

應用 SCHISM 探討台南海域 三維海流之演變

邱啓敏¹ 黃清哲² 范揚洺³ 張應龍⁴

¹國立成功大學近海水文中心計畫專員

²國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

³國立成功大學近海水文中心計畫經理

⁴美國維吉尼亞海洋研究所教授

摘要

臺灣四周海域水深地形變化複雜，尤其在西南海域位於高屏海底峽谷上游，因受水深地形影響可能導致海流流速變大。如海流流速達 1 m/s，就有能力搬運海床上的砂質物質，海底底床即有可能被侵蝕。為探討臺灣西南海域海流之變化趨勢，本研究應用三維跨尺度海洋數值模式 SCHISM 進行預測台南海域海流的變化趨勢，並收集 ADCP 實測的剖面海流資料進行驗證，其結果顯示 SCHISM 模式預測的三維海流變化趨勢與 ADCP 實測的剖面海流非常一致。另外，值得一提的是台南外海離岸 8 km 水深近 50 m 實測與預測結果皆顯示海流流速有大於 1.0 m/s，此結果表示台南海域海底底床有淘刷與侵蝕的情形。

關鍵詞：SCHISM、ADCP、剖面海流、台南海域

Prediction of Three-Dimensional Ocean Current in Tainan Waters using SCHISM

Chi-Min Chiu Ching-Jer Huang* Yang-Ming Fan Yinglong Joseph Zhang

* Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University
Director, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Strong currents are found on the complex ocean bathymetry around Taiwan, especially off the southwestern coast in the upstream of Kaoping Submarine Canyon. Previous study showed an ocean current exceeding 1 m/s has the potential of transporting sandy materials and causing seabed erosion. In this study, we applied a 3D cross-scale ocean model SCHISM to explore the spatial and temporal variations of the currents off Taiwan's southwestern coast. ADCP current-profiles were collected to verify the model. The simulated 3D ocean currents were in accord with the measured ADCP current-profiles. In particular, at the submarine canyon about 8 km off the Tainan coast and 50 m deep, the measured and predicted near-bottom velocities are both greater than 1.0 m/s, indicating the possibility of seabed erosion.

Keywords: SCHISM、ADCP、Current-profile、Tainan Waters

一、前言

臺灣西南沿岸與澎湖群島之間的海谷呈現南北走向，長約 100 km，寬為 3 km 至 6 km，谷深在 40 m

至 200 m 之間，北高南低與南寬北窄的形狀。當臺灣西南沿岸漲潮時，南海的海水由南向北流，經澎湖水道進入臺灣海峽，於夏季期間受到季風及海底地形的效應影響，在水深 50 m 處海流流速可達 1 m/s

(Huang and Yu, 2003)。如海流流速超過 1 m/s 即有能力搬運海床上的砂質物質(Liao et al., 2008)，且臺灣每年夏季常遭受颱風的侵襲，依據中央氣象局資料顯示侵臺颱風一半以上發生在 7 月至 9 月，而以 8 月最多。若侵臺颱風路徑屬於第 7 類，其路徑為沿臺灣西岸或臺灣海峽北上，此路徑颱風通過臺灣西南海域，會因強風引起的強勁海流會加劇近岸地區海底底床淘刷之影響範圍。葉等人(2012)曾利用國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心海研五號的船載多音束測深儀，進行高屏峽谷海底地形地貌的探測，研究高屏峽谷上游峽谷侵蝕與塌陷的狀況。林等人(2015)也應用資料浮標長期觀測海流資料，並分析海流特性，探討示臺灣西南海域海流的特性，同時亦能提供未來發展塌陷區域空間流場模擬之驗證。

海底淘刷會危及離岸風電基樁或是海底海管之施工與維護作業的安全，而要探討造成海底淘刷原因，需先瞭解近岸地區三維度空間海流流場之演變，才能進一步分析海底渦流與淘刷形成的機制。有鑑於此，本研究採用美國 VIMS 發展的 SCHISM 三維跨尺度海洋數值模式，進行預測夏季期間台南海域三維時序列海流之演變，來探討台南海域海流之變化特性。

