

風剪力對暴潮推算之影響

林敬傑¹ 莊士賢¹ 李汴軍³ 高家俊⁴
楊益昇⁵ 陳柏彰⁶

¹ 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生,台南市

² 國立成功大學海洋科技與事務研究所助理教授,台南市

³ 華梵大學環境與防災設計學系副教授兼系主任,台北縣

⁴ 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授,台南市

⁵ 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生,台南市

⁶ 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士班研究生,台南市

摘要

本文研究目的是修正海洋模式中的剪應力項，模式中原有的剪應力項以風速為單一變數，然而從前人對於剪應力的研究顯示，波浪亦為影響剪應力的要素。本研究利用前人提出包含波浪及風速的剪力公式取代模式原來的剪應力項，以 2004 年納坦颱風案例驗證，加入波浪的影響後，能有效修正 POM 模式中原本對暴潮水位推算值偏高的現象，使暴潮水位的推算有明顯的改善。

關鍵詞：剪力、暴潮、POM 模式

Effects of Wind Stress on Storm Surge Simulation

Chin-Chieh Lin Laurence Z. H. Chuang Beng-Chun Li Chia-Chuen Kao^{*}
Yi-Sheng Yang Po-Chang Chen

^{*} Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

The value of sea-surface stress is known to have impacts on the numerical simulation results of storm surge. To improve the simulation accuracy of storm surge, this research makes an in-depth discussion of the previous studies and proposes a more suitable wind stress formula for the Princeton Ocean Model (POM). The original wind stress formula of POM considers only wind speed. However, regression analysis of the actual measurement data (Moon, 2004) shows that the predicted sea-surface stress has a greater variation range, which means the wind speed is not the only variable influential to the sea-surface stress. Furthermore, Moon's study on the influence of wind speed and wave age to the sea surface stress also suggests that dual-variable stress formula that considers both the wind and the wave can provide more accurate calculation results and decrease the variation range of the sea-surface stress. This research adopts the formula presented by Janssen (1989), which consider both wave induced stress and turbulence stress, and the SWAN wave model to calculate the wave induced stress. Then, the wave induced stress and the turbulence stress are substituted into POM to simulate the storm surge. A set of historical typhoon data is applied to verify the proposed method. Experiment results show that the presented method can effectively improve the deviation of sea level suggested by POM and make the simulation result closer to the real monitoring value

Keywords: wind stress; storm surge; POM

一、前言

台灣位處於西北太平洋之東亞島弧中，並在颱風移動的主要路徑上，夏、秋兩季均有颱風侵襲。颱風侵襲時，常造成環境破壞及居民生命財產飽受威脅。若能建立一套準確的暴潮預測系統，則可對台灣地區之颱風暴潮進行更精確的演算及預報，有效降低居民生命財產的損失。

為達成暴潮水位的預報，數值模式為颱風暴潮預報的最佳工具，暴潮為天氣系統引起的氣壓變化與其引致的強烈風場及波浪場，產生的海面水位異常變化的現象，包括：因氣旋中心低壓所吸起的水位上升，及作用於水體表面之風剪應力與波浪應力所產生的水位堆升。

風剪應力的研究由 Charnock(1955)利用波浪及海表面風速的資料分析，提出了對於海表面粗糙長度(roughness length, Z_0)與摩擦風速 u_* 間的關係 Z_0g/μ_* (Charnock coefficient) 為定值；Wu(1980)利用低風速下實測之海表面資料分析 Charnock coefficient 為 0.0185；Large and Pond (1981) 以研究船觀測大洋中大氣邊界層的擾動特性，利用慣性消散法估算出風應力與熱通量；Smith et al. (1992)由北海的觀測資料中發現海表面粗糙度在波齡成長時卻減小的現象。

前人對於海表面剪應力的研究，多利用低風速下的實測資料提出海表面剪應力的經驗公式。然而颱風為中心具有強風速的天氣型態，數值模式在推算暴潮水位時，高風速下的剪應力需要外插求得，對於暴潮推算之準確度有待討論。本文即是討論使用低風速實測數據所求得的剪力公式是否適用高風速的情形，以及剪應力的變化對於颱風暴潮的影響，並選擇能較準確決定剪應力的公式代入模式中，以提升暴潮水位推算的準確度。

