

表 1-2-1 交付項目與驗收標準

交付項目	完成日期	驗收標準
蒐集過去海嘯事件並分析 2010 年智利海嘯事件在環太平洋的演變狀況。	99/11/30	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供歷史上太平洋地區地震所引發海嘯波高數據。 2. 模擬 2010 年智利地震所引發之海嘯波在環太平洋沿岸各地傳播與分布情況，並將模擬結果製成動畫檔或是影片檔繳交驗收。
整理並分析台灣所有觀測到海嘯紀錄的特性，深入探究源自不同地區海嘯在台灣周圍的變化與分佈特性並講授本項研究成果。	99/11/30	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分析本次海嘯波與台灣不同地區海水位變化關係。 2. 講授本項研究成果，講授時間至少 4 小時。
研議未來與國際海嘯組織進行交流與合作的方式。依據已建立的海嘯模式進行細部的海嘯溢淹模擬，並規劃符合台灣海洋環境的海嘯預警機制與作業程序。	99/11/30	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供未來與國際海嘯組織進行交流與合作的方式建議。 2. 台灣各地海嘯溢淹模擬，需包含各測站不同等級(公尺)之海水位高度相對可能發生溢淹地區之地圖。 3. 提供海嘯預警機制作業程序，內容須包含比較環太平洋國家建議之預警作業程序。

1-3 執行期程

「2010 年智利海嘯經太平洋侵襲台灣事件分析研究」計畫預定期程自 99 年 6 月起至 99 年 11 月止，為期 6 個月，預定工作項目及期程如表 1-3-1。

表 1-3-1 預定工作進度表

預定工作進度								
工作內容項目	年別		99					
	月份		6	7	8	9	10	11
	月次		1	2	3	4	5	6
1. 海嘯成因及現象論述、提供歷史上太平洋地區地震所引發海嘯波高數據。	○	○	○	○				
2. 模擬 2010 年智利地震所引發之海嘯波在環太平洋沿岸各地傳播與分布情況，並將模擬結果製成動畫檔。	●	●	●	●	○	○	○	○
3. 分析 2010 年智利地震海嘯波與台灣不同地區海水位變化關係。							○	○
4. 講授本項研究成果，講授時間至少 4 小時。							●	●
5. 提供未來與國際海嘯組織進行交流與合作的方式建議。								○
6. 建置高雄地區海嘯溢淹模擬，不同等級（公尺）之海水位高度相對可能發生溢淹地區之地圖。	○	○	○	○	○	○	○	○
7. 提供海嘯預警機制作業程序，比較環太平洋國家建議之預警作業程序。	●	●	●	●	●	●	●	○
8. 期中簡報及撰寫期末報告。							○	○
							●	●

預定進度：○ 實際進度：●

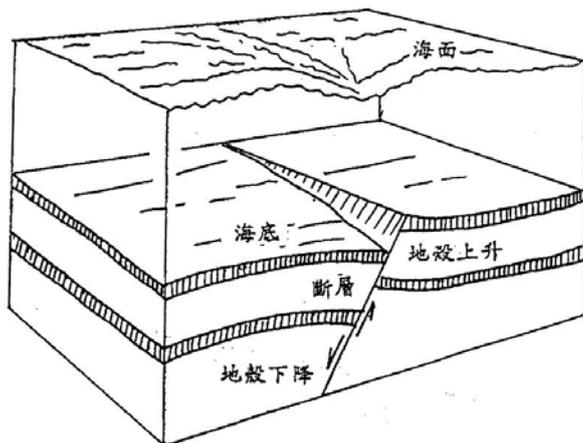
第二章 海嘯特性及預警

2-1 海嘯成因及特性

海嘯主要是由強烈的地質活動 (geologic activities) 造成，包括海底斷層 (submarine faulting)(圖 2-1-1)、海面或海下地滑(submarine landslide)(圖 2-1-2) 及海面或海下火山活動 (volcanic eruption) (圖 2-1-3) 等三種主要成因 (Dudley & Lee, 1988)，但大流星撞擊海洋或人為的高能量海中釋放 (例如核子試爆) 等也可能造成海嘯。這些地質活動有些時候會造成局部地區海水位發生變動，引起較長週期波浪，即稱為海嘯 (tsunami)；日本人稱海嘯為「津波」，意思是湧向港內的大浪 (harbor wave)。破壞性的地震海嘯，只在地震構造運動出現垂直斷層，震源深度小於 20 至 50 公里，且芮氏震級大於 7.5 的條件下才會發生(Kaitoku, 2005)。

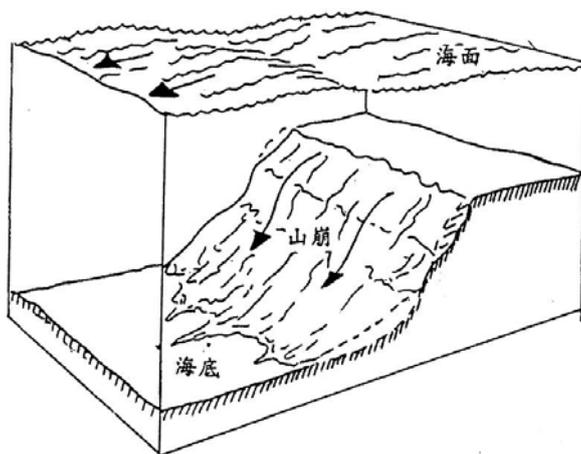
海嘯還有另一不同的名稱，如『seismic sea waves』，其中 seismic 指因地震而引起的，也間接說明了大多數海嘯的成因為地震。海嘯波的週期約介於 15 至 30 分鐘，週期長的甚至可達到 1 小時，波長一般可達到 150 公里以上，在大洋中振幅可能僅幾十公分，此也表示海嘯的斜率是相當平緩的，即使在海面上的船隻也難以察覺海嘯波的經過，當海底平均深度越大時，波浪傳遞的速度加快，此巨大能量在深海區域的海面時速可達數百公里。

一般而言，強烈的地質活動常伴隨地震 (earthquake) 發生，許多學者也試著建立地震規模和海嘯間的關係，但由於地震並不是造成海嘯的直接原因，而是與海嘯共存的一個現象 (張等，2000)。意味著並非所有的海底地震都能引發海嘯，海嘯的形成與震源位置以及地震能量的特性有關。



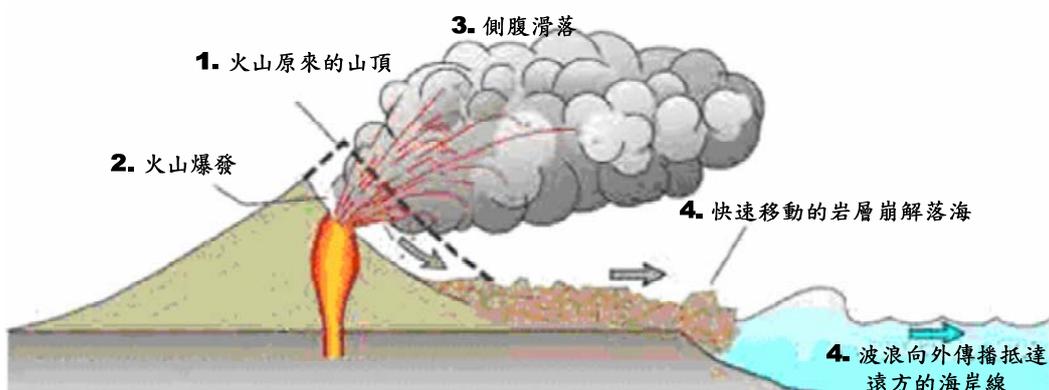
圖片來源：徐明同，1981。

圖 2-1-1 海底斷層引發海嘯示意圖



圖片來源：徐明同，1981。

圖 2-1-2 海底地滑引發海嘯示意圖



圖片修改自：TeachEngineering，2006。

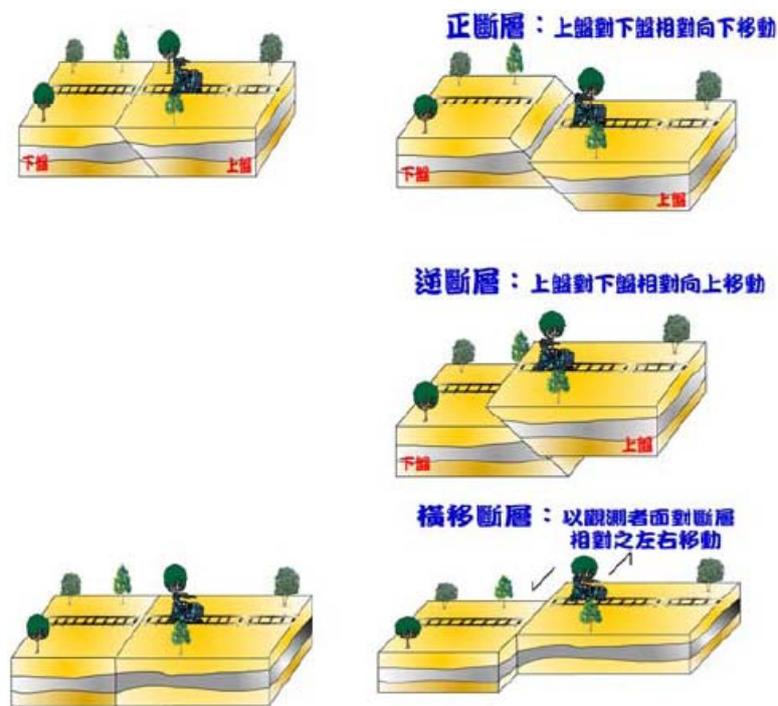
圖 2-1-3 海面火山活動造成側腹滑落引發海嘯示意圖

依震源深度，可以把地震分為淺層（深度 0~70 公里）、中層（深度 70~300 公里）、深層（深度超過 300 公里）三種（中央氣象局，2005），最常引發海嘯的震源為海底的淺層地震。且斷層大多發生在板塊邊界處，依照板塊之間相互移動的方式，斷層又可分為平移型、發散型和聚合型三種。發散型斷層是上盤向下滑移（下沉），又稱正斷層，聚合型斷層是上盤向上滑移（抬升），又稱為逆斷層（或稱逆衝斷層），可能引發海嘯的海底斷層大多是聚合型的逆斷層，只有少數是正斷層（孫，2005），正斷層和逆斷層都會造成地表的垂直位移（圖 2-1-4）。如果海底斷層為單純的平移型，僅限於水平方向的破壞，不涉及重力加速度，即無法引發海嘯。如果正斷層以造成水平面陷落為主，由正斷層所引發的海嘯大多是波谷先抵達岸邊造成海水的退去，海底顯露，然後才是波峰攻擊上岸。而逆斷層則相反，是波峰先抵達岸邊造成海水的湧漲。根據歷史資料顯示，逆斷層比較容易產生較強烈的地震以及地殼垂直運動，所以逆斷層引發大海嘯的機率高於正斷層。

若海底淺層地震造成斷層兩側的板塊產生垂直方向的相對位移，則覆蓋的海水也會跟著產生垂直方向的相對位移，海水原本的平衡狀態被破壞，抬升板塊上方的海水變得比較高，位能變得比較高，於是向位能低的下沈板塊方向流動（孫，2005）。也就是說，當一部份的海床突然向上推出（圖 2-1-5）造成在震源附近海平面的抬昇，或斷層向下墜落，在陷落的過程中，會將海水面向下拉扯（圖 2-1-6），造成了海面上大量海水離開了原有的平衡位置，而重力作用傾向於維持平衡，位能轉變成動能，向四面八方傳播，即產生海嘯活動。就是由於海水面有擾動，不同的水位高度就會產生壓力差，而這壓力差就會使海嘯波往四周傳播，傳播最主要的驅動力為重力，所以海嘯波也為一重力波。海底斷層的發生是造成海嘯最主要的原因之一，而將其稱為海嘯地震（tsunamigenic earthquake），通常此種海嘯具有的能量最大。通常海底斷層產生海嘯的頻率約數年至數十年，且能穿越大洋的海嘯幾乎都是由海底斷層所引發的。

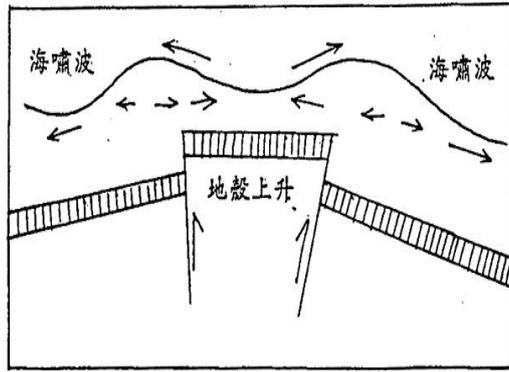
當海嘯由外海進入淺海地區後，因水深迅速變淺，使得海嘯的特性產生了極大的變化。由於近岸地區大致具有較緩的坡度（通常小於 1:200~1:500），由於海嘯的波長在深海中可達數百公里，所以在傳遞的過程中，能量衰減並不明顯。同時海嘯前進速度隨水深而比例增加，海深愈深時海嘯傳播速度愈快。可想

像當海嘯接近海岸地區使得波速變慢，波長變短，振幅加大，其前緣又因水深減少，但其後方水深仍相當深，故仍以較高速前進，因此，若海岸地區海底平緩，導致水團溯上十數公尺至數十公尺，後浪覆蓋前浪造成浪高加大，如圖 2-1-7，當海嘯在海洋中生成後即向四方傳遞，由於波長長達數百公里，在開闊海面上並不容易以肉眼觀察到海嘯（張，2007）。因此在深海中波高未達 1 公尺的海嘯，在到達近岸地區受地形「淺化」之影響，其波高可輕易的高達 10 公尺以上，危害沿海地帶（張，2000），1993 年日本北海道奧尻地區發生海嘯的浪高即達 31 公尺（陳，2005a）。



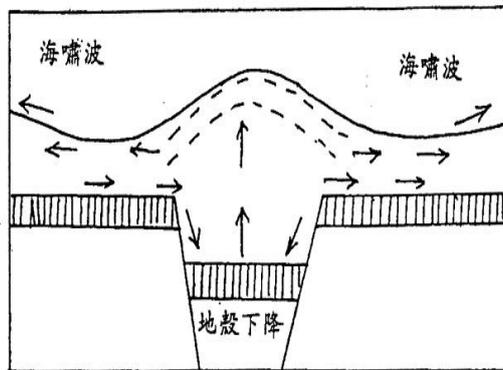
圖片來源：中央氣象局，2005。

圖 2-1-4 斷層の種類



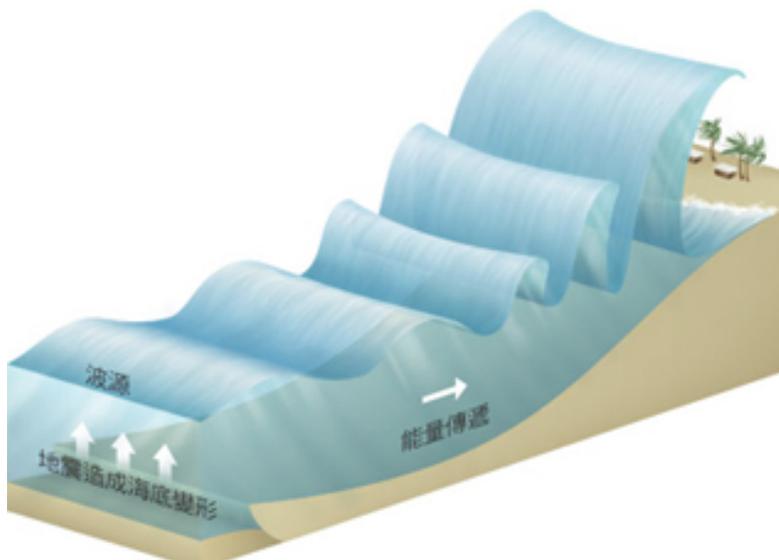
圖片來源：李起彤，1991。

圖 2-1-5 地震斷層海嘯隆起型模式圖



圖片來源：李起彤，1991。

圖 2-1-6 地震斷層海嘯下降型模式圖



圖片來源：邱淑慧，2005。

圖 2-1-7 海嘯的生成

淺水波意指水深 (h) 與波長 (L) 的比值小於 1/20，也就是長波，而深水波 (deep water wave) 的比值 $h/L > 1/2$ 。根據數值計算與衛星觀測，以 2004 年南亞海嘯為例，海嘯的波長大約為 400~500 公里，而印度洋的平均水深大約 4~5 公里深。波長大約是水深的 100 倍，波長遠大於水深，水深相對波長很淺，所以海嘯雖然處在深水域，仍是標準的淺水波 (吳, 2007)。淺水波傳播速度如下式，等於重力加速度常數乘以水深後的開平方根值。以太平洋為例，平均海水深度約 4,000 公尺，海嘯前進速度大約可達 200 m/s，換言之，其速度為每小時超過 700 公里，相當於噴射機的飛行速度 (張, 2007)。

$$C = \sqrt{gh} \quad (2-1)$$

其中 C 為傳播速度

h 為平均海水深度

g 為重力加速度常數 (9.81 m/s²)

海嘯波與暴風波浪 (storm wave) 類似，在海岬 (head land) 附近會產生較大的波高，且在近岸的海灣 (bay) 地形處，海嘯波浪仍然很大 (此異於暴風波浪)。因具有較長的波長，海嘯波和潮汐相似，在漏斗形狀的海岸地形處會大幅增高波浪的高度，由實際發生的海嘯紀錄來看，許多極大的波浪都發生在此類海灣處。然而具有垂直波形結構的海嘯並不經常發生，大部份海嘯的波形都相當平緩，但在某些情況下，仍會有近乎垂直的波形出現，此類似於潮汐在河口附近產生的潮波 (tidal bore) 現象。中國自古名聞千里的錢塘江，即具有高達 4.5 公尺的潮波，當潮波發生時，洶湧的海水以近乎直立水牆般迅速的湧入海寧附近，潮波的移動速度可達 10 knots 相當於 18.5 km/hr，潮波後方伴隨的水位略低，但仍保持相當高的水位。因此 1960 年的智利大海嘯以及 1964 年發生在阿拉斯加的海嘯，在夏威夷的 Hilo 海灣，都受到近乎直立牆海嘯的攻擊，造成了極大的人命及財產損失 (Dudley & Lee, 1988)。

一般人認為當海嘯來臨之前，岸邊的海水會被先倒吸至外海，而事實上，第一個到達岸邊的海嘯波浪可能造成水位上升 (若是波峰先到達) 或下降 (若是波谷先到達)。另外，海嘯在距離很近的兩點之波高可能相差甚多，除了取決於海嘯釋放能量、斷層之幾何特徵、海底斷層大小外，另一主因是海嘯波接近海岸

時的海岸線形狀、海底地形與來襲方向而有所差異，由於日本為島國，裡海、周邊島嶼多，且海岸彎曲又是位在環太平洋地震帶上，一但發生越洋傳播海嘯或近岸淺層地震，極易引發造成海嘯災害。通常海底深度向陸地急遽遞減的地方，此類型海岸的海嘯高度會急速增加。尤其在 U 字型或 V 字型（漏斗型）港灣最為明顯，進入的水流速度會加大，海嘯能量集中累積甚大的浪高。海灣與內海可能與海嘯產生共振而造成海嘯波高放大的效應。像是 1867 年的基隆海嘯，由基隆東北方的海底地震所引起，當時基隆尚未建港，海域是漏斗形的海灣，海嘯進入海灣後，能量容易集中，使水位大幅提高而推升至陸上，捲走居民數百，市街全毀，重創基隆（黃，2005）。相反的，台灣東部面臨太平洋，海岸線平直而單調，海水又深，故雖有海嘯來襲過，但波高較低，自有地震實測以來，目前尚無重大海嘯災害紀錄（徐，1981）。

2-2 歷史太平洋地區海嘯

依據美國地質調查所 (U.S. Geological Survey, USGS) 之全球地震報告指出，1900 年以來有感地震規模排名如表 2-2-1，第 1 至第 5 地震規模分別為 1960 年智利地震規模 9.5、1964 年阿拉斯加海嘯規模 9.2、2004 年蘇門答臘地震規模 9.1、1952 年前蘇聯堪察加地震規模 9.0，1906 年厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震及 2010 智利地震規模 8.8 並列第 5，由此可見太平洋地質活動引發海嘯事件頻繁，本章節蒐集上述地震引發海嘯事件，探討太平洋地區各歷史事件的海嘯波高及其引發危害。

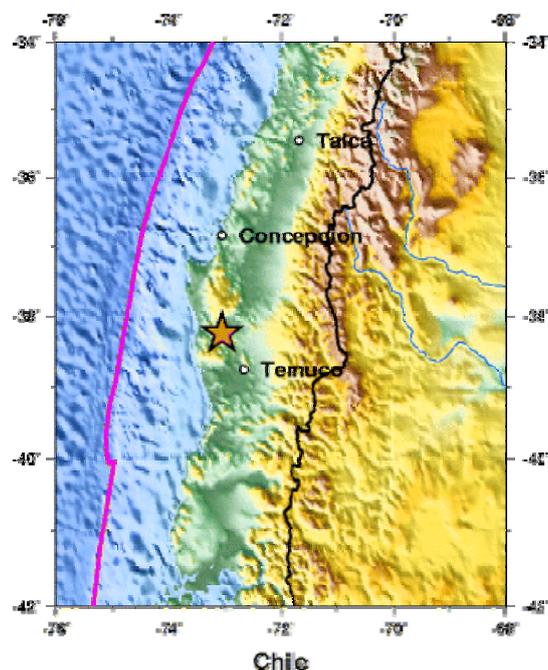
表 2-2-1 1900 年以來有感地震規模排名

Rank	Location	Date UTC	Magnitude	Lat.	Long.
1.	Chile	1960 05 22	9.5	-38.29	-73.05
2.	Prince William Sound, Alaska	1964 03 28	9.2	61.02	-147.65
3.	Off the West Coast of Northern Sumatra	2004 12 26	9.1	3.30	95.78
4.	Kamchatka	1952 11 04	9.0	52.76	160.06
5.	Offshore Maule, Chile	2010 02 27	8.8	-35.846	-72.719
6.	Off the Coast of Ecuador	1906 01 31	8.8	1.0	-81.5
7.	Rat Islands, Alaska	1965 02 04	8.7	51.21	178.50
8.	Northern Sumatra, Indonesia	2005 03 28	8.6	2.08	97.01
9.	Assam - Tibet	1950 08 15	8.6	28.5	96.5
10.	Andreanof Islands, Alaska	1957 03 09	8.6	51.56	-175.39
11.	Southern Sumatra, Indonesia	2007 09 12	8.5	-4.438	101.367
12.	Banda Sea, Indonesia	1938 02 01	8.5	-5.05	131.62
13.	Kamchatka	1923 02 03	8.5	54.0	161.0
14.	Chile-Argentina Border	1922 11 11	8.5	-28.55	-70.50
15.	Kuril Islands	1963 10 13	8.5	44.9	149.6
Updated 2010 March 29					

資料來源：USGS，2010。

2-2-1 1960 年智利地震

1960 年智利地震規模 9.5，震央於智利中部外海（圖 2-2-1），地震引發海嘯資訊如表 2-2-2，地震破裂面長度估計約 1000 km，範圍由萊布（Lebu）到艾森港（Puerto Aisen），地震對瓦爾迪維亞-蒙特港地區（Valdivia-Puerto Montt area）造成嚴重災害，但大部份的傷亡跟損失是由於大海嘯造成的，估計在智利有 1,600 人命喪於地震及海嘯災禍中，沿美洲西部海岸阿拉斯加、哥倫比亞省、華盛頓州、奧勒崗州及加州海岸造成災情，海嘯波高及災害紀錄如表 2-2-3，位於加州北端的濱海小城 Crescent City（新月市），波高雖只有 1.7 m，但也造成了數艘船隻損壞、碼頭受損及市區街道淹水，海嘯越洋傳播到達日本、夏威夷和菲律賓造成多人罹難。



圖片來源：USGS，2010。

圖 2-2-1 1960 年智利中部地震震央位置

表 2-2-2 1960 年智利地震引發海嘯資訊表

Date (UTC)	Time (UTC)	Source Location	Magnitude	Source Type
May 22, 1960	19:11:17	39.5S 74.5W	9.5 Mw	Earthquake

資料來源：NOAA，2010。

表 2-2-3 1960 年智利海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表

Location	Amplitude (m)	Damage Summary
Cape Pole, AK	1.0	Log boom broken by currents
MacLeod Harbor, Montague I., AK	2.3	Minor damage to pilings.
Seaside, OR	1.5	Boats and boat landings damaged.
Crescent City, CA	1.7	Several boats damaged. City streets flooded. Dock damaged.
San Francisco Bay Area CA	0.4 at Fort Point	Boat damage at San Rafael, ferry service disrupted.
Princeton, CA	2.2	Two trawlers damaged, many smaller craft damaged.
Pismo Beach, CA	2.4	Beach hut moved.
Santa Barbara, CA	1.4	Damage to moorings and boats.
Port Hueneme, CA	1.3	Some damage to harbor facilities.
Los Angeles, CA	0.9	One man drowned while scuba diving. Major damage to small craft. \$1M damage.
San Diego, CA	0.7	Docks near Point Loma destroyed. Barge broke in half. Extensive damage to docks throughout the harbor due to currents estimated at 20-25 knots. Damage continued through May 24.

資料來源：NOAA，2010。

太平洋地區波高紀錄整理如下（表 2-2-4）：

1. 海嘯侵襲了智利沿岸的萊布到艾森港及太平洋的其他地區，智利南方海岸的玻多沙維達市（Puerto Saavedra）被海嘯波完全摧毀，波高達到 11.5 m (38 ft)，溢淹內陸距離為 3 km (2 mi)，在科拉爾（Corral）也造成相當大的傷害，波高為 8 m (26 ft)，奇洛島（Chiloe Island）東部波高達到 5.0 至 7.4 m (USGS，2010)。
2. 海嘯波傳遞至夏威夷造成 61 人罹難，尤其是在希洛島（Hilo）最大海嘯湖上高度為 10.6 m (35 ft)（圖 2-2-2）。
3. 地震後 22 小時海嘯越過太平洋（圖 2-2-3），侵襲日本北海道東南沿岸及三陸

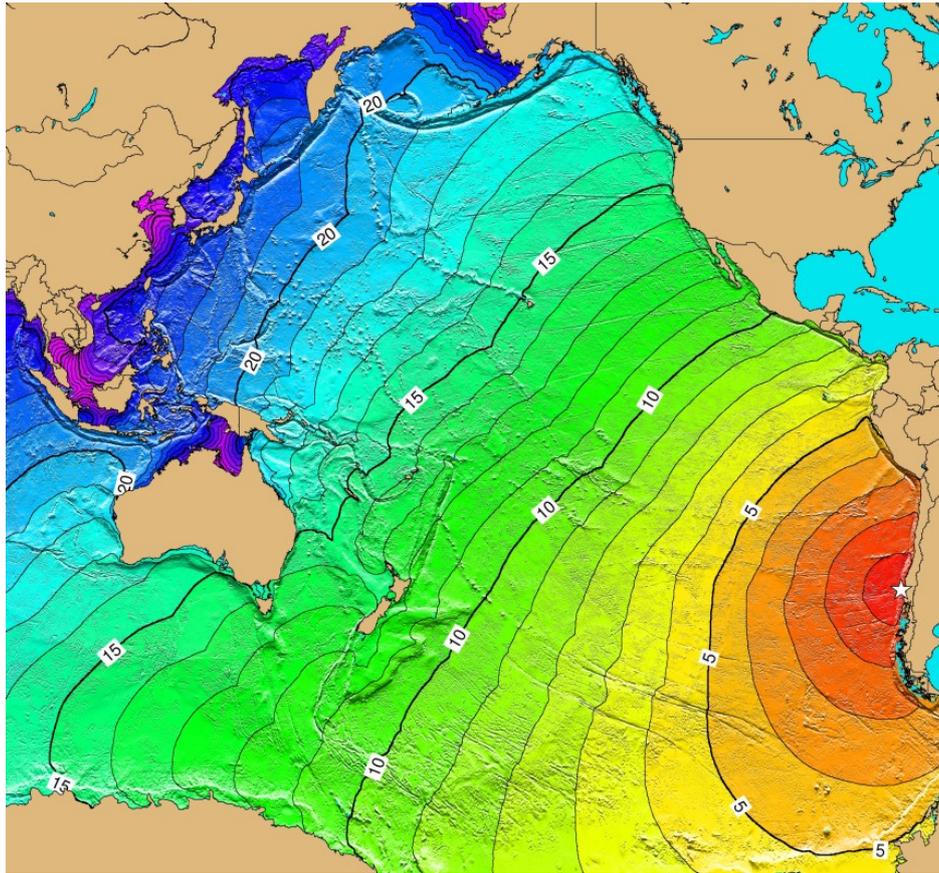
沿岸（圖 2-2-4），本州北部最大波高 6 m，計 185 人死亡或失蹤，摧毀 1,600 棟房屋。

4. 海嘯侵襲菲律賓群島後，造成 32 人死亡或失蹤。
5. 海嘯破壞也在復活節島（Easter Island）、薩摩亞群島（Samoa Islands）及加州（California）造成傷害。
6. 海嘯傳遞經歷 24.9 至 27.4 小時抵達台灣沿岸（表 2-2-4），在台灣的波高僅 0.1 至 1.1 公尺。許及李（1996）指出於花蓮波高達到 0.66 公尺，且造成基隆市田寮河橋墩被沖毀，其他地區無顯著災情傳出。



圖片來源：Sunset Newspaper。

圖 2-2-2 1960 年智利海嘯於夏威夷 hilo 海岸造成破壞



單位：小時

圖片來源：USGS，2010。

圖 2-2-3 1960 年智利海嘯傳遞時序圖



圖片來源：新華網新聞中心，2004。

圖 2-2-4 1960 年智利海嘯對 2 萬公里外的日本造成了破壞

表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
CORRAL	CHILE	39.86S	73.42W	10		
GUAFO	CHILE	43.58S	74.83W	10		
LEBU	CHILE	37.63S	73.72W	(4.0) 5.0		
ARAUCO	CHILE	37.25S	73.32W	OBS.		
MOCHA I.	CHILE	38.22N	74.00W	25		
PUNTA CONSTITUCION	CHILE	35.33S	72.42W	2.5		
AYSSEN PROV.	CHILE	0.00N	0.00E	3		
ISLA MOCHA	CHILE	38.33S	73.90W	25		
PUNTA TIRNA (TIRERA)	CHILE	38.33S	73.52W	5		
PUERTO AISEN	CHILE	45.40S	72.70W	3		
CONSTITUCION	CHILE	35.33S	72.42W	2.5		
VALDIVIA	CHILE	39.80S	73.24W	10		
MANSA RIVER	CHILE	40.55S	73.76W	8.5		
PUNTA SAAVEDRA	CHILE	38.78S	73.40W	9		
CHILOE ISLAND	CHILE	42.50S	73.92W	10		
TOME	CHILE	36.63S	72.95W	2.5		
ANCUD	CHILE	41.91S	72.76W	(8.0) 12.0		
CORONEL	CHILE	36.98S	73.17W	2		
MEHUIN	CHILE	39.43S	73.22W	15		
COQUIMBO	CHILE	29.93S	71.33W	2.2	22 20 35	1 24
VALPARAISO	CHILE	33.03S	71.63W	1.7	22 16 30	1 4
ARICA	CHILE	18.47S	70.32W	2.2	22 22 38	3 27
PUNTA ARENAS	CHILE	53.17S	70.93W	0.4	22 23 15	4 4
CALDERA	CHILE	27.08S	70.68W	2.9	22 21 14	2 3
TALCAHUANO	CHILE	36.67S	73.17W	5	22 20 5	0 54
ANTOFAGASTA	CHILE	23.65S	70.42W	1.5	22 21 40	2 29
CALLAO	PERU	12.08S	77.13W	1.1	22 23 45	4 34
SAN JUAN	PERU	15.36S	75.12W	0.5	22 22 40	3 29
MATARANI	PERU	17.00S	72.12W	0.6	22 22 36	3 25
TALARA	PERU	4.58S	81.42W	0.6	23 0 34	5 23
CHIMBOTE	PERU	9.07S	78.60W	1.7	23 0 38	5 27
LA LIBERTAD	ECUADOR	2.20S	80.92W	1.9	23 1 20	6 9
	EASTER I.	27.15S	109.45W	6		
SAN CRISTOBAL	GALAPAGOS IS.	0.90S	89.62W	0.6		
CAPE KUMAKAHI, HAWAII	HAWAII	19.52N	154.81W	0.9		
POHOIKI, HAWAII	HAWAII	19.45N	154.85W	1.8		
OPHIKAO, HAWAII	HAWAII	19.43N	154.90W	1.8		
KAIMU, HAWAII	HAWAII	19.37N	154.97W	4		

表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
KALAPANA, HAWAII	HAWAII	19.35N	154.98W	2.1		
KEAAU, HAWAII	HAWAII	19.60N	154.98W	3.7		
HILO, HAWAII	HAWAII	19.73N	155.06W	10.7	23 9 58	14 47
PAPAIKOU, HAWAII	HAWAII	19.75N	155.10W	2.7		
PEPEEKEO, HAWAII	HAWAII	19.83N	155.10W	1.5		
HONOMU, HAWAII	HAWAII	19.85N	155.10W	3.7		
HAKALAU, HAWAII	HAWAII	19.90N	155.13W	2.7		
ONOMEA, HAWAII	HAWAII	19.80N	155.13W	3.4		
HALAPE, HAWAII	HAWAII	19.27N	155.25W	1.5		
LAUPAHOEHOE, HAWAII	HAWAII	20.00N	155.25W	2.1		
HONOKAA, HAWAII	HAWAII	20.07N	155.45W	1.8		
PUNALUU BAY, HAWAII	HAWAII	19.13N	155.50W	3.4		
HONUAPPO, HAWAII	HAWAII	19.10N	155.55W	5.2		
WAIPIO V., HAWAII	HAWAII	20.13N	155.60W	2.4		
KAALUALU, HAWAII	HAWAII	18.97N	155.62W	5.2		
SOUTH POINT, HAWAII	HAWAII	18.92N	155.68W	3.7		
POLOLU V., HAWAII	HAWAII	20.21N	155.73W	3.4		
KAWAIHAE, HAWAII	HAWAII	20.04N	155.83W	2.7		
UPOLU PT., HAWAII	HAWAII	20.27N	155.87W	2.1		
HOOKENA, HAWAII	HAWAII	19.38N	155.90W	2.1		
MILOLI, HAWAII	HAWAII	19.19N	155.91W	0.9		
MAHUKONA, HAWAII	HAWAII	20.18N	155.92W	1.2		
HONAUNAU, HAWAII	HAWAII	19.42N	155.92W	1.5		
NAPOOPOO, HAWAII	HAWAII	19.48N	155.92W	4.9		
KAHALUU, HAWAII	HAWAII	19.58N	155.97W	3		
KEAUHOU, HAWAII	HAWAII	19.57N	155.97W	3.7		
KAILUA, HAWAII	HAWAII	19.63N	155.98W	2.4		
LOWER PAIA, MAUI	HAWAII	20.92N	156.38W	3.7		
SPRECKLESVILLE, MAUI	HAWAII	20.91N	156.42W	3.4		
KIHEI, MAUI	HAWAII	20.79N	156.47W	2.4		
KAHULUI, MAUI	HAWAII	20.90N	156.47W	3.4	23 10 18	15 7
PAUKUKALO, MAUI	HAWAII	20.91N	156.48W	4.6		
LAHAINA, MAUI	HAWAII	20.87N	156.67W	2.1		
MOKUOLOE OAHU	HAWAII	21.44N	157.79W	0.3	23 10 40	15 29
HONOLULU, OAHU	HAWAII	21.31N	157.87W	0.8	23 10 33	15 22
WAILUA, KAUAI	HAWAII	22.06N	159.34W	1.5		
NAWILIWILI, KAUAI	HAWAII	21.96N	159.36W	1.5	23 10 40	15 29
ANINI, KAUAI	HAWAII	22.23N	159.47W	0.6		

表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
WAHIAWA BAY, KAUAI	HAWAII	22.05N	159.55W	4.3		
HAENA, KAUAI	HAWAII	22.22N	159.55W	4.1		
KAUMAKANI, KAUAI	HAWAII	21.93N	159.63W	2.7		
PAKALA, KAUAI	HAWAII	21.93N	159.65W	3.2		
KEKAHA, KAUAI	HAWAII	21.97N	159.72W	3		
ANEOWEONUI, KAUAI	HAWAII	0.00N	0.00E	3.3		
JOHNSTON I.	HAWAII	16.69N	169.53W	0.5	23 11 30	16 19
MIDWAY I.	HAWAII	28.21N	177.36W	0.6	23 13 30	18 19
PITCAIRN I.	TUAMOTU	25.07S	130.10W	12.2		
CHRISTMAS I.	LINE IS.	1.98N	157.48W	0.3	23 9 3	13 52
TUTUILA	SAMOA	14.30S	170.70W	4.9		
UPOLU	SAMOA	13.92S	171.75W	4.9		
APIA	SAMOA	13.81S	171.75W	(1.5) 4.9		
PAGO PAGO	SAMOA	14.28S	170.68W	2.4	23 7 33	12 22
FAGA'ALU	SAMOA	14.30S	170.68W	0.8		
CANTON I.	PHOENIX IS.	2.82S	171.72W	0.1	23 9 24	14 13
SUVA	FIJI	18.13S	178.42E	0.5	23 8 30	13 19
ENIWETOK	MARSHALL IS.	11.37N	162.35E	0.2	23 13 3	17 52
KWAJALEIN	MARSHALL IS.	8.74N	167.74E	0.4	23 13 20	18 9
	WAKE I.	19.29N	166.63E	0.5	23 13 33	18 22
MOEN I.	CAROLINE IS.	7.45S	151.85E	0.1	23 14 36	19 25
LYTTELTON	NEW ZEALAND	43.62S	172.72E	0.4	23 8 12	13 1
WELLINGTON	NEW ZEALAND	41.28S	174.78E	0.9	23 7 45	12 34
TAYLORS POINT	NEW ZEALAND	45.78S	170.67E	0.6	23 7 40	12 29
PORT CHALMERS	NEW ZEALAND	45.82S	170.65E	0.4	23 7 50	12 39
TAURANGA	NEW ZEALAND	37.70S	176.18E	0.9	23 8 23	13 12
DUNEDIN	NEW ZEALAND	45.88S	170.55E	0.4	23 8 35	13 24
TOWNSVILLE, QUEENSLAND	AUSTRALIA	17.30S	146.81E	0.3	23 16 5	20 54
CAIRNS	AUSTRALIA	16.92S	145.78E	0.03	23 15 0	19 49
NORFOLK I.	AUSTRALIA	29.07S	167.95E	0.2	23 9 0	13 49
HOBART	AUSTRALIA	42.88S	147.33E	0.3	23 12 0	16 49
FREMANTLE	AUSTRALIA	32.11S	115.75E	0.3		
URANGAN JETTY,QUEENSLAND	AUSTRALIA	25.28S	152.97E	0.2		
BRISBANE	AUSTRALIA	27.45S	153.07E	0.2		
PT. MACDONNELL	AUSTRALIA	38.07S	140.70E	0.2		
LORD HOWE I.	AUSTRALIA	31.53S	159.07E	0.7	23 10 45	15 34
ILUKA	AUSTRALIA	29.42S	153.37E	0.6	23 12 33	17 22
BALLINA	AUSTRALIA	28.87S	153.58E	0.1	23 12 5	16 54

表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
NEWCASTLE	AUSTRALIA	32.93S	151.78E	0.2	23 12 0	16 49
EDEN	AUSTRALIA	37.05S	149.97E	1.7	23 12 10	16 59
APIA HARBOR	MARIANA IS.	13.43N	144.65E	0.4		
GUAM	MARIANA IS.	13.44N	144.65E	0.2	23 16 40	21 29
TACLOBAN	PHILIPPINES	11.25N	125.00E	0.2	23 21 12	26 1
LEGASPI	PHILIPPINES	13.15N	123.75E	0.2	23 19 20	24 9
HONDAGUA	PHILIPPINES	13.95N	122.23E	0.2	23 21 15	26 4
HWA-LIAN	TAIWAN	23.97N	121.62E	0.2	23 19 20	24 9
KEE LUNG	TAIWAN	25.15N	121.75E	1.1	23 20 30	25 19
KAO-HSIUNG	TAIWAN	22.62N	120.28E	0.1	23 20 30	25 19
AN-PING	TAIWAN	23.00N	120.09E	0.2	23 22 30	27 19
PENG-HU	TAIWAN	23.57N	119.55E	0.2	23 22 48	27 37
HONG KONG	CHINA	22.30N	114.18E	0.5	23 22 20	27 9
DANNOURA	JAPAN	33.97N	130.95E	0.4	24 0 40	29 29
TUKIZI	JAPAN	35.67N	139.77E	0.1	23 18 10	22 59
MAIZURU	JAPAN	35.48N	135.40E	0.5	23 23 25	28 14
MOZI	JAPAN	33.95N	130.97E	0.9	24 0 25	29 14
URAKAWA	JAPAN	42.17N	142.83E	3.2		
IZUHARA	JAPAN	34.20N	129.30E	0.2		
KAMAISI	JAPAN	39.27N	141.90E	0.7	23 17 35	22 24
SASEBO	JAPAN	33.17N	129.72E	1.3	23 21 40	26 29
NASE	JAPAN	28.38N	129.50E	0.5	23 19 50	24 39
OMINATO	JAPAN	41.25N	141.15E	0.2	23 20 15	25 4
MOMBETSU	JAPAN	44.38N	143.22E	0.4	23 19 10	23 59
HAKODATE (41.70 140.73)	JAPAN	44.67N	142.42E	2.2	23 18 38	23 27
MAKURAZAKI	JAPAN	31.27N	130.31E	1.6		
AOMORI COAST	JAPAN	40.81N	140.74E	6.3		
AOMORI COAST	JAPAN	40.81N	140.74E	6.3		
HACHINOHE	JAPAN	40.52N	141.55E	3.3		
ONAGAWA	JAPAN	38.46N	141.43E	4.2		
SHIMIZU	JAPAN	34.95N	138.47E	1.5		
HAMAMATSU	JAPAN	34.70N	137.70E	1.1		
KUSHIRO	JAPAN	42.98N	144.44E	1.8		
MUTSU	JAPAN	41.31N	141.23E	6.3		
MERA	JAPAN	34.93N	139.83E	1.3		
MIYAKO	JAPAN	39.76N	141.95E	1.2		
HOKKAIDO	JAPAN	42.90N	145.00E	5		
KOCHI	JAPAN	33.59N	133.55E	3.1		

表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
OFUNATO	JAPAN	39.06N	141.64E	4.9		
WAKAYAMA COAST	JAPAN	32.75N	135.35E	2.4		
MIYAZAKI	JAPAN	31.93N	131.45E	0.6		
ABURATSU	JAPAN	31.65N	131.37E	2		
SHIMODA	JAPAN	34.67N	138.92E	1.8		
CHOSHI	JAPAN	35.74N	140.84E	2.1		
E. COAST HOKKAIDO	JAPAN	42.90N	144.00E	5		
N RIKUCHU	JAPAN	39.83N	141.86E	6.3		
MIYAGI (S. COAST)	JAPAN	38.43N	141.25E	4		
MIE COAST	JAPAN	34.30N	136.94E	4.9		
HOSOJIMA	JAPAN	32.44N	131.68E	1.9		
SANRIKU COAST	JAPAN	39.37N	141.88E	6.4		
RIKUCHU	JAPAN	39.74N	142.00E	6.3		
SHIOGAMA	JAPAN	38.32N	141.00E	2.8		
RIKUCHU (S.)	JAPAN	39.30N	141.88E	5.6		
KUSHIMOTO	JAPAN	33.47N	135.79E	2.2		
RIKUZEN	JAPAN	38.00N	140.92E	6.4		
TOSA-SHIMIZU	JAPAN	33.51N	133.44E	2.7		
TOBA	JAPAN	34.46N	136.85E	1.6		
N MIYAGI COAST	JAPAN	38.85N	141.60E	6.4		
NAOS ISLAND	PANAMA	8.92N	79.53W	0.4	23 4 40	9 29
QUEPOS	COSTA RICA	9.40N	84.17W	0.2	23 3 45	8 34
PUNTARENAS	COSTA RICA	9.97N	84.83W	0.3	23 4 0	8 49
LA UNION	EL SALVADOR	13.33N	87.82W	0.5		
SAN JOSE	GUATAMALA	13.92N	90.83W	0.5	23 4 35	9 24
ENSENADA	MEXICO	31.88N	116.60W	1.2	23 8 48	13 37
FRIDAY HARBOR	WASHINGTON	48.54N	123.03W	0.1	23 16 30	21 19
NEAH BAY	WASHINGTON	48.37N	124.62W	0.4	23 12 25	17 14
GRAY'S HARBOR	WASHINGTON	46.91N	124.11W	0.3		
TOKELAND	WASHINGTON	46.70N	123.99W	0.6		
WILLAPA BAY	WASHINGTON	46.65N	124.05W	0.6		
MCKENNY ISLAND	CANADA	52.65N	129.48W	0.4	23 13 3	17 52
CAPE ST.JAMES, B.C.	CANADA	51.93N	131.02W	0.4	23 12 20	17 9
TOFINO, BRITISH COLOMBIA	CANADA	49.15N	125.90W	0.4	23 12 20	17 9
KETCHIKAN	ALASKA	55.35N	131.68W	<0.1		
CRAIG	ALASKA	55.46N	133.13W	1		
CAPE POLE	ALASKA	55.97N	133.81W	1		
KAKE	ALASKA	56.98N	133.95W	<0.1	23 14 0	18 49

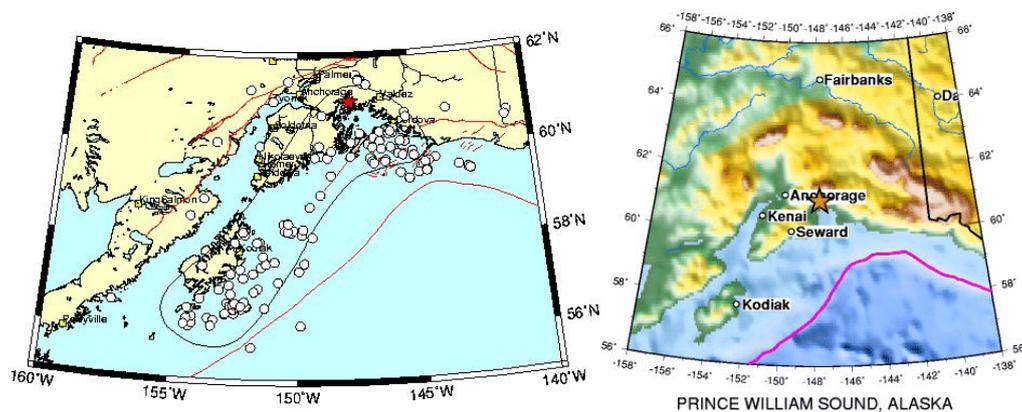
表 2-2-4 1960 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
JUNEAU	ALASKA	58.30N	134.41W	<0.1		
SKAGWAY	ALASKA	59.44N	135.33W	0.2	23 15 0	19 49
SITKA	ALASKA	57.05N	135.34W	0.5	23 13 33	18 22
YAKUTAT	ALASKA	59.55N	139.74W	0.8	23 14 18	19 7
MONTAGUE ISLAND	ALASKA	59.88N	147.78W	2.3	23 16 57	19 29
SEWARD	ALASKA	60.12N	149.43W	0.7	23 16 57	19 29
WOMEN'S BAY, KODIAK	ALASKA	57.75N	152.48W	0.7	23 14 25	19 14
DUTCH HARBOR	ALASKA	53.88N	166.54W	0.7	23 14 50	19 39
SWEEPER COVE, ADAK	ALASKA	51.86N	176.63W	1.1	23 14 40	19 29
MASSACRE BAY, ATTU	ALASKA	52.83N	173.20E	>1.7	23 15 30	20 19
KURILSKIYE	KURIL IS.	46.00N	150.00E	4.7		
CAPE LOPATKA	KAMCHATKA	50.94N	156.60E	2		
KHODUTKA INLET	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	3		
RUSSKAYA INLET	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7		
VILYUCHINSKAYA	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
TARYA INLET	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	1		
RYBACHII	KAMCHATKA	52.89N	158.60E	0.2		
CAPE MAYACHNYI	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	2		
KHALAKTYRKA	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	2		
CAPE SHIPUNSKII	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	3		
MORZHOVAYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7		
TAUISKAYA INLET	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	2.2		
LAVROVA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	2.5		
UST KAMCHATSK	KAMCHATKA	56.37N	162.45E	0.8		
OLGA INLET	KAMCHATKA	54.58N	161.00E	4		
SEMLYACHIK	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	4		
PETROPAVLOVSK	KAMCHATKA	53.10N	158.65E	0.6		
LOZHNYKHEVSTEI INLET	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	2.5		
KAMCHATKA R. MOUTH	KAMCHATKA	56.14N	162.44E	4		
NIKOLSKOE, BERING I.	COMMANDER IS.	55.18N	166.00E	3.5		
MEDNYI I.	COMMANDER IS.	54.60N	167.70E	1		

資料來源：NOAA，2010。

2-2-2 1964 年阿拉斯加地震

1964 年阿拉斯加威廉王子灣 (Prince William Sound) 地震規模 9.2 (圖 2-2-5)，地震引發海嘯資訊如表 2-2-5，1964 年阿拉斯加地震持續時間為 3 分鐘，對許多地區 (包括 Anchorage, Chitina, Glennallen, Homer, Hope, Kasilof, Kenai, Kodiak, Moose Pass, Portage, Seldovia, Seward, Sterling, Valdez, Wasilla, and Whittier) 造成傷害，其中以 Anchorage 損失最為慘重，摧毀約 75 棟住宅，整個地區水管、天然氣、下水道、電話和電力系統受到破壞。



圖片來源：USGS，2010。

圖 2-2-5 1964 年阿拉斯加威廉王子灣地震震央位置

表 2-2-5 1964 年阿拉斯加地震引發海嘯資訊表

Date (UTC)	Time (UTC)	Source Location	Magnitude	Source Type
March 28, 1964	03:36:14	61.05N 147.48W	9.2 Mw	Earthquake and Landslides

資料來源：NOAA，2010。

此次地震垂直位移面積約超過 520,000 km²，斷層走向主要由科迪亞克島 (Kodiak Island) 到東北的威廉王子灣，垂直位移約 2.3 至 11.5 m 之間，在蒙塔古島 (Montague Island) 西南邊的垂直位移達到 13 至 15 m。本次事件共奪走 128 條人命 (海嘯罹難者 113 人，地震罹難者 15 人)，並造成約 3.11 億美元的財產損失，海嘯的最大湖上高度在瓦爾狄斯海峽 (Valdez Inlet) 為 67 m，於美國西部海岸阿拉斯加、哥倫比亞省、華盛頓州、奧勒崗州及加州海岸造成災情，海嘯波高及災害紀錄如表 2-2-6，於阿拉斯加 Valdez、Whittier 及 Seward 海嘯振幅分別是 6.1 m、13.1 m 及 8.3 m (圖 2-2-6 至圖 2-2-8) 造成嚴重生命財產損失。太平

洋地區波高紀錄整理如表 2-2-7，海嘯傳遞時序如圖 2-2-9 所示，由源地發生後約經過 7 小時傳遞抵達日本，約 11 小時抵達台灣，約 15 小時傳遞抵達澳洲及南美洲，所幸對台灣並無重大影響。

表 2-2-6 1964 年阿拉斯加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表

Location	Amplitude (m)	Damage Summary
Klawock, AK	4.6	Docks, bridge and three dwellings destroyed.
Sitka, AK	2.1	Docks collapsed, minor boat damage.
Cape St. Elias, AK	3.0	One drowned during rescue.
Cordova, AK	4.2	Houses, buildings damaged. Boats and docks also damaged. \$1.7M damage.
Valdez Inlet, AK	67.1	One person missing at Anderson Bay, cabin destroyed. Navigation light destroyed in Valdez Narrows.
Valdez, AK	6.1	31 deaths. Many injured. Large section of land under city dock slid into Inlet triggering wave. Wave reached more than 2 blocks inland. Fires burned at waterfront for two weeks. 68 of 70 boats at dock destroyed. Town relocated later. \$12.5M to \$15M in damage.
Whittier, AK	13.1	13 dead, fires burned for 3 days, \$10M in damage.
Perry Island, AK	7.6	Boathouse and boat lost.
Port Nellie Juan, AK	15.0	Three dead. Dock destroyed, barge beached.
Point Nowell, AK	12.0	One dead. Several buildings demolished.
Chenega, AK	27.4	23 deaths. All buildings destroyed except for one house and the school. Most boats lost. Town relocated after earthquake. \$100K damage.
Port Oceanic, AK	11.9	Boats, dock, cannery damaged.
Crab Bay, AK	6.1	One dead. Dock and boats damaged.
Whidbey Bay, AK	15.2	Logging camp destroyed.
Seward, AK	8.3	12 dead, 200 injured, section of dock slid into Resurrection Bay, many fires, much of town destroyed, \$14M damage.
Perl Island, AK	9.0	Cattle drowned.
Homer, AK	6.0	Some boats damaged, restaurant and buildings flooded.
Seldovia, AK	1.2	Boat harbor damaged. \$500K damage.
Afognak, AK	3.4	23 of 28 structures damaged. 2 bridges destroyed. Town relocated after earthquake to Port Lions.
Ouzinkie, AK	9.1	Severe waterfront damage. Boats destroyed. \$500K damage.
City of Kodiak, AK	6.8	Nine deaths. Downtown/boat harbor extensively damaged, over 100 boats destroyed, 215 structures destroyed, \$31M in damage.

表 2-2-6 1964 年阿拉斯加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表 (續)

Location	Amplitude (m)	Damage Summary
Women's Bay, AK	7.6	Severe damage to Naval Station. \$10M in damage
Shearwater Bay, AK	7.8	Cannery destroyed. 31 boats lost.
Old Harbor, AK	7.3	One dead. 30 of 38 houses destroyed. Many boats lost. \$150K damage.
Larsen Bay, AK	1.2	Cattle drowned, small buildings lost.
Kaguyak, AK	9.8	3 dead. All houses lost. \$50K damage. Village abandoned after earthquake.
Shield's Bay, BC	9.8	Logging camp severely damaged.
Port Alberni, BC	6.4	\$10M damage. 58 buildings completely destroyed, 320 damaged, 694 homeless. Buildings swept in 1000 ft. Log booms and boats in inlet carried onshore. North bank of Somass R. suffered greatest damage.
La Push, WA	1.0	Boats and dock broke loose from moorings.
Taholah, WA	0.7	Fishing skiffs and fishnets (\$1K value) were lost. One man hospitalized for shock.
Wreck Creek, WA	4.5	\$500 damage to highway bridge.
Moclips, WA	3.4	1 Mile of sea wall damaged, \$6000 damage to eight houses, bulkheads, and road, several cars lost.
Joe Creek, WA	2.4	Bridge washed out, \$75K damage (including Copalis R. bridge)
Ilwaco, WA	3.1	Cars, dock damaged. Oyster beds destroyed.
Gearhart, OR	1.4	One home flooded and one cabin moved by waves.
Depoe Bay, OR	3.5	\$5K in damages.
Newport, OR	3.5m in Yaquina Bay	Four children camping on beach drowned. Some damage in Newport (about \$6K).
Florence, OR	3.7 near Siuslaw River mouth	Much boat damage and trailer/house damage near shore (\$50K in damage).
Umpqua River Mouth, OR	1.7	20-30 knot currents observed. Some damage in Winchester Bay harbor.
Charleston, Coos Bay, OR	1.4	Most damage at small boat basin and Hanson's landing. Approximately \$50K in damage. Wave was negligible by time it reached Pony Pont.
Rogue River, OR	2.9	Damage to small boats and docks.
Winchuk River, OR	?	Three homes damaged and minor bridge damage.
Crescent City, CA	4.8	10 drowned, 24 injured. Damage estimates from \$7M to \$15M. Worst tsunami damage along the U.S. West Coast in recorded history. 91 houses damaged, 21 boats lost, 12 house trailers lost, 172 businesses damaged or destroyed.