二、研究方法

本研究在海洋流體動力數值模式採用美國 VIMS 發展的 SCHISM 三維跨尺度海洋數值模式，SCHISM 模式 (2014 年 12 月 13 日前稱為 SELFE; Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model) 是由 Zhang and Baptista (2008) 以 ELCIRC 模式基礎修改而成，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數值模式。SCHISM 模式的基本控制方程式有連續與動量守恆方程式，為簡化 SCHISM 模式的方程式，假設流體為不可壓縮，在卡氏座標下水體的連續方程式 (continuity equation)、自由液面運動方程式、及動量方程式可分別寫為

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

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

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

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

鹽度及溫度傳遞擴散方程式可分別寫為

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

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho_s C_p} + F_t \quad (5)$$

以上方程式中符號標記說明如下：

(x,y): 水平卡式座標(m); z: 垂直座標, 向上為正(m);
 ∇ : $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$; $\eta(x,y,t)$: 自由液面高度(m);
 $h(x,y)$: 水深(m); $\mathbf{u}(x,y,z,t)$: 水平速度向量, 於卡式座標速度分量為 (u,v) ($m s^{-1}$); w : 垂直速度 (m/s); f : 科氏力參數 (s^{-1}); g : 重力加速度 ($m s^{-2}$); $\psi(\phi, \lambda)$: 地球潮汐位能 (m); α : 有效地球彈性因子 (= 0.69); ρ_0 : 水密度為 1,025 ($kg m^{-3}$); P_A : 自由液面的大氣壓力 ($N m^{-2}$); S,T: 水中鹽度 (practical salinity units, (psu))與溫度 ($^{\circ}C$); ν : 垂直渦流黏滯係數, ($m^2 s^{-1}$); μ : 水平渦流黏滯係數 ($m^2 s^{-1}$); κ : 鹽度與熱通量垂直渦流擴散係數或熱通量垂直渦流擴散係數 ($m^2 s^{-1}$); F_s, F_t : 水平擴散及質量之來源及耗損 (source and sink) 項; \dot{Q} : 太陽輻射的吸收率 ($W m^2$); C_p : 水的比熱 ($J kg^{-1} K^{-1}$)。

SCHISM 模式系統有考慮海氣交互作用 (Air-sea exchange), 並與 WWM-III 波浪模式結合, 來提昇近岸及河口流體動力現象預測的精度。SCHISM 模式在水平網格座標系統可結合非矩型與矩形網格, 因應不同計算需求能選用卡式或球面座標系統; 垂直網格可採用 SZ (Hybrid SZ coordinates) 及 LSC² (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cell) 的座標系統, 其中陡變地形是許多海洋數值模式一項重要的挑戰, 地形的陡變會造成壓力梯度變化劇烈, 在海洋數值模式計算中會產生偽流 (spurious flow) 的問題 (Zhang et al., 2015), 而 LSC² 座標系統即針對水域中地形陡變變化而發展一個新的數值方法, 可有效避免因地形陡變產生偽流的計算誤差。

本研究以 SCHISM 模式, 進行預測 2016 年夏季台南海域三維時序列海流之演變, 並收集同時期

ADCP 量測的剖面海流進行驗證預測之海流，以先行掌握台南海域三維海流之變化趨勢，提供未來探討海底淘刷形成機制之重要參考依據。

三、台南海域海流預測與驗證

本研究以 SCHISM 模式預測台南外海 2016 年 7 月 28 日至 8 月 31 日三維時序列之海流，圖 1 為台南海域三維海流計算網格系統，水平座標系統採用有限元素非結構性三角形網格，外部開放邊界最大元素邊長約為 8,000 m，陸地及研究區域的最小元素邊長約為 20 m，總計共 111,614 個節點 (node)，共 217,786 個三角元素 (element)，垂直座標系統則採用 47 層的 LSC² 座標系統。另外收集成大近海水文中心於台南外海佈放之資料浮標，利用 ADCP 所量測之剖面海流資料進行驗證，ADCP 海流量測位置如圖 1 中 Buoy 箭頭標示處，圖中藍色點線為顯示斷面長度的水深與 LSC² 垂直座標系統。圖 2 為台南海域海流量測位置附近之斷面水深與 LSC² 垂直座標系統，圖中顯示由左邊岸邊往外海離岸 3,000 m 到 7,000 m 的範圍，水深地形變化較劇烈，故採用 LSC² 垂直座標系統來克服陡變的地形，避免因地形陡變產生偽流的計算誤差。

