

# 結合POM與有限元素法海潮流模式

## 於台灣環島海域之應用

許泰文<sup>1</sup>

蔡金晏<sup>1</sup>

廖建明<sup>1</sup>

徐月娟<sup>2</sup>

國立成功大學水利及海洋工程學系<sup>1</sup>

中央氣象局海象測報中心<sup>2</sup>

### 摘 要

本文結合POM (Princeton Ocean Model) 及許等人 (1999) 所發展的有限元素法海潮流模式，應用於台灣環島海域之水位變化與流場模擬，其中同時考量潮汐引力與颱風暴潮之效應。POM為普林斯頓大學所發展的三維海洋模式，在模擬海潮流與颱風暴潮時，POM對於台灣東部海域的劇烈變化地形，具有較佳之適用性，而有限元素法海潮流模式雖是二維水深平均流場模式，不過，有限元素法的不規則網格系統，具有使計算邊界契合近岸不規則陸地或是海岸結構物的優點，且計算效率高。文中結合兩者之優缺點，於遠域模擬採用POM，藉由巢狀格網技巧擷取近域模擬所需之開放邊界條件，並於近域模擬採用有限元素法海潮流模式。在模擬結果中，經由與淡水、竹圍與新竹等測站之實測水位變化比較，發現模式之計算結果良好，惟模擬範圍內所能取得之實測流速資料有限，並無法進一步校核流場模擬結果。

關鍵字：POM，有限元素法海潮流模式

### 一、前言

台灣四面環海，每到夏、秋兩季，根據中央氣象局統計 1897 至 2005 年侵襲台灣或附近海域之颱風紀錄，每年平均約有 3.7 次颱風對台灣沿海造成巨大的威脅，颱風不僅為台灣帶來龐大的雨量，且受到低氣壓與強大風勢的作用，海水面上升，此一颱風暴潮每每使沿海地區民眾之生命財產飽受威脅，倘若遇上大潮時期，颱風暴潮對沿海低窪地區所造成的破壞更加無法估計，因此，如何有效且正確地在颱風入侵台灣附近海域前，預先得知可能發生的颱風暴潮，將能減低颱風對沿海地區所造成的損失。

雖然以現場施測記錄的方式可以準確地監測水位變化資料，不過，颱風侵襲時的惡劣海象環境，往往使得監測儀器受到破壞，而無法獲取颱風暴潮所造成的水位資料，若以此作為後續研究、工程應用或是防災的參考標準，將失去客觀準確的原則。再者，施放與維護水位觀測儀器所需耗費的費用，致使並非所有地點都能夠進行水位量測儀器的施放，以中央氣象局所施測的地點為例，包含台澎金馬等地共約有 30 多個測站，這些測站的數目，對於四面臨海的台灣而言，在諸多工程設計上的需求實屬不足。因此，以數值模擬的方式進行水位變化與颱風暴潮的推算與預測，是一種更經濟且有效率的方式。

有關水位變化及颱風暴潮之數值模式，大多以有限差分法來模擬，如楊 (1974) 所發展的二維模式曾用來預測台灣東北海岸的暴潮行為，其它有關有限差分法的相關文獻如 Harper 和 Sobey (1983)、柯等人 (1993)、Chien (1994)、Shi 和 Sun (1995)、劉 (1990) 與中央氣象局發展三合一模式，包括預報簡表、快速二維模式與三維模式，可預測 24 小時之內的暴潮變化，模式準確度較高但計算容量較大，計算需要使用超級電腦，在一般的情況下較不適用於實務單位作簡易的應用。

有限元素法能利用不規則網格的選取來克服有限差分法處理不規則邊界之不便，在複雜海岸線及地形或港灣的模擬上能提高計算精確度。Kawahara 等人 (1980, 1982) 提出二階段顯式選擇性堆積有限元素法，此法能將傳統有限元素法求解矩陣須耗費大量計算時間的缺點加以改進，可以加速疊代過程之收斂性，在模擬淺水長波及沿岸流問題上得到合理的結果。許等人 (1999) 用二階段顯式選擇性堆積有限元素法以模擬台灣東北海岸之颱風暴潮偏差，經與潮位站實測水位比較，結果顯示預測值與實測值呈合理之一致性。

