

應用 SCHISM 模式模擬裂流時空分布

王敘民¹ 邱啓敏² 梁立翰³ 董東璟⁴

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士生

² 國立成功大學近海水文中心博士級研究員

³ 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士生

⁴ 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

摘要

裂流是海岸邊的隱形殺手，據美國國家海洋大氣局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)統計美國平均每年約有 100 人因裂流而溺亡。國內海灘意外頻傳，裂流為海灘潛在的危險因子之一，然裂流的成因複雜，受地形、波浪和潮汐等因素影響。若要對裂流進行預警，即能大幅降低意外發生的機率。故本研究建立一套波流耦合數值模式(SCHISM&WWM-III)，將海流與波浪模式耦合，並模擬波流交互作用下的近岸海域流場，目的是用來探討裂流在近岸地區時空間的分佈特性。本研究以宜蘭縣外澳周圍海域作為初步研究之位置，數值模式模擬結果於水位、波高及週期驗證，皆與實測資料相當相吻合，證實模式之模擬能力。從模擬結果進行檢視，亦發現在海岸槽溝區域有發生裂流之情形，且流速可高達 1m/s 以上。上述結果說明本研究未來可用於探討臺灣海岸裂流在時空的演變。

關鍵詞：SCHISM、WWM 波浪模式、波流交互作用、裂流

A Study on the spatial-temporal distribution of Rip current Simulations by SCHISM model

Shu-Min Wang* Chi-Min Chiu Li-Han Liang Dong-Jiing Doong

¹Ph.D. student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

According to the report of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the frequent occurrence of accidents on domestic beaches, rip current is one of the potential risk factors. However, the causes of rip current are too complicated and affected by terrain, waves and tides. The probability of accidents can be greatly reduced, if simulation can be carried out from the model. Therefore, this research will use SCHISM-WWM-III to simulate the flow field in the coastal area. This can obtain the spatial character of rip current by using the data which measured Guishan buoy, including water depth and flow field calculations. This research is taken by Waiao outside Yilan County. The results are very closed to the water level, wave height and period. The results show that rip current is more likely to occur in the groove area and the flow rate can be as high as 1m/s or more. Initially, This research can be simulated on rip current.

Keywords: SCHISM; WWM model; Wave-current interactions; Rip current

一、前言

臺灣四周環海擁有豐富的海洋資源，不僅風景優美，隨著近年來海岸地區的高度利用與發展下，海域遊憩活動亦逐漸興盛。有鑑於國內海域意外事件頻傳，根據澳洲海域遊憩規範指標及 Klein et al.(2003)於巴西南部海灘災害成因調查，裂流(rip current)所造成意外事件比例占了 8 成，是造成海域遊憩危險的主要因子之一。

依據過去文獻，裂流(rip current)的發生主要是受到海岸地形不均及海岸結構物等因素，為平衡波浪輻射應力與其它外力之動量，使水流產生離岸方向之流動。Longuet-Higgins et al.(1964)將輻射應力這一概念引入到裂流研究中，訂定後續數值模擬的方法理論基礎；Wright and Short(1984)將海灘加以分類，提出海灘類型參數 Ω ，以探討各種海岸類型下的裂流特性。隨這近年來電腦運算速率的提升，不少物理模型和數值模型的開發，如:SHORECIRC、Xbeache 等，藉以求解 Boussinesq 方程，以數值模擬進行計算裂流在海岸地區的變化。

本研究所採用的三維跨尺度的 SCHISM(Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model)海洋數值模擬模式(如圖 1)，於 Arom et al.(2012)中提出此模式可基於非結構化網格，進行三維水動力模型(SELFE)和第三代波浪數值模式 WWM-III 進行波流耦合計算，在具有相同空間域下，進行不同時長的計算，確保了模式最大的效率和靈活性；此外，Chiu et al.(2018)應用 SCHISM 模擬臺北德祥號溢洩油事件時，其水位與海表面洋流的預測皆與當地海域實測結果非常吻合。另外，Alvaro et al.(2019)應用 SCHISM 模式耦合 WWM-III 波浪模式，模擬 Warren Dunes 海灘所發生的一起裂流意外，重塑當下裂流演變的特性。

