

我國海嘯浮標實測外洋水位資料之解析

吳立中¹
國立成功大學¹
近海水文中心

滕春慈²

林燕璋²
中央氣象局²
海象測報中心

摘要

有鑑於臺灣海岸也屬於可能遭受海嘯威脅之風險區，中央氣象局於2018年底於臺灣東南及西南海域建置了海嘯預警浮標系統。該系統之原理是透過持續監測外洋之水位變化，藉此偵測海嘯之波動特徵。在沒有海嘯威脅的期間，則可透過這些所測得之外洋水位資料研究外洋之潮汐特徵。本研究針對海嘯浮標所測得之外洋水位資料進行解析，從中瞭解外洋水位之變化特性。分析結果顯示，臺灣東南外海之潮型為以半日為主之混合潮型，潮差較高的月份則是發生在2月以及8月。本研究也導入卡爾曼濾波技術，檢討即時偵測海嘯波動之可行性。

關鍵字：海嘯浮標、外洋海水位變化

一、前言

臺灣位處地震活躍環太平洋火山帶中，地震之活動頻率頗高。過往地震所造成之災情對我國民眾造成了生命及財產安全之威脅。中央氣象局自民國80起開始啟用即時地震監測系統，目前每年約可蒐錄近40,000次地震，其中有感地震約1,000次（資料來源：中央氣象局網頁）。相較於震央位於臺灣陸域或是鄰近臺灣海域之地震可能會造成陸上建物毀損之災情，遠距離震央之地震波雖然可能對臺灣並無直接影響，然而海底強烈地震則有可能會引發海嘯或其他之災情。海嘯是否發生與地震之規模有關。有研究統計發現，要引發一定規模的海嘯，其地震規模大約要超過7級。有別於海面之風浪，地震所引發之海嘯是週期相對更長之水面波動，但又比潮汐波動的週期短。一般而言，海嘯週期之範圍通常介於100sec~10,000sec之間(Levin et al., 2009)。這樣週期條件之波動透過水體為媒介進行傳遞時，能量並不易產生衰減。當海嘯波動抵達近岸淺水區時，易沿著近岸底床坡面溯上，進而產生災情。全球近幾十年來最嚴重的地震及其引發之海嘯災情分別為2004年12月於印度洋發生規模9.1級地震所引發的南亞大海嘯以及2011年3月發生於日本東北地方太平洋近海地震(USGS測定為地震規模為9.1級)所引發的海嘯災情。

以日本311大地震所引發之海嘯為例，當年在臺灣地區雖無災情，但環島多數岸邊潮位站仍量測到明顯的海嘯波動。從圖1的花蓮石梯水位觀測結果可發現，2011年3月11日之前，水位僅呈現規則的潮汐

波動。自11日黃昏開始，除了潮汐的波動之外，還可偵測得較潮汐更高頻的水位波動。

我國現有岸邊潮位站所獲取的海水波動紀錄雖能即時偵測海嘯所引發之異常水位波動，但要發揮更充足時間的預警功用，仍需要結合遠海觀測平臺的海嘯偵測。為能有效預警海嘯事件，掌控相關情資，進而減緩人員傷亡，中央氣象局於2018年底於臺灣東南及西南海域建置了海嘯預警浮標系統(圖2)。該系統之原理是透過持續監測外洋之水位變化，藉此偵測海嘯之波動特徵。在沒有海嘯威脅的期間，則可透過這些所測得之外洋水位資料研究外洋之潮汐特徵。此外，在劇烈天氣系統通過監測海域上方時，則可藉此研究氣象潮，甚至是颱風低壓所引發暴潮對外洋水位抬升之影響。有鑒於此，本研究針對海嘯浮標所測得之外洋水位資料進行解析，期能從中瞭解外洋水位之變化特性。

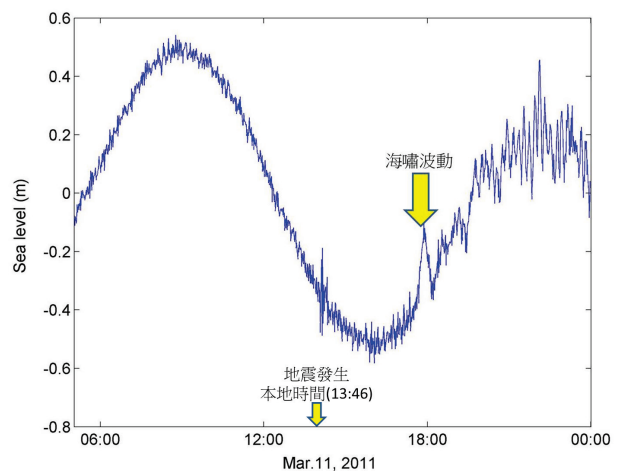


圖1 花蓮港於2011年日本地震前後測得之水位資料



圖2 中央氣象局所建置之海嘯浮標
(資料來源：中央氣象局海象測報中心)

