

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

December
2022

CECI  台灣世曦
工程顧問股份有限公司



夢想和幸福 零距離的接軌

金門大橋建設計畫第CJ02-2C標金門大橋接續工程
21屆公共工程金質獎／公共工程品質優良獎—土木工程類／特優

ISSN 0253-3804



NT\$350



Volume 49, No. 6

社團法人
中國土木水利工程學會 發行
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

工程技術及發展

橋梁通過
活動斷層
之國際首例

全國首創
水利工程
碳預算管理方法

近代海域水文觀測的
發展與應用

專 輯

福清營造 全域獨到



翡翠原水管工程

安坑一號道路
雙安隧道

興建大臺南
會展中心



台北市內湖區行善路48巷15號7樓
02-2796 3949
www.for-tune.com.tw



勞動部職業安全衛生署
OCCUPATIONAL SAFETY and HEALTH ADMINISTRATION, MINISTRY of LABOR

第14屆公共工程金安獎

第21屆 公共工程

金質獎

2021 建築類 佳作

臺北市政府
公共工程卓越獎
經典百工·卓越傳世

109年度公共工程卓越獎



夢想和幸福 零距離的接軌
台灣世曦工程顧問股份有限公司

土木水利



社團法人中國土木工程學會會刊

發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木工程學會

主任委員：詹錢登 (國立成功大學水利系特聘教授兼工學院院長、編輯出版委員會主任委員兼總編輯)

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

社團法人中國土木工程學會第二十五屆理監事 (依姓氏筆劃排序)

理事長：宋裕祺

常務理事：伍勝園 高宗正 楊偉甫 廖學瑞

理事：王宇睿 余信遠 李政安 林子剛 林聰利 胡宣德 高銘堂
張大鵬 張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃慧仁
壽克堅 歐善惠 賴建信 謝啟萬

常務監事：呂良正

監事：王藝峰 李建中 沈景鵬 林其璋 邱琳濱 劉國慶

先進工程

- 混凝土工程
- 鋼結構
- 運輸工程
- 鋪面工程
- 資訊工程
- 工程管理
- 非破壞檢測
- 先進工程

永續發展

- 永續發展
- 國土發展
- 水資源工程
- 大地工程
- 海洋工程
- 環境工程
- 景觀工程
- 綠管建工程
- 能源工程
- 天然災害防治工程
- 工程美化
- 營建材料再生利用

國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

教育學習

- 工程教育
- 終身學習
- 土木史
- 工程教育認證
- 大學教育
- 技專院校
- 學生活動

學會活動

- 學會選舉
- 學術活動
- 土水法規
- 介紹新會員
- 專業服務
- 學會評獎
- 學會財務
- 年會籌備
- 會務發展
- 會士審查
- 公共關係 [工程倫理]

出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

中國土木工程學會任務

1. 研究土木水利工程學術。
2. 提倡土木水利最新技術。
3. 促進土木水利工程建設。
4. 提供土木水利技術服務。
5. 出版土木水利工程書刊。
6. 培育土木水利技術人才。

土木水利雙月刊已列為技師執業執照換發辦法之國內外專業期刊，土木工程、水利工程、結構工程、大地工程、測量、環境工程、都市計畫、水土保持、應用地質及交通工程科技師適用。

中國土木工程學會和您一起成長！

中華郵政北台字第 518 號 執照登記為雜誌 行政院新聞局出版事業登記証 局版臺誌字第 0248 號

2023邁向50系列報導

- 📖 中國土木水利工程學會沿革 3
- 📖 50週年系列活動議程預告 45

「近代海域水文觀測的發展與應用」專輯 (客座主編：董東璟教授/詹錢登特聘教授)

- 📖 專輯序言：近代海域水文觀測的發展與應用 董東璟/詹錢登 4
- 📖 潮位觀測與應用推估台灣海平面上升趨勢分析研究 謝志敏/黃榮鑑/許泰文/陳聖學/吳一平 5
- 📖 海域資料在海岸風險評估之應用—以花蓮海岸為例 王國樑/黃偉柏/姜重宇/廖顯益/古婉婷 15
- 📖 海岸裂流觀測之研究 王敘民/董東璟/蔡政翰/林芳如 24
- 📖 人工智慧技術在海洋觀測之應用 陳威成/楊文榮/傅仲偉/董東璟/廖建明 31
- 📖 海岸異常波浪觀測之研究 陳盈智/董東璟/林芳如/滕春慈 40
- 📖 我國之近海水文監測與發展 董東璟/黃清哲/高家俊/滕春慈/吳益裕 46
- 📖 利用微波雷達回波反算近岸海域地形 吳立中/馬家驊/賴堅戌/王良生 52
- 📖 全國海灘環境調查與安全評估 余佳鎔/陳威成/王敘民/陳沛宏/廖建明 58
- 📖 海洋資料浮標站網之建置 范揚洺/王得根/林演斌/陳秋份/吳立中/李嘉文 66
- 📖 結合近海漂沙觀測與ROMS模式探討河口泥沙傳輸過程—以卑南溪為例 鮑俊宏/陳佳琳/施孟憲/廖敬元 72
- 📖 水庫安全蓄水線及其於乾旱預警之應用 虞國興/朱志彬/李元喻 80

工程技術及發展

- 📖 全國首創水利工程碳預算管理方法 賴建信/許朝欽/陳加榮/林哲震 84
- 📖 國道4號豐原潭子段橋梁通過三義活動斷層之國際首例 陳國隆/羅財怡/郭呈彰/張瑜超/曹永德/林素芳/黃能偉 95
- 📖 IoT物聯網結合BIM模型元件模組化應用 陳哲仲 103

廣告特搜

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 封面
- 遠揚營造工程股份有限公司 — 遠揚營造 創新工法 封底
- 福清營造股份有限公司 — 福清營造 全域獨到 封面裡
- 泛亞工程建設股份有限公司 — 泛亞工程 穩健創新 封底裡
- 安固工程股份有限公司 — 安得固 建築修復結構補強 110



話說從頭

中國土木水利工程學會 沿革

中國土木工程學會

中國土木工程學會於 1936 年在杭州成立。未幾抗戰軍興，致會務未能推展。迨 1952 年 6 月 6 日，工程師節在台復會，於理事長之下設總幹事、總編輯、總會計襄助理事長，執行會務。另設財務、出版、論文、工程獎章、會員徵求、資格審查、講演參觀、名詞編訂、手冊編輯、施工改進等委員會，並先後成立預力混凝土、混凝土、防震、鋼結構、土壤力學與基礎工程及水污染防治等研究會，積極從事各項會務活動與學術研究。除時有專論發表外，並曾編印出版：「預力混凝土研究試驗報告」、「預力混凝土規範專集」、「混凝土工程施工規範」、「鋼筋混凝土建築設計規範與施工規範」、「鋼構造建築設計規範及施工規範」、「鋼筋混凝土設計手冊」、「混凝土施工須知」、「土木工程名詞」及「中國工程師手冊土木類」等書，另出版「土木工程」季刊達十五卷。曾設置國內外學術團體聯繫委員會，經常與國內外各學術團體交換刊物，並派會員出席國際會議，以溝通學術。為紀念侯啟理事長家源先生對土木工程之貢獻，經募集基金，成立家源獎學金委員會，每年頒贈獎學金給予國立臺灣大學與成功大學土木工程學系四年級學生各一人，以勵後學。並為服務社會，經成立服務部接受委託，提供技術服務。截至 1973 年 9 月底止，會員人數為 4,559 人，團體會員 88 單位。

中國水利工程學會

中國水利工程學會於 1931 年成立於南京市。設會長、副會長董事及總幹事，分別組織董事會及執行部，另視會務需要，設置特種委員會及分會。曾先後於天津、西安、上海、城固、桂林、蘭州、鎮平、長沙、南仁、成都、東北、廣州、臺灣、重慶等地成立分會，並在南京、杭州、鎮江、天津及西安等地舉行年會。1951 年 5 月在臺灣重組，改為理事長制，其組織與會務活動情形，大致與中國土木工程學會相同。曾編印出版「水工名詞」、「壩工手冊」，及「中國工程師手冊水利類」等書。在大陸時曾出版「水利」月刊，來臺後改為季刊。計發行二十期。迄合併前，會員人數已增至 1,768 人，團體會員 38 單位。



中國土木水利工程學會於 1973 年合併

1970 年，中國土木工程學會及中國水利工程學會舉行聯合年會，會員多人因鑒於土木、水利工程性質相似，兩學會之宗旨亦復相同，會員中多具有雙重會籍身份，為避免會員顧此失彼，集中力量，加強組織，乃提議改組合併，當獲通過。為慎重起見，復經兩學會理事長分別以通訊方式，請全體正、仲會員投票複決，亦獲多數通過。乃成立籌備委員會草擬會章，登記會員，於 1973 年 11 月 17 日在臺北市舉行聯合年會後，召開中國土木水利工程學會會員大會，通過章程，選舉第一屆理監事，正式合併。

在歷屆理事長、理監事會、主任委員們的共同努力下，學會除延續優良傳統，從事各項學術活動，編印各種出版物，增設多項獎學金外，將合併後之「土木水利」會刊提升為雙月刊，出版「中國土木水利工程學刊」與其英文版。1997 年因應網路時代來臨，設立學會官方網站，發行電子半月刊。國際活動方面，加入國際土木及建築計算學會、與美、日、韓、菲共同創建亞洲土木工程聯盟、先後與 ASCE 等 11 個國際專業組織簽署合作協議書。2007 年成功爭取亞洲土木工程聯盟第四屆亞洲土木工程大會在台北舉辦。此外，推動我國加入亞太工程師組織等。配合國際工程環境改變及推動永續發展，增設多個教育及技術委員會，又為在職工程師知識學習需要成立東部、南部、中部分會，輪流於北中南區舉行年會；以及，辦理多種專業工程研討與講座，編輯土木史等，均反映出本學會長期以來因應工程產業需求不斷進步，與產官學研各界共謀土木水利技術及環境進步之服務宗旨，始終不變。

2021 年 11 月第 25 屆理監事會就任，國立臺北科技大學宋裕祺特聘教授續任理事長。至 2022 年 12 月統計，學會有效會員：團體會員 176 單位、榮譽會員 11 位、會士 69 位、會員 2,376 位（含長期會員 1,484 位）。

為慶祝中國土木水利工程學會 50 周年慶，112 年將舉辦系列慶祝活動，謹訂於 2023 年 9 月 21 日（星期四）假台北國際會議中心（TICC）舉辦慶祝大會，精彩可期。敬邀土木水利相關領域諸位先進、學者、專家，共襄盛舉。 



近代 海域水文觀測 的發展與應用 專輯序言

專輯客座主編 董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授
 詹錢登／國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

水文實測數據是水利和海岸工程規劃設計主要的依據。在政府剛播遷來台時期，經濟發展需要大量的土木水利與港灣建設，當時的觀測方法、儀器設備與技術經驗都不足，透過很多前輩的帶領，辛苦地取得了設計所需的資料，完成階段性的任務。隨著時代的進步，科技發展日新月異，在觀測儀器、資料儲存、數位化、傳輸方法等方面都有了高度的改良與精進。為推動我國現代化水文觀測作業，觀測對象也從河川水文拓展到海域水文和地下水文等範疇，應用領域也從工程設計用途，延伸到防災，甚至遊憩等民眾日常生活所需之參考。本專輯旨在報告近代海域水文觀測的發展。由於大多數工程場域及民眾活動範圍都在近

岸海域，近海地區的水文觀測愈顯重要，這包含了波浪、潮汐、海流、海溫、風速風向、漂沙、地形等觀測。本刊專輯內容包含近海水文觀測的歷史、最新觀測技術發展、危害性波浪和海流的觀測、自動化海域漂沙觀測及大範圍海域地形遙測。觀測所得的資料品管是近年來國內外特別關注的課題，錯誤的觀測資料比沒有資料帶來的危害更大，因此，資料品管策略與方法如何進行也納入本專輯內容。在氣候變遷的影響下，本專輯也介紹海平面上升情境及對海岸的影響，以及如何運用海域資料於海岸風險評估等課題。希望透過本專輯讓讀者瞭解我國迄今的海域水文觀測發展與應用情形。



潮位 觀測與應用推估

台灣 海平面上升 趨勢分析研究

謝志敏／國立高雄科技大學海事資訊科技系 教授

黃榮鑑／國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系 終身特聘教授

許泰文／國立台灣海洋大學河海工程學系 校長

陳聖學／國立成功大學近海水文中心 研究助理

吳一平／經濟部水利署防災中心 正工程師

海平面上升趨勢分析，通常透過潮位分析海面變化線性趨勢求得。本研究的目的是透過台灣的潮位資料來估算台灣海平面上升的趨勢，利用線性迴歸、經驗模態法和改良型調和分析等方法進行海平面變化的分析，並討論其適用性，透過比較結果顯示，改良型調和分析方法優於其它方式。本文提出改良型調和分析方法，並探討台灣海平面變遷趨勢，從中歸納出台灣海平面變化趨勢。

關鍵詞：海平面上升、調和分析、潮位觀測

前言

在極端氣候事件導致的海平面上升（Sea Level Rise, SLR），造成海洋災害頻傳，各種海洋災害導致的經濟損失也日益嚴重。海平面上升可能帶來的影響包括淹水、加劇海岸侵蝕、增加暴潮的發生頻率、鹽水入侵等。如何準確評估海平面變化趨勢，是全球關注的焦點問題^[1,2]。其中針對海平面上升議題之討論如 Mitrovica *et al.*^[3]；Douglas^[4]；Church *et al.*^[5]；Shum and Kuo^[6]；Church and White^[7] 等研究結果顯示，二十世紀全球 SLR 速率每年約為 1.5 ~ 2.4 mm，而 Merrifield *et al.*^[2] 利用潮位站資料估算全球海平面上升速率與 Church and White^[7] 透過衛星測高之結果一致，推估全球 SLR 加速上升。

Church *et al.*^[7] 使用平均海面永久服務中心（Permanent Service for Mean Sea Level）之 1880 年至 2009 年海水位資料，分析後得到 1900 年至 2009 年之全球 SLR 速率為 1.7 ± 0.2 mm/year，而從 1961 年以來之上升速率為每年 1.9 ± 0.4 毫米；由 1993 年至 2009 年之衛星資料分析，其線性趨勢為每年 3.2 ± 0.4 毫米。

作為全球氣候變化研究的權威機構，政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC），從 1990 年至今先後六次對全球氣候變化對自然生態系統、經濟系統的影響進行評估。第四次的氣候變化評價報告（AR 4）指出，自 1961 年以來，全球平均海平面上升速率為 1.8 ± 0.5 mm/year，而到了 1993 年以後，這個資料就增大到了 3.1 ± 0.7 mm/year（IPCC, 2007）。到 2050 年，全球海平面可能要比 1980 ~ 1999 年的平均海平面要高 0.18 ~ 0.21 m（IPCC, 2001）。IPCC 第五次評估報告（AR5）指出，從 1880 ~ 2012 年，全球地表平均溫度增加約 0.85°C（IPCC, 2013）。氣候變暖引起的海溫升高和大面積冰川融化等現象直接導致全球海平面上升。1901 ~ 2010 年，全球海平面上升了約 0.19 公尺，平均上升速率為 1.7 mm/year（IPCC, 2013）。1971 ~ 2010 年，全球海平面平均上升速率為 2.0 mm/year，1993 ~ 2010 年，上升速率明顯增加，達到 3.2 mm/year（IPCC, 2013）。

Nerem *et al.*^[8] 利用衛星資料分析 1992 ~ 2014 年期

間的全球 SLR，研究成果顯示，1992 ~ 2014 年期間觀測到的 SLR 為 3 mm/year。前人利用衛星測高資料對中國沿海海平面變化規律進行了探討，取得了一些成果：如 Nicholls and Cazenave [9] 利用衛星測高評估海水面高度，資料顯示全球各區域的 SLR 並非一致，其中又以西太平洋 SLR 最為顯著。如 Ablain *et al.* [10] 通過重力校正和氣候試驗（Gravity Recovery and Climate Experiment data, GRACE）對地球重力場進行觀測，並聯合衛星測高 SA、ARGO 系統的觀測結果得出：自 2003 年以來，海平面的上升主要是因為海水質量的增加。

全球海水面變化已有許多學者進行研究 [2,5,11,12]，全球海水面上升速率每年約為 1.5 ~ 2.4 公釐 [3-7]，而近二十年（自 1993 年以來）之全球海水面上升速率為 3.2 ± 0.4 mm/year [6-8,10,12]，研究結果顯示全球海水面正逐漸明顯上升。由 Llovel *et al.* [13] 與 Nicholls and Cazenave [9] 從衛星測高資料分析全球各區域的海平面上升速率，從結果顯示各區域海平面上升速率不一致，台灣海平面上升速率高於全球 SLR 速率。

海平面變化是複雜的，其中既有長週期變化，又有趨勢性變化和隨機因素干擾。Hsieh *et al.* [14] 提出了修正型調和分析法進行台灣環島的海平面上升趨勢計算，本文在 Hsieh *et al.* [14] 的基礎下多加入台灣環島潮位站分析台灣海平面的趨勢，考慮了地殼變動因素，由潮位站的潮汐資料計算海平面升降，既包括了真正的海平面的升降，又包括陸地升降引起的海面升降，由於各潮位站所處的陸地地點的升降運動各不相同，

每個站的海平面升降速率為相對升降速率。基於上述因素，精確計算台灣的海平面上升速率極為重要。

新一代潮位觀測系統

國內潮位觀測技術早期採用記錄紙及人工記錄方式，譬如浮筒式潮位計，隨著數位科技進步，大部份潮位站改成數位觀測方式，譬如壓力式潮位計或一般音波式潮位計，但因易受環境干擾，且較缺乏檢校機制，使得資料品質欠缺。美國國家海洋大氣總署（NOAA）國家海洋局投入十餘年時間，研製新一代超音波水位自動觀測系統，它最大的特色是在音波測距技術上有新的突破，應用電腦科技，大幅改進音波測距儀受溫度影響所引起之誤差，量測精度大幅提昇。交通部科技顧問室於民國 89 年委託國立成功大學近海水文中心引進，並在收錄系統、傳輸系統部分加以改良且本土化，建立我國技術自主的新一代潮位觀測系統，此系統以音波式水位儀為核心，潮位觀測解析度（resolution）為 1 mm，且其準確性（accuracy）可達 3 mm，與傳統式浮筒與壓力式水位計準確性只能到達 cm 等級而言，改善非常多，且其精度足以用來探討全球海平面上升課題。

新一代潮位觀測系統之外觀與設計圖，如圖 1 所示，系統之取樣頻率（sampling rate）為 0.1 Hz，24 小時連續觀測，線上資料間距（interval）平時為 6 分鐘，最短可為 1 秒鐘，因此亦具有觀測海嘯之能力，現場儲存資料採用 Flash 卡，可保存資料長達一年以上。雖然音波式水位儀的準確性高，但若在潮差大地

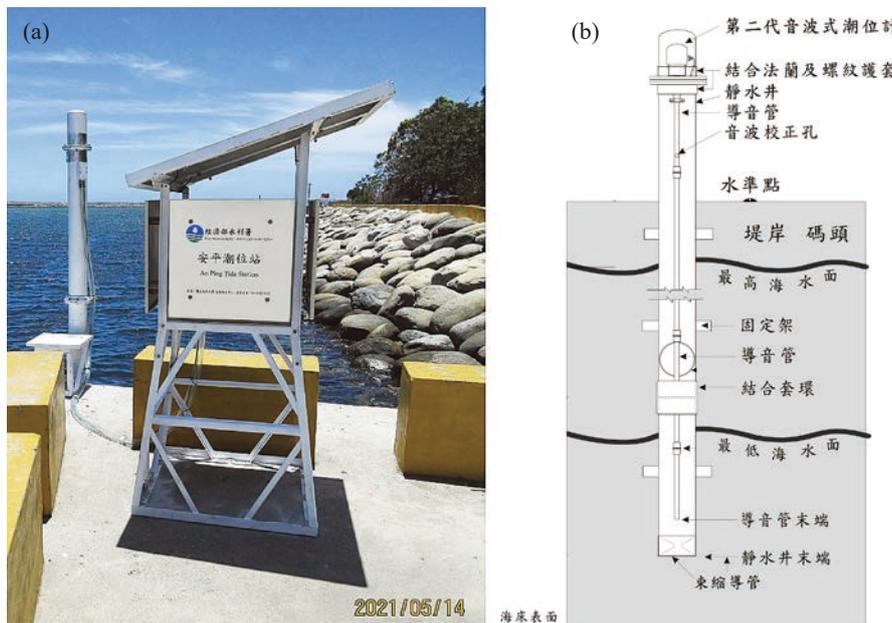


圖 1 (a) 新一代潮位站實際照片；(b) 新一代潮位站設計圖

方，且若現場兩隻水溫計間有較大溫度梯度，此時須對音波進行溫度修正，修正方式如下：

$$L' = 0.0018 * L * (T2 - T1) \quad (1)$$

式中， L' 為溫度修正後之水位值； L 為傳感器探頭至水面距離； $T1$ 為第一隻水溫計，設置於校正管中間； $T2$ 為第二隻水溫計，設置於音波管中間。上述溫度修正為這套高準確性的水位觀測儀器做了第二層把關，讓現場環境影響減到最低程度。

這種新一代高精度的音波式觀測系統在引進台灣後成為潮位觀測主流，大量興建於台灣海岸進行潮位觀測，不只可觀測平日潮位變化資料，在颱風期間亦可由測得暴潮位，很多測站同時安裝有氣象觀測儀器，同步量測氣壓、風速、氣溫等資料，可與所觀測的潮位資料進行分析研究。目前此類型潮位站由經濟部水利署、中央氣象局合力在台灣海岸設置超過 30 站（詳請見氣象局潮位年報與水利署近海水文年報），取得高品質水位資料提供各式防災應用與科學研究。

海平面上升分析方法

本文分析海平面上升的方法採用以下方法：(1) 線性迴歸 (Linear Regression, LR) 方法、(2) 改良傳統調和分析方法 (Modified Harmonic Analysis, MHA)、和 (3) 希爾伯特—黃轉換法 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 之經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition, EMD)，分析海平面上升趨勢變化。LR、MHA、EMD 方法說明如下：

潮汐分析方法：調和分析

利用最小二乘方法求取調和常數，本研究依據 Foreman [15] 建議採用 60 個分潮進行分析。潮汐的主要分析方法為利用調和分析 (Harmonic Analysis) 找出其各天文潮分潮。調和分析其理論式如下 (Foreman [15])：

$$\begin{aligned} h(t) &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \\ &= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cos(\omega_n t - \epsilon_n) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 A_0 為平均海水位， $H_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$ 代表分潮之振幅， ω_n 代表分潮的角頻率， $\epsilon_n = \tan^{-1}(B_n/A_n)$ 為分潮之相位角。 H_n 、 ϵ_n 稱為調和常數，理論上應將所有天文潮展開，惟實際應用上可依要求精度，選取 k 個分潮予以求得最佳近似之潮汐運動方程式 $y(t)$ ，假設如下：

$$y(t) = A_0 + \sum_{r=1}^k A_r \cos \omega_r t + \sum_{r=1}^k B_r \sin \omega_r t \quad (3)$$

