

越波影像判釋於花蓮港區防波堤防災應用之研究

陳鈞彥¹ 林雅雯² 吳漢倫³ 蕭士俊⁴ 陳彥龍⁵ 左秀文⁶

¹交通部運輸研究所運輸技術研究中心 副研究員

²交通部運輸研究所運輸技術研究中心 科長

³國立成功大學水利及海洋工程學系 博士後研究員

⁴國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

⁵國立成功大學水利及海洋工程學系 博士後研究員

⁶國立成功大學水利及海洋工程學系 研究助理

摘要

花蓮港東防波堤受颱風外圍環流或長浪影響，可能發生越波情形，對現場施工、巡查作業及垂釣活動人員造成安全風險，為強化港區防波堤浪襲災防管理能力，本研究於花蓮港區設置監測設備，蒐集防波堤近岸波浪影像，導入 ResNet50 深度學習架構進行越波影像分析，並結合數值模擬與高斯過程之機器學習技術，發展越波影像判釋與機器學習之數值預警模組，進行越波情形判釋及預測，相關成果整合建置「花蓮港東堤越波示警及預警系統」，提供即時示警與數值預測資訊，供花蓮港務分公司應用於工程作業、安全巡查及人員活動管理，提升港區災防管理效能與作業安全。

一、前言

花蓮台 11 線浪襲路段在颱風季節易遭受大浪襲擊，造成公路溢淹、路基淘刷，影響用路人安全，交通部運輸研究所(以下簡稱運研所)為提供海岸公路及港區防波堤浪襲災防管理決策支援，與國立成功大學合作發展海岸公路及港區防波堤浪襲影像判釋技術，並應用數值模式及機器學習技術建立浪襲預警模組，提供即時浪襲示警及數值模擬預警資訊，因花蓮港東防波堤易受颱風外圍環流或長浪影響，可能發生越波情形，此外，除颱風影響之外，東北季風之長浪也可能產生瘋狗浪，對現場施工、巡查作業及垂釣活動人員造成安全風險。

根據 2015 年國立臺灣海洋大學、臺北城市科技大學及中央氣象署合作研究報告指出 (郭等人，2015)^[1]，瘋狗浪事件在臺灣東北部及東部次數最多，分別為新北市、基隆市、宜蘭縣及花蓮縣皆發生超過 28 件；其次為臺東縣、高雄市、連江縣，發生 10 件至 28 件，其他西半部及離島縣市相對發生事件較小，至少會發生 1 件至 10 件，於非颱風季節時，以 1、11、12 月發生瘋狗浪事件最多(皆超過 20 件)，其原因可能是東北季風不斷吹拂海面，使沿岸風浪增強有關，當海面上有颱風發展時，7 月至 11 月皆發生 15 件以上，其中又以 9 月發生的件數最多。另外，以瘋狗浪事件發生當下，太平洋上是否有颱風進行分類，數據顯示僅有 3%出現在氣象署發布颱風警報時，多數瘋狗浪事件則出現在無發布颱風警報和非颱風季節期間。

鑒於許多浪襲意外與越波有關，惟越波通常無現場觀測數據或影像等直接資訊，故有必要針對越波情況進行監測，並藉由海岸即時影像推估是否發生越波，以強化港區防波堤越波災防管理能力，國立成功大學與運研所於 2023 年合作研究報告中(吳等人，2024)^[2]，於花蓮縣豐濱鄉台 11 線人定勝天路段設置影像設備及安裝波浪溯升計，蒐集海岸公路日間及夜間影像，透過影像校正、色彩轉換、分群、邊緣偵測，發展波浪溯升、浪襲之影像判釋方法，可由影像判釋水線位置變化及波浪溯升高程，並建立自動化判釋流程，以精進運研所已建置之花蓮海岸公路浪襲預警系統，提供公路局東區養護工程分局於颱風浪襲封路決策參採，強化通行安全管理，本研究延續台 11 線人定勝天越波影像判釋之研究經驗，進一步發展花蓮港東防波堤越波影像判釋技術與機器學習之數值預警模組，提供管理單位越波之示警、預警資訊。

二、文獻回顧

國外針對海岸公路防護，首要目標為準確掌握海岸情況，進而評估災害來源及影響結果、判定風險(risk)、脆弱度(vulnerability)與調適性(adaptation)，並考量極端災害及氣候變遷等影響因素。EurOtop(2016)^[3]根據大量的現場調查及實驗數據，利用類人工智慧之類神經網路分析法，提出適用於不同地形及結構物類型之溯升高及越波量估算公式，然而，其現場觀測數據以歐洲為主，若應用於臺灣，需考量因不同環境造成之差異。FHWA(2014)^[4]則指出，海岸環境評估應涵蓋暴潮、波浪及海岸地形等因素造成之影響，透過風險評估劃設不同程度之影響區域，進而規劃以公共安全為核心之分級管理措施，並做為後續工程防護手段之前期評估依據。

就整合式預警系統而言，Sabino et al.(2014)^[5]分享葡萄牙海岸越波災害管理經驗，該系統整合多套波浪模式，包括外海大範圍波浪模擬與近岸波浪傳遞計算，再透過類神經網路或經驗公式(Mase et al., 2013)^[6]推估溯升與越波，藉由預先設定之門檻值，區分不同層級之災害警示，並以地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)製作災害圖資，透過不同顏色的圖層，以不同色階呈現災害嚴重程度，例如，紅色代表較高風險等級。為簡化系統資訊並提升民眾與遊客之可理解性，其對外呈現內容主要包括波高、週期及波向等海象資訊，而平均越波量則以災害等級色階表示，該預警系統介面可參見圖 1 所示，另就警戒門檻而言，美國海岸工程手冊(Costal Engineering Manual, CEM)^[7]亦訂有越波災害相關門檻值，其定義範圍更廣泛，較適合作為國內(如台 9 線與台 11 線海岸公路)預警作業之參考。此外，相關災害資訊除發布於政府網站及管理單位電子郵件外，亦整合至手機應用程式及社群媒體平台(如 Twitter)，以提升警示資訊傳遞效率與涵蓋範圍。預警系統之建置除具減災功能外，亦可做為未來國土規劃與開發決策之參考依據。

影像判釋技術亦有運用於離岸流判釋之相關研究，Liu and Wu.(2019)^[8]以分割(segmentation)、正射糾正(ortho-rectification)、和離岸流偵測(flash rip detection)的方式，從監視影像中自動辨識 Flash rip(圖 2)。Maryan et al.(2019)^[9]比較 Viola-Jones 演算法、卷積神經網路(CNN)及基於通道狀圖像資料集的元學習器(Meta-Learner)，指出 CNN 雖具有透過特徵影像進行特徵

學習的優勢，但容易出現過度擬和的情形，需要相當大量的資料(數十萬筆)和長時間的進行超參數(hyperparameters)訓練及驗證。

透過海岸光學監視系統(Beach Optical Monitoring System, BOMS)，可掌握波浪溯升於時間與空間尺度上之分布特性(如圖 3)，藉由地理影像校正及影像分析技術，擷取波浪溯升過程與最大溯升位置，以瞭解觀測區域近岸波浪傳遞特性，相較於傳統溯升計之點位量測方式，影像判釋波浪溯升技術除可取得高頻率時間序列之近岸溯升變化外，亦可同時監測較大範圍之面狀溯升分布情形(如圖 4)。海岸公路為臺灣東部重要交通幹道，惟常受颱風長浪影響而發生浪襲事件，為降低浪襲造成之生命財產損失，運研所已建置海岸公路浪襲預警系統，透過浪襲預警機制降低災害風險。該系統主要係以數值浪襲資料庫為基礎，並介接既有海象預測資料，達成海岸公路浪襲預警目的，目前已完成花蓮及臺東 2 處海岸公路預警系統建置(運研所，2018、2021)^[10]。

