

海洋異常波浪機率預警之校驗

陳盈智¹ 林芳如² 董東璟¹

國立成功大學 水利及海洋工程學系¹ 交通部中央氣象局 海象測報中心²

摘要

海洋中的「異常波浪」與海岸邊的「瘋狗浪」發生機制不同，但相同的是它們都帶來了潛在危害。中央氣象局為達強化防災海象科技研發、促進海象科技民生應用之目標，建立發布突發性危險海象特報之作業能力，使用序率的手段發展了海洋異常波浪與海岸瘋狗浪預警系統，針對台灣周遭海域海洋異常波浪發生機率與台灣東北角海岸瘋狗浪發生機率進行預測，並令其可以作業化運作。兩套預警系統測試運作至今已達一年以上，本研究分別採用現場實測資料、因海象造成之船難事件、實際瘋狗浪事件等資料來進行兩系統之校驗，分別從事「正向驗證」和「反向驗證」。海岸瘋狗浪預警系統使用歷史長浪警戒資訊與光學瘋狗浪影像案例進行正反向驗證。驗證結果顯示，長浪警戒資訊發布時與海岸瘋狗浪預警系統發布高機率警報時刻相當吻合，但也發現在長浪警戒時間外仍有瘋狗浪高機率預警發生，顯示瘋狗浪發生原因不只有長浪引致，還有其他因素；從瘋狗浪影像案例檢視發布瘋狗浪高機率預警之準確性，預警的正確率達8成以上，顯示瘋狗浪預警系統具有相當高之可信度。在海洋異常波浪預警系統的驗證使用過去四件較顯著之船難事件與東吉島波浪站資料進行正反向驗證，結果發現這四件船難事件發生時，波譜能量在頻率域與方向上都有聚集的現象，其中兩件船難事件為過去2016-2018異常波浪發生機率之百分之72和98分位數；東吉島連續資料進行反向驗證，加權誤差為15%-22%，本研究認為這兩項結果皆顯示海洋異常波浪機率預警系統具有一定之準確性。

關鍵字：異常波浪、瘋狗浪、機率預測

一、前言

近十餘年來，臺灣周遭水域每年發生多件海洋異常波浪與海岸瘋狗浪(Oceanic and coastal freak wave)事件，導致船翻、人落海等事件，每年因此危險海象而造成之死傷人數達近百人，造成民眾生命損失並投資巨大救災資源。民國102年11月，新北市鼻頭地質步道發生重大瘋狗浪事件，遭遇海浪襲擊落海16人；民國101年8月，航行於臺中與澎湖間的客貨兩用輪「海洋拉拉號」在彰化外海遭遇突然強浪而破損，300乘客幸運獲救，此類突發大浪襲人船事件不論在海岸邊或大洋裡時常發生，且在事發前均未能給予適當警告。此類事件之特色為其瞬變性與不可預測性，不像潮汐為週期性的變化，風浪也可以數學解析之，瘋狗浪事件發生原因很多，截至目前為止，世界各國仍無法確定地預測瘋狗浪何時何地會發生。有鑑於民眾休閒活動日益向海靠近，考量民眾海域活動的安全性，以及未來政府持續推動藍色公路和兩岸間船舶往來更趨頻繁，根據最新觀測、模擬與分析技術建立前述危險海象預警系

統，提供適時的警告資訊，使能有所防範以降低傷害機率為中央氣象局重要工作之一。

中央氣象局已發展高解析度的作業化波浪預報系統，目前這些作業化的波浪模式對於大尺度、長時間的預測甚至颱風波浪的預測均有相當高的準確性，但對於突然發生的危險海象仍無法提前預知，原因是海象變化具有高度的不確定性，前述定率式(deterministic)的預測顯然不足，序率式(stochastic)的機率預測理論是另外一種替代的方法。

中央氣象局近期的已逐步進行瞬變海象之探討與雛型預警系統之建置(中央氣象局，2015)，並於後續的研究中提升為機率預警，完成「海洋異常波浪機率預警系統」與「海岸瘋狗浪機率預警系統」(中央氣象局，2017)，對台灣海峽周遭海域突發的異常波浪和東北角海岸瘋狗的浪發生機率進行預測，兩系統初步驗證顯示系統有相當程度之可信度，兩機率預警系統也自2018年開始上線測試。本計畫將使用現有之觀測資料或是過去災難事件，對兩預警系統預測能力做進一步評估。從正向與反向的角度分別進行系統驗證。所謂「正向驗證」是指探討實際發生事件時，預警系統是否預測準確？而「反向驗證」則是探討預警系統預測高發生機率時，實際是

