

海嘯監測與模擬預測

吳季莊¹ 楊文昌¹ 廖建明¹
國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心¹

摘要

本文係將利用數值模式模擬預測海嘯之傳播型態，藉以提供海嘯預警系統充分之資訊。數值模式係採用美國康乃爾大學所研發之COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)海嘯模式，海底地震模擬所採用之參數係依據美國USGS(U.S. Geological Survey)以及國家地震中心所提供之資料。針對台灣鄰近海域可能發生海嘯事件的海底斷層進行虛擬地震模擬，然後經由數值模擬預測以獲得海嘯傳播至台灣時之波高與時間，以利在海底地震發生當時，在最短的時間內作出有效的評估，提供權責單位發佈準確且快速的海嘯警報，達到保障人民生命財產安全之目的。

關鍵字：海嘯預警、數值模擬、潮位監測、COMCOT、巢狀網格

一、前言

2004年南亞海嘯藉由影像記錄引起世界譁然，其強大之威力造成南亞陸域嚴重的災損與傷亡；而今年311日本海嘯並加上衍生核災之複合式災難令人觸目心驚，其損失截至目前尚難以估算。近年之歷歷海嘯事件，對於位於太平洋西岸地震頻繁的台灣而言，適足以借鏡與警惕，防患未然必須未雨綢繆規劃與進行因應措施。

環顧台灣所處的地理位置與地質構造，係位於歐亞板塊、菲律賓板塊與太平洋板塊等三大板塊之交界，由於板塊間之移動造成地震頻繁。另外，東側有琉球海溝，南側有馬尼拉海溝，且兩條斷層均是隱沒帶，有可能引發規模大的海底地震。而海底地震係衍生海嘯的重要成因之一，故而台灣值得關注海嘯效應的課題。

根據「淡水廳志」[3]的記載：「同治六年（一八六七年）發生大地震，雞籠頭、金包里沿海，山傾地裂，海水暴漲，屋宇傾壞，漲數百人。」另依據雞籠文史工作者潘江衛所收集的歷史資料中，亦記載於1867年12月18日，基隆曾發生海嘯襲擊，造成死傷數百人，而震央約位於在東經121.7度，北緯25.5度附近，即基隆嶼東方500公尺的海底。俄羅斯學者Soloviev在1974年也曾發表過台灣南部遭受海嘯襲擊的相關文獻[2]。其文中引述綜整過去學者之文獻(Perrey, 1862 c; Mallet, 1854; Lida et al, 1967; Cox, 1970)，描述於1782年5月22日地震籠罩台灣全島形成重大破壞，並伴隨著由東向西往島嶼岸邊侵襲的海嘯，淹沒了「幾乎全島」120公里之範圍，且震動及海嘯持續了8個小時，導致島上的3個主要城市及20個鄉村被地震及海嘯所摧毀。水退去後，建築物還好，留下一堆殘骸，至於活物則無一倖存。喪生居民超過

4萬人，有許多船舶被摧毀與弄沈。熱蘭遮城（安平）港及Pinchongi港，連同住人的土丘，也都一起被沖走。

經探究前述台灣曾遭受數次海嘯襲擊之文獻，以及分析台灣所處地理地質條件，得知台灣再次遭遇海嘯威脅的機率不無可能。而觀諸海嘯的特性，雖然其發生並不頻繁，但是一旦發生，能夠因應的時間極短，且往往帶來震撼性的災難。有鑑於311日本海嘯發生時，即使日本於平時已進行對海嘯災害的防患演練與準備，但仍然造成重大傷亡，且其損失與傷害需耗費數十年才能平復；反觀台灣，地處三大板塊交界，地質構造複雜，地震頻繁，又有發生海嘯的紀錄，卻沒有一套完善的海嘯警報系統與災害防治措施，故研發海嘯預警系統實為刻不容緩的重要任務。本文即針對此海嘯預報機制，先行進行監測與模擬預測的探討。

