

應用可適隨機搜尋法率定 SWAN 波浪模式

楊大成¹ 范揚洺² 李汴軍³ 高家俊⁴ 王仲豪⁵

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系研究生

² 國立成功大學水利及海洋工程所博士後研究員

³ 華梵大學環境與防災設計學系副教授

⁴ 國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心主任

⁵ 經濟部水利署水文技術組

摘要

颱風期間所產生之颱風波浪不僅對海岸工程、海事結構物造成傷害也嚴重威脅濱海居民之生命財產安全。本研究以德國 HZG 風場做為 SWAN 波浪模式的輸入值，並對過去十年間之第二路徑颱風所造成之颱風波浪進行率定與校驗。本研究首先透過敏感度分析決定模式率定之參數，結果顯示 C_{ds} 為主要影響模式輸出結果之參數，底床摩擦係數以及碎波消散係數並沒有顯著的影響。本研究進一步利用可適隨機搜尋法配合 OBJ 函數搜尋 C_{ds} 之最佳參數值，使模式結果盡可能與實測資料一致。以碧利斯和蓄密颱風驗證最佳參數值之適用性並與龍洞、蘇澳與花蓮浮標所測得之波浪資訊做比較，結果顯示模式率定後之模擬結果明顯改善示性波高之模擬。

關鍵詞：颱風波浪、可適隨機搜尋法、率定

Application of Adaptive Random Search for Calibrating the SWAN Wave Model

Ta-Cheng Yang Yang-Ming Fan* Beng-Chun Lee Chia Chuen Kao Jong-Hao Wang

* Postdoctoral Fellow, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Typhoons play a major role in engineering and environmental problems. In this study, we used HZG high-resolution wind field to drive the SWAN wave model. Before the model can be applied to the specific region, we have to calibrate the parameters of the wave model. First of all, we selected the 3 most important parameters from the source term of the SWAN wave model and subjected them to sensitivity analysis to determine which parameter is the most sensitive. The result showed that C_{ds} is the most sensitive parameter. After sensitivity, we adopted adaptive random search (ARS) to find the optimal value of the C_{ds} for improving the simulation of typhoon waves. The accuracy of simulations of significant wave height using calibrated value of C_{ds} in the SWAN wave model was greatly improved over reference simulations at the Longdong, Suao and Hualien buoy station.

Keywords: Typhoon waves; Adaptive Random Search; Tuning

一、前言

颱風為每年影響台灣最嚴重之天氣型態，平均每年約有 3~4 個颱風侵襲台灣，期間所產生之颱風

波浪不僅對海岸工程、海事結構物造成傷害也嚴重威脅濱海居民之生命財產安全。因此，研究颱風氣候變遷的趨勢可作為日後海岸保護、政策決策及工程設計時之參考。

探討颱風波候變遷需要長時間尺度以及均勻空間分佈的資料作為分析的依據，才能有效的了解波候於時間及空間上的變化趨勢。但台灣的海氣象觀測計錄顯示僅有近十年的波浪觀測資料，因此利用長時間尺度且均勻空間分佈的風場資料做為數值波浪模式的輸入值來推算颱風波浪，重建過去數十年之波浪資料，進而探討波候變遷之趨勢，此為可行之方法。由於本研究面對的課題是颱風波浪，颱風在極短時間內變化快速，NCEP/NCAR 的重建風場資料空間解析度是 200km x 200km，時間解析度是 6 小時，無法滿足需求，又風場資料是數值波浪模式重要的輸入值，因此若能以合理的高解析重建風場資料輸入數值波浪模式，預期可更詳細描述颱風波浪特性。德國 HZG 研究中心以動態格網細化 (Dynamical Downscaling) 重建近 50 年 (1958~2007) 歷史風場資料 (von Storch et al. 2000; Feser and von Storch 2007)。重建風場資料 (Reanalysis wind field) 在時間上的解析度是一天 24 次發佈地表氣壓與溫度分析場與地面 10 公尺風場分析場，空間上的網格解析度有兩種，一為 50 公里 (0.5 度)，另一為 18 公里 (0.165 度)。此高解析重建風場資料與實測資料比對驗證，已證明該風場的合理性，此重建風場資料為本研究重要資料來源。

本研究總目標為以海岸安全調適策略的觀點，探討台灣海域之近 50 年來颱風波候變化趨勢，藉由對歷史資料之統計分析得以探討到目前為止氣候變遷對海岸造成的衝擊，對未來變動有比較科學依據的預測。為了達成總目標，本篇論文研究工作為 SWAN 數值波浪模式校驗。