否有發生?本節說明海洋異常波浪機率預警系統之正向驗證結果。

二、機率預警系統建置理論

2-1 海洋異常波浪機率預警系統

實際海洋中的波浪多屬於非線性，且大波的波高會因非線性作用更放大，導致個別波的波高分布更偏離雷禮分布(Goda, 2010)。本研究彙整以非線性波理論推導異常波浪發生機率之推導，其中估算理論以東吉島波浪站連續波浪資料進行率定，配合中央氣象局之波浪預報模式輸出資料，進行海洋異常波浪發生機率估算。

假設波場具有定常性(stationary)及遍歷性(ergodicity)，且波譜屬於窄譜，波高 H' 可以被視為是兩倍的振幅，波高的機率密度函數如下

$$p(H') = \frac{1}{4} H' e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} A_H(H')] \quad (1)$$

$$A_H(H') = \frac{1}{384} (H'^4 - 32H'^2 + 128) \quad (2)$$

接著，波高的超越機率，即超越某高度的發生機率，可以藉由積分機率密度函數從該高度到無限大而得，假設波浪數 N 非常大時，最大波高的超越機率亦可藉由對最大波高的機率密度函數積分而得

$$P_m(H_{max}) = 1 - \exp\{-Ne^{-(\frac{H_{max}^2}{8})} [1 + \kappa_{40} B_H(H_{max})]\} \quad (3)$$

$$B_H(H') = \frac{1}{384} H'^2 (H'^2 - 16) \quad (4)$$

異常波浪定義，波高大於兩倍示性波高的波浪，且示性波高可被視為 4 倍水位的標準差，因此異常波浪的定義可以被更改成波高大於8倍水位標準差的波浪。因此式無因次化的 $H_{max} = 8$ ，可以得知異常波浪的發生機率為波浪的個數(N)和峰度係數(μ_4)的函數。

$$P_{freak} = 1 - \exp[-N \cdot e^{\beta} (1 + 8\kappa_{40})] \quad (5)$$

其中 β 為一常數，相當於-8。由此可知，當一群波浪的個數及水位之峰度已知時，便可得知該水位之異常波浪發生機率。

2-2 海岸瘋狗浪預警系統機率

而海岸瘋狗浪的預警系統採用資料探勘的方式進行，由於瘋狗浪在學術上並無明確的定義，是媒體用於描述海岸邊突然出現的浪花，足以將人襲擊

落海，因此本研究將使用過去發生的瘋狗浪事件作為學習對象，使用資料探看的演算法反覆學習訓練，以找到瘋狗浪發生時的條件與發生機率。

本研究採用的演算法有辨識群體差異性的群集分析法和適用於處理非線性問題的類神經網路。群集分析方法是屬於分類型態的演算法，藉由比較群體之間發生條件的差異，可進行群體辨識。因此初代海岸狗浪預警系統僅為定率之結果，輸出生瘋狗浪發生風險之高或低。而後本研究提出一新的概念，先計算出每單因子會發生瘋狗浪事件的危險門檻條件 X_m 及安全條件 X_n ，接著計算輸入資料與安全門檻或危險門檻的距離，即可得到瘋狗浪發生的機率，計算會發生瘋狗浪事件的機率前，須先計算每一因子條件，會發生事故的機率；例如計算因子條件 $C1$ 下， X_{i1} 會發生落海事故的機率 $P(X_{i1})$ ，其機率計算方式如式6所示。

$$P(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{x_i - x_{n_i}}{x_{m_i} - x_{n_i}} \right) & x_i > x_{n_i} \\ x_i = x_{m_i} & x_i > x_{m_i} \end{cases} \quad (6)$$

在計算瘋狗浪事件發生機率時，需考量所有因子的以影響，機率計算方法則是將各因子的機率值進行加權平均，瘋狗浪的機率 $P(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik})$ 可以式7表示

$$p(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) = \frac{\sum_{j=1}^k w_j p(x_{i_j})}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (7)$$