SCHISM 進行預測台南海域三維海流時，需先給定模擬計算區域在外海開放邊界的海表面水位，以及垂直剖面流速、海水溫度、海水鹽度等邊界資料，海洋邊界條件來自全球海洋數值模式 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)。海表面氣象資料如海表面氣壓場 (Pressure reduced to MSL)、海上 10m 高風場 (Wind field)、長波與短波輻射通量 (Downward longwave radiation flux、Downward shortwave radiation flux)、空氣的比濕度 (Specific humidity)、海表面的氣溫場 (Temperature)、降雨率 (Precipitation rate) 等，氣象邊界條件來自美國氣象局氣象預報系統 NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)。本研究案例也考慮波流的交互作用，波浪模式採用在 SCHISM 模式系統中已成功耦合的 WWM-III (Wind Wave Model-III) 波浪模式。結合上述海氣象與波浪資料，以 SCHISM 預測台南海域三維流體動力演變的時序列資料，此結果也會較符合真實海洋環境物理現象的演變。

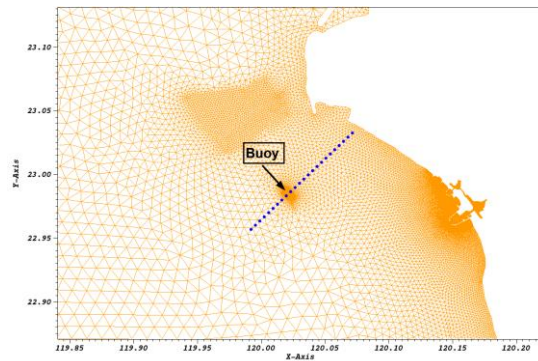


圖 1 建置台南海域三維海流計算網格系統

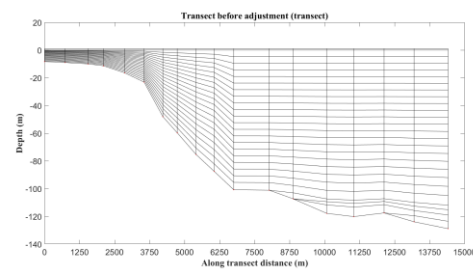


圖 2 台南海域海流量測位置附近斷面水深與 LSC² 垂直座標系統

圖 3 與圖 4 為 SCHISM 模式預測台南外海 2016/08/01 日漲退潮期間的海流流場變化趨勢，圖中浮標(Buoy)佈放位置與北邊區域海流呈現黑色部份，是因為要探討這些區域海流的特性，所以將計算網格細化而呈現的結果，漲潮期間海流流向沿著海岸往北北東方向流動，退潮期間海流流向沿著海岸往南南西方向流動，另外圖中的箭矢表示海流的流速與流向，色階則為顯示海水位的變化。圖 5 至圖 10 分別為 2016/07/29-08/06 台南外海水深 9 m 至 49 m 實測與預測海流 U 與 V 分量之比對與海表面水位之變化，由比對結果顯示，SCHISM 模式預測台南外海水深 9 m 至 49 m 的三維海流 U 與 V 分量變化趨勢與 ADCP 實測的結果非常一致，且由台南外海水深 9 m 至 49 m 實測與預測結果皆顯示海流 U 分量的速度較小，而實測海流 V 分量的速度較大。另外，為瞭解 SCHISM 模式預測海流結果與 ADCP 實測資料在時間序列上變化趨勢的線性相關程度，本研究採用相關係數來進行分析，相關係數的定義如下：

$$R = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n\sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (6)$$

其中 x 為實際值, y 為預測值。相關係數 R 其值範圍介於 -1 到 1 之間, 如果 R 值介於 0 到 1 之間則表示二組時序資料呈現正相關, 且 R 值越接近 1 則二組時序資料的相關性越強; 反之 R 值越接近 0 表示二組時序資料的相關性越弱; 如果 R 值介於 0 到 -1 之間則表示二組時序資料呈現負相關, 且 R 值越接近 -1 則二組時序資料的相關性越強。一般可將 R 值劃分為三級: $|R| < 0.4$ 為低度線性相關 (Modestly correlated); $0.4 \leq |R| < 0.7$ 為中度線性相關 (Moderately correlated); $0.7 \leq |R| < 1$ 為高度線性相關 (Highly correlated)。同時也採用均方根誤差 (Root Mean Square Error) 來檢視實測與預測海流 U 與 V 分量之差異。

