

結合 WAM 與 SWAN 模式推算台灣附近海域風浪之研究

許泰文¹ 歐善惠¹ 廖建明² 林意淳³
教授¹ 博士後研究員² 碩士班研究生³
國立成功大學水利及海洋工程學系

摘要

本文結合 WAM 與 SWAN 模式模擬海面風浪，應用 WAM 模式預測快速模擬風浪能力與 SWAN 模式能解析近岸較小較格網之功能，利用巢狀格網方式結合兩者模擬海面風浪。由模擬結果中可知，由於格網解析度影響，大範圍 WAM 模式較無法表現出澳站附近水深變化，利用 SWAN 模式進行巢狀模擬，可以明顯改善格網解析度，進一步改善由於水深變淺所產生的底床摩擦與碎波的影響機制，對於提高風浪模擬精度有相當助益。

一、前言

近年來海岸、港灣結構物遭受颱風侵襲嚴重破壞之事件屢屢發生，沿岸常有海水倒灌而造成海岸災害，暴風浪造成海岸嚴重侵蝕。這些災害發生之原因乃在於對颱風波浪之行進演化不能確切地預報。有鑑於此，如何建立適當的波浪預測模式來加強海岸防救措施及災害管理，實為海岸工程規劃的重要一環。

WAN 模式是世界各國較常用的波浪預測模式，然而 SWAN 模式和 WAN 模式之間的差異主要有三個部份，第一在於使用的控制方程式不同，SWAN 模式中應用波譜作用力平衡方程式，而 WAN 模式是應用波譜能量平衡方程式，關於波浪作用力平衡方程式與波浪能量平衡方程式之不同處，在於波浪作用力平衡方程式適用於含有流之波浪場因此在近岸地區由於流的影響與變化較為強烈，故波浪作用力平衡方程式適用性較高。第二在於兩種模式所考慮到的波浪生成與消散來源項不盡相同，SWAN 在來源項的採用比 WAM 多採用了碎波消耗項及三個波波交互作用項，補強了其近岸的適用性。此外，數值技巧的不同，SWAN 模式採用較高精度的數值技巧，在推算近岸波浪傳遞的精度較高，也較適用於水深地形較複雜的區域，但相對的其需要較多的計算時間，用於大範圍的風浪推算較不合作業化的需求。

由於計算網格的大小會影響計算結果與精度，故其需要與解析問題互相配合。例如在模擬颶風波浪時，在颶風中心處所形成的波浪向外傳遞形成湧浪(swell)，其可傳遞至相當遠的距離，因此計算領域亦需夠大才可模擬此一現

象。較小計算網格距離固然可以提高波浪解析的精度，但計算時間較長。此外在海岸工程的應用上，複雜的地形與多變的海岸線也需要較小的網格距離才能加以描述，使近岸推算處的波浪能達到適當精度。巢狀網格(nested grid)與非結構性網格的應用可以有效解決網格大小問題。較粗的網格應用在起點計算領域，使得計算能快速模擬大範圍的波浪演變，較細的巢狀網格可以插入其中，以適當模擬每岸之波浪變化，如此可以更精確地預報波浪，也可以有效率地解決問題。

二、風浪模式

2.1 WAM 模式

目前使用的 WAM 模式經 WAMDI Group (1988) 在模式的物理過程和數值方法上加以改良，適用於遠域風浪之預報。WAM 模式所使用的基本方程式為波浪能量平衡方程式，此方程式能描述方向波譜在時間及空間領域的變化過程。這些變化過程包括風傳遞到波浪的波能輸入條件、白沫效應、底床摩擦和波、波之非線性交互作用。WAM 模式所使用的基本方程式為波浪能量平衡方程式，其表示為：

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (C_{\phi} E) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (C_{\lambda} E) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_{\theta} E) = S \quad (1)$$

式中 E 波浪能量密度函數， ϕ 為緯度， λ 為經度， θ 為波浪角度， C_{ϕ} 、 C_{λ} 與 C_{θ} 分別為 ϕ 、 λ 與 θ 領域之傳遞速度，此方程式能描述方向波譜在時間及空間領域的變化