由於數值波浪模式主要的經驗公式中包含許多可調整的參數，這些參數值會受到風場資料的來源不同而有所差異，因此，利用數值波浪模式推算波浪之前，必須找到這些參數的最佳值以改進模式模擬波浪之結果。故本研究首先針對 SWAN 波浪模式中可調整之參數做敏感度分析，以了解不同參數對模式輸出結果之影響程度；其次，利用 ARS 法配合 OBJ 目標函數搜尋參數之最佳值；最後模擬碧利斯以及薔蜜颱風期間之颱風波浪，並以台灣東北角之龍洞、蘇澳和花蓮浮標觀測資料進行校驗，其結果可做為後續研究颱風波候變遷之用。

二、SWAN 波浪模式

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) 波浪模式為荷蘭 Delft 大學所發展之第三代波浪模式 (Booij et al. 1999)。其所用之控制方程式為求解二維的波浪作用力平衡方程式 (action balance equation)，如 eq. (1) 式：

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{total}}{\sigma} \quad (1)$$

上式左側之第一項為運動波譜密度函數之時變項，第二與第三為傳導項，第四項為與第五項分別表示波浪頻率位移與折射效應， $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ 為波浪作用力密度波譜 (action density spectrum)， σ 與 θ 分別表示成分波之頻率與角度， $S_{total}(\sigma, \theta)$ 表示波浪傳遞時可能發生之能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數。

2.1 經驗參數選取

SWAN 波浪模式中之源函數方程式提供了許多選擇，包括風浪線性及指數成長項 (S_{in})、四個波波非線性交互作用項 (S_{nl4})、白沫消散項 (S_{ds})、三個波波非線性交互作用項 (S_{nl3})、碎波消散項 (S_{br})、底床摩擦項 (S_{bf}) 等。

$$S_{total} = S_{in} + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{br} + S_{bf} \quad (2)$$

2.1.1 白沫消散項

SWAN 波浪模式中的白沫消散項公式採用 Alves and Banner (2003) 所提出的飽和型態消散項，而 Van der Westhuysen et al. (2007) 則將飽和型態消散項公式省略了紊流以及長短波交互作用之特性，並將其轉換為頻率譜型式表示如下：

$$S_{wc}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left[\frac{B(k)}{B(r)} \right]^{1/2} g^{1/2} k^{1/2} E(\sigma, \theta) \quad (3)$$

其中 $B(r)$ 為一門檻值，當 $B(k) > B(r)$ 時波浪碎波。 C_{ds} 為一可調整之係數，當值越大則消散地能量越大，反之則越小。

2.1.2 底床摩擦消散項

底床摩擦項 (bottom friction) 的通式為

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (4)$$

上式中的 C_{bottom} 為底床摩擦係數，雖然許多學者提出不同底床摩擦係數之計算理論，但部份複雜

之計算是其實用性仍須加以驗證。

2.1.3 碎波消散項

關於碎波消散項之公式如下

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (5)$$

其中 D_{tot} 為因碎波所造成每單位水平平均能量消散率，其表示式為

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_{max}^2 \quad (6)$$

上式中 $\alpha_{BJ} = 1$ ， H_{max} 為最大可能波高， $\bar{\sigma}$ 為平均角頻率， Q_b 為碎波微小量。

三、參數敏感度分析

本研究從 SWAN 波浪模式之源函數中針對波浪於深海傳遞至近岸時主要影響波浪能量改變之消散項各選取一參數做敏感度分析。分別為 C_{ds} (白沫消散係數)、 C_{bottom} (底床摩擦係數) 以及 α_{BJ} (碎波消散係數)。

本研究以實際風場及水深地形作為參數敏感度分析測試之輸入條件。採用德國 HZG 研究中心所提供的再分析風場資料作為波浪模式模擬之風場，風場範圍為東經 115 至 135 度、北緯 20 到 35 度，網格間距為 0.5 度，風場資料的時間從 2007 年 10 月 3 日至 2007 年 10 月 10 日為柯羅莎颱風期間。其時間間格為一小時；水深資料來源為 NGDC (National Geophysical Data Center) 之全球海底地形資料庫，其網格間距為 1 弧分，資料範圍為東經 115 至 135 度、北緯 20 到 35 度，並輸出台灣東北角龍洞、蘇澳、花蓮資料浮標位置測試參數敏感度，模式輸出範圍如圖一所示。