上式中 $y(t)$ 為某時刻之潮位。

設 e_i 為觀測潮位 y_i 與預測潮位在時間為 t 時刻之殘差，即 $e_i = [y_i - y(t)]$ 。於等時距之觀測潮位總數為 $2n + 1$ 個期間，若想使潮汐運動方程式有最佳近似，則應使殘差平方和最小，即

$$Er = \sum_{i=-n}^n e_i^2 = \sum_{i=-n}^n [y_i - y(t)]^2 \quad (4)$$

於上述條件下，即可求得潮位之最佳近似值。調和分析法是將潮位解析成各種週期的分潮總和，因此若能推求各測站之各分潮振幅與相位角，即可推估其潮汐特性，並預測未來的天文潮水位變化。而潮位的分潮成份理論上有無限多種，但進行調和分析時只需利用主要分潮來擬合即可。如 NOAA 即時水位監測系統中，建議各測站至少採用 60 至 100 個分潮成份進行調和分析。而本文採用 60 個分潮成份來進行各測站之調和分析，以擬合各測站天文潮水位變化，進而預測天文潮未來水位變化。本文分析台灣潮位站資料推估海平面上升速率，若透過調和分析，如式 (2) 計算海平面趨勢 (A_0 為平均水位)，則求出的海平面趨勢是一個固定值，看不出時間變化。

改良傳統調和分析—分析海平面上升

本文為了改良傳統調和分析方法無法分析海平面上升，提出了一種改良調和分析方法。首先重新定義趨勢訊號，本文把訊號分成週期訊號和趨勢訊號，故訊號 = 週期訊號 + 趨勢訊號 (單調函數)。若訊號是潮汐水位，就可以表示為潮汐訊號 = 週期訊號 (天文潮) + 趨勢訊號 (單調函數)，週期訊號透過天文潮來表示，趨勢訊號用多項式來表示，故改良的調和分析來分析潮汐水位，其數學式如下：

$$\begin{aligned} h(t) &= \underbrace{\left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \omega_n t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \omega_n t \right]}_{\text{週期訊號 (天文潮)}} + \underbrace{\sum_{k=0}^m C_k t^k}_{\text{趨勢訊號}} \\ &= \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} H_n \cos(\omega_n t - \epsilon_n)}_{\text{週期訊號 (天文潮)}} + \underbrace{\sum_{k=0}^m C_k t^k}_{\text{趨勢訊號 (海平面變化)}} \end{aligned} \quad (5)$$

同理，透過最小平方法 (least squares method)，即可求得各係數的值。藉由多項式來表示趨勢訊號，來代表海平面的變化量。

希爾伯特-黃轉換 (Hilbert Huang Transform, HHT) 理論

希爾伯特-黃轉換 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 由 Huang *et al.* [16] 在英國倫敦皇家學會刊物所發表，希爾伯特-黃轉換 (HHT) 分析方法包含兩個主要的部份：(1) 經驗模態分解 (EMD) 和 (2) 希爾伯特轉換 (Hilbert Transform, HT)。Huang *et al.* [16] 和 Huang *et al.* [17] 將原始資料經過 EMD 過程分成不同時間尺度之內建模態函數 (Intrinsic Mode Functions, IMF) 分量，將訊號拆解成一系列具有不同特徵尺度的時序列，依頻率由高至低依序分解出來，可以求得時頻特徵，此方法在某些情況下會產生時頻混淆 (Mode mixing)，因此 Wu and Huang [18-20] 以總體經驗模態分解方法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 使用白噪的特性，加入白噪之訊號經由 EMD 分解出的成分可以避免模態混淆 (Mode mixing) 的發生。經驗模態分解 (EMD) 演算法是 HHT 的核心演算法，其分解演算法也稱為篩選過程 (Sifting Processing)，它具有兩個主要作用：一是去除載波，二是使波形更加對稱，應用 EMD 計算過程將信號拆解為若干個 IMF 分量，從而分析各分量的時頻特性。

結果與討論

本文探討 SLR 的方法採用以下方法：(1) 線性回歸 (LR) 方法、(2) 改良傳統調和分析方法 (MHA)、和 (3) 經驗模態分解法 (EMD) 進行分析 SLR 趨勢變化。

討論各種趨勢方法的適用性

本文為了討論這些方法的優缺點，本文設計一組則混合頻率的潮汐訊號，將基本訊號混合形成一組非平穩訊號，時間尺度 t 皆是由 0 ~ 2 年，頻率分別由 M2, S2, O1, K1, M4, SA 潮汐分潮 (如表 1) 的餘弦函數和趨勢 $(1 + 0.0001t)$ 所建置而成，此混合訊號 $X_1(t)$ 如下：

$$X_1(t) = \left[\begin{aligned} &0.7 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M2}}t + \theta_1\right) + 0.3 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{S2}}t + \theta_2\right) + \\ &0.8 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{O1}}t + \theta_3\right) + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{K1}}t + \theta_4\right) + \\ &0.123 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M4}}t + \theta_5\right) + 0.5566 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{SA}}t + \theta_6\right) \end{aligned} \right] + [1 + 0.0001t] \quad (6)$$

圖 2 為 $X_1(t)$ 訊號之時序列圖，實線為 $X_1(t)$ 之時序列變化，虛線是 $(1 + 0.0001t)$ 的趨勢變化。本文利

表 1 潮汐訊號

	週期 (hour)	振幅 (m)	相位
M2	TM2 = 12.4206	0.7	$\theta_1 = 1.0472$
S2	TS2 = 12	0.3	$\theta_2 = 0.5236$
O1	TO1 = 25.8193	0.8	$\theta_3 = 0.1745$
K1	TK1 = 23.9345	0.5	$\theta_4 = 0.3491$
M4	TM4 = 6.2103	0.123	$\theta_5 = 2.1293$
SA	TSA = 8765.8	0.5566	$\theta_6 = 0.925$

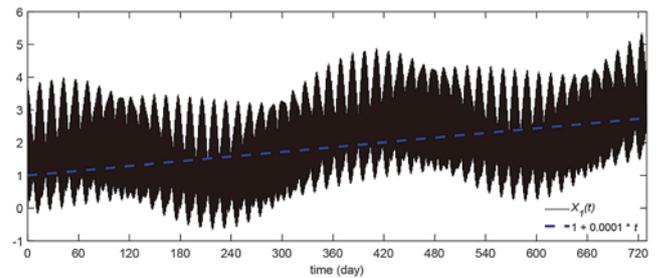


圖 2 $X_1(t)$ 之時序列圖 (垂直軸單位:m)

用最小平方法把訊號拆成週期訊號和趨勢訊號，趨勢訊號用多項式表示。將一組資料 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$ ，給定一條理論函數

$$X_1(t) = \left[\begin{aligned} &\alpha_1 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M2}}t + \theta_1\right) + \alpha_2 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{S2}}t + \theta_2\right) + \\ &\alpha_3 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{O1}}t + \theta_3\right) + \alpha_4 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{K1}}t + \theta_4\right) + \\ &\alpha_5 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M4}}t + \theta_5\right) + \alpha_6 \cos\left(\frac{2\pi}{T_{SA}}t + \theta_6\right) \end{aligned} \right] + [\beta_1 + \beta_2 t] \quad (7)$$

以殘差的大小做為評估準則，殘差 e_i 為第 i 筆資料的觀察值 y_i 與理論曲線 \hat{y}_i 的相差，即 $e_i = y_i - \hat{y}_i$ ，當殘差平方和愈小，表示以此理論函數線段配適此組資料愈好，這種想法就稱為最小平方法，也就是：最小平方法是尋求使 $Er = \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{y}_i]^2$ 最小，為了使 Er 值最小，則 $\partial Er / \partial \alpha_1 = 0, \partial Er / \partial \alpha_2 = 0, \partial Er / \partial \alpha_3 = 0, \partial Er / \partial \alpha_4 = 0, \partial Er / \partial \alpha_5 = 0, \partial Er / \partial \alpha_6 = 0, \partial Er / \partial \beta_0 = 0, \partial Er / \partial \beta_1 = 0$ 。以本文案例 $\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.8, \alpha_4 = 0.5, \alpha_5 = 0.123, \alpha_6 = 0.5566, \beta_1 = 1, \beta_2 = 0.0001$ 。

應用 EMD 計算過程將信號拆解為若干個 IMF 分量，如圖 3 所示，圖 3(a)、圖 3(b)、圖 3(c)、圖 3(d)、圖 3(e)、圖 3(f)、圖 3(g) 分別為 IMF1、IMF2、IMF3、IMF4、IMF5、IMF6 和趨勢。從 EMD 所分解出來的趨勢與正確解 $(1 + 0.0001t)$ 比較，發現在兩端點邊界處有明顯差距。

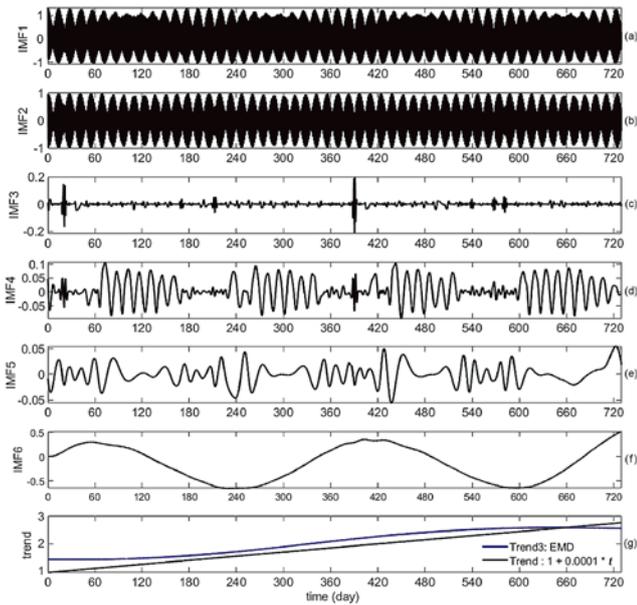


圖 3 $X_1(t)$ 訊號應用 EMD 法所得之趨勢變化圖 (垂直軸單位: m)

圖 4 為 $X_1(t)$ 訊號之採用不同分析方法計算出趨勢變化圖，圖 4 中 Trend 1：是線性迴歸 (Linear regression) 直線 $\hat{y}_i = a + bt_i$ 去做最小平方方法，求得 $a = 1.2135$, $b = 7.561 \times 10^{-5}$ ，傳統分析海平面上升都採用此種方法。Trend 2：改良傳統調和分析方法 (MHA)，利用最小平方方法，把訊號拆成週期和趨勢訊號去求出係數值。Trend 3：經驗模態分解法 (EMD)。本文之趨勢變化正確解為 $1 + 0.0001t$ 。從圖 4 中發現 Trend 1 與 Trend 5 結果一致，但與 Trend $(1 + 0.0001t)$ 有差距。Trend 3 是 EMD 方法，EMD 篩選過程中上、下包絡曲線的端點飛翼 (End Swing)，即端點處會出現過大或甚小變動現象，會有端點效應問題，進而影響分析結果。Trend 4：是採用上下包絡線求均值視為訊號趨勢，在訊號的兩端是偏離趨勢正確值。在本文例中最正確的趨勢是 Trend 2，就是把訊號拆成週期和趨勢訊號，利用最小平方方法求出係數值。

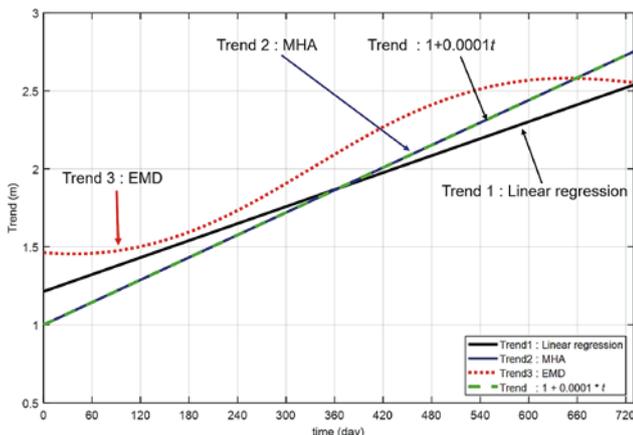


圖 4 $X_1(t)$ 訊號之不同分析方法之趨勢變化

各種趨勢方法以潮汐資料為例

為了探討包絡線方法是否會受到潮汐極端值影響，本文分析了屏東鵞鑾嘴的潮位，圖 5 為屏東鵞鑾嘴的海平面變化趨勢圖，從圖 5 中可以發現採用包絡線方法分析海平面上升，結果顯示易受到極端潮位的影響，影響到潮位包絡線，進而影響到分析海平面上升趨勢的準確性。

本文分析各海域測站的潮位紀錄，首先分析基隆潮位站資料期間自 1946 至 2019 年共 73 年。以經驗模態分解分解成各個 IMF 和趨勢訊號。將基隆 1946 至 2019 年實測水位透過 EMD 分解成如圖 6 所示之 10 個 IMF 以及趨勢項，將潮汐資料應用 EMD 分解成不同時間尺度 IMF，從最小週期至最大週期成份潮，從每個 IMF 可以清楚知道潮汐的成份受到天文潮汐的影響，在時間尺度方面有 IMF 1 (12 小時 25 分，半日潮)、IMF 2 (24 小時 50 分，全日潮)、IMF 3 (30 天)，即受到月球引力影響 (15 天和 30 天等的時間尺度) 之影響。從圖 6 中發現基隆海域的長期海水位變動趨勢是上升趨勢。

圖 7 為不同趨勢分析方法之基隆潮位趨勢比較圖，Trend 1 是採用線性迴歸直線外插去擬合潮位資料；Trend 2 是把潮位資料分成週期訊號 (60 個分潮) 和多項式去擬合潮位資料；Trend 3 採用 HHT 的方法中的 EMD 方式，去分解各個內建模態函數 (IMF) 和趨勢。從圖 7 中發現 Trend 1 和 Trend 2 的趨勢是一致的，故兩條線重疊在一起。從圖 7 中的 Trend 1 和 Trend 2 分析方法，可求出基隆海平面上升速率為 2.4 mm/year。

圖 8 為新竹潮位站資料，圖 8(a) 潮汐水位、圖 8(b) 不同分析方法之趨勢比較圖，Trend 1 是利用線性迴歸結果，Trend 2 是改良型調和分析法，Trend 3 是 HHT 之 EMD 結果。從圖 8(b) 發現 Trend 1 和 Trend 2 有很大差異，以前評估海平面上升的方式，是採用線性迴歸，如：Huang *et al.* [21]，但這種用線性迴歸，再利用最小平方方法求出係數的方法，並不能真正得到正確的海平面上升趨勢。傳統調和分析方法也無法分析海平面上升，故

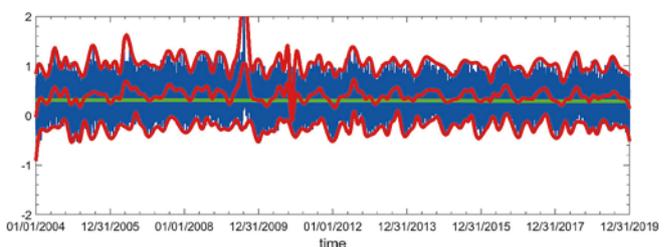


圖 5 鵞鑾嘴潮位經包絡線法所得之海平面趨勢 (單位:m)

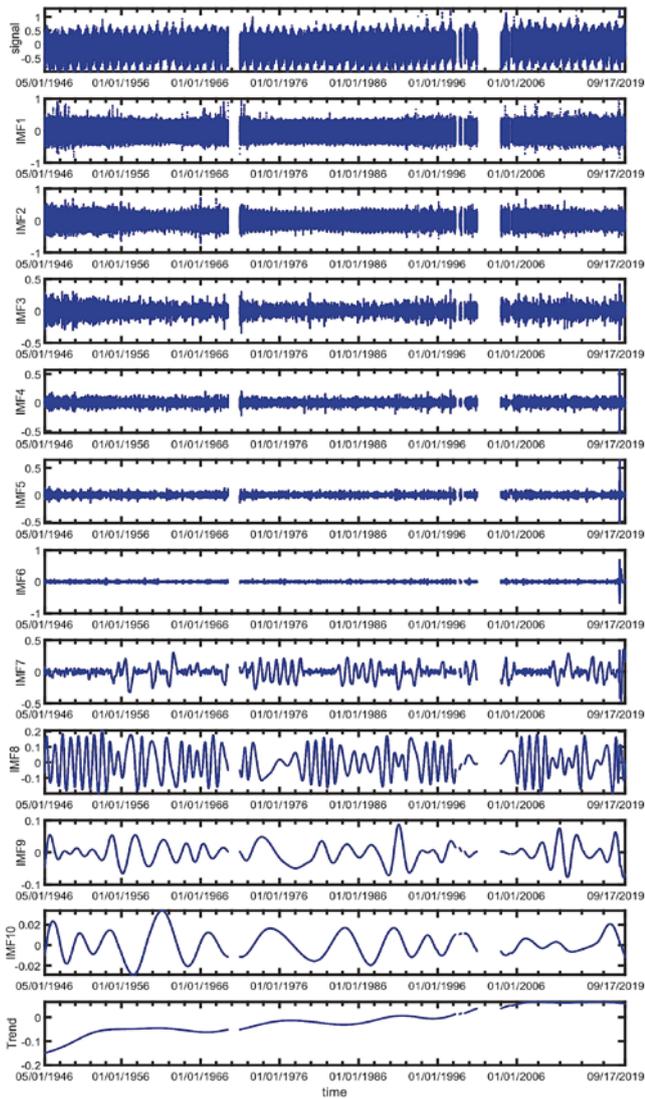


圖 6 基隆潮位經 EMD 轉換後之 IMF 和趨勢圖 (單位:m)

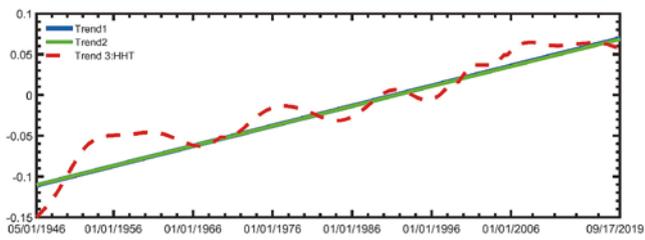


圖 7 不同趨勢分析方法之基隆潮位趨勢比較圖 (單位:m)

本案提出了一種改良調和分析方法來計算海平面趨勢，圖 8(c) 為潮汐水位和 Trend 2 之趨勢變化圖。

海平面上升成果分析

上節針對 LR、MHA 和 EMD 做了探討各種方法的優略分析，由於潮位 EMD 篩選過程中上、下包絡曲線的端點飛翼，會有端點效應問題，對海平面上升趨勢的分析會有影響誤差，所以本文的最後結果採用 MHA 來分析 SLR 趨勢。

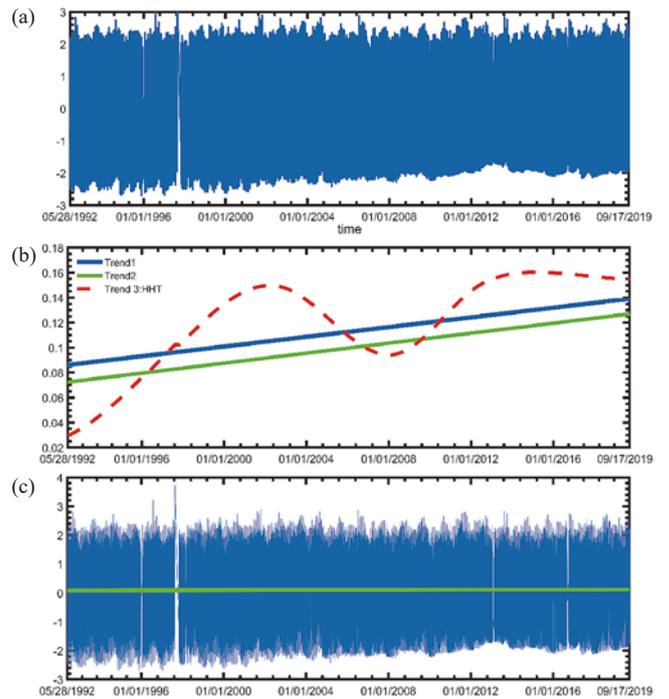


圖 8 新竹潮位站：(a) 潮位時序列、(b) 不同分析方法之趨勢比較圖、(c) Trend 2 趨勢和潮位時序列

為了要了解整個台灣環島沿岸 SLR，本文使用氣象局提供的台灣環島潮位站實測資料，如圖 9 所示。台灣環島潮位站的權責單位有氣象局、水利署和內政部。屬於內政部管轄的有台中港和高雄港。隸屬水利署的有麥寮、永安、鵝鑾嘴、石梯、富岡和綠島。其餘皆屬於氣象局潮位站。

本文利用 MHA，透過最小平方方法計算 SLR，結果如圖 10 和圖 11 及表 2 所示。表 2 中，將潮位資料分成「長期潮位」和「近 20 年潮位」，目的是想要探

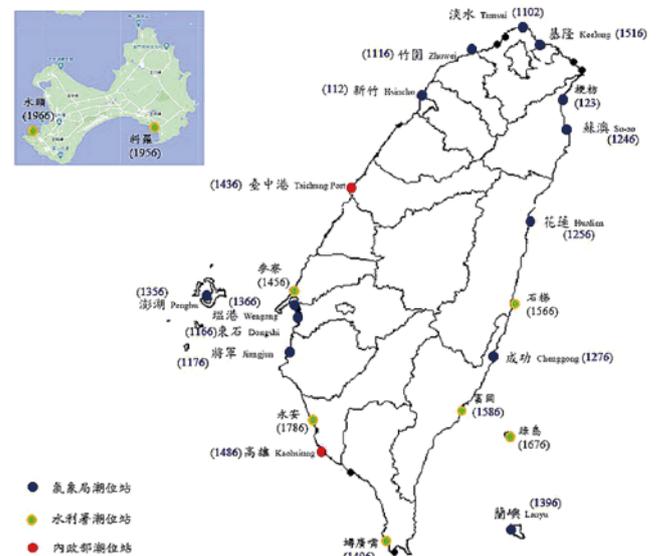


圖 9 台灣環島潮位站分布圖

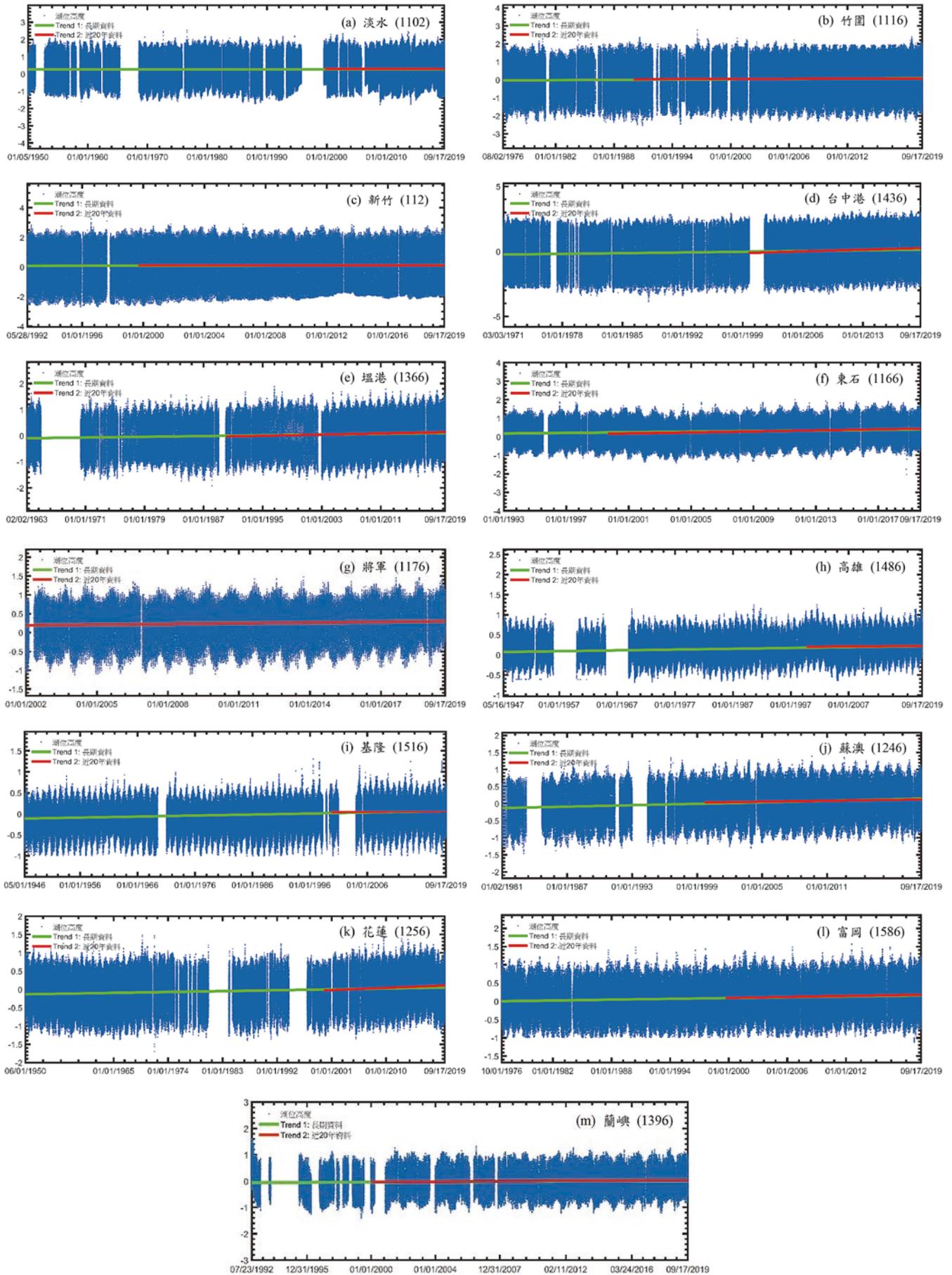


圖 10 台灣潮位站潮位歷時和趨勢圖 (單位:m)