二、研究方法

本文探討海嘯的議題主要係以數值模擬來預測其效應，監測的部分係蒐集現有氣象局與水利署佈設於台灣週遭的水位浮標量測的結果。先藉由模擬預測與實測結果，以調校模式參數，使模式能夠適用，再設定虛擬狀況以模擬預測，製作反應時間表，使得面臨海嘯災害時能藉由查表預判災損程度與警戒範圍。

(一)理論基礎

依據國際海嘯資訊中心(International Tsunami Information Center, ITIC)所公布的海嘯定義：「海嘯是一系列具有極長週期與波長的巨大波浪，這些波浪通常是經由具猛烈衝擊性的海下擾動、近岸或海中的地質活動所造成。當大量的海水遭到置移或者是地震造成海床突然隆起或下陷，海水變會因為重力的影響產生海嘯。」由於海嘯的波浪性質，一般其週期在10分鐘以上，波長達數十至數百公里，故而與其傳播的介質水深相比，即其波長遠大於海水水深，符合適用

淺水波理論。換言之，水深相對於波長的比率小於1/20時，即可適用淺水波理論來描述與解析坡長的運動情形。本文模擬解析的淺水波方程式如下列所示，係採用由Boussinesq方程式所推導而得，並於動量方程式中加入海床摩擦項[4]。

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

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

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

式中， ξ 為水位； P 、 Q 分別為 x 、 y 方向水深平均之流量； H 為總水深； t 為時間； g 為重力加速度； f 為科氏力係數； τ_x 、 τ_y 分別為 x 、 y 方向之底部摩擦力。而海床摩擦力一般可用蔡司公式（Chezy formula）或曼寧公式（Manning formula）等經驗式來模擬，亦即可分別表示成(4)式與(5)式。

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

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

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

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

其中，(4)式中的 C_f 為蔡司摩擦係數，而(5)式中的 n 為曼寧摩擦係數。

(二)數值模式

目前用來模擬海嘯傳播的數值模式常見的具有3個，(1)MOST(Method Of Splitting Tsunami)：係由美國海洋大氣部（NOAA）精密測量設備實驗室（PMEL）的Titov與南加州大學的Synolakis[8]所發展成功，適用於海嘯衍生的三個過程，包括地震、越洋傳播，以及淹沒乾地。(2)TUNAMI(Tohoku University Numerical Analysis Mode for Investigation)：係由日本東北大學(Tohoku University) Imamura教授所研發，基本上該模式係根據淺水波線性理論發展的模組，而依應用情況如網格的固定與變動、直角與球面座標、以及適用於海洋、沿岸水域，與淺水域而發展出數個模擬模式。(3)COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model)：係由美國康乃爾大學的劉立方教授[6]所研發，模式建構可解析線性與非線性控制方程式，可選擇卡氏直角坐標與球面座標系統，巢狀網格系統至多可耦合四個區域，每一個區域可選擇前述之控制方程式型態與座標系統。

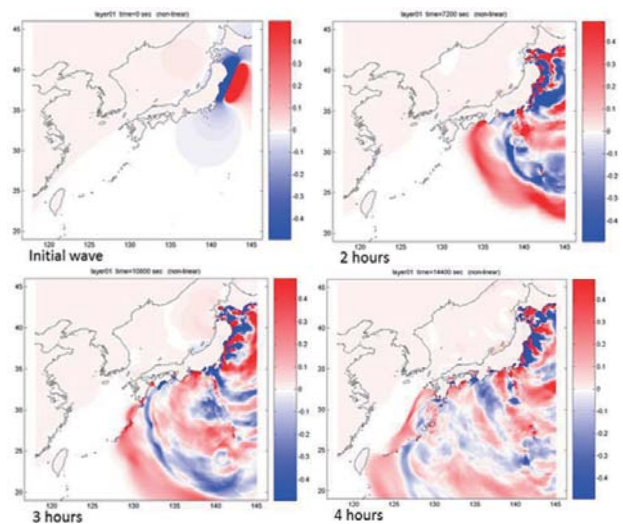
經評估瞭解前述模式的特性與差異性，基於運用的彈性與方便度，本文採用COMCOT模式來模擬預測海嘯的傳播過程中波高的變化，尤其是到達陸地時潮升(inundation)的波高演變，以利後續評估海嘯災損與因應措施的參考。在COMCOT模式中，引起水面變形傳遞的來源可以四種方式模擬，(1)斷層(fault)、(2)海底山崩(submarine landslide)模式、(3)事變造波(incident wave maker)，以及(4)給定已知初始水面位移(surface displacement)。而檢視COMCOT模式在海嘯模擬的應用上，過去有些學者藉此模式均能獲致良好的計算結果，例如1960的智利海嘯模擬[6]、1986與2002年的花蓮海嘯模擬[6]，以及2004與2005年的印度洋海嘯模擬[6]。