圖 11 至圖 19 分別為 2016/07/29-08/06 台南外海水深 9 m 至 49 m 實測與預測海流 U 與 V 分量之相關係數之比較, 表 1 與表 2 分別為 2016/07/29-08/06 台南外海水深 9 m 至 49 m 實測與預測海流 U 與 V 分量之相關係數與均方根誤差之比較, 由圖 11 至圖 19 及表 1 與表 2 中資料可看出, 水深 9 m 至 49 m 海流 U 分量介於 $0.4 \leq |R| < 0.7$, 屬於中度線性相關; 水深 9 m 至 49 m 海流 V 分量介於 $0.7 \leq |R| < 1$, 屬於高度線性相關。另外, 由均方根誤差統計結果得知, 水深 9 m 至 49 m 海流 U 分量的均方根誤差介於 0.20 m/s 至 0.29 m/s, 可見 U 分量的均方根誤差變化差異不大, U 分量速度變化幅度約 1.5 m/s, 其實測與預測誤差則介於 15% 至 19%; 水深 9 m 至 49 m 海流 V 分量的均方根誤差介於 0.22 m/s 至 0.44 m/s, 而 V 分量的均方根誤差雖隨著水深而略為增加, 但 V 分量速度變化幅度約 3.0 m/s, 其實測與預測誤差則介於 7% 至 15%。

綜合上述結果, 由圖 3 及圖 4 圖顯示台南外海海流漲潮時往北北東方向流動, 退潮時往南南西方向流動, 海流流動方向約平行於海岸線, 由此可見海流流速在垂直方向 V 分量的速度會較大。而圖 5 至圖 10 顯示 SCHISM 模式預測水深 9 m 至 49 m 海流 U 及 V 分量與 ADCP 實際量測的變化趨勢非常一致, 且海流 V 分量的速度明顯大於 U 分量, 此結果與圖 3 及圖 4 漲退潮海流變化趨勢一致。