表 2-2-6 1964 年阿拉斯加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表 (續)

Location	Amplitude (m)	Damage Summary
Noyo, CA	2.0	10-20 boats sunk, 100 damaged. Damage estimates from \$250K to \$1M. Current estimated at approximately 30 knots.
Bodega Bay, CA	0.8	Some damage to navigational aides. Eight knot currents reported.
Tomales Bay, CA	1.0	Damage to docks (\$6K), approximately 20 knot currents reported.
San Francisco Bay, CA	up to 1.5m	Damage to boats and docks throughout the bay, especially severe at San Rafael. Estimated damage \$1M.
Santa Cruz, CA	1.5	Dredge sank, some boats damaged, \$100K damage.
Monterey, CA	1.4	Some utilities damaged.
Avila, CA	1.8	Boats broke loose from moorings.
Santa Barbara, CA	0.8	Minor damage.
Santa Monica, CA	1.0	Damage to boats and harbor (\$100K).
Los Angeles, CA	0.6	Three boats sunk, many broke loose from moorings, damage estimates \$175K to \$275K.
San Diego, CA	0.6	Minor damage.

資料來源：NOAA，2010。



圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-6 1964 年阿拉斯加海嘯淹沒 Valdez 地區鳥瞰圖



圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯作用於木板刺穿卡車輪胎



圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-8 1964 年阿拉斯加海嘯於 Seward 地區造成破壞

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
KETCHIKAN	ALASKA	55.35N	131.68W	0.6	28 6 25	2 49
ANNETTE	ALASKA	55.06N	131.54W	1.2		
CRAIG	ALASKA	55.46N	133.13W	4.2		
KLAWOCK	ALASKA	55.54N	133.09W	4.6		
WRANGELL	ALASKA	56.47N	132.38W	0.9		
PETERSBURG	ALASKA	56.81N	132.96W	0.9		
JUNEAU	ALASKA	58.30N	134.41W	1.3	28 6 49	3 13
SITKA	ALASKA	57.05N	135.34W	2.1	28 5 6	1 30
ELFIN COVE	ALASKA	58.20N	136.36W	2.1		
SKAGWAY	ALASKA	59.44N	135.33W	3		
HAINES	ALASKA	59.22N	135.44W	5.8		
YAKUTAT	ALASKA	59.55N	139.74W	2	28 5 0	1 24
DISENCHANTMENT BAY	ALASKA	60.00N	139.58W	4.8		
CAPE YAKATAGA	ALASKA	60.07N	142.43W	3.7		
CAPE ST ELIAS	ALASKA	59.81N	144.60W	3		
CORDOVA	ALASKA	60.55N	145.75W	4.2		
BOSWELL BAY, HINCHIN	ALASKA	60.41N	146.11W	6		
VALDEZ	ALASKA	61.11N	146.27W	6.1		
SHOUP BAY, VALDEZ INLET	ALASKA	61.12N	146.57W	67.1		
JACK BAY	ALASKA	61.04N	146.61W	12		
TATITLEK	ALASKA	60.86N	146.68W	4.1		
INAKWIK INLET	ALASKA	60.90N	147.43W	7.6		
PORT OCEANIC	ALASKA	60.21N	147.81W	11.9		
PORT CRAWFORD	ALASKA	60.07N	147.88W	14.6		
PERRY I.	ALASKA	60.68N	147.91W	7.6		
POINT NOWELL	ALASKA	60.44N	147.94W	12		
CRAB BAY, EVANS I.	ALASKA	60.07N	148.01W	6.1		
CHENEGA	ALASKA	60.28N	148.08W	27.4		
PORT NELLIE JUAN	ALASKA	60.55N	148.16W	15		
PUGET BAY	ALASKA	60.02N	148.53W	7.3		
BLACKSTONE BAY	ALASKA	60.74N	148.57W	24.2		
KINGS BAY	ALASKA	60.50N	148.58W	34.5		
PASSAGE CANAL	ALASKA	60.80N	148.67W	31.7		
WHITTIER	ALASKA	60.78N	148.68W	13.1		
WHIDBEY BAY	ALASKA	59.97N	148.95W	15.2		
SEWARD	ALASKA	60.12N	149.43W	8.3		
AIALIK BAY	ALASKA	59.85N	149.66W	30		
HALIBUT COVE	ALASKA	59.59N	151.22W	7.2		

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
ROCKY BAY	ALASKA	59.25N	151.42W	5.5		
HOMER	ALASKA	59.62N	151.46W	6		
PERL ISLAND	ALASKA	59.12N	151.64W	9		
SELDOVIA	ALASKA	59.44N	151.72W	1.2		
PORT GRAHAM	ALASKA	59.35N	151.83W	3		
NARROW CAPE	ALASKA	57.43N	152.33W	19		
KODIAK	ALASKA	57.79N	152.41W	6.8		
WOMEN'S BAY	ALASKA	57.75N	152.48W	7.6		
OZINKIE	ALASKA	57.92N	152.50W	9.1		
AFOGNAK	ALASKA	58.00N	152.78W	3.4		
SHEARWATER BAY	ALASKA	57.35N	152.89W	7.8		
OLD HARBOR	ALASKA	57.20N	153.30W	7.3		
KAGUYAK	ALASKA	56.86N	153.76W	9.8		
LARSEN BAY	ALASKA	57.54N	153.99W	1.2		
CHIGNIK	ALASKA	56.30N	158.39W	1.5		
PERRYVILLE	ALASKA	55.91N	159.15W	3		
DUTCH HARBOR	ALASKA	53.88N	166.54W	0.35	28 6 6	2 30
SWEEPER COVE, ADAK	ALASKA	51.86N	176.63W	0.18	28 7 0	3 24
ATTU, MASSACRE BAY	ALASKA	52.83N	173.20E	0.4	28 7 27	3 51
PRINCE RUPERT	CANADA	54.32N	130.33W	1.6		
SHIELDS BAY	CANADA	53.34N	132.49W	9.8		
TASU SOUND	CANADA	52.75N	132.02W	1.1		
OCEAN FALLS	CANADA	52.35N	127.68W	1.7		
BELLA BELLA	CANADA	52.17N	128.14W	1.2		
ALERT BAY	CANADA	50.58N	126.93W	1.3		
PORT ALBERNI	CANADA	49.23N	124.82W	6.4		
TOFINO B.C.	CANADA	49.15N	125.90W	1.3	28 7 0	3 24
FULFORD HARBOUR	CANADA	48.77N	123.45W	0.5		
VICTORIA	CANADA	48.42N	123.40W	0.7		
FRIDAY HARBOR	WASHINGTON	48.54N	123.03W	0.3	28 8 30	4 54
NEAH BAY	WASHINGTON	48.37N	124.62W	0.82	28 7 18	3 42
LAPUSH	WASHINGTON	47.91N	124.64W	1		
HOH R. MOUTH	WASHINGTON	47.75N	124.44W	0.5		
SEATTLE	WASHINGTON	47.60N	122.34W	0.15	28 9 12	5 36
TAHOLAH	WASHINGTON	47.35N	124.30W	0.7		
WRECK CREEK	WASHINGTON	47.29N	124.23W	4.5		
MOCLIPS	WASHINGTON	47.24N	124.21W	3.4		
JOE CREEK	WASHINGTON	47.21N	124.21W	2.4		

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
OCEAN SHORES	WASHINGTON	46.97N	124.17W	2.9		
SEAVIEW	WASHINGTON	46.33N	124.06W	3.8		
ILWACO	WASHINGTON	46.33N	124.05W	1.4		
CAPE DISAPPOINTMENT	WASHINGTON	46.28N	124.08W	1.7		
VANCOUVER	WASHINGTON	45.64N	122.67W	<0.1		
POINT ADAMS	OREGON	46.21N	123.95W	0.8		
ASTORIA	OREGON	46.21N	123.77W	0.36	28 7 56	4 20
GEARHART	OREGON	46.02N	123.92W	1.4		
NEHALEM RIVER	OREGON	45.66N	123.94W	3.5		
TILLAMOOK BAY	OREGON	45.57N	123.96W	0.5		
DEPOE BAY	OREGON	44.81N	124.07W	3.5		
YAQUINA BAY	OREGON	44.62N	124.07W	3.5		
SIUSLAW RIVER	OREGON	44.02N	124.12W	3.7		
FLORENCE	OREGON	43.97N	124.11W	0.6		
UMPQUA RIVER	OREGON	43.67N	124.20W	1.7		
COOS BAY	OREGON	43.35N	124.34W	1.4		
ROGUE RIVER	OREGON	42.43N	124.43W	2.9		
BROOKINGS	OREGON	42.05N	124.27W	1.7		
CRESCENT CITY	CALIFORNIA	41.75N	124.18W	4.8	28 7 39	4 3
HUMBOLDT BAY	CALIFORNIA	40.77N	124.22W	1.9		
NOYO RIVER MOUTH	CALIFORNIA	39.43N	123.82W	2		
FORT BRAGG	CALIFORNIA	39.44N	123.82W	3.8		
ARENA COVE	CALIFORNIA	38.91N	123.71W	1.8		
BODEGA BAY	CALIFORNIA	38.31N	123.05W	0.8		
TOMALES BAY	CALIFORNIA	38.23N	122.97W	1		
SAN RAFAEL	CALIFORNIA	37.97N	122.49W	1.5		
SAUSALITO	CALIFORNIA	37.86N	122.48W	1.2		
SAN FRANCISCO	CALIFORNIA	37.81N	122.47W	1.1	28 8 42	5 6
ALAMEDA (NAS)	CALIFORNIA	37.77N	122.30W	0.6	28 9 6	5 30
PACIFICA	CALIFORNIA	37.64N	122.49W	1.4		
SANTA CRUZ	CALIFORNIA	36.96N	122.02W	1.5		
CAPITOLA	CALIFORNIA	36.97N	121.95W	2.1		
MOSS LANDING	CALIFORNIA	36.81N	121.79W	1.4		
PACIFIC GROVE	CALIFORNIA	36.62N	121.91W	0.9		
MONTEREY	CALIFORNIA	36.61N	121.89W	1.4		
MARTIN'S BEACH	CALIFORNIA	35.88N	121.46W	3		
AVILA	CALIFORNIA	35.18N	120.73W	1.8	28 8 44	5 8
SANTA BARBARA	CALIFORNIA	34.41N	119.69W	0.8		

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
RINCON I.	CALIFORNIA	34.37N	119.48W	0.9	28 9 17	5 41
SANTA MONICA	CALIFORNIA	34.01N	118.50W	1	28 9 15	5 39
ALAMITOS BAY	CALIFORNIA	33.75N	118.12W	0.4	28 8 36	6 0
LOS ANGELES	CALIFORNIA	33.72N	118.26W	0.6	28 9 24	5 48
NEWPORT BAY	CALIFORNIA	33.59N	117.88W	0.4	28 9 26	5 50
LA JOLLA	CALIFORNIA	32.87N	117.26W	0.6	28 9 24	5 48
SAN DIEGO	CALIFORNIA	32.71N	117.17W	0.6	28 9 50	6 14
SEAVIEW	CALIFORNIA	0.00N	0.00E	3.8		
HILO, HAWAII	HAWAII	19.73N	155.06W	3	28 9 0	5 24
LAUPAHOEHOE, HAWAII	HAWAII	20.00N	155.25W	0.7		
WAIPIO BAY, HAWAII	HAWAII	20.13N	155.60W	1.2		
KAWAIHAE, HAWAII	HAWAII	20.04N	155.83W	1		
PUAKO, HAWAII	HAWAII	19.97N	155.88W	0.6		
MAHUKONA, HAWAII	HAWAII	20.18N	155.92W	1.9		
MALIKO BAY, MAUI	HAWAII	20.80N	156.25W	2.5		
LOWER PAIA, MAUI	HAWAII	20.92N	156.38W	2.8		
KAHULUI, MAUI	HAWAII	20.90N	156.47W	3.6	28 8 47	5 11
COCONUT I., OAHU	HAWAII	21.43N	157.80W	0.3	28 8 48	5 12
HONOLULU, OAHU	HAWAII	21.31N	157.87W	0.5	28 8 53	5 17
HAUULA, OAHU	HAWAII	21.62N	157.92W	1.2		
WAIALEE, OAHU	HAWAII	21.70N	158.04W	1.8		
WAIMEA BAY, OAHU	HAWAII	21.63N	158.07W	4.9		
PUAENA POINT, OAHU	HAWAII	21.61N	158.11W	2.4		
HALIEWA, OAHU	HAWAII	21.60N	158.12W	3.1		
KAIAKA BAY, OAHU	HAWAII	21.58N	158.12W	4.6		
ANAHOLA BAY, KAUAI	HAWAII	22.15N	159.31W	1		
KAPAA, KAUAI	HAWAII	22.08N	159.32W	2.2		
MOLOAA, KAUAI	HAWAII	22.45N	159.33W	1		
WAILUA, KAUAI	HAWAII	22.06N	159.34W	1.3		
NAWILIWILI, KAUAI	HAWAII	21.96N	159.36W	0.4	28 8 33	4 57
HANALEI, KAUAI	HAWAII	21.90N	159.50W	1.9		
HAENA, KAUAI	HAWAII	22.22N	159.55W	3		
JOHNSTON I.	HAWAII	16.69N	169.53W	0.2	28 9 39	6 3
MIDWAY I.	HAWAII	28.21N	177.36W	0.2	28 8 27	4 51
MANZANILLO	MEXICO	19.06N	104.25W	0.6	28 12 15	8 39
MAZATLAN	MEXICO	23.18N	106.43W	0.4	28 12 0	8 24
SALINA CRUZ	MEXICO	16.17N	95.20W	0.4	28 14 10	10 34
ACAPULCO	MEXICO	16.85N	99.92W	0.4	28 13 5	9 29

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
LA PAZ	MEXICO	24.17N	110.32W	0.5	28 12 27	8 51
TOPOLOBAMPO	MEXICO	25.62N	109.05W	<0.1	28 11 59	8 23
ENSENADA	MEXICO	31.87N	116.62W	1.2	28 9 42	6 6
ACAJUTLA	EL SALVADOR	13.58N	89.85W	0.2	28 15 18	11 42
LA UNION	EL SALVADOR	13.33N	87.82W	0.1		
PUNTARENAS	COSTA RICA	9.97N	84.83W	0.2	28 16 23	12 47
QUEPOS	COSTA RICA	9.40N	84.17W	0.2	28 16 0	12 24
PUERTO ARMUELLES	PANAMA	8.26N	82.87W	0.15	28 16 24	12 48
NAOS ISLAND	PANAMA	8.92N	79.53W	0.15		
TUMACO	COLOMBIA	1.83N	0.00E	0.1		
BAHIA SOLANO	COLOMBIA	6.23N	0.00E	0.2	28 17 45	14 9
BUENAVENTURA	COLOMBIA	3.92N	0.00E	<0.1		
LA LIBERTAD	ECUADOR	2.20S	80.92W	0.6	28 18 9	14 33
MATARANI	PERU	17.00S	72.12W	0.5	28 19 57	16 21
SAN JUAN	PERU	15.35S	75.15W	0.6	28 19 30	15 54
TALARA	PERU	4.58S	81.42W	1		
LA PUNTA	PERU	12.08S	77.17W	0.9		
CALLAO	PERU	12.08S	77.13W	1.1	28 19 11	15 35
CALDERA	CHILE	27.07S	70.83W	0.7	28 20 55	17 19
TALCAHUANO	CHILE	36.67S	73.17W	2.5	28 22 15	18 39
ANTOFAGASTA	CHILE	23.65S	70.42W	0.5	28 20 39	17 3
CORRAL	CHILE	39.86S	73.42W	1.7	28 22 39	19 3
VALPARAISO	CHILE	33.08S	71.67W	2.2	28 21 27	17 51
ARICA	CHILE	18.47S	70.32W	2.1	28 20 30	16 54
COQUIMBO	CHILE	29.95S	71.35W	4		
PALMER PEN	ANTARCTICA	64.50S	60.00W	0.4		
SAN CRISTOBAL	GALAPAGOS IS.	0.90S	89.62W	0.6	28 16 27	12 51
	WAKE I.	19.29N	166.63E	<0.1		
CHRISTMAS I.	LINE IS.	1.98N	157.48W	0.1	28 11 21	7 48
PAGO PAGO	SAMOA	14.28S	170.68W	0.2	28 13 51	10 15
TRUK	CAROLINE IS.	7.45N	151.85E	<0.1	28 13 0	9 24
RABAU	NEW BRITAIN	4.22S	152.18E	0.3		
GUAM	MARIANA IS.	13.44N	144.65E	<0.1	28 12 48	9 12
KWAJALEIN	MARSHALL IS.	8.74N	167.74E	0.2	28 12 0	8 24
ENIWETOK	MARSHALL IS.	11.37N	162.35E	<0.1	28 11 48	8 12
CANTON I.	PHOENIX IS.	2.82S	171.72W	<0.1	28 12 15	8 36
LYTTLETON	NEW ZEALAND	43.62S	172.72E	0.6		

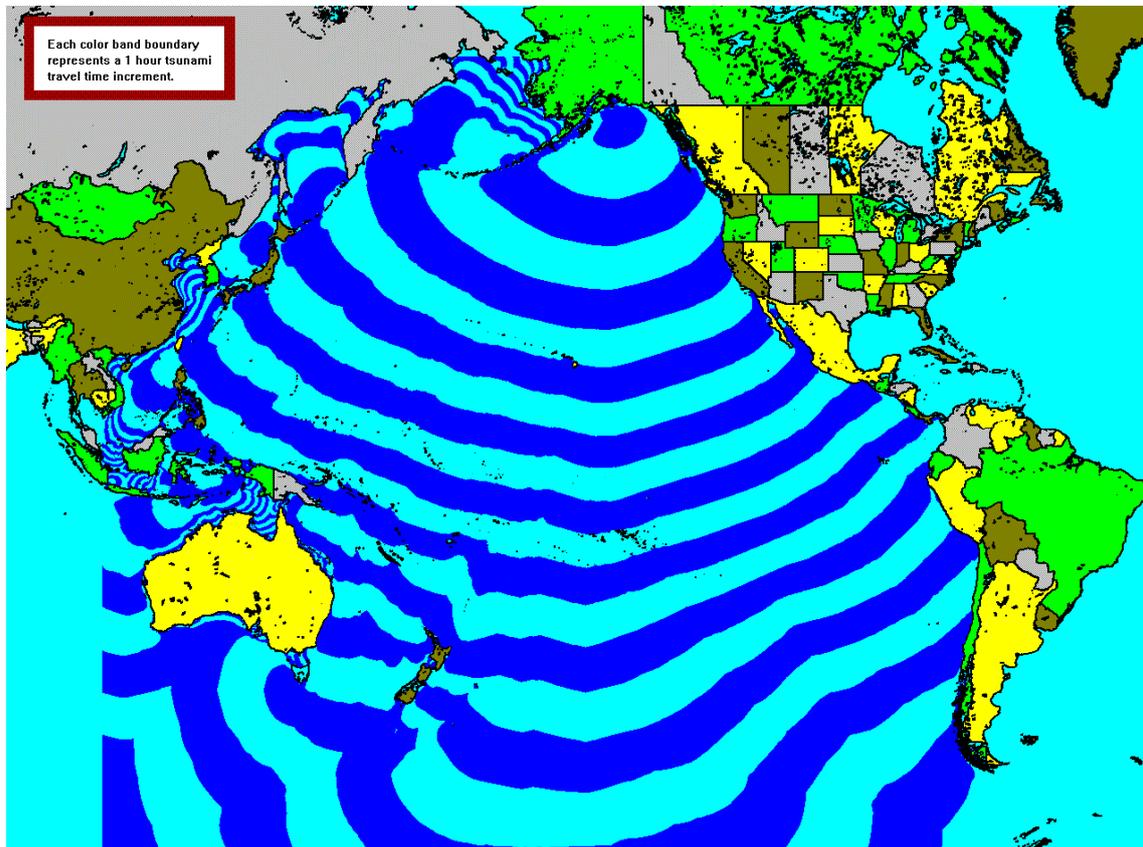
表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
SYDNEY	AUSTRALIA	33.92S	141.17E	0.2		
MISHO	JAPAN	0.00N	0.00E	0.9		
NAGOYA	JAPAN	35.14N	136.92E	0.4		
OSAKA	JAPAN	34.68N	135.51E	0.2		
WAKKANAI	JAPAN	45.43N	141.72E	0.7		
KAMAISHI	JAPAN	39.37N	141.88E	0.4		
ABASHIRI	JAPAN	44.00N	144.26E	0.3		
KUSHIRO	JAPAN	42.98N	144.44E	1.6		
OMAEZAKI	JAPAN	34.61N	138.23E	0.6		
MIYAKO	JAPAN	39.76N	141.95E	0.1		
MERA	JAPAN	34.93N	139.83E	0.3		
HANASAKI	JAPAN	43.31N	145.63E	0.7		
ENOSHIMA	JAPAN	35.30N	139.48E	0.2		
URAKAWA	JAPAN	42.17N	142.83E	0.3		
OFUNATO	JAPAN	39.06N	141.64E	0.7		
MOMBETSU	JAPAN	44.38N	143.22E	0.1		
HACHINOHE	JAPAN	40.52N	141.55E	1.4		
ONAGAWA	JAPAN	38.46N	141.43E	0.5		
ONAHAMA	JAPAN	36.95N	140.90E	0.4		
KANAYA	JAPAN	34.82N	138.14E	0.2		
URAKAMI	JAPAN	0.00N	0.00E	0.5		
UCHIURA	JAPAN	42.25N	140.25E	0.2		
HAKODATE	JAPAN	41.81N	140.75E	1		
HOSOJIMA	JAPAN	32.44N	131.68E	0.1		
ABURATSU	JAPAN	31.65N	131.37E	0.7		
KUSHIMOTO	JAPAN	33.47N	135.79E	0.7		
NAZE	JAPAN	28.37N	129.49E	0.2		
TOKYO	JAPAN	35.69N	139.75E	0.1		
TOMIZAKI	JAPAN	0.00N	0.00E	0.6		
SUMOTO	JAPAN	34.34N	134.88E	0.1		
OWASE	JAPAN	34.06N	136.20E	0.5		
KOBE	JAPAN	35.97N	123.67E	0.2		
WAKAYAMA	JAPAN	34.23N	135.18E	0.2		
AOMORI	JAPAN	40.79N	140.73E	0.3		
HACHIJO IS.	JAPAN	35.15N	139.80E	0.1		
ABURATSUBO	JAPAN	35.15N	135.63E	0.2		
YOKOSUKA	JAPAN	35.30N	139.65E	0.2		
SHIMIZU	JAPAN	34.95N	138.47E	0.3		

表 2-2-7 1964 年阿拉斯加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
TOSA-SHIMIZU	JAPAN	33.51N	133.44E	0.2		
TOBA	JAPAN	34.46N	136.85E	0.2		
ASAMUSHI	JAPAN	0.00N	0.00E	0.5		
ONIZAKI	JAPAN	0.00N	0.00E	0.1		
KOCHI	JAPAN	33.59N	133.55E	0.2		
AOSHIMA	JAPAN	0.00N	0.00E	0.2		
KAINAN	JAPAN	34.17N	135.22E	0.2		
CHOSHI	JAPAN	35.74N	140.84E	0.7		
YUZHNO, KURILSKIYE	KURIL IS.	44.04N	144.82E	0.4		
PETROPAVLOVSK	KAMCHATKA	53.10N	158.65E	0.07		

資料來源：NOAA，2010。



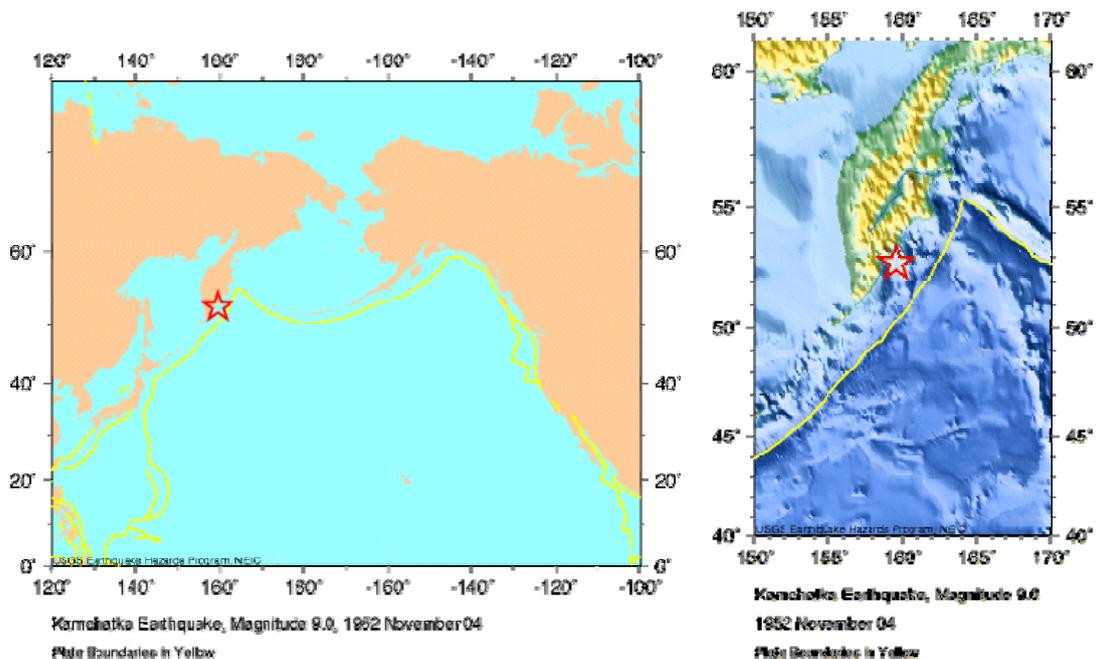
圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-9 1964 年阿拉斯加海嘯傳遞時序圖

2-2-3 1952 年前蘇聯堪察加地震

1952 年前蘇聯堪察加地震規模 9.0，震央在堪察加半島（圖 2-2-10），地震引發海嘯資訊如表 2-2-8，並由於地質活動產生海嘯襲擊當地及夏威夷群島，於當地引發 13 m 的海嘯波造成船隻擱淺，房屋損毀，海灘侵蝕，路面移動等，財產損失估計 80 萬至 100 萬美元。在歐胡島的 Kaena Point 海嘯波高達到 9.1 m，Hilo 地區波高 2.4 m 毀壞碼頭建物，Hilo 財產損失估計為 40 萬美元，據報導 Reed's Bay 波高為 3.5 m，房屋根基被拔起，海岸警衛隊重達 11 噸的浮標也因海嘯衝擊由錨碇處移開。

海嘯於美國西部海岸阿拉斯加、哥倫比亞省、華盛頓州、奧勒崗州及加州海岸造成災情，海嘯波高及災害紀錄如表 2-2-9，在阿拉斯加的阿圖（Attu）海嘯波振幅為 2.7 m，週期為 17 min，低窪地區被洪水淹沒；於艾達克（Adak）海嘯波振幅約 1.1 m，稍微溢過海岸護堤。在加州阿維拉（Avila）的海嘯振幅是 1.4 m，在新月市為 1.0 m，於西海岸的其他地方波高不到 1.0 m。太平洋地區波高紀錄整理如表 2-2-10，海嘯傳遞時序如圖 2-2-11 所示，由源地發生後約經過 3 小時傳遞抵達日本，約 7 小時抵達台灣，約 11 小時抵達澳洲，約 21 小時傳遞抵達南美洲智利。



圖片來源：USGS，2010。

圖 2-2-10 1952 年前蘇聯堪察加地震震央位置

表 2-2-8 1952 年前蘇聯堪察加地震引發海嘯資訊表

Date (UTC)	Time (UTC)	Source Location	Magnitude	Source Type
November 4, 1952	16:58:26	52.75N 159.50E	9.0 Mw	Earthquake

資料來源：NOAA，2010。

表 2-2-9 1952 年前蘇聯堪察加海嘯於美洲西部海嘯波高及災害表

Location	Amplitude (m)	Damage Summary
Adak, AK	>1.1	Banks of harbor overflowed, no damage.
Attu, AK	>1.5	Minor damage due to flooding.
Brandon, OR	?	Logs broke loose from log boom.
Crescent City, CA	1.0	Four boats overturned and sunk.
Santa Cruz, CA	?	Fishing launch damaged.

資料來源：NOAA，2010。

表 2-2-10 1952 年前蘇聯堪察加海嘯於太平洋地區波高紀錄

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
SHIPURSKY	KAMCHATKA	53.08N	160.03E	12		
OLGA BAY	KAMCHATKA	54.58N	161.00E	13		
LOBATKA	KAMCHATKA	50.52N	156.40E	9.5		
OZENOE	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
AVACHINSKAIA	KAMCHATKA	52.97N	158.50E	1.2		
POVORTNY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	10		
KRONOTSKY	KAMCHATKA	54.60N	162.12E	5		
UST KAMCHATSK	KAMCHATKA	56.37N	162.45E	0.1		
UTASHUD I.	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	8.6		
SARANNAYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7		
VILYUCHINSKAYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	8		
RAKOVAYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	3		
PETROPAVLOVSK	KAMCHATKA	53.10N	158.65E	1.2		
TARYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	3		
CAPE MAYACHNYI	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5.7		
KOLPAKOVO	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	0.5		
SEMLYACHIK	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
KRONOKA	KAMCHATKA	54.83N	161.02E	7		
ASACHA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7.5		
RUSSKAYA	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7		
ZHIROVAYA	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	8		
SCHUBERT	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	1		
ZHUPANOVO	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
MORZHOVAYA BAY	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	8		
NALYCHEVO	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	7		
KHALAKTYRKA	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
CAPE BEZMYANNI	KAMCHATKA	0.00N	0.00E	5		
SHUMSHU	KURIL IS.	50.75N	156.53E	(9.0) 15.0		
PARAMUSHIR	KURIL IS.	50.42N	155.83E	18		
SEVERO	KURIL IS.	50.67N	156.02E	20		
SHIASHKOTON	KURIL IS.	48.75N	154.00E	8		
ITURUP	KURIL IS.	45.00N	148.00E	2.5		
ALAI	KURIL IS.	50.70N	155.50E	1.5		
ONEKOTAN I.	KURIL IS.	49.33N	154.68E	9		
NIKOLSKOE, BERING I.	COMMANDER IS.	55.18N	166.00E	2		
KORSAKOV	SAKHALIN I.	46.62N	142.80E	1		
MAGADAN	USSR	59.64N	150.90E	2		
JUNEAU	ALASKA	58.30N	134.41W	0.1		
SKAGWAY	ALASKA	59.44N	135.33W	<0.1		

表 2-2-10 1952 年前蘇聯堪察加海嘯於太平洋地區波高紀錄（續）

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
SITKA	ALASKA	57.05N	135.34W	0.3		
YAKUTAT	ALASKA	59.55N	139.74W	0.3		
SEWARD	ALASKA	60.12N	149.43W	0.1		
KODIAK	ALASKA	57.75N	152.48W	0.2		
DUTCH HARBOR	ALASKA	53.88N	166.54W	0.6		
ADAK	ALASKA	51.86N	176.63W	>1.1		
MASSACRE BAY	ALASKA	52.83N	173.20E	>1.5		
KUSHIMOTO	JAPAN	33.47N	135.79E	0.8		
ISHINOMAKI	JAPAN	38.50N	141.26E	0.9		
KUJI	JAPAN	40.39N	141.77E	1		
KUSHIRO	JAPAN	42.98N	144.44E	0.5		
HACHINOHE	JAPAN	40.52N	141.55E	1.6		
FUKUSHIMA COAST	JAPAN	37.25N	141.05E	1		
HOKKAIDO COAST	JAPAN	42.28N	142.00E	1		
SANRIKU COAST	JAPAN	39.37N	141.88E	3		
OWASE	JAPAN	34.06N	136.20E	0.7		
SHIMODA	JAPAN	34.67N	138.92E	1		
KYUSHU	JAPAN	32.00N	131.50E	1		
HAKODATE	JAPAN	41.81N	140.75E	0.5		
GUAM	MARIANA IS.	13.44N	144.65E	<0.1		
KALAPANA, HAWAII	HAWAII	19.35N	154.98W	0.9		
HILO, HAWAII	HAWAII	19.73N	155.06W	2.4		
HAWAII I.	HAWAII	19.75N	155.50W	3.5		
KAWAIIHAE, HAWAII	HAWAII	20.04N	155.83W	0.6		
NAPOOPOO, HAWAII	HAWAII	19.48N	155.92W	1.2		
KEAUHOU, HAWAII	HAWAII	19.57N	155.97W	0.9		
HOOKENA, HAWAII	HAWAII	19.38N	155.90W	1.2		
KAILUA, HAWAII	HAWAII	19.63N	155.98W	0.6		
MAKAPUU POINT, OAHU	HAWAII	21.30N	157.67W	3		
HONOLULU, OAHU	HAWAII	21.31N	157.87W	1.3		
PEARL HARBOR, OAHU	HAWAII	21.35N	157.97W	0.2		
KAHUKU POINT, OAHU	HAWAII	21.70N	158.00W	1.2		
WAIALUA, OAHU	HAWAII	21.58N	158.13W	5.2		
KAENA POINT, OAHU	HAWAII	21.57N	158.26W	9.1		
WAHAIWA BAY, KAUAI	HAWAII	22.05N	159.55W	3		
PORT ALLEN, KAUAI	HAWAII	21.90N	159.58W	0.3		
JOHNSTON I.	HAWAII	16.69N	169.53W	0.2		
MIDWAY I.	HAWAII	28.21N	177.36W	1.3		

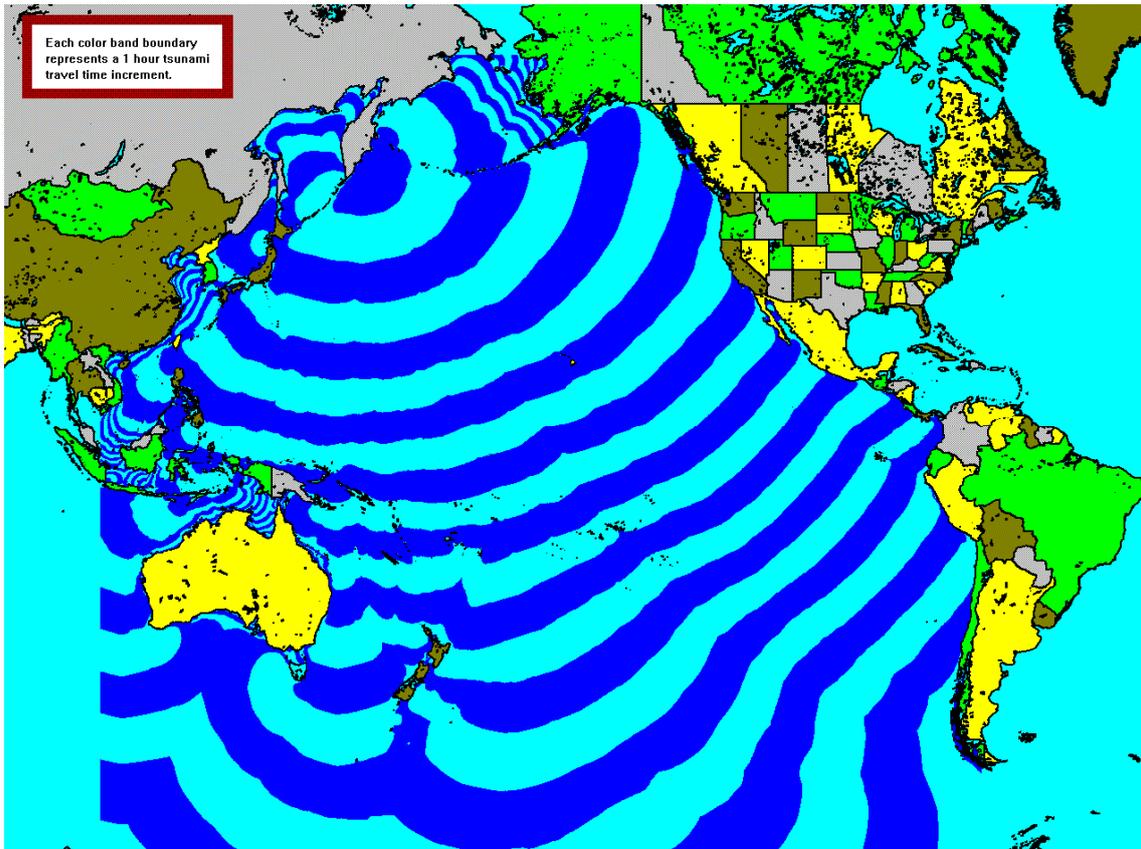
表 2-2-10 1952 年前蘇聯堪察加海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
TRUK	CAROLINE IS.	7.45N	151.85E	<0.1		
YAP, PALAU I.	CAROLINE IS.	9.51N	138.14E	<0.1		
	WAKE I.	19.29N	166.63E	0.3		
KWAJALEIN	MARSHALL IS.	8.74N	167.74E	0.2		
ENIWETOK	MARSHALL IS.	11.37N	162.35E	0.2		
CANTON I.	PHOENIX IS.	2.82S	171.72W	0.1		
PAGO PAGO	SAMOA	14.28S	170.68W	0.9		
FAGALOA BAY	SAMOA	13.89S	171.52W	OBS.		
APIA	SAMOA	13.81S	171.75W	OBS.		
(? LOC)	NEW ZEALAND	40.00S	176.00E	1		
TOFINO	CANADA	49.15N	125.90W	0.3		
VICTORIA	CANADA	48.44N	123.38W	0.2		
FRIDAY HARBOR	WASHINGTON	48.54N	123.03W	<0.1		
NEAH BAY	WASHINGTON	48.37N	124.62W	0.2		
SEATTLE	WASHINGTON	47.60N	122.34W	<0.1		
ASTORIA	OREGON	46.21N	123.77W	0.1		
CRESCENT CITY	CALIFORNIA	41.75N	124.18W	1	5 0 58	7 54
SAN FRANCISCO (W COAST)	CALIFORNIA	37.81N	122.47W	0.5	5 1 40	8 42
PRESIDIO	CALIFORNIA	37.81N	122.47W	0.6	5 1 30	8 32
ALAMEDA	CALIFORNIA	37.77N	122.30W	0.4	5 1 55	8 57
HUNTER'S POINT	CALIFORNIA	37.73N	122.36W	0.2		
AVILA	CALIFORNIA	35.18N	120.73W	1.4		
PORT HUENEME	CALIFORNIA	34.15N	119.21W	0.7		
SANTA MONICA	CALIFORNIA	34.01N	118.50W	0.5	5 2 34	9 26
SAN PEDRO	CALIFORNIA	33.75N	118.29W	0.3		
LONG BEACH	CALIFORNIA	33.75N	118.20W	0.3		
LOS ANGELES	CALIFORNIA	33.72N	118.26W	0.3		
LA JOLLA	CALIFORNIA	32.87N	117.26W	0.2	5 2 10	9 12
SAN DIEGO	CALIFORNIA	32.71N	117.17W	0.3	5 2 34	9 36
SALINA CRUZ	MEXICO	16.17N	95.20W	0.67		
LA PAZ	MEXICO	24.16N	110.30W	0.2		
ACAPULCO	MEXICO	16.85N	99.92W	0.5		
SAN JOSE	GUATAMALA	13.92N	90.83W	0.3		
LA LIBERTAD	EL SALVADOR	13.47N	89.33W	0.2		
SAN JUAN D SUR	NICARAGUA	0.00N	0.00E	0.2		
PUNTA ARENAS	COSTA RICA	9.97N	84.08E	0.4		
PUERTO ARMUEL	PANAMA	8.28N	82.84W	0.4		
LA LIBERTAD	ECUADOR	2.20S	80.92W	0.2		

表 2-2-10 1952 年前蘇聯堪察加海嘯於太平洋地區波高紀錄（續）

Location	Region	Latitude	Longitude	Amplitude (m)	Arrival time (day hr. min. UTC)	Travel time (hr. min.)
CALLAO	PERU	12.08S	77.13W	1		
CALDERA	CHILE	27.08S	70.68W	2.8		
ANTOFAGASTA	CHILE	23.65S	70.42W	1.4		
TALCAHUANO	CHILE	36.67S	73.17W	1.8		
VALPARAISO	CHILE	33.08S	71.67W	1.8		
ARICA	CHILE	18.47S	70.32W	2.3		

資料來源：NOAA，2010。

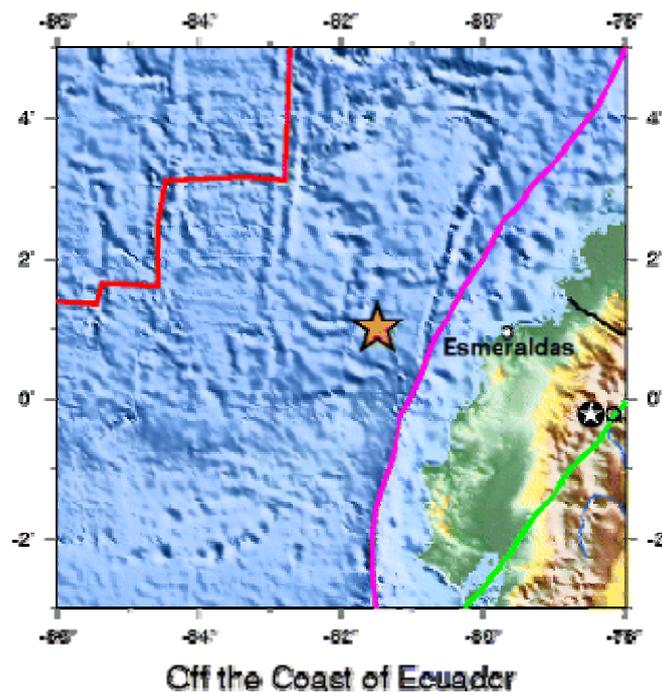


圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-11 1952 年前蘇聯堪察加海嘯傳遞時序圖

2-2-4 1906 年厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震

1906 年 1 月 31 日 15:35 UTC 厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震規模 8.8，引發海嘯撲上厄瓜多（Ecuador）與哥倫比亞（Colombia）沿岸（圖 2-2-12），死亡人數估計在 500 到 1500 人之間，海嘯波約經過 12.5 小時後抵達夏威夷 Hilo 地區。檀香山驗潮站的海嘯波也是在 12 小時之後開始有水位振幅紀錄，於當地造成溢淹後水位振盪加劇，直到第 4 個海嘯波時，達到最大海嘯波高 0.25 m，周期為 20-30 分鐘（USGS，2010）。



圖片來源：USGS，2010。

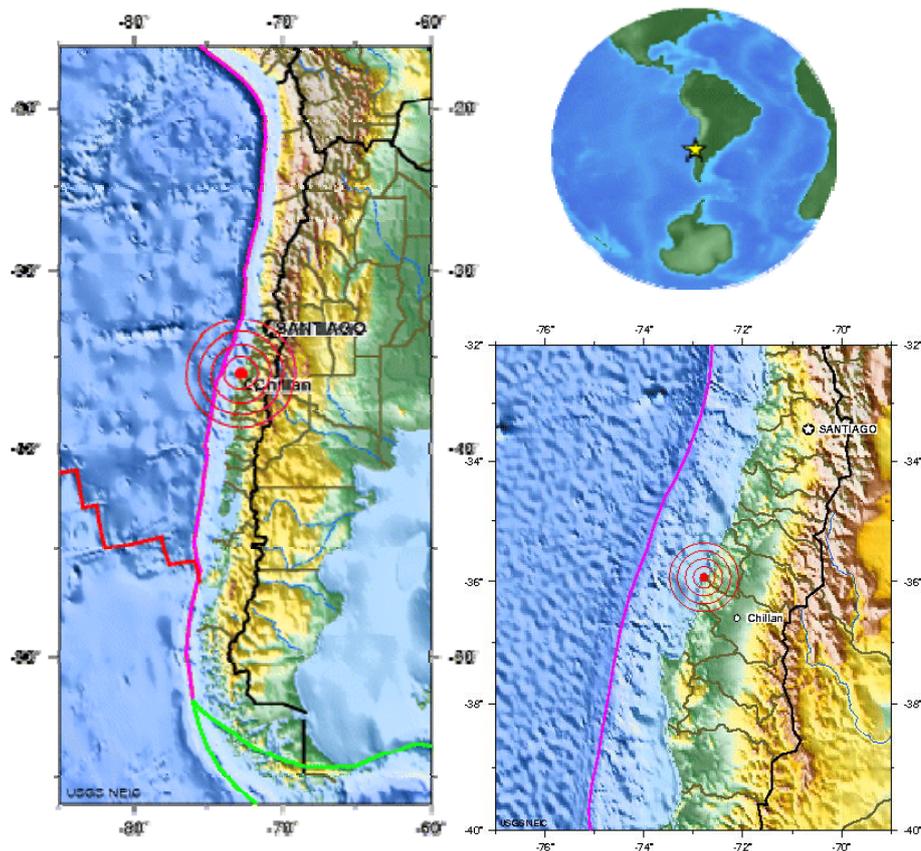
圖 2-2-12 1906 年厄瓜多艾斯美拉達斯外海地震震央位置

2-2-5 2010 年智利地震

今年(2010)2月27日智利地震規模8.8，震央位置在35.909°S、72.733°W 智利中部馬烏萊(Maule, Chile)外海(圖2-2-13)，震源深度23.2 km，就2-1節所述，此次地質活動屬於淺層地震(深度0~70公里)，地震引發海嘯資訊如表2-2-11，主震與台灣相距18,100公里。

在Bio-Bio、Maule、O'Higgins、Region Metropolitana及Valparaiso地區至少有180萬居民受影響，在Valparaiso-Concepcion-Temuco地區，造成至少521人死亡，56人失蹤，約12,000人受傷，80萬人無家可歸。37萬棟房屋、4,013所學校、79個醫院及4,200艘船隻損壞，在智利總經濟損失估計約30億美元。在美國聖地亞哥(San Diego)和智利康塞普西翁(Concepcion)造成機場停擺、電力、電信及供水中斷。在San Diego、Concepcion、Constitucion、Dichato及Pichilemu地區，海嘯摧毀了建築物和道路，也破壞碼頭及船隻。

於太平洋地區海嘯波振幅被紀錄在以下驗潮站(參考表2-2-12)：美屬薩摩亞群島的帕果帕果(Pago Pago, American Samoa)為71 cm，加拿大冬季港(Winter Harbour)為22 cm，智利的瓦爾帕萊索(Valparaiso)為261 cm，智利中部沿岸的塔爾卡瓦諾(Talcahuano)為261 cm、科金博港口(Coquimbo)為164 cm，科拉爾港(Corral)為144 cm；於巴爾特拉，厄瓜多爾(Baltra, Ecuador)為41 cm，法屬波利尼西亞的里基提亞(Rikitea, French Polynesia)為32 cm，日本花咲(Hanasaki, Japan)為95 cm，大船渡市(Ofunato)為40 cm，那霸(Naha)為30 cm，北馬里亞納群島的塞班(Saipan, Northern Mariana Islands)為15 cm，中途島(Midway Island)為32 cm，墨西哥的阿卡波爾哥(Acapulco, Mexico)為65.5 cm，巴布亞新幾內亞的馬努斯(Manus, Papua New Guinea)為37 cm，祕魯西部的卡亞俄(Callao, Peru)為69 cm，菲律賓的卡里馬奧(Currimao, Philippines)為16 cm，阿拉斯加的科迪亞克島(Kodiak, Alaska)為36 cm，加州新月市為64 cm，夏威夷的卡胡魯伊(Hawaii, Kahului)為86 cm，奧勒崗的歐爾福特港(Port Orford, Oregon)為32 cm，華盛頓的尼亞灣(Neah Bay, Washington)為23 cm。海嘯傳遞時序如圖2-2-14，由源地發生後約經過15小時傳遞抵達澳洲，約經過18小時抵達阿拉斯加，約經過23小時抵達日本，約25小時傳遞抵達台灣。



OFFSHORE MAULE, CHILE

2010 02 27 06:04:14 UTC 06.036 72.78W Depth: 35 km, Magnitude: 6.6

Earthquake Location

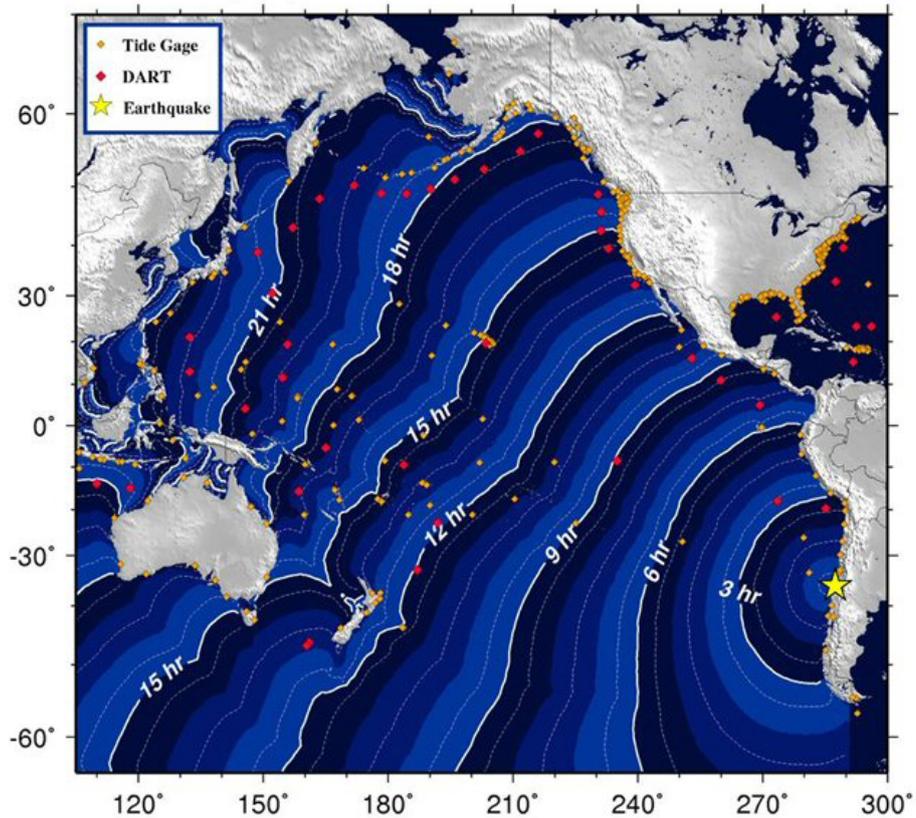
圖 2-2-13 2010 年智利外海地震震央位置

表 2-2-11 2010 年智利外海地震引發海嘯資訊表

Magnitude	8.8
Date-Time	Saturday, February 27, 2010 at 06:34:14 UTC
Location	35.909°S, 72.733°W
Depth	35 km (21.7 miles) set by location program
Region	OFFSHORE MAULE, CHILE
Distances	95 km (60 miles) NW of Chillan, Chile 105 km (65 miles) NNE of Concepcion, Chile 115 km (70 miles) WSW of Talca, Chile 335 km (210 miles) SW of SANTIAGO, Chile
Location Uncertainty	horizontal +/- 6.2 km (3.9 miles); depth fixed by location program
Parameters	NST=391, Nph=391, Dmin=987.2 km, Rmss=1.17 sec, Gp= 14°, M-type=teleseismic moment magnitude (Mw), Version=8

資料來源：USGS，2010。

February 27, 2010 Chilean Tsunami Travel Times



At 06:34:14 UTC, a M8.8 earthquake occurred offshore Maule, Chile, [35.846°S, 72.719°W], resulting in a Pacific-wide tsunami. Shown above are the tsunami travel time contours in hours, beginning from the 0-time of the earthquake.

