

災害性瞬變海象之研究

董東環¹ 蔡政翰¹ 蔡仁智² 滕春慈³ 朱啟豪³ 陳盈智¹
國立台灣海洋大學 海洋環境資訊系¹ 崇佑技術學院 資訊管理學系² 中央氣象局 海象中心³

摘要

惡劣的海象不一定會造成災害，然而「瞬變」的海象沒有徵兆，令海上航行與作業人員難以因應，進而造成船隻翻覆或人員落海等傷亡事件。本研究所探討之瞬變海況包含了海洋中的異常波浪、近岸發生的異常波浪以及急速成長波浪等三種。在外洋異常波浪分析部分，從台灣四周浮標資料中探勘異常波浪案例，分析結果顯示，海洋中出現危險異常波浪之發生機率約為 $(4.68\sim 14.2)\times 10^{-5}$ ，外洋海域發生的機率高於近岸海域。應用非線性波理論，推導得知異常波浪發生機率與波浪數目以及水位變化峰度(kurtosis)有關，經由連續觀測實測資料驗證，確認此理論推導在峰度係數超過3時有合理的估算結果，平均無因次均方根誤差為18%。在近岸異常波浪(瘋狗浪)研究方面，以龍洞測站海象資料與當時的氣象預報資料，分別透過群集分析演算法建置6小時瘋狗浪擊落海預警模式，使用實際落海案件進行驗證，結果顯示前置時間6小時的預警系統，其準確性可達九成以上。針對急速成長波浪分析，本研究分析龍洞浮標與澎湖浮標，分別共尋得671件與490件案例。分析結果顯示，在龍洞和澎湖海域之急速成長波浪主要是發生於鋒面通過或大陸冷氣團南下，案例發生後，風速明顯上升且風向有集中的趨勢。本研究也嘗試以鋒面移動速度、鋒面強度以及鋒面延時為參數，透過多項式迴歸建立急速成長波高預測經驗式，驗證結果確認模式計算所得與實測比較之相關性達0.7。

關鍵字：異常波浪、瘋狗浪、急速成長波浪

一、前言

隨著科技技術日新月異的進步，極端惡劣的海象都可事前預知，許多海上災害得以避免。然而，造成船隻翻覆等海上危害事件的原因大多是遭受「瞬變」的異常海象，使的海上工作者應變不及，進而造成傷亡，因此若能準確的預報瞬變的異常海象，無異於是海上工作者的一大福音。本研究所著重的瞬變海象包含：洋中的異常波浪(Oceanic freak wave)，這是指在廣闊海洋中突然發生且比前後波浪都還要來得大的波浪；第二種是類似前述的異常波浪，但發生於近岸海域，本計畫稱之為近岸異常波浪(Coastal freak wave)，這也是一般人所稱的瘋狗浪，它常無預警的發生並衝上防坡堤；第三種瞬變海象是所謂的急速成長波浪(Rapid growth wave)，有時海上在前一時刻風平浪靜，但在短時間內波浪卻快速成長，小噸數的漁船或舢板非常難以應付此類情況。

外洋異常波浪是近年來從事波浪相關研究的熱門課題之一，目前最廣泛使用的異常波浪定義是根據Sand et al. (1990)提出，當波高為示性波高的兩倍以上即稱為異常波浪。異常波浪的研究很多，以數值模擬的方法對發生的機制提出許多解釋，然而現場觀測的資料則相當缺乏。此外，雖然發生機制逐漸明朗化，但是以定率上來推測異常波浪的發生仍未成熟，而以序率的方式推導發生機率則較為可行。近十年間中央氣象局在附近海域佈放了許多資料浮標，並提供了豐富的波浪資料，因此本研究將對長期的

波浪資料進行異常波浪探勘，並以前人的研究成果，彙整外洋異常波浪發生機率估算方法，並以實測資料進行驗證。

釣客或民眾於海邊活動受浪擊落海事件，無論是哪個季節皆層出不窮，如2013年11月9日於鼻頭角發生浪擊人員落海事件，造成8死8傷的慘劇。近岸瘋狗浪的發生成因探討，需考慮近岸地形與波浪的交互作用和水深變化導致的波浪淺化等因素，其機制相對於外海異常波浪複雜許多，蔡等人(2001)就指出近岸危險波浪與海底坡度有極大的關係。本研究為建立一套預警系統，利用群集分析演算法，搭配現實中實際落海的事件進行訓練，找尋落海時海氣象的關聯因子，進一步對未來發生浪擊落海事件的風險高低做出預警。