考慮台灣附近海域地形水深變化劇烈，尤以東部海域為甚，若僅採用水深積分之二維平均流場模式，將無法適切地模擬台灣環島海域之海潮流與暴潮變化，因此本文擬結合三維海洋模式 POM 與許等人 (1999) 發展之有限元素法海潮流模式，在遠域推算時，因計算範圍必須涵蓋台灣環島，因此採用含

三維效應之 POM，而到了近域高解析度模擬時，考量模式的計算效率，以及近岸地區之不規則陸地或港灣結構物等複雜邊界，以巢狀格網方式結合 POM 遠域推算結果，於近域模擬採用有限元素法海潮流模式。文中將先以敏督利颱風與海棠颱風為背景，進行海潮流與颱風暴潮之模擬，藉由與實測水位比較校核本文模式之適用性，並進一步分析近域流場之模擬結果。

## 二、POM

POM 為美國普林斯頓大學所發展的三維非線性海洋模式 (Blumberg 和 Mellor, 1983)，其目的為推算天文與氣象潮位的變化，此模式可模擬大尺度海洋、海岸等天文潮及氣象潮所引起的水位與流場變化，亦可推算溫度、鹽度等水理運動的改變。POM 使用了兩個假設條件：第一為假設流體本身的重量與壓力梯度力平衡，亦即為靜力平衡 (hydrostatic assumption)，第二假設水體內部的密度差異可以忽略，除非這個差異是由重力所引起此條件的。POM 的基本控制方程式可表示如下

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] - \frac{gD^2}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma \\ & + \frac{gD}{\rho_0} \frac{\partial D}{\partial x} \int_{\sigma}^0 \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma + DF_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial VUD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] \\ & - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' + F_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta UD}{\partial x} + \frac{\partial \theta VD}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right) + DF_{\theta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial S D}{\partial t} + \frac{\partial S U D}{\partial x} + \frac{\partial S V D}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + DF_S \quad (5)$$

式中  $U$ 、 $V$  為流速在水平方向之分量， $f$  為柯氏力參

數， $g$  為重力加速度， $p$  為壓力， $\rho_0$  為水的參考密度 (reference density)， $\rho$  為水的當地密度 (in situ density)， $\eta$  為水面高程， $K_M$  為垂直渦漩混合擴散係數 (vertical eddy viscosity diffusivity of turbulent momentum mixing)， $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_{\theta}$  及  $F_S$  為水平混合程序 (horizontal mixing processes) 參數化後的產生項，用來處理流場中不能以模式格網解析的所謂次網格運動過程， $\theta$  為勢溫，在淺水時為現場溫度； $S$  為鹽度， $K_H$  為熱能和鹽度的垂直渦漩混合擴散係數。

## 三、有限元素法海潮流模式

有限元素法海潮流模式為許等人 (1999) 所發展之平面二維海潮流模式，由於利用有限元素法數值方法建立，可模擬不同解析度流場情形，適用範圍可遠至海洋範圍小至港灣內流場，配合有限元素法非結構性格網，可模擬近岸複雜岸線與地形之流場。本模式之控制方程式可由淺水長波理論來描述，假設水深方向之壓力分佈是呈流體靜壓分佈，且將動量方程式及連續方程式由海底至積分至水面，雷諾應力與黏滯效應之尺度較其它分量為小故忽略之，如此可得水深積分型式之  $x$ 、 $y$  方向動量與連續方程式如下

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (h+\eta)u}{\partial x} + \frac{\partial (h+\eta)v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + fv - \tau_{bx} + \tau_{wx} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - fu - \tau_{by} + \tau_{wy} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (8)$$

式中  $x$ 、 $y$  為卡式座標軸； $u$ 、 $v$  為流體質點在  $x$ 、 $y$  軸方向上之平均流速； $\eta$  為暴潮偏差； $h$  為水深； $p$  為大氣壓力； $g$  為重力加速度 ( $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ )； $f$  為科氏力係數，可表示成  $f = 2\omega \sin \phi$ ，其中  $\omega$  為地球旋轉角速度 ( $\omega \approx 7.292 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ )， $\phi$  為緯度； $t$  為時間， $\tau_x^B$ 、 $\tau_y^B$  為  $x$ 、 $y$  方向海床剪應力； $\tau_x^S$ 、 $\tau_y^S$  則為  $x$ 、 $y$  方向海面剪力。