二、剪應力的影響

2.1 剪應力的分佈範圍

本文利用 POM 模式推算颱風暴潮水位。在控制方程式等號右邊的源函數項分別為壓力項、剪力項及黏滯項，而模式中對於剪應力的計算，如(1)式所示：

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \tau \quad (1)$$

其中 τ 為海表面剪應力。POM 模式中將海表面剪應力定義為：

$$\tau = \rho_a C_d U_{10} |U_{10}| \quad (2)$$

式中 C_d 為阻力係數(drag coefficient)， ρ_a 為空氣密度， U_{10} 為 10 米高風速。模式中建議 Charnock number α_{CH} 為 0.020

$$\frac{z_0 g}{u_*^2} = \alpha_{CH} \quad (3)$$

式中 Z_0 為海表面有效糙度， u_* 為摩擦風速。其中 C_d 與 α_{CH} 的關係如下式：

$$C_d = (0.78 + 0.475 \sqrt{\alpha_{CH}} U_{10}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

式(4)顯示在 POM 模式內所建議使用的阻力係數公式，在同風速下所對應到的阻力係數為一固定的值，會隨風速增大而線性增加。

Moon (2004) 使用 couple Wave-Wind Model 模擬 10 個颱風侵襲下海表面阻力係數值的分布狀況，討論在高風速下海表面阻力係數的分布情況，顯示如圖 1。圖中實線為 Wu(1980) 分析低風速下觀測資料所提出的阻力係數公式；虛線為 Large & Pond (1981) 分析風速 0 m/s 到 25 m/s 情況下海表面情況所求的的阻力係數分佈情況；點線為 POM 模式中建議的阻力係數。

圖中之柱狀圖示為 Powell (2003) 計算 1998 年 Bonnie 颱風的風速剖面實測資料，以求得海表面上的阻力係數。

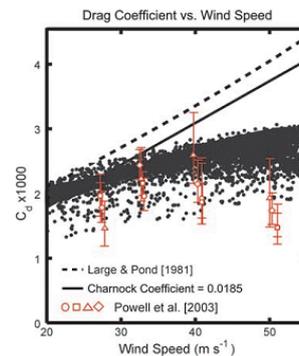


圖 1 海表面剪應力之阻力係數分佈圖

Moon 模式分析結果與 Powell 的實測結果趨勢相符，顯示阻力係數為範圍變動，在高風速下之阻力係數隨風速的增加趨於平緩，阻力係數的值介

於 0.001~0.003 之間。Wu 和 Large & Pond 的分析結果在高風速下與 Powell 的實測分析及 Moon 的模式計算結果，阻力係數的差異相當大。

由於 Wu 及 Large & Pond 使用低風速實測值分析求得的阻力係數在颱風狀態下必須將經驗公式外插，以求得高風速下的阻力係數大小，在高風速下會與實際的情形有著不小的差距。而 POM 模式所建議的阻力係數公式的分佈狀況也有一樣的問題。

2.2 剪應力對暴潮水位的影響

從 Moon (2004)及 Powell (2003)的研究結果可知，阻力係數分佈應為帶狀分佈，故將 Moon 的研究結果做上下限的迴歸，並將此帶狀分布的上下界所迴歸得的兩公式帶入模式中試算，討論阻力係數變動對於暴潮水位的影響程度。

此阻力係數變化範圍的上下限之迴歸公式為：

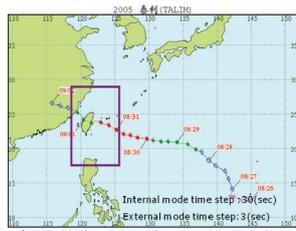
$$C_{D_up} = 1.20 + 0.057U - 0.000418U^2 \quad (5)$$

$$C_{D_down} = 0.47 + 0.043U - 0.000302U^2 \quad (6)$$

將此上限與下限分別代入 POM 模式內去計算，並以 2005 年 8/26 至 9/02 時侵台的泰利颱風，其颱風路徑如圖 2；計算範圍為東經 117 到東經 126 度、北緯 17 到北緯 28 度，如圖 3 所示。

