

海洋藍色公路異常波浪機率預警

陳盈智¹ 朱啟豪² 董東環¹ 蔡政翰³ 蔡仁智⁴ 陳憲宗⁵

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
國立臺灣海洋大學 海洋環境資訊系³ 崇右影藝科技大學 數位媒體設計系⁴
逢甲大學 水利工程與資源保育學系⁵

摘要

海洋中的「異常波浪」是海洋中航行船隻或是海上工作平台潛在的危險。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，已逐步從早期建置的漁業氣象預報逐步發展，目前針對台灣周遭24條航線建立藍色公路海象預報資訊系統，預測航線上逐時的海氣象預報資料，可提供客輪航行安全之參考資訊。本研究預期結合前期發展之海洋異常波浪機率預測系統，細化至台灣海峽航線上，輸出航線上逐時之海洋異常波浪發生機率，期望能使藍色公路海象預報資訊系統更加豐富。異常波浪之發生機制尚未明確，因此本研究以序率的手段，參考前人研究彙整一套海洋異常波浪機率估算理論，並結合台灣海域實測波浪資料進行理論修正與率定。預警系統架構原理是基於異常波浪是在波浪成份間的非線性調和所產生，在航線上海洋異常波浪機率預測係使用中央氣象局細化後多重網格輸出之NWWIII 預測波浪波譜資料，機率預測所需之，初步針對基隆-馬祖和台中-平潭兩條跨越台灣海峽航線進行分析。從過去兩年計算結果顯示，夏季颱風期間異常波浪發生機率達到最大，也發現一案例發生在冬季大陸冷高壓東移，航線上異常波浪發生機率大幅上升的情況，而示性波高僅1-2米的案例，是屬於風險相對較高的案例。

關鍵字：異常波浪、機率預測、藍色公路

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 (Oceanic freak wave) 事件，導致船翻、人員落海等事件，每年因此危險海象而造成之死傷人數很多，造成民眾生命損失並投資巨大救災資源。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乘客幸獲獲救，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。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的作業能力，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，2017)，然而已完成之研究尚存在有不足，現行預警系統可得知台灣周遭海域之異常波浪發生機率，但僅有大域上的概況，對於小區域或是特定地點的資訊仍然不足。

中央氣象局自2001年來也逐步發展高解析度的作業化波浪預報系統，目前針對台灣周遭24條航線提供航線上未來48小時之海氣象逐時預報資訊，空間解析度達0.025度，目的為提供操船者足夠的航行海氣象資訊，避免航運船隻遭遇險惡的海況，減少意外發生；除此之外，近年來台灣港務公司針對客輪進出港管制作業程序裡，新增參考藍色公路航段海象預報資訊系統之海氣象資料，作為判別客輪適航條件。至今，藍色公路預報系統已完成上線運作，於中央氣象局的網頁上社會大眾皆可即時點選參考航線上海氣象預報結果。目前海洋異常波浪發生機率預警系統已可針對台灣週遭海域的異常波浪發生機率，目前已線上運作測試中，本研究將應用此系統之運作理論與方法，針對海峽航線上之異常波浪發生機率進行預測，結合異常波浪發生機率預測的方法與藍色公路預警系統，預期可以使藍色公路海氣象預

報系統更佳完善，提供海上船隻更豐富之航行安全資訊，減少意外之發生。

二、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：

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

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

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

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(2)中即可得知波高的機率密度函數如下

$$p(H') = \frac{1}{4} H' e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} A_H(H')] \quad (3)$$

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

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

$$P(H') = e^{-(1/8)H'^2} [1 + \kappa_{40} B_H(H')] \quad (5)$$

$$B_H(H') = \frac{1}{384} H'^2 (H'^2 - 16) \quad (6)$$

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

$$p_m(H_{max}) = N[1 - P(H_{max})]^{N-1} p(H_{max}) \quad (7)$$

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(8)所示。

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

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

$$P_m(H_{max}) = 1 - \exp\left\{-N e^{-\left(\frac{H_{max}^2}{8}\right)} [1 + \kappa_{40} B_H(H_{max})]\right\} \quad (9)$$