有鑑於此，本研究應用 SCHISM-WWM-III 波流耦合數值模式，模擬近岸地區波、流特性，探討裂流在時空間上分佈的情形。對於分析場址的選擇根據林(2009)現場觀測的研究結果，以台灣宜蘭縣外澳海域進行探討。

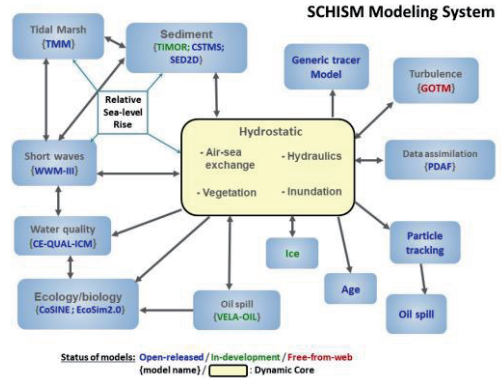


圖 1 SCHISM 海洋數值模式系統
(<http://ccrm.vims.edu/schismweb/>)

二、理論分析

裂流發生主要是因地形的不均，在波流交互作用下所產生的輻射應力所導致的。本研究在進行裂流模擬時，採用美國 VIMS 發展的 SCHISM 三維跨尺度海洋數值模式，並耦合第三代波浪數值模式 WWM-III，採用非結構線性網格模擬計算該區域。

2.1 波浪數值模式

依 JONSWAP(Joint North Sea Wave Project)理論發展第二代波浪數值模式 WWM，並應用在臺灣四周海域波浪的預測。所建立的目前波浪模式 WWM 已發展到第三代(WWM-III)，能廣泛應用於各區域波浪預測之研究，亦能與 SCHISM 模式進行雙向耦合 (two-way coupling)。因此，本研究採用 WWM-III 模式分析近岸波場。

WWM-III 模式求解波浪作用力平衡方程式 (Wave Action Balance Equation, WAE)，其波動作用方程式如下

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x(\dot{X}N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(\dot{\theta}N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\dot{\sigma}N) = S_{tot} \quad (1)$$

式中 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ 為波浪作用力密度波譜， $E(\sigma, \theta)$ 為能量密度波譜， σ 和 θ 分別表示成份波之頻率與角度。且根據幾何光學逼近不同空間中的對流速度(Keller, 1958)

$$\dot{X} = cX = \frac{dX}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = c_g + U_{A(k)} \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = c\theta = \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U_{A(k)}}{\partial s} \quad (3)$$

$$\dot{\sigma} = c\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U_{A'} \cdot \nabla_x d \right) - c_g k \frac{\partial U_{A(k)}}{\partial s} \quad (4)$$

其中 s 代表沿波傳播方向的座標， m 垂直於波傳播方向， X 是地理空間中的笛卡爾標向量 (x, y) 、 k 是週波數、 c_g 是群波速度、 ω 是波浪頻率以及 ∇x 是地理空間中向 x 方向的梯度。由離散關係計算群波速度，有效的流速 U_A 通常取決於各個波的成份，故在本公式中，他可以近似於表面流速。

S_{tot} 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支援函數，包含風引起的能量 (S_{in})、深水和淺水相互作用 (S_{nl4} 和 S_{nl3})、波浪所產生之白浪或破碎的能量消散 (S_{ds} 和 S_{br}) 以及底床摩擦立 (S_{bf})，公式如下

$$\frac{DN}{Dt} = S_{tot} = S_{in} + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{br} + S_{bf} \quad (5)$$

2.2 海洋流體動力模式

SCHISM 控制方程式主要為求解三維淺水波方程 (3D shallow-water equations)、靜水壓方程 (Hydrostatic) 和包式近似 (Boussinesq approximations)，SCHISM 所使用的控制方程式是符合靜水壓假設並以笛卡爾座標表示三維雷諾平均 Navier-Stokes 方程，目的為計算流場之渦流現象：

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} (v \frac{\partial u}{\partial z}) - g \nabla \eta + F \quad (6)$$

公式(6)中的 F 可由下式所得：

$$F = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - f k \times u - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \varphi + R_s \quad (7)$$