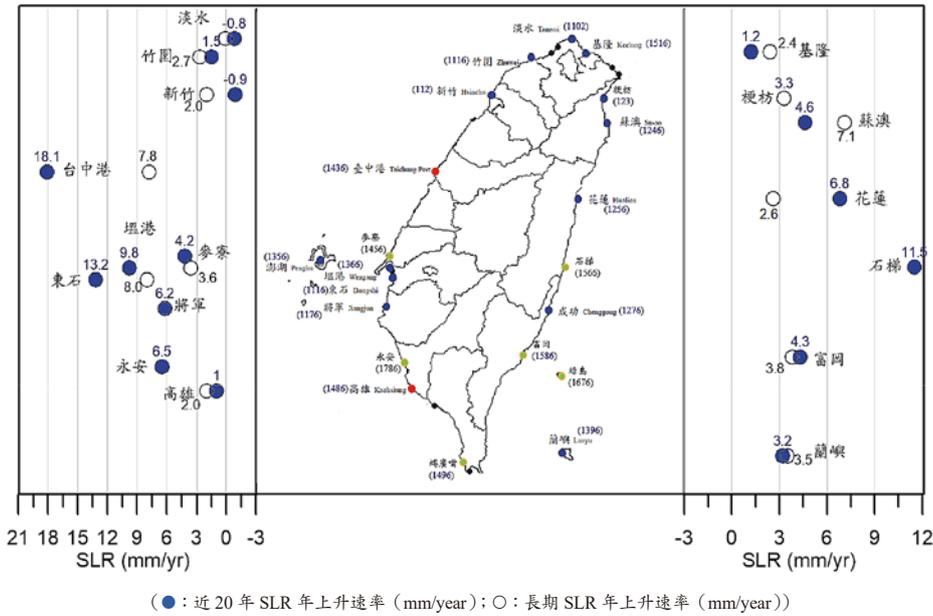


圖 11 台灣環島潮位站海平面近 20 年來變化趨勢圖

討長期和近 20 年 SLR 趨勢。表 2 中以「長期海平面上升趨勢」分析結果顯示：(1) 淡水 SLR 速率 0.1 mm/year；(2) 竹圍 SLR 速率 2.7 mm/year；(3) 新竹 SLR 速率 2.0 mm/year；(4) 臺中港 SLR 速率 7.8 mm/year；(5) 塭港 SLR 速率 3.6 mm/year；(6) 嘉義東石 SLR 速率 8.0 mm/year；(7) 台南將軍 SLR 速率 6.2 mm/year；(8) 高雄 SLR 速率 2.0 mm/year；(9) 基隆 SLR 速率 2.4 mm/year；(10) 蘇澳 SLR 速率 7.1 mm/year；(11) 花蓮 SLR

速率 2.6 mm/year；(12) 臺東富岡 SLR 速率 3.8 mm/year；(13) 蘭嶼 SLR 速率 3.5 mm/year。

「近 20 年海平面上升趨勢」分析結果顯示：(1) 淡水 SLR 速率 -0.8 mm/year；(2) 竹圍 SLR 速率 1.5 mm/year；(3) 新竹 SLR 速率 -0.9 mm/year；(4) 臺中港 SLR 速率 18.1 mm/year；(5) 塭港 SLR 速率 9.8 mm/year；(6) 雲林麥寮 SLR 速率 9.8 mm/year；(7) 嘉義東石 SLR 速率 13.2 mm/year；(8) 台南將軍 SLR 速率 6.2 mm/

表 2 潮位站實測資料分析台灣海域年海平面上升速率

	潮位測站	時間起始	時間結束	長期		近 20 年	
				年上升速率 (mm/year)	R 平方	年上升速率 (mm/year)	R 平方
1	淡水 (1102)	1950/01/04	2019/09/17	0.1	0.908	-0.8	0.943
2	竹圍 (1116)	1976/08/02	2019/12/18	2.7	0.966	1.5	0.985
3	新竹 (112)	1992/05/27	2019/09/17	2.0	0.981	-0.9	0.987
4	臺中港 (1436)	1971/03/01	2019/09/17	7.8	0.935	18.1	0.987
5	塭港 (1366)	1963/02/02	2019/12/19	3.6	0.918	9.8	0.964
6	麥寮 (1456)	2005/10/01	2019/12/31	X	X	4.2	0.986
7	東石 (1166)	1993/01/01	2019/09/17	8.0	0.951	13.2	0.952
8	將軍 (1176)	2002/01/01	2019/09/17	6.2	0.954	6.2	0.954
9	永安 (1786)	2004/01/01	2019/12/31	X	X	6.5	0.910
10	高雄 (1486)	1947/05/16	2019/09/17	2.0	0.844	1.0	0.863
11	基隆 (1516)	1946/05/01	2019/09/17	2.4	0.874	1.2	0.910
12	梗枋 ¹ (123)	1976/09/02	2008/05/29	3.3	0.903	X	X
13	蘇澳 (1246)	1981/01/01	2019/09/17	7.1	0.941	4.6	0.948
14	花蓮 (1256)	1950/06/01	2019/09/17	2.6	0.913	6.8	0.939
15	富岡 (1586)	1976/10/01	2019/09/17	3.8	0.913	4.3	0.941
16	蘭嶼 ² (1396)	1992/07/23	2019/09/17	3.5	0.924	3.2	0.944

註：1：梗枋：自 2008/05/30 之後就沒有潮汐資料；

2：蘭嶼 1999/07/21 ~ 1999/12/20 資料遺漏；X：表示資料不足，沒計算。

year；(9) 永安 SLR 速率 6.5 mm/year；(10) 高雄 SLR 速率 1.0 mm/year；(11) 基隆 SLR 速率 1.2 mm/year；(12) 花蓮 SLR 速率 6.8 mm/year；(13) 臺東富岡 SLR 速率 4.3 mm/year；(14) 蘭嶼 SLR 速率 3.2 mm/year。

以「長期資料」和「近 20 年資料」分析 SLR 趨勢結果顯示：SLR 持續加快的測站有：台中港、東石、塭港、蟳廣嘴、花蓮港、富岡；SLR 減緩的測站有：基隆港、淡水、新竹、竹圍、高雄港、蘇澳港、蘭嶼、馬公等測站。

本文將所有潮位站的 SLR 速率，彙整成（圖 11）利用台灣環島潮位站分析 SLR 趨勢圖，圖 11 中各站之海平面觀測潮位資料及海平面長短期變化趨勢。藍點符號為潮位觀測資料、綠色線符號為海平面長短期變化趨勢、紅色線符號為海平面 1999 年至 2019 年變化趨勢。在西海岸海平面上升速率最快的是台中港 18.1 mm/year，次之是東石潮位站 13.2 mm/year。東海岸海平面上升速率最快的是石梯 11.5 mm/year，次之是富岡潮位站 8.4 mm/year。台灣沿海的 SLR 速率分布與台灣潮差的分布很相似，塭港和東石潮位站上升速率如此快是因為區域受到地層下陷影響，塭港區域每年地表約有 14 mm 下沉量^[22]。

本文的分析在沒有修正地殼變動、地層下陷因子，所以才高過全球上升速率。Ching *et al.*^[22] 探討台灣地殼垂直變動速率，利用全球定位系統（Global Positioning System, GPS）觀測站推估，結果顯示台灣東南部與西南部等區域的地殼垂直變動量比台灣附近海面變動量大，表示台灣潮位站水位受到地殼垂直變動影響，此因素會影響潮位站資料所估算之 SLR。

郭重言等人^[23] 執行「台灣海域海平面上升之加速特性研究」計畫，將台灣 2002 ~ 2011 衛星測高與潮位站進行分析，計算 2002 ~ 2011 年之 SLR 速率，報告指

出「台灣北部海域 SLR 為 $-1 \sim 2$ mm/year，台灣南部海域 SLR 為 $4 \sim 8$ mm/year，表示台灣南方海域的 SLR 速率較台灣北部快」。從表 2 和圖 11 結果顯示台灣西岸北部區域 SLR 約 $-1 \sim 2$ mm/year；台灣南部海域 SLR 約為 $4 \sim 8$ mm/year 與郭重言等人^[23] 趨勢結果一致。

IPCC 第五次評估報告（AR5）^[24] 指出，1901 ~ 2010 年，全球海平面上升了約 0.19 m，平均上升速率為 1.7 mm/year（IPCC, 2013）。1971 ~ 2010 年，全球海平面平均上升速率為 2.0 mm/year，1993 ~ 2010 年，上升速率明顯增加，達到 3.2 mm/year（IPCC, 2013）。從表 2 結果顯示 (1) 以「長期上升速率」台灣海平面上升速率比全球平均快 2 倍以上的潮位測站有臺中港、嘉義東石、台南將軍、蘇澳等潮位測站；(2) 「近 20 年資料」台灣海平面上升速率比全球平均快 2 倍以上的潮位測站有臺中港、塭港、嘉義東石、台南將軍、花蓮港等潮位測站。

全球海平面變化有兩種發生方式：(1) 地殼變化引起的大洋盆地容積變化；(2) 海洋體積變化。本文分析潮位站皆未考慮潮位站地殼垂直變動之影響，本文參考 Ching *et al.*^[22] 的 GPS 觀測站資料之地殼垂直變動速率（最接近各潮位站的 GPS 觀測站與水準點之成果），考量地表垂直變動速率之後的 SLR 速率，成果如表 3 所示。潮位站經考量地殼垂直變動速率修正後之 SLR 速率，修正後的台灣環島潮位站 SLR 速率趨於一致。

綜合以上結果，直接利用未改正地表垂直變動的台灣周圍潮位站資料並估算 SLR 速率，地表垂直變動因素會顯著影響 SLR 速率之估算成果。本文分析結果與過去學者有所差異，主因為過去學者在分析 SLR 速率是採用線性回歸方式處理，本文的分析方法採用的改良型調和分析方法，所以會有所差異，此外，本方法是在最小平方方法的基礎上，故分析結果會隨著資料選取的時間長度有所差異。

表 3 潮位站考量地表垂直變動速率修正後之海平面上升速率

潮位測站	近 20 年年上升速率 (mm/year)	地表垂直變動速率 GPS (mm/year)	GPS 量測時間	海平面修正垂直地殼變動之 SLR 上升速率 (mm/year)
基隆 (1516)	1.2	-1.63 ± 0.09	2002/01 ~ 2012/12	-0.4
將軍 (1176)	6.2	-7.91 ± 0.05	2001/12 ~ 2012/09	-1.71
高雄 (1486)	1.03	-0.91 ± 0.07	2004/01 ~ 2012/08	0.12
蟳廣嘴 (1496)	5.0	-3.55 ± 0.12	2001/12 ~ 2012/09	1.45
蘇澳 (1246)	4.6	-4.63 ± 0.12	2002/01 ~ 2012/08	-0.03
花蓮 (1256)	6.83	-5.15 ± 0.13	2002/01 ~ 2012/12	1.73
富岡 (1586)	4.3	-3.89 ± 0.07	2003/12 ~ 2012/12	0.41

註：GPS 資料來自 Ching *et al.*^[22]

結論

本文利用中央氣象局提供的台灣環島沿岸長期之海水位實測資料進行分析後，將潮位資料分解成週期訊號（天文潮）和非週期性（單調函數）之趨勢訊號來分析海平面趨勢是比較合理的分析方式。利用改良型的調和分析方法，透過最小平方法迴歸分析計算海平面上升，結果顯示：在本文例的台灣環島潮位站海平面變化趨勢圖，台灣東西岸海平面上升速率最快的是分別是石梯、台中港潮位，東西海岸的海平面上升速率分布與台灣潮差的分布很類似。以「長期資料」和「近 20 年資料」分析海平面上升趨勢結果顯示：海平持續加快的測站有：台中港、塭港、東石、花蓮、臺東富岡；海平面減緩的測站有：基隆、淡水、竹圍、新竹、高雄、蘇澳、蘭嶼。若考量到海平面上升因子（地表垂直變動速率、地層下陷等因子）後，修正後的台灣環島潮位站海平面上升速率趨於一致。

參考文獻

1. Feenstra, J. F., Burton I., Smtih J. B., and Tol R. S. J. (1998), Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies, United Nations Environment Program (UNEP), University of Amsterdam.
2. Merrifield, M. A., Merrifield S. T., and Mitchum G. T. (2009), An anomalous recent acceleration of global sea level rise, *Journal of Climate*, 22, 5772-5781.
3. Mitrovica, J. X., Tsimplis M. E., Davis J. L., and Milne G. A. (2001), Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change, *Nature*, 409, 1026-1029.
4. Douglas, B. C. (2001), Chapter 3 Sea level change in the era of the recording tide gauge, *International Geophysics*, 75, 37-64.
5. Church, J. A., White N. J., Coleman R., Lambeck K., and Mitrovica J.X. (2004), Estimates of regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period, *Journal of Climate*, 17, 2609-2625.
6. Shum, C. K. and Kuo C.Y. (2011), Observation and geophysical causes of present-day sea level rise, *Climate Change and Food Security in South Asia*, 85-104.
7. Church, J. and White N. J. (2011), Sea-level rise from the late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, 32, 585-602.
8. Nerem, R. S., Beckley B. D., Fasullo J. T., Hamlington B. D., Masters D., and Mitchum G. T. (2018), Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PANS)*, 115 (9), 2022-2025.
9. Nicholls, R.J. and Cazenave A. (2010), Sea-level rise and its impact on coastal zones, *Science*, 328, 1517-1520.
10. Ablain, M., Cazenave A., Valladeau G., and Guinehut S. (2009), A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2009, *Ocean Sciences*, 5, 193-201.
11. Cazenave, A. and Nerem R. S. (2004), Present-day sea level change: observations and causes, *Reviews of Geophysics*, 42 (3), 1-20.
12. Cazenave, A., Dieng H. B., Meyssignac B., von Schuckmann K., Decharme B., and Berthier E. (2014), The rate of sea-level rise, *Nature Clim. Change*, 4(5), 358-361, doi: 10.1038/nclimate2159.
13. Llovel, W., Guinehut S., and Cazenave A. (2010), Regional and interannual variability in sea level over 2002-2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass, *Ocean Dynamics*, 60, 1193-1204.
14. Hsieh, C. M., Chou D., and Hsu, T. W. (2022), Using modified harmonic analysis to estimate the trend of sea-level rise around Taiwan, *Sustainability*, 14, 7291. <https://doi.org/10.3390/su14127291>.
15. Foreman, M. G. G. (1977), Manual for tidal heights analsis and prediction, Pacific Marine Science Report 77-10, Istitute of Ocean Science, Partica Bay, Sidney, B. C.
16. Huang, Norden E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N., Tung C. C., and Liu H. H. (1998), The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. R. Soc. Lond A.*, 454, 903-995.
17. Huang, N. E., Shen Z., and Long S. R. (1999), A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 417-457.
18. Wu, Z. and Huang N. E. (2004), A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 460, 1597-1611.
19. Wu, Z. and Huang N. E. (2005), Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, Centre for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Technical Report No. 193.
20. Wu, Z. and Huang N. E. (2009), Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method, *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1, 1-41.
21. Huang, Z., Zong Y., and Zhang W. (2004), Coastal Inundation due to sea level rise in the Pearl river delta, *China, Natural Hazards*, 33, 247-264.
22. Ching, K.E., Hsieh M. L., Johnson K. M., Chen K. H., Rau R. J., and Ying M. (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, B08406, doi: 10.1029/2011JB008242.
23. 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎 (2016)，台灣海域海平面上升之加速特性研究。MOTC-IOT-105-H3DB003a 合作研究報告，交通部運輸研究所臺灣技術研究中心。
24. Official IPCC WGI AR5 website: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> 

歡迎加入學會



www.ciche.org.tw

下載入會申請書



中國土木工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

e-mail: service@ciche.org.tw

電話：(02) 2392-6325

傳真：(02) 2396-4260



海域資料在海岸風險評估之應用

— 以花蓮海岸為例

王國樑／經濟部水利署第九河川局 局長

黃偉柏／國立臺灣海洋大學河海工程學系 副教授

姜重宇、廖顯益／國立臺灣海洋大學河海工程學系 研究生

古婉婷／經濟部水利署第九河川局 工程員

近年來因氣候變遷影響，極端氣候發生頻率及能量漸增，單就加強海岸防護強度來抵禦極端海象條件並非唯一選項，應搭配調適方式適度承擔災害風險，因應災害可能帶來的衝擊。因此，本文透過海岸災害風險評估，全面瞭解海岸災害潛勢之危險程度，以及災害影響範圍內人文社經損傷與防災應變能力之脆弱程度，進而評估各村里之風險等級，以供目的事業主管機關資源投入、基礎設施改善及管制強度優先順序之參考，並就該村里之風險主導指標，分別改善災害潛勢或脆弱程度，以提升海岸韌性之根本。本文應用歷年海域監測資料，包括波浪及水深地形實測資料，以分析各村里之波浪條件、岸線變化及堤前緩衝帶寬度等危險度代表性影響因子，進而量化其危險等級。由風險評估結果顯示，研究區以民孝里（高風險）風險等級最高，其次為民心里（中高風險），再者為民有里及新社村（中風險），而其餘村里之風險等級為中級以下。

前言

民國 60 年代起，隨著國家政策、社經發展、人口增加等因素，內陸可利用土地快速飽和加上出口導向等經濟誘因，人口逐漸向濱海地區遷移。為保護沿海居民的生命財產安全及加速經濟發展，於沿岸地區陸續興建許多海岸防護設施等人工構造物及設施。然而隨著攔沙壩興築、河川整治等因素導致沿岸輸砂源減少，造成海岸侵蝕，對沿岸防護設施、保全對象以及國土資源的威脅性增加。有鑑於此，各岸段開始檢討海岸防護設施的安全性，並在海岸侵蝕較為嚴重地區，輔以其他構造物提升防禦浪潮的功能。目前雖各防護設施均符合設計標準，但近年來在極端氣候發生頻率、能量漸增，以及人們對海岸環境保護及生態永續的觀念興起下，單以加強海岸防護強度抵禦極端氣候並非唯一選項，應在經濟發展、海岸防護及環境保

育間取得平衡，以促進海岸地區的永續發展。

因此，為因應氣候變遷以及達到海岸永續發展之宗旨，內政部於 104 年 2 月 4 日公告並施行海岸管理法^[1]，希望可達海岸零損失、防治海岸災害，並將海岸侵蝕、暴潮溢淹、洪氾溢淹及地層下陷列入法定災害，且因應氣候變遷與海岸災害風險，易致災害之海岸地區應採退縮建築或調適其土地使用，使得在國土保存與人民生命財產安全都能兼顧，以達降低海岸災害風險。

爰此，本文透過海岸侵蝕、暴潮溢淹、洪氾溢淹及地層下陷災害潛勢分析，以釐清研究區近年所面臨之海岸災害。然後，就災害潛勢以村里為尺度進行風險評估，分析研究區內之災害危險程度以及社會經濟與應變能力脆弱程度，最終繪製海岸災害風險地圖，供未來調適策略參考應用。

研究範圍

本文以花蓮縣新城鄉新城村以南至吉安鄉仁安村及豐濱鄉新社村為案例進行說明，如圖 1 所示。

海域監測概況

本文蒐集彙整研究範圍內相關海象與地形調查監測資料，供後續海岸災害潛勢及危險度代表影響因子分析應用。

潮位

依據中央氣象局花蓮潮位站（花蓮港內）2002 ~ 2021 年統計資料^[2]，年平均之大潮平均高潮位約 0.82 公尺，平均潮位約 0.04 公尺，大潮平均低潮位約 -0.91 公尺，平均潮差約 1.20 公尺。

另根據水利署石梯潮位站（石梯漁港內）2002 ~ 2021 年統計資料^[3]，年平均之大潮平均高潮位約 0.91 公尺，平均潮位約 0.17 公尺，大潮平均低潮位約 -1.00 公尺，平均潮差約 1.23 公尺。

波浪

依據中央氣象局花蓮浮標站（七星潭外海 300 公尺處）2002 ~ 2021 年統計資料^[2]，夏季期間（4 ~ 9 月），平均示性波高約 0.80 公尺，平均週期約 5.8 秒，主要波向為 ENE ~ ESE；冬季期間（10 ~ 翌年 3 月），平均示性波高約 1.42 公尺，平均週期約 6.2 秒，主要波向為 NE ~ ENE。

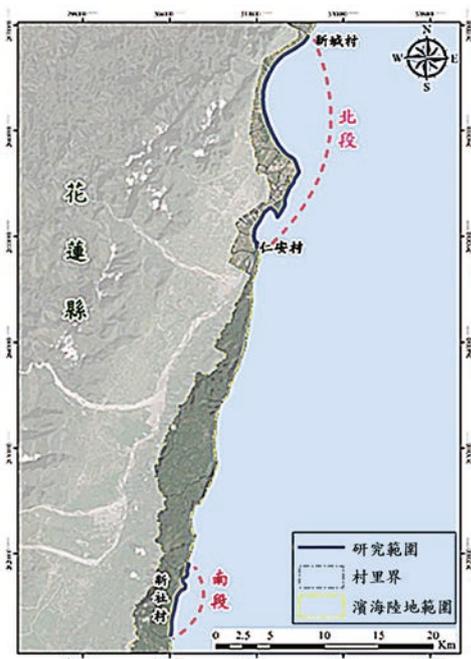


圖 1 研究範圍圖

地形調查監測

水利署第九河川局於民國 75 ~ 91、93 年度以自辦方式完成南、北濱及化仁海岸監測調查；民國 94 ~ 109 年度則以專業委託服務方式完成南北濱至化仁、七星潭（含環保公園）、水璉、牛山、新社東興至豐濱及崇德新城海岸等監測調查。

海岸災害潛勢分析

為瞭解研究區所面臨之海岸災害類型，以下就法定四大海岸災害潛勢進行分析，釐清災害潛勢高低及空間分布。

暴潮溢淹潛勢分析

暴潮溢淹指因颱風或低氣壓所產生之強風或氣壓突變等氣象變化，使海面產生明顯之暴漲，加上天體引力所引發之天文潮，兩者結合而成之海水位超過海堤或護岸高度，使得大量海水湧入低窪地區，造成溢淹。