此外，過去有許多翻船事件發生於天氣驟變，漁船返回不及，而發生意外，從波浪站資料也找到示性波高在短時間內增長3倍的案例(呂蕙君，2007)。然而急速成長波浪在過往的研究中被討論的甚少，為了解這些急速成長波浪發時的天氣背景，本研究將著重於急速成長波浪的探勘與歸納其天氣系統背景。

二、外洋異常波浪分析與預測

2.1 外洋異常波浪發生機率分析

本研究分析中央氣象局設置於台灣環島海域的資料浮標波浪資料，選用的浮標包含近岸的龍洞、花蓮、鵝鑾鼻、七股和新竹浮標以及外洋的東沙和台東外洋浮標（位置圖如圖1），藉此比較是否在不同水域與地文環境下，其異常波浪發生機率為何。異常波浪判別的方法是以異常指數(Abnormal Index, AI)進行判別，AI的定義是波高與示性波高的比值，當AI大於2時，該波即為異常波浪；然而異常波浪是指海上相對大的波，不一定會造成危害。本研究多增加示性波高大於1米的條件（異常波浪大於2米），希望著重於具威脅性的異常波浪分析。

分析7個測站共計34,384,669筆波浪資料，找到2642筆危險異常波浪案例，平均發生機率為 7.68×10^{-5} ，相較Baschek and Imai(2011)分析美國太平洋海岸之異常波浪發生機率 1.2×10^{-5} 還大，將近為6倍之多。2642筆危險異常波浪中最大AI的案例為3.13，發生在2011/08/04 12時花蓮浮標站，當時示性波高為1.03公尺，異常波浪波高達3.23公尺(如圖2)。所有測站的危險異常波浪發生機率介於 $4.68 \sim 14.2 \times 10^{-5}$ 之間(如表1)，結果顯示不同環境其危險異常波浪發生機率皆不同，並且外洋海域發生機率也較近岸海域高。

表1 危險異常波浪探勘結果與發生機率

| 浮標名稱 | 資料時間 | 記錄筆數 | 總波長數 | 危險異常波浪個數 | 危險異常波浪發生機率 |
|------|---------------------|--------|-----------|----------|-----------------------|
| 龍洞 | 1998-2012 | 81,375 | 7,049,240 | 580 | 8.22×10^{-5} |
| 花蓮 | 1997-2012 | 85,775 | 6,962,949 | 602 | 8.64×10^{-5} |
| 鵝鑾鼻 | 2000-2012 | 66,556 | 5,837,078 | 381 | 6.52×10^{-5} |
| 七股 | 2006-2012 | 37,723 | 3,892,260 | 360 | 9.25×10^{-5} |
| 新竹 | 1997-2012 | 74,046 | 8,052,745 | 377 | 4.68×10^{-5} |
| 台東外洋 | 2006,2008,2009-2012 | 17,897 | 1,430,545 | 204 | 14.2×10^{-5} |
| 東沙 | 2010-2012 | 13,362 | 1,159,852 | 137 | 11.8×10^{-5} |

