

麥寮港防波堤堤頭動床三維數值模擬研究

曾以帆	國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授
李忠潘	國立中山大學海洋環境及工程學系教授
林義復	國立中山大學海洋環境及工程學系博士
邱永芳	交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
何良勝	交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔡金吉	交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員

摘要

為探討與分析防波堤堤頭的淘刷機制，防止港灣防坡堤崩塌，本研究應用 FLOW-3D[®] CFD 軟體對港灣防波堤堤頭附近海域進行波流場動床三維數值模擬，以麥寮工業港（以下簡稱麥寮港）外海 50 年重現期之颱風波浪作為開放水域邊界條件，以海域現場設置都卜勒流剖儀 (ADCP) 觀測潮汐水位做為潮流場啟動邊界，以實測水深建立定床邊界，港口實體物理模型 (CAD) 為封閉邊界，流場穩定包括網格獨立性與計算領域邊界敏感性測試。研究的結果顯示，波流場水動力的模式驗證與水工試驗現場觀測趨於一致。以視覺化呈現

波場自由水面及堤頭前之垂直流況時序變化，以及最大底床水分子速度分佈分析與渦流區底床切剪力的分布情形，包括波浪引發的流場伴隨南北向的漲退潮流，以及陡峭淺化的海底地形，共同形成堤頭附近海床的淘刷機制。前進波列在防波堤遮蔽的前方積聚的水動力能量，折向深海方向的帶狀離岸流與南向的前進波列混合，深化了海床邊界層的紊流機制，淘刷區因此紊流機制起動之懸浮載，隨著漲退潮流搬離遠處。由於長期缺乏砂源補注，淘刷區浸淤失衡，因此持續威脅防波堤結構體的穩定。

一、前言

防波堤 (breakwater) 為港內港外分界線的海事結構體，主要作用為遮蔽 (sheltering) 與防止波浪及漂砂侵入，保持港內靜穩度 (calmness)，確保船舶安

全進出，順利靠泊裝卸。建設港口規劃防波堤的海域深度與座向前，應先考慮分析預定港址外海歷年來各項實測波候統計資料，包括平均、眾數、中值與

極值等，湯 (2004)。

波浪或海流通過海中結構物時，可能在結構物臨近底床造成沖蝕，導致結構的破壞甚或傾倒，如港灣防波堤堤頭附近的海底地形，可能因為波浪及海潮流的集中、下沖或轉向等造成堤頭沖蝕。以麥寮港為例，其北防波堤堤頭之原設計水深約為 -22 m，根據 2014 年實測海底地形顯示，堤頭附近海床已形成一個約 500 m × 100 m 的深坑，消波塊群淘刷最大水深約在 37 m ~ -48 m 之間，即淘刷洞的深度已達 26 m，如圖 1 所示。其嚴重程度將危及防波堤堤身以及港灣船舶航行的安全。由於防波堤堤頭的海床淘刷及堤趾沖蝕嚴重時將可能造成防波堤直立部傾斜損壞，然而造成侵蝕的原因與機制仍未明確，因此急需進一步的觀察、模擬與研析，以期提出有效的防制對策與工法。

研究的結果顯示，波流場水動力的模式驗證與水工試驗現場觀測趨於一致。以視覺化呈現波場自由水面及堤頭前之垂直流況時序變化，以及最大底床水分子速度分佈分析與渦流區底床切剪力的分布情形，包括波浪引發的流場伴隨南北向的漲退潮流，以及陡峭淺化的海底地形，共同形成堤頭附近海床的

淘刷機制。前進波列在防波堤遮蔽的前方積聚的水動力能量，折向深海方向的帶狀離岸流與南向的前進波列混合，深化了海床邊界層的紊流機制，淘刷區因此紊流機制起動之懸浮載，隨著漲退潮流搬離遠處。由於長期缺乏砂源補注，淘刷區浸淤失衡，因此持續威脅防波堤結構體的穩定。

本研究以麥寮港為主要研究範圍，針對防波堤堤頭附近海域之波、流場及海底地形變化特性與機制進行三維數值模擬與分析，並與水工模型試驗及現場實測波、流場及海底地形侵蝕特性進行比對與驗證。

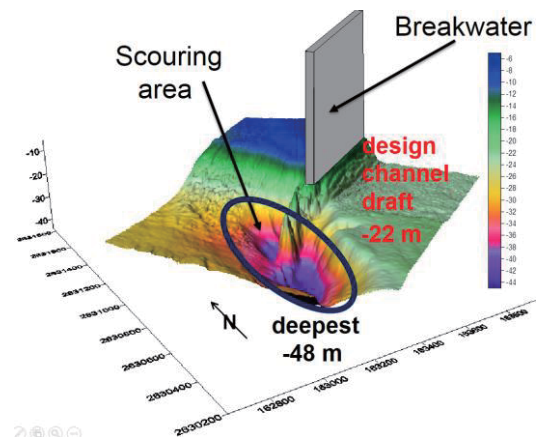


圖 1 麥寮港西防波堤堤頭水深測量色階圖

二、相關研究文獻

Tasi et al. (2009) 分別以捲浪型碎波以及無碎波兩種波浪類型進行模擬，模擬結果發現捲浪型碎波之波浪作用於海堤後發生明顯之渦度對底床有

明顯之沖刷現象；Dentale (2012) 根據水工模型試驗之佈置建構防坡堤保護工模型，利用 FLOW-3D[®] 模擬三維石堆斜坡底床，分析波流對於消波設施的反

射、透射、溯升、越波與碎波等現象，以及結構體基礎的穩定性。陳 (2009) 分析有限水深短峰波對海床處將形成波壓力，引起海床變形乃至液化。應用 FLOW-3D[®] 模擬防波堤堤頭附近海床上的波壓力，最大波高與海床超靜孔隙水壓力最大值均位於距堤頭 0.5 倍波長附近，也是最易發生液化的地方。賴 (2009) 以 FLOW-3D[®] 計算不透水和孔隙底床之波浪變形、流場及紊流特性。結果顯示孔隙底床對波浪發生碎波之型態產生影響，使得因捲波(plunging)而產生的迴流減弱消失。因孔隙層之摩擦及滲透作用，在碎波帶與沖刷帶之間波能消散、流場及紊流特性有很大的差

異。Acharya (2011) 利用 FLOW-3D[®] 的紊流模式模擬探討系列丁壩平面底床沖刷機制，定量剖析丁壩周圍縱向、橫向及垂直面紊流流場。馬 (2011) 利用 FLOW-3D[®] 的紊流模式求解非定常雷諾平均方程式 (RANS) 之控制方程式，探討潛堤與直立堤間之波高水位變化及波流場狀態。結果顯示波浪通過潛堤後，受直立堤反射影響，重複波波峰位置因兩堤間距不同而變化，當兩堤間距為 0.25 倍和 0.75 倍波長時，波高與水位較高。侯等人 (2011) 以 FLOW-3D[®] 模擬港池內外波浪繞射分佈特性，比較港池於外海為不等水深的條件下，港池內外 Kd 值之變化。

三、FLOW-3D[®] 模式介紹

本計畫利用 FLOW-3D[®] 流體數值模式分析軟體，模擬防波堤堤頭鄰近海域波場的時空分佈和演變，並導入淘刷模式，探討堤頭處地形變化。數值模擬計算結構物與地形互制現象，需考量黏性流理論，以控制方程式而言，納維爾－史托克斯方程式 (Navier-Stokes Equation) 為具有黏性流體應力、應變關係的運動方程式，相較於勢流理論，可真實地描述渦流流場。黏性流體的運動方程式求解有相當的難度，而數值方法亦需求高速的計算效能。Hirt (1963) 提出 VOF (Volume of Fluid Method) 流體動力學數值計算方法，不僅大幅提高流體力學數值模擬的穩定性，並可描述

自由液面的變動狀態。FLOW-3D[®] 是 1985 年 Flow Science 公司推出的商業版流體分析軟體，除了包含 VOF 自由液面處理法之外，並含有其他諸多重要的核心技術，如多重區塊網格 (Multi-Block Grids)、通度係數法 (Fractional Area/Volume Obstacle Representation, FAVOR) 等。FLOW-3D[®] 適用於動床淘刷相關模式如表 1 所示。

表 1 FLOW-3D[®] 適用於動床淘刷相關模式

模組名稱	適用性簡述
Moving and deforming objects	波浪與潮流對結構物之繞射與應力的耦合分析
Particles model	波流場的分佈追蹤與分析
Porous media model	海域孔隙結構物模型的建立與處理
Sediment scour model	預測泥沙等的淘刷懸浮沉降過程
Scour potential model	計算與評估定床面侵蝕的趨勢
Shallow water model	水深平均應用於三維垂直動量方程的處理
Viscosity and turbulence	流場粘性係數與紊流模式的處理
Wave boundary	邊界線性波與非線性波的產生與應用

3.1 理論基礎

FLOW-3D[®] 的理論基礎在於三維的質量守恆及動量守恆方程式等，針對本計畫所研究的物理現象，乃為水動力學問題，其運動方程式為 Navier-Stokes 方程式，其數學模式的架構為：

3.1.1 FLOW-3D[®] 控制方程式

(1) 質量連續方程式 (Mass Continuity Equation)

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

上式中 V_F 是流體體積比， ρ 是流

體密度， R_{DIF} 是紊流擴散項， R_{SOR} 是質量源項， (u, v, w) 是卡式座標系統的速度分量， A_x, A_y, A_z 分別是 X, Y, Z 方向流動的通量面積比，若以直角座標且為不可壓縮，則可表示為：

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (2)$$

上式中係數 ν_ρ 等於 $c_p \mu / \rho$ ，其中 μ 是動量分佈的係數 (例如黏度)， c_p 是對應於紊流施密特數 (turbulent Schmidt number) 的常數。至於式(5)右邊最後的 R_{SOR} 項可用於質量模式穿越孔隙介質表面。

$$R_{SOR} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) \right) \quad (3)$$