過程。這些變化過程包括風傳遞到波浪的波譜輸入條件、白沫效應、底床摩擦和波、波之非線性交互作用。

2.2 SWAN 模式

SWAN (Simulating WAves Nearshore) 模式係由荷蘭 Delft 大學所發展之波浪模式 (Booij 等人, 1996), 此模式係以過去學者之研究為基礎再加以改良, 可以計算波浪在時間與空間領域中之傳遞、淺化、波與波的非線性交互作用、波浪受風之成長、碎波與底床造成波浪能量衰減及受到海流與地形變化而產生之頻率位移與折射, 因此 SWAN 模式具有預報近岸海域風浪之功能。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), 如下式:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中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, 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; $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ 為波浪作用力密度波譜 (action density spectrum), $E(\sigma, \theta)$ 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, $S(\sigma, \theta)$ 表示波浪傳遞時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象之源函數。在波浪成長與消散之源函數項中, SWAN 模式提供了許多選擇, 包括風浪線性成長項、風浪指數成長項、白沫消積項、四個波波非線性交互作用項、底床摩擦項、三個波波交互作用項、碎波消積項等。

三、風場模式

3.1 衰金渦動風場模式

一般當颱風形成後, 其內部氣壓低會導致環繞周圍的空氣由外邊的高壓向低壓的氣旋中心流動, 氣壓梯度差為主要的風場動力來源, 因此在模擬颱風風場時必須掌握颱風當時大氣壓力分佈及特性。利用衰金渦動模式 (Rankin-Vortex Model; 簡稱 RVM) (Holland, 1980) 模擬颱風風場, 此模式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。RVM 所選用的壓力分佈為 Myers (1954) 所提議之指數形式, 表示為

$$P = P_0 + \Delta P e^{-R_0 / R} \quad (3)$$

其中 P 為距颱風中心 R 處的壓力, P_0 為颱風中心氣壓, $DP = P - P_0$, P 為距颱風中心無限遠的氣壓, 設定為 1 大氣壓 (1013.3 mb), R_0 為最大暴風半徑, 以 Graham 和 Nunn (1959) 之建議為:

$$R_0 = 28.52 \tanh[0.0873(\phi - 28)] + 12.22 / \exp[(1013.3 - P_0) / 33.86] + 0.2V_F + 37.22 \quad (4)$$

式中颱風移動速度 V_F , 由式 (3) 對距離作微分可得到梯度風 U_R (Holland, 1980),

$$U_R = -0.5 f R + \sqrt{(0.5 f R)^2 + U_c^2} \quad (5)$$

因波浪模式所需風速資料為海面上十公尺處的風速, 故須將梯度風轉換成海面上十公尺處之風速 U_{RS} , Powell (1980) 建議下式

$$U_{RS} = 0.8 U_R \quad (6)$$

如考慮颱風的前進速度, 則

$$U_{RS}^* = U_{RS} + 0.5 V_F \cos \theta_c \quad (7)$$

其中 U_{RS}^* 為行進中颱風距颱風中心 R 處的實際合成風速, θ_c 為測點合成風速 U_{RS}^* 與颱風移動速度 V_F 風向的夾角。

3.2 艾克曼動力風場模式

波浪模式的主要外力為風, 正確的風場才能檢驗波浪模式之適用性。一般利用艾克曼動力理論 (Ekman dynamic theory) 為基礎之風場模式來提供波浪模式所需之風場資料。模式架構為在邊界層動力理論中, 假設氣壓梯度力、科氏力與摩擦力互相平衡, 則運動方程式為:

$$-fV = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial F_x}{\partial z} \quad (8)$$

$$fU = -\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial F_y}{\partial z} \quad (9)$$

其中 U 與 V 分別表示風向之東西與南北之分量, F_x 與 F_y 分別表示東西與南北動量通量, f 為科氏力參數。對式 (8) 與 (9) 從海面上 $z = z_{10}$ (海面上 10 m 處) 到海面邊界層頂 h 作高度積分 (Yu, 1988; 李, 1993), 則式 (8) 與 (9) 可寫成:

$$U = \left[-\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} C_D q - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} f \right] / (C_D^2 q^2 + f^2) \quad (10)$$

$$V = \left[\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} f - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} C_D q \right] / (C_D^2 q^2 + f^2) \quad (11)$$