海床剪應力在  $x$ 、 $y$  方向分量可表成下列形式

$$\tau_x^B = \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h+\eta)} \quad (9)$$

$$\tau_y^B = \frac{g\nu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h+\eta)} \quad (10)$$

式 (9) 及式 (10) 中  $C_z$  為 Chezy 係數，本文計算採  $C_z^2 = h^{1/3}n^{-2}$ ， $n$  為曼寧係數 (manning coefficient)， $n = 0.025$ 。海面剪應力  $\tau_x^s$ 、 $\tau_y^s$  與風力的關係為

$$\tau_x^s = \frac{\gamma\rho_a W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h+\eta)} \quad (11)$$

$$\tau_y^s = \frac{\gamma\rho_a W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h+\eta)} \quad (12)$$

式中  $\gamma$  為海面剪力係數，一般建議為  $\gamma \approx 2.6 \times 10^{-3}$ ， $\rho_a$  為大氣密度 ( $\rho_a \approx 1.22 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$ )， $\rho$  為海水密度 ( $\rho \approx 1.033 \text{ gr/cm}^3$ )。  $W_x$  和  $W_y$  分別為  $x$ 、 $y$  方向之風速之分量。模式以選擇性堆積二階段顯式有限元素法所建立 (Kawahara 等人, 1980、1982；許等人, 1999)，具有計算快速與合理性兼具之特性。

#### 四、模式計算流程

在模擬台灣環島海域之海潮流及暴潮變化時，必須於外海開放邊界條件給定適當的潮汐水位變動，及計算格網點上的大氣壓力與風剪應力資訊，作為驅使水流運動之外力，方能達到高解析度流場之需求。因此，本文在水位邊界方面，利用巢狀格網方式，在最外層之遠域格網方面 (其水深如圖 1 所示)，考慮台灣附近海域之劇烈變化地形，故採用含三維流場效應之 POM 進行遠域流場模擬，空間解析約為 20 km，天文潮位邊界採用日本 Matsumoto

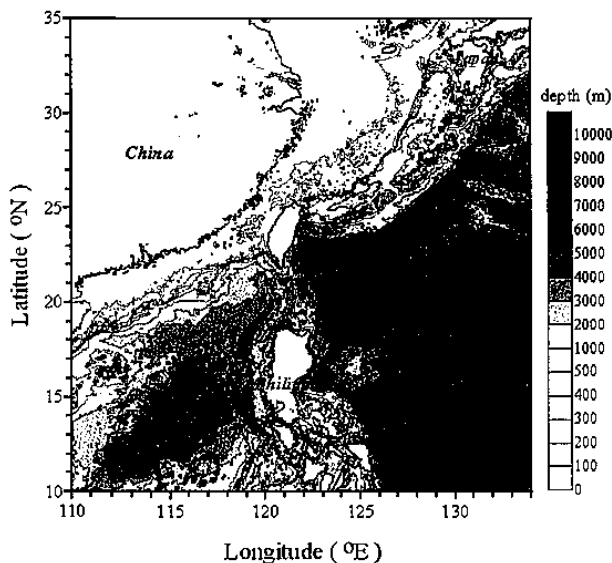


圖 1 遠域 POM 計算範圍與水深分布圖

等人 (2000) 所發展的 NAO Tide 潮汐預測結果，而在暴潮模擬輸入條件中，則以中央氣象局的 MC 大氣模式輸出結果，內插出最外層之遠域網格點上的大氣壓力與風剪應力值。藉由上述的天文潮位邊界、海平面上的大氣壓力與風剪應力資訊，即可模擬出台灣附近海域之海潮流與暴潮變化，並據此作為近域有限元素法海潮流模式之輸入條件。

對於近域海潮流及暴潮模擬時，最常面臨之問題為近岸複雜岸線與地形之流場模擬，本文考慮有限元素法非結構性格網具有之特性，係採用有限元素法海潮流模式進行近域模擬。模式計算時，為提高流場模擬之精確度，進一步再採用兩層之巢狀格網。近域第一層格網之水深與三角形元素分布如圖 2 與 3 所示，圖中之地形水深資料係採用國科會海洋科學研究中心之臺灣附近海域海底地形第六版 (TaiDBMV6)，座標系統為 TWD97 二度分帶座標系統，計算範圍北起基隆外海，南至苗栗縣一帶，三角形元素格網由 3467 個節點與 6728 個元素所組成；近域第二層格網之水深與三角形元素分布如圖 4 與 5 所示，圖中之水深地形係採用水利署第二河川局於 2005 年 4 月在新竹縣海域實測之地形資料，計算範圍北起頭前溪出海口北側，南至客雅溪出海口，

