

# 海象災防應用技術發展

范揚銘<sup>1</sup> 張恆文<sup>1</sup> 薛炳彰<sup>1</sup> 高家俊<sup>1</sup> 陳進益<sup>2</sup> 滕春慈<sup>2</sup>  
國立成功大學近海水文中心<sup>1</sup> 中央氣象局海象測報中心<sup>2</sup>

## 摘要

臺灣位於颱風容易侵襲的亞熱帶區域之太平洋西岸，惡劣的海象災害如颱風波浪、暴潮溢淹、甚至是海嘯衝擊等，容易造成外洋的船隻觸礁、碰撞甚至傾覆，造成油污溢油，對於住在海岸的居民生命財產也造成威脅，因此海象資訊對於海上航行安全、海岸結構設計等影響極大。此外，國人從事海洋遊憩活動頻繁，民眾從事許多近岸的水上活動和捕魚產業，曾經發生過人員落海失蹤事件，除了完善的硬體設施提供遊客遊憩便利性外，準確的海象資訊是減少意外災害的發生及生命財產的損失之重要一環。

本研究針對不同海象災害開發監測預報技術，包括船級舒適度、海岸長浪、海嘯即時分析等技術，並透過直覺性平台介面展示，用以增加政府執行各項災害性海象事件的預警與防災能力，降低各種災害之損失，並提升中央氣象局在災防環境的服務效能。

關鍵字：臺灣海象災防環境資訊平台、船級舒適度、海岸長浪、海嘯即時分析

## 一、臺灣海象災害概述

多元發展多樣海象資訊即時上傳和分享，將觀測與未來的預測模擬結果即時呈現，方便政府與民眾第一時間瀏覽各種海氣象資訊。為了使氣象資訊公開與查詢便利，中央氣象局全球資訊網致力於提供民眾一般性的氣象資訊，例如觀測、預報、災害、天文等等，颱風警報期間有定期的大氣監測播報，地震災害後也有即時的地震規模資訊；然而，相對於大氣與地震，海象觀測的報導較少，位於西北太平洋、四面環海的臺灣本島，海水溫度、近岸風速與波浪高度都是颱風強度的重要因素，若是能先掌握臺灣周圍的海象狀況，對於預防海象災害將有所助益。

為了提供臺灣海象災防資訊的應用，本研究建構「臺灣海象災防環境資訊平台」即時資訊，除了可供應相關學術單位取得研究所需的海象觀測資料，獲取近岸地區的海象觀測資訊將有助於海洋科學、海洋工程領域的研究，亦可進一步運用數值模式準確預測或預警可能發生的海象災害。

臺灣海象災防環境資訊平台呈現各式海象資訊，包括海洋溢油漂流預報、海難漂流預報、海岸潮線預報、颱風波浪、颱風暴潮、航海風浪流況、航級舒適度、海運區域波候、帆船潮流、海岸長浪海溫、漁業海溫、海嘯即時分析、海平面變化趨勢以及海洋熱含量等，用以災害預防、探討臺灣海象的長期變遷等議題。

## 二、船級舒適度技術發展

船舶航行安全受制於海象條件，不論是海上運輸、海上遊憩活動、漁業活動、海洋資源調查與能源探勘、科學教育、離岸風電工程施工、人員運輸等，均需要在一個安全的環境下進行，才能避免危機之發生。依據英國勞氏驗船協會之「海難回顧」(Casualty Return, Lloyd's Registry of Shipping)統計資料顯示，臺灣海域被列為中度海上風險環境(Moderate Risk Environment)。另根據海巡署之相關統計數據資料(2005-2014)發現，近年臺灣海域商船及漁船在海上發生海難事故每年約有170多件，遭難人數平均每年有650人左右。