暴潮特性

本文採以潮位站歷史實測年極值排序統計，即涵蓋天文潮與氣象潮兩者之影響機制而成，並經重現期分析後，作為各期距之暴潮水位。由於花蓮海岸長度較長，為符合海洋營力作用機制與影響相近之岸段，本文參照花蓮縣二級海岸防護計畫分段方式，將花蓮沿海水位分佈區分為兩大大段，分別為花蓮海岸（I）和平溪口至奇萊鼻段及花蓮海岸（II）奇萊鼻至花東縣界段。

花蓮海岸（I）為採中央氣象局花蓮潮位站觀測資料；花蓮海岸（II）則以水利署石梯潮位站監測資料進行重現期分析。由分析結果顯示，花蓮海岸（I）50 年重現期暴潮水位為 1.53 公尺；花蓮海岸（II）50 年重現期暴潮水位為 1.55 公尺。

暴潮溢淹潛勢

本文所探討之暴潮溢淹潛勢為海堤全面潰堤最危險情境，即以 50 年重現期距的暴潮水位條件與數值高程模型（Digital Elevation Model, DEM），單純考量水位與地形高程差值，評估研究區濱海陸地內之溢淹範圍與深度分佈^[4]。由結果顯示，研究區因緊鄰中央山脈與海岸山脈，地勢高且坡度陡，受暴潮位影響相對輕微，溢淹潛勢範圍均位於河口以及自然灘地，並無溢淹至內陸情形。因此於 50 年重現期下，研究區受暴潮溢淹災害致災機率較低。

海岸侵蝕潛勢分析

海岸侵蝕為海岸線向內陸退縮之現象，造成海岸侵蝕之主要原因之一為沙源流失，供輸失衡，即該海岸地段流失之沙源比補充之沙源量大，其肇因一般可分為自然因素及人為因素兩類。自然因素主要包括海洋營力及水文條件改變引起河川輸砂量減少；人為因素則包括填海造陸、突出岸線之人工結構物、河川整治造成輸砂減少等。

為能釐清研究區海岸地形變遷趨勢，以瞭解海岸侵蝕危害程度，本文利用 2016 年 05 月及 2020 年 06 月之實測水深地形資料，進行岸線變化速率及平面侵蝕量體變化分析，進而判定侵蝕潛勢高低及分布。

漂砂特性

本文依據中央氣象局花蓮浮標站歷年逐時波浪觀測資料，以其年平均波高及標準偏差，並依 Birkemeier^[5] 提出的經驗公式推算得漂砂帶終端水深約 10 公尺。

海岸侵蝕潛勢

岸線變化速率：將各輸砂單元沿岸線以每 100 公尺作一控制斷面，以計算各斷面上的高灘線變化速率，進而探討岸線侵蝕趨勢^[4]。由分析結果顯示，部分斷面侵蝕速率大於每年 5 公尺，然就各輸砂單元內各斷面變遷速率的平均結果來看，皆未達每年 5 公尺，但新社村平均年侵蝕速率達中潛勢（-2m/yr），如圖 2 所示。

水深地形平面侵蝕：分析範圍為從陸側 +1 公尺（高灘線）起向海側計算至 -10 公尺水深（漂砂帶終端水深）止^[4]。根據分析結果，立霧溪口至奇萊鼻及新社村整體輸砂單元呈侵蝕趨勢；而美崙溪口至花蓮溪口，因經濟部水利署第九河川局近年於該岸段辦理數次置沙養灘作業及佈置離岸潛堤，使整體呈淤積趨勢，如圖 3 所示。

由以上岸線變化及海岸平面侵蝕分析結果可知，研究區內具侵蝕潛勢之岸段共有 4 處，分別為立霧溪口南側、奇萊鼻、花蓮溪口北側以及新社村全段，其中以奇萊鼻及新社村之侵蝕情勢最為嚴重。

洪氾溢淹潛勢分析

洪氾溢淹為颱風豪雨所帶來的大量雨水，導致河水溢過堤防及護岸，或排水系統無法即時將之貯蓄或排除至河道而造成溢淹。而為達洪氾溢淹治理成效，需從河川排水上、中及下游進行整合性考量，非僅從海岸地區範圍內進行相關作為即能夠完備，故在洪氾溢淹災害防治時，外水溢淹部分仍以水利法及流域綜合治理特別條

例等相關規定為主^[4]。換言之，需納入海岸風險評估裡的洪氾溢淹災害潛勢的溢淹範圍為目前公告之定量降雨淹水潛勢圖與 50 年重現期暴潮溢淹潛勢的重疊範圍。

因此，本文透過水利署 24 小時延時 50 年重現期連續降水圖資與暴潮溢淹潛勢範圍進行套疊，以釐清淹水潛勢範圍內是否具有受暴潮水位影響導致淹水之區域，即重疊區域。由套疊結果顯示，降雨淹水潛勢範圍主要集中在內陸低窪區域，與暴潮溢淹潛勢分布在河口及自然灘地範圍並無重疊，可研判其淹水成因為屬地處低窪地區遇強降雨導致排水不及而造成內水溢淹，非屬暴潮溢淹引致災害，因此可判定研究區域並無海岸地區所指之洪氾溢淹災害潛勢。

地層下陷潛勢分析

地層下陷指地層向下移動之現象。臺灣之地層下陷主要係由人為因素所造成，因無節制地超量抽取地下水所致，當地下水抽取超量時，地下水水壓將相對隨之降低，導致區域性地層下陷之結果。

而依據經濟部 2022 年 1 月 27 日所公告地下水管制區位分佈，研究區並未列入管制區域；另由臺灣地區民國 110 年度地層下陷檢測概況^[6] 顯示研究區非屬地層下陷潛勢區，故地層下陷災害不予納入本文討論。

災害潛勢整合分析

根據以上海岸災害潛勢分析結果，顯示研究區所面臨之法定災害為海岸侵蝕，因此後續風險評估將以海岸侵蝕災害為主軸，作為評估海岸災害風險分布及韌性調適策略研擬之依據。

海岸災害風險評估

本文根據聯合國減災組織（UNDRO）^[7] 所提出之風險定義，將海岸災害風險分為危險度與脆弱度指標以進行風險評估計算。危險度指標為海岸災害潛勢及防護設施特性之代表；脆弱度指標則代表濱海陸地之人文社經可能受影響的損傷程度與防災應變能力，並以臺灣第四級行政區「村里」為尺度，透過風險辨識、風險分析及風險評量就研究區海岸災害進行風險評估，進而繪製風險地圖。

風險因子資料庫建置

由於臺灣各海岸地區特性不同，在選用因子時應考量該海岸地區，因地制宜建立其危險度及脆弱度因子資料庫。因此，本文以一般性海堤之風險評估計畫書（參考本）^[8] 之風險因子資料庫為基礎，並將危險度因子資

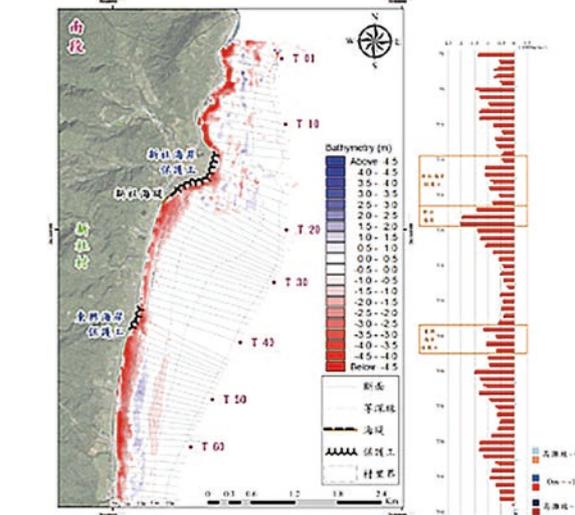
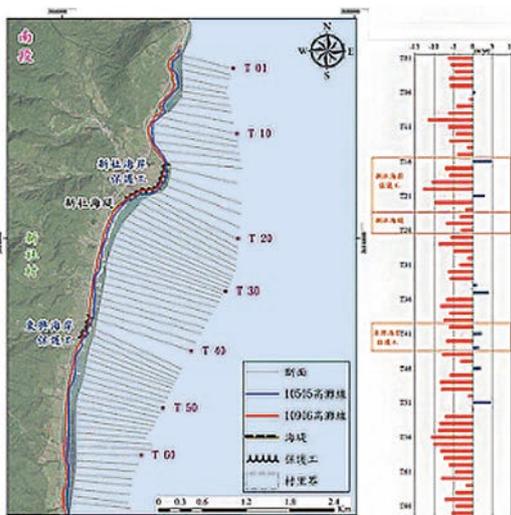
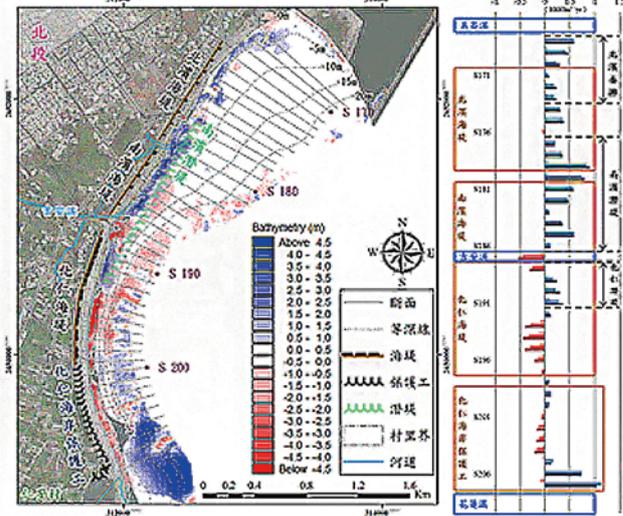
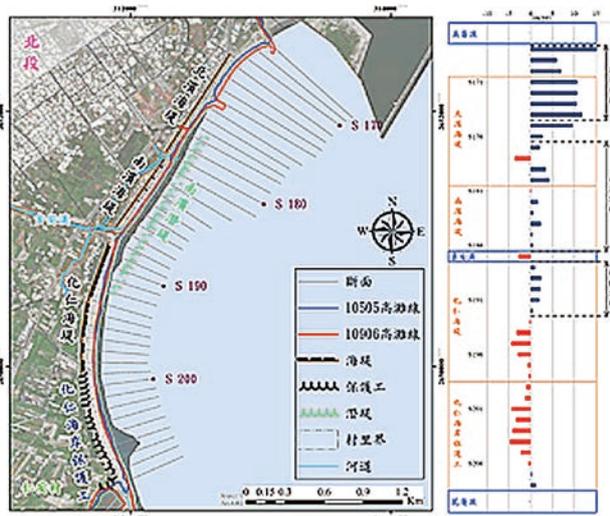
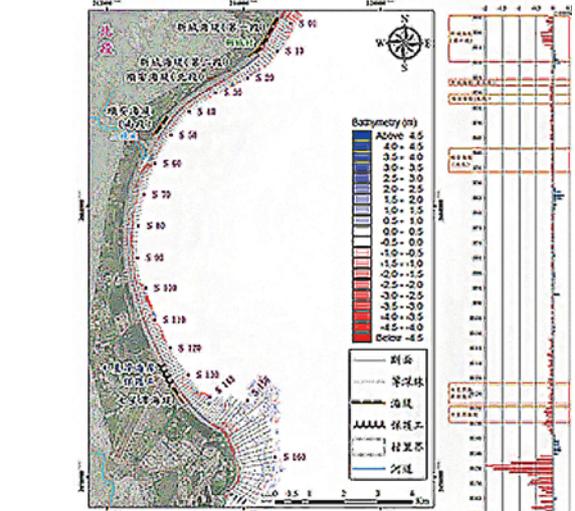
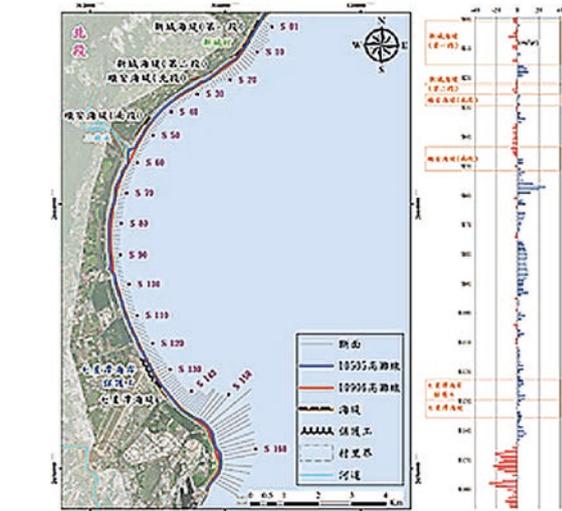


圖 2 岸線變化速率圖 (2016~2020)

圖 3 水深地形平面侵蝕圖 (2016~2020)

料庫中排除非屬研究區所面臨之海岸災害，包括暴潮溢淹課題、洪氾溢淹課題及地層下陷課題等相關因子，以利聚焦於海岸侵蝕災害風險。依上述所建置之研究區海岸災害及社會經濟特性風險因子資料庫如圖 4 所示。

風險辨識

建立風險因子資料庫後，本文透過 Murray *et al.*^[9] 所提出的模糊德爾菲法 (Fuzzy Delphi Method, FDM) 篩選出代表影響因子進行後續相關風險評估。由模糊

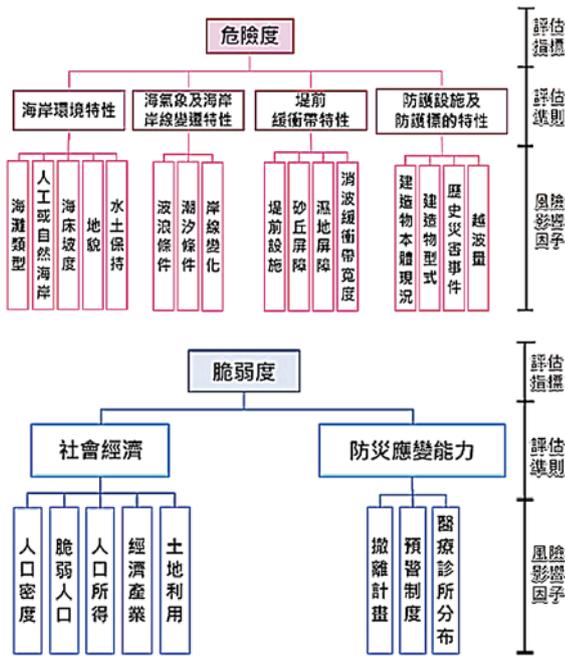


圖 4 研究區風險因子資料庫

德爾菲法專家問卷調查計算結果，顯示 16 項危險度因子中有 7 項達專家共識的門檻值 ($G_i \geq 6.0$)；8 項脆弱度因子中則有 3 項，其可視為影響研究區災害風險的代表性因子。代表性影響因子如下：

1. 危險度代表影響因子：波浪條件、岸線變化、堤前設施、消波緩衝帶寬度、建造物本體現況、建造物型式及歷史災害事件，共 7 項。
2. 脆弱度代表影響因子：人口密度、土地利用型態及預警制度，共 3 項。

風險分析

接下來，本文依據各項因子特性，藉由定性分析、定量分析或半定量分析，針對該代表影響因子進行系統性分級，以量化、釐清各因子的分級關係，將危險度及脆弱度因子之風險等級量化成 1 ~ 0.01 分，如表 1 和表 2 所示。其中，該危險度或脆弱度代表影響因子之風險分數值越大，則表示其災害潛勢越高，或防護標的損傷程度越大；另在脆弱度影響因子中，當應變能力越差、耗時較長者，風險分級值越高。

危險度代表影響因子

1. 波浪條件：在海洋營力作用下，波浪能量為驅使海岸地形變遷或危及相關防護設施、標的之重要因素之一。於 50 年重現期防護標準下，若入射波高越大，則對海岸地形變遷及相關防護設施、標的之危險程度越高，即造成防護設施及消波工等

表 1 危險度風險分級劃設原則表

代表影響因子	潛勢	分數	海氣象及海岸岸線變遷特性		堤前緩衝帶特性	
			波浪條件	岸線變化	堤前設施	消波緩衝帶寬度
高	1	堤前入射波高排序分佈 80% 以上	高灘線每年後退 5 公尺以上	堤前無消波結構物或為自然海岸	消波緩衝帶寬度小於 25 公尺	
中高	0.75	堤前入射波高排序分佈 60% 至 80%	-	-	-	
中	0.5	堤前入射波高排序分佈 40% 至 60%	高灘線每年後退 2 至 5 公尺	堤趾處設有附屬保護工	消波緩衝帶寬度 25 至 50 公尺	
中低	0.25	堤前入射波高排序分佈 20% 至 40%	-	-	-	
低	0.01	堤前入射波高排序分佈 20% 以下	高灘線每年後退量 2 公尺以下	堤前設有離岸堤等大型消波設施	消波緩衝帶寬度大於 50 公尺	
代表影響因子	潛勢	分數	堤前緩衝帶特性			
			建造物本體現況	建造物型式	歷史災害事件	
高	1	近 5 年安全檢測結果被列為改善且尚未辦理修繕	自然海岸	蛇籠	近 20 年災害事件排序分佈 66.6% 以上	
中高	0.75	-	-	-	-	
中	0.5	近 5 年安全檢測結果正常或已辦理修繕，但結構物現況目視有破損情形	消波塊	土/拋石堤	近 20 年災害事件排序分佈 33.3% 至 66.6%	
中低	0.25	-	-	-	-	
低	0.01	近 5 年安全檢測結果正常或已辦理修繕且結構物現況目視正常	混凝土堤	混泥土堤	近 20 年災害事件排序分佈 33.3% 以下	

表 2 脆弱度風險分級劃設原則表

代表影響因子	潛勢	分數	社會經濟型態		防災應變能力
			人口密度	土地利用	預警制度
高	1	正規化分數大於 0.8	建築、公共利用土地	無預警制度	
中高	0.75	正規化分數介於 0.6 至 0.8	遊憩、交通利用土地	-	
中	0.5	正規化分數介於 0.4 至 0.6	農業利用土地	(不定期) 防汛人員巡視	
中低	0.25	正規化分數介於 0.2 至 0.4	鹽礦利用土地	-	
低	0.01	正規化分數小於 0.2	森林、水利、其他	設有即時監測系統	

破損機率越高，因此本文以 50 年重現期堤前入射波高排序分佈百分比，將其分為 5 個等級。

其中，50 年重現期之堤前入射波高為以 2020 年 05 月實測水深地形資料建置數值地形，再經實測波浪資料率定數值模式參數後，再重現 1980 ~ 2020 年所有有發佈颱風警報之颱風事件，進行重現期分析，推求堤前入射波高。

2. 岸線變化：依據整體海岸管理計畫^[10]所公告的海岸侵蝕災害潛勢劃分原則，將危險程度分為 3 級。分別為每年後退量達 5 公尺以上、2 ~ 5 公尺及 2 公尺以下。

其中，岸線變化為根據 2016 及 2020 年地形監測資料，計算各村里岸段之高灘線年平均變化速率。

3. 堤前設施：堤前存有入射消波設施或附屬保護工，能使其堤前碎波能力增加，進而降低海岸地形變遷趨力及波浪作用能量，且可保護堤身基礎避免

受波浪淘刷，使該岸段之海岸災害風險較低。本文以堤前無人工消波結構物設施、堤趾處設有附屬保護工及堤趾處設有附屬保護工且堤前存有其餘消波結構物設施（如離岸潛堤），分為3等級。

4. 消波緩衝帶寬度：波緩衝帶寬度為海岸防護設施堤趾、崖趾或植生綠帶至水線之砂灘寬度。此區域提供波浪提早受到淺化作用消滅能量，不致於直接衝擊至海岸，意即為減少防護標的受災之緩衝帶。本文依據2020年05月地形調查監測資料分析各村里之消波緩衝帶寬度，並參照整體海岸管理計畫^[10]海岸侵蝕災害潛勢分級標準，係以海岸侵蝕速率每年後退5公尺以上之高災害潛勢為基礎，並考量海岸防護計畫每五年需通盤檢討一次，因此將消波緩衝帶寬度採以25公尺為單位，將其危險程度分為3級。
5. 建造物本體現況：藉由近期海岸防護設施不定期檢查結果及近5年安全檢測結果，瞭解於地震、海洋營力等作用影響下，建造物本體現況是否老舊、破損，或其堤身使用狀況、功能、耐受性是否符合防護標準，分為3級。
6. 建造物型式：防護設施因本身型式不同而在功能及耐受力上對其危險度會有所差異。本文藉由海岸防護設施型式之抵禦浪潮能力及耐受力進行分類，包含自然海岸、蛇籠、消波塊、土/拋石堤以及混凝土堤，將危險程度分為5級。
7. 歷史災害事件：由於花蓮海岸位於臺灣東部，於颱風季節期間，研究區域經常受颱風直接侵襲或因颱風湧浪影響，使研究區易有海岸防護設施破損或海崖崩坍等災害紀錄，因此當該岸段歷史災害事件越多，代表危險程度越高。本文根據近20年主管機關提報與紀錄之海岸防護設施破損、災情修護等，依其排序分佈百分比分為3級。

脆弱度代表影響因子

1. 人口密度：由於研究區海岸地勢緣故，人口多集中於都市計畫區域等重要聚落範圍，且部分都市計畫區域範圍緊鄰海岸，當人口密度越高，則越易因海岸災害造成人員傷亡，即脆弱度越高，因此本文透過標準化及正規化方式^[11]計算濱海村里人口密度，以量化人口密度脆弱度，最後將人口密度分為5級。
2. 土地利用：濱海地區之實際土地利用型態會隨著社經人文發展而有所改變，且不同的土地使用區

位所對應之人類活動及經濟發展程度亦有所差異。因此，本文根據內政部第二次國土利用調查成果資料（109年）及土地使用分類項目，包括建築、公共、遊憩、交通、農業、礦鹽、森林、水利及其他利用土地，並將人類活動頻繁地區視為脆弱度風險等級最高，其餘則依人類活動程度進行分級，共分為5級。

3. 預警制度：目前就水患、積淹水等致災頻繁區域，相關主管機關多以防汛志工通報或是設置監測裝置等設備，做為颱風期間即時掌控災情以及發布預警報告之依據，而事前若已制定預警制度，於災害來臨前即時發布預警，供民眾提前進行自主防災整備或撤離至地勢較高之區域，藉由政府與人民合作，降低脆弱度高地區之風險，並加強民眾對災害的憂患意識以及韌性承洪觀念。本文以該濱海村里範圍內是否設有監控裝置或派遣防汛人員巡視等，可供做為防災預警所用之軟、硬體設備，以評估災害應變能力等級，共分3等級。而預警制度屬韌性因子，歸屬於脆弱度，其計量方法之分數與前列脆弱度因子成反比。

風險評量

由於各項代表影響因子對於海岸災害之影響程度比重應有所不同，為求得各評估準則以及影響因子權重，以計算各岸段之危險度總分和脆弱度總分進而推估其風險等級。因此，本文藉由 Saaty^[12]所提出之層級分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP），透過問卷調查彙整數名專家學者意見，將各因子間複雜的重要程度問題分層解析，以量化影響權重。由分析結果顯示，危險度風險因子以岸線變化及消波緩衝帶寬度所主導，其次依序為波浪條件、堤前設施、建造物本體現況等；另於脆弱度因子權重中，則以預警制度作為脆弱程度的主導因子，其次為人口密度，如表3所示。

以上將危險度因子以及脆弱度因子的風險分級定義及權重關係分析完後，將海岸地區海岸災害潛勢與人文社經影響程度進行結合。即為將各項代表影響因子的風險分數乘以相對應的權重值，得出該項因子的加權分數後，再分別將危險度、脆弱度各項因子的加權分數加總，可求得危險度、脆弱度的總分，並對應其危險度、脆弱度等級。最後，將危險度及脆弱度風險等級帶入風險矩陣，如圖5所示，即可評量海岸災害風險等級。