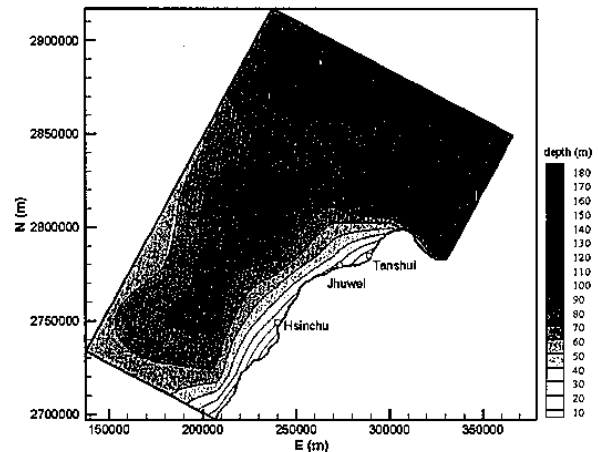


圖 2 近域第 1 層格網之計算範圍與水深分布圖

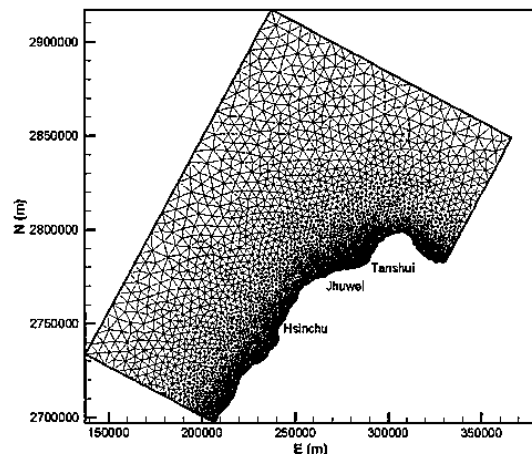


圖 3 近域第 1 層格網之三角形元素分布圖

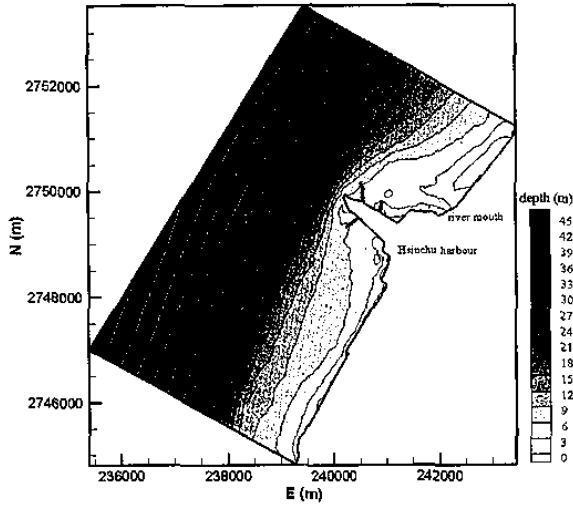
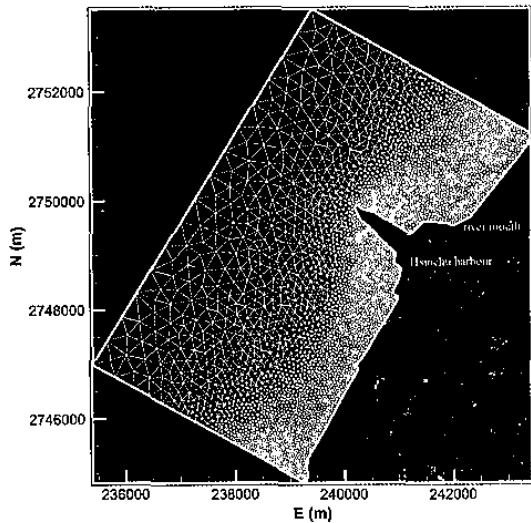


