

# 港灣季刊

(原港灣報導季刊)

第 103 期

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 2 月

## 港灣季刊第 103 期

刊期頻率：季刊

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：[www.ihmt.gov.tw](http://www.ihmt.gov.tw)

電 話：(04)26587176

總 編 輯：林信得

編輯委員：邱永芳、朱金元、許英正、謝明志、何良勝、蘇青和、  
單誠基、馬維倫

出版年月：每年 2、6、10 月

創刊年月：中華民國 77 年 2 月 1 日

定 價：100 元

本次出刊：100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

印 刷 者：群彩印刷科技股份有限公司

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：

10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：2007700020 ISSN：1019-2603

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

# 目 錄

## 一、港灣防波堤堤頭波場定床三維數值模擬研究 .....1

李忠潘 國立中山大學海洋環境及工程學系教授  
曾以帆 國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授  
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

## 二、港區海域油污擴散數值模式評估 .....25

邱啟敏 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生  
黃清哲 國立成功大學水利及海洋工程學系教授  
范揚銘 國立成功大學近海水文中心研發組組長  
莊士賢 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授  
簡仲璟 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長  
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

## 三、臺中港鄰近海域之波流場模擬 .....42

許弘萇 國立成功大學水工試驗所研究員  
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員  
楊炳達 國立成功大學水工試驗所助理研究員  
郭平巧 國立成功大學水工試驗所研究助理  
李孟學 國立成功大學水工試驗所助理研究員

## 四、臺中港地區防救災系統整合及應用 .....64

曾文傑 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員  
邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任  
謝明志 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長  
吳勝宏 環球科技大學助理教授

## 五、AIS 於海難資訊平台及相關調查分析之應用 .....72

張淑淨 國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系教授  
張時銘 國立臺灣海洋大學光電科學研究所博士生  
邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任  
黃茂信 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員  
葉冠宏 國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生  
彭冠敦 國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生  
陳詩佳 國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生  
任奕翰 國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生



# 港灣防波堤堤頭波場定床三維數值模擬研究

李忠潘 國立中山大學海洋環境及工程學系教授  
曾以帆 國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授  
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

本研究應用 FLOW-3D<sup>®</sup> CFD 軟體對港灣防波堤堤頭附近海域進行波場定床三維數值模擬，以台中港及麥寮工業港外海 50 年重現期之颱風波浪作為開放水域邊界條件，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。本研究模擬結果以視覺化呈現波場自由水面時序變化，堤頭前之垂直流況變化，防波堤頭附近最大底床水分子速度分佈分析與渦流區底床 ESS(Excess Shear Stress) 的分布情形與底床掏刷的關係，並說明了應用 Stokes 5 階造波邊界與 RNG 紊流模式可以得到合理的計算結果。

## 一、前言

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。本研究以台灣西海岸中部的台中港及麥寮工業港為例，其中，台中港掏刷最深處位於北防波堤堤頭向外海延伸方向約 140 m 處，最深處約 -32 m；麥寮工業港西防波堤堤頭處之原設計水深約為 -22 m，根據 2012 年實測海底地形顯示，堤頭附近海域底床已形成一個約 500 m×100 m 的深坑，其最深處達 -48 m，掏刷之深度已達 26 m，其嚴重程度將危及防波堤堤身以及港灣船舶航行的安全。而應用 CFD 數值模擬正可以提供快速預測防波堤堤頭海底地形侵蝕的機制，不但合乎經濟性且其可信度高。本研究應用 FLOW-3D<sup>®</sup> CFD 軟體對本區海域進行波場定床三維數值模擬，以台中港及麥寮工業港外海 50 年重現期之颱風波浪作為開放水域邊界條件，以實測水深建立定床邊界，港口實體物理模

型為封閉邊界，流場穩定包括網格獨立性與計算領域邊界敏感性測試。本研究模擬結果以視覺化呈現波場自由水面時序變化，堤頭前之垂直流況變化，防波堤頭附近最大底床水分子速度分佈分析與渦流區底床 ESS(Excess Shear Stress) 的分布情形與底床掏刷的關係，並說明了應用 Stokes 5 階造波邊界與 RNG 紊流模式可以得到合理的計算結果。

## 二、研究範圍

本研究將以台中港及麥寮工業港為主要研究範圍，針對防波堤堤頭附近海域之波場及海底地形變化進行三維數值模擬分析。

### 2.1 臺中港

臺中港北鄰大甲溪以及大安溪，南鄰大肚溪，臺中港為因應淤積以及航行安全，而延伸北防波堤，2002 年以來受到河川輸沙暴增的因素，於 2002 ~ 2005 年之年平均淤沙量為 1994 ~ 2002 年 4.9 倍之多，由於漂沙已有部分繞過北防波堤堤頭進到航道，未來勢必影響船隻航行安全。臺中港於民國 65 年完成主體工程，民國 79 ~ 84 年先延長北防波堤 850 m，民國 89 ~ 91 年再延長北防波堤 480 m，相關工程施工位置如圖 1 所示。

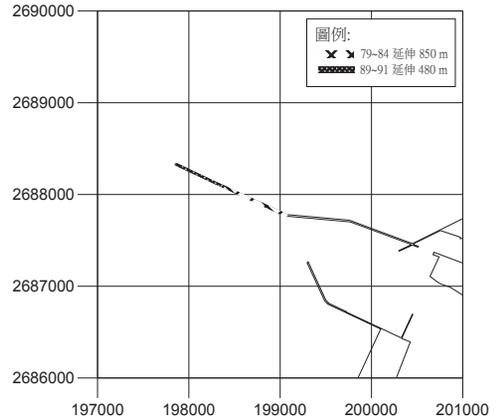


圖 1 臺中港北防波堤延伸歷程圖

### 2.2 麥寮工業港

雲林縣海岸北起濁水溪口南至北港溪口，涵蓋麥寮鄉、台西鄉、四湖鄉及口湖鄉四鄉，海岸線全長約 58 km。雲林離島工業區自民國 83 年麥寮區動工興建以來，麥寮區北側海堤受到濁水溪砂源的補注，已有淤積現象產生。圖 2 為麥寮工業區各區段海堤位置圖，其中西防波堤 I 約於民國 84 年期間完工，南防波堤 II 與西防波堤 II 分別於民國 85 年 6 月與 86 年 3 月完工，鄰近外航道之西防波堤 III 則於民國 87 年 3 月開始逐漸施工延伸至民國 89 年 9 月，外航道內側之南防波堤 I 則於民國 87 年底完工 (成大水工所，2002a)。麥寮工業港其西防波堤 III 堤頭之原設計水深約為 -22 m，根據目前實測的海底地形顯示，堤頭附近海底地形形成一個約 500 m × 100 m 的深坑，最深處達到 -48 m，堤基被沖刷的深度可達 26 m。

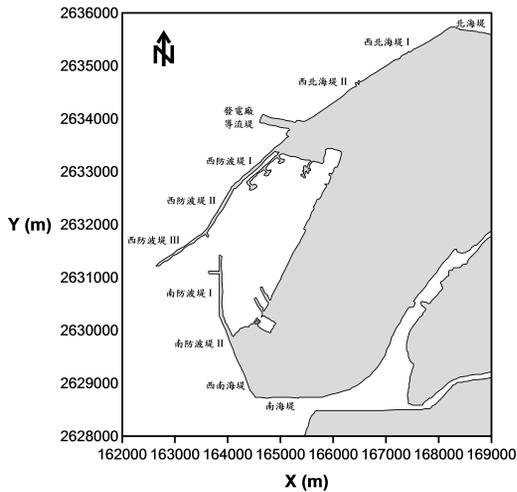


圖 2 麥寮工業區各區段海堤位置圖

### 三、相關研究文獻

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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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。Achartya(2011) 利用 FLOW-3D<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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。

### 四、FLOW-3D<sup>®</sup> 模式介紹

本計畫利用 FLOW-3D<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 以往常用之處理流體和固體耦合運動的模擬計算，若能選擇合適的水動力、淘刷及波浪等計算模組，FLOW-3D<sup>®</sup> 亦可適用於港灣工程之領域，相關模組如表 1 所示。使用 FLOW-3D<sup>®</sup> 進行防波堤堤頭附近之波、流場數值計算及地形變化模擬結果，另外可與現場調查資料和水工模型試驗進行結果的驗證及輸入條件的同化 (assimilation)，以期進一步瞭解防波堤堤頭侵蝕機制。

表 1 港灣工程領域適用的計算模組

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

模組名稱	適用性簡述
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

## 4.1 理論基礎

FLOW-3D<sup>®</sup> 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：

### 4.1.1 Navier-Stokes 控制方程式

在古典力學中，物質體系所遵循的物理法則是「質量守恆」及「動量守恆」，對於三維不可壓縮黏性流體，在直角座標系的形式下連續方程式為：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

動量方程式，在 X、Y 和 Z 方向分別表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g \quad (4)$$

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， $P$  為瞬時壓力，而  $\rho$ 、 $\nu$  分別為流體之密度和運動黏滯係數，在數值模擬過程中假設不受其他因素之影響而保持定值。

#### 4.1.2 FLOW-3D<sup>®</sup> 控制方程式

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

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (5)$$

上式中  $V_F$  是流體體積比， $\rho$  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：

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (6)$$

上式中係數  $\nu \rho$  等於  $c_p \mu / \rho$ ，其中  $\mu$  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。

$$R_{SOR} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) \right) \quad (7)$$

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  $\rho$  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  $(u, v, w)$ ：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - \delta u_s) \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - \delta v_s) \quad (9)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - \delta w_s) \quad (10)$$

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

$$\rho V_F f_x = w s x - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \right\} \quad (11)$$

$$\rho V_F f_y = wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \right\} \quad (12)$$

$$\rho V_F f_z = wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \right\} \quad (13)$$

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

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (14)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (15)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \quad (16)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (17)$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \quad (18)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (19)$$

FLOW-3D<sup>®</sup> 以不可壓縮黏性流體之 N-S 方程作為控制方程式，加入 k-ε、RNG 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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 數值的方法

FLOW-3D<sup>®</sup> 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 N-S 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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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)：

$$\frac{u_{i,j,k}^* - u_{i,j,k}^n}{\delta t} = f_{x,i,j,k}^n - (FUX + FUY + FUZ)_{i,j,k}^n$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^* - p_{i,j,k}^n}{\delta x} - \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\delta y^2} + \frac{u_{i+1,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\delta z^2} \right) \quad (20)$$

$$\frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^*}{\delta t} = \frac{1}{\rho} \frac{p'_{i+1,j,k} - p'_{i,j,k}}{\delta x} \quad (21)$$

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 (20) 可獲得中間速度  $u_{i,j,k}^*$ 。其次，將方程 (21) 代入到離散後的連續性方程 (22)：

$$\frac{AFR_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFR_{i-1,j,k}^{n+1} u_{i-1,j,k}^{n+1}}{\delta x} + \frac{AFB_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFB_{i,j-1,k}^{n+1} u_{i,j-1,k}^{n+1}}{\delta y} + \frac{AFT_{i,j,k}^{n+1} u_{i,j,k}^{n+1} - AFT_{i,j,k-1}^{n+1} u_{i,j,k-1}^{n+1}}{\delta z} = 0 \quad (22)$$

得到含有壓力修正值的壓力泊松方程式 (23)：

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* - \frac{\delta t}{\rho} \nabla^2 p' = 0 \quad (23)$$

求解方程 (23) 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 (21) 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<sup>®</sup> 中包含五種紊流模式，分別是 Prandtl 混合長度模式、單一方程模式、二方程之標準  $\kappa$ - $\varepsilon$  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<sup>®</sup> 泥沙淘刷模組適用所有的紊流模式，但一般建議使用 RNG 紊流模式，因為 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模適合模擬劇烈變形的底層邊界。RNG 紊流模式方程式：

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_A \frac{\partial k_T}{\partial x} + u_A y \frac{\partial k_T}{\partial y} + u_A z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad (4-20) \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_A \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + u_A y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + u_A z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_{\varepsilon} - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (25)$$

其中， $P_T$  為速度梯度引起的紊流動能  $k$  的產生項， $G_T$  為浮力引起的紊流動能產生項，對於不可壓縮流體， $G_T = 0$ ， $\varepsilon_T$  為紊流動能耗散率， $CDIS1$ 、 $CDIS2$  和  $CDIS3$  為使用者可調整的無因次參數。 $P_T$  和  $G_T$  的運算式如下：

$$P_T = C_{SPRO} \left( \frac{u}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{array}{l} 2A_x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2A_z \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left[ A_x \frac{\partial v}{\partial y} + A_y \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\ + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{array} \right\} \quad (26)$$

$$Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left( v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_k A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) \end{array} \right\} \quad (27)$$

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left( v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_\varepsilon A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) \end{array} \right\} \quad (28)$$

$$v_T = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (29)$$

$$\mu = \rho(v + v_T) \quad (30)$$

其中， $v_T$  為運動粘滯係數， $\mu$  為動力粘滯係數， $CSPRO$  為紊流參數，預設值為 1.0。

選擇紊流模式 (one equation, two

equation, 或 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  model)，不建議使用 dynamically computed maximum turbulent mixing length model，因為該模式顯示，接近底床載介面時計算結果不是很理想，可能是自動縮小了紊流的長度。因此，最好直接給定最大的紊流混合長度 (maximum turbulent mixing length)。因為在 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模式中為了控制紊流動能耗散率式 (30)， $\varepsilon_T$  模式中引入了紊流特徵長度參數 TLEN。TLEN 長度設置太小將高估能量耗散，底床載邊界上幾乎沒有動靜；太大則能量耗散值偏小從而導致不能準確模擬紊流。經過大量的數值模擬，FLOW-3D<sup>®</sup> 預設 TLEN 取計算域三個方向最小長度的 7% 倍。進行底床淘刷預測數值模擬時，計算域通常在垂直方向最小，如果從  $Z_{\min}$  至  $Z_{\max}$  是 50 m，則 TLEN 的輸入值等於  $50 \times 0.07 = 3.5$ 。

$$\varepsilon_T = CNU \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad (31)$$

$CNU$  紊流黏度預估係數，RNG 紊流模式預設值為 0.085， $\kappa$ - $\varepsilon$  紊流模式預設值為 0.085。

在 RNG 紊流模式求解式 (25) 中的  $\varepsilon_T$  值時，如果小於式 (31) 的計算值，則程式將式 (25) 的計算值作為  $\varepsilon_T$  的值。RNG 紊流模式中引入的各個參數  $CNU$ 、 $v_k$ 、 $v_\varepsilon$ 、 $CDIS1$ 、 $CDIS2$  和  $CDIS3$  均為常數，其值見表 2。

表 2 RNG 紊流模式系數值

係數項	CNU	$\nu_k$	$\nu_\varepsilon$	CDIS1	CDIS2	CDIS3
數值	0.085	1.39	1.39	1.42	1.92	0.2

## 4.2 邊界與網格處理方法

### 4.2.1 開放邊界

在非主要波、流輸入方向的邊界條件，可選用 Sommerfeld 輻射邊界條件 (radiation boundary condition)，表示為

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_c \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

其中  $Q$  表示任何求解之變數，而  $C_c$  則為通過邊界之波浪相位速度。

### 4.2.2 造波邊界

FLOW-3D<sup>®</sup> 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 3 表示 Stokes 5 階造波由平底水槽傳播至計算領域的邊界網格。

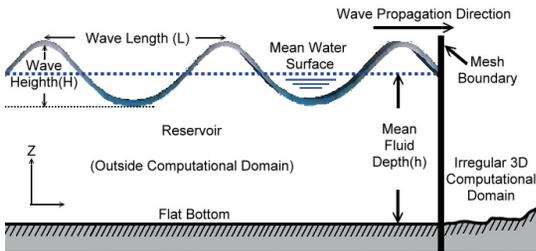


圖 3 Stokes 5 階造波邊界示意圖

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  $\eta$  隨時間變化，並沿著  $+z$  從底部量至水面，波角頻率  $\omega$  和波速度  $c$  關係式如 (33) 所示。

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = ck, \quad c = \frac{L}{T}, \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (33)$$

其中  $k$  代表造波數、 $\omega$  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  $\psi$  存在且滿足拉普拉斯方程理論

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (34)$$

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

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (35)$$

進一步的假設波峰存在 ( $x = 0, t = 0$ )，拉普拉斯控制方程式  $\psi$ ，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  $\varepsilon$  五階解如下：

$$\begin{aligned} \eta(x, t) = & d + \frac{\varepsilon}{k} \cos kX + \frac{\varepsilon^2}{k} B_{22} \cos 2kX \\ & + \frac{\varepsilon^3}{k} B_{31} (\cos kX - \cos 3kX) \\ & + \frac{\varepsilon^4}{k} (B_{42} \cos 2kX + B_{44} \cos 4kX) \\ & + \frac{\varepsilon^5}{k} \left[ -(B_{53} + B_{55}) \cos kX \right. \\ & \left. + B_{53} \cos 3kX + B_{55} \cos 5kX \right] \end{aligned} \quad (36)$$

$$u(x, z, t) = U + C_0 \left( \frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} jk \cosh jkz \cos jkX \quad (37)$$

$$w(x, z, t) = C_0 \left( \frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} jk \sinh jkz \sin jkX \quad (38)$$

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  $\varepsilon$  的四階，波數和波頻相依且滿足非線性方程。

$$\left( \frac{k}{g} \right)^{1/2} U - \frac{\omega}{(gk)^{1/2}} + C_0 + \left( \frac{kH}{2} \right)^2 C_2 + \left( \frac{kH}{2} \right)^4 C_4 = 0 \quad (39)$$

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 (39) 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 (40) 式：

$$k = \frac{\alpha + \beta^2 \operatorname{sech}^2 \beta}{(\tanh \beta + \beta \operatorname{sech}^2 \beta)d} \quad (40)$$

式中

$$\alpha = \frac{\omega^2 d}{g}, \quad \beta = \alpha \sqrt{\coth \alpha} \quad (41)$$

這個理論同時適用於深水波和淺水波，參數  $\varepsilon$  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]。

## (1) VOF 自由液面處理方法

FLOW-3D<sup>®</sup> 的自由液面追蹤法使用 VOF 計算，可以精確的模擬流體介面結合與分離狀態，FAVOR 定義矩形網格內一般幾何形狀的區域，利用矩形立方體所構成的網格定義複雜的幾何形體，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，在二個元素的公共面上，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。FAVOR 的優越之處在於它提供建立模式時的彈性。對於不可壓縮、黏性流而言，FAVOR 以下列方程組表示：

$$\nabla \cdot (\bar{A}\bar{u}) = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{1}{V} (\bar{A}\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho V} (\nabla \bar{A}) \cdot (\mu \nabla) \bar{u} + g \quad (43)$$

其中

$$\bar{A}\bar{u} = (A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z) \quad (44)$$

$$(\nabla \bar{A}) = \left( \frac{\partial}{\partial x} A_x, \frac{\partial}{\partial y} A_y, \frac{\partial}{\partial z} A_z \right) \quad (45)$$

上式中  $\bar{A}$  是相關於流體可自由通過的部分面積， $V$  表示可自由進出的部分體積， $\rho$  是密度， $P$  是壓力， $\bar{u}$  表示速度， $\mu$  是流體的黏滯係數， $g$  表重力。

FLOW-3D<sup>®</sup> 除了能夠計算單一液體的運動，亦可計算液/氣界面(不可壓縮流體/可壓縮流體)，甚至模擬多相流體界面。

定義一 VOF 函數  $F(X, Y, Z)$  代表控制體積內不同特性流體所佔體積分率，以液/氣體混合界面為例， $F = 0$  代表控制體積內充滿氣體， $F = 1$  則表示控制體積內皆為液體，而  $0 < F < 1$  時存在自由液面。 $F$  函數亦應滿足直角坐標下的控制方程式：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) + \xi \frac{FA_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (46)$$

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_F A_x F}{x} \right] \quad (47)$$

其中  $v_F = c_F \mu / \rho$  表擴散常數， $c_F$  為參照紊流施密特數， $F_{DIF}$  是紊流擴散項，藉以計算兩種流體發生紊流混合時的分佈狀況。 $F_{SOR}$  與  $R_{SOR}$  具相關性，表示體積分率的時間變化率。

## (2) 網格處理方法—多區塊結構網格

多區塊結構網格 (Multi-block Grids)，能減少網格數目，網格與幾何現狀自動耦合，精確、穩定、可以加快運算的收斂性。

## (3) FAVOR 障礙物體積分率表示法

FLOW-3D<sup>®</sup> 數值方法採用 FAVOR (Fractional 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。

對於防波堤堤頭地形淘刷的模擬，FLOW-3D<sup>®</sup> 可以波場或流場分別進行模擬，或是當造波邊界導入流場時，FLOW-3D<sup>®</sup> 的求解器可同時混合流場與波場的數值計算。

## 五、波場定床三維數值模擬

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。

### 5.1 模式驗證

陳彥彰(2004)以 Wei 等人(1995)之二階非線性 Boussinesq 方程式為控制方程式，再加入 Kennedy 等人(2000)之方法以模擬波浪碎波及溯升。在數值模式的建立上，則參考 Wei 及 Kirby(1995)之研究，為避免數值離散之捨去項造成數值頻散，建議在空間離散上，對一階微分項採四階精確度之中央差分法，二階以上之微分項則離散至二階準確度後進行計算，以解決數值頻散的問題。另外，Wei 和 Kirby(1995)在計算網格上是以非交錯網格(non-staggered grid)進行離散，其會造成數值計算上有鋸齒狀波形的出現，會使得模式較不穩定，為改善此一情況，此研究採用 Banijamali(1997)提出的交錯網格(staggered grid)進行有限差分法之離散。在時間離散上，利用四階精確度之 Adams-Bashforth-Moulton 預測與修正(predictor-corrector)技巧。模式計算規則波通過潛堤及斜坡底床上的波場變化，計算結果並與理論值或試驗值進行一系列比較驗證，用以確認此模式適用於近岸波場的模擬。

本研究以 FLOW-3D<sup>®</sup> 模式計算規則波通過潛堤及斜坡底床上的波場變化，計算結果與陳彥彰(2004)、理論值及試驗值進行一系列比較驗證，驗證案例如表 3、試驗佈置圖如圖 4，模擬結果如圖 5、6 所示。結果顯示，以 FLOW-3D<sup>®</sup> 模式計算所得均可適當描述規則波通過潛堤及斜坡底床上的波場變化，結果亦比二階非線性 Boussinesq 方程式所得結果為佳。

表 3 驗證案例列表

模擬案例	長度 (m)	網格 (m)	造波條件			模擬時間 (s)	網格總數
			h (m)	H (m)	T (s)		
CASE 1	X 32	$\delta x = 0.05$	0.4	0.02	2	30	64000
	Y 1.5	$\delta y = 1$					
	Z 0.5	$\delta z = 0.005$					
CASE 2	X 32	$\delta x = 0.05$	0.4	0.025	1.25	30	64000
	Y 1.5	$\delta y = 1$					
	Z 0.5	$\delta z = 0.005$					

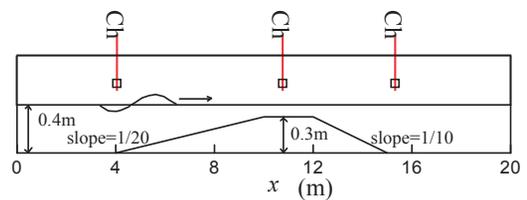


圖 4 Beji 等人(1992)之試驗佈置圖

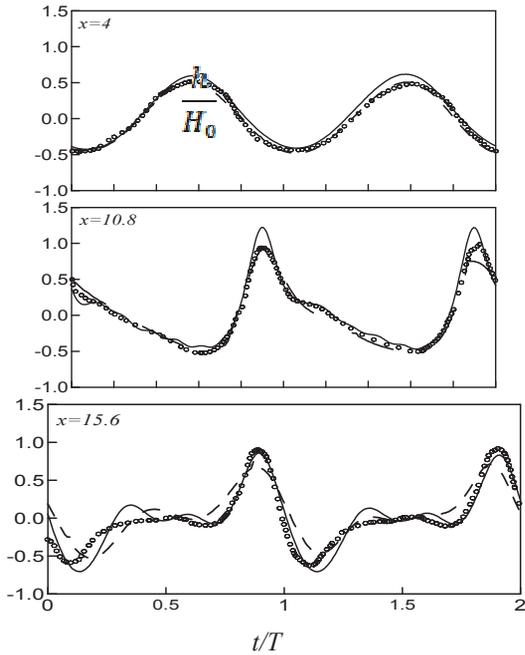


圖 5 CASE 1 (—): 陳論文模式; (o): Beji 等人試驗值; (---): FLOW 3D 模擬

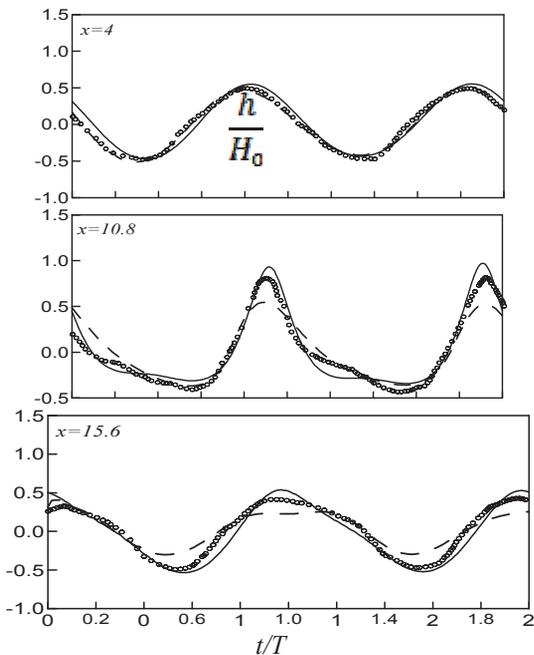


圖 6 CASE 2 (—): 陳論文模式; (o): Beji 等人試驗值; (---): FLOW 3D 模擬

## 5.2 防波堤堤頭波場計算範圍及水深地形

台中港波場數值模擬以台中港北防波堤堤頭附近海域並包含南防波堤為計算範圍，如圖 7 所示。防波堤堤頭附近計算範圍為  $4.3\text{km} \times 3.8\text{km}$ ，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，垂直入射波向 ( $\delta y$ ) 網格設定為  $1/20$  波長，平行入射波向網格 ( $\delta x$ ) 設定為  $1/10$  波長，而垂直水層網格 ( $\delta z$ ) 則設定為  $1/180$  波長。

麥寮工業港波場數值模擬以麥寮工業港西防波堤堤頭附近海域並包含東防波堤為計算範圍，如圖 8 所示。防波堤堤頭附近計算範圍為  $2.3\text{ km} \times 2.6\text{ km}$ ，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，垂直入射波向 ( $\delta y$ ) 網格設定  $1/20$  波長，平行入射波向網格 ( $\delta x$ ) 設定為  $1/10$  波長，而垂直水層網格 ( $\delta z$ ) 則設定為  $1/130$  波長。

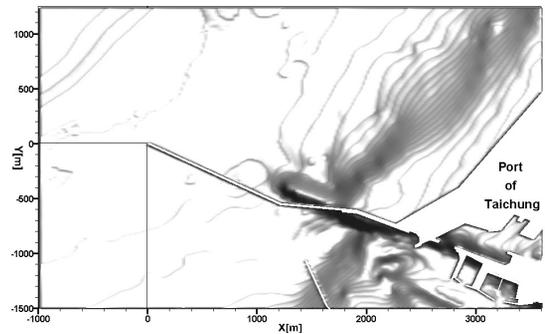


圖 7 台中港波場數值模擬海域示意圖

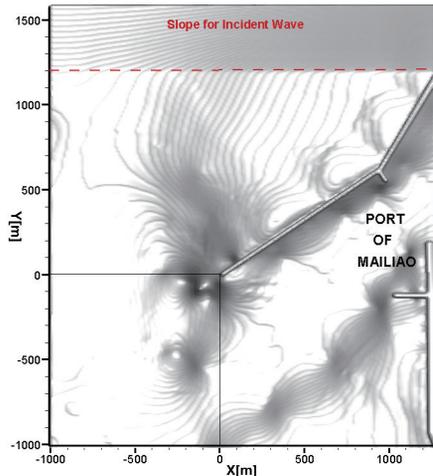


圖 8 麥寮工業港波場數值模擬海域示意圖

### 5.3 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；台中港西防波堤堤頭海域及麥寮工業港西防波堤堤頭海域波場計算案例如表 4 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西側海域為輔，海象包括 50 年期颱風、夏季平均、夏季最大、冬季平均及冬季最大等。

表 4 FLOW-3D<sup>®</sup> 計算案例

計算案例	H (波高)	T (週期)	波向	模擬時間
台中港 50 年期颱風	7.40m	11.4s	N	27T
台中港 50 年期颱風	7.40m	11.4s	W	30T