二、外洋水位觀測技術之檢討

國際上現有的海嘯監測系統可大致區分為壓力式監測系統與 GPS 監測系統這兩類。壓力式監測系統之原理是將高精度之壓力感測儀布放於海底，透過水壓推算出壓力計上方之海水位高度，藉此偵測海嘯水位變化。由於現行衛星通訊科技之普及，系統可布放於離岸較遠處，藉此爭取較充裕之預警時間。

一般而言，壓力式海嘯監測系統是由四種模組所組成：一、海底壓力計，藉此偵測海嘯水位變化；二、水下無線訊號傳輸器，藉此將海底壓力計測得資料傳輸至水面之浮標平臺；三、錨碇式水面浮標，為一資料傳輸中繼站，接收來自海底壓力計測得之海水位資料，並將資料透過衛星傳至陸上監測站；四、地面接收站，接收衛星傳輸之數據。

從底碇式壓力計(Bottom Pressure Recorder, 簡稱BPR)觀測海表面水位波動的原理為透過實測水壓反算出海水位資訊。如式(1)所示，為海水位波動 $\zeta(t)$ 與水壓 $p(t)$ 之間的數學關係為：

$$\zeta(t) = [p(t)/\rho g] - h \quad (1)$$

上式中 ρ 為海水密度、 g 為重力加速度、 h 為BPR所在位置之水深條件。透過式(1)搭配BPR所實測得之壓力值即可求得海水位之波動。在不同環境外力影響之下，海水面上的波動週期可從小於一秒到數十小時都有可能發生。因水壓之偵測會受到BPR所在水深之影響(Tucker, 1991)：

$$p(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \rho g a_i \exp(-k_i h) \sin(\omega t - \phi) \quad (2)$$

上式中 a_i 為海面波動之振幅、 k_i 為波浪之波數、 ω 為波浪之角頻率、 ϕ 為相位。如式(2)所示，當波數 k_i 愈大，亦即波浪週期愈短，其對應之水壓會以 $\exp(-k_i h)$ 的冪式衰減。由於

此一短週期波動隨水深條件衰減之特徵，深海地區所測得之水壓僅會呈現出長週期之海面波動。海面風湧浪(波動週期一般為30秒以內的波動特徵基本上是不會從深海測得之水壓資料中呈現出。相較於海面風湧浪，海嘯(波動週期約為數十分鐘)以及潮汐(波動週期約為數小時到數十小時)因其週期較長，不易衰減，可從深海水壓中偵測出其波動特徵(林等，2015)。

三、外洋水位觀測資料分析與討論

如圖3所示，為中央氣象局於臺灣東南外海所建置海嘯浮標站測得之外洋水位高度範例。該站位於臺東之東南方約340公里處，該處之水深約為5,500公尺。該系統於平常時間是每15分鐘取得1筆水位高度資料。從2019年1月的水位波動特徵可確認，該海域之單日潮差最大可超過1.5公尺。考慮到系統可能會遭遇一些狀況，致使在極少數的觀測時刻會缺少資料，本研究利用2019年全年的水位實測資料進行調和分析(Boon, J., 2004)，可藉此對缺漏的資料進行補遺。從實測資料的調和分析結果可確認，該海域主要的分潮為半日潮(M2與S2)與全日潮(K1與O1)。值得注意的是，從調和分析結果還可發現該海域水位變化中存在較明顯的長週期波動(SSA，其週期約為183天，也就是約為半年)，如圖4所示。

儘管透過前述資料分析可確認海嘯資料浮標可觀測到潮汐所產生之海水位波動，但由於測站設置於外洋，並無法利用參考水準點高程值引測至臺灣高程基準(TWVD2001)。換言之，外洋水位無法以基隆平均海面當作零點，也就無法直接將外洋水位與本島之潮位進行比較。相較於潮位值，潮差值則就無需以高程基準為依據，可針對外洋之潮差進行分析。