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，由線性波理論示性波高可被視為 4 倍水位的標準差，然而異常波浪為高度非線性之波浪，Mori (2004)利用實驗結果提出了示性波高與水位均方根值比值的經驗公式，證實使用線性波理論假設與驗結果並不相同，進而可能導致發生機率估算之誤差；本研究也從實測資料的分析中也得知，示性波高與水位均方根之比值並非為 4，而是峰度係數的函數，因此將無因次 H_{max} 以 α 取代，稱之為機率推算係數，此係數是水位峰度值的函數，用以代表最大波高與水位均方根值的比值，在線性理論的假設下異常波浪發生時 $\alpha = 8$ ，使用東吉島波浪站 2012-2014 年的資料進行回歸，異常波浪發生機率之估算修正式如下式所示

$$P'_{freak} = 1 - \exp\left\{-N e^{-\left(\frac{\alpha^2}{8}\right)} \left[1 + \frac{\kappa_{40}}{384} \alpha^2 (\alpha^2 - 16)\right]\right\} \quad (10)$$

α 值資料與回歸結果如圖 1，並得到關係式如下

$$\alpha = -0.045\mu_4^2 + 0.406\mu_4 + 6.608 \quad (11)$$

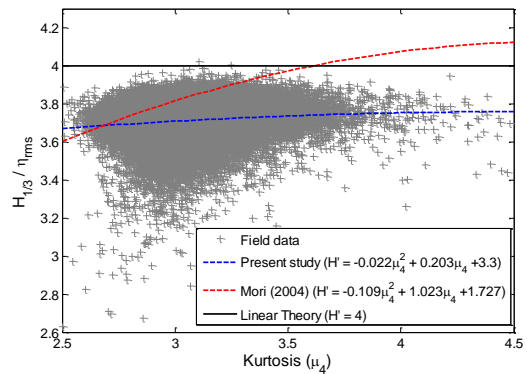


圖 1 波高比值與峰度係數關係圖 (中央氣象局, 2016)

三、異常波浪機率預測之驗證

本研究以2014-2016/10將近3年的水位資料重新驗證修正後的機率估算式，驗證的過程將示性波高小於0.5米的資料移除，依照不同波浪數N將水位資料切割，再依照不同峰度值分類以進行後續驗證。由表1可知在峰度值大於3.3的資料群中，資料數僅1000多筆左右，相較於峰度值3的樣本數相差約有15倍之多，因此在峰度值較大的部分驗證時，會有一定程度的不確定性產生，然而東吉島波浪站是目前唯一有作業化連續觀測的波浪資料，因此本研究仍使用此資料進行分析。

驗證結果如圖2，其中不同顏色分別表示著不同的峰度係數，範圍從2.9到3.6，在不同峰度係數對應的 α 與計算所得之均方根誤差為誤差如表1，驗證結果顯示在峰度係數 $2.9 \leq \mu_4 \leq 3.2$ 間的驗證結果最佳相對誤差較小，其餘偏大的峰度係數時，驗證結果偏差較大。圖中符號為實際測量之數據，虛線則為修正後之理論線，顏色用以區分不同峰度值。驗證結果顯示，修正後之理論式有著較佳的估算結果，其平均相對誤差為9.29%，平均均方根誤差為13.2%，比原理論式之22.3%有明顯進步(中央氣象局，2014)，從圖2也可得知以修正式估算異常波浪發生機率與實測資料的變化趨勢相當符合。驗證之誤差圖如圖3，由圖中可知，誤差較大的範圍主要集中在波浪數小於500的範圍內，當波浪數大於1000個誤差大多在10%以下。