圖片來源：NOAA，2010。

圖 2-2-14 2010 年智利海嘯傳遞時序圖

表 2-2-12 2010 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄

Tide gage	Peak amplitude (above sea level in cm)	Observed Initial Arrival time (UTC)	Computed Initial Arrival time (UTC)	Initial motion	Sample Interval (min)
Valparaiso, Chile	261	0637	0731	rise	2
San Felix, Chile	79	0648	0834	down	2
Santa Cruz, Galapagos, Ecuador	105	1243	none	up	1
San Pedro, Chile	40	0942	0926	up	2
Iquique, Chile	68	0848	0901	up	2
Corral, Chile	144	0730	0756	up	2
Coquimbo, Chile	164	0723	0750	up	2
Callao La Punta, Peru	69	1034	1034	up	6
Caldera, Chile	90	0747	0810	up	2
Baltra, Ecuador	41	1252	1311	up	1
Arica, Chile	118	0914	0922	up	2
Antofagasta, Chile	47	0815	0839	up	2
Ancud, Chile	59	0754	none	up	2
Acapulco, Mexico	65.6	1547	none	up	1
Cabo San Lucas, Mexico	35.9	1727	1743	up	1
Manzanillo, Mexico	60	1631	1652	up	1
Quepo, Costa Rica	?	1417	none	up	1
Alameda, California	12	2144	none	up	1
Arena Cove, California	39	2048	2104	up	1
Crescent City, California	64	2140	2146	up	1
Eureka (N. Spit), California	23	2136	2133	up	1
La Jolla, California	60	2002	2002	up	1
Los Angeles, California	42	2015	2015	up	1

表 2-2-12 2010 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

Tide gage	Peak amplitude (above sea level in cm)	Observed Initial Arrival time (UTC)	Computed Initial Arrival time (UTC)	Initial motion	Sample Interval (min)
Los Angeles, California	42	2015	2015	up	1
Monterey, California	36	2031	2043	up	1
Point Reyes, California	46	2059	2059	up	1
San Diego, California	40	2004	none	up	1
San Francisco, California	32	2120	2126	up	1
Santa Barbara, California	91	2030	2031	up	1
Santa Monica, California	64	2025	2025	up	1
Astoria, Oregon	5	?	2311	?	1
Charleston, Oregon	16	2205	2202	up	1
Port Orford, Oregon	32	2137	2150	up	1
South Beach, Oregon	16	2230	2229	up	1
Westport, Washington	14	2300	2257	up	1
Toke Point, Washington	9	2312	none	up	1
Port Townsend, Washington	10	0031 (JD 059)	none	up	1
Port Angeles, Washington	19	2350	2344	up	1
Neah Bay, Washington	23	2312	2307	up	1
La Push, Washington	22	2258	2256	up	1
Langara Point, BC	16	2352	2351	up	1
Tofino, BC	14	2317	2315	up	1
Winter Harbour, BC	22	2316	2316	up	1
Adak, Alaska	38	0142 (JD 059)	0142	up	1
Akutan, Alaska	22	0120	0125	up	15 sec
Alitak, Alaska	18	0150	0208	up	1

表 2-2-12 2010 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄 (續)

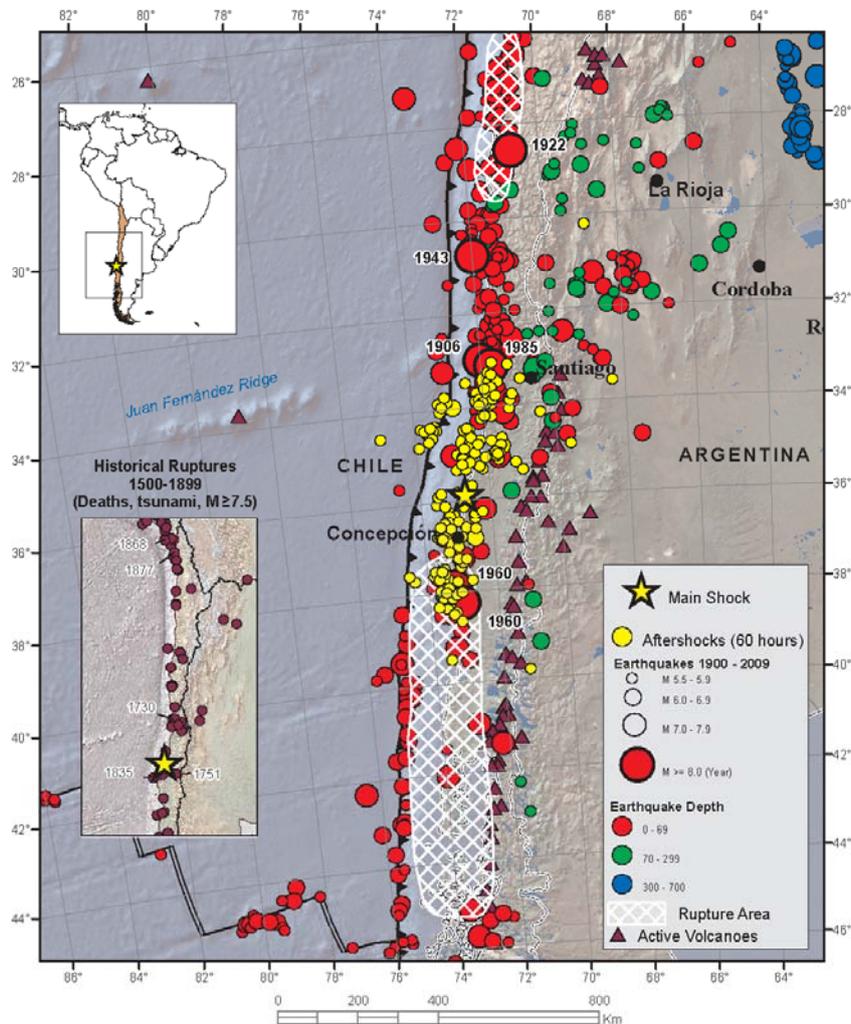
Tide gage	Peak amplitude (above sea level in cm)	Observed Initial Arrival time (UTC)	Computed Initial Arrival time (UTC)	Initial motion	Sample Interval (min)
Atka, Alaska	42	0130	0122	up	1
Cordova, Alaska	13	0220	0206	?	1
Craig, Alaska	23	0045	0100	up	1
Dutch Harbor, Alaska	19	?	0138	up	1
Elfin cove, Alaska	13	0035	0038	up	1
Juneau, Alaska	11	?	0135	up	1
Ketchikan, Alaska	6	?	0049	up	1
King Cove, Alaska	63	0140	0134	up	1
Kodiak, Alaska	36	0135	0128	up	1
Old Harbor, Alaska	51	0125	0138	up	1
Port Alexander, Alaska	18	0020	0015	down	1
Sand Point, Alaska	38	0130	0129	up	1
Seldovia, Alaska	12	?	?	?	1
Seward, Alaska	39	0140	0139	up	1
Shemya, Alaska	39	?	0221	?	15 sec
Sitka, Alaska	21	0030	0029	up	1
St. Paul Island, Alaska	18	0257	none	up	1
Valdez, Alaska	12	0210	0157	up	1
Yakutat, Alaska	36	0118	0119	up	1
Chatam Island, NZ	101	1824	none	up	15 sec
North Cape, NZ	23	2008	none	up	15 sec
Currimao, Philippines	16	0819	none	down	1
Gisborn, NZ	117	1919	none	up	15 sec
Johnston Island	21	2239	none	up	1
East Cape, NZ	24	1856	none	up	1

表 2-2-12 2010 年智利海嘯於太平洋地區波高紀錄（續）

Tide gage	Peak amplitude (above sea level in cm)	Observed Initial Arrival time (UTC)	Computed Initial Arrival time (UTC)	Initial motion	Sample Interval (min)
Midway Island	32	0026	0020	up	1
Owenga, Chatham, NZ	98	1816	1842	up	1
Pago Pago, Am. Samoa	71	1935	1954	up	1
Papeete, Fr. Polynesia	22	1733	1747	up	1
Penrhyn, Cook Is.	3	1930	1921	up	1
Raoul Island, NZ	50	1850	none	up	15 sec
Rikitea, Fr. Polynesia	32	1536	1541	up	1
Saipan	15	0404	none	up	1
Waitangi, Chatham Is.	78	1821	none	up	2
Wake Island	33	0122	0118	up	1
Apia, West Samoa	42	1948	2014	up	1
Rarotonga, Cook Is.	33	1816	none	?	1
Manus, PNG	37	0245	0214	up	1
Honolulu, HI	26	2147	2147	up	1
Kahului, HI	86	2141	2143	up	1
Kaumialapa, HI	29	2135	none	up	1
Kawaihae, HI	51	2129	2135	up	1
Nawiliwili, HI	40	2154	2154	up	1
Hanasaki, Japan	95	0443	none	up	1
Naha, Japan	30	0644	0627	up	1
Ofunato, Japan	40	0508	0508	up	1
Omaezaki, Japan	60	0558	0533	up	1
Tosashimizu, Japan	68	0638	none	up	1

資料來源：NOAA，2010。

2010 年智利外海規模 8.8 地震震央位置與 1960 年規模 9.5 之地震震央位置相近，1900 以來智利沿岸曾經發生地震的位置，如圖 2-2-15 所示，圖中星號表示 2010 年智利主震位置，最大的圓圈為規模大於 8.0 的地震位置，顯示各地震事件發生幾乎沿著板塊交界處分布。

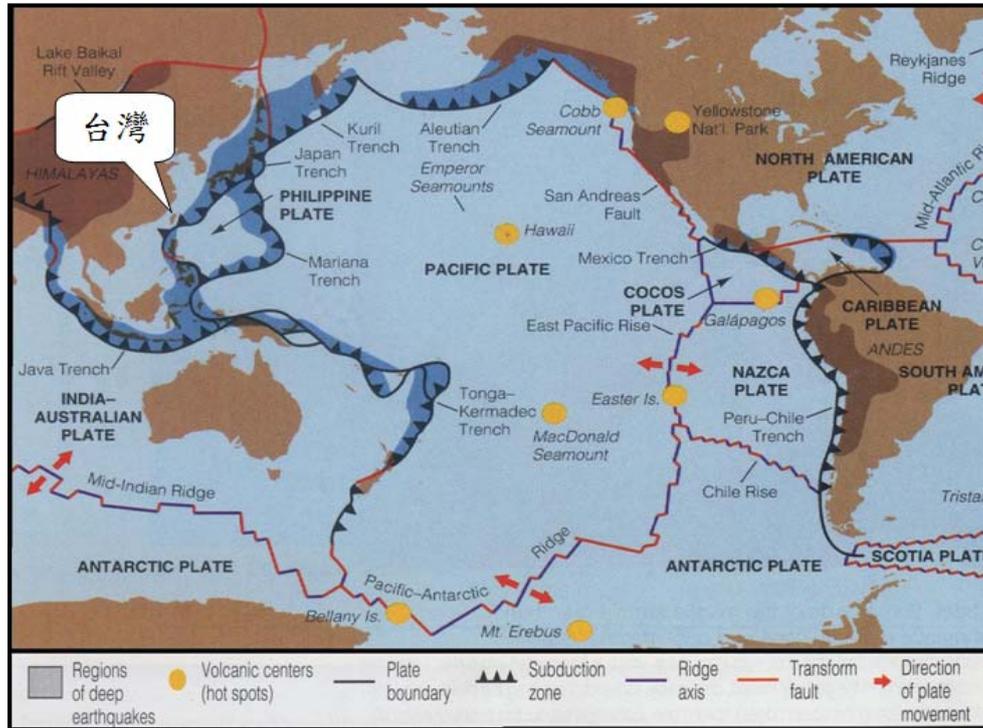


資料來源：USGS，2010。

圖 2-2-15 歷史智利地震規模及空間分布

在此歸納幾個比較大的地震事件，統計 1973 年以來智利外海共有 13 個規模超過 7.0 以上的地震紀錄，1985 年於智利瓦爾帕萊索 (Valparaíso) 板塊交界處發生曾發生規模 8.0 地震；1922 年於北瓦爾帕萊索發生規模 8.5 地震，在智利海岸科金博港口 (Coquimbo) 附近產生了高達 9 m 的海嘯波，並沖走夏威夷 Hilo 海港的船隻。在智利北部海岸及祕魯沿岸，於 1586 年、1687 年、1868 年及 1877 年，均有大地震及發生越洋傳播海嘯的紀錄，可看出於東太平洋盆地的那茲卡板

塊 (Nazca Plate) 與南美板塊 (South American Plate) 交界處的智利沿岸 (圖 2-2-16), 發生過數次全球最劇烈的地震活動, 大約每 10 年就出現規模 8.0 強震, 確實有引發越洋傳播海嘯的潛在危險。



圖片來源：Tom Garrison，2002。

圖 2-2-16 環太平洋地震帶分布圖

2-3 海嘯預警

由於重大海嘯所攜帶的能量極為龐大，且波長超長，就波浪消能的觀點來說，能夠消除海嘯的結構物必須具有相當巨大的空間尺寸，例如中國大陸東岸外海有廣大的大陸棚（continental shelf）地形，因大陸棚的淺水地形保護，來自太平洋的大海嘯在此大陸棚區內會消耗掉許多能量，使得海嘯災情不致像日本或夏威夷等地區一樣嚴重，寬廣的大陸棚地形即為消除海嘯的天然屏障，有些學者提出在海岸地區種植大片的密集林木，以吸收海嘯的能量，也有在海岸地區建築高大堅固的海堤，以防止海嘯的侵襲，目前為止並沒有一個實質有效的方法可以削減海嘯（張，2000）。

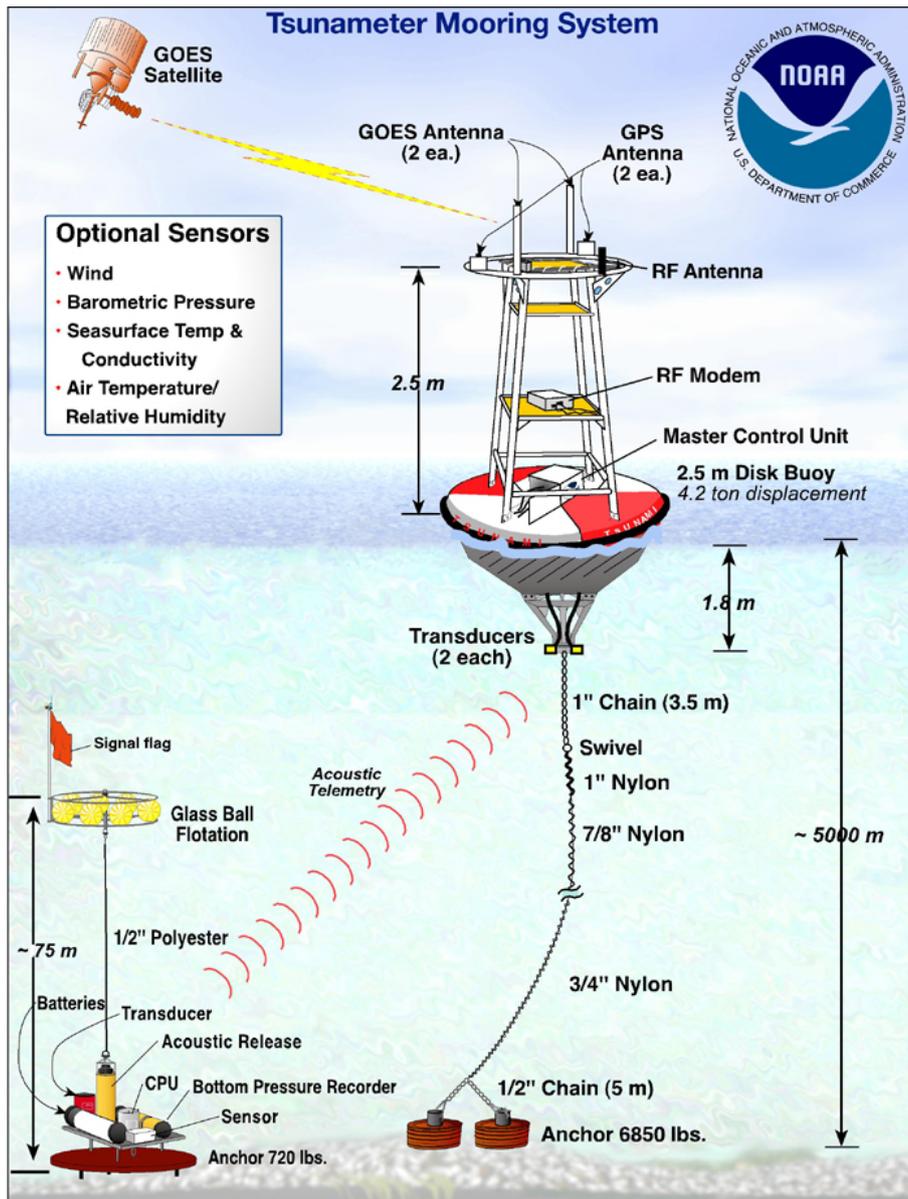
環太平洋地區早在檀香山設置了國際海嘯資訊中心（International Tsunami Information Center, ITIC），進行國際間的海嘯資訊傳遞及研究合作事宜。並重新整合美國政府於1949年設立的海嘯預警系統（Tsunami Warning System, TWS）機構，負責監測夏威夷附近區域的海嘯地震。由於1960年智利及1964年阿拉斯加大海嘯皆造成整個環太平洋地區嚴重的海嘯災害，於是1965年在夏威夷成立太平洋海嘯預警中心（Pacific Tsunami Warning Center, PTWC），以執行太平洋地區的海嘯預警作業（蕭等，2005）。

海嘯依發生位置來源可分為遠域海嘯（far field tsunami）與近域海嘯（near field tsunami），依中央氣象局之規定，震央在台灣300公里以外者，稱為遠域地震，如按國際規定，則以1000公里為標準（中央氣象局，2005）。通常遠域海嘯一旦在源地生成後，在無島嶼群、珊瑚礁及淺水陸棚阻擋情況下，一般可傳播很長的距離而能量衰減很少，因此造成數千公里之遙的地方也遭受海嘯災害，此種遠域海嘯到達台灣可能需要一、二十小時以上，雖然海嘯的行進速度甚快，但由於遠域海嘯到達海岸尚有時距，所以海嘯預警系統可以達到預警的效果。當海嘯於源地發生時，太平洋海嘯預警中心會發布警報，由此，我們有充裕的時間進行應變準備。

太平洋海嘯預警中心（PTWC）運作的主要功能在於1、利用地震儀系統偵測並定位出所有可能引發海嘯的海底地震，2、透過太平洋各地的潮汐觀測站監視確認海嘯是否形成，3、當海嘯形成後，估算海嘯抵達岸邊的時間並向可能受

影響的地區或國家提供警報訊息。地震的資料是由太平洋海嘯預警中心、阿拉斯加海嘯預警中心 (ATWC)，美國國家地震中心 (NEIC)，以及參與 PTWC 的各會員國提供，在深海中的海嘯資訊，可利用錨碇在海底的高精度壓力感應儀，偵測出海面的海嘯狀況，透過衛星將此資料傳送至海嘯預警中心作為發布海嘯訊息的參考 (圖 2-3-1)，台灣雖然不是 PTWC 的會員，但仍可接收到 PTWC 的警報訊息。如果測得地震的位置和規模達到已知產生海嘯的標準，PTWC 就發布一個緊急海嘯災害警告 (Tsunami Warning) 的海嘯警報 (表 2-3-1)，警報內容為在數小時內海嘯可能到達地區的預估到達時間，以提供各會員國在鄰近海嘯地區的防災準備。根據美國國家海洋大氣總署 (NOAA) 資料，若夏威夷當地發生海嘯後其表面波浪到達台灣東岸所需的時間約十二個小時，若是發生在南美洲的外海則需約一日的時間抵達台灣。

舉例來說 2004 年 12 月 26 日的南亞大海嘯，印尼外海發生強震時，多國的研究人員在定出規模與位置後，便極為擔心將會引發海嘯，但卻苦無方法通知當地人員發佈警報，失去了拯救生命的機會 (邱，2005)。由於地震發生後，鄰近的監測站可以在數分鐘之內測知，並判定震央及強度，及時對可能受海嘯侵襲的地區發出警報。由震央印尼亞齊省外海到斯里蘭卡距離約 1600 公里，海嘯的巨浪到達需 2.5 小時，如果能預先發布警報，所有的人都有足夠的時間撤至安全地點。由於缺少預警系統，斯里蘭卡傷亡慘重，甚至遠在東非的索馬利亞也有數百人喪生。但在震央附近的印尼錫默盧島 (Simeulue)，島民憑藉「發生地震立即往山上跑」的古老傳說，據報導在這次南亞大海嘯中竟然全島無一人傷亡 (吳，2007)。因此，建立海嘯預警系統，並且準備好發生海嘯時的撤離路線是必要的。



資料來源：NOAA，2010。

圖 2-3-1 太平洋海嘯測報系統

表 2-3-1 太平洋海嘯警報中心海嘯警報內容種類

警報資訊	說明	發布時機
Pacific-wide Tsunami Warning Bulletin	<ol style="list-style-type: none"> 1. 確認太平洋地區有可能發生災害性海嘯。 2. 海嘯除了可能對於震源地區產生災害外，同時對於整個環太平洋的海岸線將造成威脅。 3. 每個小時更新警報內容，直到海嘯警報取消為止。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 地震規模大於 7.5，同時根據潮位站資料，確認海嘯發生後發布。 2. 持續發布警報，直到海嘯警報取消為止。
Regional Tsunami Warning/Watch Bulletin	<ol style="list-style-type: none"> 1. 藉由地震資料，初步判定海嘯發生之可能性。 2. 透過陸續傳回之潮位資訊，更正警報內容。 3. 以警報發布時間為準，對於海嘯波將於 3 個小時內到達的國家發布警報 (Warning)，海嘯波將於 3 到 6 個小時到達的國家發布注意報 (Watch)。 4. 約每個小時更新警報內容，直到將警報升級成 Pacific-wide Tsunami Warning Bulletin 或是取消為止。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 地震規模大於 7.5 時發布。 2. 透過陸續傳回之潮位資訊，持續發布警報，直到警報升級成 Pacific-wide Tsunami Warning Bulletin 或是取消為止。
Tsunami Information Bulletin	<ol style="list-style-type: none"> 1. 告知太平洋地區或近太平洋地區發生大規模地震，但根據評估將不會發生災害性海嘯。 2. 告知內容包括下列三種： <ol style="list-style-type: none"> (1) A Pacific-wide tsunami was not generated based on earthquake and historical tsunami data. This will be the only bulletin issued. No Pacific-wide tsunami Warning is in effect. (2) An investigation is underway to determine if a Pacific-wide tsunami has been generated. Additional bulletins will be issued hourly or sooner as information becomes available. No Pacific-wide tsunami warning is in effect. (3) No destructive Pacific-wide tsunami threat exists. However, some areas may experience small sea level changes. This will be the final bulletin issued unless additional information becomes available. No Pacific-wide tsunami warning is in effect. 	地震規模大於 6.5，小於 7.5 時發布。
Tsunami Communication Test	<ol style="list-style-type: none"> 1. 測試太平洋海嘯中心與警報接收單位線路通訊狀況。 2. 強化接收單位警報回報熟悉程度。 	不定時，約每個月一次。

資料來源：蕭等，2005。

在南亞海嘯災難之後，建立全球海嘯早期預警制度已是普遍共識，世界氣象組織（World Meteorological Organization, WMO）、聯合國教科文組織（United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, UNESCO）、及世界主要國家並已著手規劃建立印度洋海嘯預警系統。太平洋海嘯預警中心目前共有 26 個會員國，共同參與太平洋地區海嘯資料的收集、情報交換，以及海嘯預警工作。雖是太平洋海嘯預警組織之會員國日本，卻還是建立本身所需的海嘯觀測系統，務求在第一時間主動觀測並發布警報也會提供台灣警報訊息。日本氣象廳為有效掌握海嘯訊息，近年來發展了多項監視科技與資料整合系統，簡要彙整如下：

- (1) 氣象廳為迅速判斷有無海嘯之發生，在全國約 180 個地點設有配置地震器之海嘯地震早期監視網，採取 24 小時全天候作業體制，監看全國地震之發生情況。利用「緊急資訊衛星同步通報系統」，快速且正確傳達海嘯之預報。海嘯預報資訊傳抵防災和報導機構後，透過大眾傳媒、宣傳車等向居民通告。
- (2) 另在全國約 600 個地點設置震度器，為因應遠離日本之太平洋海域發生大地震所帶來之海嘯，與夏威夷之「太平洋海嘯警報中心」密切聯絡，並獲取對日本有影響之海嘯資訊。
- (3) 另外氣象廳亦導入具最新自動處理技術之系統，迅速發表海嘯預報。該系統名為「地震海嘯監視系統 ETOS」(Earthquake Tsunami Observing System)。
- (4) 1995 年 1 月 17 日阪神大地震之後，幾乎日本所有都、道、府、縣等行政區域轄下之區、市、町、村均設有地震觀測點。上述全國的觀測點與氣象廳之觀測點，合計約達 3800 處，形成了平均約每 10 平方公里即有觀測點之高密度觀測網。氣象廳在各都、道、府、縣之協同合作下，取得震度器之紀錄資料後，與氣象廳本身資料進行整合，以利發表正確的地震資訊。
- (5) 日本氣象廳並律定海嘯預報種類如表 2-3-2。

表 2-3-2 日本氣象廳海嘯預報分類表

預報種類		說明	海嘯浪高
海嘯警報	大海嘯	評估海嘯產生之浪高將高於 3 公尺以上者，需嚴密戒備。	3(公尺)、4、6、8、10 以上
	海嘯	評估海嘯產生之浪高為 2 公尺左右者，需警戒。	1(公尺)、2
海嘯注意報	海嘯注意	評估海嘯產生之浪高為 0.5 公尺左右者，需留意。	0.5(公尺)
無海嘯。			

資料來源：日本氣象廳網頁

當日本發生大地震海嘯時，內閣總理大臣和各省廳主要負責人必須在內閣總理大臣官邸組成「緊急集合小組」或「危機管理中心」，分析災情，制定對策。根據氣象廳提供各種災情預報，消防人員、警察和自衛隊即組成救援隊，應當地政府的要求，立即投入緊急救援活動。電力、瓦斯、自來水公司、通信、交通等部門都有各自的防災計畫及組織，海嘯發生時，即可各自應變搶救，也可以整合統一行動。此外日本氣象廳製作了一部海嘯宣導影片，以 CD-ROM 的形式在各地區氣象台與氣象機關、全都道府縣、全市町村置放，供民眾索取及網路下載，內容主要為透過過去海嘯歷史紀錄的傳達與災害狀況描述，讓民眾體會海嘯的危險性，並隨後告知避難要訣。日本政府及相關單位也針對各海嘯危險地區製作海嘯災害地圖，災害地圖中清楚列示海嘯危險區、避難場所及避難道路選擇等有助於避難撤離效率的內容（李等，2008）。

台灣地區海嘯警報發布作業部份，經過中央氣象局的評估規劃以及國內專家學者的建議，參考過去災害性海嘯紀錄，並考量區域性地震活動特徵及鄰近海域地體構造，將台灣地區海嘯危險性分為 1 至 3 級（表 2-3-3），其中由於台北縣以及基隆市曾經在 1867 年發生過災害性海嘯，因此被列為第 1 級最有可能遭受海嘯侵襲的地區。至於資料顯示可能有海嘯紀錄或疑似海嘯紀錄，但無海嘯災害的縣市則被列入第 2 級，各縣市政府訂定因應海嘯侵的應變措施時，因其海嘯威脅等級的不同，而制定不同程度的應變計畫（蕭等，2005）。

表 2-3-3 台澎金馬沿海地區海嘯危險性分級表

區域	縣市	說明
I	台北縣、基隆市	資料顯示有海嘯災受害者。
II	台中縣、彰化縣、雲林縣、嘉義縣、台南縣市、高雄縣、高雄市(含東沙、南沙)、屏東縣、台東縣、花蓮縣、宜蘭縣、澎湖縣	資料顯示可能有海嘯紀錄或疑似海嘯紀錄,但無海嘯災受害者。
III	桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣、金門縣、連江縣	資料顯示並無海嘯紀錄,但可能受影響者。
附註：台北市、台中市、嘉義市、南投市未臨海，無海嘯威脅。		

資料來源：中央氣象局。

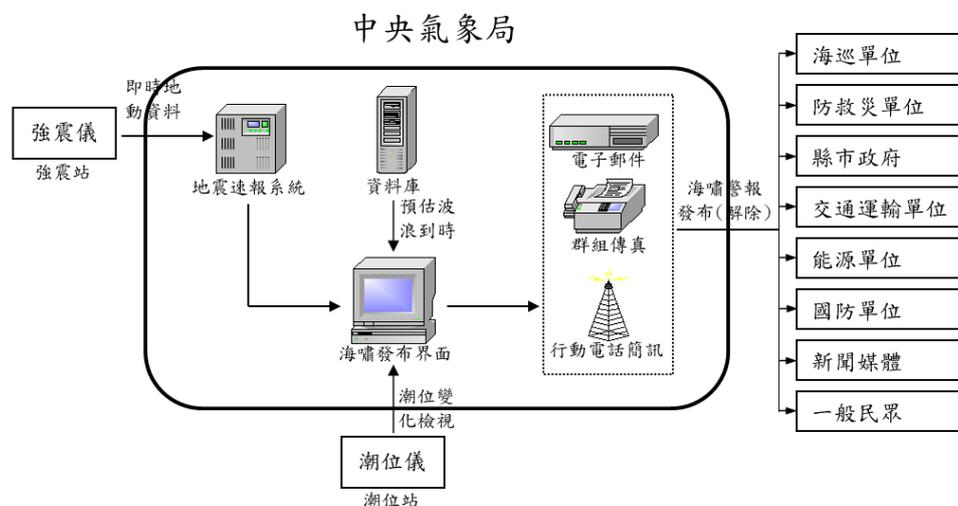
中央氣象局觀測到我國沿海發生波高 50 公分以上之海嘯時，將儘速發布海嘯報告，並迅速通報中央災害防救主管機關、相關單位以及新聞傳播機構，採取必要措施。台灣海嘯警報發布作業規定主要依現階段中央氣象局發布海嘯警報的的作業方式所制定，其完整條文如下（參考氣象預報警報統一發布辦法）：

1. 遠域地震所引起海嘯通報：預測海嘯將於三小時內到達我國沿海時，應發布海嘯警報，並迅速通報中央災害防救主管機關、相關單位以及新聞傳播機構，籲請沿岸居民防範海嘯侵襲。
2. 近域地震所引起海嘯通報：當偵測到台灣沿岸及近海發生地震規模七以上，震源深度淺於三十五公里之淺層地震時，發布海嘯警報，並迅速通報中央災害防救主管機關、相關單位以及新聞傳播機構，籲請沿岸居民防範海嘯侵襲。

海嘯警報發布後，經中央氣象局研判海嘯之威脅解除時，應即解除海嘯警報。

中央氣象局現階段將近域地震所引起海嘯的警報作業與地震速報系統相結合，藉由地震速報系統迅速有效的地震偵測能力，配合海嘯走時數值模擬結果，針對近域海嘯發出警報通知，作業流程如圖 2-3-2（蕭等，2005）。在台灣西南方或東北方海域（與台灣陸地有數百公里的距離）發生海嘯，若能及時發布海嘯警報，可能可以避免嚴重損失，台灣有必要儘早建立海嘯預警系統。但是若海嘯發生在離岸數十公里，到達海岸時距可能只有數分鐘，預警系統不易發揮預期效果，此種近域海嘯的預防工作，除了有預警系統之外，最重要是必需建立民眾對於海嘯災害的警覺與認識才能有效的減少災害（陳，2005b）。台灣目前所發布的

海嘯警報也僅止於預估初波到達時間，並未預估海嘯高度，有必要建立完整的海嘯預估作業程序作為海嘯預警及災害防治參考。



圖片修改自：蕭等，2005。

圖 2-3-2 中央氣象局近域海嘯發布作業流程圖

一個區域性海嘯預警系統的技術層面並不困難，但關鍵在整個機制的有效運作。國外海嘯災害頻繁地區於通訊、溝通、因應、民眾與決策者的教育，以及地方、國家、及區域系統都能有效的整合，決定了預警系統是否能充分發揮效能。政府除了加強海嘯相關的研究、建立預警及救難制度之外，更應積極建立全民對海嘯防災的認識，圖 2-3-3 為美國奧勒崗州海岸上之海嘯警告標誌，提供民眾在海嘯發生時的撤離路線指示。



圖片來源：Tom Garrison, 2002。

圖 2-3-3 美國奧勒崗州海岸中部小鎮上之海嘯災害逃生警告標誌

海嘯的可怕在於其發生頻率低，且看不出事發前的徵候，甚至沒有明顯地震感覺，通常發生海嘯時，海岸邊水位可能有異常的上升或下降現象，國際海嘯資訊中心 ITIC 提出了以下十項海嘯安全守則，提供人們對海嘯的簡單認識，以及海嘯發生時之處置參考：

1. 並非所有地震都會造成海嘯，但許多地震都會產生海嘯，當聽到地震發生時，就準備可能有海嘯緊急事件發生。
2. 在你的附近有地震發生就是海嘯的自然警訊，感覺到強烈地震後，不要停留在海岸的低窪區域。
3. 海嘯並非僅有一個波浪，而是有一系列的波浪，停留在安全的地方，直到有關當局發佈了完全解除警報。
4. 海嘯接近海岸時，有時會有海水的上升或下降發生，這是海嘯的自然現象，必須加以留意。
5. 在某處海嘯很小，但在數公里外可能有極大的海嘯，不要因為一處的小規模海嘯，而失去了對海嘯的戒心。
6. 太平洋海嘯預警中心不會發布假海嘯，當海嘯警報被發佈時，表示確是有海嘯存在，1960 年夏威夷海嘯，因為人們認為又是一次假海嘯警報，造成 61 人死亡。
7. 所有的海嘯都跟颶風一樣危險，即使他們不一定在所有的通過區域都造成災害。
8. 絕不要下到海邊去觀看海嘯，當你能看到海嘯時，就會因為太靠近而無法逃避海嘯。
9. 海嘯或早或晚都會影響到太平洋區域的海岸，如果是住在太平洋海岸區域，海嘯警報就有幫助。
10. 在海嘯緊急事件發生時，當地的救難單位、警察、以及其他的緊急事件處理組織，都在設法救你的性命，請盡量予以配合。

由於台灣不是 PTWC 及 WMO 的成員，沒有參與及取得相關資訊的直接管道，但國內仍可透過電子郵件和網際網路與 PTWC 保持聯繫，以掌握國際上海嘯有關之最新資訊。未來可積極參與雙邊（中國、日本、印尼等）、或區域性（例如 PTWC）合作計畫，建議能與 PTWC 建立合作管道，不論是由中央氣象局派

專人至 PTWC 進行交流，或邀請 PTWC 人員至中央氣象局舉辦研討會，一方面可經由國際合作提供雙方海嘯預警、防災上的研究成果，另一方面也加強我國在國際間之交流活動。

第三章 數值模式之建立

地震是一突發性的自然現象，發生時間、位置及大小目前尚無法事前預知，但若有長期的統計紀錄，可以推估地震頻率特性（楊等，1983）。歷史海嘯大多是以文字敘述記載，近數十年來由於驗潮技術日益精進，水位觀測實際運作，海嘯發生的水位變動可被予以記錄，但自有儀器記錄水位資料以來的時間並不長，尤其海上大地震不多，不足以作為統計之用。海嘯的波長相當大，理論上可視為淺水波，隨著電腦的計算速度及記憶容量的快速提昇，使得運用數值模式模擬海嘯，成為一可靠且相當經濟可行的方法。

於 1990 年在南加大召開的國際長波湖上研討會中，對於海嘯的數值模擬就有十分深入的探討（黃，2005），歷經十餘年的研究發展，全球已有十分成熟的模式問世，目前常見的海嘯數值模擬模式有 1998 年美國南加州大學發展之 MOST (Method Of Splitting Tsunami) model、1994 年美國康乃爾大學發展之 COMCOT model、1996 年日本東北大學發展之 TIME model、美國阿拉斯加大學發展之 UAF Tsunami Model 及日本港灣空港研究所 (PARI) 所發展之線性頻散海嘯模式 (Linear Dispersion Equation) 等（張，2008）。

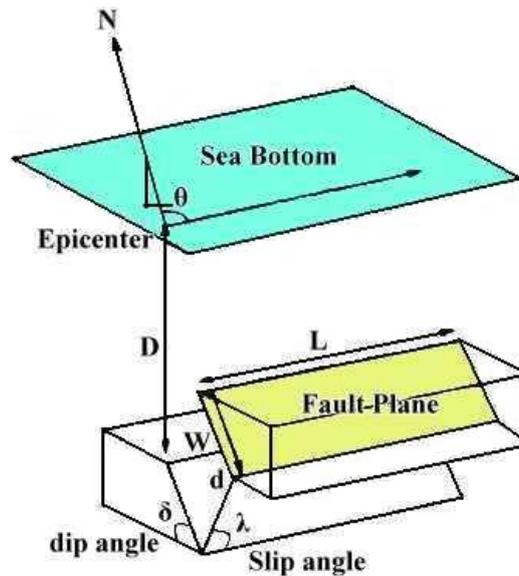
為了建立適用於台灣地區的海嘯模擬系統，本研究係利用康乃爾大學土木及環境工程學系劉立方教授 (Professor Philip Liu) 所研發之 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model) 數值模式 (Liu 等，1994)。本模式由程式語言 Fortran 撰寫而成，修正各參數及台灣周邊海域環境後，用來模擬海嘯在海洋中產生、傳遞以及傳播到海岸地區的湖上變化，在模式中分別利用線性淺水波方程式 (linear shallow water wave equation) 及非線性淺水波方程式 (nonlinear shallow water wave equation)，配合不同的座標系統來計算；並採用蛙躍式 (leap-frog scheme) 的有限差分格點系統，模式考慮到頻散效應 (frequency dispersion effects) 及海底摩擦 (bottom friction) 的影響；海岸線附近則使用移動邊界 (moving boundary) 處理，使海嘯波於近岸地區的模擬狀況較為符合實際之情形。

3-1 海嘯模擬理論

海嘯的演變過程包括產生 (generation)、傳遞 (propagation) 及溯上 (run-up) 三個部份 (Goring, 1992)。海嘯在大洋中產生後，可能以約每小時數百公里的速率在大洋中傳遞，其波高不超過 2 公尺，遠小於波長，此時海嘯在運動時所造成的水體流速 (velocity) 則不大。但海嘯在到達海岸地區時，因水深變淺，使海嘯波長縮小，波高增大，流速急速增加，使海嘯以高速前進，並攜帶海岸附近一些岩石或船筏等物體，一起衝向內陸，海嘯溯上高度常超過數十公尺以上，因此造成嚴重的災害 (Gonzalez, 1999)。

本研究使用美國康乃爾大學發展的康乃爾多重網格藕合海嘯模式 (COMCOT) 配合台灣地區高解析度水深及地形資料進行模式穩定性測試後，執行 2010 年智利海嘯越洋傳遞模擬及台灣近域海嘯溢淹模擬，並撰寫輸出結果處理程式，製作智利海嘯由太平洋東部越洋傳遞至台灣近岸及近域海嘯發生淹溢高雄市及台南市之動畫檔，使模擬之結果展示簡明易懂。

海底斷層現象造成海洋表面海水產生大量的水體運動，是產生海嘯的主要來源，但此兩者間理論上的變化關係，常是海嘯模擬的主要困難之一。斷層現象大致由以下斷層參數組成(圖 2-1)，斷層長度 (length of fault, L)、斷層寬度 (width of fault, W)、震源深度 (focal depth, D)、斷層垂直位移高度 (vertical displacement, d)、斷層傾角 (strike direction, θ)、斷層垂直向上傾角 (slip angle, λ)，及垂直向下傾角 (dip angle, δ)。Mansinha & Smylie (1971) 提出一個目前普遍應用的海底斷層與海嘯初始波形關係：彈性半空間錯移模型 (elastic half-space dislocation model)，可由海底斷層活動所造成的 strike-slip 和 dip-slip 位移得到，本研究即是引用 Mansinha 與 Smylie (1971) 的理論產生斷層引發海嘯初始波形。



圖片來源：修改自 Imamura et al., 2006.

圖 3-1-1 斷層參數

雖然線性淺水波理論足以描述海嘯在大洋中傳遞的特性，但當海嘯進入淺水地區，會在海岸線 (shoreline) 附近產生溯上的現象，本文所依據之淺水波方程式是由 Boussinesq 方程式所推導而出。當入射波前進到淺水區域時，因海底地形的淺化 (shoaling)，海嘯波高會迅速增大，波長也會變短，使得非線性 (non-linear) 項的影響變成不可忽略的一環。底部摩擦 (bottom friction) 的影響變得非常重要，在水深趨淺及波高加大的情況下，使得由海嘯通過引起海水流動與海底底床間的摩擦作用也大幅提高。Boussinesq 方程式並沒有考慮底部摩擦，故 Liu 等 (1994) 在動量方程式中分別加入摩擦項 $\tau_x H$ 與 $\tau_y H$ 如 (3-2) 及 (3-3) 式所示，而柯氏力項及頻散項的影響則相對的較不重要，可予以忽略。

於近岸考慮底部摩擦作用的非線性淺水波方程式可以下列基本控制方程式表示之 (Liu et al., 1994)。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P^2}{H} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{PQ}{H} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{PQ}{H} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{Q^2}{H} \right] + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \quad (3-3)$$

t：時間

x、y：直角座標系統

P：x 方向深度平均之流量 (= uH，u 為 x 方向係數)

Q：y 方向深度平均之流量 (= vH，u 為 y 方向係數)

g：重力加速度常數

H：全水深 (水深加上波高)

ζ：自由表面之變動水位

τ_x、τ_y：x 及 y 方向底部摩擦係數

上式中的底部摩擦項的剪應力 τ_x 及 τ_y，採用 Chezy's formula 或 Manning's formula 來處理，其關係分別如下所述：

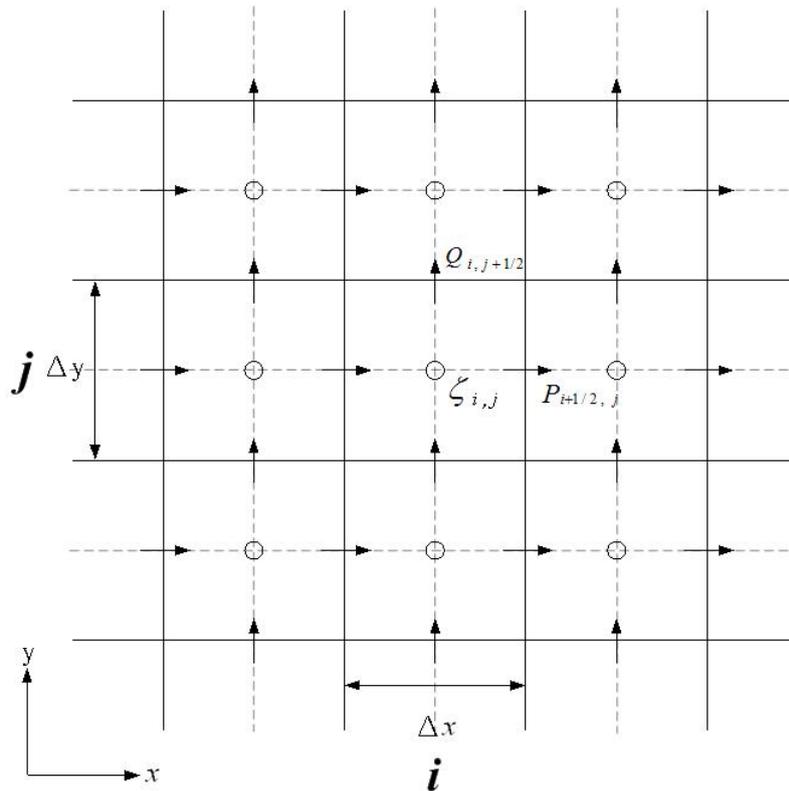
$$\tau_x = \frac{g}{C_f^2 H^3} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{g}{C_f^2 H^3} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3-4)$$

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{10/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \frac{gn^2}{H^{10/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (3-5)$$

上式中的 C_f 表示 Chezy 的摩擦係數，而 n 代表 Manning 的相對粗糙係數，此兩經驗常數都與流動狀況及底部的表面粗糙度有關。

3-2 數值處理方法與多重網格模式

就模式的實際運算而言，是採用交錯的有限差分格點系統 (staggered finite difference grid system) 來執行 (如圖 3-2-1)，其處理的過程為先使用連續方程式 (continuity equation) 計算 (i, j) 格點在第 $(n + 1 / 2)$ 時刻的自由表面水位 $\zeta_{i,j}^{n+1/2}$ ，而此計算需使用前一時刻的體積流量 (volume flux) 以及自由表面水位，接著再計算在第 $(n+1)$ 時刻的體積流量 $P_{i+1/2}^{n+1}$ 及 $Q_{i,j+1/2}^{n+1}$ ，體積流量和水位是由不同的位置分別計算，圖 4-2 顯示在格點中央計算水位，而在格點四周計算體積流量。如此的計算方法，表面水位和體積流量在時間及空間方面都是採交錯式處理。



圖片來源：修改自 Liu et al., 1998。

圖 3-2-1 交錯的有限差分格點系統

非線性淺水波方程式的差分化仍以 leap-frog scheme 為主，但此法並不適用於

於 $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right)$, $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right)$, $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right)$, $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right)$ 等，這些非線性對流項

(nonlinear convective terms) 是以較簡單的 upwind scheme 處理。

由於使用 upwind scheme，動量方程式 (momentum equation) 經差分化後的精度僅達空間網格大小的一階，其關係為

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{(P_{i+3/2, j}^n)^2}{H_{i+3/2, j}^n} + \lambda_{12} \frac{(P_{i+1/2, j}^n)^2}{H_{i+1/2, j}^n} + \lambda_{13} \frac{(P_{i-1/2, j}^n)^2}{H_{i-1/2, j}^n} \right] \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[\lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+1/2, j+1}^n}{H_{i+1/2, j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+1/2, j}^n}{H_{i+1/2, j}^n} + \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+1/2, j-1}^n}{H_{i+1/2, j-1}^n} \right] \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1, j+1/2}^n}{H_{i+1, j+1/2}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i, j+1/2}^n}{H_{i, j+1/2}^n} + \lambda_{33} \frac{(PQ)_{i-1, j+1/2}^n}{H_{i-1, j+1/2}^n} \right] \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) = \frac{1}{\Delta y} \left[\lambda_{41} \frac{(Q_{i, j+3/2}^n)^2}{H_{i, j+3/2}^n} + \lambda_{42} \frac{(Q_{i, j+1/2}^n)^2}{H_{i, j+1/2}^n} + \lambda_{43} \frac{(Q_{i, j-1/2}^n)^2}{H_{i, j-1/2}^n} \right] \quad (3-9)$$

底部摩擦項經差分化的形式如下

$$\tau_x H = v_x (P_{i+1/2, j}^{n+1} + P_{i+1/2, j}^n) \quad (3-10)$$

$$\tau_y H = v_y (Q_{i, j+1/2}^{n+1} + Q_{i, j+1/2}^n) \quad (3-11)$$

上式中 v_x, v_y 在 Chezy's formula 的關係式如下所示

$$v_x = \frac{1}{2} \frac{g}{C_f^2 (H_{i+1/2, j}^n)^2} \left[(P_{i+1/2, j}^n)^2 + (Q_{i+1/2, j}^n)^2 \right]^{1/2}$$

$$v_y = \frac{1}{2} \frac{g}{C_f^2 (H_{i, j+1/2}^n)^2} \left[(P_{i, j+1/2}^n)^2 + (Q_{i, j+1/2}^n)^2 \right]^{1/2}$$

在 Manning's formula 的關係式則為

$$v_x = \frac{1}{2} \frac{g n^2}{(H_{i+1/2, j}^n)^{7/3}} \left[(P_{i+1/2, j}^n)^2 + (Q_{i+1/2, j}^n)^2 \right]^{1/2}$$

$$v_y = \frac{1}{2} \frac{g n^2}{(H_{i, j+1/2}^n)^{7/3}} \left[(P_{i, j+1/2}^n)^2 + (Q_{i, j+1/2}^n)^2 \right]^{1/2}$$

粗糙度越大，摩擦力越大，影響流體流動之流速也越慢。本文採用 Manning's

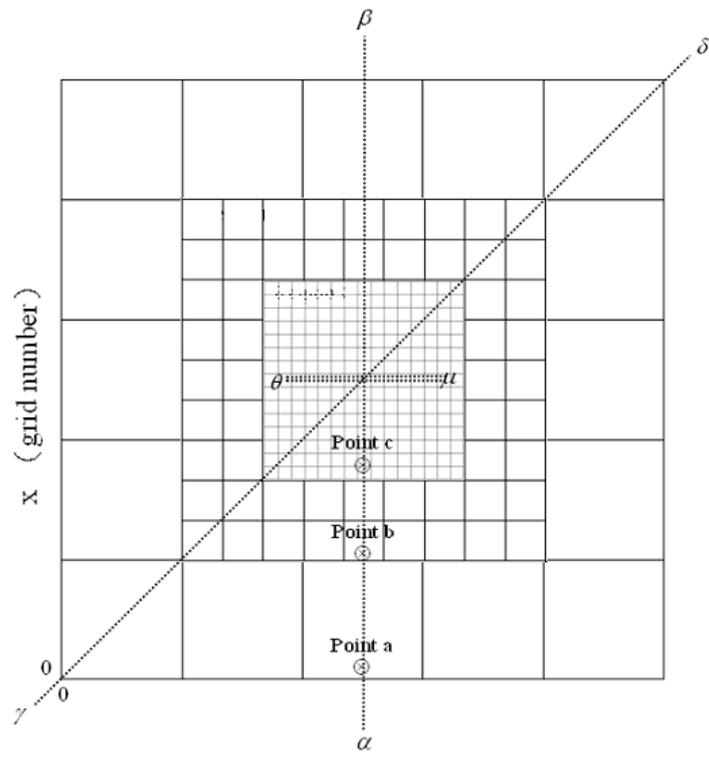
formula 進行底部摩擦項的處理 (Liu et al., 1994)。

另外，本模式特別之處乃是使用多重網格耦合的數值模式來處理，可提高模擬海嘯運動之效率。以不同的網格大小，分別模擬遠方海嘯在大洋中傳遞，及其後自外海進入淺水地區溯上過程的模擬作業，可更合理的模擬海嘯產生後，在海洋中傳遞及在近岸地區溯上的不同特性，較為符合實際之情形。

海嘯在海洋中傳遞時，其特性的變化屬較緩慢之演變，在進入海岸地區時，受淺化效應的作用，在較短的歷程中便有明顯的波形變化。本模式之多重網格系統 (multi-grid system)，模擬海嘯在大洋中傳遞時，所使用的網格共為第一區域 (最外層計算區域 REGION 1) 如圖 3-3-1 所示，考慮了地球曲面效應、頻散效應及科氏力造成的偏轉效應，所以在此網格系統中，所使用之座標系統為球面座標系統。

而第二區域 (REGION 2) 網格是在第一區域 (REGION 1) 的網格之中，當模擬海嘯於近岸地區溯上時，則必須考慮到近岸的非線性效應 (nonlinear effect) 而忽略科氏力效應，所以底部摩擦的影響就變得非常重要，在第三區域 (REGION 3) 網格大小減小，所使用的網格系統則必須為卡氏座標系統 (Cartesian coordinate system)，亦即直角座標系統 (rectangular coordinate system)，而模式的計算是依據非線性淺水波 (nonlinear shallow water) 控制方程式 (3-1) 至 (3-3) 式 (Liu et al., 1994)。因此，由上述兩種處理過程可分別滿足海嘯在大洋中傳遞，及在近岸地區溯上的兩種不同特性之需求。

小網格區域是包含在大網格之內，如圖 3-2-2 所示，不同網格區域間的資料處理過程為：在某一時間階層，先由動量方程式計算整個大、小網格內的體積流量，但在大、小網格邊界上小網格的體積流量，是由邊界上大網格的資料經過 1:3 或 1:5 比率線性內差處理，得到小網格中次一時間階層在邊界上的體積流量，小網格在下一時刻接著利用連續方程式計算出水位，直到小網格內的水位計算達到大網格的次一時間階層，才利用連續方程式更新大網格部份的水位，如此交互使用動量方程式及連續方程式，計算更新各層網格格點上之流量 (Q) 及格點內之水位 (ζ)。



圖片來源：Liu et al., 1998。

圖 3-2-2 多重網格系統

3-3 移動邊界

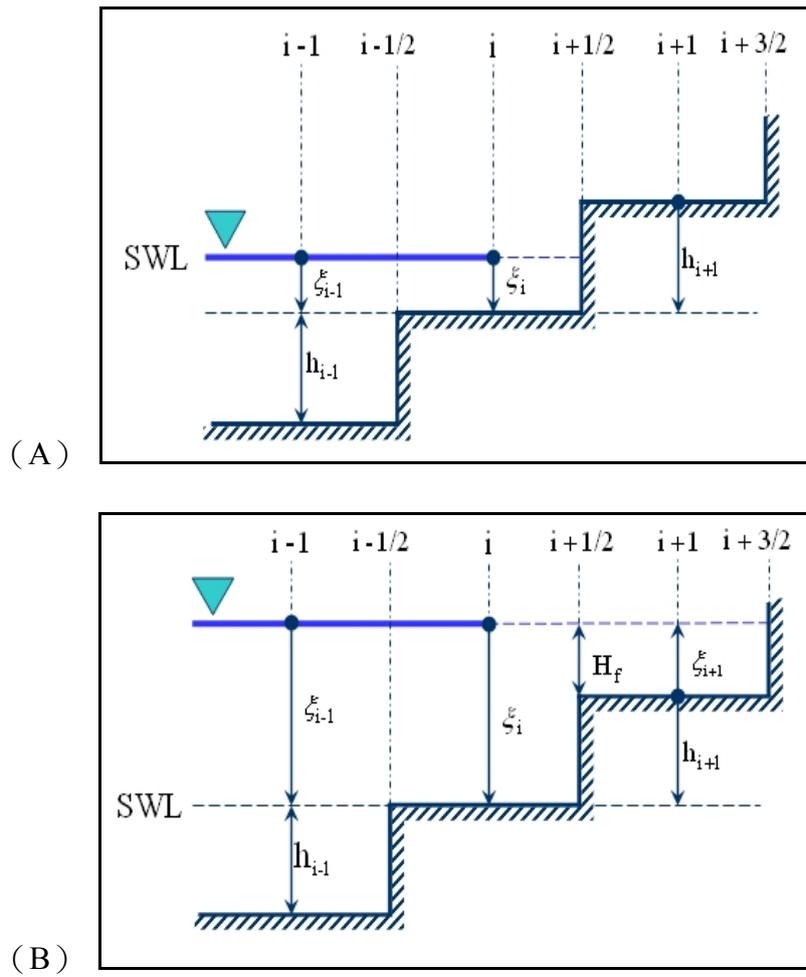
為合理的模擬出海嘯在近岸地區實際的溯上及溯下動態變化，在水陸交界處的水位變動採用移動邊界處理 (moving boundary treatment)。圖 3-3-1 為移動邊界處理之示意圖 (A) 及 (B)，如圖所示之近岸地形剖面係以一階梯形式代表。在網格格點 $i-1$ 、 i ，及 $i+1$ 處計算全水深 H ，而在 $i-1/2$ ， $i+1/2$ ，及 $i+3/2$ 處計算流量，圖中 SWL 代表靜止水位， ξ 表示自由表面之變動水位， h 為自靜止水位算起之水深 (網格為陸地時， h 為負值，網格為水域時， h 為正值) 而 H_f 代表淹水深度。就陸地網格而言，全水深 H ($H = h + \xi$) 為負值，而在水域部份則為正的 H 值，海岸線即介於正、負 H 值網格之間。由連續方程來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，在此過程中必須判定計算網格點之全水深是否足以使水移往鄰近的陸地網格 (移動海岸線)。動量方程式則更新在水域部份的流量。

判定移動海岸線的法則可使用一維的情況加以說明，如圖 3-2-1 (A) 所示， i 處是水域，其全水深為正值， ξ_i 表 i 處自由表面之變動水位， h_i 為 i 處自平均水位算起之水深，而 $i+1$ 處是陸域，其全水深為負值且流量為零。海岸線即介於 i 和 $i+1$ 間，因此在 $i+1/2$ 處的流量即為零，海岸線不會移動。當水位上升使得 $i+1/2$ 處的流量不為零時如圖 3-2-1 (B)，海岸線即會向岸方向移動一個網格。在全水深由連續方程更新後，即可由下列方式判斷海岸線是否會移動，此時 $H_i > 0$ 。

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

(ii) 若 $H_{i+1} \leq 0$ 且 $h_{i+1} + \xi_i > 0$ ，則海岸線移往 $i+1$ 和 $i+2$ 之間，流量 $P_{i+1/2}$ 可能為非零值。但 $P_{i+2/3}$ 仍為零，淹水之深度 H_f 即為 $h_{i+1} + \xi_i$ 。

(iii) 若 $H_{i+1} > 0$ ，則海岸線移至 $i+1$ 和 $i+2$ 之間，流量 $P_{i+1/2}$ 可能為非零值，但 $P_{i+2/3}$ 仍為零，淹水深度 H_f 為 $(h_{i+1} + \xi_i)$ 和 $(h_{i+1} + \xi_{i+1})$ 二者之較大者。



圖片來源：修改自 Liu et al., 1998。

圖 3-3-1 移動邊界處理之示意圖

由以上的處理方式，可確保海岸線的移動過程能滿足質量守恆，也使得移動邊界的處理得到更確切的預估。

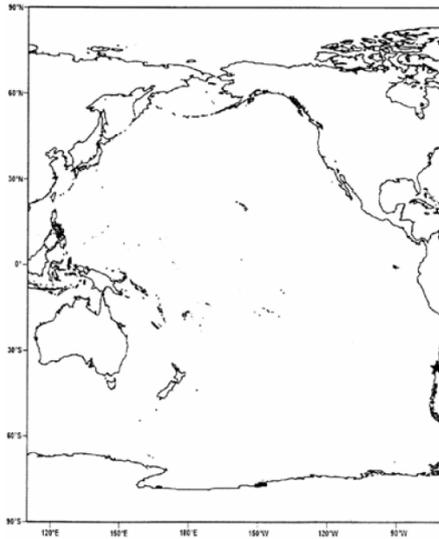
第四章 模擬狀況與條件

4-1 2010 年智利海嘯於台灣水位變化

2010 年 2 月 27 日智利地震發生在智利中南部沿岸，震央位於智利第二大城市康賽普西翁東北偏北方向 115 公里、智利首都聖地亞哥西南方 325 公里處。太平洋海嘯警報中心先向智利和秘魯發出海嘯警報，後來警報範圍擴大到厄瓜多爾、哥倫比亞、南極洲、巴拿馬和哥斯達黎加，再擴大至環太平洋 52 個國家和地區，海嘯波及整個中美洲以及太平洋國家和地區，遠至台灣、菲律賓及香港等地。

依據中央氣象局網站（2010）智利地震引發之海嘯事件相關說明指出，台灣時間 2010 年 2 月 27 日 14 時 34 分（全球標準時間 2010 年 2 月 27 日 06 時 34 分）於智利中部海岸南緯 36.1 度、西經 72.6 度發生規模 8.5，深度 35 公里之強烈地震，主震之後伴隨多次餘震，最大規模達 6.9，主震與台灣相距約 18,100 公里。中央氣象局發布海嘯消息如圖 4-1-1 至圖 4-1-2，太平洋海嘯警報中心(PTWC)發出海嘯警報電文，共計 27 報，發布第 001 報為台灣時間 2/27 14:46，發布第 005 報為台灣時間 2/27 18:45 將台灣『列入』海嘯警戒區域，發布第 018 報為台灣時間 2/28 08:12 將台灣『排除』於警戒區域。在智利塔爾卡華諾觀測到 2.34 m 高的海嘯，除了近震央智利部份地區之外，太平洋及沿岸地區未觀測到超過 1 m 之水位變化（圖 4-1-3）。

PTWC 原本預估本次地震引發之海嘯可能影響台灣地區時間為 28 日 14:26 至 55 分，但根據中央氣象局海嘯潮位監測系統之東岸部份測站（如圖 4-1-4）於台灣時間 2/27 14:30 至 3/1 14:30 之海水位觀測資料顯示（如圖 4-1-5），約在 28 日 15 時 30 分至 17 時起方有較明顯水位變化的海嘯波進入台灣東部海域。



中央氣象局海嘯消息

發布時間：2010年02月28日08時44分

2010年02月27日14時34分(台灣時間)，智利中部發生規模8.8地震，震央在西經72.6度、南緯36.1度，深度約為35公里。經初步推算，海嘯湧浪預計約在2010年02月28日14時26分到達台灣，請民眾今日勿到海邊觀浪或嬉戲，並嚴防海水面變化。下次發布時間約為11:30，將進一步提供關島之海水面變化資訊。

預估到達時間：

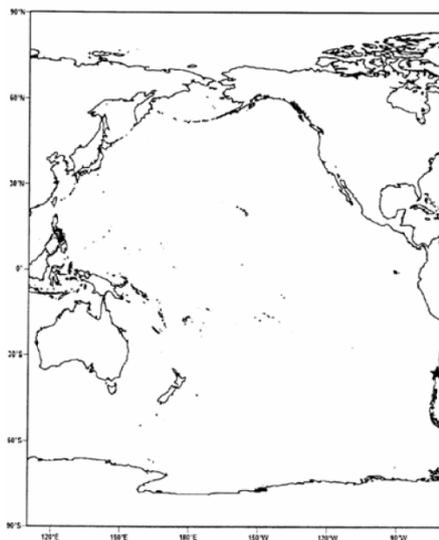
關島	02/28-11:11	花蓮	02/28-14:26
基隆	02/28-14:54	台東	02/28-14:55