三、結果與討論

如前所述本文係利用COMCOT模式來進行數值模擬，因而有四種方式可用來形成海嘯波源；在此以海底地震為海嘯波源的形成機制，故而需要地震發生時的相關參數以輸入模式，這些參數包括地震點的位置、斷層長次度、寬度、深度、滑落長度、滑動(slip)角度、傾斜(dip)角度等資訊。而依照所設定的不同參數，即可利用斷層模擬試算公式去模擬不同規模的海底地震。由於本中心與國家地震工程研究中心(簡稱地震中心)有合作計畫在進行，故而海底地震相關資訊與地震資料均由地震中心提供，再由海洋中心進行模式模擬與計算。換言之，地震參數與斷層資訊均為真實資料，以確保模擬出來海嘯狀況的真實性與可信度。

(一)模式驗證

為了驗證COMCOT模式的可行性，本文利用最近且台灣切身攸關之日本311海嘯案例來模擬，其海底地震參數係依據世上所發佈認同之數值。海嘯模擬之時系列結果如圖1所示，並將以此模擬預測結果與中央氣象局設置的潮位站之實際量測資料(圖2)來進行比較，再將實測與預測的結果整理成表1所示。



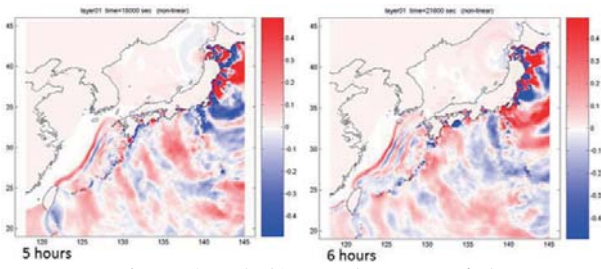


圖1. 日本311海嘯數值模擬之時系列波高分佈圖



圖2. 台灣潮位站分佈與對應日本海嘯之實測結果

表1. 日本311海嘯於台灣潮位站實測與模式預測結果之比較。(日本地震發生時間為13:46。表中括號內之差異值係相對於實測值)

測 站	到達時間 (分鐘)		到達波高 (公尺)	
	實測	預測	實測	預測
基隆港	18:34	18:48 (+15)	0.3	0.3 (+0)
宜蘭烏石	18:18	18:16 (-2)	0.35	0.3 (-0.05)
花蓮石梯	17:55	17:54 (-1)	0.1	0.2 (+0.1)
台東小港	17:53	17:57 (+4)	0.15	0.2 (+0.05)
台東富岡	17:58	18:01 (+3)	0.15	0.1 (-0.05)
綠島	17:57	17:59 (+2)	0.15	0.2 (+0.05)
屏東麟廣嘴	18:15	18:24 (+9)	0.1	0.1 (+0)
屏東林邊	18:41	18:39 (-2)	0.2	0.1 (-0.1)
高雄永安	18:54	18:50 (-4)	0.2	0.1 (-0.1)
麥寮	NAN	20:49	<0.02	0.1
金門料羅	NAN	21:35	<0.02	0.1
桃園竹圍	19:16	19:16 (+0)	0.15	0.2 (+0.05)
麟山鼻	18:50	18:44 (-6)	0.2	0.3 (+0.1)
龍洞	18:20	18:18 (-2)	0.2	0.3 (+0.1)

