

裂流模擬與影響因子之評析

王敘民¹ 邱啟敏² 董東璟³ 蔡政翰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教授

⁴國立台灣海洋大學海洋環境資訊學系名譽教授

摘要

裂流(rip current)是海岸邊的隱形殺手，流速強，垂直海岸線向外海流去，時常將遊客牽引流向外海，造成生命財產的損失。若能了解裂流發生的成因，進而從事預警作業，便能大幅降低意外事件的發生，因此本研究接續先前的研究成果，透過波流偶和數值模式(SCHISM&WWM-III)模擬近岸海域之流場，探討在不同海氣象條件下裂流發生之情形，該模式模擬結果於水位、波高及週期驗證，皆與實測資料相當吻合。此外，本研究亦將透過小波轉換邊緣化偵測的技術，建立一套半自動化裂流影像辨識系統，蒐集完善的裂流資料庫，藉由與鄰近的浮標站比對，探討裂流發生當下之海氣象特性。目前已完成半自動化裂流影像辨識系統，可從衛星影像中盼釋出是否有裂流的發生，準確率可達 8 成。綜整模式模擬以及遙測分析之結果，顯示裂流發生時，波高多介於 0.5-1.5 公尺間，且在波高大於 1 公尺時裂流現象較明顯，流速亦較強，而風速約小於 4m/s(約三級風)。上述結果未來可用於臺灣海岸裂流預警之統計經驗模式的基礎。

關鍵詞：裂流、波流耦合、數值模擬、小波轉換、影像辨識

Numerical Model Simulation and Impact Factor Analysis for Rip Current

Shu-Min Wang^{*}, Chi-Min Chiu, Dong-Jiing Doong, Cheng-Han Tsai

^{*} Ph.D. student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Rip current is one of the hazard in the coastal area, especially in the beach. They are fast-moving flowing and traveling outward at right angles to the shore. To understand, monitoring and warn it is necessary. Not like the waves or tides, the occurrence of rip is difficult to be seemed. In order to understand the mechanism of rip currents, this research uses SCHISM&WWM-III wave-current coupling model to simulate the flow field in different meteorological and wave condition. The results are very closed to the water level, wave height and period. In addition, this research developed image analysis process to collect rip current cases from satellite image or camera by wavelet transform technology. A set of semi-automatic image detection technology has been completed, which can determine the rip current from satellite images, and the accuracy rate could reach 80.5%. In summary, the results of numerical model simulation and remote measurement analysis show that the most of rip current cases occur when wave height is between 0.5-1.5 meters and the wind velocity is less than 4m/s. The above results can be used as the basis for the rip current warning in Taiwan in the future.

Keywords: Rip current; wave-current coupling; numerical simulation; wavelet transform; Image detection

一、前言

近二十年來，台灣周遭水域裂流(Rip current)事件頻傳，導致人員遭海流捲走時有耳聞，造成民眾生命威脅並花費大量救災資源。裂流不意察覺，常出現在海灘，流速強，將遊客牽引流向外海，時常造成海岸邊的漁民、釣客、戲水民眾及海巡人員的危害。

裂流不像波浪高低和潮汐變化都目視可辨別，加上裂流發生的成因相當複雜，據文獻所述裂流的發生主要是因為地形不均所引致的淺化和折射效應，亦或是為平衡波浪造成輻射應力的外力所導致的(Longuest-Higgins and Stewart, 1964)，隨著不同時間和營力產生變化，其裂流位置和強度也會產生不同的變化。而影響裂流發生與否以及裂流強度除了上述所提及之地形因素外，與海氣象條件亦有所關係。隨著近年來各國開始注重該海岸災害，裂流監測和預警系統亦開始發展，然因裂流的特性所致，在模擬上需要相當高的解析度，導致運算效率過低，若要能實際作業畫執行將會有所阻礙，故目前國際上裂流預警系統多根據上述觀測及數值模式分析之結果，瞭解裂流發生時之海氣象條件(Lushine, 1991; Lascody, 1998)，進而針對各個海氣象參數給定權重進而評估裂流發生之機率。Liu and Wu (2019)以影像分析技術蒐集裂流案例，並根據裂流發生時海氣象資料建立裂流即時預報系統，該研究認為風速、風向、波高是造成裂流發生的重要海氣象參數。而Mucerino et al.(2021)藉由Xbeach 數值模式模擬裂流發生時的海氣象條件，並以加權分析的方式提出裂流風險分級之方法。