一般而言，大潮會隨季節而改變大小，潮差最大的那一月稱為年度大潮，一般是發生在接近春、秋分的朔或望日期間，但全球不同位置點發生最大潮差的時間仍會有所差異。如圖5所示，為本研究針對2019年一整年的外洋水位資料進行潮差分析，從中計算出不同月份之潮差結果。依據中央氣象局潮汐觀測資料年報之定義，月平均潮差為當月平均高潮位與平均低潮位之差值；月最大潮差則為當月最高高潮位與最低低潮位之差值(交通部中央氣象局，2020)。根據中央氣象局發布的資料，2019年8至9月的新月時，臺灣地區有全年較高的滿潮水位。從圖5的分析結果可發現，臺灣東南外海之外洋潮差較高的月份是發生在2月以及8月。

除了潮差特徵之外，本研究也針對海水位波動之潮型特徵進行分析。為能解析出觀測海域之潮型，目前常用四種主要分潮的振幅比值作為潮型指標 F ：

$$F = \frac{A_{k1} + A_{o1}}{A_{k2} + A_{o2}} \quad (3)$$

一般而言，當 $F < 0.25$ 時，可視為半日潮型； $0.25 \leq F < 1.5$ ，可視為以半日為主之混合潮型； $1.5 \leq F < 3.0$ ，可視為以全日為主之混合潮型； $F \geq 3.0$ ，則可視為純粹的全日潮型(Pugh, 1996)。如圖6所示，為本研究針對外洋潮位分析所獲得不同月份之潮型指標值。分析結果顯示，不同月份之潮型指標值 F 皆介於0.30到0.55之間，說明了臺灣東南外海之潮型可視為以半日為主之混合潮型。此外，從不同月份分析結果可發現，全年逐月之潮型指標值呈現週期性之變化。在3月與9月時，潮型指標值較小。在1月、6月、12月時，潮型指標值較大。這樣的波動現象約略與圖5的潮差逐月變化成相反之關係。

為能解析出外洋水位之異常波動特徵，如海嘯波動，本研究嘗試導入卡爾曼濾波技術，藉此檢討即時偵測異常水位波動之可行性。卡爾曼濾波器為匈牙利數學家卡爾曼所提出之方法(Kalman, 1960)。該法在演算過程中，若取得新的觀測資料，就會結合當時的預測值和觀測資料估算其誤差協方差(Error covariance)，並同時對誤差協方差進行分析和預測。整體而言，卡爾曼濾波器假設每一個時刻的雜訊，其彼此之間都互相獨立。只要能掌握前一時刻的估計值與當前時刻的觀測值，儘管觀測數值含有雜訊於其中，仍可透過卡爾曼濾波方法計算出當前狀態的估計值。經過每次的遞迴演算可讓估計值離動態系統狀態更為接近。卡爾曼濾波器應用於解析潮汐資料的優點在於僅需要輸入當前時刻的潮位測量結果與前一時刻的估計值就能估算出當前時刻的潮汐特徵(吳等, 2019)。

由於從中央氣象局2018年底建站至今，海嘯浮標尚未監測到明顯之海嘯水位波動，本研究嘗試自行模擬類似海嘯之波動，並置入實測之外洋水位資料中。如圖7所示，為本計畫所模擬之海嘯波動訊號。海嘯波動的開始時間是設置在時序列圖中約70小時之後。一般而言，海嘯波動週期之範圍通常介於100秒~10,000秒之間，本研究將模擬之波動週期設定為1小時，也就是3600秒。考慮到海嘯波動在外洋深水區域之振幅並不大，本研究將海嘯波動振幅設定為小於10公分，並持續衰減。如圖8之上圖所示，為本研究將模擬之海嘯波動疊加實測水位波動資料中之結果。圖8之下圖則為卡爾曼濾波預測結果與原始潮位資料之間的差值。一旦發生如海嘯波之較高頻的水位波動，卡爾曼濾波預測之水位值會與實測水位值產生明顯之偏差。透過即時演算實測與預測資料之偏差值，可有效偵測出異常波動現象，藉此偵測出海嘯波。

