

異常海象機率預警之研究

陳盈智¹ 董東環¹ 蔡政翰² 蔡仁智³ 陳憲宗⁴ 藤春慈⁵ 朱啟豪⁵

國立成功大學 水利及海洋工程學系¹ 國立臺灣海洋大學 海洋環境資訊系²
崇佑技術學院 數位媒體設計系³ 逢甲大學 水利工程與資源保育學系⁴
交通部中央氣象局 海象測報中心⁵

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，擬建立發布突發性危險海象特報之作業能力，本研究之目標為研究海上異常波浪與海岸瘋狗浪預警系統並令其可以作業化上線運作。由於不論是異常波浪或瘋狗浪之發生機制均尚未明確，因此本研究以序率的手段從事相關研究。中央氣象局前期研究已建立了預警系統雛形，本研究目的為持續現有預警系統之運作並加以改進、提升預測準確性，另外，也將把現行定率式的預警系統提升為機率預警(probability prediction)模式。在海岸瘋狗浪研究的部分，本研究應用群集分析方法並提出機率計算的概念，完成前置時間12小時與前置時間24小時瘋狗浪機率預警系統。在海上異常波浪機率預測的部分，本研究就現行在中央氣象局海象中心上機測試中的機率預測系統運作成效進行探討，同時以東吉島測站連續觀測資料進行驗證，結果顯示機率預測結果誤差在合理的範圍內，顯示此系統具有很高的參考價值。

關鍵字：海上異常波浪、海岸瘋狗浪、機率預警

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。

本研究為達成強化防災海象科技研發、促進海象科技民生應用之政策目標，藉由觀測補強與技術開發之執行策略來達到建立中央氣象局發布突發性危險海象特報之作業能力，期能建置機率預警系統，減少因災害性海象所造成的損失，並建立危險海象預警系統來滿足未來民眾和防救災單位之需求。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預測，由於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。

中央氣象局過去的研究已開始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)，然而已完成之研究尚存在有不足，現行預警系統可得知瘋狗浪發生之風險高低，但未有提供發生機率值。本研究將提昇現有預警系統計算瘋狗浪發生機率。由於中央氣象局已在臺灣環島建置波浪與潮位觀測系統，本計畫研究資料來自於目前建置之觀測系統，再輔以瘋狗浪事件預警模式發展等層面，完成近岸區域瘋狗浪預警模式和外海異常波浪預警模式之建置，期望未來能對發生在岸邊和海洋中的瘋狗浪提

出適宜的預警資訊，並將此機率預警作業落實於中央氣象局作業化流程中。

二、機率預測方法

2-1 海岸瘋狗浪預警系統機率預測方法

在先前的研究中(中央氣象局，2015)，針對台灣東北角海岸瘋狗浪好發區域，以群集分析方法建置瘋狗浪預警系統，然而此系統僅為定率之結果，輸出發生瘋狗浪發生風險之高或低，本研究欲將此系統提昇為機率預警系統，完成後可提供東北角海域發生海岸瘋狗浪之機率。由先前的預警模式建置過程中，輸入海象因子(如示性波高、平均週期、尖峰週期)與氣象因子(平均風速、平均風向、三秒陣風、氣溫、氣壓)等相關統計因子進行率定，率定後可得到數個預警系統輸入之海氣象因子與因子的門檻值，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($X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$)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，其中 X_{i1}, X_{i2}, \dots 代表輸入資料中的每一候選因子的量化數值，因子候選集會發生落海的門檻條件集合為($X_{m1}, X_{m2}, \dots, X_{mk}$)，不會發生落海的門檻條件集合為($X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}$)，每一因子在該條下會發生落海事件的權重分別為 w_1, w_2, \dots, w_k (可由差異分析取得其機率值)。

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1所示。

$$P(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{x_i - x_{n1}}{x_{m1} - x_{n1}} \right) & x_i > x_{m1} \\ x_i = x_{m1} & x_i > x_{m1} \end{cases} \quad (1)$$

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2表示

$$p(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) = \frac{\sum_{j=1}^k w_j p(x_{i_j})}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (2)$$