當中 k 是 z 軸的單位向上(垂直向上為正)、 f 為科氏力參數、 α 為有效地球彈性因子(=0.69)、 v 和 μ 分別是垂直和水平渦流黏制度， ρ_0 是水密度， p_A 為大氣壓力。假設流體不可壓縮的情況下可表示如下：

$$\nabla \cdot u + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

其中 $u = (u, v)$ 是水平速度、 η 為表面高程、 $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$ 為水平梯度因子、 g 為重力加速度， w 為垂直速度。為了求解水位高度，可藉由求解水深梯度積分之結果所得，公式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} u dz = 0 \quad (9)$$

此外，輻射應力項 R_s 用不童的公式進行參數化在本研究採用了 Longuet-Higgins (1964) 提出最簡單之輻射應力公式：

$$\begin{cases} R_s = (R_{sx}, R_{sy}) \\ R_{sx} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \\ R_{sy} = -\frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0 H} \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} \end{cases} \quad (10)$$

其中 S_{xx} 、 S_{xy} 和 S_{yy} 是輻射應力張量的組成部分，根據 Battjes(1974) 的在應力垂直方向上為均勻的情況下，定義為不規則波譜的形式為、其中 $H = h + \eta$ 為總水深、 c_p 是群波相位速度：

$$S_{xy} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \sigma \frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} \sin(\theta) \cos(\theta) \quad (11)$$

$$S_{xx} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \sigma \left[\frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} (\cos^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \quad (12)$$

$$S_{yy} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_{(\sigma, \theta)} \sigma \left[\frac{c_g(\sigma)}{c_p(\sigma)} (\sin^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] d\theta d\sigma \quad (13)$$

SCHISM 模式在進行波浪耦合數值模式計算時，會先將 WWM-III 波浪模式會先計算輻射應力，再將波浪引起的表面傳遞至水動力模式，重新獲得流場和水位，再進行接下來所探討之議題所使用之模式，確保準確的考慮到波流交互作用下之情形。

2.3 模式網格

SCHISM 模式網格座標系統可同時結合非矩形與矩形網格，在地形較曲折之區域相較於結構性網格能更精確地分析地形，且能因應不同計算需求選用卡式或球面座標系統。在許多海洋數值模式中地形陡變造程壓力梯度變化劇烈，容易造成偽流 (spurious flow) 的問題，是難以解決的。SCHISM 模式在垂直網格上分為 SZ 混和型網格與 LSC² 網格，亦可選擇純 S 型的等比網格或是純 Z 型固定水深網格，依所設定各層水深進行劃分，在地形變化劇烈較大區域常使用 SZ 混和型網格，在表層及淺水區域使用，深水區域則使用 Z 網格來劃分，此種設定可以降低模式的計算量，且於近岸與表層能有最佳的解析度。在紊流閉合模式中採用包含了 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 以及 Mellor and Yamada 的 Umlauf and Burchard 的 Geric Length Scale (GLS) turbulence closure。

三、宜蘭外澳裂流模擬

根據林雪美(2009)計畫中和多份報導指出，宜蘭外澳沙灘可能發生裂流之現象，故本研究應用 SCHISM-WWM-III 波流耦合數值模式，探討該區域是否會發生裂流以及裂流發生的時空分布。

在模式計算網格建置範圍，以西經 121.82° 至東經 122.01°，南緯 24.7° 至北緯 25.0° 範圍建置模式計算區域，計算範圍垂直外澳沙灘往海外海延伸約 25 公里，沿岸方向由北至南約 30 公里的範圍。近岸網格解析度約為 90 公尺，總計共建置 4227 個三角元素(如圖 2)，網格輸入水深資料在近岸地區採用水產規劃試驗所在外澳沿岸量測 10 公尺精度的水深地形，再加上海科中心(TORI)所提供的臺灣四周海域解析度 200 公尺的水深地形，建構整個計算網格之水深地形。

WWM-III 模式在網隔的建置上同 SCHISM 的設置，而在波浪場設定最小與最大頻率解析度為 0.03Hz 和 1.0Hz，採指數遞增分佈共 36 個頻率帶，方向波譜的解析度為 $\Delta\theta=10^\circ$ ，共計 36 個方位角，傳播項與源函數項的積分時距為 $\Delta t=10$ 分鐘；在垂直座標系統的設定則採用 21 層的混和 S-Z 座標(如圖 3)。