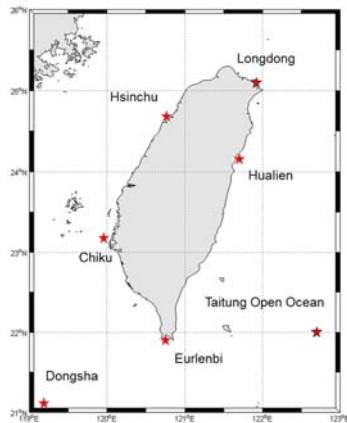


圖1 資料浮標測站位置圖

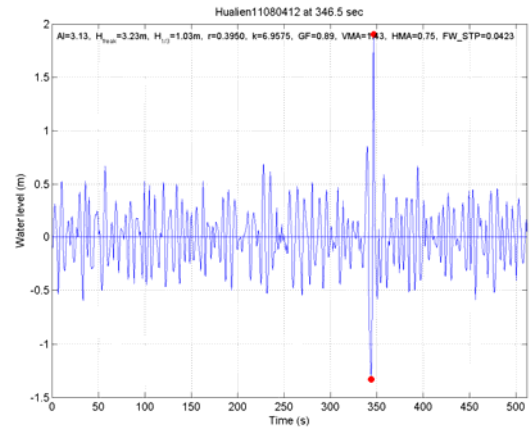


圖2 異常波浪案例 (2011/08/04 12時)

2.2 外洋異常波浪發生機率預測

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討，並以碧砂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：

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

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(1)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

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

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，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(9)可改寫為式(10)，即無因次化的 $H_{max} = 8$ ，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。

$$P_{freak} = 1 - \exp[-N \cdot e^\beta (1 + 8\kappa_{40})] \quad (10)$$

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(10)] 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。現場資料與理論之驗證結果如圖3。從圖中可得知當波浪個數足夠大時(例如 $N=10,000$)，異常波浪的發生機率將接近於100%。此外除了趨勢相同外，當峰度係數為弱非線性時，實測資料與理論之符合更加良好，當水位變化峰度 $\mu_4 \geq 3.0$ 時，平均的均方根誤差為18%，但當峰度係數偏小時，理論與實測資料結果差異較大，其原因將進一步討論。

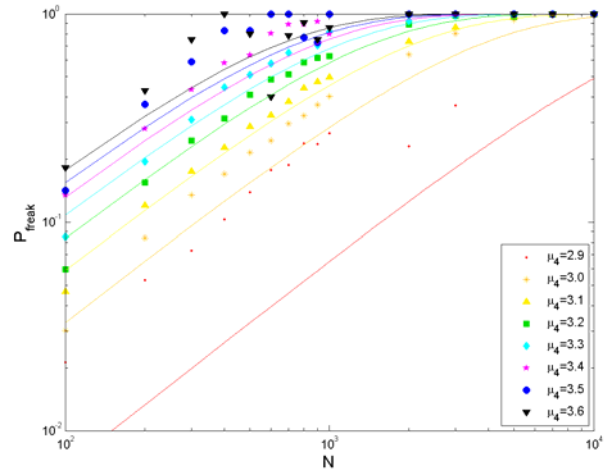


圖3 現場資料與理論驗證結果

三、近岸瘋狗浪預警模式雛形

3.1 瘋狗浪預警模式建置流程與輸入因子

近岸瘋狗浪浪擊意外事件時有耳聞，若能事先評估事件發生的風險，應可有效的避免。然而欲以演算法的技巧進行預警模式的建置，會因為實際發生案例數太少，而使模式產生過適現象(Overfitting)。為了避免過適的問題，本研究首以資料探勘的關聯規則找出東北角龍洞海域可能發生落海事件的時段，有2897筆完整資料，包含991筆可能發生落海的資料。將上述這些時段的海氣象資料已以Microsoft SQL Server 2012建立資料庫，搭配SQL Server Data Tools 探勘工具，並選定群集演算法建置6小時預警模式，找出預警模式的最佳輸入因子，同時以2004-2012年間的所有實際落海事件進行驗證（如圖4）。

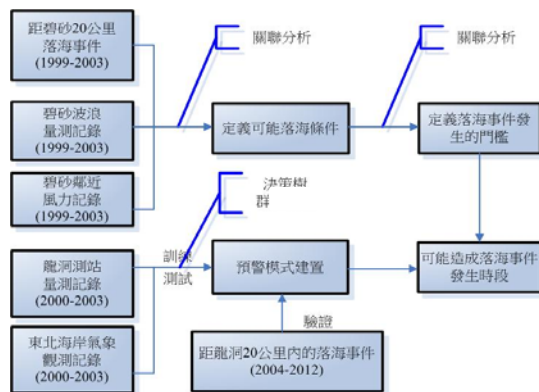


圖4 瘋狗浪預警模式建構圖

模式輸入因子的資料來源主要包含資料浮標以其氣象預報資料，浮標資料包含風速、風向、波浪波高、波浪週期、水溫、氣壓等，而預報資料包含下雨機率、風力、風向和浪級等。本研究將上述資