近年來影像判釋技術應用範圍廣泛，除民生、安全及醫療等用途外，亦有應用於海岸相關研究，莊等人(2021)^[11]以 YOLOv4 深度學習模型為架構，開發出可從影片中自動識別海灘區常見之 2 大類型離岸流，通道狀與沉積物雲羽狀(sediment plume)的模式，精確度可達 86.76%和 82.37%。郭等人(2009)^[12]指出，以較高影像擷取頻率的 CCD 攝影機進行海表面影像拍攝，應具備沿岸流監測分析之可行性。周等人(2011)^[13]探討 CCD 攝影機應用於現地波浪量測，並以最小二乘法判斷波浪方向的可行性。王等人(2017)^[14]利用光學攝影機記錄海岸異常波浪(瘋狗浪)，並應用影像邊界偵測技術，自動辨識異常波浪水花之邊界，以分析波浪與岸礁交互作用所產生之水花特性。董等人(2019)^[15]針對前述 2 處異常海象之發生機制，研發預警系統，並藉由瘋狗浪影像案例，進行機率預警模式率定與雙向驗證。本研究過往亦有影像判釋技術發展之相關經驗，於 2021 年透過海堤上所架設之攝影設備，拍攝海堤溯升影像，分析影像中溯升訊號，藉以推估海堤溯升高度，提供越波預警系統校驗，做為溯升機器學習模型調校之依據。

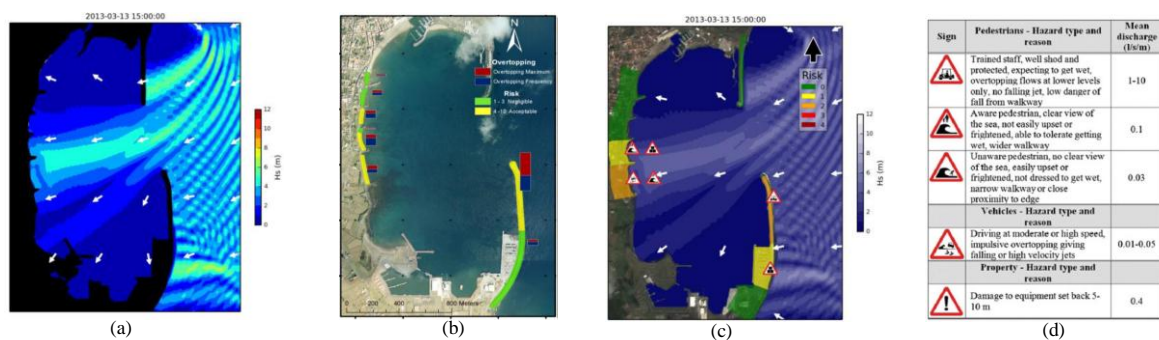
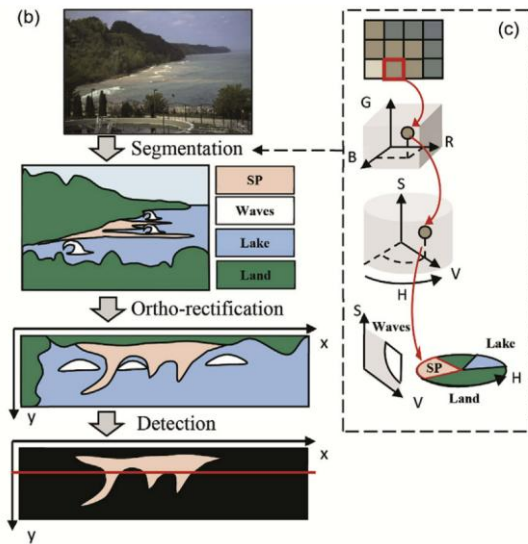
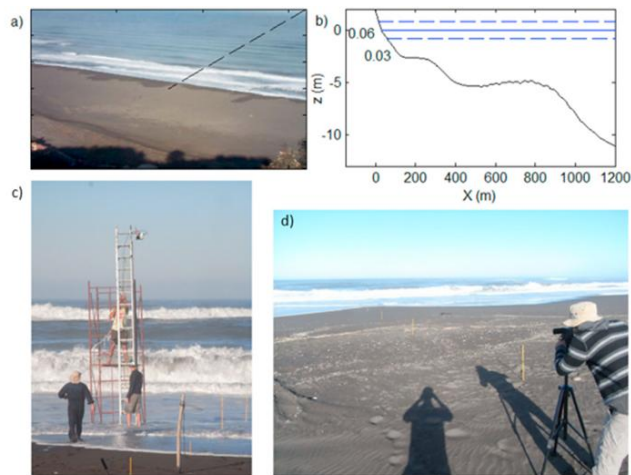


圖 1 葡萄牙海岸越波災害預警系統



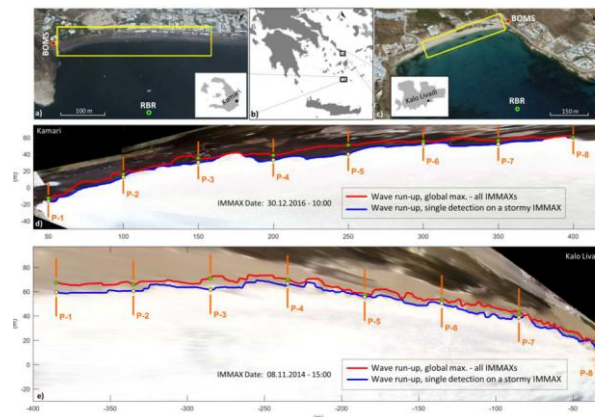
資料來源：Liu and Wu, 2019^[8]

圖 2 Flash rip 偵測方式



資料來源：Almar et al., 2017^[16]

圖 3 架設波浪潮升監視系統



資料來源：Chatzipavlis et al., 2019^[17]

圖 4 透過影像分析技術萃取波浪潮升情況

三、越波影像判釋分析

3.1 港區影像蒐集

本研究於花蓮港區西防波堤設置光學攝影機(Axis Q1786-LE)，以東防波堤之新東堤段為研究區域進行拍攝(如圖 5)，該攝影機於低照度環境下，具備自動啟用紅外線功能，可提升夜間影像之可判讀性，以利觀測越波情形，增進影像判釋技術於夜間低光源環境下之應用可行性。

圖6 為 2025 年楊柳颱風與樺加沙颱風期間觀測到的日間越波影像，圖 7 則為樺加沙颱風期間夜間越波影像，影像中可見，花蓮港東防波堤在颱風影響期間，出現明顯越波現象，夜間影像雖較模糊，但仍可辨識堤頂外溢之水體，顯示在低光環境下仍能有效記錄越波事件。整體而言，蒐集之影像資料，不僅可做為實際颱風條件下防波堤越波行為之觀測依據，亦可做為後續越波數值模擬及防波堤安全性評估之參考基礎。



圖 5 花蓮港區東防波堤影像拍攝範圍



圖 6 2025 年花蓮港區東防波堤越波影像(左：楊柳颱風、右：樺加沙颱風)



圖 7 花蓮港區東防波堤夜間影像(樺加沙颱風)

3.2 判釋方法概述及流程

花蓮港區東防波堤因受 2024 年康芮颱風極端波浪影響，導致堤體結構受損，並造成影像場景改變，如圖 8 所示，此變化使原本採用之高度仰賴場景穩定性水線判釋方法，需重新投入大量計算資源進行內部參數調校，方能維持合理之辨識準確率，考量越波影像判釋之目的，為於判別影像中是否發生越波事件，並非精確定位水線位置，為提升影像判釋方法之彈性、運算效能及可遷移性，本研究採用深度學習技術，以 ResNet50 架構為基礎，開發適用於花蓮港防波堤越波影像判釋模型。



圖 8 花蓮港區東防波堤災損前(左)、災損後(右)

ResNet50 屬於一種殘差神經網路(Residual Network)，其建立於卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)架構上，具備多層深度與跨層連接機制，可有效解決深層網路訓練過程中的梯度消失問題，CNN 則為專為影像處理所設計的深度學習架構，擅長從原始影像中自動萃取多層次、具有空間語意的局部特徵，進而提升模型對於不同場景與擾動條件下的分類準確率與泛化能力，透過本模型的訓練與在地化調校，可使擺脫對特定水線條件的依賴，更具備即時性與長期維運所需之穩定性，於進一步應用於其他港區或惡劣海況下的越波判釋作業，建立可擴展基礎。

考量攝影機於夜間補光時，影像呈現近似灰階之單色調特性，其色彩分布與特徵表現與日間彩色影像有明顯差異，影響影像特徵萃取與判釋模型推論之準確度，本研究針對彩色與近似灰階影像採行雙軌化訓練，以確保模型在不同光照條件下均具備優異的適用性與穩定性，整體判釋流程分為下列 3 個步驟：區分彩色與近似灰階影像、依據影像特性選擇對應模型進行推論、輸出判釋結果(以文字標記與標註影像)。