由式7可將各因子對發生海岸瘋狗浪的影響加總，計算發生瘋狗浪事件的機率值。

類神經網路為仿照人類大腦組織及運作方式的資訊處理技術，其優點在於不需瞭解系統的數學模型為何，直接以神經網路取代系統模型，就能獲得輸入與輸出之間的關係。為使類神經網路正確的運作，必須透過訓練(training)的方式，讓類神經網路反覆的學習，直到每個輸入都能對應到正確的輸出，因此必須建立訓練資料做為學習過程中的參考。神經元是類神經網路最基本的組成單位如圖1所示，輸入值 X 與權重值 W 輸入至神經元後，神經元內部即開始計算，計算公式如式8所示，計算結果 Y 為神經元之輸出值。

$$Y_j = f(net) = f(\sum_i W_{ij} X_i - \theta_j) \quad (8)$$

本研究選用之類神經網路為Rumelhart et al. (1986) 提出的倒傳遞類神經網路，具有監督式學習的特性，即學習網路中有輸入值及學習目標值。當開始學習時，網路將建立輸出值與學習目標值間的關聯性，可視為一種輸入與輸出之間的映射過程，

利用網路權重(weights)與門限值(bias)來表示其關係的強弱。本研究使用Matlab 程式來建置倒傳遞類神經網路，模式建置工作包含了學習演算法、隱藏層神經元數、隱藏層數、學習速率以及隱藏層與輸出層轉化函數等6 項。詳細的演算法訓練過程與預警系統使用資料可參考(中央氣象局，2017)。

三、海洋異常波浪機率預警系統驗證

3.1 正向驗證

在正向驗證部分，本研究使用在台灣周遭海域實際發生之船難事件時，檢視預警系統是否計算出較高發生機率。挑選四件較大較顯著的船難事件，執行數值波浪預測模式，取得事件發生時刻之方向波譜，提供海洋異常波浪機率預測系統估算發生機率。本研究挑選的案例分別為：2010年11月9日約晚間7點在鵝鑾鼻東南方187海哩(21N, 119.49E)的礦砂輪翻船事件，該事件造成25人落海，22人傷亡的意外；案例二是發生在2014年1月2日下午5點發生在野柳附近海域(25.1266N, 121.4128E)之漁船遭到突然大浪襲擊，造成5人落海之意外；案例三是發生在2014年2月14日約下午1點，地點位於花蓮環保公園外海(24.0822N, 121.3881E)，一艘棧板遭遇到海上突發大浪，造成3人落海1人傷亡的意外。案例四則是發生在2009年10月4日下午約5:40，地點位於澎湖查某嶼東北10海哩(23.32N, 119.544N)，一艘4000噸貨輪突然遭遇巨浪翻覆，造成19人落海，9人失蹤的意外事件。本研究模擬事件發生前後3天之海況變化，並計算海洋異常波浪發生機率，檢視事件發生當時異常波浪發生機率與波浪非線性程度，以了解海洋異常波浪發生機率預警系統在過去船難事件其表現情況。計算結果如表1。

綜合以上四件船難事件分析結果發現，第一與第二案例發生時，海洋異常波浪發生機率預警系統計算所得的發生機率分別約為29%和29.5%，此值對比過去海洋異常波浪機率預警系統長期(2016-2018年)分析的結果僅是百分之35位數，理論上是屬於低度風險量值，但卻有此兩起船難事件發生。至於上述第三件案例發生時，分析結果顯示船難海域的波浪能量在頻率域與方向域皆有顯著聚集的情形，第四件案例則發生於颱風期間，波浪能量也有集中之趨勢，此兩案例異常波浪發生機率計算結果分別達35%和48.5%，是過去預警系統長期計算結果的百分之72和98分位數，是屬於相對高的發生機率。綜合上述分析結果，四件案例有兩件船難發生時，異常波浪有高度發生機率，另兩件則無，本研究認為尚難以有所定論。

表1 船難事件發生時海況與異常波浪發生機率

案例	時間	示性波高[m]	Qp	σ_{θ}	異常波浪發生機率
1	2010/11/9 19:00	1.2	2.85	0.7	29%
2	2014/1/2 17:00	0.5	4.97	1.2	29.5%
3	2014/2/14 13:00	2.1	5.2	2.3	35%
4	2009/10/4 17:40	3.9	5.8	2.2	48.5%

3.2 反向驗證

本節以東吉島連續波浪觀測資料來驗證海洋異常波浪機率預警系統計算所得的發生機率是否合理，此即本研究定義的反向驗證。針對此驗證，本研究參考中央氣象局降雨機率預報驗證方式來進行。此驗證的方法是從過去的預測中，將相同預測機率的事件進行歸類，並比較在此預測機率下，實際發生的機率為何，若實際發生的機率與預測的發生機率相同，則稱為最佳預測，例如在預測發生機率為20%的事件當中，實際發生的次數有20%，即為最佳預測。