由比較表顯示模式預測值對應實際觀測資料之符合度相當高，證實COMCOT模式在模擬海嘯時能發揮大效益。

(二)海嘯情境模擬分析

本研究將以台灣周圍海底地形中選取可能引發海嘯的區域來進行海嘯情境模擬，以不同地震點與地震規模為橫軸與縱軸，做出經驗表格，以達到在得知地震點位與規模的同時即可發布精準的海嘯警報。

1. 海嘯波源分析

海嘯波形成之物理機制主要來自大規模之海底地

震與山崩，故而先就台灣周遭之地形地質環境來研析，評估可能引發海嘯的因素，以確保虛擬海底地震參數之可信度。

(1)台灣東側琉球海溝斷層帶

琉球海溝斷層帶較為破碎，無法形成本次日本大地震長達450公里的斷層帶，但因聚合性板塊易引發深層地震，故仍有可能產生規模8以上之海底地震（斷層帶長度在26公里以上）。

(2)台灣南側馬尼拉海溝隱沒帶與南海海盆海底山崩

馬尼拉海溝之斷層幾乎與板塊移動方向垂直，極有可能發生斷層帶超過300公里以上之大型地震，且馬尼拉海溝以逾四百年沒有釋放能量，地體壓力已超過穩定年限。南海海盆北側邊緣發現有大量甲烷水合物，其形成機制為海底山崩，大量沉積物快速包裹含水層，日積月累已形成甲烷水合物。相對證明南海海盆確實有海底山崩之潛在因素，其規模不亞於大型海底地震。

(3)台灣東北部斷層與琉球海盆海底山崩

距今135年前發生的基隆海嘯之成因，即是台灣東北側花瓶嶼與棉花嶼之間的海底地震，由於和台灣的距離很短，能量來不及消散，因而造成重大災害。因此，台灣周遭的小型斷層也必須列入模擬範圍。琉球海盆因旁有大河出水口，大量沉積物堆積在琉球海盆北緣，由於陸緣沉積物大多含水性高，因而有發生大規模海底山崩之顧慮。

2. 模擬範圍與條件設定

考量規模9.0的311日本地震之發生地震點位為東經142.6與北緯38.1，雖然台灣偵測到對應的波高變化僅有0.3公分的波高，但仍可確知其海嘯波的確傳播至台灣。另外，考量前述波源分析中，可能造成海嘯波的斷層分佈之經緯度情況，在期望能包括馬里亞納海溝與菲律賓板塊和太平洋板塊交界之聚合性隱沒帶、南海海盆直達海南島、以及馬尼拉海溝與完整琉球海溝之地震帶，因此在海嘯模擬範圍的選取上，將以經度110度至150度，緯度10度至40度的區域來執行計算，如圖3所示。

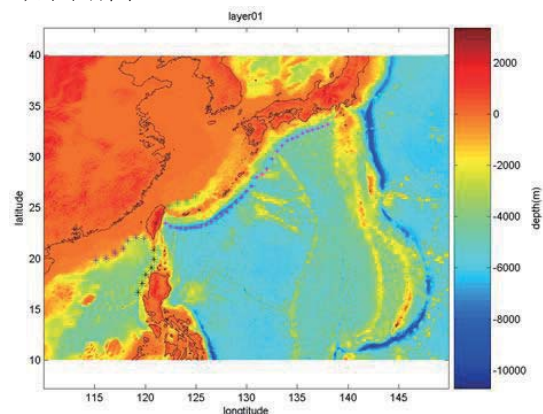


圖3. 海嘯數值模擬之選取範圍

藉由海嘯模擬探討其影響效應，計畫中將對前述之3個海嘯波源來模擬，而本文將先就已初步完成之琉球海溝所引起的海嘯波源模擬來分析。由於模式中由斷層引起的海底地震所需參數包括走向角(strike angle)與傾斜角(dip angle)，故而在海嘯情境模擬的案例規劃，將自琉球海溝西側取18個地震點位，以經度0.5度為一間隔，走向角依斷層點位量取，傾斜角依經驗值取為40度，如表2所示整理此18模擬案例之參數；而其規模則參照斷層規模對照表設定斷層長度、寬度與斷層滑落距離。另外，依琉球海溝斷層之特性，自經度122度，至124度，由於斷層構造破碎，故選擇規模7.0之數據，而經度124度，以東則選擇規模7.5之數據。實際模擬計算時，評估在此範圍所需的傳播時間，故計算時間取為7000秒。

