

颱風過程對東澳嶺海岸沖積扇地貌變遷之影響探討

周憲德^{[1]*} 陳大煒^[2] 李璟芳^[3] 臧效義^[4] 黃邗軒^[5]

摘要 本文以現地調查、水下測量、影像分析及數值模擬探討東澳嶺崩塌及海岸沖積扇於 2009-2022 間的地貌演變與歷次颱風歷程之關係。內容包含降雨與崩塌面積之關係、人為工程效應、海岸沖積扇面積之潮位校正，並以 2015 年天鵝颱風為案例進行颱風路徑及強度對風浪及漂砂之情境模擬。本文建立降雨量與東澳嶺邊坡崩塌及崩塌面積之關係，經由各期沖積扇影像之潮位修正，合理反映東北季風及颱風對沖積扇灘線的沖蝕效應。單一颱風事件的風浪造成的扇端沖蝕面積超過整季東北季風的作用。造成沖積扇面積增加之颱風，主要為有效降雨量誘發邊坡崩塌而與颱風路徑關係較不明顯。造成沖積扇侵蝕之颱風主要為風速大，降雨量較少且其路徑大多由台灣東北部外海掠過並往日本方向行進（第六類型），導致沖積扇面積率退之啟動小時平均風速約為 135 km/hr。2015 年天鵝颱風期間沖積扇附近海域的風浪及漂砂模擬顯示在湧浪與風暴區間有明顯近岸流，流向由東向西，故陸域灘線易受波浪侵蝕而退縮，被侵蝕的土砂量則以離岸流回補至較深海域，或在西南向沿岸流作用下，向西南側及外海方向移動。2015 年天鵝颱風的風浪模擬歷程顯示在湧浪及風暴區間，近岸流場呈現由東向西的流向，尤其在沖積扇面對東南方的波浪入射產生的近岸流，並往沖積扇西南西方向流出。湧浪作用導致漂砂往內陸堆疊，而風浪作用則逐漸將漂砂沉積物帶往西南側及外海。2012-2022 間沖積扇受颱風之風湧浪溯升造成之淘刷，灘線向陸退縮，近域海床侵蝕範圍為東南到南向，此區域之海床高程已接近沖積扇形成前之原海床高程。東澳嶺海岸沖積扇面積之控制因素，已由早期降雨崩塌提供扇頂料源，經邊坡及溝床保護工法之調節作用，轉為由扇端之風浪侵蝕作用主導。本文定量分析降雨引致邊坡崩塌，及颱風過程對海岸沖積扇之地形演變作用，成果可供坡地災害評估及海岸防減災規劃之參考依據。

關鍵詞： 颱風、崩塌、風浪、地貌變遷、海岸沖積扇。

Morphological Response of a Coastal Alluvial Fan to Typhoons in Northeastern Taiwan

Hsien-Ter Chou ^{[1]*} Da-Wei Chen ^[2] Ching-Fang Lee ^[3] Shiao-Yih Tzang ^[4]
Tse-Hsuan Hwang ^[1]

ABSTRACT This study investigated the geomorphological evolution of the Donao coastal alluvial fan between 2009 and 2022 and its associations with typhoon events through field surveys, underwater measurements, image analysis, and numerical modeling. Specifically, the associations of wave-induced erosion of the coastal alluvial fan area with rainfall, landslide area, and tidal correction were explored. The typhoon paths and intensities during Typhoon Goni (2015) were simulated to investigate their effects on wind waves and sediment transport. From 2009 to 2013, the shoreline prograded due to typhoons associated with rainfall-induced landslides. Conversely, the shoreline retreated during typhoons characterized by low rainfall and hourly wind speeds exceeding 135 km/h. These typhoons generally tracked over the offshore waters of northeastern Taiwan and moved toward Japan (Type VI). Therefore, shoreline retreat during a single intense typhoon can outweigh the seasonal effect of the northeast monsoon. Numerical modeling was performed to investigate sediment transport trends in the study area during Typhoon Goni (2015). The results revealed the development of strong nearshore currents under both swell and storm conditions, with a dominant east-to-west flow. The simulations indicate that the beach zone (approximately 1 to 3 m in elevation) is highly susceptible to erosion due

[1] 國立中央大學土木工程學系
Department of Civil Engineering, National Central University, Taiwan, R.O.C.
[2] 金揚科技工程顧問有限公司
Axesea Technology and Engineering Consulting Limited Company, Taiwan, R.O.C.
[3] 創聚環境管理顧問股份有限公司
Innofusion Environmental Management Co. Ltd., Taiwan, R.O.C.
[4] 國立臺灣海洋大學 河海工程學系
Dept. of River & Harbor Engineering, National Taiwan Ocean University, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail: profhtchou@gmail.com

to large breaking waves. High-velocity alongshore currents transport and deposit sediments southwestward and offshore. Over the study period, the dominant control on the coastal alluvial fan shifted from early rainfall-induced landslides supplying sediment at the fan apex to wind-wave erosion at the fan skirt due to changes in mitigation measures. In summary, this study elucidated how the coastal alluvial fan evolves during typhoons and how this process relates to rainfall-induced landslides, offering guidance for slope-land disaster prevention and coastal hazard mitigation.

Key Words: typhoon, landslide, wind wave, morphological response, costal alluvial fan

一、前言

因東北季風的共伴效應，東澳山區在梅姬颱風期間(2010/10/19-2010/10/21)的累積雨量達939 mm。2010/10/21中午過後，蘇花公路(台九線)東澳嶺段大坑橋(115.9K)所橫跨的野溪(以下稱大坑溪)，其上游源頭邊坡及兩側道路邊坡(台九線115.7K-161.1K)在強降雨中發生大規模崩塌，崩落土方量達210萬m³。崩落土體伴隨逕流沿大坑溪下移，並在谷口產生一高達32m、水上面積為49,040m²的海岸沖積扇(圖1)。梅姬颱風時東澳嶺的大規模崩塌是源於前一年芭瑪颱風(2009/10/05)崩塌地之溯源侵蝕過程，而2010年後東澳嶺後續坡面崩塌大多沿既有崩塌地坡頂的弧型張力裂隙發展(Chou et al., 2017)。大坑橋二側下邊坡路基的後退式崩滑災害則與溪流沖蝕坡趾及剪裂帶生成有關。東澳嶺崩塌地之裂隙位態大致與區域地質構造位態(N70°W)相近，說明本區域大規模崩塌主要仍受地質條件主控(Lo et al., 2016)。大坑橋二側有斷層層及剪裂帶，且蝕溝溯源侵蝕及凹溝坡型亦為此崩塌地地貌變遷之重要影響因子(李璟芳等, 2014; Chou et al., 2017)。台九線此路段上、下邊坡之安全性評估，應針對此區域的地質條件進行更全面的調查，並考慮地震效應及強降雨的情境下坡體的穩定分析。

梅姬颱風之後的豪雨引致山崩事件持續提供土砂料源，以致大坑溪口的海岸沖積扇在蘇拉颱風(2012/08/12)後的面積達到77,828m²(圖2)。隨後於2013-2015進行道路邊坡保護工及大坑溪溝床整治(廖吳章等, 2015)，使得匯到谷口的土砂量變少；另一方面，沖積扇端則受颱風及東北季風的風浪淘蝕，故扇面積呈逐年向陸遞減的趨勢，2021年-2022年陸上扇面積約為20,000-24,000m²(圖2)，小於2012年最大面積的1/3。故海岸沖積扇之地貌特性因集水區地文條件、颱風歷程、海象條件(波浪及潮汐)及人為工程施作的內容及規模而有不同演化歷程。前人對於海岸沖積扇之致災分析多著重於降雨引致土石流與沖積扇致災規模或粒徑組成之研究(Larsen et al., 2002)，然而案例調查如忽略扇端長期風浪對沖積扇的淘蝕作用，容易導致低估沖積扇之最大規模或甚而忽略其發生潛勢，進而提高致災風險。

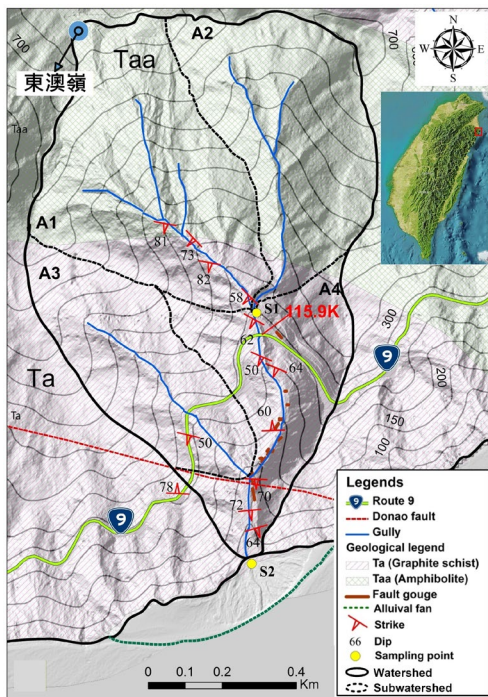


圖1 東澳嶺沖積扇及大坑溪集水區地質圖(台9線115.9K)
Fig.1 The Don-Ao peak coastal alluvial fan and the geological setting of Daken drainage area (115.9K of Route 9)

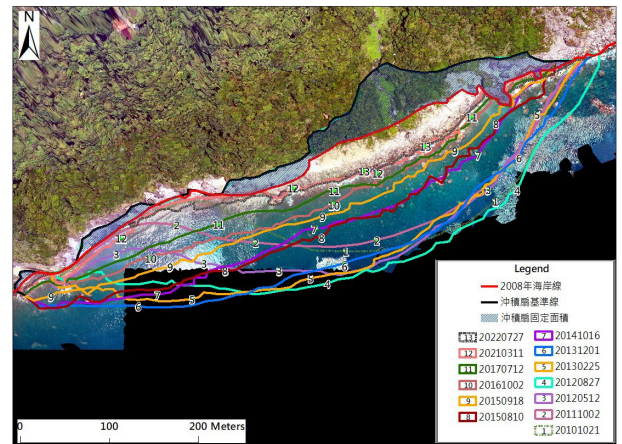


圖2 各期重大變化之颱風暨降雨事件沖積扇濱線變化(底圖為20220727 UAV正射影像)

Fig.2 Coastal shoreline changes of the alluvial fan associated with major typhoon and rainfall events during different periods (base image: UAV orthophoto acquired on 27 July 2022)

東澳嶺海岸沖積扇的形成與消長演變歷程，是探討自然營力及人為工程對海岸集水區地貌動態影響的一極佳案例，故本文針對東澳嶺海岸沖積扇2009-2022年間的地形演變與歷次颱風歷程之關係進行分析。因各期衛星影像拍攝時間之潮位高程不同，會影響水面上的沖積扇面積。漲潮時拍攝沖積扇面積減少，反之退潮時沖積扇面積增加。故本文修正各期影像以平均海平面的沖積扇面積進行比較，並以數值模式探討天鵝颱風歷程及行徑所產生風浪對海底地貌及漂砂之效應。另針對颱風之路徑及強度對東澳嶺海岸沖積扇沖淤效應進行分析。本文定量分析颱風過程之降雨引致邊坡崩塌之規模，東澳嶺海岸沖積扇之地貌演變過程、人為工程施作及

風浪對海岸沖積扇之侵蝕作用,故研究成果可供坡地災害監測及海岸防減災規劃之參考。

二、研究區概述與遙測影像蒐集分析

1. 地理與地質概述

本研究區域為大坑溪集水區及其谷口的海岸沖積扇,位於宜蘭縣蘇澳鎮境內東南側(圖1),西與中央山脈接壤,東臨太平洋。台9線位處海岸山麓東側,山勢陡峭且路線蜿蜒,本研究範圍介於台9線115.8-116.4K之間,道路線平均高程介於海拔220-280m。東澳嶺最高點標高為795m,與太平洋距離僅有1.2km,屬於陡降地形(坡度多於30°)。大坑溪谷口以上的集水面積為0.986km²,而根據中央地質調查所五萬分之一臺灣區域地質圖-蘇澳及南澳圖幅資料顯示(林啟文等,2009),上游崩塌地屬於東澳片岩中的角閃岩出露區域,其位態約為北偏西45度、南傾65度,其坡向大致向西南。該處角閃岩強度甚高(單壓強度約700kg/cm²),RMR分級為III級(坡地環境地質資料庫查詢系統資訊網,中央地質調查所),但因其風化程度較高,屬極破碎之地質材料。地質圖中顯示東澳斷層(存疑)通過116.7K及大坑溪下邊坡溪谷,本研究區位於中央地質調查所公告環境地質圖中岩崩滑與落石中潛勢區(坡地環境地質資料庫查詢系統資訊網,中央地質調查所),其中大坑溪上游流動段屬於東澳片岩中的石墨雲母片岩區(圖1)。下游河床兩側於2012年12月24日下邊坡崩塌後出露數條剪裂帶(圖1),本研究崩塌區內之風化片岩,常沿著葉理面受重力作用產生塊狀傾覆破壞或彎曲-塊狀傾覆破壞。岩坡破壞號發於岩性交界帶,強降雨所引起豐沛地表逕流與地下水滲流作用則為次要誘發因子。剪裂帶斷層泥採樣經物理試驗分析判釋為工程性不佳之低塑性黏土(李璟芳等,2014),其阻水特性影響上方邊坡之地形演育,故未來應持續監測坡體應變率變化以掌握豪雨事件時之崩塌潛勢。

2. 歷年工程治理

本區域在2010梅姬颱風災後的持久性坡地治理工程,包含大坑橋上游溪床之攔砂壩整建、台九線大坑橋改建及115.7-115.9K道路邊坡保護工程。道路上邊坡之工程內容為後退縮切山以增加路寬,並打設岩釘、型框植生及施作擋土牆,而道路下邊坡整治工法包含分階地錨、灌漿錨筋、RC格梁及型框植生或掛網噴混凝土護坡。溪底則設置潛壩與固床工以防溪床下切(廖吳章等,2015)。上述工程治理主要於2013-2015間施作,隨著邊坡及溪床的保護工程發揮成效,崩塌土砂及溪床料源逐漸受到控制,故在無重大新生崩塌的情況下,溪床穩定,谷口沖積扇頂的植生茂密,顯示沖積扇之陸上砂源日漸減少。