在訓練資料部分，本研究選取 2023 至 2025 年颱風期間所蒐集之影像，建立涵蓋越波與非越波事件之資料集，資料集除收錄多樣化氣象條件下之實際場景，納入了 2024 年花蓮港東防波堤結構受損前後之對照影像，且包含越波與非越波情形，透過完整之資料集建立，本研究模型能深度學習防波堤環境變動前後之越波特徵，提升模型於港區實際環境變化下的判釋能力及應用性。

為有效區分彩色與近似灰階影像，首先將每張 RGB 影像轉換至 HSV 色彩空間，並計算其中 V 通道(亮度)的平均值做為該影像之代表亮度指標，以海葵颱風期間 2024 年 9 月 3 日之影像為例，所計算之 V 通道平均值的數量分布顯示(如圖 9)，整體分布顯集中於 2 個區間，其中數值較低者(藍色，約分布於 0.1 至 0.2 之間)對應至夜間大部分的影像，呈現高度集中趨勢，主因為夜間影像受外部光源影響較少，故亮度變異較小，而數值較高者(橘色)則屬於日間影像，受自然光強度變動影響，其分布範圍較分散。

為建立自動化分類門檻，本研究採用 K-means 分群演算法對所有影像之 V 通道平均值進行分群，所得之最佳門檻值為 0.4，此門檻值做為彩色與近似灰階影像之分類依據，進一步導入自動化判別流程中，藉以決定後續推論階段所使用的模型版本(彩色模型或夜間模型)。

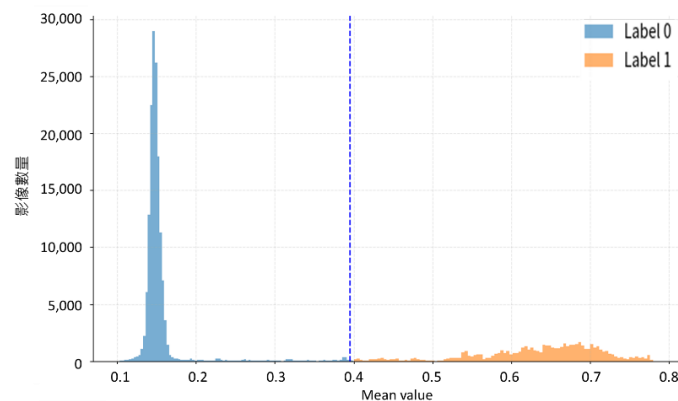


圖 9 花蓮港區防波堤 2024 年 9 月 3 日單日之單張影像平均亮度(V)分布

3.3 影像資料集及模型訓練成果

為建立具備日夜間判釋能力之越波影像深度學習模型，研究依據前述 V 通道平均亮度之分類結果，將影像樣本分為日間與夜間 2 大子集，進行資料集建立與標記，並依照常見之影像分類訓練流程，將各類資料進一步以 6:2:2 的方式劃分為訓練集(train)、驗證集(val)與測試集(test)。

本研究以圖 10 之示意圖，建置花蓮港東防波堤越波影像判釋模型流程，為有效率地建立影像資料集，初期透過少量經人工標註建立初步分類模型，隨後利用該模型進行大規模影像之初步分類，經初步分類後之影像再由人工確認及修正後重新訓練模型，透過此循環式流程，可逐

步擴充影像資料庫並提升標註品質，使模型訓練樣本更趨完整，以達成高效且準確的越波影像判釋能力。



圖 10 花蓮港區防波堤越波影像判釋模型建置流程圖

其中，夜間影像資料資料量相對較大(彙整如表 1 所示)，整體涵蓋 Normal(無越波)與 Overtopping(越波)兩類情境，且兩類樣本之比例趨於均衡，有利於模型訓練之穩定性，日間影像資料集(彙整如表 2 所示)，其中無越波影像數量明顯多於越波影像，主要原因有二：(1)颱風前後或非風浪期間，常有船舶行經，船體若出現在防波堤附近易被模型誤判為越波現象；(2)日間影像受光照變化顯著影響，易產生反光與陰影，需蒐集更多非越波影像以增進模型對光照差異的適應能力，為克服資料不平衡問題，於訓練階段採用資料增強(data augmentation)策略，針對越波影像進行隨機旋轉、對比度增強與亮度調整等操作，以擴充少數樣本並提升模型的學習多樣性，此方法可使訓練資料於學習過程中維持相對平衡，進而有效提升模型之泛化能力與判釋穩定性。

表 1 花蓮港東防波堤夜間影像資料集(2023-2025 颱風期間)

	Normal (無越波)	Overtopping (越波)
Train	2553	2059
Val	851	686
Test	852	687

表 2 花蓮港東防波堤日間影像資料集(2023-2025 颱風期間)

	Normal (無越波)	Overtopping (越波)
Train	4102	651
Val	1367	217
Test	1368	218

為評估模型於不同環境條件下之判釋效能，分別以夜間與日間影像資料進行測試，利用混淆矩陣(confusion matrix)進行精度分析，結果如圖 11 所示，夜間模型測試結果顯示，在總計 1,539

張影像中，無越波(Normal)影像有 848 張判釋正確，僅 4 張誤判為越波，越波(Overtopping)影像則有 676 張判釋正確，誤判為無越波者僅 11 張，整體分類錯誤張數僅 15 張，對應整體準確率達 99%，越波判釋準確率亦為 99%。此結果顯示夜間模型於紅外線補光模式下具備高度辨識穩定性與準確性，能非常高準確的判釋出越波，滿足實務應用需求，而日間模型測試集共計 1,587 張影像，其中無越波影像有 1,362 張判釋正確，僅 7 張誤判為越波；越波影像有 202 張判釋正確，有 16 張誤判為無越波，整體分類錯誤張數為 23 張，整體判釋準確率為 99%，越波判釋準確率為 97%。

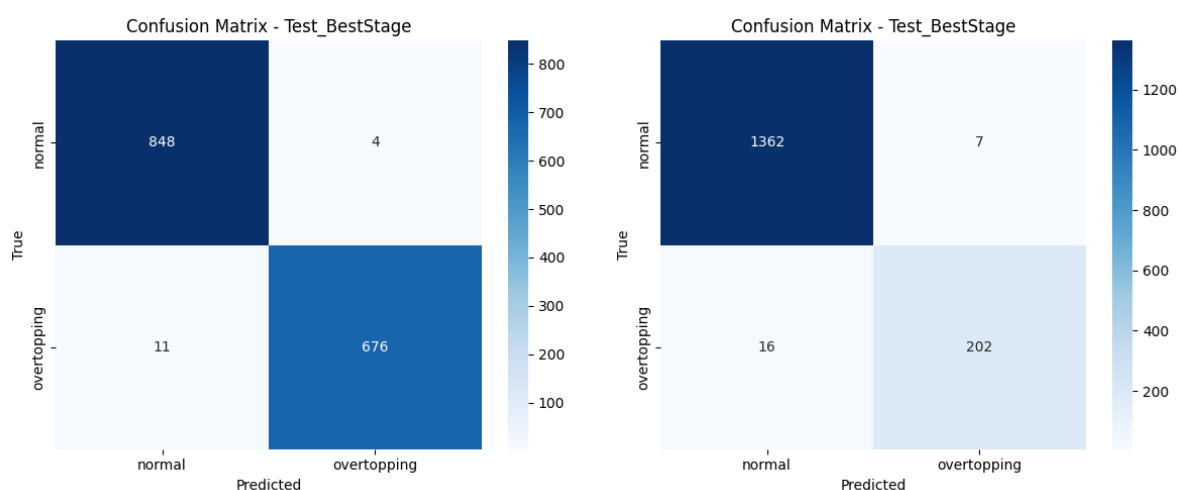


圖 11 花蓮港區東防波堤夜間(左)、日間(右)影像的測試集混淆矩陣

綜合上述分析結果，本研究建立之分類模型，於日間與夜間影像皆展現出良好的判釋效能，然而，模型仍可能因日照變化、氣象條件或船舶通過等複雜因素而產生誤判。未來可進一步著重誤判影像分析其錯誤型態與樣本擴充，以提升模型於多樣環境下之泛化能力與實務應用價值。