表1 修正式驗證結果之係數及均方根誤差

Kurtosis	樣本數	α	RMSE [%]	MSE [%]
$\mu_4=2.9$	19103	7.40	11.3%	6.99%
$\mu_4=3.0$	14859	7.42	15.1%	8.75%
$\mu_4=3.1$	7672	7.43	14.4%	9.40%
$\mu_4=3.2$	4030	7.44	6.5%	4.54%
$\mu_4=3.3$	2022	7.46	14.9%	12.78%
$\mu_4=3.4$	1026	7.46	15.5%	12.24%
$\mu_4=3.5$	1326	7.47	12.0%	8.71%
$\mu_4=3.6$	1216	7.48	15.8%	10.94%
平均			13.2%	9.29%

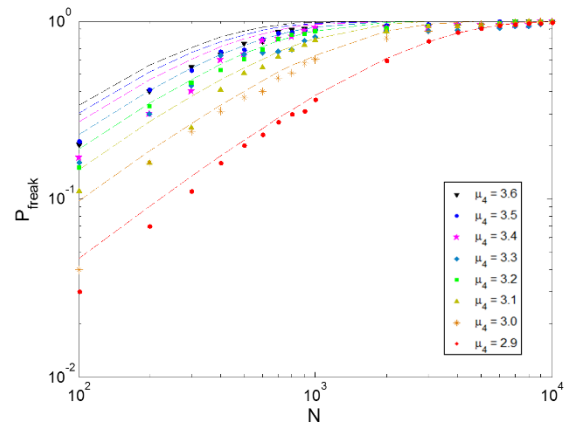


圖 2 異常波浪機率預測修正式之驗證結果

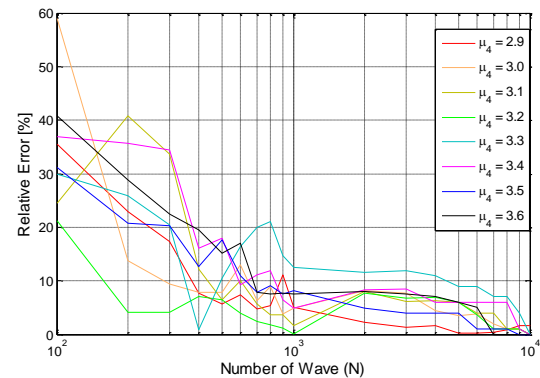


圖 3 異常波浪機率誤差

四、異常波浪機率結合藍色公路

本為了解航線上異常波浪發生機率之特性，使用中央氣象局產出解析度為0.25度之NWW III波浪模式輸出進行分析，每次輸出時間點包含預報時間、未來24、36以及48小時之波浪方向波譜，方向譜之頻率帶為25，方向帶為24。本研究使用預報時間點之波譜資料進行系統之測試，資料頻率為每日四次，資料時間為每天2時、8時、14時與20時。接著分析統計航線上海洋異常波浪發生機率之分佈情形，由於解析度較粗糙，取用的原則採取航線通過波浪模式較近之網格點代表該航段之波浪場情形，資料時間自2015年06月至2017年9月底為止，共計28個月，此期間包含11個有發布警報之颱風案例，分別針對基隆-馬祖與台中-平潭航線進行建置與分析。

異常波浪乃是稀有事件，因此以平均值進行統計難以找到其特性，因此依照四季分別統計最大值與中位數，四季的定義為春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12-2月)，整體上基隆-馬祖航線上各航點的全年中位數的發生機率相當接近，約為34-36%之間，此結果也與各航點之全年盒鬚圖分析結果相似(圖4、圖5)，全年的中位數約在35%上下，第三分位數與第一分位數差大約在5%之間。從四季

