臺北港港域漂沙機制分析

劉勁成　國立交通大學土木工程學系博士後研究員
陳蔚偉　國立交通大學土木工程學系博士後研究員
張憲國　國立交通大學土木工程學系教授
薛憲文　國立中山大學海洋環境及工程學系教授
許弘莒　國立中山大學海洋環境及工程學系副教授
劉明鑫　交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

摘要

丹麥水力研究所(DHI: Danish Hydraulic Institute)是一個獨立的國際諮詢及科學研究機構，其所研發的 MIKE 21 是模擬水動力、水質、泥沙、波浪的專業工程軟體，主要應用於港口、河流、湖泊、河口海岸和海洋，具有先進的前後處理功能和用戶介面，DHI 研發完成之 MIKE 21 軟體，已被全球廣泛應用於各個研究領域，為研究臺北港區域漂沙之推估，瞭解漂沙移動之特性及計算海域內之侵淤特性，配合實際臺北港及淡水河之現場觀測資料進行驗證，本研究採用 MIKE 21 進行數值模擬分析淡水河輸沙對於臺北港鄰近海域之影響及模擬漂沙潛勢，及分析其漂沙動力機制與地形變遷之模擬。

一、研究方法

1.1 作業流程

本研究以 MIKE 21 數值模擬軟體中之 MIKE 21 SW 波浪模式進行波浪場模擬，此模式主要應用波浪資料為邊界條件，藉以計算模擬海域之波浪場與輻射應力分佈。海岸漂沙以受波浪及潮流之影響為主，但在碎波帶內，由於潮流之強度一般較弱，因此由波浪碎波後而產生之沿岸流即成為影響沿岸輸沙之主要機制。輻射應力為波浪引起沿岸流之主要動力，且為海域海流模擬計算時之主要波浪特性參數。

另以 MIKE 21 HD 水動力模式進行流場模擬，透過波浪場模擬計算所得之輻射應力，作為流場計算之波浪條件，同時配合 Matsumoto 等人(2000)針對 NAO Tide 提出的 NAO.99b 模式的輸出結果作為驅動 HD 模式進行天文潮推算所需的動力邊界條件。最後以 MIKE 21 ST 輸沙模式模擬受海域之水動力與波浪引起之地形變化特性，將前述所得之波場及流場計算成果，作為模擬計算之輸入條件，可得波浪與潮流共同作用下所造成之侵淤特性，且經由地形的改變重新計算波浪場，整體分析流程圖如圖 1 所示。

模擬過程將先透過風浪推算模式模擬逐時之波浪場，配合風浪推算模式之波浪模擬結果及 NAO.99b 模式之潮位模擬結果，同時考慮淡水河逐時的流量和輸沙量，模擬受到海域水動力與波浪引起之地形變化特性，模擬過程中每個時間步長皆會對地形進行改變，且於下個時間步長重新計算地形改變後之波浪場及流場。

各模式皆以有限體積法(Finite Volume Method)將控制方程式在空間上進行離散，所採用之網格系統為非結構性三角形網格，每一個三角形都代表一個

元素，每一時間步均可解出各元素中心的 N 值(要求解的未知數)。

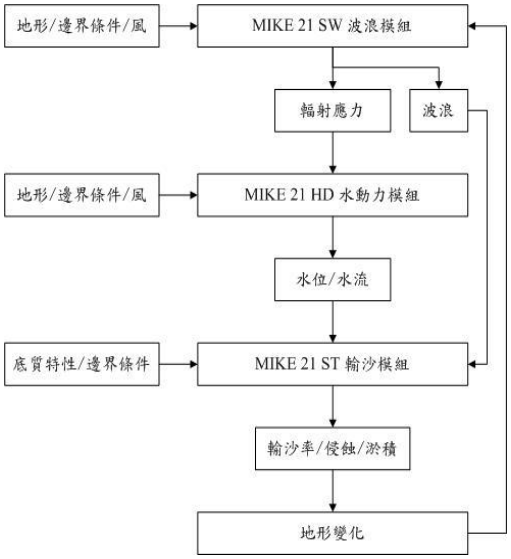

圖 1　地形變遷分析流程圖

1.2 MIKE 21 模式建立

1.2.1 MIKE 21 SW 波浪模式

MIKE 21 SW 主要用於模擬離岸及近岸區，風浪和湧浪的成長、衰減及傳播變形。MIKE 21 SW 包含兩個不同公式：

(一)全譜公式：

全譜公式基於 Komen 等人(1994)和 Young (1999)的波動守恆方程。全譜模式包含下列物理現象：風浪成長、波與波非線性交互作用、白沫消散、底床摩擦消散、水深引起的波浪破碎、水深變化引起的折射和淺水變形、波流交互作用、水深隨時間變化產生的影響、波浪場冰層覆蓋產生的影響。

該模式係模擬波浪在各種外力作用下之波能變化，其求解之方程式為波浪作用力守恆方程式(Wave action conservation equation)，此方程式為二維時變域之偏微分方程式，表示如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\vec{v}N\right)=\frac{S}{\sigma} \quad \text{.....(1.1)}$$

其中，$N(\vec{x},\sigma,\theta,t)$為波力頻譜密度函數(wave action density function)，與波能頻譜密度函數$E(\vec{x},\sigma,\theta,t)$(wave energy density function)之關係為 N=E/σ；$\vec{x}=(x,y)$；t 為時間；σ為角頻率；而θ則為波向角。$\vec{v}=\left(c_x,c_y,c_\sigma,c_\theta\right)$為一個 4 維空間的向量，$\left(c_x,c_y\right)=\frac{d\vec{x}}{dt}=\overrightarrow{c_g}+\vec{U}$，代表群波在空間上的傳遞速度，其中$\overrightarrow{c_g}$為群波速度，而$\vec{U}$則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。$c_\sigma=d\sigma/d\mathrm{t}$，代表角頻率$\sigma$之變化速度。$c_\theta=d\theta/d\mathrm{t}$，代表波向角$\theta$之變化速度。