圖 4 為將阻力係數以式(5)代入計算之結果，顯示在 9 月 1 日 10 時，大陸沿海地區最大暴潮偏差量可達約 100 公分；圖 5 為將阻力係數以式(6)代入計算之結果，同一時間在大陸沿岸地區最大暴潮偏差量約 40 公分。

圖 6 為台灣環島幾個測站，代入阻力係數上限與下限所推算的暴潮偏差的差異值，在部分地區暴潮偏差可達約 50 公分。上述暴潮水位的差異最大可達 50 公分，說明了暴潮水位在該處對於剪力值的變動是敏感的。此阻力係數的變動範圍已較 POM 模式中建議的數值更接近實際情況。



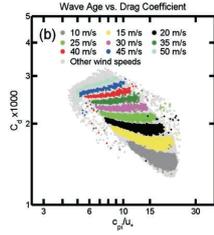


圖 7 阻力係數與波齡之關係受風速影響圖

Jansson 在 1989 年提出一理論計算海表面的動量通量，為包含計算波致應力的剪力公式：

$$\tau = \tau_t + \tau_w \quad (7)$$

將表面總應力 τ_w 表示為波致應力(wave-induced stress)與 τ_t 紊流應力(turbulence stress)之和。

$$\tau_t = \rho_a (\kappa z)^2 \left[\frac{du(z)}{dz} \right]^2 \quad (8)$$

$$\tau_w = \rho_w \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sigma' S_m(f, \theta) d\theta df$$

(8)式中 S_m 為波浪成長能量， $u(z)$ 為海面上高度 z 處之風速， σ' 為角頻率， f 和 θ 為各成份波之頻率與方向。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z + z_0 - z_b}{z_0} \quad (9)$$

對 z 微分

$$\frac{du}{dz} = \frac{u_*}{\kappa} \left(\frac{1}{z + z_0 - z_b} \right) \quad (10)$$

其中

$$z_b = \hat{z}_b \frac{u_*}{g} \quad z_0 = \frac{z_b}{\sqrt{1 - \tau_w / \tau}} \quad (11)$$

z_b 為粗糙長度， \hat{z}_b 為常數等於 0.01， z_0 為表面有效糙度， u_* 為摩擦風速。

將 POM 模式當中原本的剪力公式，替換成式(7)到式(11)，將海表面剪應力表示成：由波浪所造成的波致應力及風所產生的紊流剪應力之和，使海表面剪應力的考慮加入了波浪的影響。

四、波浪模式與海洋模式的結合

4.1 模式結合的必要性

由於海洋模式為利用動量方程式計算表面流速及水位，無法在模式內計算以能量方程為主的波浪資訊，所以必須利用波浪模式以獲取所需的波浪成長能量。本文選用一廣泛運用的波浪模式(SWAN)以求取整個計算範圍上的波浪資訊。

4.2 波浪引致剪力的決定方法

波浪成長項在在波浪模式中為能量從風傳遞到波浪的機制，在波浪模式中包含兩個部分，一為 Philip 的共振理論(線性成長項)，另一為 Miles 的回饋理論(指數成長項)，當風浪線性成長到一定程度後，指數成長項就會變得較為重要，成長項表式通式如式(12)所示：

$$S_m(f, \theta) = A + \mu \cdot S(f, \theta) \quad (12)$$

SWAN 模式在計算波場時，採用 JONSWAP 的初始值，則線性成長會被初始值所取代，本文中採用 JONSWAP 初始波場，而指數成長項在 SWAN 模式中採用 Janssen 所提出的指數成長經驗式。

五、結合模式測試

5.1 模式設定

應用 SWAN 模式及 POM 模式計算颱風引起的暴潮水位時，模式的計算範圍介於東經 117 度到東經 126 度，北緯 17 度到北緯 26 度間海域，網格解析度為 2 分。地形資料來源為國科會海科中心發佈之台灣附近海域地底地形第六版(TaiDBMv6)做為水深資料。

數值模式進行推算時，不考慮天文潮對於氣象暴潮的影響，在模式中只推算由颱風所引起的氣象暴潮。POM 模式在時間網格上的計算採用 mode splitting 的方法，分為二維運算的外模(external mode)與三維的運算內模(internal mode)，其積分時步長分別設定為 3 秒與 20 秒。