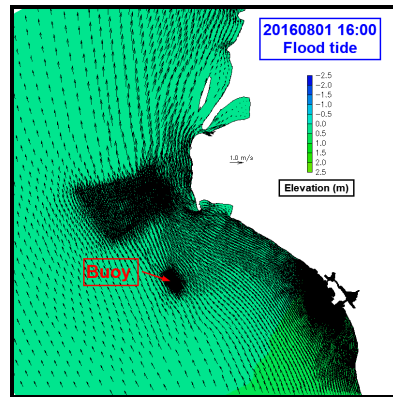


圖 3 2016/08/01 漲潮期間海流流場變化趨勢

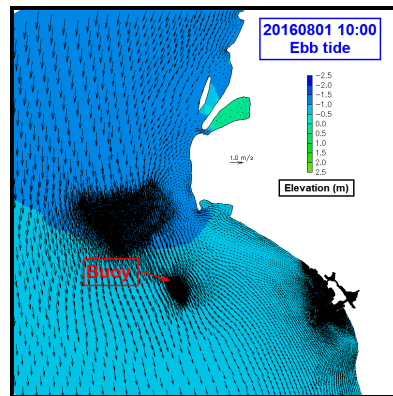


圖 4 2016/08/01 退潮期間海流流場變化趨勢

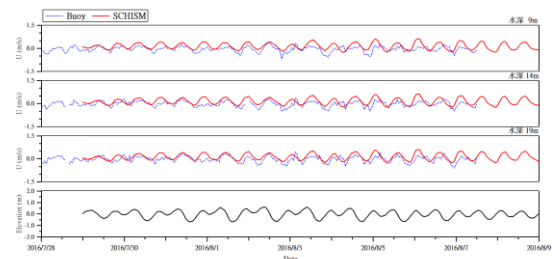


圖 5 2016/07/29-08/06 台南外海水深 9 m 至 19 m 實測與預測海流 U 分量之比對

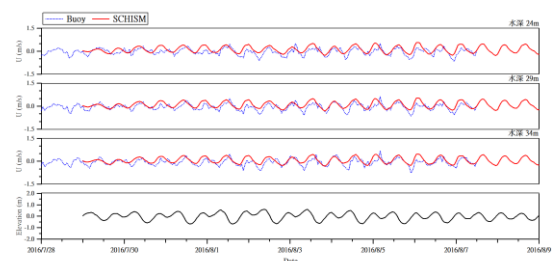


圖 6 2016/07/29-08/06 台南外海水深 24 m 至 34 m 實測與預測海流 U 分量之比對

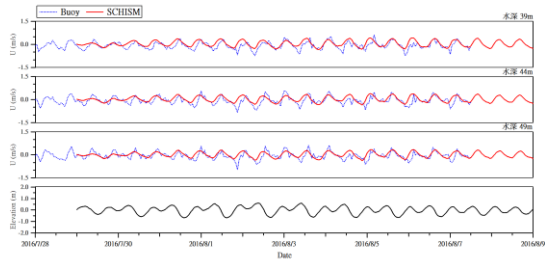


圖 7 2016/07/29-08/06 台南外海水深 39 m 至 49 m 實測與預測海流 U 分量之比對

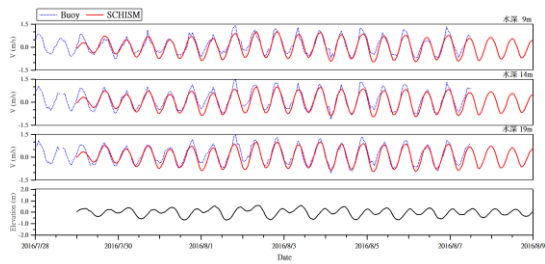


圖 8 2016/07/29-08/06 台南外海水深 9 m 至 19 m 實測與預測海流 V 分量之比對

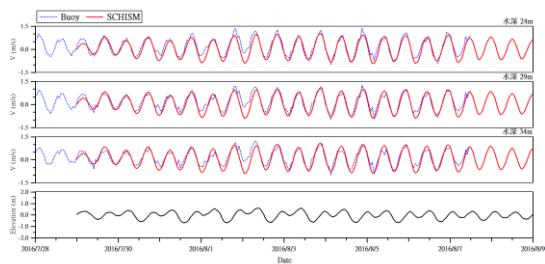


圖 9 2016/07/29-08/06 台南外海水深 24 m 至 34 m 實測與預測海流 V 分量之比對

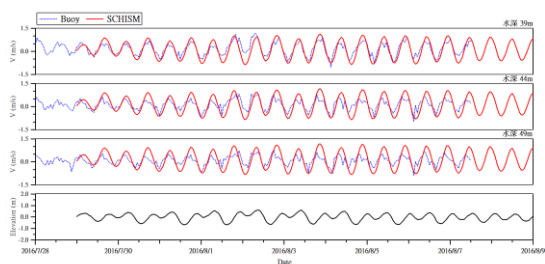


圖 10 2016/07/29-08/06 台南外海水深 39 m 至 49 m 實測與預測海流 V 分量之比對

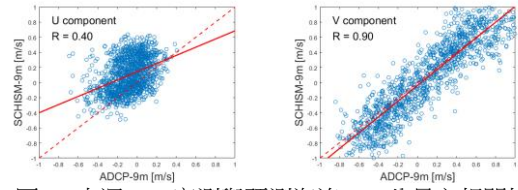


圖 11 水深 9 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

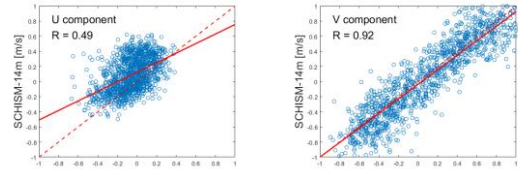


圖 12 水深 14 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

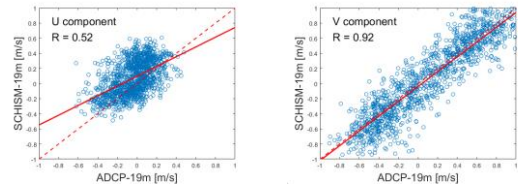


圖 13 水深 19 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

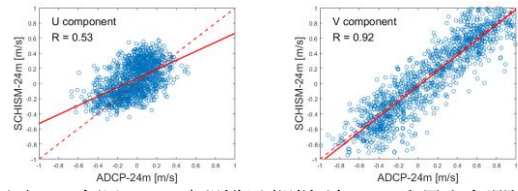


圖 14 水深 24 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

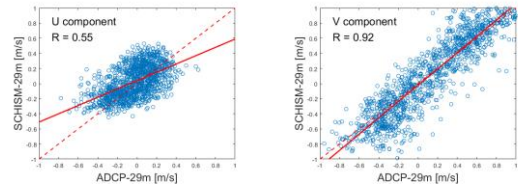


圖 15 水深 29 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

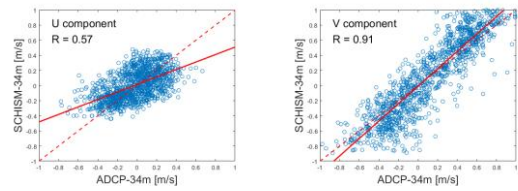


圖 16 水深 34 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

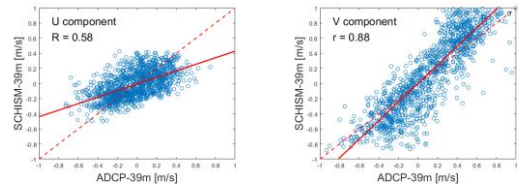


圖 17 水深 39 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

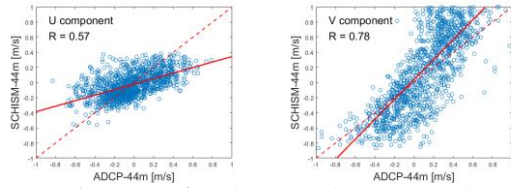