$\nabla=\left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y},\frac{\partial}{\partial\sigma},\frac{\partial}{\partial\theta}\right)$為一個 4 維空間的向量運算子，S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程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，表示如下：

$$S=S_{in}+S_{nl}+S_{ds}+S_{bot}+S_{surf} \quad \text{.....(1.2)}$$

其中S_{in}為風浪之成長項，S_{nl}為波與波非線性交互作用項，S_{ds}為白沫消散項，S_{bot}為底床摩擦項，而S_{surf}則為碎波消耗項。

(二)方向參數化解耦公式

方向參數化解耦公式基於波動守恆方程的參數化形式，按照 Holthuijsen (1989)理論，參數化在頻率空間內進行，引入波譜的零階和一階矩作為決定

變量，可用於以波浪碎波後而產生之沿岸流的泥沙傳輸計算。參數化的方程式表示如下：

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t}+\frac{\partial\left(C_{gx}m_0\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(C_{gy}m_0\right)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta m_0)}{\partial\theta}=\mathrm{T}_0$$

……(1.3)

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t}+\frac{\partial\left(C_{gx}m_1\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(C_{gy}m_1\right)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta m_1)}{\partial\theta}=\mathrm{T}_1$$

……(1.4)

其中 $m_0(x,y\theta)$ 為波譜 $N(x,y\omega\theta$ 的零次矩，$m_1(x,y,\theta)$ 為波譜 $N(x,y,\omega,\theta)$ 的一次矩，C_{gx} 及 C_{gy} 分別為群波速度 x、y 方向之分量，C_θ 為 θ 方向的波浪行進速度，ω為角頻率，T_0 和 T_1 為 Source Terms，包含風、底床摩擦、碎波等因素。n 次矩 $m_n(\theta)$ 定義為

$$m_n(x,y,\theta)=\int_0^\infty \omega^n N(x,y,\omega,\theta)d\omega \ldots(1.5)$$

1.2.2MIKE 21 HD 水動力模式

MIKE 21 HD 建立在 Boussinesq 和流體靜壓力假設的不可壓縮 Reynolds averaged Navier-Stokes 方程式的基礎之上，其由連續方程式和動量方程式組成。對一般含時間因素之空間上三維的水動力系統方程式，以水深方向積分處理後，簡化為如下含時間變化之二維水動力計算系統

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS \quad \ldots\ldots(1.6)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y}=&\,f\bar{v}h-gh\frac{\partial\eta}{\partial x}-\frac{h}{p_0}\frac{\partial p_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2p_0}\frac{\partial p}{\partial x}\\&+\frac{\tau_{sx}}{p_0}-\frac{\tau_{bx}}{p_0}-\frac{1}{p_0}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)\\&+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{xy}\right)+hu_sS\end{aligned}$$

…… (1.7)

$$\begin{aligned}\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y}=&-f\bar{u}h-gh\frac{\partial\eta}{\partial y}-\frac{h}{p_0}\frac{\partial p_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2p_0}\frac{\partial p}{\partial y}\\&+\frac{\tau_{sy}}{p_0}-\frac{\tau_{by}}{p_0}-\frac{1}{p_0}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right)\\&+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{yy}\right)+hu_sS\end{aligned}$$

…… (1.8)

其中 η 為自由液面，d 為靜止水深，h= η +d 為總水深，f 為柯氏(Coriolis)力參數，g 為重力加速度，P_a 為大氣壓力，S_{xx}、S_{xy} 、S_{yx} 、S_{yy} 為輻射應力張量(radiation stress tensor)，τ_{sx} 和 τ_{sy} 為表面風應力，τ_{bx} 和 τ_{by} 為底部應力，T_{xx} 、T_{xy} 、T_{yy} 為側向應力，S 為點源的排出量，$\bar{u}$ 和 $\bar{v}$ 為水深平均速度，可定義如下式

$$h\bar{u}=\int_{-d}^{\eta}udz,\quad h\bar{v}=\int_{-d}^{\eta}vdz, \quad \ldots\ldots(1.9)$$

側向應力 T_{ij} 包括黏性摩擦和紊流摩擦，可透過紊流渦度黏滯 (eddy viscosity)係數 A 估計

$$T_{xx}=2A\frac{\partial\bar{u}}{\partial x},\ T_{xy}=A\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right),\ T_{yy}=2A\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}$$

…… (1.10)

1.2.3MIKE 21 ST 輸沙模式

MIKE 21 ST 主要為計算波浪、潮流或波流共同作用下的非粘性沙傳輸能力及相對的地形變化率。該模式的數值計算是基於給定地形條件下的相應水動力條件進行，透過對地形變化率的回饋機制進行地形變遷計算。MIKE 21 ST 的輸沙量同時考慮底床載輸沙量和懸浮載輸沙量，可表示為

$$q_t = q_b + q_s \quad \text{.....(1.11)}$$

其中 q_t 為總輸沙量，q_b 為底床載輸沙量，q_s 為懸浮載輸沙量。底床載輸沙量採用 Engelund 和 Fredsøe (1976)的理論，透過瞬時徐爾茲參數(Shields parameter)計算而得。懸浮載輸沙量採用 Fredsøe 等人(1985)的理論

$$q_s = \frac{1}{T}\int_0^T \int_{2d}^{D} (uc)dzdt \quad \text{.....(1.12)}$$

其中 u 為瞬時流速，c 為瞬時漂沙濃度，$2d$ 為底床邊界層厚度，D 為水深，T 為波浪周期。

MIKE 21 ST 主要透過網格中心點的地形變化率 $\frac{\partial z}{\partial t}$ 來決定地形變化，其控制方程式可表示為

$$-1(1-n)\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \quad \text{.....(1.13)}$$