三、研究方法

大坑溪之源頭及兩側邊坡(台九線115.7K-161.1K)於

2010年梅姬颱風強降雨發生大規模崩塌並形成一海岸沖積扇(Chou et al., 2017)。沖積扇之料源來自豪雨所致山崩,此研究區域之地震雖頻繁且可使坡體強度變弱,但無具體資料可供參考,故地震效應不予考慮。降雨條件由根據中央氣象署蘇澳站、東澳及東澳嶺站等測站資料進行分析(Chou et al., 2017)。本文彙整此一海岸沖積扇歷年(2009-2022)的地貌演變歷程與颱風資料。本區域地貌資料分析係根據地面及空載光達(Riegl 620, Riegl LMS-Q600i,精度1m)、無人載具(UAV)空拍、中央大學太遙中心(CSRSR)所接收之衛星(型號FS-2, SPOT5, horizontal accuracy=1.5-5m)正射影像(各期影像空間解析度1.5-5m,如表1)並配合Google Earth的衛星影像以進行沖積扇面積繪製與計算。以扇頂為原點計算至扇緣距離,以釐清該沖積扇之變化主要受颱風降雨造成土砂匯入抑或扇緣受颱風湧浪淘蝕所控制,其成果如表1所示。潮位、風浪及風速資料以蘇澳港測站為主。平均半日潮差為1.1m,平均沿岸餘流為0.18m/s NNE。東北季風之顯著波高為1.3m,週期為8s;而觀測到的颱風巨浪可達6.6m,以西南向(SE)為主(港研中心,2013)。沖積扇海底地形根據1/50000海圖及三次船載水下聲納測量(2011/8/23, 2012/12/19及2021/05/24-25,精度1m)。崩塌事件及地貌特性之驗證由現地訪談及現場勘查而得。

1. 降雨引致崩塌分析

Chou et al. (2017)分析歐洲及中國的重大降雨引致土石流及崩塌案例,歸納其臨界降雨條件為事件之累積降雨量與年平均降雨量(mean annual precipitation (MAP))的比值大於0.1(Sanderson et al., 1996; Bacchini and Zannoni, 2003; Guzzetti et al., 2007 Tang et al., 2012)。東澳嶺2009-2013數次崩塌的有效累積雨量(Re(mm))與年平均雨量(MAP(mm))之比值介於5.4-15.7%,且發生崩塌的有效降雨強度(Ie=Re/D)與降雨延時D(hr)之關係滿足式(1a)或(1b)如下:

$$I_e = 98.8 D^{-0.54} \quad (1a)$$

$$\frac{I_e}{MAP} = 0.017 D^{-0.54} \quad (1b)$$

東澳嶺2009-2013間各崩塌案例所產生的新崩塌面積dA_i與降雨量Re、臨界降雨量門檻值R_c、集水面積A_d及年降雨量MAP的關係符合打荻公式(1971),如式(2)所示:

$$\frac{dA_i}{A_d} = K(R_e - R_c)^2 \quad (2a)$$

$$\frac{dA_i}{A_d} = 4.34 \left(\frac{R_e - R_c}{MAP} \right)^2 \quad (2b)$$

式(2a)中K值代表該坡地超過臨界降雨後的面積崩塌比係數((mm)²)。經2009-2014東澳嶺的崩塌案例資料可知,K=0.128 x 10⁻⁶, R_c=282mm(Chou et al., 2017)。東澳嶺海岸沖積扇面積A_f(包含水面上及水面以下面積)相對應於崩塌面積A_i與集水面積A_d之關係式如下:

$$\frac{A_f}{A_d} = 0.758 \left(\frac{A_i}{A_d} \right) - 0.00421 \quad (3)$$

式(3)的水面下之沖積扇面積係由船載聲納測得水下地形及堆積範圍決定(Chou et al., 2017)。上述崩塌量與沖積扇面積關係會因地域、崩塌材料及土砂運移歷程而改變。

Allen and Hovius (1998) 提出土石流或崩塌產生的小沖積扇面積與源頭面積之比例介於 0.1 - 0.2 間。洪水沖積扇則介於 0.2 - 0.4 間。東澳嶺沖積扇的扇面坡度為 8.9°，集水區險峻值 (Melton ratio) 為 0.8，可歸類為一活躍型沖積扇 (Melton's Group 1)(Melton, 1965)。由表 1 可知，颱風過程對沖積

扇之增加效應主要為降雨引致上邊坡崩塌，並經由渠道輸送土砂料源至沖積扇頂（此一過程需考慮人為保護工法對輸砂量的調節效應）；另一方面 颱風引起之風浪及湧浪則造成海岸沖積扇緣的侵蝕。二者之綜合效應決定一場颱風造成海岸沖積扇之淤積或沖蝕量。

表 1 東澳嶺沖積扇地形演變歷程

Table 1 Geomorphic evolution of the Dong'ao Ridge alluvial fan

Date	Area (m ²)	Event	Apex to edge (m)	WS Max. (m/s)	note
2009/10/5	-	2009/9/26~10/16 芭瑪颱風	-	15.2	-
2010/10/21	49,040	2010/10/14~10/23 梅姬颱風	214.5	12.3	-
2011/10/2	63,370	2011/9/30~10/10 奈格颱風	198.7	12.3	-
2012/5/12	65,920		218.0	-	-
2012/8/2	77,828	2012/6/16~21 泰利颱風, 2012/7/26~8/4 蘇拉颱風	255.4	泰利7.5 蘇拉14.8	-
2012/8/27	78,123	2012/8/17~30 天秤颱風	242.0	9.2	太遙 (2.5 m)
2012/9/11	80,335		245.3	-	太遙 (5 m)
2012/10/22	72,368	2012/9/18~10/1 杰拉華	214.3	9.4	太遙 (5 m)
2013/2/25	72,902	2012-2013 東北季風	214.3	-	太遙 (2.5 m)
2013/3/23	71,823		217.1	-	太遙 (2.5 m)
2013/8/19	78,837	2013/7/7~14 蘇力颱風	212.3	蘇力颱風16.4	自強公司
2013/12/1	76,479		212.6	東北季風	太遙 (2.5 m)
2014/2/17	70,299	2013-2014 東北季風	210.5	-	太遙 (1.5 m)
2014/7/9	69,869	2014/7/21~24 麥德姆颱風	203.5	20.7	太遙 (2.5 m)
2014/7/29	67,428		193.6	-	太遙 (5 m)
2014/9/30	61,104		195.7	-	太遙 (1.5 m)
2014/10/16	54,695	2014/10/7~13 黃蜂颱風	175.2	7.8	太遙 (2.5 m)
2014/12/31	54,490	2014/11/2~7 鸚鵡颱風	166.9	6	太遙 (2.5 m)
2015/2/14	53,455	2014-2015 東北季風	170.2	東北季風	太遙 (1.5 m)
2015/5/29	51,758		166.3	-	太遙 (1.5 m)
2015/8/10	55,441	2015/8/6~10 蘇迪勒颱風	172.4	31.6	太遙 (1.5 m)
2015/9/18	44,748	2015/8/20~24 天鵝颱風	146.2	7.2	太遙 (1.5 m)
2015/10/27	44,214	2015/9/27~30 杜鵑颱風	145.2	32.3	太遙 (1.5 m)
2016/7/20	41,137	2015-2016 東北季風	143.2	-	太遙 (1.5 m)
2016/10/2	36,954	2016/9/12~9/15 莫蘭蒂颱風, 2016/9/25~29 梅姬颱風	136.2	莫蘭蒂颱風12.5 梅姬颱風28.1	太遙 (1.5 m)
2017/6/29	33,482	2016-2017 東北季風, 2017/1/30~2/6 降雨	133.8	6.5	太遙 (1.5 m)
2017/7/12	33,378		130.3	-	太遙 (1.5 m)
2017/8/7	36,300	2017/7/28~30 尼莎颱風	136.3	25.1	太遙 (1.5 m)
2017/9/9	32,856	2017/8/20-9/12 泰利颱風	130.3	8.6	太遙 (1.5 m)
2017/11/26	31,818	2017/10/16-10/23 蘭恩颱風	128.8	9.9	太遙 (1.5 m)
2018/1/15	31,267	2017-2018 東北季風	127.9	東北季風	太遙 (1.5 m)
2018/11/11	27,415		-	-	google (2.5 m)
2019/11/23	29,942		-	-	google (2.5 m)
2020/6/22	27,953	2019-2020 東北季風	-	-	google (2.5 m)
2020/9/18	23,430	2020/8/31-9/9 海神颱風	111.3	8.1	太遙 (1.5 m)
2021/3/11	23,324		118.8	-	太遙 (1.5 m)
2021/7/3	22,406		-	-	google (2.5 m)
2021/9/9	19,610		111.2	-	中興社UAV
2022/7/27	24,303		118.4	-	本團隊UAV

2. 沖積扇潮位校正

由於各期衛星影像之空間解析度不同 (1.5-5 m, 如表 1 所示) 且因衛星拍攝角度之差異, 導致各期影像疊疊時產生水平誤差(2-8 m), 需進行局部特徵點對位校正後(根據 5-7 個以上地勢較平坦的參考點位), 方可進行東澳嶺沖積扇範圍之判釋。根據中央氣象署海象防災資訊中心提供的蘇澳港歷年潮位歷程資料 (2009-2022 年), 及各期衛星影像所拍攝時間, 可內插求得該影像時間之潮位高程 $\eta(\text{m})$, 而以沖積扇前緣平均坡度 ($\alpha=8.9^\circ$) 配合各期沖積扇弧長 $L(\text{m})$ 進行計算潮位影響沖積扇面之增減, 可得調整至潮位為零(各期共同基準水位)時, 由水體幾何條件可求得該影像的沖積扇面積修正量 $\Delta A(\text{m}^2)$ 如下式。

$$\Delta A = \frac{L\eta}{\tan\alpha} \quad (4)$$

3. 近岸風浪漂砂模式

本文以 SWAN 與 XBeach 模式模擬與預測近岸海域之波浪及漂砂運移, 可包含波浪於深水、過渡水域與淺水之流況。由於上述兩者模式均由荷蘭 Delft University of Technology 所開發, 因此 SWAN 模式可作為遠域到近域的波浪條件評估, 到近岸後輸出東澳嶺外海的能量譜作為 XBeach 模式的輸入條件, 再進行波浪輻射應力與底床的動態變化估算。以下就兩模式進行說明:

(1) SWAN 模式

SWAN 模式由荷蘭 Delft University of Technology 所開發 (Booij et al., 1996), 為一個基於作用平衡方程式的完全離散譜模型 (fully discrete spectral model), 模式模擬風浪的傳輸過程, 包含風產生的波浪、波浪在時間和空間中的傳播、淺灘、水流和深度引起的折射以及非線性波-波相互作用。該模式根據二維之作用平衡方程式(action balance equation)如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (5)$$

式 (5) 中, x 為空間、 t 為時間。式 (5) 左側的第一項表示作用密度 (action density) 隨時間的局部變化率。第二項與第三項表示波浪能量在地理空間中的傳播, 包括淺水區群體速度衰退 (decreasing group velocity, C_g) 之波浪淺化 (wave shoaling)。第四項表示由於深度和水流的變化而導致放射頻率之偏移。第五項代表深度引致與折射當下引致之變化。此外, N 表示波作用密度頻譜, 表示式為 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, 其中 $E(\sigma, \theta)$ 表示波浪變異譜或能量密度, 說明波浪能量在頻率 (σ) 與波傳播方向 (θ) 上變化。此外, 式 (5) 的右邊 S_{tot}/σ 是總源項其代表所有物理過程, 包括風驅浪、碎波耗散 (white capping dissipation)、非線性三元波流相互作用 (nonlinear triad wave-wave interactions)、底床摩擦力與深度導致波浪破裂等。這些物理過程包括波浪傳播於深水和淺水之變化。SWAN 模式採 41.31 版本執行, 風場採用美國國家海洋大氣總署 (NOAA) 之歷史資料庫 (NCAR, CCMP) 作為大尺度波浪模擬的重要的輸入資料, 其空間解析度為每 6 小

時一筆數據。在 SWAN 模式遠域到近域的分層上, 遠域的經緯度分別為東經 110-140 度及北緯 10-34 度, 空間解析度為 20 km; 中域的經緯度分別為東經 119-123 度及北緯 21-26 度, 空間解析度為 4 km; 近域的經緯度分別為東經 121.80-121.95 度及北緯 24.44-24.59 度, 空間解析度為 100 m, 計算時間步長為 15 min, 並輸出每小時方向波譜代表東澳嶺外海的波浪入射條件。

(2) XBeach 模式

Xbeach 模式為一時域數值模式 (Bolle et al., 2010; McCall et al., 2010; Roelvink et al., 2009), 用於求解瞬時短波作用平衡 (time-dependent short wave action balance)、滾浪能量方程 (roller energy equation)、物質動量非線性淺水方程 (nonlinear shallow water equation of mass momentum)、泥砂輸運方程式 (sediment transport formulation) 和波波群於底床上的尺度。Xbeach 模式中於波浪作用平衡於淺水之控制方程式為:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (6)$$

其中式 (6) 左側之總和與式 (5) 相同。式 (6) 右側為淺水中的波浪變化, 分別包括波浪耗散項 (D_w)、底床摩擦力 (D_f) 與植被 (D_v)。實際之特徵頻率 σ 由下式得:

$$\sigma = \sqrt{gh \tanh kh} \quad (7)$$

波作用傳播速度於 x-y 方向空間中的由下式得:

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos \theta \quad (8a)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin \theta \quad (8b)$$

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \quad (8c)$$

其中 h 為水深、 k 為波數。自然特徵頻率 σ 為無波流相互作用 (wave current interaction) 的情況下, 等於絕對輻射速度 (ω , absolute radial frequency)。

Xbeach 模式對於漂砂濃度使用深度平均與平流擴散的方式進行模擬, 其包含沉降源項 (source-sink) 之質量守恆控制式如下:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(hC \cdot u^E)}{\partial x} + \frac{\partial(hC \cdot v^E)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{h}{T_s} (C_{eq} - C) \quad (9)$$