已測得潮位資料：

Kaunapou Hawaii	02/28-05:36	0.18M
Kawaihae Hawaii	02/28-06:11	0.52M

圖片來源：中央氣象局，2010。

圖 4-1-1 中央氣象局海嘯消息一



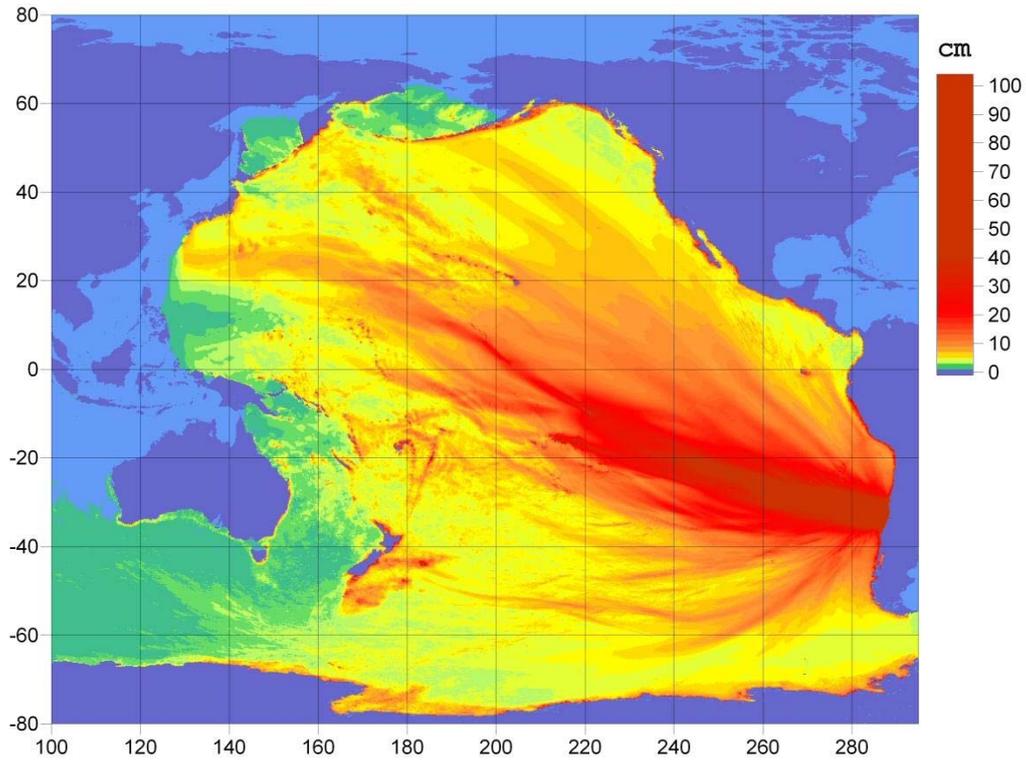
中央氣象局海嘯消息

發布時間：2010年02月28日10時07分

2010年2月27日14時34分(台灣時間)，智利中部發生規模8.8地震，震央在西經72.6度、南緯36.1度，深度約為35公里。太平洋海嘯中心已於2月28日上午解除對台灣地區的警戒，民眾無須過於驚慌，本局將持續監測沿岸海水位變化，若仍未觀測到水位異常訊息，本局將不再針對此地震發布海嘯相關消息。

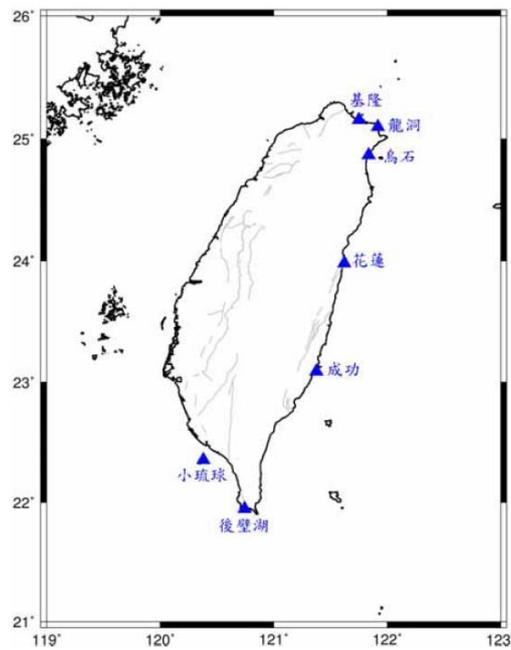
圖片來源：中央氣象局，2010。

圖 4-1-2 中央氣象局海嘯消息二



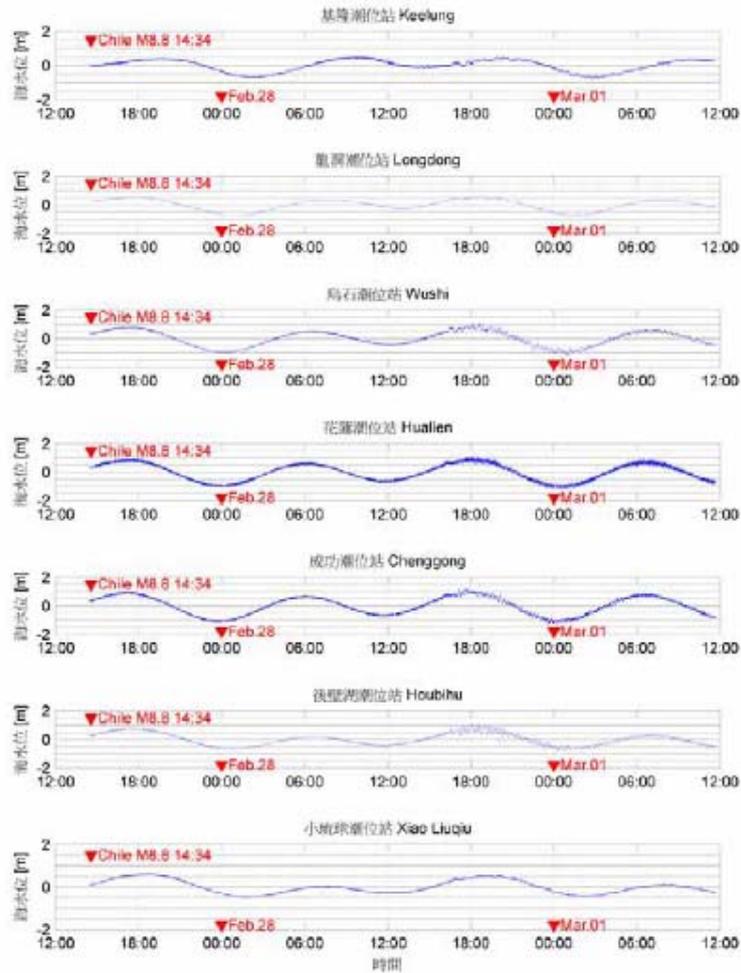
資料來源：NOAA，2010。

圖 4-1-3 智利海嘯於太平洋地區振幅分布



資料來源：中央氣象局，2010。

圖 4-1-4 中央氣象局海嘯潮位監測系統東岸測站位置圖



資料來源：中央氣象局，2010。

圖 4-1-5 中央氣象局海嘯潮位監測系統東岸潮位站水位觀測圖

使用濾除潮汐的方法對中央氣象局全台及離島共 17 個潮位站進行濾波（圖 4-1-6），原始資料經濾波後可看出水位受地震之變化。圖 4-1-7 為各測站台灣時間 2 月 28 日至 3 月 2 日下午 2 時之海水位觀測圖，先由各測站原始 15 秒一筆的原始資料經由 1 小時的高通濾波（high pass filter）將天文潮（潮汐）濾除，即為海嘯波紀錄。圖中第一個▼指示智利地震發生時間為台灣時間 2010 年 2 月 27 日 14 時 34 分（全球標準時間 2010 年 2 月 27 日 06 時 34 分），第二個▼指示 PTWC 預估本次地震引發之海嘯可能影響台灣地區之時間為 28 日 14:26 至 55 分。

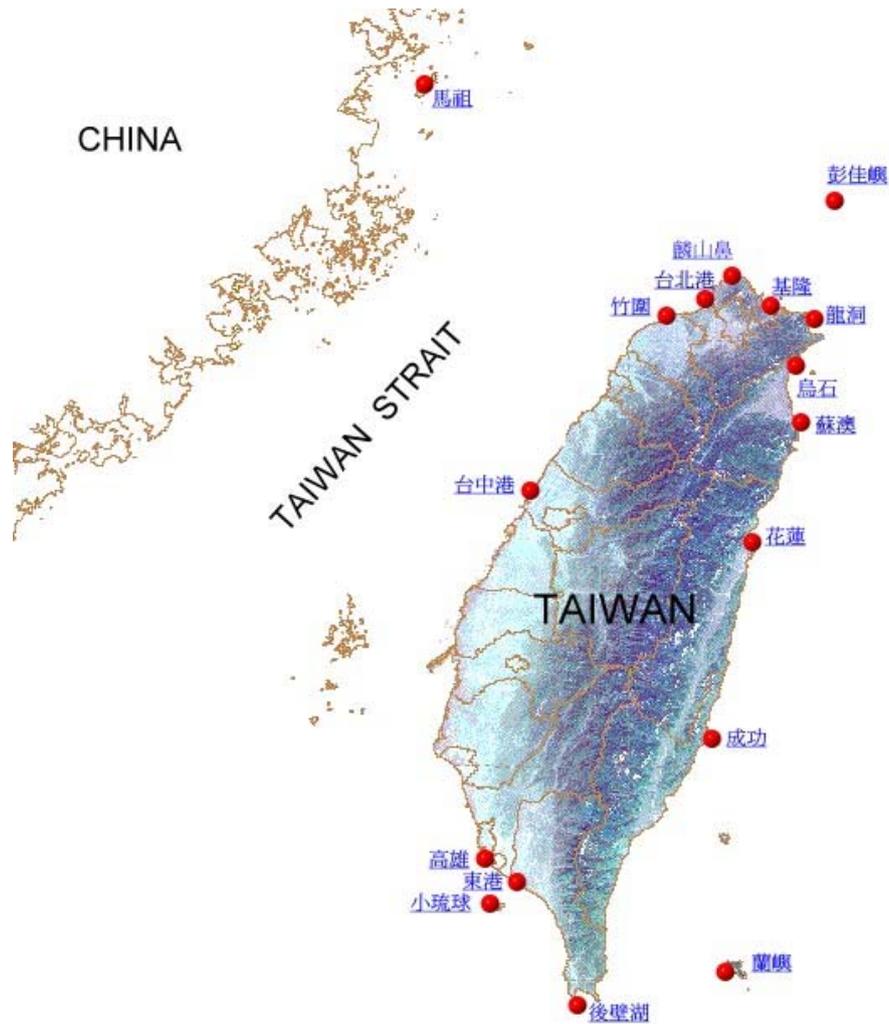


圖 4-1-6 中央氣象局海嘯潮位監測系統測站位置圖

分析本次潮位站監測紀錄後，海嘯波由台灣東南部進入後產生繞行海島現象（圖 4-1-8），於台灣時間 2/28 下列先後時段各測站始有明顯水位變動：

15:30	成功	（約海嘯發生後 25 小時）
15:45	花蓮	（約海嘯發生後 25 小時 15 分）
16:00	蘇澳	（約海嘯發生後 25 小時 30 分）
16:15	烏石/龍洞/後壁湖	（約海嘯發生後 25 小時 45 分）
16:30	基隆/小琉球/東港	（約海嘯發生後 26 小時）
17:00	高雄	（約海嘯發生後 26 小時 30 分）
17:15	台北港	（約海嘯發生後 26 小時 45 分）

由以上資料可知，海嘯波先到達成功再分為沿順時針及逆時針方向繞行台灣四周。

受到海嘯的影響於南部及東部各測站包括高雄/東港/後壁湖/成功/花蓮/蘇澳/烏石/龍洞/基隆潮位站皆有異常水位擾動現象，且於恆春/烏石/成功/花蓮潮位站觀測到較大的海嘯波高（約 0.66/0.52/0.46/0.38 m），海嘯波越過台灣東北及西南大陸棚時，週期可超過 30 至 40 min，但在部份測站受港池形狀影響，海嘯在港內會形成一些較高頻的振盪，且有時能持續達 1 天以上。本次海嘯事件均未達到發布海嘯警報的波高警戒值（1.0 m），部份測站水位有顯著的變動現象，與驗潮站於港內架設地點及港灣形狀有關，而蘭嶼、彭佳嶼、麟山鼻、竹圍、台北港及馬祖等站並未測到明顯的海嘯紀錄。

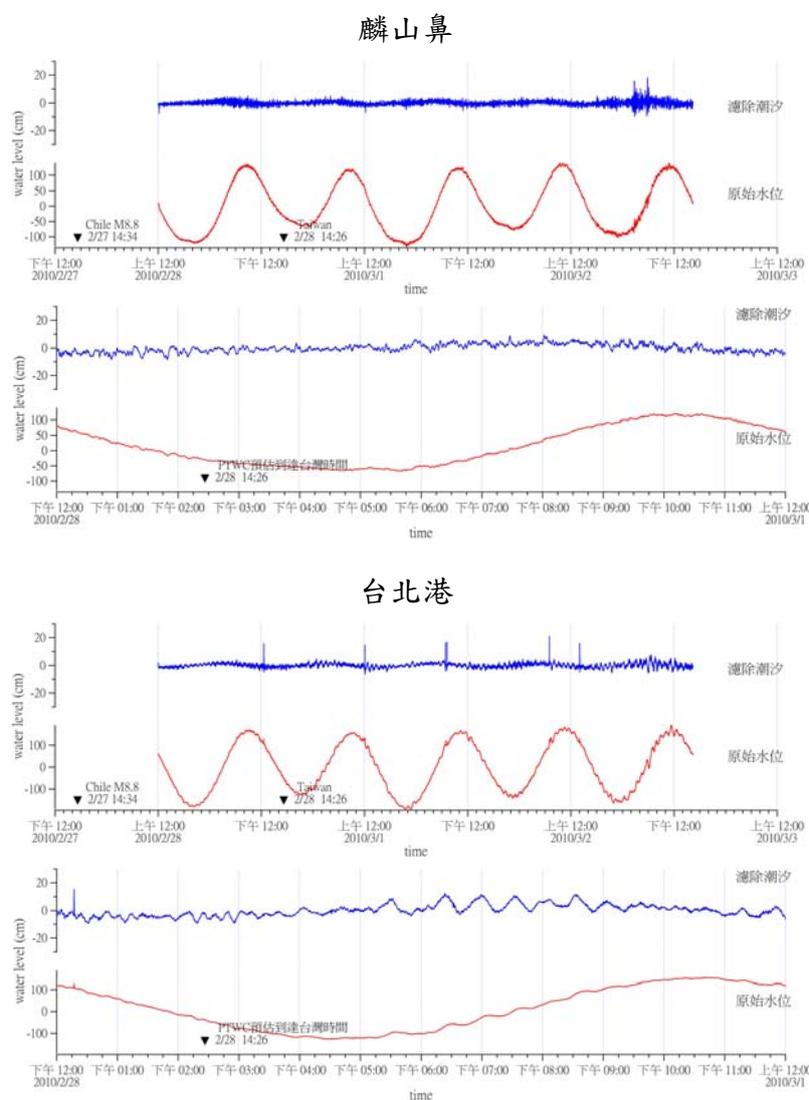
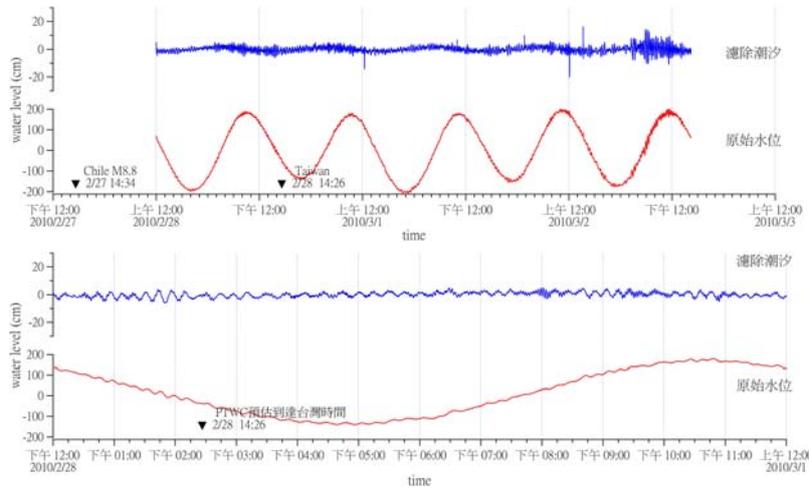
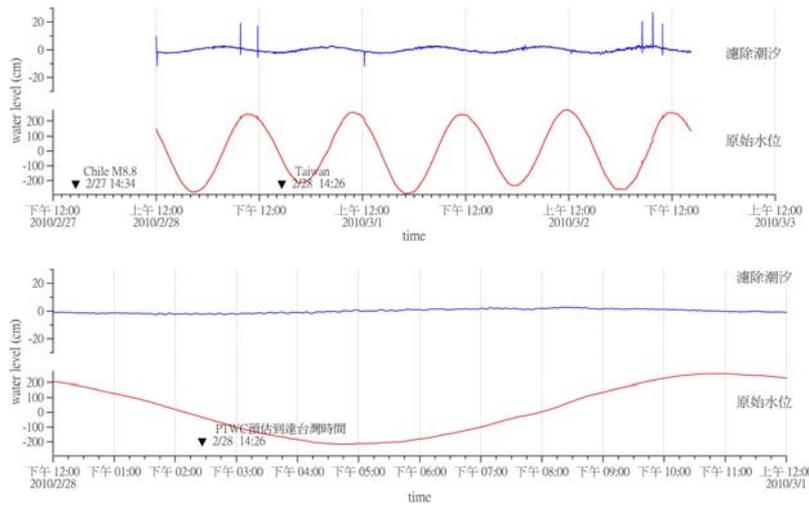


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖

竹圍



台中港



高雄

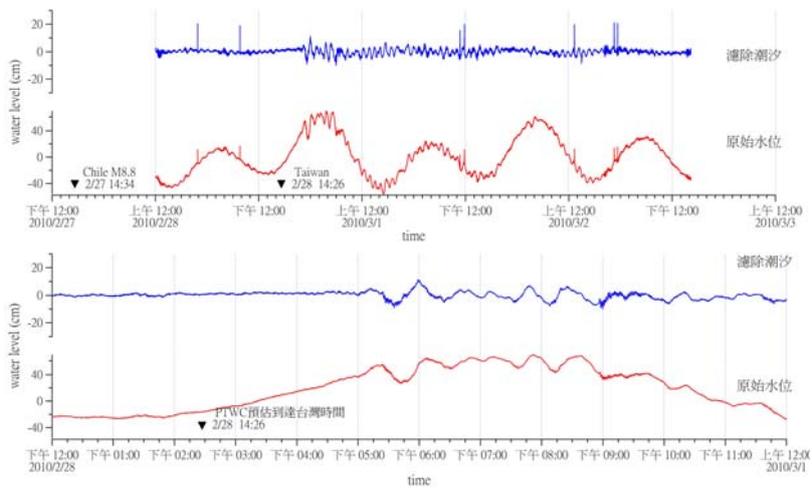
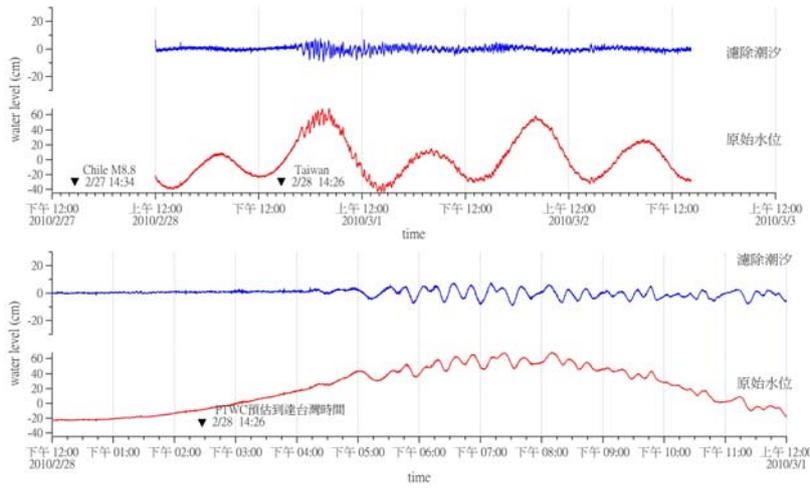
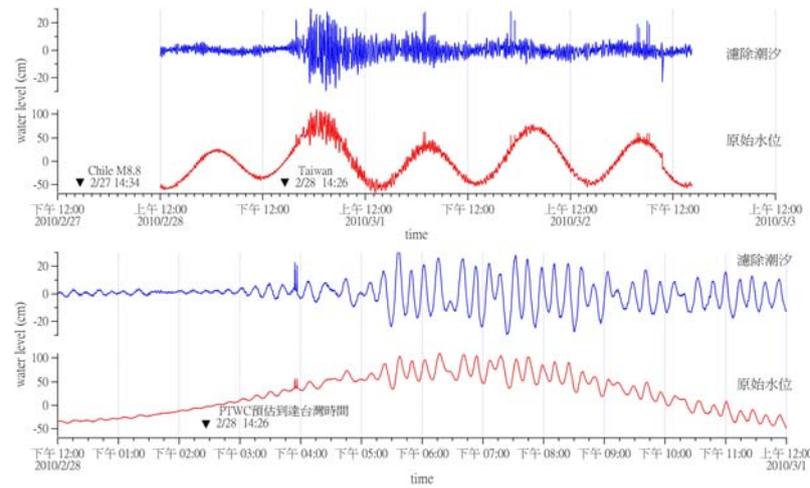


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖 (續)

東港



後壁湖



成功

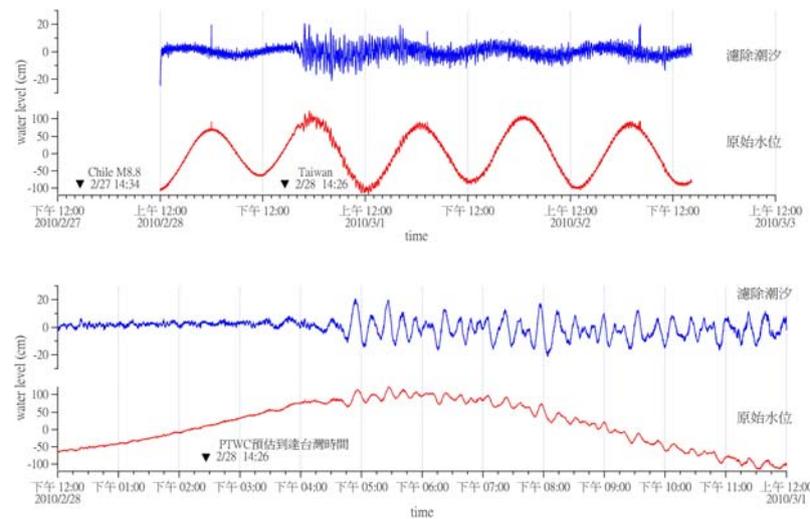
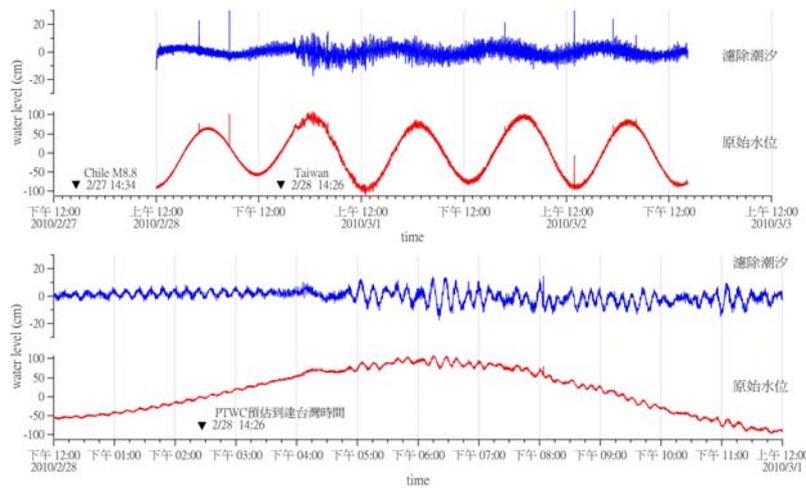
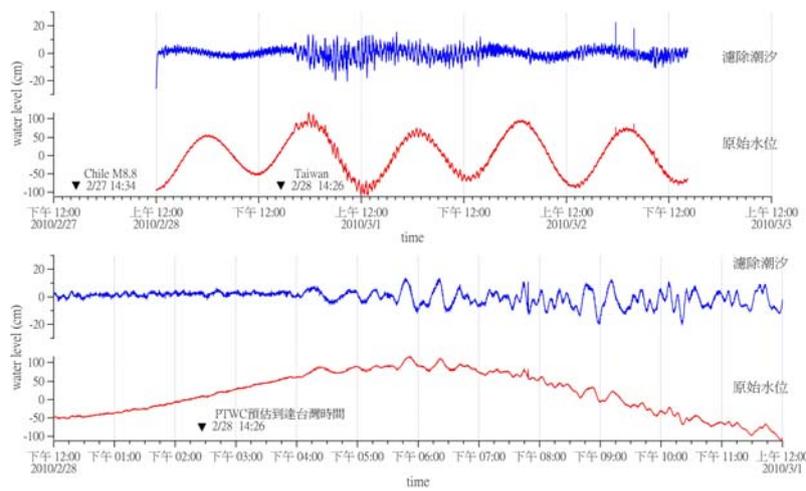


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖 (續)

花蓮



蘇澳



烏石

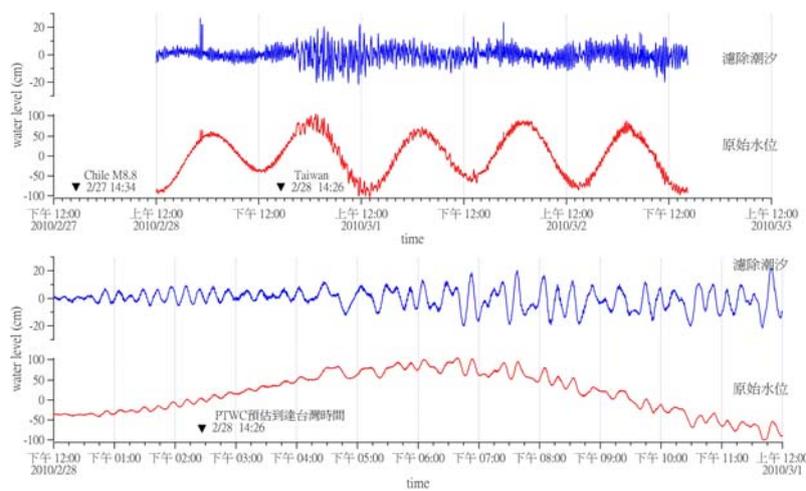
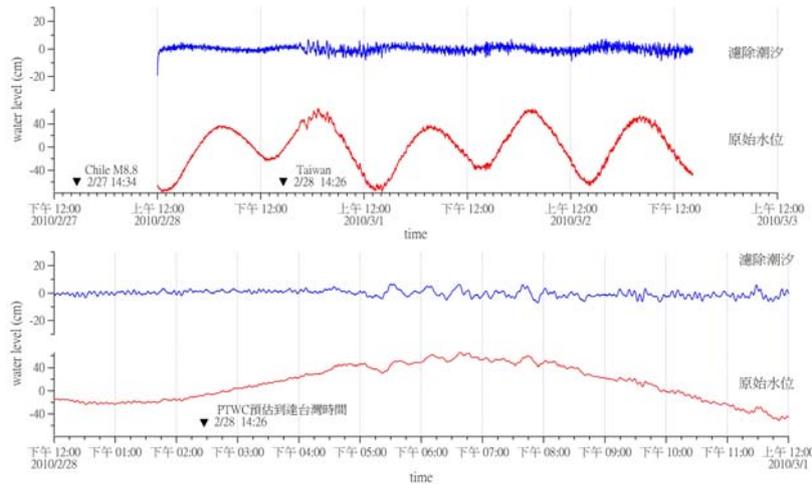
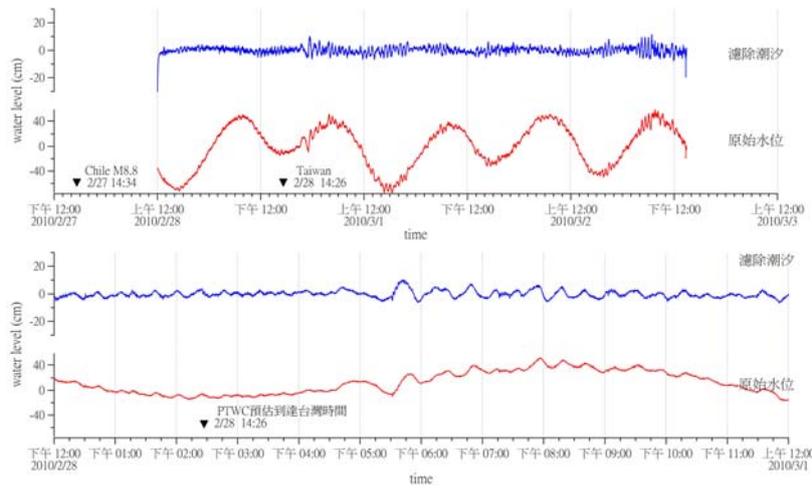


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖 (續)

龍洞



基隆



彭佳嶼

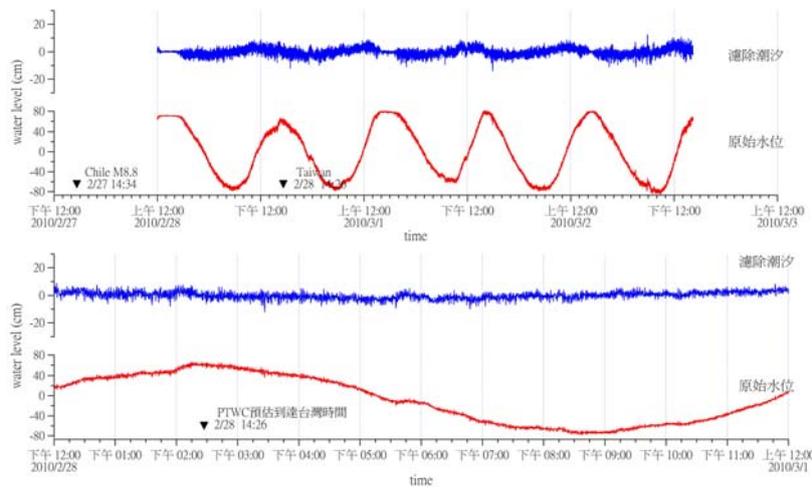
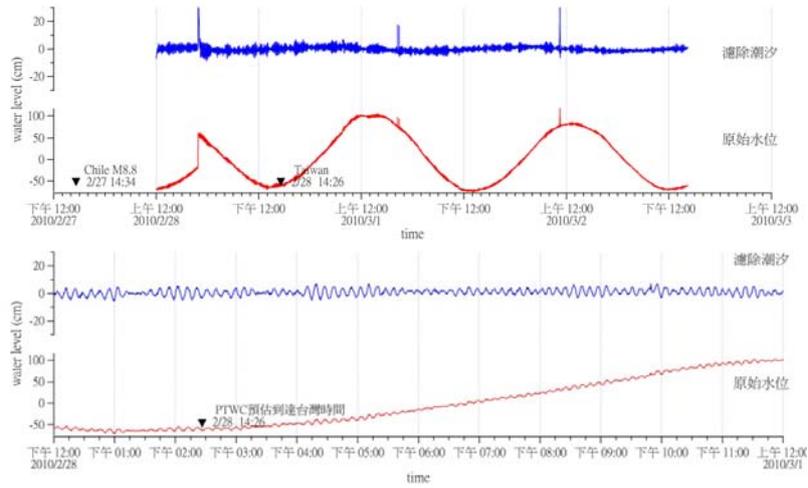
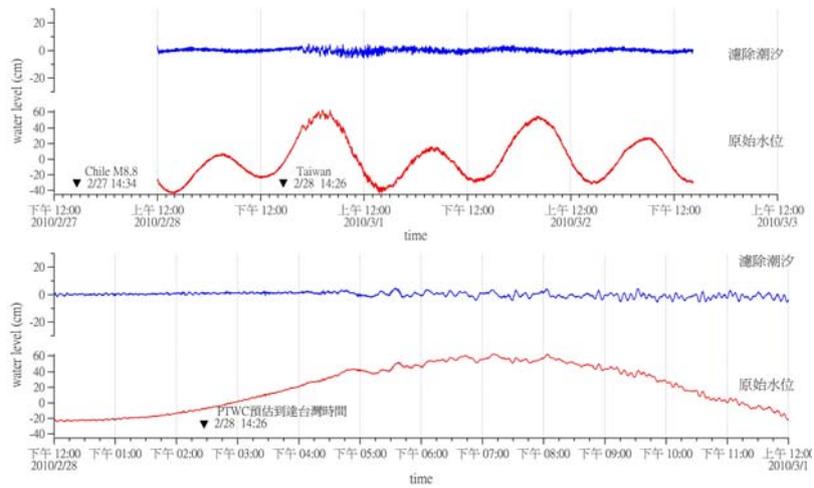


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖 (續)

蘭嶼



小琉球



馬祖

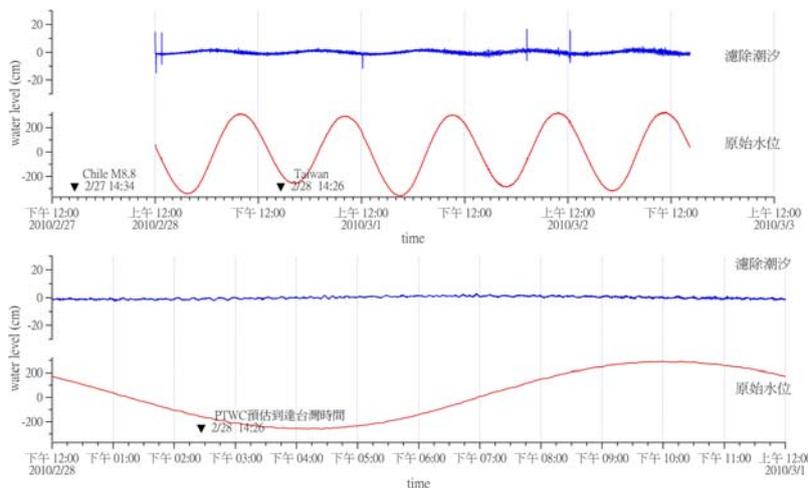


圖 4-1-7 中央氣象局海嘯潮位監測系統潮位站水位觀測圖 (續)

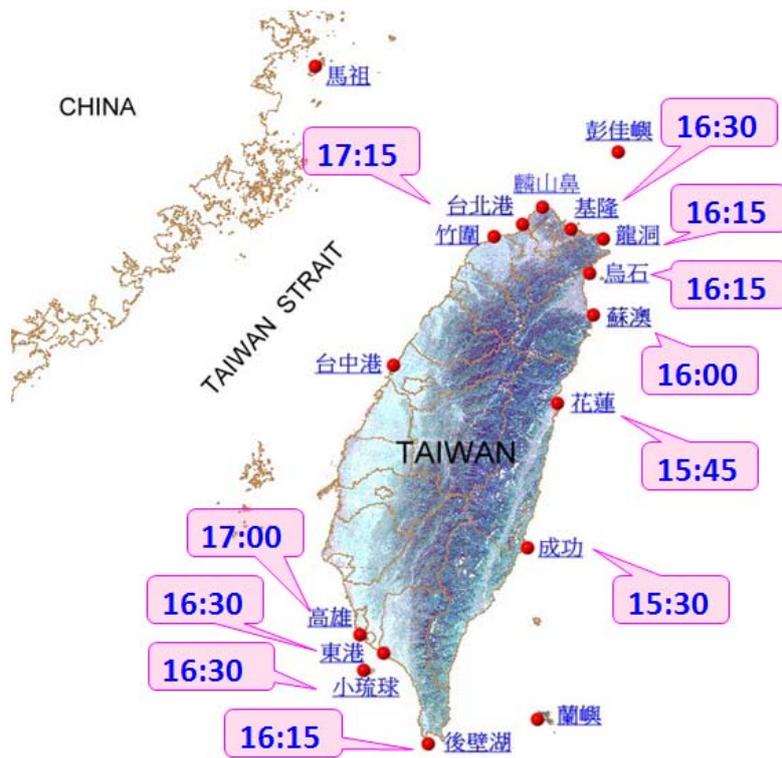


圖 4-1-8 2010 智利海嘯繞行台灣傳遞時序圖

4-2 模擬區域及水深地形

地震是一突發性的自然現象，發生時間、位置及大小目前尚無法事前預知，但若有長期的統計紀錄，可以推估地震頻率特性（楊等，1983）。歷史海嘯大多是以文字敘述記載，近數十年來由於驗潮技術日益精進，水位觀測實際運作，海嘯發生的水位變動可被予以記錄，但自有儀器紀錄水位資料以來的時間並不長，尤其海上大地震不多，不足以作為統計之用。隨著電腦的計算速度及記憶容量的快速提昇，使得運用數值模式模擬海嘯在海洋中產生、傳遞，以及到達近岸地區的溯上過程，成為一可靠且相當經濟可行的方法。本模式將分別應用於模擬遠域海嘯：2010年2月27日智利海嘯越洋傳遞情況，及近域海嘯：高雄市、台南市海嘯溯上溢淹都會區之影響。

目前台灣周圍較完整而可以公開獲得的海岸水深地形數值檔案屬國家海洋科學研究中心 0.3'（約 555.6 m）網格水深數值檔，外海大洋區則是 ETOPO5 或 ETOPO2（NOAA/NGDC）較普遍，本研究模擬 2010 年智利海嘯，使用大域網格蒐集美國 NOAA（National Oceanic and Atmospheric Administration）之 ETOPO5 水深地形檔案（http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html），將海底與陸地的海拔高度變化以 5 分經/緯地圖方格（經/緯度 1 分=1 海浬=1.15 哩=1.852 公里）為單位所產生出來。

遠域海嘯－2010 年智利海嘯模擬

ETOPO5 的資料綜合了衛星的高度觀測、船隻的聲納探測以及來自數位海深探測分析 (the Digital Bathymetric Data Base Variable Resolution) 以及全球計畫 (the GLOBE project) 中全球海拔數據模型的資料，經後處理後轉換成本研究所需之電子檔，可提供模擬 2010 年智利地震所引發之海嘯波在環太平洋沿岸各地傳播與分布情況。模式計算區域如圖 4-2-1 所示，範圍包括 119.0°E / 70.0°S 至 65.0°W / 70.0°N 涵蓋環太平洋地區，包括北美、南美、阿留申群島、千島群島、日本、台灣、菲律賓、印尼及澳洲，網格數目為 $2112 \times 1680 = 3,548,160$ 格 (圖 4-2-1)，網格大小為 $0.083^\circ = 5'$ (約 9.26 km)，此區最大水深為 10,376 m。

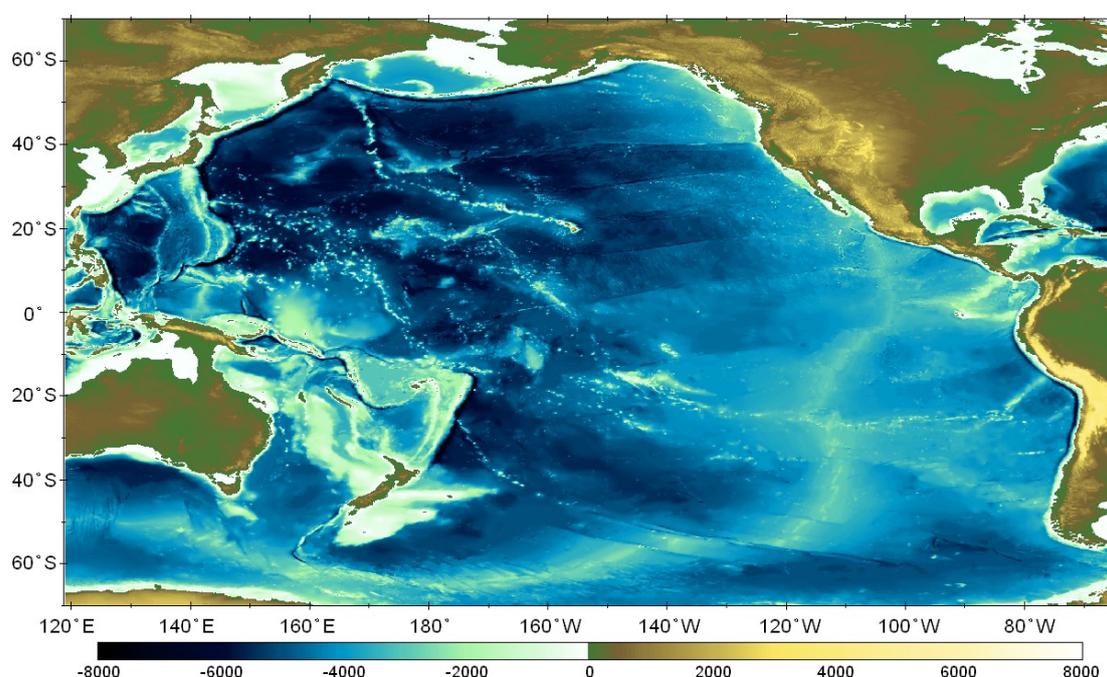


圖 4-2-1 ETOPO5 太平洋地區大域網格

近域海嘯－高雄海嘯模擬

Liu 等 (2007) 認為 2006 年的屏東恆春地震事件，是將來大型隱沒型斷層產生海嘯地震 (tsunamigenic earthquakes) 的警訊，由於台灣西南位於錯綜複雜的板塊邊界位置，此區域從台灣的西南海域至馬尼拉海溝 (Manila Trench) 的南邊，海嘯之好發區域通常位於海溝或是大規模地殼運動區，以及年輕的地殼摺疊處 (Fukao, 1979)。馬尼拉海溝剛好介於南中國海 (South China Sea) 及菲律賓海板塊之邊界，形成一島弧海溝 (island arc-trench) 位於南中國海的西邊，構成了此區就有可能成為一個破壞性驚人的海嘯波發源地。Wang and Zhang (2005) 提出了近二百年間中國海域附近發生的歷史海嘯紀錄 (表 4-2-1)，在台灣的北部及南部海岸都有發生海嘯的可能性。根據 Liu 等 (2007) 收集的地理調查資訊及模擬結果顯示，若海嘯發生於南中國海西部及馬尼拉海溝北部，台灣南灣、高雄及台南將會直接受到海嘯衝擊。

表 4-2-1 近二百年間中國海域附近發生的歷史海嘯紀錄

Wave incidence	Time	Epicenter	Magnitude
Gulf of Penglai, Bohai	April 4, 171		
Gulf of Laizhou, Bohai	July, 173		
Jiangsu and Zhejiang	July 9, 1496	South Sea of Japan	≥8
Quanzhou, Fujian	December 29, 1604	(24.7°N, 119.0°E)	7
Qiantangjiang, Zhejiang	October 28, 1707	(33.2°N, 135.9°E)	8.4
Tainan, Taiwan	August 9, 1792	(23.6°N, 120.6°E)	7
Keelung, Taiwan	December 18, 1867	(25.25°N, 122.2°E)	a
Keelung, Taiwan	July 4, 1917	(25.0°N, 123.0°E)	7.3 ^b
Huangzhou, Fujian	February 13, 1918	(23.6°N, 117.3°E)	7.3
Yantan, Shandong	July 13, 1923	(31.0°N, 130.5°E)	7.2
Huanlien, Ilan, Taiwan	November 15, 1986	(24.1°N, 121.7°E)	7.6

a : Wave height 7.5 m.

b : Wave height 3.7 m.

資料來源：Liu et al., 2007。

高雄及台南地區人口稠密，高雄市又是全國的工商業重鎮，若發生大規模海嘯，可能會造成重大災害，但是此部分的潛在威脅並未受到適當的重視。為了讓國人及政府相關單位了解當沿岸發生海嘯時，可能對高雄市及台南市造成的影

響，所以本研究以數值模式來模擬近域海底斷層引發之海嘯，利用康乃爾大學發展之 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 海嘯數值模擬模式 (Liu 等, 1998)，輸入 Harvard CMT (Centroid Moment Tensor) 之斷層活動參數，配合高雄市及台南市外海水深地形及市區高解析度高程資料進行模擬計算。

高雄海嘯模式計算第一區域 (region 1) 如台灣周圍水深地形圖 4-2-3 方塊處□所示，範圍 119.0°E / 21.0°N 至 121.0°E / 23.0°N 涵蓋台灣南部高雄、屏東海岸線及離島小琉球，網格數目為 $400 \times 400 = 160,000$ 格 (圖 4-2-2)，網格大小為 $0.005^\circ = 0.3'$ (約 555.6 m)，此區最大水深為 3,745 m (圖 4-2-3)。

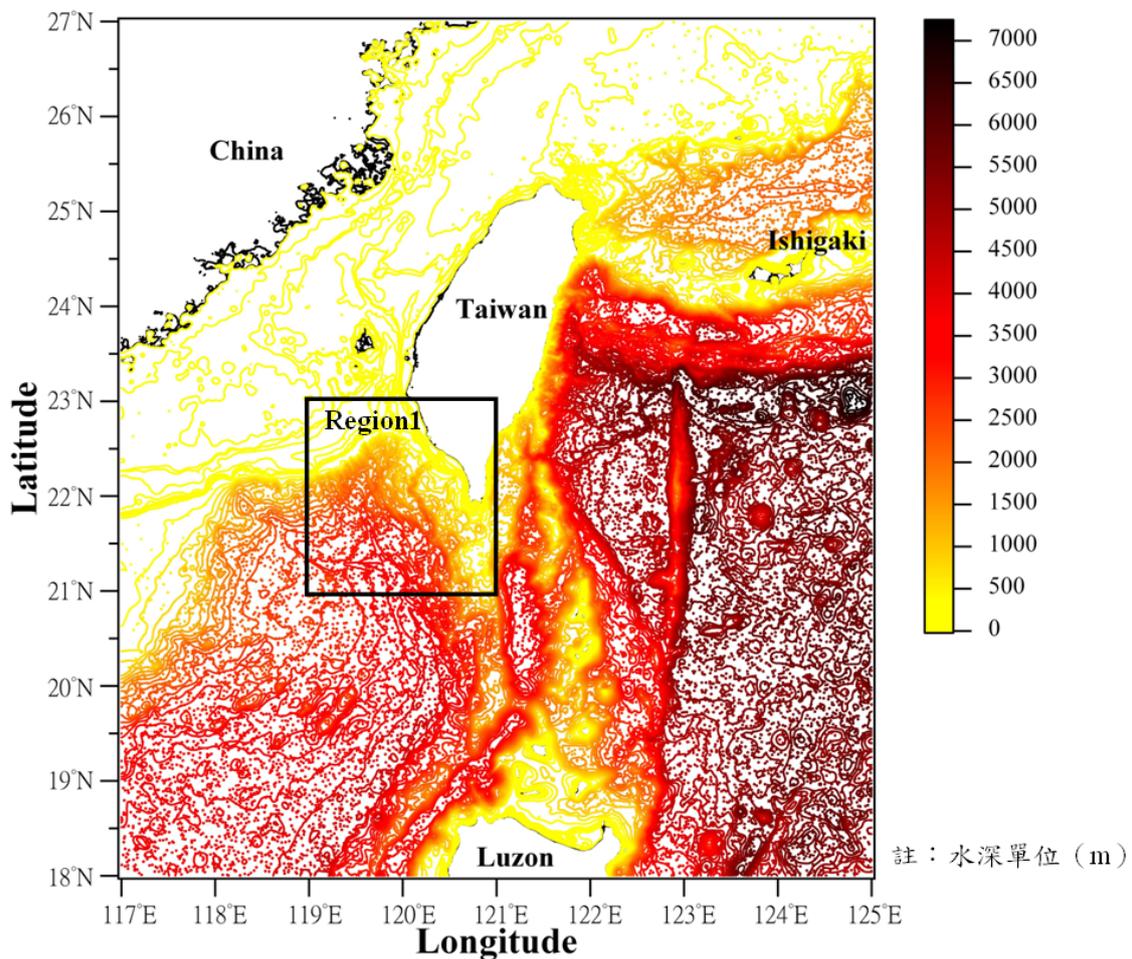


圖 4-2-2 台灣周圍水深地形

於 3-2 節提到多重網格模式的好處是，以不同的網格大小，分別模擬遠方海嘯在大洋中傳遞，及其後自外海進入淺水地區溯上過程的模擬作業，可更合理的模擬海嘯產生後，在海洋中傳遞及在近岸地區溯上的不同特性，較為符合實際之情形。因此，高雄海嘯模擬中加入第二及第三區域之水深地形。模式計算第二

區域 (region 2) 如圖 4-2-4 所示，第二區域模擬範圍約 120.00° E / 22.25°N 至 120.50° E / 22.75° N 涵蓋高雄港區 (Kaohsiung Harbor)，網格數目為 300 × 300 = 90,000 格，網格大小為 0.1' (約 185.2 m)，此區最大水深為 1,211 m。

圖 4-2-4 中方塊處□約為模式計算高雄海嘯傳遞之第三區域 (region 3)，為了觀察海嘯傳遞到達防波堤及高雄市之水位變動情況，第三區域 (圖 4-2-5) 涵蓋高雄市第一港口及第二港口，網格數目為 168 × 165 = 27,720 格，網格大小為 0.033' (約 61.73 m)，此區最大水深為 64 m，第一至第三區域之網格大小比例為 1:3:9。

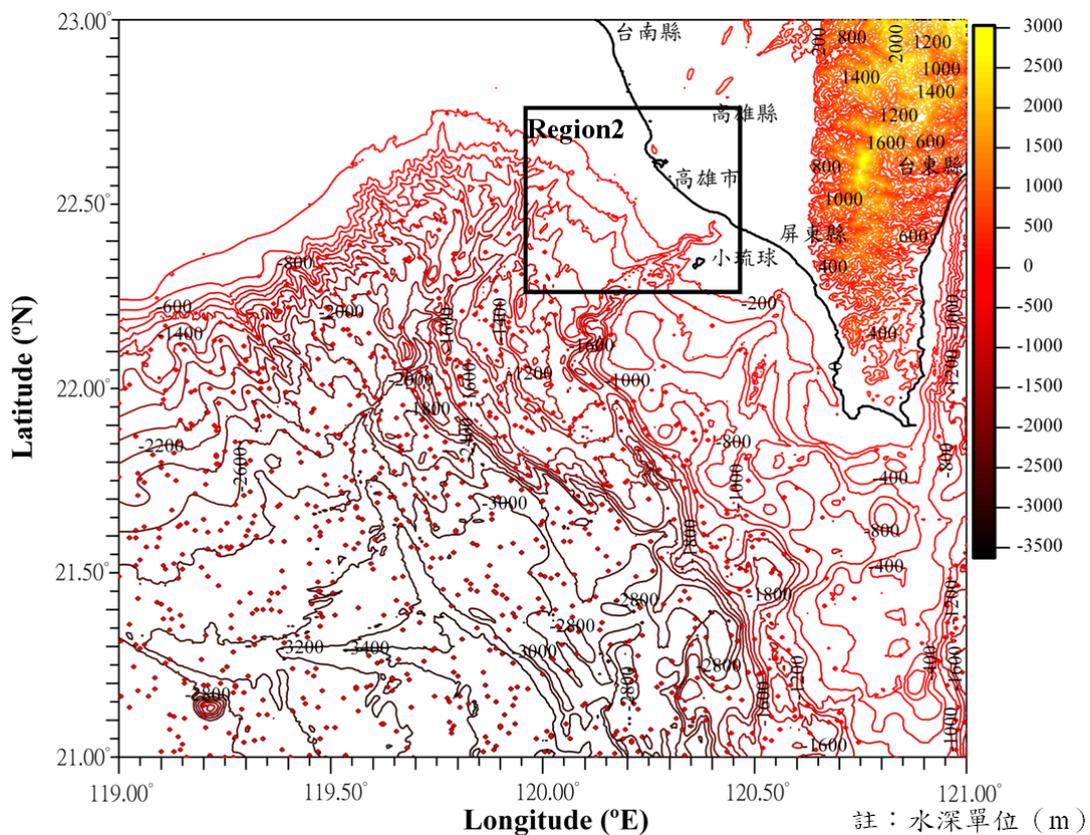


圖 4-2-3 高雄海嘯模擬計算 region 1 水深地形

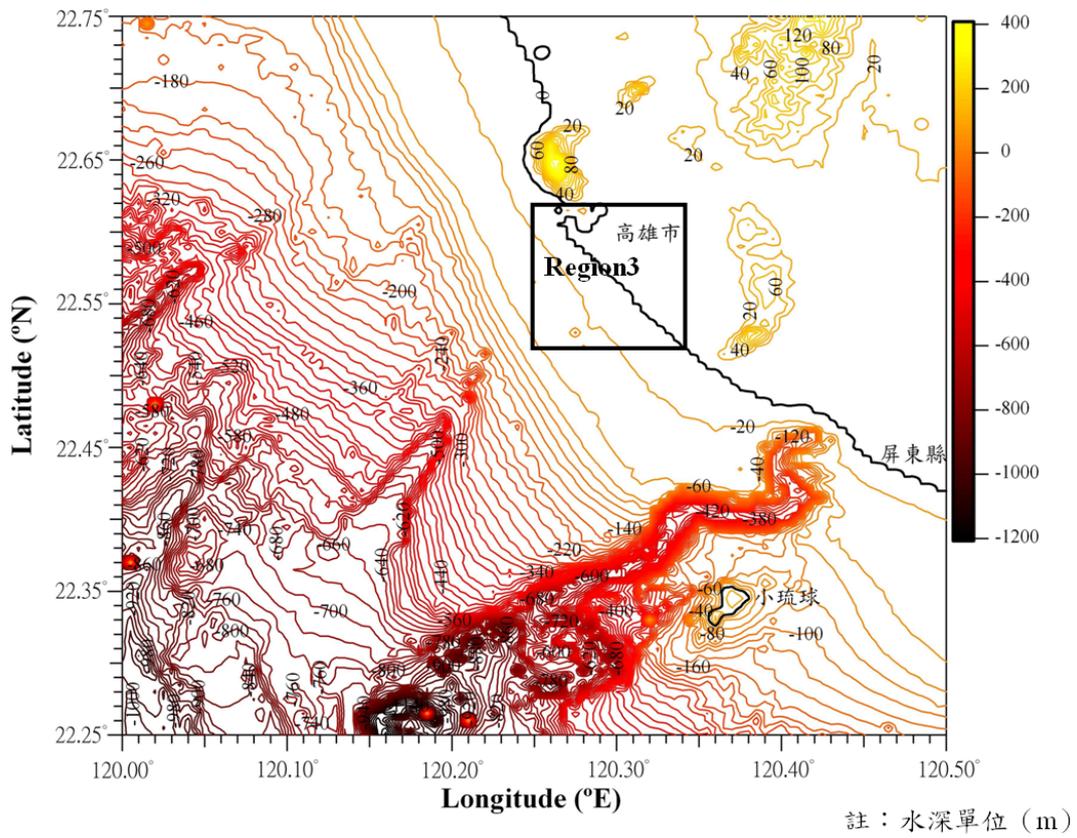


圖 4-2-4 高雄海嘯模擬計算 region 2 水深地形

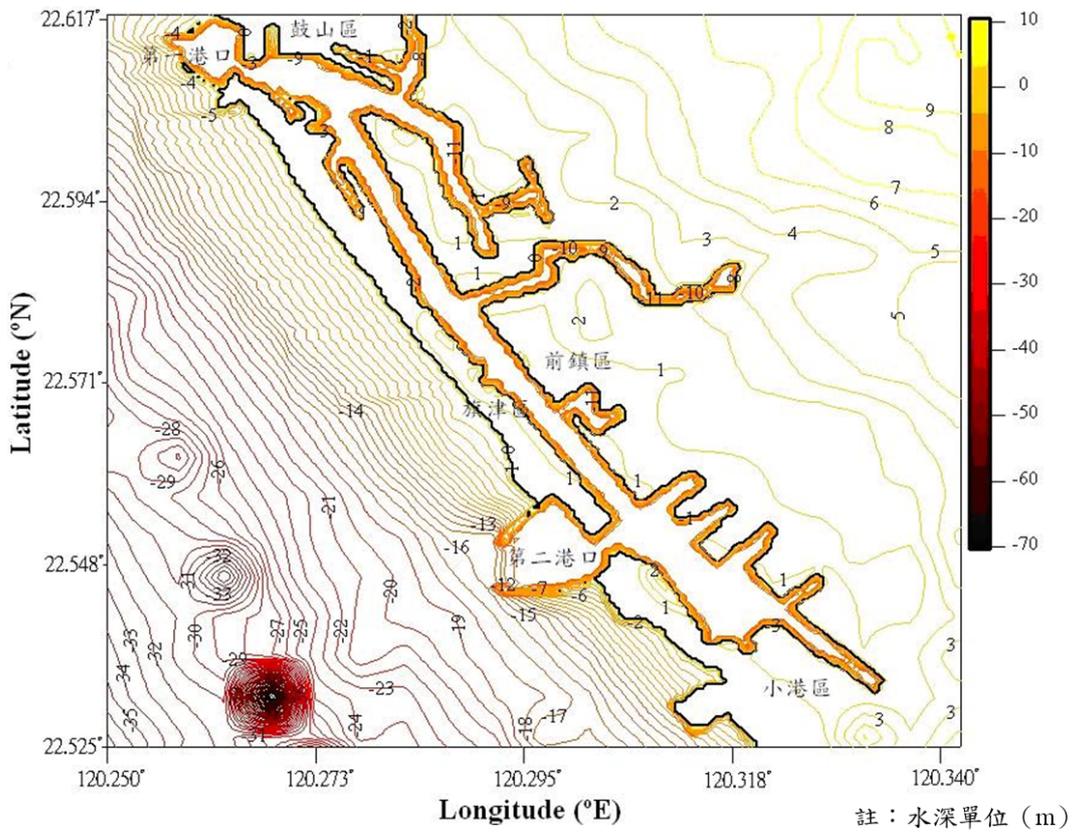


圖 4-2-5 高雄海嘯模擬計算 region 3 水深地形

近域海嘯—台南海嘯模擬

台南海嘯模式計算第一區域(region 1)範圍為 $119.0^{\circ}\text{E} / 21.5^{\circ}\text{N}$ 至 $121.0^{\circ}\text{E} / 23.5^{\circ}\text{N}$ 涵蓋台灣南部台南、高雄及屏東海岸線、離島小琉球及部份澎湖縣，網格數目為 $400 \times 400 = 160,000$ 格(圖 4-2-6)，網格大小為 $0.005^{\circ} = 0.3'$ (約 555.6 m)。