目前國內並未有完善的裂流監測系統，裂流案例多來自於報章媒體所刊登之意外事件，然而並非沒有意外事件的發生就無裂流現象的出現，該些案例並未能完整的描述裂流的特性。有鑑於此，本研究建置一套半自動化裂流辨識系統，藉此蒐集完善的裂流資料庫。並藉由前期研究之成果王等(2020)透過SCHISM&WWWM-III 波流耦合模式所建置之裂流數值模式，模擬不同的海氣象時空條件，探討近岸波、流特性，找出流發成因，並評析各因子對裂流發生的影響程度，以及裂流發生時之特性。

二、文獻回顧

裂流的發生通常位於碎浪區 (surf zone) 內，波波交互作用或波浪與地形交互作用導致波浪破碎後，碎波引起的水流以垂直海岸線的方向離開碎波帶，由於裂流可以在很短的時間內將泳客帶離海岸，過去有許多學者致力於找到影響裂流的主要成因(Castelle et al., 2016)，且歸納裂流好發條件，以作為預測裂流發生與否的重要參考依據。

Wright and Short (1984) 根據近岸地形的測量結果，提出海灘類型參數 Ω ，並歸納出各種地形型態以極易發生裂流的地形型態。除了地形外，波浪破碎後的水體運動亦是影響裂流發生與否的關鍵，因此許多學者從實驗、觀測討論裂流容易發生時的波浪條件。在觀測部分，MacMahan et al. (2008)藉由 ADCP 發現裂流發生當下的波高介於 0.9 至 1.6 公尺間；Austin et al. (2012)發現裂流會隨著波高增長而增強，然當波高大於 3.0 公尺時，裂流現象則會開始消失；Leatherman (2017)以 GPS 浮球觀測，發現裂流發生當下波高介於 0.6 至 0.9 公尺時，裂流現象較不明顯。亦有部份學者以數值模式探討裂流，其結果與實驗與觀測相近，的如 Bruneau et al. (2007)以 MARS 2DH 進行模擬，發現當波高小於 1.0 公尺時，裂流現象較不明顯；Austin et al. (2012) 以 Xbeach 進行模擬，發現裂流發生當下的波高介於 0.9 至 1.2 公尺間；Mucerino et al. (2021) 以 Xbeach 進行模擬，找出裂流發生時波高介於 0.5 至 1.34 公尺、週期 4.7 至 7.0 秒，波向約垂直海岸線。

本研究統整上述相關研究，顯示裂流的發生主要與波高有關，且多發生於 0.5-1.5 公尺之間(如圖 1)。

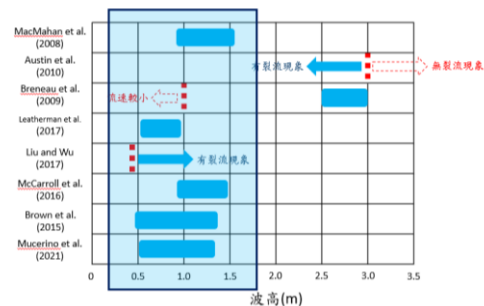


圖 1 過去文獻記載裂流發生時的波高條件

三、研究方法

裂流具有很大的變動性，監測站的架設範圍將會有所侷限，以全面設置監測站進行研究易造成資源過度的浪費，若能以數值模式進行模擬，便能大幅降低現場觀測的成本。本研究將採用 SHCIMS&WWM-III 波流耦合數值模式針對不同的海氣象條件進行模擬。然進行裂流模擬需要精細的地形水深，因此本研究亦會透過影像偵測的方法，建置完善的裂流資料庫，並透過與鄰近浮標站比較，統計裂流號發之波浪條件。