分布顯示以秋冬的發生機率約略較大，通常在秋冬兩季海況較為惡劣，在較惡劣的海況條件下，異常波浪發生機率也較高此結果與實測浮標資料分析結果吻合，隨著海況越惡劣，異常波浪發生機率越高；各航段上最大異常波浪發生機率於夏季有較大的結果，此結果推測是受到颱風影響所致。從各航段的機率預測結果顯示，在航段1與航段2較靠近台灣本島的區域，發生機率在秋冬季也有比較大的差異。在台中-平潭航線上，在航段1的異常波浪發生機率無論哪個季節，發生機率相對較小，而位於海峽另外一側之航段三，則是此航線上異常波浪發生機率最大之航段。四季當中以春季是屬於相對危險的季節，航段三的異常波浪發生機率可達4成。

兩條航線上，預測異常波浪發生機率最大是發生在位於基隆-馬祖航線上基隆外海的航段一，發生機率達約87%，此案例發生在2016年2月10日0點(UTC)，當時天氣系統有一高壓位於台灣北方東海上空，台灣海峽至東海一帶平均波高約有1米左右，海況並不算平靜。在先前異常波浪機率預測系統的運作經驗中，通常東海海域出現大範圍異常波浪高機率的情形時，是發生在冬春季交界時有大型天氣系統(尤其是大陸冷高壓)的時刻，此案例即為一例。相較台灣海峽北部的分析統計結果，航線上異常波浪發生機率之計算結果顯示偏高的情形，顯示航線上海域是台灣海峽北部異常波浪發生機率偏高且相對危險的區域。此外本研究參考前期研究分析的成果，取台灣海峽周遭海域之預異常波浪發生機率的第三分位數為標準(~45%)，定義為異常波浪出現之高風險時段，統計基隆-馬祖航線上超過此標準的資料頻率，目的是從超越標準的發生次數，用以評估航線上較易發生異常波浪的航段，結果如圖6、圖7，發生頻率約在3-7%之間，航線上越靠近基隆端其發生頻率越高，在靠馬祖端的頻率則略低。而在台中-平潭航線上，靠近台灣測之航段一達高風險之比率為0，在航段3的頻率約為15%，與四季分析結相同，航段3是比較較危險之區域。

目前異海峽航線異常波浪機率預測系統已完成基隆-馬祖、台中-平潭航線的建置，只要輸入NWW III波浪模式輸出之方向波譜資料，系統即可計算出航線上異常波浪發生機率，若輸入的波譜資料為逐時資料，即可得到未來每小時異常波浪發生機率。本研究以2017年6月27日的案例為例，輸入6月27-29日的方向波譜資料，計算所得之機率可與藍色公路預警系統結合，依照不同時間於航線上各航段之機率預測值如表2之結果。待未來完成多多段航線之建置，機率預測系統輸出可輸出給藍色公路海氣象預警系統使用，此將使藍色公路系統更佳完善。

表2 基隆-馬祖航線藍色公路預報系統結合異常波浪資訊

航段	時間	浪高 [m]	浪向	週期 [s]	風速 [m/s]	風向	異常波浪發生機率
一	6/27 18:00	0.6	WS	3.2	7.6	ES	36.1%
二	6/27 19:00	0.8	WN	3.8	5.6	ES	34.2%
三	6/27 20:00	1.0	EN	4.3	5.1	ES	34.2%
四	6/27 21:00	1.0	EN	5.0	4.8	ES	34.2%
五	6/27 22:00	0.9	EN	5.2	3.8	ES	35.7%
六	6/27 23:00	1.0	EN	4.7	3.6	WS	34.1%
七	6/28 00:00	0.9	EN	4.3	4.5	W	34.0%
八	6/28 01:00	0.3	ES	3.4	2.0	WN	33.7%