上式中 u, v, w 分別表示水平和垂直方向之瞬時速度分量， x, y, z 分別為水平和垂直方向之座標， A_x, A_y, A_z 分別是 X, Y, Z 方向流體通過之面積分率，而 ρ 為流體之密度，在數值模擬過程中假設不受其他因素之影響而保持定值。

(2) 動量方程式 (Momentum Equations)

以直角座標的形式將 Navier-Stokes Equation 展開可得 (X, Y, Z) 三個方向的流體速度 (u, v, w) ：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - \delta u_s) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - \delta v_s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (6)$$

上式中 u_s , v_s , w_s 是流體表面速度, f_x , f_y , f_z 為 X, Y, Z 三個方向的黏滯項即

$$\rho V_F f_x = wsx - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \quad (7)$$

$$\rho V_F f_y = wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \quad (8)$$

$$\rho V_F f_z = wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \quad (9)$$

上式中 wsx 、 wsy 、 wsz 分別為壁面在 X、Y、Z 方向的剪應力(wall shear stress), τ_{ij} 代表流體剪應力, 下標 i 為作用面, 下標 j 為作用方向:

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (11)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (13)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad (14)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (15)$$

FLOW-3D® 以不可壓縮黏性流體之 NSE 方程作為控制方程式, 加入 RNG k - ϵ 及大渦模擬等多種紊流模式, 配合 VOF 方法處理自由液面, 利用 FAVOR 技術來描述網格中之結構物。

透水結構物部分以 FLOW-3D® 內建孔隙介質模組中之雷諾數依存法處理, 並以有限差分法將控制方程式離散, 其連續方程式和動量方程式對於體積分數、面積分數、速度分量、物體重力加速度以及物體粘滯力加速度等, 都以三個方向運算。

(3) FLOW-3D® 數值的方法

FLOW-3D® 提供三種演算法對壓力速度式求解: 超鬆弛反覆運算法 (Successive Over Relaxation, SOR)、交替方向隱式 (Alternating Direction Implicit, ADI) 算法和廣義最小殘量 (Generalized Minimum RESidual, GMRES) 演算法。其中 GMRES 支援 CPU 平行處理, 演算法收斂速度快、計算精度高、不易發散, 特別在求解 NSE 方程時效率較高。為提高計算效

率，避免同一時刻求解所有變數，FLOW-3D[®] 採用目前應用較廣的流場數值解法，不直接求聯立方程組的解，而是有序地、逐一求解各個變數的代數方程組。在求解的過程中，FLOW-3D[®] 中引入兩個量——中間速度和當前時刻的壓力修正值，中間速度是不考慮新時刻壓力場的影響。通過求解動量方程所獲得中間速度，然後將中間速度和壓力修正值的關係式代入連續性方程，得到含有壓力修正值的壓力泊松方程，再應用 GMRES 演算法求解壓力泊松方程。求解步驟如下：

首先，將中間速度 $u_{i,j,k}^*$ 、 $v_{i,j,k}^*$ 、 $w_{i,j,k}^*$ 帶入差分後的動量方程中，其 x 方向的動量方程將改寫成下面的形式（其他兩個方向 y , z 亦同）：

$$\frac{u_{i,j,k}^* - u_{i,j,k}^n}{\delta t} = f_{i,j,k}^n - (FUX + FUY + FUZ)_{i,j,k}^n - \frac{1}{\rho} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^* - p_{i,j,k}^n}{\delta x} - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\delta y^2} + \frac{u_{i+1,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k+1}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\delta z^2} \right) \right] \quad (16)$$

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^*}{\delta t} = \frac{1}{\rho} \frac{p'_{i+1,j,k} - p'_{i,j,k}}{\delta x} \quad (17)$$

其中， p' 為當前時刻 n 的壓力修正值，則下一時刻的壓力為 $p^{n+1} = p^n + p'$ ，通過解方程 (16) 可獲得中間速度 $u_{i,j,k}^*$ 。其次，將方程 (17)

代入到離散後的連續性方程 (18)：

$$\frac{AFR_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFR_{i-1,j,k}^{n+1} u_{i-1,j,k}^{n+1}}{\delta x} + \frac{AFB_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFB_{i,j-1,k}^{n+1} u_{i,j-1,k}^{n+1}}{\delta y} + \frac{AFT_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFT_{i,j,k-1}^{n+1} u_{i,j,k-1}^{n+1}}{\delta z} = 0 \quad (18)$$

得到含有壓力修正值的壓力泊松方程式 (19)：

$$\nabla \cdot u^* - \frac{\delta t}{\rho} \nabla^2 p' = 0 \quad (19)$$

求解方程 (19) 得到修正後的壓力值 p' ，則 $n+1$ 時刻的壓力值 p^{n+1} 也可求出，並將得到 p' 代入到方程 (17) 中求得 $n+1$ 時刻的速度場。然後檢驗計算出來速度場是否收斂，若不收斂，程式自動調整時間步長，直到獲得收斂的速度場。最後，在求得新時刻速度場和壓力場後，再應用 Hirt-Nichols 施主—受主(donor-acceptor)方法計算出各個單元體 $n+1$ 時刻的流體體積函數 F 值，並重構新時刻的自由表面和位置，同時更新其他的變數。

(4) 紊流模式與選擇

紊流模式的好壞決定了淘刷模組的成敗，FLOW-3D[®] 中包含五種紊流模式，分別是 Prandtl 混合長度模式、單一方程式模式、二方程式之標準 κ - ε 模式、雷諾平均 (RNG) 模式和大渦模擬 (Large eddy simulation)。前四種模式需

要設置紊流參數，大渦模擬模式雖然不需要設置紊流參數，但是它主要適用於三維數學模式，而且對網格尺寸的要求非常高，FLOW-3D® 泥沙淘刷模組適用所有的紊流模式。

(5) 底質淘刷模式

泥砂淘刷模式主要預測泥砂的輸砂侵淤過程，這個模式可以同時模擬不同屬性之砂礫、淤泥以及非黏性沉積物等於任何流場的流動，包括：底床載輸砂、懸浮載輸砂、夾帶起砂和沉積等。雖然預設泥砂運動必須發生在單相流中，但也適用於兩相流，只是兩相流中泥砂不會與第二流體對流或互動，底質淘刷模式的物理特性包括：

A. 底床剪應力 (Bed shear stress)

底床剪應力是流體施加於底床載表面的剪應力，運用壁面函數求解三維紊流：

$$u = u_\tau \left[\frac{1}{k} \ln \left(\frac{Y}{\frac{v}{u_\tau} + k_s} \right) \right] \quad (20)$$

底式中 u_τ 表示剪力速度， $u_\tau = \sqrt{\tau / \rho}$ ， τ 表示底床剪應力， ρ 表示流砂混合容積密度， Y 表示壁面距離， v 表示全域運動黏性係數， $k = 0.4$ 表示馮卡門 (Von Karman) 常數， k_s 表示尼古拉斯糙度 (Nikuradse roughness)，本模式 k_s 的底質粒徑相關式為

$$k_s = c_s d_{50} \quad (21)$$

式中 d_{50} 表示底質中質粒徑， c_s 表示使用者定義係數， c_s 建議值為 2.5。在淺水中流動時，利用二次摩擦法評估該底床剪應力。

$$\tau = \rho_f C_D \bar{v} |\bar{v}| \quad (22)$$

式中 $\bar{v}$ 表示水深平均流速， ρ_f 表示流體密度， C_D 表示拽引力係數 (可由使用者設定，預設值為 0.0026)。

$$C_D = \left[\frac{k}{B + \ln(z_0 / h)} \right]^2 \quad (23)$$

式中 h 表示現場水深， $B = 0.71$ ， $z_0 = k_s / 30$ 。

B. 臨界希爾斯數

希爾斯數是底床剪應力無因次的表達式，定義如下：

$$\theta_n = \frac{\tau}{g d_n (\rho_n - \rho_f)} \quad (24)$$

式中 g 表示重力絕對值， ρ_n 表示底質顆粒的質量密度， d_n 表示粒徑，其下標 n 用來標示個別底質類別。

臨界希爾斯數 $\theta_{cr,n}$ 用來定義夾帶起砂和底床載輸砂初始啟動的臨界底床剪應力 $\tau_{cr,n}$ 。

$$\theta_{cr,n} = \frac{\tau_{cr,n}}{g d_n (\rho_n - \rho_f)} \quad (25)$$

式中 $\theta_{cr,n}$ 的基準值適用於均勻顆粒的平整底床，可由使用者設定，其預設值為 0.05，或是根據 Soulsby-Whitehouse 公式求解 (Soulsby-Whitehouse, 1997)。

$$\theta_{cr,n} = \frac{0.3}{1+1.2d_{*,n}} + 0.055(1-e^{-0.02d_{*,n}}) \quad (26)$$

式中 $d_{*,n}$ 表示無因次粒徑

$$d_{*,n} = d_n \left[\frac{g(s_n-1)}{v_f^2} \right]^{1/3} \quad (27)$$

式中 $s_n = \rho_n/\rho_f$ ， v_f 表示流體運動黏度。斜坡底床因為重力的切向分量致使底床載的穩定程度必須取決於流體方向。臨界剪應力因溯升而增加，反之隨溯降而減小。根據斜坡底床效應修改 $\theta_{cr,n}$

$$\theta'_{cr,n} = \theta_{cr,n} \frac{\cos\psi \sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta \tan^2\phi_n - \sin^2\psi \sin^2\beta}}{\tan\phi_n} \quad (28)$$