其中 n 為底床孔隙率，z 為地形高程，S_x 為 x 方向底床載輸沙量或總輸沙量，S_y 為 y 方向底床載輸沙量或總輸沙量，ΔS 為源項。地形的更新主要基於地形變化率，因此新的地形高程可表示為

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n}\frac{\partial z}{\partial t}\Delta t_{HD} \quad \text{.....(1.14)}$$

1.2.4 風浪推算數值計算條件

(一)地形及網格設定

本研究所採用之地形資料，於近岸區利用海軍海洋測量局發行之海圖地形，而遠岸區則採用 National Geophysical Data Center 發布之全球高程資料 ETOPO2v2 (2006)。該地形資料範圍包含東經 180º～西經 180º、北緯 89.967º～南緯 90º，地形格網之解析精度為 2'×2' (約為 4×4 公里)。本研究採用非結構型三角網格方式計算，模擬範圍之邊界南約至北緯 14 º、北約至北緯 30 º、西約至東經 111º、東約至東經 135º，範圍涵蓋至大陸、臺灣及菲律賓群島，所模擬範圍之地形水深如圖 2 所示。由圖中可知，為於近岸區獲得較高精度之模擬結果，鄰近臺灣、澎湖、金門、馬祖海域之海岸線採用較密之網格，而遠岸區則採用較粗之網格，共計有 5,436 個節點、9,709 個元素，網格之設定如表 1 所示。

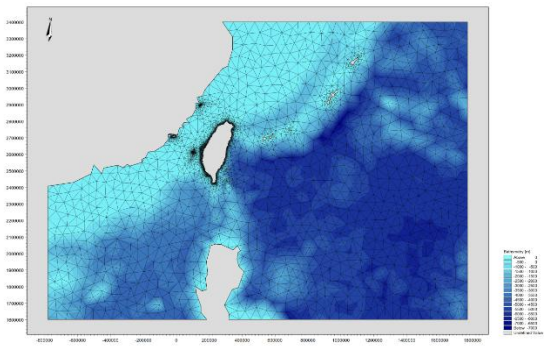

圖 2　風浪推算模擬範圍之地形水深

表 1　風浪推算模擬之網格設定內容

元素個數	9,709
節點個數	5,436
最小元素面積(m^2)	1,984
最大元素面積(m^2)	1.2×10^9

(二)風場模式

本研究風場模式採用高雄海洋科技大學海事資訊科技系暨研究所陳昭銘教授辦理「臺北港區風場數值預報系統之建置研究」計畫之研究成果進行模擬，陳教授的風場主要是將大氣模式的風場資料細化成 2 公里的解析度(以下簡稱 ARW_NFS2 公里)，並依照波浪推算模式的需求逐時輸出風場資料，ARW_NFS2 公里所使用之大氣風場預報模式係以 Weather Research and Forecasting (WRF)模式(e.g., Skamarock et al. 2001)為基礎，經由進階改良之 Advanced Research WRF (ARW; e.g., Skamarock et al. 2005; Skamarock et al. 2008)模式。ARW_NFS2 公里模式之優點為可使用多層巢狀方式，將全球觀測資料所預報之大尺度預報資訊(約為 50 公里解析度)，以動力降尺度方式逐漸內化到各指定小區域，並經由提高網格點之解析度，達到指定區域所需求之高解析度預報資訊。ARW_NFS2 公里以全球預報模式之高解析度(0.5 º×0.5 º，約 50 公里網格點)預報結果為邊界條件，採用三層巢狀系統，以 4 倍放大效率，依序使用 32 公里、8 公里、2 公里解析度，將全球預報資訊降尺度到臺灣鄰近海域與港灣區。

(三)模式參數設定

本研究進行 SW 模組颱風波浪推算所設定之相關參數如表 2 所示。在頻率領域方面，最小頻率採 0.055Hz，並以 1.1 倍參數的指數型式分割成 25 個頻率帶，相當於週期 1.85～18.18 秒。在角度領域方面，以 10º為 1 個角度單位，共計分割成 36 個方向角，計算時距以 1 小時進行計算。風浪能量消散機制則考量 4 個波波非線性交互作用、碎波效應、底床摩擦、白沫消散等物理機制。計算範圍的邊界條件共分成二種邊界形式，一為陸域邊界，其不考慮入射波浪的能量通量；另一為海域邊界，其考慮波浪通過此邊界時完全被吸收。

表 2　模式參數設定彙整表

相關參數	設定
頻率領域	0.055Hz~ 0.542Hz
角度領域	0º~360º、Δθ=10º
時距	Δt=1hr
碎波指標	γ=0.8
底床摩擦	kN=0.04m
白沫消散	Cds=4.5、δds=0.5

1.2.5 地形變遷數值計算條件

(一)地形及網格設定

本研究於近岸區利用的地形水深資料為現地實測的地形，遠岸區則採用海軍海洋測量局發行之海圖地形，模擬範圍之地形水深如圖 3 所示，由圖中可知，為了於研究區域獲得較高精度的模擬結果，鄰近臺北海域之海岸線採用較密的網格，而離研究區域較遠之外海則採用較粗的網格，網格的設定如表 3 所示。