本研究模擬外澳沙灘流場主要應用 SCHISM 進行模擬，先以臺灣四周海域計算之水位和流速資料，給定本研究案例模擬計算區域在海外的開放邊界。裂流形成的因子與波浪衝擊海岸與地形效應有關，為得知近岸波場的演變，模式輸入風場資料採用距龜山島尾端西方 1 公里處之龜山島資料浮標每小時量測記錄資料。再以 SCHISM-WWM-III 波流耦合數值模式模擬宜蘭外澳沙灘近岸流體動力之演變，進一步探討在宜蘭外澳沙灘近岸處之裂流可能發生之位置和時間點。

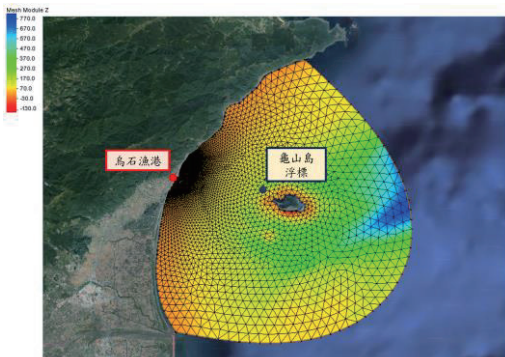


圖 2 宜蘭外澳海岸 SCHISM 模式計算網格系統

四、結果與討論

4.1 數值模式驗證

本研究案例計算網格範圍內有烏石港潮位站與龜山島資料浮標量測之波浪資料，本研究收集烏石港水位紀錄資料與龜山島資料浮標量測之波浪資料，用以驗證 SCHISM-WWM-III 模式計算結果。

首先，本研究以烏石港量測紀錄之水位資料，進行 SCHISM 模式預測水位之驗證。圖 3 為 SCHISM 模式模擬水位與烏石港實測水位之比對，由圖中資料顯示 2019 年 8 月 10 日至 13 日期間，SCHISM 模式模擬水位與烏石港實測水位變化非常一致，此表示 SCHISM 模式模擬水位之精度。

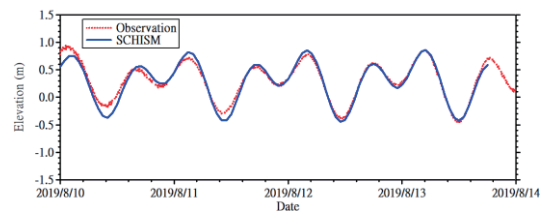


圖 3 SCHISM 模式模擬水位與烏石港實測水位之比對圖

本研究以龜山島資料浮標所測得之波浪資料，包括示性波高(Hs)、平均週期(Tm0)和尖峰週期(Tp)進行驗證 SCHISM 模式預測之波浪。波浪模式計算期間為 2019 年 7 月 29 日至 8 月 15 日，為了解近岸波浪的演變，採用龜山島資料浮標實測的風速風向作為計算網格上輸入之風場，波浪計算結果輸出時間間距為 1 小時。圖 4 為 SCHISM 模式模擬示性波高與龜山島資料浮標實測示性波高之比對圖，由圖中資料顯示模擬與實測變化趨勢一致，模擬期間於 8 月 8 日至 9 日實測波高較大是正好適逢強颱風利奇馬颱風在東部外海經過，而模式模擬波高較小原因應是未採用大範圍氣象模式預測之風場，導致模式模擬波高未能反應颱風期間的波高。圖 5 與圖 6 分別為 SCHISM 模式模擬平均週期及尖峰週期與龜山島資料浮標實測平均週期及尖峰週期之比對圖，由圖中資料顯示模擬與實測變化趨勢非常一致，亦表示 SCHISM 模式可應用宜蘭外澳附近的海域，進行預測流體動力與波浪之演變。