於參數敏感部分分析時，模式預設參數之計算結果為對照組；分別調整參數 $\pm 10\%$ ， $\pm 20\%$ 和 $\pm 50\%$ 之比例，將其結果作為實驗組。分析實驗組以及對照組之資料，所獲得之誤差即為各參數對計算結果之反應程度，以此誤差作為判斷各參數敏感度之標準，再將各參數於敏感度分析測試後所得到之誤差大小作順序排列，此排列順序即是各參數反應模式計算結果之影響程度依據。

為了獲得對照組以及實驗組之時序列資料誤差，本研究以目標函數(OBJ)作為判斷參數敏感度之評估指標，在最小平方差方法下另外乘上一權重係

數，其優點在於可針對選取的每一點時序列資料作加權修正。其中目標函數(OBJ)的定義如 (7) 所示；權重係數公式的定義如(8)式所示，式中將分母乘以係數 2，使分子分母的個數一致。

$$OBJ = \sum_{i=1}^N \left[(O_i - M_i)^2 \times WT_i \right] / N \quad (7)$$

$$WT_i = (O_i + \bar{O}) / (2 \times \bar{O}) \quad (8)$$

其中， O_i 為對照組資料、 M_i 為實驗組資料、 N 為資料比數、 WT_i 為權重係數、 \bar{O} 對照組資料之平均值。

由表 1 的結果顯示參數敏感度排序為： C_{ds} (白沫消散係數)、 C_{bottom} (底床摩擦係數)、 α_{BJ} (碎波消散係數)。

表 1 柯羅莎颱風期間各資料浮標站之波高 OBJ 誤差表

參數	C_{ds}	C_{bottom}	α_{BJ}
誤差	5.21	0.004	0.0003
排序	1	2	3

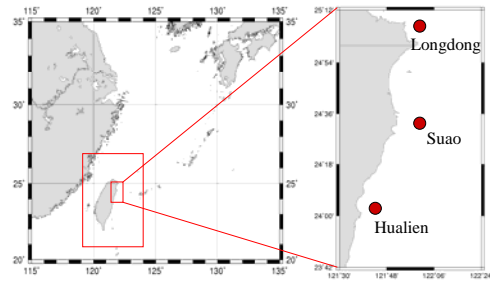


圖 1 模式計算範圍及資料浮標站相關位置圖

四、結果與討論

4.1 應用可適隨機搜尋法搜尋參數最佳值

本研究應用 ARS (Torn and Zilinskas, 1989) 法來搜尋參數最佳值，因為此法具有效率及簡易的優點，且成功的應用於數值波浪模式的率定 (Lee et al., 2009)。ARS 法之作業程序歸納如下：

1. 訂定參數搜尋範圍。
2. 選擇一焦點
3. 在搜尋範圍內產生 N 個點，並計算各點之函數值，記憶最佳值之位置。
4. 重複步驟 2，直到指定次數為止。在第 i 次時，將原始範圍縮小至原始範圍之 10^i 分之一，且仍

- 以原焦點為中心，記憶每一次最佳值之位置。
- 比較所有記憶值，選擇一最佳函數值，重新定義最佳函數值位置為焦點，並紀錄新的焦點是在第幾個範圍中尋得。
 - 若最佳函數值非最小範圍中尋得，則重新定義此點為焦點，並以相同之搜尋範圍間距，重複步驟3~5，直到最佳值落入指定之最小範圍內，此點即為所求之最佳值。

本研究以泰利颱風 (Talim, 2005/08/28 ~ 2005/09/04)、海棠 (Haitang, 2005/07/15 ~ 2005/07/22)、柯羅莎 (Krosa, 2007/10/03 ~ 2007/10/10) 作為調整模式參數之案例，在調整的過程中，本研究定義大於兩米以上之波高為颱風波浪，因此針對大於兩米之波高對模式做率定。在調整模式方面，利用 ARS 法配合 OBJ 誤差對模式參數做調整，搜尋到的參數值使模式的輸出波高與浮標所觀測的波高之 OBJ 誤差為最小。最後，透過 ARS 法不斷的縮小搜尋範圍，可取得參數最佳值從原本之 5.0×10^{-5} 改為 1.6×10^{-4} 。

4.2 颱風波浪模擬之驗證

本節以率定後之最佳參數值模擬碧利斯颱風 (Bilis, 2006/07/10~2006/07/17) 和 薔蜜颱風 (Jangmi, 2008/09/25~2008/10/02) 期間之颱風波浪以驗證參數之適用性。

圖 2~圖 4 為碧利斯颱風期間於龍洞、蘇澳及花蓮資料浮標站之示性波高時序列比較圖，圖中的圓點表示示性波高之實測資料，實線為參數調整前示性波高之模式輸出值，虛線則是參數調整後示性波高之模式輸出值。由圖中的結果可知道，應用最佳化參數值所模擬之示性波高與實測資料有良好的的一致性，在大於兩米波高的模擬上也能與實測資料吻合，但在花蓮浮標位置所模擬的示性波高則有偏大的趨勢。