由於船隻在出海都必須遵從港口管制，因此在出海端會有相關規定，例如依據「客輪進出商港管制作業程序」，客輪適航條件低於中央氣象局網站藍色公路海象(風力、陣風、浪高)預報之進出港管制基準者，個別依適航條件執行管制。因此每個港口的管制條件均不相同，一旦船隻出了港口，面臨海上氣候變化、海象條件改變時，就必須自行參考相關海上的觀測及預報資訊以作為持續航行與否的依據，因此本研究就船隻航行安全，利用耐浪性及舒適度指標，針對不同航行船隻提出海況警示，有別於只針對海況加以說明之普遍作法。然而，各類型船隻耐浪程度不同，因此本研究透過調查與歸納國內漁船、遊艇、動力小船的耐浪級數，並依據中央氣象局每日作業化波浪與風場預報資料，開發船級舒適度技術。

### (一) 船級舒適度預報作業技術

本研究發展船級舒適度預報產品，旨在提供船隻海上作業時所需之海氣象資訊，並呈現不同船隻在不同浪況下的航行舒適性資訊。船級舒適度預報依據WW3波浪預報資料與WRF大氣預報資料，提供未來72小時之舒適度指標，並展示船級舒適度指標的變化，以供船隻航行參考，本技術分析程序架構如圖1所示。

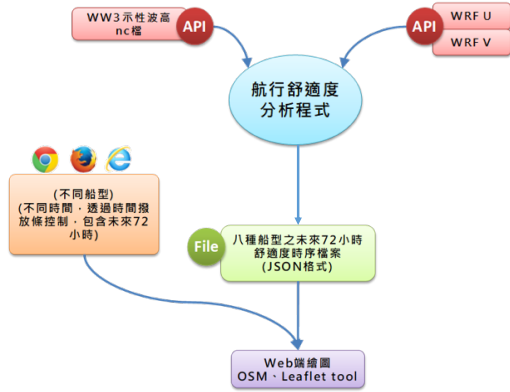


圖1 船級舒適度預報技術分析程序架構

### (二) 船隻海上之航行警示條件

為了了解不同船隻的耐浪程度，本研究蒐集漁船、動力小船、海巡署船艦、遊艇等耐浪性資料，且經由當面訪談後，訂定出不同船隻海上之航行警示條件。其中漁船與海巡署艦艇均屬於工作船隻，均以工作的達成及人員安全為目標，其船員的素質與一般人員不同，故不以舒適度為前提，採用二個燈號。遊艇為遊憩使用，與藍色公路船隻一樣，需考慮人員舒適度的問題，因此航行警示採用三個燈號，不同船隻海上之航行警示條件如表1所示。

### (三) 船級舒適度介面設計及展示

使用者可依據船型種類，在下拉選擇框選定船型，內含八種不同船型、大小之選擇，如圖2所示。在點選其中一種船型後，即可展示海域上的舒適度指標，舒適度指數乃透過分析程式來進行指標的判斷，其根據WW3之「示性波高」與WRF「風速」兩種預報資料源進行分析計算。

圖2右下方顯示警戒顏色分級，採用三種顏色分級，包括透明色為船隻得以航行平穩，黃色表示要注意安全，橘色則代表航行可能會過度搖晃而且有危險。此模組提供未來72小時西北太平洋海域之舒適度指標預報，提供航運人員航線之規畫參考，冀望降低海上意外事故的發生。此外，使用者可於下方撥放條逐步展示船級舒適度指標的變化，以供船隻航行參考。