3.1 裂流數值模式

裂流主要是因地形不均下所產生的波流交互作用所導致的，故本研究在進行裂流模擬時，採用美國 VIMS 發展的 SCHISM 三為跨尺度海洋數值模式求解二維 Boussinesq 以解析淺水方程，耦合第三代波浪數值模式 WWM-III(Wind Wave Model)，並採用非結構線性網格進行模擬。

3.1.1 波浪模式

本研究分析近岸波場以 WWM-III 模式進行模擬，求解之波浪作用立平行方程式如下(1):

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_x \left(\hat{c}_x \dots \right) + \nabla_\theta \left(\hat{c}_\theta \dots \right) \quad (1)$$

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。

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_m)、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

$$\frac{DN}{Dt} = S_{tot} = S_m + S_{nl4} + S_{ds} + S_{nl3} + S_{br} + S_{bf} \quad (2)$$

3.1.2 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)：

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + F \quad (3)$$

而 SCHISM 所使用的控制方程式是在笛卡爾座標系

統下符合靜水壓假設，藉此表示三維雷諾平均 Navier-Stokes 方程，目的為計算流場之渦流現象。公式(6)中的 F 可由下式所得：

$$F = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - f k \times u - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_A + \alpha g \nabla \varphi + R_s \quad (4)$$

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)、 ν 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：

$$\nabla \cdot u + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

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：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} u dz = 0 \quad (6)$$

SCHISM 模式在進行波浪耦合數值模式計算以有限元素法 (Finite-Element methods, FEM) 進行數值解析，會先計算 WWM-III 風浪模式所產生之算輻射應力，再將波浪引起的表面動量傳遞至流體水動力模式，進而再次計算流場和水位，確保準確的考慮到波流交互作用下之情形。

3.1.3 模式設置

本研究選址宜蘭縣外澳沙灘進行數值模擬，該範圍垂直外澳沙灘往外海延伸約 25 公里，沿岸方向由北至南約 30 公里的範圍，模擬時間為 2019 年 7 月 21 至 2019 年 8 月 20 一個月的時間。在往格設置上考量運算效率以及裂流尺度大小，採用非矩形槽狀網格，在沿岸區域網格設定為 10 公尺×10 公尺，採用的地形資料為水產規劃試驗所提供之 10 公尺解析度資料，而外海地區則採用科技部海洋資料庫 200 公尺解析度的水深資料設置為 1.0° (如圖 2)；而在垂直網格上基於水平網格給定之深度設置 20-30 層之混和 S 網格，以及混和曲率為 1×10^{-6} 之 Z 網格。

在邊界波浪條件使用 WAVEWATCH III(WW III)所計算的大網格解析度波浪場以內插方式代入模式，空間解析度為 0.15°，時間解析度為 1 小時；而潮汐邊界採用 FES(Finite Element Solution)模式於 2014-2016 年計算的 8 個分潮(K1、P1、O1、Q1、

S2、M2、N2 和 K2)，並將分析結果與鄰近潮位站相比針對平均水位和潮汐相位進行微調；而氣象條件則採用氣象預測系統第二代 (Climate Forecast System Version 2, CFSv2)所計算的全球大氣資料，包括風速(velocity)、短波輻射(Short radiation)、長波輻射(Long radiation)、氣壓(pressure)、濕度(Humidity)和降雨量(precipitation)。

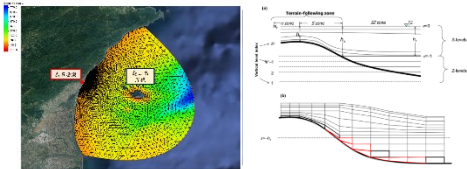


圖 2 宜蘭外澳海岸 SCHISM 模式計算網格 (左.水平網格、右.垂直網格)

另，為探討不同海氣象條件下裂流發生之情形，本研究採用 JONSWAP 能譜代入不同波高條件 (0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m 和 3.0m)和風速(3 級風、5 級風和 7 級風)作為初始邊界條件進行 WWM-III 數值波浪場的模擬，潮汐邊界和風速已外的氣象條件同上述採用 FES 模式和 CFSv2 模式全球模式運算之結果。每組條件的模擬時間均設定為一個禮拜，最後每一小時輸出一筆資料，探討在不同波高和風速條件下裂流發生的情形，藉以評估裂流發生時之海氣象條件。