3.4 作業化系統建置

為達成花蓮港區越波影像之長期穩定監測與判釋，本研究開發一套基於 Python 語言之自動化影像判釋作業化流程，系統架構如圖 12 所示，透過 API 介接即時影像，自動下載影像資料，進行越波影像判釋。

將下載之每張影像先轉換為 HSV 色彩空間，取其 V 通道之平均值為分類依據，若亮度平均值 $V < 0.4$ ，則判定為夜間影像，導入夜間影像專用之越波判釋模型，反之，若 $V \geq 0.4$ ，則判定為日間影像，由日間模型進行判釋，此分類機制可有效因應影像光照條件差異，選用最適模型以提升整體準確度，當影像經模型判釋為發生越波時，系統將此類影像視為有效資料，並標記為危險狀態(紅燈)，至於判釋結果為無越波之影像，標記為安全狀態(綠燈)，此流程不僅有助於提升資料品質控管，也能針對具風險潛勢之事件進行有效篩選與回報，確保整體示警資訊之實用及準確性。

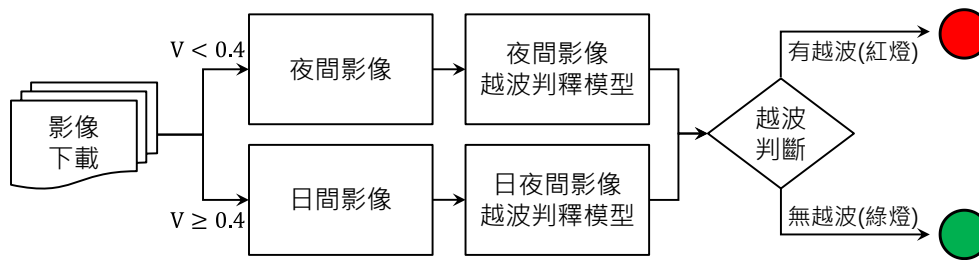


圖 12 花蓮港區防波堤越波影像作業化系統分析流程

四、數值模擬越波預測

本研究除透過越波影像判釋分析提供越波示警資訊，亦以波浪模式進行越波數值模擬，以提供越波預警資訊，應用數值模式預先模擬各斷面潮位、波高、週期不同情境條件之斷面溯升情況，並將其成果納入資料庫做為預警應用，當運研所「臺灣近岸海象預測系統 2.0」(TaiCOMS 2.0)之外海預測資料發布時，會將外海波浪與潮位條件代入資料庫中，檢索相對應情境之斷面越波數據，以達到越波預警之成效。儘管此技術成功連結了高解析度斷面模擬與大範圍海象預測資料，且透過預先建立資料庫，可以達到快速獲得斷面越波之情況，惟未能完整反映波向的影響，此外，因海象預測有其不確定性，亦會反應至越波預測結果。

因此，本研究透過機器學習方式，於現有預測系統基礎下，透過機器學習模型方式增加波向考量，以配合預警系統海象資料來進行分析，並進一步以迴歸建立其關係，此建置工作可分為 2 階段進行，第 1 階段透過二維平面數值模式產出模擬樣本，納入波高、週期、波向及潮位等參數建立機器學習模型，搭配 TaiCOMS 2.0 預測資料即可進行越波預測，第 2 階段當影像分析資料量足夠後，可納入海象觀測或再分析資料至機器學習模型進行修正，使越波預警資料更為在地化。

4.1 颱風事件追算及越波模擬

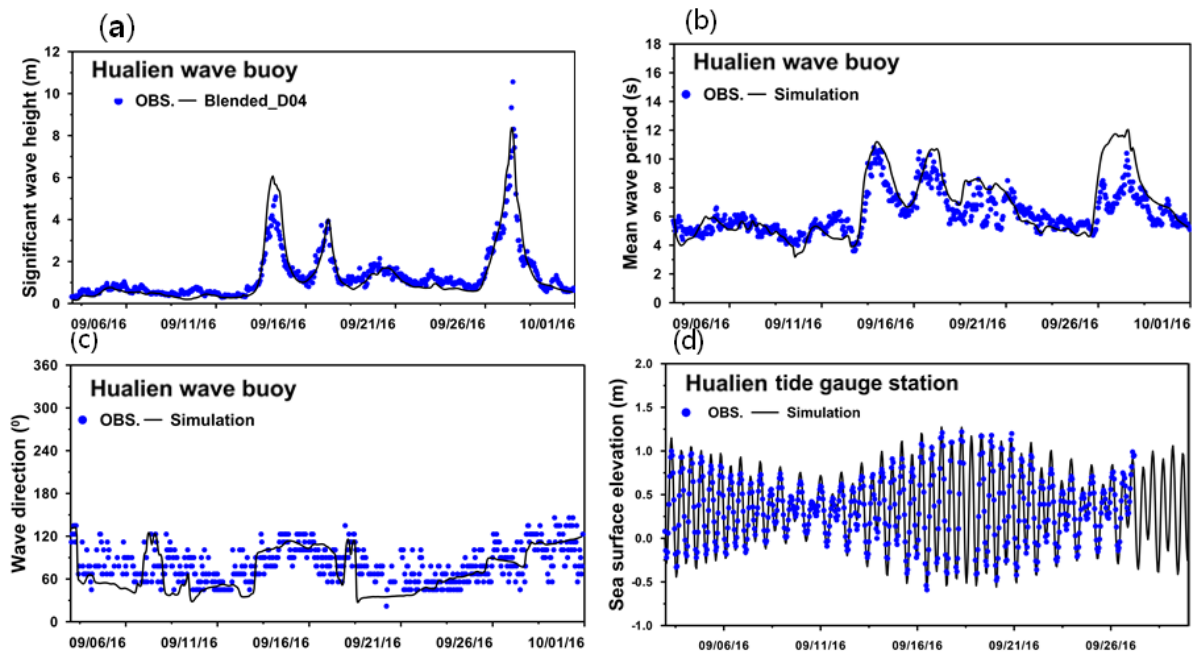
本研究所使用之模型主要是透過機器學習方式連結外海波高、潮位、週期、波向及越波關係，發展由外海海象資料推估防波堤越波情形之技術，提供越波警戒之依據，其中各步驟分述如下：

首先，透過數值模式進行颱風事件追算，以建立外海波浪與水位空間分布資料，本研究採用開源之波流耦合模式 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model, Zhang et al., 2016)^[18]，結合 WWM-III(Wind Wave Model III, Roland et al., 2012)^[19]可模擬颱風風浪變化，另應用混合風場，整合 ECMWF-ERA5 再分析風場及參數風場(Modified Rankine Vortex, MRV)，強化颱風波高和暴潮偏差追算之可靠性。

其次，導入上述颱風波浪追算成果，進行該研究範圍越波追算。透過完全非線性 Boussinesq 波浪模式 FUNWAVE(Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model, Kirby et al., 1998)^[20]，模擬港區周

圍波場與越波行為，透過相對應海象追算資料之港區越波模擬，以建立港區越波資料，此外，需建立越波訓練樣本資料，其來源可分為「外海」與「港區海域」兩類，外海主要為各颱風事件之波高、波向、週期與水位資料，港區海域則為相對應之港區越波推估資料。

最後，採用高斯過程(Gaussian Process, GP)做為機器學習核心演算法，建構外海海象資料與港區越波之連結性，本研究共追算 1990 年至 2022 年之 33 場颱風事件，每場颱風事件至少模擬 252 小時，並以每小時海象資料做為訓練樣本。圖13 為颱風事件追算模擬之海象資料驗證圖，



該圖是以 2016 年莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬颱風事件為例。

圖 13 颱風事件追算模擬與觀測資料比較(以 2016 年莫蘭蒂(9/12-9/15)、馬勒卡(9/15-9/18)、梅姬颱風(9/25-9/28)為例)