表 3　地形變遷數值模擬之網格設定內容

元素個數	44,673
節點個數	23,065
最小元素面積(m^2)	141.48
最大元素面積(m^2)	7297.56

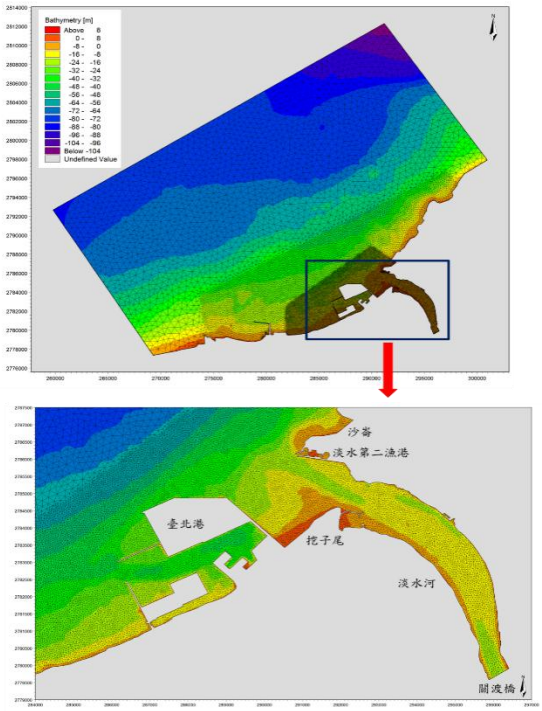

圖 3　地形變遷模擬範圍之地形水深

(二)邊界條件

本研究地形變遷數值模擬的波場邊界條件擷取自風浪模式推算結果作為外海波浪條件，而流場邊界則採用 Matsumoto 等人(2000)針對NAO Tide提出的NAO.99b模式的輸出結果作為驅動 HD 模式進行天文潮推算所需的動力邊界條件。

(三)模式輸入參數

本研究地形變遷數值模擬各模式參數設定如表 4 所示，其中底值粒徑分布採用經濟部水利署第十河川局(2015)「淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估(2/2)」之現場調查成果，如圖 4 所示。

表 4　地形變遷數值模擬各模式參數設定

模擬時間	2012/12/24~2012/12/29、2013/6/2~2013/6/7、2013/7/9~2013/7/18、2013/10/3~2013/10/11
時間間距	1hr
MIKE 21 SW 波浪模式	
波譜公式	方向參數化解耦公式
時間公式	準穩態公式
水位條件	模擬範圍內隨空間和時間變化
水流條件	模擬範圍內隨空間和時間變化
碎波參數	Gamma，常數 0.8
底床摩擦	Nikuradse roughness，模擬範圍內隨空間變化
邊界條件	逐時變動波浪條件(波高、週期和波向)
MIKE 21 HD 水動力模式	
渦流黏度	Smagorinsky formulation，常數 0.28
底床摩擦阻力	Manning number，模擬範圍內隨空間變化
波浪輻射應力	模擬範圍內隨空間和時間變化
源	淡水河逐時流量
邊界條件	逐時變動潮位
MIKE 21 ST 輸沙模式	
模擬方式	結合波和流
底床孔隙率	0.4
底床中值粒徑	模擬範圍內隨空間變化，D_{50} 介於 0.0251mm 至 0.4922mm 之間
波浪外力	模擬範圍內隨空間和時間變化
最大地形改變量	1m/day，地形改變量將反饋至波浪、水動力和輸沙模式
邊界條件	Zero sediment flux gradient for outflow, zero bed change for inflow

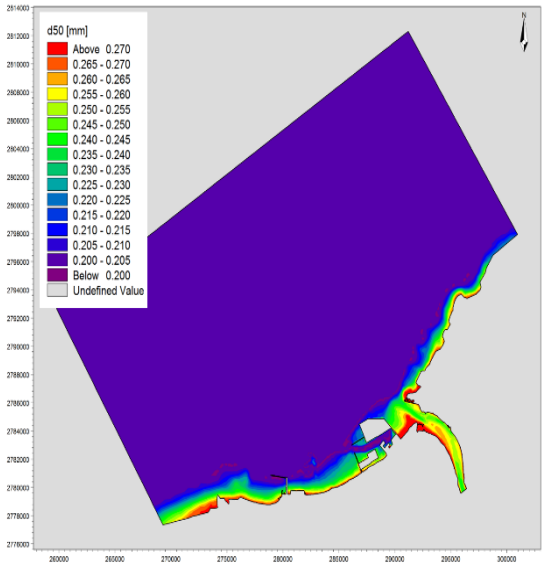

圖 4　底質粒徑分布圖

二、模式驗證

2.1 風浪模式驗證

為確認本模式於研究區內的模擬成效，分別選擇研究區內颱風波浪及季風波浪進行驗證，本研究選用之驗證資料來源為交通部運輸研究所港灣技術研究中心於臺北港之海氣象觀測資料。

2.1.1 颱風波浪

颱風波浪採用臺北港歷年來監測到最大波高 6.94m 的 2013 年蘇力(SOULIK)颱風波浪資料及該年度第二大的菲特(FITOW)颱風波浪資料進行驗證。

(一)模式評估指標

為瞭解模式推算值與觀測值的吻合程度，將採用 4 個指標來評估模式推算結果的優劣，分別為判定係數(R-square, R2)、均方根誤差(RMSE, root mean squared error)、颱風波浪最大波高誤差ΔHs, p、最大波高發生時間誤差Δtp。

$$R^2=\frac{\left(\sum_m\sum_n\left(\left(H_{s,obs}\right)_{mn}-\bar{H}_{s,obs}\right)\left(\left(H_{s,num}\right)_{mn}-\bar{H}_{s,num}\right)\right)^2}{\left(\sum_m\sum_n\left(\left(H_{s,pbs}\right)_{mn}-\bar{H}_{s,pbs}\right)^2\right)\left(\sum_m\sum_n\left(\left(H_{s,num}\right)_{mn}-\bar{H}_{s,num}\right)^2\right)} \quad \text{.....(2.1)}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{mn}\sum_m\sum_n\left(\left(H_{s,obs}\right)_{mn}-\left(H_{s,num}\right)_{mn}\right)^2} \quad \text{.....(2.2)}$$

$$\Delta H_{s,p}=MAX\left(H_{s,num}\right)-MAX\left(H_{s,obs}\right) \quad \text{.....(2.3)}$$

$$\Delta t_p=t_{p,num}-t_{p,obs} \quad \text{.....(2.4)}$$

其中 $H_{s,num}$ 為模式推算颱風波浪示性波高；$H_{s,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高；$t_{p,num}$ 為模式推算颱風波浪示性波高最大值發生時間；$t_{p,obs}$ 為測站實測颱風波浪示性波高最大值發生時間。由式(2.3)可知，若 $\Delta H_{s,p}$ 為正值，表示模式推算的示性波高過於高估，若為負值則表示低估，由式(2.4)可知，若 Δt_p 為正值，表示模式推算的示性波高最大值發生時間較實測晚，若為負值則表示較實測早。