模式計算第二區域(region 2)如圖 4-2-7 所示，第二區域模擬範圍約 $119.75^{\circ}\text{E} / 22.75^{\circ}\text{N}$ 至 $120.25^{\circ}\text{E} / 23.25^{\circ}\text{N}$ 涵蓋台南安平海岸線，網格數目為 $300 \times 300 = 90,000$ 格，網格大小為 $0.1'$ (約 185.2 m)。

圖 4-2-7 中方塊處□約為模式計算海嘯傳遞之第三區域(region 3)，為了觀察海嘯傳遞到達防波堤及台南市區之水位變動情況，第三區域(圖 4-2-8)涵蓋台南市安平商港及安平漁港，網格數目為 $144 \times 144 = 20,736$ 格，網格大小為 $0.033'$ (約 61.73 m)，第一至第三區域之網格大小比例為 1:3:9。

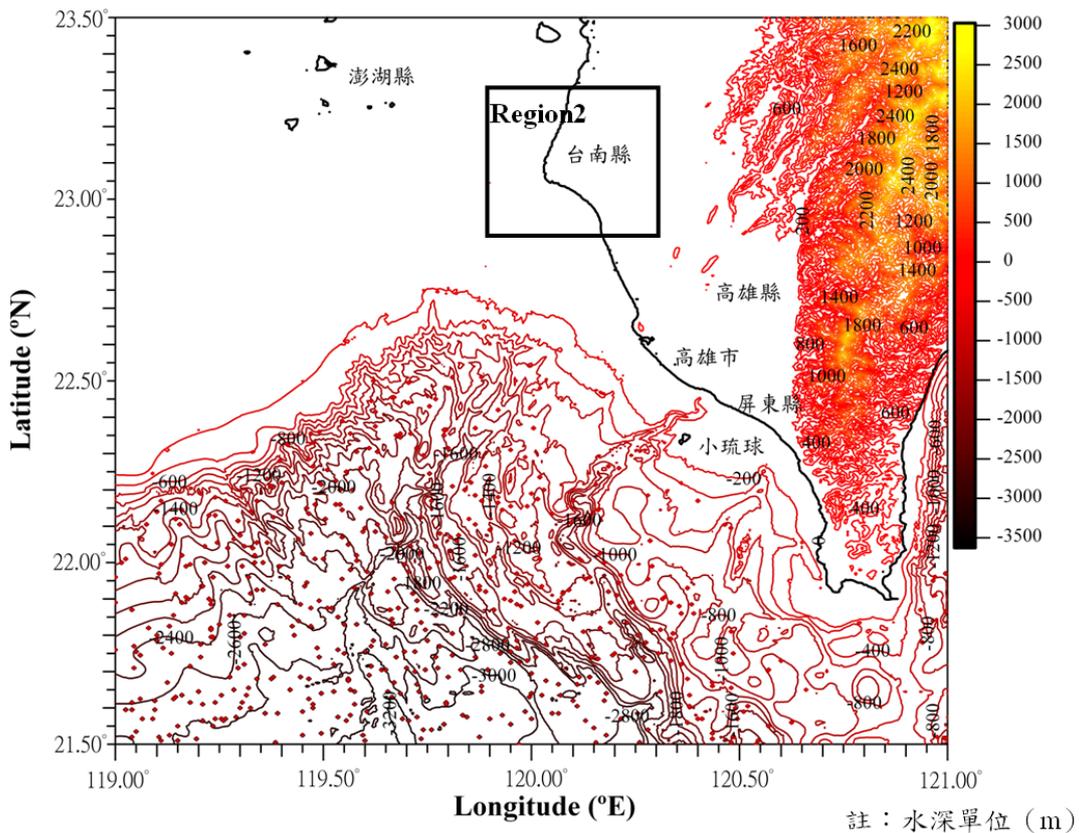


圖 4-2-6 台南海嘯模擬計算 region 1 水深地形

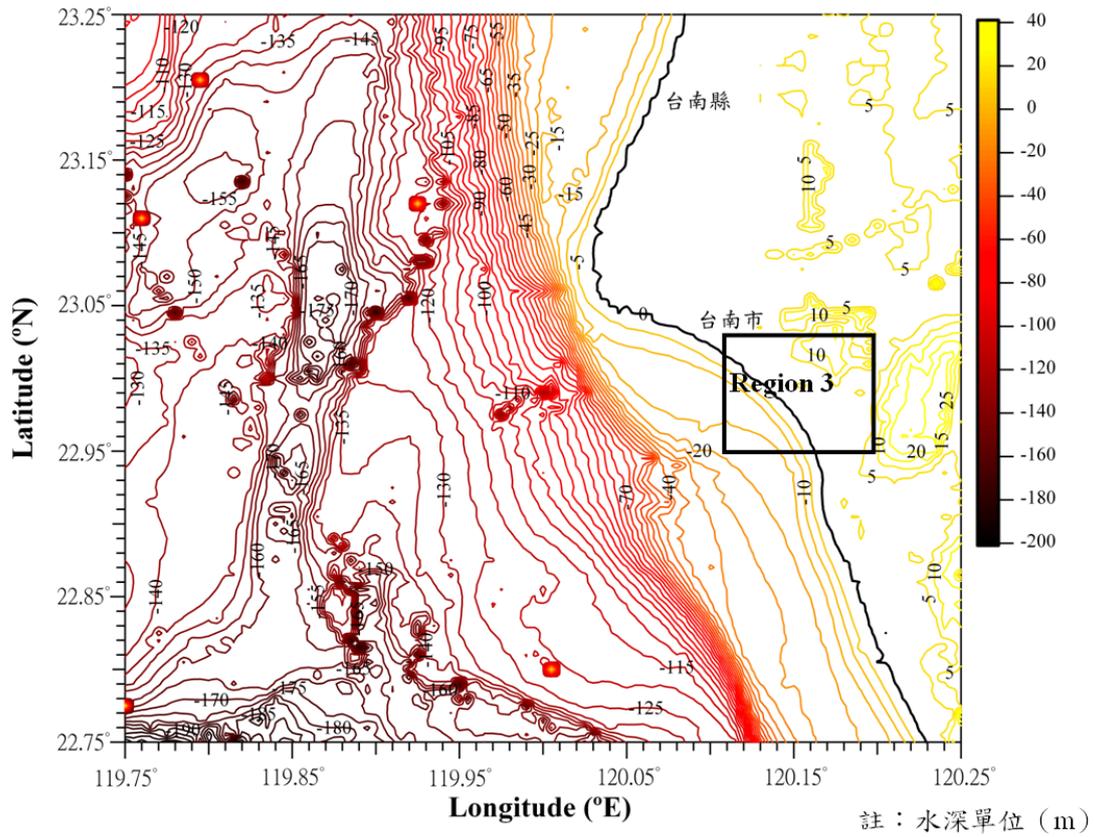


圖 4-2-7 台南海嘯模擬計算 region 2 水深地形

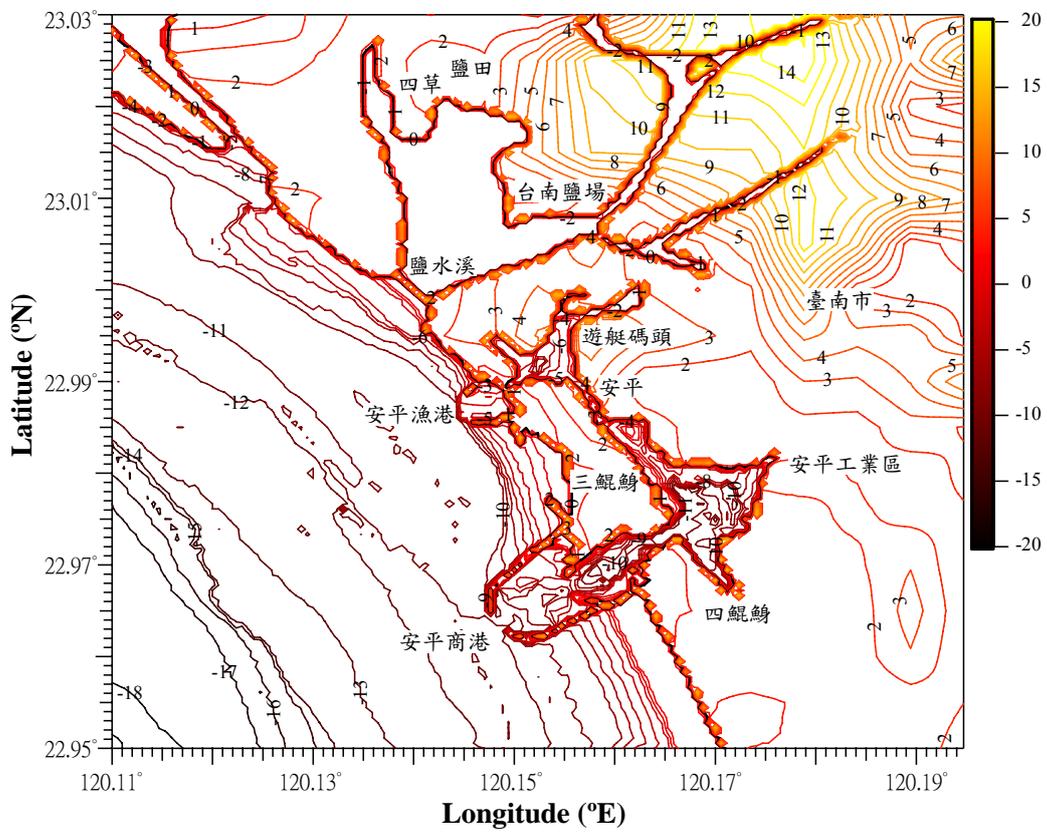


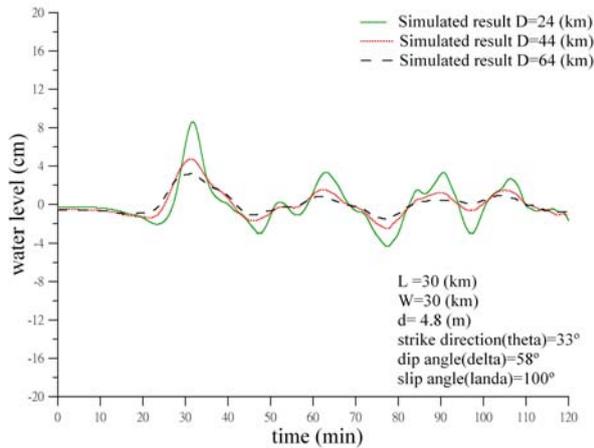
圖 4-2-8 台南海嘯模擬計算 region 3 水深地形

4-3 初始條件

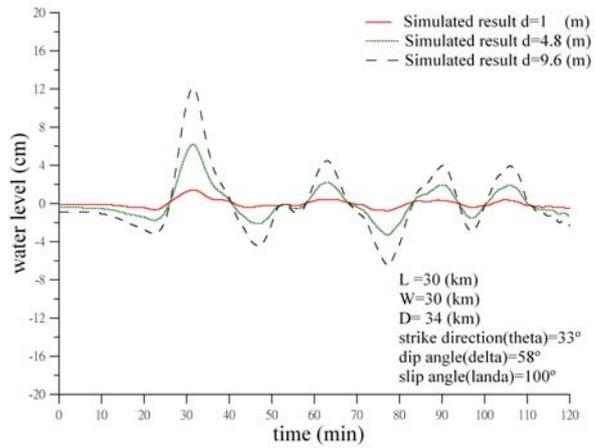
海底斷層產生之初始波形會因破裂面的差異，影響傳播至近岸的振幅大小，若地震觀測站平均散布於震源四周，將有助於觀測地震波特性，在觀測資料量足夠的輔助下，將可得到確切之斷層參數，然而並非所有的海嘯在歷史中均有紀錄留下，且自 1781 年至今 200 年來，高雄及台南地區並未再發生災害性海嘯事件，因此，須以合理的斷層破裂參數代入海嘯模擬中。

美國 Harvard CMT (Centroid Moment Tensor) Catalog (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) 目錄，所發布地震訊息記錄了 1977 年至今的全球地震，提供非常詳盡的地震資料。本研究選擇使用其發布的歷史斷層參數進行遠域海嘯—2010 年智利海嘯的模擬及分析。無台灣近域斷層參數的情況下，由 Wells & Coppersmith (1994) 經驗公式可計算出地震矩規模 M_w 與破裂面長度 ($M_w = 4.38 + 1.49 \log(RLD)$)、寬度 ($M_w = 4.06 + 2.25 \log(RW)$)、平均錯動量 ($M_w = 6.93 + 0.82 \log(AD)$) 及最大錯動量 ($M_w = 6.69 + 0.74 \log(MD)$) 間之關係。對於地震潛勢的評估，我們可以最大地震規模 (Maximum Possible Earthquake Magnitude) 進行預測。通常低估地震規模是使得災難性海嘯超過估計的原因，因此本研究評估未來可能產生的最大地震規模所引發之海嘯，將選擇此地發生之最大錯動量 (MD) 進行高雄及台南海嘯之模擬。

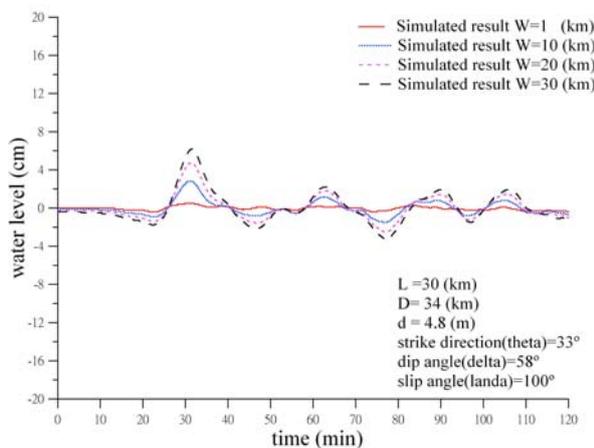
假設依序改變斷層垂直位移高度 (d)、震源深度 (D)、斷層寬度 (W) 及斷層長度 (L) (圖 4-3-1)，模擬發生之後二小時，於近岸地區的水位變化情況。若 (1) 斷層位移高度加大為 9.6 m，連帶會使其上水位產生較大的位移，而相對的傳遞至近岸受地形淺化的影響，波高也會增加。在 (2) 改變震源深度方面，若震源深度越淺 (24 km)，所引發的海嘯波高則越大。而 (3) 及 (4) 改變斷層寬度及長度所產生的波高、波形及相位差不多，可想像當海中之斷層長度及寬度加大為 30 km，產生之波高及周期也會相對增加。以上改變各參數的共通點為：當斷層參數加大時，其水位擾動也更加明顯，導致波峰越高及波谷越深。



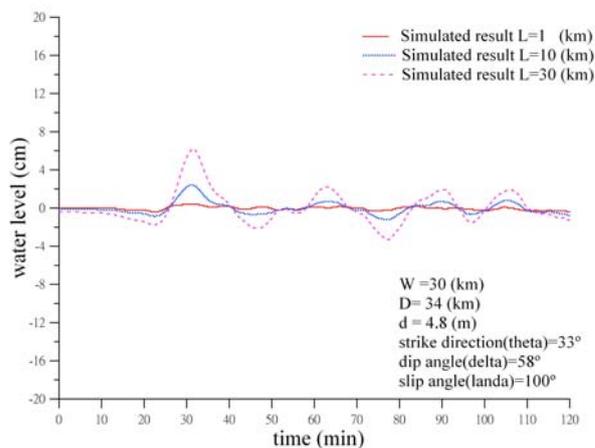
(1)



(2)



(3)



(4)

圖 4-3-1 改變斷層參數 (D、d、W 及 L) 後之波形演變

當斷層發生時的震源愈深，波高愈小；滑移量及破裂面寬度愈大，初始波長愈大，波高愈大；而垂直位移高度對波高的影響最劇烈。改變斷層垂直位移高度 (d) 對模擬結果影響最大，而改變震源深度 (D) 次之 (陳，2008)。本研究假定於南中國海北部隱沒帶附近發生海底斷層，板塊位移引發災難性海嘯，模擬台灣近域海嘯溢淹高雄及台南地區，以不同的垂直位移高度，分別為：

狀況一：Mw 7.0，d = 2.6 m，產生 0.85 m 初始海嘯波高

狀況二：Mw 7.2，d = 4.9 m，產生 1.80 m 初始海嘯波高

據此比較高雄市及台南市沿岸所能承受的海嘯規模，計算海嘯發生後於高雄及台南沿岸之溯上高度，觀察沿海地帶之溢淹情況。

遠域海嘯－2010 年智利海嘯模擬

假設 2010 年智利海嘯海底斷層發生之位置如圖 4-3-2 所示，圖中星號處表示震央座標位置 (location of epicenter) 為 $73.15^{\circ}\text{W} / 35.98^{\circ}\text{S}$ ，模式計算地震之起始座標位置 (origin of computation) 為 $119.00^{\circ}\text{E} / 70.00^{\circ}\text{S}$ 。表 4-3-1 為模式計算智利地震引發海嘯所設定之斷層參數，可由下列參數計算出海嘯的初始波形。

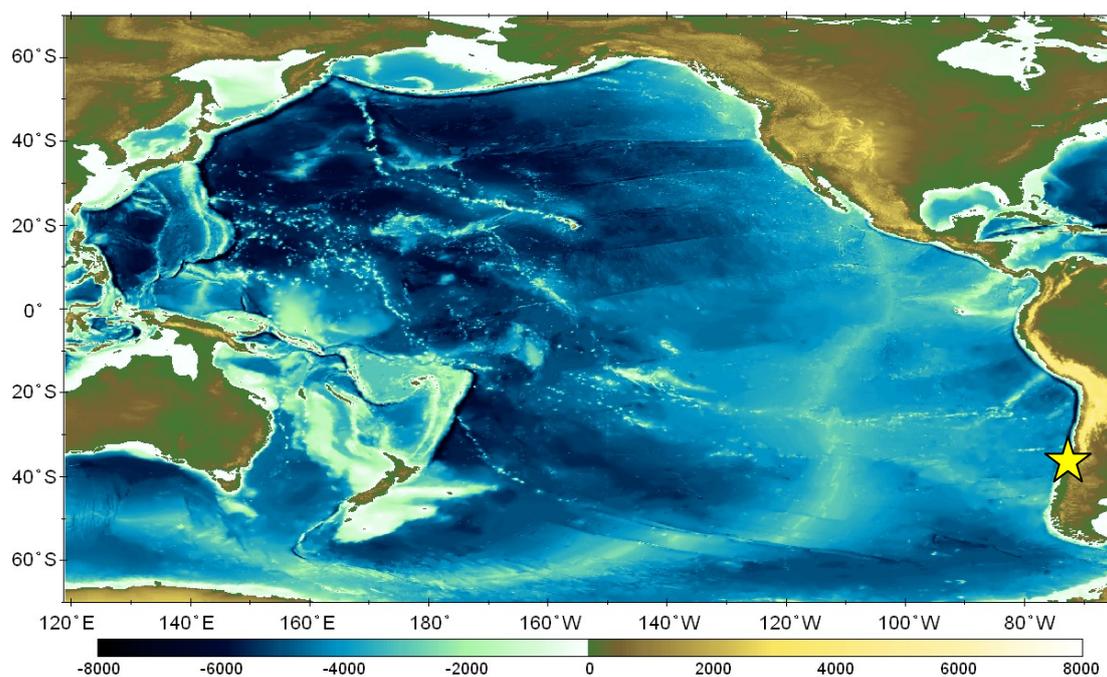


圖 4-3-2 模式計算 2010 年智利地震震央座標位置

表 4-3-1 2010 年智利海底斷層參數設定表

斷層參數	代表符號	Mw 8.8
計算原點 (經度/緯度)	X_o / Y_o	119.00 / -70.00
震央位置 (經度/緯度)	X_e / Y_e	-73.15 / -35.98
震源深度 (km)	D	23.2
斷層傾角 ($^{\circ}$)	θ	19
斷層垂直向下傾角 ($^{\circ}$)	δ	18
斷層垂直向上傾角 ($^{\circ}$)	λ	116
斷層長度 (km)	L	925.6
斷層寬度 (km)	W	127.8
斷層垂直位移高度 (m)	d	710.2

資料來源：Harvard CMT，<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>。

近域海嘯－高雄海嘯模擬

假設高雄海嘯模擬之海底斷層發生位置如圖 4-3-3 所示，圖中星號處表示震央座標位置為 119.75°E / 21.25°N，模式計算地震之起始座標位置為 119.00°E / 21.00°N。表 4-3-2 為模式計算地震引發海嘯所設定之斷層參數，可由下列參數計算出海嘯的初始波形。

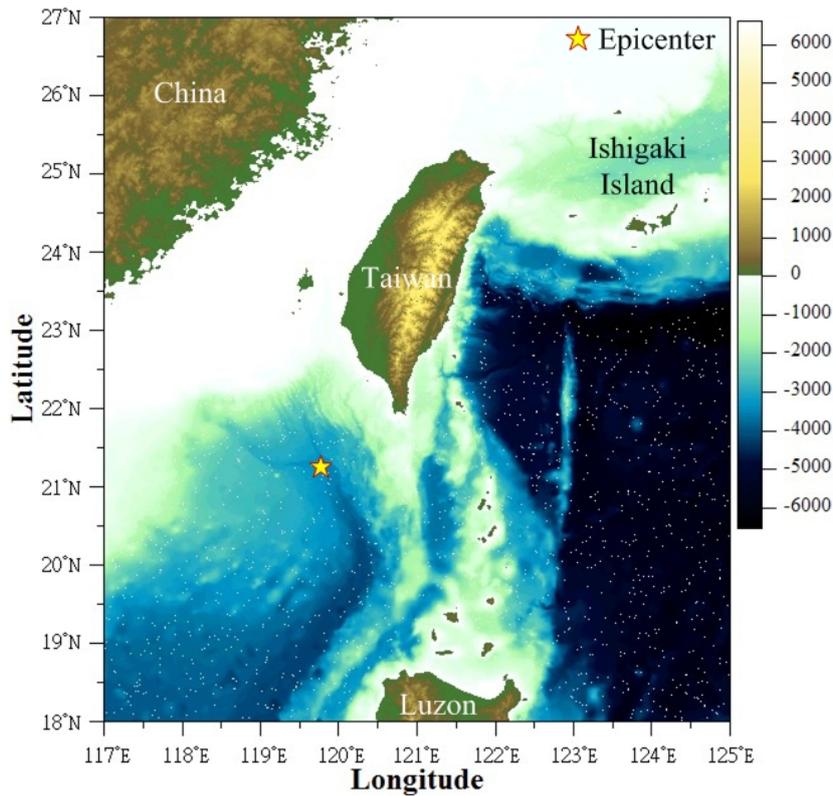


圖 4-3-3 模式計算高雄地震震央座標位置

表 4-3-2 高雄海底斷層參數設定表

斷層參數	代表符號	Mw 7.0	Mw 7.2
計算原點 (經度/緯度)	Xo / Yo	119.00 / 21.00	
震央位置 (經度/緯度)	Xe / Ye	119.75 / 21.25	
震源深度 (km)	D	10	
斷層傾角 (°)	θ	315	
斷層垂直向下傾角 (°)	δ	58	
斷層垂直向上傾角 (°)	λ	100	
斷層長度 (km)	L	57.3	78.1
斷層寬度 (km)	W	20.3	24.9
斷層垂直位移高度 (m)	d	2.6	4.9

近域海嘯—台南海嘯模擬

假設台南海嘯模擬之海底斷層發生位置如圖 4-3-4 所示，圖中星號處表示震央座標位置為 119.75°E / 21.75°N，模式計算地震之起始座標位置為 119.00°E / 21.50°N。表 4-3-3 為模式計算地震引發海嘯所設定之斷層參數，可由下列參數計算出海嘯的初始波形。

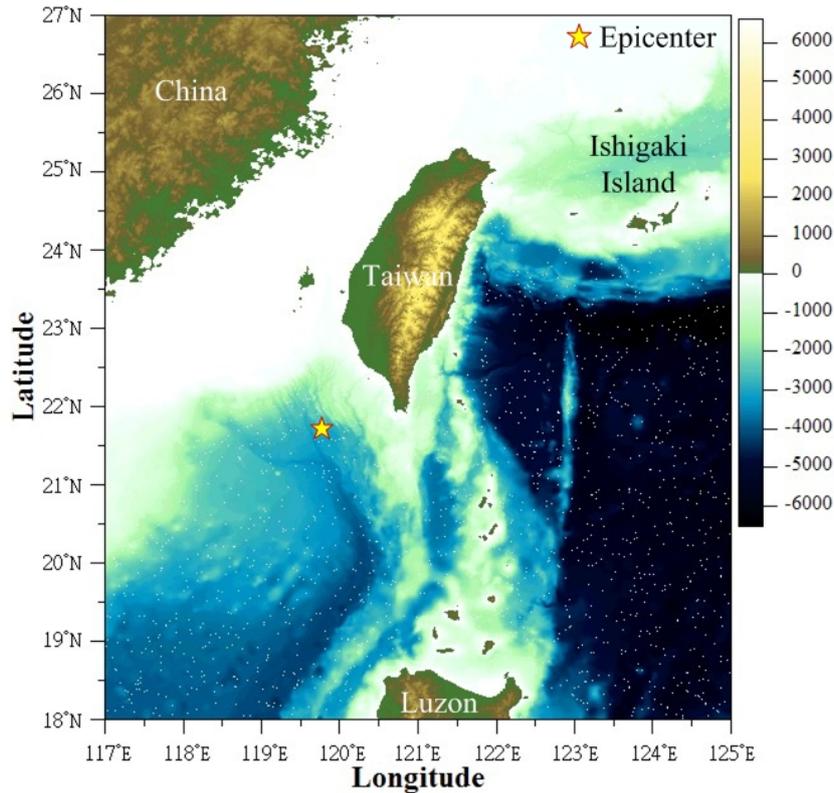


圖 4-3-4 模式計算台南地震震央座標位置

表 4-3-3 台南海底斷層參數設定表

斷層參數	代表符號	Mw 7.0	Mw 7.2
計算原點 (經度/緯度)	Xo / Yo	119.00 / 21.50	
震央位置 (經度/緯度)	Xe / Ye	119.75 / 21.75	
震源深度 (km)	D	10	
斷層傾角 (°)	θ	315	
斷層垂直向下傾角 (°)	δ	58	
斷層垂直向上傾角 (°)	λ	100	
斷層長度 (km)	L	57.3	78.1
斷層寬度 (km)	W	20.3	24.9
斷層垂直位移高度 (m)	d	2.6	4.9

第五章 海嘯模擬

5-1 遠域海嘯—2010 年智利海嘯模擬

台北時間 1986 年 2 月 27 日 14:34 智利中部外海發生規模 Mw 8.8 強烈地震，震源深度為 23.2 km，震央位置為 73.15°W / 35.98°S，斷層傾角 $\theta = 19^\circ$ 、垂直向下傾角 $\delta = 18^\circ$ ，及斷層垂直向上傾角 $\lambda = 116^\circ$ ，計算所得之斷層長度 $L = 925.6$ km、斷層寬度 $W = 127.8$ km，斷層垂直位移高度 $d = 710.2$ m 進行模擬。

依據 Mansinha & Smylie (1971) 提出之理論，於地震發生的瞬間，考慮到海底變形及其上水位是同步變化，地震時垂直海床的變形是計算海嘯的初始條件。圖 5-1-1 顯示海嘯於智利中部沿岸傳遞經歷不同時間 $T = 0、10、20、30、40$ 及 60 分鐘的變化情形，可看出地震發生的瞬間產生海嘯波波峰向太平洋地區傳遞，波谷則向近岸地區傳遞，初始波形向四面八方傳遞，在傳遞的同時尚維持良好波形。

根據淺水波傳播速率公式 $C = \sqrt{gh}$ 計算海嘯波傳遞速度，假設太平洋平均水深為 4,000 m，則海嘯波行進時速為 720km/hr，主震與台灣地區相距 18,100 km，計算海嘯波傳遞至台灣約只要 25 小時。圖 5-1-2 顯示智利海嘯於太平洋地區沿岸傳遞經歷不同時間 $T = 0、10$ 分鐘、30 分鐘，及 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25、27、29 小時的變化情形，於地震發生後約經過 1 小時，海嘯波傳遞至智利海岸，約 3 小時傳遞抵達秘魯，約 5 小時抵達厄瓜多爾，約 7 小時抵達哥倫比亞、巴拿馬及哥斯大黎加，約 9 小時抵達瓜地馬拉及尼加拉瓜等地，約 11 小時抵達墨西哥加利福尼亞灣，約 13 小時抵達紐西蘭及美國西部沿岸，約 15 小時通過夏威夷群島，約 17 小時抵達加拿大及阿拉斯加，約 19 小時抵達索羅門群島及千島島弧，約 21 小時抵達巴布亞新幾內亞，約 23 小時抵達日本及澳洲東岸，約 25 小時抵海嘯波前導波峰即傳播抵達菲律賓及台灣東岸，基本上，海嘯接近島嶼時會產生繞行海島的現象（圖 5-1-3），約 26 小時海嘯波沿著台灣東北及西南海岸線傳遞，約 29 小時海嘯波傳遞抵達台灣西岸及中國大陸沿岸並完成繞島傳播，本模式與 NOAA 海嘯模式比對計算結果相當吻合。

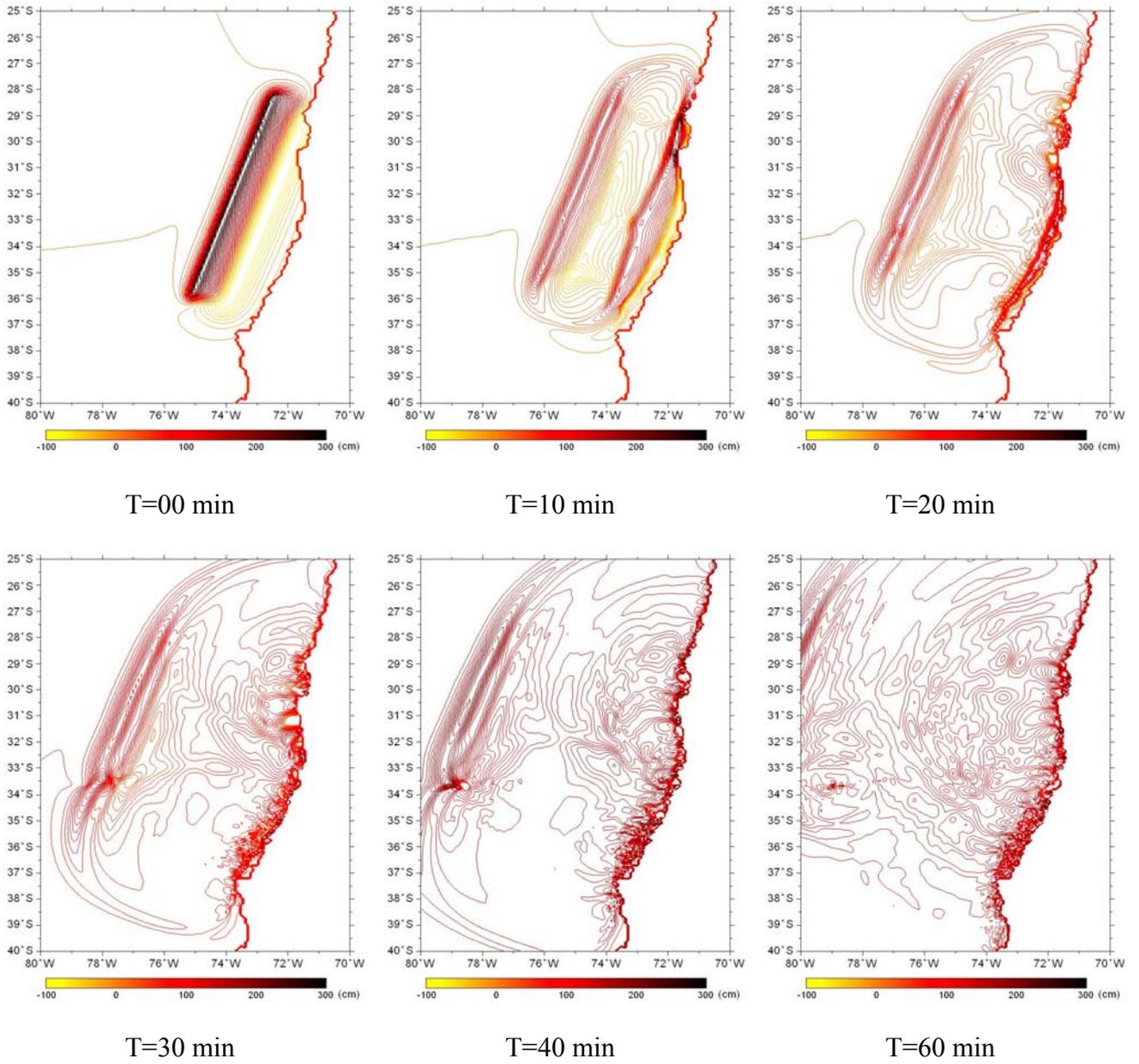


圖 5-1-1 智利海嘯初始波形分布

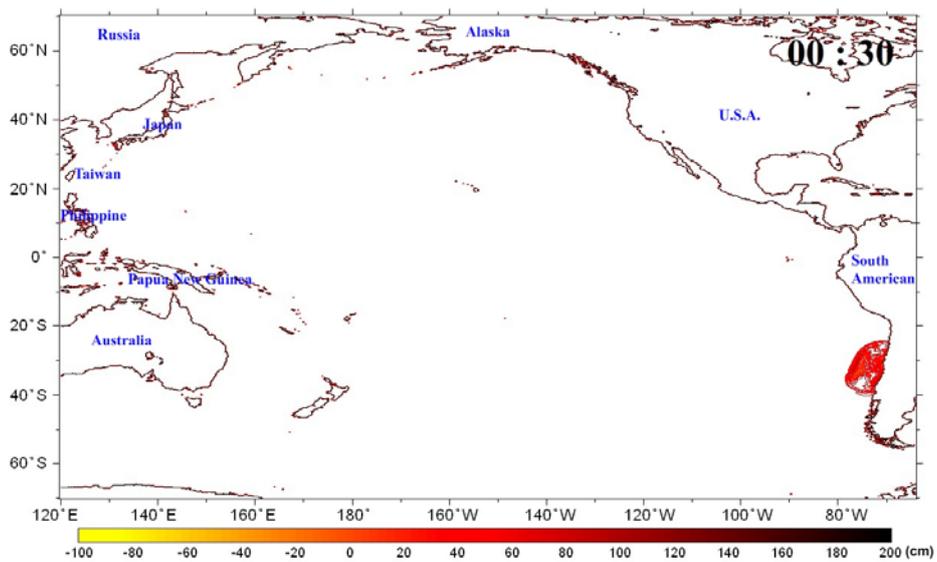
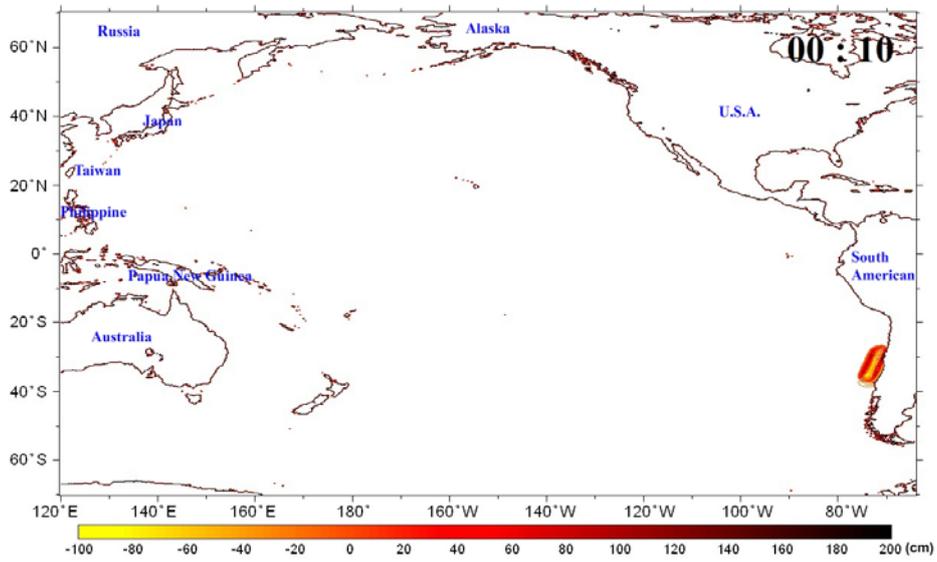
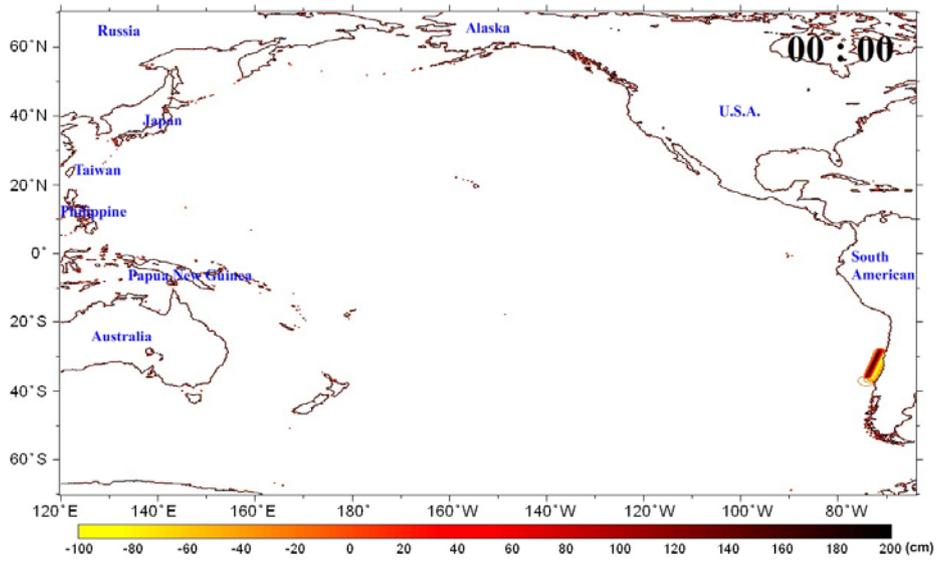


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形

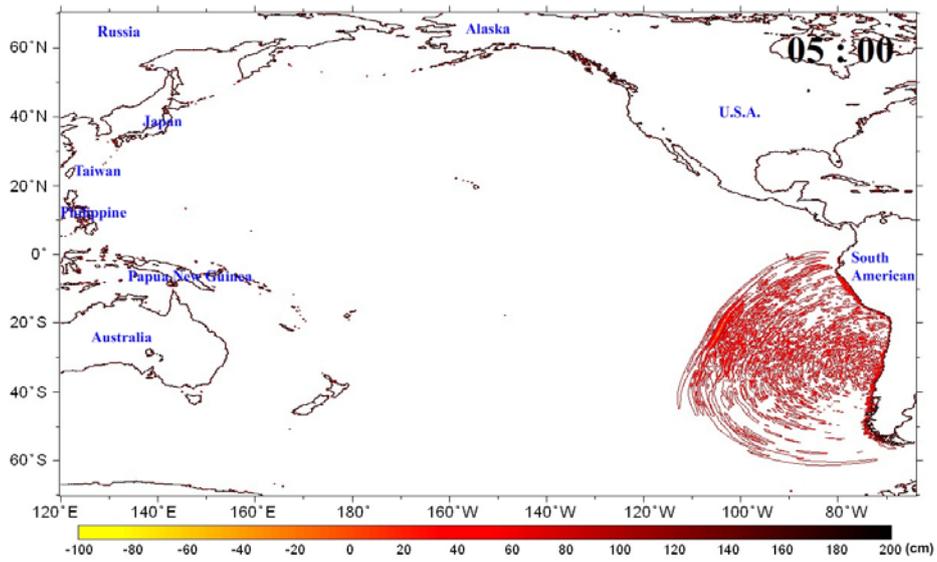
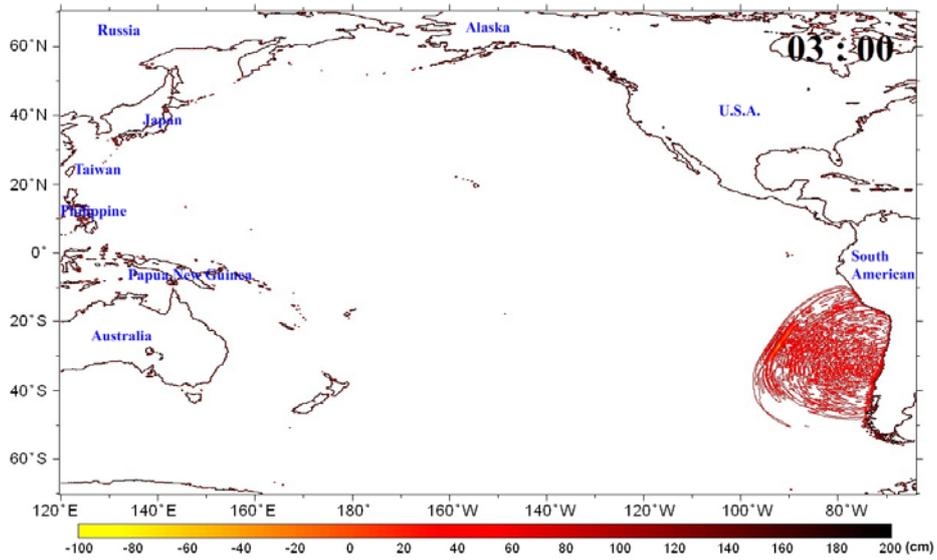
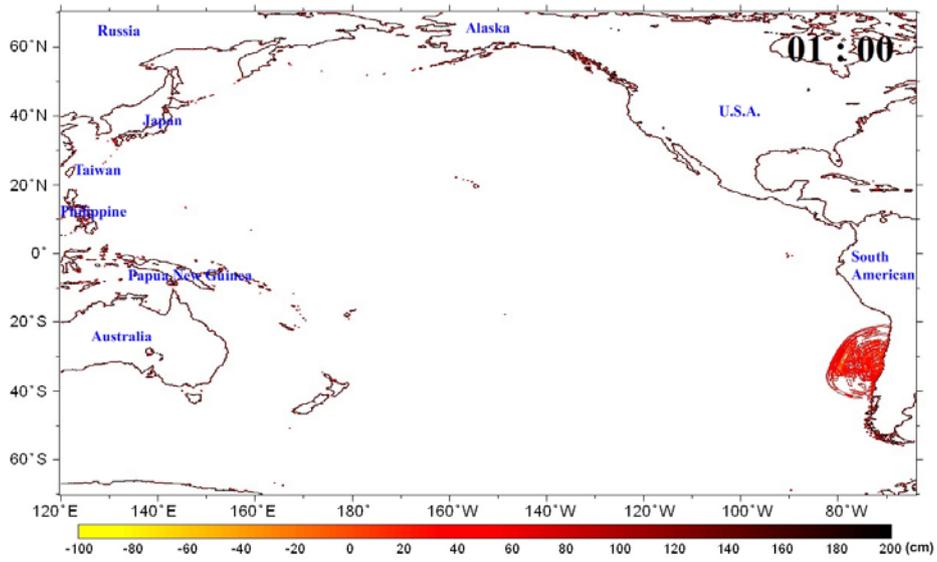


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形 (續)

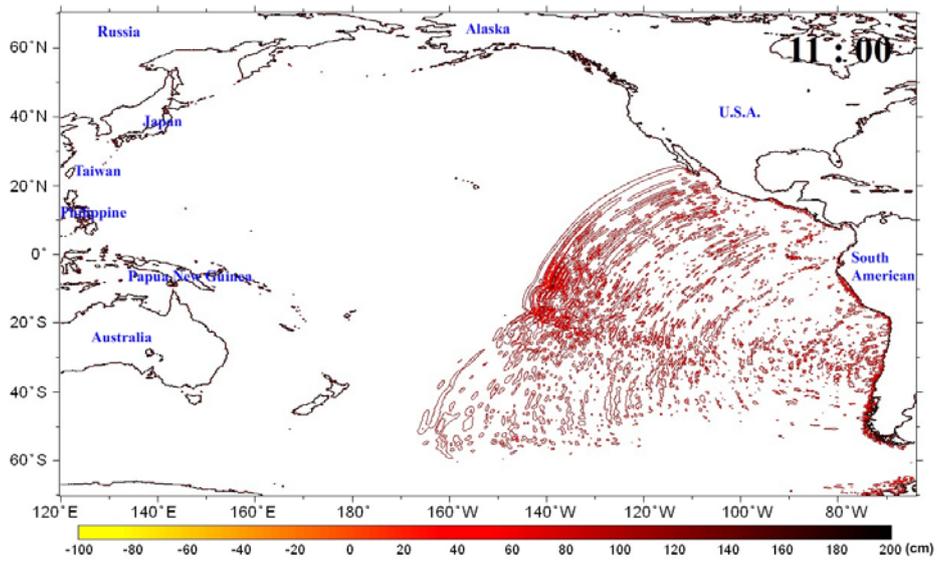
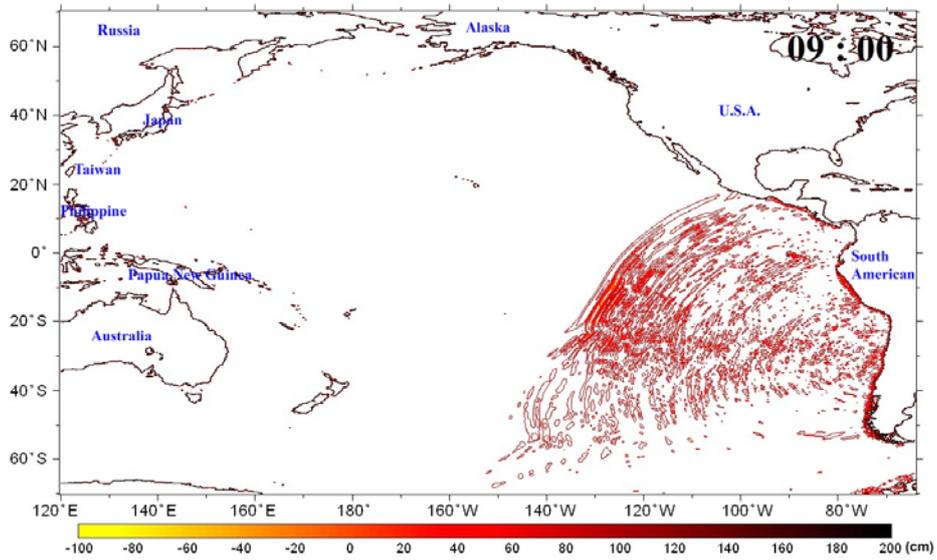
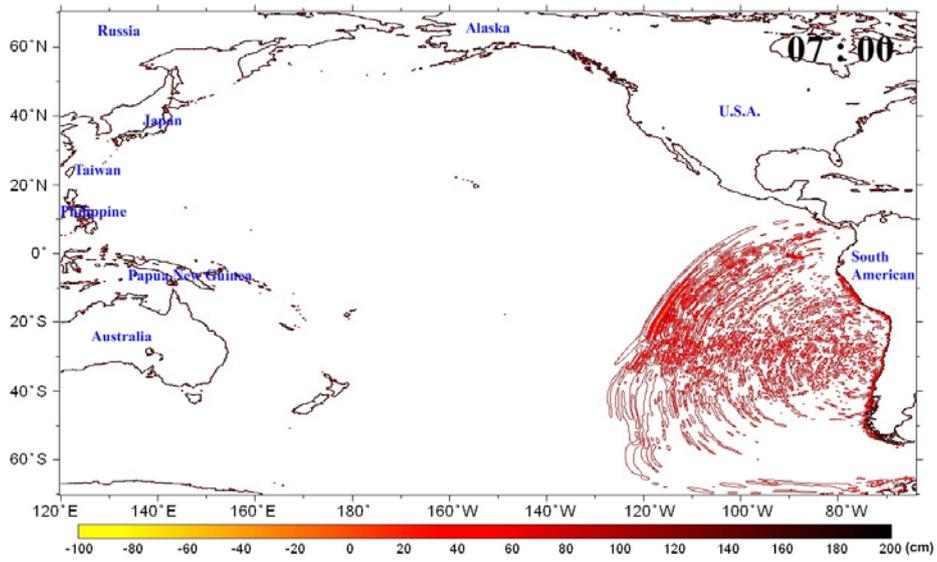


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形 (續)

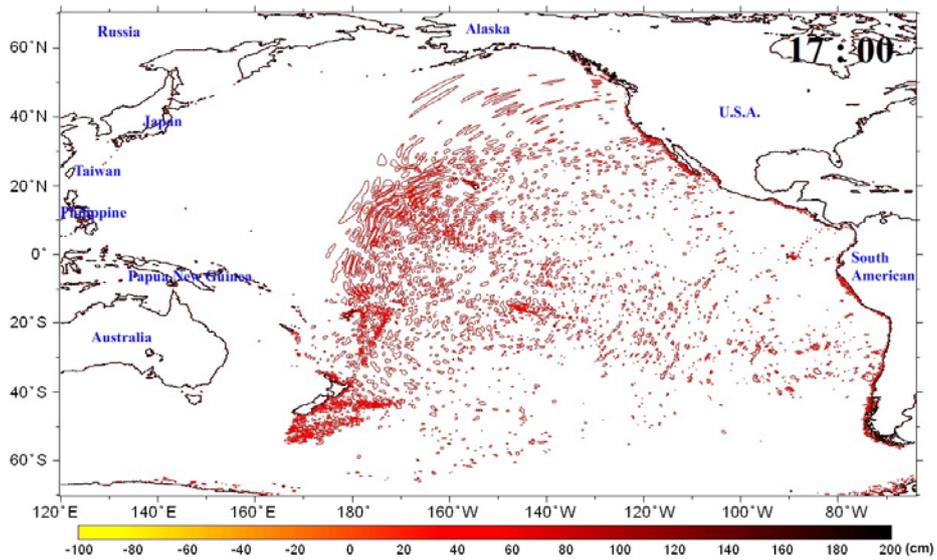
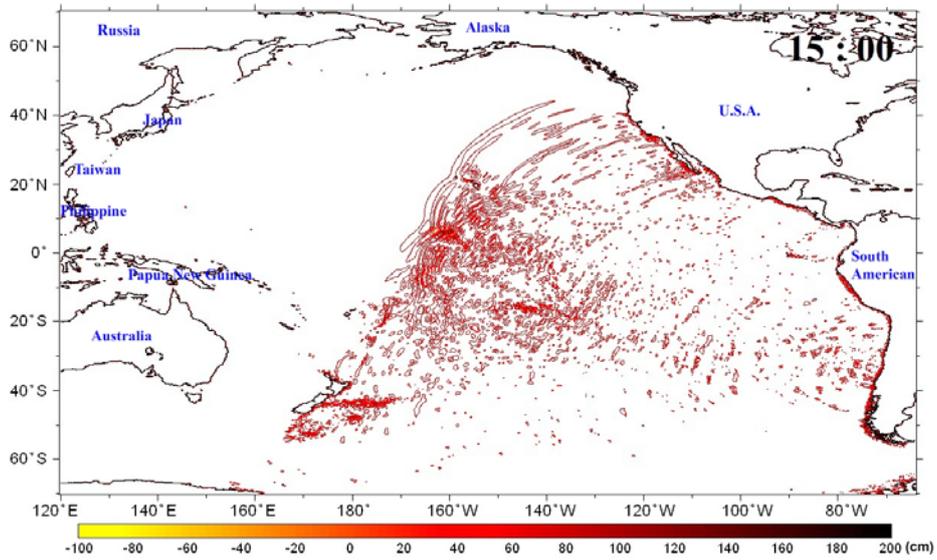
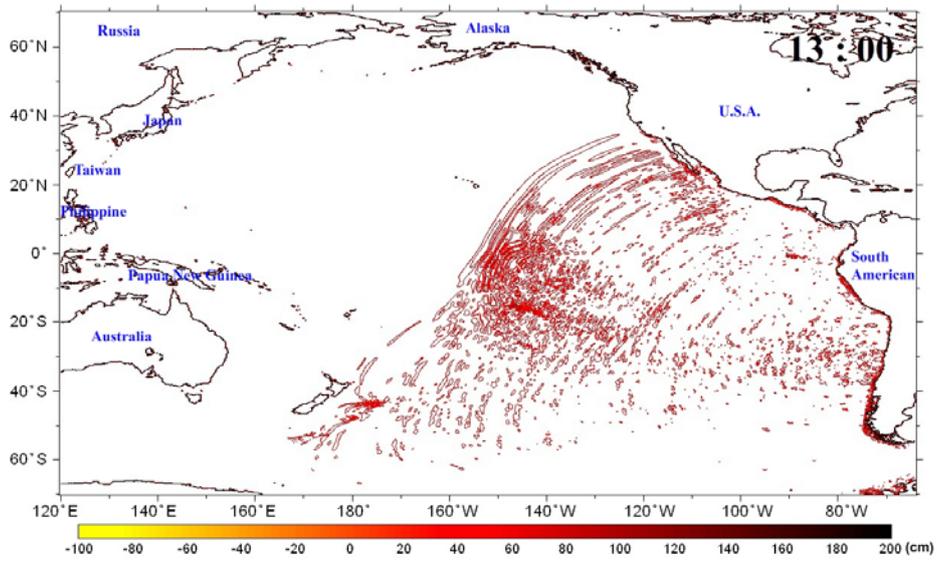


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形 (續)