由式2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。

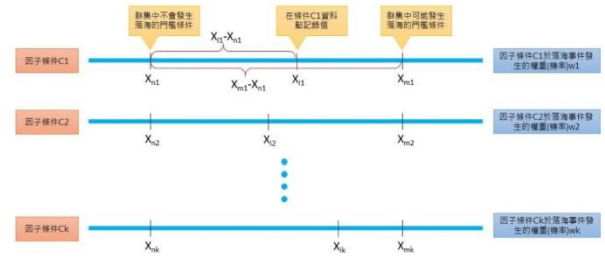


圖1 瘋狗浪發生機率計算概念

2-2 海洋異常波浪機率預測方法

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，配合中央氣象局之波浪預報模式輸出資料，進行海上異常波浪發生機率估算，估算結果以東吉島波浪站連續波浪資料進行驗證。

假設波場具有定常性(stationary)及遍歷性(ergodicity)，且波譜屬於窄譜，則波浪振幅可視同於波包振幅 R ，該表面水位可以用振幅 R 及相位 ϕ 來表示。Longuet-Higgins(1963)提出了兩個非線性變數在弱非線性的條件下其聯合機率密度函數可表示成：

$$p(\eta', \zeta') = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}(\eta'^2 + \zeta'^2)\right] \times \left[1 + \frac{1}{3!} \sum_{n=0}^3 \frac{3!}{(3-n)!n!} \kappa_{(3-n)n} H_{3-n}(\eta') H_n(\zeta') \right. \\ \left. + \frac{1}{4!} \sum_{n=0}^4 \frac{4!}{(4-n)!n!} \kappa_{(4-n)n} H_{4-n}(\eta') H_n(\zeta') \right] \quad (3)$$

其中 H_n 是第 n 階的埃爾米特多項式(Hermite polynomial)， K_{nm} 則為累積量(cumulant)。為了得知波高的機率分布，可以利用 $p(A, \Phi) = A p(\eta', \zeta')$ 將式(3)中的變數轉換成波浪振幅及相位，加上波浪的隨機性，因此振幅和相位可被視為互相獨立，而波浪振幅的機率分布即可藉由對相位的積分而得知

$$p(A) = A \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{2}\right) \times \left[1 + \frac{1}{3} \kappa_{40} \left(1 - A^2 + \frac{1}{8} A^4\right) \right] \quad (4)$$

基於窄譜的假設，波高 H' 可以被視為是兩倍的振幅，而代入式(4)中即可得知波高的機率密度函數如下：

$$p(H') = \frac{1}{4} H' e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} A_H(H')] \quad (5)$$

$$A_H(H') = \frac{1}{384} (H'^4 - 32H'^2 + 128) \quad (6)$$

同時，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

$$P(H') = e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} B_H(H')] \quad (7)$$

$$B_H(H') = \frac{1}{384} H'^2 (H'^2 - 16) \quad (8)$$

雷禮分布並沒有上限邊界，最大波高 H_{max} 僅是一種統計上的定義，指從母體中選出之樣本的最大值，Longuet-Higgins (1952)推導出了最大波高之機率密度函數

$$p_m(H_{max}) = N[1 - P(H_{max})]^{N-1}p(H_{max}) \quad (9)$$

其中 $p(H_{max})$ 即為式(5)之機率密度函數，表示當波高為 H_{max} 之機率。當 N 非常大時，最大波高之機率密度函數如式(10)所示。

$$p_m(H_{max}) = \frac{N}{4}H_{max}e^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)}[1 + \kappa_{40}A_H(H_{max})] \times \exp\left\{-Ne^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)} \times [1 + \kappa_{40}B_H(H_{max})]\right\} \quad (10)$$

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

$$P_m(H_{max}) = 1 - \exp\{-Ne^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)}[1 + \kappa_{40}B_H(H_{max})]\} \quad (11)$$