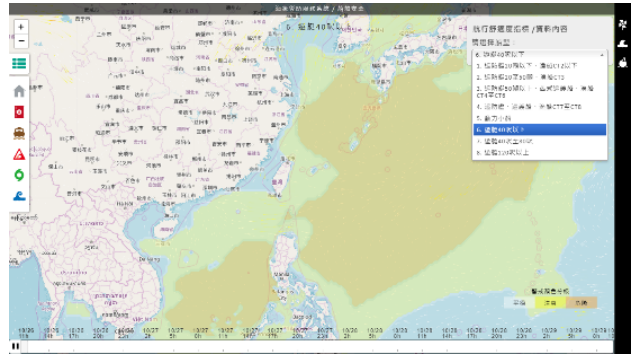


圖2 船級舒適度預報模組二維 contour 指標展示畫面

表 1 不同船隻海上之航行警示條件

種類	船別	顯示燈號		
		● 黃色	○ 透明色	
顯示訊息		作業風險大	可作業	
海巡艦艇、漁船	除汗船、巡防艇20噸以下 (漁船CT2以下)	5級(2m)		
	巡防艇20至60噸 (漁船CT3)	7級(4m)		
	巡防艇60噸以上、舊式巡邏船 (漁船CT4至CT6)	8級(6m)		
	巡防艦、巡邏船 (漁船CT7至CT8)	9級(7m)		
動力小船	CTR、CTS	4級(1m) 陣風6級		
種類	船別	顯示燈號		
		● 橘色	● 黃色	○ 透明色
顯示訊息		警告	注意	舒適
遊艇	40英尺	2.3m	1m	
	80英尺	4.8m	1m	
	120英尺	6.8m	1m	

## 三、海岸長浪技術發展

長浪又稱湧浪，成因主要是海洋中受到強烈的低氣壓影響，波浪傳播距離遠，挾帶的能量通率較大，傳播速度較快，其災害使近岸地區猛烈溯上、海水倒灌，釀成重大災害。長浪多見於夏秋颱風鼎盛時期，特點為來勢猛、速度快、強度大、破壞力強，凡是有颱風影響的海洋沿岸地區均可能發生，且長浪往往在岸邊受到地形淺化效應，容易出現兩公尺以上的浪高。本研究結果將提供長浪預報訊息，以提高海濱遊憩安全。

### (一) 海岸長浪作業技術

本研究為建立長浪警示技術，透過觀測及模擬資料以及長浪警戒標準的判定，可用於判斷危險長浪，系統架構如圖3所示。長浪警戒標準判斷的資料來自中央氣象局的海象資料浮標站，以及預報資料則為中央氣象局作業化WRF風場資料以及WW3波浪模式運算所得之波浪資料。

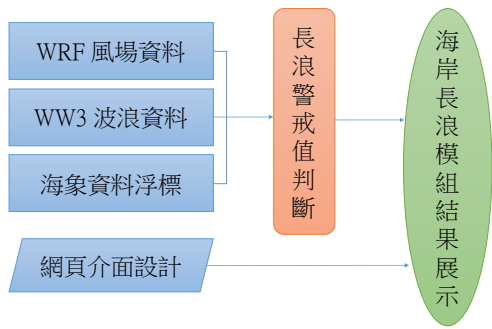


圖 3 海岸長浪模組系統架構示意圖

## (二) 長浪警戒指標

為了探討何種條件下的長浪容易造成危險，本模組選取過去發生的49筆船難事件，海況資料採用歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)的ERA5重分析資料(ERA5 reanalysis dataset)，其空間解析度為0.36度，時間解析度為每小時，並提供全球的波浪模擬結果，其結果亦經過與實測資料驗證，確保一定的可信度。

描述海況的參數有很多種類，包括波高、週期、波向、尖銳度等等，各項參數之間有一定的關聯性，例如尖銳度可由波高及週期求得，此外透過風湧浪分離便能分離各參數中風浪及湧浪的成分。為了探討各項參數對船難海況的重要性以及顯著性，本模組嘗試了各種參數組合。一般認為波高及週期為最主要需考慮的參數，然而光是只有波高和週期並不能夠完整表現出危險海況的特性(Niclasen et al., 2010)。前人研究建議考慮之參數另包括尖銳度、波浪方向分布、風湧浪頻率差、風湧浪角度差等等，Savina et al. (2003)認為波浪尖銳度必須與波高一同考慮才有作為指標的意義，因此提出尖銳指標(steeptness index, SI)，該指標可透過波高及尖銳度求得，其式子如下：

$$SI = \frac{\xi}{0.05} \times \frac{H_{m0}}{H_0} \quad (3-1)$$

式中 $\xi$ 是波浪尖銳度( $\xi = 2\pi H_{m0}/gT^2$ )， $H_{m0}$ 是示性波高， $H_0 = 4 \text{ m}$ 。