計算案例	H (波高)	T (週期)	波向	模擬時間
台中港 夏季平均	1.02m	5.8s	N	27T
台中港 夏季最大	7.50m	6.0s	N	27T
台中港 冬季平均	2.08m	6.3s	N	27T
台中港 冬季最大	6.91m	6.0s	N	27T
麥寮港 50 年期颱風	5.90m	10.2s	N	30T
麥寮港 50 年期颱風	5.90m	10.2s	W	30T

### 5.4 Stokes 5 階造波波場水粒子運動軌跡

為了檢視 FLOW-3D<sup>®</sup> Stokes 5 階造波數值解之生成與傳遞現象，於數值水槽造波邊界處預先設定追蹤粒子五個在一垂直線上，粒子直徑 0.5 m，密度 1000 kg/m<sup>3</sup>，入射波高 5.9 m，造波週期 10.2 s，水深依本計畫麥寮工業港附近海域底床地形變化，如圖 9 至圖 13 所示。圖中粒子代號 P[T] 表示位於自由液面 ( $z = -0.25$  m) 處，P[U] 表示位於上水層 ( $z = -10$  m) 處，P[M] 表示位於中水層 ( $z = -20$  m) 處，P[L] 表示位於下水層 ( $z = -30$  m) 處，P[B] 表示位於底床邊界上 ( $z = -39$  m) 處。

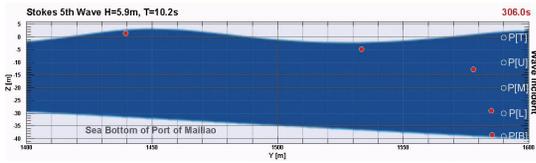


圖 9 Stokes 5 階波場速度剖面水粒子於造波時間 306 s 之位置圖

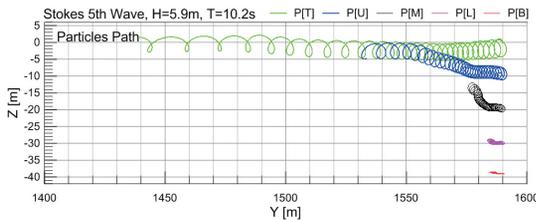


圖 10 Stokes 5 階波場速度剖面水粒子運動軌跡圖

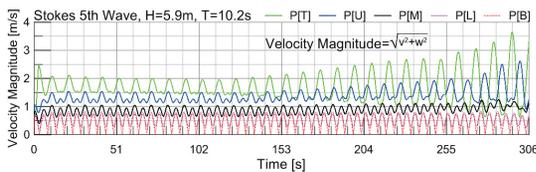


圖 11 Stokes 5 階波場速度剖面水粒子運動速度大小之比較

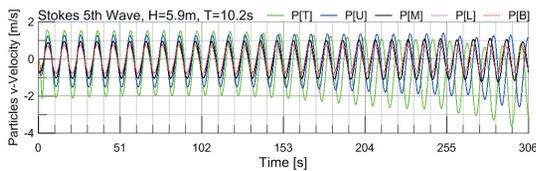


圖 12 Stokes 5 階波場速度剖面水粒子波浪傳遞方向運動速度之比較

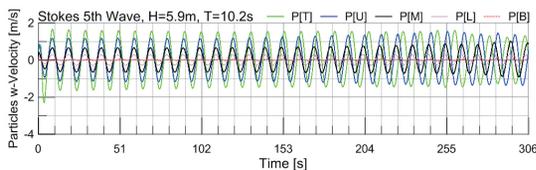


圖 13 Stokes 5 階波場速度剖面水粒子波浪垂直運動速度之比較

## 5.5 波場中自由水面變化

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 14 至圖 17 所示。

### 5.5.1 台中港北側入射波自由水面變化

台中港北側海域入射波浪的水面時序變化如圖 14、15 所示，北防波堤由邊界的東側分成三段向西邊偏北方延伸，與海岸線包圍略呈狹灣，北側海域入射波浪進入之後即受到地形的影響，東側近岸區隨即呈現淺化現象，模擬時間經過第 9 個造波週期時，波浪已傳播抵達堤頭，入射波浪受到防波堤影響而致產生東至東北側海域的反射波，至第 12 造波週期(12T)時與北側海域入射波、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。需注意的是，為便於觀察小振幅的變化，圖中水位尺度色標設定的限制值為  $\pm 5$  m 幅度，當計算結果超過  $\pm 5$  m 時仍以上、下限顏色表示，入、反射波浪疊合後的水位變化已超過此範圍，並非水位變化最大僅達  $\pm 5$  m 之程度。隨著模擬時間的增加，繞射波浪逐漸進入北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，亦可於第 15 造波週期 (15T) 時後

清楚地觀察到。比較第 18 造波週期 (18T) 時至第 24 造波週期 (24T) 時間變化，除北防波堤南側繞射波浪持續向東傳遞之外，各波峰線與短峰波峰點所在位置與水位高程已接近穩定。

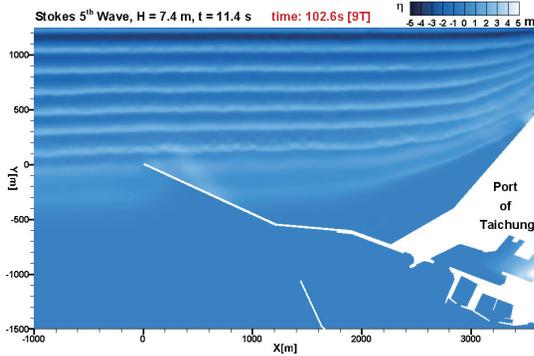


圖 14 台中港北側入射波第 9 週期

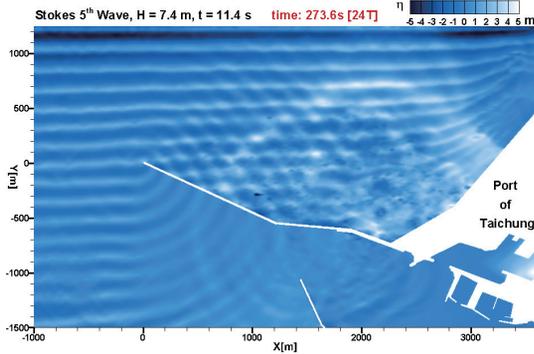


圖 15 台中港北側入射波第 24 週期

### 5.5.2 台中港西側入射波自由水面變化

台中港西側海域入射波浪的水面時序變化如圖 16、17 所示，隨著西側海域入射波浪向岸傳遞，北防波堤堤頭首當其衝，將入射角接近正向的群波南北分隔，在防波堤北側海域之群波隨著地形逐漸淺化，而進入防波堤南側海域的波浪則產生顯著的繞射現象。

當模擬時間經過第 18 個造波週期 (18T) 時，進出港航道海域則是堤頭繞射波與入射前進波疊合區，這種情形對於進出港船舶造成航行安全上的考量，至第 30 個造波週期 (30T) 波浪傳遞進入港內水域，對於港內停泊船隻的裝卸作業也會產生一定的影響，因此顯見台中港北防波堤的設計對於西側海域入射波的遮蔽效果不佳。

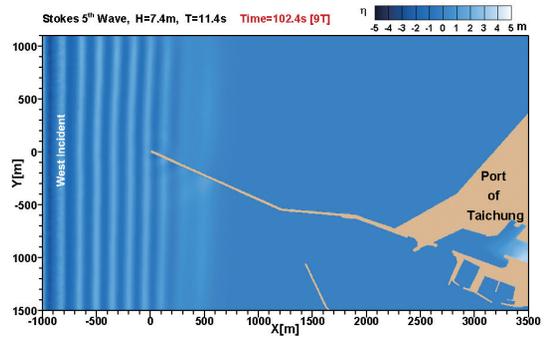


圖 16 台中港西側入射波第 9 週期

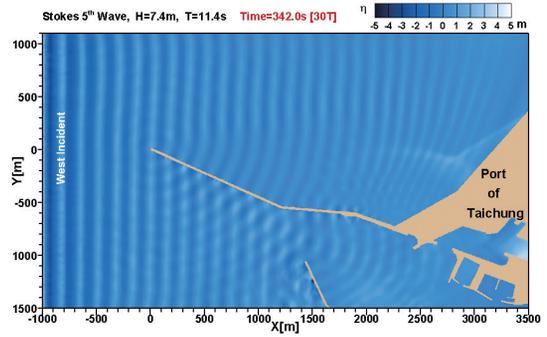


圖 17 台中港西側入射波第 30 週期

### 5.5.3 麥寮工業港北側入射波自由水面變化

麥寮工業港北側海域入射波浪的水面時序變化如圖 18、19 所示，西防波堤由邊界的東北角分成兩段向西南

方延伸，因此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，模擬時間經過第 12 造波週期後，入射波浪逐漸受第二段西防波堤影響而致發東至東北側海域的反射波，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。約於第 18 造波週期時波浪已傳播抵達堤頭，並隨著模擬時間的增加，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，亦可於第 24 造波週期時觀察到。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。

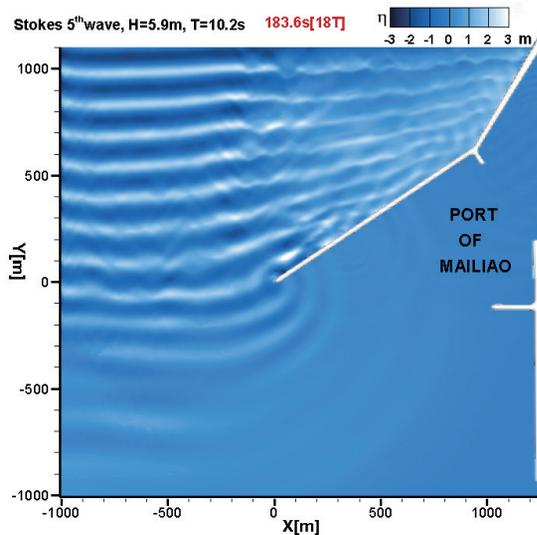


圖 18 麥寮工業港北側第 18 造波週期

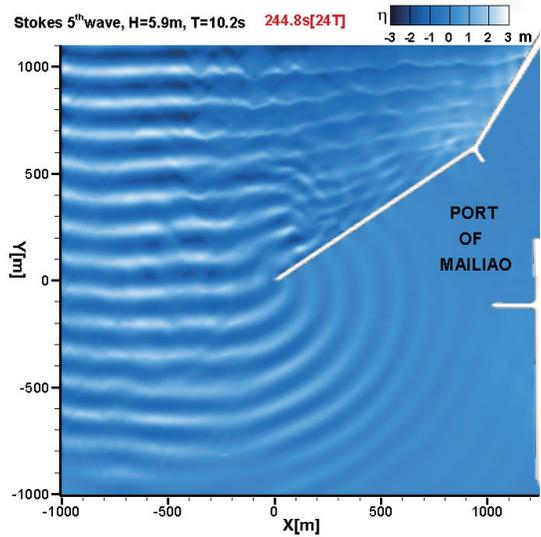


圖 19 麥寮工業港北側第 24 造波週期

#### 5.5.4 麥寮工業港西側入射波自由水面變化

麥寮工業港西側海域入射波浪的水面時序變化如圖 20、21 所示，西側海域入射波浪群波的傳遞方向和台中港一樣，西防波堤堤頭也是首當其衝，只是夾角較大(大約 10 度)。因波浪群波入射方向與堤頭逆向銳角，亦呈現分隔現象，進入防波堤北側海域之群波則隨地形逐漸淺化，而進入防波堤南側海域的波浪不但受到地形淺化的影響，接近東防波堤時亦與反射波疊合，對於西側海域入射波的遮蔽效果雖然比台中港稍佳，但對於船舶進出港的導航以及港內裝卸貨作業都會造成一定程度的影響。

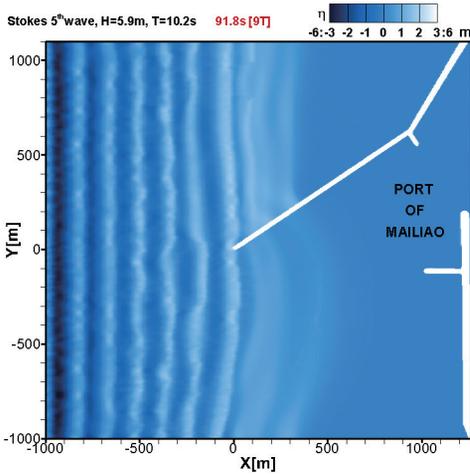


圖 20 麥寮工業港西側第 9 造波週期

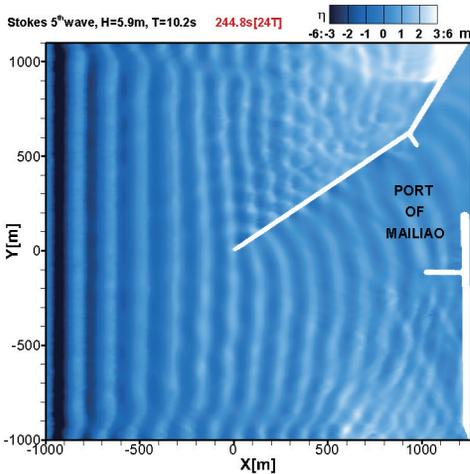


圖 21 麥寮工業港西側第 24 造波週期

## 5.6 堤頭前之垂直流況變化

### 5.6.1 台中港北側入射波堤頭垂直流況

台中港北側海域入射波通過緊鄰北防波堤堤頭的流況垂直剖面，如圖 22 所示。波浪水粒子運動速度的計算等於  $(u^2 + v^2 + w^2)$  和的開平方，右上方黑色箭頭符號長度表示速度每秒 5 m 的單位。圖中第 9 個造波週期時波浪

剛好抵達且波峰正通過堤頭，其北側緊鄰的網格顯示此時的波浪水粒子運動方向沿著垂直壁下潛，由色階判斷速度介於 1 m/s 至 2 m/s 之間；第 12 個造波週期時成熟的波浪與堤頭開始劇烈的耦合運動，水粒子下潛的趨勢明顯，速度由底床至水面增加到 6 m/s，評估此波浪條件下所引發的流場，應造成底床相當程度的影響。堤頭的下流面，受到結構物的遮蔽，垂直流場則仍有 1 m/s 左右、運動方向向上的流動；第 18 個造波週期至第 24 個造波週期的波浪水粒子運動趨於穩定，速度介於 1 m/s 至 2 m/s 之間。

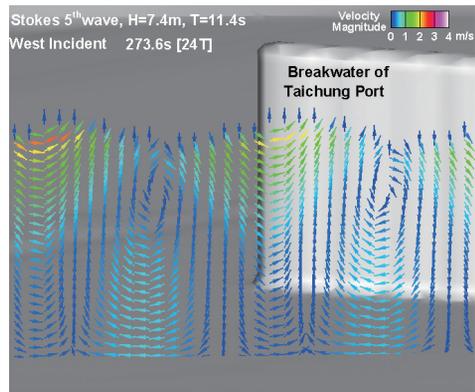


圖 22 台中港北側入射波堤頭垂直流況

### 5.6.2 台中港西側入射波堤頭垂直流況

台中港西側海域入射波通過緊鄰北防波堤堤頭垂直剖面流況的時序變化，如圖 23 所示，為了便於分辨低速底層流況之分布情形將流況圖色階範圍全面降低，由於堤身與群波入射方向接近平行且有 20 度的偏北，因此波浪

傳遞並未有明顯的流固耦合現象，底床流速分布與時序變化均小於0.5m/s，對於堤頭附近海床的掏刷影響小於北側入射波浪。

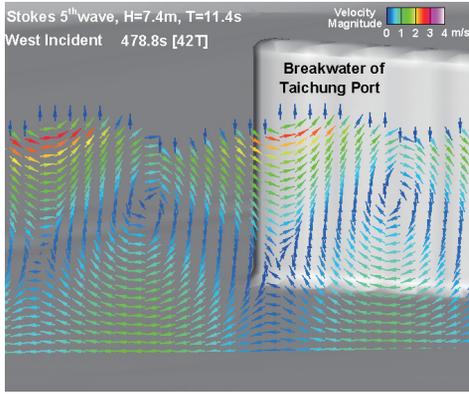


圖 23 台中港西側入射波堤頭垂直流況

### 5.6.3 麥寮工業港北側入射波堤頭垂直流況

麥寮工業港北側海域入射波通過緊鄰西防波堤堤頭垂直剖面流況，如圖 24 所示。波浪水粒子運動速度的計算等於  $(u^2 + v^2 + w^2)$  和的開平方。圖中波浪在第 12 個造波週期時抵達堤頭，波浪水粒子運動速度低於 1m/s，至第 18 個造波週期時波浪與堤頭開始劇烈的耦合運動，水粒子下潛抬升起伏上下趨勢明顯，速度由底床而水面增加到 4m/s，評估此波浪條件下所引發的流場，應造成底床相當程度的影響。堤頭的下游面，受到結構物的遮蔽，垂直流場則仍有 1m/s 左右、運動方向向上的流動；第 18 個造波週期至第 24 個造波週期的波浪水粒子運動趨於穩定，速度介於 1m/s 至 2m/s 之間。

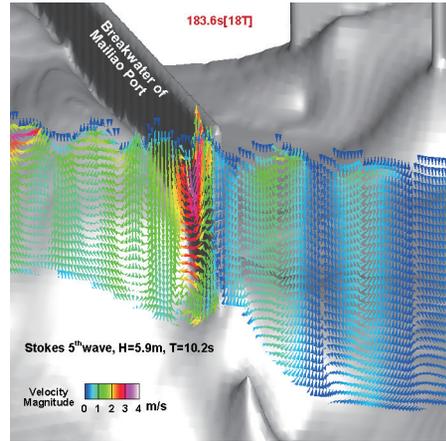


圖 24 麥寮工業港北側入射波堤頭垂直流況

### 5.6.4 麥寮工業港西側入射波堤頭垂直流況

麥寮工業港西側海域入射波通過緊鄰西防波堤堤頭垂直剖面流況，如圖 25 所示。深藍色趨近於零的向量分布於底床坑洞上方水層，而在坑洞的斜坡與坑底顯示的流速推估大於 1m/s。

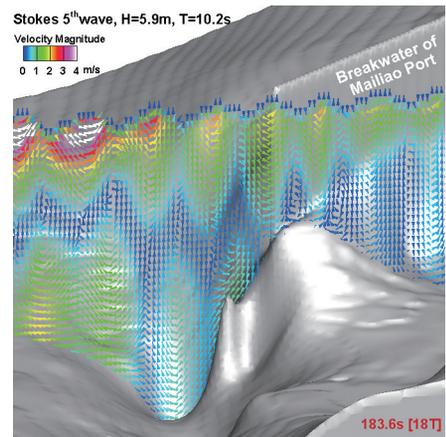


圖 25 麥寮工業港西側入射波堤頭垂直流況

## 5.7 防波堤頭附近最大底床水分子速度分佈

為了進一步瞭解數值模型波場內的流況，並提供更易於理解的資訊，對數值的時序列計算結果，進行統計與分析。首先定義分析海域範圍，以台中港北防波堤堤頭為原點，其方形對角點座標： $([-400,-100]、[100, 200])$ ；以麥寮工業港西防波堤堤頭為原點，其方形對角點座標： $([-400,-300]、[100, 200])$ ，如圖 26、圖 27 所示。對該波場內所有模擬時間步階的水分子速度由大至小進行排序，其第一筆資料即為最大值 ( $V_{max}$ )，並計算其總資料量的前十分之一的水分子速度平均值 ( $V_{1/10}$ ) 及前三分之一的水分子速度平均值 ( $V_{1/3}$ )，各分析案例如表 5 所示。

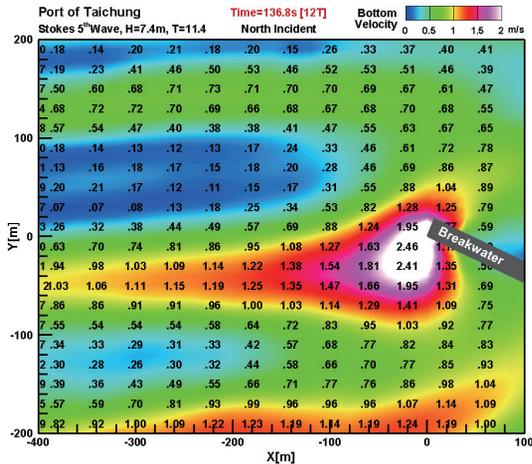


圖 26 麥寮工業港北側入射波堤頭垂直流況

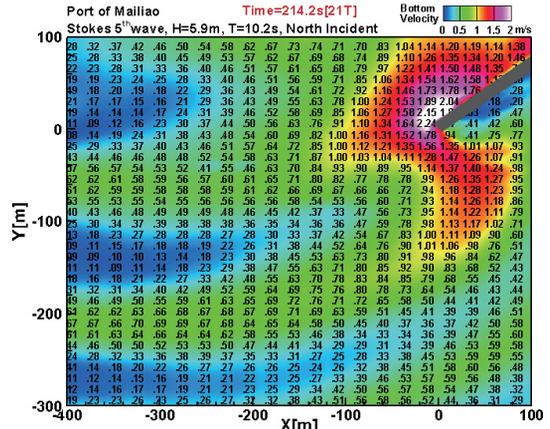


圖 27 麥寮工業港西側入射波堤頭垂直流況

表 5 防波堤頭附近最大底床水分子速度分佈

分析案例	造波邊界	海象條件	波高 (m)	週期 (s)	底床流速 $V_{max}$	底床流速 $V_{1/10}$	底床流速 $V_{1/3}$
台中港波場	北側	颱風 50 年	7.40	11.4	2.82	1.23	0.91
台中港波場	西側	颱風 50 年	7.40	11.4	2.38	1.45	0.99
台中港波場	北側	夏季平均	1.02	5.8	0.02	0.01	0.008
台中港波場	北側	夏季最大	7.50	6.0	0.31	0.10	0.08
台中港波場	北側	冬季平均	2.08	6.3	0.11	0.03	0.02
台中港波場	北側	冬季最大	6.91	6.0	0.26	0.09	0.07

分析案例	造波邊界	海象條件	波高 (m)	週期 (s)	底床流速 $V_{max}$	底床流速 $V_{1/10}$	底床流速 $V_{1/3}$
麥寮港波場	北側	颱風 50 年	5.90	10.2	2.73	0.87	0.59
麥寮港波場	西側	颱風 50 年	5.90	10.2	2.30	1.63	1.13

台中港北側海域 50 年期颱風入射波浪條件，波高 7.4 m，週期 11.4 s，模擬結果的水分子速度最大值 2.82 m/s，極值排序前十分之一的平均值 1.23 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.91 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 43%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 32%。

台中港西側海域 50 年期颱風入射波浪條件，波高 7.4 m，週期 11.4 s，模擬結果的水分子速度最大值 2.38 m/s，極值排序前十分之一的平均值 1.45 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.99 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 61%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 42%。

台中港北側海域夏季平均入射波浪條件，波高 1.02 m，週期 5.8 s，模擬結果的水分子速度最大值 0.02 m/s，極值排序前十分之一的平均值 0.01 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.008 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 50%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 40%。

台中港北側海域夏季最大入射波浪條件，波高 7.5 m，週期 6.0 s，擬

結果的水分子速度最大值 0.31 m/s，極值排序前十分之一的平均值 0.1 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.08 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 32%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 26%。

台中港北側海域冬季平均入射波浪條件，波高 2.08 m，週期 6.3 s，模擬結果的水分子速度最大值 0.11 m/s，極值排序前十分之一的平均值 0.03 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.02 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 27%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 18%。

台中港北側海域冬季最大入射波浪條件，波高 6.91 m，週期 6.0 s，模擬結果的水分子速度最大值 0.26 m/s，極值排序前十分之一的平均值 0.09 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.07 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 35%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 27%。

麥寮工業港北側海域 50 年期颱風入射波浪條件，波高 5.9 m，週期 10.2 s，模擬結果的水分子速度最大值 2.73 m/s，極值排序前十分之一的平均值 0.87 m/s，極值排序前三分之一的平均值 0.59 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 32%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 22%。

麥寮工業港西側海域 50 年期颱風入射波浪條件，波高 5.9 m，週期 10.2 s，模擬結果的水分子速度最大值 2.3 m/s，極值排序前十分之一的平均值 1.63 m/s，極值排序前三分之一的平

均值 1.13 m/s。在同樣區域， $V_{1/10}$  約為  $V_{max}$  的 71%， $V_{1/3}$  約為  $V_{max}$  的 49%。

針對台中港及麥寮工業港 50 年期颱風入射波浪條件的模擬結果，其西側海域的入射波場  $V_{1/10}$  值與  $V_{1/3}$  值都較北側海域的入射波場大，推測是受到防波堤遮蔽的影響。

比較 50 年期颱風北側入射波浪條件，麥寮工業港的  $V_{1/10}/V_{max}$  比值遠大於台中港的  $V_{1/10}/V_{max}$  比值為 21%，推測原因是防波堤的配置方向與海域地形的關係。

### 5.8 掏刷區底床流速與 ESS 之分布

應用多餘剪應力 (Excess Shear Stress,  $ESS = \tau/\tau_c$ ) 模式可以在定床的底床邊界條件下快速預估動床的掏刷趨勢，本研究麥寮工業港北側入射波浪第 20 造波周期於掏刷區底床的流速及 ESS 之分布分別如圖 28、圖 29 所示，流速 ESS 的大小隨著造波週期增減。圖中以防波堤堤頭水面切點為原點，取紅色框選區座標  $[x = -222 \text{ m}, y = -39 \text{ m}, z = -44 \text{ m}]$  作時序分析如圖 30、圖 31 所示，顯示底床流速與 ESS 時序具有一致性的發展趨勢。

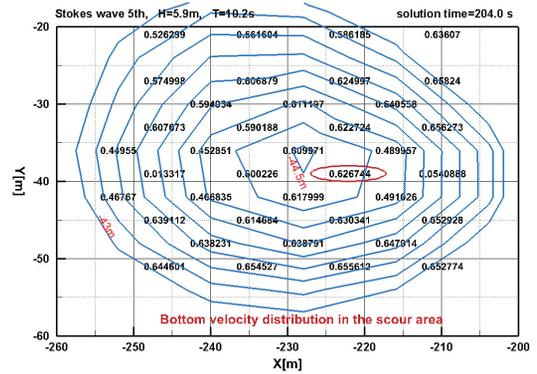


圖 28 掏刷區底床流速分布圖

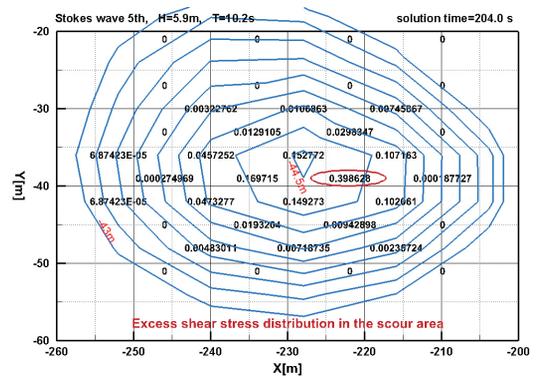


圖 29 掏刷區底床 ESS 分佈圖

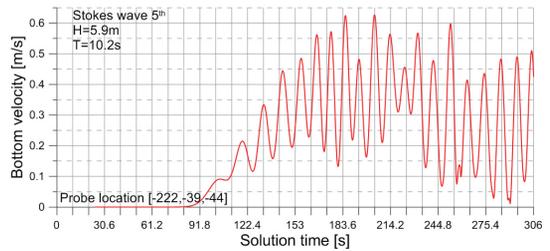


圖 30 座標  $[-222, -39, -44]$  底床流速時序圖

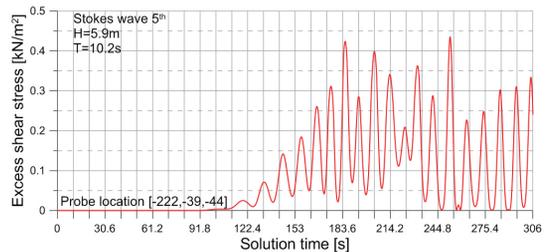


圖 31 座標  $[-222, -39, -44]$  底床 ESS 時序圖

## 六、初步結論

利用 FLOW-3D<sup>®</sup> 對台中港與麥寮工業港防波堤堤頭附近海域進行波場數值模擬，台中港範圍 4.3 km×3.8 km，麥寮工業港計算範圍 2.3 km×2.6 km，其底床邊界均採用附近海域實測地形資料，海象條件包括 50 年期颱風、夏季平均、夏季最大、冬季平均及冬季最大等，入射波浪邊界以北向為主西向為輔，模擬時間以成熟波完成傳遞該計算海域為考量。

分析台中港 50 年期颱風北側及西側入射波，波高 7.4 m、週期 11.4 s 的極端波浪條件，計算造波週期 27 個的波場以及波浪引發的流場變化。以北防波堤堤頭為原點，北側海域入射波浪受北防波堤北側阻擋形成反射波，東側沿岸亦同時形成反射波，此兩股反射波再與入射波交會，海況紛紜，也證明了防波堤的設置達到了保護港口的目的。至於堤趾附近海床水粒子的運動速度，同樣的波浪條件北側入射波比西側入射波大 0.44 m/s，海床淺化和防波提交會角度是主要原因，至於整體的平均值 ( $V_{1/3}$ 、 $V_{1/10}$ ) 卻是西側入射波比北側入射波大，防波堤的反射與遮蔽是主要因素。

分析台中港海域夏季平均、夏季最大、冬季平均及冬季最大等北側入射波浪條件的計算結果，發現其波場引發的底床流速最大值為 0.31 m/s，

約為 50 年期颱風北側入射波的十分之一，針對防波堤附近海床掏刷機制探討的必要性，麥寮工業港季節波浪條件的計算因此先予省略等待商榷。

分析麥寮工業港，波高 5.9 m、週期 10.2 s 的極端颱風波浪條件，計算造波週期 30 個的波場以及波浪引發的流場變化。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，而西防波堤南側海域受到堤體的遮蔽，波高變化與流速變化皆小於北側。

藉由模擬波場、波浪引發的流場，至今對堤頭近域的流體動力狀態已有初步認識，未來進一步的數值模擬，將朝向波流交會與漂砂動床等領域持續測試，以協助釐清與理解堤頭沖蝕的機制與變化。

## 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. Dentale, F., G. Donnarumma and E. Pugliese Carratelli (2012) "Wave Run Up and Reflection on Tridimensional Virtual Break-water," Journal of Hydrogeology & Hydro-logic Engineering, 1:1.