根據本文所採用的異常波浪定義，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(11)可改寫為式(12)，即無因次化的 $H_{max} = 8$ ，可以得知異常波浪的發生機率为波浪的個數(N)和峰度係數(μ_4)的函數。

$$P_{freak} = 1 - \exp[-N \cdot e^\beta (1 + 8\kappa_{40})] \quad (12)$$

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。根據推導過程，此處所指的異常波浪必為各組之最大波高，而異常波浪的發生機率則為各群組之最大波高為異常波浪之機率。根據上述理推導結果[式(12)] 可以得知異常波浪的發生機率和兩個參數相關，一個是波浪的數目，另一個參數為水位變化的峰度。當峰度係數(μ_4)越大或波浪個數(N)越大時，異常波浪的發生機率(P_{freak})越大。為驗證此推導結果，須使用連續觀測的資料才能截出足夠的波浪個數來進行驗證。詳細的驗證過程可參考(Tseng et al., 2014)

三、機率預警系統使用資料

海岸瘋狗浪預警系統建置過程中，使用龍洞浮標以及中央氣象局海象中心波浪模式輸出資料(NOAA WaveWatch III, NWW III)，進行機率預警系統之訓練與驗證。龍洞浮標使用的資料包含示性波高、平均週期、尖峰週期、氣壓、3秒陣風風速、平均風速、平均風向、氣溫等，而NWW III波浪模式僅取龍洞浮標座標位置之預測資料，包含示性波高、模式風速、模式風向等資料，將以上資料之各統計結果

(包含平均值、最大值、標準差、最大上升率、平均上升率等)，匯入資料庫中，成為資料探勘輸入的候選因子。

在海上異常波浪預警的部分，機率預測使用的資料是NWW III波浪模式之方向波譜，資料範圍從東經111度到東經133度，北緯15度到北緯40度，資料解析度為1/4度。在驗證機率預測的部分，根據前述理論推導，只有連續觀測的資料才具有足夠的波浪個數進行前述推導的驗證，且為了分析異常波浪，需有水位變化資料，也就是說需要連續之水位變化時序列來進行理論驗證，本研究使用中央氣象局設置在東吉島東方波浪站之觀測資料進行驗證，現場測站設置於水深約20公尺處，觀測儀器為底錠是超音波波浪儀，每次觀測20分鐘，每小時觀測3次，也就是不間斷連續觀測。

四、系統建置結果與驗證

4-1 海岸瘋狗浪預警系統建置與驗證

現行海岸瘋狗浪預警系統的第一個模式(主模式)係使用龍洞浮標觀測資料以及NWWIII模式資料作為輸入，預警時間有12小時與24小時，本文以預警時間12小時預警系統之主模式進行說明。由前述之機率預警系統建置方法與使用資料，建置結果所得最佳候選因子包含(1)預報點前6小時內示性波高的平均值、(2)預報點前6小時內示性波高的最大值、(3)NWWIII預報點前12小時在0°方向(即北風)的平均風速分量、(4)NWWIII預報點前6小時在0°方向的平均風速分量、(5)NWWIII預報點前12小時在45°方向(即東北風)的平均風速分量和(6)預報點前6小時內尖峰週期的最大值等。