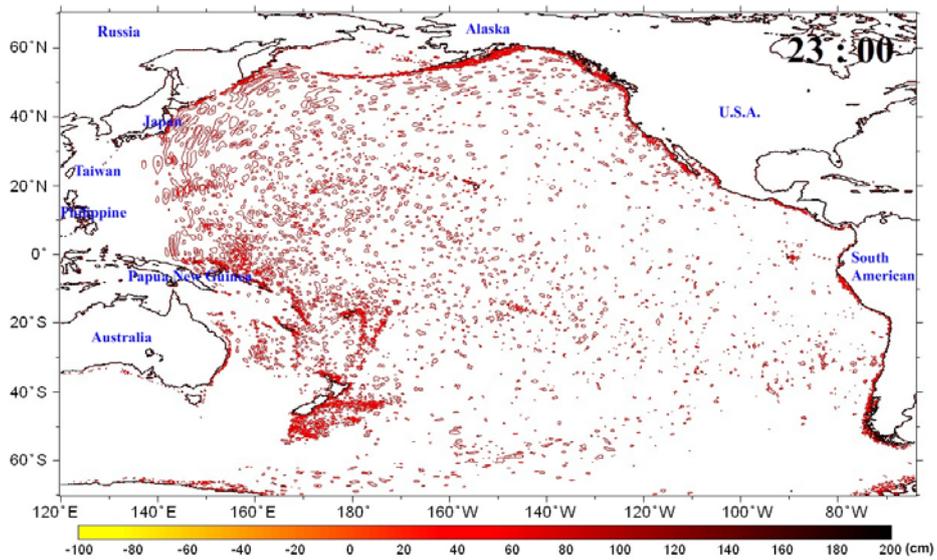
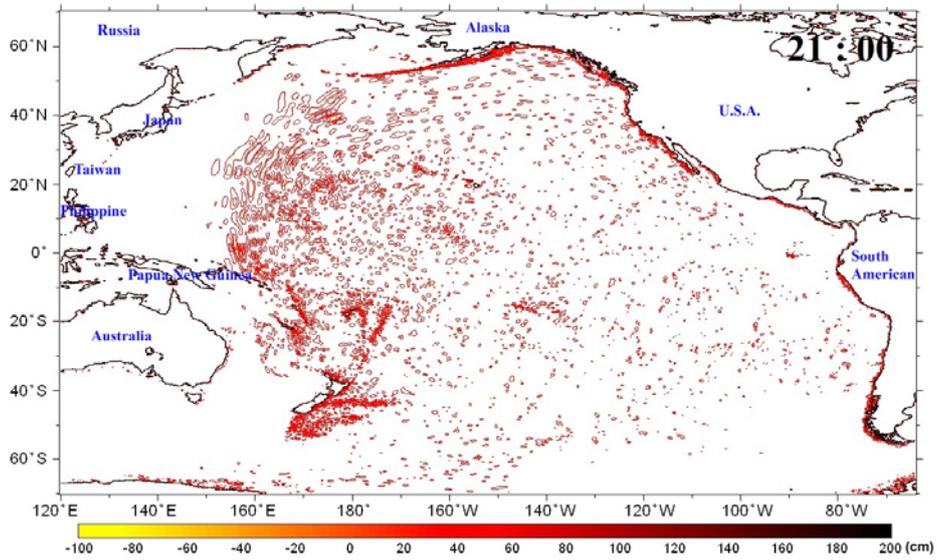
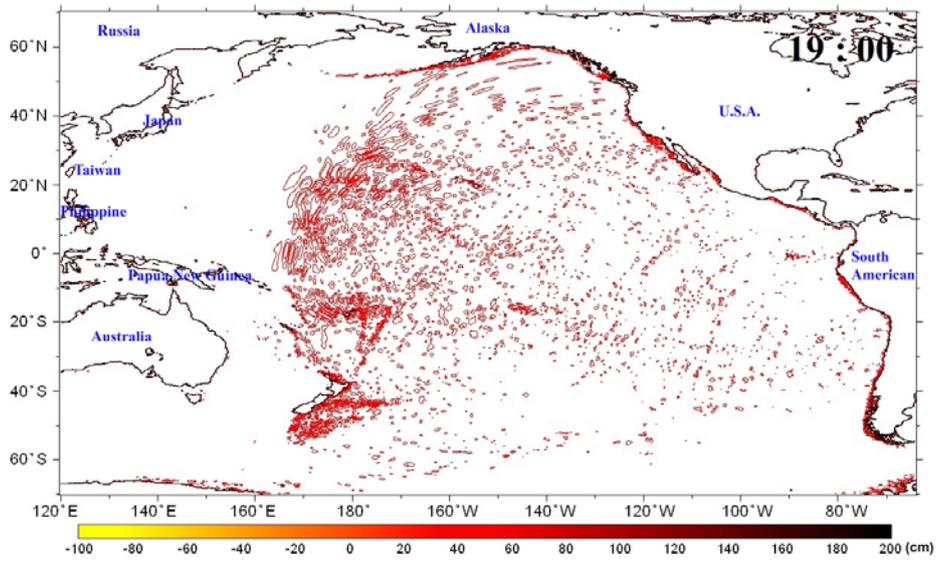


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形 (續)

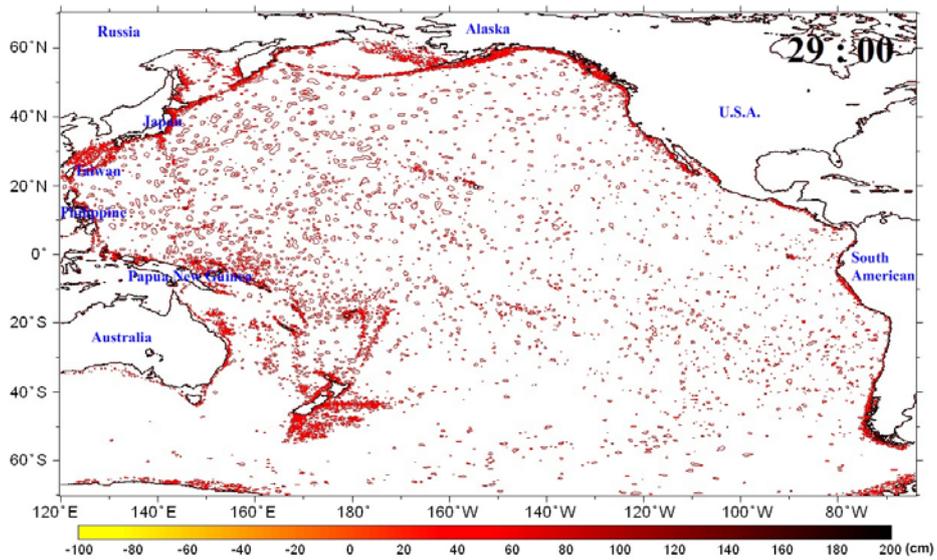
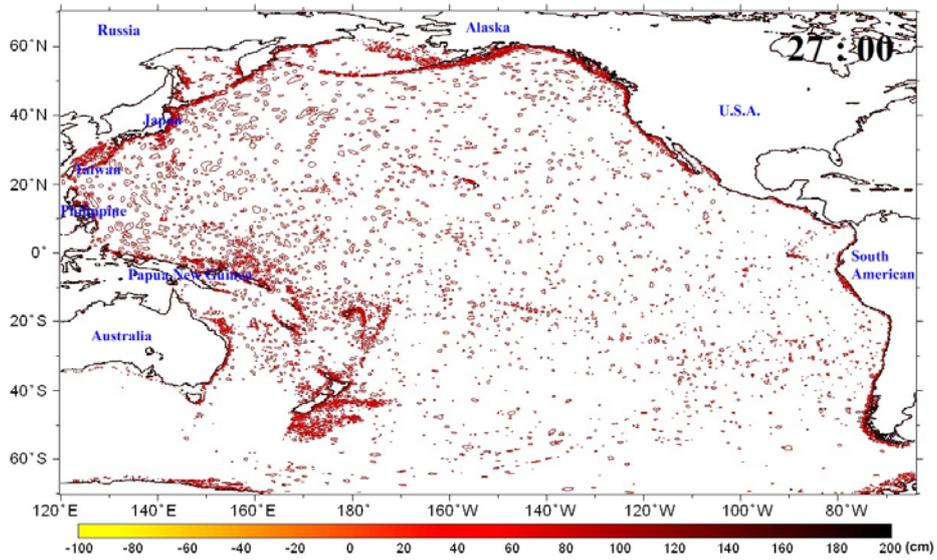
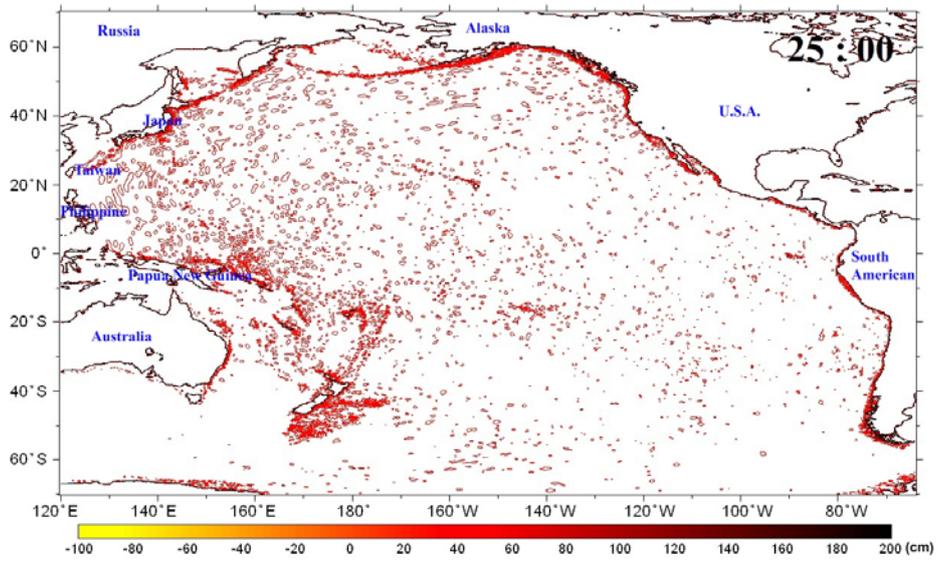


圖 5-1-2 智利海嘯於太平洋地區傳遞分布情形 (續)

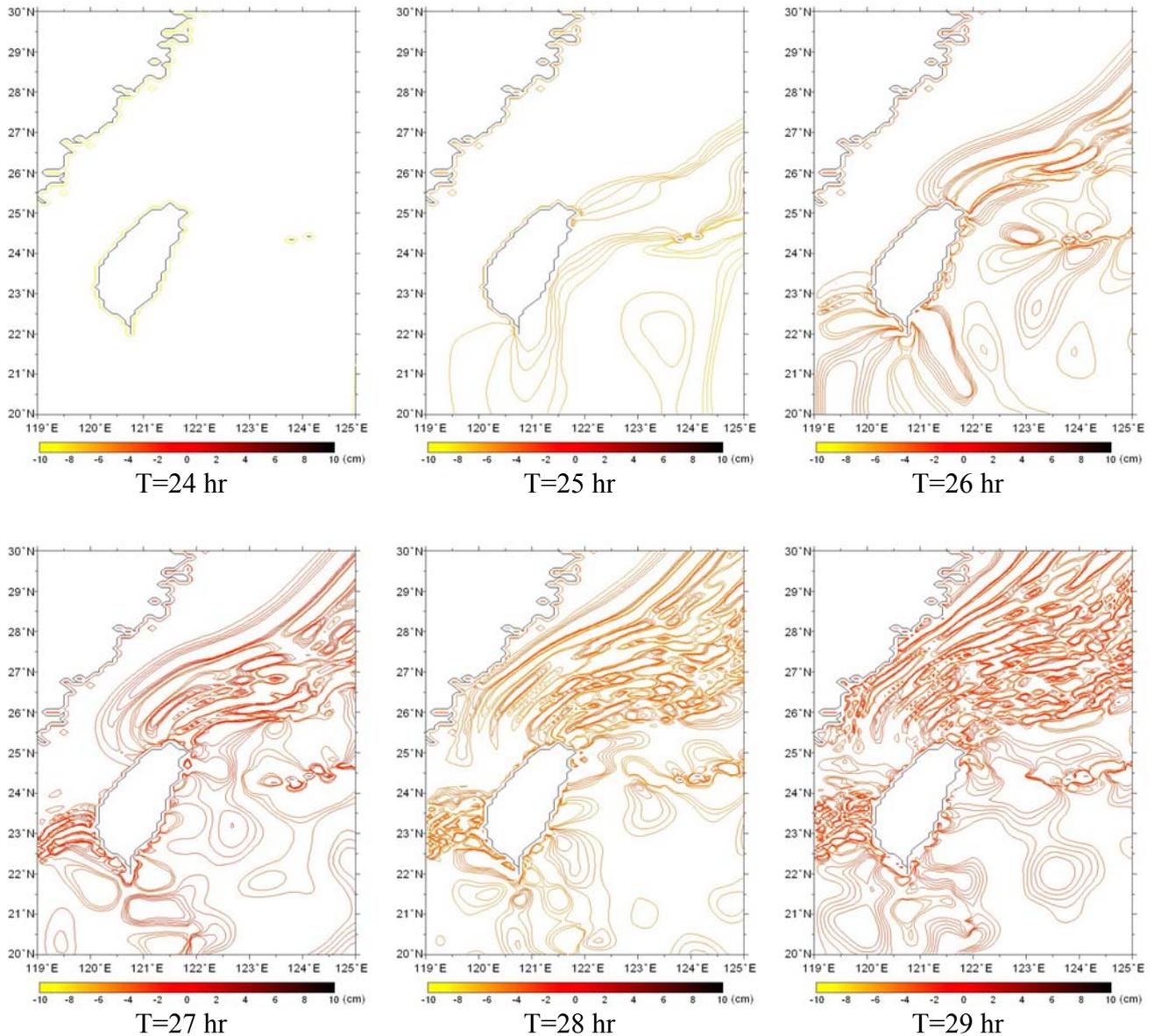


圖 5-1-3 智利海嘯於台灣地區傳遞分布情形

就理論上而言，繞島傳播之海嘯於島前（於本案例指台灣東部沿岸），也就是海嘯來源方向，及島後（台灣西部沿岸）會產生較大的波高，在此案例中島前及島後波高平坦，為一開始斷層於智利發生後，海嘯波傳播受到太平洋上眾島嶼阻隔，且台灣東岸陡峭海嘯溯上不易，海嘯波越洋傳遞至島前往北有琉球群島，往南有呂宋島弧列嶼阻擋，最後行經廣大東海及南海淺水陸棚區，行進速度趨緩，也消散了原本斷層驅動之能量。

於台灣東北部為歐亞板塊及菲律賓海板塊的交接處，此處水深約 1000~2000 公尺為沖繩海槽所在地，龍洞以北為歐亞大陸板塊上之東海大陸棚區，水

深變淺至 200 公尺左右，海嘯波由東岸傳遞至此，由於水深變淺的關係，行進速度相對較慢，為一吸收海嘯能量的天然屏障。台灣東北以南為菲律賓海板塊之擠壓區，水深約 2000 ~ 3000 公尺，經過擠壓區往東南方向為菲律賓海板塊，水深依次遞減達到 7000 公尺左右，故海嘯波由太平洋傳遞至此區行進速度甚快。於台灣南端，海嘯波往西傳遞受到台灣西南部水深地形複雜的影響，越過呂宋群島及恆春海脊也會消滅海嘯傳遞能量，故海嘯行經台灣東北及西南海域受到地形影響而減緩傳播速度，且台灣海峽為廣大的大陸棚區水深約小於 200 m，此區水深地形可有效的削減海嘯能量。

自 1995 年起美國開始使用大洋海嘯測報系統 DART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)，在深海海底設有水面長波壓力偵測感應器，將資料以音波傳給錨碇浮於海面上的浮球，其上裝有衛星傳輸系統，將資料立即傳回預警中心，電腦即時分析，算出海嘯行進模式及規模。2001 年美國已在太平洋設有 6 個偵測站使用 DART 浮標，2005 年南亞海嘯後計畫增設 32 處，在 2007 年年中完成使用運作。

PTWC 同時結合太平洋各國所設置之潮位波浪測量站，形成一個太平洋海嘯警報系統，將海嘯情報發布各會員國（圖 5-1-4）。擷取 2010 年智利海嘯於太平洋地區實測資料與模擬結果進行比對，由於有些測站資料較不完整，選取有較完整資料的測站（Station52401 及 51406）進行與模式模擬結果作比對。DART 比對測站資訊如表 5-1-1，比對測站位置如圖 5-1-4。本次智利海嘯發生於 2/27 06:34:14 UTC，太平洋地區測站水位濾波結果如圖 5-1-5，較靠近震源智利的 Station 51406 濾波後得到較大的海嘯波高約 30 cm，另一位於太平洋西岸的 Station 52401 濾波後的海嘯波高約 10 cm，與太平洋海嘯中心公布之海嘯振幅相當接近（圖 5-1-6）。

表 5-1-1 太平洋地區水位比對測站資訊

測站	Station 52401	Station 51406
位置	610 NM Northeast of Saipan	2,900 NM Southeast of Hawaii
經緯度	19.254°N 155.756°E (19° 15'16" N 155° 45'23" E)	8.480°S 125.027°W (8°28'49" S 125°1'36" W)
測站型式	Owned and maintained by National Data Buoy Center	
	2.6-meter discus buoy DART II payload	2.6-meter discus buoy DART II payload
		

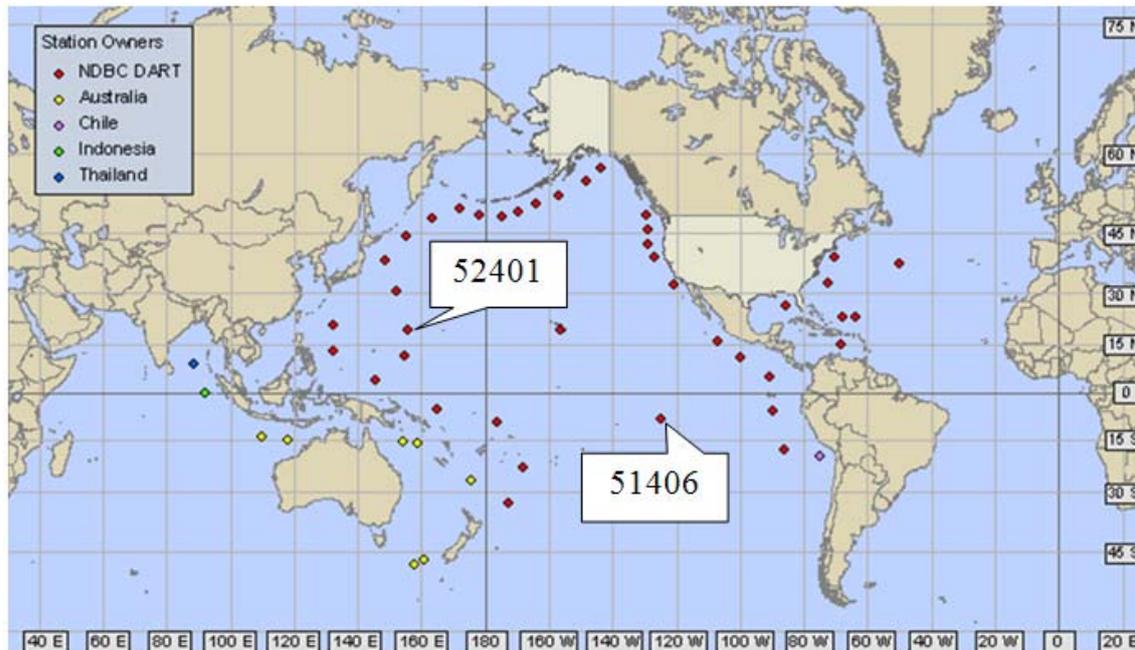


圖 5-1-4 NOAA 安置 DART II 深海雙向通訊海嘯警告浮台位置

太平洋地區模擬與實測水位比對結果如圖 5-1-7 所示，於發震時間開始時，Station 51406 測站於 2/27 06:34 UTC 即量測到因地震引起的水位變動，於 15:00 至 16:00 量測到海嘯波通過的最大振幅，海嘯傳遞到達西太平洋 Station 52401 約於 2/28 4:00 量測到海嘯波通過，模式推估海嘯初波到達上述二測站與實測資料到達時間及水位約動均相當接近。

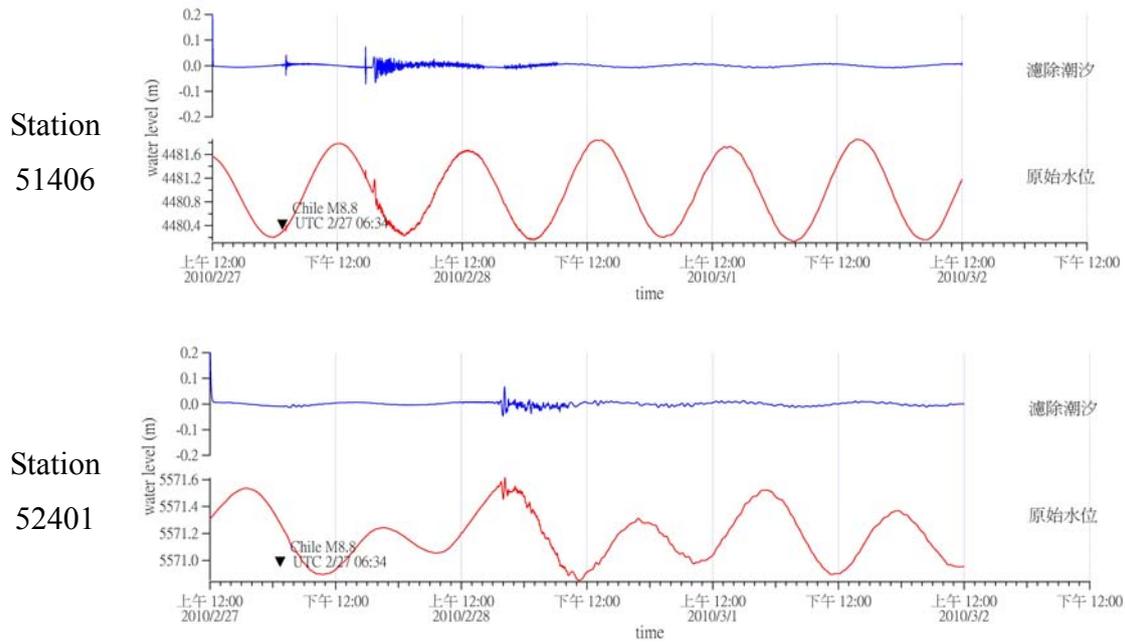
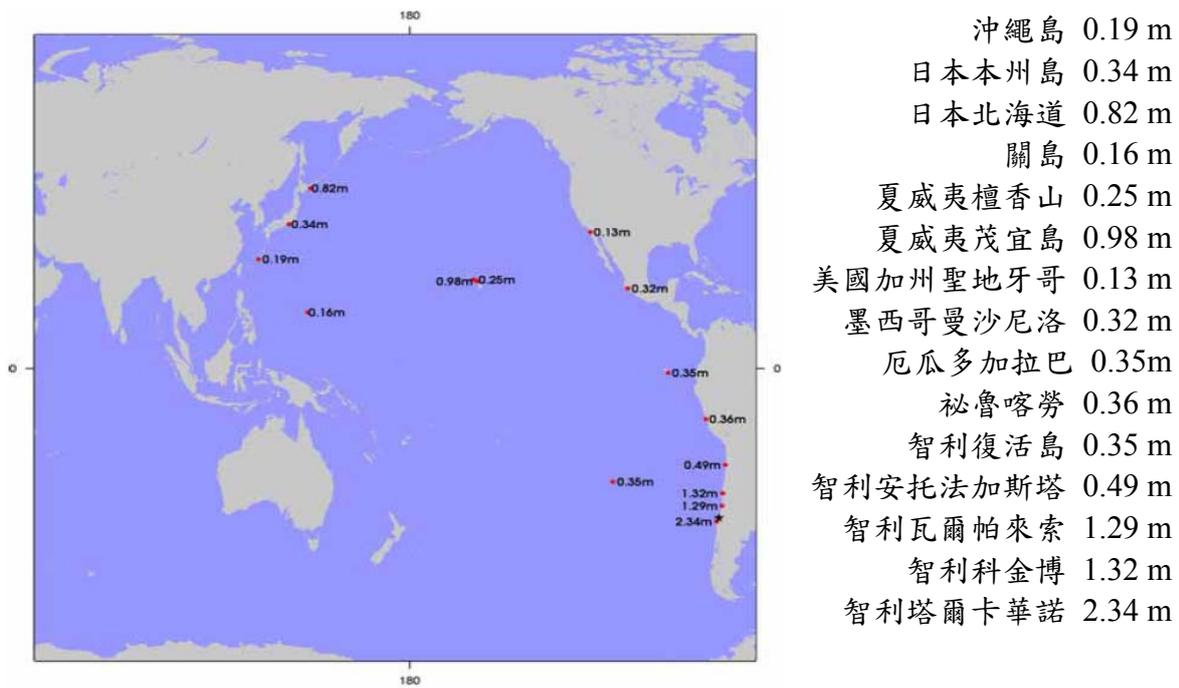
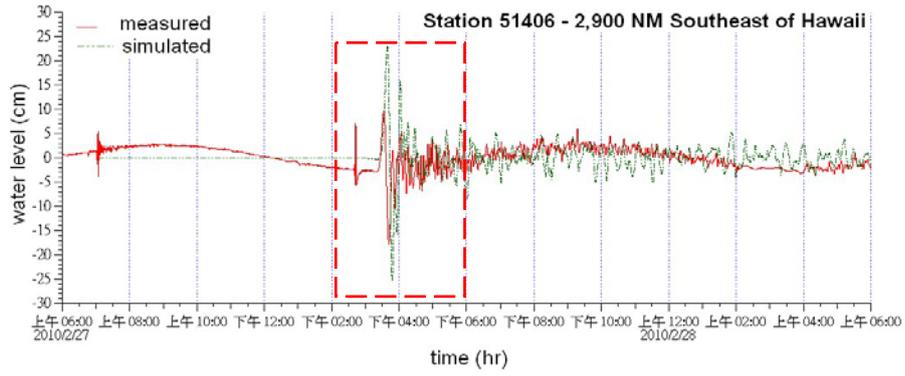


圖 5-1-5 2010 年智利海嘯於太平洋地區水位濾波

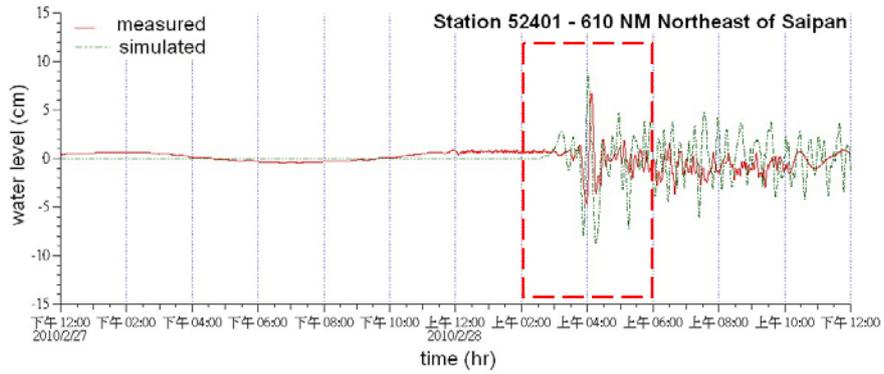
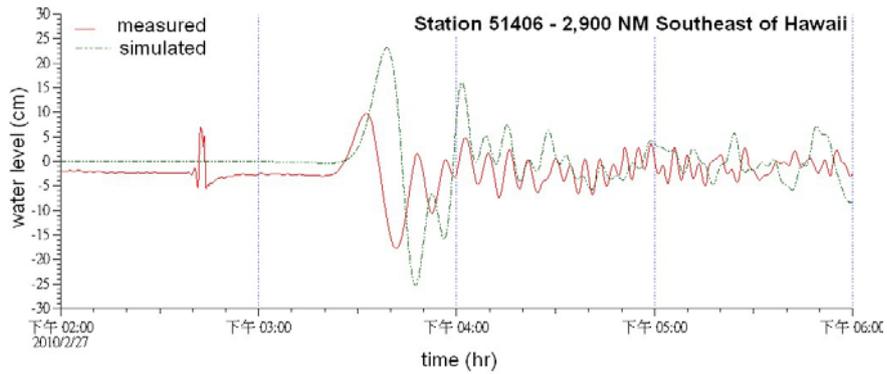


資料來源：摘錄自太平洋海嘯中心第 027 報海嘯電文

圖 5-1-6 2010 智利地震實際觀測之海嘯振幅及位置圖



Station
51406



Station
52401

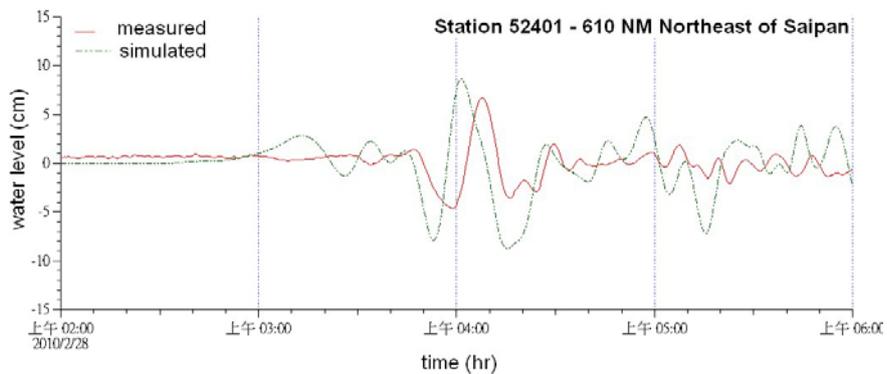


圖 5-1-7 2010 年智利海嘯於太平洋地區水位比對

擷取 2010 年智利海嘯於後壁湖潮位站 2/28 至 3/1 濾波結果與模式輸出之水位結果進行比對如圖 5-1-8，模式推估與實測資料的最大海嘯波振幅約在 50 至 60 cm 左右，實測水位資料明顯有海嘯波振幅到達的時間點為 2/28 15:30 左右，本模式推估與 NOAA 模式所估計到達台灣的影響時間相同約在 2/28 14:26 至 55 分之間，造成模式推估與實測資料之間差異的主要原因可能由於所使用網格為 ETOPO5 水深地形，ETOPO5 的網格可適當模擬出大洋上海嘯波水位傳遞情形，但於近岸地區由於水深地形變化複雜，且受到港埠地形影響及港池內的水位反射情形而使模擬水位有所差異，於近岸地區可能無法充份模擬出測站水位變動，未來可考慮使用較精細的網格進行計算。

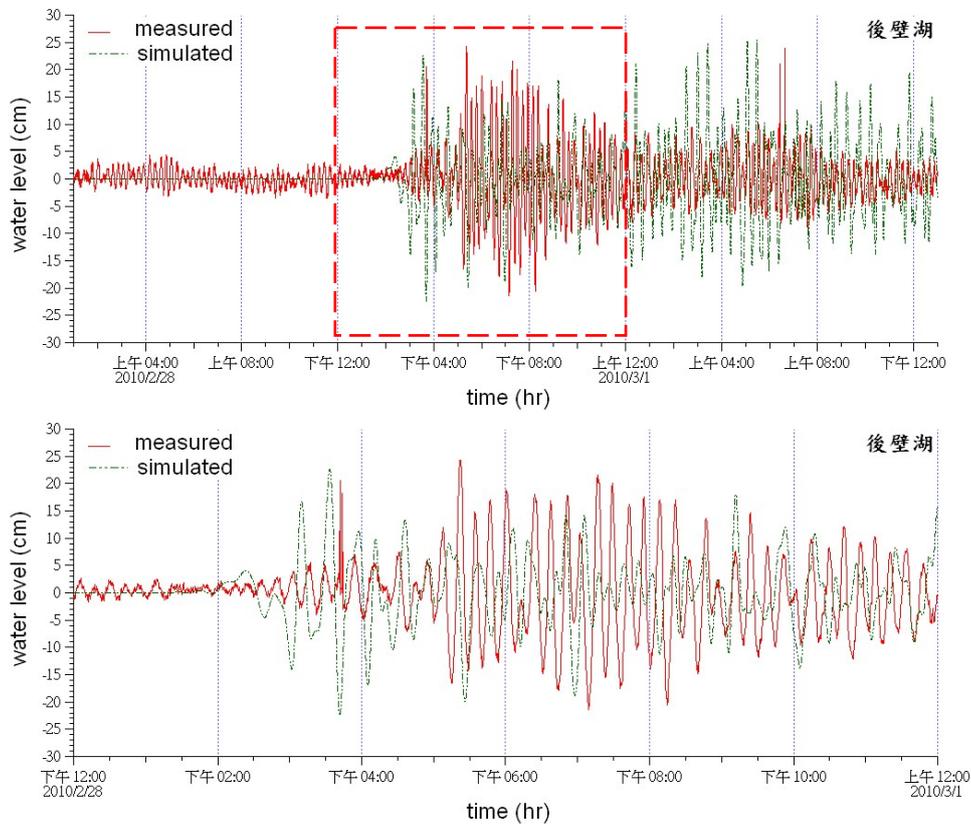


圖 5-1-8 2010 年智利海嘯於蜆廣嘴測站水位比對

5-2 近域海嘯—高雄海嘯模擬

假設高雄西南外海發生二種地震規模情形，分別為狀況一：規模 Mw 7.0 地震，震源深度為 10.0 km，震央位置為 119.75°E / 21.25°N，斷層傾角 $\theta = 315^\circ$ 、垂直向下傾角 $\delta = 58^\circ$ ，及斷層垂直向上傾角 $\lambda = 100^\circ$ ，計算所得之斷層長度 $L = 57.3$ km、斷層寬度 $W = 20.3$ km，斷層垂直位移高度 $d = 2.6$ m。以及狀況二：規模 Mw 7.2 地震進行模擬，計算所得之斷層長度 $L = 78.1$ km、斷層寬度 $W = 24.9$ km，斷層垂直位移高度 $d = 4.9$ m。

高雄海嘯狀況一：

依據 3-1 章節 Mansinha & Smylie (1971) 提出之理論，於地震發生的瞬間，考慮到海底變形及其上水位是同步變化，地震時垂直海床的變形是計算海嘯的初始條件。計算 Mw 7.0 $d=2.6$ m 得出海嘯的初始波形如圖 5-2-1，初始波形剖面如圖 5-2-2 所示。對照圖 5-2-3 $T = 0$ min 可看出初始波峰及波谷的分布情形，可知地震發生的瞬間，造成斷層走向為西北—東南方向，產生海嘯波峰直撲台灣西南沿岸，初始波高約為 0.8 m，同時也產生 -0.13 m 的波谷。

圖 5-2-3 分別顯示高雄海嘯狀況一在計算範圍 Region 1 傳遞經歷不同時間 $T = 0、2、4、6、12、18、24、30、40$ 及 60 min 的變化情形，圖中水位等高線上之數字為波高，單位為公尺。 $T = 0$ min 圖中橫切線即為圖 5-2-2 之海嘯初始波剖面。根據淺水波傳播速率公式 $C = \sqrt{gh}$ 計算海嘯波傳遞速度，海嘯發生處距離高雄旗津沿岸約 155 km，此區域水深約 3,100 m，就理論而言，海嘯發生後傳遞至旗津沿岸約需 26 min，於圖 5-2-3 海嘯發生約 24 min 後，海嘯前導波峰即傳播抵達高雄旗津沿岸，與理論推估大致相符。

海嘯波傳遞一段時間即可擴展至相當大的海域範圍，沿著台灣西南沿岸傳播的前導波通過屏東小琉球，並接近高雄海岸，於岸邊溯上會有水位堆積現象。本次模擬地震強度只有 7 級，於屏東近岸水位皆在 1 m 以下，根據中央大學水文與海洋科學研究所的數值模擬結果，如果地震是 7.5 級，將會於屏東沿岸產生 2 m 的海嘯，如果是 8 級則海嘯將高達 5 m。

海嘯波在台灣西南的南中國海盆產生後，其海底水深約 3,000 ~ 4,000 m，進入南海陸棚前海嘯波擴散傳遞速度甚快（圖 5-2-3 T= 0 ~ 6 min），行進進入更高的南海陸棚地形後，海嘯波後方行進速度比前導波前方行進稍快，在陸棚前緣有水位堆積現象（T= 12 ~ 18 min），在越過南海陸棚後，前導波前後方傳播速率便趨於一致（T= 24 ~ 30 min）。於狀況一中除了初始波高達到 0.8 m 左右，其他時間點 region 1 的波高相當平坦，都在 0.5 m 以下。

圖 5-2-4 分別顯示高雄海嘯狀況一在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 T = 22、24、26、28、30、40、50、60 min 的變化情形，T = 22 min 圖中上方箭頭指示為高雄港「第一港口」，下方箭頭指示為「第二港口」，於旗津區內側為港內「迴船池」及「內港區」部份。Region 3 水深由旗津海岸線往圖中左下角依次遞增。於海嘯發生 22 min 後，海嘯前導波傳播進入模式計算 region 3 內，波高約-0.2 至 0.4 m；經過約 24 min，前導波抵達第二港口外港，此時波高約介於-0.4 至 0.6 m。傳遞經歷 24 至 40 min，海嘯波持續由高雄港西南方傳遞至高雄港區，並沿著旗津海岸線由高雄港第一及第二港口傳播進入港內，由於地形淺化的影響，波高振幅加大，接觸陸地後的海嘯水位擾動複雜，傳遞經歷 40 至 60 min，旗津海岸線附近波高約介於-0.5 至 0.5 m 之間。

圖 5-2-5 分別顯示高雄海嘯狀況一在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 T = 24、26、28、30、40、50、60、70、80 及 90 min 的變化情形，於海嘯發生 24 min 後，前導波抵達第二港口外港，並且開始溢淹旗津海岸地區，海嘯波在產生後傳遞經歷 24 至 40 min，短時間港區內水位變化加大，並順著海嘯傳遞方向淹溢高雄市，溢淹範圍由北邊鼓山區、鹽埕區、旗津區至南邊的小港區沿岸。

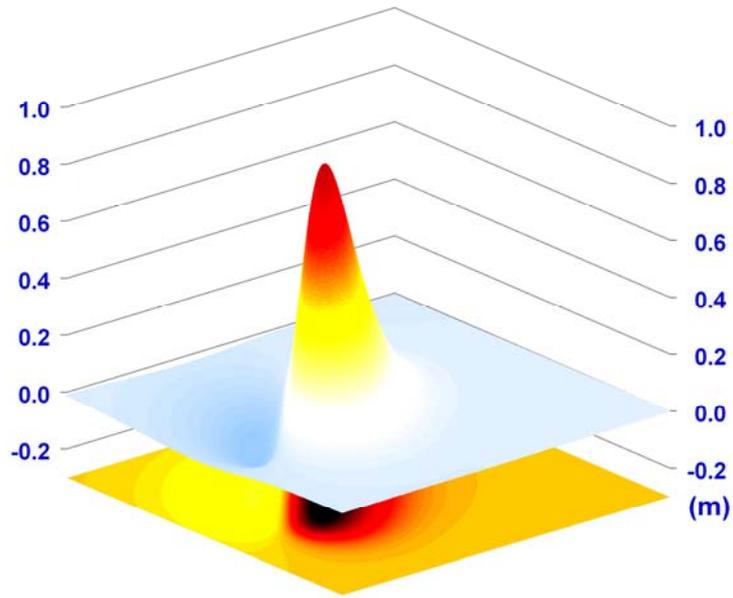


圖 5-2-1 高雄海嘯狀況一 (Mw 7.0) 3D 初始波形

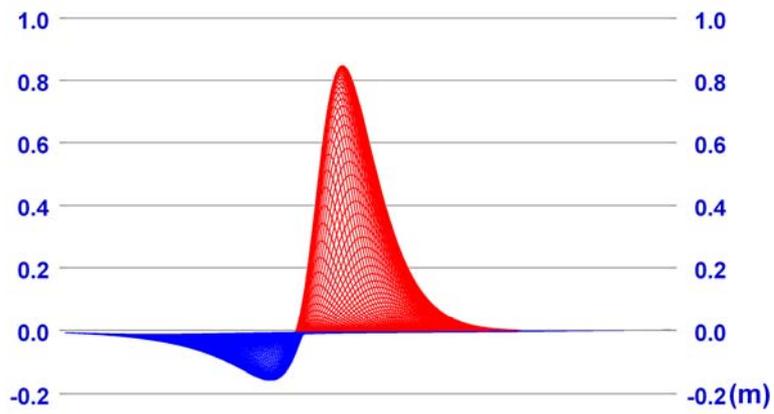


圖 5-2-2 高雄海嘯狀況一 (Mw 7.0) 初始波形剖面

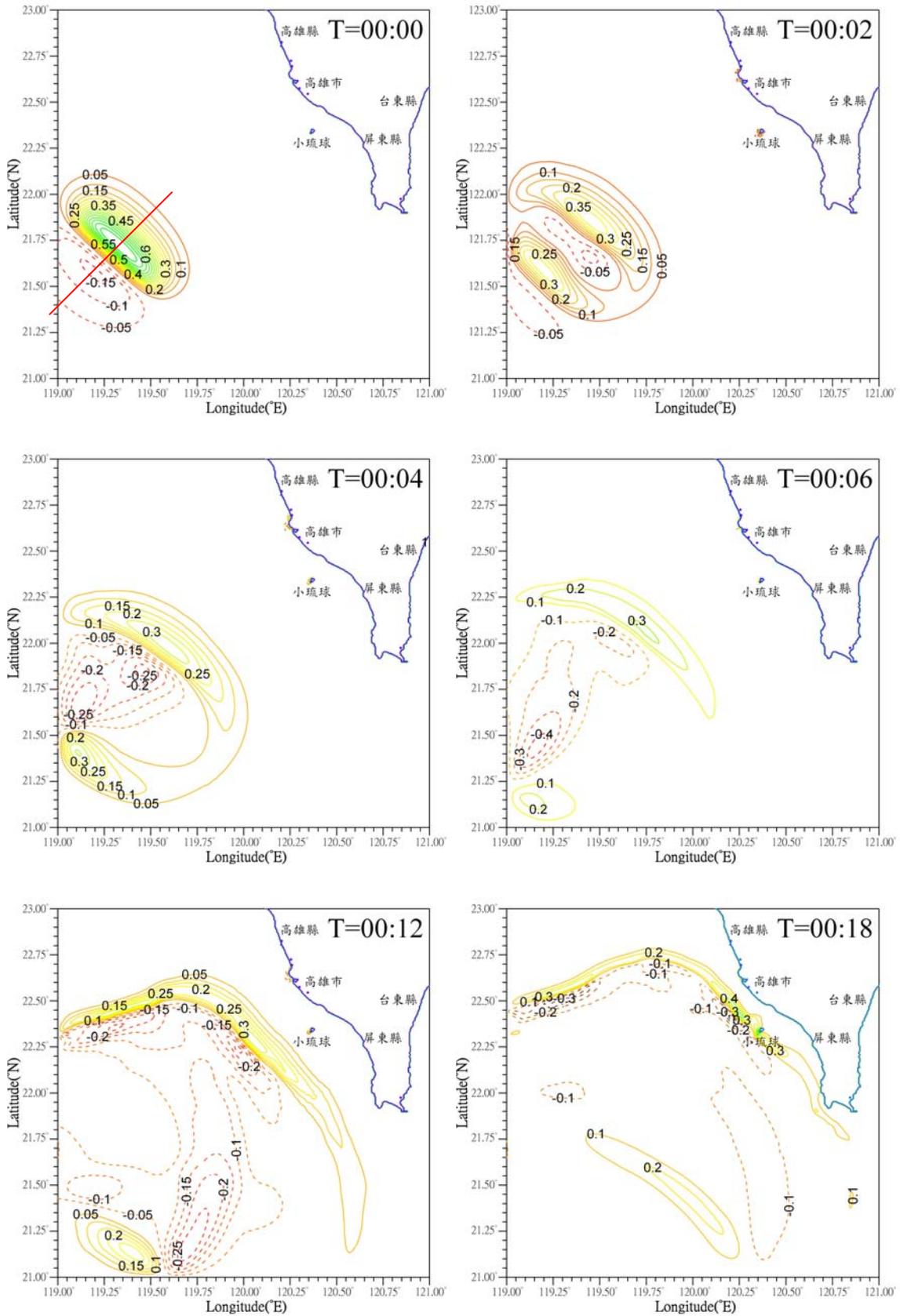


圖 5-2-3 高雄海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形

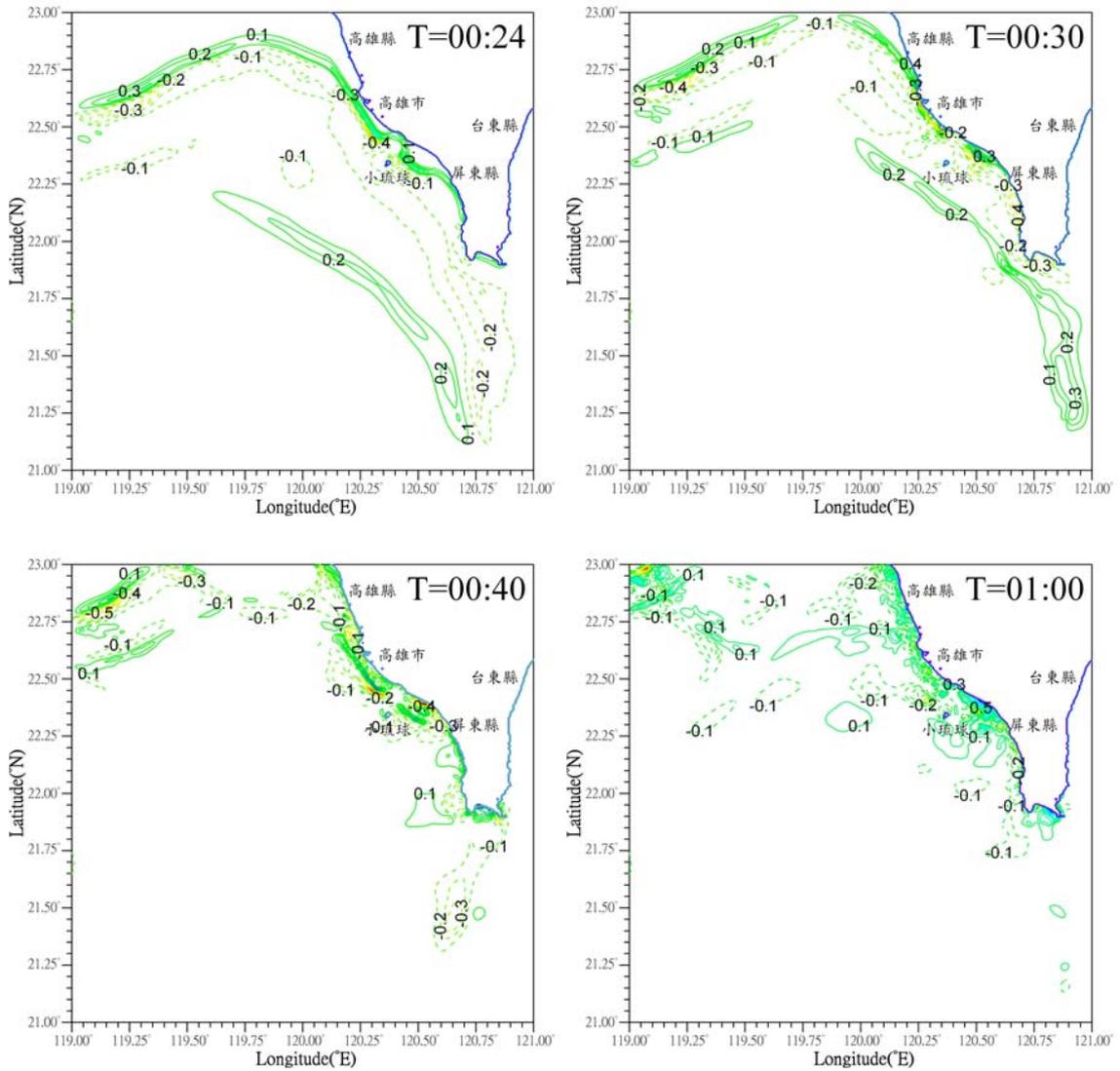
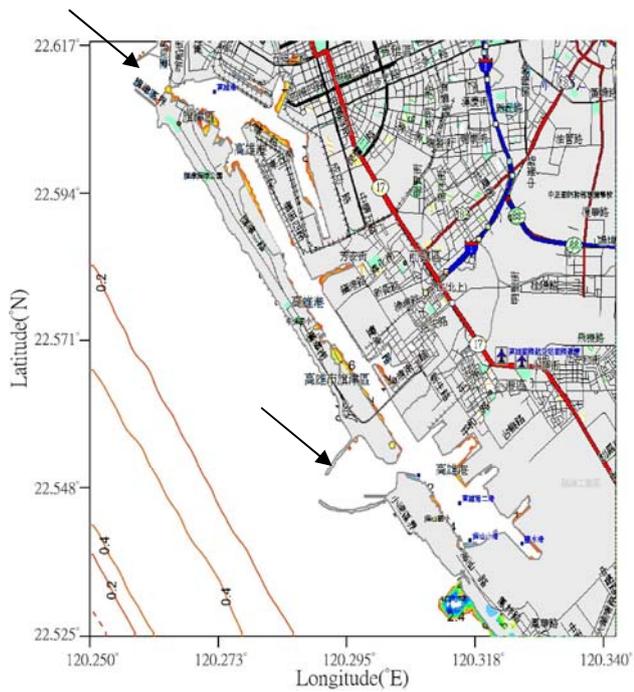
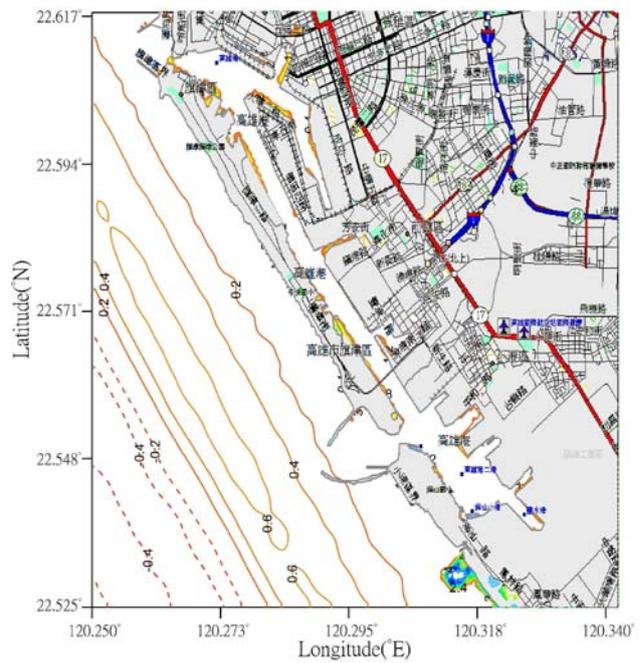


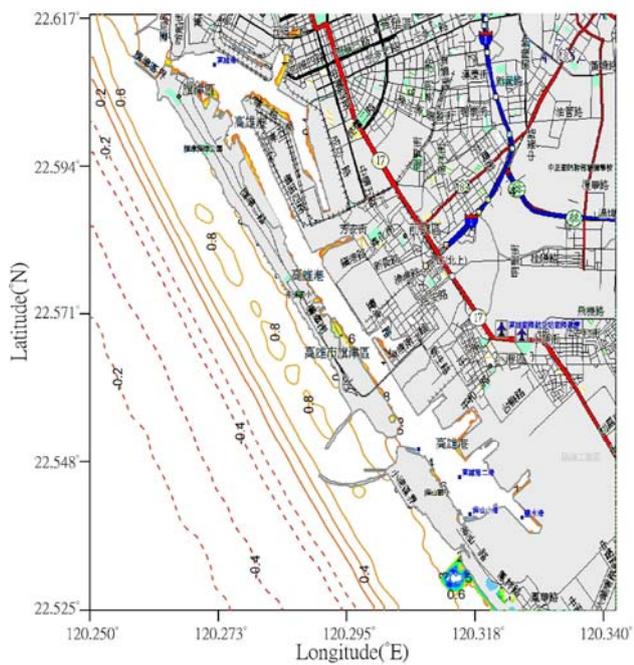
圖 5-2-3 高雄海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形（續）



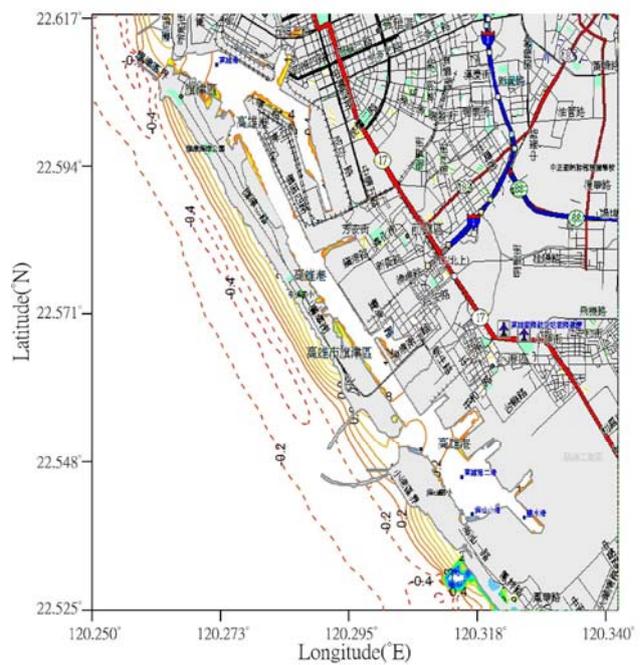
T= 22 min



T= 24 min

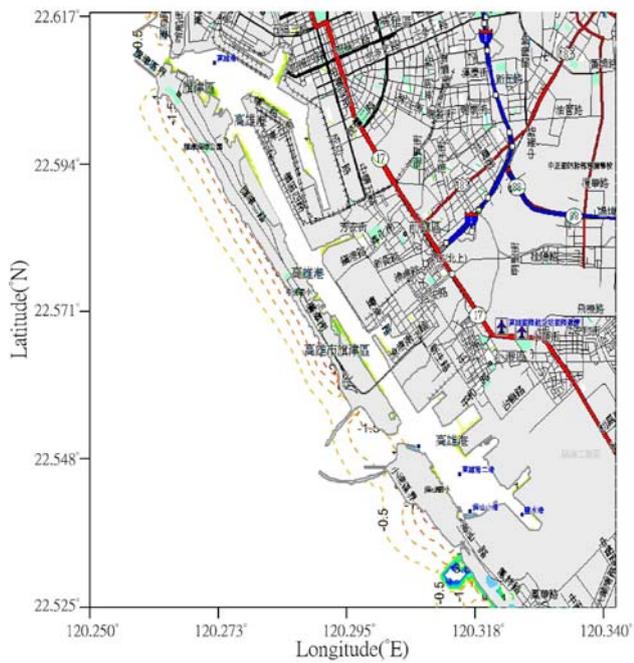


T= 26 min

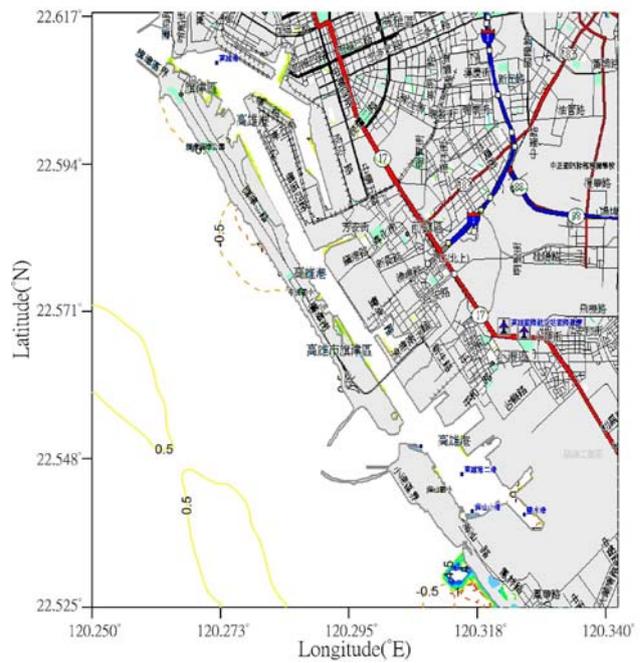


T= 28 min

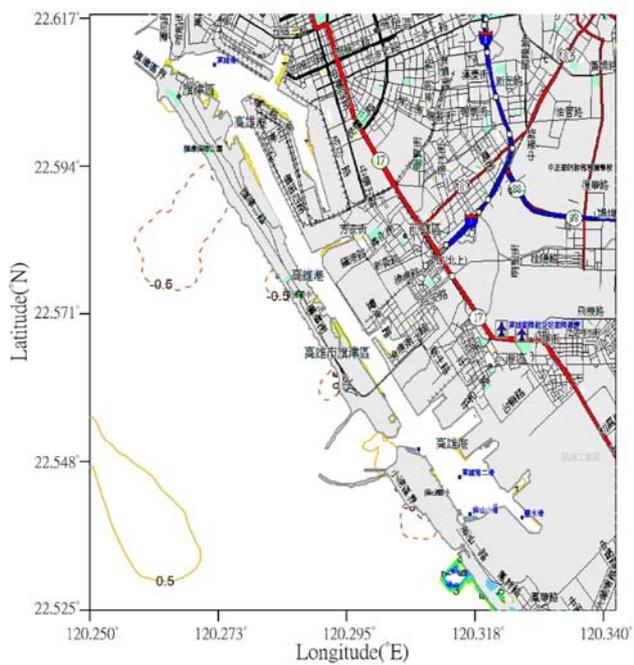
圖 5-2-4 高雄海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形