圖 5~圖 7 為薔蜜颱風期間於龍洞、蘇澳及花蓮資料浮標站之示性波高時序列比較圖。圖中的圓點表示示性波高之實測資料，實線為參數調整前示性波高之模式輸出值，虛線則是參數調整後示性波高之模式輸出值。圖中顯示應用最佳化參數值所模擬之示性波高較調整前更接近實測資料，但在尖峰波高的模擬上略小於實測資料，且於花蓮資料浮標站所模擬之示性波高依舊有大於實測資料的趨勢。

除了定性上的比較，本節還引用四個統計誤差值作定量上的討論，分別為 OBJ、平均誤差 (Bias)、均方根誤差 (RMSE)、與分散指標 (SI)，表 2~表 3 為碧利斯與薔蜜颱風期間於各資料浮標站之統計誤差值，由表中的結果顯示，應用最佳化參數模擬大於兩米之示性波高於各資料浮標站之誤差值皆明顯的改善。

由以上的比對資料知道由 ARS 法配合 OBJ 函數所搜尋到的最佳參數值能確實改善模式模擬的示性波高。

表 2 碧利斯颱風期間各資料浮標站示性波高統計誤差表

Bilis	Hs	Longdong	Suao	Hualien
OBJ	Reference	3.28	5.43	5.97
	Calibrated	0.26	0.91	1.89
Bias	Reference	1.64	2.13	1.73
	Calibrated	0.17	0.63	0.33
RMSE	Reference	1.81	2.37	2.57
	Calibrated	0.52	0.99	1.45
SI	Reference	0.57	0.8	0.84
	Calibrated	0.17	0.33	0.47

表 3 薔蜜颱風期間各資料浮標站示性波高統計誤差表

Jangmi	Hs	Longdong	Suao	Hualien
OBJ	Reference	4.53	12.46	24.99
	Calibrated	2.35	1.99	6.39
Bias	Reference	1.24	3.31	4.49
	Calibrated	-0.39	1.06	2.05
RMSE	Reference	2.1	3.51	5.03
	Calibrated	1.44	1.41	2.57
SI	Reference	0.54	0.78	1.32
	Calibrated	0.37	0.31	0.68