3.2 影像邊緣化偵測

現有衛星與攝影機影像量過於龐大，為此本研究建置一套人工半自動化系統進行判讀判讀，將衛星影像進行數位處理，量化為可用的資訊，該系統以「小波轉化邊緣化偵測法」作為核心，再搭配多種影像處理，包含影像灰階、影像強化、影像二值化、中值濾波等技術，概略挑選出疑似裂流之影像案例，再經人為檢視判定是否有裂流的發生。

本研究為增加裂流影像判定之可信度，參考 Maryan(2013)所提出之原則，以及 Wright and Short(1984)認為之裂流成因，以碎波帶斷裂處作為裂流判定之基礎上，再額外提出兩項原則

1. 裂流發生位置彼此間須大於 40 公尺
 2. 若無顯著的氣象災害(颱風，海嘯)造成嚴重的地形變遷，短時間內裂流應有復發之情形
- 本研究透過小波轉換邊緣化偵測進行碎波帶範

圍辨識該技術是將灰階影像視為一個二維訊號矩陣 $f(x, y)$ ，利用快速傅立葉轉換 (FFT) 和逆二維快速傅立葉轉換演算法計算其 $F(\alpha, \beta)$ 的傅立葉轉換和小波轉換 $Wf(\zeta, s)$ ，其二維小波轉換定義為

$$\begin{aligned}
 Wf(\zeta, s) &= \left\langle f(x), \psi_{\zeta, s}(\cdot) \right\rangle \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{\zeta, s}(\cdot) dx dy \\
 &= Wf(\zeta, \eta, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) - \psi \left(\frac{\cdot}{s} \right) dx dy
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

並利用二維迴旋定理可將影像的二維小波轉換表示為與二維迴旋積分，並由共軛複數性可得到，並從中取出逆二維傅立葉轉換，將去除係數等於 0 之結果便可獲得邊緣偵測之結果，表示為

$$\begin{aligned}
 \Psi_{\zeta, s}(\cdot, \cdot, \beta) &= F_{\alpha}^{-1} F_{\beta}^{-1} \{F_x F_y [Wf(\zeta, s)]\} \\
 &= \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha) s \Psi(s\alpha) \exp(i\alpha\zeta) \exp(i\beta\eta) d\alpha d\beta
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

利用上述所提及之理論，針對衛星航拍影像進行五次影像邊緣畫偵測，於第二次疊代結果可準確的辨識出碎波帶的範圍，同時可以初步辨識出碎波帶是否有斷裂。最後，本研究挑選 30 筆以人工辨識之裂流影像資料，將裂流出現位置附近影像進行分群並計算其特徵值，置三種不同大小之「裂流影像遮罩視窗」(30×30、40×40 和 50×50)，將裂流影像遮罩以每 15 度選轉一圈，針對邊緣化偵測影像比對，若比對結果程度大於 0.8 時，將該位置記錄且視為裂流發生之區域，本研究建立之半自動化裂流影像辨識系統過程如圖 3。

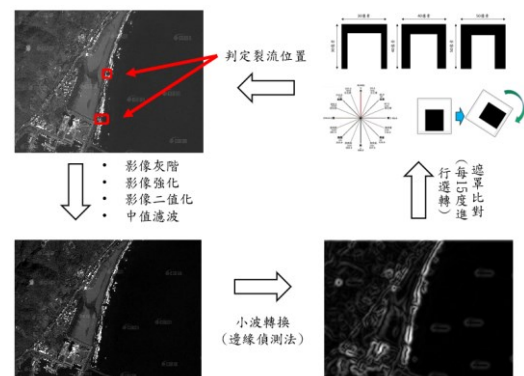


圖 3 半自動化裂流影像判釋流程圖

四、結果與討論

4.1 數值模式結果

4.1.1 模式驗證

本研究已於去年(2020年)完成裂流模式模擬建置，今年僅更改邊界條件帶入之方式，從原先以龜山島風場資料作為整個面的造波風場，改以帶入 CFSv2 全球模式預測風場資料內插帶入，故同先前研究，本研究採用龜山島資料浮標量測之波浪資料進行驗證。