表2. 琉球海溝模擬位置與走向角、傾斜角之設定。

案例	經度	緯度	走向角	傾斜角
1	122.0	23.47	301.8	40
2	122.5	23.16	292.8	40
3	123.0	23.05	279.1	40
4	123.5	23.00	272.9	40
5	124.0	23.00	267.1	40
6	124.5	23.05	264.3	40
7	125.0	23.10	264.3	40
8	125.5	23.15	258.7	40
9	126.0	23.30	245.8	40
10	126.5	23.60	237.8	40
11	127.0	23.93	235.8	40
12	127.5	24.28	234.2	40
13	128.0	24.65	231.3	40
14	128.5	25.08	229.6	40
15	129.0	25.50	226.5	40
16	129.5	26.03	222.3	40
17	130.0	26.60	221.8	40
18	130.5	27.15	215.5	40

3. 模擬結果分析

經前述海嘯情境模擬的18個案例之實際計算結果，將其接觸台灣時波浪傳遞之波高分佈情況分別繪製成圖4所示，且於圖中分別標示其模擬的震源位置。由圖中可看出無論震源的位置在何處，海嘯波的傳遞於琉球島弧東側與下側的傳遞速率遠比其西側與上側來得快，此概因於地形上深海的傳遞比淺海來得快。另外，從模擬案例震源在經度127度以東的情況來看，當海嘯波已傳遞接觸台灣時，沿著琉球島弧西側與上側亦呈現海嘯波的傳遞，且似乎其波高向較下有變高的趨勢，此現象可能因該處地形較淺，淺化效應比波浪衰減來的大的結果。