料進行歸納整理，並考量各項資料的變化率，得到48項海氣象因子，做為預警系統輸入候選因子集。

3.2 預警模式驗證

研究中在模式建置的學習與測試階段，均使用以落海事件的發生與否來驗證模式的準確性，經探勘工具的學習或驗證後可得出預測的錯差矩陣(表2)。錯差矩陣中包含回應率 (response rate)、反查 (recall) 兩指標。回應率 $[D/(C+D)]$ 是指在預測為有落海事件發生集中，多少是屬於真正的落海事件發生。反查 $[D/(B+D)]$ 是指在所有實際有落海事件發生中，有多少比率被模式找出來。落海事件的發生為稀有事件，因此模式的準確性較不具有參考價值。此外，當瘋狗浪發生時若無人於海邊活動，則不會有事件發生，因此本研究認為，反查率應是最重要的指標。

群集分析法主要是使群集間的相異性增加，如此便可依群體的特性來辨識其行為。為能明顯得到最佳的模式，必須嘗試改變群集的個數，最小支持度及最大的輸入因子等參數。分別測試不同的輸入因子個數與輸入因子集，本研究發現示性波高(預報當時示性波高、預報前六小時平均示性波高、預報前六小時內最大示性波高)與預報風向(起始風向、轉向風向)等因子進行輸入可以得到最佳的反查率(92%)，並且以2004-2012年間41件實際落海事件進行驗證，模式皆可準確預測。

表2 事件發生之錯差矩陣

| | 實際未發生 落海事件 | 實際發生 落海事件 |
|---------------|---------------|--------------|
| 預測未發生 落海事件 | A | B |
| 預測發生 落海事件 | C | D |

四、急速成長波浪特性分析

海上的波浪與天氣系統產生的風息息相關，因此當天氣急遽變化時，波浪也會受影響而產生變化，這對小噸位的漁船或遊艇極具威脅性。

4.1 急速成長波浪探勘

本研究定義在時間間距為六小時內的情況下，示性波高成長2倍以上，成長後並達到1.5公尺以上者則符合急速成長波浪，圖5即為龍洞海域一急速成長波浪之案例，此案例發生於2008/12/21，示性波高由原先0.66公尺經16小時後增長為4.63公尺，達7倍之多。分析資料包含龍洞浮標和澎湖浮標，並且分析及速成長波浪發生前後八小時的海氣象資料，以了解其特性。

分析結果顯示，龍洞浮標探勘得到671筆急速成長波浪、澎湖浮標得490筆，並發現急速成長波浪形成時通常伴隨著天氣系統誕生，歸納後主要可分成鋒面通過、大陸冷高壓南下、受颱風影響等。這三個測站分析結果顯示(圖6)，大部分的急速成長波浪都是發生在冬季前後，受到冷高壓南下或示鋒面通過所致，不過當颱風經過時，也有可能產生急速成長波浪。

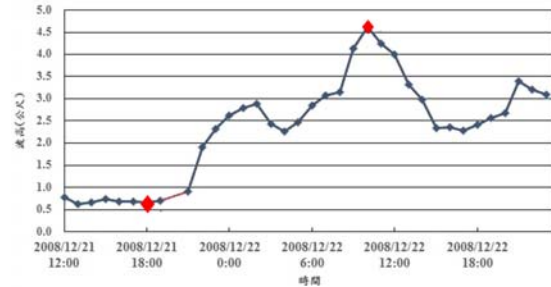


圖5 龍洞海域及速成長波浪案例(2008/12/21)