式 (9) 中 C 表示深度平均之漂砂濃度, 可隨波群時間尺度之變化, D_h 為泥砂擴散係數。沉積物傳輸之適應時間以 T_s 表示、 h 為局部水深、 w_s 為泥砂沉降速度。適應時間 (T_s) 受到最小周期 ($T_{s,min}$) 的限制, 該最小周期定義為時間步長 (time-step) 的一個因子。 f_{T_s} 為一個校正與律定係數, 用以用來補償以水深平均方式估算沉降速度 (w_s) 所帶來的誤差, 其公式如下:

$$T_s = \max \left(f_{T_s} \frac{h}{w_s}, T_{s,min} \right) \quad (10)$$

泥砂的挾帶或沉積由實際泥砂濃度 (C) 與平衡濃度 (C_{eq}) 之差異所控制, 該差異代表泥砂輸送方程式中的源項。為更新床面高程所需之泥砂輸送率, 以

下以 x 方向為例，其定義為平流輸砂通量與擴散輸砂通量之合成，亦即 x 方向之單位寬度泥砂輸送率 q_x (sediment transport rate)：

$$q_x = hCu^E - D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \quad (11)$$

本文中，近岸場中的 XBeach 模式網格採用局部加密 (locally refined) 的結構性網格，解析度為 10-40 m。為求模式穩定，本研究在底床摩擦上，採曼寧公式 (Manning's formula)，其係數值約為 0.02-0.04 間，並依現場水面上砂礫較粗設為 0.04；水面下較細設為 0.02。此外，沉積物輸送通量 (Sediment transport parameter) 為保守值 0.1，避免輸砂偏弱或偏強。中質粒徑 (D_{50}) 依現場條件設為 0.6 mm，沉降速度則為模式則依 Van Rijn (1993) 公式判定。

上述兩種模型皆可與從海上到近岸的邊界條件相結合。本研究主要採用版本 41.31 的 SWAN 模式，近場與近場嵌套計算分別覆蓋整個台灣地區以及台灣東北部的研究區域。SWAN 對於遠場波模擬，網格間距為 20 km，計算時間步長為 15 min。近場中之網格大小為 5 km 及 100 m Xeach 之網格則為 10-40 m。

4. 無人載具攝影測量與資料處理

本研究針對近期 (2022 年) 之地形監測，採用四旋翼無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 進行低空攝影測量。由於東澳嶺沖積扇地形由扇頂至扇端存在顯著高程落差，且包含陡峭邊坡，為確保地形模型之完整性與精度。航線規劃採雙格網 (Double Grid) 交叉飛行方式進行，並適度調整鏡頭拍攝角度 (約-60 度至-90 度)，以減少地形死角與植生遮蔽效應。飛行高度設定為距地表約 60 至 100 公尺，影像航向重疊率 (Frontal Overlap) 設定為 80%，旁向重疊率 (Side Overlap) 設定為 70%，以確保在特徵點匹配 (Feature Matching) 時有足夠的影像資訊，地面解析度 (GSD) 控制在 3-5 cm 之間。地面控制點之座標測量採用 e-GNSS 即時動態定位系統 (Real-Time Kinematic, RTK) 進行施測，水平與垂直定位誤差均控制在 2-3 cm 以內。SfM-MVS 影像處理 (Structure from Motion and Multi-View Stereo) 採用 Agisoft Metashape 軟體進行。首先應用運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 演算法，自動搜尋影像特徵點並進行空中三角測量 (Aerial Triangulation)，解算相機內外方位參數及稀疏點雲 (Sparse Cloud)；隨後引入地面控制點座標進行區域網平差 (Bundle Adjustment)，以提升模型精度。最後採用多視角立體匹配 (Multi-View Stereo, MVS) 技術產製高密度點雲 (Dense Cloud)，並據此建立數值地表模型 (DSM) 與正射影像 (DOM)。針對扇頂植生茂密區域，則配合濾波演算法 (Filtering Algorithm) 濾除地表植被與非地面點，以獲取較接近真實之數值高程模型 (DEM)，用於後續地形變遷分析。

四、結果與討論

1. 東澳嶺崩塌範圍變化歷程

東澳嶺各期衛星正射影像判釋所得豪雨引致邊坡發生明顯崩塌的案例如表 2 所示，前六場強降雨的案例分析為公式 (1), (2)用以判釋降雨引致崩塌之門檻及估算降雨引致的崩塌面積 (Chou et al., 2017) 之依據。本文首先以 2016 年 11 月 23 -26 日之降雨事件進行驗證，該起降雨事件歷程如圖 3 所示，東澳嶺站最大時雨量為 36.5 mm/hr、有效累積降雨量為 594 mm，邊坡崩塌面積約 7,159 m²。

圖 3 中的虛線為 Chou et al.(2017) 提出降雨引致崩塌之門檻條件，即式 (1a)，與本區域之其他颱風與降雨事件進行比對。圖 3 中蘭恩颱風 (Lan, 2017/10/16-23) 及蘇迪勒 (Soudelor, 2015/8/6~10) 颱風之降雨歷程未達門檻值，無明顯坡面崩塌。2016 年 11 月 23 -26 日間降雨事件有明顯崩塌，該起降雨事件符合公式(1)之降雨門檻值約在降雨延時 $D = 36$ 小時，累積降雨達 509mm。超過此公式後之最高平均有效降雨強度為 12.12 mm/hr，延時為 49 小時，此時累積降雨強度為 594 mm。根據打荻公式 (2a) 推求本場累積降雨為 594 mm 時之崩塌量推估值為 7,183 m²，與影像所得崩塌面積 7,159 m² 相近如圖 4 所示。由歷次崩塌事件驗證東澳嶺之累積降雨與新增崩塌面積的關係大致符合打荻公式 (式 (2a))，且崩塌產生之降雨量門檻值符合 $R_c=282$ mm。

表 2 歷年 (2009-2016) 坡面崩塌面積與颱風暨降雨事件
Table 2 Slope-failure area and corresponding typhoon-rainfall events from 2009 to 2016

日期	崩塌面積 ΣA (m ²)	崩塌面積 A (m ²)	事件
2009/10/5	5,638	5638	芭瑪
2010/10/21	89,574	83,936	梅姬
2011/10/2	119,449	29,875	奈格
2012/5/12	123,387	3,938	強降雨
2012/8/2	136,405	13,018	蘇拉
2013/11/11	136,530	125	強降雨
2016/11/23-26	143,689	7,159	降雨

*黑色粗體字為沖積扇面積增加之事件

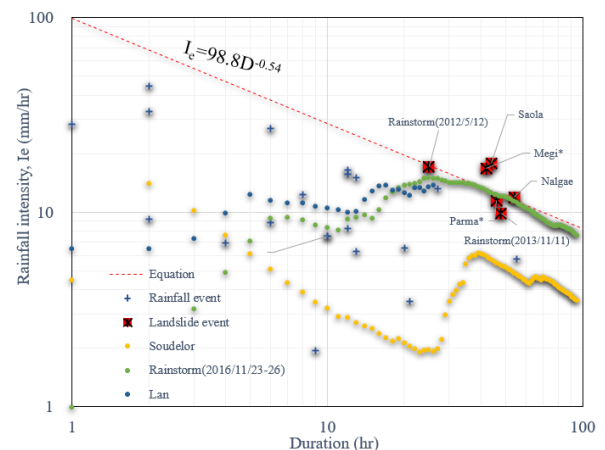


圖 3 歷年颱風降雨事件降雨延時 I_e 與降雨延時 D

Fig.3 Relationship between rainfall intensity (I_e) and rainfall duration (D) for historical typhoon events

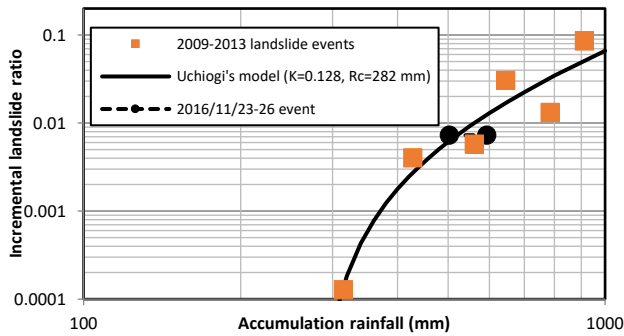


圖 4 有效累積降雨與崩塌面積增加比之關係
Fig.4 Relationship between effective accumulated rainfall and relative increase in landslide area

2. 沖積扇面積之潮位校正

依據中央氣象署蘇澳港在 2009-2022 間的潮位表內插可得衛星拍攝時間的潮位最高達 0.74 m；最低為 -0.63 m，沖積扇弧長約為 670-750 m，故以水面高程零為基準值，由式 (4) 估算潮位影響沖積扇面積增量(漲潮)最多為 3,241 m²;減少量(退潮) 最多為 2,781 m²，如表 3 所示。經潮位修正後沖積扇面積增加之事件 (漲潮) 為奈格 (2011)、2012/05/12、鳳凰 (2014)、天鵝 (2015) 及 2017/06/29 影像。沖積扇潮位校正前後之面積變化如圖 5(a) 所示，圖中沖積扇固定面積 (綠色實線) 為 2008 年 Google earth 所繪製之濱線，其與 2012-2022 年間判釋沖積扇範圍的後方基準線，二者間所包圍之面積 (如圖 2 所示約 13,361 m²)。歷年來沖積扇面積變化與降雨量及風速之關係整理如圖 5 所示。由圖 5a 可知 2012-2022 期間，沖積扇面積在颱風事件後先呈增加趨勢 (2010-2013 間)；而在 2015 年後沖積扇面積則轉為遞減。此一趨勢變化與 2013-2015 間人為工程介入，降低谷口料源供應及扇端風浪侵蝕有關。由表 3 可知，每年度東北季風對沖積扇面積的沖蝕減少面積介於 321-3,329 m²間，與潮位修正量相近，故二者皆應予考慮。由表三及圖 5(a) 可知潮位校正使沖積扇之面積變化更合理，如 2022/07/22 之影像拍攝時間為退潮，測得沖積扇陸上面積較大，而其修正面積為-2781 m²；經修正後沖積扇面積符合遞減趨勢。

3. 海岸沖積扇面積變化與颱風歷程

由表 1 及表 3 可知，颱風或豪雨過程使沖積扇面積擴大乃因降雨引致邊坡崩塌，並經由渠道輸送土砂料源至沖積扇

頂 (邊坡及溪溝的人為工程可能會減低泥砂的沿程遞移率)；颱風或東北季風引起之近岸風浪及湧浪則造成海岸沖積扇緣的侵蝕。二者之綜合效應決定一次事件造成沖積扇之沖淤量變化。導致扇面積增加之颱風分別為 2010 年梅姬、2011 年奈格、2012 年泰利與蘇拉、天秤、2013 年蘇力、2015 年蘇迪勒 (僅有坡面沖蝕並無崩塌) 及 2017 年尼莎等颱風事件。東澳嶺沖積扇面積增加主要因素為強降雨引致東澳嶺坡面崩塌，及上游河道淤積土砂，經逕流匯集並由河道水流輸送到沖積扇；沖積扇面積之減少則由於海上風浪及湧浪潮升的淘刷作用，導致扇端溯源侵蝕所致。經潮位校正後，豪雨引致邊坡崩塌並使沖積扇面積增加的明顯案例依次為梅姬 (2010)，奈格 (2011) 及蘇拉颱風 (2012)，其面積增量分別為 48441, 16934 及 9257 m²。因風浪侵蝕海岸沖積扇的扇端以致面積遞減的明顯案例依序為黃蜂颱風 (2014)、天鵝颱風 (2015) 及杰拉華 (2012)，其遞減量 8286, 7203 及 6009 m²。每年東北季風之淘蝕量則為 400-3000 m²。由圖 5 可知在大坑溪河床新建攔砂壩及邊坡施做防護工程後，溪床侵蝕量明顯減少，以致海岸沖積扇的土砂料源供應不足，且沖積扇頂端植生茂密。另一方面，扇緣明顯向陸地退縮，扇面上之顆粒粗化且後灘區坡度變陡，顯示近年來之沖積扇地貌變化主要受風浪潮升影響。

本研究分析歷年 (2009-2022 年) 颱風事件之累積降雨量、配合沖積扇長度與面積變化之成果如圖 5(a)-(c) 所示，其中雨量以中央氣象署東澳站與蘇澳站資料進行彙整。圖 5(c) 得知以芭瑪 (2009)、梅姬 (2010)、奈格 (2011)、蘇拉 (2012) 等之累積雨量皆遠超過降雨門檻值 Rc = 282 mm。除芭瑪 (2009) 侵台時，崩塌土體僅在 115.9K 公路上淤積，並未形成海岸沖積扇，其餘三個颱風皆導致沖積扇面積增加。風速方面以最大小時平均風速 WS(m/s)進行統計 (表 1 與圖 5(d))，WS 超過 20 m/s 之颱風分別為麥德姆 (2014)、蘇迪勒 (2015)、杜鵑 (2015)、梅姬 (2016)、尼莎 (2017)，其中麥德姆 (2014)、蘇迪勒 (2015)、為沖積扇面積增加之颱風，其餘杜鵑 (2015)、梅姬 (2016) 則屬面積減少之颱風事件。故颱風風速大小影響扇端淘蝕及颱風降雨引致崩塌二者之效應宜分別評估，並考慮人為工程之效應。由上述梅姬 (2010)、奈格 (2011)、蘇拉 (2012) 等三起颱風挾帶高累積雨量及具較長降雨延時，導致上方坡體崩塌及有利於坡面及溪溝的土砂運移至沖積扇，造成沖積扇面積增加。

表 3 潮位校正後之沖積扇面積

Table 3 Alluvial fan area corrected for tidal level

日期	衛星或無人載具正射影像面積 (m ²)	潮汐效應後面積 (m ²)	面積差 ΔA(m ²)	潮位 (mm)	沖積扇固定面積 (m ²)	事件
20091005	0	0	0	0		
20101021	49,040	48,441	-599	-136		2010/10/14~10/23 梅姬颱風
20111002	63,370	65,375	2,005	436		2011/9/30~10/10 奈格颱風
20120512	65,920	68,996	3,076	651		-
20120802	77,828	78,253	25	88	13,661	2012/6/16~21泰利颱風, 2012/7/26~8/4蘇拉颱風
20120827	78,123	76,356	-1,767	-371		2012/8/17~30天秤颱風
20120911	80,335	78,739	-1,596	-333		-
20121022	72,368	72,729	361	75		2012/9/18~10/1杰拉華