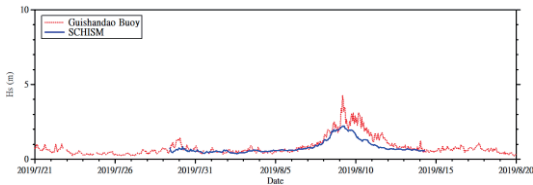


圖 4 SCHISM 模式模擬示性波高與龜山島資料浮標實測示性波高之比對圖

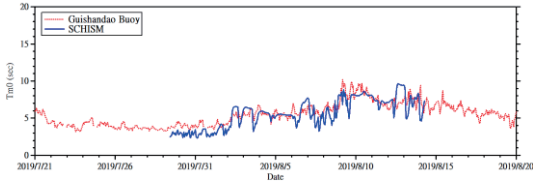


圖 5 SCHISM 模式模擬平均週期與龜山島資料浮標實測平均週期之比對圖

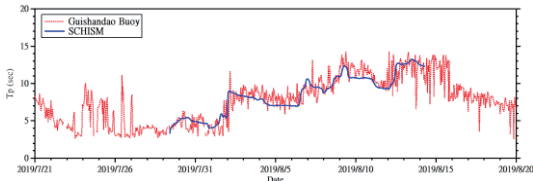


圖 6 SCHISM 模式模擬尖峰週期與龜山島資料浮標實測尖峰週期之比對圖

4.2 裂流模擬

裂流(rip current)又稱為離岸流，是一種向外海方向移動的強勁海流，離岸流對於在海邊戲水的遊客非常危險，如有人員戲水碰到裂流會被快速帶離海岸邊並往外海漂流，易因體力耗盡而造成悲劇。

裂流主要是當海浪衝擊海岸時，因遇到陸地或沙灘地形或結構物阻礙而潰散，這些海水初期會沿著與沙灘平行的方向移動，最後匯集成一道或數道的強大水流退回海中。較常見的裂流通常發生在垂直向外的結構物旁，本研究透過波流耦合模式(SCHISM-WWM-III)進行模擬，每一小時輸出一筆資料，從圖 7 為退潮期間近岸海流之變化趨勢，當外海潮流向近岸傳輸時，流向逐漸轉為平行海岸線，在淺化的影像下流速僅約 0.16m/s，然遇到烏石漁港北側防波堤時，流向則轉向為離岸情形，有明顯的離岸流現象，且流速有明顯的增強約 0.4m/s。

除了上述常見的離岸流發生情形外，根據專家學者的研究表示，在地形出現沙槽時發生裂流的可能性大幅增加，從模擬結果中本研究亦發現在離烏石漁港北側防波堤約 0.5 公里和 1.3 公里處有裂流發生的情形，從當地近岸地形圖(如圖 8)顯示在此二者

區域確實呈現沙槽，從圖 9 為漲潮期間近岸海流之變化趨勢，結果顯示此時外海流向均向沿岸所流動，由於海岸線呈現海灣的地形，流向逐漸轉為平行海岸線向南流動，然在兩處有沙槽地形區域有兩股強勁的海流垂直海岸線向外流動，流速分別約為 0.55m/s 和 1.26m/s，當然於烏石漁港北側防波堤處亦有向外海延伸的流發生。

由於模擬時間內有於 8 月 7 日後就受到颱風影響，在近岸流場上的線上非常混亂，但從 7 月 29 日至 8 月 6 日間，同上述情形外海流向並非遠離海岸，但卻有裂流發生的現象，共計有 13 個小時，且絕大部分發生在距北側防波堤 0.5 公里處，且發現在 8 月 1 日下午 5 點至 9 點，此四個小時內間均有裂流發生的情形，由於模擬結果為一小時一筆，因此無法確定裂流是一直存在的，但只要有裂流發生，在兩個小時內均可能會發生現象。