颱風期間引發暴潮的主要成因為颱風中心低氣壓所產生的倒氣壓計效應及風剪力對海面所造成的影響，是模式中主要的作用力來源。為描述颱風所形成的氣壓場與風場，本文中所採用的氣壓場為參數化圓形颱風氣壓經驗公式。風場則採用 Ueno (1981)提出的方法計算，由氣壓場推算之。

5.2 暴潮推算結果的比較

利用調和分析法解析新竹、竹圍、淡水、花蓮、梗枋及蘭嶼測站的天文潮水位，再將實測水位與天文潮水位相減即可求得這些測站的暴潮水位，將此法求得之暴潮水位與模式推算的暴潮水位比較如下。

圖 8 為納坦颱風侵台期間自 10 月 24 日到 10 月 25 日的海表面阻力係數值分佈(圖 8 中之分佈

點)，可以發現到使用 Janssen 提出之剪力公式換算成阻力係數後之分佈在納坦颱風案例下與 Moon(2004)的阻力係數分佈相符，也修正了 POM 模式對於阻力係數高估的現象(圖 8 中的斜直線)。

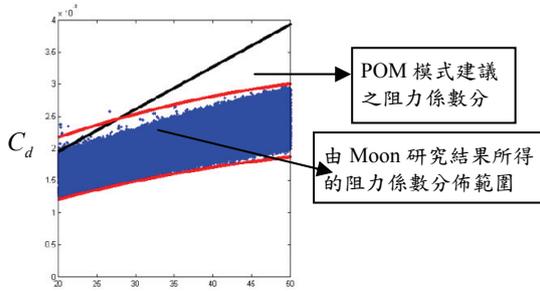


圖 8 納坦颱風侵台時期阻力係數分佈圖

將上述所提到利用 Janssen 之剪力公式代入模式計算求得之最大暴潮偏差與 POM 模式中建議之剪力公式直接求得之最大暴潮偏差及測站實測得的最大暴潮偏差(依東西岸數個測站)作比較，如表 1 所示。再將兩種模式估計值與實測值的差異做比較可得表 2。圖 9 到圖 11 為三個測站(淡水、新竹和竹圍)使用不同公式求得的暴潮偏差比較圖，圖 12 到圖 14 則為各測站只考慮剪力引起的暴潮差異比較圖。在淡水、新竹和竹圍測站使用模式建議之剪力公式所推算出最大暴潮分別為 67 公分、75 公分和 71 公分；使用 Janssen 的剪力公式推算出的最大暴潮水位分別為 58 公分、59 公分和 54 公分；而實測的最大暴潮偏差為 51 公分、49 公分和 46 公分；在淡水、新竹和竹圍若只考慮剪力造成的水位抬升之比較如表 1 所示。表 2 顯示將波浪影響考慮於暴潮推算當中，並採用 Janssen 之剪力公式以推求最大暴潮值，可修正 POM 模式使用原建議之剪力公式所造成的暴潮值高估現象。