日期	衛星或無人載具正射影像面積 (m ²)	潮汐效應後面積 (m ²)	面積差 ΔA (m ²)	潮位 (mm)	沖積扇固定面積 (m ²)	事件
20130225	72,902	71,586	-1,316	-280		2012-2013東北季風
20130323	71,823	71,841	18	4		-
20131201	76,479	74,378	-2,101	-435		2013/7/7~14蘇力颱風,
20140217	70,299	71,049	750	154		2013-2014東北季風
20140709	69,869	67,924	-1,945	-384		-
20140729	67,428	68,995	1,567	331		2014/7/21~24麥德姆颱風
20140930	61,104	63,076	1,972	415		2014/9/19~22鳳凰颱風
20141016	54,695	54,791	96	21		2014/10/7~13黃蜂颱風
20141231	54,490	54,221	-269	-59		2014/11/2~7鸚鵡颱風
20150214	53,455	53,982	527	117		2014-2015東北季風
20150529	51,758	51,211	-547	-124		-
20150810	55,441	54,281	-1,160	-258		2015/8/6~10蘇迪勒颱風
20150918	44,748	47,078	2,330	525		2015/8/20~24天鵝颱風
20151027	44,214	43,234	-980	-221		2015/9/27~30杜鵑颱風
20160720	41,137	40,337	-800	-187		2015-2016東北季風
20161002	36,954	37,045	91	21		2016/9/12~9/15莫蘭蒂颱風,
20170629	33,482	36,723	3,241	742		2016/9/25~29梅姬颱風
20170712	33,378	35,579	2,201	510		2016/11/22~23 降雨,
20170807	36,300	35,350	-950	-215		2016-2017東北季風
20170909	32,856	34,944	2,088	487		2017/7/28~30 尼莎颱風
20171126	31,511	31,598	87	20		2017/8/20-9/12 泰利颱風
20180115	31,267	31,164	-103	-24		2017/10/16-23蘭恩颱風
20181111	27,415	28,201	786	181		2017-2018 東北季風
20191123	29,942	28,059	-1,883	-446		-
20200622	27,953	27,931	-22	-5		-
20200918	23,430	23,247	-183	-40		2020/8/31-9/9 海神颱風
20210311	23,324	22,017	-1,307	-275		東北季風
20210909	19,610	21,712	2,102	463		-
20220727	24,303	21,522	-2,781	-630		-

表 4 歷年 (2010-2020) 颱風中心氣壓與強度

Table 4 Central pressure and corresponding intensity of typhoons during 2010-2020

年份	颱風事件	中心氣壓 (hPa)	強度 (km/hr)	路徑類別
2010	梅姬	885	230	9
2011	奈格	935	175	5
	泰利	985	95	9
2012	蘇拉	960	130	1
	天秤	950	150	6
	杰拉華	905	205	6
2013	蘇力	925	185	2
	潭美	965	110	1
	麥德姆	965	130	3
2014	鳳凰*	985	85	6
	黃蜂	900	215	6
	鸚鵡	910	205	6
	蘇迪勒	900	215	3
2015	天鵝	930	185	6
	杜鵑	925	205	3
2016	莫蘭蒂	890	220	7
	梅姬	940	175	3
	尼莎	960	150	2
2017	泰利	935	175	6
	蘭恩	915	185	6
2020	海神	910	195	6

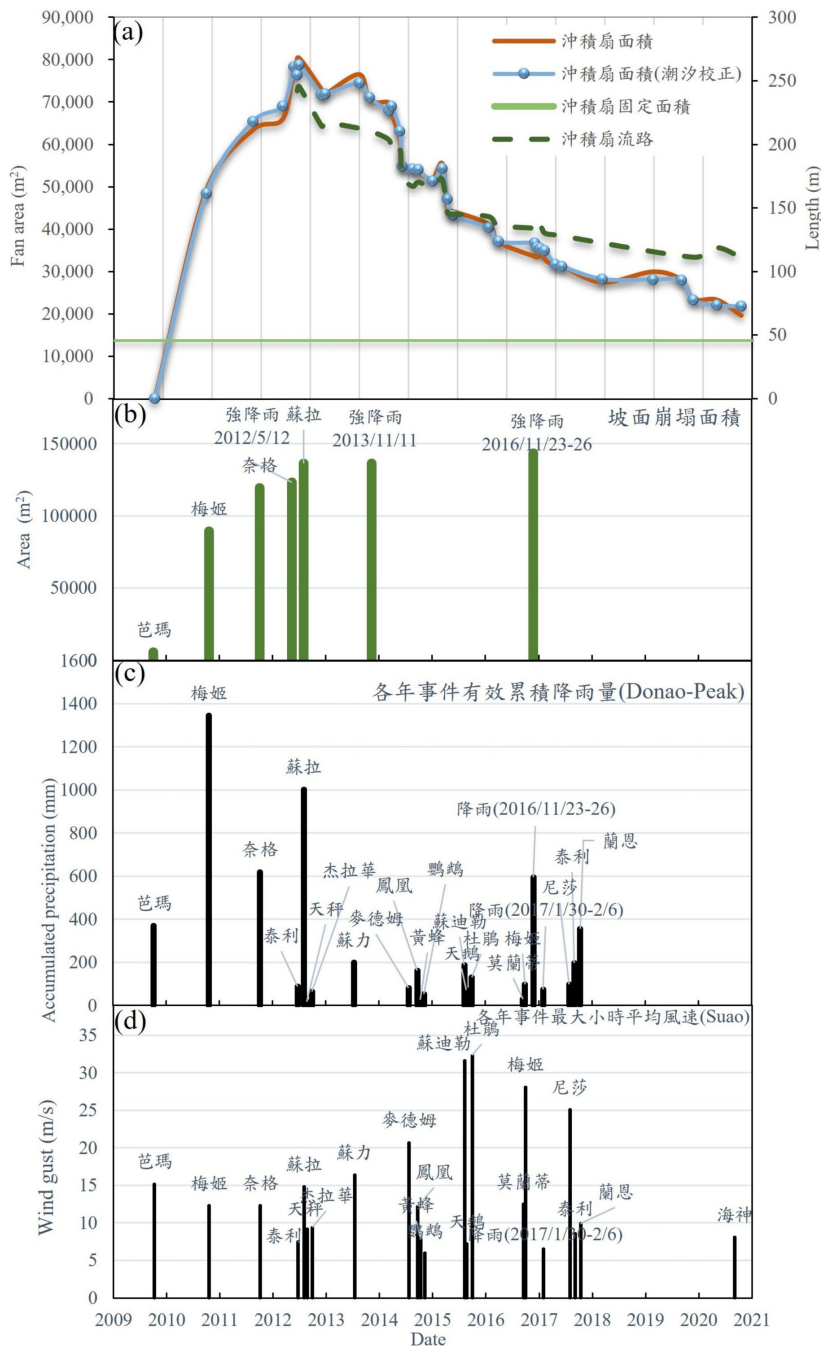


圖 5 歷年颱風事件之沖積扇長度與面積變化、降雨量、風速關係

Fig.5 Variation of alluvial-fan length and area in relation to rainfall and wind speed during past typhoon events

4. 颱風事件輸砂模式分析及驗證

如圖 6 所示, 本文從歷年 (2012-2022) 的颱風事件中選取 2015 年天鵝颱風的過程做為研究風暴潮輸砂之案例, 因此颱風期間降雨量小, 可排除降雨對沖積扇輸砂的影響。海面變化依據蘇澳港附近潮汐站每隔 6 分鐘的潮位記錄數據, 並以諧波分析 (harmonic analysis, Foreman, 1977) 預測之天文潮汐以及颱風通過期間之風暴潮, 成果如圖 7 所示。其結果顯示, 當颱風最接近蘇澳時, 其中心位置離東澳嶼仍有 200 公里以上, 顯示颱風中心低壓引致的颱風暴潮相對小, 暴潮偏差均在 25 cm 以下。

本研究以天鵝颱風 (2015) 2015/08/19 00:00 至

2015/08/24 23:00 的波浪條件進行驗證。由於示性波高 (H_s)、尖峰週期 (T_p) 及波向 (Dir) 為控制沿岸漂砂方向之關鍵因子, 圖 8 呈現本研究模擬結果與模擬區域內最近之蘇澳港浮標測站之資料比對結果。分析顯示, 波高時間序列中呈現兩次明顯峰值, 其模擬值與實測值之最大差距約為 2 m, 顯示於極端波浪條件下, 模式對波高峰值之預估仍有不足。然而, 就尖峰週期與波向之驗證結果而言, 模擬值與實測資料整體趨勢及變化幅度均相當一致, 顯示模式於波浪週期與傳播方向之模擬具有良好可靠度。造成波高低估之主要原因, 推測與本研究採用之 CCMP 風場資料時間解析度為每 6 小時一筆有關, 該風場資料可能無法完整描述颱風期間最強風場

之瞬時變化，進而影響波高峰值之模擬結果。整體而言，本研究之波浪模擬結果在時序變化與物理過程表現上仍屬合理。就漂砂模擬影響而言，雖尖峰波浪於近岸提前碎波，可能造成較強之輻射應力並增強漂砂流動強度，但對漂砂方向及整體流動趨勢之影響應屬有限，故仍可作為漂砂趨勢分析之合理依據。若排除極端尖峰波高事件不納入誤差統計，其餘時段之有效波高均方根誤差 (RMSE) 為 0.90 m，尖峰週期之 RMSE 為 2.69 s，波浪前進方向之 RMSE 為 37.03°。

本文的數值模擬以風量效應為主，並未考慮潮汐和洋流之變化。海上波浪條件以 SWAN 模型中第 2 層的波浪頻譜，置於離岸 270 m、水深 24.2 m 處。近海域泥砂在波浪下之運移採用 Xbeach 模式，泥砂傳輸之模擬採用平均粒徑 (D_{50}) 0.6 mm，沖積扇的初始海岸邊界根據 2011 年 8 月 11 日之水深線 0 m 之處。兩個模型的模擬持續時間均為 433,800 秒 (=120.5 小時，包括颱風成形、強弱轉變與過境)。數值模擬中的破波帶根據 McCown 公式 (1894)，即碎波於波高達水深之 0.78 倍時產生。

東澳海域的風浪模擬主要為探討單一颱風事件對沖積扇附近海床的漂砂影響。為探討颱風期間，不同波浪條件引致的近岸流場變化與漂砂變化，本文將天鵝颱風 (2015) 的

過程分為 Pre-swell (A), Swell(B), Storm(C), and Post-storm(D) 四個階段如表 5 所示。其中，A (Pre-swell) 及 D (Post-storm) 分別代表波高與週期的增加與減緩，B (Swell) 及 C (Storm) 代表颱風最強與逐漸接近研究區域的情況，兩情境均有 3.5-4.0 m 的波高與約 12-15 sec 的長周期波浪，如圖 9 所示。入射波高僅 A (Pre-swell) 入射條件小於 2 m；A 及 D 之入射波向均有小於 100 度 (大約為東向之波浪) 的情況，B 及 C 皆在 130-140 度 (以正北為 0，即東南向之波浪) 間。

表 5 天鵝颱風(2015)模擬之四個時間階段

Table 5 Simulation phases of Typhoon Goni (2015)

ID	Interval Name	Interval Time	Total Duration (hours)
A	Pre-swell	Start	2015/08/19 00:00
		End	2015/08/20 00:00
B	Swell	Start	2015/08/20 18:00
		End	2015/08/21 12:00
C	Storm	Start	2015/08/22 18:00
		End	2015/08/23 12:00
D	Post-storm	Start	2015/08/23 12:00
		End	2015/08/23 23:00

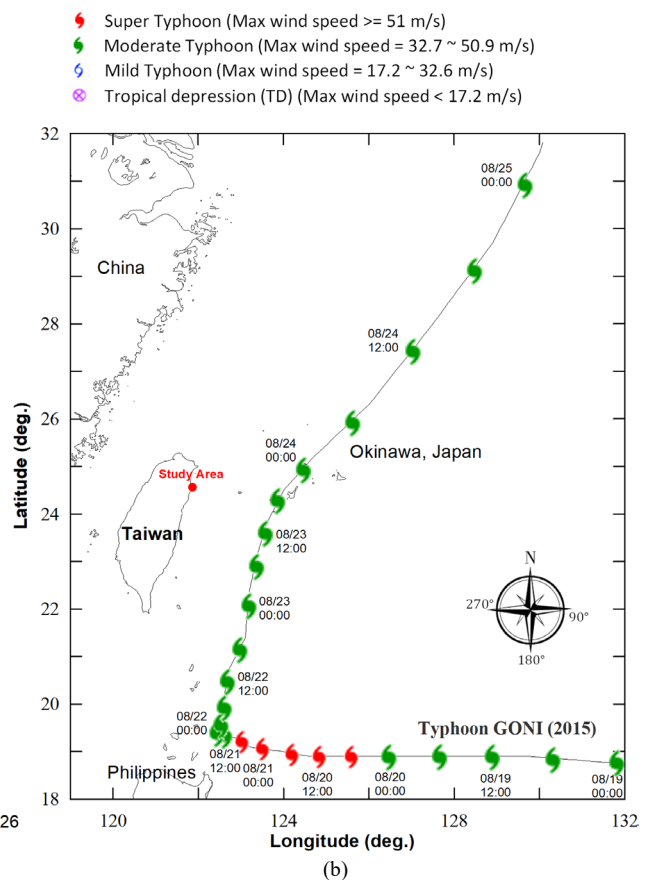
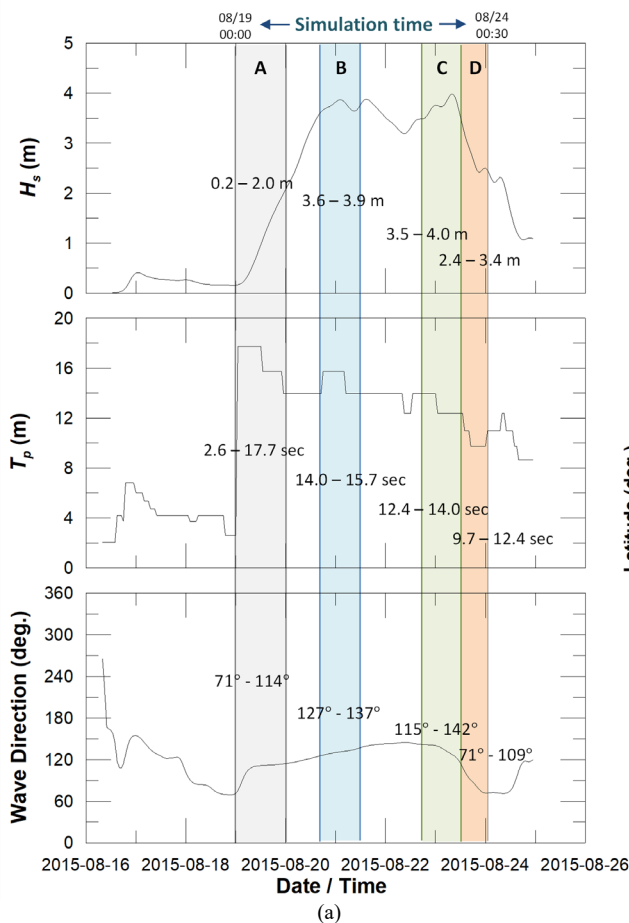


