

以格林函數快速預報高雄港外海嘯高度

邱永芳¹

蘇青和¹

陳冠宇²

劉俊志²

交通部運輸研究所港灣技術研究中心¹ 國立中山大學海下科技暨應用物理海洋研究所²

摘要

本文主要研究目的在於建立高雄港外海嘯高度的快速預報模式，藉由COMCOT模式 (Cornell Multigrid COupled Tsunami model)的線性淺水波方程來模擬高雄港外一定點的波源水位傳播，進而得到區域內各點對應於定點的互逆格林函數(reciprocal Green's Function)時間序列。互逆格林函數只要計算一個海嘯傳播的情況，因此可以大幅節省計算格林函數的時間。由於大多數海嘯的成因起源於海底地震，可根據斷層模式由地震參數計算出地震引發的海嘯水位分布。最後將各點的水位與其格林函數的乘積作加總，便可獲得定點的水位變化。利用事前已計算的格林函數，當未來發生海底地震時，可以節省計算的時間，加快預報速度。

關鍵字：海嘯預報、互逆格林函數

一、前言

格林函數的運用在傳統上觀察線性系統中波源所造成的反應，而格林函數通常以波源的振幅為單位，如果區域內各點的格林函數已經求得，只要計算起始波源的水位與其格林函數的乘積後進行加總，便可得知波源對各點所引起的水位變化。儘管海嘯波靠近近岸時會呈現高度非線性變化，但在水深深於 50 公尺的海域，線性淺水方程式能適用於描述其傳播過程(Shuto,1991)。

上述的格林函數(Green's Function，以下以 GF 簡稱)是表現區域內各點對應波源所產生的反應，即單波源全接收點(one-source-all-reciver)的形式，傳統上的 GF 是由 s 到 r，s 表示波源位置(source)，而 r 則為接收位置(reciver)。而其逆向的 GF 代表以 r 產生的波源振幅為單位，在 s 所造成的反應。

Loomis(1979)談到 GF 及其逆向 GF 對於 s 和 r 是呈現對稱的形式，亦即相同的波源出現在 s 所造成對 r 的反應相當於出現在 r 所造成對 s 的反應，Loomis 所提的互逆特性可以提高計算各點 GF 的效益，只要計算 s 傳播後對所有 r 的 GF，等同於得知當任何 r 出現波源時對 s 造成的反應。所以當海嘯發生時，僅需將各點 r 的起始水位作簡單的乘積加總便可得知 s 的水位變化。

有鑒於 2004 年南亞大海嘯所造成的災害，海嘯

的預警便成為海岸防災重要的一環。對海嘯防災而言，人口密集的地點才是重點地區，而防災的目的在於有效減少生命財產損失。既然海嘯防災只注重在某些特定地點，那麼把計算時間花費在區域內的非重點地帶無疑是種浪費，本文根據可逆 GF 的觀點(即 Xu 提出的 all-source GF)，快速預報高雄港外海嘯高度。

二、研究方法

2.1 模式設定

本文使用海嘯數值模式 COMCOT (Liu et al.,1998) 計算水位傳播，模式可選用的淺水方程式包含線性或非線性兩者，既然線性淺水方程式足以描述海嘯波在海域深度超過 50 公尺的變化，在此採用線性的部分((1)-(3)式)，不考慮非線性及摩擦力的影響。模式區域範圍在東經 117° 至 125°，北緯 19° 至 27° (圖 1)，網格點 481*481，解析度 1 分。首先在高雄港外海離岸約 3 公里的地方選取水深 22.4 公尺的定點 s(圖 2)，並且給予水位高度 1 公尺當成波源振幅，經模式計算水位傳播(圖 3)，除 s 點之外，所有的點皆視為接收點 r，而 s 點即為之後海嘯高度預報的水位點。此研究的目的在海岸防災，因此希望能了解海嘯波越接近岸邊的威脅，儘管 s 點的深度不到 50 公尺會稍微影響到預報的準確度。