式中 $q = \sqrt{U^2 + V^2}$ 為平均風速, C_D 為有效拖曳力係數。

四、模式應用與討論

應用 WAM 模式能迅速模擬風浪能力與 SWAN 模式能解決近岸較小校格網之功能, 利用兩者相互配合模擬海面風浪, 使用 WAM 模式模擬大範圍海域風浪演變, 利用 SWAN 模式內插 WAM 模式所計算出來的二維頻

譜，獲得小範圍 SWAN 模式所需之邊界入射條件，使用巢狀網格進行計算，可清楚模擬出颱風波浪於近岸處的分佈情形。WAM 模式計算中大範圍及數位化水深，圖 1 為大小計算範圍之關係圖，圖中方框為 SWAN 模式計算範圍，而小範圍 SWAN 模式之計算範圍與數位化水深如圖 2 所示，南至北緯 20°，北至北緯 27°，西至中國大陸約在東經 118°，東至東經 124°。模式所應用的網格大小 $\Delta x = \Delta y = 0.05^\circ$ 約為 5 公里，最小與最大頻率解析度為 0.05 Hz 和 0.5 Hz，並採譜數遞增分佈共 20 個頻率帶，方向波譜之解析度採用 $\Delta\theta = 18^\circ$ ，共計 20 個方位角，計算時間間隔為 $\Delta t = 10$ 分鐘，模式中所需之風速與風向則採用海面風場推算法與 RVM 模型化颱風之風速與風向。

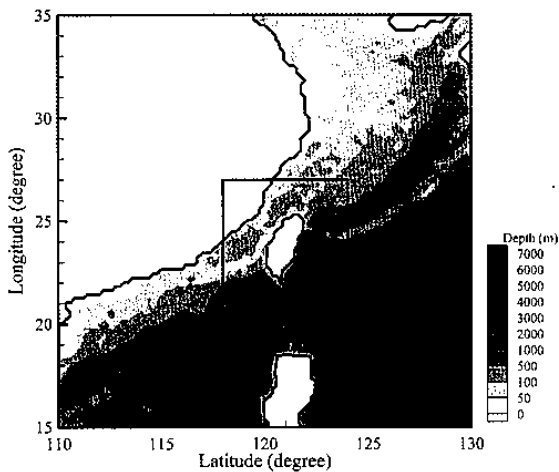


圖 1 大範圍計算水深圖

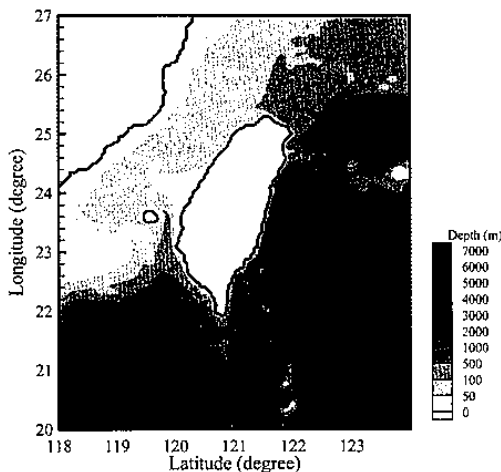


圖 2 SWAN 模式之計算範圍與水深圖

利用不同路徑侵襲台灣的颱風所產生的風浪來驗證模式適用性，根據歷年來 (1897 ~ 2001 年) 侵襲台灣之颱風，其路徑由中央氣象局之颱風路徑分類法，大致上可分為 9 種，如圖 3 所示。考量實測波浪資料來源與颱風路徑的代表性，一共選擇四個颱風，第二類路徑之 1996 年賀伯 (Herb) 颱風、第三類路徑之 2001 年桃芝 (Toraji) 颱風、第七類路徑之奇比 (Chebi) 颱風、第八類路徑之 2001

年西馬隆 (Cimaron) 颱風等。

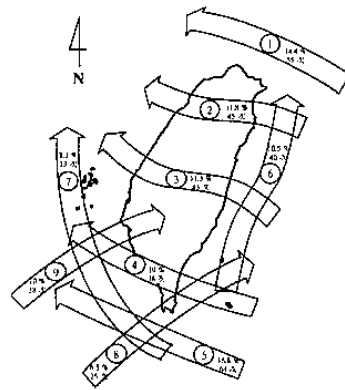


圖 3 侵台颱風路徑分類統計圖 (1897~2001)