(二)颱風波浪示性波高的時序列比較

圖 5 為颱風波浪示性波高的時序列比較圖，上圖為蘇力颱風波浪的比較，下圖為菲特颱風波浪的比較，圖中實心圓點為觀測值，實線為 MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場的推算結果。由圖中可知，模擬趨勢和觀測值皆非常一致。由颱風資料的驗證可知，MIKE 21 SW 使用 ARW_NFS 風場的波浪推算方式在計畫區內可獲得不錯的推算成果。

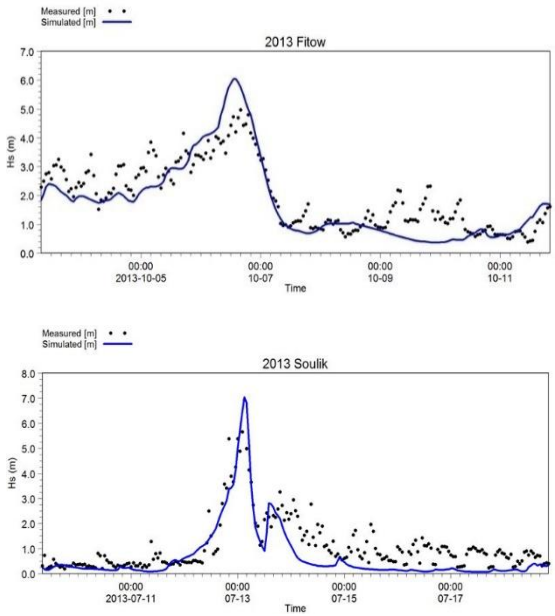

圖 5　颱風波浪示性波高時序列比較

(三)颱風波浪示性波高的評估指標比較

由 2013 年蘇力颱風在臺北港推算的結果可知，判定係數(R^2)為 0.77，均方根誤差(RMSE)為 0.7m，推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 為 0.11 m，最大波高發生時間誤差 Δt_p 為 0 小時。由 2013 年菲特颱風在臺北港推算的結果可知，判定係數(R^2)為 0.78，均方根誤差(RMSE)為 0.68m，推算結果與實測結果最大波高誤差 $\Delta H_{s,p}$ 為 1.08m，最大波高發生時間誤差 Δt_p 為-2 小時。由評估指標的比較可知，MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場在臺北港有不錯的推算結果。

2.1.2 季風波浪

圖 6 為季風波浪示性波高的時序列比較圖，上圖為冬季季風波浪的比較，下圖為夏季季風波浪的比較，圖中實心圓點為觀測值，實線為 MIKE 21 SW 採用 ARW_NFS 風場的推算結果，由圖中可知，模擬趨勢和觀測值皆非常一致，另由觀測值和推算結果的誤差比較可知，冬季季風波浪均方根誤差(RMSE)為 0.86m，而夏季季風波浪均方根誤差(RMSE)為 0.41m，顯示 MIKE 21 SW 使用 ARW_NFS 風場的波浪推算方式在研究區域內可獲得不錯的推算成果。

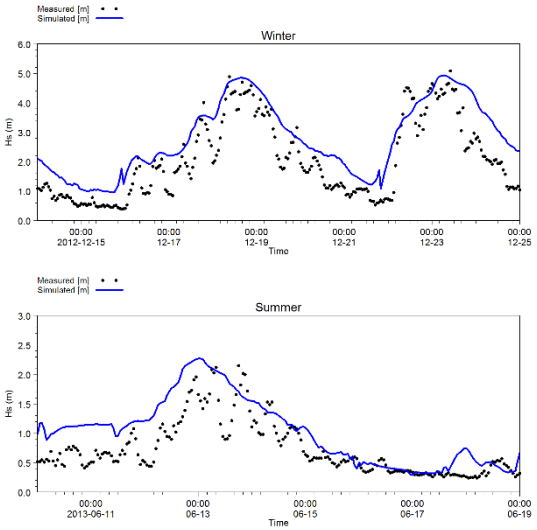

圖 6　季風波浪示性波高時序列比較

2.2 流場模式驗證

2.2.1 颱風時期

2013 年蘇力颱風期間由於無觀測到潮流資料，故僅進行潮位驗證。圖 7 為蘇力颱風期間潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，由圖中可知，模擬與實測的潮位非常接近，其均方根誤差(RMSE)為 0.17m。

圖 8 為 2013 年菲特颱風期間流場驗證圖，上圖為潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，中圖為流速時序列比較圖，圖中黑色實線為實測資料，藍色實線為模擬結果，下圖為流向時序列比較圖，圖中黑色實心圓點為實測資料，藍色實心方點為模擬結果。由圖中可知，實測與模擬結果於潮位、流速及流向的比對皆相當一致，菲特颱風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.28m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.23m/s。