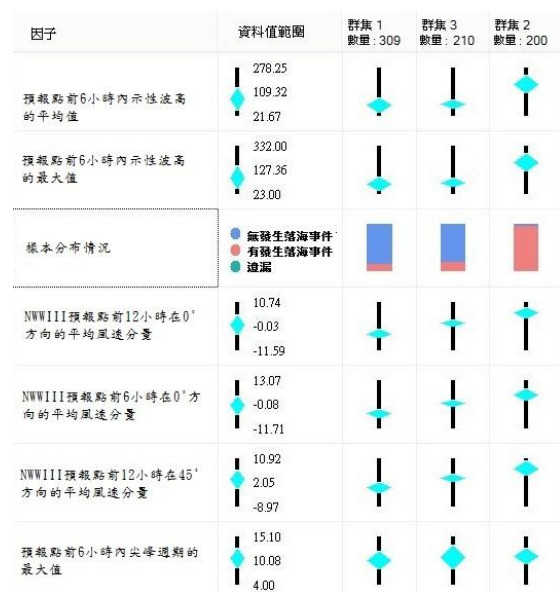


圖2 預警時間12小時機率預警模式各群特性設定

圖2為預警系統之輸入因子以及不同群集中，因子分布的範圍，狀態欄中的黑色直條表示該群集資料的範圍並顯示最小值至最大值，淺藍色菱形高度即代表該群集資料的平均值±標準差的分佈範圍，其中樣本分機情形中的紅色1代表有落海事件發生，藍色0的部分為不會有落海事件發生。由圖中可知，群集1的案例數有309筆，其中僅有16.5%可能會有落海事件發生，其中83.5%是不會發生落海事件，群集2的案例數有200筆，其中有94.4%可能會有落海事件發生，其中5.6%是不會發生落海事件，群集3的案例數有210筆，其中僅有20.7%可能會有落海事件發生，其中79.3%是不會發生落海事件，亦即當海氣象紀錄資料集接近於群集2時，會被判定可能會有落海事件的發生，反之海氣象紀錄資料集接近群集1時，亦表示不會發生落海事件。因此當系統運作時，輸入因子集運算結果偏向群集2時，表示12小內發生落海事件的機率將提高許多。

本研究中利用群集找出最可能會發生落海事件的群集2以及較不會發生落海事件的群集1，並使用辨識工具將模式內兩群集各因子最大值設定為危險門檻值、最小值設定為安全門檻值，如表1所示，NWWIII預報點前12小時在0°方向的平均風速分量安全門檻值為-11.6 m/sec、危險門檻值為10.7 m/sec，NWWIII預報點前6小時在0°方向的平均風速分量安全門檻值為-11.7 m/sec、危險門檻值為13.1 m/sec，NWWIII預報點前12小時在45°方向的平均風速分量安全門檻值為-9 m/sec、危險門檻值為10.9 m/sec，預報點前6小時內示性波高的最大值安全門檻值為23.0 cm、危險門檻值為332.0 cm，預報點前6小時內示性波高的平均值安全門檻值為21.7 cm、危險門檻值為278.3 cm。

本研究以2003年至2014年所蒐集的53件瘋狗浪落海事件進行驗證，結果如圖3-8所示，結果顯示預測發生機率在50%以上者共佔53件瘋狗浪事件的86%。此外本研究也將12小時機率預警模式以最近發生之瘋狗浪事件進行測試，2016年2月14日瑞芳明隧道旁事件，事件發生當時機率預警如表3-4所示，如表所示在預警時間2016/2/14 07:00 預警機率为36%、2016/2/14 13:00 預警機率为40%，亦表示在機率預警上仍有可能會發生落海事件。

表1預警時間12小時機率預警模式輸入因子門檻值

因子說明/群集	安全門檻值	危險門檻
NWWIII 預報點前 12 小時在 0° 方向的平均風速分量(m/sec)	-11.6	10.7
NWWIII 預報點前 6 小時在 0° 方向的平均風速分量(m/sec)	-11.7	13.1
NWWIII 預報點前 12 小時在 45° 方向的平均風速分量(m/sec)	-9.0	10.9
預報點前 6 小時內示性波高的最大值(cm)	23.0	332
預報點前 6 小時內示性波高的平均值(cm)	21.7	278

表2 預警時間12小時機率預警模式在2016/2/13-14日預警結果

機率預警系統執行時間	預警時間	預警機率 (%)
2016/2/13 01:00	2016/2/13 13:00	49
2016/2/13 07:00	2016/2/13 19:00	42
2016/2/13 13:00	2016/2/14 01:00	37
2016/2/13 19:00	2016/2/14 07:00	36
2016/2/14 01:00	2016/2/14 13:00	40
2016/2/14 07:00	2016/2/14 19:00	40
2016/2/14 13:00	2016/2/15 01:00	50
2016/2/14 19:00	2016/2/15 07:00	90