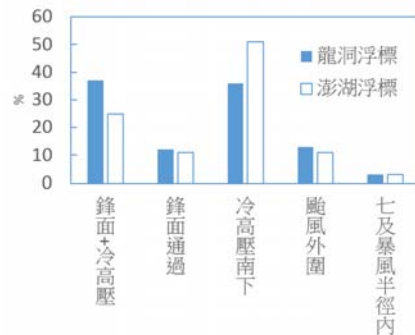


圖6 急速成長波浪發生時之天氣系統比例

4.2 急速成長波浪特性分析

本文將各測站所得之急速成長波浪案例，將其示性波高、週期、風速、氣壓與風向等資料進行分析，以急速成長波浪開始時間為基準，計算其前後八小時的平均值與標準差。兩個測站分析結果相近，在此以龍洞測站為例，分析結果顯示，急速成長波浪在案例發生前其示性波高些微下降後急速升高(圖7)；在風的變化上，其風速變化由案例發生前緩慢上升，在發生後急速上升(圖8)，而風向在發案例發生後也有集中的趨勢(圖9)。

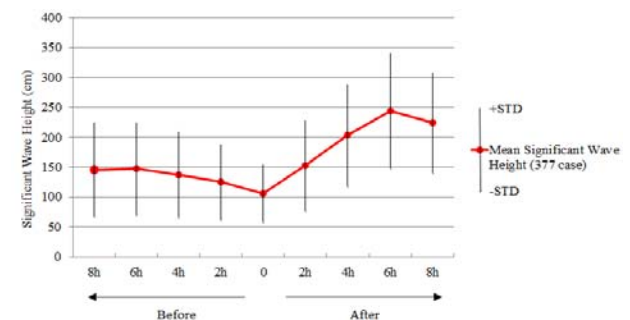


圖7 急速成長波浪發生前後8小時之波高變化

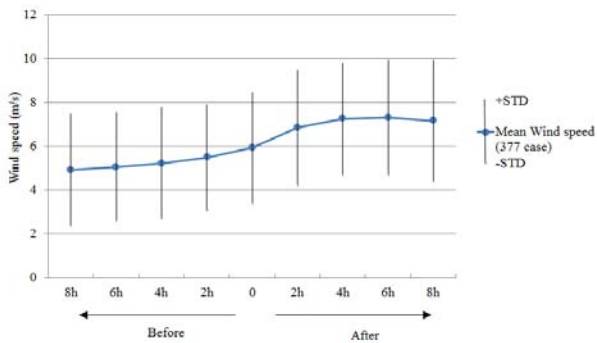


圖8 急速成長波浪發生前後8小時之風速變化

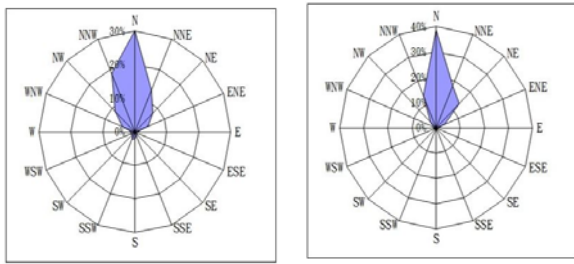


圖9 急速成長波浪發生前(左)後(右)2小時風向變化

4.3 鋒面引致型急速成長波的預測

急速成長波浪生成時之天氣系統，其中有鋒面通過者占有很大的比例。本研究探討這類因為鋒面引起之急速成長波浪的特性，並嘗試尋求其與氣象因子之間的關係，作為後續進行急速成長波預測的基礎。本文取得中央氣象局提供的2005年至2012年地面天氣圖，篩選出新竹海域資料完整且典型的急速成長案例共有27例。

本研究認為影響急速成長波浪的氣象因子至少有以下四個：鋒面移動速度(V_F)、鋒面期間最大平均風速(\bar{u}_{max})、鋒面期間平均風速成長量($\Delta\bar{u}$)、波浪成長歷時(Δt)，目標為探討影響急速成長波浪之最大示性波高以及波浪成長速率的因子，用以上四個氣象因子探討多變量分析的相關性。本文利用線性多變數迴歸建立急速成長波浪高預測模型，測試不同變數組合，將前述27個案例中，其中14個案例做為率定，其他13個案例做為驗證，結果發現急速成長波高增長量與鋒面移動速度、平均風速之變化量及急速成長波的延時有關，其定量關係如式(11)

$$\Delta H = 0.1421 + 0.0093V_F + 0.0942\Delta\bar{u} + 0.1213\Delta t \quad (11)$$