4.2 越波模擬分析及機器學習模型建置

花蓮港位於臺灣東部，面向太平洋，港口呈南北走向之狹長人工港口，由東、西兩個防波堤相接形成，如圖 14 所示，圖中東防波堤分為舊東防波堤和新東防波堤延伸段(以下稱為新東堤)，新東堤全長 1835 公尺，堤頭長 30 公尺，總長達 1865 公尺，此外，花蓮港開放新東防波堤部分區域為垂釣活動範圍，如圖 15 所示。開放條件規定，在花蓮港附近漁業氣象平均風力達到 6 級(含)或以上，最大陣風達 9 級(含)以上，浪高超過 2 公尺，或遇颱風外環流影響、發布海上颱風警報且花蓮列在警戒區內、暴雨、暴潮等天氣不佳的情況下，則取消開放釣魚區，因花蓮港東防波堤易受颱風外圍環流、長浪或東北季風長浪影響而有越波情形，對現場施工、巡查作業及垂釣活動人員造成安全風險，本研究以新東防波堤為對象，發展數值機器學習越波模型，介接海象預測資料後，達到越波警戒之成效。

圖 16 為港區追算情境模擬結果(波高：5 公尺，週期：16.1 秒，水位：1.2 公尺)，模擬結果顯示波浪在進入花蓮港時，因地形陡變而於港口南側產生顯著的波浪變形現象，模擬中觀察到 A 區域存在疑似駐波現象，此部分需在進行確認是否真有此現象發生，或是模式設定時該處因消波參數需要再調整，使其反射能量降低。根據情境模擬結果，越波現象主要集中於新舊防波堤銜接處(B 區)、亦為本研究監視攝影機覆蓋範圍及堤頭位置。進一步以選取 2023 年海葵颱風做為實測驗證案例，結合現場影像紀錄與人工判釋結果(如圖 17)進行比對，透過上述模擬方式，對應該事件每小時海象資料進行越波模擬，並與越波記錄資料進行比對，於該事件 85 筆資料比對中有發生越波事件的誤判率約 14%；無發生越波的誤判率約 8%。



圖 14 花蓮港區東防波堤示意圖

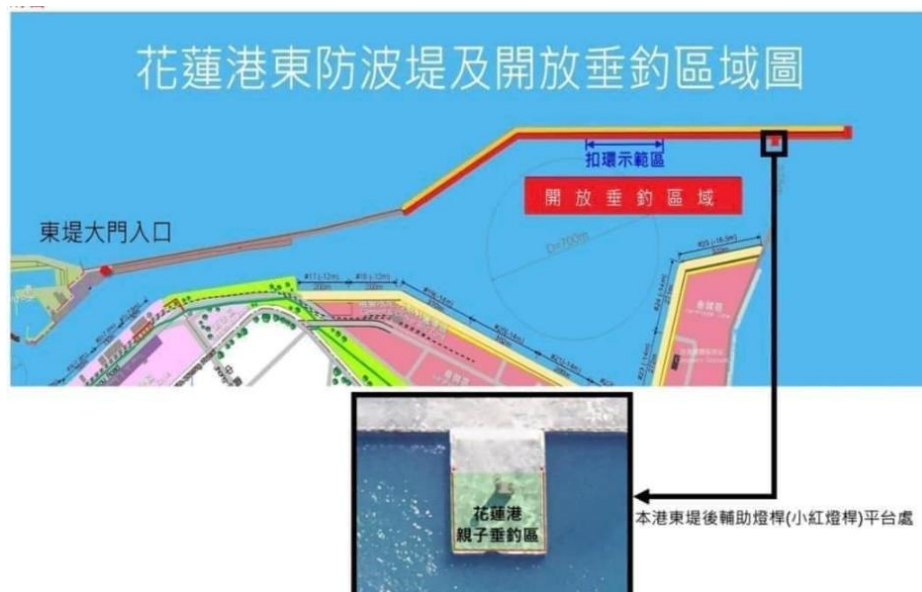


圖 15 花蓮港東防波堤開放垂釣區域圖

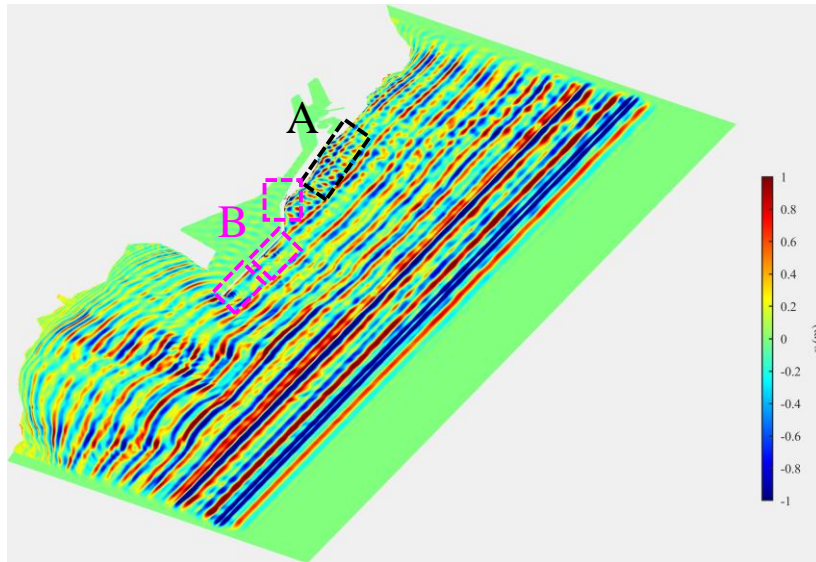
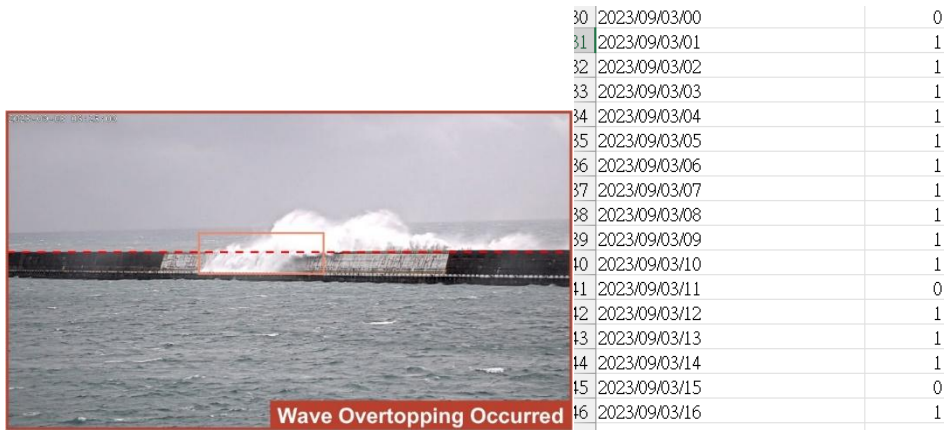


圖 16 花蓮港近岸波場模擬結果



備註：人為判釋越波資料(1 為越波；0 為無越波)

圖 17 2023 年海葵颱風事件越波記錄資料

進一步以相同上述方法，模擬 33 場颱風事件，並將數值模擬分析之越波結果(0：無越波，1：越波)做為輸出值，將花蓮港外海的波高、週期、潮位和波向作為輸入值進行高斯過程機器學習模型之建置。首先，透過最大差異演算法(MDA)依輸入值的資料集分布，劃分為訓練集、驗證集和測試集，接著以訓練集(3170 筆資料，如圖 18)進行機器學習模型之參數訓練，並透過驗證集(3698 筆資料)調整訓練集的超參數，最後以測試集(3698 筆資料)進行模式成效的確認，成果如圖 19 所示，不同資料集的相關係數皆高於 0.8 以上，顯示訓練所得之模型具有良好的適用性，由於用於訓練模型的輸出參數為「有越波=1」和「無越波=0」2 種，故資料庫的真值僅會有 1 或 0 兩種，而機器學習模型的預測值呈現仍呈現 0~1 的浮點數值結果，可以看到預測的結果雖呈現散佈的型態，但仍相當集中於真值附近。

圖 20 顯示出，發生越波情況(真值為 1)下，預測值與真值之間差異的累積分佈。結果顯示，誤差在 0.02 內的情況佔整體的 90%，而誤差在 0.04 以內的情況佔了整體的 95%，因此，可將此

結果用於預測值警戒的門檻條件，例如，若設定 95% 的信心水準，可以將越波的定義為預測值介於 0.96 到 1.04 之間，超出這個範圍的預測值，則判定為無越波情況。