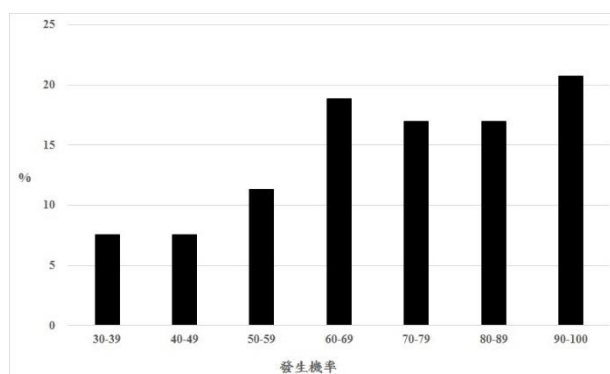


圖3 預警時間12小時海岸瘋狗浪機率預警系統驗證

4-2海洋異常波浪機率預測驗證結果

在海上異常波浪機率預測之驗證部分，本研究參考中央氣象局降雨機率預報驗證方式來進行異常波浪發生機率估算結果驗證。驗證的方法為從過去的預測中，將相同預測機率的事件進行歸類，並比較在此預測機率下，實際發生的機率为何，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为20%的事件當中，實際發生的次數站有此類事件之20%，即為最佳預測。

異常波浪發生機率預測程式於2015年8月10日開始上機測試，至2016年6月20日為止共累積316天運作結果。本研究對於異常波浪發生機率計算時使用的波浪數(N)，是設定某船隻在此海域停留40分鐘所會遭遇到的波浪數，在驗證的過程中，則使用東吉島波浪站在40分鐘內實際觀測到之波浪數。在一般風浪情況下，波浪之平均週期約為5~6秒，40分鐘內可觀測到之波浪數約為400-480個波。異常波浪機率預測作業中包含分析場(預測當時時刻)、未來24小時、未來36小時與未來48小時異常波浪發生機率，本研

究也分別驗證不同預測時間之計算結果。在運作的316天內，異常波浪發生機率預測結果主要介於15-45%間，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，則機率預測的誤差則可以機率預測值減去時機發生機率值表示。結果顯示在低發生機率的預測皆非常接近最佳預測，而針對發生機率較大的部分似乎有較大偏差，但其原因之一是因為樣本數過少所致，本文以樣本數作為加權因子來計算加權平均誤差，如表3所示，未加權之預測誤差介於2% - 76%之間，但考慮了樣本數之加權平均誤差介於7% - 14%，此結果確認了本計畫所開發的異常波浪發生機率預測系統具有一定程度的準確性。

本研究認為，遭成異常波浪機率估算的可能誤差主要來自於式(11)中參考線性波理論中示性波高為4被的水位均方根，此方法讓機率估算式簡化方便使用，但此假設與真實海洋的情況略有差異。

表3 本計畫研發之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 誤差
	-	-	-	-	-	-	
	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	
分析 場	5.2%	5.2%	13.4%	17.1%	27.7%	11.6%	7.1%
24小 時	3.1%	19.1%	9.1%	27.0%	16.6%	21.5%	7.9%
36小 時	2.9%	11.2%	31.0%	18.5%	44.7%	76.4%	10.1%
48小 時	10.6%	13.9%	9.0%	2.8%	58.3%	52.9%	14.1%

五、結論

瘋狗浪事件的發生是海岸活動的人們最大的陰影，但是瘋狗浪的發生地點與時機卻是無法被精確掌握。本研究已完成12小時機率預警模式建置，以過去報載瘋狗浪事件進行驗證，發生機率在50%以上者佔有8成，顯示此預警系統具有一定的可信度。而海上異常波浪機率預測系統執行結果顯示，台灣周遭海域異常波浪發生機率約介於15-45%之間，主要集中在17-21%。以東吉島波浪站連續觀測資料對海上異常波浪機率預測結果進行驗證，加權誤差介於7-14%，表示海上異常波浪機率預測結果具有一定的參考性。

謝致

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 (1/4)」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

- 中央氣象局，2015，「災害性瞬變海象之研究」，研究計畫報告。
- 曾菱璇、董東璟、高家俊、蔡政翰，2014，非線性波場中之異常波浪發生機率預測研究，海洋工程學刊，第14卷，47-58頁
- Goda, Y. (2000), *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific Publishing Company.
- Longuet-Higgins, M.S. (1952), On the statistical distribution of the heights of sea waves, *Journal of Marine Research*, vol. 11, pp. 245-266.
- Longuet-Higgins, M. S. (1963), The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp.245-265.