3. Hsu, J.R.C., Y. Tsuchiya and R. Silvester (1979) "Third-order approximation to short-crested waves," J. Fluid Mech., Vol. 90, part 1, pp. 179-196.
4. Lin M. and D.S. Jeng (2004) "A 3-D model for ocean waves over a Columb-damping poroelastic seabed," Ocean Engineering, Vol.31, pp. 561-585.
5. Sato, S. and I. Irie (1970) "Variation of topography of sea-bed caused by the construction of breakwaters," Proc.12th Int. Conf. Coastal Eng., Washington D.C., USA, ASCE 2, 1301-1319.
6. Sumer, B. M. and J. Fredsøe (1997) "Scour at the head of a vertical-wall breakwater," Coastal Engineering 29, 201-230.
7. Sumer, B. M. and J. Fredsøe (2000) "Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater," Coastal Engineering 40, 59-87.
8. Sumer, B. M., Richard J. S. Whitehouse and A. Tørum (2001) "Scour around coastal structures: A summary of recent research," Coastal Engineering 44(2), 153-190.
9. Sumer, B. M., J. Fredsøe, A. Lamberti, B. Zanuttigh, M. Dixen, K. Gislason and A. F. Di Penta (2005) "Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures," Coastal Engineering 52, 995-1025.
10. 林銘崇、盧衍琪、梁乃匡、吳啟東 (1984) 「短峰波對防波堤基礎沖刷影響之研究」，第七屆海洋工程研討會論文集，pp44-1~44-21。
11. 劉景毅、黃煌輝 (2000) 「直立防波堤前海流造成之底床沖刷預測」，第二屆國際海洋大氣會議論文彙編，第 331-336 頁。
12. 許泰文、黃清哲、藍元志、蔡金晏、曾以帆、謝志敏、林俊遠 (2003) 「防波堤堤前沖刷問題數值模擬研究」，財團法人中華顧問工程司主辦，中華民國 92 年 12 月。
13. 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。
14. 賴堅戊 (2009) 「波浪於粗粒徑斜坡底床傳遞之試驗與數值研究」，國成功大學水及海洋工程研究所博士論文。
15. 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。

# 港區海域油污擴散數值模式評估

- 邱啟敏 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生  
黃清哲 國立成功大學水利及海洋工程學系教授  
范揚名 國立成功大學近海水文中心研發組組長  
莊士賢 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授  
簡仲璟 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長  
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

## 摘要

港區海域的大型油污不但會對海洋生態與經濟活動造成嚴重衝擊，也影響到國家的門面形象。掌握並預測油污的發生區域與運動特徵，將能更有效地進行油污災情控制與清理工作。本文目的為綜整與評估適用於港區海域油污擴散模擬之數值模式，以初步規畫作業化模式之架構。

## 一、前言

港埠區域的船舶進出頻繁，若不慎發生漏油事件，將嚴重影響港區的環境生態。1982年決議的聯合國海洋公約法 (United Nations Convention on the Law of the Sea) 認定來自船舶的污染物是海洋污染的主要來源之一。根據統計，海上油污的污染來源有48%來自於燃油；29%則來自於原油 (Fingas, 2000)。海上運輸工具所載運之油料洩漏，或污水傾倒注入海洋後，

海域被這些物質污染，進而影響生物圈之生態平衡，並造成水產資源的嚴重損失。根據北海行動論壇全球協會 (Bremer Umweltvereins Aktionskonferenz Nordsee) 公佈的資料顯示，全球海域每年大約有超過300萬噸的廢油漂流於海上，其中有13%是來自於船難漏油。臺灣海域為東亞航運必經之地，經濟快速開發使得臺灣對外的航運更趨頻繁，尤其是石化工業的興起，油品及化學品的進出口更增加了港灣環境管理的不確定性，例如民國97年11月10日巴拿馬籍 Morning Sun(晨曦號) 汽車貨輪擱淺臺北縣石門鄉外海即造成海洋油污污染。

根據我國海洋污染防治法 (103年6月4日修正) 之規定，行政院環境保護署 (簡稱環保署) 為海洋污染防治的主管機關，其職掌包括：防治海洋污染、保護海洋環境、維護海洋生態、確保國民健康、及永續利用海洋資源。為有效完成這些工作，環保署已發展

出利用無人飛機、衛星、及 X-band 雷達等平台為基礎的監測技術。根據海洋污染防治法第二條之規定，該法適用範圍，亦即環保署針對海域油污之權責監控範圍包括了中華民國管轄之潮間帶、內水、領海、鄰接區、專屬經濟海域及大陸礁層上覆水域。相較於環保署之執掌，根據我國海洋污染防治法第十一條之規定，各類港口管理機關應依該法及其他相關規定採取措施，以防止、排除或減輕所轄港區之污染。

油污洩漏後，會產生各種風化過程，除了隨水流、潮流和風向造成水平擴散之外，部分還會蒸發；部分會與垃圾漂浮物混合，或是與沉澱物結合而成垂直擴散或是滲入沙灘；此外還會被海中生物分解後，又被魚蝦等生物攝食。若能在事發現場即時掌握油污擴散範圍，並有效掌握未來的油污擴散方向，將可有效降低對自然環境的衝擊。為能控制海上油污擴散，目前常見的方法是透過攔油索控制油污的擴散範圍，若能事先掌握海流的運動特性，從中預測出油污的漂移路徑，則必能有效的透過攔油索控制海上油污。

## 二、適用於油污擴散模擬之海潮流模式評估

本文規劃的海域油污擴散數值模式的主要組成有二：(1) 海域海潮流運

動之模擬，及 (2) 溢油污染擴散之模擬。海潮流運動模擬結果提供溢油污染擴散模擬所需之流場資料，而準確的海潮流資訊是油污擴散模擬成功的關鍵。因此本文先針對現有的海潮流模式進行評估。

全球使用的海潮流模式眾多，早期純粹以海潮流模式進行模擬河口的潮流及暴潮位的演變。近十年來，由於電腦科技迅速的進步，海潮流模式已結合大氣與波浪模式來提昇河口流體動力現象預測的精度。眾多的海潮流模式雖各具不同的優缺點，在理論基礎上各模式皆差異不大，唯一的差異即不同的數值技巧，但一致目標皆是希望能達到一套具備有快速的計算效率與精度佳的模式。海潮流模式建置的計算網格可區分為結構性網格 (structured grids) 及非結構性網格 (unstructured grids)，在結構性網格模式分別有 POM (Blumberg and Mellor, 1987)、TRIM (Casulli and Cheng, 1992)、ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005)、NCOM (Barron et al., 2006)；非結構性網格模式分別有 ADCIRC (Luettich et al., 1991)、QUODDY (Lynch and Werner, 1991)、UnTRIM (Casulli and Walters, 2000)、ELCIRC (Zhang et al., 2004)、SCHISM (Zhang and M. Baptista, 2008) (2014 年 12 月 13 日前為 SELFE)、SEOM (Iskandarani et al.,

2003)、及 FVCOM (Chen et al., 2003), 其中 SCHISM 於 2014 年底起修改為無縫跨尺度網格模式 (seamless cross-scale modelling), 意即結合結構性與非結構性網格。

海潮流模式面臨的挑戰是需包含河川、複雜的河口與海岸地形、以及到海岸陸棚整個系統, 因需結合不同的空間與時間尺度, 所以海潮流模式使用的數值方法可分為顯式法與隱式法兩種。顯式法的優點在於記憶體空間較為節省, 在高速運算上的應用也比隱式法簡單, 缺點是在時間步長上須配合模擬範圍的水深作修正, 才能達到穩定。隱式法較為穩定, 且時間格點的大小不受模式區域內水深所影響, 缺點則是較耗記憶體空間, 在應用上比顯式法複雜。自 1990 年起, 半隱式非結構性網格模式 (semi-implicit unstructured grid models) 開始盛行, 如 UnTRIM、SUNTANS (Fringer et al., 2006)、及 ELCIRC 等。如 UnTRIM 模式利用隱式法處理動量方程 (momentum equations) 中的正壓梯度 (barotropic-pressure gradient) 與垂直黏性 (vertical viscosity) 項, 以及連續方程 (continuity equation) 的發散項 (divergence term), 如此會得到較佳的計算結果。ELCIRC 模式曾成功應用在美國哥倫比亞河口系統 (Columbia River estuary-plume-shelf system), 哥倫比亞河口有寬廣的

潮間帶、強烈的潮流、與明顯的流速梯度。即便如哥倫比亞河口複雜的地形, ELCIRC 亦能提供快速計算效率來模擬及預測三維河口海流與擴散的演變 (Baptista et al., 2005), 並結合實測資料變成一個重要觀測系統 (CORIE, Baptista, 2006)。

SCHISM 利用 ELM (Eulerian-Lagrangian Method) 計算對流項, 並利用半隱式法求解, 可使用較大的時間步長計算, 並確保模式的穩定與精度。意即模式不受 CFL 條件限制。CFL 條件 (Courant-Friedrichs-Lewy condition) 指流體質點在一個時間步階  $\Delta t$  內, 不能流過一個空間大於網格的距離  $\Delta x$ 。因此當網格尺寸  $\Delta x$  非常小時, 必需選很小的  $\Delta t$  才能使數值穩定。油污的移動速度可能會很緩慢,  $\Delta t$  需配合油污的可能移動速度, 又模擬港區油污擴散時, 為了完整描述複雜地形,  $\Delta x$  可能會非常小, 因此半隱式法適用於油污擴散模擬。

歐美各國作業化海潮流模式的發展趨勢由於大範圍模式 (全球海洋模式或大西洋海洋模式等) 之範圍、邊界、驅動力等條件多類似甚至相同, 所以模式之發展已由各國或研究機構獨自發展建置而趨向於共同研發的模式系統。整理歐美現今主要的作業化海潮流模式如表 1, 唯 SCHISM 模式具備模擬溢油擴散的能力, 且結合大氣與

波浪模式能有更高精度的模擬結果，另一重點是具有快速的電腦計算效率，可以達到災害緊急應變與防災預警之時效要求。

### 三、SCHISM 模式

#### 3.1 SCHISM 模式物理公式

SCHISM 模式是由 Zhang and Baptista 以 ELCIRC 模式基礎改成 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model, <http://ccrm.vims.edu/schism/>) 海洋模式，是一個求解三維淺水波方程 (3D shallow-

water equations)、靜水壓方程 (Hydrostatic)、包氏近似 (Boussinesq approximations)、與鹽度及溫度的傳輸方程的海洋流體動力數值模式。SCHISM 模式主要求解海氣交界自由液面 (Free surface) 的運動情況、水體中三維的流場與鹽度及溫度分佈。

SCHISM 模式的基本控制方程式有連續與動量方程式，為簡化 SCHISM 模式的方程式，第一個假設為不可壓縮流體運動，則在卡氏座標下描述水體的連續方程式可寫為：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

表 1 海潮流模式比較表

海流模式	數值方法	驅動力	垂直方向座標系統	模組
NEMO	有限差分法	潮汐、各種氣象資料、河流等	S 座標 Z 座標 混合 SZ 座標	海冰、示踪劑、生物化學
COHERENS	有限差分法	潮汐、各種氣象資料、河流等	$\sigma$ 座標系統	生態、漂砂、粒子追蹤
FVCOM	有限體積法	潮汐、各種氣象資料、河流等	$\sigma$ 座標系統 S 座標系統	資料同化、系集卡門濾波、多層網格嵌套、三維乾濕處理、波浪、GOTM 紊流、三維漂砂、水質生態、追蹤顆粒、極區冰
HYCOM	有限差分法	各種氣象資料	垂向混合座標 (等密度坐標、 $\sigma$ 座標及 z 座標的混合)	
POM	有限差分法	潮汐、各種氣象資料、河流等	$\sigma$ 座標系統	
ROMS	有限差分法	潮汐、各種氣象資料、河流等	S 座標系統	波浪、大氣、生態系統、資料同化、沉積、極區冰
SCHISM	有限元素法	潮汐、各種氣象資料、河流等	混合 SZ 座標或 S 座標	油污擴散、波浪、生態系統、資料同化、漂砂、水質

為描述自由液面  $\eta(x, y, t)$  隨著流場演變，模式求解下式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (2)$$

第二個假設則是使用近似的方法簡化流體的動力方程式，引用包氏近似 (Boussinesq approximations)，因此求解三維的動量方程 (3D momentum equations) 如下：

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} &= \mathbf{f} - g\nabla\eta + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) \\ &- \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \nabla \rho d\zeta + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{f} = -f \mathbf{k} \times \mathbf{u} + \alpha g \nabla \psi$ 。

鹽度對流擴散傳輸方程 (salt advection-diffusion-reaction) 如下式：

$$\frac{D\mathbf{S}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial z} \right) + F_s \quad (4)$$

溫度對流擴散傳輸方程 (temperature advection-diffusion -reaction) 為：

$$\frac{D\mathbf{T}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho_0 C_p} + F_h \quad (5)$$

以上程式中符號標記說明如下：

$(x, y)$ ：水平卡式座標； $z$ ：垂直座標，向上為正； $\nabla$ ： $\left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ ； $\eta(x, y, t)$ ：自由液面高度； $h(x, y)$ ：水深； $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ ：水平速度向量，於卡式座標速度分量為  $(u, v)$ ； $w$ ：垂直速度； $f$ ：科氏因子；

$g$ ：重力加速度； $\hat{\psi}(\varphi, \lambda)$ ：地球潮汐位能； $\alpha$ ：有效地球彈性因子 ( $= 0.69$ ) (Schwiderski, 1980a, 1980b)； $\rho(\mathbf{x}, t)$ ：水密度， $\rho_0$  唯一常數， $1025 \text{ kg m}^{-3}$ ； $p_A(x, y, t)$ ：自由液面的大氣壓力； $S, T$ ：水體中鹽度 (practical salinity units (psu)) 與溫度； $\nu$ ：垂直渦流黏滯係數； $\mu$ ：水平渦流黏滯係數； $\kappa$ ：鹽度垂直渦流擴散係數或熱通量垂直渦流擴散係數； $F_s, F_h$ ：擴散作用造成的側向應力 (在 SCHISM 中予以忽略)； $Q$ ：太陽輻射的吸收率； $C_p$ ：水的比熱。

SCHISM 模式採用 Generic Length Scale (GLS) 紊流閉合模式 (turbulence closure models) (Umlauf and Burchard, 2003) 來處理垂直方向的混合作用，其優點包含多種閉合模式 ( $k-\varepsilon$  (Rodi, 1984);  $k-\omega$  (Wilcox, 1998); Mellor and Yamada (1982))。紊流閉合模式中紊流動能 ( $k$ ) 與通用長度尺度 (generic length-scale) ( $\psi$ ) 的傳輸、產生及消散如下：

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_K^\psi \frac{\partial K}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &+ \nu M^2 + \mu N^2 - \varepsilon \\ \frac{D\psi}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_\psi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ \frac{\psi}{K} (c_{\psi 1} \nu M^2 + c_{\psi 3} \mu N^2 - c_{\psi 2} F_w \varepsilon)$$

其中， $\nu_K^\psi$  與  $\nu_\psi$  為垂直紊流擴散 (vertical turbulent diffusivities)； $c_{\psi 1}$ 、 $c_{\psi 2}$ 、 $c_{\psi 3}$  為模式特定常數 (model-specific con-

stants) (Umlauf and Burchard, 2003 ; Zhang et al., 2004) ;  $F_w$  為接近壁面函數 (wall proximity function) ;  $M$  與  $N$  為剪力與浮力頻率 (shear and buoyancy frequencies) ;  $\varepsilon$  是消散率 (dissipation rate) 。通用長度尺度定義為 :

$$\psi = \left(c_\mu^0\right)^p K^m \ell^n \quad (8)$$

其中  $c_\mu^0 = 0.3^{1/2}$  ,  $\ell$  是紊流混合長度 (turbulence mixing length) ,  $p$  、  $m$  及  $n$  在不同紊流閉合模式皆有不同的特定常數。

根據 Umlauf and Burchard (2003) 之紊流閉合理論 , 式 (3) 與式 (5) 的垂直紊流黏滯與擴散係數是參考  $k$  、  $\ell$  及穩定函數 (stability functions) , 可寫作 :

$$\begin{aligned} \nu &= \sqrt{2} s_m K^{1/2} \ell_w \\ \mu &= \sqrt{2} s_h K^{1/2} \ell_w \\ v_k^\psi &= \frac{\nu}{\sigma_k} \\ v_\psi &= \frac{\nu}{\sigma_\psi} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 ,  $K$  為紊流運動能量 ,  $\ell$  為紊流混合長度 , 施密特數 (Schmidt numbers) 為  $v_k^\psi$  與  $v_\psi$  , 穩定函數 (stability functions) 為  $s_m$  與  $s_h$  (Kantha and Clayson, 1994; Canuto et al., 2001; or Galperin et al., 1988) 。

在河川與海洋的表面與底床 , 紊流動能 (turbulent kinetic energy) 與混合

長度 (mixing length) 來自於狄利克雷邊界條件 (Dirichlet boundary conditions) , 如下 :

$$K = \frac{1}{2} B_1^{2/3} |\tau_b|^2 \quad (10)$$

$$\ell = \kappa_0 d_b \text{ or } \kappa_0 d_s \quad (11)$$

其中  $\tau_b$  為底部摩擦剪應力 ;  $\kappa_0 = 0.4$  為馮卡門常數 (von Karman's constant) ;  $B_1$  是常數 ;  $d_b$  與  $d_s$  分別是底部與海水表面邊界的距離。

SCHISM 模式動量方程的垂直邊界條件如下 :

在海水面有考慮內部雷諾應力與剪應力的平衡可寫作 :

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \tau_w , \text{ 在 } z = \eta \quad (12)$$

其中  $\tau_w$  為剪應力。

在底床邊界層考慮無滑移條件 (no-slip condition) , 則內部雷諾應力與底床磨擦力的平衡可寫作 :

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \tau_b , \text{ 在 } z = -h \quad (13)$$

其中  $\tau_b$  為底床磨擦力。

紊流邊界層中 (Blumberg and Mellor, 1987) , 底床磨擦力可寫作 :

$$\tau_b = C_D |\mathbf{u}_b| \mathbf{u}_b \quad (14)$$

邊界層內速度剖面遵守對數率 (logarithmic law) , 可寫作 :

$$\mathbf{u} = \frac{\ln[(z+h)/z_0]}{\ln(\delta_b/z_0)} \mathbf{u}_b, \quad (15)$$

$(z_0 - h \leq z \leq \delta_b - h)_b$

其中  $\delta_b$  為計算網格邊界層的厚度。邊界層的雷諾應力可由式 (15) 推導出：

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \frac{\nu}{(z+h) \ln(\delta_b/z_0)} \mathbf{u}_b \quad (16)$$

紊流閉合模式的渦流黏性 (eddy viscosity) 可從穩定函數 (stability function)、紊流動能 (turbulent kinetic energy)、與中尺度的混合長度 (mesoscale mixing length) 得到：

$$\begin{aligned} s_m &= g_2 \\ K &= \frac{1}{2} B_1^{2/3} C_D |\mathbf{u}_b|^2 \\ \ell &= \kappa_0 (z+h) \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $g_2$  與  $B_1$  是常數， $g_2 B_1^{1/3} = 1$ 。然而，邊界層內的雷諾應力 (Reynolds stress) 可改寫作：

$$\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = \frac{\kappa_0}{\ln(\delta_b/z_0)} C_D^{1/2} |\mathbf{u}_b| \mathbf{u}_b, \quad (18)$$

$(z_0 - h \leq z \leq \delta_b - h)_b$

阻力係數 (drag coefficient) 可由式 (13)、式 (14) 與式 (18) 計算求得：

$$C_D = \left( \frac{1}{\kappa_0} \ln \frac{\delta_b}{z_0} \right)^{-2} \quad (19)$$

### 3.2 SCHISM 海洋模式數值方法

SCHISM 模式中，結構性網格與非結構三角形網格使用在水平方向，而垂直方向則結合隨地形變化 (terrain-following) 的  $S$  與  $Z$  座標系統，如圖 1。垂直座標 ( $Z$ -axis) 起始點在平均水位 (Mean Sea Level, MSL)。 $S$  座標 (Song and Haidvogel, 1994) 放置於  $Z$  座標的上層 (如圖 1 中 a 及 b)， $S$  與  $Z$  座標的區分線 (demarcation line) 在  $k^z = -h_s$  處，意即  $h_s$  在  $S$  垂直座標上隨最高水面位至改變而變動。底部邊界線  $k^b$  在  $Z$  座標上會如圖 1 中呈現階梯式的變化。SCHISM 模式在垂直座標結合  $S$  與  $Z$  座標系統， $S$  座標區域計算的層數皆使用在淺水區 ( $h \leq h_s$ )；為解決底部效率則在深水區 ( $h \geq h_s$ ) 使用  $Z$  座標。

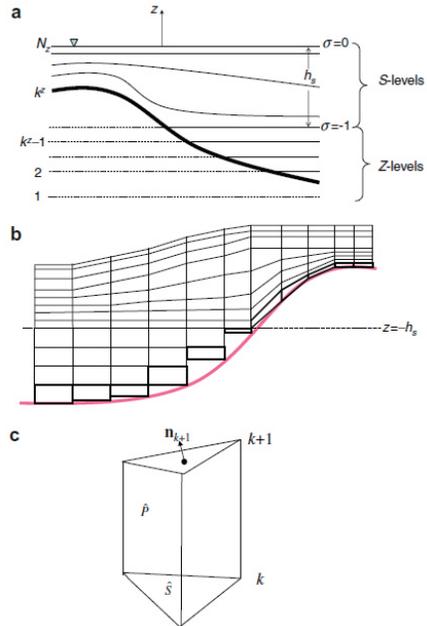


圖 1 SCHISM 模式垂直座標系統 (Zhang and M. Baptista, 2008)

綜合上述結果， $S$ 座標可隨著自由液面的曲線變動，且可在自由液面下計算網格作局部加密，以求得精度更佳之自由液面下各項物理量的演變情況。另 $Z$ 座標於底床處以階梯式方法處理，更能描述複雜海底地形的變化情形。

### 3.3 驅動模式之初始條件與邊界條件

在模式邊界條件方面，本文蒐集現有的海氣象資料庫作為驅動模式所需之外力與初始條件，以下則簡述各資料庫之基本參數與時空範圍。

#### 一、海表面風場資料

風場資料來源為中央氣象局區域數值預報模式 (Weather Research and Forecast, WRF) 提供海面風場資料，空間格網有 45km、15km 及 5km 三種解析度。資料範圍皆涵蓋臺灣海域，將視 SCHISM 網格設置配合採用適用解析度的風場資料。

#### 二、海平面大氣壓力資料

採用與海面風場相同來源之 WRF 模式提供海面氣壓資料，空間格網解析度亦有 45km、15km 及 5km 三種。資料範圍皆涵蓋臺灣海域，將視 SCHISM 網格設置採用適用解析度的氣壓場資料。

### 三、海面溫度

採用與海面風場相同來源之 WRF 模式提供海面溫度 (SST) 資料，空間格網解析度亦有 45km、15km 及 5km 三種。資料範圍皆涵臺灣海域，將視 SCHISM 網格設置採用適用解析度的溫度資料。

### 四、海洋鹽度與溫度

蒐集 NODC (National Oceanographic Data Center) 的 WOA (World Ocean Atlas) 海洋水文資料庫，其分析場資料包含海洋溫度、鹽度、溶氧、磷酸鹽、矽酸鹽等資料，資料時間為 2005 年，水平空間解析度為 1.0 度，垂直方向共有 33 層，最上層為表面，最深為 5500 公尺，其資料範圍涵蓋全球。

### 五、地形水深

在水深地形資料方面，採用美國地球物理資料中心 (National Geophysical Data Center, NGDC) 的 ETOPO1 地形水深資料庫，資料範圍涵蓋全球，資料格網解析度為 1 弧分，SCHISM 使用的水深地形網格將選取適用範圍的風場資料並輔以 SMS 處理。

## 四、油污擴散模式理論介紹

### 4.1 油污擴散過程

溢油污染之嚴重與否著重於數日至數週之短期變化，對生態之影響破壞亦在此一短暫期間所造成。在長期情況下，油污下沉及沉積後則含有生物分解作用，油污將漸漸自環境中消除。國際油輪船東防污染聯合會 (The International Tanker Owners Pollution Federation, ITOPF) 指出油污主要風化過程 (weathering processes) 涵蓋：擴展 (spreading)、蒸發 (evaporation)、延散 (dispersion)、乳化 (emulsification)、溶解 (dissolution)、氧化 (oxidation)、沉澱及沉降 (sedimentation/sinking)、生物分解 (biodegradation) 及結合過程 (combined processes) 等過程，以下即針對各種過程作說明。

早期溢油模式的發展主要以海洋環境為主，多數模式僅以模擬油塊平移 (advection) 及分散兩個機制，或有其他模式僅專注於油污之物理與化學變化，而較近期之模式則包括油污之運動 (transport) 及風化 (weathering) 現象。由於本文關心的油污擴散問題是在污染開始的兩三天內的擴散情形，污染的開始，即可掌握未來油污擴散方向，進而立即清除油污，所以影響較深的效應為分散 (spreading)、蒸發 (evaporation)、延散 (dispersion) 及乳化

(emulsification)，這四項效應在溢油開始產生的幾小時至一星期內影響最大，其他效應產生在一星期之後，故可不予考慮。

### 4.2 油污擴散模式理論

溢油擴散模擬軟體可描述海水表層浮油與沉入水團之油污的傳輸過程 (如圖 2)，在海水表層浮油描述採用二維溢油傳輸擴散模式 (Oliveira et al., 2000; Oliveira and Fortunato, 2002) (2D-VOILS)，而沉入水團之油污則採用三維溢油傳輸擴散模式 (3D-VOILS) (Azevedo et al., 2014)。二維與三維溢油擴散模式需要水深地形、全球或區域潮流模式、氣象資料、大氣作用力、波浪、溢油特性及油品成份等輸入資料與模式的結合，來描述油污在海上傳輸與擴散的過程。在流體動力模式中採用 SCHISM 模式來提供水位、流速場、溫度、以及鹽度等資料。

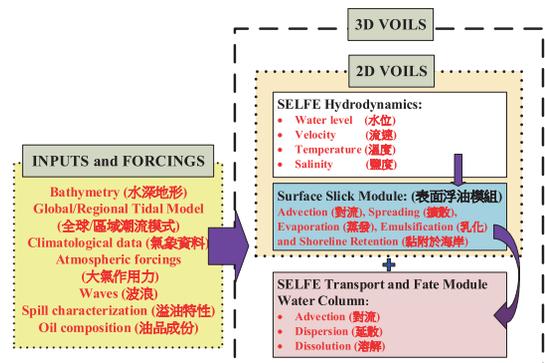


圖 2 油污擴散模擬流程圖 (Tkalich, 2006)