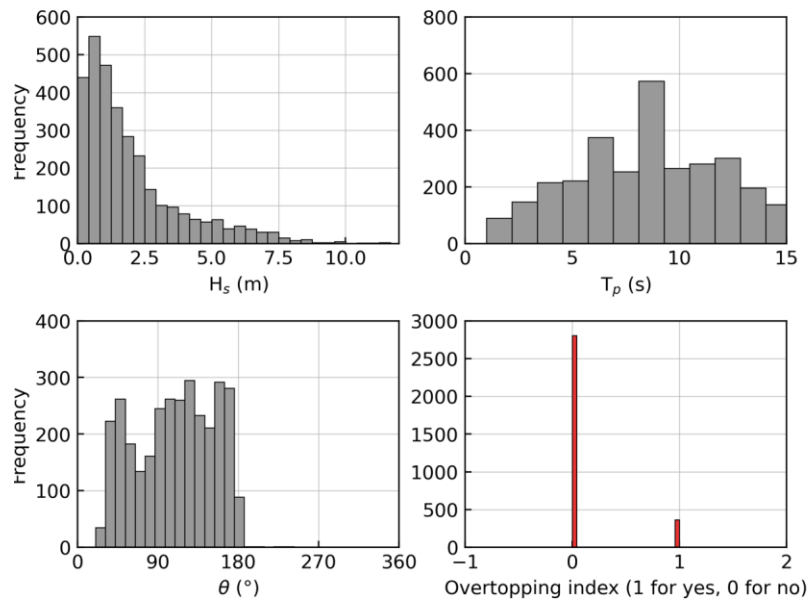


圖 18 花蓮港防波堤越波機器學習模型的訓練集樣本分布

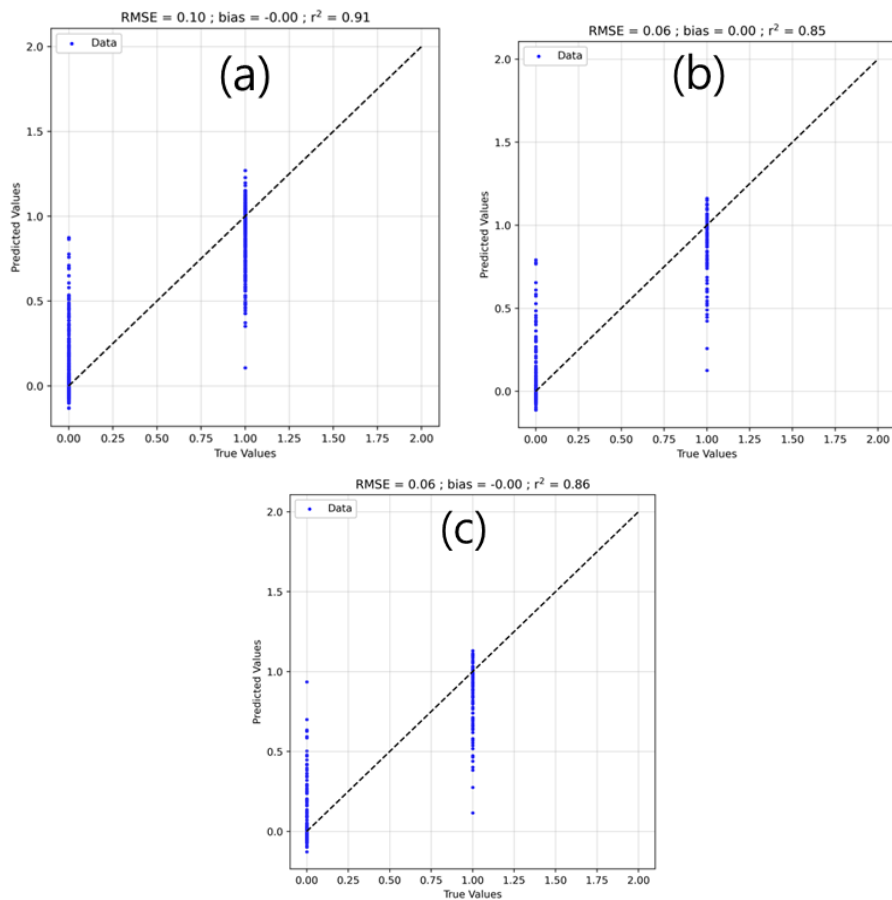


圖 19 花蓮港防波堤越波機器學習模型之(a)訓練集、(b)驗證集、(c)測試集

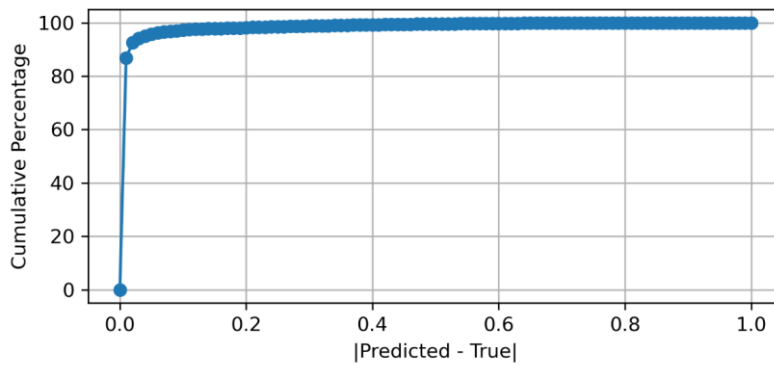


圖 20 花蓮港防波堤越波機器學習模型於不同越波誤差值的累積分佈

4.3 作業化越波預測系統建置

將前述越波機器模型進行作業化建置，預測模式將透過介接 TaiCOMS 2.0 之花蓮港區外海海象預測資料，每日執行 4 次的越波預測作業(圖 21)，作業化程式自動讀取 TaiCOMS 2.0 預測結果開始，依序完成所需變數的擷取與重組，最後輸出斷面越波預測結果(含有無越波警示)，以利後續應用於決策或警戒通報，此外，為強化越波之警戒覆蓋範圍，除東防波堤延伸段之外，亦建置東堤延伸至漁港段之越波模型，並採用多斷面方式來進行預警，圖 22 為各段防波堤分段與斷面數量，若各分段任一斷面紅燈警戒，則該段即發佈紅燈警戒；反之則顯示綠燈訊息。

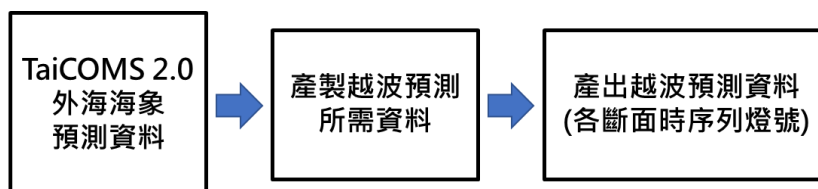


圖 21 花蓮港區東防波堤越波預測作業化建置流程圖



圖 22 花蓮港東防波堤越波預測系統之斷面數量設定

4.4 越波預測準確率探討

作業化越波預測系統建置後，若輸入海象預報資料，輸出則為越波預報資料，假設海象觀測資料(潮位站、浮標站、波流儀)為真值，透過該資料的輸入所得到的越波資料亦為真值，此可做為預報資料的比較基準。藉此比對方式瞭解其誤差是來自海象預報或模型本身誤差。然而，依據目前研究區域而言，花蓮港區與人定勝天路段目前銜接的外海海象預測資料並無觀測站做為真值來進行分析，因此，均需透過再分析資料推算溯升或越波資料，才能夠進行準確度分析。

本研究蒐集歐盟(ERA5)與美國(CFSv2)再分析波浪與風場資料，做為準確度分析的基礎，表 3 為再分析波場資料規格，其顯示波場空間解析度分別約為 25 公里與 20 公里，其對於較近岸區域之海象，可能無法得到較佳的資訊。因此，本研究採取再分析風場驅動數值模擬方式，以產製具備物理代表性的邊界真值較能夠反應近岸海況。