綜合上述驗證與模擬結果，SCHISM-WWM-III 波流耦合數值模式可以描述近岸地區裂流在時空上演變的現象。

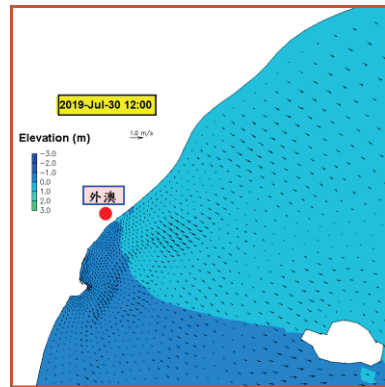


圖 7 SCHISM 模式模擬宜蘭外澳 7 月 30 日退潮期間海流之變化趨勢

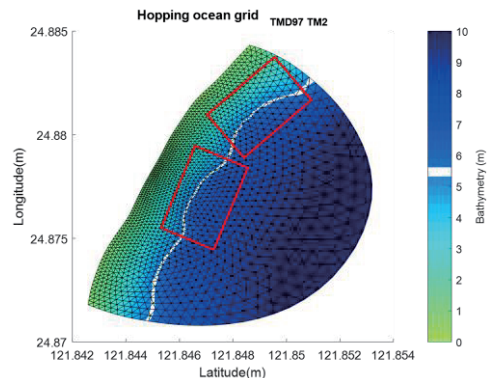


圖 8 外澳海域近岸地形圖

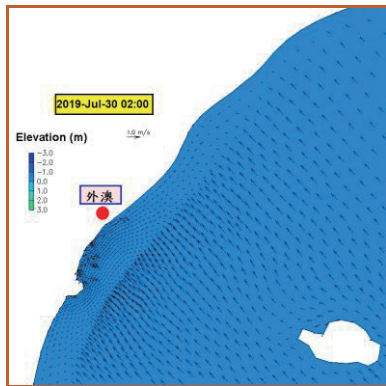


圖 9 SCHISM 模式模擬宜蘭外澳 7 月 30 日漲潮期間海流之變化趨勢

五、結論與建議

在這項研究中，初步建立了以波流耦合模式 (SCHISM-WWM)，從模擬近岸流場，發現有裂流發生。本研究以烏石漁港潮汐資料和龜山島浮標所測得之波浪資料進行驗證，結果顯示水位、示性波高、平均週期和尖峰週期趨勢上均相似，驗證良好。從模擬結果也發現，在潮汐漲退潮期間皆會有裂流的現象發生，在距烏石漁港北側防波堤 0.5 公里處，其沙槽地形為此區域容易發生裂流的區域，其流速最高可達 1m/s 以上，已超過人體游泳速度的極限，具有高度的危險性。本研究初步模擬結果顯示，波流耦合模式 (SCHISM-WWM) 具有能力模擬近岸區域波浪破碎後引起的近岸流現象，後續會進一步探討更多案例，並提高近岸計算網格的解析度，以呈現出近岸流場由內向外之列流現象，並探討裂流發生之特性或發生前後海表面特徵，應有助於了解裂流發生的時空資訊及其特性。

參考文獻

1. 許泰文、歐善惠、廖建明、梁澗文(2005)「波浪作用力平衡方程式數值模式的繞射效應」，第 27 屆海洋工程研討會論文集，第 1-8 頁。
2. 黃清哲、邱啓敏、莊士賢、范揚名、吳立中、邱永芳、蘇青和、李俊穎(2016)「SCHISM 模式模擬油污染擴散-以「德祥臺北」漏油為例」，第 38 屆海洋工程研討會論文集，第 375-380 頁
3. 陳韋廷、尤皓正、于嘉順(2018)「以波浪及海流耦合數值模擬模式探討波流交互作用引發異常巨浪可行性」，第 40 屆海洋工程研討會論文

集。

4. 林雪美(2009)宜蘭外澳海灘裂流判釋與遊憩安全告示牌設計，國立臺灣師範大學地理學系，交通部觀光局計畫。
5. Kevin A. H., I. A Svendsen, Merrick C. H., and Qun Z.(2003), Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*. VOL. 108. NO. C7, 3217.
6. Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Stewart (1964), Radiation stresses in water waves: A physical discussion, with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529–563.
7. Wright, L.D., and A.D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surfzone and beaches : a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
8. Aron R., Zhang Y, J., Wang H. V., Meng Y., Teng Y. C., Vladimir M., Igor B., Mathieu D. S., and Ulrich Z.(2012), A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117, C00J33..
9. Chiu C. M., Huang C. J., Wub L. C. , Yinglong J. Z., Laurence Z. H. C., Yangming F., Yu H. C.(2018), Forecasting of oil-spill trajectories by using SCHISM and X-band radar. *Marline Pollution Bulltin*, 137, 566-581.
10. Álvaro l., Chin H. W., Adma J. B., Eric J. A., and David A. R.(2019). Unexpected rip currents induced by a meteotsunami. *Scientific Reports*. 9:2015. 1-9.