二維與三維溢油傳輸擴散模組分別說明如下：

#### 4.2.1 油污的擴散與初始溢油面積 (Spreading and initial area of the slick)

油污在海面上擴散可由重力 (gravitational)、慣性力 (inertial)、黏滯力 (viscous forces)、表面張力 (interfacial tension stresses) 之間的平衡關係來描述，海水表層浮油範圍與厚度在溢油模式中是很重要的參數 (Lehr, 2001)。溢油在海上的傳輸擴散過程非常複雜，需考慮油污的物理特性與海水表面的環境條件，特別是海水表面與水團中的紊流現象。

#### 4.2.2 二維溢油傳輸擴散模式 (The 2D oil spill model)

在二維溢油傳輸擴散模式 (2D-VOILS) 中，油污初始溢油面積定義 (Lehr et al., 1984; Lehr, 2001) 如下式：

$$A_{ini} = 2.27(\Delta_w V)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} + 0.04(\Delta_w V U_{10}^4) t \quad (20)$$

其中  $A_{ini}$  為初始溢油面積； $\Delta_w = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w$  為油與水密度差； $\rho_w$  為水的密度； $\rho_o$  為油的密度； $V$  為初始溢油體積； $t$  為溢油後時間； $U_{10}$  為水面上 10 m 處之風速； $\nu$  為水的運動黏滯係數。

海水表層浮油以歐拉-拉格朗日方法 (Eulerian-Lagrangian scheme) 求解油

污在海水表層的傳輸過程現象，包括蒸發、乳化、及黏附於海岸邊等物理化學現象，如下對流-擴散方程式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (hu_i) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_s \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = R_{h\_2D} \quad (21)$$

$$R_{h\_2D} = -Evap + Emul - ShoreRetention \quad (22)$$

其中  $t$ ：時間； $h$ ：表層浮油厚度； $x_i$ ：水平卡式坐標系統； $u_i$ ：表層浮油對流速度； $R_{h\_2D}$ ：油污的風化過程，即表層浮油的來源與沉降及與水團的交互作用，有蒸發、乳化及黏附海岸邊等物理化學現象；油污擴散係數：

$$D_s = gh^2 (\rho_w - \rho_o) \frac{\rho_o}{\rho_w C_f},$$

$C_f = 0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  為水表面浮油阻力係數。

油污的風化過程包含蒸發 (evaporation)、乳化 (emulsification)、黏附海岸邊 (shoreline retention) 等現象，如下分別作說明：

#### 1. 蒸發 (evaporation)

蒸發需考慮溢油特性與油的蒸汽壓，依序表示如下：

$$\frac{dF_{evap}}{dt} = \frac{K_e A_s}{V_0} \cdot \exp \left[ A - \frac{B}{T} (T_0 + T_G F_{evap}) \right] \quad (23)$$

其中  $F_{evap}$  為油污分餾蒸發的作用； $T$  為時間； $A_s$  為溢油面積； $V_0$  為初始溢油體積；常數  $A = 6.3$ ，常數  $B = 10.3$ ；乳化常數  $K_e = C_{evap} \times U_{10}^{0.78}$  ( $C_{evap} = 2.0 \times 10^{-3}$ )， $T_0$ 、 $T_G$  為油污相關性參數，以 API (American Petroleum Institute density) 來區分不同油品的參數。

## 2. 乳化 (emulsification)

乳化的過程為水滴進入到海面油污的混合過程，可分別由 Mackay et al. (1980) 與 Rasmussen (1985) 提出的公式描述：

Mackay et al. (1980):

$$\frac{dF_{emul}}{dt} = K_{emul} - (1+U_{10})^2 \left( 1 - \frac{F_{emul}}{F_{emul}^{final}} \right) \quad (24)$$

其中  $F_{emul}$  為部份含水量 (fractional water content)； $F_{emul}^{final}$  為油污乳化現象中可結合的最大水體積； $F_{emul}$ 、 $K_1$  and  $K_2$ ：乳化現象之無因次參數。

Rasmussen (1985)：

$$\frac{dF_{emul}}{dt} = R_1 - R_2 \quad (25)$$

其中  $R_1$  與  $R_2$  分別為水進入油污中的進流與出流量，

$$R_1 = \frac{K_1}{\mu_0} (1+U_{10})^2 * (F_{emul}^{final} - F_{emul}),$$

$$R_2 = \frac{K_2}{AsphWax\mu_0} F_{emul}; \mu_0 \text{ 為溢油的}$$

初始動黏滯度； $Asph$  and  $Wax$ ：瀝青物質與礦臘含量的百分比。

## 3. 海岸邊黏附與脫離 (shoreline retention and reposition)

油污黏附海岸邊是油污染在海岸地區最重要的部份，因對環境與社會-經濟的影響非常大，其過程可由下式表示：

$$M_{maxret} = \rho_0 h_{max} A_{node} \quad (26)$$

其中  $M_{maxret}$  為海岸邊最多的油污黏附量； $h_{max}$  為最大黏附油污厚度容量； $A_{node}$  為模式中每個計算節點影響的範圍。

$$M_i = \sum_{ret=i} \left\{ M_i - M_i \left( \frac{t-t_{ret_i}}{t_{removal}} \right) \cdot \exp \left[ \left( \frac{t-t_{ret_i}}{t_{removal}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (27)$$

其中  $M_i$  為模式中每個計算節點的油污殘留量， $i$  為節點數； $t_{removal}$  為在每個海岸斷面時間移動常數； $t_{ret_i}$  為油污殘留出現的時間。

$$M_{rep_1} = M_1 \left( \frac{t-t_{ret_1}}{t_{removal}} \right) \cdot \exp \left[ \left( \frac{t-t_{ret_1}}{t_{removal}} \right) - 1 \right] \quad (28)$$

其中  $M_{rep_1}$  為油污脫離海岸邊再返回到水中的時間。

### 4.2.3 三維溢油傳輸擴散模式 (The 3D oil spill model)

沉入水團之油污採用三維溢油傳輸擴散模式 (3D-VOILS) 求解油污在水團中的延散與溶解的傳輸與擴散如下式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_C + R_{h\_3D} \end{aligned} \quad (29)$$

其中  $C$  為一般的追蹤者 (generic tracer)； $u, v, w$  分別為  $x, y, z$  方向速度分量  $\kappa$ ：垂直渦流擴散係數 (vertical eddy diffusivity)； $F_C$ ：水平擴散項； $R_{h\_3D}$  為水團中油污的源流與沉流 (sources and sinks)，定義如下式：

$$\begin{aligned} R_{h\_3D} \\ = -Dispersion - Dissolution \end{aligned} \quad (30)$$

其中 Dispersion 表示油污在水團中延散過程；Dissolution 表示溶解過程。延散與溶解過程分別說明如下。

#### 1. 延散過程 (dispersion process)

油污在水團中分散過程為浮力與剪應力在平衡過程中導致油污進入水體中，較大的油滴受浮力作用會再上浮到水面，小的油滴會沉入水中甚至沉入海底。油污在海水表層、混合層及水團中的質量傳輸，可由下列式子表示：

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_{es}}{\rho_0} (\Lambda \rho_0 h - Z_m C_{em}) \quad (31)$$

$$\frac{dC_{em}}{dt} = \frac{K}{Z_m} (\Lambda \rho_0 h - Z_m C_{em}) \quad (32)$$

$$k_{es} = \frac{(\lambda_{ow} + \lambda_{wo}) \lambda_{wo} B_1}{(\lambda_{ow} + \lambda_{wo} B_1)} \quad (33)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_{ow}}{\lambda_{wo} B_1} \quad (34)$$

式 (31) 中  $k_{es}$  為油質量交換率； $\Lambda$  為油滴或混合因子； $C_{em}$  為油水混合層中的油滴濃度； $Z_m = \alpha H_s$  為油水混合層的厚度， $\alpha = 1.2 - 1.6$  為無因次比例因子 (取決於海面上狀態)， $H_s$  為示性波高。式 (33) 中  $\lambda_{ow}$  為油滴沉入水中的速率； $\lambda_{wo}$  為油滴再上浮到水面的速率； $B_1$  為再上浮到水面油滴的阻力。

在油污質量項，海水表層與水團中油污之間的運動 (kinetic) 有由下列式子表示：

$$\frac{dM_s}{dt} = -k_{es} (\Lambda M_s - M_e) \quad (35)$$

$$\frac{dM_e}{dt} = k_{es} (\Lambda M_s - M_e) \quad (36)$$

其中  $M_s = h \rho_0 A_{node}$  為每個水平計算格點中浮油的質量； $M_e = Z_m C_m A_{node}$ ：在混合層垂直計算格點中浮油的質量。

#### 2. 溶解過程 (dissolution process)

在溢油發生的第一至第二天，油分子可能會溶解進入到水體中，約占

總溢油質量的 5%。溶解過程取決於油的成份，或許不會有溶解現象的發生。油污質量項的關係式如下：

$$\frac{dM_d}{dt} = k_{ds} (\Lambda_{ds} M_{ds} - M_d) \quad (37)$$

其中  $k_{ds}$  為油污溶解過程中質量交換率； $\Lambda_{ds}$  為油污溶解過程中混合係數； $M_{ds}$  為油污溶解過程中表層浮油含有的質量； $M_d$  為溶解到混合層中油污的質量。

綜合上述二維與三維油污模式可知，海水表層油污風化過程可由式 (22) 來表示，其演變過程有油包水 (water-in oil) 的蒸發、乳化及處理黏附海岸邊有源流與沉流 (sources and sinks)。另在水團中的風化過程則以式 (30) 來描述，分別有分散與溶解過程。因此油污在

海上的傳輸與擴散之物理化學現象可表示為：

$$R_h = R_{h\_2D} + R_{h\_3D} \quad (38)$$

### 4.3 OILMAP 與 SCHISM-ILSPILL MODEL 之比較

目前全球所使用的油污染擴散數值模式可分為開放程式取得與商業用的軟體 (如 OILMAP)，OILMAP 為較常見的商業用軟體，其能預測溢油在水表面移動的情況與對環境衝擊影響程度，輸入條件包括：溢油地點 (經緯度)、溢油數量、油品種類等溢油狀況資料，及風場、海潮流和波浪等海洋環境資料等。進一步比較 SCHISM 的油污擴散模組理論與 OILMAP，如表 2

表 2 溢油模式功能比較表

模式功能	項目	SCHISM-OILSPILL MODEL	OILMAP MODEL
外部輸入條件	風	✓	✓
	波浪	輸入波浪場資料	輸入單點波浪資料
	流	SCHISM model	HYDROMAP model
油污風化過程	延散 (dispersion)	✓	✓
	擴展 (spreading)	✓	✓
	乳化 (emulsification)	✓	✓
	溶解 (dissolution)	✓	✓
	蒸發 (evaporation)	✓	✓
	氧化 (oxidation)	✓	✓
	沉澱及沉降 (sedimentation/sinking)	✓	✓
	生物分解 (biodegradation)	×	✓
	海岸交互作用 (coastal-interaction)	✓	✓

✓：表示具有此功能、×：表示不具有此功能

所示，雖然 SCHISM 的油污擴散模組理論缺少了生物分解的功能，但由油污分解時間尺度來看，此項功能可以不予考慮。又本文採用的 SCHISM 的油污擴散模組考慮了波浪場資料，亦即空間上的波高、週期及波向，相較於單點的波浪資料更能完整描述溢油在海面上受到波浪的影響。

## 五、結論

為了解目前世界各國作業化海流模式的發展現況，本文蒐集與綜整世界各國作業化海流模式，並評估適用於港區油污擴散之海流模式。SCHISM 模式採用有限元素的非結構性網格設置，垂直網格結合 S 與 Z 座標可提高表底層之解析度與避免因地形變化較大產生之水平壓力梯度不一致性。又 SCHISM 模式利用半隱式法求解，可使用較大的時間步長計算，並確保模式的穩定與精度，因此本文採用 SCHISM 模式做為油污擴散模擬之海潮流資料來源。

在海潮流預報模式建置的輸入與初始條件方面，採用中央氣象局 WRF 區域數值預報模式提供的海面風場、大氣壓力、溫度等資料做為模擬海流所需的輸入資料；初起條件是蒐集 WOA 海洋水文資料庫的海洋溫度與鹽度。

油污擴散模式除需結合海洋流體

動力數值模式，亦需加入地形、氣象、波浪、潮流及油品特性等條件。本文選用的 SCHISM-Oil spill model 結合數值波浪模式，可輸入區域波浪場的資料，相較於商業用軟體 OILMAP 僅輸入單點的波浪資料更能完整描述溢油在海面上受到波浪的影響。

## 參考文獻

1. Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, Andre B., Zhang, J., Baptista, Antonio M., (2014), A cross-scale numerical modeling system for management support of oil spill accidents, *Marine pollution bulletin*: 80, 132-147.
2. Baptista, A.M., (2006), CORIE: the first decade of a coastal-margin collaborative observatory, In: *Oceans'06, MTS/ IEEE, Boston, MA.*
3. Baptista, A.M., Zhang, Y.L., Chawla, A., Zulauf, M., Seaton, C., Myers III, E.P., Kindle, J., Wilkin, M., Burla, M., Turner, P.J., (2005), A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: II. Application to the Columbia River, *Cont. Shelf Res.* 25, 935-972.
4. Barron, C.N., Kara, A.B., Martin, P.J., Rhodes, R.C., Smedstad, L.F., (2006), Formulation, implementation and examination of vertical coordinate

- choices in the Global Navy Coastal Ocean Model (NCOM), *Ocean Modell.* 11, 347-375.
5. Blumberg, A.F., Mellor, G.L., (1987), A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, In: Heaps, N. (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, 1-16.
  6. Canuto, V.M., Howard, A., Cheng, Y., Dubovikov, M.S., (2001), Ocean turbulence I: one-point closure model. Momentum and heat vertical diffusivities, *J. Phys. Oceanogr.* 31, 1413-1426.
  7. Casulli, V., Cheng, R.T., (1992), Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 15, 629-648.
  8. Casulli, V., Walters, R.A., (2000), An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 32, 331-348.
  9. Chen, C., Beardsley, R.C., Luetich Jr, R.A., Westerink, J.J., Wang, H., Perrie W., Xu, Q., Donahue, A.S., Qi, J., Lin, h., Zhao, L., Kerr, P.C., Meng, Y., Toulany, B., (2013), Extratropical storm inundation testbed: Intermodel comparisons in Scituate, Massachusetts. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118, 1-20.
  10. Fingas, M., (2000), *The Basics of Oil Spill Cleanup*, Second Edition, Taylor & Francis.
  11. Fringer, O.B., Gerritsen, M., Street, R.L., (2006), An unstructured-grid, finite-volume, nonhydrostatic, parallel coastal ocean simulator, *Ocean Modell.*, 139-173.
  12. Galperin, B., Kantha, L.H., Hassid, S., Rosati, A., (1988), A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.* 45, 55-62.
  13. Iskandarani, M., Haidvogel, D.B., Levin, J.C., (2003), A three-dimensional spectral element model for the solution of the hydrostatic primitive equations, *J. Comput. Phys.* 186, 397-425.
  14. Kantha, L.H., Clayson, C.A., 1994. An improved mixed layer model for geophysical applications, *Journal of Geophysical Research* 99 (25), 235-266.
  15. Lehr, W.J., (2001), Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior, In: Brebbia, C.A. (Ed.), *Oil Spill Modeling and Processes*, WIT Press, 51-90.

16. Lehr, W.J., Fraga, R.J., Belen, M.S., Cekirge, H.M., (1984), A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula, *Marine Pollution Bulletin*, 15, 326-329.
17. Luettich, R.A., Westerink, J.J., Scheffner, N.W. (1991), ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries. *Coast. Engrg. Res. Ct., US Army Engs. Wtrways. Experiment Station, Vicksburg, MS Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL.*
18. Lynch, D.R., Werner, F.E., (1991), Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: non-linear time-stepping model. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 12, 507-533.
19. Mackay, D., Paterson, S., Trudel, K., (1980), A Mathematical Model of Oil Spill Behavior, Environmental Protection Service, Canada. Report EE-7.
20. Mellor, G.L., Yamada, T., (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys*, 20, 851-875.
21. Oliveira, A., Fortunato, A.B., (2002), Towards an oscillation-free, mass conservative, Eulerian–Lagrangian transport model. *J. Comput, Phys.* 183 (1), 142-164.
22. Oliveira, A., Fortunato, A.B., Baptista, A.M., (2000), Mass conservation in Eulerian–Lagrangian simulations of transport in estuaries. *ASCE J. Hydraul, Eng.* 126 (8), 605-614.
23. Rasmussen, D., (1985), Oil spill modeling – a tool for cleanup operations, In: *Proceeding of the 1985 Oil Spill Conference*, API, Washington DC, USA, 243-249.
24. Rodi, W., (1984), Turbulence models and their applications in hydraulics: a state of the art review. *International Association for Hydraulics Research, Delft, The Netherlands.*
25. Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C., (2005), The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate, oceanic model. *Ocean Modell.* 9, 347-404.
26. Schwiderski, E. W., (1980a), Ocean tides: I. Global ocean tidal equations, *Marine Geodesy*, 3(1-4), 161-217.
27. Schwiderski, E. W., (1980b), Ocean tides: II . Global ocean tidal equations, *Marine Geodesy*, 3(1-4), 219-255.

28. Song, Y.T., and D.B. Haidvogel, (1994), A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography following coordinate system, *J. Comp, Phys.*, 115, 228-248.
29. Tkalich, P., (2006), A CFD solution of oil spill problems. *Environ. Model. Softw*, 21, 271-282
30. Umlauf, L., Burchard, H., (2003), A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, *J. Mar. Res*, 6, 235-265.
31. Wilcox, D.C., (1998), Reassessment of scale determining equation for advance turbulence models, *AIAA J*, 26, 1299-1310.
32. Zhang, Y., Baptisa, A.M., (2008), SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, *Ocean Modelling*, 21, 71-96.
33. Zhang, Y.L., Baptista, A.M., Myers, E.P., (2004), A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary–plume–shelf systems: I. Formulation and skill assessment, *Cont. Shelf Res*, 24, 2187-2214.

# 臺中港鄰近海域之波流場模擬

許弘莒 國立成功大學水工試驗所研究員  
蔡立宏 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員  
楊炳達 國立成功大學水工試驗所助理研究員  
郭平巧 國立成功大學水工試驗所研究助理  
李孟學 國立成功大學水工試驗所助理研究員

## 摘要

本研究主要應用 NearCoM 模式設置適用於臺中港海域的近岸波流場模式，再以臺中港北防波堤堤頭外側 600m 處量測之海流資料及烏溪外海之海流測站實測海流資料進行模式檢核，流場模擬結果與實測資料比對一致，最後應用 NearCoM 模式進行浮標軌跡模擬，並且修正 NearCoM 模式之浮標軌跡模組，於浮標軌跡模組中增加水平擴散項，並且以臺中港北防波堤北側處之實測浮標軌跡資料來進行驗證，比對結果符合，在考慮水平擴散項模擬結果較未考慮水平擴散項模擬結果有改善。因此，本模式可適切模擬臺中港區域波流場變化。

## 一、前言

臺灣海岸線全長一千五百多公里，擁有豐富的海洋資源，故臺灣港口甚多。港灣結構物興建後，由於流

場的改變，造成海岸地形的變化，港口淤砂問題。因此，港灣鄰近海域之波流場模擬一直是重要的研究議題。

目前臺灣對於近岸平面波流場模擬常用模式為丹麥水利試驗所發展的 MIKE21 水動力數值模式，如楊文衡與許泰文 (2004) 以 MIKE21 模擬核四廠進水口附近海域波流場及漂砂趨勢。楊文衡等人 (2012) 針對淡水第二漁港以 MIKE21 進行波流場及漂砂數值模擬，宋芷萱 (2014) 則利用 MIKE21 模擬東沙島海域颱風侵襲下之波流場，探討東沙島海岸地形變遷。然而 MIKE21 屬於商業軟體，收費不貲。而一般公開免費模式在波場模擬常用如 SWAN 模式為荷蘭 Delft 大學主導發展之波浪模式 SWAN，徐月娟等人 (2005) 應用 SWAN 模式預報台灣近岸海域之風浪預報。李汙軍等人 (2006) 利用 SWAN 討論風浪成長過程出現高估高頻能量及低估低頻能量之現象。陳永隆等人 (2013) 應用 SWAN 模式來評估基隆海

域波浪能量。至於流場模擬則以 POM 模式及 ROMS 模式為主，如廖建明等人 (2004) 應用 POM 模式模擬鹽水溪河口水動力模擬、林濤 (2006) 模擬淡水海岸颱風暴潮水位應用 POM 模式，卓庚榆 (2012) 以 POM 模式討論基隆近岸地區颱風期間之流場，李汙軍等人 (2010) 應用 ROMS 模式模擬墾丁南灣海域潮流流場。江朕榮等人 (2010) 應該 ROMS 模式建立台灣海域海流預報模式。Lim et al.(2013) 應用 ROMS 模擬韓國海岸地區之流場。Moriarty et al.(2014) 以 ROMS 模式模擬紐西蘭 Waipaoa Shelf 區域的漂砂情況。

POM 模式及 ROMS 模式皆為三維水動力模式，因此在計算上需要耗費大量時間，而且 POM 模式與 MIKE21 模式於波流場計算時，並無考慮波流交互作用之影響。因此本研究應用 NearCoM 模式模擬臺中港的近岸波流場，NearCoM 模式是擬三維波流耦合模式 (Shi et al., 2012)，因此可以節省大量計算時間，而且保有三維模式之優點。另外 NearCoM 模式為波流耦合計算在波流場模擬時可呈現波流交互作用之影響。

## 二、研究方法

本研究應用 NearCoM 模式設置臺中港的近岸波流場模式，首先透過資料收集所得的海氣象資料，作為

NearCoM 模式的輸入條件，進行臺中港海域波流場模擬。NearCoM 模式是結合波場模擬的 SWAN 模式與流場模擬的 SHORECIRC 模擬，因此模式中已考慮波流交互作用之影響，模式工作流程圖如圖 1 所示，NearCoM 模式介紹如下。

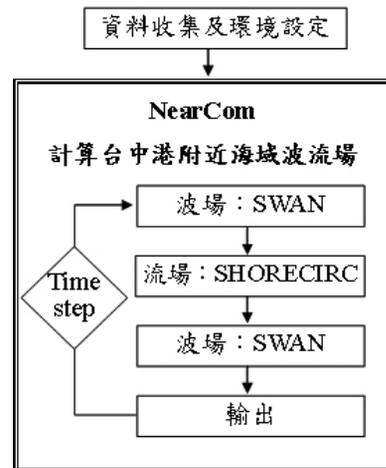


圖 1 模式工作流程圖

NearCoM 近岸系統是結合數種子模式的整合系統模式 (Shi et al., 2012)，主程式用於連結其他子模式 (通常為波浪、潮流、近岸流及漂沙) 並且處理資料的輸入、輸出及模式間資料轉換。NearCoM 常用配置是結合 REF/DIF-1 波浪模式 (Kirby and Dalrymple, 1992)、SHORECIRC 近岸流模式 (Svendsen, et al., 2003) 和 HH 漂沙模式 (Haas et al., 2003)。近期 Newberger and Allen (2007) 則結合波浪模式以及三維環流模式 (POM)。由於 NearCoM 是著重預測近岸波浪與潮流及其所引發的

現象，故 NearCoM 系統主要是針對海岸線至水深大約 10 米處的近岸地區所開發的模式。最近，Shi et al. (2012) 整合 SWAN 波浪模式並且修改系統中的 SHORECIRC 模式版本，將其擴展應用至大尺度海灘系統。

數值計算方面，原始版本的 SHORECIRC 是架構在直角坐標系統的方程式，在時間上採用有限差分預測校正法，而空間差分則是使用二階中央差分。曲線座標版本的 SHORECIRC 則將卡式坐標變換到廣義曲線網格系統 (Shi et al., 2003)，並更進一步使用 CFL-free 的數值方法，以提高計算效率 (Shi et al., 2007)。

最近 NearCoM 應用於各種沿岸系統的案例日益增加，例如河口的波流相互作用之系統、暴潮引起的沿岸溢淹、沙灘和沙丘侵蝕及潮灘過程等。在大尺度區域的應用上，潮汐、風和波浪扮演了重要的角色，而這些應用必需考慮到模式在長時間間隔 (time step) 模擬的效率及穩定性。雖然最近版本使用的 CFL-free 數值方法在長時間間隔應用很有效率的，但在極大的 Courant 數仍會引起所謂的“ADI 效應” (Casulli and Cheng, 1992)。

本研究預計使用的 SHORECIRC 模式為 Dr. F.Y. Shi 所提供的新版模式，該模式使用結合有限體積及有限差分的 TVD 法 (Toro, 2009)。完全非線性

Boussinesq 模式以 TVD 法求解，在計算碎波與海岸線變遷問題上，已證明 TVD 是一個穩定及有效率的數值方法 (Shi et al., 2011a; 2011b; Tehranirad et al., 2011; Kirby et al., 2013)。使用 TVD 法求解 Boussinesq 方程及淺水方程式亦皆有很好的表現 (Tonelli and Petti, 2009; Roeber et al., 2010; Shiach and Mingham, 2009; Erduran et al., 2005)。

## 2.1 SHORECIRC 方程式

SHORECIRC 是擬三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu and Svendsen (1999) 將瞬時水平速度設為為紊流項  $u'^{\alpha}$ 、波浪項  $u_w^{\alpha}$ 、水深及短波平均速度項  $u^{\alpha}$ 、以及短波平均速度的垂直變化  $u_1^{\alpha}$  所組成，如式 (1)：

$$u_{ins}^{\alpha} = u'^{\alpha} + u_w^{\alpha} + u^{\alpha} + u_1^{\alpha} \quad (1)$$

在廣義曲線座標， $( )^{\alpha}$  代表向量的逆變分量 (contravariant component)，我們使用上標代表逆變分量，用下標代表笛卡爾分量 (下同)，而水深及短波平均速度  $u^{\alpha}$  依 Lagrangian 平均定義如下：

$$u^{\alpha} = \frac{1}{h} \int_h^{\zeta} u_{ins}^{\alpha} dz \quad (2)$$

此處  $\zeta$  代表瞬時自由表面高程，這種分解方式不同於 Haas et al. (2003) 依 Eulerian 觀點來分解。Lagrangian 平均法假設：

$$\int_{-h}^{\eta} u_1^{\alpha} dz = -Q_w^{\alpha} \quad (3)$$

上式中  $Q_w^{\alpha}$  或  $Q_{\omega\alpha}$  (Cartesian expression) 是短波通量， $\eta$  是波浪平均自由表面水位。

SHORECIRC 方程式在逆變形式下可寫成：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} [Ju^{\alpha} H] = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^{\alpha} H}{\partial t} + (u^{\alpha} u^{\beta} H)_{,\beta} + f^{\alpha} + \frac{1}{\rho} (S^{\alpha\beta})_{,\beta} \\ + gHg^{\alpha\beta} \frac{\partial \eta}{\partial x_{\beta}} + \frac{\tau_b^{\alpha}}{\rho} - \frac{\tau_s^{\alpha}}{\rho} - (H\tau^{\alpha\beta})_{,\beta} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $H = h + \eta$ ， $h$  是靜止水深、 $\rho$  是水的密度、 $f^{\alpha}$  是科氏力， $(\cdot)_{,\beta}$  代表共變導數，而  $g^{\alpha\beta}$  是逆變度量張量， $S^{\alpha\beta}$  是輻射應力 (Longuet-Higgins and Stewart, 1962; 1964)，其逆變形式在 Shi et al. (2003) 中曾提及說明。 $\tau_s^{\alpha}$  和  $\tau_b^{\alpha}$  分別為風應力和底床應力， $\tau^{\alpha\beta}$  代表等水深情況下的紊流剪力：

$$\tau^{\alpha\beta} = \nu_t T^{\alpha\beta} \quad (6)$$

其中  $T^{\alpha\beta}$  是應變張量， $\nu_t$  是渦粘度係數，渦黏滯度會影響碎波及底床所產生的紊流，可表示如下：

$$\nu_t = C_1 \kappa \sqrt{\frac{f_{cw}}{2} u_0 h + Mh \left(\frac{D}{\rho}\right)^{1/3}} + \nu_{t0} + \nu_s \quad (7)$$

其中  $\kappa$  是馮卡曼常數 ( $k \sim 0.4$ )， $u_0$  是波浪模式中短波的粒子速度振幅， $D$  是波浪模式中單位面積之能量消散。

和  $C_1 \sim 0.2$  和  $M = 0.08$  (Svendsen et al., 2003)。常數  $\nu_{t0}$  是由實驗所得的背景渦黏滯度。如果關閉三維頻散時可以使用較大的值 (紊流黏滯度的 10~20 倍)。