然而，進行追算模擬後，其結果(如圖 23、圖 24)顯示於 2022 與 2023 年模擬值與觀測值吻合度不佳，其原因可能為 CFSv2 於此 2 年度之風場資料有異常，導致模擬波場有異常現象。因此，此追算資料無法提供越波模型檢核所用，本研究改以運研所 TaiCOMS 2.0 追算波浪資料做為檢核資料所用，代入 TaiCOMS 2.0 的追算資料後，與影像判釋結果進行比對，以瞭解目前兩區域機器學習模型之準確度，圖 25 為花蓮港越波預測模型與影像判釋結果之比對混淆矩陣(包含 2023 年至 2025 年颱風事件)。由結果可觀察到，模型在無越波(No Overtopping)事件之辨識表現相對穩定，能準確預測多數無越波時段，顯示模型在一般浪況條件下具有一定的分類能力與基礎準確性。然而，在有越波(Overtopping)事件之預測方面，仍可見部分誤判為「無越波」的情形，反映出模型仍有提升空間。整體而言，模型能反映越波事件的發生趨勢，且目前對越波事件的預測相對保守。儘管預測結果仍有偏差，本研究所建立之花蓮港越波預測模型，已成功捕捉約 80%的主要越波事件。

表 3 再分析波場資料規格

項目	ERA5	CFSV2
空間解析度	0.25° × 0.25° (~25 km)	0.205° × 0.204° (~20 km)
時間解析度	0.25° × 0.25° (~25 km)	1 小時 (或 3 小時)
時間範圍	1979 年起至今	2011 年起至今

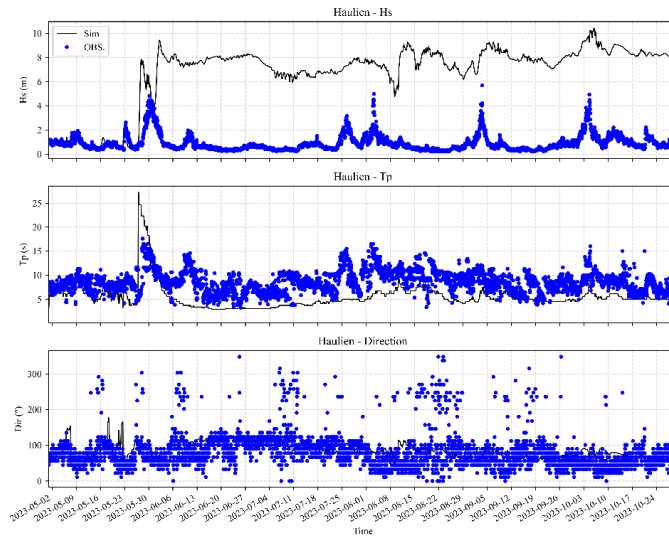


圖 23 2022 年颱風事件追算模擬結果

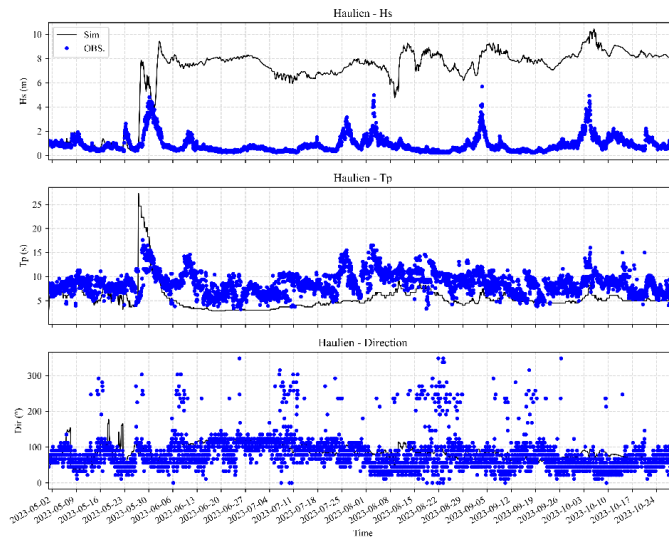


圖 24 2023 年颱風事件追算模擬結果

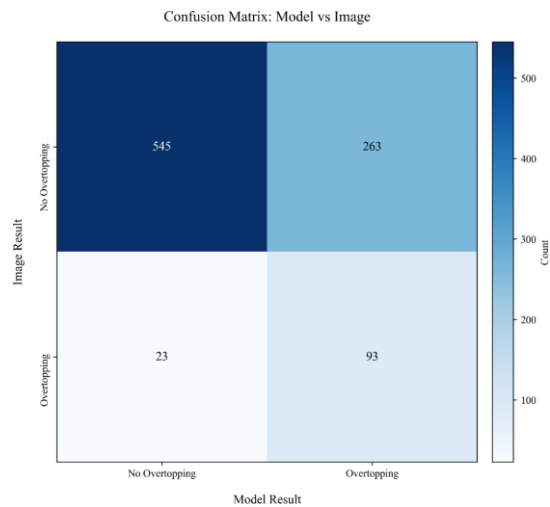


圖 25 花蓮港區東防波堤越波預報模型混淆矩陣圖

綜上所述，目前的模型於越波發生的判斷能力仍有改進空間，其誤判情形可能與追算模擬差異、樣本追算模擬差異，或影像判釋過程中之判定不確定性有關。儘管如此，模型已能掌握越波事件發生之時間趨勢，呈現出一定程度之相關性與預測潛力，該模型於越波事件模擬中具備實際應用價值，可做為海岸防災之輔助分析工具，並為後續越波機制分析及災害防減策略，提供可靠之技術基礎。

本研究將前述之作業化越波影像判釋、作業化越波預測系統、及運研所於花蓮港區海象觀測與模擬資訊等成果，整合於「花蓮港東堤越波示警及預警系統」(如圖 26)，以系統網頁呈現即時越波示警、未來 24 小時之越波數值預警及花蓮港區海氣象觀測、模擬等資訊，研究成果 2025 年 12 月 4 日，透過辦理教育訓練方式(如圖 27)，提供臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司災防管理應用。