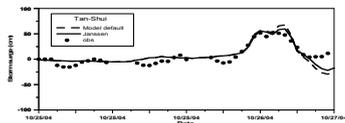


圖 9 淡水潮位站模式推算暴潮偏差比對

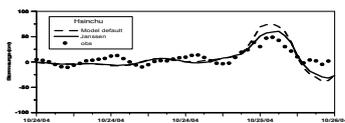


圖 10 新竹潮位站由剪力引起之暴潮偏差比對

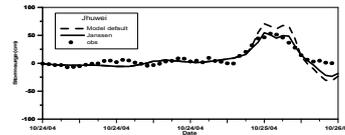


圖 11 竹圍潮位站模式推算暴潮偏差比對

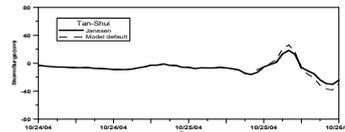


圖 12 淡水潮位站由剪力引起之暴潮偏差比對

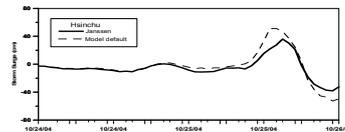


圖 13 新竹潮位站模式推算暴潮偏差比對

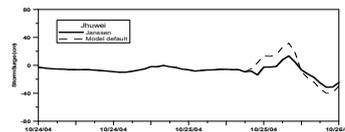


圖 14 竹圍潮位站由剪力引起之暴潮偏差比對

表 1 最大暴潮偏差比較表

測站 ^o	最大暴潮偏差 (cm) ^o		
	Model default ^o	Janssen ^o	實測 ^o
淡水 ^o	67 ^o	58 ^o	51 ^o
新竹 ^o	75 ^o	59 ^o	49 ^o
竹圍 ^o	71 ^o	54 ^o	46 ^o
花蓮 ^o	45 ^o	45 ^o	38 ^o
梗枋 ^o	65 ^o	56 ^o	59 ^o
蘭嶼 ^o	18 ^o	22 ^o	22 ^o

表 2 模式推算之最大暴潮偏差與實測差異值

測站 ^o	Model default (cm) ^o	Janssen (cm) ^o
淡水 ^o	16 ^o	7 ^o
新竹 ^o	26 ^o	10 ^o
竹圍 ^o	25 ^o	8 ^o
花蓮 ^o	7 ^o	7 ^o
梗枋 ^o	6 ^o	3 ^o
蘭嶼 ^o	4 ^o	0 ^o

六、結論

本文目的為選擇能準確決定剪應力的公式代入暴潮推算中，提升暴潮水位推算準確度。由前人研究得知決定剪應力時考慮波浪因子的影響能較準確的決定剪應力值，本文利用 SWAN 波浪模式將波浪因子對於剪應力的影響代入 POM 海洋模式中推算暴潮水位。考慮實際颱風案例的數值模擬結果，經

分析後可歸納出以下結論。

研究顯示利用低風速觀測資料所求的阻力係數公式，在高風速情況下與實測有很大的偏差。將阻力係數變動範圍的最大值與最小值代入模式試算 2005 年泰利颱風案例，發現暴潮水位對於剪力影響是敏感的，此變動範圍對暴潮水位的計算差異，在中部及西北部的測站之差異可達約 50cm，東北部測站約為 10 公分。但並不是所有測站的暴潮水位都會因阻力係數變動影響而有很大的差異，暴潮水位對於剪應力的敏感程度與地域性有關。

於納坦颱風案例下使用 Janssen 提出之剪力公式其阻力係數分佈與 Moon(2004)的阻力係數分佈相符，修正了 POM 模式對於阻力係數高估的現象，也使其估算的暴潮值高估現象有所改善，在颱風路徑下的三測站(淡水、新竹和竹圍)之模式推算的暴潮水位較接近實測值。

謝誌

本文係國科會專題研究計畫「海面波浪對颱風暴潮推算影響」之研究成果(計畫編號：NSC96-2221-E-203-MY3)，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利進行，中央氣象局及水利署提供潮位站資料，成功大學近海水文中心同仁在研究期間的幫助，特此申謝。

參考文獻

1. Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987) "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model," *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Volume 4, pp. 1-16.
2. Charnock, H. (1955) "Wind stress on a water surface," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Volume 81, pp. 639-640.
3. Janssen, P.A.E.M. (1989) "Wave induced stress and the drag of air flow over sea waves," *Journal of Physical Oceanography*, Volume 19, pp. 745-754.
4. Large, W.G. and Pond, S. (1980) "Open Ocean Moment Flux in Moderate to Strong Winds," *Journal of Physical Oceanography*, Volume 11, pp. 324-335.
5. Moon, I.-J., Ginis, I. and Hara, T. (2004) "Effect of surface waves on Charnock coefficient under

tropical cyclones," *Geophysical Research Letters*, Volume 31, L20302.

6. Powell, M.D., Vickery, P.J. and Reinhold, T.A. (2003) "Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones," *Nature*, Volume 422, pp. 279-283.
7. Wu, Jin (1980) "Wind-Stress Coefficient over Sea Surface near Neutral Conditions--A Revisit," *Journal of Physical Oceanography*, Volume 10, pp. 727-740.