表3 代表影響因子平均權重值總表

評估指標	評估準則	準則權重	風險代表影響因子	相對權重	絕對權重
危險度指標	海氣象及海岸岸線變遷特性	0.41	波浪條件	0.38	0.16
			岸線變化	0.62	0.25
	堤前緩衝帶特性	0.32	堤前設施	0.39	0.12
			消波緩衝帶寬度	0.61	0.20
	防護設施特性	0.27	建造物本體現況	0.41	0.11
建造物型式			0.28	0.08	
歷史災害事件			0.31	0.08	
脆弱度指標	社會經濟	0.50	人口密度	0.72	0.36
			土地利用	0.28	0.14
	防災應變能力	0.50	預警制度	1.00	0.50

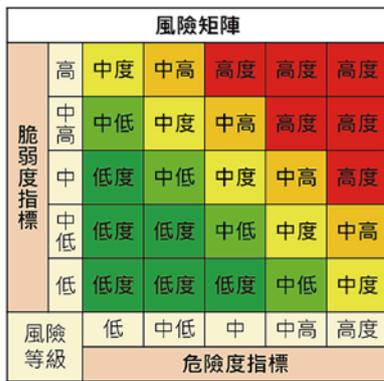


圖5 風險矩陣示意圖

海岸災害風險地圖

透過以上方法確立各區域之危險度、脆弱度及風險等級後，本文藉由地理資訊系統 (Geographic

Information System, GIS) 繪製海岸風險地圖，呈現風險等級空間分布，以利作為未來相關管理規劃使用，如表4、圖6。

1. 危險度等級：研究區各村里之海岸災害危險度介於低級至高級分布，並以中低危險度岸段為多。其中，民孝里因位處突出岸線之岬頭，波浪能量易集中於此，且以自然海岸占比最高，整體危險程度屬高級；新社村海岸侵蝕達中潛勢且以自然海岸占比最高並偶有災情發生，整體危險程度屬中高級；民心里位處岬頭北側，入射波高屬高危險等級但沿岸防護設施以消波工占比最高，整體危險程度屬中級。其餘村里危險度則為中低級以下。
2. 脆弱度等級：研究區各村里之海岸災害脆弱度介於低級至中高級分布。其中，民心里、民孝里因

表4 海岸災害風險評估成果一覽表

評估指標		危險度等級	脆弱度等級	風險等級
鄉鎮	村里			
新城鄉	新城村	中低	中低	低級
	順安村	低級	中低	低級
	康樂村	中低	中級	中低
	大漢村	中低	低級	低級
花蓮市	民心里	中級	中高	中高
	民孝里	高級	中高	高級
	民權里	中低	中低	低級
	民有里	中低	中高	中級
	民主里	中低	中級	中低
	主計里	低級	低級	低級
	主和理	低級	中級	低級
吉安鄉	東昌村	低級	低級	低級
	仁安村	中低	低級	低級
豐濱鄉	新社村	中高	中低	中級

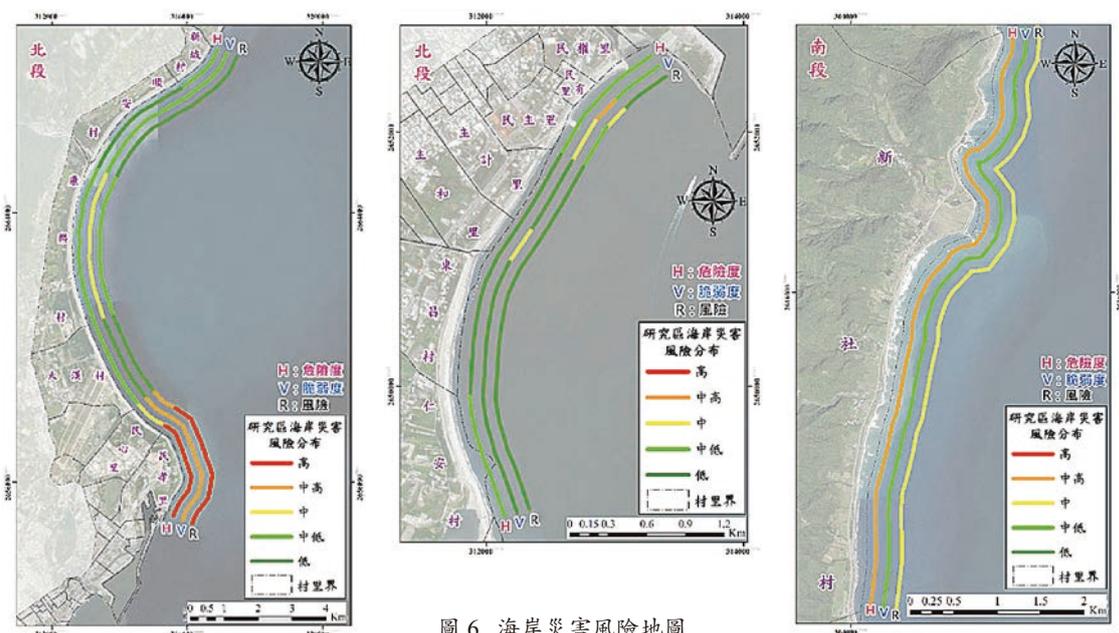


圖6 海岸災害風險地圖

土地利用以建築及公共土地使用占比最高且預警制度尚未健全，脆弱程度屬中高級；民有里則因人口密度較高且土地利用型態以建築及公共為主，脆弱程度亦屬中高級。其次，康樂村雖人口密度與土地利用均屬低脆弱度，但因其預警制度較為不足，整體脆弱程度屬中級；民主里、主和里土地利用型態分別以遊憩、交通及建築、公共為主，但人口密度相較於民有里低，整體脆弱程度屬中級。其餘村里脆弱度則為中低級以下。

3. 風險等級：經由危險度以及脆弱度風險評估成果，研究區各村里之海岸災害風險程度介於低級至高級分布，並以低風險岸段為多。其中，民孝里因位處海洋營力強之岬頭處，具高潛勢之海岸侵蝕且堤前消波緩衝帶不足、沿岸防護設施分布零星，加上土地利用型態及預警制度脆弱程度較高，導致整體海岸災害風險達高等級；其次，民心里因近岸入射波高較高、沿岸以消波工占比最高且堤前並無其他防護設施分布，加上土地利用型態及預警制度脆弱程度較高，整體災害風險呈中高級。

而中級風險岸段包括民有里及新社村，其中民有里海岸災害潛勢雖屬中低級，但其人口密度較高且土地利用型態以建築及公共為主，可知本岸段風險受脆弱度所主導；新社村人文社經受海岸災害影響的損傷程度較低，但其自然海岸占比高且具中潛勢之海岸侵蝕、波浪條件及消波緩衝帶寬度亦屬中危險程度，可知本岸段受危險度所主導。

此外，康樂村、民主里、主和里雖脆弱程度達中級，但其危險程度屬低級至中級，在綜合考量危險度及脆弱度下，整體風險介於低級至中低級。其餘村里之風險等級則為低級。

問題與討論

在災害應變時，為能更迅速且有效率展開應變行動，對於民眾生命財產更有保障，政府單位就防救災計畫及避難路線、場所為以臺灣最小行政層級「村里」進行規劃。而為使風險評估結果於實際應用上能有所鏈接，本文以村里為尺度進行分析。但根據海岸災害潛勢分析結果，研究區海岸災害潛勢以海岸侵蝕為主，其影響範圍僅侷限於臨海地區，並未延伸至內陸區域，如以村里為尺度進行分析，可能會高估或低估該村里人文社經之脆弱程度。因此，以下就大漢村、民心里及民孝里土地利用脆弱度因子之空間解析尺度為例進行探討，以

瞭解不同空間尺度分析之差異及適宜性。

由於釐清臨海地區之土地利用現況，除有利瞭解社會經濟等層面致災脆弱程度外，未來在土地利用管制、後撤線規劃等，皆可作為管制強度、劃設距離等參考。因此本文就海岸侵蝕災害防治蒐集彙整相關文獻，得知目前各國常以侵蝕速率 30 ~ 50 倍距離，作為臨海地區防護管理應用參考。而就研究區高灘線變化潛勢分析結果，侵蝕最嚴重岸段之平均變化速率約 -10m/year，本文以此為基準將村里空間解析尺度調整為自高灘線向陸側延伸 500 公尺（50 倍距離）進行分析，如圖 7 藍色虛線所示，以探討兩者解析尺度之差異性。

由圖 7 顯示，以村里尺度，大漢村以公共使用土地為主，民心里、民孝里則以建築使用土地為主；而以臨海 500 公尺範圍內，大漢村仍以公共利用土地占比最高，民心里以森林利用土地占比最高，民孝里則以水利利用土地占比最高。然就本文土地利用脆弱度風險分級標準來看，於村里尺度下，大漢村、民心里及民孝里均屬高土地利用脆弱等級；於高灘線後 500 公尺範圍內，大漢村屬高脆弱等級，民心里及民孝里則屬低脆弱等級。

接下來，就臨海 500 公尺內之土地利用脆弱因子分析結果，重新進行風險評量，以得出其脆弱度及風險等級，並將其與原先分析結果進行比較。其中，綜合考量人口密度、土地使用及預警制度之脆弱度，大漢村維持低級脆弱度，民心里、民孝里則由中高脆弱降至中級脆弱；而整體風險變化，大漢村仍屬低級風險，民心里則由中高風險降至中風險，民孝里則因海岸災害潛勢較高，風險程度仍屬中高級。

然而，就風險管理角度而言，中高以上之脆弱及風險程度，應採取高強度之土地利用管制、防救災資源投入及軟硬體設施改善。以村里尺度來看，民心里及民孝里均應採取高強度之管理策略，但就海岸侵蝕影響範圍之實際土地利用現況多以森林土地為主，並無重要防護標的。因此僅需維持其土地低密度使用，將防救災資源分配至災害實際影響脆弱較高之岸段，其與高灘線 500 公尺解析尺度之分析結果較為相符。綜上，本文建議未來在執行海岸風險評估研究，應視當地海岸災害特性予以調整其分析空間尺度，以切合海岸災害實際影響範圍之脆弱程度。

如臺灣西南部沿海地區因本身地勢低窪平坦，加上養殖業及農業大量超抽地下水造成地層下陷，以及

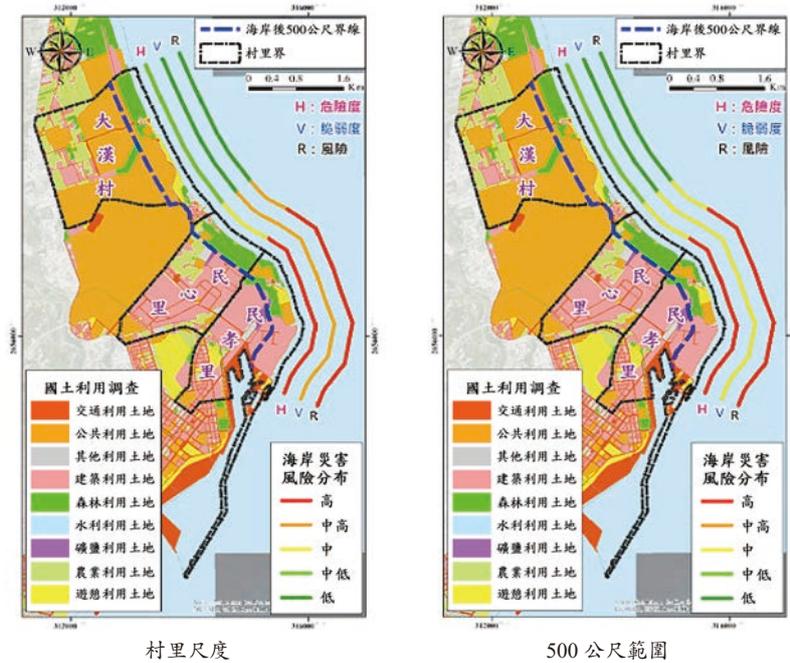


圖 7 不同尺度之海岸災害風險比對圖

近年沿岸工業區開發導致海岸侵蝕，使其所面臨之海岸災害為以海岸侵蝕、暴潮溢淹及地層下陷交互影響之複合型災害，其中暴潮溢淹災害影響範圍會擴及至內陸低窪地區，加上地層下陷會使溢淹範圍擴大，因此就臺灣西南部海岸災害風險評估研究，建議以村里為尺度進行分析。而臺灣東部海岸所面臨之法定災害為單一海岸侵蝕災害，且颱風波浪越波致災範圍有限，因此建議風險評估時應視當地海岸侵蝕潛勢可能影響範圍為尺度進行分析，以精準判定災害對人文社經及應變能力之脆弱程度，並供後續在研擬適宜之治理辦法及管理措施時，於有限資源下，可因地制宜合理分配資源投入之順序及管理強度。

結論

研究區岸段主要受海岸侵蝕潛勢影響，其中具侵蝕潛勢之岸段共有 4 處，由北往南分別為立霧溪口南側、奇萊鼻、花蓮溪口北側以及新社村全段，其中以奇萊鼻及新社村之侵蝕情勢最為嚴重。

危險度代表影響因子為波浪條件、岸線變化、堤前設施、消波緩衝帶寬度、建造物本體現況、建造物型式及歷史災害事件，共 7 項；脆弱度代表影響因子則為人口密度、土地利用及預警制度，共 3 項所組成。

危險度代表影響因子由岸線變化及消波緩衝帶寬度所主導，其次依序為波浪條件、堤前設施、建造物

本體現況、建造物型式及歷史災害事件；脆弱度代表影響因子則以預警制度為主導因子，其次分別為人口密度及土地利用。

研究區各村里岸段整體風險介於低級至高級分布，並以低風險岸段最多，其中以民孝里（高風險）風險等級最高，其次為民心里（中高風險），再者為民有里及新社村（中風險），而其餘村里岸段之風險等級為中級以下。

參考文獻

1. 內政部 (2015), 海岸管理法。
2. 中央氣象局 (2002~2021), 中央氣象局觀測資料年報。
3. 經濟部水利署 (2002~2021), 近海水文年報。
4. 經濟部水利署 (2019), 海岸防護整合規劃及海岸防護計畫擬定作業參考手冊。
5. Birkemeier, W.A., (1985), "Field data on seaward limit of profile change", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 111, 3, pp. 598-602.
6. 經濟部水利署 (2021), 臺灣地區民國 110 年地層下陷檢測概況圖。
7. UNDR0, (1979), Natural disasters and vulnerability analysis: report of Expert Group Meeting. Geneva, UNDR0 books.
8. 經濟部水利署 (2020), 一般性海堤之風險評估計畫書 (參考本)。
9. Murray, Thomas J., Pipino, Leo L., and van Gigch, John P., (1985), "A Pilot Study of Fuzzy Set Modification of Delphi", Human Systems Management, Vol. 5, No. 1, pp. 76-80.
10. 內政部 (2017), 整體海岸管理計畫。
11. 江宜錦 (2007), 天然災害統計指標建構與分析—以台灣各縣市為例。
12. Saaty, T. L., (1980), "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, New York.



海岸裂流觀測之研究

王敘民／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士候選人

董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

蔡政翰／國立台灣海洋大學海洋環境資訊學系 教授

林芳如／交通部中央氣象局海象測報中心 課長

裂流 (rip current) 是在近岸碎波帶一股向外海而去的海流，對從事海洋活動民眾具威脅性。過去裂流記錄非常稀少，因此發生的機制或海氣象條件至今仍未完全被掌握。為能夠蒐集更加完善的裂流案例，本研究彙整國內外有關於裂流觀測的技術，根據觀測方法和儀器可分類為五種：(1) 質點追蹤法、(2) 直接測量法、(3) 拉格朗日測量法、(4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法。本研究採用裂流影像特徵法，從碎波帶的斷裂處判釋有無裂流存在，該方法識別的正確率達 82%，顯示此分析方法可正確地從影像中分析得到裂流案例。同時亦應用於衛星影像與外澳監視站影像之分析，歸納後發現多數案例發生在 46 處海灘，裂流出現的持續時間從最短 1 小時至最長 10 小時。本文彙整現今可用於裂流觀測的方式，以及所建立的裂流影像判釋模式，可供後人進行裂流觀測上使用，蒐集大量的裂流案例，為裂流後續相關研究甚至是建置預警系統奠定基礎。

關鍵詞：裂流、光學影像、衛星影像

前言

裂流 (rip current) 也稱為離岸流，是一種發生於海岸邊，向外海移動的強勁水流，加上海流無法直接以肉眼觀測，因此遊客往往會無意間的快速被帶離海岸，造成意外事件的發生。近年來台灣海域遊憩活動逐漸發展，民眾開始親近海洋，但也伴隨意外事件的發生，根據美國國家海洋大氣局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 統計，裂流是造成全球海岸邊意外事件最多的原因，在美國平均每年約有 100 人因裂流而溺亡。台灣亦是受裂流危害嚴重的國家，近年來裂流引起溺斃的事件頻傳，根據過往文獻紀錄台灣迄今至少發生數十起的意外事件，累計造成傷亡人數甚至達數百人之多。然而裂流發生機制複雜，至今尚未被完全掌握，因此為能正確地預測發生時間或發生地點，避免意外事件的發生，相關研究仍持續進行。

若要掌握裂流發生的機制，需要基於大量案例的分析，過去有許多研究會採用報章媒體所記錄的裂流案例進行分析^[1,2]，但這些紀錄本身具有一定程度的不確

定性，當下亦沒有現場測量結果可供研究上進行檢核，且當裂流發生時沒有意外事件發生，則不會有所紀錄。Shepard *et al.*^[3] 以海面的懸浮物和浪花漂移的軌跡觀測裂流 (如圖 1)；Huntley *et al.*^[4] 則是佈放染料用以標記海水流動的情形。直接測量海流流速的儀器也能進行裂流的觀測，如聲學都卜勒流速剖面儀 (Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)、聲學都卜勒流速儀 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV) 或是 GPS 漂流儀^[3,5,6] 等。但由於無法確認裂流何時、何地會出現，加上裂流的位置發生在海岸與陸地交界的碎波帶範圍，使得該些方法或儀器無法進行長期測量，研究上往往僅能對特定案例進行探討。而在海洋相關研究常會使用光學影像並透過影像處理技術來進行觀測與分析海域中的各種問題，裂流觀測亦可透過影像進行觀測，不僅可以長時間對同一區域進行觀測，若使用衛星影像則可同時蒐集到多個海岸裂流發生的情形^[7-9]。

本研究旨在於彙整過去文獻中提及可用於觀測裂流的方法，並建立一套自動化裂流影像判釋模式，同時應用



(a) 台南漁光島裂流案例



(b) 宜蘭外澳裂流案例

圖 1 裂流示意圖

於衛星和監視站影像之分析，探討裂流發生時的特徵和時空間分布。未來若能有效的應用上述裂流觀測的技術與方法，便能大量蒐集裂流案例，不僅能提供後續裂流相關研究，亦能作為建置預警系統和數值模式驗證之資料。

裂流現場觀測方法

本研究蒐集近二十年國內外曾用於裂流觀測的技術，根據所使用的儀器和方法，將裂流觀測的方法歸納為五類，分別為透過佈放染劑或觀測懸浮物的 (1) 粒子追蹤法、使用儀器測量海流流速的 (2) 直接測量法和 (3) 拉格朗日測量法，以及從光學影像中擷取海面特徵的 (4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法^[3,5,10,11]，該些方式都是目前裂流觀測常見的方式，以下將進行詳述。

粒子追蹤法

對於裂流的觀測，最早可追溯至西元 1941 年，Shepard *et al.*^[3] 發現裂流可將底床的沙粒或是海面的浪花從岸邊快速的帶往外海。爾後，許多學者以此概念作為

基礎，透過海面上質點移動的軌跡，蒐集裂流案例，統計裂流發生時的寬度、長度和延時等，甚至利用顆粒追蹤速度法 (Particle Tracking Velocity, PTV)，直接計算裂流範圍內的流速。Shepard and Inman^[12] 以釣魚線綁住漂浮物，觀測其移動的路徑，發現裂流會出現於波浪的匯聚點。考量並非海面上均會出現漂浮物或沙粒，Huntley *et al.*^[4] 和 MacMahan *et al.*^[13] 則是佈放染劑來標記海水移動的情形，進而觀測裂流現象，如圖 2 (右：黃色部分為染劑)，並透過波浪模式計算的近岸波浪場，發現裂流的發生與案例發生前後入射波高的變化有相關。

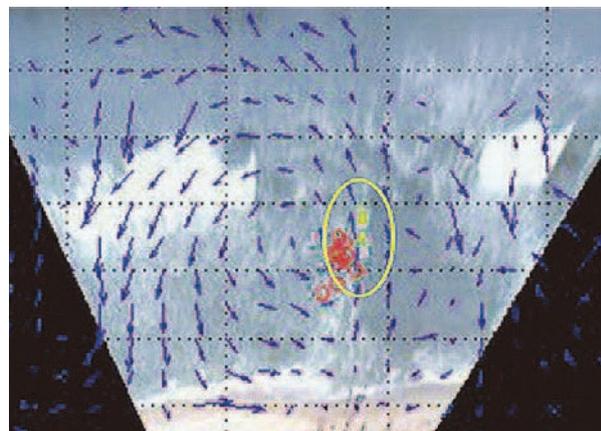
儀器直接量測

直接測量法

隨著科技的進步，可直接測量海流流速的儀器逐漸問世，如透過電位差計算流速的電磁流量計 (electromagnetic flow meter, EM) 或是根據都卜勒效應獲得垂直剖面流速的 ADCP 和 ADV 均是可以直接計算流速。然而裂流具有空間變異性，需要多點量測得以量



(a) 從浪花中發現裂流 (Shepard *et al.*^[3])



(b) 透過染劑觀測裂流 (MacMahan *et al.*^[13])

圖 2 透過海面特徵進行裂流觀測

測，方能從近岸流場的分布情形觀測裂流。Bowman *et al.* [14] 以陣列是擺放 14 個電磁流量計測量以色列 Herzliya 海灘的海流流速，發現影響裂流發生的因素不僅與入射波有顯著關係，次諧波 (subharmonic edge waves) 和亞重力波 (infragravity) 所造成的震盪亦有相關。此外，透過該些儀器不僅可以觀測裂流，亦可同時計算出當下的流速和流向，Bruneau *et al.* [15] 利用多個 ADCP 和 ADV 對法國的阿基坦海岸進行觀測，發現在波高小於 1.0 m 時，裂流流速不超過 0.8 m/s，而波高為 2.5 ~ 3.0 m 時，在整個潮汐週期均可觀測到裂流現象。

拉格朗日測量法

現今全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 在越來越小的同時還更加精確，也有許多的儀器開始搭載 GPS 定位系統，透過本身可以記錄絕對位置 (經緯度座標) 的優點，提供不同時間點下空間分布的訊息。近岸環流的觀測亦可使用類似的技術，利用儀器記錄空間資訊，藉由拉格朗日測流法 (Lagrange method) 分析漂流物的時空分布，根據物體移動之距離與時間的倒數，計算海流的流速和流向。使用拉格朗日測量法的海洋觀測儀器常見的有 GPS 漂流儀或 GPS 浮標，相較單點式流速儀，由於本身會隨著海流移動，故可以在僅有一台儀器的情況下，判釋是否有裂流發生 [16-18]。Song and Bae [19] 在裂流發生時透過 GPS 漂流浮標進行量測 (如圖 3)，並結合 GPS 浮標本身所測量多種波浪參數，調查裂流發生時周圍的海氣象環境，作為協助後續改善經驗預警系統的參考；Austin *et al.* [20] 使用多個 GPS 漂流儀進行裂流的觀測，發現裂流在低潮時流速會達到最高，而在高潮和中潮時，近岸海流的流向則是由沿岸流所主導。