本模組根據上述資料分析湧浪成分，結果顯示湧浪波高主要落於0.5-1米，湧浪平均週期主要落在5-7秒(約57%)。考慮並分析不同之海況參數，其中又以風湧浪波向夾角(dD)分別與湧浪平均週期( $T_{m02s}$ )及風湧浪週期差(dT)之分布最為集中，如圖4，因此本模組採用上述參數之聯合機率，透過雙變數常態分佈(Multivariate Normal Distribution)計算其機率，雙變數常態分佈的機率密度函數可以下式表示：

$$y = f(x, \mu, \Sigma) = \frac{1}{\sqrt{|\Sigma|(2\pi)^2}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)\Sigma^{-1}(x-\mu)} \quad (3-2)$$

其中 $\mu$ 為平均向量， $\Sigma$ 為共變異數矩陣。計算60%機率涵蓋的分布範圍(圖4綠線)可得各別參數之上下界。

根據計算結果本模組選用了湧浪平均週期、風湧浪平均週期差及風湧浪波向差三個參數，定義當湧浪平均週期大於4.3秒、風湧浪平均週期差小於4.8秒且風湧浪波向差小於77.6度時當作長浪警戒值。意即當海況符合三項條件時則可視為容易發生危險之海況。

近岸時有海難事件發生，但在事件發生位置有海象監測站的卻很少，本模組蒐集2018年船難事件進行警戒值之驗證，三起事件之湧浪平均週期分別為7、8、6秒，風湧浪週期差分別為3.2、4.4、6秒，風湧浪角度差則分別為9.7、29.4、43.6度，結果顯示驗證資料中僅有一起事件其風湧浪週期差不符合前述之標準，本案團隊後續將蒐集更多事件以加強驗證。

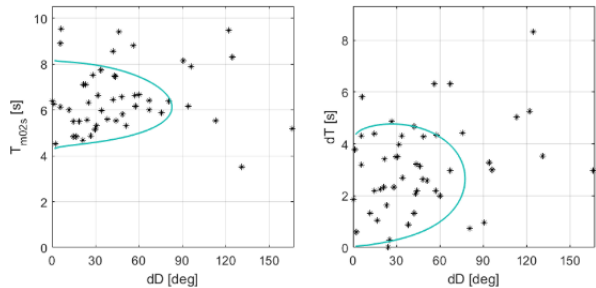


圖 4 船難事件時風湧浪波向差與湧浪尖峰週期(左)及風湧浪週期差(右)散佈圖，綠線範圍為60%機率範圍

## 四、海嘯即時分析技術發展

由於海嘯形成係因海水受到鉛直方向的強烈擾動，海底地震引發者較為常見，也可能因海底火山爆發或山崩所引起。本技術主要是分析既有潮位站觀測水位資料，以瞭解異常水位變化情況。因此，本技術應針對可能發生異常水位之災害狀況進行即時監測(例如：海嘯波、氣象海嘯或颱風暴潮等)，目前本研究先以海嘯波為研究對象進行適用性分析與探討，將可即時提供海嘯等異常海水位監測功能及提供國家防災單位迅速完整的海水位監測資訊。

### (一) 海嘯即時分析作業技術

「海嘯即時分析作業技術」主要為利用既有的潮位站觀測資料，透過訊號分析萃取觀測訊號中海嘯波之資訊，建立估算各波次海嘯抵達時間、結束時間與海嘯波高之程序，並建構海嘯介面功能，俾利未來即時警示與展示所用。訊號分析方法如濾波法、潮汐模式分析及調和分析法之，本研究評估並提出較適合的即時水位分析方法。