$$H_t + Q_x + R_y = 0 \quad (1)$$

$$Q + gdH_x = 0 \quad (2)$$

$$R + gdH_y = 0 \quad (3)$$

其中 H 為水位高度， Q 、 R 各為 x 、 y 方向的流量， d 為總水深， g 為重力加速度。

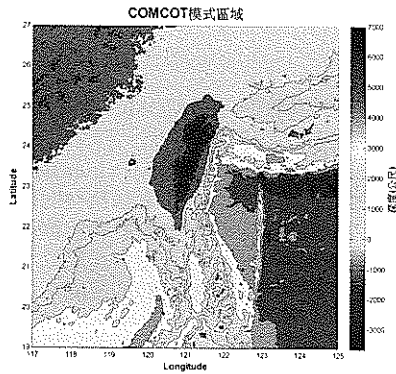


圖1、海嘯數值模式計算區域圖

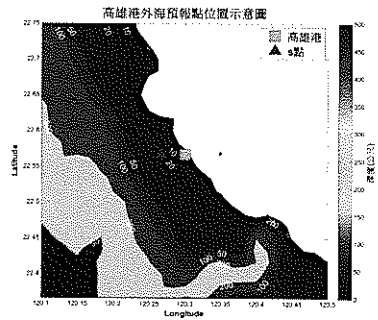


圖2、海嘯高度預測點s點位置圖

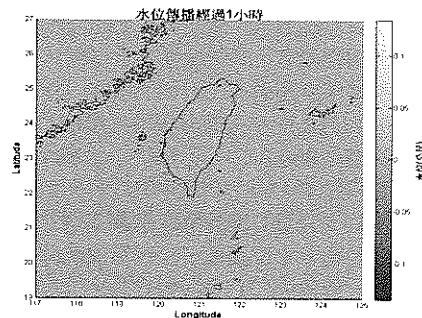


圖3、s點初始水位傳播3小時後

2.2 格林函數的計算與逆向格林函數的驗證

為了解區域內任何 r 點發生海嘯時，其當地水位將對 s 點位置的造成多大的水位高度，故先計算所有

r 點對應 s 點的GF。首先將3小時內各 r 點的水位經(4)式正規化便是 s 點傳播至各點的GF值，又因波源振幅為1公尺，所以模式計算後的水位值即為GF值。再根據GF的逆向性質， r 點對應 s 點的GF等同於 s 點對應 r 點的GF((5)式)。只要透過(6)式作簡單的乘積與加總就可到 s 點在海嘯發生後的3小時水位變化。

$$GF_r^s = \frac{r\text{點水位}}{\text{波源}s\text{之初始水位}} \quad (4)$$

$$GF_s^r = GF_r^s \quad (5)$$

$$H_{s,t} = \sum_{r=1}^N \sum_{t=1}^M (GF_{r,t} * H_{r,t}) \quad (6)$$

其中(6)式的 $H_{s,t}$ 為 s 點在時間 t 的水位高度， GF_r 為各 r 點在時間 t 的GF， H_r 各 r 點的初始水位高度， N 為所有 r 點的總數， M 為總時間長度。

為了驗證由模式所計算出的GF是否符合(5)式，在此選擇 s 點設置起始波源進行模式水位傳播，之後各別在 $c1$ 與 $c2$ 點(圖4)設置同樣波源進行傳播，由這三次模擬可得到 s 、 $c1$ 、 $c2$ 三點相互傳播的GF(圖5)，基本上互傳的結果相一致，儘管由數值模式計算產生的誤差導致了微小差異。

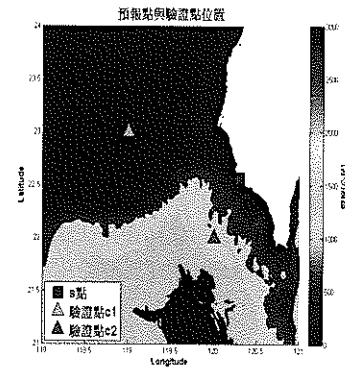


圖4、逆向GF驗證點的位置圖

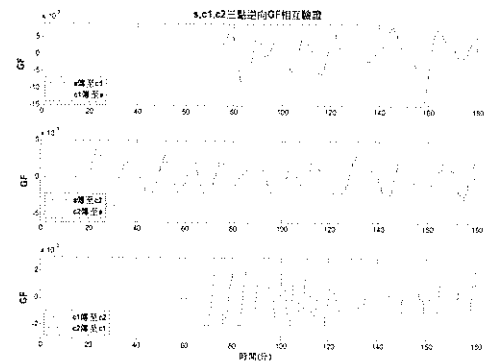


圖5、利用s、c1及c2三點互相驗證GF與逆向GF的一致性。

三、高雄港外海預報的應用

3.1 海嘯波源驅動模式

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

本文進行兩次試驗來了解發生海嘯對 s 點的水應影響，第一次試驗代入斷層模式所用的參數同陳(2007)引用的 2006 年恆春大地震斷層參數，其參數來源為 Harvard CMT 世界地震網，使用的地震規模為 Kanamori(1977)提出的地震矩規模(moment magnitude, Mw)，因第二場地震對水位影響不大(陳, 2007)，所以僅採用第一場地震的斷層參數。第二次試驗假設震央在東經 119.5°、北緯 21.5° 發生地震矩規模高達 8 的海底地震所引發的海嘯，兩次試驗的斷層參數如表 1、2。

表 1、第一次試驗的斷層參數

震央位置	東經 119.5° 北緯 21.5°
震源深度	5000 公尺
斷層長度	60000 公尺
斷層寬度	30000 公尺
平均滑移量	15 公尺
strike direction	329 度
dip angle	15 度
slip angle	110 度
地震矩規模	8.0

表 2、第二次試驗的斷層參數

震央位置	東經 120.52° 北緯 21.81°
震源深度	19600 公尺
斷層長度	37358 公尺
斷層寬度	18679 公尺
平均滑移量	1.1008 公尺
strike direction	165 度
dip angle	30 度
slip angle	-76 度
地震矩規模	7.0