式中 β 表示底床載斜坡角度， ϕ_n 表示休止角，預設值 32° 。 ψ 表示溯升流與底床斜坡夾角，如圖 2 所示，其範圍介於 0° 至 180° 之間， 0° 對應溯升流， 180° 對應溯降流。

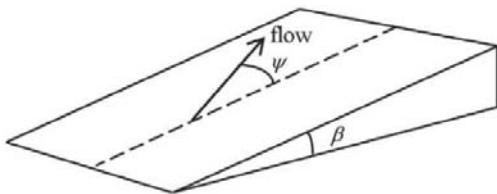


圖 2 底床斜坡與流動方向示意圖

C. 夾帶起砂和沉積

在此模式中，夾帶起砂和沉積彼此微過程是在同一時間交互發生的，兩者共同決定底床載和懸浮載之間的交換淨率，至於夾帶起砂顆粒離開底床載的揚升速度計算係依據 Winterwerp et al. (1992)：

$$u_{lift,n} = n_b \alpha_n d_{*,n}^{0.3} (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} \sqrt{gd_n(s_n-1)} \quad (29)$$

式中 α_n 表示底質夾帶起砂係數 (預設值為 0.018)， n_b 表示底床載床面朝外法線向量。至於沉積方面沉降速度則依據 Soulsby (1997)

$$u_{settle,n} = \frac{g}{g} \left[\left(10.36^2 + 1.049d_{*,n}^3 \right)^{1/2} - 10.36 \right] \frac{v_f}{d_n} \quad (30)$$

式中 g 表示重力加速度， $u_{settle,n}$ 假設與 g 同向。

D. 底床載輸砂

底質類別 n 之無因次底床載輸砂率定義如下式：

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{\left[g(s_n-1)d_n^3 \right]^{1/2}} \quad (31)$$

式中 $q_{b,n}$ 表示個別底床載每單位床寬容積輸砂率 (M/L^2T)，運用 Meyer-Peter-Muller 方程計算 Φ_n ：

$$\Phi_n = B_n (\theta_n - \theta_{cr,n})^{1.5} c_{b,n} \quad (32)$$

式中 Bn 表示底床載係數，一般介於 5.0 到 5.7 表示低輸砂率，8.0 左右表示中量輸砂率，超過 13.0 則為高輸砂率。本模式預設值 8.0，這也是一般文獻中最常使用的輸砂率， $c_{b,n}$ 表示底質個別分類的含量：

$$c_{b,n} = \frac{\text{net volume of species } n}{\text{net volume of all species}} \quad (33)$$

並滿足

$$\sum_{n=1}^N c_{b,n} = 1.0 \quad (34)$$

式中 N 表示分類總數，原始的 Meyer-Peter-Muller 方程不存在 cb,n ，它是加在式 (32) 以考慮多種底質分類的效應。

Van Rijn (1984) 利用此關係式推估底床載厚度 h_n ，

$$h_n = 0.3d_n d_{*,n}^{0.7} \left(\frac{\theta_n}{\theta_{cr,n}} - 1 \right)^{0.5} \quad (35)$$

底床載速度 $u_{b,n}$ 的計算：

$$u_{b,n} = \frac{q_{b,n}}{h_n c_{b,n} f_b} \quad (36)$$

底床載速度 $u_{b,n}$ 的計算：

$$u_{b,n} = \frac{q_{b,n}}{h_n c_{b,n} f_b} \quad (37)$$

式中 f_b 表示底質堆積分數， $u_{b,n}$ 與 $q_{b,n}$ 同時位於緊鄰底床面的流動方向。

E. 懸浮載輸砂

對於不同分類的懸浮泥砂濃度依據各自的輸砂公式求解：

$$\frac{\partial C_{s,n}}{\partial t} + \nabla \cdot (C_{s,n} \mathbf{u}_{s,n}) = \nabla \cdot \nabla (D C_{s,n}) \quad (38)$$

這裡 $C_{s,n}$ 是懸移質濃度，其被定義為個別流砂混合體積內的泥砂質量， D 是擴散係數， $\mathbf{u}_{s,n}$ 是個別泥砂 n 的速度。值得注意的是，每種分類的泥砂依照本身的速度各自懸浮移動，這是因為個別泥砂顆粒的質量密度、粒徑、慣性和拽引力係數各自不同。另外，個別分類之懸移質的濃度 $c_{s,n}$ 則為：

$$c_{s,n} = \frac{C_{s,n}}{\rho_n} \quad (39)$$

流砂混合質量密度依據下式計算：

$$\bar{\rho} = \sum_{m=1}^N c_{s,m} \rho_{s,m} + (1 - c_{s,tot}) \rho_f \quad (40)$$

為了求解方程式 (38)，必須先計算 $C_{s,n}$ 、 $\mathbf{u}_{s,n}$ 。假設懸浮顆粒之間無強烈交互作用，懸移質和流砂混合物之間的速度差主要是顆粒的沉降速度造成。 $\mathbf{u}_{settle,n}$ 如式 (30) 所定義。至於 $\mathbf{u}_{s,n}$ ，則使用下式評估：

$$\mathbf{u}_{s,n} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}_{settle,n} C_{s,n} \quad (41)$$

式中 $\bar{\mathbf{u}}$ 表示流砂混合體之全域平

均速度。

$$\bar{\mathbf{u}} = \sum_{m=1}^N c_{s,m} \mathbf{u}_{s,m} + (1 - c_{s,tot}) \mathbf{u}_f \quad (42)$$

$\bar{\mathbf{u}}$ 通過求解連續性和 NSE 方程與紊流閉合模式求解。

F. 動床底質定義

泥砂種類特性參數的設定路徑為 ModelSetup > Physics > SedimentScour，包括泥砂種類 (code SSNAME)、泥砂粒徑 (code SSDIA)、泥砂粒子密度 (code RHFSS 泥砂典型密度值為 2.65 g/cm³)、臨界希爾斯數 (code SSCRT 預設值為 0.05)、阻力係數 (code SSDFCD，預設值為 0.5)、摻混係數 (code SSEDTRF)、底床載係數 (code SSBDF，預設值為 8) 和休息角 (code SSANG，預設值為 30) 等。FLOW-3D[®] 希爾斯數的預設值 SSCRT = 0.05，但對於不穩定的底床，輸砂較容易被流場摻混夾帶，可藉由修改臨界希爾斯數以計算斜波底床的效應。先求出 Rouse Reynolds number，再求出臨界希爾斯數。FLOW-3D[®] 定義泥砂底質為一結構物件，在 Model Setup > Meshing Geometry 視窗的 Geometry 樹狀選單建立新結構物元件 (Component)，再選擇 Packed Sediment 定義完成。底床 (Packed bed) 可以任意幾何形狀，或是直接匯入 CAD 先處理的 STL 檔。泥砂種類若超過一種，就必須分配比例，總和是 100%。另外，泥砂在輸砂過程中，必須選定輸砂邊界，計算輸砂守恆或平衡，必須先建立

流場中懸浮泥砂的濃度，其設定路徑為 ModelSetup > Boundaries > Sediment Concentration。依據泥砂的分類以及時間函數建立，參數的輸入依據現場調查資料、輸砂經驗模式、或是利用迭代試錯的方式，如圖 3 所示。

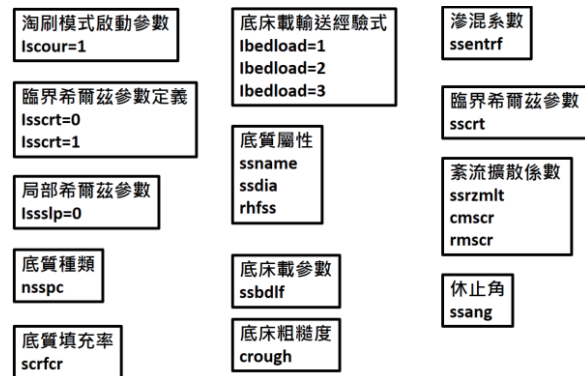


圖 3 底值淘刷模式參數

3.2 邊界與網格處理方法

3.2.1 造波邊界

FLOW-3D[®] 三維波場造波邊界條件是依據 Stokes 5 階理論，Stokes 波是一種非線性有限幅度的前進波，比較線性波理論，它允許更高的波動幅度。圖 4 表示 Stokes 5 階造波由平底水槽傳播至計算領域的邊界網格。

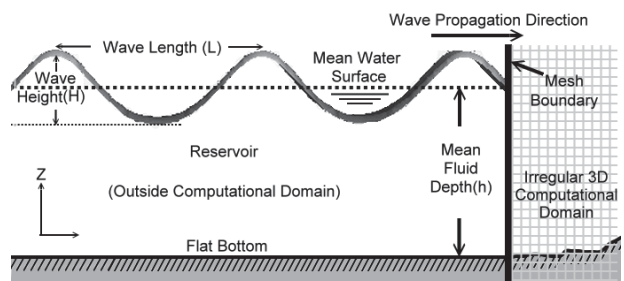


圖 4 Stokes 5 階造波邊界示意圖 (李，2016)

如上圖中所示，假設平底水域之前進波列通過網格邊界進入計算領域，垂直向上為 $+z$ ，水平為波列前進方向，為 $\pm x$ 或 $\pm y$ 。波高 H 是波谷到波峰的垂直距離， L 表波長， T 表週期，靜止水深 $h = \text{常數}$ ，水位 η 隨時間變化，並沿著 $+z$ 從底部量至水面，波角頻率 ω 和波速度 c 關係式如 (43) 所示。

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = ck, \quad c = \frac{L}{T}, \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (43)$$