發展海嘯即時分析模組其架構系統架構如圖5所示，先即時取得潮位站觀測資料，再藉由本工作評估較適合的海嘯波分析方式即時分析水位，並獲



得海嘯波相關訊號，經由自動警示門檻判斷，最後於即時展示介面上顯示海嘯警示燈號。

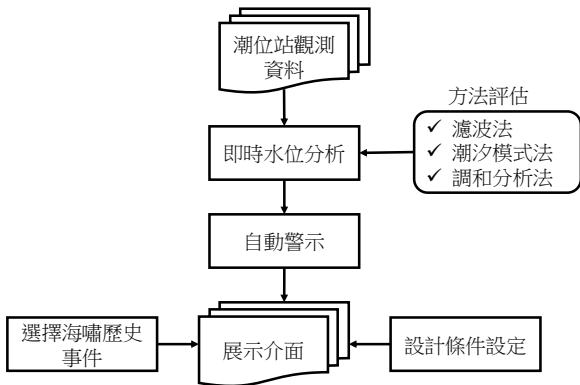


圖5 海嘯即時分析模組架構與發展示意圖

## (二) 即時分析海嘯水位技術

本研究採用「濾波法」、「潮汐模式分析法」及「調和分析法」等3種方式，針對潮位站觀測資料進行海嘯波訊號分析，透過分析國內既有潮位觀測站資料方式，達即時得知海嘯波之相關資訊，俾利做為未來海嘯防災之重要參考依據。各分析方法概述如后：

### 1. 濾波法

時間解析度15秒之濾波分析結果如圖6，其結果顯示低通濾波分析結果與高通濾波和帶通濾波分析結果差異較大；高通濾波法則會有高頻雜訊產生，導致波高無法明確辨識；帶通濾波法則仍可有效萃取出較完整的海嘯波訊號。綜上可知，3種濾波方式雖均能分析出海嘯波之訊號，惟運用低通濾波法與高通濾波法分析觀測水位資料時，除萃取出海嘯波訊號外，仍有包括其他頻率訊號之可能性(例如：低通濾波法可能無法完全扣除其它長波訊號；而高通濾波可能萃取出更短週期水位訊號等)。為避免此種情況發生，導致海嘯波訊號誤判，因此本研究建議以帶通濾波做為分析海嘯波之濾波方式。

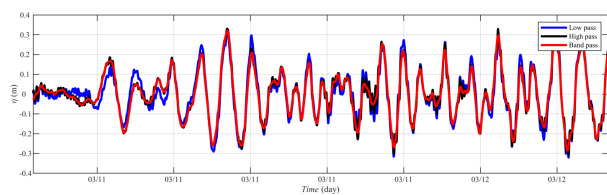


圖6 濾波法比較圖(觀測資料解析度：15秒)

然上述分析方式均是以潮位站「歷史」觀測水位資料進行濾波分析，以獲得過去海嘯波分布情況，並無「即時分析」海嘯波之效能。因此，本研究進一步以帶通濾波法配合固定長度的歷史資料之方式，進行即時分析潮位站水位訊號作業，俾利瞭解濾波法於即時分析上之適用性。濾波法運用於即時水位分析與歷史資料分析之比較結果，其結果顯示即時濾波時，於即時水位處會有異常值發生，此

現象可能會導致即時海嘯波分析誤判之情況，如圖7。除以固定長度方式分析即時水位外，亦同時修正前時刻分析資料，惟至少須3小時以上歷史資料才能修正水位訊號。由此可知，帶通濾波法運用於海嘯波即時分析上有所困難。

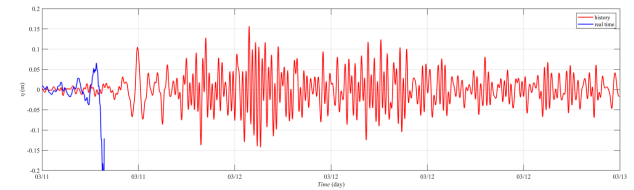


圖7 濾波法運用於即時分析觀測資料與歷史資料分析之比較結果

### 2. 潮汐模式分析法

本研究採NAO99b(全球潮汐預測模式)模擬潮汐水位變動情形，NAO99b運用於越接近深海地區會因地形效應影響較少，進而提高推估水位之準確度，惟國內部分潮位站較靠近岸，甚至位於港灣之內(例如：馬公潮位站)，水位訊號受地形或建物(港口、防波堤或港池振盪等)影響可能較大，導致實測資料與推估資料會有所差異。鑒此，運用潮汐模式分析法時，須先針對各潮位站觀測資料與潮汐模式推估資料進行調校與率定，藉以提昇模式模擬各測站潮汐之準確性，進一步估算實測值與推估值差異，以做為萃取海嘯波訊號資訊之重要參考依據。