圖 6 細部模擬之輸入條件 (a) 邊界條件下波浪氣候的時間序列 (b) 颱風路徑與計算間隔

Fig.6 Model input settings: (a) boundary-condition wave climate time series; (b) typhoon track and computation intervals

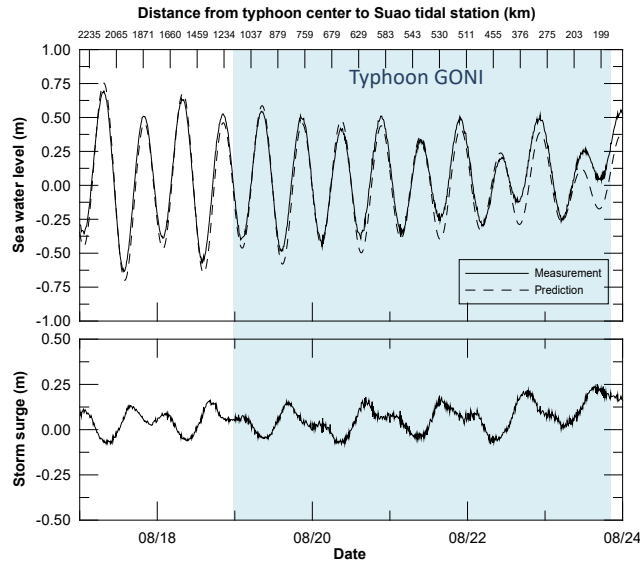


圖 7 天鵝颱風期間蘇澳潮汐站的實測海水水位與風暴潮變化

Fig.7 Observed sea level and storm surge variations at the Suao tide gauge during Typhoon Goni

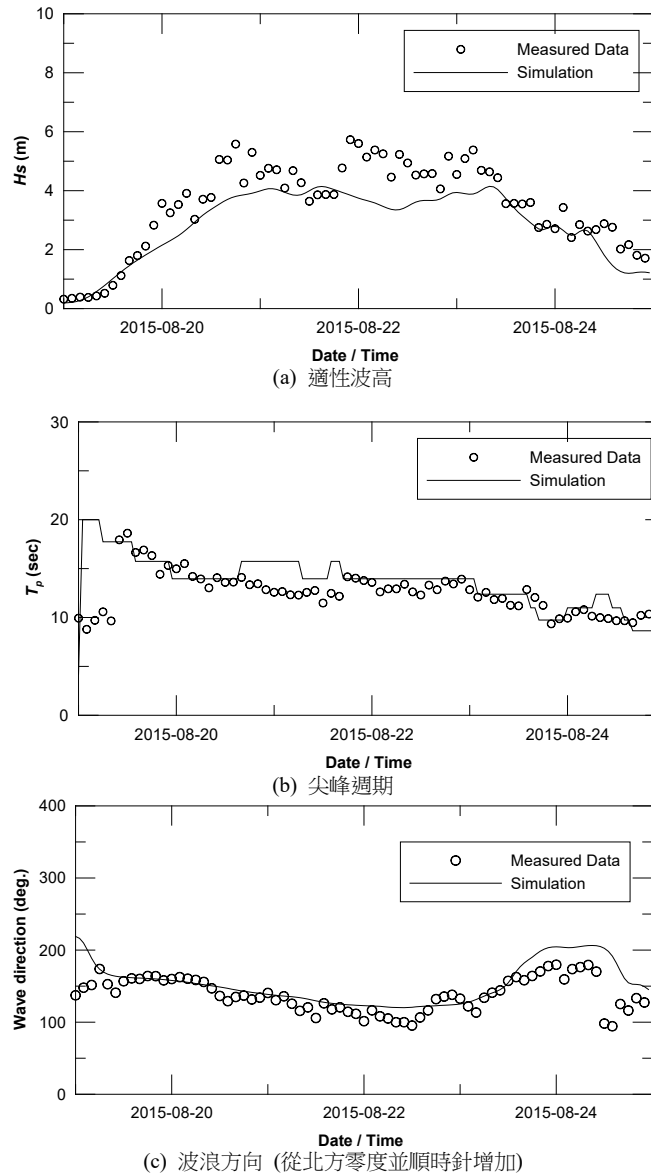


圖 8 以測量數據驗證模型之成果 (蘇澳波浪浮標處)

Fig.8 Validation of model results against measured data at the Suao wave buoy location

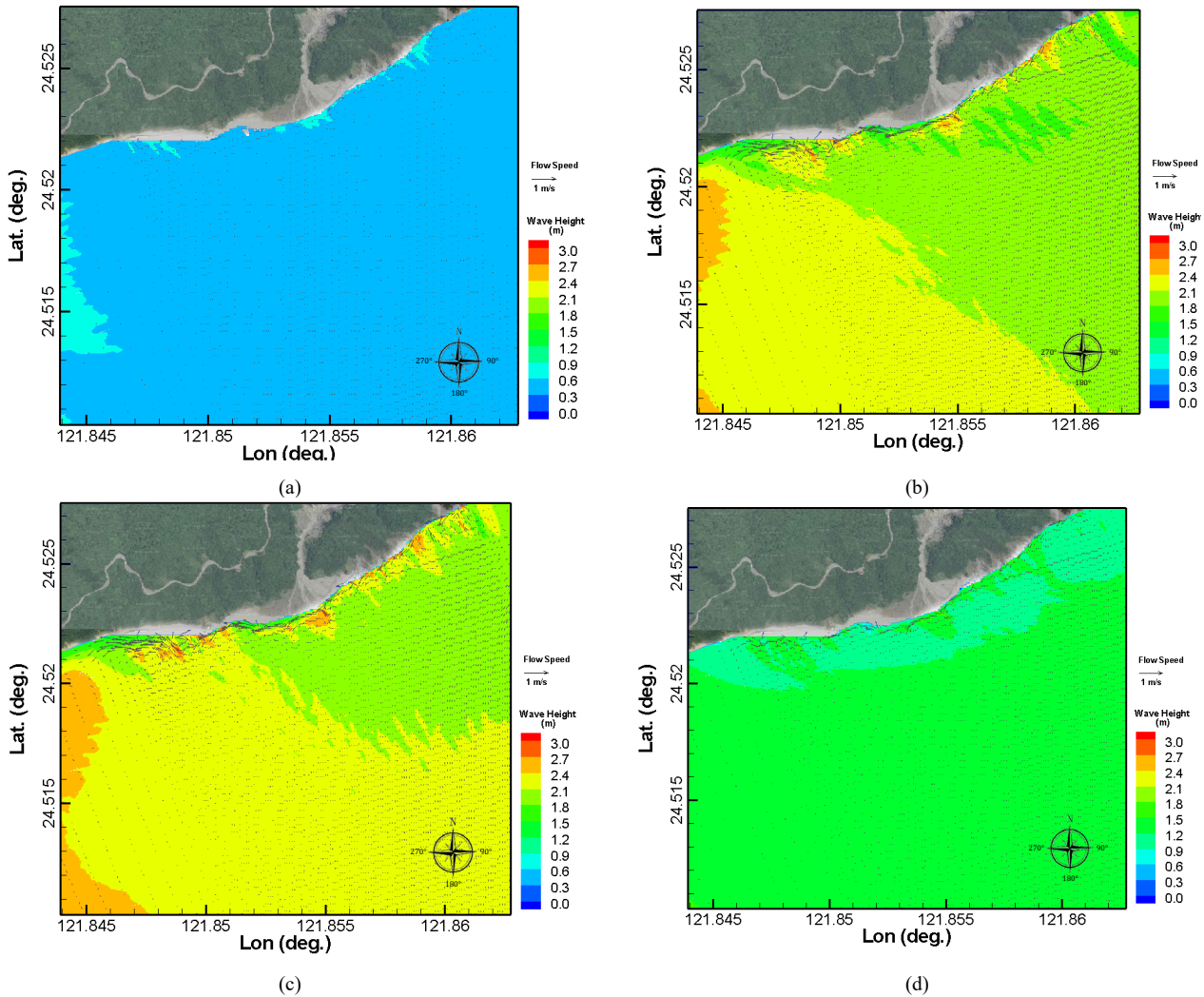


圖 9 研究區不同階段之水動力波模擬平均示性波高 (a) Pre-swell ; (b) Swell ; (c) Storm ; (d) Post-storm

Fig.9 Mean significant wave height during four hydrodynamic stages: (a) Pre-swell; (b) Swell; (c) Storm; (d) Post-storm

1. 在 Pre-swell 的 24 小時歷程中，在 24 小時內自 0.2 m 遞升高至 2 m，尖峰週期在 1 小時內由 2.6 sec 急升至 18 sec，而後稍降至約 14 sec。24 小時之平均波浪場如圖 9 (a) 所示，在水深 0 至 5 m 的海域的波高約為 0.8 m，其餘海域波高則為 0.4-0.6 m。
2. 在 Swell & Storm 的 18 小時區間中，入射波高大致介於 3.5-4.0 m 間，差異為 Swell 有較長的尖峰周期介於 14-16 sec，Storm 則約為 12-14 sec。由圖 9 (b) 與 (c) 可知，水深 0 至 5 m 的範圍，有較大波高 (約為 2.1-2.4 m)，風暴期間的波高均高於湧浪期間且涵蓋面積較廣，因這期間颱風中心較接近此場域且具較高的人射波高。
3. 風暴後期的人射波高約在第 10 小時由 3.4 m 降至 2.4 m，尖峰週期則由 12 sec 降至 10 sec。此時研究區域的浪高大致小於 2 m，如圖 9(d) 所示。

整體而言，此颱風事件的 B 至 D 區間，靠近沖積扇近岸流場 (水深 0 至 5 m 範圍) 呈現由東北向西南的流向，尤其沿沖積扇灘線處 (見圖 9(b) 及 (c)) 更明顯看出沿岸流從約 250° 方向流出。圖 10 為波浪引致近岸流所驅動的漂砂傳輸及每個區間漂砂的平均變化量。由圖 10 (a) 可知，湧浪前期 (A 區間) 入射波浪小於 2 m，沖積扇外緣水深 5 m 內的砂源堆積於灘線 (0 m 水深線) 附近，淤高約為 0~0.5 m 左

右。圖 10 (b) 及 (c) 分別為湧浪期間 (B 區間) 及風暴期間 (C 區間)，二者侵淤方式相似，主要為灘線附近漂砂沿沿岸之西南方向 (約 200-250° 方向) 及朝離岸運移，故漂砂在水下沖積扇前緣淤積 (圖中藍色區域)，灘線以上的陸域明顯受到碎波波浪衝擊，呈現侵蝕 (圖中紅色區域)。圖 10 (d) 所示風暴區間後 (D 區間)，波浪較小與 A 區間雷同，僅在灘線附近有微小約 0~0.5 m 的淤積。由本次颱風引致漂砂運動的模擬顯示，湧浪及風暴期間 (B 及 C 區間) 較大波浪的衝擊造成灘線以上陸域的侵蝕，並呈現往西南方向沿岸漂砂或離岸的淤積；湧浪前及風暴後 (A 及 D 區間)，則易發生灘線附近淤積。2012 至 2015 年間實測灘線呈現向岸內縮與往西南側 (約 250° 方向) 淤積的趨勢 (圖 2)，與本次模擬趨勢一致。

在天鵝颱風 (2015) 事件的歷程模擬中，本研究分別擷取不同區段時東澳嶺沖積扇附近海域及灘線地形的即時變化，時間點分別為 Pre-swell (A 區間)、Swell (B 區間)、Storm (C 區間) 及 Post-storm (D 區間) 的分界點如圖 11 所示。由圖中可知風浪作用下的地形變化，尤其是水深 5 m 內至陸域高程 3 m 間以黃色至紅色呈現的區間。圖 11(a) 為湧浪抵達前 (A 區間) 的地形變化。而後在湧浪 (B 區間) 作用下，沖積扇西南外緣處的灘線附近 (高程 0-2 m) 陸域受到波浪侵蝕，

漂砂逐漸往離岸移動, 淤積於水深 0 m 至 4 m 的區域, 如圖 11(b) 所示。風暴期間 (C 區間) 及風暴後 (D 區間), 水深 0 m 至 4 m 的淤積地形更往西南側及外海擴大, 分別如圖 11(c) 及 (d) 所示。由本次 2015 天鵝颱風事件的模擬可知在較高