在 SHORECIRC 中的風應力使用 Van Dorn's (1953) 公式：

$$\tau_s^{\alpha} = f_a \rho_a |\mathbf{W}| W_{\alpha} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{W}$  是水面上 10 米高的風速， $f_a$  是風阻係數 (Dean and Dalrymple, 1991)， $\rho_a$  代表空氣密度。

在 SHORECIRC 中之底床應力採用 Svendsen and Putrevu (1990) 結合波和流的波浪平均底床應力的公式：

$$\tau_b^{\alpha} = f_{cw} \rho u_0 (\beta_1 u_b^{\alpha} + \beta_2 u_w^{\alpha}). \quad (9)$$

其中  $u_w$  為在底床處的短波粒子速度振幅， $f_{cw}$  為摩擦係數， $u_b^{\alpha}$  為底床流速，可從方程式中垂直項的理論解獲得， $\beta_1$  和  $\beta_2$  是流和波動的權重係數 (Svendsen and Putrevu, 1990)，並且使用線性波理論來評估。ROT 在式 (5) 代表與大氣壓相關的剩餘項和三維頻散 (詳細請參閱 Shi et al., 2003)。

結合的有限體積法和有限差分法，並不適合在以上的逆變形式方程式。使用笛卡爾和逆變式相結合，可以得到方程式的保守形式 (Shi and Sun, 1995; Shi et al., 1998)，即笛卡爾坐標  $x_{\alpha}$  和廣義曲線坐標系  $\xi_{\alpha}$  之間進行坐標變換。

速度向量的逆變項可表示如下：

$$u^{\alpha} = u_{\beta} L_{\beta}^{\alpha} \quad (10)$$

其中 $u_\beta$ 是速度向量的笛卡爾項並且

$$L_\beta^\alpha = \frac{\partial \xi^\alpha}{\partial x_\beta} \quad (11)$$

在直角坐標中的導數可(12)式轉換至曲線坐標

$$\frac{\partial}{\partial x_\alpha} = L_\alpha^\beta \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \quad (12)$$

SHORECIRC 方程式的守恆形式如下，

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial JP^\alpha}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Hu_\alpha}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} \left[ JP^\beta u_\alpha + \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\alpha^\beta \right] \\ & + f_\alpha - g\eta \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} (hJL_\alpha^\beta) + \frac{1}{\rho} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (S_{\alpha\beta} JL_\beta^\gamma) \\ & + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (\tau_{\alpha\beta}^b JHL_\beta^\gamma) + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + \mathbf{ROT} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $P^\alpha = Hu^\alpha$ ，表示體積通量的逆變項； $f_\alpha$ 代表科氏力的笛卡爾項，如 $(-fHv, fHu)$ ，其中 $(u, v)$ 代表直角坐標中的速度； $S_{\alpha\gamma}$ 代表輻射應力的笛卡爾項； $\tau_\alpha^b$ 和 $\tau_\alpha^s$ 是底床應力和風應力的笛卡爾項，注意(14)式的推導使用度量公制法 (metric identity law, Thompson et al., 1985)，如：

$$\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (JL_\beta^\alpha) \equiv 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & -gHJ \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} \left[ \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\beta^\alpha \right] \\ & + g\eta \frac{\partial}{\partial \xi^\alpha} (hJL_\beta^\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

使用(13)式和(14)式較使用(3)式和(4)式具有以下優點：1. 他們是守恆形式可用於混合數值方法中。2. 不同於(5)式中的逆變項，所有外力項在直角座標中將恢復為向量形式。3. 輻射應力項 $S_{\alpha\beta}$ 使用直角坐標中的原始形式，因此二階張量不需要轉換。缺點是(14)式包含笛卡爾項 $u_\alpha$ 和逆變項 $P^\alpha$ ，然而在SHORECIRC使用的混合數值方法，為方便求解這二個變數，採用顯式法，而非隱式法 (Shi et al., 2007)。

紊流剪應力項的處理如同輻射應力項的方式， $\tau_{\alpha\beta}$ 被定義在直角坐標中如下：

$$\tau_{\alpha\beta} = \nu_t \left( \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (17)$$

使用(12)式可求得在直角坐標中的導數。

水平速度的垂直結構的控制方程式，可求解最低階之流的垂直變化方程式之解析解得之：

$$\frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u_{1\alpha}}{\partial z} \right) = F_\alpha \quad (18)$$

其中 $\nu_t$ 是渦黏滯係數， $F_\alpha$ 為局部外力項 (local forcing)，其一般形式如下：

$$F_\alpha = \frac{1}{\rho h} f_{w\alpha} - f_\alpha^{rad} + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (19)$$

其中 $f_\alpha^{rad}$ 代表局部輻射應力如Putrevu and Svendsen (1999)所定義。在離岸區域無波力時，(19)式減化為

$$F^\alpha = \frac{\tau_\alpha^b}{\rho h} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho h} \quad (20)$$

(18) 式的解可依 Putrevu and Svendsen (1999) 的方式被解出。底床流速  $u_\alpha^b$  可由在底床的  $u^\alpha$  和  $u_{1\alpha}$  來表示，如：

$$u_\alpha^b = u_\alpha + u_{1\alpha}(z = -h) \quad (21)$$

## 2.2 SWAN 方程式

SWAN (Simulating Waves Near-shore)，是由荷蘭的 Delft 大學統合以往學者的研究並加以改良而成風浪模式 (Booij et al., 1999)，為求解波浪作用力之平衡方程式，在廣義曲線坐標下，其控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J C_g^\alpha)}{\partial \xi_\alpha} + \frac{\partial (C_{g\sigma} N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_{g\theta} N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (22)$$

其中  $\xi_\alpha$  為曲線坐標，其定義與曲線型 SHORECIRC 模式相同； $\sigma$  是相對角頻率； $\theta$  是每個波的前進方向； $C_g^\alpha$  代表能量傳遞速度的逆變項，可利用坐標轉換求得：

$$C_g^\alpha = C_{g\beta} L_\beta^\alpha \quad (23)$$

其中，在矩形直角坐標  $C_{g\beta} = (C_{g\sigma}, C_{g\theta})$ ，為了使其符合環流方程式，(22) 式是張量不變形式，如 Booij et al. (1997) 中擴展的數值形式。 $C_{g\sigma}$  和  $C_{g\theta}$  分別代表在  $\sigma$  和  $\theta$  能量傳遞速度， $S$  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， $N$  是波浪作用力，其定義如下：

$$N = E(\xi^\alpha, \sigma, \theta, t) / \sigma \quad (24)$$

式中  $E$  是波浪能量密度。

至於流對波變形的影響詳述如下：

1. 群波速度 (包含流的項)

$$C_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_\alpha}{|\mathbf{k}|^2} + u_{E\alpha} \quad (25)$$

其中  $k_\alpha$  或  $\mathbf{k}$  代表波速， $d$  是短波平均下之水深，而  $d = h + \eta$ 。

$u_{E\alpha} = u_\alpha - Q_{w\alpha} / H$  為回流項，或 Eulerian 平均速度。

2. 相對頻率的改變

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u}_E \cdot \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial s} \quad (26)$$

3. 流導致之波浪折射

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial m} \right) \quad (27)$$

其中  $s$  是在方向  $\theta$  的空間坐標， $m$  是  $s$  的法線坐標

## 三、模式之率定驗證

數值模式之品質管制主要包括：1. 控制方程式之品管；2. 數值技巧之品管；3. 模式計算結果之品管。本研究應用之 NearCoM 模式為美國 Delaware 大學所發展，由於此模式已被廣泛的應用於許多地區，其在模式控制方程式與數值技巧方面之品管均已有相當程度之公信力。因此本研究之模式品管重點在於模式參數之率定與模擬結果之驗證。

### 3.1 模式設定

本研究模擬區域(如圖2方框所示)北涵蓋臺中港海域至彰濱工業區崙尾區海域,其沿岸長度約為41公里,向離岸範圍則延伸至水深-50公尺處,長度約為15公里。圖3則為經座

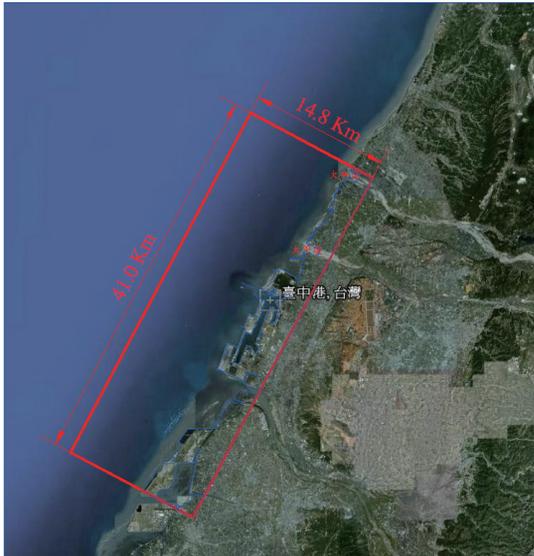


圖2 計畫範圍

標轉換後之海潮流模擬範圍及地形水深分佈圖,模式領域在水平方向劃分為 $408 \times 148$ 個正方網格,每一網格之邊長為100公尺。表1則詳列模式所運用之計算時間間距及地理座標之轉換參數。模式開放邊界資料,採用臺灣近岸海象預報系統(TaiCOM Model)所提供的逐時預測水位,以預測水位做為調合分析取得邊界上M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2分潮係數之用。開放邊界資料以8個分潮計算。

表1 大區域海潮流模式之格網及計算條件

模式面積	40.8 公里 $\times$ 14.8 公里
格網大小	100 公尺 $\times$ 100 公尺
格網數目	$408 \times 148$
原點座標 (Twd 67)	E = 191,800 N = 2,663,500
轉角 (由正北向順時針)	$62^\circ$

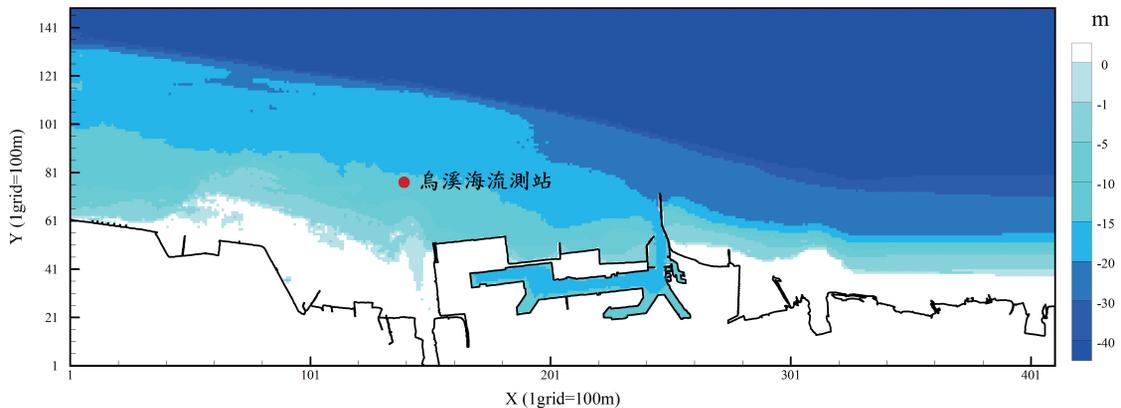


圖3 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖

### 3.2 模式率定

水動力模式之主要參數包括渦動粘性係數及底床磨擦係數，這些參數值的選取將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。一般來說，模式使用之參數值必須經由模式之率定來決定。



圖 4 臺中港海象測站示意圖

本研究在流場模式之率定方面，利用設置於北防波堤堤頭外側 600m 水深 25m 處以 AWCP 儀器量測海流資料 ( $24^{\circ}18'04''N$   $120^{\circ}28'59''E$ )，以及本所港灣技術研究中心在 2011 年於臺中港南側，烏溪 (又稱大肚溪) 外海 ( $24^{\circ}13'6.8''N$   $120^{\circ}25'30.3''E$ ) 之海流測站實測海流資料來進行模式檢核與驗證。並與臺中港內 ( $24^{\circ}17'16''N$ ,  $120^{\circ}31'57''E$ ) 及北防波堤外 AWCP 測站的水位資料進行比對，測站位置如圖 4。

SHORECIRC 模式之主要參數為底床磨擦係數與渦動黏性係數，其值將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。本研究利用測站資料進行參數值率定，測站實測資料與模擬結果的均方根誤差 (RMSE) 如圖 5 所示，率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。

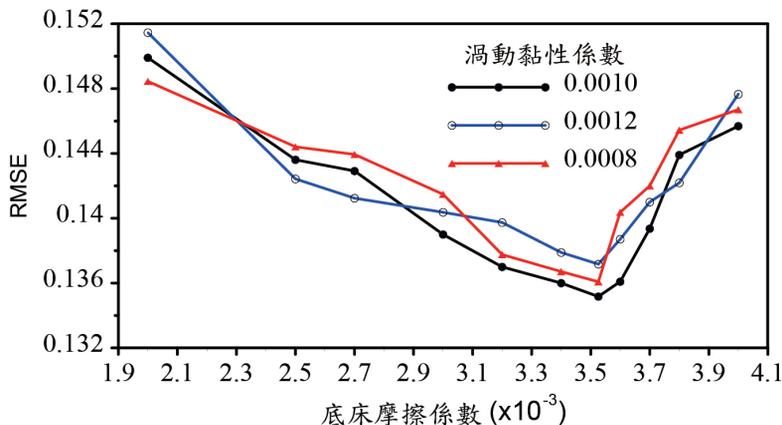


圖 5 NearCoM 模式參數率定圖

流場模式計算結果，其沿岸方向之流速分量以往北為正，岸方向流速分量則以岸方向(往西方向)為正。模式計算結果與實測值之比較分析如下：

圖 6 與圖 7 分別為臺中港內以及北防波堤外 AWCP 的潮位及水位記錄與海潮流模式模擬結果，時間為

2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中可發現此二處水位變化差異不大，模式計算結果略小於實測記錄，但大致相符。本模式開放邊界潮位資料係採用大區域模式計算所得資料，可預期會有誤差存在，但結果尚可接受。

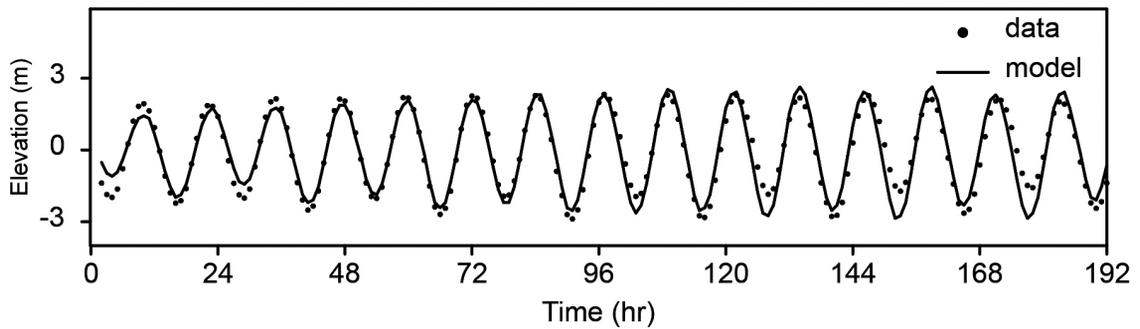


圖 6 臺中港內實測潮位與模式計算比較圖 ( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

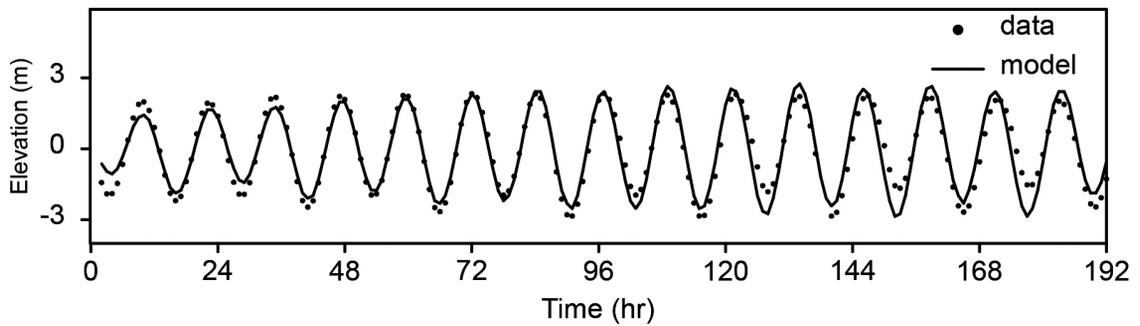


圖 7 臺中港北防波堤外 (AWCP) 實測水位與模式計算比較圖  
( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

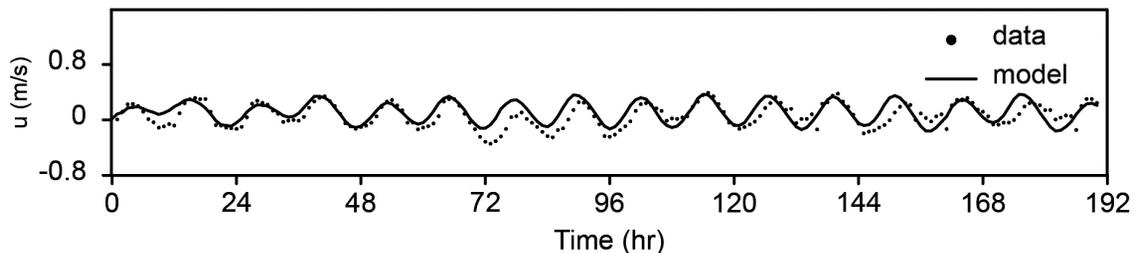


圖 8 烏溪外海實測沿岸海流與模式計算比較圖 ( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

圖 8 與圖 9 對烏溪海流測站記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.3m/sec，離岸方向最大流速 0.12m/sec。沿岸流

速與離岸流速二者位相差約二分之一週期，約為 6 小時。圖中顯示模擬結果與實測值尚為吻合。

圖 10 與圖 11 對臺中港北防波堤外 AWCP 站測記錄與海潮流模擬結果，針對沿岸流速及離岸流速成份分別進行比較，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中

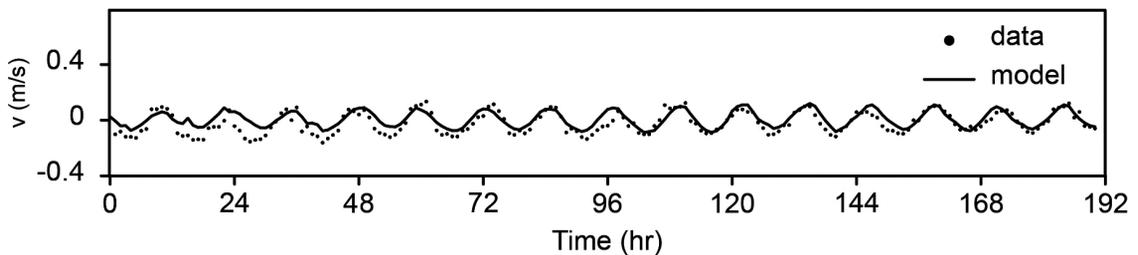


圖 9 烏溪外海實測離岸海流與模式計算比較圖 ( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

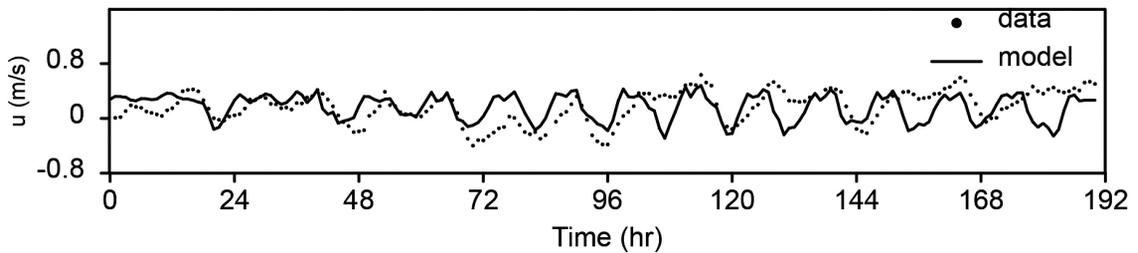


圖 10 臺中港北防波堤 (AWCP) 實測沿岸海流與模式計算比較圖  
( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

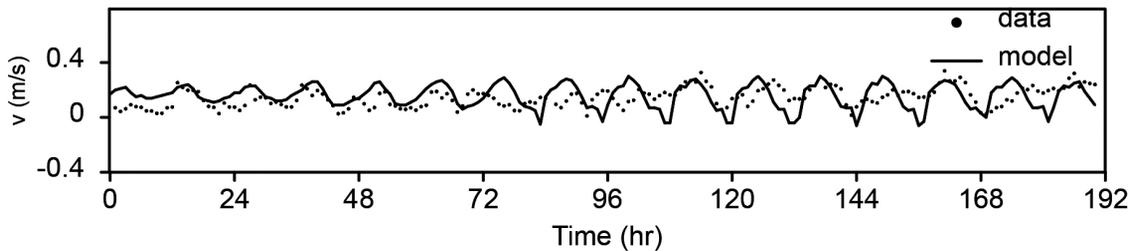


圖 11 臺中港北防波堤 (AWCP) 實測離岸海流與模式計算比較圖  
( 起始時間：2011/05/14 00:00:00)

顯示，此海域沿岸流速大於離岸流速，約為兩倍之量，計算期間，沿岸方向最大流速為 0.64m/sec，離岸方向最大流速 0.34m/sec。此處海域存在恆流，沿岸流速平均為 0.20 m/sec，離岸流速平均為 0.15 m/sec，整體流向約為 N 方。此處受到波流及突堤影響，流場較為複雜，圖中顯示模擬結果不如烏溪外海測站理想，但趨勢仍與實測值相符。由以上分析可驗證本模式可適切模擬臺中港區域海潮流變化。

### 3.3 臺中港附近海域流場模擬

港灣技術研究中心於 2014 年 6 月 20 日在臺中港北防波堤附近海域進行

船碇 ADCP 量測表層流速流，並分析其不同潮位之流場。圖 12 至圖 15 為本模式在相同時間所模擬臺中港鄰近海域於滿潮、退平潮、乾潮及漲平潮時之潮流場向量圖。

圖 16 至圖 19 為北防波堤堤頭附近的實測流場與模式模擬結果之比較圖，左圖為實測圖，右圖為模擬結果。實測資料為一段時間(約 2 至 3 小時)量測的結果，數值模擬呈現的則為某一瞬間的流場，二者條件有所差異，但應有相似的趨勢。

圖 16 至圖 19 顯示臺中港北防波堤堤頭西側海域，海流流向大致呈現為往北以及東北向，漲潮時段的流

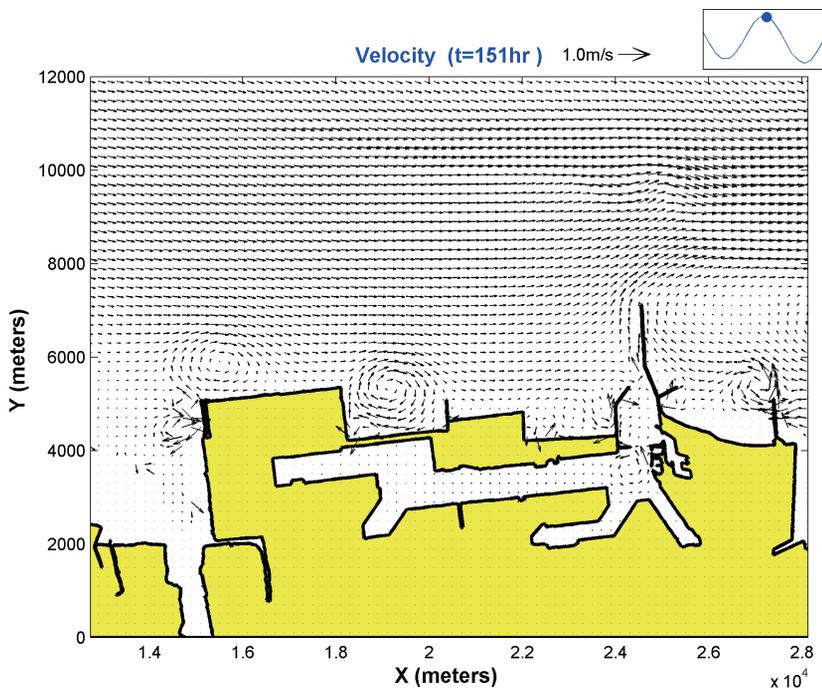


圖 12 臺中港附近海域潮流場模擬 (滿潮，2014/6/20 17:00:00)

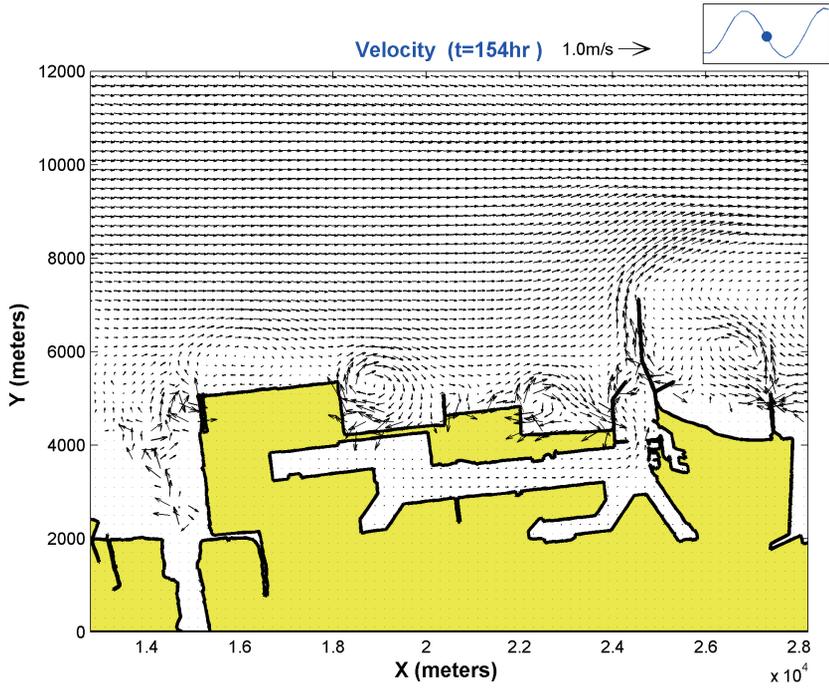


圖 13 臺中港附近海域潮流場模擬 (退平潮，2014/6/20 20:00:00)

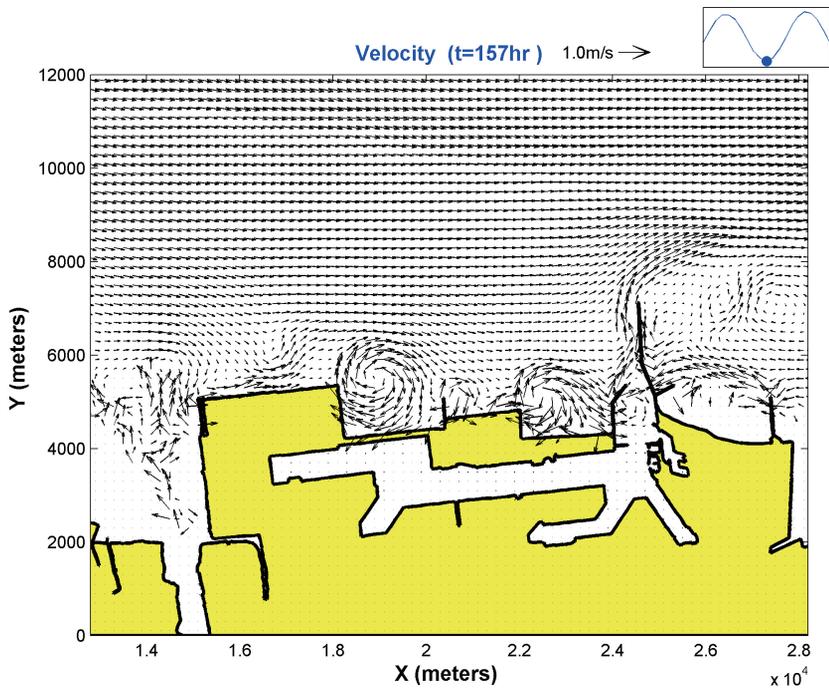


圖 14 臺中港附近海域潮流場模擬 (乾潮，2014/6/20 23:00:00)