影像遙測法

上述直接量測流速的儀器，在觀測裂流的同時也能測量多種海氣象參數，對於後續裂流研究係屬相當便利。相對於直接測量，遙測技術也常被用來進行海



圖 3 海雲台海灘測量裂流之 GPS 浮標 [19]

洋觀測，有學者提出可以透過雷達 (radar) 或光學 (optical) 影像從事長時間和大範圍的裂流觀測，在方法上可從影像中擷取海面裂流的特徵，或透過反算海面的流速和流向，以下將針對該兩方法進行說明。

影像流場反算法

近岸環流的變化也可以從雷達或光學影像中計算出來，前者是以雷達波取得海表面的粗糙度，再透過傅立葉轉換 (Fourier transform) 或是小波轉換 (Wavelet transform) 擷取影像中海表面的訊息，並利用調制轉換函數 (Modulation Transfer Function, MTF) 以及分散方程式 (dispersion relation function) 求解波場和流場。Frasier *et al.* [21] 透過雷達微波測量碎波帶間的流速變化，結果與 ADV 觀測結果相當一致。Punzo [22] 透過 X-band 雷達進行近岸環流的觀測 (如圖 4)，發現在礁石海岸或防波堤附近會有裂流的發生，且流速快慢與屏障前後水面高低落差呈正相關。此外，亦有學者提出透過監視站光學影像反算流場的方法，Chickadel *et al.* [23] 提出光學流速測量法 (optical current meter, OCM)，透過時頻分析方法擷取影像中周波數的頻譜後，與觀測得到的實際譜型進行擬合估計海面流場。Cohen [24] 透過 OCM 法進行裂流的觀測 (如圖 5)，發現雖然 OCM 法與單點流速儀量測流速量質並不相同，但趨勢是一致的，因此認為 OCM 法可以透過流速梯度變化來進行裂流觀測，當流速梯度值超過一定閾值，則觀測範圍內高機率是有裂流發生。

裂流影像特徵法

海流不像波浪變化或潮汐漲退可由目視辨別，但當海岸邊有裂流的出現，海面上就會出現與平時不一樣的特徵，因此裂流的觀測可以透過影像中海面特徵的變化來進行觀測。最早在 Shepard *et al.* [3] 就有提到當裂流發生時，海面上的碎浪帶會有明顯的斷裂處，但該現象也有可能是沿岸的強風或是突如其來的大浪所造成的，因

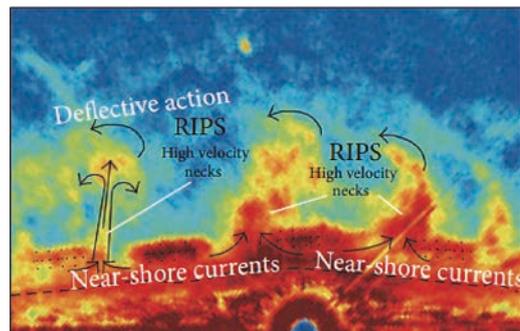


圖 4 雷達觀測裂流結果圖 [22]



圖 5 影像反算流場範圍 [24]

此為解決上述的不確定性，有學者提出，將數十分鐘甚至數小時的影像進行平均，若平均影像內碎波帶仍有明顯的不連續現象，便可確認該位置有裂流的發生 [15,25]。Holman *et al.* [26] 透過將長期岸邊攝影機的影像資料進行平均，結果顯示在 Embayed 海灘發現 5271 個裂流渠道（如圖 6），甚至在四年的觀測期間有 782 天有裂流發生。韓國氣象局為能減少裂流意外事件的發生，於海雲台海灘架設光學攝影機，並透過擷取影像中裂流的特徵，進行即時監測，一但有裂流出現，便立即警告民眾 [19]。

此外，近年來隨著人工智慧（Artificial intelligence, AI）的發展，只要所觀測的目標可從影像中擷取特徵，便可以透過 AI 技術進行判釋。而上述提及裂流在發生時，海面上有明顯的特徵變化，因此是可以透過人工智慧的方法進行判釋，Akila *et al.* [9] 以卷積神經網路（Convolutional Neural Networks, CNN），並結合影像平均和影像聚合的方法，建立自動化判釋裂流判釋模式。

研究資料與分析技術

分析方法

裂流影像判釋原則

本研究參考前人所提出的海面裂流影像特徵法作為基礎，並從裂流發生的機制以及發生時的海面特徵，提出從衛星影像和監視站影像中判釋裂流的準則，藉此增加裂流案例分析結果的可信度。

根據 Longuet-Higgins and Stewart [27] 的研究成果，裂流的發生與近岸波流交互作用有顯著相關，在沒有裂流的情況，波浪入射至近岸後，波浪應會破碎導致能量的消散，然而當裂流發生時，波浪匯聚後會導致水位的抬升，此時水體為抵抗輻射應力所引致的外力，進而產生向外海移動的水流，此時能量已被抵消便不會有波浪破碎的現象，故透過近岸區域碎波帶斷裂情形便可以進



圖 6 透過裂流影像特徵觀測之裂流案例 [26]

行裂流的觀測，且該現象已於過去許多文獻均有被提及且應用 [3,28]；此外，過去文獻亦會透過海面上有明顯懸浮物（如漂砂、漂流木等）移動的軌跡進而判定當下海流的流向 [7,29]，倘若影像中該些物質有向外海延伸的趨勢，便可視為影像中有裂流的發生（如圖 7）。

然而並非出現以上的情形就必定有裂流，由於波浪傳遞是具有週期性的變化，因此透過影像在進行判釋的時候，不同位置上波浪破碎會有先後的差異，使碎波帶呈現斷裂的情形；或近岸風速較大時，會使得海面上碎浪浪花被吹散，亦會呈現碎波帶不連續的現象。考量波浪的週期和陣風發生的時間較短，與裂流持續時間長達數十分鐘至數小時有明顯的區別 [8]，故本研究將參考前人的方法，對時序列影像進行平均，若平均後的影像中仍出現碎波帶不連續的情形，便可確認有裂流的發生 [25,26]。

而衛星影像為某時刻的單張影像，雖無法對影像進行平均，但可以從裂流發生時的空間分布進行確認，透過裂流與裂流彼此間間隔大小確認碎波帶斷裂是否為裂流所導致的，本研究彙整前人文獻的研究



圖 7 判釋裂流發生之主要條件（向外海延伸的浪花）

成果發現裂流彼此間隔不小於 40 m^[30-32]，並將此條件作為裂流影像判釋的準則之一。

裂流發生的機制除有合適的海氣象環境，水深地形亦是一個重要的因素，Wright and Short^[33] 透過現場觀測與實驗對海灘類型進行分類，並且認為中間過渡型的海灘（即非完全消散型或反射型海灘）是較容易產生裂流的。由於海灘的地形與地貌倘若沒有遭遇颱風或暴潮等劇烈的天氣現象是不易改變的，加上產生裂流的海氣象條件並不是非常的嚴苛的極端海況^[1,34]，故在同一個位置上裂流應有復發之現象。綜上所述，為提高裂流影像判釋結果的可信度，本研究參考前人的研究成果，並根據裂流發生的機制和發生時的特徵，提出以下四點作為從光學影像中判釋裂流的準則：

1. 碎波帶需有明顯的斷裂處、未斷裂但有向外海延伸之浪花或懸浮物
2. 碎波帶斷裂情形需須達 10 分鐘以上
3. 若在同時出現兩處以上的碎波帶斷裂，間隔須超過 40 公尺
4. 某處裂流之發生應會重複出現

裂流影像分析技術

前文已詳述從影像中判釋裂流的四個準則，然現有衛星與攝影機所拍攝的影像資料量過於龐大，為此本研究建立一套裂流影像判釋方法，將影像資料進行數位化處理，量化為可用的資訊。該模式是透過「小波邊緣偵測 (Wavelet Edge Detector)」和「影像卷積 (Image convolution)」作為核心概念，搭配影像灰階、影像平均和影像擴增等多種影像處理技術，根據裂流判釋的主要條件，概略挑選影像中有裂流的位置，再以準則二至準則四檢核該處是否真為裂流所發生的位置，其詳細的分析過程如下。

裂流的發生主要位於近岸碎波帶的區域，為強化沙灘與碎波帶間的差異，本研究透過小波邊緣偵測對影像進行強化，由於該方法係屬一種帶通 (bandpass) 濾波器，不僅可偵測碎浪邊緣的位置，亦可進行濾波去除影像上的雜訊。而為能正確判釋裂流發生的位置，本研究建置一種左右為白色 (碎浪)，中央為黑色 (海水) 的遮罩，模擬裂流發生時碎波帶周圍環境，並將其對小波邊緣偵測後的影像進行影像卷積，計算影像與遮罩間的相似度，當相似度達 80% 以上時，本研究就會認定該區域是疑似裂流發生的區域，並且透過影像擴增 (Image Data Augmentation) 的方法，將該遮罩進行縮放、延伸、扭曲和旋轉來因應這些差異，使該模式的應用性能更加廣泛。

研究資料

本研究所使用的影像有衛星和監視站所拍攝的兩種資料，衛星影像的蒐集是由「中央大學太空及遙測中心」所提供，考慮裂流空間尺度較小，約數十公尺至百來公尺^[18]，故本計畫僅使用 SPOT6/7 和 Pléiades 的高解析度衛星資料，解析度均達到 1.5 m/pixel (如圖 1(a))，探勘的範圍為全日本島 227 處海灘 (海灘分類根據國家海洋研究院 (2021) 所調查之結果)，影像資料的時間則是從 2013 年至 2017 年，以每個海灘作為一張圖片，本研究所使用的衛星影像資料共計可達 8,000 多張。

此外，裂流的觀測可利用攝影機拍攝的序列影像進行分析，雖然不能如衛星影像進行大範圍的觀測，但可持續不間斷的進行拍攝，瞭解裂流發生的延時，甚至可詳細觀測到裂流從發生至消散的整個過程。我國中央氣象局為能進行裂流的監測，已於去 (2021) 年開始於台灣裂流潛勢發生區域建置監視站，目前已於宜蘭縣外澳海灘完成裂流監測站的建置，由於該監測站建置於外澳海域正後方約一公里處的山頭上，拍攝角度可達 30° 至 40°，且裝設三台的 FULL HD 光學攝影機 (即影像大小為 1920 × 1080)，故影像資料可良好的描述裂流特徵 (如圖 1(b))。目前本研究已蒐集該監視站從去 (2021) 年 11 月啟用至今年 5 月的影像資料，由於是光學攝影機的拍攝受限於日照，共計約 2,376 小時可作為後續裂流觀測分析使用。

裂流影像分析結果

影像判釋驗證

由前文說明的分析流程可以自動的從影像中擷取裂流發生的範圍，為瞭解該模式對於裂流影像判釋的正確率，本研究透過人工方式判釋 100 筆影像中有出現裂流，以及 100 筆影像中未有裂流出現的資料，其中衛星影像資料和監視站影像資料各占一半。驗證結果顯示在 100 筆有裂流發生的影像中，有 86 筆被成功判釋出來；反之，在 100 筆沒有裂流的影像中有 22 筆被誤判為裂流，故整體正確率達 82%。在 14 筆裂流影像判釋失敗的原因，主要受到天氣的影響，使得海灘反光，與碎浪的顏色幾乎相同，因此在碎波帶的判釋上，無法將兩者區分開來。而 22 筆平時影像被誤判有裂流發生的情形，大多是因為陸地的房屋或魚塢間隔相排，與碎波帶斷裂情形相似，因此被誤判為裂流。此外，本研究亦針對裂流判釋出的位置進行檢視，從圖 8 結果顯示，該模式所判釋出的裂流位置，均位於碎波帶明顯斷裂處。整體而



圖 8 裂流影像判釋模式辨識結果

言，當岸邊碎浪帶出現不連續的現象時，本研究所提出的裂流影像判釋方法，絕大部分皆可以成功辨別。

裂流案例分析

從 2013 年至 2017 年的衛星影像分析結果顯示，在 1,494 張的衛星影像中有 468 張影像分析得到裂流案例，進一步統計更發現多數案例集中在 46 處海灘（如圖 9），顯示這些海灘為裂流相對較易發生的區域，其中發生比例達 20% 以上的海灘包含新北市福隆海灘、中角灣海灘和沙崙海灘、宜蘭縣外澳海灘和蜜月灣海灘、台南市漁光島海灘、黃金海岸海灘和四草海灘，以及台中市大安海水浴場等著名的水域遊憩活動熱門景點。

外澳裂流監視站裂流案例分析結果顯示，在 2,376 個小時的影像中共計蒐集 76 筆裂流案例，累計時長為 186 小時，裂流發生的位置大致可分布于 9 個位置，如圖 10 中標示 R1 至 R9 的位置，且同一個海灘同時可出現多起裂流案例。根據前人研究成果，於結構物旁會因為波浪的繞射和折射，容易有裂流的發生^[18]，位於烏石漁港北側防坡堤旁 R9 的位置，本研究確實有發現裂流案例，故可提高本研究提出裂流判釋方法的可信度。由於監視站影像資料可提供時間尺度的訊息，故本研究

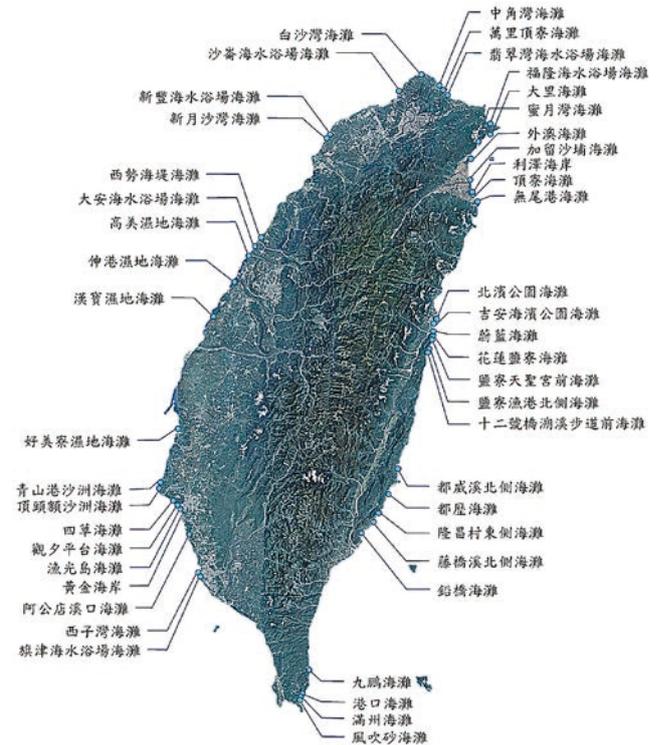


圖 9 全台灣裂流發生潛勢區域
(資料來源：1494 張衛星影像；資料時間：2013 ~ 2017 年)

統計裂流發生的延時（即裂流發生的持續時間），裂流發生的延時最短不到 1 小時，最長則可達 10 小時，例如 2021 年 12 月 15 日於 R6 位置所發生的裂流，從早上 6 時至下午 15 時均有明顯的碎波帶斷裂情形。此外，本研究透過計算碎波帶斷裂處的平均寬度，對裂流的流幅（即裂流的寬度）進行統計，結果顯示裂流的寬度介於 20 m 至 80 m 間。

結論

裂流是海岸常見的自然災害，但由於觀察的不易，裂流案例的缺乏，至今對於裂流發生的機制和條件仍尚未明瞭。為能得到更加完善的裂流案例進行裂流相關研

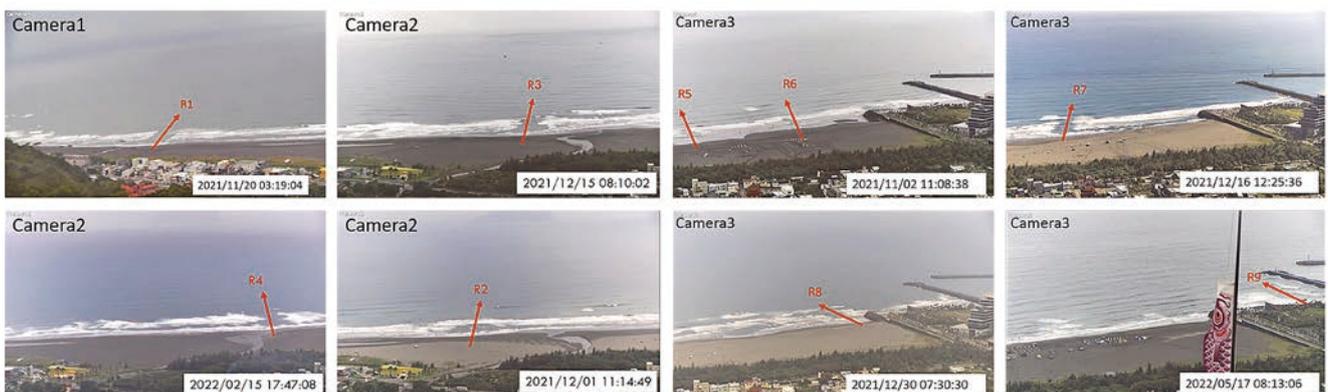


圖 10 外澳海灘裂流發生位置示意圖

究，本研究彙整過去文獻中提及可用於裂流觀測的方法，並提出一套可從光學影像中判釋裂流的方法，同時亦進一步對裂流的特徵進行分析和探討。本研究蒐集近二十年來國內外有關於裂流觀測技術的文獻，並基於觀測所使用的儀器和方法將其歸納為 5 種，分別為 (1) 質點追蹤法、(2) 直接測量法、(3) 拉格朗日測量法、(4) 影像流場反算法和 (5) 裂流影像特徵法。而本研究採用裂流影像特徵法建立了一套裂流影像判釋方法，並參考 Longust-Higgins and Stewart^[27] 所提出之裂流發生機制，以及彙整文獻中觀測到裂流發生的特徵，提出四個裂流影像判釋準則。經驗證該方法判釋的正確率達 82%，顯示此分析方法可正確地從影像中得到裂流案例，同時亦應用於台灣海岸周遭的衛星影像與岸上監視站影像，分析 2013 年至 2017 年共計約 8000 多張的衛星影像結果中取得 712 筆案例，歸納後多數案例發生在 46 處海灘，包含新北市福隆海灘、宜蘭縣外澳海灘和台南市漁光島海灘等多處熱門遊憩景點，且在大多案例中可以發現同一海域同一時間會出現多個裂流渠道。在岸上監視站影像分析上，從 2021 年 11 月至 2022 年 5 月 2376 個小時中，有 186 個小時有裂流發生，共計有 73 筆案例，並發現裂流出現的延時從最短不到 1 個小時，最常則可達到 10 小時，而裂流的寬度則介於 20 ~ 80 m 間。本研究蒐集裂流觀測相關文獻，並提出一套自動化裂流影像判釋方法，經測試可從影像中得到裂流案例。後續若能於海岸廣泛架設光學影像監測站或取得更多衛星影像資料，便可自動化蒐集大量的裂流案例，提供裂流相關研究甚至是建置預警系統的基石。

誌謝

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 (2/3)」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

- Lushine, B.J. (1991), A study of rip current drownings and related weather factors. Nation Weather Service Forecast Office, 13-19.
- Engle, J., MacMahan, J., Thieke, R.J., and Hanes, D.M. (2002), Formulation of a Rip Current Predictive Index Using Rescue Data. National Conf. on Beach Preservation Technology, FSBPA, January 23-25, Biloxi, MS.
- Shepard, F.P., Emery, K.O., and LaFond, R. 1941. Rip currents, a process of geological importance. *J. Geol.*, 49 (1941), pp. 337-369.
- Huntley, D.A., Hendry, M.D., Haines, J., and Greenidge, B. (1988), Waves and rip currents on a Caribbean pocket beach, Jamaica. *Journal of Coastal Research*, 4 (1) 69-79. Char-lottesville (Virginia) ISSN 0749-0208.
- Turner, I.L., Whyte, D., Ruessink, B.G., and Ranasinghe, R. (2007), Observations of rip spacing, persistence and mobility at a long, straight coastline. *Marine Geology*: 236, 209-221.
- Nieto-Borge, J.C. (2013), Use of X-band marine radars as a remote sensing system to survey wind-generated waves. *COASTAL PROCESSES 2013* Volume: 169.
- Brander, R.W.(1999), Field observations on the morphodynamic evolution of low wave energy rip current system. *Mar. Geol.* 157, 199-217.
- Dalrymple, R.A., MacMahan J.H., Reniers A.J.H.M., Nelko V. (2011), Rip currents. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43:551-81.
- Akila, D.S., Mori, I., Dusek, G., Davis, J., and Pang, A. (2021), Automated Rip Current Detection with Region based Convolutional Neural Networks. *Coastal Engineering* 166, 103859.
- Guza RT, and Thornton EB. (1989), Measuring surf zone dynamics: A. General measurements. In *Nearshore Sediment Transport*, ed. RJ Seymour, pp. 51-60. New York: Plenum.
- Stockdon HF, and Holman RA. (2000), Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *J. Geophys. Res.* 105:22015-33.
- Shepard FP, and Inman DL. (1950), Nearshore circulation related to bottom topography and wave refraction. *Trans. Am. Geophys. Union* 31:196-212.
- MacMahan J, Brown J, Thornton E. (2009), Low-cost handheld global positioning system for measuring surfzone currents. *J. Coast. Res.* 25:744-54.
- Bowman D, Rosen D.S, Kit E, Arad D, and Slavicz A. (1988), Flow characteristics at the rip current neck under low energy conditions. *Marine Geology*. Vol. 79, Issues 1-2, pp. 41-54.
- Bruneau N., Castelle B., Bonneton P., Pedreros R., and Almar R. (2009), Field observations of an evolving rip current on a meso-macrotidal well-developed inner bar and rip morphology. *Cont. Shelf Res.* 29:1650-62.
- Johnson D, Stocker R, Head R, Imberger J, and Pattiaratchi C. (2003), A compact, low-cost GPS drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 18:1880-84.
- Schmidt W, Woodward B, Millikan K, Guza R, Raubenheimer B, and Elgar S. (2003), A GPS-tracked surf zone drifter. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 20:1069-75.
- Gallop, S.L.; Bryan, K.R.; Pitman, S.J.; Ranasinghe, R., and Sandwell, D., 2016. Pulsations in surf zone currents on a high energy mesotidal beach in New Zealand. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 75*, 379.
- Song, D. and Bae, H.K. (2011), Observation and Forecasting of Rip Current Generation in Haeundae Beach, Korea Plan and Experiment. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 946-950.
- Austin, M.J., Scott, T., Brown, J., Brown, J., MacMahan, J., Masselink, G. and Russell, P. (2010), Temporal observations of rip current circulation on a macrotidal beach. *Continental Shelf Research* 30 (2010) 1149-1165.
- Farquharson G., Frasier B., Raubenheimer B., and Elgar S. (2005), Microwave radar cross sections and Doppler velocities measured from the surf zone. *J. Geophys. Res.* 110:C12024.
- Punzo, M., Lanciano, C., Tarallo, D., and Bianco, F. (2016), Application of X-Band Wave Radar for Coastal Dynamic Analysis: Case Test of Bagnara Calabra. *Journal of Sensors*, Volume 2016, Article ID 6236925, 9.
- Chickadel C., Holman R., and Freilich M. (2003), An optical technique for the measurement of longshore currents. *J. Geophys. Res.* 108:3364.
- Cohen A. (2005), Video-derived Observations of Longshore Current. *Coastal Engineering* 2004, pp. 1468-1479.
- Holman RA, and Stanley J. (2007), The history and technical capabilities of Argus. *Coast. Eng.* 54:477-91.
- Holman RA, Symonds G, Thornton EB, and Ranasinghe R. (2006), Rip spacing and persistence on an embayed beach. *J. Geophys. Res. C Oceans* 111:C01006.
- 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.
- Lippmann TC. and Holman RA. (1990), The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *J. Geophys. Res.* 95:11575-90.
- Short, A.D. (1985), Rip current type, spacing and persistence, Narrabeen Beach, Australia. *Mar. Geol.*, 65, pp. 47-71.
- Aagaard, T., Greenwood, B., and Nielsen, J. (1997), Mean currents and sediment transport in a rip channel. *Mar. Geol.* 140, 24-45.
- Brander, R.W. and Short, A.D. (2000), Morphodynamics of a large-scale rip current system at Muriwai Beach, New Zealand. *Mar. Geol.* 165, 27-39.
- Maryan, C.C. (2018), Detecting Rip Currents from Image. University of New Orleans.
- Wright, L.D. and A.D. Short. (1984), Morphodynamic variability of surfzone and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.
- Lascody, R.L. (1998), East central Florida rip current program. *National Weather Digest*, Volume 22, 25-30. 