3.2 預報點水位計算結果

由第一次試驗將表 1 的參數代入斷層模式所得的海嘯起始水位如圖 6。經由(6)式計算出的 s 點預報水位結果如圖 7。預報結果顯示 s 點受海嘯作用引起的最大水位僅 7.8 公分(接近第 40 分鐘及第 150 分鐘)，不至對高雄近岸產生威脅。

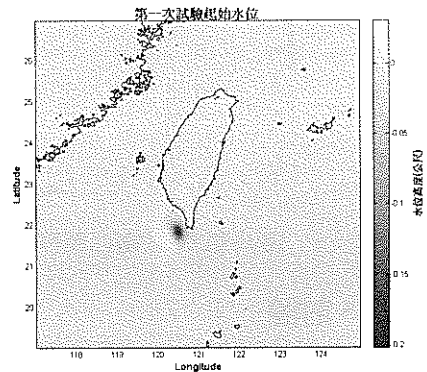


圖 6、利用斷層模式所模擬的第一次試驗水位

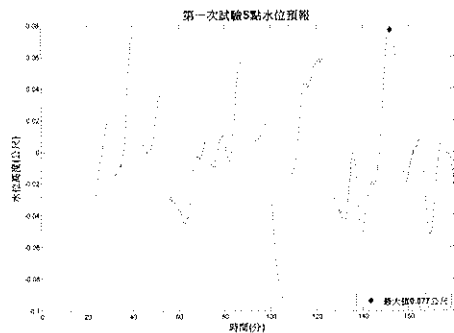


圖 7、第一次試驗在 s 點的海嘯高度預報後
第二次試驗將表 2 的參數代入斷層模式所得的海

嘯起始水位如圖 8。經由(6)式計算出的 s 點預報水位結果如圖 9。預報結果顯示 s 點受海嘯作用引起的水位最大值達 4.486 公尺(接近第 37 分)，最大波高約 8 公尺，對高雄港近岸威脅甚大。

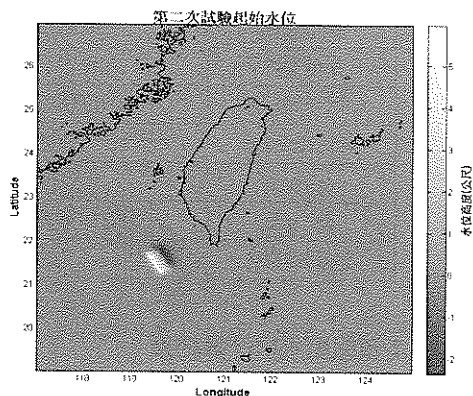


圖 8、第一次試驗在 s 點的海嘯高度預報

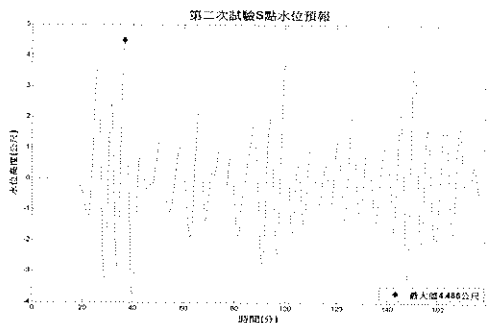


圖 9、第二次試驗在 s 點的海嘯高度預報

- 3.Kanamori, H., "The energy release in great earthquakes", *Journal of Geophysical Research*, 82, 2981-2987, 1977.
- 4.Loomis, H.G., 1979: "Tsunami prediction using the reciprocal property of Green's functions," *Mar. Geod.*, 2(1), 27-39 (1979)
- 5.Shuto N., 1991: "Numerical Simulation of Tsunamis—Its Present and Near Future," *Natural Hazards* 4, 171-191.
- 6.Xu, Z., 2007: "The All-source Green's Function and its Applications to Tsunami," *Science of Tsunami Hazards*, 26(1), 59-69.
- 7.Liu, P.L.-F., Woo, S.-B., and Cho, Y.-S., Computer programs for tsunami propagation and inundation., Cornell University, 1998

四、討論

本文所使用的方法，在斷層參數上沒有限制，只要是在模式區域內發生的地震，皆可透過斷層模式得到海嘯起始波源，再經簡單的運算便可在三十秒內預報定點的水位高度，適合人口密集的近岸地區當作海嘯防災預報系統來使用。期望未來能獲得更多海底地震引發的海嘯資料，透過水位實測資料來驗證模式。淺水方程式能適用於描述其傳播過程(Shuto,1991)。

參考文獻

- 1.陳韻如(2007)，「屏東外海地震引發海嘯的數值模擬探討」，國立中央大學水文科學研究所碩士論文。
- 2.Mansinha, L. and Smylie, D. E., "The displacement fields of inclined faults", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61(5), 1433-1440, 1971.