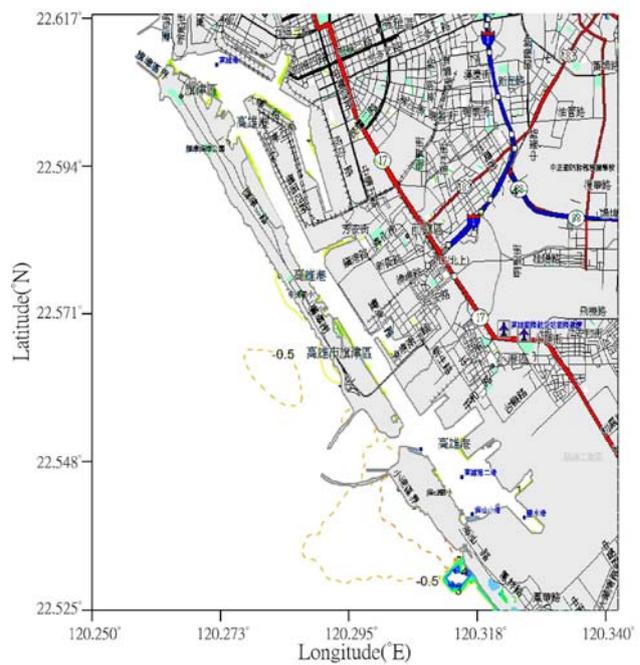
T= 30 min



T= 40 min



T= 50 min



T= 60 min

圖 5-2-4 高雄海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形（續）

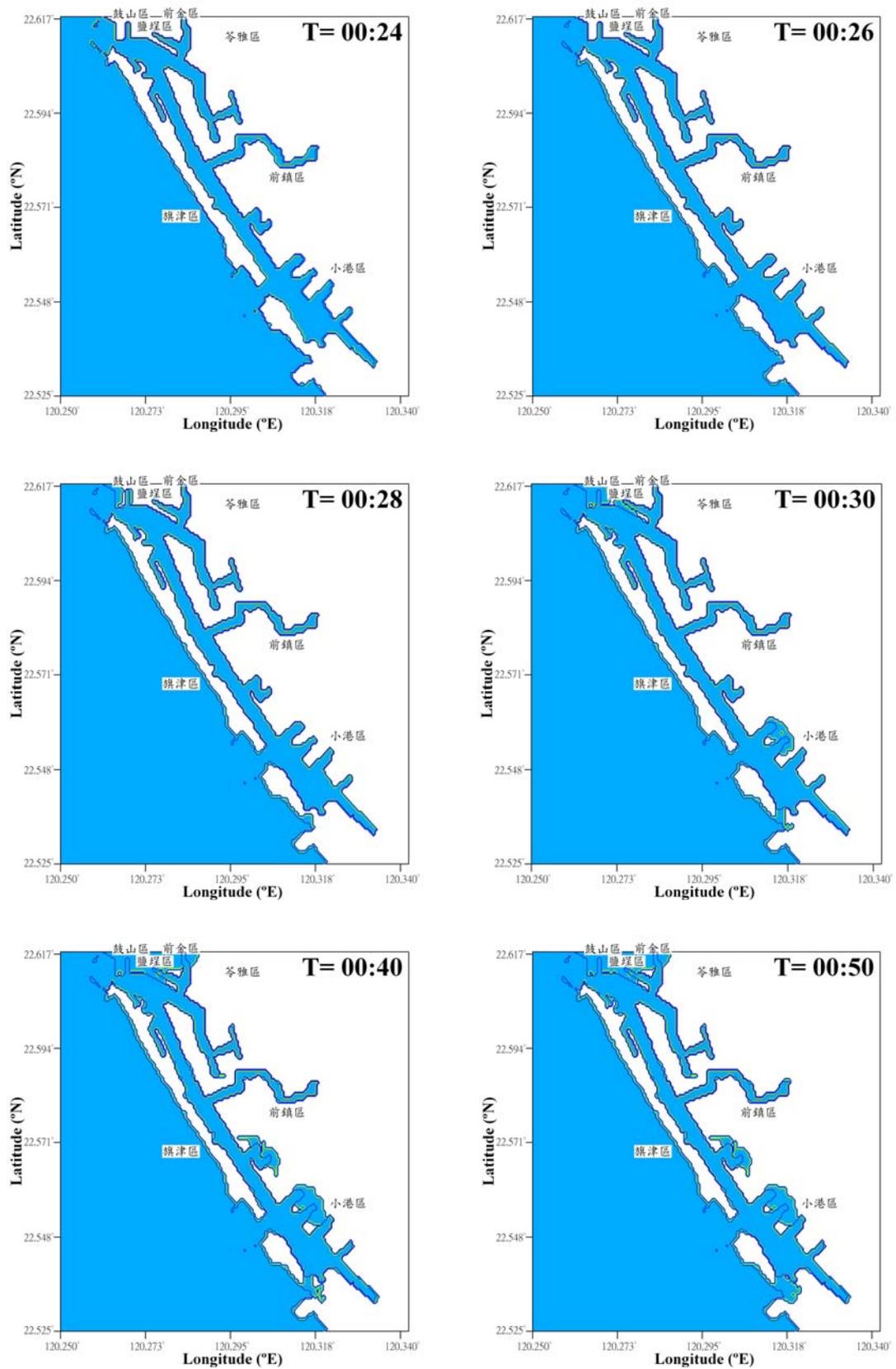


圖 5-2-5 高雄海嘯狀況一：溢淹分布情形

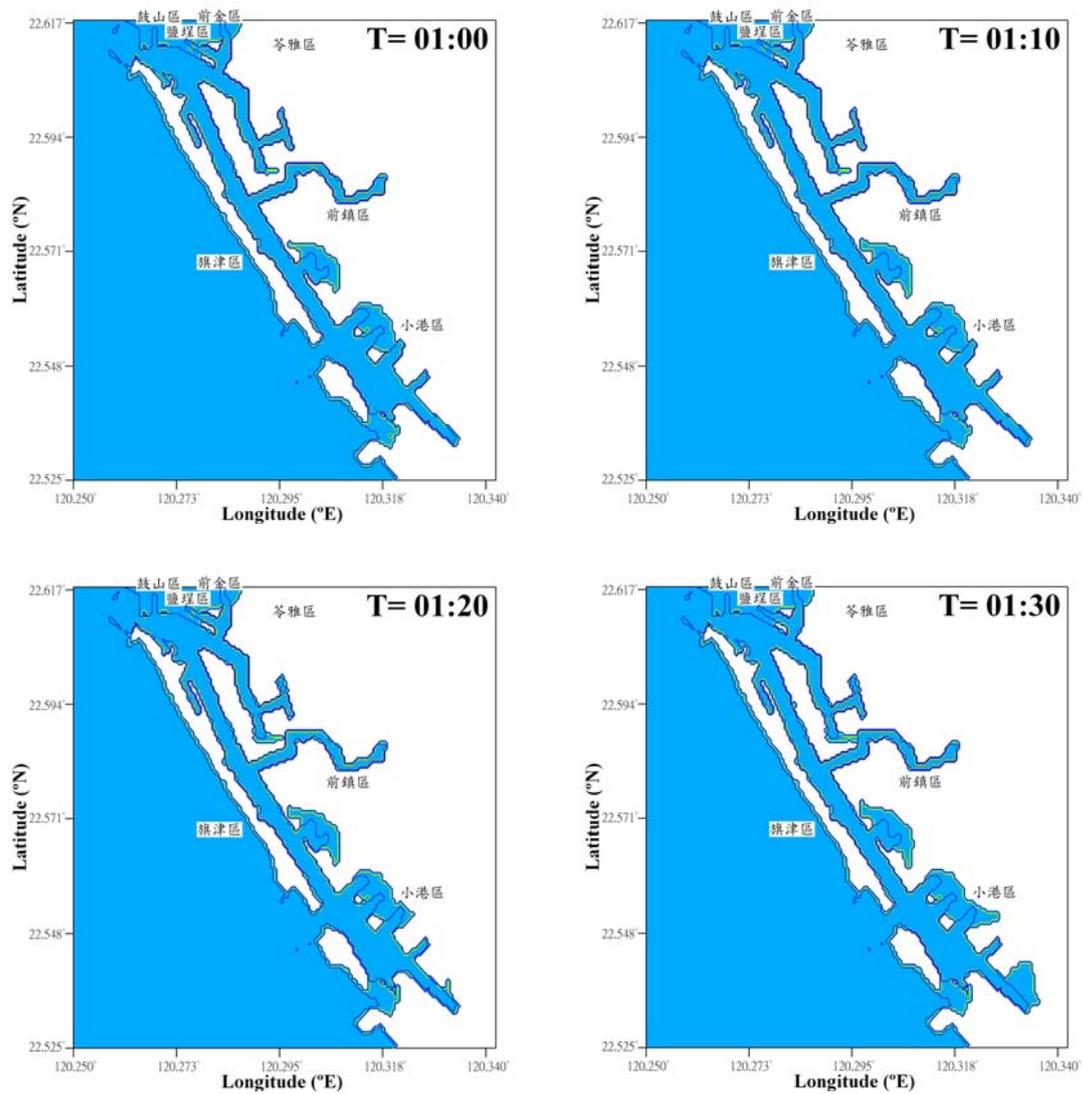


圖 5-2-5 高雄海嘯狀況一：溢淹分布情形（續）

高雄海嘯狀況二：

計算 $M_w 7.2$ $d=4.9$ m 得出海嘯的初始波形如圖 5-2-6，初始波形剖面如圖 5-2-7 所示。對照圖 5-2-8 $T = 0$ min 可看出初始波峰及波谷的分布情形，可知地震發生的瞬間，造成斷層走向為西北—東南方向，產生海嘯初始波高約為 1.8 m，同時也產生 -0.35 m 的波谷。

圖 5-2-8 分別顯示高雄海嘯狀況二在計算範圍 Region 1 傳遞經歷不同時間 $T = 0、2、4、6、12、18、24、30、40$ 及 60 min 的變化情形，圖中水位等高線之數字為波高，單位為公尺。 $T = 0$ min 圖中橫切線即為圖 5-2-7 之海嘯初始波剖面，海嘯發生約 24 min 後，海嘯前導波峰即傳播抵達高雄旗津沿岸。

海嘯前導波在南中國海盆產生後可維持相當完整之波形，傳遞一段時間即可擴展至相當大的海域範圍，越過南海陸棚及通過小琉球後，海嘯前導波形即變得較為破碎。於狀況二中除了初始波高達到 1.8 m 左右，其他時間點 region 1 的波高相當平坦，都在 1 m 以下，於 24 至 40 min 之間由於海嘯波抵達屏東及高雄岸際，水位擾動情況顯著。

圖 5-2-9 分別顯示高雄海嘯狀況二在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 22、24、26、28、30、40、50、60$ min 的變化情形，於海嘯發生 22 min 後，海嘯前導波傳播進入模式計算 region 3 內，波高約 1.2 m，經過約 24 min，前導波抵達第二港口外港，此時波高約介於 -1.0 至 1.5 m。經歷 24 至 40 min 後，海嘯波持續由第一港口及第二港口傳遞至港內，接觸陸地後的海嘯水位擾動複雜，傳遞經歷 40 至 60 min，旗津海岸線附近波高約介於 -1.5 至 1.5 m 之間，狀況二之波高振幅明顯比狀況一加大。

圖 5-2-10 分別顯示高雄海嘯狀況二在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 24、26、28、30、40、50、60、70、80$ 及 90 min 的變化情形，與情況一類似，於海嘯發生 24 min 後，前導波抵達第二港口外港，並且開始溢淹旗津海岸地區，海嘯波在產生後傳遞經歷 24 至 40 min，短時間港區內水位變化加大，並順著海嘯傳遞方向淹溢高雄市，溢淹範圍由北邊鼓山區、鹽埕區、旗津區至南邊的小港區沿岸。狀況二溢淹範圍較狀況一嚴重，除了上述各區外，狀況二更造成苓雅區溢淹。

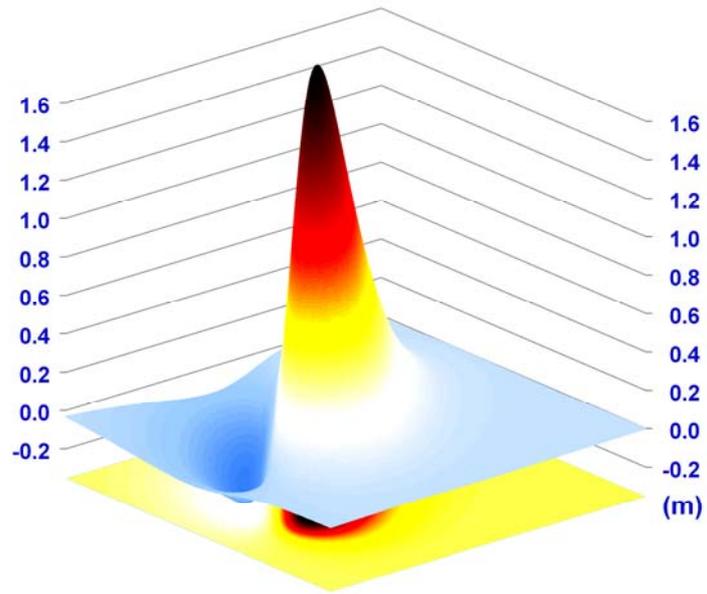


圖 5-2-6 高雄海嘯狀況二 (Mw 7.2) 3D 初始波形

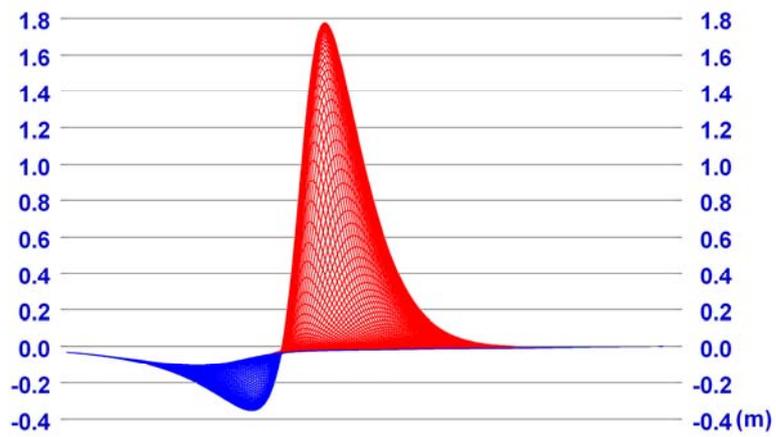


圖 5-2-7 高雄海嘯狀況二 (Mw 7.2) 初始波形剖面

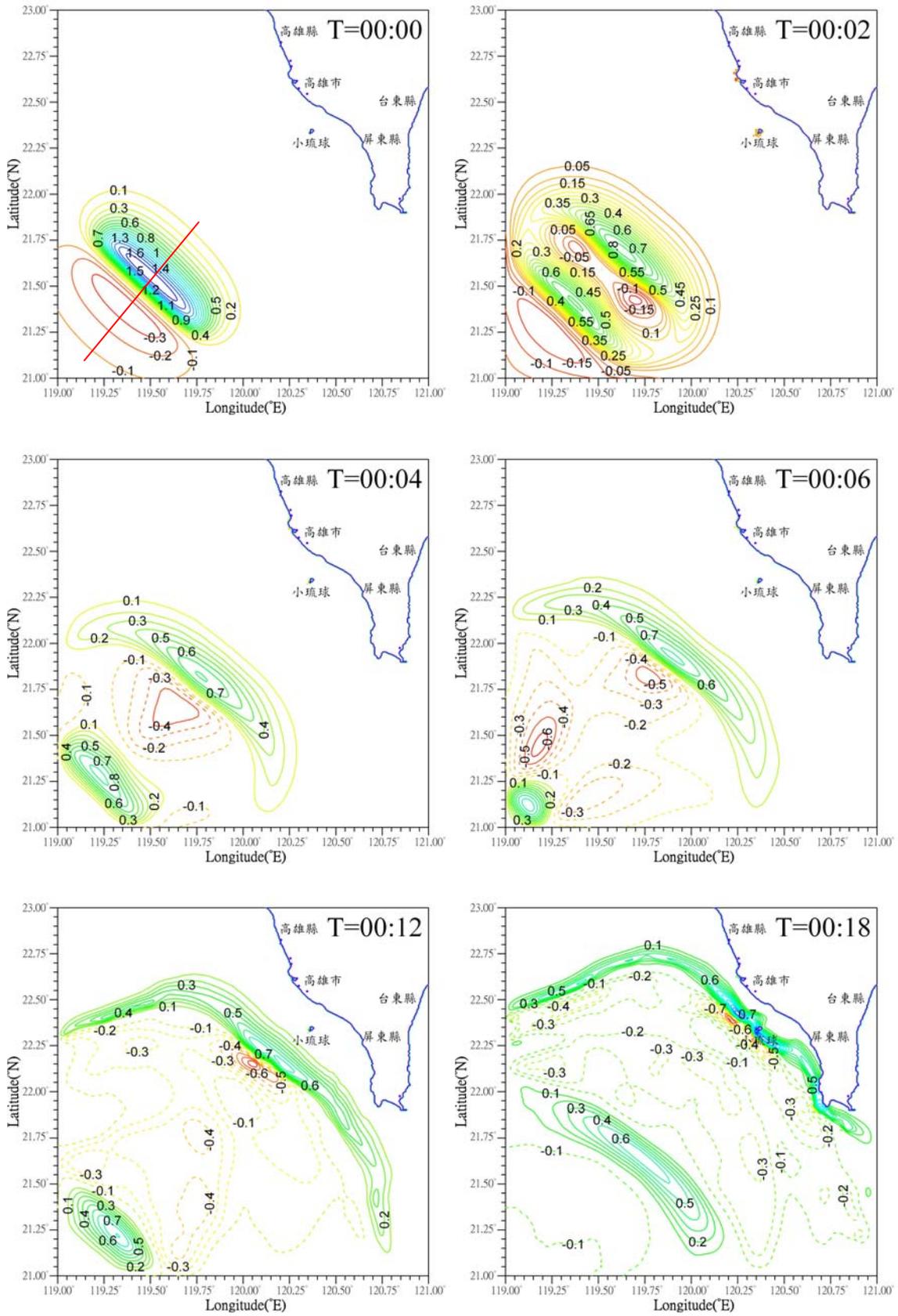


圖 5-2-8 高雄海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形

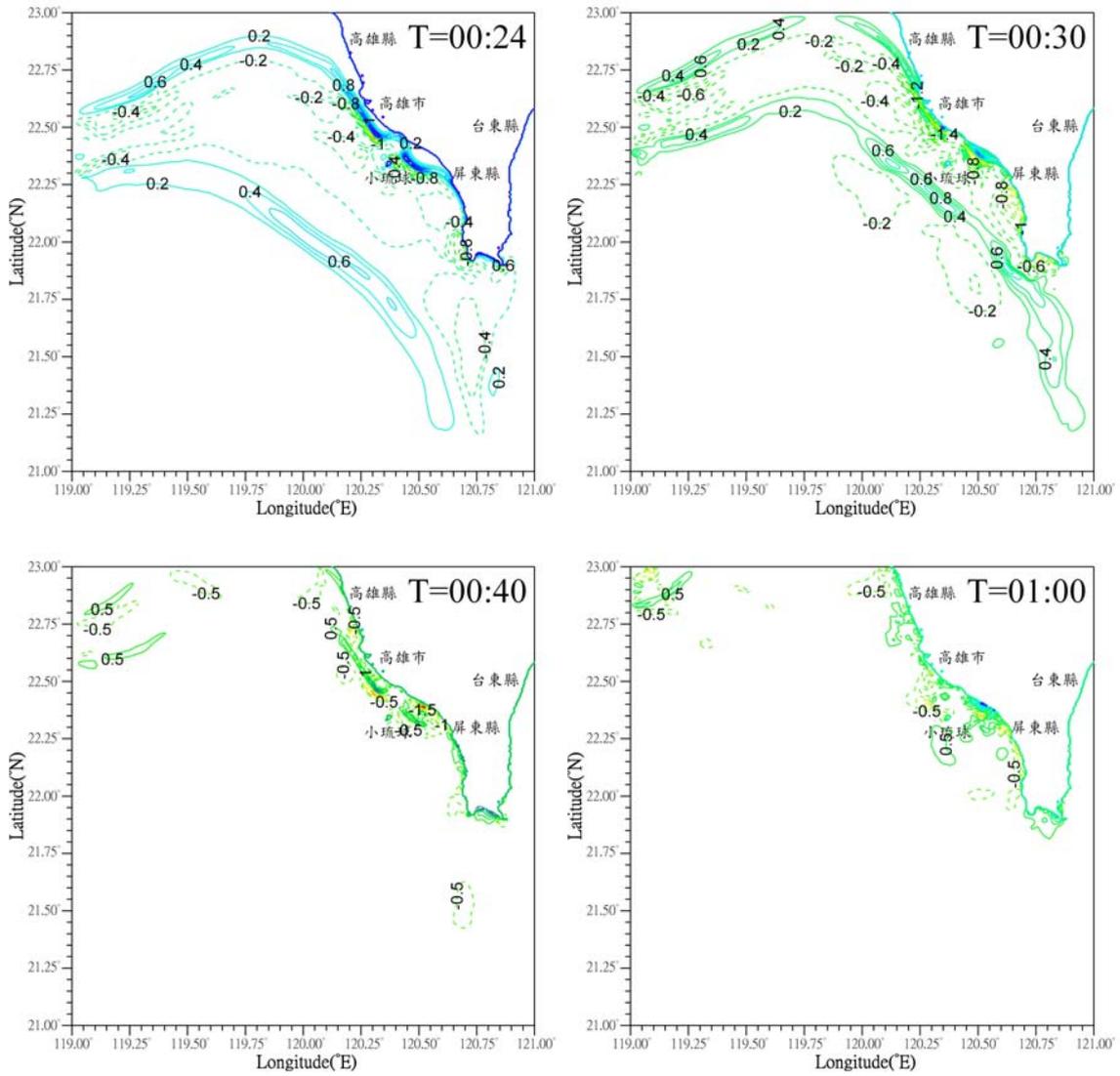
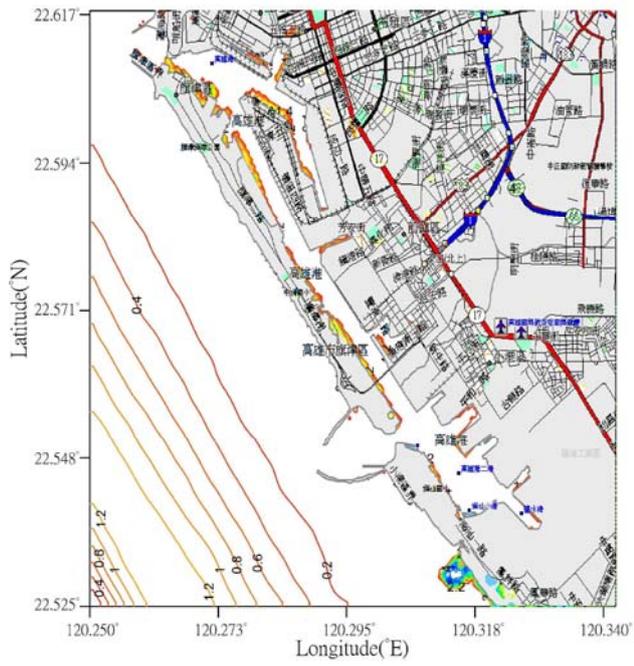
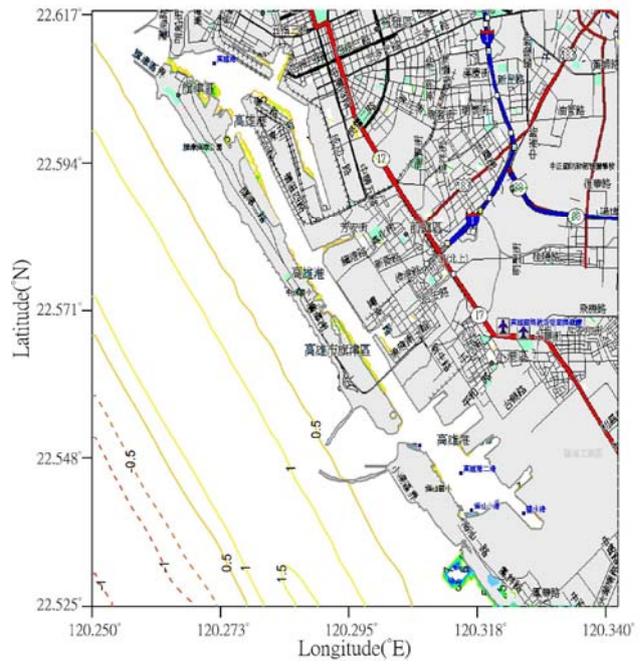


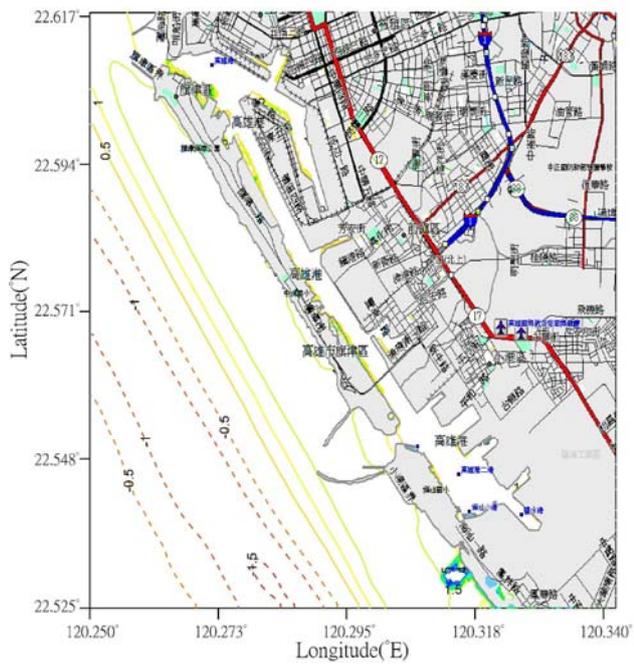
圖 5-2-8 高雄海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形（續）



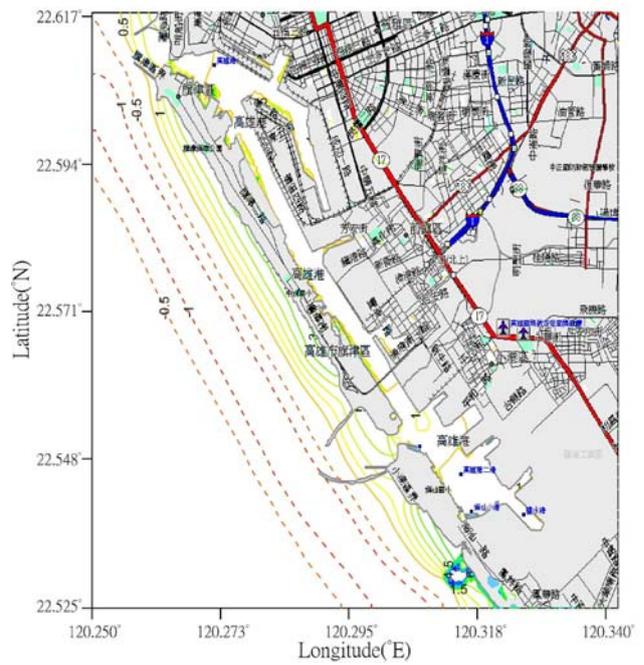
T= 22 min



T= 24 min

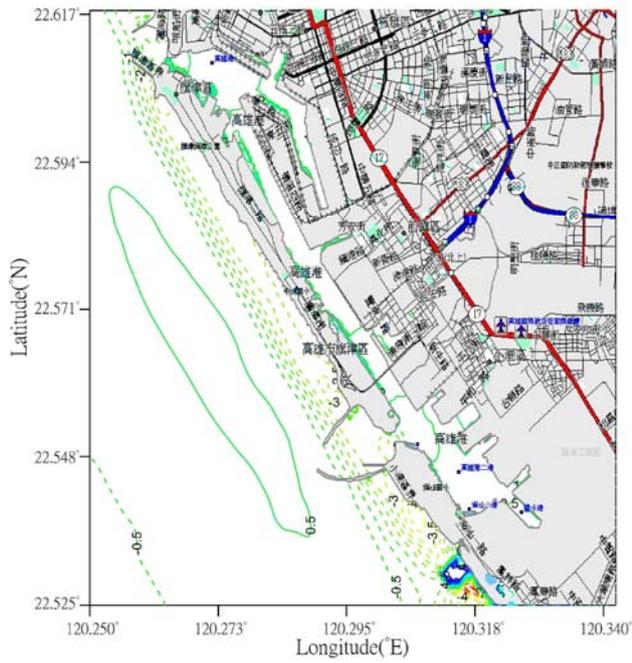


T= 26 min

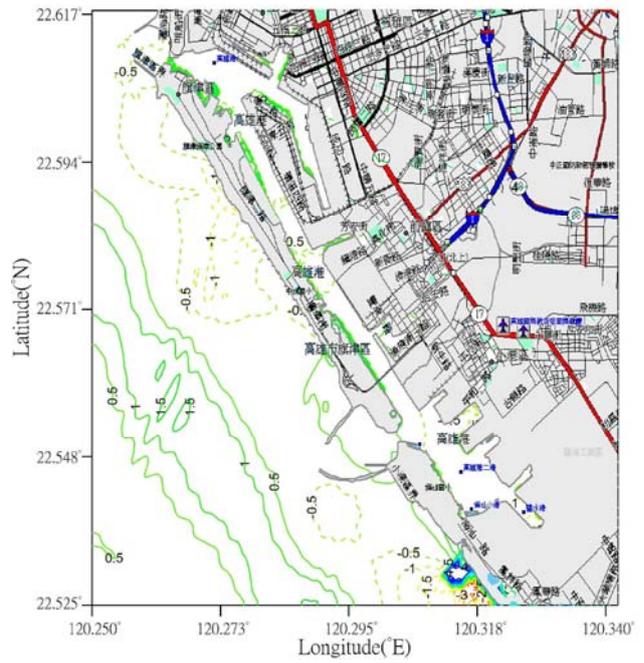


T= 28 min

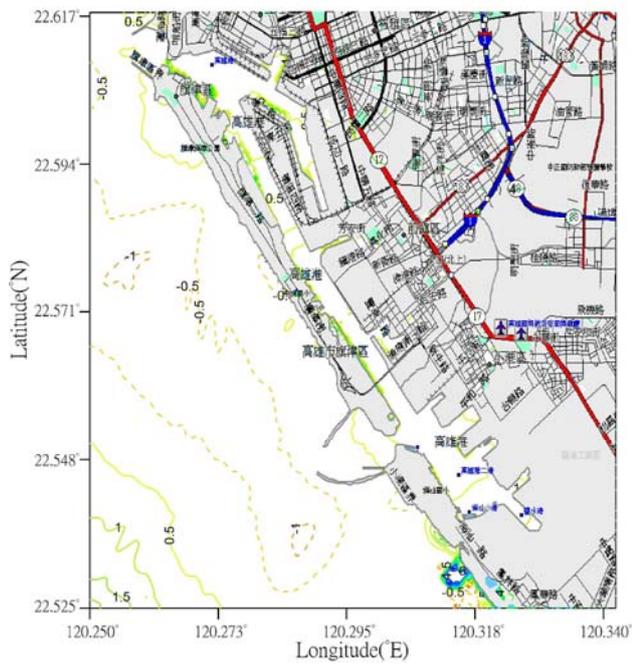
圖 5-2-9 高雄海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形



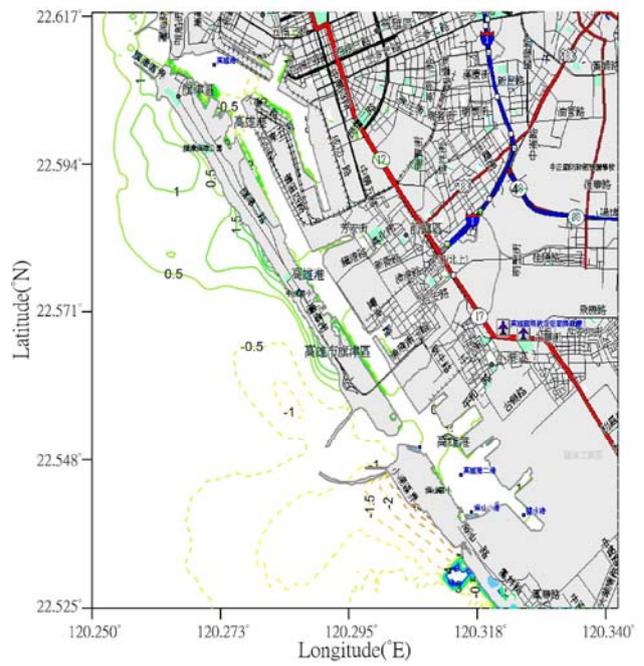
T= 30 min



T= 40 min



T= 50 min



T= 60 min

圖 5-2-9 高雄海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形（續）

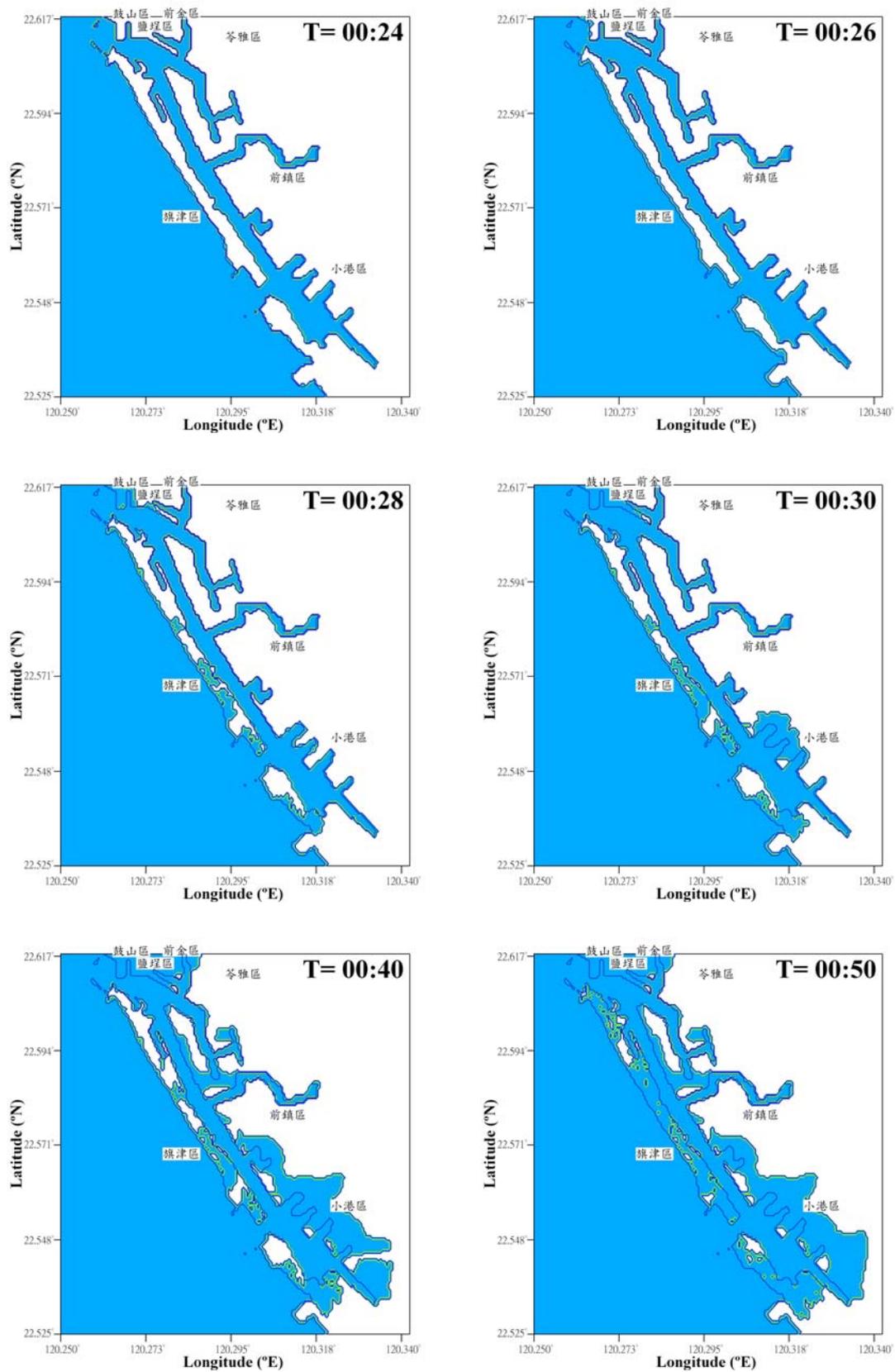


圖 5-2-10 高雄海嘯狀況二：溢淹分布情形

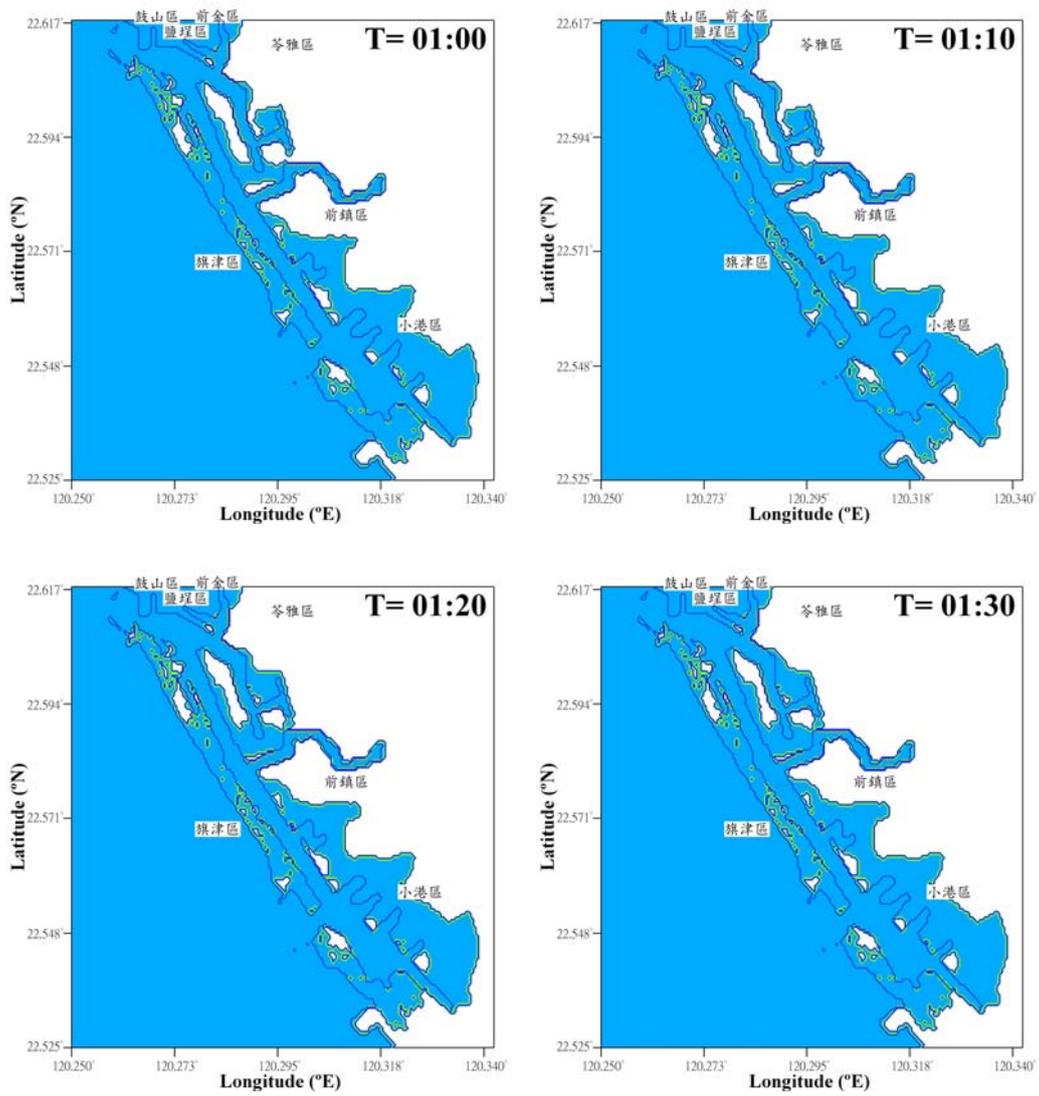


圖 5-2-10 高雄海嘯狀況二：溢淹分布情形（續）

5-3 近域海嘯—台南海嘯模擬

假設台南西南外海發生二種地震規模情形，分別為狀況一：規模 Mw 7.0 地震，震源深度為 10.0 km，震央位置為 119.75°E / 21.75°N，斷層傾角 $\theta = 315^\circ$ 、垂直向下傾角 $\delta = 58^\circ$ ，及斷層垂直向上傾角 $\lambda = 100^\circ$ ，計算所得之斷層長度 $L = 57.3$ km、斷層寬度 $W = 20.3$ km，斷層垂直位移高度 $d = 2.6$ m。以及狀況二：規模 Mw 7.2 地震進行模擬，計算所得之斷層長度 $L = 78.1$ km、斷層寬度 $W = 24.9$ km，斷層垂直位移高度 $d = 4.9$ m。上述二種狀況之 3D 初始波形及波高剖面可分別參考圖 5-2-1、圖 5-2-2，及圖 5-2-6、圖 5-2-7。

台南海嘯狀況一：

圖 5-3-1 分別顯示台南海嘯狀況一在計算範圍 Region 1 傳遞經歷不同時間 $T = 0、2、4、6、12、18、24、30、36$ 及 60 min 的變化情形，圖中水位等高線之數字為波高，單位為公尺。根據淺水波傳播速率公式 $C = \sqrt{gh}$ 計算海嘯波傳遞速度，海嘯發生處距離高雄旗津沿岸約 140 km，此區域水深約 2,500 m，就理論而言，海嘯發生後傳遞台南安平海岸線約需 36 min，於圖 5-3-1 海嘯發生約 36 min 後，海嘯前導波峰即傳播抵達安平海岸，與理論推估大致相符。

圖 5-3-2 分別顯示台南海嘯狀況一在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 28、30、32、34、36、38、40、44、48、52、56、60$ min 的變化情形， $T = 28$ min 圖中上方箭頭指示為「安平漁港」，下方箭頭指示為「安平商港」，於港口內側為港內「迴船池」及「內港區」部份。Region 3 水深由安平海岸線往圖中左下角依次遞增。於海嘯發生 32 min 後，海嘯前導波傳播進入模式計算 region 3 內，波高約 0.4 m，傳遞經歷 36 至 40 min 後，前導波抵達安平商港外港，此時波高約介於 -0.2 至 0.6 m。海嘯波持續由安平商港西南方傳遞至港內，接觸陸地後的海嘯水位擾動複雜，傳遞經歷 44 至 60 min，安平海岸線附近波高約介於 -0.6 至 -0.2 m 之間。

圖 5-3-3 分別顯示台南海嘯狀況一在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 36、38、40、50、60、70、80$ 及 90 min 的變化情形，於海嘯發生 36 min 後，前導波抵達安平海岸線，並且開始溢沿海地區，海嘯波在產生後傳遞經歷 36 至 40 min，短時間由於海嘯於海岸溯上水位變化加大，並順著海嘯傳遞方向淹溢安

平區（安平漁港、安平商港）至南區沿岸。

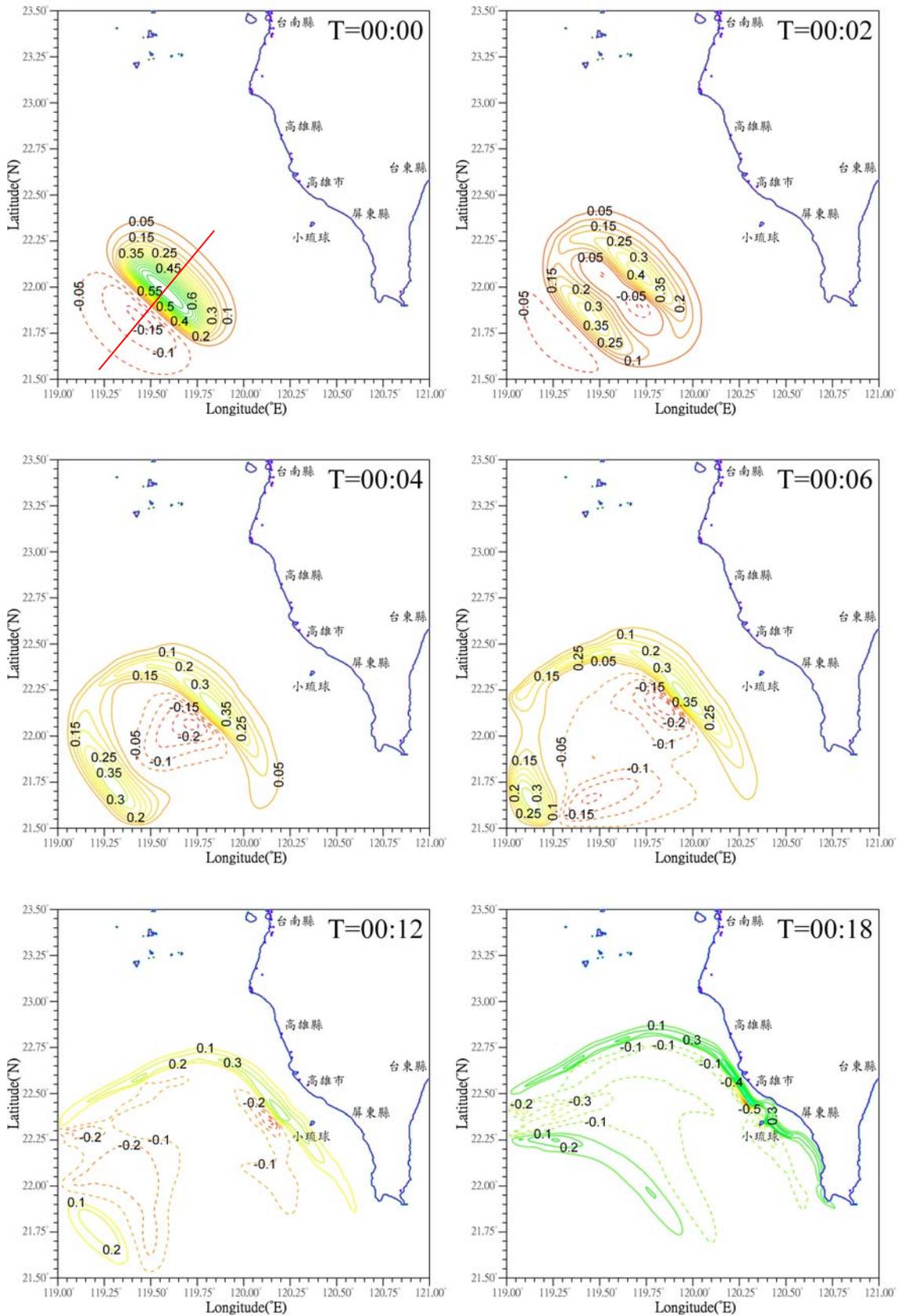


圖 5-3-1 台南海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形

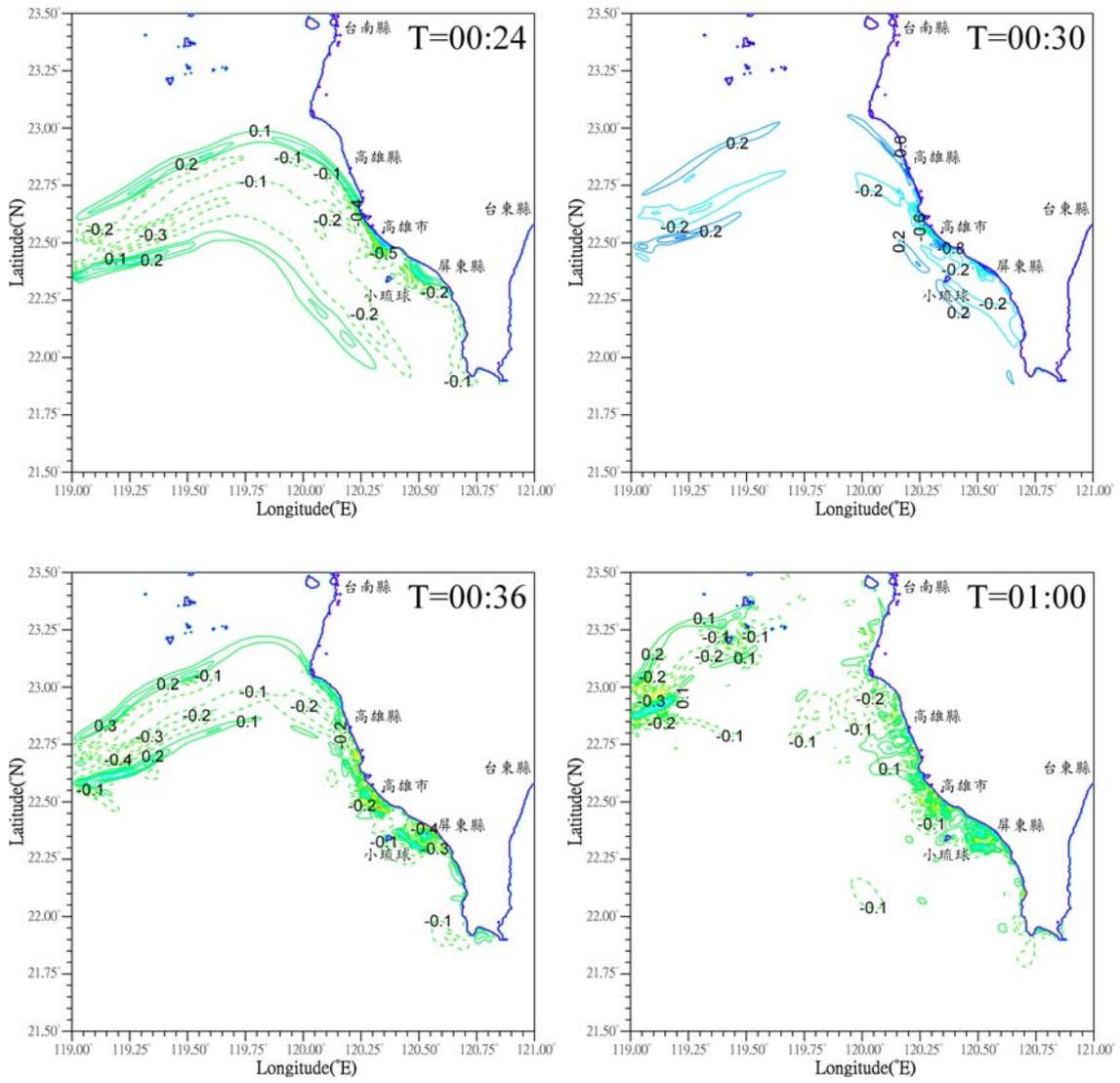
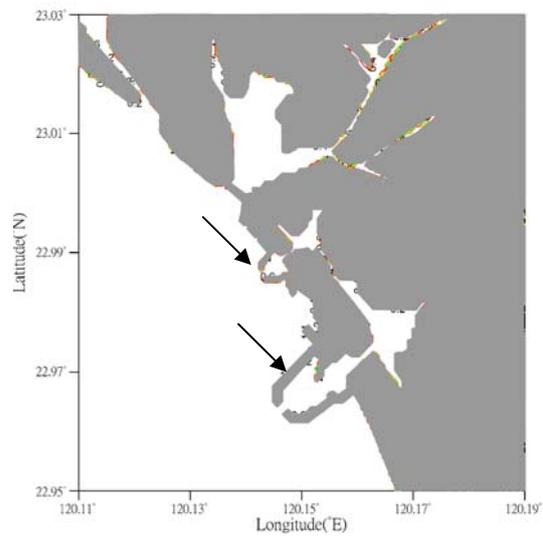
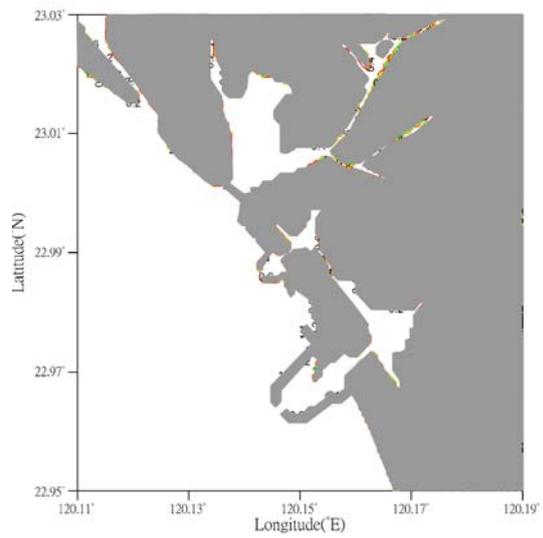