4.1 第二類路徑之 1996 年賀伯 (Herb) 颱風

1996 年之賀伯颱風最大強度為強烈颱風，近中心最大風速為 53 公尺秒，屬於中央氣象局第二類路徑，其於 31 日 20 時 44 分在基隆與蘇澳間登陸，強度開始減弱，繼續偏西進行，8 月 1 日 04 時在新竹附近出海後，以西北西方向前進。

颱風風場為利用模型化颱風方式產生，圖 4 為賀伯颱風於花蓮海或指示波高變化時序列圖，圖中圓黑點為花蓮測站之實測值，資料來源為中央氣象局，黑實線為 WAM 模式所推算結果，黑虛線為 SWAN 模式所推算結果。由圖中所示，兩者推算結果趨勢相近，但 WAM 模式所推算結果大於 SWAN 模式所推算結果，尤其在颱風中心靠近花蓮測站時更為明顯。圖 5 為賀伯颱風於台西海或指示波高變化時序列圖，圖中實測資料來源為成大水工試驗所，由圖中可知，由於網格解析度影響，大範圍 WAM 模式較無法表現出測站附近水深變化，利用 SWAN 模式進行巢狀模擬，可以明顯改善網格解析度，進一步改善由於水深變淺所產生的底床摩擦與碎皮的影響機制，對於提高風浪模擬精度有相當助益。

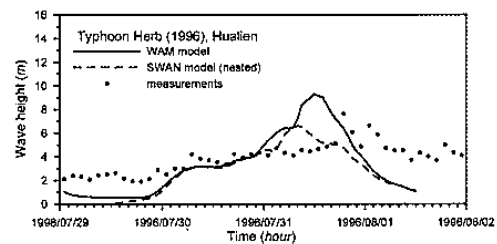


圖 4 賀伯颱風於花蓮海或之示性波高變化時序列圖

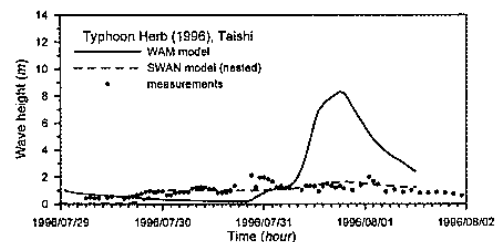


圖 5 賀伯颱風於台西海或之示性波高變化時序列圖

4.2 第三類路徑之 2001 年桃芝 (Toraji) 颱風

2001 年桃芝颱風為中度颱風，近中心最大風速為 38 公尺/秒，屬於中央氣象局第三類路徑，於 7 月 30 日 0 時 10 分左右登陸花蓮秀姑巒溪口，並於當日 10 時 20 分左右由新竹附近離開本島進入台灣海峽北部。

圖 6 至圖 9 分別為各風速測站實測值與模型化颱風風場模式計算值及海面風場模式計算值之比較圖，其實測風速與風向資料來源為中央氣象局。由圖中比較分析可知，由於模型化颱風風場模式並不考慮地形對風場的影響，僅由颱風中心氣壓與位置控制風場變化，對於地形影響較大處的風場有偏高之預測，如基隆測站。而海面風場模式乃是由氣象局所提供之海面大氣壓資料轉換而成，對於地形所產生風速影響較容易反應其變化。由颱風行進路徑來分類，東部測站且位於颱風行進路徑右側者，在模型化颱風風場模式中皆有預測值偏大趨勢，如基隆與花蓮測站。而在左側者，預測值較為接近實測風速，如成功測站。在台灣西部測站之準確性而言，若以風速成長與消散趨勢而言，模型化風場模式預測值皆與實測值具有一致性，表示若需改善參數設定應可更準確預測風場大小。比較海面風場與模型化風場預測值，由於海面風場模式受限於大氣模式格網約為 45 公里限制，海面風場模式在靠近颱風中心處測站之風速預測能力不若模型化風場為佳，如花蓮測站，其不能適當描述風速成長與消散趨勢，為仍需改善缺點。對於風向之模擬，模型化與海面風場模式皆能適當模擬，與實測值具有一致性。