入射波浪作用下會發生灘線上的陸域侵蝕, 且整體漂砂移動方向大致為往西南沿岸及向外海運移, 故颱風期間灘線若無陸上砂源補助, 受強烈風浪作用下呈現向陸退縮的趨勢。

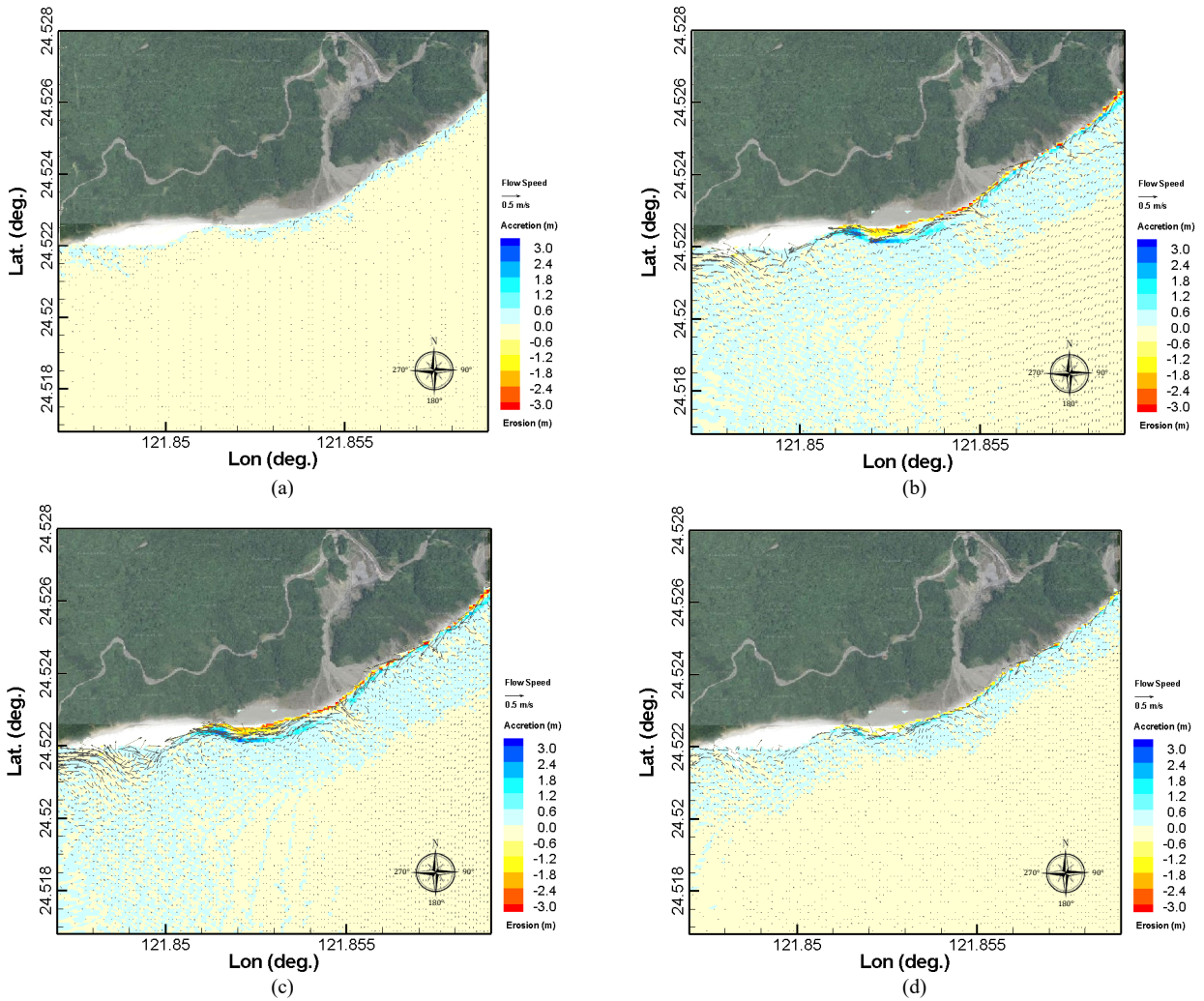
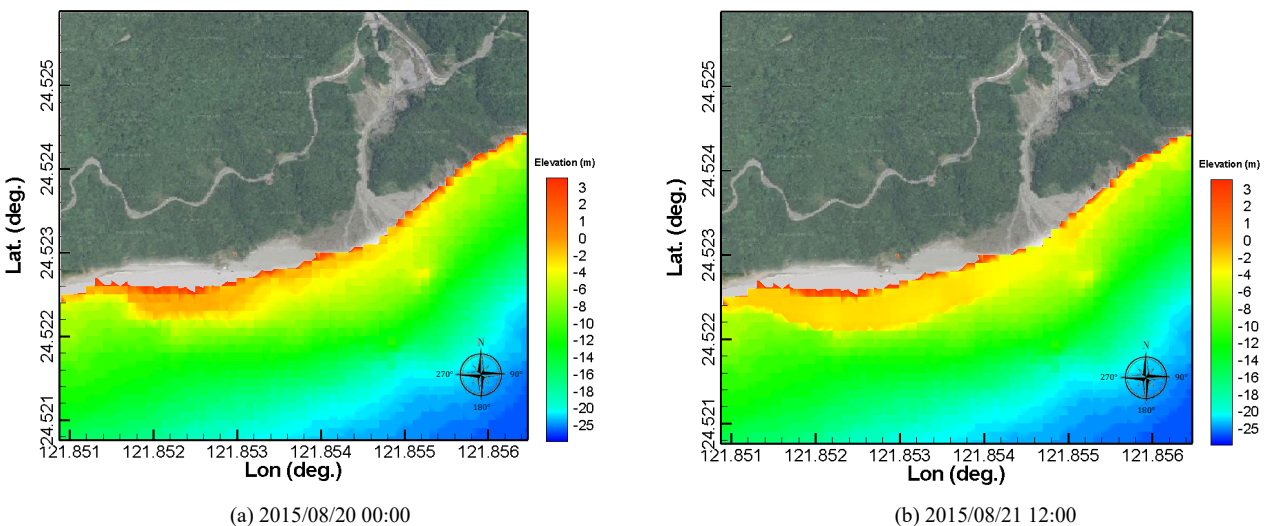


圖 10 沖積扇海域不同階段之流況及底床平均沖淤量 (a) Pre-swell ; (b) Swell ; (c) Storm ; (d) Post-storm.

Fig.10 Mean morphological variation and velocity field during four simulation stages: (a) Pre-swell; (b) Swell; (c) Storm; (d) Post-storm



(a) 2015/08/20 00:00

(b) 2015/08/21 12:00

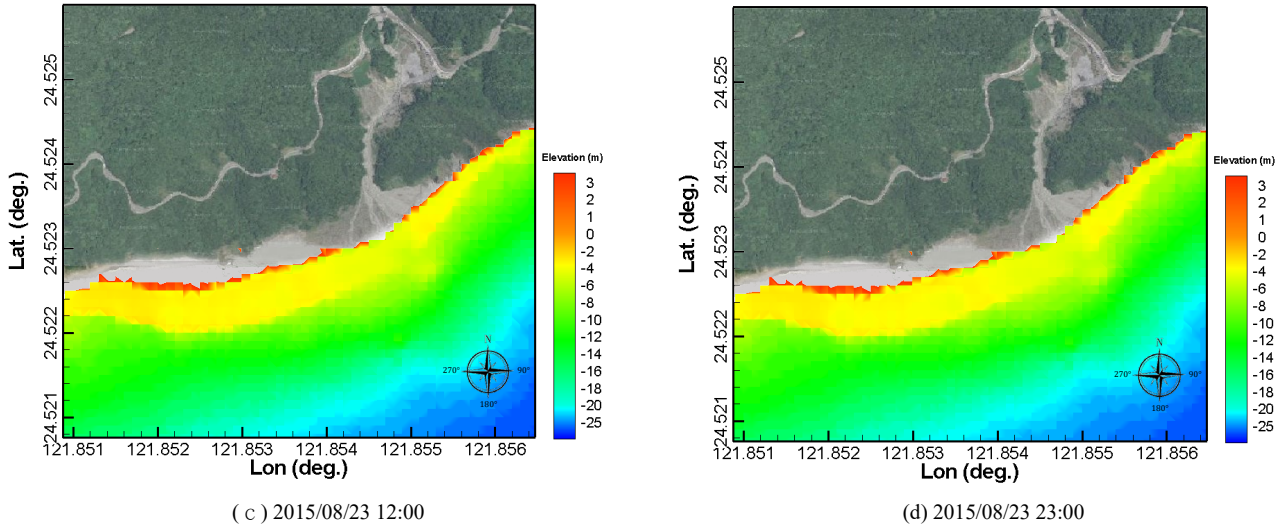


圖 11 不同時期東澳灣海底地形高程變化

Fig.11 Bathymetric elevation changes of the Dong'ao Bay before and after typhoon passage (d_0 = pre-typhoon baseline)

5. 歷年颱風路徑與強度分析

本文根據中央氣象署蘇澳站風速資料，對於 2009-2022 年颱風路徑進行沖積扇面積增加與衰退之劃分，如圖 12 所示。由圖 12(a) 可知造成沖積扇面積增加的颱風大多直接由東部或東北部貫穿台灣 (圖 12(b))，其中蘇拉 (2012)、蘇力 (2013)、潭美 (2013) 由東澳嶺之北部貫穿或掠過台灣，而蘇迪勒 (2015) 為東澳嶺之南邊貫穿台灣；另外泰利 (2012) 則由台灣西南部朝向東北部方向行進並於西北部侵台。颱風梅姬 (2010) 其路徑繞行菲律賓後往中國行進，並未登陸，惟與東北季風共伴，故所挾帶之雨量對於東澳嶺造成大規模崩塌。由圖 12(b) 顯示造成沖積扇侵蝕之颱風大多由台灣東北部外海掠過並往日本方向行進，東澳嶺位於此類颱風行徑路線 (第六路徑) 之西側。杜鵑 (2015)、梅姬 (2016) 與尼莎 (2017) 等三個颱風，其路徑由台灣東南部登陸，貫穿中央山脈向西行進。莫蘭蒂 (2016) 颱風的路徑由台灣東南方外圍朝西南方前進。上述颱風主要特性為風速大，降雨量較少。

為確定東澳嶺沖積扇面積衰退與颱風強度等關聯性，本研究蒐集中央氣象署頒佈之歷年 (2010-2022) 颱風之中心氣壓與強度(最大小時平均風速)及颱風路徑類別分類 (1-9 類)，如表 5 所示。表 5 中紅字部分為沖積扇面積增加之颱風，此外 2014 年鳳凰颱風因其路徑乃由台灣南部外海順沿著東部向北直上，其距離台灣整個東半邊相當接近再加上強度相較於其他颱風相對較弱 (85 km/hr)，因此未列入考慮。圖 13 為沖積扇衰退面積與颱風最大小時平均風速 S (km/hr) 之關係，圖中導致沖積扇面積減少之小時平均風速門檻值 (S_c) 約為 135 km/hr，即沖積扇衰退面積 $\delta A(m^2)$ 與小時平均風速之關係式可表示如下

$$\delta A = 29.97(S - S_c)^{1.13} \quad (12)$$

造成沖積扇沖蝕之風浪受沖積扇地貌、海域環境及沖積扇顆粒組成等因素決定，並非一通用值，故此門檻值有待更深入的探討。綜合上述，颱風對於沖積扇面積變化之影響主要為颱風引至海上風湧浪溯升造成之淘刷效應，絕大多數造

成沖積扇面積減少之行進路徑為掠過台灣東北部外海並朝向日本行進。造成沖積扇面積增加主要為豪雨誘發邊坡崩塌，以致料源向下游補給造成扇面積增加，而降雨量與颱風路徑及風力的關係並無明顯關係。

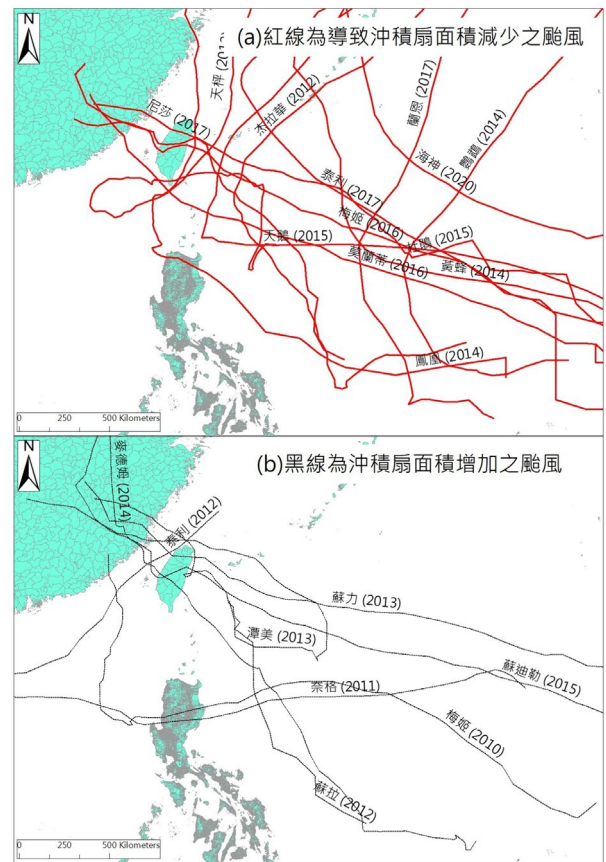


圖 12 歷年(2009-2021 年)颱風行進路徑

Fig.12 Tracks of typhoons affecting the study area during 2009-2021

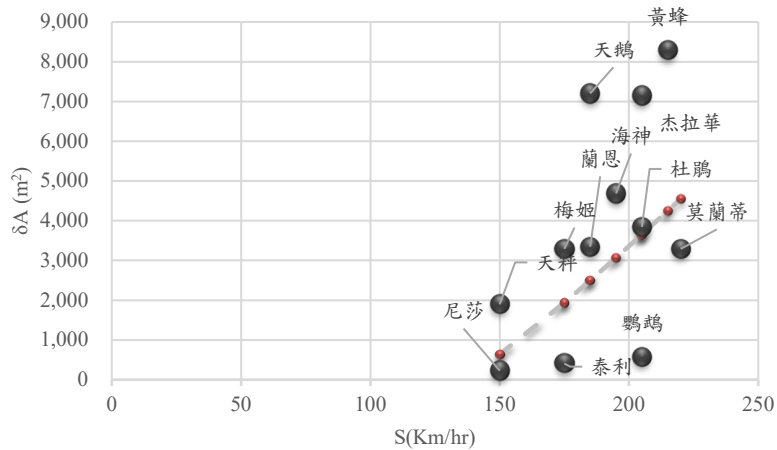


圖 13 颱風強度與沖積扇衰退面積關係 ($A=29.97(S-SC)^{1.13}$)