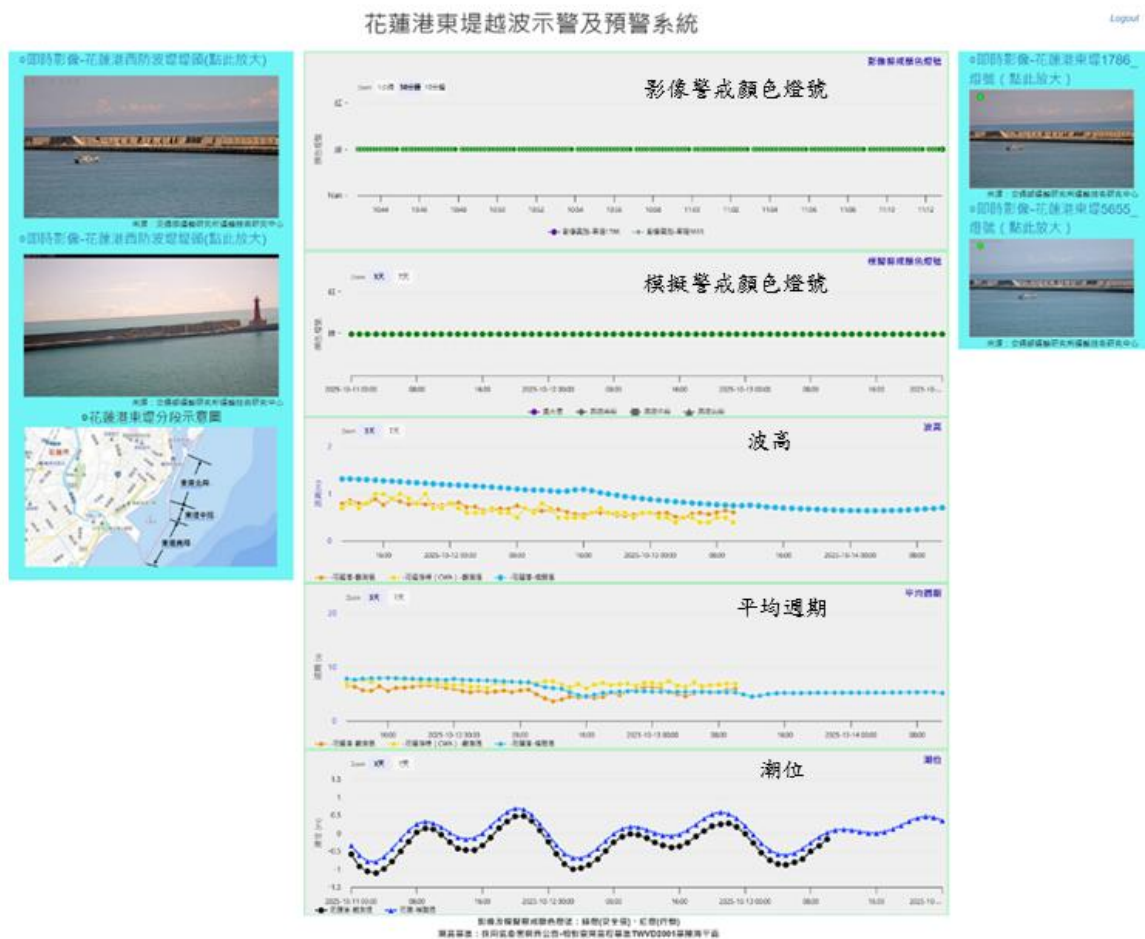


圖 26 花蓮港東堤越波示警及預警系統



圖 27 花蓮港務分公司教育訓練活動

五、結論

本研究發展花蓮港區東防波堤之越波影像判釋技術、以波浪數值模式進行波浪溯升模擬，發展越波機器學習模型，將成果整合於「花蓮港東堤越波示警及預警系統」，提供花蓮港於港區災防管理應用，本研究之主要結論說明如下：

1. 於越波影像判釋方面，為強化判釋之穩定性與準確度，本研究建立影像自動分類與多模型分流架構，花蓮港越波影像採用 ResNet50 為核心之影像分類模型，針對彩色與夜間灰階影像分別進行訓練與推論，以強化模型在不同光照條件下的適應性，並完成影像下載、分類、判釋及輸出結果之自動化串接流程，建立作業化之系統維運機制，使影像判釋模型能長期穩定運作。整體而言，影像判釋系統已由原始研究型雛形，進化為具備工程化特性之持續作業系統，能即時支援越波之判釋需求。
2. 於越波模型，本研究完成模型與 TaiCOMS 2.0 海象預測資料之串接，越波預測模型能持續進行越波預測資料產製，且提升預測作業之效率與穩定性，其混淆矩陣檢核結果顯示，模型對「無越波」事件辨識穩定，對「有越波」事件則略顯保守，可成功捕捉約 80% 的實際越波事件，反映出其在事件趨勢掌握與實務應用上具相當潛力。
3. 花蓮港越波模型顯示，東防波堤南區溯升高推估較影像判釋結果保守，未來可再透過影像判釋資料持續累積，以確認越波模型特性與之差異，藉以調校模型進行可靠度優化。
4. 本研究成果已整合於「花蓮港東堤越波示警及預警系統」，亦透過辦理教育訓練方式，向臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司推廣及交流研究成果，提供花蓮港務分公司於東防波堤工程作業、人員巡查、釣客活動等安全管理實務應用，提升災防管理效能。

參考文獻

1. 郭人維、潘庭馨、許明光、陳進益、練育貞、滕春慈(2015)，與颱風長浪有關之瘋狗浪事件研究，104 年天氣分析與預報研討會。

2. 吳昀達、陳鈞彥、林雅雯、蕭士俊、吳漢倫、陳彥龍(2024)，應用影像智慧化技術判釋海岸公路及防波堤越波研究(2/4)-夜間越波判釋，交通部運輸研究所。
3. EurOtop, 2016. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on european research, but for worldwide application, Second Edition, Authors: J.W. van der Meer, N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. DeRouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch and B. Zanuttigh.
4. FHWA, 2014. Highways in the Coastal Environment: Assessing Extreme Events. Hydraulic Engineering Circular, 25(2), FHWA-NHI-14-006, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
5. Sabino, A., Rodrigues, A., Araújo, J., Poseiro, P., Reis, M.T., & Fortes, C.J., 2014. Wave overtopping analysis and early warning forecast system. Computational Science and Its Applications (ICCSA 2014), Cham, 267-282.
6. Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T., 2013. Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 139(5), 346-357.
7. Coastal Engineering Manual(2002), U. S. Army Corps of Engineers.
8. Liu, Y. and Wu, C.H., 2019. Lifeguarding operational camera kiosk system (LOCKS) for flash rip warning: Development and application. Coastal Engineering, 152.
9. Maryan, C., Hoque, M.T., Michael, C., Ioup, E. & Abdelguerfi, M., 2019. Machine learning applications in detecting rip channels from images. Applied Soft Computing, 78: 84-93.
- 10.交通部運輸研究所(2018)“海岸公路異常波浪特性及防災應用技術之研究”。
- 11.莊士賢、徐新綸、陳美慧、劉正千、鍾曉緯(2021)“應用深度學習自動識別光學影片中離岸流”，第 43 屆海洋工程研討會論文集，國立中央大學，pp. 89-94。
- 12.郭晉安、簡仲和(2009)“高斯模糊函數應用於波浪水位影像偵測研究”，第 31 屆海洋工程研討會，臺中，國立中興大學，pp.775-780。
- 13.周宗仁、石瑞祥、翁文凱、黃恩得(2011)“CCD 遙測波浪適用於現場觀測研究(II)”，第 33 屆海洋工程研討會論文集，國立高雄海洋科技大學，pp. 711-716。
- 14.王敘民、陳盈智、董東璟、滕春慈(2017)“海岸瘋狗浪光學影像分析之研究”，第 39 屆海洋工程研討會論文集，弘光科技大學，pp. 555-560。
- 15.董東璟、蔡政翰、蔡仁智、陳憲宗(2019)“異常海象機率預警研究與作業試用(4/4)”，交通部中央氣象局研究報告。
- 16.Almar, R., Blenkinsopp, C., Almeida, L. P., Cienfuegos, R., & Catalan, P. A., 2017. Wave runup video motion detection using the Radon Transform. Coastal Engineering, 130, 46-51.
- 17.Chatzipavlis, A., Tsekouras, G. E., Trygonis, V., Velegrakis, A. F., Tsimikas, J., Rigos, A., & Salmas, C., 2019. Modeling beach realignment using a neuro-fuzzy network optimized by a novel backtracking search algorithm. Neural Computing and Applications, 31(6), 1747-1763.
- 18.Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S., 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102, 64-81.

19. Roland, A., Zhang, Y. J., Wang, H. V., Meng, Y., Teng, Y. C., Maderich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, and Zanke, U. (2012). A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).
20. Kirby, J. T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. B. and Dalrymple, R. A., 1998, "FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and users manual". Report CACR98-06, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware.
21. 交通部中央氣象署網站，<https://www.cwb.gov.tw>。
22. 邱啟敏、黃清哲、范揚洺、莊士賢、簡仲璟、李俊穎(2016)，港區海域油污擴散數值模式評估，*港灣季刊*第 103 期，交通部運輸研究所。
23. 邱啟敏、黃清哲、范揚洺、張應龍(2019)，應用 SCHISM 探討台南海域三維海流之演變，第 41 屆海洋工程研討會論文集。
24. 王紘民、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 屆海洋工程研討會論文集。
25. 李兆芳、江朕榮、傅怡鈞、林雅雯、劉正琪、謝佳紘(2024)，海氣象預測模擬系統之維運與精進(2/4)－建置高雄海域模組，交通部運輸研究所。
26. Aron Roland. Development of WWM II: Spectral wave modeling on unstructured meshes(2009).
27. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. V., & Grashorn, S., 2016. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.
28. SCHISM development teams, SCHISM v5.3.1 Manual(2018).
29. SWAN User Manual SWAN Cycle III version 41.31AB(2021).
30. SWAN Scientific and Technical Documentation, SWAN Cycle III version 41.41(2022).
31. Fu, G.; Li, J.; Yuan, K.; Song, Y.; Fu, M.; Wang, H.; Wan, X. Wind-Wave-Current Coupled Modeling of the Effect of Artificial Island on the Coastal Environment. *Appl. Sci.* 2023, 13, 7171.
32. Tran HQ, Ayala Cruz F, McCarroll J and Babanin A (2024) Non-linear surges and extreme wind-waves in Port Phillip Bay under existing and future mean sea levels. *Front. Mar. Sci.* 11:1480054. doi: 10.3389/fmars.2024.1480054.