由圖 4 結果顯示，其波高和週期模擬結果與時測資料趨勢相當一致，僅在颱風期間 8 月 8 日至 9 日模式有低估之情形，主要是由於輸入的為預測風場與實際風場有異所導致的，而週期的 RMSE 分別為 0.1315 和 0.2649。故表示該 SCHISM-WWM III 波流耦合模式可應用於外澳附近海域，重現近岸流場之演變。

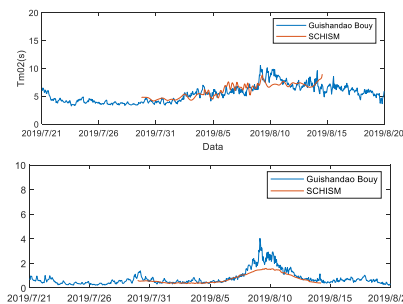


圖 4 SCHISM 模式模擬波浪參數與龜山島資料浮標實測之比對圖

4.1.2 裂流模擬

從過往對裂流文獻中，裂流的發生主要是由於波浪於近岸所產生之輻射應力所引致的，而風則是會影響到波浪的消散與成長，甚至在特定的時空環境下風更是可以牽引流場的變化。因此，本研究透過 SCHISM&WWM-III 模擬不同的波高與風速條件下，裂流的發生情形，並根據流速較大的範圍判斷其流向，若流向為遠離海岸則將其視為裂流。

從結果表 1 顯示，裂流的發生並非波浪愈大或釋風速愈大就會發生，而是有規則性的在一個區間內。從波高方面進行探討可發現，裂流發生時波高多屆於在 1.0 公尺-2.5 公尺間，在波高較小時(約小

於 0.5 公尺時)，近岸流場仍由潮流所主導，反之，當波高較大時(約 3.0 公尺時)，由於近岸波浪能量過大，使得近岸流場整體呈現相當混亂的情況，以無法明顯辨識出流場大致的方向(如圖 5)。而從風速結果進行探討，近岸流場受風趨流的影響並不大，風的作用主要是在於波浪成長上的影響，當波高較小時(約 0.5 公尺時)，在風速較大為 7 級風的情形下仍有短暫的裂流發生，而在波高為 2.5 公尺時，風速為 7 級風也會導致波浪能量過大，因而導致流場混亂情形。

表 1 不同海氣象條件裂流發生與否

	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
3 級風	X	X	O	O	O	O
5 級風	X	O	O	O	O	X
7 級風	O	O	O	O	X	X

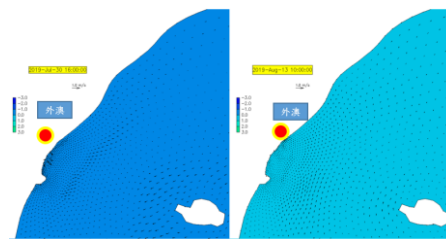


圖 5 不同海氣象條件近岸流場分布情形 (左:波高=3m7 級風、右:波高=0.5 公尺 3 級風)

4.2 影像辨識結果

4.2.1 結果驗證

本研究透過計算準確率和精確率，藉以檢視該系統是否能精準的判別是否有疑似裂流影像。結果如表 2 所示，由人工判釋 100 筆疑似裂流影像中，系統判釋有裂流的影像有 91 筆，無裂流影像有 9 筆；而人工判釋為平時影像，經系統判釋後有 22 筆是有裂流的影像，而 78 筆是沒有裂流的影像，故該系統之準確率為 84.5%，精確率則為 80.5%。

表 2 半自動化裂流影像辨識結果

	疑似裂流影像 (人工判識)	平時影像 (人工判識)
裂流影像 (系統判識)	91 筆/100 筆	9 筆/100 筆
一般影像 (系統判識)	22/100 筆	78/100 筆