圖 10 與圖 11 分別花蓮與新竹海或之指示波高變化時序列圖，皆為中央氣象局所提供。由圖中波高模擬與實測比較中發現，與風速測站模擬有相當一致性。花蓮測站在模型化風速模擬較大則波高模擬亦較大，而海面風場模式不能適當模擬最大風速出現時間，在波高模擬上亦有此現象等。在台灣西部海域測站而言，模擬結果在 SWAN 模式上有較佳之一致性，表示格網解析度能提高風浪解析精度，對於近岸波浪受水深與岸線影響有較好模擬能力。

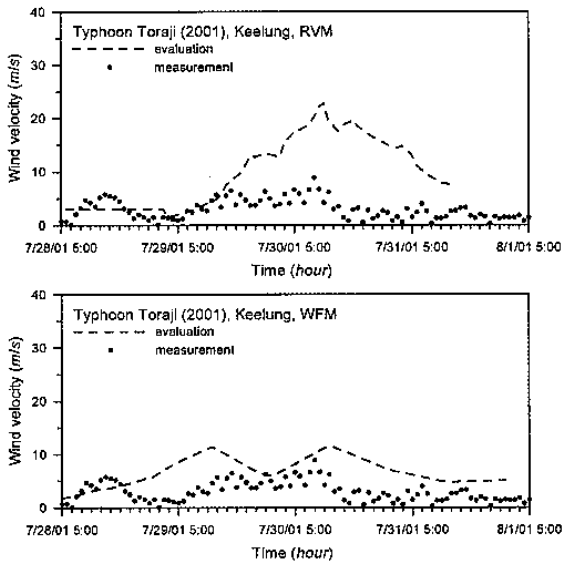


圖 6 桃芝颱風於基隆地區之風速變化時序列圖

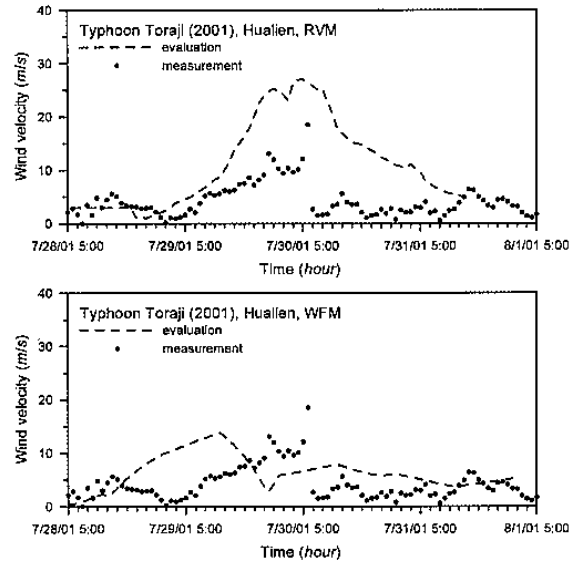


圖 7 桃芝颱風於花蓮地區之風速變化時序列圖

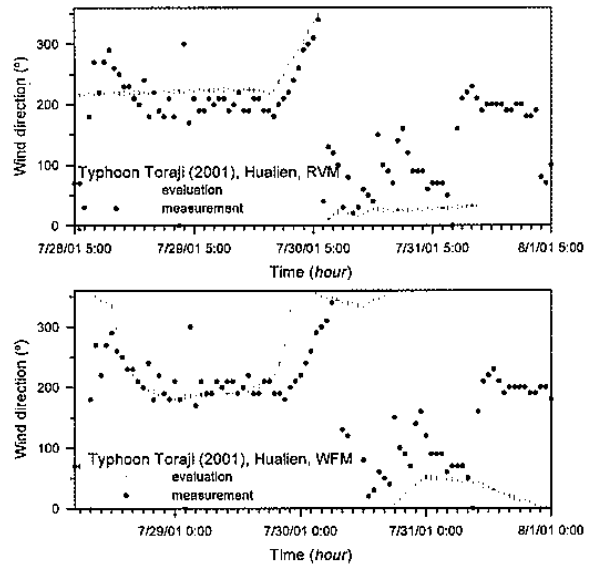


圖 8 桃芝颱風於花蓮地區之風向變化時序列圖

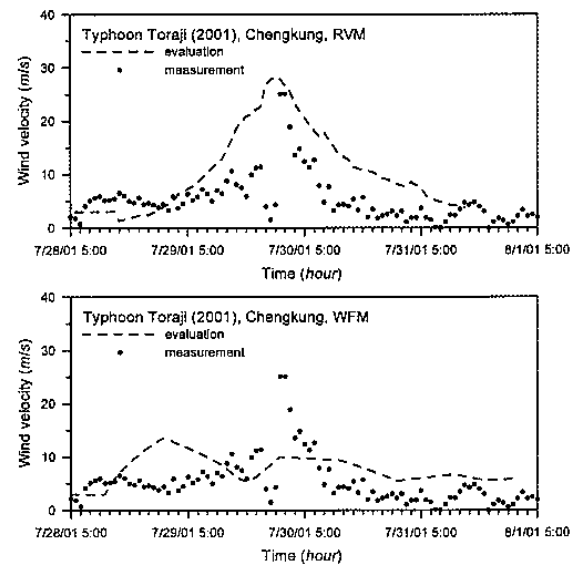


圖 9 桃芝颱風於成功地區之風速變化時序列圖

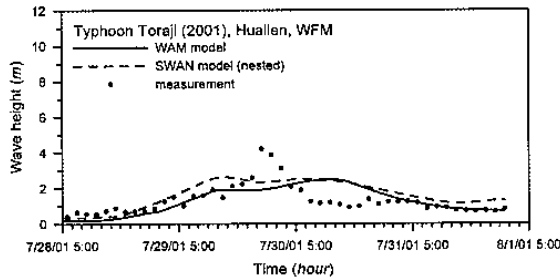
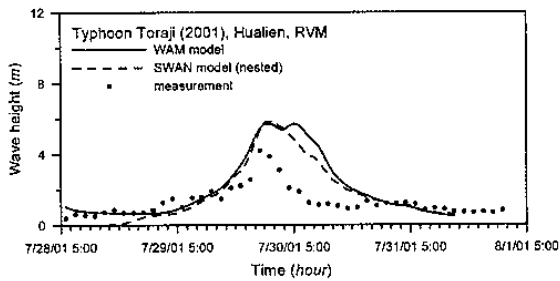