圖 18 水深 44 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

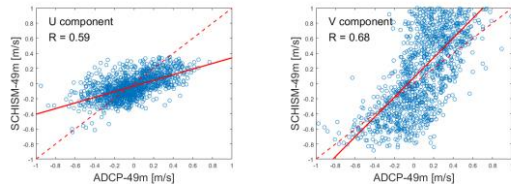


圖 19 水深 49 m 實測與預測海流 UV 分量之相關性

表 1 台南外海實測與預測海流 U 分量統計分析結果

水深 (m)	相關係數 (R)	RMSE (m/s)
9	0.40	0.29
14	0.49	0.25
19	0.52	0.23
24	0.53	0.22
29	0.55	0.20
34	0.57	0.20
39	0.58	0.20
44	0.57	0.21
49	0.59	0.20

表 2 台南外海實測與預測海流 V 分量統計分析結果

水深 (m)	相關係數 (R)	RMSE (m/s)
9	0.90	0.24
14	0.92	0.23
19	0.92	0.22
24	0.92	0.22
29	0.92	0.23
34	0.91	0.25
39	0.88	0.28
44	0.78	0.38
49	0.68	0.44

四、結論與建議

依據 SCHISM 模式預測台南海域三維海流的結果顯示，台南海域海流漲潮時往北北東方向流動，退潮時往南南西方向流動，海流流動方向約平行於海岸線，且 2016/07/29-08/06 期間水深 9 m 至 49 m 的 SCHISM 模式預測之海流 U 及 V 分量時序列的變化趨勢與 ADCP 實測結果非常一致。另外，值得一提的是台南外海離岸 8 km 水深近 50 m 的海流變化趨勢與實測結果也非常一致，且實測與預測海流結

果皆顯示海流流速有大於 1.0 m/s，此結果表示台南海域海底底床有淘刷與侵蝕的情形。

綜合上述結果，SCHISM 模式可應用預測臺灣西南海域三維海流的變化趨勢，預測結果可提供未來探討臺灣西南海域海底淘刷及侵蝕的形成機制，以及政府機關及相關單位在離岸風電基樁或是海底海管之施工與維護作業規劃之重要參考依據。

參考文獻

1. 林演斌、范揚洺、施孟憲、陳世宗、王耀貞、王松池、江郁芳、吳振文(2015)「臺灣西南海域海底海流特性」，第 37 屆海洋工程研討會論文集，第 535-539 頁。
2. 葉一慶、沈宗甫、劉紹勇、楊益、郭芳旭(2012)「高屏峽谷上游海底地形測繪與海床崩塌區域初探」，國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心。
3. Huang, Z. Y., & Yu, H. S. (2003). Morphology and geologic implications of Penghu Channel off southwest Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 14(4), 469-485.
4. Liao, H. R., Yu, H. S., & Su, C. C. (2008). Morphology and sedimentation of sand bodies in the tidal shelf sea of eastern Taiwan Strait. *Marine Geology*, 248(3-4), 161-178.
5. Zhang, Y., Ateljevich, E., Yu, H.C., Wu, C.H., and Yu, J.C.S. (2015). A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. *Ocean Modelling*, 85, 16-31.