Fig.13 Correlation between typhoon intensity and alluvial-fan degradation area

6. 海岸沖積扇陸上及水下地形變化

大坑溪出口附近海域共進行三次床載水下地形測量以分析沖積扇海床之長期變化，施作日期分別為 (a)2011 年 8 月 23 日、(b)2012 年 12 月 19 日及 (c)2021 年 5 月 24-25 日，測量之成果如圖 14 所示。東澳灣之海床坡度整體向東傾斜，坡度較緩；大坑溪谷口海床之傾斜方向則為南偏東，與水上沖積扇之中心線相近，海床坡度較東澳灣陡。2011-2021 之水下測量顯示水下沖積扇範圍變大，陸上沖積扇面積則先增後減。圖 15 中紅線分別為扇頂中心不同圓周角 (以正東為零度，順時鐘方向增加，依序為 0°、30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°等角度) 之徑向剖面，150°與 180°多為礁岩海岸與植被，故沖積扇的弧角可視為 150°。0°-30° 之海域中有巨大礁岩為屏障，主要海床地形變化介於 30°-120° 間。圖 15(a) 為 2021 年水下測量的 3D 地形圖，三期海底地形沖淤範圍 (2011-2012, 2012-2021 及、2011-2021 年) 如圖 15(b)、圖 15(c)、圖 15(d) 所示。2011-2012 間 (圖 15(b)) 海床泥砂淤積較多位置集中於沖積扇外緣之東南側約 30°與 60°之間 (原點

距離約 200-275 m、最高淤積深度約 4-5 m；刷深範圍則位於東南及西南側約 60°-120°之間。2012-2021 間 (圖 15(c)) 海床在近域 (距岸 200 m 內) 之 30°-120° 範圍均呈刷深，較遠區域則為淤積，為風浪之沖蝕下刷及搬運所致。整體而言，圖 15(d) 顯示 2011-2021 年水下沖積扇在近域 (距岸 200 m 內) 之侵蝕範圍為東南到南向 (30°-120°)，淤積則在西南到偏西側 (120°-150°) 發生。輕微淤積發生在較遠海域 (距岸 200-300 m) 的 (30°-60°) 區域。海床之變化趨勢與上述數值模擬天鵝颱風之漂砂趨勢相符。

圖 16 為初始海岸線與 2011、2012、2021 扇面數值高程沿中心線 (75°) 剖面之變化歷程。陸上沖積扇(高程大於 0，距扇中心 30 m 內因植生茂密，故 UAV 量測高程高於 2012 高程。扇端灘線由距中心點 180 m 向陸後退 85 m，此處之扇面高程下切約 16 m。近域海床 (85 m-200 m) 為侵蝕趨勢，且已接近梅姬颱風前之海床高程，顯示此區域風浪之作用力強。較遠海床 (200 m-400 m) 則呈先淤積後轉為侵蝕，並趨於穩定。

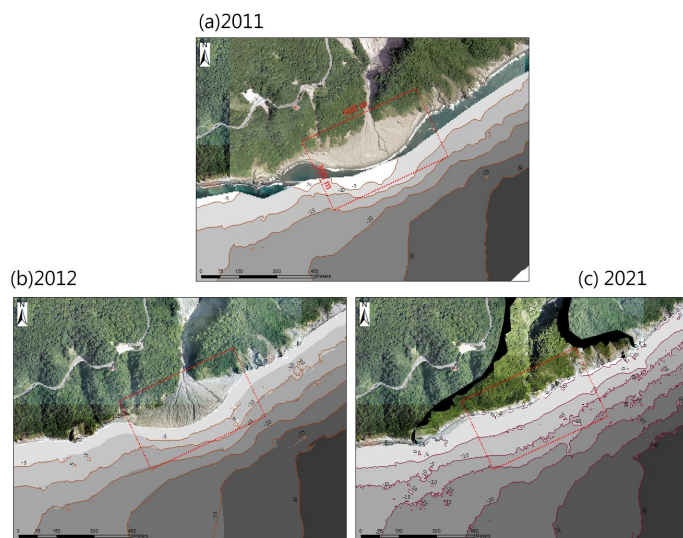


圖 14 東澳嶺海下地形測量成果 (2012、2021)

Fig.14 Bathymetric survey results off the Dong'ao Ridge coast (2012 and 2021)

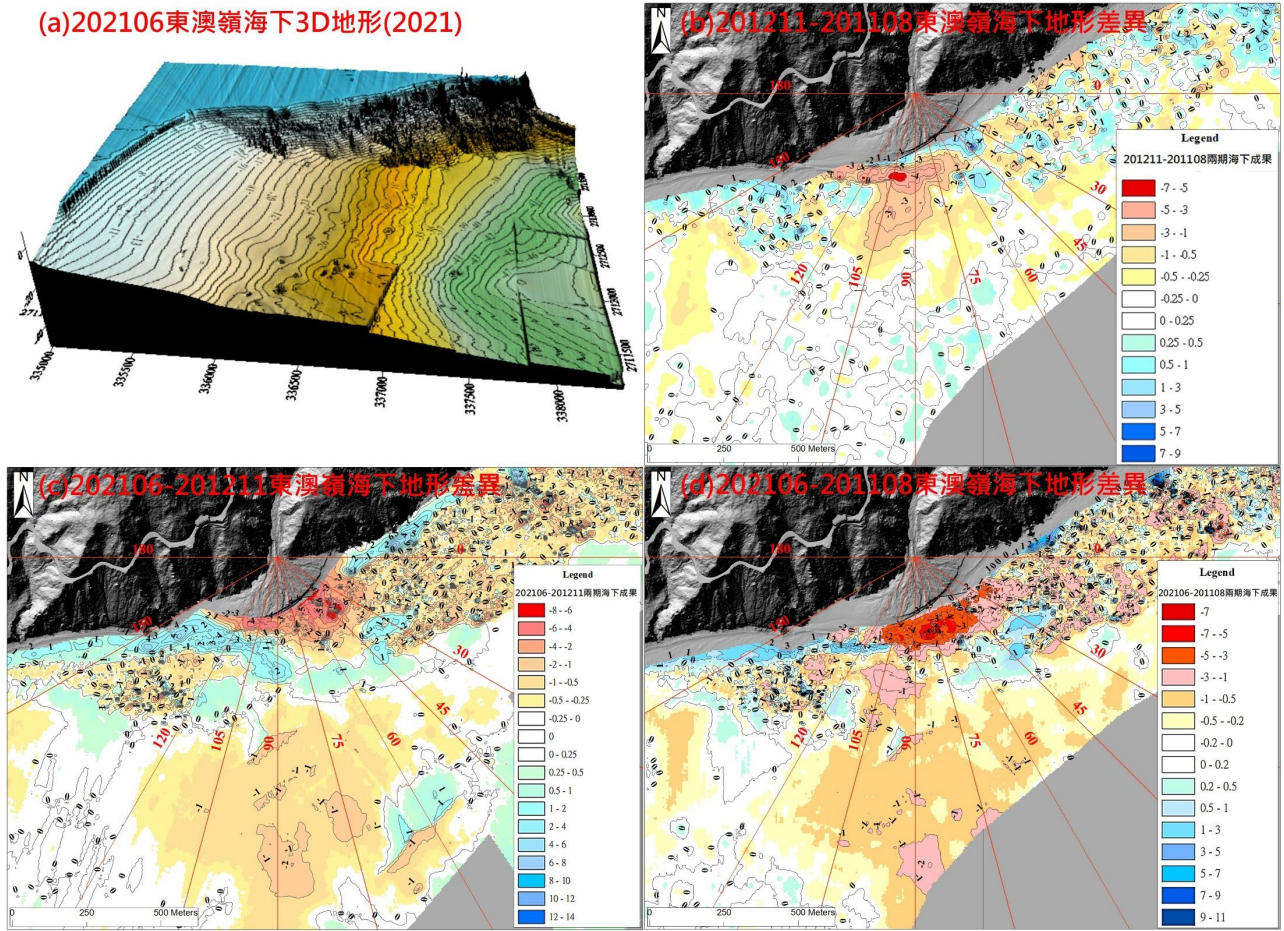


圖 15 三期東澳嶺海岸沖積扇水下地形測量差異比較 (2011、2012、2021)

Fig.15 Comparison of bathymetric differences among three survey periods (2011, 2012, and 2021)

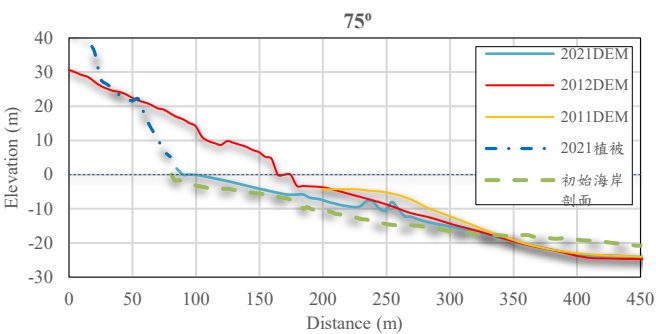


圖 16 初始海岸線與 2011/08/23、2012/12/19、2021/05/24 三期實測高程剖面比對

Fig.16 Comparison between the initial coastline and elevation profiles from 2011, 2012, and 2021

圖 17-18 中 各角度之陸域部分因有植生茂密(距扇中心 100 m 內)，以致 UAV 量測高程高於 2012 之扇面高程。沖積扇 0° 海域之海岸線維持約在 150 m 處，150-350 m 之海床為淤積。沖積扇 30° 徑向之海岸線由 150 m 處退縮至 100 m 處，且下切 10 m，海床則為沖淤互見 (150-200 m 淤積，200-350 m 侵蝕)。45° 徑向之海岸線由 160 m 處退縮至 90 m 處且下切 13 m，200-400 m 之海床以侵蝕為主。徑向 60° 之海岸

線由 160 m 處退縮至 80 m 處，下切 15 m，海床在 150-300 m 處為刷深，而在 300 m-350 m 處有輕微淤積。90° 徑向之海岸線由 180 m 處退縮至 100 m 處，下切 15 m)，海床在 150-350 m 處為刷深，且海域在 350 m 為穩定。105° 徑向之海岸線由 180 m 處退縮至 110 m 處，下切 13 m，海床在 150-300 m 處為刷深。海域在大於 350 m 處則為穩定。120° 徑向之海岸線由 200 m 退縮至 130 m，下切 10 m，在 130 m-250 m 呈刷深。在 280 m-370 m 處有輕微淤積。2011-2012 間的明顯淘刷位於沖積扇外緣西南側 (距離原點約 250-300 m)，最高淘刷深度約 5-6 m。2012 -2021 年之海床淘刷位置則介於為東南側 30° 與 60° 之間，由扇緣至距原點約 300m 間，淘刷深度達 7 m。徑向 90°-120° 區間，距原點 250-350m 間海床在 2011-2012 間刷深約 3-5 m。在 2012-2021 年間有逐漸回淤之現象，顯示出沿岸漂沙方向將沖積扇之扇端泥沙由東向西運移之效應，三期水下地形高程離原點距離 400 m 後並無太大差異。由圖 17-18 可知沖積扇地貌可得知 2012-2021 年間沖積扇受海上風浪溯升的淘刷作用，大幅減少沖積扇面積，並使陸上沖積扇高於高潮線的後灘 (backshore) 坡度轉為陡峭 (19-24°)，明顯高於臨海前灘 (foreshore) 區的灘線坡度 (8°-9°)。