圖 10 桃芝颱風於花蓮海域之示性波高變化時序列圖

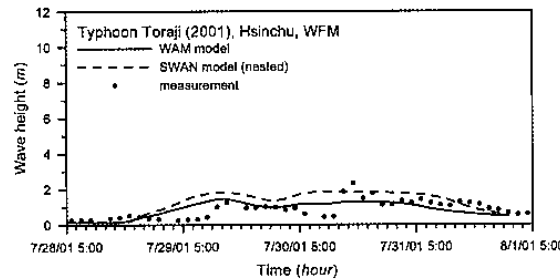
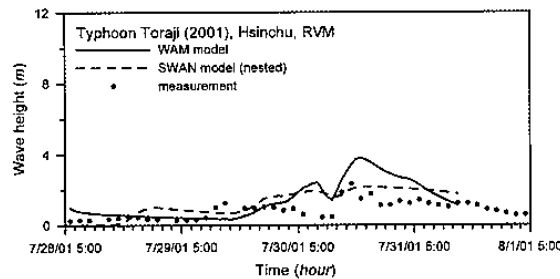


圖 11 桃芝颱風於新竹海域之示性波高變化時序列圖

4.3 第七類路徑之奇比 (Chebi) 颱風

2001 年之奇比颱風最大強度為中度颱風，近中心最大風速為 53 公尺/秒，屬於中央氣象局第七類路徑，其形成後，向西北方向移動，其中心進入巴士海峽後，以偏西方向通過巴士海峽；再以偏北的路徑通過台灣海峽，於馬祖附近進入大陸。

關於奇比颱風計算方案，輸入風場為大氣壓所轉換之海面風速，圖 12 至圖 15 分別為各測站之風速與風向比較圖，大致上模擬風速與風向與實測值具有合理之一致性，但由於奇比颱風中心路徑通過台灣海峽，靠近中心路徑之測站，如安平測站之最大風速預測有偏低現象，其與桃芝颱風推算案例有相同趨勢，原因應為大氣壓力格網解析度偏低所致。在波高預測方面，圖 16 與圖 17 為指示波高時序列變化圖，波高模擬大致上相當合理，除安平測站在接近奇比颱風中心處有偏低預測外，在颱風未侵襲台灣與過境後之波高亦能適當描述，表示模式具有相當預測