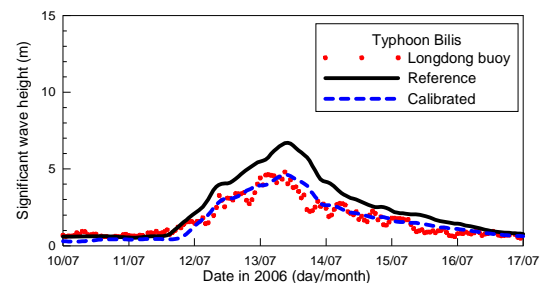


圖 2 碧利斯颱風期間龍洞資料浮標站示性波高時序列比較圖

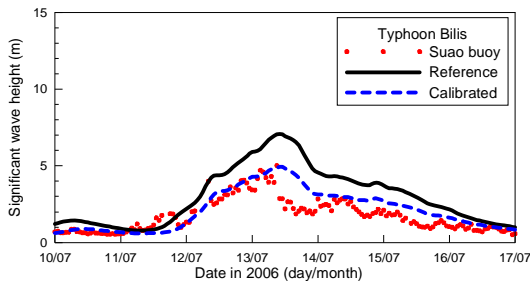


圖 3 碧利斯颱風期間蘇澳資料浮標站示性波高時序比較圖

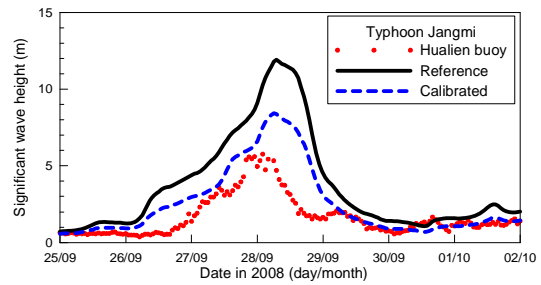


圖 7 薔蜜颱風期間花蓮資料浮標站示性波高時序比較圖

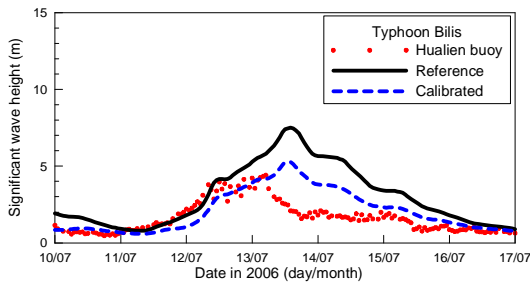


圖 4 碧利斯颱風期間花蓮資料浮標站示性波高時序比較圖

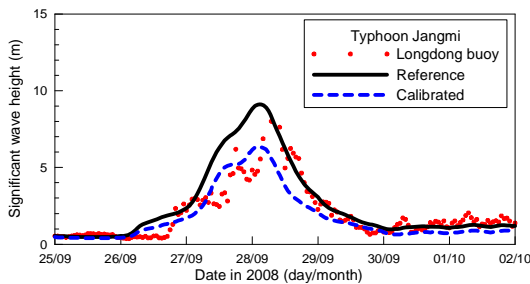


圖 5 薔蜜颱風期間龍洞資料浮標站示性波高時序比較圖

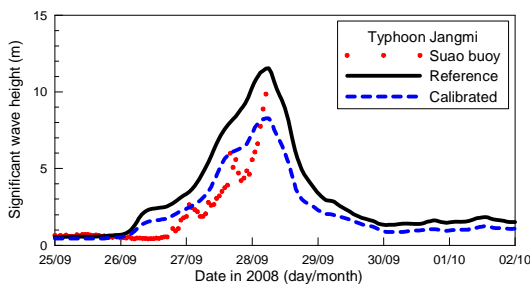


圖 6 薔蜜颱風期間蘇澳資料浮標站示性波高時序比較圖

五、結論

為了研究長期的颱風波候變遷，利用模擬的颱風波浪資料為一可行的方法。又因颱風具有時間以及空間上變化快速的特性，本研究利用德國 HZG 研究中心提供的高解析度風場作為數值波浪模式的輸入。為了達成長期波候變遷的研究與建立颱風波浪資料庫，本研究對 SWAN 模式進行參數率定，並以過去十年間第二路徑颱風案例做驗證，期望所獲得之最佳參數能作為後續長期波候變遷研究之應用。

為了瞭解模式中參數對計算結果影響程度的大小，本研究針對主要影響波浪於傳遞過程中能量消散之參數做敏感度分析，其分析結果顯示敏感度的排序為： C_{ds} (白沫消散係數)、 C_{bottom} (底床摩擦係數)、 α_{BI} (碎波消散係數)。

由參數敏感度分析知道主要影響模式輸出結果之參數為 C_{ds} ，因此本研究利用 ARS 法配合 OBJ 誤差調整 C_{ds} 之參數值，獲得之最佳參數值為 1.6×10^{-4} 。為了驗證其參數值的適用性，本研究用此參數值模擬颱風碧利斯與颱風薔蜜，其結果顯示在颱風波浪期間，示性波高的推算有明顯改善率定前之推算值。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「氣候變遷對波候影響之研究」(編號 NSC99-2221-E006-234)之研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。中央氣象局與水利署慷慨提供相關波浪資料，特此一並致謝。

參考文獻

1. Alves J.H.G.M., and Banner M.L. (2003) “ Performance of a Saturation-based Dissipation-rate Source Term in Modeling the Fetch-limited Evolution of Wind Waves, ” *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 36, pp. 1274-1298.
2. Booij N., Ris R.C., and Holthuijsen L.H. (1999) “A Third Generation Wave Model for Coastal Region. 1. Model Description and Validation,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 7649-7666.
3. Feser F. and von Storch, H. (2007) “A Dynamical Downscaling Case Study for Typhoons in Southeast Asia Using a Regional Climate Model,” *Monthly Weather Review*, Vol. 136, pp. 1806-1815.
4. Lee B.C., Fan Y.M., Chuang Laurence Z.H. and Kao C.C. (2009) “ Parametric Sensitivity Analysis of the WAVEWATCH III Model,” *Terr Atmos Ocean Sci*, Vol. 20, pp. 425-432.
5. Törn, A. and Zilinskas A. (1989) “ Global Optimization,” *Springer Verlag*, New York, pp. 255.
6. Van der Westhuysen A.J., Zijlema M., and Battjes J.A. (2007) “ Nonlinear Saturation-based Whitecapping Dissipation in SWAN for Deep and Shallow Water,” *Coastal Engineering*, Vol. 54, pp. 151-170.
7. von Storch, H., Langenberg, H. and Feser, F. (2000) “A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purpose,” *Monthly Weather Review*, Vol. 128, pp. 3664-3673.