將其他13個案例進行驗證，結果如圖10，圖中驗證案例的波高成長量繪在橫軸，利用(11)式關係式求得之波高成長量繪於縱軸，兩者相關係數達0.70，顯示利用上述關係式推算急速成長波的波高成長量具有不錯的結果。

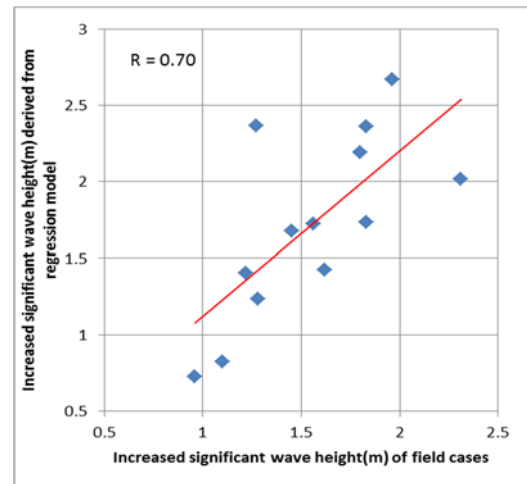


圖10 波高成長量(ΔH)預測模式之驗證

五、結論

瞬變海象可能讓人們應變不及，因而遭受傷害。本計畫所研究之瞬變海象包含外洋的異常波浪、近岸的異常波浪(即俗稱之瘋狗浪)以及急速成長波浪等三種。針對外洋異常波浪，分析台灣近岸浮標(龍洞、花蓮、鵝鑾鼻、七股和新竹)以及外洋浮標(東沙和台東外洋)，探勘得到2642筆危險異常波浪(高度超過2m的異常波浪)，其危險異常波浪發生機率 $(4.68\sim 14.2)\times 10^{-5}$ ，意即連續約每7000~21000個波會出現一危險異常波浪，此結果也比Baschek and Imai(2011)計算美國太平洋的異常波浪發生機率還高，同時也發現外洋海域發生的機率會高於近岸海域。在異常波浪機率預測的部分，本計畫彙整國外近期研究建議，透過非線性波浪理論推導異常波浪發生機率，推導得知異常波浪發生機率與波浪數目以及水位峰度有關，經由連續觀測實測資料驗證，確認此理論推導在峰度係數超過3時有較為合理的估算結果，平均無因次均方根誤差為18%。

在近岸異常波浪(瘋狗浪)研究方面，以龍洞測站海象資料與當時的氣象預報資料，分別透過群集分析演算法建置6小時瘋狗浪擊落海預警模式，使用龍洞海域附近20公里內41落海案件進行驗證，結果顯示以群集分析方法建置前置時間6小時的預警系統，其準確性都可達九成以上。

針對急速成長波浪分析，本研究分析龍洞浮標近15年資料中急速成長波浪之探勘，共尋得671案例，平均每年45例。另外，澎湖浮標6年資料中發現490件案例。分析結果顯示，在龍洞和澎湖海域之急速成長波浪主要是發生於鋒面通過或大陸冷氣團南下，而急速成長波浪的發生後，風速明顯上升且風向有集中的趨勢。除此，本研究嘗試以鋒面移動速度、鋒面強度以及鋒面延時為參數，透過多項式迴歸建立急速成長波高預測經驗式，驗證結果確認模式計算所得與實測比較之相關性達0.7。

謝致

本研究係交通部中央氣象局「災害性瞬變海象之研究(2/4)」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

- 呂蕙君，2007，碧砂港外急速成長波浪之探討，國立台灣海洋大學碩士論文。
- 蔡政翰、林盈成、曾相茂，2001，群波與瘋狗浪，海洋工程學刊，第一卷，第一期，第71-82頁。
- Baschek, B. and Imai, J. (2011), Rogue wave observations of the US West coast, *Oceanography*, Vol. 24, pp. 158-165.
- 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 non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp.245-265.
- Sand, S.E., Hansen, N.E.O., Klinting, P., Gudmestad, O.T., and Sterndor, M.J. (1990), Freak Wave Kinematics in: *Water Wave Kinematics*, NATO ASI Series E, 178, Kluwer Academic, pp. 535-550.