圖 4 近域第 2 層格網之計算範圍與水深分布圖



資料來源：Google Earth 3.0

圖 5 近域第 2 層格網之三角形元素分布圖

離岸約到水深 45 m 處，三角形元素格網由 5104 個節點與 9926 個元素所組成。

關於有限元素法海潮流模式中參數方面之設定，近域第一層計算時距採用 5 秒，第二層計算則依較小之格網間距調整為 2 秒，模式中之選擇性堆積參數則採用許等人 (1999) 之建議設為 0.85。至於模擬颱風暴潮所需的壓力、風場資訊，近域第一層格網係採用同樣由中央氣象局所建立的 HC 大氣模式輸出結果內插而得；而近域第二層格網之壓力、風場資訊，考量中央氣象局 HC 大氣模式，其風場與壓力場之格網間距約為  $0.04^\circ$ ，即 5 km，這樣的空間解析度並無法作為近域第二層海潮流格網內插風場及壓力場資料時之用，因此，本文在第二層海潮流格網之壓力與風剪應力資料之處理，係採用修正型衰金渦動模式 - RVM 模型颱風模式 (Rankin-Vortex Model)，RVM 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，詳細的理論基礎可以參考 Ou 等人 (2002)。

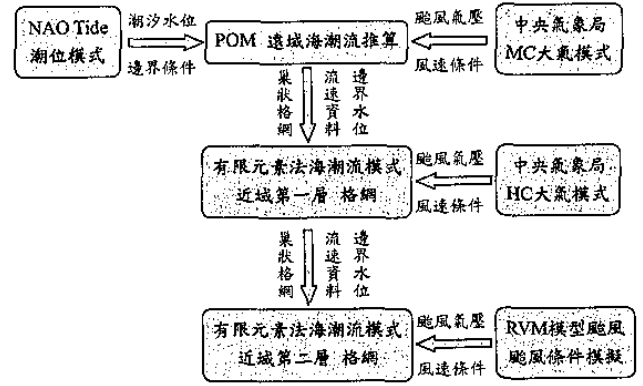
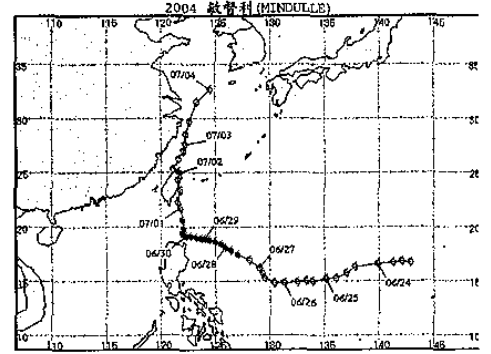


圖 6 POM 與有限元素法海潮流模式之結合計算流程

上述 POM 與有限元素法海潮流模式之結合計算流程如圖 6 所示。

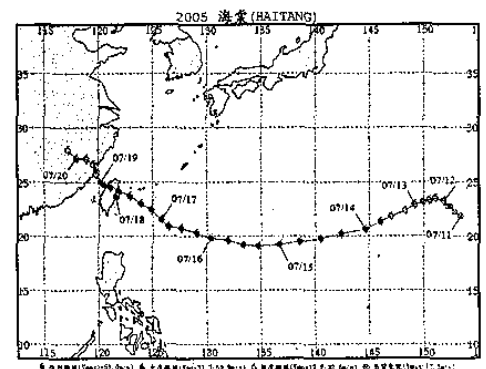
## 五、計算結果分析

為驗證本文結合 POM 與有限元素法海潮流模式於台灣環島海域之海潮流及颱風暴潮之模擬，本文選取實際發生的兩場颱風事件進行模式之驗證與結果分析。兩場颱風事件分別為 2004 年的敏督利颱風與 2005 年的海棠颱風，其侵台路徑圖分別如圖 7 與 8 所示，依據中央氣象局的七種颱風路徑分類法，敏督利颱風與海棠颱風分屬於第 4 類與第 1 類路徑。