另外，在量化的結果上係將海嘯波傳遞抵達台灣時的時間與波高擷錄出來，並將18個模擬案例知結果整理成表3所示。

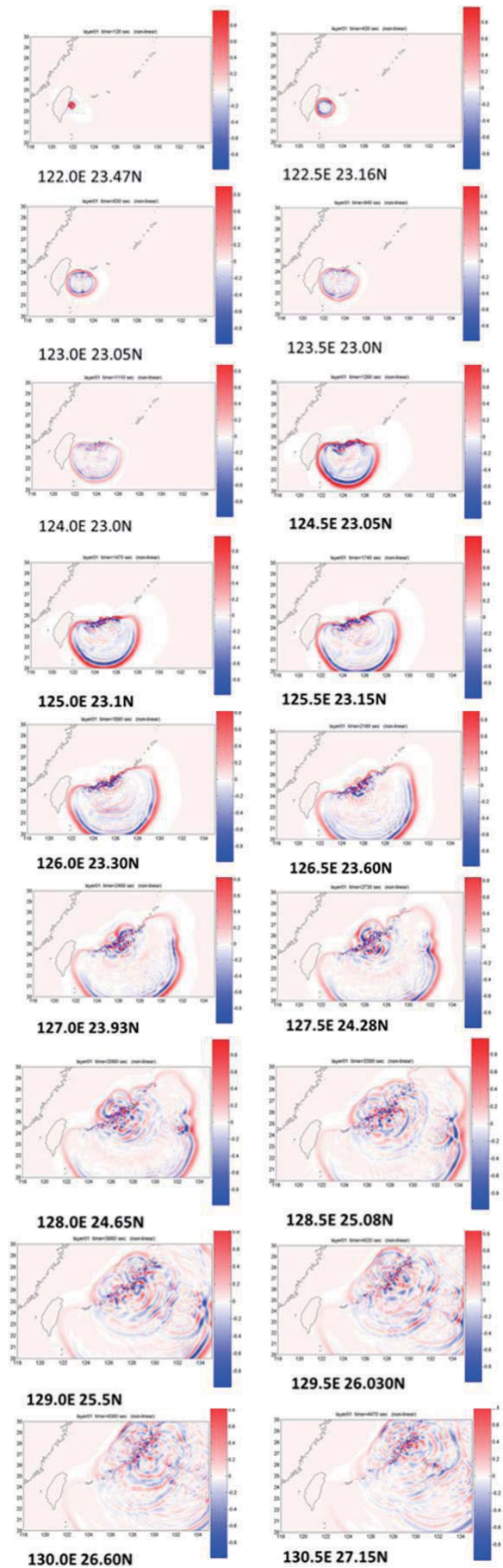


圖4. 海嘯模擬抵達台灣當時之波高分佈圖

表3. 海嘯波傳遞抵達台灣之時間與波高

案例	經度	緯度	MW	時間(s)	波高(cm)
1	122.0	23.47	7	120	67
2	122.5	23.16	7	420	42
3	123.0	23.05	7	630	39
4	123.5	23.00	7	840	24
5	124.0	23.00	7	1110	18
6	124.5	23.05	7.5	1260	68
7	125.0	23.10	7.5	1470	57
8	125.5	23.15	7.5	1740	52
9	126.0	23.30	7.5	1890	44
10	126.5	23.60	7.5	2160	36
11	127.0	23.93	7.5	2460	27
12	127.5	24.28	7.5	2730	23
13	128.0	24.65	7.5	3060	17
14	128.5	25.08	7.5	3390	15
15	129.0	25.50	7.5	3660	10
16	129.5	26.03	7.5	4020	9
17	130.0	26.60	7.5	4380	7
18	130.5	27.15	7.5	4470	2

由表3可知在本文設定之海底地震規模下，海嘯波抵達台灣時之波高最大值為67與68公分，其對沿岸之災損影響可能不致於太大，或許於海底地震規模的設定上於後續模擬應再向上調升。而在距離台灣海岸線兩百公里以內的地震，造成海嘯之海嘯波均在20分鐘內即到達台灣海岸，且震源和台灣的距離與首波之波高成正比衰減。另案例6則因斷層帶漸趨平直而提高震度至MW值為7.5，故其海嘯首波的波高增高，但反應時間也相對增加。