其中 k 代表造波數、 ω 為頻率。Stokes 波假設勢流理論，即是不可壓縮非旋轉流。因此，流線函數 ψ 存在且滿足拉普拉斯方程理論 (Lee, 1994)。

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (44)$$

由拉普拉斯控制方程式 (Laplace Equation) 之解可求得水粒子運動速度為

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (45)$$

進一步的假設波峰存在 ($x = 0, t = 0$)，拉普拉斯控制方程式 ψ ，隨著自由表面和底部的邊界條件，利用攝動法求解拉普拉斯方程。該攝動參數是無因次的波幅 $\varepsilon = KH/2$ ，也被稱為波的尖銳度。水位和水粒子速度之相對於 ε 五階解如下：

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = & d + \frac{\varepsilon}{k} \cos kX + \frac{\varepsilon^2}{k} B_{22} \cos 2kX \\ & + \frac{\varepsilon^3}{k} B_{31} (\cos kX - \cos 3kX) \\ & + \frac{\varepsilon^4}{k} (B_{42} \cos 2kX + B_{44} \cos 4kX) \\ & + \frac{\varepsilon^5}{k} \left[-(B_{53} + B_{55}) \cos kX \right. \\ & \left. + B_{53} \cos 3kX + B_{55} \cos 5kX \right] \end{aligned} \quad (46)$$

$$u(x, z, t) = U + C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} jk \cosh jkz \cos jkX \quad (47)$$

$$w(x, z, t) = C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} jk \sinh jkz \sin jkX \quad (48)$$

其中 $X = x - ct$, $kX = kx - \omega t$ 。係數 A_{ij} 、 B_{ij} 和 C_0 都是 kd 的非線性函數，可視為 Stokes 波一階近似線性波理論。換句話說，Stokes 五階理論精度高於線性波 ε 的四階，波數和波頻相依且滿足非線性方程。

$$\left(\frac{k}{g} \right)^{1/2} U - \frac{\omega}{(gk)^{1/2}} + C_0 + \left(\frac{kH}{2} \right)^2 C_2 + \left(\frac{kH}{2} \right)^4 C_4 = 0 \quad (49)$$

上式中 C_0 、 C_2 和 C_4 是 kd 的非線性函數 (Fenton, 1985)，這是不考慮 (49) 式左側末兩項的線性波分散關係式一階近似的計算結果。網格邊界造波初始條件必須使用時只需於波長或週期其中擇一輸入即可，迭代計算 k 的初始近似值 (Fenton, 1988) 如 (50) 式：

$$k = \frac{\alpha + \beta^2 \sec^2 h^2 \beta}{(\tanh \beta + \beta \sec^2 h^2 \beta) d} \quad (50)$$

式中

$$\alpha = \frac{\omega^2 d}{g}, \quad \beta = \alpha \sqrt{\coth \alpha} \quad (51)$$

這個理論同時適用於深水波和淺水波，參數 ε 不能太大，亦即波的尖銳度儘可能小，此外，更須考慮波長與水深比，波長的合理上限為 $T(g/h)^{1/2} \approx L/h \approx 10$ (Fenton, 1985)。

3.2.2 Outflow 吸波層邊界

數值造波水槽與實驗室造波水槽一樣，不能將造波水槽無限延長，因此為了消滅反射波浪能量，目前數值造波水槽在處理下游輻射條件時最常用的方法有三種：A. Sommerfeld 輻射邊界條件 (radiation boundary condition)，B. 延伸網格，C. 設定海綿層 (sponger layer)。延伸網格雖然比較簡單，但是會增加電腦計算時間和儲存空間。利用輻射邊界條件和海綿層可以吸收開放邊界週期波的反射，當入射波前進波列抵達開放邊界之前其波能就可因此消散。波浪海綿層從計算域下游區域的設定點開始，至開放邊界結束，如圖 5 所示，海綿層與輻射邊界條件的組合可以使來自入射邊界的波浪反射最小化，阻尼力通常相對於流體速度是線性的。阻尼係數可以根據位置調整最佳設定值 (Davies, 1976, 1983)。如果海綿層與輻

射邊界條件結合使用，則能最有效地消開放邊界的波浪反射 (Israeli, 1981)。

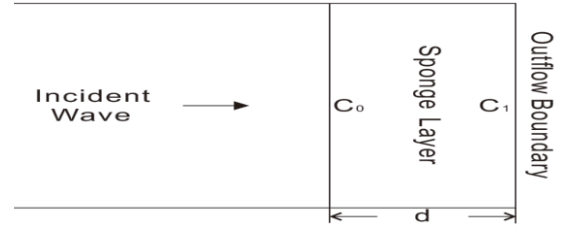


圖 5 吸波層邊界示意圖

FLOW-3D[®] 開放邊界設置海綿層必須改寫 NSE 為

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \nabla (\nu \mathbf{U}) - c(\mathbf{U} - \mathbf{U}_{str}) \quad (52)$$

式中 $-c(\mathbf{U} - \mathbf{U}_{str})$ 表示人工阻尼力，用來吸收消散波能， c 表示阻尼係數，單位 $(\text{time})^{-1}$ ， $\mathbf{U}_{str}$ 表示波場背景流速。阻尼力僅能作用於波能的吸收，至於背景流則不受影響。吸收層內的阻尼係數可以是一個常數，也可以隨著吸收層起始側在下游方向的距離而線性增加， c 值計算式

$$c = c_0 + s \frac{c_1 - c_0}{d} \quad (53)$$

式中， c_0 和 c_1 分別是海綿層起始端和末端的阻尼係數，預設值分別為 0.0 和 1.0 s^{-1} ，一般取為波長的 2 到 3 倍 (許, 2003)。造波邊界至吸收層起始端的距離為 s ，海綿層在下游方向的厚度為 d 。建議海綿層至少需大於一個波長，若同時增加阻尼係數可以更明顯減

小波浪的反射。

3.2.3 FAVOR 障礙物體積分率表示法

FLOW-3D[®] 數值方法採用 FAVOR (Frac-tional Area/Volume Obstacle Representation) 表示法及控制體積 (Control Volume) 的觀念，使網格與幾何形狀完全獨立。這種方法比變形網格 (Deformation Mesh) 的方法簡單，避開了冗長的網格整理工作，即使模式非常複雜，也能夠精確的描述外型。利用矩形立方體所構成的網格，能夠定義每一個矩形立方體六個面的流通面積比與自由出入的體積。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中，例如，在自由液面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數，若沒有可讓流體自由通過的面積，則不可能有對流的通量。

3.3 模式驗證

為檢視數值計算結果與波流場數值模式的適用性，本研究引用相關水工試驗結果做為主要驗證對象，並採用本研究現場觀測資料做為數值參數之率定條件。

3.3.1 淘刷模式驗證

圖 6 表示 Gladstone 等人 (1998) 的試驗水槽，長 5.7 m，寬 0.2 m，水深 0.4 m，當閘門抬升時，懸浮液中的沉積物沿著水槽的長度分佈，所使用的沉積物分別為細砂和粗沉積物的直徑為 $25\ \mu$ 和 $69\ \mu$ ，微觀密度為 $3.217\ \text{g/cm}^3$ 。數值模擬利用 FLOW-3D[®] 的沉降和沖刷模組，沉積物直徑和密度比照水工試驗，所有其他參數均為預設值。數值計算結果轉換為沉積密度，也就是沿著試

驗水槽底部的每單位面積的沉積物質量，並與水工試驗進行直接比較。表 2 列出了水工試驗和數值模擬案例，所有數值模擬案例計算領域都是 105,600 個均勻三維網格。

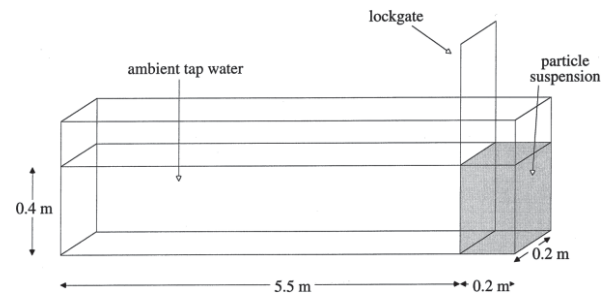


圖 6 試驗水槽示意圖 (Gladstone 等人, 1998)

表 2 數值模擬案例表

	細砂 ($25\ \mu\text{m}$)	粗砂 ($69\ \mu\text{m}$)
Case 1	0 %	100 %
Case 2	50 %	50 %
Case 3	100 %	0 %

圖 7 表示水工試驗和數值模擬流動前沿的沉積物密度分布曲線，可以看出最大和最小沉積物密度的趨勢，以及流動前沿的最終位置接近一致。

3.3.2 測站潮位流向與流速之驗證

麥寮港 W 測站坐標 $23^{\circ} 45' 37.98''\text{N}$, $120^{\circ} 09' 08.22''\text{E}$ ，水深約 10.0 m，施放之自記式

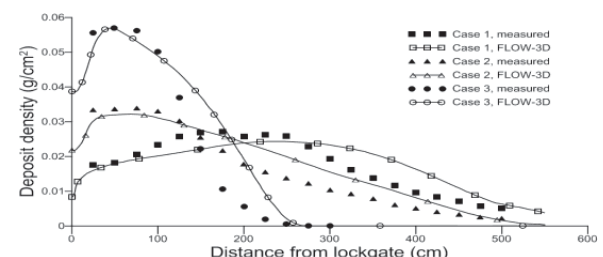


圖 7 FLOW-3D[®] 與水工試驗 (Gladstone 等人, 1998) 沉積密度驗證圖

潮波流儀，觀測海面表層及海床底層之流速、波浪及潮位。觀測日期自 2012 年 5 月 3 日至 5 月 24 日止共 22 天。驗證成果顯示，FLOW-3D®建立的數值模型與 W 測站觀測之潮位流向與流速具相當程度的一致性，如圖 8 至圖 10 所示。