資料來源：中央氣象局

圖 7 2004 年敏督利颱風侵台入徑圖



資料來源：中央氣象局

圖 8 2005 年海棠颱風侵台入徑圖

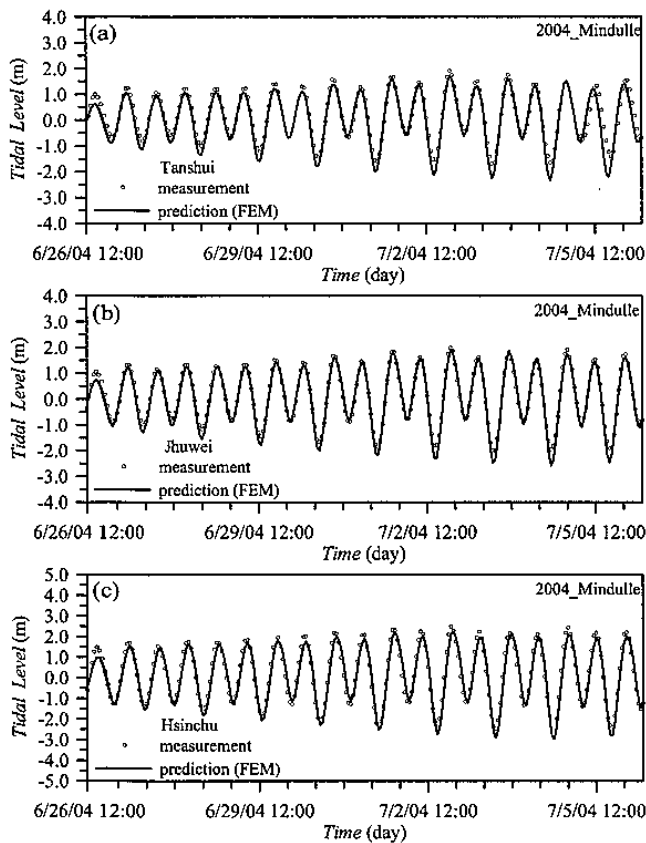


圖 9 敏督利颱風侵台期間各測站之水位變化驗證圖，(a) 淡水測站，(b) 竹圍測站，(c) 新竹測站。

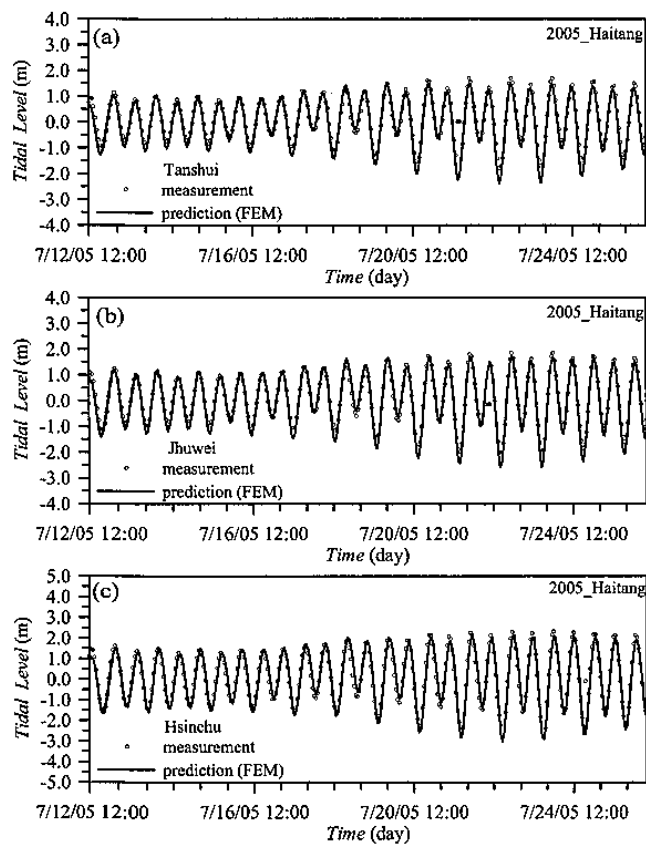


圖 10 海棠颱風侵台期間各測站之水位變化驗證圖，(a) 淡水測站，(b) 竹圍測站，(c) 新竹測站。

圖 9 與 10 分別為敏督利颱風與海棠颱風侵台期間，台灣西部淡水、竹圍、新竹之近域第一層格網模式模擬結果與潮位測站之水位比較圖，測站位置如圖 2 所示，圖中黑色實線為有限元素法海潮流模式之模擬結果，黑色圓點為中央氣象局潮位測站量測結果。由圖中比較結果可知，不論是相位與振幅皆可準確預測，顯示本文在 POM 與有限元素法海潮流模式間的巢狀計算銜接上具有合理性。