茲以帶通濾波分析海嘯波成果為基準，進行潮汐模式分析法結果比較，如圖8所示。結果顯示，透過計算觀測資料與潮汐模式預測值之差值，可辨識水位異動訊號(例如：海嘯波)，且水位變動高度與發生時間均與濾波分析結果相似。由此可知，透過潮汐模式分析方式確實可以擷取出海嘯波發生時間與水位高度資訊，且因潮汐模式可事先推算未來潮汐水位變動情況，因此可與觀測資料同步計算水位差值，藉以達到即時分析之目的。然由分析結果可知，潮汐模式推算水位變化中，部分區間之相位與振幅值仍與實測資料有較大差異，導致差值有不穩定之趨勢發生，此概為NAO99b模擬之水位變化與臺灣近岸潮位變化之誤差所導致。

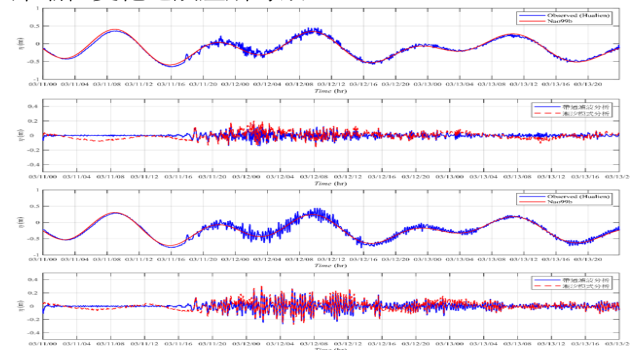


圖8 帶通濾波分析與潮汐模式分析比較結果(日本311地震事件, 2011)

### 3.調和分析法

調和分析法係以傅立葉級數來表示潮汐特性，透過分析各潮位站歷史觀測資料，可有效擬合並估算出各測站之潮位變化行為。此方法針對各站潮汐變動模擬應有較佳之精度，惟僅能針對各測站點位進行推算，且須要長期的觀測資料（至少一年以上）。當潮汐資料長度不足或資料品質不佳時，以調和分析法所獲得之分潮特性則會有相當的誤差。透過調和分析法求出各潮位站適合之傅立葉級數後，即可即時模擬各測站潮汐之變動行為。藉由即時計算模擬值與實測值之差值，可進一步判識海嘯波訊號分布。此分析方式與潮汐模式分析法相似，主要差異在於模擬潮汐方法的不同。透過各潮位站歷史資料之調和分析或許可得到更符合當地潮汐變化之模擬值，進一步提昇海嘯波分析之準確度。

本文以後壁湖觀測站為例，針對其觀測資料做為調和分析法之分析案例。運用帶通濾波法與調和分析法，分析恆春地震事件海嘯波之比較結果，如圖9；研究顯示調和分析除可即時預測天文潮水位資料，並可藉由計算實測與推估天文潮之資料差值，獲得異常水位(例如：海嘯波或暴潮)發生時間與異常水位高度。進一步分析兩種即時分析方法之均方根誤差，NAO99b推算之異常水位與濾波所得海嘯波結果之均方根誤差約9%；而由調和分析推算結果之均方根誤差約5%。依目前分析結果(後壁湖測站)可知，調和分析是針對各觀測站歷史資料進行率定，其推算結果會更符合臺灣近岸海域天文潮水位變化，使其差值會較NAO99b推算結果更為穩定。