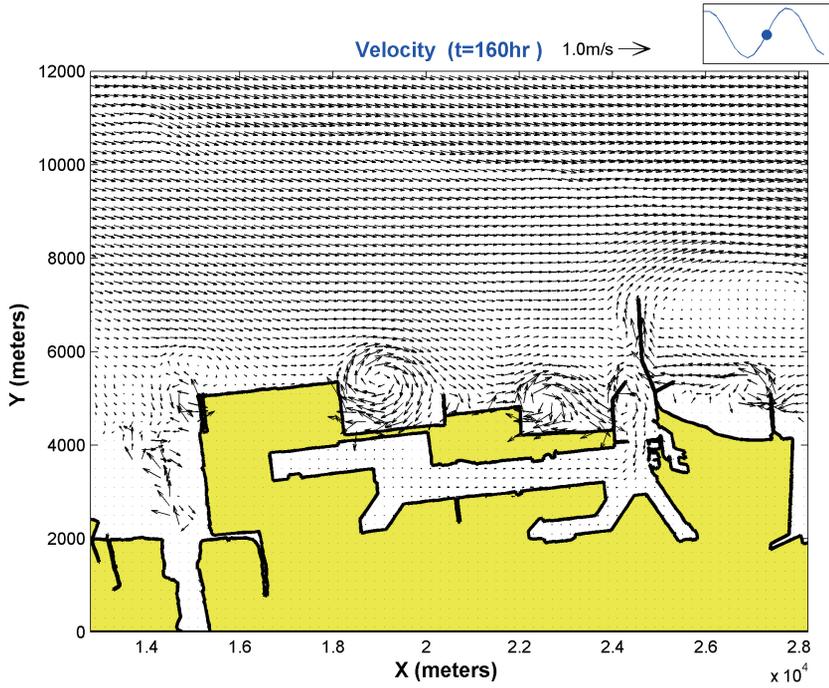


圖 15 臺中港附近海域潮流場模擬 (漲平潮，2014/6/21 02:00:00)

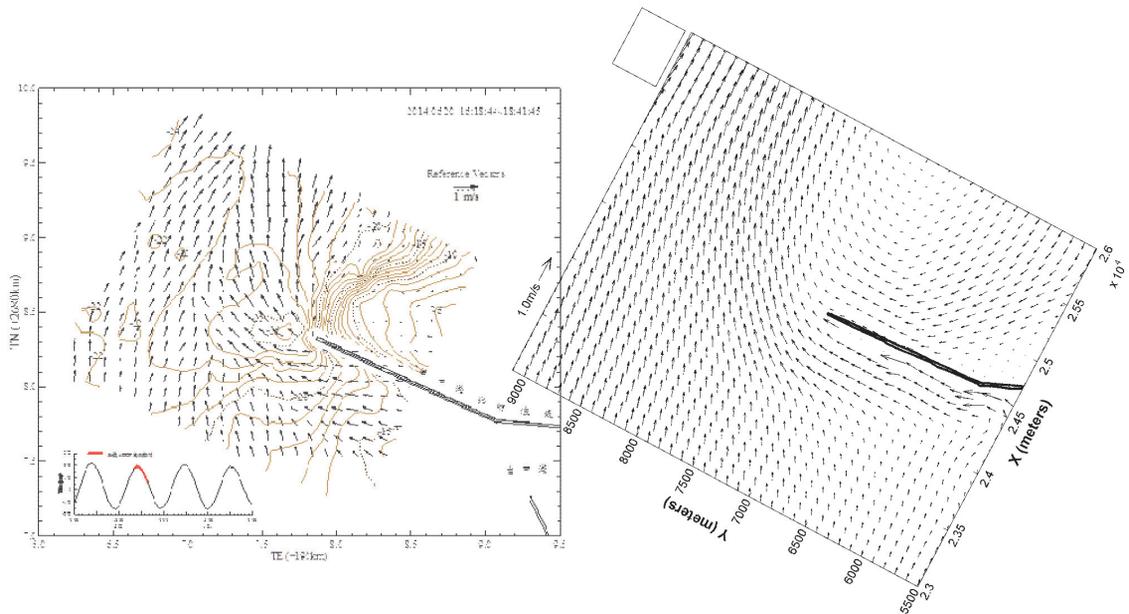


圖 16 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場 (滿潮，2014/6/20 17:00:00)

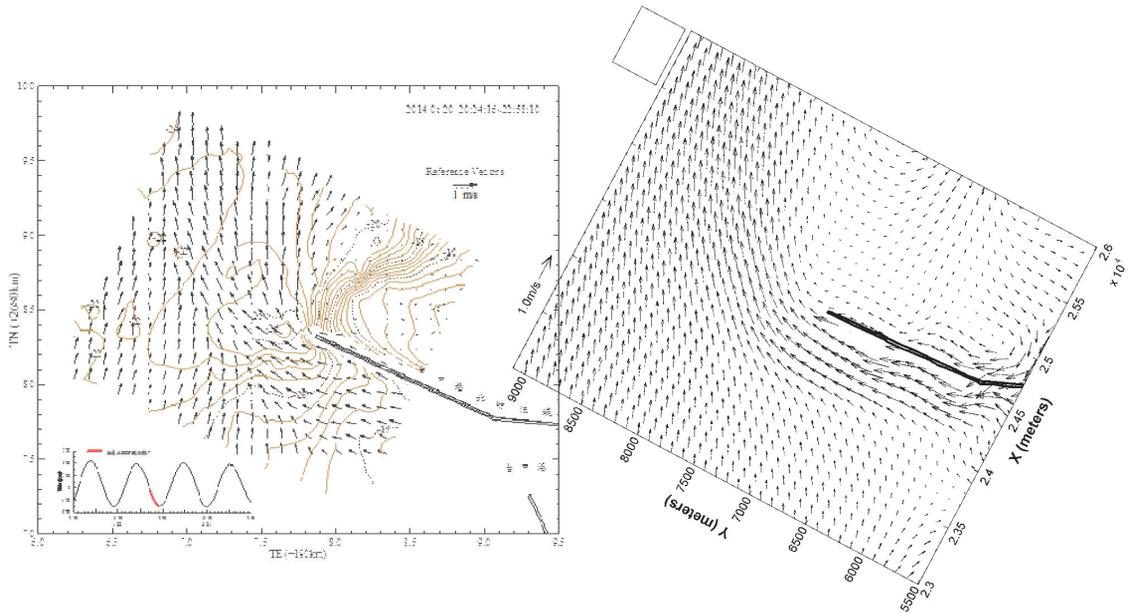


圖 17 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場  
(退平潮, 2014/6/20 20:00:00)

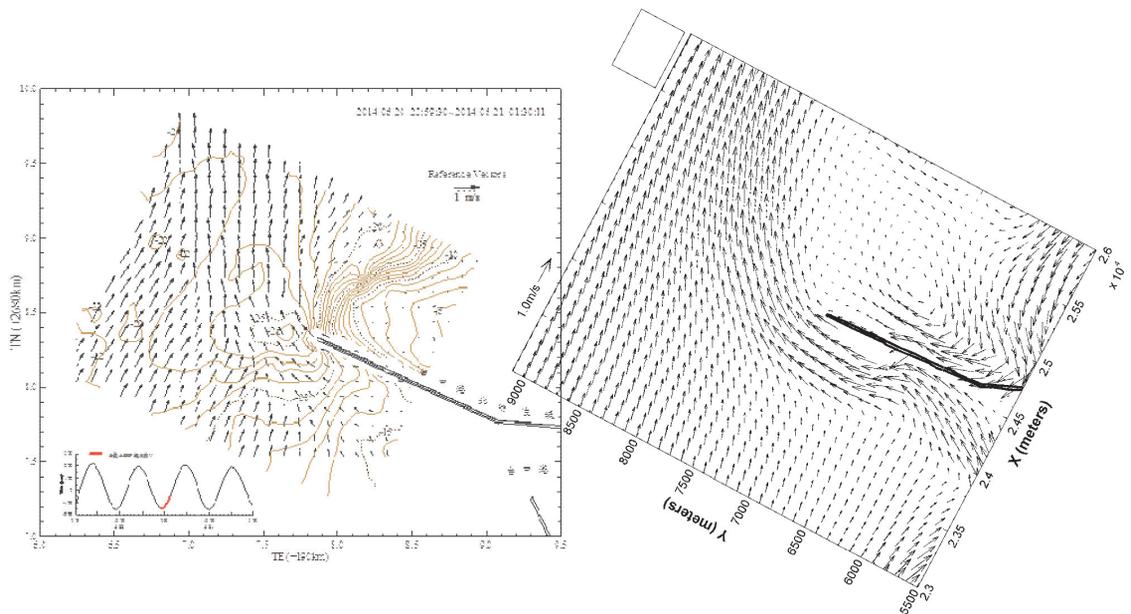


圖 18 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測 (左) 與模擬 (右) 流場  
(乾潮, 2014/6/20 23:00:00)

向較偏東北，退潮時段則較偏北；在臺中港北防波堤西側凹陷地形區之流向大則呈現往西北及東北方向，漲潮時段的流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略大於其西側海域，可能肇因於退潮時港嘴區海流與之匯流而產生較大流速；臺中港北防波堤北側區域則受到防波堤遮蔽影響，無論漲潮或退潮，其流速都明顯小於其他地區，且流向呈現順時針旋轉。模式計算結果與實測流場分布，趨勢尚屬一致，惟漲、退潮的流況差異，模式計算結果較為不明顯。

此次觀測期間之表層平均流速，在臺中港北防波堤以西之海域，其平

均海流流速約在 0.42~0.58m/sec 間，流向大致為往東北~北之方向前進，而臺中港北防波堤南側(港嘴附近海域)之平均流速約在 0.2~0.35m/sec，其流向為沿北防波堤往西北方向前進，而北防波堤北側區域受防波堤遮蔽影響，流速明顯較小(約 0.05m/sec 以下)。

### 3.4 臺中港附近海域浮標軌跡模擬

港灣技術研究中心於 2013 年 7 月 23 日，在臺中港北防波堤附近海域海面漂流浮標軌跡與風速之量測，以瞭解當地海域之表面流場變化情況。圖 20 為北防波堤處的實測風速資料，量測所得之風速介於 0 ~ 10.3m/s 間。本

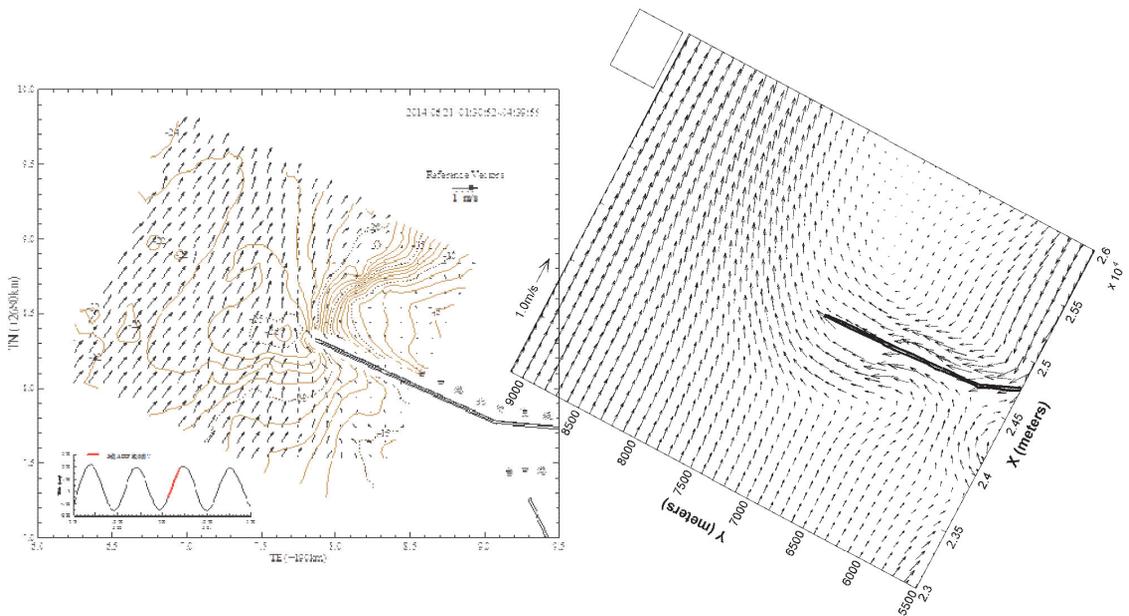


圖 19 臺中港堤防波堤堤頭附近海域之實測(左)與模擬(右)流場  
(漲平潮，2014/6/21 02:00:00)

節應用 NearCoM 模式模擬臺中港北防波堤附近海域之浮標漂流，並與實測資料進行驗證。

描述流體運動之方式通常可分為 Eulerian 方式與 Lagrangian 方式兩種。

1. Eulerian 方式是針對流場中通過固定位置點處之流體質點的運動特性；2. Lagrangian 方式則為描述流場中特定流體質點之運動軌跡與特性。因此，若將浮標視為流體質點以數值模式所模擬計算出之 Eulerian 方式之流速，將可轉換成特定流體質點之 Lagrangian 流速。浮標追蹤模組中模擬浮標軌跡的路徑  $\overline{X}_m$  之方程式如下

$$\overline{X}_m(t) = \overline{X}_m(t=0) + \int_0^t [\overline{u}_{L,m}(\overline{X}_m(t'), t')] dt', \quad (28)$$

其中  $\overline{u}_{L,m}$  為 Lagrangian 方式下之質點速度，在 NearCoM 模式中可計算各

個位置之  $\overline{u}_{L,m}$  隨時間變化所有情形。因此，各時間點的浮標位置  $\overline{X}_m$  即可被求得，應用 (28) 式模擬浮標漂移結果如圖 21 ~ 22。圖中分別為不同時間點實測資料與數值模擬結果比較，其中實線為 NearCoM 模擬結果，而點為蔡與黃 (2014) 實測資料。結果顯示應用 (28) 式模擬北防波堤堤頭附近的浮標軌跡模擬結果則尚屬合理，但圖 21 中點位 1、2 與圖 22 中點位 1 比對結果尚不理想。因此，根據 Thorpe et al.(2004) 方式加入水平擴散修正項，如 (29) 式所示

$$\overline{X}_m(t) = \overline{X}_m(t=0) + \int_0^t \{\overline{u}_{L,m}(\overline{X}_m(t'), t') + w(t')\} dt', \quad (29)$$

其中  $w(t') = (\sqrt{12\kappa VtR_1} \cos(2\pi R_2), \sqrt{12\kappa VtR_1} \sin(2\pi R_2))$  為二維水平擴散項， $R_1$ 、 $R_2$  為隨機變數， $\kappa$  為水平擴散係數，參考 Spydell et al. (2015) 之建議

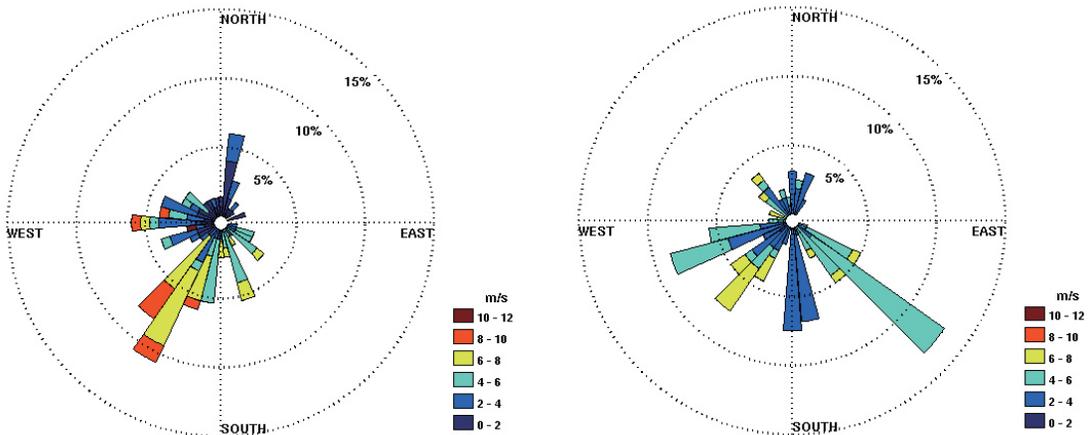


圖 20 臺中港北堤漲潮 (左) 及退潮 (右) 時段風玫瑰圖。(引自蔡、黃 2014)

及實測資料率定可得 $\kappa = 0.1m^2s^{-1}$ 。圖 23 與圖 24 為應用 (29) 式之浮標漂流模擬結果。圖中顯示於圖 21 點位 1、2

與圖 22 點位 1 模擬結果不理想的部份於圖 23 與圖 24 皆有改善。

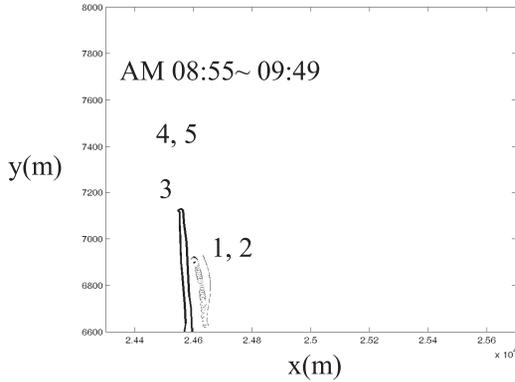


圖 21 浮標軌跡模擬圖  
(平均風速：1.26m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

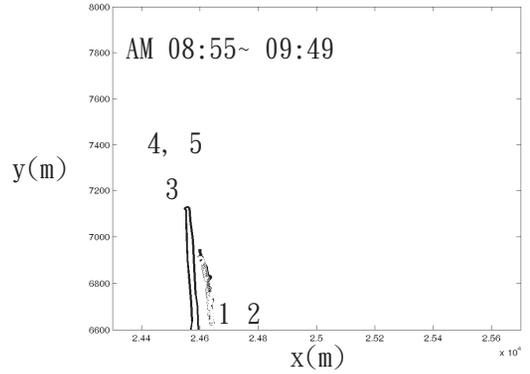


圖 23 含水平擴散浮標軌跡模擬  
(平均風速：1.26m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

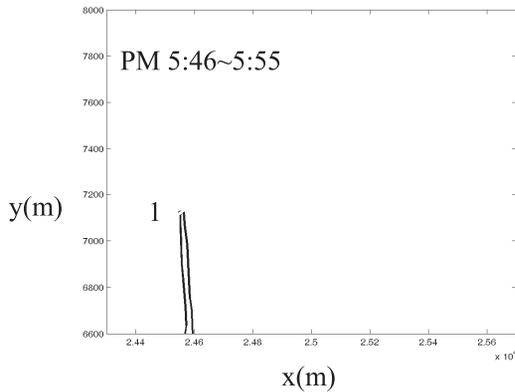


圖 22 浮標軌跡模擬圖  
(平均風速：5.43m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

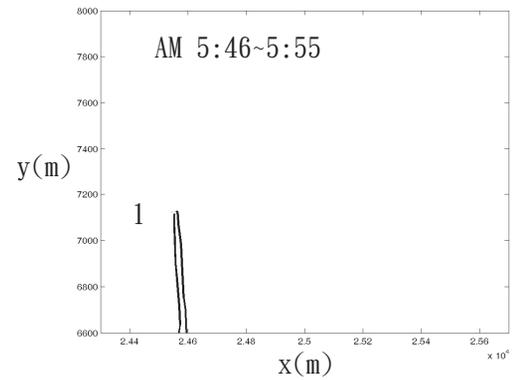


圖 24 含水平擴散項之浮標軌跡模擬圖  
(平均風速：5.43m/s，實線：NearCoM 模擬結果，點：蔡與黃(2014)實測資料)

## 四、結論

本研究應用 NearCom 擬三維波流耦合模式進行臺中港的近岸波流場模擬。總結如下：

1. 臺中港附近海域波流場模式，利用臺中港北防坡堤外 AWCP 測站資料，以及本所在民國 100 年於臺中港南側(烏溪外海)之海流測站實測海流資料來進行模式參數值率定與驗證。最終率定所得到底床摩擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動黏性係數為 0.001。NearCom 模式模擬結果與臺中港南側(烏溪外海)實測資料有不錯的吻合度；與北防波堤外 AWCP 測站資料則有較大的差異，但趨勢仍相符合。
2. 臺中港北防波堤堤頭西側海域，海流流向大致呈現為往北以及東北向，漲潮時段的流向較偏東北，退潮時段則較偏北；在北防波堤西側凹陷地形區之流向大則呈現往西北及東北方向，漲潮時段的流向較偏東北，而退潮時段則較偏西北，且該區域之流速略大於其西側海域；臺中港北防波堤北側區域則受到防波堤遮蔽影響，無論漲潮或退潮，其流速都明顯小於其他地區，且流向呈現順時針旋轉。模式計算結果與實測流場分布，趨勢尚屬一致，惟漲、退潮的流況差異，模式計算結果較為不明顯。

3. 對於一般浮標追蹤模擬常用的方式為  $x(t+Vt) = x(t) + U(t)Vt$ ，如莊與廖(2011)。而近年研究於浮標追蹤模擬時，需考慮水平擴散的影響如(Spydell et al. 2015)。本研究依 Thorpe et al.(2004) 考慮水平擴散，則改善浮標追蹤模擬結果，並完成臺中港區水平擴散係數率定。

## 參考文獻

1. 楊文衡、許泰文，2004，核能四廠鹽寮海岸漂砂數值模擬，台灣電力公司報告。
2. 廖建明、許泰文、林意淳，2004，POM 模式應用於河口水動力計算之研究，第 26 屆海洋工程研討會論文集，A8。
3. 徐月娟、楊天瑋、林芳如、陳琬婷、張恆文，2005，SWAN 模式在近岸風浪預報之應用研究，第 27 屆海洋工程研討會論文集，pp55-62。
4. 李汴軍、鄭皓元、范揚洺、高家俊，2006，區域化颱風波浪現報模式之研究 (I)-SWAN 波浪模式推算週期之探討，第 28 屆海洋工程研討會論文集，pp229-234。
5. 林濤，2006，應用 POM 模式模擬淡水海岸颱風暴潮水位之研究，國立海洋大學河海工程學系碩士論文。
6. 江朕榮、余杏儒、于嘉順、陳琬婷、朱啟豪、滕泰慈，2010，台灣海域

- 多尺度三維海流預報作業模式建置—太平洋及西北太平洋模式，中央氣象局天氣分析與預報研討會暨美華海洋大氣學會第五屆國際海洋大氣研討會論文集，pp37。
7. 李汴軍、范揚洺、馮智源，2010，ROMS 海洋模式應用於南灣海域潮流流場模擬，海洋工程學刊，第 10 卷，pp201-217。
  8. 卓庚榆，2012，應用 POM 模式模擬基隆近岸波浪測試場颱風期間之流場，國立海洋大學河海工程學系碩士論文。
  9. 楊文衡、陳鈺龍、馬雅馨，2012，淡水第二漁港波流與漂砂數值模擬之研究，第 34 屆海洋工程研討會論文集，pp393-398。
  10. 陳勇隆、臧效義、許泰文、鎮洲、何積忠，2013，應用 SWAN 模式於基隆海域波能計算之評估，第 35 屆海洋工程研討會，pp861-866。
  11. 宋芷萱，2014，颱風侵襲下 - 東沙島海岸地形變遷數值研究，海洋國家公園管理處成果報告。
  12. 蔡立宏、黃茂信，2014，港灣構造物與波流互制研究 (1\_4)，交通部運輸研究所。
  13. Booij, N., Holthuijsen, L. H., Doorn, N. and Kieftenburg, A. T. M. M., 1997, "Diffraction in a spectral wave model", Proceedings of 3th International Symposium Ocean Wave Measurement and Analysis WAVES 97, ASCE, New York, 243-255
  14. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999, "A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7649-7666.
  15. Casulli, V. and Cheng, R. T., 1992, "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 15 (6), 629-648.
  16. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World-Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.
  17. Erduran, K. S., Ilic, S., and Kutija, V., 2005, "Hybrid finite-volume finite-difference scheme for the solution of Boussinesq equations", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 49, 1213-1232.
  18. Haas, K. A., Svendsen, I. A., Haller, M. C. and Zhao, Q., 2003, "Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems", Journal of Geophysical Research, 108 (7), 3217.
  19. Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A.,

- 1992, Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.4. Documentation and User's Manual, Research Report No. CACR-92-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
20. Kirby, J. T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J. C. and Grilli, S. T., 2013, "Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects", *Ocean Modeling*, 62, 39-55.
21. Lim, H.S.m, Kim, C.S., Park, K.S., Shim, J.S., Chun, L., 2013, "Down-scaled regional ocean modeling system(ROMS) for high-resolution coastal hydrodynamics in Korea", *Acta Oceanol. Sin.*, 9, 50-61.
22. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1962, "Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats' ", *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481–504.
23. Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1964, "Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications", *Deep Sea Research and Oceanographic*, 11(4), 529–562.
24. Moriarty, M.M., Harris, C. K., Hadfield, M.G., 2014, "A Hydrodynamic and sediment transport model for Waipaoa shelf, New Zealand: sensitivity of fluxes to spatially varying erodibility and model nesting", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2, 336-369.
25. Newberger, P. A. and Allen, J. S., 2007, "Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive equation model for application in the surf zone: 1. Formulation", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
26. Putrevu, U. and Svendsen, I. A., 1999, "Three-dimensional dispersion of momentum in wave induced nearshore currents", *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 409-427.
27. Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H., 2010, "Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes", *Coastal Engineering*, 57, 407-423.
28. Shi, F. and Sun, W., 1995, "A variable boundary model of storm surge flooding in generalized curvilinear grids", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 21 (8), 641-651.
29. Shi, F., Sun, W. and Wei, G., 1998, "AWDM method on generalized curvilinear grid for calculation of storm surge flooding", *Applied Ocean Research*, 19(4), 275-282.

30. Shi, F., Svendsen, I. A., Kirby, J. T. and Smith, J. M., 2003, "A curvilinear version of a Quasi-3D nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 49 (1-2), 99-124.
31. Shi, F., Kirby, J. T. and Hanes, D., 2007, "An efficient mode-splitting method for a curvilinear nearshore circulation model", *Coastal Engineering*, 54, 811-824.
32. Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B. and Harris, J. C., 2011a, "FUNWAVE-TVD, users' manual and benchmark tests", Center for Applied Coastal Research Report, CACR 2011-04, University of Delaware, Newark, Delaware.
33. Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D. and Grilli, S. T., 2011b, "A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation", *Ocean Modelling*, 43, 36-51.
34. Shi, F., Kirby, J. T., Hsu, T. J. and Chen J. L., 2012, "NearCoM-TVD, documentation and users' manual", Research Report, CACR, University of Delaware, Newark, Delaware.
35. Shiach, J. B. and Mingham, C. G., 2009, "A temporally second-order accurate Godunov-type scheme for solving the extended Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 32-45.
36. Spydell, M. S., Feddersen, F., Olabarrieta, M., and Chen, J. L., 2015, "Observed and modeled drifters at a tidal inlet", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI 10.1002/2014JC010541.
37. Svendsen, I. A. and Putrevu, U., 1990, "Nearshore circulation with 3-D profiles", *Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 241-254.
38. Svendsen, I. A., Haas, K. A. and Zhao, Q., 2003, *Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC: Version 2.0*, Research Report, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
39. Tehranirad, B., Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C. and Grilli, S., 2011, *Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD, Version 1.0*, Research Report No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
40. Thompson, J. F., Warsi, Z. U. and Mastin, C. W., 1985, "Numerical grid generation: foundations and applications", Amsterdam: North-hollan.

41. Thorpe, S. E., Heywood, K. J., Stevens, D. P., and Brandon, M. A., 2004, "Tracking passive drifter in a high resolution ocean model: implications for interannual variability of larval krill transport to South Georgia", *Deep-Sea Research I*, 51,909-920.
42. Tonelli, M. and Petti, M., 2009, "Hybrid finite volume - finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations", *Coastal Engineering*, 56, 609-620.
43. Toro, E. F., 2009, *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction*, Third edition, Springer, New York.
44. Van Dorn, W.G., 1953, "Wind Stress on an Artificial Pond", *Journal of Marine Research*, 12, 249-276.