圖 11 至圖 14 分別為敏督利颱風侵台期間，近域第二層巢狀格網（新竹縣附近海域）之退潮段平潮、低潮、漲潮段平潮及高潮時的水位與流場分布圖。由圖中可知，新竹縣附近之最大潮流發生時刻約在漲、退潮段之平潮，在漲潮段平潮時，流向呈東北—西南走向，相反地，在退潮段平潮時，流向呈西南—東北走向，且退潮時之流速略大於漲潮時之流速，至於低潮或高潮時則為轉潮時刻，意即最小流速發生之際，另外，受到南寮漁港防波堤遮蔽

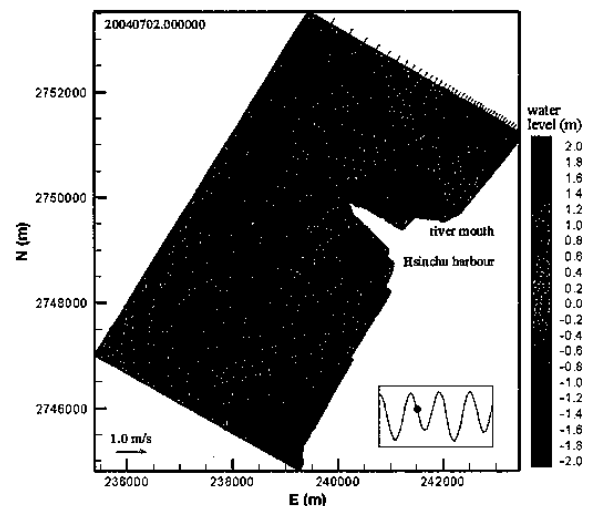


圖 11 近域第二層之流場與水位計算結果（敏督利颱風侵台期間，退潮段平潮）

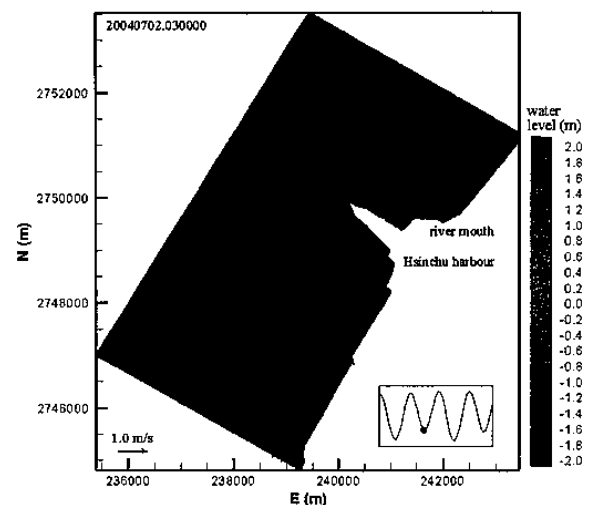


圖 12 近域第二層之流場與水位計算結果（敏督利颱風侵台期間，低潮）

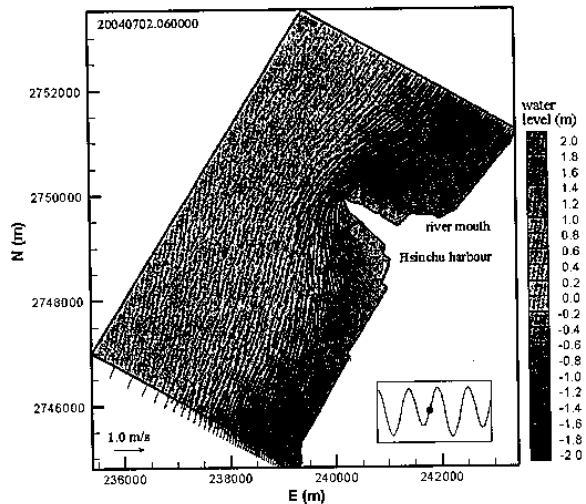


圖 13 近域第二層之流場與水位計算結果 (敏督利颱風侵台期間，漲潮段平潮)