能力。

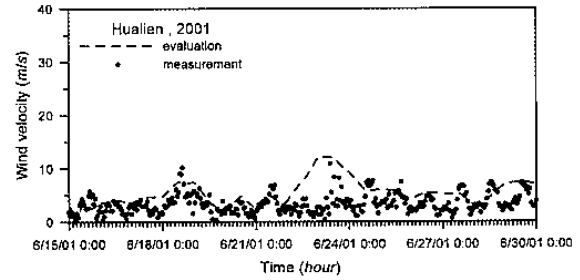


圖 12 奇比颱風於花蓮地區之風速變化時序列圖

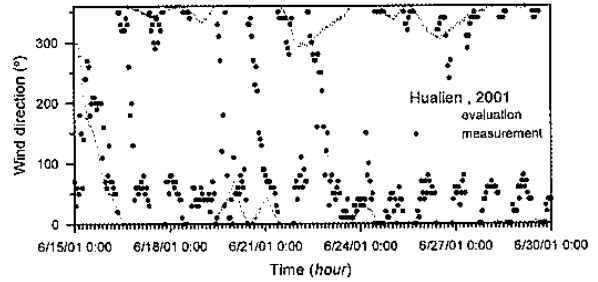


圖 13 奇比颱風於花蓮地區之風向變化時序列圖

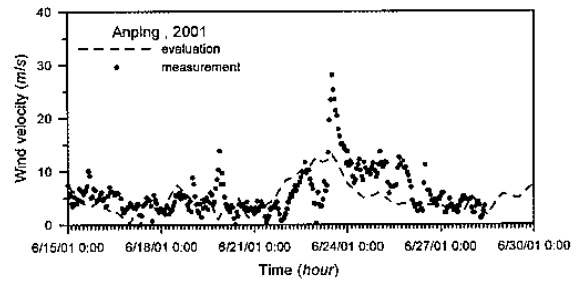


圖 14 奇比颱風於安平地區之風速變化時序列圖

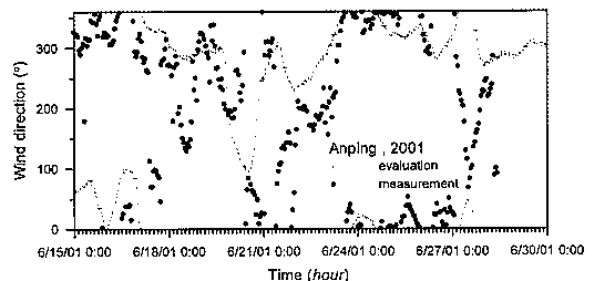


圖 15 奇比颱風於安平地區之風向變化時序列圖

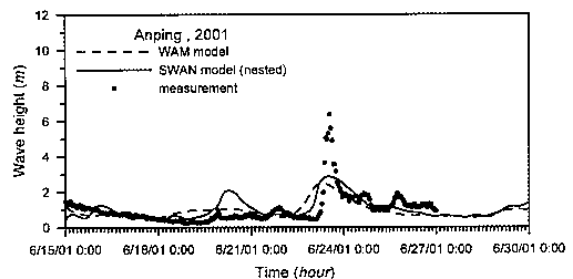


圖 16 奇比颱風於安平海域之指示波高變化時序列圖

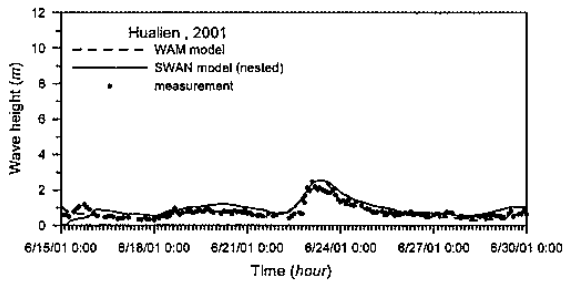


圖 17 奇比颱風於花蓮海域之指示波高變化時序列圖

4.4 第八類路徑之 2001 年西馬隆 (Cimaron) 颱風

2001 年之西馬隆颱風最大強度為輕度颱風，近中心最大風速為 23 公尺/秒，屬於中央氣象局第八類路徑，在呂宋島西方海面生成後緩慢北上，移動至呂宋島東北方近海時，中心呈現滯留打轉的現象，再以緩慢北上至巴士海峽後，轉向東北加力並通過台灣東南部海面，朝琉球方向移動。