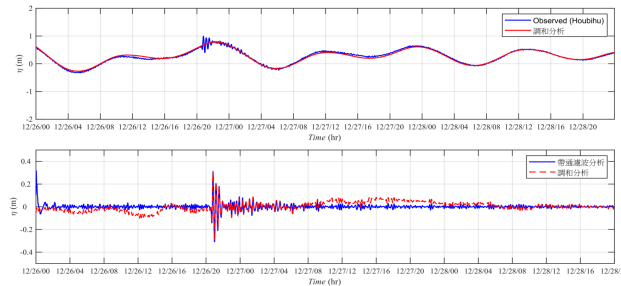


圖9 帶通濾波分析與調和分析比較結果 (恆春地震事件，2006)

潮汐模式與調和分析均方根誤差比較結果如圖10，於比較基準同為帶通濾波分析結果時，其各測站調和分析均方根誤差大多小於潮汐模式均方根誤差，因此透過各測站調和分析所得天文潮水位變化，應較能符合臺灣各潮位站天文潮水位變化情況。然於部分測站有呈現調和分析均方根誤差大於潮汐模式之情況，其可能因素概如下所示：

目前採用1年期往昔資料進行調和分析，並預測下一年度天文潮水位變化情形。然有部分測站觀測資料缺漏較為嚴重，雖已透過調和分析方式進行資料補遺，惟缺漏過多時，仍有預測水位趨勢偏移之可能性發生。

目前是採用60個分潮進行調和分析，惟有部分測站受近岸地形影響較大(例如：港內、海岸結構物)，因而有部分長頻訊號無法擬合完善。然此部分仍須更多觀測資料進行測試與分析才可能改善。

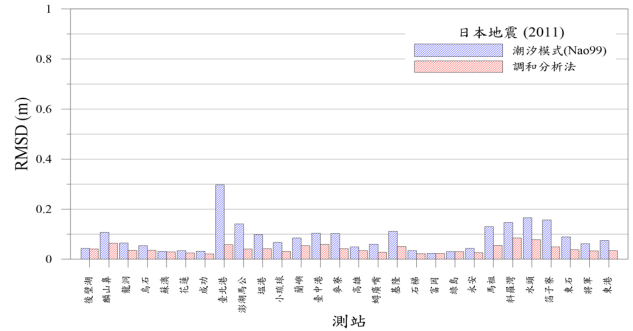


圖10 潮汐模式與調和分析均方根誤差比較結果 (日本地震事件，2011)

### 4.即時分析方法比較與建議

上述3種分析方法，應均可由潮位觀測資料中有效離散出海嘯波訊號，此三種方法之比較如表2。濾波法可分析歷史觀測資料，求得海嘯波分布情況，且為減少雜訊影響，建議以「帶通濾波」法進行海嘯波訊號萃取方法，惟本案團隊目前採用的濾波法運用即時分析水位上有所困難；「潮位模式分析」與「調和分析法」均可達到即時分析異常水位(例如：海嘯波或暴潮)之需求，惟「調和分析法」用於分析臺灣近岸海域天文潮水位變化會更為穩定。然，目前即時分析方法雖可即時得到水位異常變化之訊號，惟此差值僅扣除天文潮水位變動訊號，並無法濾除其它因素導致水位變動之訊號(例如：暴潮)。因此，未來若要純粹做為海嘯即時警報之方式，仍必須配合地震警報進行海嘯通報之前提。

表 2 海嘯即時分析方法比較

方法	說明
濾波法	「帶通濾波法」為較適合分析海嘯波之濾波方法。本研究採用之濾波法僅能針對歷史觀測資料進行分析，並不適用於海嘯即時分析作業。
潮汐模式分析 (NAO99b)	可即時推算各潮位站天文潮資訊，並透過計算觀測資料與天文潮水位差值，達即時分析異常水位(例如：海嘯波或暴潮)之需求。 相位與實測資料有些微差異，導致差值分布不穩定。
調和分析法	透過調和分析法，可分析各站天文潮水位變化，並可推估未來的天文潮水位變化情況，計算觀測資料與天文潮水位差值，亦可即時分析各觀測站異常水位訊號。 天文潮推算結果會更符合臺灣近岸海域天文潮水位變化情況。