# 臺中港地區防救災系統整合及應用

曾文傑 交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員

邱永芳 交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任

謝明志 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長

吳勝宏 環球科技大學助理教授

## 摘要

臺灣為一個海島型國家，維繫經貿產能主要依賴海運與空運，其中港埠為水路運輸的門戶基地及國際貿易之樞紐，並為商船暫居處所與客貨集散之地，足以影響一個國際政治與經濟之興衰。當港埠災害發生時，相關救災機制是否及時啟動，港埠內外之災害防救設施是否足以滿足，達到災害抑制及災害損失控制之目的。

本研究主要選取臺中港為主要研究對象，臺中港是位於臺中市的一座國際商港，目前因吞吐量大幅成長為臺灣第二大港，也是中臺灣的航運門戶。本研究選定運用防救災應變系統及緊急應變指揮系統建置，實際瞭解臺中港區若發生災害事故時系統是否能夠滿足通報與應變需求。

防救災系統可連接雲端系統，能於緊急情況或無電力供應階段，亦能發揮通報之功效或前段連結 APP、QR

CODE 先期定位與通報系統，能讓災害事故相對位置誤差機率縮小，並能解決災害位置點選的誤差，顯示防救災系統可調式設計的優點。

防救災系統能強化防救災資源整合、急救與搶救資源整合、緊急應變計畫等，能於系統上登載相關防救災設備位置、消防單位及設備位置與數量、區域醫院相對位置與可容納病床數、毒化災應變能力與緊急通道安排等，發揮防救災系統 ALL IN ONE 整合的優點。

## 一、前言

港埠 (Port) 為水陸運輸的門戶基地及國際貿易樞紐，並為商船暫居處所與客貨集散之地，實足以影響一國政治與經濟之興衰。一優良的商港，不僅需滿足港埠內之船隻需求外，對於港埠內外之災害防救，當災害發生時搶救之相關機制是否可以即時啟動，達到災害抑制、災損降低之目的，此乃為更重要之課題。

依據災害管理的角度分析港埠使用者所面臨的災害潛勢，可分為災害空間(地)、災害類型(型)與災害時間(時)等三個向度。然而，(1)災害空間係指港埠中所有災害發生之有形環境(包含：水域設施、隔浪設施、繫船設施、港勤船舶等)；(2)災害類型包含港埠使用者所可能面臨的災害(disaster)(包含：海嘯襲堤、爆炸火災、護岸崩塌、結構倒塌等)；(3)災害時間則為針對地與型於災害發生前、災害發生時及災害發生後三個重要防制分界點。

為健全台灣各主要港埠之防救災能量，港灣技術研究中心陸續建置完成基隆港、臺北港、蘇澳港、臺中港、高雄港、安平港及花蓮港之『運用地理資訊系統技術建立港灣地區防救災系統』，並依據使用者經驗進行系統調整與功能開發。為擴大系統使用效益，更積極參與各港區防救災演習，該系統曾參演行政院「2011金華演習」及海岸巡防署海洋巡防總局「100年度海嘯應變演練暨港口保全演習」，並多次參與台灣中油公司液化天然氣台中廠應變演習等防災實兵演習，提供災情資訊通報與傳遞等項目，藉以修正系統架構，以符各港務分公司實際操作使用。

本系統建立4D網際網路地理資訊系統，建構防救災資料庫系統，主要

針對：(1)採多方位災情通報流程、(2)具有時間及空間資訊整合展示能力、(3)防救災資源維護簡單化及(4)定位為各港既有系統之輔助系統<sup>[1、2]</sup>。以上四項要素可有利提升各港災害事故處理及應變能力。

基於港務推動為國家長久大計，相關規劃皆應考量長期運作，因此持續更新與建立防救災應變系統、防災體系規劃、危害風險等級劃分與應變組織規劃及緊急應變流程建置，以協助(1)港區內事業單位災害通報與事故報告輔助系統(低風險事故)、(2)協助港區及港務分公司成立緊急應變中心之災害指揮輔助系統(中風險事故)、(3)協助中央應變中心災情輔助系統(高風險事故)<sup>[3]</sup>。

防救災應變系統及緊急應變指揮系統資源整合之需要，更新防救災應變系統及開發一套緊急應變指揮系統為迫切之需求。因此，本研究將建立一套與既有防救災應變系統(網站)配合之緊急應變指揮系統(標準流程)，以達輔助臺中港港務分公司進行災害事故通報與災害應變中心災情分析與管理之用<sup>[4、5]</sup>。

## 二、研究方法

本研究分為二大部分(如圖1研究流程圖)：(1)台中港港灣地區防災系統更新與修正及補強。(2)實際兵推

演練及通報流程標準化與港區 LNG 事故擴散模式分析。

針對防救災資料庫系統功能之需求(圖 2)，以實際應用防救災系統進行兵推模擬演練，並針對兵推模擬演練優缺點進行分析比較。採多方位災情通報流程：經由訪談結果分析顯示，主要通報方式為室內電話及行動電話為主，但往往人、事、時、地、物等資訊無法在室內電話及行動電話中完全展現出來，因此採用多方位災情通報方式(圖 3)，如多媒體簡訊、自動語音電話、網路自動傳真，配合手持裝置的使用，可有效提升災情通報的精度、時效與品質。

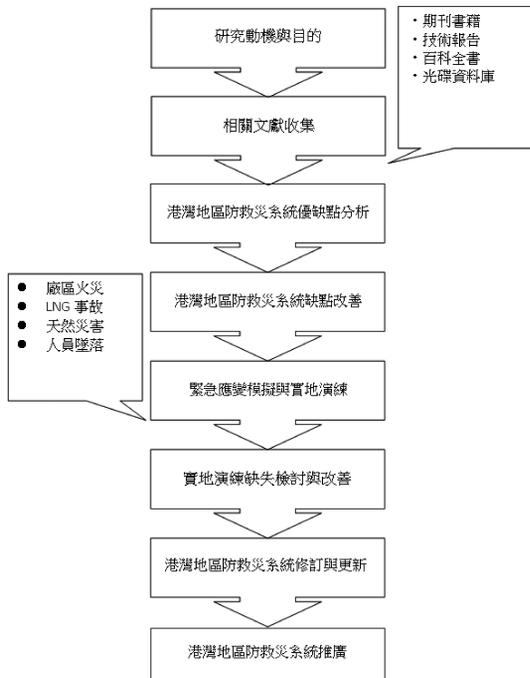


圖 1 研究流程圖

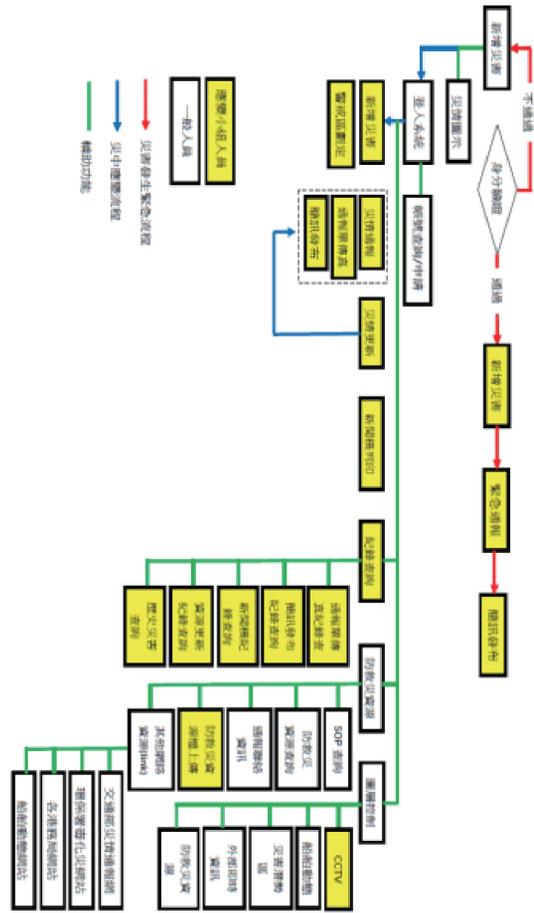


圖 2 防救災系統功能規劃<sup>[1]</sup>



圖 3 全方位災情通報方式

### 三、系統功能

系統首頁：系統使用者無須登入系統即可於首頁 <http://163.29.73.11/dprs2015/tchb/> 中了解最新災情資訊，本研究開發之災害狀況圖示描述如下：以地圖方式顯示港埠地區之災害狀況，包括災害類型、最新處置現況、時間

等資訊，無需下載任何元件即可瀏覽地圖資訊，可支援桌上型電腦及手持裝置大部分之瀏覽器，具備跨平台之特性(如圖4)。

災害管理模組：當災害發生時災害發現者或聯絡中心人員可點選此功能進行災害之新增(如圖5)，於地圖上點選災害發生位置，選取災害事件、



圖4 防災系統登入首頁



圖5 新增災害

災害類型，輸入災害描述、災前整備，若有精確位置也可手動輸入災害位置之座標(經、緯度)後即可完成。

災情通報模組：災情通報模組為災中應變流程，包括「語音通報」、「傳真通報」、「簡訊通報」等多元通報方式，點選災情通報功能(如圖6)，於通報內容輸入欲發送之通報資訊，選擇通報方式為簡訊通報或語音通報，指定接收訊息之群組聯絡人，確認後點選送出，即可完成災情通報。

事件歸檔：災情處置作為之一功能，根據災害處理情況加以判斷與分

析是否為結案事件。若災害處理完畢，則可以使用事件歸檔功能並將相關該事故通報所有資料、描述、影音、簡訊等過程加以記錄並保持日後事故調查、災情參考、年度統計等使用，如圖7。

即時災情：提供「多媒體簡訊即時災況」、「影音即時災況」與「影音即時災況上傳」等即時災情資訊接收與傳送之方法。多媒體簡訊即時災況：使用中華電信簡訊特碼服務，可接收手機發送至指定門號的多媒體簡訊，包括文字、圖片等資訊。災害現場人員使用手持式裝置拍攝照片，以



圖6 災情通報功能畫面



圖7 事件歸檔與紀錄

多媒體簡訊的方式發送至「○○○-○○○○」。開啟多媒體簡訊即時災況功能，系統會自動擷取多媒體簡訊內容，並於畫面上顯示影像及文字內容；更進一步，將選定的影像以多媒體簡訊的方式轉發至指定的群組聯絡人，如圖 8。



圖 8 即時災情通報模組化

後臺管控措施：登入首頁可設定管控人員進入，並且針對申請帳號及相關權限管控(如圖 9)。管理功能選單包含：使用者帳號管理、災情傳遞群組管理、電話輸入通報管理、災害類型管理、災情狀況管理、防救災資源更新、事件監控。系統主畫面：當使用者被通過檢核後，會開啟系統主畫面，下列範例以「應變人員」完整權限做說明。主畫面配置，包括主功能選單、事件災害選單、地圖控制工具列、地圖顯示區與地圖狀態列。

防救災資源：內容包含文件查詢、資源分布圖層展示、其他網站查詢，如圖 10。文件查詢可以提供相關防救災標準作業流程、物質安全資料表、火災分類、滅火措施等相關重要防救災文件。

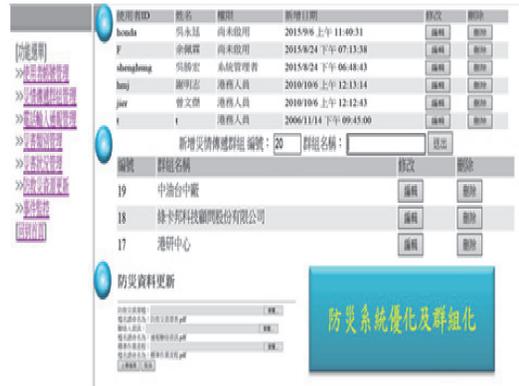


圖 9 後臺管控措施



圖 10 防災資源查詢

#### 四、結語

本研究主要針對臺中港地區防救災系統整合與應用進行研究，成果說明如下：

- (1) 本系統可應用於臺中港務分公司、事業單位及消防相關單位，主要協助各級事業單位與臺中港務分公司容易於天然災害及人為災害發生時，運用系統點選方式快速、方便

地傳達災害相關訊息及資料給應變指揮中心或各級長官瞭解，並就災情狀況加以指示。

- (2) 本系統發展之功能主要以災害急救與搶救、事故通報與報告及事故調查與分析三大構面分析，以強化三大構面為基礎進而達到減災、降災、與防災三大目標。
- (3) 本系統能強化防救災資源整合、急救與搶救資源整合等，能於系統上登載相關防救災設備位置、消防單位及設備位置與數量、區域醫院相對位置與可容納病床數、毒化災應變能力與緊急通道安排等，發揮防救災系統ALL IN ONE 整合的優點。
- (4) 本系統能縮短防救災人員通報時間與繁瑣業務，可應用多向度通報方法，其中包含：簡訊通報、傳真通報、語音通報、影音登載通報等方式，於同一個系統介面即可多方通報，相較傳統通報方法必須逐一完成所花的時間相較的多，顯示防救災系統能解決防災人員的困擾與減少業務壓力，且能瞭解接受端是否有接到相關通報訊息及歷史通報紀錄可被登載。
- (5) 本系統可連接雲端系統，能於緊急情況或無電力供應階段，亦能發揮通報之功效或前段連結 APP、QR CODE 先期定位與通報系統，能讓災害事故相對位置誤差機率縮小，

並能解決災害位置點選的誤差，顯示防救災系統可調式設計的優點。

- (6) 本系統能與港務分公司、消防救災系統、醫療救災系統連結及協助相關救災人員多方參考，防救災系統應用上不改變其他系統既有的操作模式且能主要輔助腳色協助指揮官參考與應用。港務分公司既有系統是直接由通報端通報事故後，瞭解災因後再由 24 小時值班人員直接應用中華電信 EMOME 分災情各階段進行簡訊系統通報，但值班人員僅能完成或處理單一事項。顯示防救災系統能多方應用系統功能解決多項次層面問題，並解決防災人員的人為疏失。
- (7) 本系統能將災況結案及記錄可供日後港務分公司、消防單位、警察單位等政府機關針對事故調查、災因分析、防救災佈署、災房設備佈署等問題詳加統計與分析，並易於危害區域劃分與風險區域分析。
- (8) 本系統應用必需預先執行教育與訓練，能讓各級單位防災人員清楚瞭解防救災系統應用的時機、責任等因素，使得通報過程中減少錯誤通報、錯誤決策、錯誤判斷等影響，顯示防救災系統較有專業角度與責任操作模式且能容易客製化進行適合各層級與各級事業單位之專屬防救災系統。

- (9) 整合消防及災害防救所使用環境災害管理資訊系統 (EMIS) 與消防署防救災系統 (EMIC) 二大領域系統與港灣地區防救災系統連結與強化防救災與緊急應變能力，可為防救災系統整合的考量與實施方針。
- (10) 針對情境模擬完成一場臺中港區災害事故兵推模擬演練，並製成相關影音流程與記錄。
- (11) 完成臺中港港區內事業單位 (西碼頭進駐廠商) 作業風險等級評估分析。
- (12) 運用 ALOHA 擴散模擬軟體電腦模擬實際 LNG(臺灣中油天然氣事業部台中廠) 化學品洩漏量之擴散範圍。

概論，高立圖書有限公司，ISBN: 9789864126880。

- [5] Crowl, D. A., Louvar, J. F., Chemical process safety-fundamental with applications, Third Edition, 2011, Pearson education, Inc., ISBN:9780132782838.

## 參考文獻

- [1] 邱永芳、謝明志、曾文傑、紀雲曜、黃敏郎、葉永信、林文釵(2009)，「港區防救災體系建置之研究 (1/2)」，交通部運輸研究所。
- [2] 邱永芳、謝明志、曾文傑、紀雲曜、黃敏郎、蔡宗在、林文釵、陳谷君(2013)，「港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合研究」，交通部運輸研究所。
- [3] 吳勝宏，職業安全與衛生，普林斯頓國際有限公司，ISBN: 9789866534638。
- [4] 于樹偉、周更生，化學工業安全

# AIS 於海難資訊平台及相關調查分析之應用

張淑淨	國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系教授
張時銘	國立臺灣海洋大學光電科學研究所博士生
邱永芳	交通部運輸研究所港灣技術研究中心主任
黃茂信	交通部運輸研究所港灣技術研究中心副研究員
葉冠宏	國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生
彭冠敦	國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生
陳詩佳	國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生
任奕翰	國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系碩士生

## 摘要

海難調查可指出相關肇因或安全問題與缺失；海事案件資料庫的統計分析，更可得出整體趨勢以及潛在風險之所在。為使我國海難事故資料更完備，成為可支援調查分析以及時間空間分析統計的電子資料庫及資訊平台，進而藉由跡近事故偵測統計建立災害潛勢資訊，據以評估風險控管方案與決策，本研究整合 AIS 船舶動態、電子海圖地理資訊以及海氣象資訊，設計建置海難資料庫及其分析技術與服務，並以海翔 8 號與海研五號等海難為例，試驗其整合應用。

## 一、研究背景與目的

國際海事組織 (International Maritime Organization, 簡稱 IMO) 於 2008

年以 MSC.255(84) 決議案通過「海難調查章程 (Casualty Investigation Code)」，該章程已於 2010 年 1 月 1 日起生效 [1]。2013 年 12 月再以大會決議案 A.1075 (28), “Guidelines to assist investigations in the implementation of the Casualty Investigation Code”，為海難調查章程之實施提供系統化調查的實務建議，以利發展有效的分析與預防措施，達到避免再發生類似海難事故的總體目標 [2]。船上的航行數據記錄儀 (Voyage Data Recorder, 簡稱 VDR)、電子海圖系統，以及從外部取得的船舶自動辨識系統 (Automatic Identification System, 簡稱 AIS) 等，都是 A.1075 (28) 建議蒐集或記錄的重要電子物證。從文獻及海運相關媒體報導可知，由於這些電子證據通常是在海難發生後可立即取得的，無論是對於海難調查或

是在法律判定上，其價值與證據力已是國際公認，而且權重日益增高。

風險分析或安全相關決策的成本效益分析需要定量的海難事故模型。但海難是機率相當低的事件，通常缺少足夠的資料建立模型。而「跡近事故 (near-miss)」發生的頻率較高，且背後因素或機制與海難有相當的共通性。因此「跡近事故」事件資料庫被視為另一個重要的資料來源。

2008 年 IMO 的海事安全委員會 (MSC) 與海洋環境保護委員會 (MEPC) 以通函 MSC-MEPC.7/Circ.7 共同提出「跡近事故報告指南」，希望各國藉由鼓勵報告 near-miss 以提升海運安全文化 [3]。IMO 對於 near-miss 的定義是：可能造成損失的一連串事件或狀況，只因偶然突破該連環事件或狀況而幸運地避免了損失。所舉範例包括：因採取緊急措施而避免了碰撞；船舶偏航誤入淺水區，還好遇到不尋常的高潮位。跡近事故報告指南指出：調查「跡近事故」是持續改善安全管理系統不可或缺的要件。建議之「跡近事故」調查程序則是：蒐集資訊、分析資訊、指出原因、提出並實現相關建議事項。可惜在追究責任的陰影下，無論是公司或國家層級的系統，「跡近事故」報告的落實都面臨許多關卡。因此尚待研發改善資料蒐集系統。

在全球的層面，IMO 於 2013 年再

以 MSC-MEPC.3/Circ.4 確立通報海難資料的程序與格式 [4]，以利各成員國透過網際網路在 IMO 的「全球整合航運資訊系統 (Global Integrated Shipping Information System, GISIS)」內的「海難事故模組 (Marine Casualty and Incidents, MCI)」執行電子式通報 [5]。

依據我國災害防救法第 3 條，海難事故的中央災害防救業務主管機關是交通部，依該法第 22 條應實施之減災事項包括：「災害防救上必要之氣象、地質、水文與其他相關資料之觀測、蒐集、分析及建置；災害潛勢、危險度、境況模擬與風險評估之調查分析，及適時公布其結果」。交通部依災害防救法第 22 條規定，訂定了「空難海難及陸上交通事故災害潛勢資料公開辦法」。該辦法對「海難」的定義為：「指船舶發生故障、沉沒、擱淺、碰撞、失火、爆炸或其他有關船舶、貨載、船員或旅客之非常事故者。」

民國 96 年台中港務局航政組劉慶林先生的「台灣海難與海事評議制度之研究」報告指出：「經實際蒐集相關單位資料發現，不論交通部統計處、農委會漁業署、海巡署及各港務局等單位之海難事故資料中，僅有海難事故類型、數量之統計，並未對事故發生之原因…進行分析統計，而找尋真正問題之癥結所在，以便進一步依此發出航行安全建議」；「我國海事調

查業務之來源不足，現有主要來源為船方所提供之海事報告」。

AIS 是海上人命安全國際公約 (SOLAS) 要求安裝的船舶設備，300 總噸以上國際航線船舶，500 總噸以上國內航線船舶，以及所有客輪都必須安裝 AIS 且保持運作。適用 SOLAS 公約的船舶皆已於 2008 年完成安裝 (國際航線船舶於 2004 年完成)，不少國家更是逐步擴大要求安裝的範圍，而我國漁船也已有不少基於本身航行安全而自願安裝。船載 AIS 設備 [6] 可自動廣播船舶的識別碼 (含水上行動通訊識別碼、船名、無線電呼號、船舶 IMO 編號)、航儀動態 (GPS 船位經緯度、對地航向航速、艏向、轉向速率)、船舶靜態與航程資料 (船舶與貨載種類、天線位置、船舶長寬、目前最大靜態吃水、定位系統、目的港、預計抵達時間)。無論是對於海難調查或跡近事故相關資訊蒐集都是很有價值的數據來源。應用 AIS 於水道航行風險評估、動態風險管理、跡近事故偵測等，已是國際實務應用趨勢與研究焦點，例如：歐盟的 EfficienSea[7]，MONALISA 等系列知名計畫都以 AIS 為基礎。EfficienSea 以 AIS 分析結果與海難資料庫比對，發現擱淺熱區出現在主要參數 (包括航向、航速、艏向等) 標準差較大的區塊內，而船舶發生事故前確實偏離典型的交通模式。

交通部運輸研究所港灣技術研究中心與國立臺灣海洋大學通訊與導航工程學系合作，於 2009 年起建置臺灣沿岸的 AIS 接收網路，以此建立「臺灣海域船舶動態資訊系統」，累積建立了長期的船舶動態資料庫。為使我國海難事故資料能更完備，成為可支援調查分析以及時間空間分析統計的電子資料庫，並輔以跡近事故偵測統計以利建立災害潛勢資訊，據以評估風險控管方案與決策，因此在「結合動態船舶與環境資訊之綠色航路智慧領航計畫」四年期合作研究計畫的第 2 年，以「電子海圖服務與資料安全系統建立研究」、「智慧化海運系統建立之研究」系列計畫所建立的電子航行圖資料庫與 AIS 分析應用技術為基礎，進行 AIS 於海難資料庫建置、調查分析以及跡近事故偵測之應用研究。本論文為計畫成果的部分摘錄。

## 二、結合船舶動態與空間資訊之海難資料庫設計

本研究建置的海難資料庫以 2004 年 (SOLAS 船舶安裝 AIS) 起，已具備或可取得經緯度位置資訊的海難事件資料庫為主要對象與範圍。無位置經緯度的部分則必須再透過船舶識別資訊查詢交通部相關單位的船舶基本資料庫後從 AIS 取出。無位置資訊又無法取得基本識別資料進而與 AIS 關聯者，

只能暫時排除不納入分析。

因我國目前海難或海上交通事故資料分散於不同部會，常牽涉商船與漁船(或海域養殖相關漁業活動)，而且從目前航港局各航務中心提供的海難資料看來，資料缺漏不明的情況相當多。這或許也是業務分散不同部會以及海難資料特性(各項資料難以明確分類、時間空間都不止是點狀而是範圍)使然。因此這項工作必須先從完善資料庫的各項機制開始，才能在一個能持續運作的資料庫系統上進行有意義的分析並提供服務。

本研究參考相關文獻報告與國際上的經驗，考量我國實際狀況，設計利用目前已趨成熟的網路分散式協作技術、網路地圖服務與空間資訊分析技術，從海難資料庫的分散式資料登錄，以及船舶航儀動態、航路交通、海域環境、海氣象狀況等方面的資料關聯，提供海難資料庫多元資料儲存查詢與整合分析顯示。

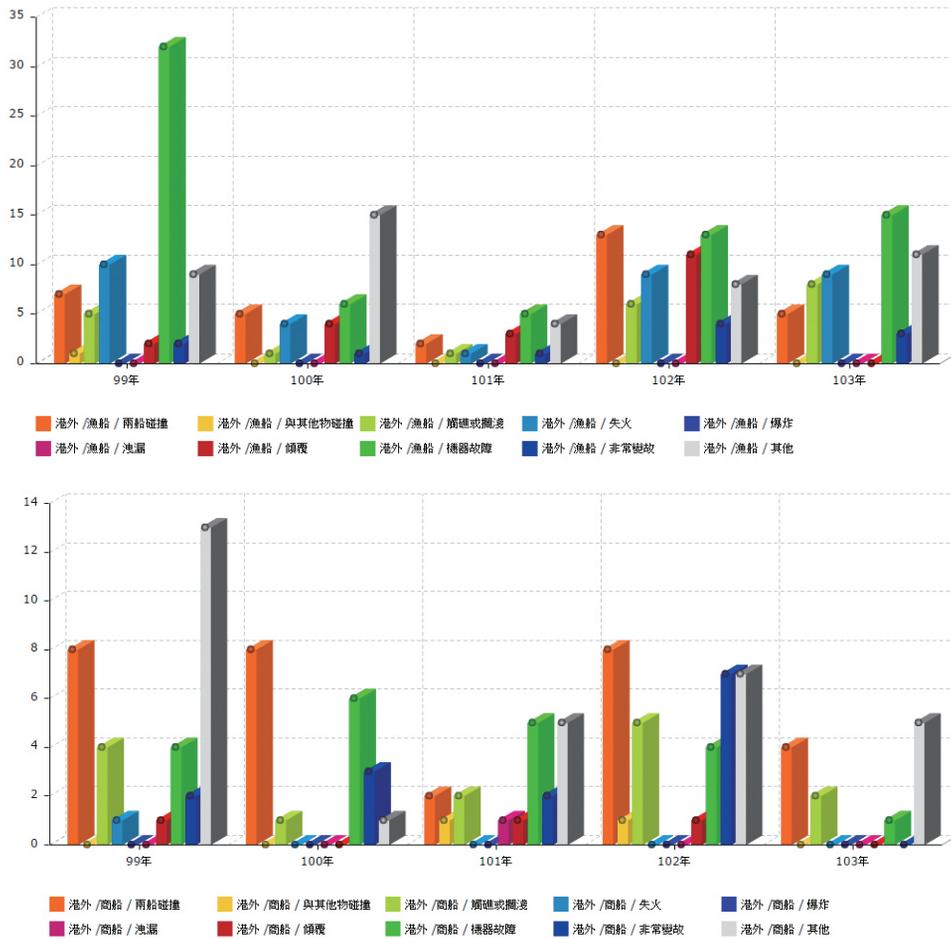
## 2.1 海難資料之蒐集與現況資料分析

交通部統計查詢網(<http://stat.motc.gov.tw/>)已提供海事案件統計查詢，圖1是於該網站查詢99年後港外商漁船海事案件事故類別統計結果。

該網站將「海事案件」定義為：「指船舶在海上發生沉沒、觸礁、擱淺、碰撞、失火、爆炸、傾覆、機器

故障或其他意外事故及有關船舶、貨載、船員或旅客之非常事變等案件」。原始來源主要是：海事案件發生後，船長依據「海事報告規則」，依照航政機關印置備用之空白海事報告書製作並送請航政機關簽證的海事報告。對於失事地點的統計區分港內與港外，港外海事案件係指事件發生於我國飛航情報區而非屬任一港區者；發生原因別原本區分為：碰撞、觸礁擱淺、失火、爆炸、洩漏、傾覆、機器故障、非常變故、惡劣天氣、其他。99年起將碰撞改為「兩船碰撞」、「與其他物碰撞」兩項，海事案件的統計單位由「艘」改為「件」，也不再將「惡劣天氣」這一項，惡劣天候有損失者列為非常變故。可惜其中兩船碰撞件數的統計，無法明確區分是商船之間、漁船之間或商漁船之間的碰撞，因此從圖1實難以確認兩船碰撞類別的整體數量變化。

本研究於102年10月函請交通部航港局提供93-102年的海事案件資料，取得各航務中心以PDF或Word等檔案格式提供的「我國重大/一般海難事故統計資料表」，這些資料的船舶識別通常只有中文(或中譯)船名，肇事地點描述方式不一(可能是格式不一的經緯度或僅以大致的方位距離描述)，要建置成適於空間分析的地理資訊系統(GIS)資料庫，確實有相當的



說明：1.各港海事案件數自99年起由總數改為件數。  
2.港外海事案件係指事件發生於我國飛航情報區而非屬任一港區者。

圖 1 (上) 漁船與 (下) 商船港外海事案件數與事故類別 (交通部統計查詢網)

困難度。研究團隊並就近前往北部航務中心從海事報告紙本資料取得必要資訊，例如：船舶的英文船名、IMO 號碼或 MMSI 等識別資料、時間等，以利與 AIS 船舶動態資料關聯。

## 2.2 海難資料庫之建置

為了從快速從紙本海事報告中取

出資料並輸入資料庫，本研究首先設計一海事案件輸入系統，操作時是透過網頁介面線上輸入，系統提供透過船名查詢 MMSI 後自動填入的功能，案件的地理位置經緯度則提供文數字與地圖兩種輸入介面，如圖 2。