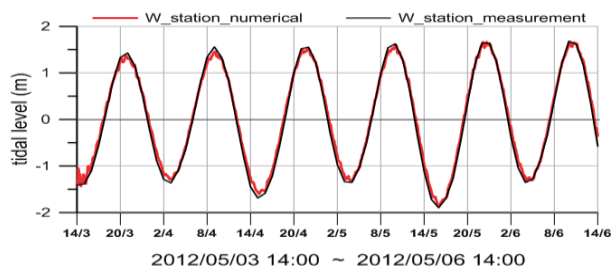


圖 8 麥寮港 W 測站潮位驗證

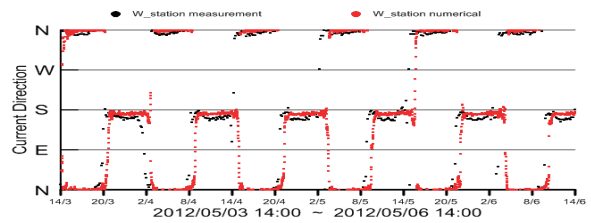


圖 9 麥寮港 W 測站流向驗證

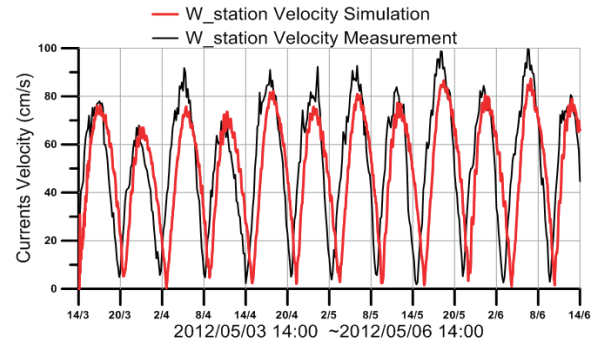


圖 10 麥寮港 W 測站流速驗證

四、波場動床三維數值模擬

數值模擬流程概略分為前處理、數值求解及後處理三個階段。前處理階段：選定適當的控制模組，確立初始條件及邊界條件，劃分計算網格與生成計算節點。數值求解階段：導入離散方

程，設定求解控制參數，求解離散方程，判斷求解是否收斂，若還未收斂，調整控制參數再導入離散方程；若已收斂，則以後處理展示和輸出計算結果。

表 2 FLOW-3D[®] 一般參數設定

Option	Setting	Parameter
Interface tracking	Free surface	itb = 1
Flow mode	incompressible	icmprs = 0
Fluid density	26°C water	rhof = 996.8 kg/m ³
Simulation units	SI	units = 0
Temperature unit	Celsius	tunits = 99
Activate	Z component	gz = - 9.81
Viscosity	Newtonian fluid	ifvisc = 1
Turbulence	RNG κ - ε	ifvis = 4
Wall shear BC	No-slip	iwsh = 1
Time-step	Stability and convergence	autot = 1
Pressure solver	GMRES convergence	imgres = 1 epsi = 0.001
Momentum advection	explicit first-order, upwind	iorder = 1, alpha = 1
Viscous stress	explicit	impvis = 0
VOF advection	split Lagrangian method	ifvof = 6
F-packing	default	cfpk = 1

4.1 防波堤堤頭波場計算範圍及水深地形

麥寮港波場動床三維數值模擬以麥寮港西防波堤堤頭附近海域計算範圍，如圖 11 所示。為配合水工試驗比較，計算範圍為 1.5 km × 2.5 km，東北角為造波導流遮蔽區，底床邊界採用附近海域實測地形資料。根據網格獨立性測試結果，麥寮港三維波場計算領域南北向 (Δy) 網格設定 1/20 波長，東西向網格 (Δx) 設定為 1/10 波長，而垂直水層網格 (Δz) 設定為 1/10 波高。

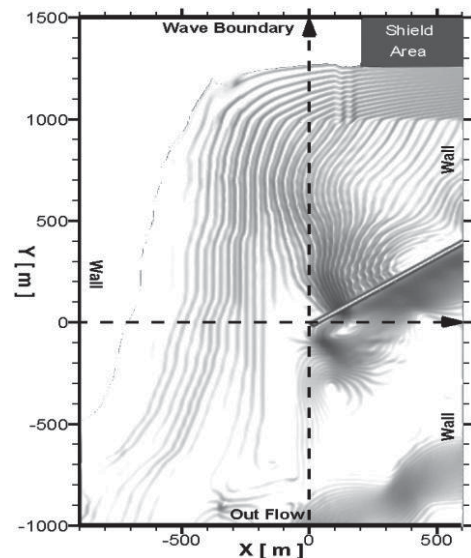


圖 11 麥寮港波場動床三維數值模擬示意圖

4.2 波場輸入條件

為瞭解堤頭附近因波浪所引發的波場與流場分佈，將縮小計算範圍，加密堤頭處的網格分佈，專注於堤頭附近的解析；麥寮港西防波堤堤頭海域波場

計算案例如表 3 所示，模擬時間以成熟波完成傳遞計算海域為考量，入射波浪邊界以北側海域為主，海象為 50 年期颱風。

表 3 FLOW-3D[®] 計算案例

計算案例	H(波高)	T(週期)	波向	模擬時間
麥寮港50年期颱風	6.4 m	10.6 s	N	80 T

波場數值模擬的自由水面時序變化是檢視波場結果合理性最直接的現象，在此為節省篇幅僅擷取 4 個造波週期模擬結果繪製水面時序變化如圖 12 及圖 13 所示。

4.3 麥寮港北側入射波自由水面變化

波場數值模擬的自由液面時序變化是檢視波場結果合理性最直接的現象，麥寮港北側海域入射波浪第 45 至 80 個造波期之波峰與波谷自由液面時序變化如圖 12 及圖 13 所示。在此模擬中，北側海域入射波浪進入之後即受西防波堤阻擋而產生反射波，其波向約為東至東北方向之間，並與北側海域入射波、東北側海域反射波及東北側海域二次反射波交互疊合形成水面變化情況複雜的短峰波場。繞射波浪逐漸進入西防波堤南側的遮蔽區域，而波浪繞射現象於堤頭處所形成點波源的波動。由本模擬的波浪水面時序變化觀察，顯現本防波堤對於北側入射波浪的遮蔽效果良好，至於堤頭附近總是處於一個紛紜與平靜的分際點。

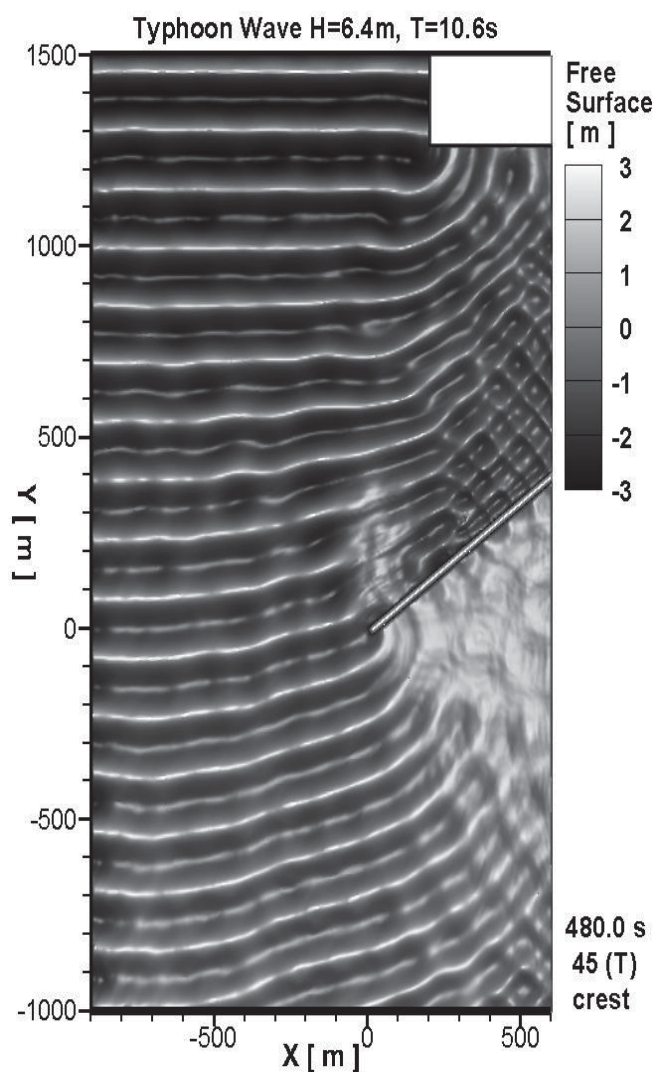


圖 12 麥寮港北側第 45 造波週期

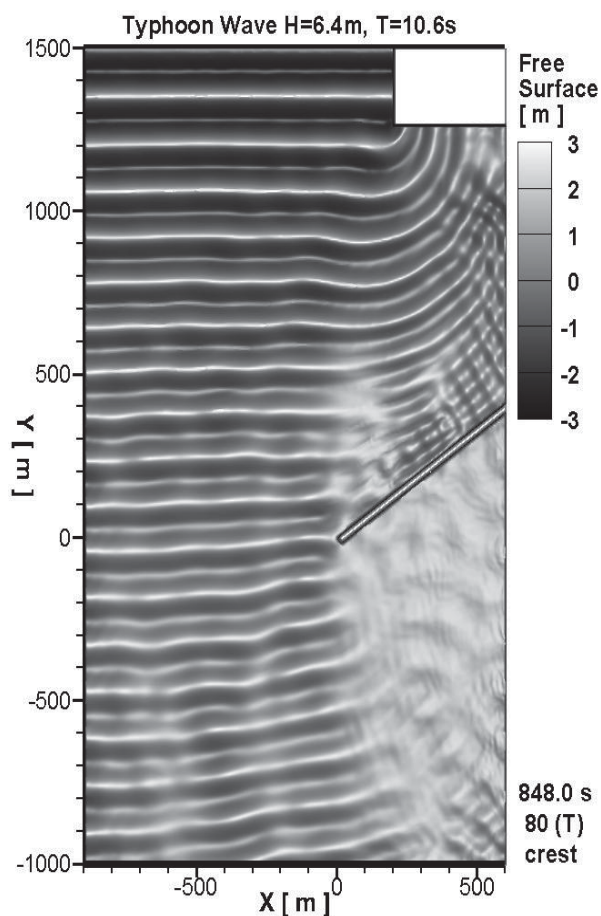


圖 13 麥寮港北側第 80 造波週期

4.4 波浪作用下引發的流況變化

為了瞭解極端波浪通過防波堤時的水動力行為，是否導致堤頭附近海域底床大幅侵淤變化，因此必須進一步對波場數值計算結果的底床流向流速加以分析，從波場全域海床層流向流速變化的了解，如圖 14 至圖 16 所示。