接著，為了瞭解海嘯波能量傳遞的情形，將每個案例於模擬範圍中的每個網格所歷經7000秒計算過程中所獲之最大水面高繪製成圖，如圖5所示。

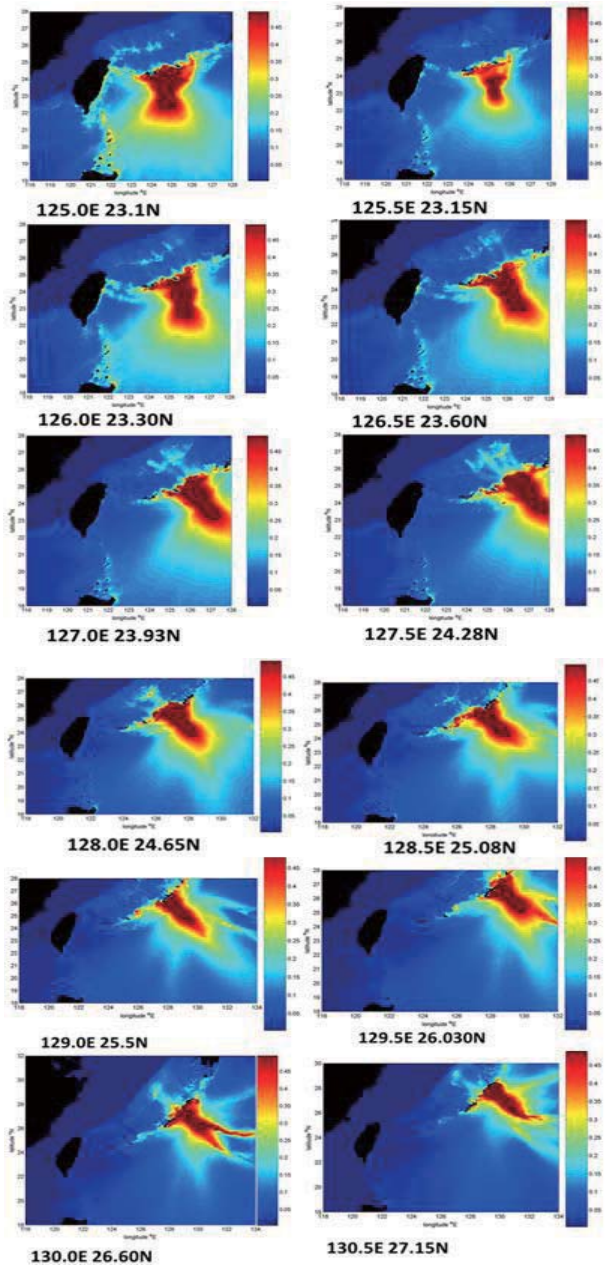
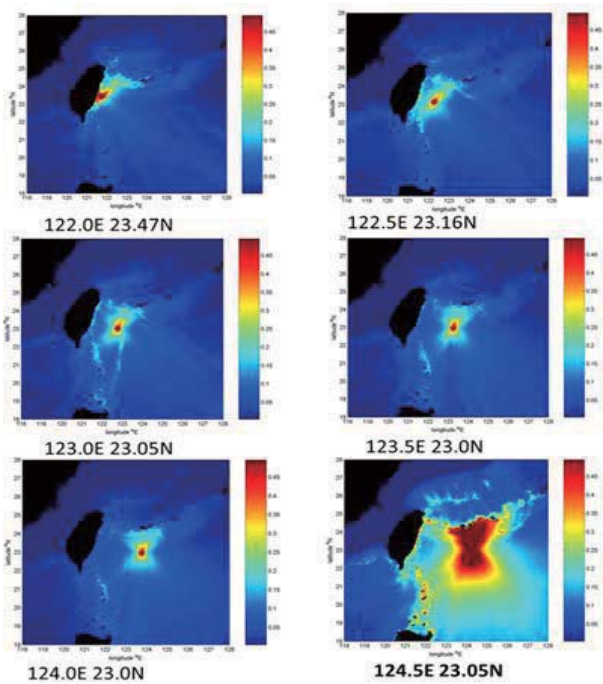


圖5. 海嘯模擬全程式中之最高水位分佈圖

由圖5可看出海嘯波能量之主要傳遞方向大致為垂直於斷層方向，因此在東經125.5以東，海嘯波的能量擴散主要向東往太平洋方向傳播，且傳遞過程中由於能量之衰減，所以抵達台灣東側沿岸時已大量衰減，而位於琉球海溝北側的琉球群島由於相距距離短則將遭受較大的災害。另一方面，由於琉球海溝北側有耶雅瑪海脊，故而琉球海溝斷層地震引發的海嘯波再往北傳播時，亦將有部分反射往南或東南向傳遞，使得較大的能量係往南或東南向傳遞。

案例1至案例3震源係位於經度123度以西，其海嘯波傳遞方向偏西南向，由於加瓜海脊（位處經度於122.5度與123度之間）的地形影響，故除震源處傳遞外另加成加瓜海脊的反射效應，使其主要的較大能量落於加瓜海脊西側花東海盆處。案例4與案例5海嘯波傳

遞亦受加瓜海脊地形影響，而有反射的效應，使得較大的能量落於加瓜海脊東側西菲律賓海盆處。

隨著模擬案例之震源往東設定，由圖5中可看出震源位於經度126.5度以東時，海嘯波能量之傳遞係朝東南向，而有別於其前面的幾個案例海嘯波能量朝南向傳遞，其間的差異可能因震源離加瓜海脊愈遠，受到加瓜海脊的反射效應愈小。綜觀所有案例之海嘯波能量大致於50公分左右，而案例1與案例5之首波傳遞至台灣時，波高增加至67與68公分，除了歷經傳遞過程的衰減外，在台灣東側近岸大陸棚則會產生淺化效應，顯然於此兩案例淺化效應比衰減來得大，故波高較震源處高。