該系統可大致將裂流影像擷取出來，然而精確率有較低的情形，顯示該系統在判定裂流上有高估

之情況。另，本研究挑選 20 個裂流影像案例進行分析，由圖 6 顯示該系統僅能針對較明顯之碎波帶區域進行辨識。然上述兩不足處均可藉由半自動化分析後，由人工方式檢視進行補足，故本研究認為該系統已可達到作業化程度，大幅降低影像分析所需之時間和人力。

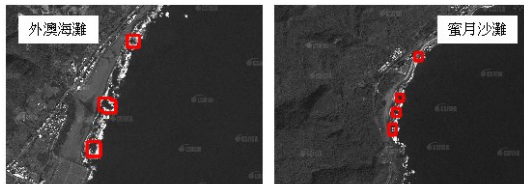


圖 6 半自動化裂流影像判釋結果

4.2.2 裂流發生時之海氣象特性

目前本研究以從現有影像資料庫中分析五年以上(2016年至2018年)的影像裂流案例，主要探勘範圍為台灣東北角海域和西南部海域，資料來源為中央大學太遙中心和Google Earth衛星航拍影像，共計432筆資料、34處海灘，包含外澳沙灘、蜜月灣、福隆沙灘、黃金海岸等著名遊憩景點。為了解該些裂流影像案例發生當下之海氣象條件，本研究參考Cavaleri et al.(2012)的研究成果，以浮標位置 25公里內之海氣象特徵，均以該浮標資料作為代表，經統計結果顯示，示性波高和週期較有明顯的規律性，當波高介於0.5m-1.5m的案例有131件佔約86%，裂流案例發生時之示性波高整體平均約為0.96m(如圖10)，而平均週期則位於4.5秒至7.5秒間，尖峰周期則位於6秒至10秒(如圖7)。

此外，本研究亦分析風向波向差，發現有 5 例以上的案例兩方向差達 140 度，該現象本研究認為是由於風浪關係和風趨流成長關係有所抵觸所造成的，風會造成波能的增加使得輻射應力更加明顯，然風亦會產生風趨流，使得原本應向外海流的流廠受到阻礙，因而使得離岸流的現象減弱。

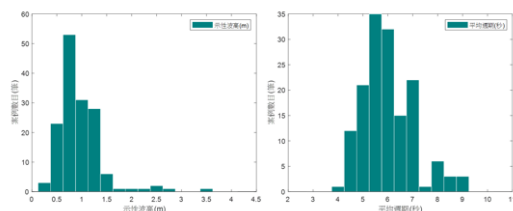


圖 7 裂流發生時波高與週期分布圖(左:波高分布圖、右:週期分布圖)

五、結論與建議

本研究利用 SCHISM&WWM-III 波流耦合模式模擬不同海氣象條件近岸流場分布情形，以及建置一套半自動化裂流影像辨識系統，蒐集完善的裂流影像資料庫，透過上述兩方法分析裂流發生時之海氣象特性。綜上所述，本研究認為在有裂流潛勢的地形下，波高、週期和風速是主要發生裂流的原因，當波高介於 0.5m-1.5m 和週期介於 4.5 秒-7.5 秒間是最容易發生裂流的條件，且當波高越大裂流的現象會愈加明顯，然在波高大於 3 公尺時會因為近岸流場的混亂使得裂流現象的消失，而風速在適當增加波能的情況下亦會造成裂流的發生，若風速過大則會導致使得海流獸風趨流所主導，則亦可能造成裂流的現象消失。

謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「海岸裂流監測與預警技術研究(1/3)」之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. 1964. Radiation Stresses in Water Waves; A Physical Discussion, with Applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 11(4): 529-562.
2. Wright, L.D., and A.D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surfzone and beaches : a synthesis. Marine Geology, 56, 93-118.
3. 林雪美、黃翊翔、沈淑敏，2009，台灣東北部福隆海灘類型和裂流分布之長期變動研究，第十期地理研究，第 47-65 頁。
4. 王敘民、邱啟敏、梁立翰、董東璟(2020) 應用 SCHISM 模式模擬裂流時空分布，第 42 屆海洋工程研討會，國立臺灣海洋大學。