關於西馬隆颱風計算方案，輸入風場為大氣壓所轉換之海面風速，圖 18 與圖 19 分別花蓮與新竹海域之指示波高時序比較圖。由圖中比較可知，SWAN 模式與 WAM 模式之結合具有快速推算且合理模擬風浪之能力。但由於風場產生來源的不同亦可左右推算結果，故應以更多範例來歸納出使用之模式推算風浪的缺點與優點。

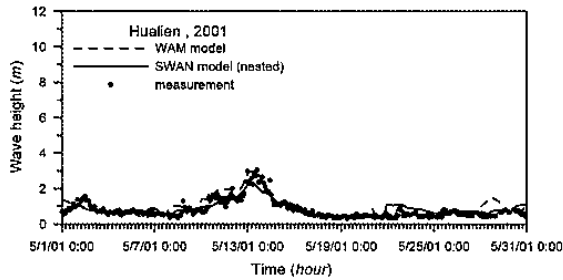


圖 18 西馬隆颱風於花蓮海域之指示波高變化時序列圖

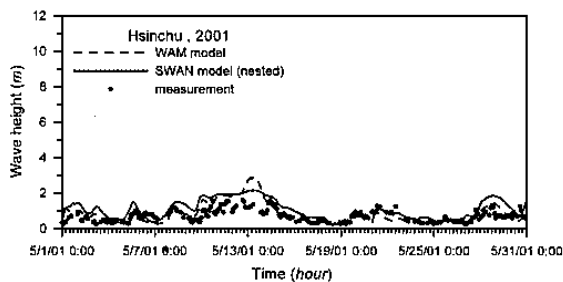


圖 19 西馬隆颱風於新竹海域之指示波高變化時序列圖

五、結論

本文結合 WAM 與 SWAN 模式模擬海面風浪，應用 WAM 模式能快速模擬風浪能力與 SWAN 模式能解析近岸較小校格網之功能，利用巢狀格網方式結合兩者模擬海面風浪。由模擬結果中可知，由於格網解析度影響，大範圍 WAM 模式較無法表現出測站附近水深變化，利用 SWAN 模式進行巢狀模擬，可以明顯改善格網解析度，進

一步改善由於水深變淺所產生的底床摩擦與碎波的影響機制，對於提高風浪模擬精度有相當助益。

於風場模擬方面，模型化風場模式預測值皆與實測值具有一致性，表示若能改善參數設定應可更準確預測風場大小。比較海面風場與模型化風場預測值，由於海面風場模式受限於大氣模式格網約為 45 公里限制，海面風場模式在靠近颱風中心處測站之風速預測能力不若模型化風場為佳，為仍需改善缺點。對於風向之模擬，模型化與海面風場模式皆能適當模擬，與實測值具有一致性。

參考文獻

1. Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C., 1996. "The SWAN wave model for shallow water", Proceedings of 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Orlando, 1, 668-676.
2. 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.
3. Holland, G. J., 1980 "An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes", Monthly Weather Review, 108, 1212-1218.
4. Myers, V.A., 1954. "Characteristics of United States hurricanes pertinent to levee design for Lake Okechobeem", FL. Hydromet. Rep. 32, 126p.
5. Powell, M.D., 1980. "Evaluations of diagnostic marine boundary layer models applied to hurricanes", Monthly Weather Review, 108, 758-766.
6. WAMDI Group, 1988. "The WAM model – A third generation ocean wave prediction model", Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.
7. Yu, T. W., 1988. "A method for determining equivalent depths of the atmospheric boundary layer over the oceans", Journal of Geophysical Research, 93 (C4), 3655-3661.
8. 李汭軍, 1993. "艾克曼動力理論在海面風場之應用", 中華民國第十五屆海洋工程研討會論文集, 43-56.