四、結論

相較於引發日本海嘯之斷層帶長達五百公里，且距離陸地僅一百公里；而琉球海溝距離台灣一百公里以內之斷層帶破碎，且持續以MW 5以下之地震釋放能量，故可能不足以引發相似於日本地震規模的大型地震。距離台灣在一百公里以外的琉球海溝則因斷層帶轉轉而面朝太平洋，其能量擴散將朝太平洋東側前進，而西側則因琉球島弧、耶雅瑪海脊以及加瓜海脊之擾動會破壞海嘯波結構，使傳遞至台灣時可能已無明顯波浪。

藉由COMCOT模式來數值模擬海嘯波之傳遞情況，經本文利用日本311海嘯案例來驗證模式之可行性，雖然經比較預測值與觀測測資料之符合度均屬良好，但由於該海嘯傳遞至台灣時之波高值不大，故而後續仍須加以進行COMCOT模式之驗證，以確保COMCOT模式本土化之適用性。

本文以地震規模MW 7與MW 7.5來模擬海嘯波之影響效應，模擬結果顯示海嘯首波抵達台灣時，波高最大僅為67與68公分，對台灣的災損影響可能不大。而相較日本311海嘯之規模達到9，或許在後續數值模擬時，可提升海底地震之規模，期以能夠掌握最大的災損影響。

海嘯波之主要能量傳遞方向通常係為斷層帶之垂直方向，但由於地形地勢的影響可能改變其方向，或會因此於局部造成加成效應。值得注意的，如距離台灣100公里內之琉球海溝發生規模較大地震，有可能在地形效應下造成加成的影響，後續可以此來模擬其結果並探討。

總結來說，台灣位處海底地震頻繁發生的地帶，尤其緊鄰之平直的馬尼拉海溝斷層帶，已逾四百年未釋放能量，一旦觸動規模大的海底地震，其後果勢必超乎想像，潛在威力不容小覷。而眾所周知日本針對海嘯研究與警報系統為世界之冠，但仍於遭逢海嘯後造成重大傷亡損失，故而台灣應引以為借鏡，除要有

完善之預警系統之外，更需發展應變措施，才得以在海嘯發生時確實保障人民安全。

參考文獻

1. 李昭興, 許樹坤, 吳季莊, 2006: “台灣西南部海嘯警報系統建立之初始研究”, 氣象局報告。
2. 林欽隆, 1998: “台灣海域海嘯狀況與海巡艦艇因應對策之研究”, 海洋大學博士論文。
3. 陳培桂, 1871: “淡水廳志”。
4. 張孟挺, 1998: “台灣的海嘯威脅與高雄市溢淹之模擬”, 中山大學碩士論文。
5. Anat Ruangrassamee, 2009: “Effect of Tsunamis generated in the Manila Trench on the Gulf of Thailand”, JAES, 36, 56-66.
6. Liu, P.L.F., Cho, Y.S., Yoon, S.B. and 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.
7. Soloviev, S.L. and Ch. N. Go, 1974: “Catalogue of Tsunamis on the Western Shore of the Pacific Ocean, Nauka, Moskva”, 1-16.
8. Titov, V. V. and Synolakis, C. E., 1993: “A numerical study of wave runup of the September 1, 1992 Nicaraguan tsunami”, Proc. Intern. Tsunami Symposium, 627.
9. Wang, X. and Liu, P. L.F., 2005: “Preliminary Simulation of 1986 & 2002 Taiwan Hualien Tsunami”, Cornell University.
10. Wang, X. and Liu, P. L.F., 2006: “An Analysis of 2004 Sumatra Earthquake Fault Plane Mechanisms and Indian Ocean Tsunami”, Journal of Hydraulic Engineering and Research, 44(2), 147-154.