A. 防波堤堤頭附近海域海床底層之流速變化

麥寮港北側海域第 80 入射波浪引發近底床層 x 方向流速 u 分布變化如圖 14 所示。

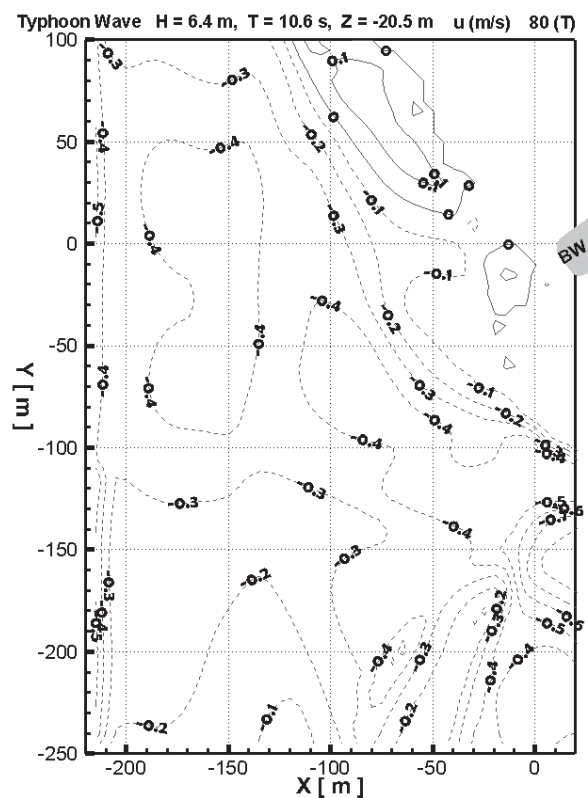


圖 14 近底床層流速 u 分布變化圖

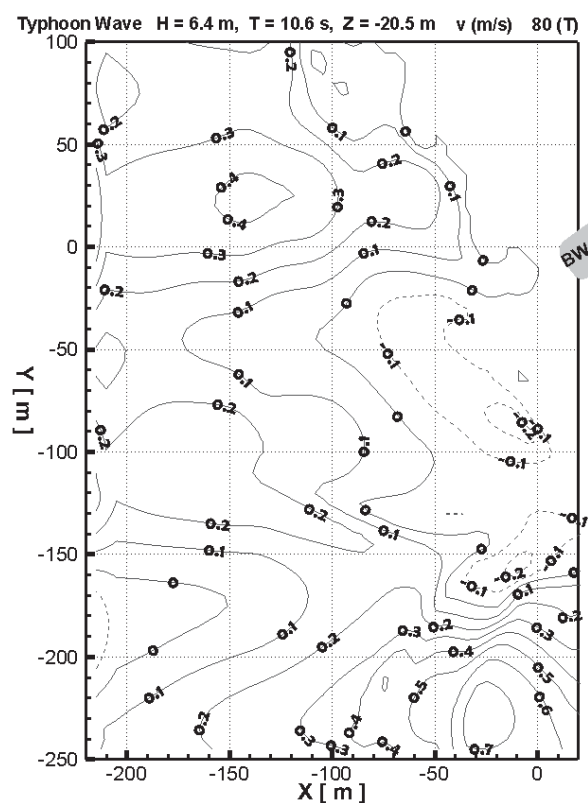


圖 15 近底床層流速 v 分布變化圖

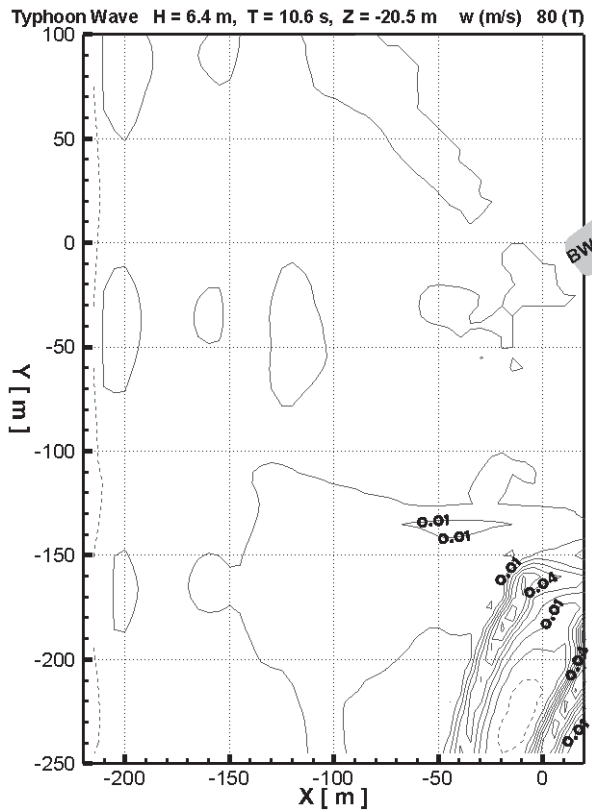


圖 16 近底床層流速 w 分布變化圖

B. 波場流速與底床高程變化分析

淘刷區底床流速與高程變化如圖 17 所示，底床流速 $\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 介於 0.57 m/s 與 1.51 m/s 之間，淘刷區底床高度約介於 -20.32 m 至 -20.45 m 之間。觀察淘刷區底床流速的時序變化顯示本區波場流況不穩定，和淘刷時序的變化顯示正相關，即淘刷曲線趨於平緩時，底床流速相對減小。

為了瞭解極端波浪通過防波堤時的水動力行為是否導致堤頭附近海域底床大幅侵淤變化，因此必須進一步對波場數值計算結果的流向流速加以分析，以淘刷區中心座標 $[-113 \text{ m}, -48 \text{ m}, (-1.5 \sim -20.5 \text{ m})]$ ，如圖 18 所示，分析波場引發流速的變化，顯示東西向流速 u 介於 -1.41 m/s 至 -

0.55 m/s，南北向流速 v 介於 -1.47 m/s 至 0.75 m/s，垂直向流速 w 介於 -0.43 m/s 至 0.53 m/s，如圖 18 所示。其中流速 u 從近底床層 -20.5 m 至水面 -1.5 m 共 20 層之流速均呈現負值 ($-x$)，可以判斷前進波列因為防波堤的遮蔽效應引發流場束縮流流向堤頭西向之淘刷區。