#### (三) 海嘯即時分析展示介面

此項工作主要為配合「海象服務平台」設計海嘯即時分析功能測試工具。主要是透過虛擬的合成水位訊號，確認海嘯即時分析功能之運作是否正常(包含海嘯波高、開始時間及結束時間等)。模擬海嘯事件侵襲臺灣時，海嘯即時分析模組是否能達到即

時分析、展示及警示之成效，以利未來做為海嘯預警系統建置之參酌，展示方式如圖11所示。

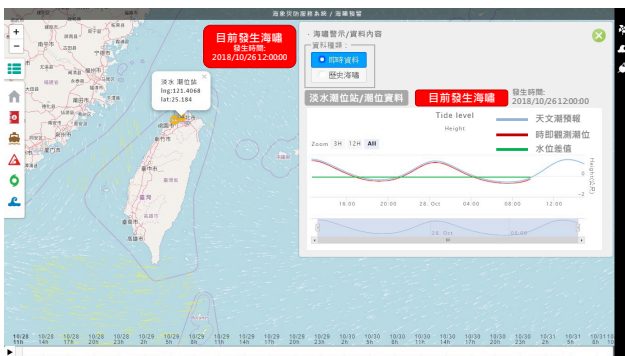


圖 11 海嘯即時分析展示介面

為了建置即時分析水位方法以達海嘯即時分析之目的，透過濾波法、潮汐模式分析法及調和分析法之比較分析，可知調和分析法可有效達到即時分析水位之目的，且其相較於潮汐模式分析法，更能反應臺灣近岸海域天文潮變化情況。

## 五、結論與建議

本研究針對不同海象災害開發監測預報技術，包括船級舒適度、海岸長浪、海嘯即時分析等技術，並透過直覺性平台介面展示，結論說明如下：

1. 由於礙於漁船耐浪特性資料較為缺乏，參考海巡署艦艇噸位數為基準之安全指標來訂定漁船之安全指標，共分為5級，其中CT2以下之耐浪級數為5級風浪，CT3為7級風浪，CT4至CT6為8級，CT7以上為9級，動力小船部分則以6級陣風為耐浪條件。資訊系統顯示之訊息分別為「作業風險大」及「可作業」。遊艇部分，安全指標分為3個等級，分別為40英尺為2.3 m，80

英尺為4.8 m，120英尺為6.8 m，遊艇舒適度則訂為1m。而藍色公路使用之交通船應可比照遊艇的規則使用。資訊系統顯示之訊息分別為「警告」、「注意」及「舒適」。

2. 在長浪警戒標準研究結果顯示湧浪平均週期、風浪湧浪頻率差以及風浪湧浪角度差最為相關，亦即當海況符合三項條件時則可視為容易發生危險之海況，此結果經過實際資料驗證其合理性。
3. 運用濾波法、潮汐模式分析法及調和分析法評估海嘯即時分析之效能，並進行各方法適用性探討與比較分析。結果顯示以調和分析法為基礎預測天文潮水位變化，再藉由水位觀測資料介接方式，建構海嘯即時分析模組。

本研究「海象災防應用技術系統」的建置，除已建立航海風浪流況模組之船級舒適度預報與海運區域波候、海岸長浪海溫模組之長浪警示、海嘯即時分析模組等作業技術，並改進海洋溢油漂流預報模組與颱風海象模組之颱風波浪早期預估作業技術，提供一般民眾、學術研究、災防機關以及內部氣象機關即時的海氣象觀測資訊服務。

## 七、參考文獻

1. Niclasen, B.A., Simonsen, K. and Magnusson, A.K., 2010. Wave forecasts and small-vessel safety: A review of operational warning parameters. *Marine Structures*, 23(1): 1-21.
2. Savina H, Lefevre JM, Josse P, Dandin P., 2003. Definition of warning criteria. In: MAXWAVE final meeting. Geneva, Switzerland.