如前所述，鄰近我國之2座海嘯浮標建置之後，全球尚未發生明顯之海嘯事件。本文後續研究將嘗

試分析過往其他海域之海嘯浮標於海嘯事件期間之實測資料，藉此更有效確認卡爾曼濾波技術應用於海嘯波動偵測的效果。

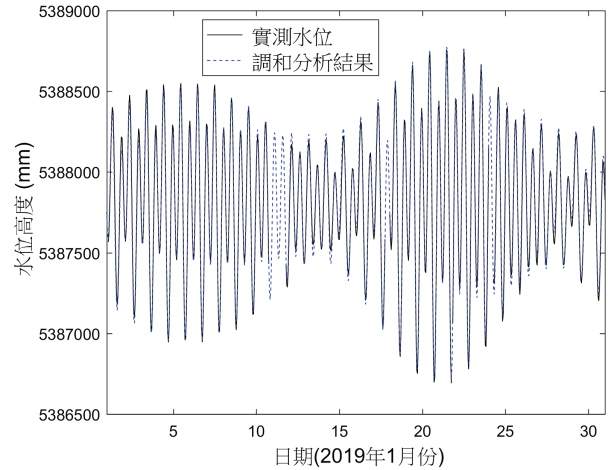


圖3 2019年1月之水位高度實測資料與調和分析結果

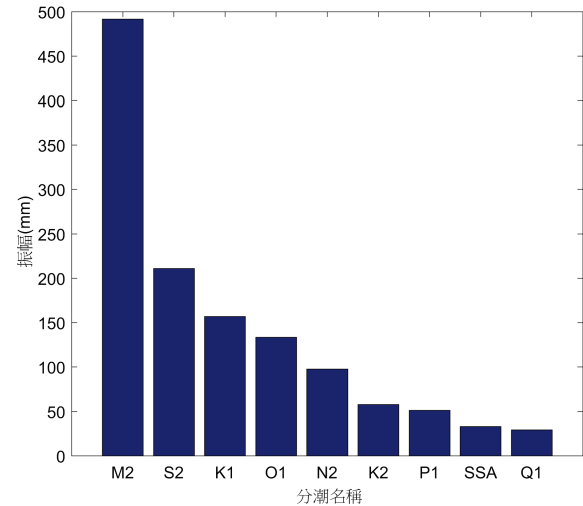


圖4 較大振幅之分潮分布

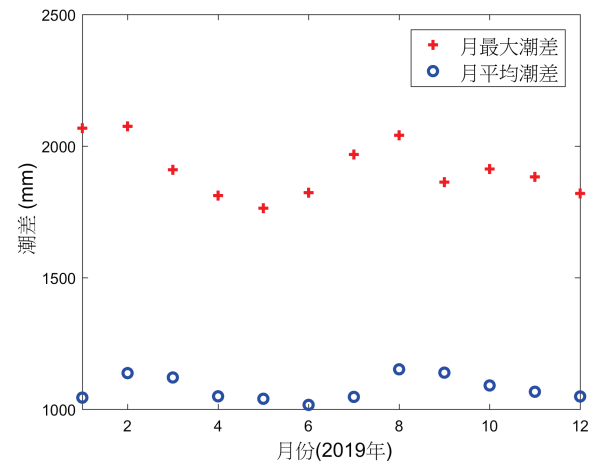


圖5 2019年不同月份之潮差結果

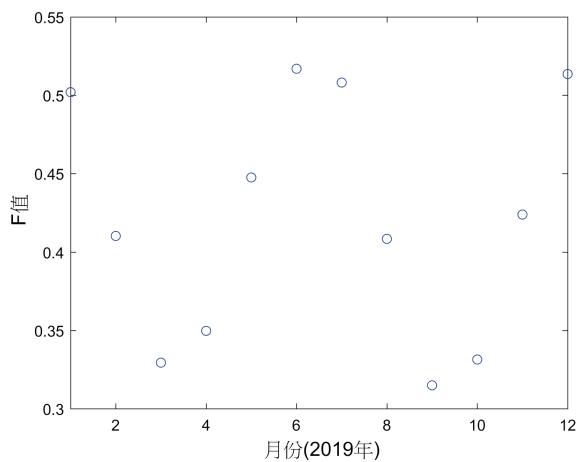


圖6 2019年不同月份之潮型指標值

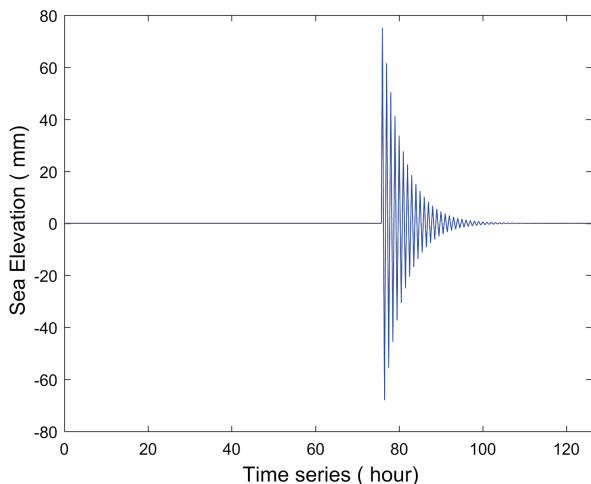


圖7 本研究所模擬之海嘯波高頻水位波動

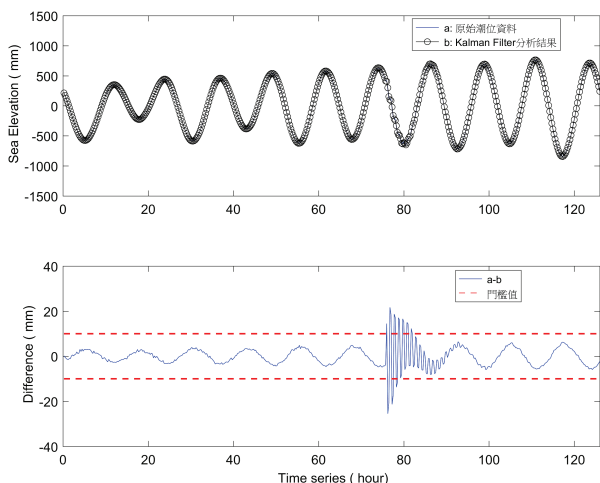


圖8 透過卡爾曼濾波偵測異常水位抬升結果

四、小結

外洋之海水位實測資料是掌握不受陸域地形影響海水位波動特徵之關鍵，可釐清單純天體引力或是極端天氣系統所引發之潮位漲落現象。然而受限於深水條件以及離岸距離遠，外洋海水位觀測站之建置成本以及難度遠較近岸。中央氣象局於外洋所

建置之海嘯浮標除可監測海嘯波動之外，還可以作為研究外洋海水位波動之依據。

本研究透過分析中央氣象局於臺灣東南外海所建置海嘯浮標站測得之外洋水位高度資料確認該海域之單日潮差最大可超過1.5公尺。根據逐月的潮差分析結果亦發現，潮差較高的月份是發生在2月以及8月。該海域主要的分潮為半日潮(M2與S2)與全日潮(K1與O1)，潮型可視為以半日為主之混合潮型。除了振幅較大的全日潮與半日潮波動之外，從全年資料也發現存在較明顯的SSA分潮的長週期波動，其週期約為半年。

本研究亦研究卡爾曼濾波技術應用於即時偵測異常水位波動訊號之可行性。透過自行模擬類似海嘯之波動，並置入實測之外洋水位資料中。透過導入卡爾曼濾波即時演算預測與實測資料之偏差值，可有效偵測出異常波動(如海嘯波)。