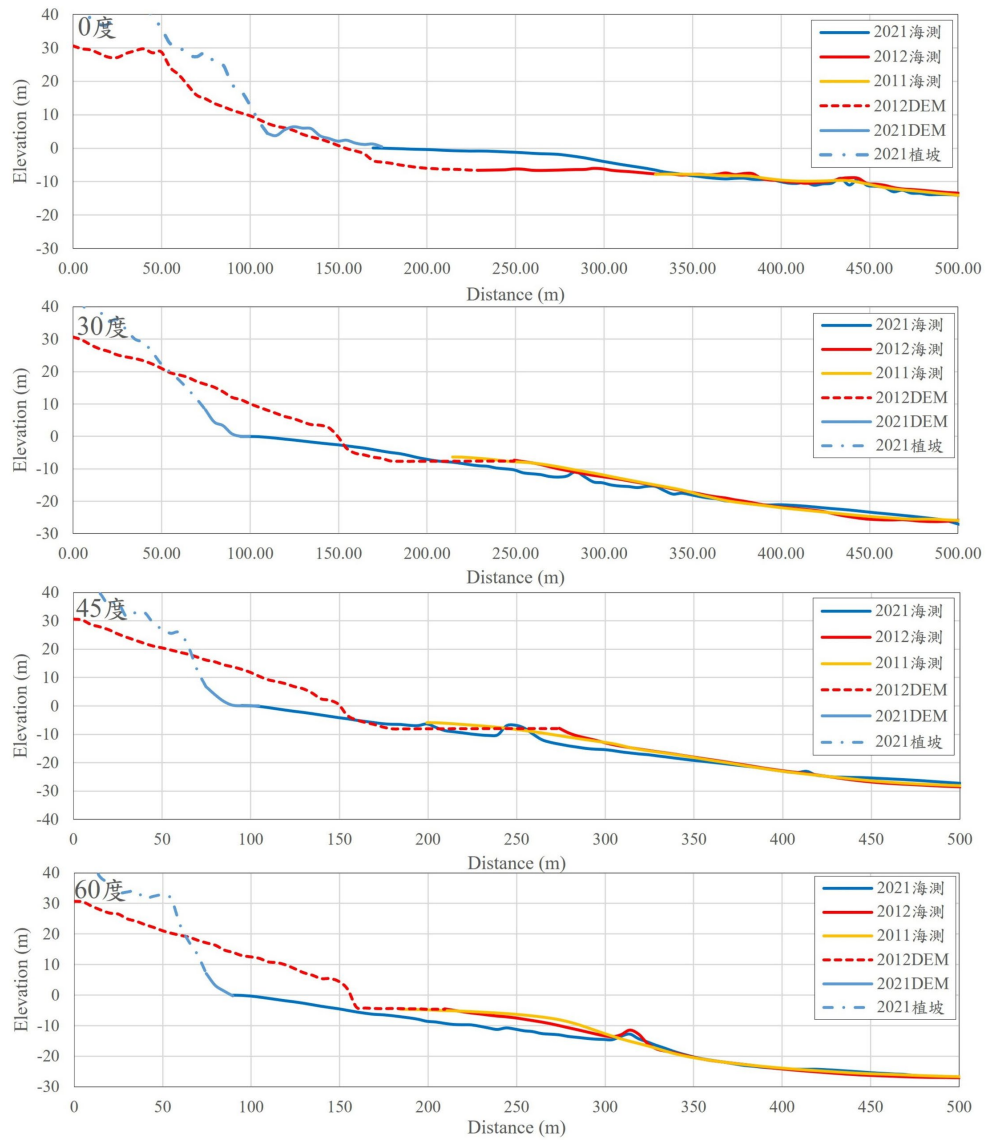
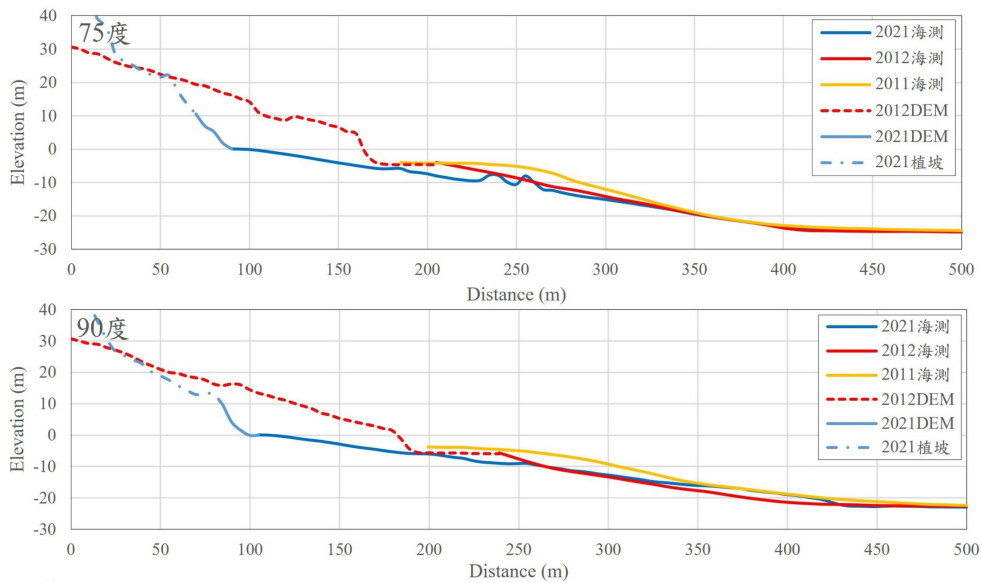


圖 17 三期沖積扇地形各角度地形量測成果比較 (0-60°)

Fig.17 Comparison of multi-directional bathymetric survey results among three survey periods (0-60°)



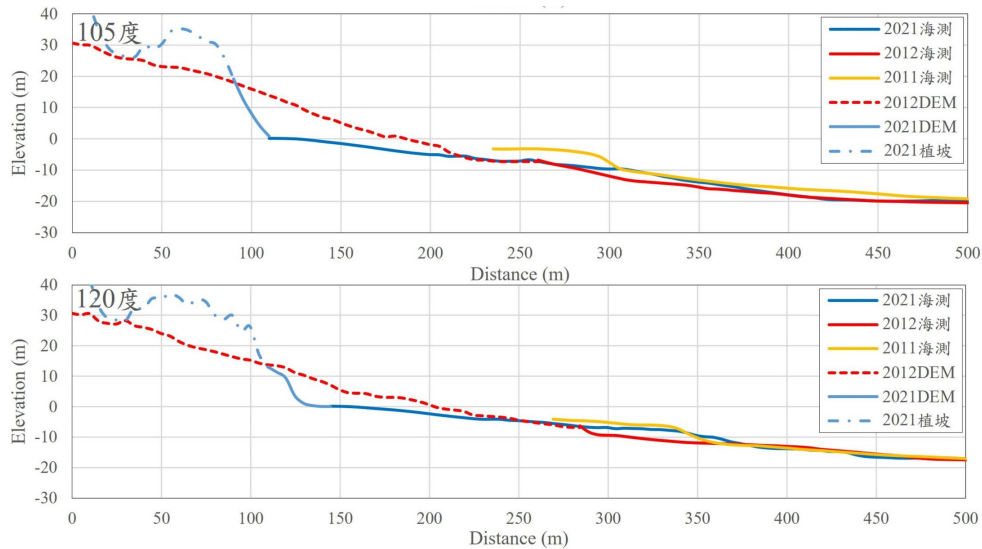


圖 18 三期沖積扇地形各角度地形量測成果比較 (75°-120°)

Fig.18 Comparison of multi-directional bathymetric survey results among three survey periods (75°-120°)

五、結 論

東澳嶺海岸沖積扇於 2010 年形成後的地貌演變歷程，是探討自然營力及人為工程影響濱海坡地集水區地形變化的一極佳案例。本文針對東澳嶺海岸沖積扇 2009-2022 年間的地形演變與歷次颱風歷程之關係進行量化分析，主要成果綜整說明如下：

1. 東澳嶺降雨引致邊坡崩塌的降雨強度門檻值與降雨延時符合幕次關係，新增崩塌面積與累積降雨量的關係符合打荻公式 (1971)，其中累積降雨量門檻約為 282 mm。
2. 以零水位為共同基準，潮位變化影響衛星測得沖積扇陸上面積的修正量介於 -2,784 - 3,241 m²；每年東北季風對沖積扇的沖蝕面積介於 321-3,329 m²。單一颱風事件的風浪造成的沖蝕面積可達 6,009-8,286 m²，相當或可超過整季東北季風的效應。
3. 大坑溪新建攔砂壩及施做邊坡防護工程後，海岸沖積扇的土砂料源供應不足且沖積扇頂端植生茂密，故近年來之沖積扇地貌變化主要受風浪影響且呈遞減趨勢。
4. 本文針對 2015 年天鵝颱風之風浪歷程 (2015/08/19-2015/08/24) 對東澳嶺沖積扇海域漂砂進行模擬，在湧浪與風暴區間，近岸流場對於陸上砂灘 (高程 0 至 3 m 範圍) 產生侵蝕，之後風暴期間的碎波導致強勁的東向西沿岸流將砂帶往西南方沿岸與外海。
5. 造成東澳嶺沖積扇面積增加之颱風，主要為其有效降雨量誘發邊坡崩塌，與颱風路徑關係並不明顯。造成沖積扇侵蝕的颱風，其主要特性為風速大、降雨量較少，且其路徑大多由台灣東北部外海掠過並往日本方向行進 (第六類型)，故東澳嶺位於此類颱風行徑路線之西側；少數則由台灣東南部登陸或台灣東南方往西前進 (第四、五類型)。沖積扇面積減少量與颱風小時平均風速呈正相關，導致沖積扇面積侵蝕的小時平均風速門檻值約為 135 km/hr。

6. 2012-2021 年間沖積扇受颱風之風湧浪溯升造成之淘刷，灘線向陸退縮 50-85 m，新灘線的高程已較原高程下切 10-16 m。陸上沖積扇高於高潮線的後灘坡度轉為陡峭 (19°-24°)，明顯高於臨海前灘區的灘線坡度 (8°-9°)。
7. 近域海床 (85m-200 m) 為侵蝕趨勢，侵蝕範圍為東南到南向 (30°-120°)，此區域的海床高程已接近沖積扇形成前的高程。近域海床的淤積範圍位於西南到偏西南側。較遠海域 (距岸 200-300 m) 的東南側區域有輕微淤積。量測結果與數值模擬結果相近，顯示在工程施作後，東澳嶺海岸沖積扇面積之控制因素已由降雨崩塌提供扇頂土砂料源轉為扇端之風浪侵蝕，故其陸上沖積扇面積遞減而灘線則呈退縮趨勢。
8. 東澳嶺所在的大坑溪集水區是降雨引致坡面崩塌的高潛勢區位，東澳又位於北行颱風路徑範圍，颱風期間湧浪及風浪常淘蝕海岸。人為保護工法可有限度地調節或減少土砂量下移，本案例顯示海岸灘線在缺少砂源補給情況下受風浪作用逐漸退縮。邊坡及溝床保護工法的施作方式及規模與集水區泥砂遞移率的關係，直接影響集水區的地貌穩定及土砂災害的規模及區位，應進行更深入的探討。

誌 謝

本文承蒙國科會補助計劃經費 (113-2625-M-008-010-), 自強測量公司提供水下地形測量, 論文審查委員及期刊主編於審查過程中提供寶貴修正意見, 謹此一併致謝。

參考文獻

- [1] 林啟文、高銘健 (2009), 五萬分之一台灣地質圖 (第二版), 圖幅第 16 號, 蘇澳, 經濟部中央地質調查所出版。(Lin, C.W., and Kao, M.C. (2009). Explanatory Text of the

- Gological Map of Taiwan, scale 1:50000, Suao, No.16, Central Geological Survey. (in Chinese))
- [2] 李璟芳、周憲德、魏倫璋、黃韋凱、冀樹勇、陳樹群、黃文昭(2014), 「東澳嶺崩塌地地形演育與沖積扇特性分析」, 103 年 中華水土保持學報, 45(3), 174-183。(Lee, C.F., Chou, H.T., Wei, J.L., Huang, W.K., Ji, S.Y., Chen, S.C., and Huang, W.J. (2014). "Geomorphologic Evolution of The Dong-Ao Peak Landslide, North Eastern Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 45(3), 174-183. (in Chinese))
- [3] 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 (2013), 2012年港灣海氣象觀測資料年報, 512 頁。(Institute of Harbor and Marine Technology (2013), Oceanographical Observation Data-Annual Report 2012, Taichung, Taiwan, 512. (in Chinese))
- [4] 廖吳章、陳世昌、傅立祥、楊賢德、陳仁達 (2015), 「台9 線蘇花公路 115.8k 路段災害歷史及邊坡保護工程紀實」, 台灣公路工程, 41(1), 2-23。(Liao, W.J., Chen, S.C., Fu, L.H., Yang, H.T., and Chen, J.D. (2015). "Chronicle report for Disasters and mitigation measures at 115.8K section on Route 9 (Suhwa Highway)." *Taiwan Highway Engineering*, 41(1), 2-23. (in Chinese))
- [5] Allen, P.A., and Hovius, N. (1998). "Sediment-supply from landslide-dominated catchments: Implication for basin-margin fans." *Basin Research*, 10, 19-35.
- [6] Booij, N., Holthuijsen, L.H., and Ris, R.C. (1996). "The SWAN wave model for shallow water." *Proceeding 25th International Conference Coastal Engineering*, Orlando, USA, 1, 668-676.
- [7] Bolle, A., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., and Trouw, K. (2010). "Application and Validation of XBeach for Three Different Field Sites." *Coastal Engineering Proceedings*, 32, 40-40. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.40>.
- [8] Chou, H.T., Lee, C.F., Lo, C.M. (2017). "The formation and evolution of a coastal alluvial fan in eastern Taiwan caused by rainfall induced landslides." *Landslides*, 2017, 14, 109-122.
- [9] Foreman, M.G.G. (1977). *Manual for tidal heights analysis and prediction*, Pacific Marine Science Rep. 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 66.
- [10] Guzzetti F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe." *Meteorology Atmospheric Physics*, 98, 239-267.
- [11] Hovius, N., Stark, C.P., Chu, H.T., and Lin, J.C. (2000), "Supply and Removal of Sediment in a Landslide-Dominated Mountain Belt: Central Range, Taiwan." *Journal of Geology*, 108, 73-89.
- [12] Larsen, M.C., Wicczorek, G.F., Eaton, L.S., Morgan, B.A., and Torres-Sierra, H. (2002) "Natural hazards on alluvial fans: The Venezuela debris flow and flash flood disaster.", *Fact Sheet 103-01, USGS*, <https://doi.org/10.3133/fs10301>, file:fs-0103-01.
- [13] Lee, C.F., Lo, C.M., Chou, H.T., Chi, S.Y. (2015). "Landscape evolution analysis of deep-seated landslides at Donao Peak, Taiwan." *Environmental Earth Sciences*, 75(29).
- [14] Lo, C.M., Lee, C.F., Chou, H.T., and Lin, M.L. (2014). "Landslide at Su-Hua Highway 115.9k triggered by Typhoon Megi in Taiwan." *Landslides*, 11(2), 293-304.
- [15] McCall, R.T., Van Thiel de Vries, J.S.M., Plant, N.G., Van Dongeren, A.R., Roelvink, J.A., Thompson, D.M., and Reniers, A.J.H.M. (2010). "Two-Dimensional Time Dependent Hurricane Overwash and Erosion Modeling at Santa Rosa Island." *Coastal Engineering*, 57(7), 668-683. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.02.006>.
- [16] Melton, M.A. (1965). "The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona." *The Journal of Geology*, 73(1), 1-38.
- [17] Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., and Lescinski, J. (2009). Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152.
- [18] Sandersen, F., Bakkeoi, S., Hestnes, E., and Lied, K. (1996). "The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rock mass stability." *Proc. of the VII International Symposium on Landslides*, Trondheim, 1, Balkema, Rotterdam, 97-114.
- [19] Tang, C., Rengers, N., van Asch, T.W.J., Yang Y.H., and Wang, G.F. (2012). "Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqui city, Gansu Province, northwestern China." *Natural Hazards Earth System Science*, 11, 2903-2912.
- [20] Uchiogi, T. (1971). "Landslides due to a continual rainfall", *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 23(4), 21-34 (in Japanese)
- [21] Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands (WWW.AQUAPUBLICATIONS.NL)
- [22] Yu, B., Yang, Y., Su, Y., Huang, W., and Wang, G. (2010), "Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu county, Gansu province of August 7, 2010." *Journal of Engineering Geology*, 18(4), 437-444 (in Chinese).

2025 年 11 月 28 日 收稿
 2026 年 01 月 05 日 修正
 2026 年 01 月 16 日 接受