海洋異常波浪發生機率預測模式於2015年8月開始在氣象局測試運作，至2018年8月為止共約有1000天運作資料。海洋異常波浪發生機率計算過程中使用的波浪數(N)是設定某船隻在此海域停留90分鐘所會遭遇到的波浪數，在一般風浪情況下，波浪之平均週期約為5~6秒，90分鐘內可觀測到之波浪數約為1000個波，亦即N設定為1000。海洋異常波浪發生機率計算結果主要介於15-45%間，本文以5%作為分組間距，分別計算東吉島波浪站之波浪資料中異常波浪實際發生之機率，則機率預測的誤差可以相對誤差的概念計算，驗證結果如表2所示，結果顯示在低發生機率的預測皆非常接近最佳預測，誤差較低，而在預測機率較大的情況時，驗證結果也有較大偏差，但其原因之一是由於過去三年多裡，系統運作出現機率較大的情形較為少見，雖然驗證過程使用之樣本數已逐漸累積，但仍嫌不足，此會造成在統計上的不確定性，仍需要待資料累積以解決這個問題。本文若改以樣本數作為加權因子來計算加權平均誤差，如表2所示，結果顯示未加權之預測誤差介於13% - 29%之間，

表2 異常波浪發生機率預測結果誤差分析

機率區間	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	加權
	-	-	-	-	-	-	平均
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	誤差
分析場	15.6%	18.4%	24.1%	22.9%	26%	26%	17.2%
24小時	14.6%	25.7%	28.5%	27.5%	22.1%	29.4%	15.9%
36小時	13.5%	18.1%	21.6%	22.2%	26.6%	24.4%	22.9%
48小時	18.7%	16.6%	20%	24%	18.3%	22.2%	20.1%

四、海岸瘋狗浪機率預警系統驗證

4.1 正向驗證

長浪與瘋狗浪之間並無絕對必然的關係，然而長浪為引發瘋狗浪的原因之一，因此長浪預警資訊可用於瘋狗浪預警系統運作成效檢驗，作為預警系統的正向驗證。中央氣象局發布之長浪訊息共有三處，分別在天氣概況或一週天氣預報中，以及長浪即時訊息，天氣概況與一周天氣預報產品發布頻率為每日四次，若有長浪發生之機率，會針對該海域提出長浪警示資訊；一周天氣發布頻率與天氣概況相同，產品內容包含未來一周各地每日天氣概況，且包含海象概況預報，若某些海域有發生長浪的可能性，會以文字呈現於預報內容；長浪即時訊息與前述兩項產品不同，僅有現場觀測到長浪(示性波高大於1.5米，平均週期大於8秒)現象時，才會發布。整2018年1-9月期間長浪發布的情形初步比較可發現3種長浪警戒資訊發布時間相當一致，整體主要長浪預警時間在7個時段，分別為3/7、3/18、3/22-23、3/27-4/5、5/22、9/3-4和9/25-10/1，本研究將針對此7個時間進行比較驗證。瘋狗浪機率預警系統與長浪警戒資訊比較結果如圖1，長浪警戒資訊分別以藍色(天氣概況)、綠色(一周天氣概況)和橘色(長浪即時訊息)表示，主觀上判斷瘋狗浪機率預警系統高風險預警與長浪警戒訊息比對結果相當接近，然在長浪警戒時間外，仍有許多瘋狗浪高機率預警，顯示並非只有在長浪期間才有瘋狗浪。

4.2 反向驗證

過去瘋狗浪案例資料僅有報章雜誌報導之瘋狗浪案例，因此必須要有人落海，才能確定真實有瘋狗浪案例發生，然而無法掌握人的行為，因此反向驗證難以根據真實落海事件進行驗證。反向驗證將著重在從預警系統發布高風險警報，可能有瘋狗浪發生時，實際上是否有瘋狗浪發生來進行系統之驗證