人工智慧 技術在 海洋觀測 之應用

陳威成／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士生

楊文榮／國家海洋研究院海洋產業及工程研究中心 助理研究員

傅仲偉／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士

董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

廖建明／國家海洋研究院海洋產業及工程研究中心 主任

台灣海域遊憩活動興盛，但海域也面臨著自然災害和人為污染等問題。有許多研究利用海洋觀測方法，使用衛星影像和光學影像並透過影像處理技術進行觀測和分析。近年來隨著電腦硬體和人工智慧技術的發展，應用人工智慧技術來研究自然現象問題也逐漸興起。本研究論述了與人工智慧應用在海洋觀測相關的研究，包含利用人工智慧技術偵測海岸或海面上的海洋廢棄物協助解決海洋垃圾問題、以及偵測海面下的石油或天然氣管線是否洩漏以防止海域污染擴散等。這些研究都展示了人工智慧在海洋觀測領域的潛在價值。最後，本研究以人工智慧應用於裂流觀測為例，使用更快速卷積神經網路（Faster R-CNN）建立裂流判識模型，並獲得良好的判識效果，正確率可達八成。顯示人工智慧技術可以有效地應用於海洋觀測。

關鍵詞：人工智慧、海洋觀測、裂流判識

前言

台灣四面環海，近年來海域遊憩活動更是逐漸興盛，許多民眾經常趁著空閒時候前往各處海岸進行遊憩活動，但在民眾親近海的同時，海域也常伴隨著自然災害、人為汙染等問題，例如突然在岸邊出現的瘋狗浪（freak wave）將民眾打入海中、暗藏在海面下將人帶離近灘的裂流（rip current）或是人類任意傾倒垃圾導致海岸堆積海洋廢棄物等問題。因此，許多研究透過海洋觀測方法來了解海域的情況，常使用衛星影像和光學影像並透過影像處理技術來觀測與分析海域的各種問題，如 Dankert *et al.*^[1] 使用衛星雷達影像或微波雷達影像去分析海洋中的群波（wave groups），Goddijn and White^[2] 提出利用數位相機拍攝海域來估計海域水質的方法，Pugliano *et al.*^[3] 利用光學影像來觀察海岸線的變化等。

近年來因為電腦硬體與技術的增強，將人工智慧方法（Artificial Intelligence, AI）應用於自然現象問題的研究逐漸興起。人工智慧目的為讓機器或電腦等非人類的

人造物能透過各種不同的方法來擁有部分與人類相似的智慧，人類智慧的行為諸如模仿、學習、思考、判斷以及啟發等，因此人工智慧是一種理念、目的或是框架，可以囊括諸多概念與方法。在人工智慧的基礎下誕生了許多諸如資料探勘（data mining）、機器學習（machine learning）以及深度學習（deep learning）等概念及方法，這些人工智慧方法彼此相關聯，目標皆為讓機器擁有部分於人類智慧相似的能力。

與海洋領域相關的問題通常較為複雜，例如部分海洋現象尚未有明確的理論可以說明其機制，並且較常出現只能應用在特定區域，在其他區域應用需重新校正的問題。海洋的清澈度、天氣條件與地理位置等因素也容易影響海洋觀測的結果，並且海洋觀測常需耗費大量的人力與資源。因此，掌握人工智慧技術應用於海洋觀測，能讓人工智慧學習如海洋現象或海洋污染等問題的特徵，透過學習大量的海洋觀測資料，讓人工智慧能自動化且準確地觀測到相關問題，有利於後續的分析與研究。

人工智慧方法 深度學習方法

近年因電腦計算能力增強，對於利用機器學習以及深度學習的研究逐漸興起，包含能針對時序資料如股票走勢的預測、非時序資料如單張圖像的分析都能有不錯的效果。如圖 1 所示，機器學習是在已處理過的資料中透過學習已知的特徵來對新事物進行預測，機器學習在進行學習前必須給定一組包含經由人類知識萃取出特徵的資料。而深度學習基於神經網路（neural network）理論，不同於機器學習方法，深度學習捨去了需先由人類知識執行的知識萃取，而是多層結構的神經網路從大量的資料中學習特徵為何，對資料進行學習前不需透過人類知識的介入，因此，近年來在人工智慧領域中，深度學習方法相當熱門。

深度學習是機器學習分支下的一門學問，同樣是使機器或是電腦能透過經驗、試誤或模擬的方式進行學習。因此，深度學習可視為一個自適應的函數，通過結合多個簡單的概念來表達複雜的問題，深度學習透過過往的資料和經驗來學習資料中的規則或是特徵，尋找一個能從特定輸入與預期輸出找出關聯的功能函數，以回歸問題的例子來說，深度學習即是透過不斷地計算與修正函數中的參數，從資料分布中找出一個函數能夠擬合資料，進而能預測輸入新的資料時的輸出為何。深度學習旨在透過優化問題（optimization problem）來適應任何欲應用問題的函數，根據損失函數（loss function）來定義問題，例如與實際資料相差程度的均方根誤差（root mean square error），透過參數優化的技術使其適應和擬合所要解決的問題，而不同架構的深度學習目標都是為了幫助機器能有效適應問題的過程。

如圖 2 所示，機器學習方法包含隨機森林（Random Forest, RF）、支撐向量機（Support Vector Machine, SVM）以及淺層的類神經網路（Artificial Neural Network, ANN）等，而深度學習方法包含深層神經網路（Deep Neural Network, DNN）、遞迴神經網路（Recurrent Neural Network, RNN）以及卷積神經網路（Convolution Neural Network, CNN）等，遞迴神經網路處理需考慮時間屬性的時序列資料能有很好的效果，而卷積神經網路在影像處理領域有顯著的成果，主要能透過對二維的影像進行特徵擷取，從擷取的特徵中學習知識或是規律等，從而對新的資料能進行準確的辨識或

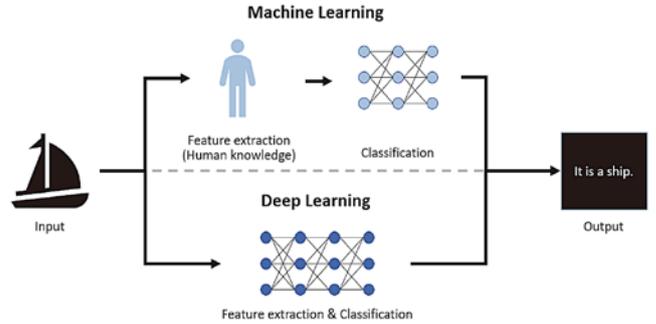


圖 1 機器學習與深度學習之差異

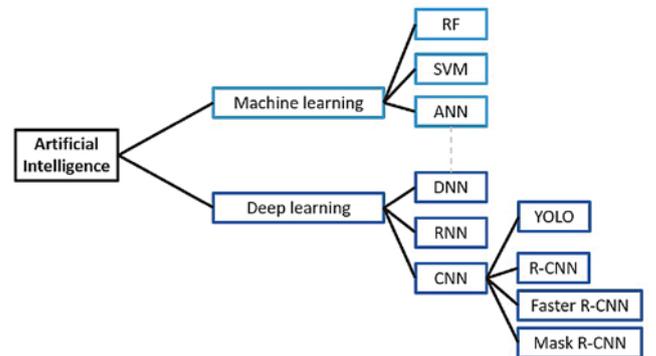


圖 2 人工智慧、機器學習與深度學習衍生之多種方法

是預測。因此，以卷積神經網路為基礎衍生了許多新的方法與架構來處理各式各樣的影像問題，如運算速度較高能快速偵測目標物的 YOLO（You Only Look Once）、針對影像中每一個區域仔細辨識的 R-CNN（Region Convolutional Neural Network）、以 R-CNN 為基礎改善辨識速度的 Faster R-CNN 以及以 Faster R-CNN 為基礎能偵測出目標物外型的 Mask R-CNN。

類神經網路

目前的深度學習方法皆以類神經網路（artificial neural network）為基礎衍生而來，類神經網路為模仿人類大腦組織及運作方式的資訊處理技術，人類大腦由密集相互連接的神經細胞所組成，每個神經細胞的構造簡單，但大量的神經細胞結合起來即能擁有可觀的計算與處理能力。神經元（neuron）為類神經網路最基本的組成單位，如圖 3 所示，神經元透過權重的連結將信號傳

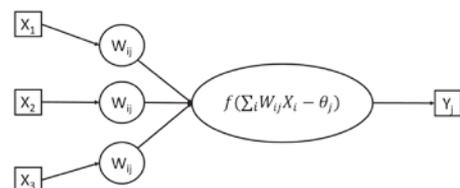


圖 3 神經元架構

送至其他神經元，輸入值 X 與權重值 W 輸入至神經元後，神經元內部即開始進行運算，運算完後的結果再經過啟動函數（activation function）轉換，計算公式如式 (1) 所示，而計算結果 Y 即為神經元之輸出值。

$$Y_j = f(\text{network}) = f\left(\sum_i W_{ij} X_i - \theta_j\right) \quad (1)$$

其中 Y_j 為類神經網路中神經元的輸出值， $f(\text{network})$ 為啟動函數， W_{ij} 為類神經網路中各神經元間的連結權重值， X_i 輸入變數， θ_j 類神經網路處理單元的門檻值。

類神經網路架構包含輸入層（input layer）、隱藏層（hidden layer）以及輸出層（output layer），若隱藏層的數目夠多且擁有大量的神經元進行運算，就會被稱為深度神經網路，如圖 4 所示，神經網路的輸入資料由輸入層輸入，傳遞至隱藏層的神經元進行運算，根據要解決的問題之複雜度，神經元的數量可以是一個或是多個，最後經由啟動函數（activation function）計算得到輸出值。而對於機制尚未明確或是較為複雜的問題，通常會使用如 S 型曲線函數（sigmoid function）和雙曲線正切函數（hyperbolic tangent function），使類神經網路具有非線性計算能力，建立複雜的函數關係。

近年來隨著硬體的計算能力和儲存空間的增加，能夠成功訓練隱藏層層數較多且神經元較多的神經網路，增加隱藏層與神經元數目來建構更為複雜的神經網路，比起淺層神經網路可以提供更準確的結果，使電腦能更進一步地模擬人腦複雜的神經系統，這種具有多層的類神經網路架構，被稱為深度神經網路（deep neural network），即為深度學習方法的基礎，透過多個隱藏層中的神經元去萃取資料中隱含的知識或是特徵，來處理較為複雜的問題。

而目前的深度學習方法皆以神經網路為基礎衍生而來，由 Rumelhart *et al.* [4] 研究出倒傳遞類神經網路（back propagation neural network）加上電腦能力日新月異，使得類神經網路開始突出於人工智慧領域，透過

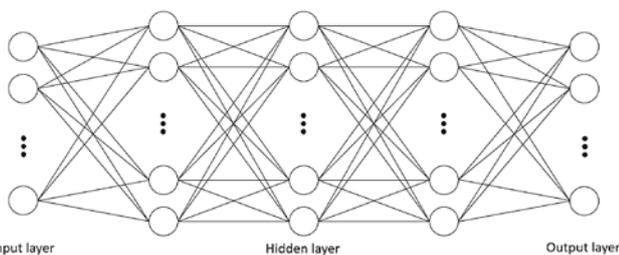


圖 4 深度神經網路架構概念圖

讓電腦學習與人腦結構相同的神經傳遞訊息的過程，從而讓電腦模擬神經傳遞訊息與反應動作的過程。倒傳遞神經網路即利用倒傳遞演算法來更新權重，透過不斷地計算與更新權重，最終得到可以適應或是擬合欲解決問題的函數。倒傳遞演算法是利用將網路中所有的權重，計算損失函數的梯度，根據梯度下降法（gradient descent）來決定如何修正網路中的權重，如圖 5 所示，梯度下降法會透過計算誤差函數的梯度，得到如何修正權重能使誤差降低的方向，訓練過程中不斷地計算梯度並修正權重，使誤差隨著訓練次數而逐漸降低，最終得到訓練效果良好的神經網路模型。

卷積神經網路

目前有許多種深度學習方法，例如深層神經網路（Deep Neural Network, DNN）、遞迴神經網路（Recurrent Neural Network, RNN）以及卷積神經網路（Convolution Neural Network, CNN），藉由能從大量資料中提取較為複雜的知識或是特徵等優勢，應用在各種領域上。深度學習方法在各種領域上的成功，使用深度學習方法應用各種問題上的研究逐漸興起，如影像分類、人類語音識別以及自然語言處理（natural language processing）等，在各項領域中皆能有顯著的成效。

卷積神經網路因其能有效地提取影像特徵並準確分析的優勢，至今仍在影像處理領域上蔚為主流。以 Le Cun *et al.* [5] 以神經網路進行手寫數字辨識技術為先驅，但當時受限於硬體設備的不足，神經網路在當時並無顯著優勢，而 Chellapilla *et al.* [6] 利用顯示卡

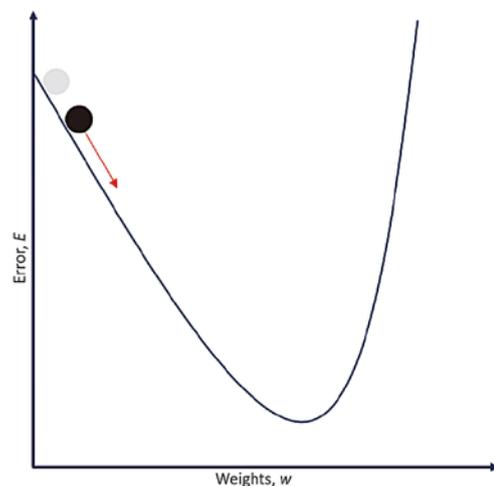


圖 5 梯度下降法概念圖

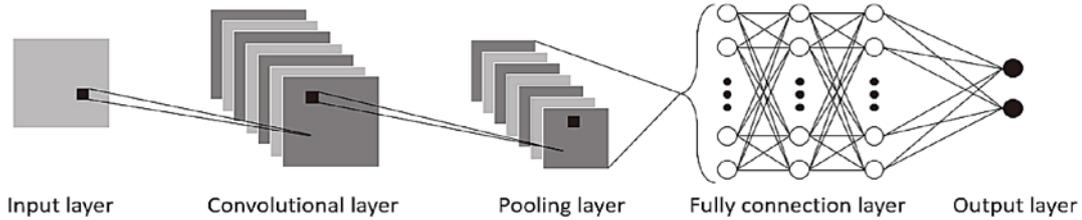


圖 6 卷積神經網路架構

(Graphics Processing Unit, GPU) 的平行運算能力，將原先的深度學習模型訓練的速度提升，也是第一個使用 GPU 進行平行運算來訓練的深度學習模型，Keizhevsky *et al.*^[7] 在 2012 年參與 ILSVRC (ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition) 競賽，利用卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 模型拿下影像分類比賽冠軍。

卷積神經網路架構與神經網路相同，可分為輸入層、隱藏層以及輸出層，輸入層與輸出層用於資料的輸入與運算結果的輸出，如圖 6 所示，卷積神經網路不同之處在於隱藏層中由卷積層 (convolutional layer)、池化層 (pooling layer)、全連接層 (fully connected layer) 所組成。如圖 7 所示，輸入資料在卷積層中通過卷積核 (convolutional kernel) 在影像上滑動進行卷積運算，尋找影像中的紋理或是邊緣等特徵，將找出的特徵結果結合成特徵圖 (feature map) 並傳入下一層中繼續尋找特徵，能保留目標的空間資訊並提取出合適的特徵。而卷積神經網路的訓練就是透過不斷地運算並調整卷積核參數以及神經元間的權重，使得輸入影像經過卷積層後能得到最有代表性的特徵。池化層目的為將卷積層輸出的特徵圖縮小，進行下採樣 (down sampling) 使得網路中的參數能減少，進而簡化網路的複雜程度以及降低運算成本，同時又能保留影像的特徵，常見的池化方式有平均池化 (average pooling) 和最大池化 (max pooling) 等，以平均池化為例，將輸入的影像分成多個子區域，計算每個子區域中的平均值，並將其作為新的特徵圖輸出至下一層中。全連接層將卷積層以及池化層提取出來的特徵整合，將原先二維的特徵圖轉換成一維的數據，並輸入至深度神經網路進行訓練，透過不斷地運算與更新權重，得出當特定的特徵圖輸入全連接層時，能正確進行影像分類或是偵測，因此在辨識新影像時，能透過影像中的空間位置與相關特性，將新影像經由多層的

運算與處理，最終判斷出新影像的特徵，進而進行影像分類與偵測。

卷積神經網路與一般的神經網路的區別在於卷積神經網路常用於影像特徵辨識 (pattern recognition)，卷積神經網路能透過卷積層可以從影像中捕捉到空間特徵 (spatial feature)，準確地判識影像中的目標和目標位置，相較於常用來處理一維數據的神經網路，一般的神經網路如欲處理二維影像資料，將二維影像的每個像素輸入網路中，會需要大量的神經元以及參數，並會失去原輸入資料的空間特性，而卷積神經網路的特點在於能處理二維數據，除了能特徵提取的同時保存資料的空間特性外，也能減少訓練模型所需要的參數，能判斷影像之特徵並分析，建構出層數多的網路，使網路有足夠多的參數可以進行訓練，具有較高的學習能力，能學習且處理較為複雜的問題。

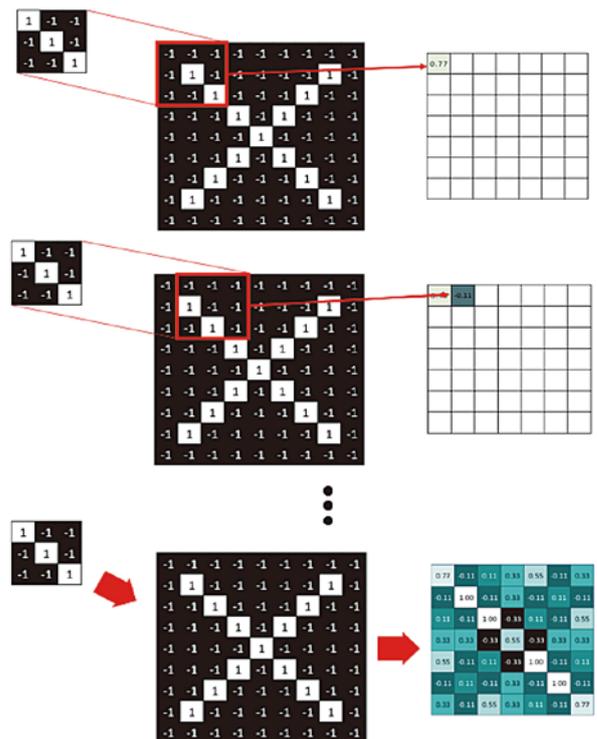


圖 7 卷積核對單張影像進行卷積並提取出特徵

導入 AI 的海洋觀測

應用 AI 於海洋觀測相關研究

人工智慧技術的演進與電腦硬體設備的增強誕生許多人工智慧方法，得利於深度學習方法在影像辨識上的發展，諸多利用深度學習方法來分析衛星或光學影像的研究逐漸興起，在海洋觀測領域上亦然。如 Dusek *et al.* [8] 探討美國國家大氣海洋局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）對於裂流的觀測與分析模式，並展示使用岸邊攝影機以及時間平均（time-averaged）影像，讓救生員與模式兩者來辨識裂流並進行比較，此研究也介紹了使用基於影像流（video flow-based）和人工智慧方法來辨識裂流，結合這些方法可以提高裂流辨識的準確性。

除了可應用在觀測海洋現象外，也可透過人工智慧技術偵測海洋廢棄物或是環境汙染來解決海洋汙染問題。如 Fallati *et al.* [9] 指出人為海洋垃圾（anthropogenic marine debris）為海洋環境首要問題，其中以塑膠垃圾占所有人為海洋垃圾八成以上，此研究利用商用無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）搭配 RGB 高解析度攝影機空拍海岸影像，並且基於深度學習方法，偵測與分類出所有分散在海岸上的人為海洋垃圾，結果顯示透過此類方法能有效辨識海岸人為海洋垃圾。Chang *et al.* [10] 利用卷積神經網路以及遷移學習（transfer learning）的方法對濟州島的海灘圖像進行分類訓練，遷移學習能將已訓練好的模型轉移至新的模式，將某種問題已被訓練好的結果套用在另一個問題上，使用更少的運算成本來訓練。此研究以此種方法來訓練模型，學習對海灘影像是否乾淨或是遭受汙染的判斷，結果顯示此種演算法可以有效在光學監視影像中擔任海灘是否乾淨的偵測模式，幫助當地政府減少海灘垃圾的政策。De Laurentiis *et al.* [11] 指出使用合成孔径雷達影像（synthetic aperture radar imagery）辨識海洋浮油的研究中，面臨最大的挑戰之一是如何在海面存在多種光線散射機制下，準確辨識出漏油事件，此研究使用無人飛行器的數據，並且利用卷積神經網路提取非線性特徵的能力以及深度學習網路學習判斷漏油的能力來建置辨識海上漏油模型，研究結果顯示此種人工智慧技術能有效地判斷漏油事件。

而人工智慧技術不只能應用在海面上的觀測，也

可應用於海面下的觀測，如 Hu *et al.* [12] 指出海底石油和天然氣運輸管道若發生氣體洩漏可能導致海洋環境被嚴重破壞，甚至可能引起火災與爆炸。因此，此研究透過使用自主水下載具 - 機器魚（autonomous underwater vehicles-robotic fish）來偵測水下氣體洩漏事件，該機器魚除了裝備高解析度廣角攝影鏡頭拍攝水下畫面外，也裝載深度學習方法辨識模型，來辨識水下氣體洩漏事件的發生。透過不同尺度的水下物理實驗產生水下氣體洩漏資料集，提供給深度學習辨識模型進行訓練，此研究顯示結合深度學習與自主水下載具即時偵測水下氣體洩漏的可行性。

以上研究展示使用人工智慧技術可應用在各種海洋觀測的相關問題，包含海洋現象的判識、海洋廢棄物辨識、水下汙染偵測和船舶漏油追蹤等，顯示人工智慧技術在海洋觀測上的可行性與潛在價值。

透過 AI 觀測海洋裂流

海洋裂流是指在碎波帶（surf zone）內發生並具有時間短、尺度小且流速強等特點的海流。通常會發生在波浪與波浪之間或是波浪與地形交互作用導致波浪碎波後，引起以垂直海岸線方向離開碎波帶之海流。由於裂流的危險性相當高，許多學者致力於研究裂流的發生原因。根據現有的研究，裂流的出現、範圍以及強度主要取決於海氣象參數、潮汐特徵、海灘型態以及海底地形等因素。世界各國每年仍有許多人因為裂流而罹難，根據台灣交通部中央氣象局 [13] 統計國內近十年共計有 27 筆因為裂流所導致的意外事件發生，其中傷亡人數高達 118 人，並且實際上有發生裂流之事件會比僅統計傷亡事件的數據高出不少。因此，若能夠即時觀測到遊憩海域上裂流的出現，並盡早向民眾發出預警，請民眾遠離裂流發生之區域，進而減少傷亡事件的發生。