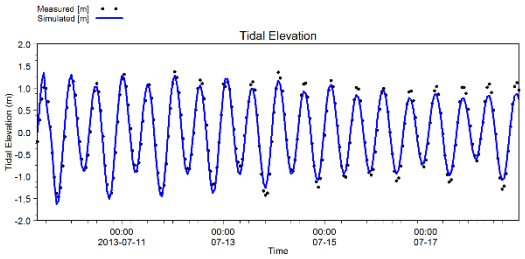

圖 7　2013 年蘇力颱風期間潮位驗證

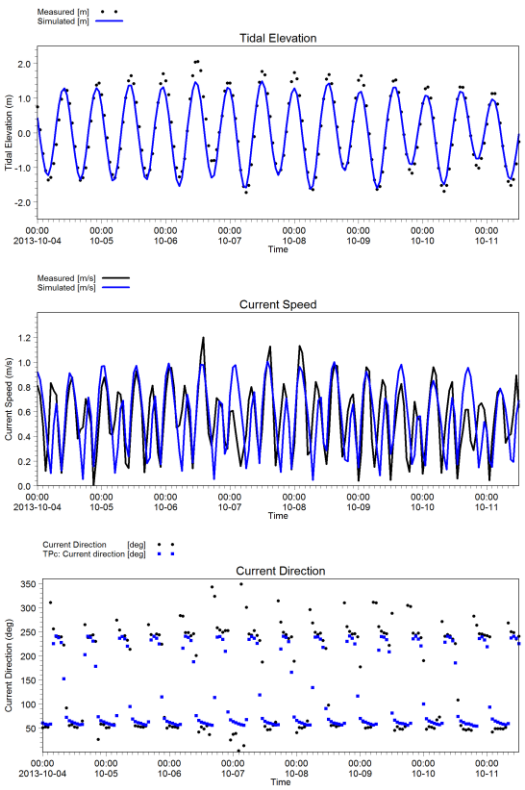

圖 8　2013 年菲特颱風期間流場驗證

2.2.2 季風時期

圖 9~圖 10 分別為冬季季風和夏季季風期間流場驗證圖，上圖為潮位時序列比較圖，圖中實心點為實測資料，實線為模擬結果，中圖為流速時序列比較圖，圖中黑色實線為實測資料，藍色實線為模擬結果，下圖為流向時序列比較圖，圖中黑色實心圓點為實測資料，藍色實心方點為模擬結果。由圖中可知，實測與模擬結果於潮位、流速及流向的比對皆相當一致，冬季季風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.12m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.19m/s，夏季季風期間潮位的均方根誤差(RMSE)為 0.12 m，流速的均方根誤差(RMSE)為 0.17m/s。

由流場模式的驗證可知，應用 MIKE21 HD 水動力模式配合本研究所使用之邊界設定，確實可充分掌握並完整呈現臺北港附近海域潮位與潮時之整體變化特性及分佈趨勢。

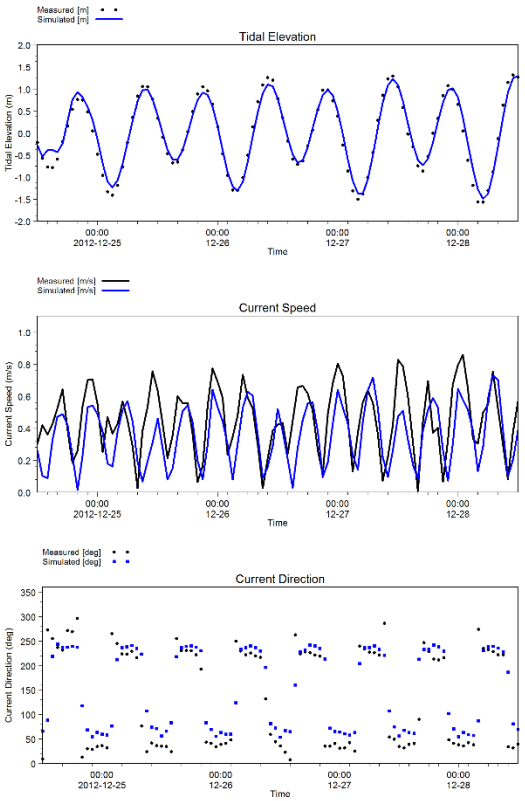

圖 9　冬季季風期間流場驗證

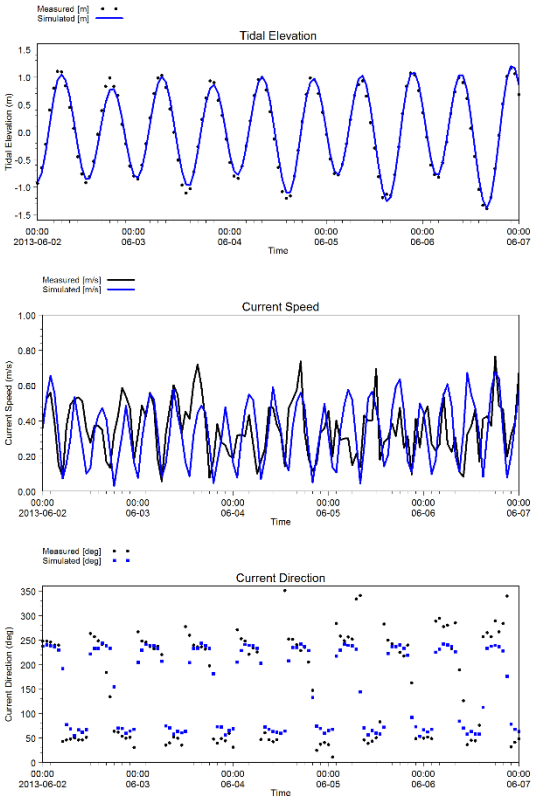

圖 10　夏季季風期間流場驗證

三、模擬案例

本節利用交通部運輸研究所港灣技術研中心在淡水河關渡測站的實測流量與含沙量資料，作為 MIKE 21 數值模式河川上游相關流量、輸沙邊界條件，並以蘇力颱風為實際應用之模擬案例，進行河口輸沙與海岸地形變遷之影響評估。

2013 年 7 月蘇力颱風侵台，臺北港監測到歷年來最大波高 6.94m，因此採用逐時模擬的方式，探討蘇力颱風期間河口輸沙對於臨近海岸變遷之影響。首先透過風浪推算模式模擬 2013 年 7 月 9 日 8 時至 7 月 18 日 20 時之波浪場，其中已包含蘇力颱風完整的影響效應，配合風浪推算模式之波浪模擬結果及 NAO.99b 模式之潮位模擬結果，同時考慮淡水河逐時的流量和輸沙量，模擬受到海域水動力與波浪引起之地形變化特性，模擬過程中每個時間步長皆會對地形進行改變，且於下個時間步長重新計算地形改變後之波浪場及流場。