現階段臺灣外海所建置之海嘯浮標技術來自於美國。事實上國內亦已開始研發自有之海嘯浮標觀測技術(林等，2015)，期能盡速建置國內技術自主之海嘯及外洋水位監測技術，建立國內技術自主之海嘯預警能量。

謝誌

本文所使用外洋水位觀測資料為交通部氣象局海象測報中心所提供。

參考文獻

- [1]. 林演斌、吳立中、余孟娟、黃清哲，2015，海氣象海嘯資料浮標之發展與應用，中央氣象局104年天氣分析與預報研討會，A6-5，第1-6頁。
- [2]. 吳立中、滕春慈、林燕璋，2019，卡爾曼濾波應用於潮位實測數據分析之初步研究，第41屆海洋工程研討會論文集，臺南。
- [3]. 交通部中央氣象局，2020，潮汐觀測資料年報。
- [4]. Boon, J., 2004, *Secrets of the Tide: Tide And Tidal Current Analysis And Applications, Storm Surges And Sea Level Trends (Marine Science)*: Horwood Publishing Limited.
- [5]. Kalman, R.E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- [6]. Levin, B., Levin, B. W., Nosov, M., 2009, *Physics of Tsunamis*: Springer.
- [7]. Pugh, D. T., 1996, *Tides, surges and mean*

sea-level (reprinted with corrections): John Wiley
& Sons Ltd.

measurement, analysis, interpretation, E.Horwood.

[8]. Tucker, M. J., 1991: Waves in ocean engineering: