

應用 SWAN 模式於台灣西部海域之波浪預測

歐善惠¹

許泰文¹
水利及海洋工程學系¹
國立成功大學

臧效義²

廖建明¹
河海工程學系²
國立海洋大學

方介群¹

摘要

本文應用荷蘭 Delft 大學所發展的第三代風浪模式 SWAN 作為台灣附近海域之颱風波浪推算。模式係應用有限差分技巧來求解二維波浪頻譜傳播方程式，方程式中對於物理授受機制的的作用項，如成長項、消散項及非線性作用項亦加以考慮。本文中利用實際季風波浪資料來驗證模式之合理性，並推算不同的實際颱風路徑所形成之波浪，結果發現整體波高與週期分佈趨勢尚稱合理，其中以第二種及第三種颱風路徑的推算結果較佳。

一、前言

台灣本島位於北太平洋西部處於亞熱帶區域，為太平洋西岸颱風生成與行進路徑上，在夏秋兩季常受到颱風的威脅，因其地理位置位於大陸棚之交界處，東岸陡峭水深變化劇烈，西岸台灣海峽水深平緩。尤其台灣西岸地區，由於海岸平坦加上地層下陷之因素，使得颱風來臨時由於低氣壓與強風之作用下，造成近岸水位上升，使得碎波線靠近海岸線，碎波線內移將增加颱風波浪對港灣結構物的破壞力，使防波堤或沈箱因承受巨大波力而有潰堤之危險，海堤也因水位上升使波浪越過堤頂而造成海水倒灌。由於台灣地理位置與氣象條件特殊，使得過往之風浪模式並不能有效的應用在台灣之此類島嶼的波浪預測。因此為了防範海岸地區受到颱風波浪所帶來的破壞，建立合適的波浪模式來模擬颱風造成海岸地區的波浪變化成為首要的任務，良好的波浪模式不僅可以有效預測出巨浪的破壞時間及區域，而且可作為日後設計港灣結構物的標準。

波浪預報數值模式首先是由 Gelci 和 Vassal (1957) 提出後，大致上可將整個波譜數值計算模式分成三個階段，分別稱之為第一、第二及第三代波譜法。在 1970 年以前的波譜法統稱為第一代波譜法，如日本學者 Uji 和 Isozaki (1972) 之 MRI 模式，義大利學者 Cavaleri 和 Malanotte-Rizzoli (1981) 的 VENICE 模式都是屬於第一代波譜法。歐美國家於 1968 年於北海進行一大型現場觀測計畫稱為 JONSWAP，其研究成果指出風浪波譜中的發展除了自風吸取能量外，不同成份波間的非線性交互作用在波浪發展期間亦扮演著極重要的角色，這個論點造就新一代風浪模式的誕生，1970 年至 1985 年中所發展出的風浪模式可稱之為第二代波譜法。SWAMP (1985) 將第一代與第二代之作一系統的整理，分析出對於未來風浪模式的改進之處，加上近十年來波浪演化的過程都有較明確的瞭解，至於波譜密度函數的計算可直接由積分波譜密度傳播方程

式來求得，所以對波譜的發展並不加以任何的限制與規定，此類的風浪模式有效的改善第一代與第二代的缺失，稱之為第三代波譜法。如 WAMDI (1988) 所提出的第三代風浪模式 WAM (Wave Model)，同時它也是也是目前各國最常使用的波譜模式，另外 Tolman (1989) 加入潮流對波浪的影響而發展的 WAVEWATCH 模式。

近幾年由荷蘭 Delft 大學主導發展之波浪模式 SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Booij 等人，1996)，統合以往學者之研究，模式具有第三代風浪模式的特徵，且此模式在能量成長及消散項的參數選擇上比其他模式具有更多的彈性，同時提供第一代、第二代與第三代的相關波浪成長與消散參數供使用者應用，此模式能計算波浪在時間與空間領域中之傳遞、淺化、波與波之間的非線性交互作用、波浪受風之成長、碎波與底床造成波浪能量衰減及波浪受到海流與地形變化而產生之頻率位移與折射。此模式也經過學者 Holthuijsen 等人 (1997)，Booij 等人 (1998) 對實測風浪資料作一驗證。

由於 SWAN 風浪模式可根據不同的海域選定適當參數，因此實際應用上 SWAN 風浪模式比其他風浪模式更加具有前瞻性與廣泛之適用性。因此本文應用荷蘭 Delft 大學所發展的第三代波浪模式 (SWAN) 推算颱風在台灣附近海域的波浪特性，並與實測值作一驗證，以瞭解 SWAN 模式應用在台灣附近海域推算波浪時之適用性與應用性。

二、理論基礎

(一) 颱風風場

模式中能量的來源為颱風所造成的氣壓分佈，因此模擬颱風風場時必須掌握颱風當時大氣壓力分佈及特性，由於目前氣象局所提供的實測颱風風場資料無法滿足颱風波浪模式的需求，所以必須藉助模型颱風的建立。本文利用 Rankin-Vortex Model 作為模型化颱風風場，在此模式內所考慮到的外力有

壓力梯度力、離心力及地球自轉所導致的科氏力。本文所選用的壓力分佈形式是 Hydromet-Rankin-Vortex Model (Holland, 1980), 它的壓力剖面可由式 (1) 表示,

$$P_r = P_0 + \Delta P e^{-r_0/r} \quad (1)$$

其中 P_r 為距颱風中心 r 處的壓力, P_0 為颱風中心氣壓, r_0 為最大暴風半徑, $\Delta P = P_\infty - P_0$ 為距颱風中心無限遠的氣壓 P_∞ 與中心氣壓 P_0 的氣壓降。而颱風最大暴風半徑則利用 Graham 和 Nunn (1959) 的最大暴風半徑的公式如下式:

$$r_0 = \{28.52 \tanh[0.0873(\phi - 28)] + 12.22 \exp[(P_0 - 1013.2)/33.86] + 0.2[V_f \times 1.852 + 37.22]\} / 1.852 \quad (2)$$

式中 ϕ 為緯度, P_0 為中心氣壓值, V_f 為颱風前進速度。旋衡風 (Cyclostrophic Wind) 由下式計算:

$$U_r^2 = \frac{1}{\rho_a} r \frac{dP}{dr} = \frac{1}{\rho_a} \Delta P \left(\frac{r_0}{r}\right) e^{-r_0/r} \quad (3)$$

其中 ρ_a 為空氣密度, U_r 為距颱風中心 r 處的旋衡風速。梯度風 (Gradient Wind) 關係如下

$$V_r^2 + frV_r = \frac{1}{\rho_a} r U_r^2 \quad (4)$$

$$V_r = -0.5fr + \sqrt{(0.5fr)^2 + U_r^2} \quad (5)$$

其中 V_r 為距颱風中心 r 處的梯度風, $f = 2\omega \sin\phi = 0.525 \sin\phi$ 為科氏參數, 式中 $\omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 為地球自轉角速度, ϕ 是緯度。因波浪模式所需的風速是海面上十公尺處的風速, 所以必須將梯度風轉換成海面上十公尺處之風速 V_{rs} , 如下式:

$$V_{rs} = 0.865V_r \quad (6)$$

考慮颱風的前進速度所造成的影響, 式(5)可寫成

$$V_{rs}^* = V_{rs} + 0.5V_f \cos(\theta) \quad (7)$$

其中 V_{rs}^* 為行進中颱風距颱風中心 r 處的實際合成風速, V_f 為颱風前進速度, θ 為測點速度 V_{rs}^* 之風向與颱風移動速度 V_f 風向的夾角。

(二) 波浪模式

SWAN 模式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), 此平衡方程式是由 Hasselmann 等人 (1973) 所提出, 如下式所示

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (9)$$

上式左側之第一項為運動波譜密度函數之時變項, 第二與第三項為傳導項, c_x 、 c_y 分別表示 x 與 y 方向之傳導速度, 第四與第五項分別表示由於地形與洋流所造成的波浪頻率位移與折射效應。式中 $N(\sigma, \theta)$ 為作用力密度波譜 (action density spectrum), $S(\sigma, \theta)$ 為波浪傳遞時可能發生之多種波浪能量成長、消散及非線性交互作用。其中 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$, $E(\sigma, \theta)$ 為能量密度波譜 (energy density spectrum), σ 與 θ 分別表示成份波之頻率與角度。

三、計算結果與討論

(一) 季風風浪

為了驗證 SWAN 模式在台灣之適用性, 本節利用中央氣象局所提供的季風風場資料作為模式計算之用, 輸入資料時間為 1995 年 1 月至 3 月的風場, 其網格大小為 60×60 平方公里, 風場的時間間隔為 12 小時, 模式計算所需風場可由內差而得。模式計算範圍及地形水深如圖 1 所示, 南至北緯 15° 、北至北緯 30° 、西至東經 114° 、東至東經 130° 。計算時所用的座標是六度分帶系統座標, 通常在小範圍的轉換是不會造成任何影響, 但是應用到大範圍時就必須考慮此因素, 本文推算波浪的範圍位於較低緯度區域, 故因轉換而造成失真的現象並不嚴重。SWAN 模式所應用的計算格網大小為 12 公里, 各格網點上之能量波譜中最小與最大頻率分別為 0.01 Hz 至 0.5 Hz, 採指數遞增分佈共 20 個頻率帶, 方向波譜之解析度為 30 度, 共計 12 個方位角。利用東吉島的波浪實測資料作為模式的驗證, 圖 2 與圖 3 分別為 1 月份中, 東吉島的實測波浪數據及 SWAN 模式計算出的有義波高及週期的比較圖。圖中黑點為實測波高及週期值, 實線為 SWAN 模式計算值, 從圖中可看出 SWAN 模式之計算結果與實測資料在趨勢上大致相同, 但週期有偏低的現象。SWAN 模式對於 1 月份的波高值所計算出的相關係數為 0.73; 由相關係數可看出模式結果尚稱合理。

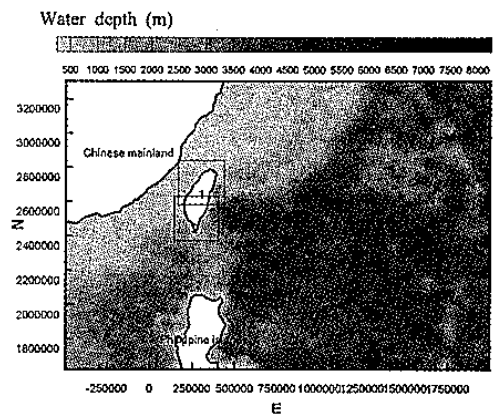


圖 1 模式計算範圍及水深圖 (方框區域 1 為台灣中北部計算範圍, 區域 2 為台灣中南部計算範圍)。

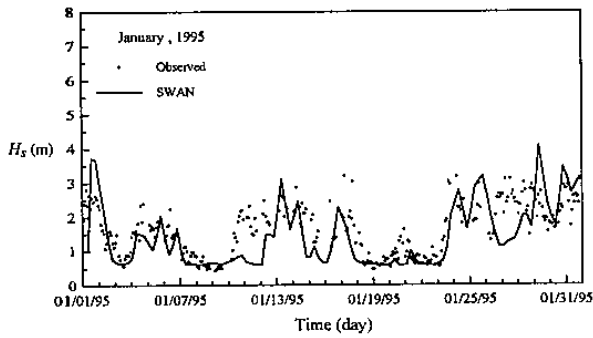


圖 2 1995 年 1 月東吉島有義波高時序列變化圖

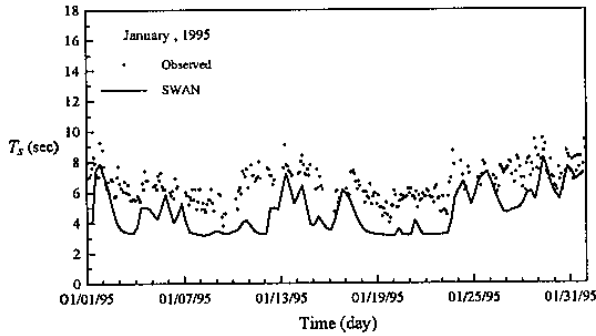


圖 3 1995 年 1 月東吉島有義週期時序列變化圖

(二) 颱風風浪

根據中央氣象局的颱風資料統計顯示，侵襲台灣本島的颱風路徑主要可分為七種，其中路徑 1 至 4 佔 83% 左右，因此本節分別利用類屬這 4 種颱風路徑及實測波浪資料較完整的颱風來作為模式驗證之用，其中包括類屬於第一、第二、第三及第四種颱風路徑之賀伯颱風、安珀颱風、肯特颱風及瑞伯颱風，以下便依照各個颱風的基本資料及計算結果作一分析。

模式之遠域計算範圍與地形水深資料如圖 1 所示，計算範圍足可包含整個颱風的影響範圍。模式之格網大小約為 12 公里，頻率解析度的範圍介於 0.01 Hz 至 0.5 Hz，採指數遞增分佈共 20 個頻率帶，方向波譜之解析度為 6 度，共計 60 個方位角，計算時間間隔為 15 分鐘，模式中所需之風速與風向則採用上述所提出之模型化颱風之風速與風向，SWAN 模式中所需之各種係數皆採用 SWAN 中之建議值。為了提高計算之精度與準確性，利用巢狀格網 (nest grid) 的計算方法，將大範圍計算出的結果輸出作為計算台灣中北部及中南部範圍之邊界條件，兩者的計算範圍與水深圖如圖 4 與圖 5 所示，其格網的大小均為 2 公里。再利用台灣中北部及中南部的計算結果輸出各局部地形的波浪邊界條件，其中包括台南海域、新竹及東吉島等，波浪頻率、方向解析度與時間間隔的選用皆與遠域大範圍之條件相同，而格網大小為 300 公尺。利用巢狀格網的優點，將大範圍的計算結果輸出為小範圍之邊界條件，再進行小範圍的計算，如此一層一層推算至近岸處，可清楚模擬出颱風波浪於近岸處的變化。

1. 賀伯颱風

民國 85 年強烈颱風賀伯於呂宋島東方海面生成，之後以西北西方向向台灣前進，於 7 月 31 日 20 時在基隆與蘇澳間登陸，強度開始減弱，繼續偏西進行。賀伯颱風帶來強風豪雨，全國各地災情嚴重，航空、鐵路交通全面停飛、停駛，公路坍方、橋樑斷裂，嚴重受損。圖 6 為賀伯颱風路徑圖，屬於第 1 種颱風路徑。圖 7 與圖 8 為賀伯颱風於台灣西岸之台西測站之有義波高及週期圖，圖中黑點為波浪實測值，實線為模式計算值，虛點點線為颱風中心至測站距離，其中實測值最大波高發生時間為 7 月 31 日 8 時，波高與週期分別為 3 公尺與 3.3 秒，而模式計算出的最大波高發生時間為 8 月 1 日 6 時，波高與週期分別為 3.5 公尺及 9.4 秒，兩個整整相差 22 小時，而颱風中心距測站最短距離的時間為 8 月 1 日 5 時。因台西測站離賀伯颱風中心移動位置較遠，再加上台灣山脈地形的阻擋，導致風場發生變化而衰減，使得模型化颱風無法準確模擬風場，進而影響波浪模式之計算。

2. 安珀颱風

民國 86 年中度颱風安珀於呂宋島東方海面形成，颱風隨即以西北西後轉西北方向前進，於 8 月 29 日 4 時左右在花蓮秀姑巒溪北方附近登陸後，強度減弱，繼續以西北方向前進，造成本省公路多處坍方，鐵、公路及航空部分交通中斷，花蓮縣、台東縣及宜蘭縣的農業損失 14.6 億。圖 9 為安珀颱風路徑圖，屬於第 2 種颱風路徑。

圖 10 與圖 11 為安珀颱風於新竹測站的波高及週期分佈圖，其中黑點為新竹測站的波浪實測值，實線為模式計算值。新竹實測之最大波高值發生在 8 月 29 日 18 時，波高與週期分別為 2.18 米與 6 秒，至於模式所推算之最大波高發生時間於 8 月 29 日 20 時，波高與週期分別為 4.2 米與 8.01 秒，與實測最大值發生時間僅相差 2 小時。雖然颱風中心至測站最短距離的時間為 8 月 29 日 11 時，但從實測資料中可知，安珀颱風之外圍環流接近台灣時形成新竹測站第一次的大波高發生，當颱風登陸後，風場受地形影響而潰散，使得波高下降，當颱風中心通過中央山脈後，繼而形成另一次最大波高的發生，SWAN 模式可清楚的描繪出此種狀況的演變。但在波高與週期的預測上，受中央山脈的影響使得模型颱風無法模擬出風場因地形消散的變化，所以造成波高值偏大。

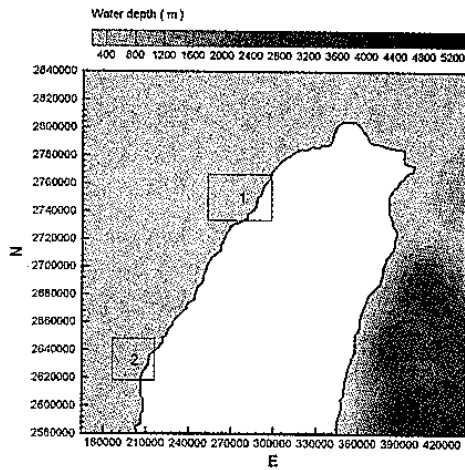


圖 4 台灣中北部計算範圍及水深圖
(方框區域 1 為新竹、區域 2 為台西海域)

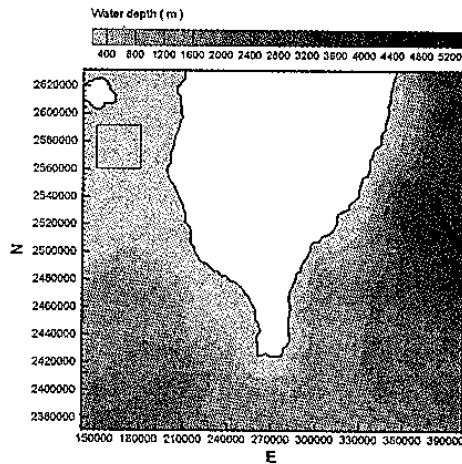


圖 5 台灣中南部計算範圍及水深圖
(方框區域為東吉島)

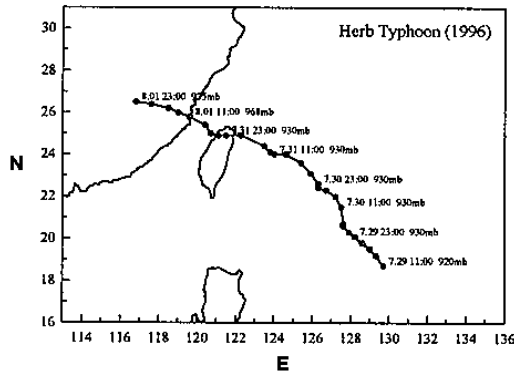


圖 6 賀伯颱風路徑圖

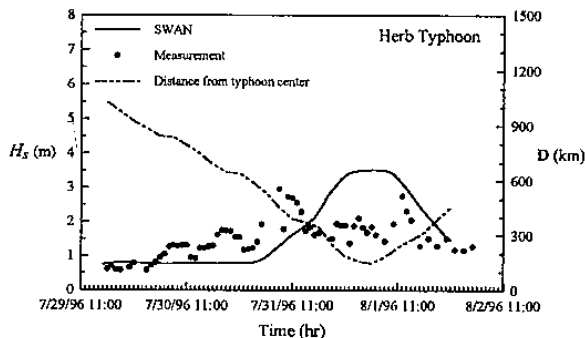


圖 7 賀伯颱風於台西測站之有義波高分佈圖

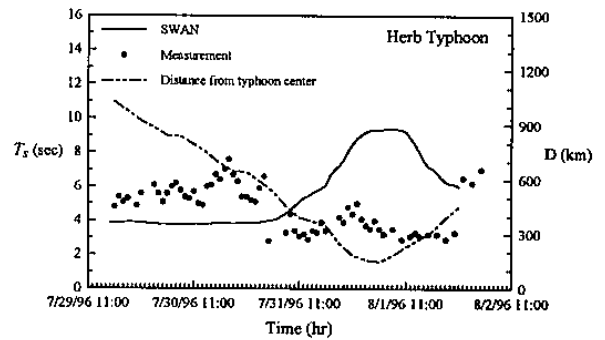


圖 8 賀伯颱風於台西測站之有義週期分佈圖

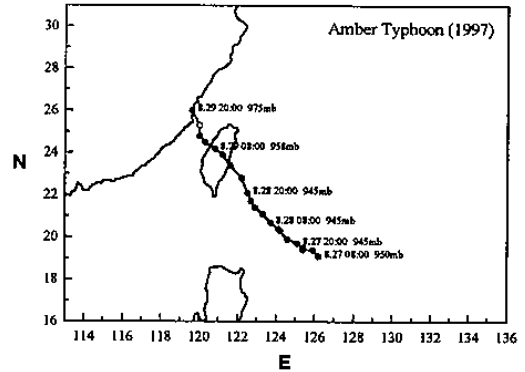


圖 9 安珀颱風路徑圖

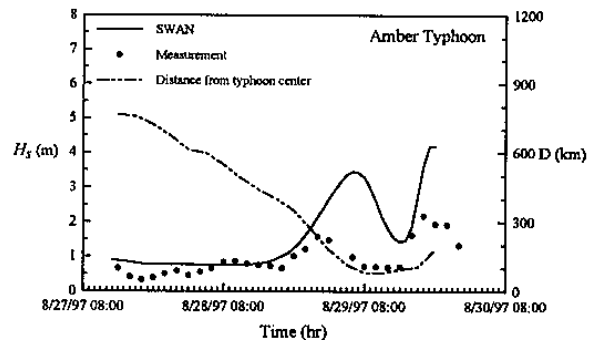


圖 10 安珀颱風於新竹測站之有義波高分佈圖

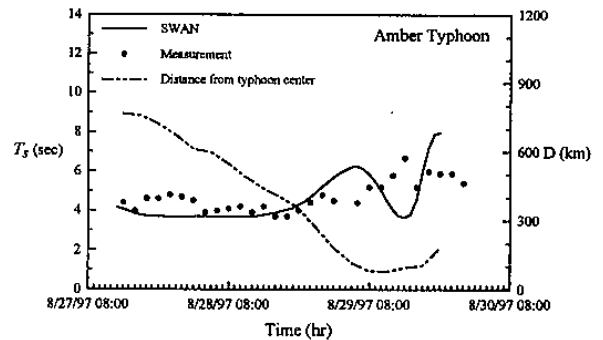


圖 11 安珀颱風於新竹測站之有義週期分佈圖

3. 肯特颱風

民國 84 年中度颱風肯特於呂宋島東方海面，形成後向西北方向前進，於 31 日 14 時在汕頭與香港之間登陸，強度減弱。東、南部地區有強風暴雨，鐵、公路部分中斷。圖 12 為肯特颱風路徑圖，屬於第 3 種颱風路徑。

圖 13 與圖 14 為肯特颱風於東吉島的有義波

高、週期分佈圖，圖中黑點為東吉島測站的波浪實測值，實線為模式計算值，虛點點線為颱風中心至測站距離。實測值的最大波浪發生時間為 8 月 31 日 4 時，波高與週期分別為 4.6 公尺與 10.1 秒，而模式計算出最大波高發生時間為 8 月 31 日 3 時，波高與週期分別為 4.9 公尺與 8.5 秒，實測值與模式計算出的最大波高發生時間幾乎相同。因為東吉島測站較接近颱風前進路線，且測站位於外島區，受陸地影響較小，所以波高的分佈相當一致，而週期分佈的在前半段則比實測值小。

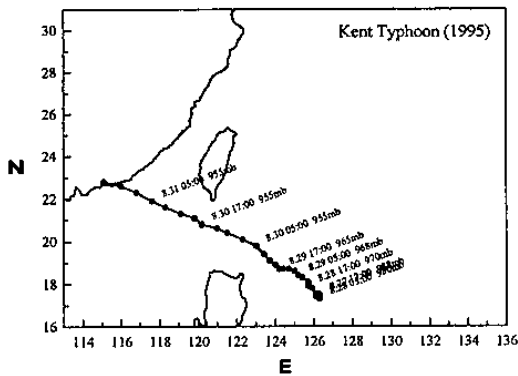


圖 12 肯特颱風路徑圖

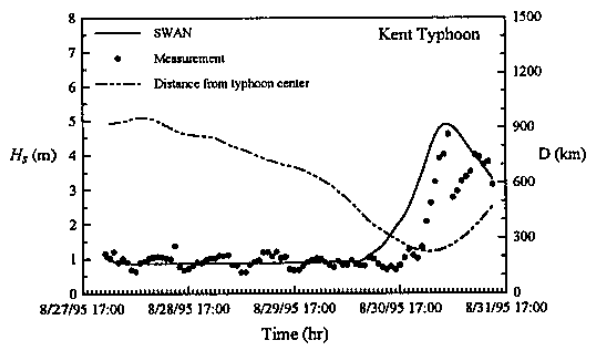


圖 13 肯特颱風於東吉島測站之有義波高分佈圖

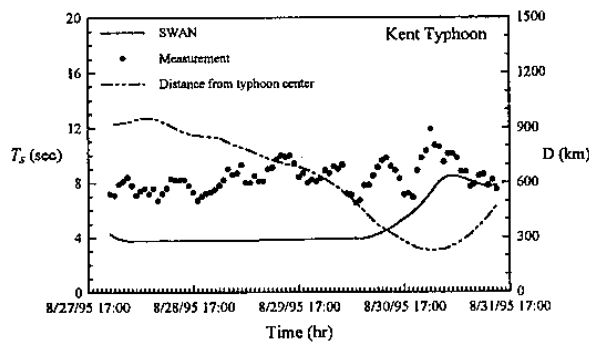


圖 14 肯特颱風於東吉島測站之有義週期分佈圖

4. 瑞伯颱風

民國 87 年強烈颱風瑞伯於恆春東南方海面生成後以西北方向前進，經呂宋島北部受地形影響減弱為中度颱風並轉向北方移動，經台東東方近海時轉為北北東方向前進，此時暴風圈籠罩全台，於 10 月 16 日晚間轉向東北方向移行並減弱為輕度颱

風，圖 15 為瑞伯颱風路徑圖，屬於第 4 種颱風路徑。

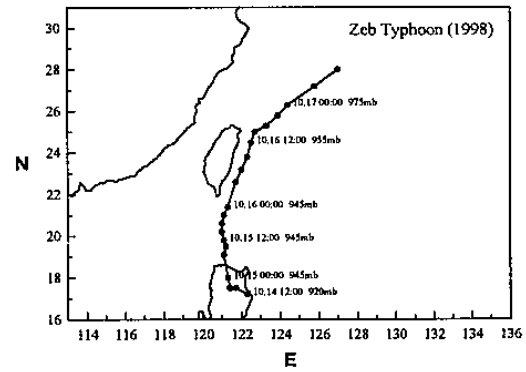


圖 15 瑞伯颱風路徑圖

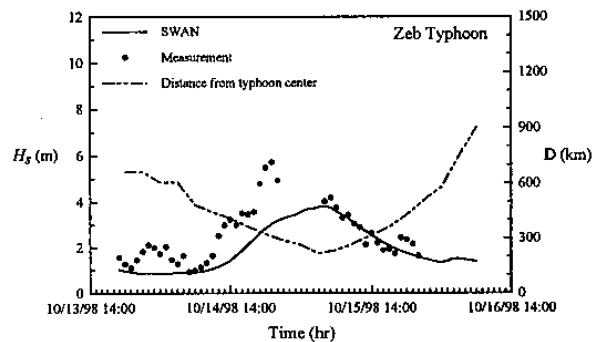


圖 16 瑞伯颱風於東吉島測站之有義波高分佈圖

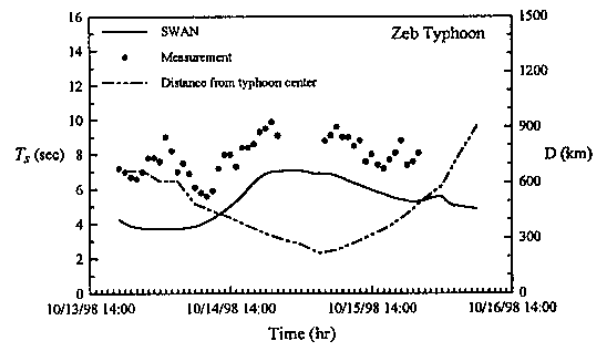


圖 17 瑞伯颱風於東吉島測站之有義週期分佈圖

圖 16 與圖 17 為瑞伯颱風於東吉島的有義波高、週期分佈圖，圖中黑點為東吉島測站的波浪實測值，實線為模式計算值，虛點點線為颱風中心與測站的距離。實測值的最大波浪發生時間為 10 月 14 日 21 時，波高與週期分別為 5.7 公尺與 9.9 秒，而模式計算出最大波高發生時間為 10 月 15 日 6 時，波高與週期分別為 3.8 公尺與 6.9 秒，颱風中心與測站最接近的時間為 10 月 15 日 5 時，實測值與模式計算出的最大波高發生時間相差 9 小時，模式與颱風中心與測站最接近的時間也很接近。由於實測數據中途有中斷現象，故發生時間難以斷定，不過整體趨勢十分相近。但波高與週期有偏小之趨勢，與之前三種路徑之颱風波浪在台灣西部成長情形比較不同之處，推測是因為瑞伯颱風路徑為沿台灣東部海岸由南向北前進，颱風左半部的有效

暴風範圍幾乎都籠罩在台灣陸地上，使得波浪可成長之距離有限，減緩了波浪在台灣海峽的成長。

由以上四種不同颱風路徑之波浪推算，可發現不論在最大波浪發生時間及波高週期在時序列的分佈尚稱合理，尤其以第二種及第三種颱風路徑的颱風波浪推算較佳。

四、結論

為了使颱風對於海岸地區的傷害減到最低，應用合適的波浪模式於颱風波浪的推算為首要工作，離散波譜的推算方法不僅可實際瞭解波浪於颱風期間空間上的傳播情形，而且可作為往後港灣結構物設計的條件，因此本文利用實測季風波浪資料來檢定荷蘭 Delft 大學發展之 SWAN 第三代波浪模式於台灣海域之適用性，並使用 H-R-V Model 作為模式所需之颱風風場，推算不同實際颱風路徑下台灣近海域之颱風波浪，得到以下幾點結論：

1. 由東吉島季風波浪推算中發現 SWAN 模式的推算結果在波高與週期分佈的趨勢上尚稱合理，但週期稍微偏小。
2. 對於最大波浪發生時間，西岸的推算結果與實測值都有時間延遲的現象，但與颱風中心距測站位置的最短距離的時間相當接近，尤以中央氣象局之颱風路徑分類法中之第二及第三種颱風路徑的結果較佳。
3. 關於波高與週期在時序列的分佈方面，其計算結果在定性方面與實測值的相似，其中以第二種與第三種颱風路徑的推算值具有合理之一致性。
4. 從計算結果中發現，颱風風場模式無法正確模擬出有效暴風範圍外的風場及颱風受地形影響的風場改變，也會影響模式的準確性，因此若推算點位於不受地形影響及颱風暴風範圍內時，可獲得更好之風浪推算結果。

參考文獻

1. Booij N., L. H. Holthuijsen and IJ. G. Haagama, 1998: "Comparison the Second-Generation HISWA Wave Model with the Third-Generation SWAN Wave Model," 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, Melbourne, Florida, 215-212.
2. Booij, N., L. H. Holthuijsen and R. C. Ris, 1996: "The SWAN Wave Model for Shallow water," Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, USA, Vol. 1, 668-676.
3. Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli, "Wind Wave Prediction in Shallow Water Theory and Applications, 1981:" Journal of Geophysical Reserch, Vol. 86, No. C11, 10961-10973.
4. Gelci, R. and J. Vassal, 1957: "Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires," Bull. Inform. Comité Central Oceanogr. D'Etude Côtes, Vol. 9, 416-435.
5. Graham, H. E. and D. E. Nunn, 1959: "Meteorological Conditions Pertinent to Standard Project Hurricane," Atlantic and Gulf Coasts of United States, National Hurricane Research Project, Report No. 3, U. S. Weather Service.
6. Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of Wind-wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
7. Holland, G. J., 1980: "An Analytical Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes," Monthly Weather Review, No. 108, 1212-1218.
8. Holthuijsen, L. H., N. Booij, R. C. Ris, J. H. Andorka Gal and J. C. M. de Jong, 1997: "A Verification of the Third-Generation Wave Model (SWAN) along the Southern North Sea Coast," Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 49-63.
9. SWAMP Group (24 Authors), 1985: Ocean Wave Modeling, Plenum Press, New York.
10. Tolman, H. L., 1989: "The Numerical Model WAVEWATCH: A Third Generation Model for the Hindcasting of Wind Waves on Tides in Shelf Seas," Communication on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft University of Technology, Report No. 89-2.
11. Uji, T. and I. Isozaki, 1972: "The Calculation of Wave Propagation in Numerical Prediction of Ocean Waves." Pap. Meteorol. Geophys., Vol. 23, 347-359.
12. WAMDI Group, 1988: "The WAM model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model," Journal of Physical Oceanography, Vol. 18, 1775-1810.