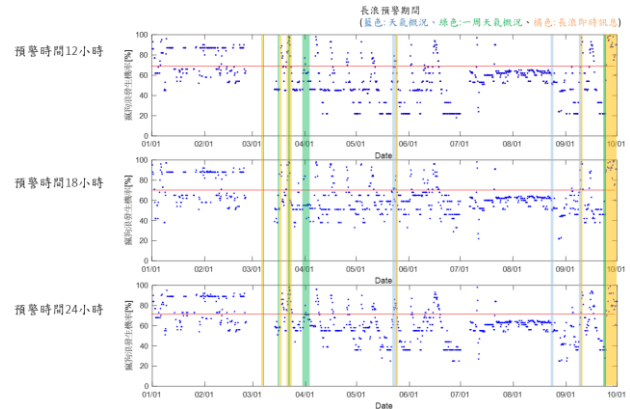


圖1 長浪發布情形和瘋狗浪機率預警結果比較

本研究團隊於前期研究中透過學理分析，已建置一套影像分析流程與準則，可判釋是否發生巨大浪花(瘋狗浪)(中央氣象局，2017)。

龍洞瘋狗浪影像之驗證採用2017/5-2017/12月影像較為完整且連續之區間，期間共找到約9000筆光學瘋狗浪影像案例，若同一小時內有發生一件瘋狗浪案例，則該小時視為有瘋狗浪發生，瘋狗浪預警系統在2017/5 - 2017/12期間共有576個小時有記錄到瘋狗浪案例。龍洞子系統預警時間12小時模式於2017/5-2017/12白天期間共發布了165次高風險預警(每天僅進行2次預警)，18小時模式發布了177次高風險預警，24小時模式發布了179次高風險預警。以2017/6做為案例，12小時龍洞與警系統共發布了47件瘋狗浪高機率預警，其中有36次影像系統有觀測到瘋狗浪成功率達77%(圖2)，而24小時預警模式共預警65次，其中有48件被瘋狗浪影像紀錄得到，成功率達74%。針對2017/5-12月全期間系統的高風險預警結果(12/18/24小時預警時間分別是165/177/179次)，分別有130次/141次/126次有被現場影像所記錄，亦即其預警正確率分別為79%、80%與70%。上述反向驗證結果顯示瘋狗浪預警系統所估算之發生機率與實際上瘋狗浪之發生具有高度準確性。

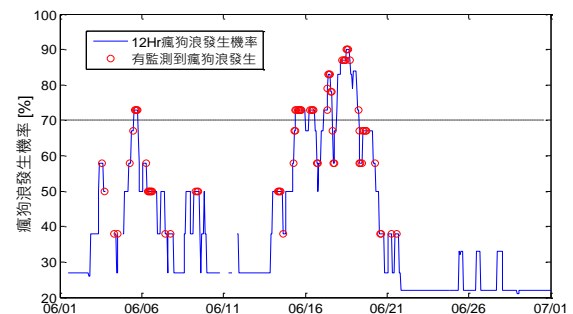


圖2 龍洞子系統與光學影像之驗證

五、結論

在前期研究中，針對海面上突發的災害性異常海象真建立兩套機率預警系統，「海洋異常波浪機率預警系統」和「海岸瘋狗浪機率預警系統」，本研究從過往災害事件或是實測資料進行兩系統的校驗。海洋異常波浪機率預警系統運作成效，選取過去四件較顯著之船難事件，自跑波浪模式探討船難發生時刻異常波浪發生機率情形，結果發現這四件船難事件發生時，波譜能量在頻率域與方向上都有聚集的現象，其中兩件船難事件為過去2016-2018異常波浪發生機率之百分之72和98分位數，顯示此船難事件是由異常波浪引起之可能性很高；此外本研究同樣使用東吉島連續資料進行反向驗證，加權誤差為15% - 22%，本研究認為這兩項結果皆顯示海洋異常波浪機率預警系統具有一定之準確性。在海岸瘋狗浪機率預警系統的部分，本研究使用歷史長浪警戒資訊對預警系統進行驗證，驗證結果顯示，長浪警戒資訊發布時與海岸瘋狗浪預警系統發布高機率警報時刻相當吻合，但也發現在長浪警戒時間外仍有瘋狗浪高機率預警發生，顯示瘋狗浪發生原因不只有長浪引致，還有其他因素。另本研究也使用從光學影像判釋獲得具危害性之瘋狗浪案例，進行海岸瘋狗浪預警系統之反向驗證，檢視發布瘋狗浪高機率預警之準確性，在12小時、18小時和24小時

預警時間之預警的正確率分別為79%、80%和70%，驗證結果顯示瘋狗浪預警系統具有相當高之可信度。

致謝

本研究係交通部中央氣象局「異常海象機率預警研究與作業試用(3/4)」研究計畫成果，承蒙中央氣象局經費補助使本研究得以完成，謹致謝忱。

參考文獻

- 董東璟(2015) 災害性瞬變海象之研究。交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告。
- 董東璟(2016) 異常海象機率預警研究與作業試用(1/4)。交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告。
- 董東璟(2018) 異常海象機率預警研究與作業試用(3/4)。交通部中央氣象局委託研究計畫成果報告。
- Goda, Y. (2000), *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific Publishing Company.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986). Learning internal representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533 – 536.