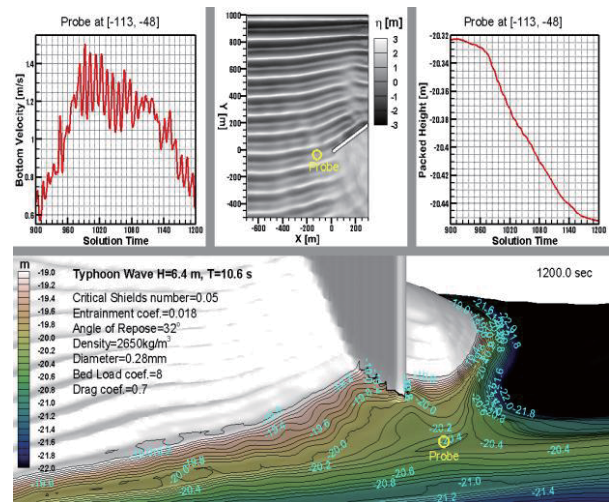


圖 17 淘刷區底床流速與高程變化圖

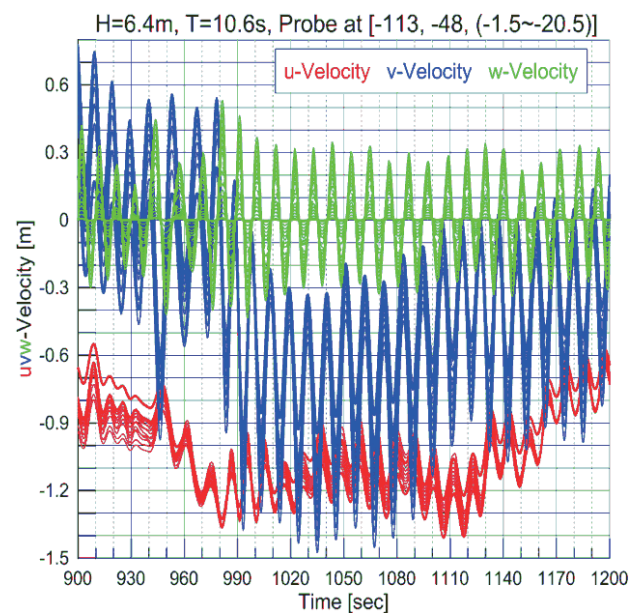


圖 18 淘刷區 20 層流速 u, v, w 時序變化比較圖

C. 波場底床浸淤變化與分布

觀察造波時間 510 sec 至 840 sec 之間的底床高程淨變化大約介於 0.05 mm 之間，如圖 19 所示。

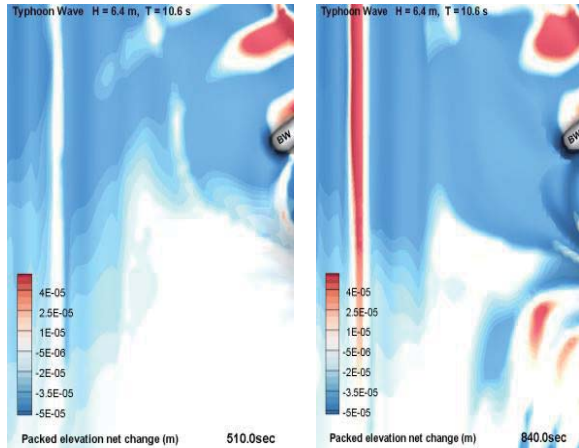


圖 19 第 510 sec 及 840 sec 底床高程淨變化

利用 FLOW-3D[®] 對麥寮港防波堤堤頭附近海域進行三維動床波場數值模擬，計算範圍 1.5 km × 2.5 km，其底床邊界採用 1996 年實測地形資料；海象條件為 50 年期颱風，設定北側為入射波浪邊界，造波條件設定波高 6.4 m、週期 10.6 sec，模擬時間以海床淘刷區淘刷率趨於緩和（約 113 個造波週期）為考量。以西防波堤堤頭為原點，以北側海域入射波而言，波浪受西防波堤北側阻擋形成反射波，大幅增長了此海域的波高，亦提高了波場下的流速。前進波列因為防波堤的遮蔽效應引發流場西向的束縮流，該速縮流與上下約 0.5 m/s 垂直流速形成之垂直方向渦流應該是造成防波堤堤頭附近海床淘刷洞的主要原因之一。

五、流場動床三維數值模擬

5.1 流場向量分布時序變化

流場數值模擬的流場向量分布時序變化是檢視流場結果合理性最直接的現象，麥寮港北側海域設定為流場上游邊界，初始流速設定 1.0 m/s，流場向量分布時序變化截圖如圖 20 所示。在此模擬中，流場中的南流因為西防波堤結構物的遮擋，因而沿著堤頭繞射的帶狀流在堤後南側的遮蔽海域產生渦流，而南向的帶狀流也因地形的淺化折向東南。由本模擬的流場時序變化觀察，顯示本防波堤對於南向的潮流遮蔽效果良好。

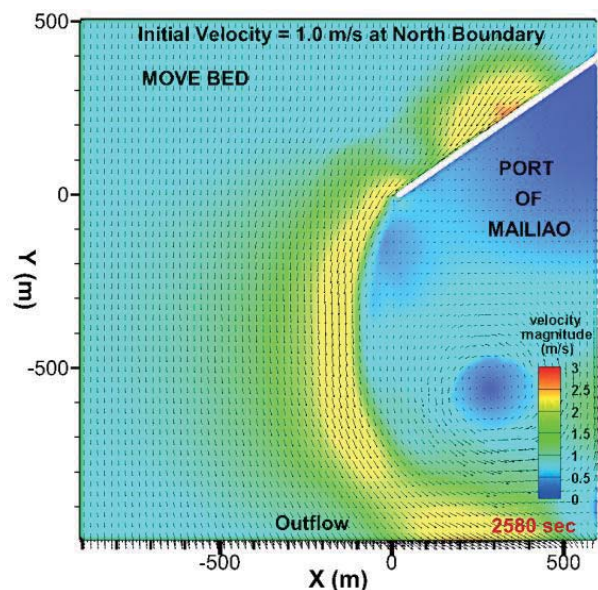


圖 20 南流第 2580 sec 流場分布圖

麥寮港南側海域設定為流場上游邊界，初始流速設定 1.0 m/s，流場向量分布時序變化截圖如圖 21 所示。在此模擬中，流場中的北流因為西防波堤結構物的遮擋，因而沿著堤頭繞射的帶狀流在堤後北側的遮蔽海域產生渦流，而北向的帶狀流也因地形的淺化折向西北。

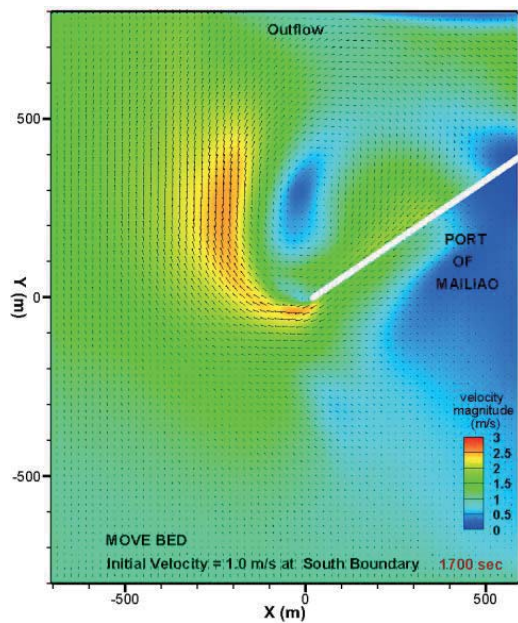


圖 21 北流第 1700 sec 流場分布圖

5.2 流場垂直分層流速 u 、 v 、 w 之變化

觀測麥寮港防波堤堤頭附近海域海床底層固定於同一時間同位層流速 u 變化可以了解流場東西向分層流速分布與變化，接近堤頭的繞射水流最大西向流速 u 出現於淨水位 -15 m 之同位層，最大可達 -3 m/s，如圖 22 所示，西南方向因南向的帶狀流影響產生微幅的東向流速 u 約為 0.25 m/s，可見於各分層。

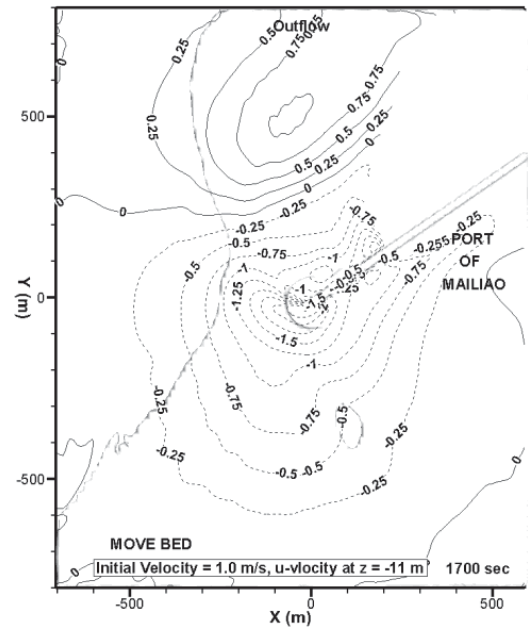


圖 22 南流水位-15 m 流速 u 分布

觀測麥寮港防波堤堤頭附近海域海床底層固定於同一時間同位層流速 v 變化可以了解流場南北向分層流速分布與變化，如圖 23 所示，帶狀流的位置與範圍趨於穩定，最大南北流速 v 可達 -2.2 m/s。

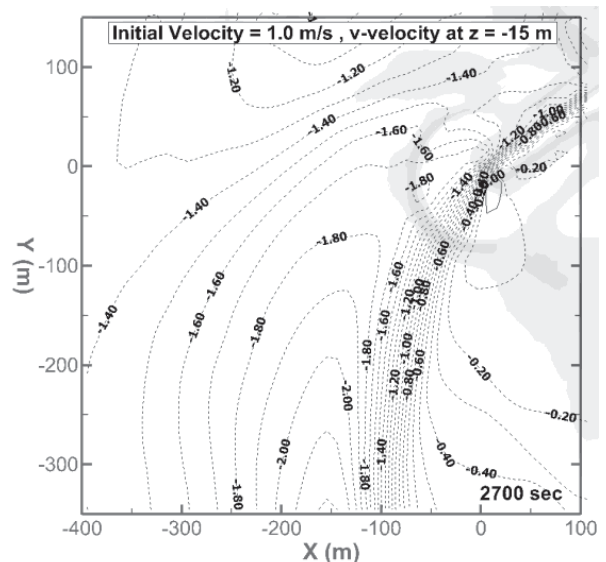


圖 23 南流水位-15 m 流速 v 分布

5.3 防波堤頭附近潮流場流速變化與分布

以麥寮港海域自計式潮波流儀 W 測站之潮位紀錄為邊界水位條件，輸入建置的數值模型，初步以模擬麥寮港附近海域 ($12\text{ km} \times 16\text{ km} \times 50\text{ m}$) 漲退潮的流況，將其計算結果再擷取堤頭淘刷區之潮位作為加密網格 ($800\text{ m} \times 800\text{ m} \times 50\text{ m}$) 的新啟動邊界條件，如圖 24 所示，進行模擬底床浸蝕變化，模擬結果如圖 25 所示，分別就各潮流階段討論如下：

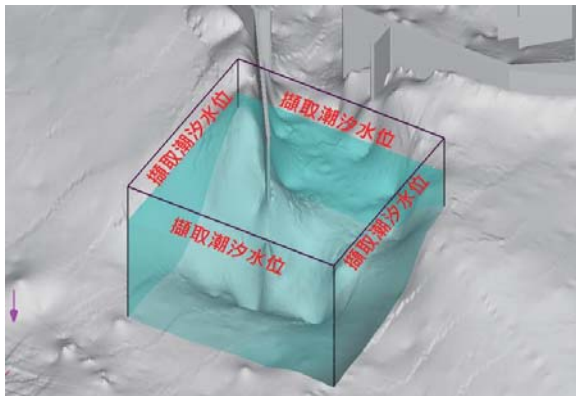


圖 24 加密網格三維潮流計算領域圖

A. 麥寮港低潮階段

低潮位的流場在麥寮港外海形成低流速區域，均勻的流場向量向北，顯示了潮水已經開始轉折進入漲潮階段。

B. 麥寮港漲潮階段

此海域的漲潮段主要潮流流向為北向，以麥寮港西防波堤堤頭為起點，向北形成高流速的帶狀區域，此區域流速多超過 1.25 m/sec ，南北長幅約 $3 \sim 4\text{ km}$ 、東西寬幅 $1.5 \sim 2\text{ km}$ ，受防波堤外形作用，堤頭處流向為西北至北北西之間，向北則漸向東向偏轉，因此於西防波堤北側產生順時鐘旋轉型渦流。