從 MMSI 與日期時間就可以從 AIS 船舶動態資料庫中取出該案件的船舶



圖 2 海事案件輸入系統的操作畫面示意圖

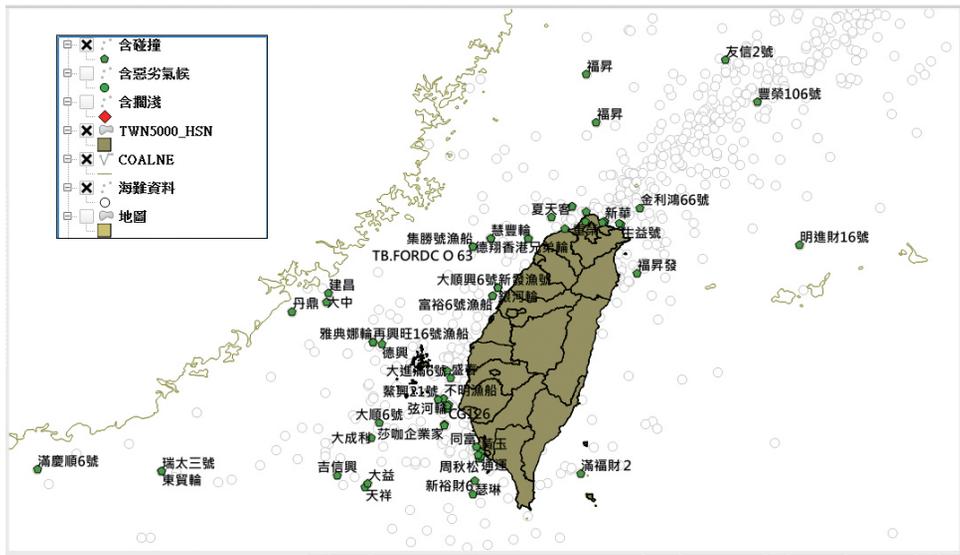


圖 3 原因含碰撞的的海事案件分佈

軌跡。各航務中心提供之海事案件統計表內所列案件，也以人工的方式輸入資料表，其中缺少經緯度資訊的部分案件，是從海軍航船布告中尋找對應的英文船名，繼而找出 MMSI 然後從

AIS 船舶動態資料庫中，取出實際發生位置。海難資料建置後，以地理資訊系統分別查詢事故原因含碰撞的分布如圖 3，事故原因含擱淺或觸礁的海事案件分布如圖 4。

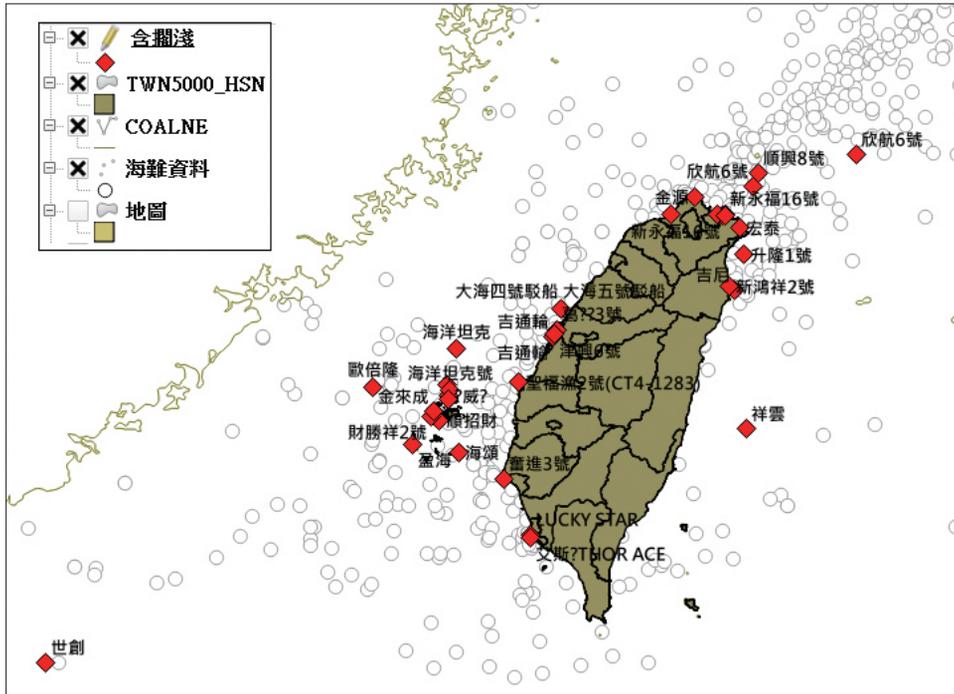


圖 4 原因含觸礁或擱淺的海事案件分佈

### 2.3 依 IMO 海難事故通報格式設計之海難資料庫服務平台

前節所述的海難資料庫與輸入系統是為了盡速將蒐集到的現有海難資料建置成資料庫，以利分析研究。就長期運作維護我國海難資料庫而言，仍應另建一作業化的系統供航港局專責人員操作。此一資料庫系統之設計應符合海難調查章程及其相關通報要求。

本研究基於 MSC-MPEC.3/Circ.4 格式並符合 IMO 國際標準之準則，設計海難資料庫服務平台雛型，以整合海氣象資訊、電子海圖與船舶動態資訊系統 AIS 資料。此服務可提供 (1) 海難資料登錄及查詢；(2) 海難期間周遭

船舶海域交通及氣象狀況，以紀錄並還原當時的地理時空關係。

海難案件登錄至 MSC-MPEC.3/Circ.4 格式資料庫的資料分為基本及事實資料：基本資料項目定義了案件事發經過、位置、時間、環境、事故類別以及後續處理方式等；事實資料內容包含所涉及船舶的詳細資訊及在此案件對於船舶而言所造成的損壞或人員傷害。登錄海難資料時系統會指派唯一的案件編號，搜尋時可根據案件編號、發生時間前後及地理位置範圍向海難資料庫搜尋案件。圖 5 與圖 6 分別是海難資料庫服務平台的資料登錄與查詢畫面。

Add >> Generic >> **Factual** >> Analyze >> AIS

Incident Reference:  Ship Reference:

### Generic Casualty

事件概要:

初始海上事故或海上事件日期(本地):

初始海上事故或海上事件時間(本地):

經度 - 初始海上事故或海上事件位置:

緯度 - 初始海上事故或海上事件位置:

初始海上事故或海上事件發生的地點:

總體發生之海難事件劃分:

總體發生之嚴重程度:

圖 5 海難資料庫服務平台的資料登錄畫面

## Marine Casualty

Welcome Incident

Search

案件編號:

地理位置範圍(最小經度,最小緯度,最大經度,最大緯度):

案件發生時間:

直到:

案件編號	影響的船舶	案件發生日期	案件發生時間	案件發生地點-經度	案件發生地點-緯度	事件嚴重程度
C00001	海翔八號	2012-03-19	04:30:00	25.22027	121.83433	非常嚴重的海難
C00002	民春輪	2011-02-28	02:00:00	25.15829	121.75142	海上事故
C00003	瑞興輪	2011-10-02	23:00:00	25.17958	121.70799	非常嚴重的海難

圖 6 海難資料庫服務平台的資料查詢畫面

此海難資料庫服務除了提供登錄海事案件之外，也結合了船舶動態系統 AIS 資料以及海氣象資料，並透過海難的前後時間點，向 AIS 資料庫及

海氣象資料庫搜尋該時間點的資料，以動態回播方式將涉及海難船舶周遭的交通狀況及氣象狀況還原出來，以利後續分析及研究之用。海氣象資料

分為氣象資料及潮位資料，氣象資料是從中央氣象局取得的民國 100~102 年颱風資料以及彭佳嶼、基隆、龍洞資料浮標、淡水、梧棲、高雄及澎湖測站，而潮位資料則是中央氣象局發布的年度潮汐表。

### 三、資料之整合應用與海難案例分析

本研究應用資料整合分析之海事案件或海難案例包括：99 年 1 月 12-13 日升隆 1 號於宜蘭蘇澳外海失去動力

漂流擱淺事件、100 年 10 月 2-3 日瑞興輪於基隆大武崙外擱淺斷裂沉沒並造成 8 死 2 失蹤及燃油外漏污染的嚴重海難事故、101 年 3 月 19 日的海翔 8 號於基隆外海傾覆沉船事件、以及 103 年 10 月 10 日海研五號於澎湖外海觸礁沉沒事件。在此僅以海翔 8 號與海研五號之海難分析為例，報告應用 AIS 於調查分析的試驗成果。

#### 3.1 海翔 8 號海難事件

以海翔 8 號之分析為例，圖 7 是海難資料庫服務平台的查詢結果。

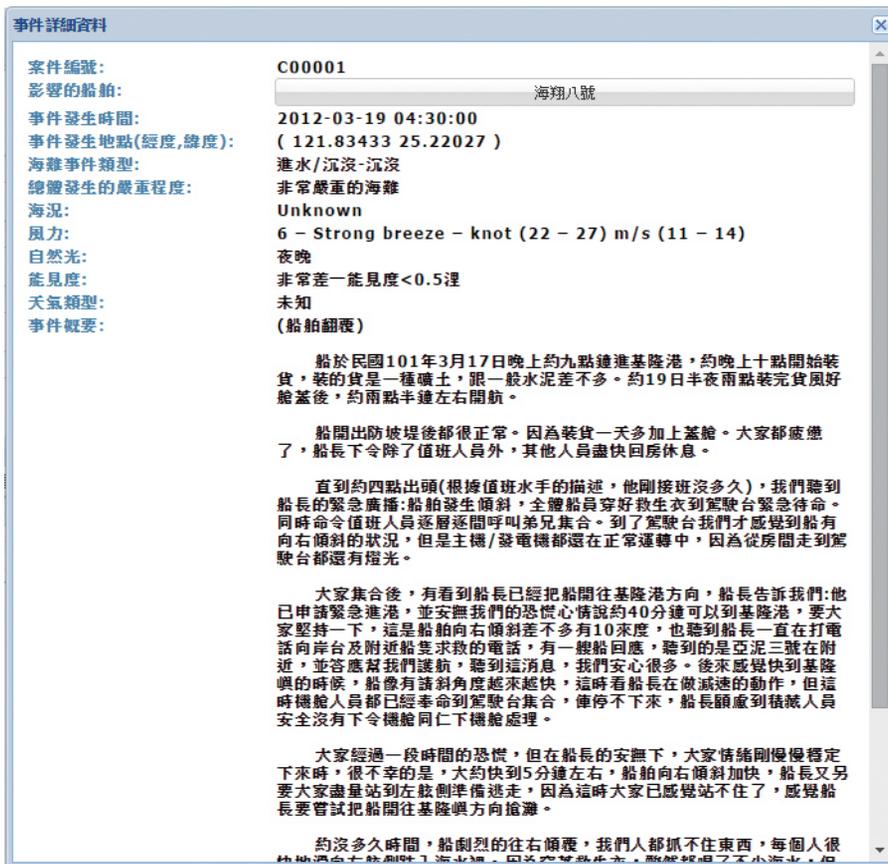


圖 7 以海翔 8 號現有資料填入海難資料庫服務平台的查詢結果



圖 8 海翔 8 號海難事件之動態回播畫面擷圖

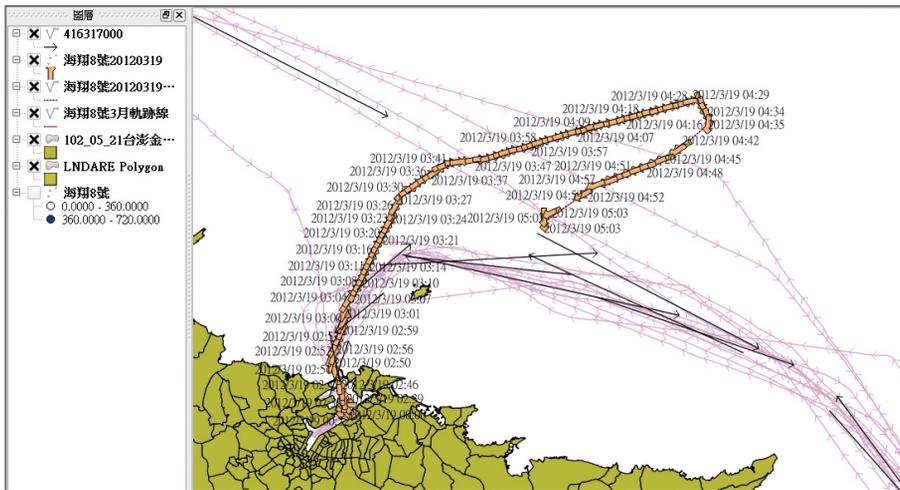


圖 9 海翔 8 號歷史軌跡、代表路徑及出事航次的船位與艏向

圖 8 是以海難資料庫服務平台動態回播的局部畫面擷圖，圖中可見事件發生於基隆嶼東北方海域，海翔 8 號從基隆港出港後到沉沒前的軌跡如紅色虛線，折返擬提供救援的亞泥 3

號軌跡則如白色虛線。

本研究取出該船當年所有 AIS 歷史航跡，執行軌跡群聚分析產生代表路徑後，與事發當日的 AIS 航跡套疊並顯示如圖 9，圖中黑色向量線段是當

年 1-3 月所有軌跡的代表路徑，橘黃色箭頭符號 (依船艏向角度而旋轉) 是當天的 AIS 船位，且標示記錄時間，另以紫色顯示海翔 8 號出事當月的所有歷史航跡。

依據海翔 8 號傳送的 AIS 報告，該航次目的地是花蓮，預計於當天下午 14:00 抵達。但是出基隆港後從 3:20 左右就明顯偏離該船歷史航跡與代表路徑。海翔 8 號出港後到出事這段期間的船艏向幾乎都和航向一致，且數值相當穩定，但在 4:29 到 4:31 兩分鐘內船艏向右轉了 78 度，4:35 到 4:43 約八分鐘內再度右轉 77 度，此時航速也從 7.1 節加快至 8.4 節 AIS 最後船位距離基隆嶼大約 5km，時間是 5:03 分。

氣象觀測資料顯示：當時風向約 30~50 度，風速在彭佳嶼測站約 7.7m/s，基隆測站約 4.4m/s，僅略高於測站的

年平均值。從上述各項資料看來，海翔 8 號明顯偏離其往常從基隆到花蓮的慣用航路甚遠，急右轉致使船艙內載運的貨物偏離，船身右傾，很可能是此一海難事故的重要因素。

### 3.2 海研五號海難事件

101 年 8 月才首航的海研五號研究船於 103 年 10 月 10 日 (本研究計畫執行期間) 發生海難沉沒於澎湖外海。海研五號出事的航次是從安平港出港經過澎湖群島北側海域於臺灣海峽北上，一開始返航時有段時間並未收到其 AIS 訊息，關鍵時段的 AIS 航跡 (圖 10 左圖的黃色區段) 同時被港研中心船舶動態系統以及海洋大學為氣象局設置的東吉島 AIS 站同時收到。從圖 10 可知海研五號先通過北淺石再到水深不到 5m 的外淺石區域。

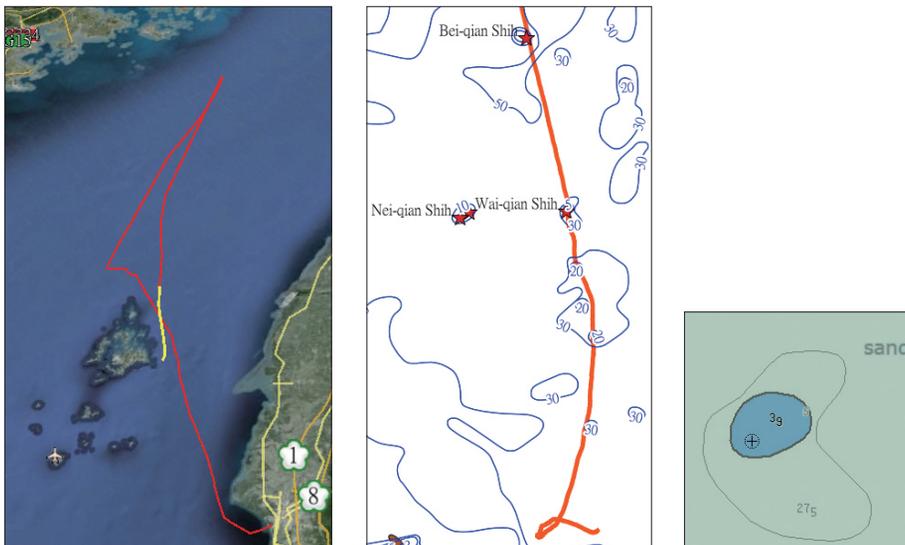


圖 10 海研五號最後航次航跡、出事區段及海圖標示的外淺石區域水深

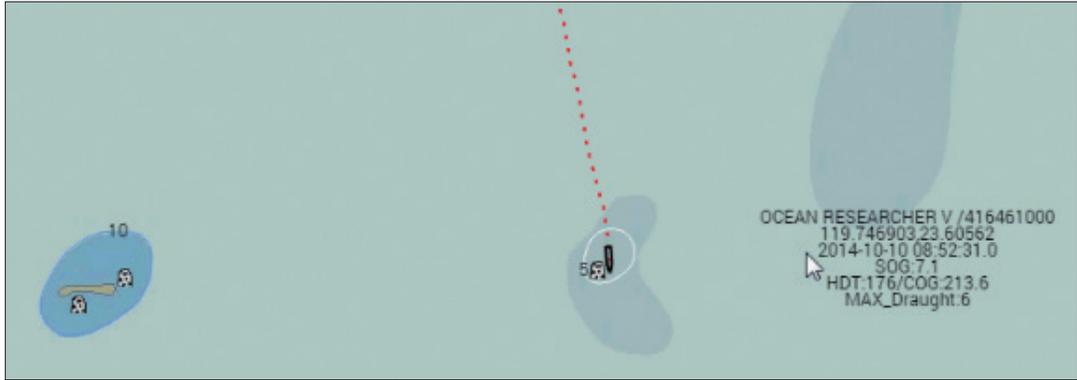


圖 11 海研五號進入外淺石區域後的 AIS 報告 (AIS 動態回播畫面)



圖 12 海研五號經過外淺石前後的航速 (節)、艏向與航向 (左至右圖)

海研五號進入外淺石區域後的 AIS 報告如圖 11，設定的吃水是 6m，時間是 UTC。圖 12 由左至右圖分別是海研五號航行經過外淺石前後的航速 (數字標示，單位：節)、艏向 (箭頭方向) 與航向 (箭頭方向)。其中船艏向垂直於航跡方向是典型的漂流 / 漂航特徵。

圖 13 是國家實驗研究院臺灣海洋科技研究中心於該時段觀測到的表面海流，資料畫面取自該中心網站 (<http://www.tori.narl.org.tw/>)。

中央氣象局的東吉測波站觀測導浪高 2.5 ~ 3.3m，流速 0.1 ~ 0.5 節；澎湖資料浮標觀測的浪高 2.4 ~ 3m，流速

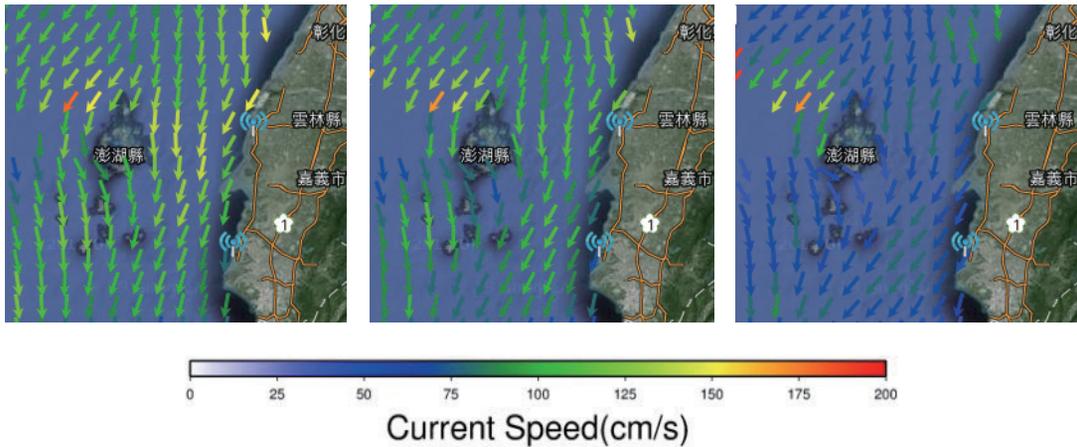


圖 13 該時段海科中心觀測的表面海流 (左至右為 15:00 至 17:00)

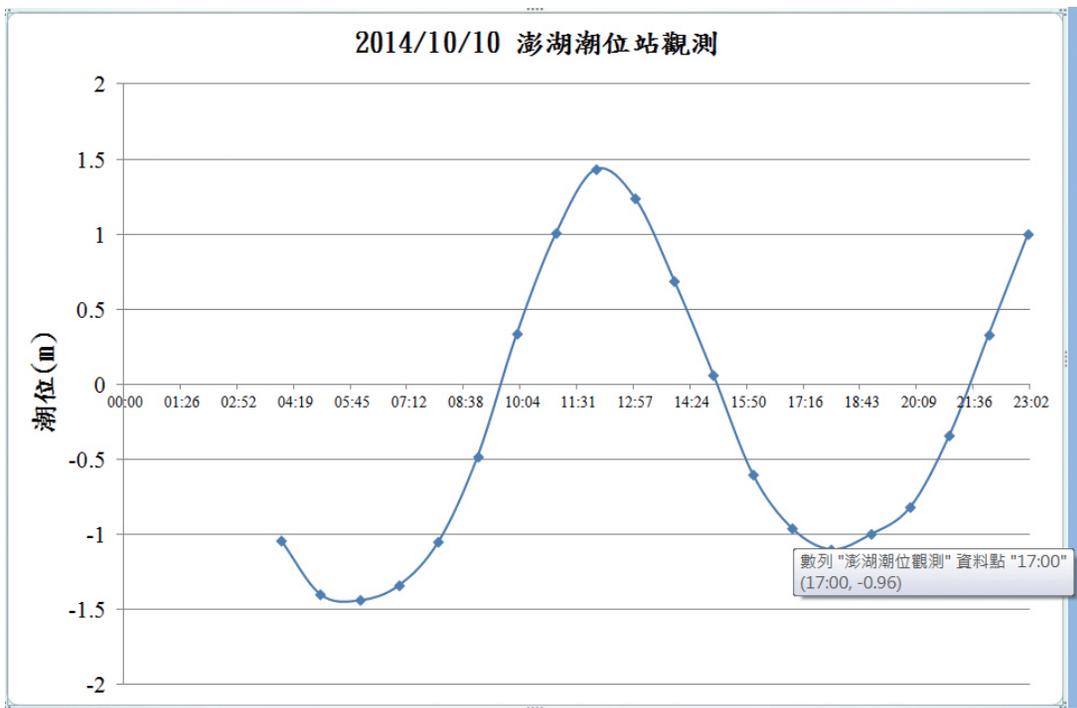


圖 14 海研五號出事當日的澎湖潮位觀測

0 ~ 0.7 節。圖 14 是海研五號出事當日的潮位觀測。

透過 AIS 資料、海圖、潮位這些事實資訊的整合分析，可清楚呈現海

研五號海難發生的主要事件序列。海研五號回程航行到澎湖海域北方時，並未轉入原先北上時的航路，而是順著風與流一路南下進入更貼近澎湖群

島的水域。海研五號先是以超過 12 節的速度通過北淺石所在的 10~20m 淺水區，大約 8 分鐘後再經過水深不到 5m 的外淺石區域。海研五號 AIS 設定的靜態吃水深度 6m，經過外淺石的時候潮位又已接近當日第二次退潮的最低點，未能幸運避過災難。海研五號與外淺石礁石高速接觸後船速驟降，航跡偏轉晃動，對地航向開始跳動，在失去動力後船艏向逐漸轉為垂直於航跡方向呈現漂流狀態，隨風逐流繞了個圈後，終因進水而致沉沒。

#### 四、結論與建議

本研究的具體成果總結如下：

1. 整合 AIS 船舶動態資料、電子海圖資料與海氣象資料應用於海難事故分析。
2. 建置海難資料庫：分析公開之海事案件統計現況，設計網頁版海事案件輸入系統，將紙本海事報告與不同格式的統計表格資料轉換建置成可供查詢分析的電子資料庫。
3. 建立海難資料庫內海難事件與 AIS 船舶動態資料、海氣象資料、海陸地圖的時間空間關聯、動靜態展示與分析技術。
4. 設計符合 IMO 海難事故通報準則之海難資料庫服務平台雛型，可提供海難資料登錄及查詢，進而關聯取得海難期間周遭船舶海域交通與氣

- 象狀況，還原當時的地理時空關係。
5. 以海翔 8 號、海研五號、瑞興輪…等多個實際的海難案例，試驗及示範如何應用船舶動態、電子海圖與海氣象等資料進行整合分析，以輔助海難原因的調查，獲致相關安全建議，例如實施沿岸船舶交通服務。

本研究建立的海難資料庫，以及依據 IMO 海難調查國際章程與相關通函或指南 (內附 GISIS 海難調查模組線上通報的表格) 而設計海難資料庫服務平台雛型，後續可再持續發展成為正式運作且與國際接軌的資料庫與填報/查詢系統。如此的設計較能將可納入更多的關於人員、訓練、船舶等等可能的因素，並與國際安全管理章程結合，提升海事安全。

從海難事件的特徵分析，可獲得利用 AIS 偵測跡近事故的重要參數。若能提高海難記錄與 AIS 船舶識別的關聯比例，使海難位置與時間範圍資訊更加明確，輔以船齡、噸位等基本資料，將可透過更多的海難案例分析探勘歸納出更多的知識，應用於智慧化專家系統所需之推論準則與參數，輔助海難調查與航安相關決策。

#### 參考文獻

1. IMO (2008), Resolution MSC.255 (84), Adoption of the code of the international standards and recomm-

- ended practices for a safety investigation into a marine casualty or marine accident (Casualty Investigation Code), adopted on 16 May 2008.
2. IMO (2013), A.1075 (28), Guidelines to assist investigations in the implementation of the Casualty Investigation Code (Resolution MSC.255 (84)), adopted on 4 Dec. 2013.
  3. IMO (2008), MSC-MEPC.7/Circ.7. “Guidance on Near-miss Reporting”.
  4. IMO (2013), MSC-MPEPC.3/Circ.4, Casualty-related matters reports on marine casualties and incidents: Revised harmonized reporting procedures - reports required under SOLAS regulations I/21 and XI-1/6, and MARPOL, articles 8 and 12, 28 August 2013.
  5. IMO Global Integrated Shipping Information System (GISIS) , <http://gisis.imo.org/Public/Default.asp>
  6. International Electrotechnical Commission, (2012). IEC 61993-2: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Automatic identification systems (AIS) - Part 2: Class A shipborne equipment of the automatic identification system (AIS) - Operational and performance requirements, methods of test and required test results, Ed.2.0.
  7. EfficienSea project documents, <http://www.efficiensea.org/>

## 港 灣 季 刊 徵 稿 簡 訊

1. 本刊為提供國內港灣工程界同仁交換工作經驗與心得之園地，歡迎工程、學術界之同仁提供港灣工程相關之工程動態、實務、工程新聞、技術新知、地工技術、工程材料、營運規劃及其他有關之工程簡介或推動中之計畫等的報告、論著或譯述。
2. 投稿者應保證所投稿件無侵害他人著作權情事，如有違反，願就侵害他人著作權情勢負損害賠償責任，並對中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）因此肇致之損害負賠償責任。
3. 來稿經本刊接受刊登後，作者應附具著作授權同意書，同意非專屬授權予本刊做下述利用：
  - (1) 以紙本或是數位方式出版。
  - (2) 進行數位化典藏、重製、透過網路公開傳輸、授權用戶下載、列印、瀏覽等資料庫銷售或提供服務之行為。
  - (3) 再授權國家圖書館或其他資料庫業者將本論文納入資料庫中提供服務。
  - (4) 為符合各資料庫之系統需求，並得進行格式之變更。
4. 作者應保證稿件為其所自行創作，有權為前項授權，且授權著作未侵害任何第三人之智慧財產權。
5. 稿件每篇以八頁（含圖）（4000～5000字）以內為原則，稿酬從優；請附磁片或E-mail，並請加註身分證字號及戶籍地址（含鄰、里）。
6. 本刊每年刊行3期，分別於2月、6月、10月出版。如蒙惠稿請於每期出版前30日寄交本刊。
7. 聯絡電話：(04)2658-7139 馬維倫  
傳真電話：(04)2656-4415  
E-mail：[elisa@mail.ihmt.gov.tw](mailto:elisa@mail.ihmt.gov.tw)
8. 歡迎賜稿，來稿請寄：  
43542 臺中縣梧棲鎮中橫十路2號  
交通部運輸研究所港灣技術研究中心「港灣季刊編輯委員會」收