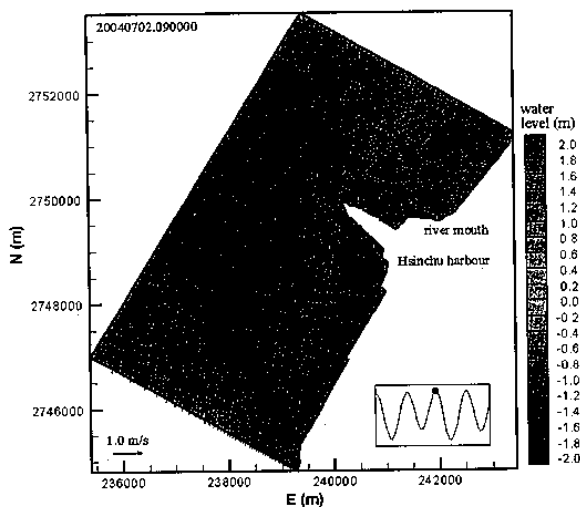


圖 14 近域第二層之流場與水位計算結果 (敏督利颱風侵台期間，低潮)

效應影響，漁港兩側會有環流的形成。在敏督利颱風侵台期間，受到暴潮效應影響，新竹縣附近海域最大發生流速在 1.02 m/s 左右，最大水位約為+1.6 m。

## 六、結論與建議

本文結合 POM 與有限元素法海潮流模式，模擬台灣環島海域之海潮流與暴潮水位變化，經由與淡水、竹圍、新竹等測站之實測水位資料比對後，數值模擬結果與實測值一致，顯示本文採用之巢狀格網技巧，在 POM 與有限元素法潮流模式間的銜接上具有一定之適用性。

在海潮流分布方面，雖然沒有實測的流速時序列資料供比對校核，然在近域第二層模式計算結果中，最大潮流發生在平潮時段，漲潮期間流向呈東北—西南走向，在退潮期間，流向則呈現相反之西

南—東北走向，且退潮時之流速略大於漲潮時之流速，這樣的結果與現場觀測的流場分布相當，顯示本文模式應用於台灣環島海之海潮流與暴潮水位變化模擬的合理性。

## 參考文獻

1. 柯允沛, 鄒明城, 薛曙生, 尹可健, 1993: "FEMA 暴潮模式模擬技術在個人電腦之應用", 第十五屆海洋工程研討會論文集, 663-676。
2. 許泰文, 廖建明, 李兆鑫, 1999: "以有限元素法推算台灣東北海岸之暴潮偏差", 中國土木水利工程學刊, 11 卷, 4 期, 849-857。
3. 楊春生, 1974: "台灣北岸暴潮推算之研究", 台南水工試驗所土木水利學術彙刊, 49-63。
4. 劉肖孔, 1990: "台灣海域颱風暴潮及氣象潮數值預報模式", 中央氣象局研究報告第 374 號。
5. Chien, C.H., 1994: "1-D Modeling of Surges for the Eastern Coast of Taiwan Induced by Typhoons", Proceedings of 25th IAHR Conference, Tokyo, 40-47.
6. Harper, B.A. and R.J. Sobey, 1983: "Open-Boundary Conditions for Open-Coast Hurricane Storm Surge", Coastal Engineering 7, 41-60.
7. Kawahara, M., S. Nakazawa, S. Ohmori and T. Tagaki, 1980: "Two-Step Explicit Finite Element Method for Storm Surge Propagation Analysis", International Journal for Numerical Methods in Engineering 15, 1129-1148.
8. Kawahara, M., H. Hirano, K. Tsubota and K. Inagaki, 1982: "Selective Lumping Finite Element Method for Shallow Water Flow", International Journal for Numerical Methods in Engineering 2, 89-112.
9. Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe, 2000: "Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan", Journal of Oceanography 56, 567-581.
10. Ou, S.H., J.M. Liao and T.W. Hsu and S.Y. Tzang, 2002: "Simulating Typhoon Waves by SWAN Wave Model in Coastal Waters of Taiwan", Ocean Engineering 29, 947-971.
11. Shi, F. and W. Sun, 1995: "A Variable Boundary Model of Storm Surge Flooding in Generalized Curvilinear Grids", International Journal for Numerical Methods in Fluids 21, 641-651.