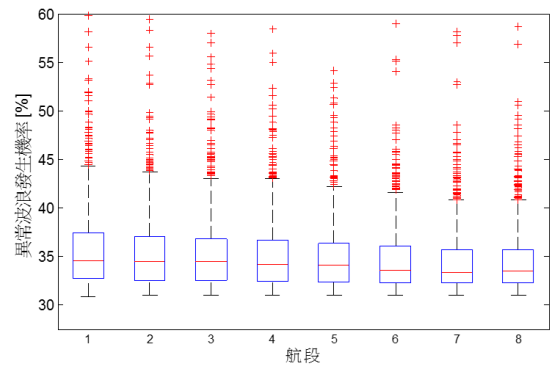


圖4 基隆-馬祖各航段異常波浪發生機率分布

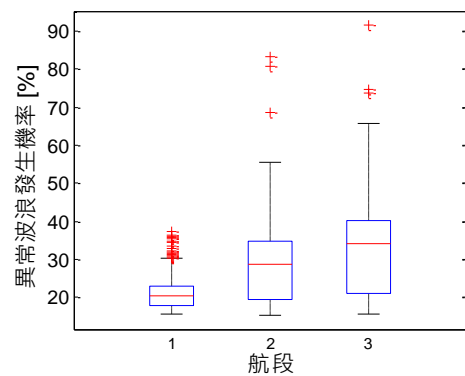


圖5 台中-平潭各航段上異常波浪發生機率分布

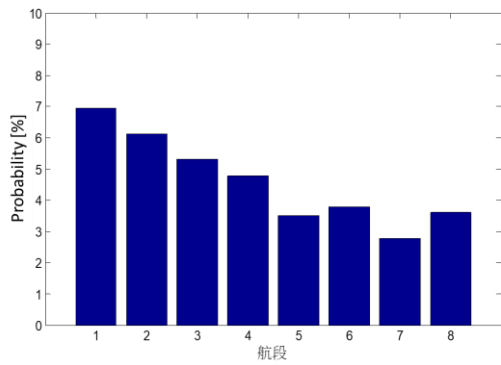


圖6 基隆-馬祖各航段異常波浪發生高機率(大於45%)頻率

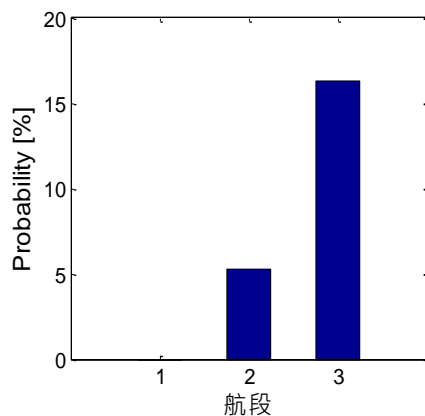


圖7 台中-平潭各航段異常波浪發生高機率(大於45%)頻率

五、結論

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，已針對台灣周遭24條航線建立藍色公路海象預報資訊系統，預測航線上逐時的海氣象預報資料。本研究應用前期發展之海洋異常波浪發生機率預警系統，使用中央氣象局輸出之波浪預報資料，細化至台灣海峽航線上，輸出航線上逐時之海洋異常波浪發生機率，期望能使藍色公路海象預報資訊系統更加豐富。本研究初步針對基隆-馬祖與台中-平潭兩條海峽航線進行測試，預測航

道上異常波浪發生機率並進行統計，以了解過去海線上異常波浪發生之概況。該預警系統架構原理是基於異常波浪是在波浪成份間的非線性調和所產生，進而估算異常波浪發生機率。從過去兩年計算結果顯示，夏季颱風期間異常波浪發生機率達到最大，也發現一案例發生在冬季大陸冷高壓東移，航線上異常波浪發生機率大幅上升的情況，而示性波高僅1-2米的案例，是屬於風險相對較高的案例。本研究顯示估算藍色公路上異常波浪發生機率之可行性，未來結合航線上波浪模式預報資料可作業化提供海洋異常波浪發生機率資訊，提供航行船隻更多航行安全之保障。

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 (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

- 中央氣象局，2015，「災害性瞬變海象之研究」，研究計畫報告。
- 中央氣象局，2017，「異常海象機率預警研究與作業試用」，研究計畫報告。
- 曾蔭璇、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.
- Mori, N. (2004), Occurrence probability of a freak wave in a nonlinear wave field, *Ocean Engineering*, 31(2), 165-175.