由數值模式計算出蘇力颱風期間波浪作用下的沿岸特性(波場、沿岸流場、泥沙擴散分布、底床侵淤變化)如圖 11~圖 16 所示。圖 11 為蘇力颱風期間最大波高發生時的波場分布圖，由圖中可知，近岸波高最大位置發生在臺北港北側防波堤，介於 6.0~7.0m，臺北港港口處介於 3.0~6.0m，臺北港南側近岸則皆介於 1.0~1.5m。圖 12 為蘇力颱風期間最大波高發生時的沿岸流場分布圖，由圖中可知，近岸流速較大的位置為臺北港北側防波堤外海，約為 0.6~0.8m/s，並由西南向東北流動。圖 13 為蘇力颱風期間淡水河最大流量發生時沿岸流場分布圖，由圖中可知，淡水河出海造成的流速變化延伸至淡水第二漁港外側，並受到漲潮的影響，流向轉向西南，同時在挖子尾附近形成渦流。圖 14 為蘇力颱風期間臺北港漲潮時泥沙擴散分布圖，由圖中可知，漲潮時海水由河口進入淡水河，造成河口處懸浮質累積，且由於流場向西南流動，因此部分泥沙出淡水河後由挖子尾外海往西南側擴散，並有些許漂沙進入臺北港。圖 15 為蘇力颱風期間臺北港退潮時泥沙擴散分布圖，由圖中可知，退潮時淡水河水量由淡水第二漁港外側出海，大部分與潮流匯集後向東北側流動，小部分則在挖子尾外側跟臺北港間形成渦流，因此泥沙出淡水河後大部分往東北側擴散，小部分則擴散至挖子尾外側跟臺北港間。圖 16 為蘇力颱風作用後底床侵淤變化圖，由圖中可知，受到蘇力颱風波浪作用後，臺北港與挖子尾間呈現淤積的現象，臺北港港口處亦有些許淤積，臺北港南側則呈現近岸侵蝕遠岸淤積的現象，而外海大致呈現侵淤互現的現象。