C. 麥寮港高潮階段

潮位已經開始緩降，開始轉折進入退潮階段，防波堤南側遮蔽海域產生微弱的逆時鐘旋轉型渦流。

D. 麥寮港退潮階段

邊界的水位變化時序進入退潮段後，整體流向由北轉為南向，高流速的區域自北方邊界向南移動，大約穩定於麥寮港外西方至西北西方海域。靠近西防波堤側，以堤頭為起點存在向南延伸的帶狀高流速系統，流向為南至南南東之間。

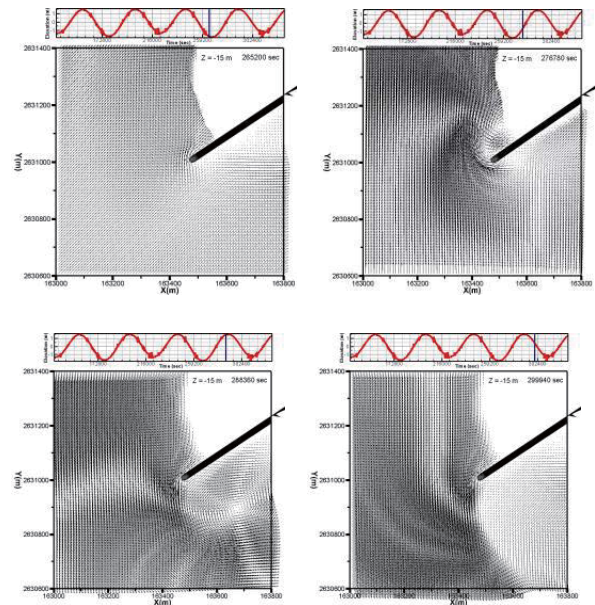


圖 25 流場向量分布：低潮階段(左上)、漲潮階段(右上)高潮階段(左下)退潮階段(右下)

5.4 潮流場底床載浸淤變化與分布

動床數值模擬的目的在於獲得底床高程的浸淤變化，本次潮流模擬計算結果顯示淘刷區浸淤變化率介於 $\pm 5\text{ mm/hr}$ ，如圖 26 至圖 29 所示，淘刷區位置約於防波堤堤頭西南方向，與現場觀測大致符合。

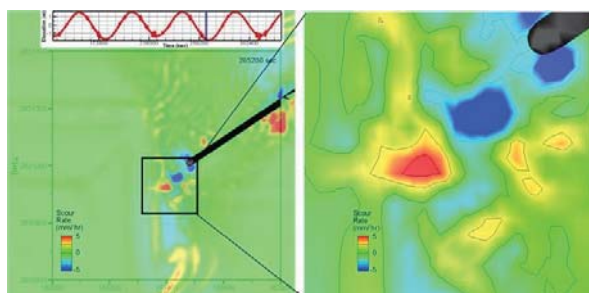


圖 26 低潮階段潮流場底床載高程淨變化

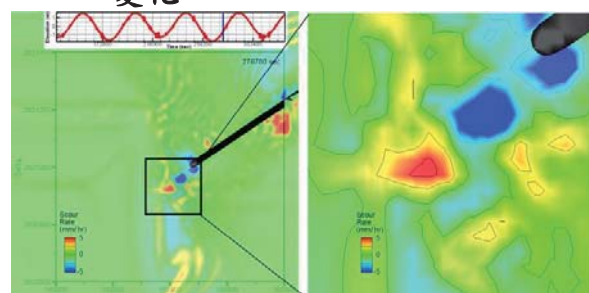


圖 27 漲潮階段潮流場底床載高程淨變化

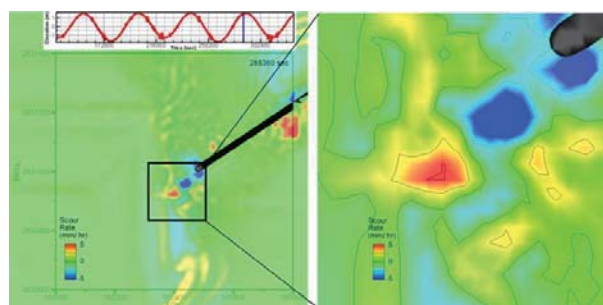


圖 28 高潮階段潮流場底床載高程淨變化

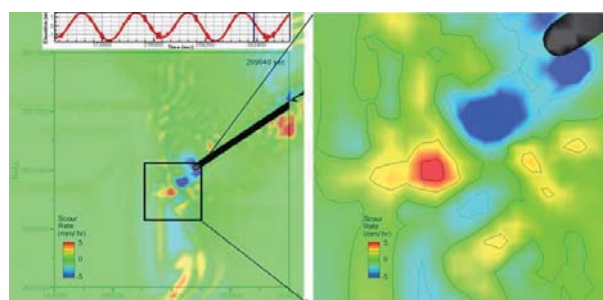


圖 29 退潮階段潮流場底床載高程淨變化

六、結論

利用 FLOW-3D[®] 對麥寮港防波堤堤頭附近海域進行動床三維波潮流場數值模擬，計算範圍 $2.3 \text{ km} \times 2.6 \text{ km}$ ，其底床邊界均採用附近海域實測地形資料，海象條件為 50 年期颱風，設定北側為入射波浪邊界，模擬時間考量成熟波完成傳遞該計算海域及淘刷區浸淤平衡。

引用實測潮位資料，導入港口三維模型，模擬防波堤堤頭附近海域漲退潮的流況。漲潮時自西防波堤堤頭，向北形成流速大於 1.25 m/sec 的帶狀區，高潮時流速迅速減小，但堤頭北側渦流的

流速仍有 0.5 m/sec ；退潮時，超過 1.25 m/sec 的高速流場以堤頭為起點向南延伸，至低潮之時麥寮港的西南側有大範圍流速趨近於 0.75 m/sec 。

根據潮流數值模擬結果顯示防波堤堤頭對於漲退潮流具有遮蔽、繞射與攔阻作用，因此波場中的前進波列在防波堤結構物遮蔽的前方因地形淺化折射與結構物反射積聚的水動力能量折向深海方向（西向），產生帶狀離岸流再與垂直方向的渦流混合深化了海床底層的淘刷機制。

參考文獻

1. Acharya, A. (2011). Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes. *Ph.D. thesis, Univ. of Arizona, USA.*
2. Davies, H. C. (1976). A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 405-418.
3. Davies, H. C. (1983). Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. *Monthly Weather Review*, 111, 1002-1012.
4. Dentale, F., Donnarumma G. & Pugliese Carratelli, E. (2012). Wave Run Up and Reflection on Tridimensional Virtual Breakwater. *Journal of Hydrogeology & Hydrologic Engineering*, 1:1.
5. Fenton, J.D. (1985). A fifth-order Stokes theory for steady waves. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 111, pp. 216-234.
6. Fenton, J.D. (1988). The numerical solution of steady water wave problems. *Computers and Geosciences* 14, 357-368.
7. Gladstone, C., Phillips, J. C. & Sparks, R. S. J. (1998). Experiments on bidisperse, constant-volume gravity currents : propagation and sediment deposition. *Sedimentology* 45, pp 833-843
8. Hsu, J. R. C., Tsuchiya, Y. & Silvester, R. (1979). Third-order approximation to short-crested waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 90, part 1, pp. 179-196.
9. Israeli, M. (1981). Approximation of Radiation Boundary Conditions. *Journal of Computational Physics* 41, pp.115-135.
10. Lee, C. P. (1994). Dragged Surge Motion of a Tension Leg Structure. *Ocean Engng*, Vol. 21, No. 3, pp. 311-328.
11. Lin M. and Jeng, D.S. (2004). A 3-D model for ocean waves over a Columb-damping poroelastic seabed. *Ocean Engineering*, Vol.31, pp. 561-585.
12. Soulsby, R. (1997). Dynamics of Marine Sands. *Thomas Telford Publications, London.*
13. Tsai, C.P., Chen, H.B. & You, S.S. (2009). Toe Scour of Seawall on a Steep Seabed by Breaking Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol.2,

- no.135, pp.61-68.
14. Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (10), pp 1431-1456.
 15. Winterwerp, J. C., Bakker, W. T., Mastbergen, D. R. & Van Rossum, H. (1992). Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. *J. Hydraul. Eng.*, 118, pp. 1508–1525.
 16. 湯麟武、黃煌煒、李兆芳 (1979) 「堤腳沖刷理論與試驗之研究」，第三屆海洋工程會議論文集，pp. 17-29。
 17. 許泰文 (2003) 「近岸水動力學」，中國土木水利工程學會。
 18. 陳海鋒 (2009) 「波浪作用下的三維海床回應及液化分析」，天津大學建築工程學院碩士論文。
 19. 賴堅戊 (2009) 「波浪於粗粒徑斜坡底床傳遞之試驗與數值研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
 20. 馬煒倫 (2011) 「潛堤與海堤間波流場特性之數值模擬」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
 21. 李忠潘、曾以帆、邱永芳、何良勝、蔡金吉 (2016) 「港灣防波堤堤頭波場定床三維數值模擬研究」，期 103，頁次 1-24。