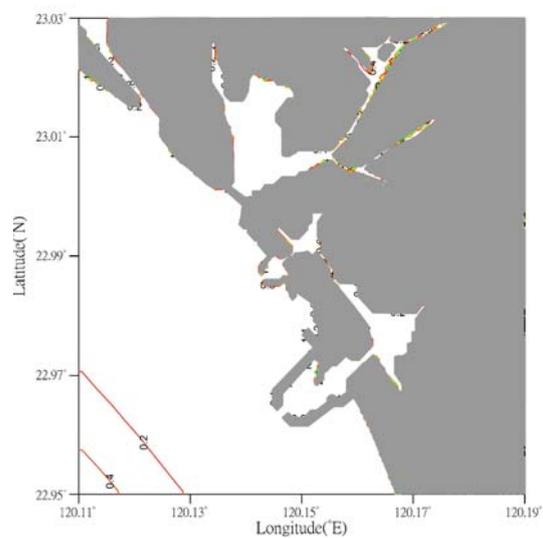
圖 5-3-1 台南海嘯狀況一：台灣外海傳遞分布情形（續）



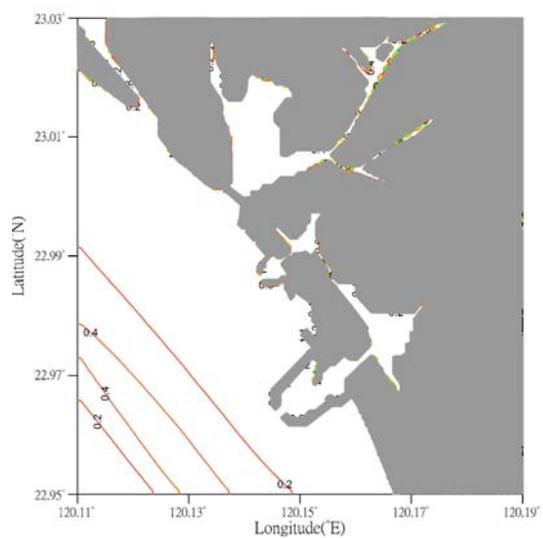
T= 28 min



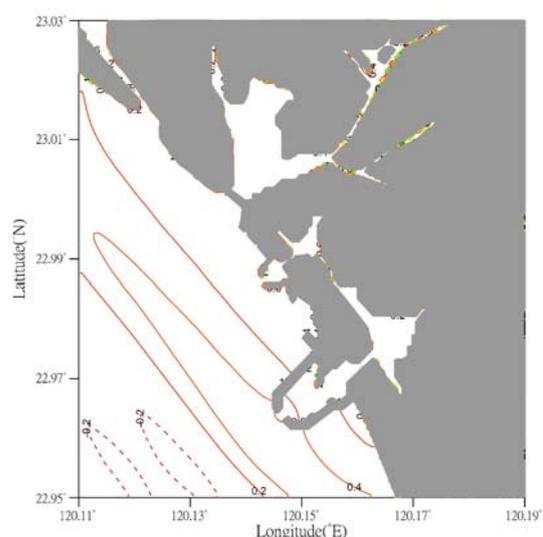
T= 30 min



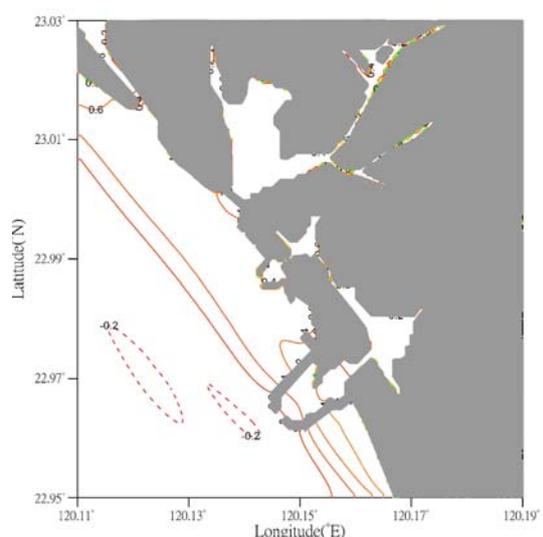
T= 32 min



T= 34 min

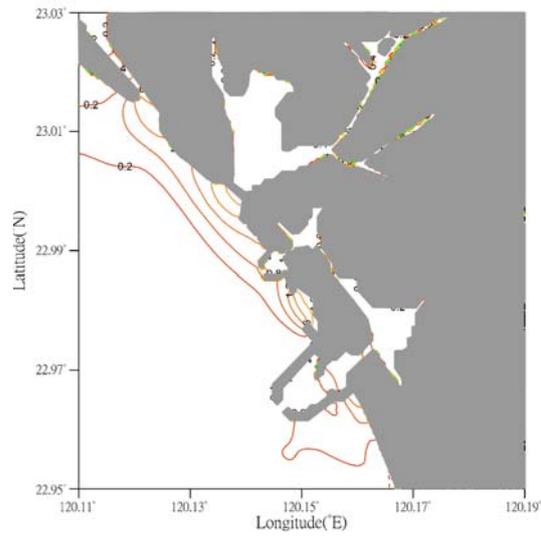


T= 36 min

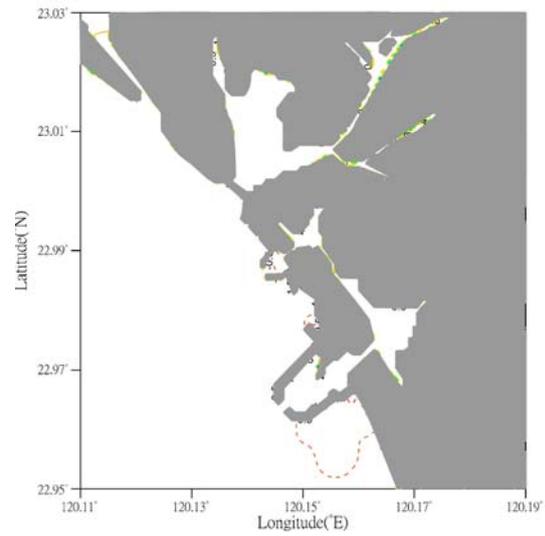


T= 38 min

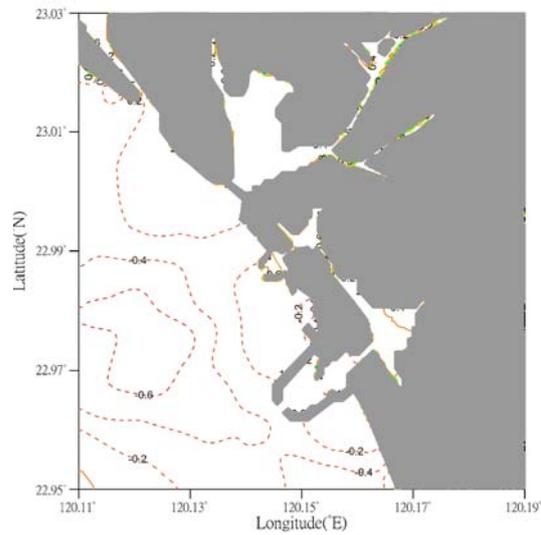
圖 5-3-2 台南海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形



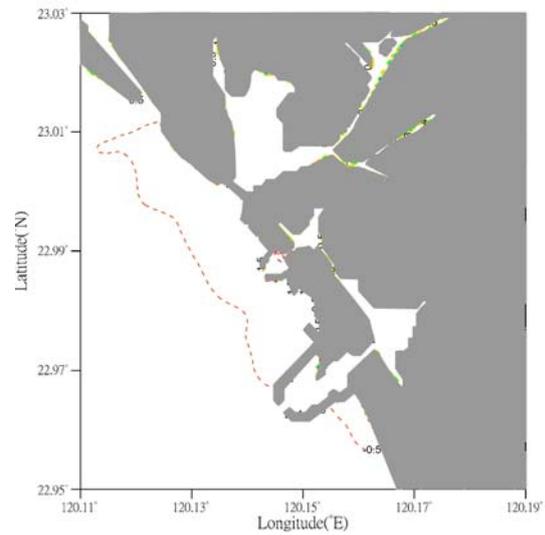
T= 40 min



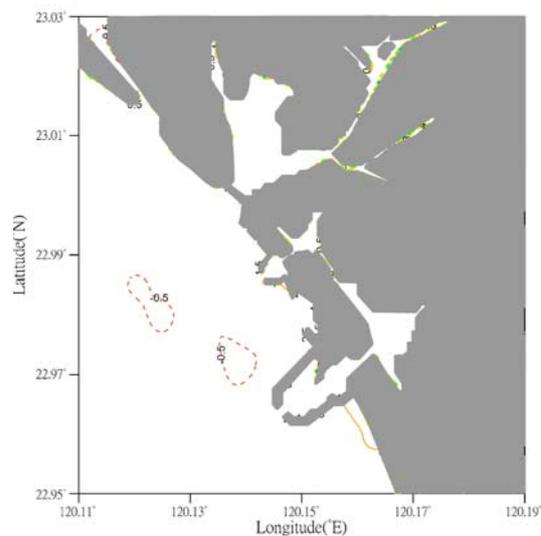
T= 44 min



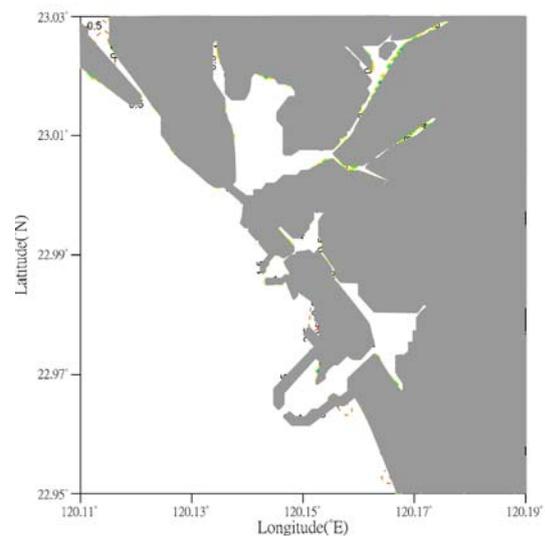
T= 48 min



T= 52 min



T= 56 min



T= 60 min

圖 5-3-2 台南海嘯狀況一：台灣沿岸傳遞分布情形（續）

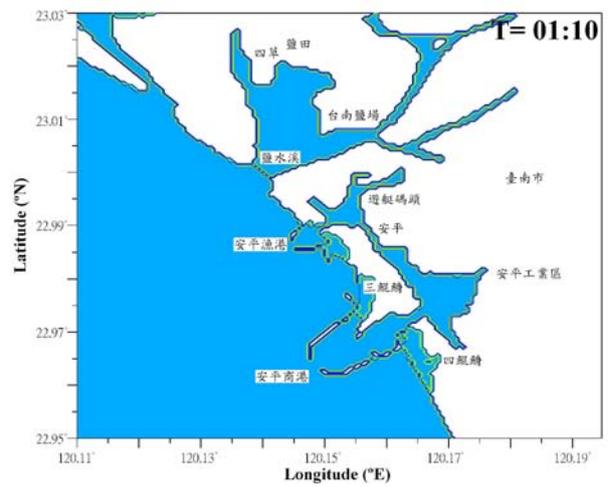
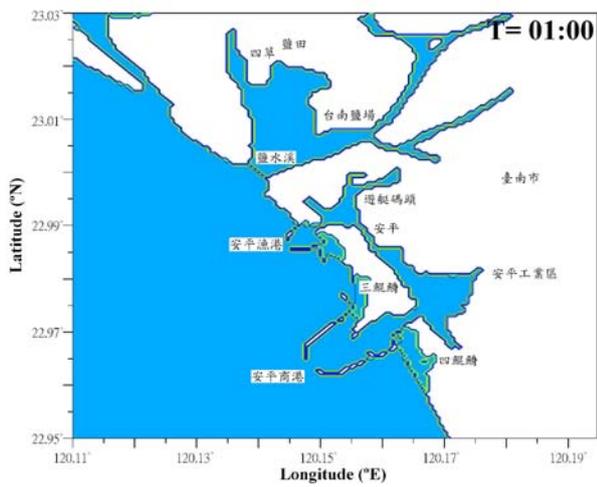
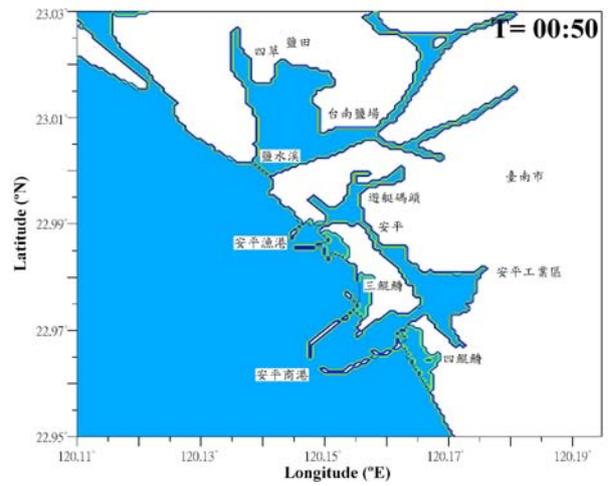
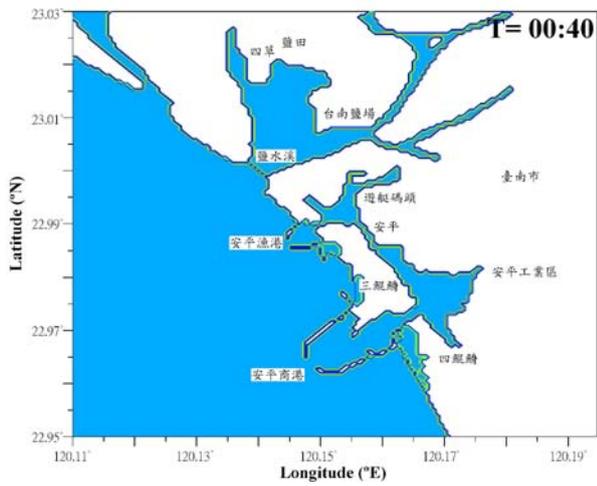
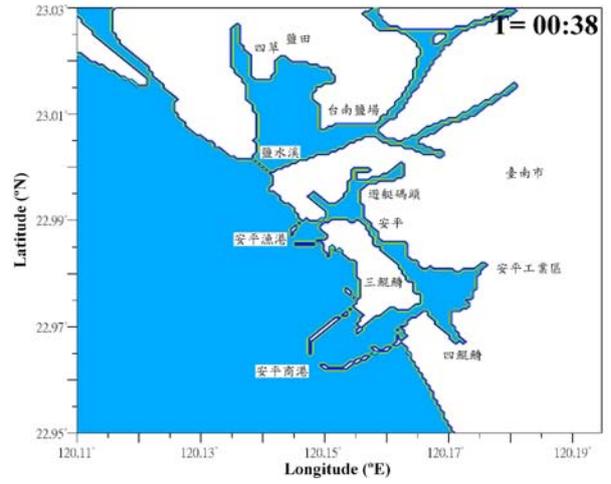
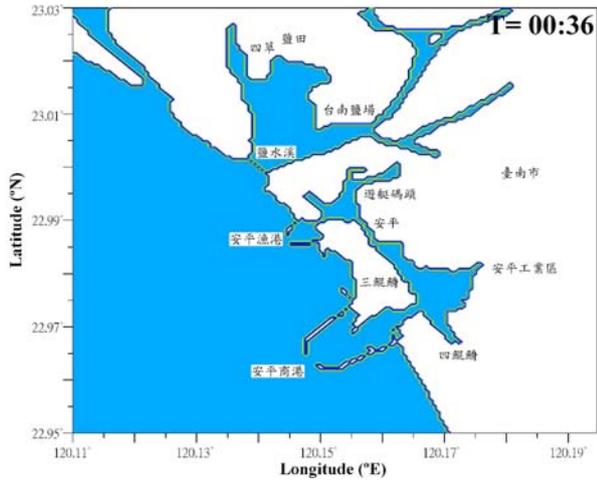


圖 5-3-3 台南海嘯狀況一：溢淹分布情形

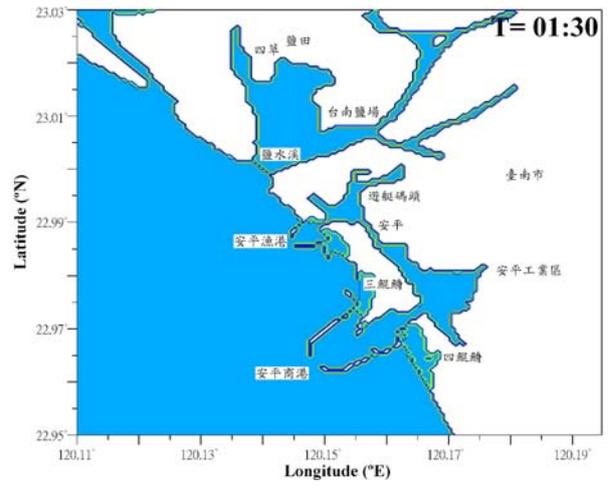
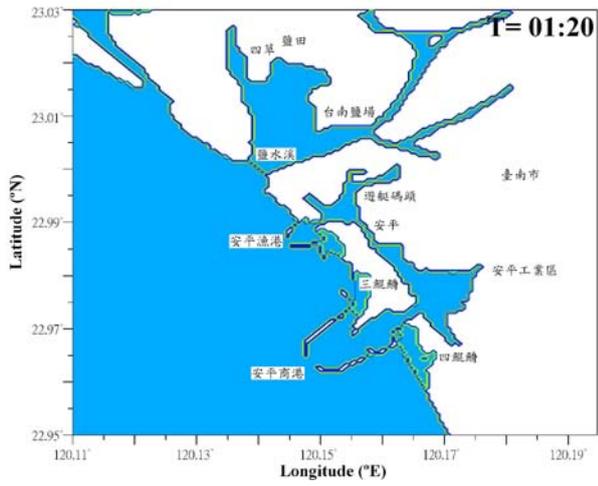


圖 5-3-3 台南海嘯狀況一：溢淹分布情形（續）

台南海嘯狀況二：

圖 5-3-4 分別顯示台南海嘯狀況二在計算範圍 Region 1 傳遞經歷不同時間 $T = 0、2、4、6、12、18、24、30、36$ 及 60 min 的變化情形，圖中水位等高線上之數字為波高，單位為公尺。海嘯發生約 36 min 後，海嘯前導波峰即傳播抵達台南沿岸。由高雄狀況一、狀況二及台南狀況一得知，無論地震規模大小的海嘯，其前導波在南中國海盆內產生後均可維持相當完整之波形，當接近陸棚、岸邊或島嶼時（越過南海陸棚及通過屏東小琉球），海嘯波形即變得較為破碎。於本案例中，除了初始波高達到 1.8 m 左右，其他時間點整個 region 1 的波高相當平坦，都在 1 m 以下。

圖 5-3-5 分別顯示台南海嘯狀況二在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 28、30、32、34、36、38、40、44、48、52、56、60 \text{ min}$ 的變化情形， $T = 28 \text{ min}$ 圖中上方箭頭指示為「安平漁港」，下方箭頭指示為「安平商港」，於港口內側為港內「迴船池」及「內港區」部份。Region 3 水深由安平海岸線往圖中左下角依次遞增。於海嘯發生 30 min 後，海嘯前導波傳播進入模式計算 region 3 內，波高約 0.4 m ，傳遞經歷 36 至 40 min 後，前導波抵達安平商港外港，此時波高約介於 -0.4 至 2.6 m 。海嘯波持續由安平商港西南方傳遞至港內，接觸陸地後的海嘯水位擾動複雜，傳遞經歷 44 至 60 min ，安平海岸線附近波高約介於 -1.5 至 1.5 m 之間，狀況二之波高振幅明顯比狀況一加大。

圖 5-3-6 分別顯示台南海嘯狀況二在計算範圍 Region 3 傳遞經歷不同時間 $T = 36、38、40、50、60、70、80$ 及 90 min 的變化情形，於海嘯發生 36 min 後，前導波抵達安平海岸線，並且開始溢沿海地區，海嘯波在產生後傳遞經歷 36 至 50 min ，短時間由於海嘯於海岸溯上水位變化加大，並順著海嘯傳遞方向淹溢安平區（安平漁港、安平商港）至南區沿岸，狀況二溢淹範圍較狀況一嚴重，除了上述各區外，狀況二更造成安南區溢淹。由上述可知由於狀況二的初始波高較大，在抵達安平海岸後造成的溢淹時間加長外，溢淹範圍也加大。

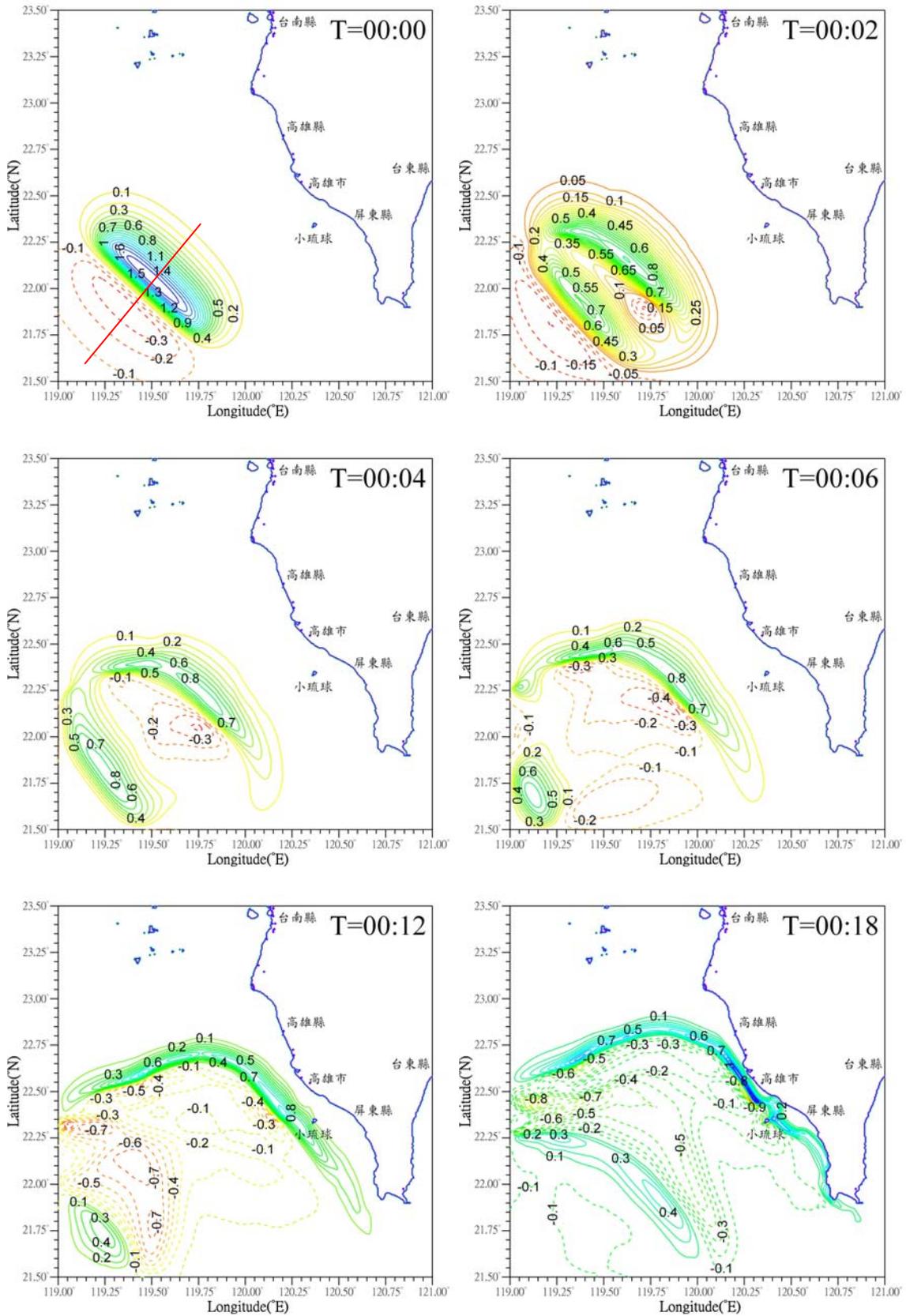


圖 5-3-4 台南海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形

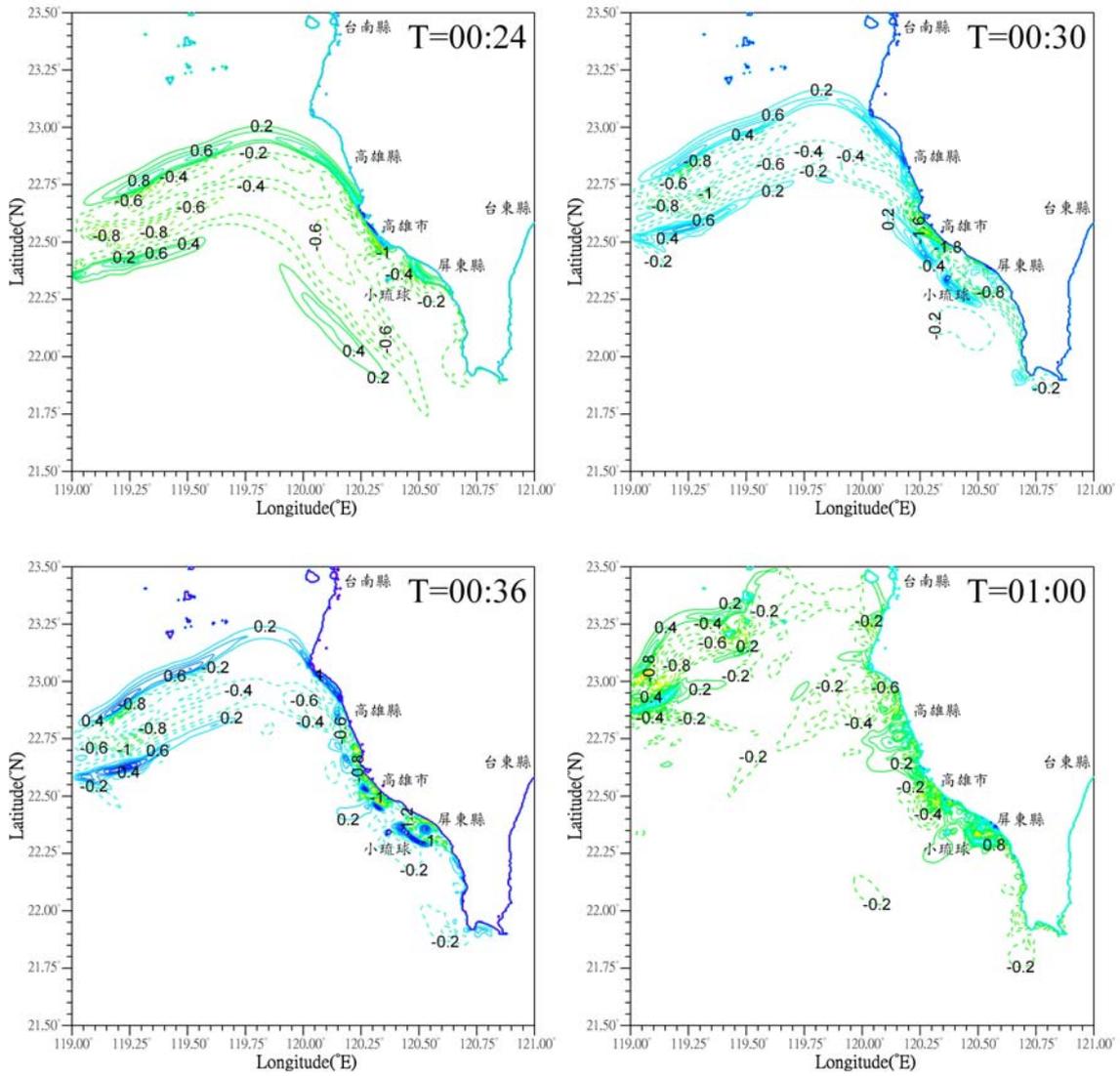
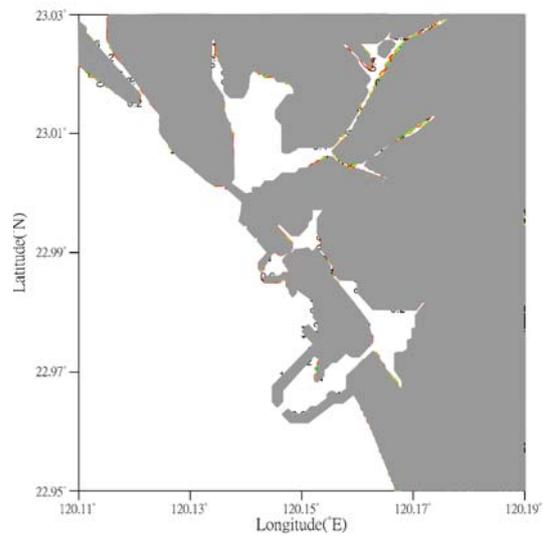
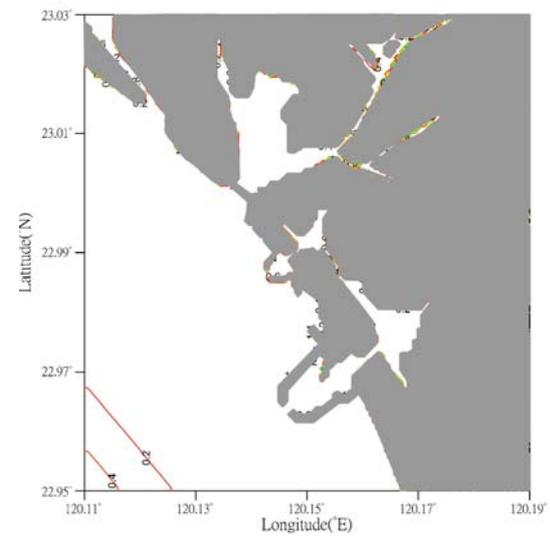


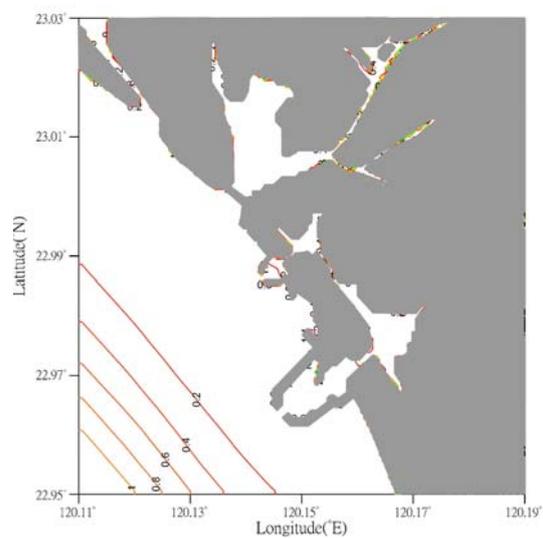
圖 5-3-4 台南海嘯狀況二：台灣外海傳遞分布情形（續）



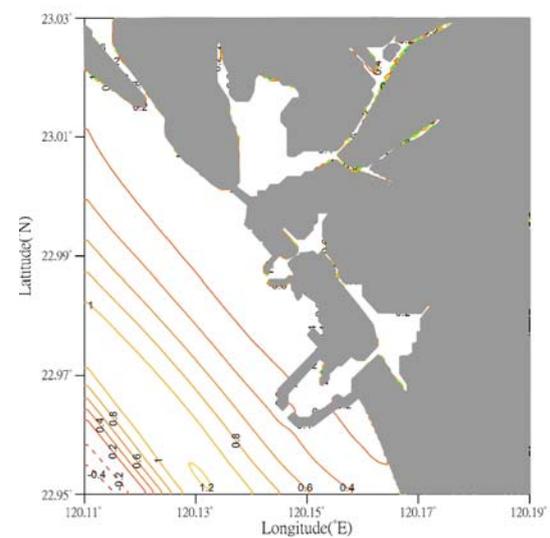
T= 28 min



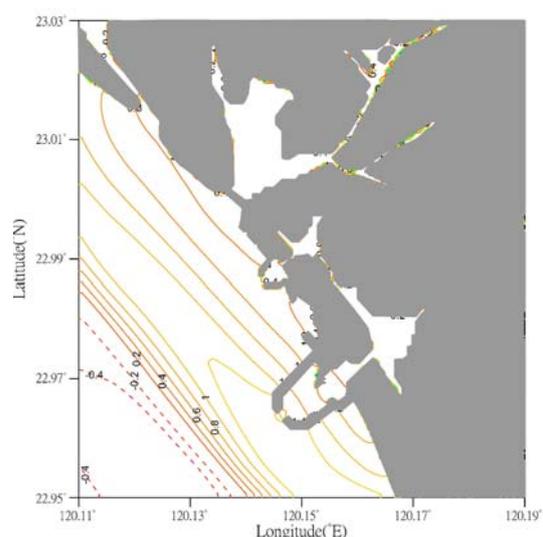
T= 30 min



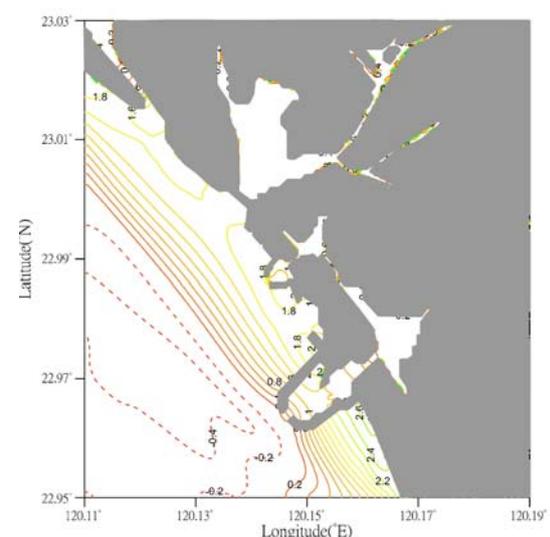
T= 32 min



T= 34 min

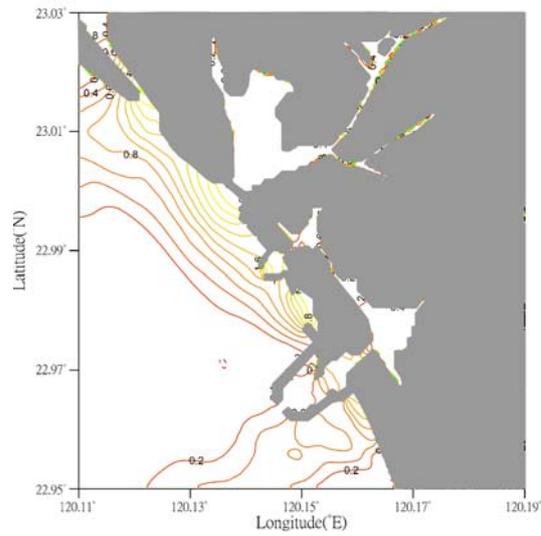


T= 36 min

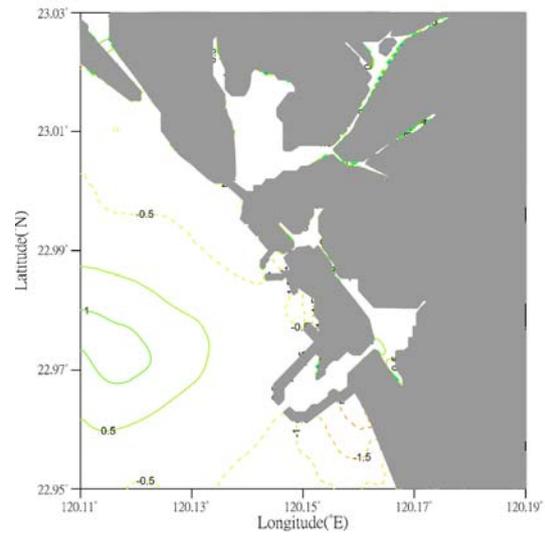


T= 38 min

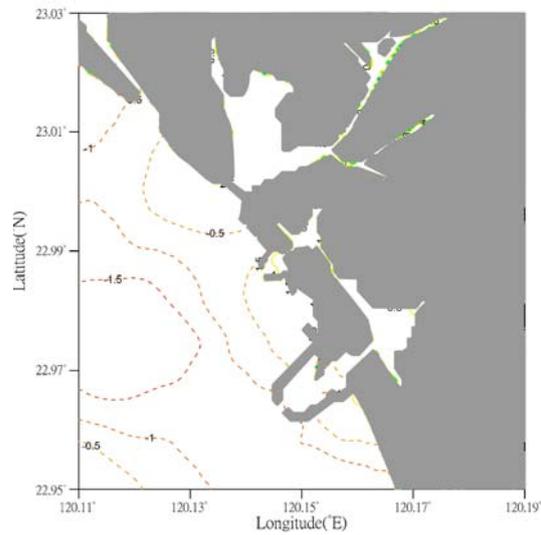
圖 5-3-5 台南海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形



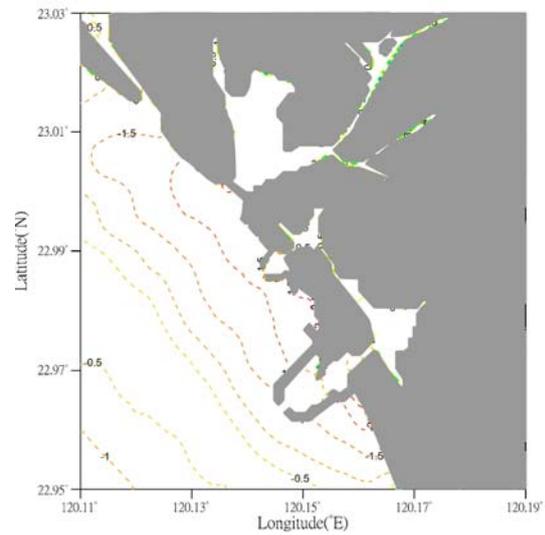
T= 40 min



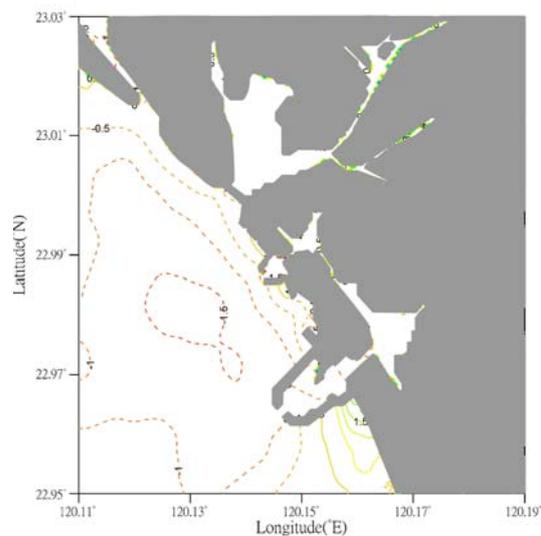
T= 44 min



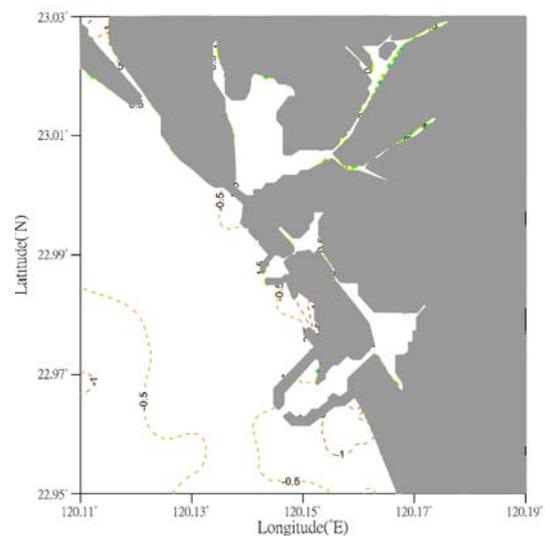
T= 48 min



T= 52 min



T= 56 min



T= 60 min

圖 5-3-5 台南海嘯狀況二：台灣沿岸傳遞分布情形（續）

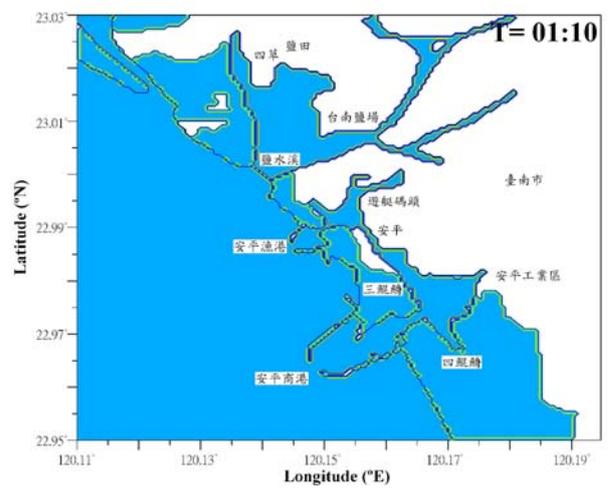
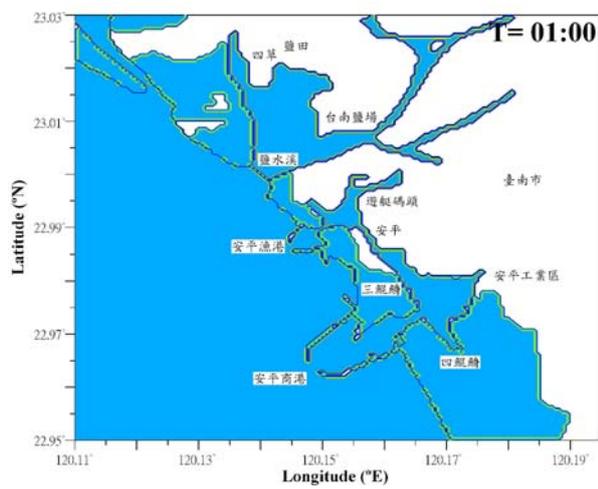
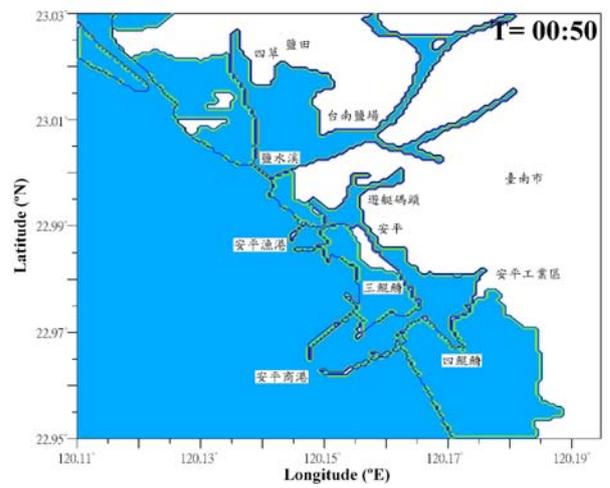
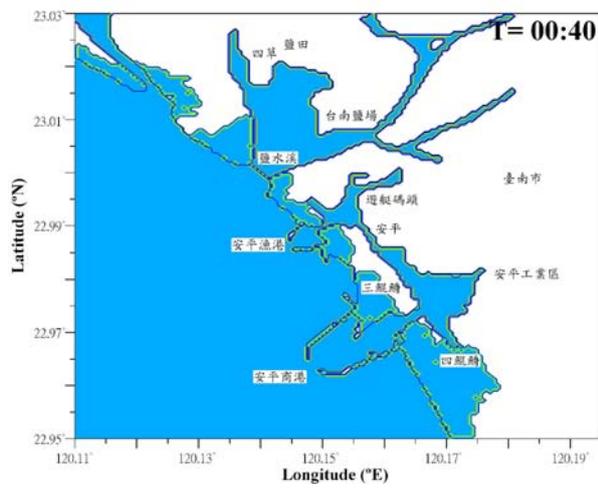
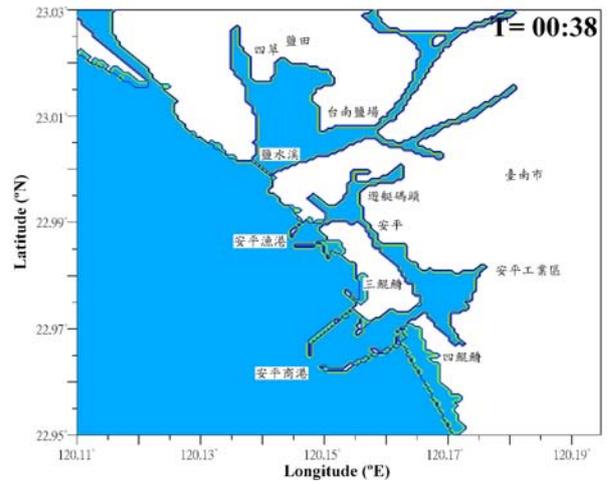
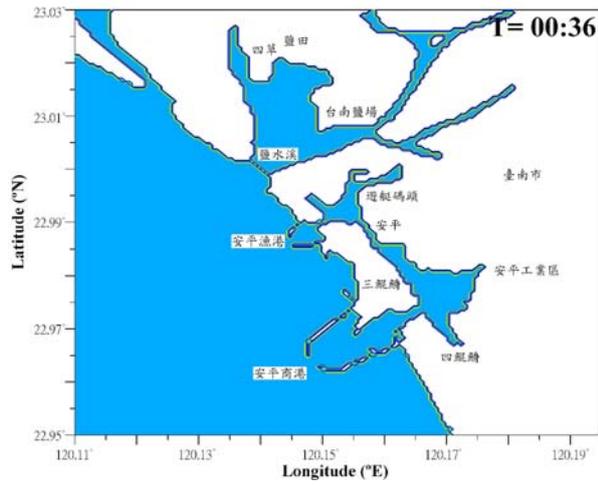


圖 5-3-6 台南海嘯狀況二：溢淹分布情形

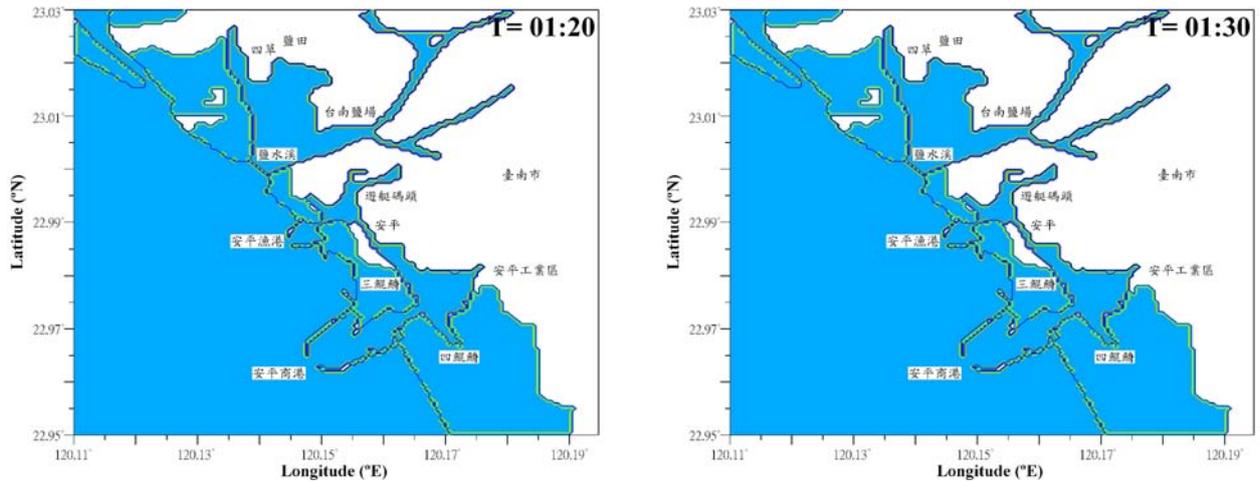


圖 5-3-6 台南海嘯狀況二：溢淹分布情形（續）

綜合以上高雄及台南地區之近域海嘯模擬結果，從地震發生源地到濱海地區若分別為 155 及 140 km，傳遞時間僅只有 24 及 36 分鐘左右。高雄市大部份的行政區域皆鄰海，尤其旗津區更為四面環海之地理環境，高雄市濱海地區包括軍港、商港、漁港、海岸公園及其他海岸觀光景點，且百貨商圈緊鄰沿海地帶設置，另外，台南市西鄰台灣海峽，與澎湖遙遙相對，安平濱海地區商港、漁港、海岸觀光景點、文化園區及各級古蹟林立，台灣位於板塊運動處，地震活動將會不斷發生，不得不防範海嘯威脅臺灣沿海都會區的潛在可能。

第六章 結論與建議

6-1 結論

1. 蒐集整理歷史上太平洋地區地震所引發海嘯事件，分析 2010 年智利海嘯事件在環太平洋的演變狀況，及台灣所有觀測到海嘯紀錄的特性，可瞭解海嘯事件對台灣可能造成的傷害。
2. 分析 2010 年智利海嘯波與台灣不同地區海水位變化關係，探討海嘯在台灣周圍的分布特性，可瞭解海嘯對台灣整體造成之影響範圍。由本次智利海嘯所測得水位紀錄得知，由太平洋地區越洋傳播而來之海嘯波，雖然直接衝擊台灣東部，但台灣東部海岸線平直而單調，海水又深，故雖有海嘯侵襲，但所測得的波高卻較後壁湖測站低。
3. 由本次智利海嘯所測得水位資料可知，海嘯波於台灣時間 15:30 傳遞抵達成功（約海嘯發生後 25 小時）、15:45 抵達花蓮、16:00 抵達蘇澳、16:15 抵達烏石/龍洞/後壁湖、16:30 抵達基隆/小琉球/東港、17:00 抵達高雄、17:15 抵達台北港，海嘯波先到達成功再分為沿順時針及逆時針方向繞行台灣四周，受到海嘯的影響於南部及東部各測站包括高雄/東港/後壁湖/成功/花蓮/蘇澳/烏石/龍洞/基隆潮位站皆有異常水位擾動現象，且於後壁湖/烏石/成功/花蓮潮位站觀測到較大的海嘯波高（約 0.66/0.52/0.46/0.38 m），海嘯波越過台灣東北及西南大陸棚時，週期可超過 30 至 40 min，但在部份測站受港池形狀影響，海嘯在港內會形成一些較高頻的振盪，且有時能持續達 1 天以上。本次海嘯事件均未達到發布海嘯警報的波高警戒值（1.0 m），部份測站水位有顯著的變動現象，與驗潮站於港內架設地點及港灣形狀有關，而蘭嶼/彭佳嶼/麟山鼻/竹圍/台北港/馬祖等站並未測到明顯的海嘯紀錄。
4. 模擬近域海嘯在高雄及台南的變化及溯上特性，由模擬結果可知，台灣近海發生的近域海嘯，從地震發生源地到濱海地區若分別為 155 km 及 140 km，由於震央及海岸地區水深地形不同，到達高雄及台南海濱時間僅有 26 及 36 min，若發生地震位於更近岸處，海嘯波抵達海岸的時間更短，通常只有數分鐘。
5. 海嘯初始波高不同，將使得海嘯於近岸的溯上高度及溢淹程度在不同地區

產生極大差異。依此建立海嘯作用時的海岸溢淹地圖 (inundation map)，即可提出適合當地之應變措施及海岸防災規劃參考。

6. 本研究完成智利海嘯模擬及台灣近域海嘯溢淹模擬，同時辦理一場次研究成果教育研習會議，藉以提供相關單位作為規劃海岸防救災計畫之參考依據。
7. 參考環太平洋各國之海嘯預警制度，規劃符合台灣海洋環境的海嘯預警機制與作業程序，提供中央氣象局作為緊急應變參考，同時提供未來與國際海嘯組織進行交流與合作的方式建議，對於遠地海嘯的預警，將可藉由加強國際合作加以防範，期使意外災害對生命財產安全之衝擊降至最低程度。

6-2 建議

1. 要得到真實且可信賴的海嘯模擬結果，須根據台灣過去的海嘯紀錄予以驗證模式的可靠性。持續蒐集過去海嘯事件的演變狀況及歷史上太平洋地區地震所引發海嘯波高數據，深入探究源自不同地區海嘯在台灣周圍的變化與分布特性，縮小近岸地區之計算網格大小，並取得陸上及海域精密高層資料，有助於提高海嘯預警的準確性，能有效的預測出海嘯在海岸地區精確的溯上、溯下及溢淹情形。
2. 若海嘯發生在離岸數十公里，到達海岸時距可能只有數分鐘，預警系統不易發揮預期效果，此種近域海嘯的預防工作，除了有預警系統之外，最重要是必需建立民眾對於海嘯災害的警覺與認識才能有效的減少災害。台灣目前所發布的海嘯警報也僅止於預估初波到達時間，並未預估海嘯高度，有必要建立完整的海嘯預估作業程序作為海嘯預警及災害防治參考。
3. 經由深入模擬海嘯在台灣西南外海發生時在高雄及台南的溢淹特性後，依此規劃溢淹地圖，未來特別針對沿海地區的居民，辦理各地區海嘯災害教育訓練及應變演練，提供民眾在海嘯發生時的撤離路線指示，宣導海嘯的危險性及海嘯災害應變處理方法，可作為教育民眾防災自救知識的教材。

參考文獻

- 交通部中央氣象局，(2005) ”地震百問”，交通部中央氣象局編印，第 15-21 頁。
- 李孟芬，(1995) ”台灣地區地震之可能性研究”，中央大學地球物理學系碩士論文。
- 李昭興、許明光、林欽隆、徐月娟、郭鎧紋及王承韜，(2008) ”台灣地區海域地震與海嘯發生之關聯性研究”，交通部中央氣象局。
- 李起彤，(1991) ”活斷層及其工程評價”，地震出版社。
- 邱淑慧，(2005) “台灣會不會發生大海嘯”，科學人，第 36 號，第 13-14 頁。
- 吳祚任，(2007) ”終極天災：海嘯”講義，中央大學水文與海洋科學研究所，第 1-13 頁。
- 徐明同，(1981) “海嘯所引起之災害”，中央氣象局氣象學報，第 27 卷，第 1 期，第 1-15 頁。
- 孫鎮球，(2005) “海嘯”，科學發展 Science Development，第 386 期，第 72-77 頁，行政院國家科學委員會。
- 許明光與李起彤，(1996) “台灣及其臨近域區之海嘯”，台灣海洋學刊，第 35 期，第 1 號，第 1-16 頁。
- 許明光，(2005) “20 世紀以來臺灣發生過海嘯嗎？”，地質 Ti-Chih，第 24 卷，第 1 期，第 28-29 頁。
- 陳文山，(2005a) “大地震與海嘯”，地質 Ti-Chih，第 24 卷，第 1 期，第 16-19 頁。
- 陳文山，(2005b) “南亞海嘯對臺灣的警訊”，地質 Ti-Chih，第 24 卷，第 1 期，第 20-27 頁。
- 張孟挺，(2008) “台灣的海嘯威脅與高雄市溢淹之模擬”，國立中山大學海下科技暨應用海洋物理研究所碩士論文。
- 張國棟、徐月娟與許明光，(2000) “台灣海嘯災害”，第二屆國際海洋大氣會議論文彙編，天氣分析與預報研討會，交通部中央氣象局，第 360-363 頁。
- 張國棟，(2000) “台灣四周海嘯溯上及災害減緩研究”，建工書局，第 12-18 頁。
- 張國棟，(2007) “從遠方傳來的長浪-海嘯”，工程小叢書-鑽石海岸系列，財團法人中興工程科技研究發展基金會，第 1-37 頁。
- 游明聖，(1994) “明清時代的破壞性地震海嘯記錄”，中央氣象局氣象學報，第 40 卷，第 1 期，第 37-46 頁。
- 黃煌輝，(2005) ”海嘯的模擬”，科學發展，394 期，第 46~51 頁。
- 楊春生、湯麟武與邵建林，(1983) ”台灣東北海岸地震海嘯數值推算之研究”，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 72-23 號，第 1-57 頁。
- 蕭乃祺、陳致宏、陳伯飛與辛在勤，(2005) “台灣地區海嘯警報發佈作業現況”，中央氣象局氣象學報，第四十六卷，第一期，第 31-43 頁。

- Dudley, W.C. and Lee, M., (1988) “[Tsunami](#)”, University of Hawaii Press, Honolulu.
- Fukao, Y., (1979) ”[Tsunami earthquakes and Subduction processes near deep-sea trenches](#)”, J. Geophys. Res. 84, pp.2303-2314.
- Goring, D. G. & Raichlen, F., (1992) “[Propagation of long waves onto shelf](#)”, Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 118, pp. 43-61.
- Gonzalez, F. I., (1999) “[Tsunami](#)”, Scientific American, Vol. 280, No. 5, pp. 56-65.
- Imamura, F., Yalciner, A.C. and Ozyur G., (2006) ”[Tsunami Modelling Manual](#)”.
- Liu YC, SantoSA, Wang SM , Shi YL, Liu HL, Yuen DA, (2007) “[Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea](#)”, Physics of the earth and planetary interiors, Vol.163, Issue 1-4, pp. 233-244.
- Liu, Philip L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S. -B. & Seo, S. -N., (1994) “[Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii](#)”, in Recent Development in Tsunami Research, edited by El-Sabh, M. I., Kluwer Academic Publishers.
- Liu, Philip L.-F., Woo, S.-B. & Cho, Y.-S., (1998) “[Computer programs for tsunami propagation and inundation](#)”, School of Civil and Environmental Engineering Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA.
- Mansinha, L. & Smylie, D. E., (1971) “[The displacement fields of inclines faults](#)”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, pp. 1433-1440.
- Tom Garrison, (2002) “[Oceanography](#)”, fourth edition, Chapter3, pp. 72, Chapter11, pp.263-269.
- Wang, F., Zhang, Z.-Q., (2005) ”[Earthquake tsunami record in Chinese ancient books](#)”, Earthquakes 21(3), pp. 9.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) ”[New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement](#)”, Bull. Seism. Soc. Am. 84, pp. 974-1002.

參考網站

- 中央氣象局全球資訊網，(2010) “[地震測報](http://www.cwb.gov.tw/)”。<http://www.cwb.gov.tw/>
- 新浪網新聞中心，(2004) “[歷史上最大的海嘯-1960年智利地震海嘯](http://news.sina.com.cn/w/2004-12-31/16015389209.shtml)”。
<http://news.sina.com.cn/w/2004-12-31/16015389209.shtml>
- Kaitoku T., (2005) “[How do earthquakes generate tsunamis?](http://www.tsunamiwave.info)”, retrieved Dec. 31, 2006 from the world wide web.
<http://www.tsunamiwave.info>, International tsunami information center.
- NOAA, (2010) ”[Recent tsunami events](http://www.tsunami.noaa.gov/)”, NOAA Tsunami Website.
<http://www.tsunami.noaa.gov/>
- TeachEngineering.org for k-12, (2006) “[TE Lesson: Tsunami Attack!](http://www.teachengineering.com/view_lesson.php?url=http://www.teachengineering.com/collection/cub_/lessons/cub_natdis/cub_natdis_lesson06.xml)”, Free Curriculum, hosted by National Science Digital Library, National Science Foundation, and Fund for the Improvement of Post-secondary Education.
http://www.teachengineering.com/view_lesson.php?url=http://www.teachengineering.com/collection/cub_/lessons/cub_natdis/cub_natdis_lesson06.xml
- USGS, (2010) “[Historic Worldwide Earthquakes](http://earthquake.usgs.gov/regional/world/historical.php/)”, Earthquake Center.
<http://earthquake.usgs.gov/regional/world/historical.php/>