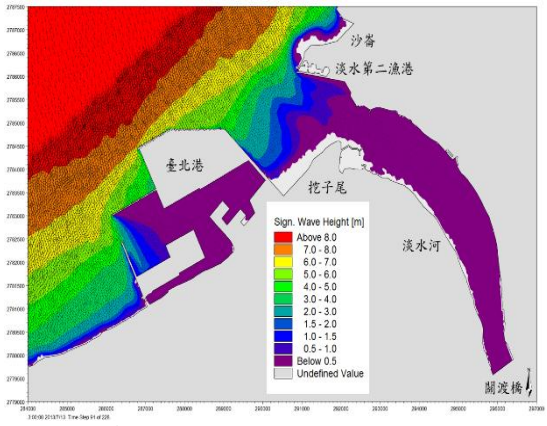

圖 11　蘇力颱風期間最大波高發生時的波場分布圖

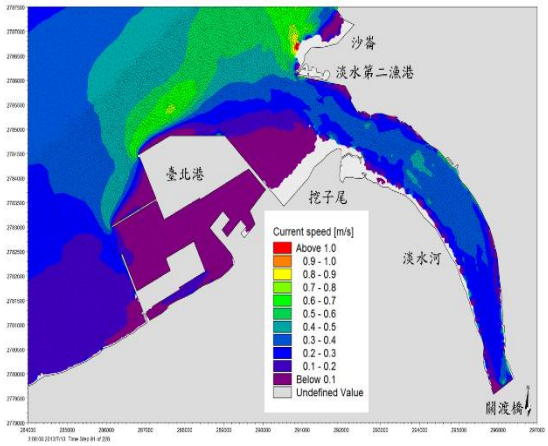

圖 12　蘇力颱風期間最大波高發生時的沿岸流場分布圖

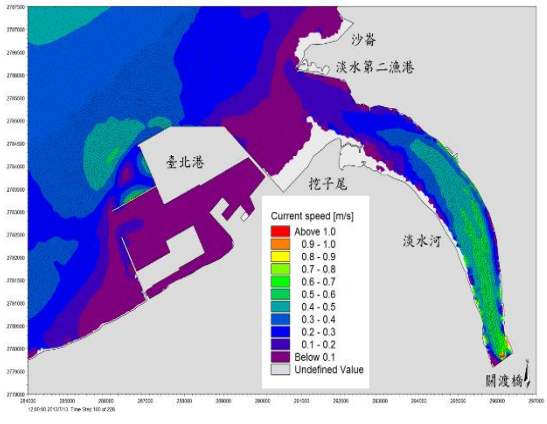

圖 13　蘇力颱風期間淡水河最大流量發生時沿岸流場分布圖

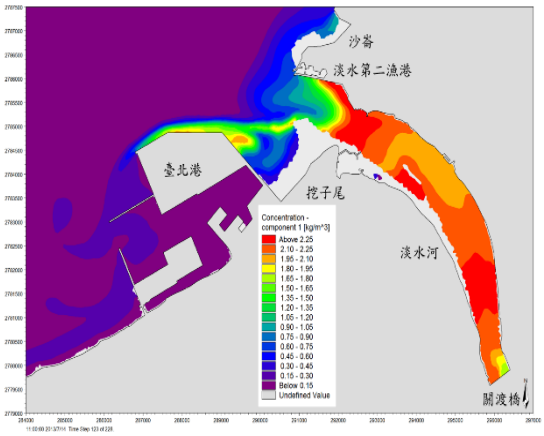

圖 14　蘇力颱風期間臺北港漲潮時泥沙擴散分布圖

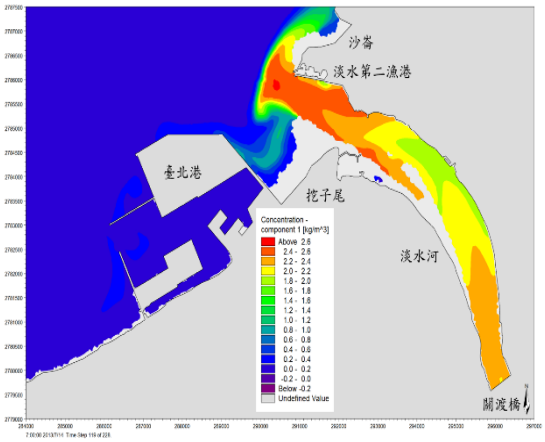

圖 15　蘇力颱風期間臺北港退潮時泥沙擴散分布圖

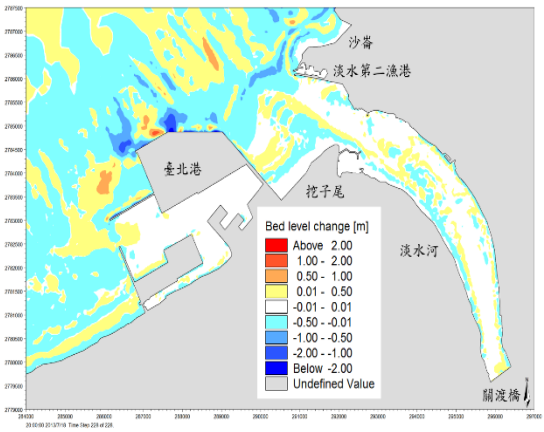

圖 16　蘇力颱風作用後底床侵淤變化圖

四、結論

本研究藉由數值模式DHI研發完成之MIKE 21軟體,配合實測資料進行模擬驗證，藉由依據臺北港區附近之海象資料、底質分佈特性及淡水河年輸沙量等，作為模式計算之設定依據，建立淡水河河口地區輸沙與臨近海岸地形變遷之數值模式，並完成風浪模式驗證、颱風時期流場模式驗證及季風時期流場模式驗證等模式驗證及模式建置工作。

河口之輸沙行為，與上游河道來水、來沙量密切相關，河口模式所需之上游流量、輸沙量資料，可考慮距離河口最近之河川水文測站，故本研究採用關渡測站港研中心之實測資料，進行河口輸沙與海岸地形變遷之影響評估，透過 MIKE 21 軟體設定海域底質粒徑分佈，模擬研究區域複雜的沙礫特性，以該軟體之 SW 波浪模組模擬波場，HD水動力模組模擬流場,ST輸沙模組模擬漂沙潛量，判斷其侵淤特性及地形變化趨勢，而由模擬蘇力颱風期間淡水河口輸沙對於臨近海岸變遷之影響，瞭解臺北港鄰近區域之泥沙擴散分布及底床侵淤變化等沿岸特性。

參考文獻

1. 林銘崇，淡水河系河床穩定性與河口地形變化之研究，臺灣大學水工試驗所，臺北，1989年。
2. 何良勝、林柏青、廖慶堂、林受勳、陳志弘、蔣敏玲,「臺北港(105年)海岸漂沙調查及海氣象與地形變遷監測作業」，交通部運輸研究所，2016年。
3. 廖慶堂、林受勳、陳志弘、蔣敏玲、衛紀淮、羅冠顯、何良勝、蔡立宏，「105年臺灣國內商港海域海氣象觀測分析研究」，交通部運輸研究所，2016年。
4. 李忠潘、張憲國、曾以帆、許弘莒、劉勁成、李孟學、陳蔚瑋、劉黃宗隆、莊曜陽、吳泓毅、王韋樺、江朕榮、陳沛宏、李明峯、許城榕、林照川，「臺北港海氣地象資料檢核與分析」，交通部運輸研究所，2018年。
5. 魏震,「台北港興建對鄰近海岸地形影響之評析」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2001年。
6. 張菀文,「淡水河河口地區變遷之研究」，國立臺灣大學地理環境資源系碩士論文，2002年。
7. 蔣華傑,「極端條件下台北港附近海域底床變遷之研究」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2002年。
8. 莊富凱,「淡水河下游河海工程對河口段地形影響之研究」，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文，2003年。
9. 賴春婷,「河口短時距地形變動之研究~以淡水河口挖子尾為例」,國立臺灣大學地理環境資源系碩士論文，2003年。
10. 陳昭銘,「臺北港區風場數值預報系統之建置研究」，交通部運輸研究所，2012年。
11. 薛憲文、李忠潘、陳陽益、王兆璋、李賢華、劉黃宗隆，”澳底福隆地區海岸地形變遷”，中華民國第二十五屆海洋工程研討會專題，東北角海域海氣象特性與海岸防護，基隆海洋大學，2003年，pp.59-75。
12. 經濟部水利署第十河川局,「淡水河口輸砂對鄰近海岸之影響評估(2/2)」，2015年。
13. 港灣技術研究中心「港灣環境資訊網」：http://isohe.ihmt.gov.tw
14. Coles, S.G., “An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values”, Springer-Verlag, London, 2001.

15. Coastal engineering manual “Hydro-dynamic analysis and design conditi ons,” Chapter 8, 2002.
16. DHI, User guide and reference man ual of MIKE 21-coastal hydraulics and oceanography hydrodynamic mo del, Danish Hydraulic Institute, 201 1.
17. Saha, S., and Coauthors: The NCEP Climate Forecast System Reanalysi s. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 20 10, pp. 1015–1057.
18. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A des cription of the Advanced Research WRF version 2. NCAR/TN-468_ST R, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 2005,pp.88
19. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, an d Dudhia, J. “Prototype for the WR F(Weather Research and Forecasting) model,” Preprints, Ninth Conf. on Mesoscale Processes, Fort Lauderdal e, FL, Amer. Meteor. Soc., 2001, J1 1-J15.