至今已有不少裂流觀測與機制探討的研究，Brander [14] 在澳洲的海灘進行現場實驗，透過近岸調查、佈放染料、航空測拍照片以及壓力計等方式來觀測與分析裂流，Dalrymple *et al.* [15] 透過現場觀測、實驗模擬與數值模式等方式分析，發現裂流會以不同的形態發生。除了可以使用影像處理技術來分析裂流的光學影像或航拍照片外，人工智慧中深度學習方法之卷積神經網路能透過卷積層擷取影像的特徵，為現今建置物件判識深度學習模型的常見方法，由 Grishick *et al.* [16] 提出的區域卷積

神經網路 (R-CNN) 奠定更有效且準確地進行物體識別的基礎，後續同樣由 Grishick *et al.* [17] 提出的快速區域卷積神經網路 (Fast R-CNN) 以及 Ren *et al.* [18] 提出的更快速區域卷積神經網路 (Faster R-CNN) 皆是以區域卷積神經網路 (R-CNN) 為基礎衍生而來。

因此，本研究利用深度學習方法中的更快速區域卷積神經網路 (Faster R-CNN) 建立裂流觀測模式，從 Google Map 與 de Silva *et al.* [19] 的研究共蒐集 320 張衛星影像，其中有 220 張為裂流影像，100 張則為無裂流之影像，藉由裂流影像建立資料庫並訓練深度學習模式，並進行模式超參數之率定，找到訓練效果最佳之裂流觀測模式。

Grishick *et al.* [16] 提出的區域卷積神經網路奠定準確辨識物件的基礎，如圖 8 所示，透過選擇演算法 (selective search) 的方法將影像切割成數個子區域，藉由子區域中影像的物體顏色、尺寸與紋理等關係合併成相似性較高的區域，找出具體有目標物的位置，因此選取了一定數量的候選區域 (region proposal)，再將每個候選區域輸入進卷積層中進行卷積運算，最後將卷積後提取出的特徵輸入支撐向量機 (support vector machine)，支撐向量機是一種善於處理分類問題的機器學習方法，支撐向量機會根據提取出的特徵對目標物進行分類並以邊界框 (bounding box) 表示其位置。區域卷積神經網路方法相較過往物件偵測之演算法，能大幅提升對物件辨識能力，並能解決傳統物體偵測方法須對影像中所有像素進行辨識，導致運算成本過高的問題。

然而區域卷積神經網路在訓練過程中，每一個候選區域均須經過卷積層進行特徵的提取，且卷積神經網路要求輸入的特徵圖尺寸必須為相同大小，區域卷積神經網路須對大小不同的候選區域進行裁減與縮放成相同大小後再進行卷積，因此運算過程較為緩慢且耗時，也容易導致影像的資訊失真或是形變，同時保存了許多卷積後提取出的特徵圖導致對於硬碟之儲存空間需求龐大。

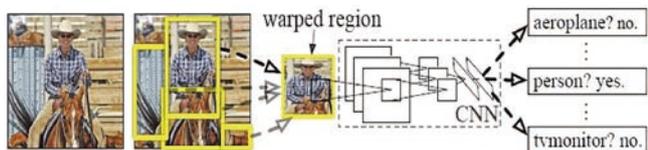


圖 8 R-CNN 架構圖 [16]

Grishick *et al.* [17] 以區域卷積神經網路為基礎，加入了 RoI 池化層 (region of interest pooling layer)，RoI 池化層先確定要輸出的影像大小為 $M \times N$ ，將輸入特徵圖的長與寬之像素分成 M 和 N 等份，每一份取最大值結合成 $M \times N$ 的影像，即能輸出固定尺寸的特徵圖。因此，如圖 9 所示，快速區域卷積網路透過選擇演算法產生候選區域，並投影到輸入影像經過卷積後的特徵圖上，利用 RoI 池化層進行特徵的篩選並輸出新的特徵圖，連結全連接層找出目標物的分類與邊界框。快速區域卷積神經網路將整張影像輸入卷積層中，而非將各個候選區域進行卷積，並且將輸出分類與邊界框的任務一併結合在全連接層中的網路訓練，而非另外使用支撐向量機訓練，因此減少許多運算成本與儲存空間。

Ren *et al.* [18] 認為原先的快速區域卷積神經網路中選擇演算法所需耗費的時間依舊較長，因此提出以快速區域卷積神經網路為基礎，加入區域提取網路 (region proposal network, RPN) 取代原先的選擇演算法來提取候選區域，如圖 10 所示。因此，候選區域的提取、影像特徵的提取以及目標物分類與邊界框均由同一個深度學習網路架構來進行分析，減少運算時間與儲存空間。區域提取網路為一全卷積神經網路 (fully convolutional

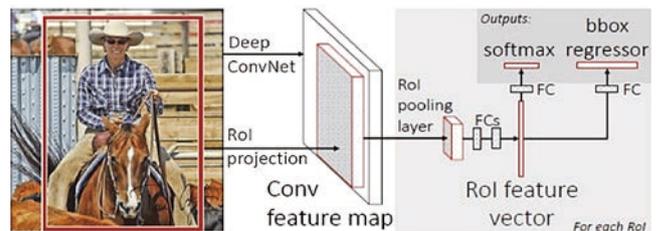


圖 9 Fast R-CNN 架構圖 [17]

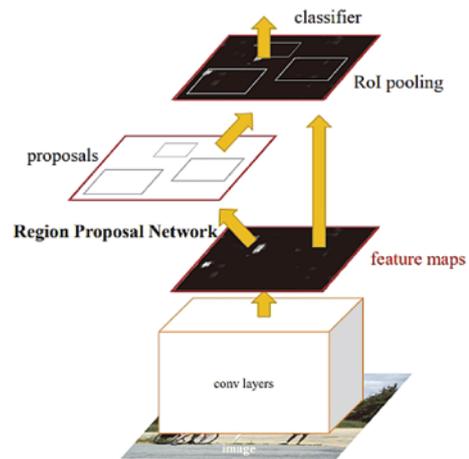


圖 10 Faster R-CNN 架構圖 [18]

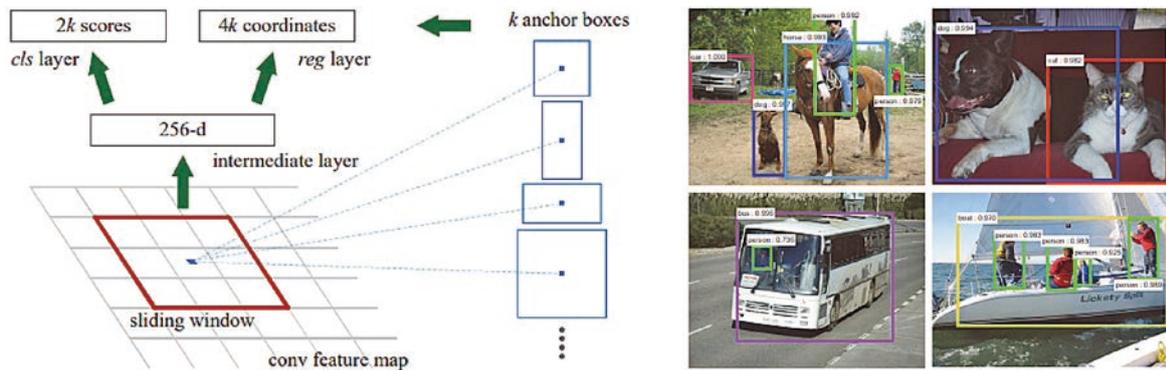


圖 11 Faster R-CNN 透過錨點選取候選區域並得到物體的分類與位置 [18]

network)，表示該神經網路中僅有卷積層，並無池化層與全連接層，用來產生候選區域。區域提取網路先經過一層 3×3 之卷積層於特徵圖上進行卷積運算，再輸入兩層 1×1 之卷積層，分別為進行物體或背景之二元分類的分類層 (box-classification layer) 與進行邊界框中心點與長寬大小回歸的回歸層 (box-regression layer layer)，因此可得多個候選區域。卷積層提取輸入影像的特徵輸出特徵圖，經過區域提取網路後卷積得到新的特徵圖，特徵圖中每個點結合了原特徵圖周圍的空間資訊。再對特徵圖上的每個點，生成多個大小不同的候選框，可由多種面積尺寸與長寬比例搭配而成，如圖 11 所示，這些候選框的中心點被稱為錨點 (anchor)，錨點包含了四個變數，分別為中心點座標、寬度以及高度，因此對於特徵圖上的每個點，得到多個候選區域。上述提到的分類層針對候選區域來判斷該區域為目標物或是背景，如果為背景即能篩選掉，減少後續的計算量；回歸層則用來確定目標物邊界框的中心點位置與範圍，未經過回歸層的邊界框部分框出物體的位置，透過與正確物體位置比較對邊界框進行調整，能回歸出能使原中心點與長寬更接近正確位置的函數，找出更準確的目標物位置。

裂流影像判識結果

評估指標

當一個人工智慧演算法模型建置完成後，需要以針對人工智慧的指標來評估訓練出來的模型成效如何。對於二元分類問題能以混淆矩陣 (confusion matrix) 來計算評估指標。以判識裂流影像的混淆矩陣為例，模型偵測該區域有發生裂流且實際亦為如此稱為真陽性 (True Positive, TP)，模型偵測該區域未發生

裂流且實際也未有裂流發生為真陰性 (True Negative, TN)，模型偵測該區域有發生裂流但實際卻未有裂流發生為 (False Positive, FP)，模型偵測該區域未有裂流發生但實際該區域有裂流發生為偽陰性 (False Negative, FN)。根據此混淆矩陣可以計算出不同的評估指標來評估模型的好壞，本研究使用以下三種評估指標：

正確率 (accuracy)

正確率即模型在所有輸入的資料中，正確判識的比率，代表模型在實際有發生或是未發生裂流的情況下，均能正確判識的能力，可顯示出模型總體的判識效果。

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

召回率 (recall)

召回率即在實際有發生裂流的資料中，模型亦正確判識有發生的比率，又可稱為真陽性率 (true positive rate)，代表模型在海域實際有裂流發生時，能正確偵測該區域有發生裂流的能力，可顯示出模型準確判識裂流發生的效果。

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

精確率 (precision)

精確率即在模型判識有裂流發生的結果中，有多少比率實際亦有發生裂流的比率，又稱為陽性預測值 (Positive Predictive Value, PPV)，可用來評估模型是否常常將沒有裂流發生卻判識有發生的誤報程度，精確率越高代表誤報程度越低，若精確率低但召回率卻相對高時，代表模型在判識裂流發生時有高估的傾向。

$$\text{precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

模式訓練與測試

本研究使用的更快速區域卷積神經網路 (Faster R-CNN) 是以卷積神經網路為基礎架構，因此在建置模型的過程中神經網路透過一定數量的神經元以及神經元之間相連的權重來計算並傳遞資訊，擬合出一個複雜的函數去近似機制或特徵未明的問題，神經網路中的訓練意指透過不斷地進行試誤，並調整神經元之間的權重，直至神經網路能正確地輸出分類或預測等目標。權重的調整方式並非隨機調整，而是利用倒傳遞演算法將網路中的權重與誤差之關係 (即損失函數)，根據梯度下降法來決定如何修正網路中的權重，透過計算誤差函數中的梯度方向來決定如何修正權重能使誤差降低。因此，在訓練神經網路模型時，需先設定訓練時的超參數，超參數影響模型訓練時如權重的調整幅度與模型試誤的次數等，率定超參數能有效建置辨識效果最佳的模型本研究在模式訓練時進行訓練超參數 (hyperparameter) 之率定，目的為找出使訓練結果表現最佳之參數，超參數率定的好壞對模式辨識效果有顯著的影響。

本研究根據過往經驗與前人文獻先設定一組超參數，使用手動調整法 (manual tuning) 進行超參數之率定，選擇前人文獻已構建之參數能較有方向地設定超參數率定的範圍，找出正確率最佳之訓練模式。使用與訓練資料不同之 100 張影像進行超參數之率定，調整依序從影像模式進行一次權重調整過程時所訓練的

資料數量的批量大小 (batch size)、令權重更新時不會停滯的動量係數 (momentum)、抑制權重更新速度的權重衰減係數 (weight decay) 與影響模式權重調整次數的疊代次數 (iteration) 共四個超參數，根據率定好的超參數建置訓練正確率最佳的辨識模式，並進行後續模式測試。率定結果顯示，當超參數設置批量大小為 100、動量係數為 0.99、權重衰減係數為 0.0005 與疊代次數為 30000 時進行模式訓練，其訓練結果相較於其它超參數組合訓練之模式有較佳之正確率，可達 95%，代表設定此組率定好的超參數組合可以得到不錯的訓練效果。

因此，本研究設定率定好的超參數組合來建置裂流辨識模式，並且輸入與訓練資料不同的測試資料來評估模式的辨識能力。測試資料同樣蒐集於 Google Map 與前人研究所使用之影像，共計有 100 張衛星影像，其中 50 張為有裂流發生的影像、另外 50 張則為無裂流發生的影像。測試結果顯示模式建置的效果良好，正確率可達 86%，代表模式整體辨識效果不錯，部分的辨識結果圖如圖 12 所示。而模式的召回率可達 84%，代表模式能有效地辨識出裂流的發生，模式的精確率可達 88%，代表模式辨識出裂流的結果中，大多實際也有裂流發生，模式的召回率與精確率皆高，顯示模式在辨識裂流時不常有誤判的情形發生。以上三種指標皆達八成以上的辨識效果，顯示利用深度學習方法中的更快速卷積神經網路能建置良好的裂流辨識模式，使用此種人工智慧技術能有效地辨識裂流的發生。



圖 12 模式裂流辨識結果圖。圖中紅框處代表模式辨識裂流發生的位置

結論與建議

台灣四面環海，而海域也常伴隨著自然災害、人為汙染等問題，許多研究透過海洋觀測方法來分析海域相關問題，常使用衛星影像和光學影像並透過影像處理技術來觀測與分析海域的各種問題。因近年來電腦硬體與人工智慧（Artificial Intelligence, AI）技術的增強，將人工智慧方法應用於自然現象問題的研究逐漸興起。

人工智慧方法中的深度學習方法在影像辨識上的成功，許多研究使用深度學習方法應用於海洋觀測與相關問題上，包含可利用人工智慧技術來偵測海岸或海面上的海洋廢棄物來協助解決海洋垃圾問題、偵測海面下的石油或天然氣管線是否洩漏來阻止海域汙染擴散或是可追蹤海上船舶漏油區域來定位海上漏油事件並盡早防止漏油影響範圍擴大等。這些研究皆展示了人工智慧在海洋觀測領域的可行性與潛在價值。

本研究以深度學習方法中的更快速卷積神經網路（Faster R-CNN）建置裂流判識模式為例，從 Google Map 與前人研究共蒐集 320 張衛星影像，藉由裂流影像建立資料庫並訓練深度學習模式，並進行模式超參數之率定來找到訓練效果最佳之裂流觀測模式。結果顯示模式建置成果良好，正確率可達 86%，代表模式整體判識效果不錯，能準確地判識出裂流發生，並且在判識裂流發生時沒有顯著誤判的傾向，代表利用更快速卷積神經網路能建置良好的裂流判識模式。顯示使用人工智慧技術能有效地應用在海洋觀測問題上。

人工智慧方法應用在海洋觀測上往往需要大量且廣泛的資料來學習，未來針對所要應用的問題不同，建議可設置攝影機來固定拍攝海域影像，蒐集大量的影像資料提供給人工智慧模式學習，並且可搭配影像處理技術來減低因天氣條件等因素影響模式判斷的問題，提升模型判識的穩定性與準確性，增強人工智慧方法建置觀測模式時的判識效果。

參考文獻

- Ankert, H., Horstmann, J., Lehner, S., and Rosenthal, W. G. (2003), Detection of wave groups in SAR images and radar image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1437-1446.
- Goddijn, L. M. and White, M. (2006), Using a digital camera for water quality measurements in Galway Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66(3-4), 429-436.
- Pugliano, G., Robustelli U., Benassai, G., Luccio, D., D., and Mucerino, L. (2019), Shoreline measurement obtained with direct and remote techniques on a sandy beach in Gulf of Pozzuoli (Campania). 2019 IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986), Learning representations by back-propagating errors. *Nature* 323, 533-536.
- Le Cun, Y., Boser, B., Denker, J.S., Henderson, D., Howard, R.E., Hubbard, W., and Jackel, L.D. (1989), Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation* 1 (4), 541-551.
- Chellapilla, K., Shilman, M., and Simard, P. (2006), Combining multiple classifiers for faster optical character recognition. *Document Analysis Systems VII, Proceedings 3872*, 358-367.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. (2012), ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in neural information processing systems*.
- Dusek, G., Churma, M., Im, J., Etienne, R., Pang, A., de Sliva, A., and Mori, I. (2020), From Lifeguards to AI: Advancing Rip Current Forecasting Through New Detection Methods. *Ocean sciences meeting. Computer Vision and Pattern Recognition.*, Cornell University.
- Fallati, L., Polidori, A., Salvatore, C., Saponari, L., Savini, A., and Galli, P. (2019), Anthropogenic Marine Debris assessment with Unmanned Aerial Vehicle imagery and deep learning: A case study along the beaches of the Republic of Maldives. *Science of the Total Environment*, 693.
- Chang, M., Yuan, Y., and Yue, Q. (2020), CNN Image Classification Analysis for 'Clean-Coast Detector' as Tourism Service Distribution. *Seed Science and Technology*, 18(1), 15-26.
- De Laurentiis, L., Jones, C. E., Holt, B., Schiavon, G., and Del Frate, F. (2021), Deep Learning for Mineral and Biogenic Oil Slick Classification With Airborne Synthetic Aperture Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(10), 8455-8469.
- Hu, S. Y., Feng, A., Shi, J. H., Li, J. J., Khan, F., Zhu, H. W., Chen, J., and Chen, G. M. (2022), Underwater gas leak detection using an autonomous underwater vehicle (robotic fish). *Process Safety and Environmental Protection*, 167, 89-96.
- 交通部中央氣象局 (2021)，海岸裂流監測與預警技術研究（1/3）計畫報告，財團法人成大研究發展基金會執行。
- Brander, R. W. (1999), Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system. *Marine Geology*, 157(3-4), 199-217.
- Dalrymple, R. A., MacMahan, J. H., Reniers, A. J.H.M., and Nelko, V. (2011), Rip Currents. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 551-581.
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., and Malik, J. (2014), Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 580-587.
- Girshick, R. (2015), Fast r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 1440-1448.
- Ren, S., He, K., Girshick, R.B., and Sun, J. (2015), Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39, 1137-1149.
- de Silva, A., Mori, I., Dusek, G., Davis, J., and Pang, A. (2021), Automated rip current detection with region based convolutional neural networks. *Coastal Engineering*, 166, 103859. 



海岸異常波浪觀測之研究

陳盈智／國立成功大學近海水中心 助理研究員

董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

林芳如／中央氣象局海象測報中心 課長

滕春慈／中央氣象局海象測報中心 主任

海岸異常浪 (Coastal Freak Waves) 又稱為瘋狗浪，過去頻繁出現在海岸區域，是岸邊突然出現的巨大浪花，足以將人衝擊入海。由於瘋狗浪不知何事會發生，過去記錄的案例非常稀少，使得相關研究也相對罕見。本研究藉由分析光學影像資料，增加海岸瘋狗浪的案例資料。根據案例分析結果也發現，海岸瘋狗浪發生的型態並非只有一種，且從過去長期影像之分析結果，本研究發現波高大小與瘋狗浪發生與否無高度相關性，顯示尚有其他因素的影響。本研究所提出的瘋狗浪案例判釋方法，亦可應用在其他海岸，藉以蒐集更加完善的資料，對於掌握海洋災害特性，提供後續研究災害發生的機制以及建置預警模式之基石。

關鍵詞：海岸異常波浪、瘋狗浪、光學影像

前言

科技發展日新月異，海洋中極端海象大多都已可準確預測，海上災害大多得以避免。然而，使船隻翻覆等海上危害事件的原因大多是遭受「瞬變」的異常海象，船隻難以應付則造成傷亡，海上異常波浪 (Freak Wave; Rogue Wave) 即屬瞬變的異常海象，異常波浪的定義是波高為示性波高兩倍以上的波，突然發生也順漸消失，是海洋中相對大的波浪，此種波浪被認為是造成海洋中航行船隻失事的原因之一。然而異常波浪也可能會發生在岸邊，為海岸瘋狗浪 (Coastal Freak Waves)，過去在東北角沿海，有許多釣客經常受到這種難以預測的海岸異常波浪襲擊，坊間媒體又稱之為瘋狗浪，典型的瘋狗浪如圖 1，發生在 2014 年黃蜂颱風期間，對海邊的釣客或遊客具有很大的威脅性，國內每年總會發生十幾件瘋狗浪襲人事件，過去累計造成死傷人數達數百人之多，然而瘋狗浪發生的機制複雜，尚未完全被掌握，因此要準確地預測發生時間或發生地點，尚無法做得到。

海岸瘋狗浪是描述海岸邊突然激起的浪花，且浪花的動能足以將人沖倒造成傷害，然而過去的瘋狗浪完整的影像紀錄並不多，大多案例來自於報章媒體和救災報案紀錄，若發生瘋狗浪而沒有發生意外事件，或是發生事件沒有被報導則不會有紀錄，此外媒體或報案紀錄本身具有一定程度的不確定性。而案例蒐集不易也導致過



圖 1 基隆海岸瘋狗浪案例 (2014 年黃蜂颱風期間)

去在瘋狗浪相關的研究非常稀少，相關的研究如 Chieh *et al.*^[1] 蒐集近海與海岸的瘋狗浪案例，並針對這些案例發生時的海氣象特徵進行討論；Tsai *et al.*^[2] 認為瘋狗浪的發生與颱風或東北季風有關，且發現群波現象與瘋狗浪發生有高度相關，同時也從影像與波浪資料討論瘋狗浪案例，也發現瘋狗浪容易發生在三個週期相當的波群當中。考量沿海地區的民眾活動安全的保障，海岸或海洋工程必須考慮這類突發、極端或具有災害性的波浪的影響。在前期研究中^[3,4]，也嘗試以機器學習的方法建置瘋狗浪預警系統，預期透過預警來降低其危害性，然而系統的建置需要大量的案例進行訓練與驗證，才能確保系統的預警能力。

因此在案例蒐集上需要以連續觀測的方式，在同一地點持續監測，才能完整地蒐集海岸瘋狗浪案例，連續觀測亦能完整的掌握案例發生形成的過程，用於探討浪花的特性，窺探瘋狗浪的發生機制，相關案例也能進一步應用來建置預警系統，完善預警系統並確保其預警能力。

波浪觀測技術與瘋狗浪觀測資料

目前常見的波浪觀測技術包含接觸式與非接觸式兩種，傳統觀測技術以接觸式為主，例如裝載三軸加速度儀的浮標系統，是目前最廣泛被應用在波浪觀測的儀器，也是中央氣象局、水利署於海象觀測的主要儀器，藉由記錄浮標本體隨水面的運動，同步觀測水面運動加速度，假設浮標本體的運動與水面變化相同，則可利用浮標的垂直加速度計算求得水位變化，目前開放海洋中大多是使用此種觀測技術量測波浪，過去亦有許多颶

風期間極端大浪成功觀測的紀錄^[5]；另外高精度全球衛星導航系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）也是具有潛力的測波工具之一，應用內政部國土測繪中心之虛擬基準站即時動態定位技術（Virtual Base Station Real-Time Kinematics, VBS-RTK），裝載於浮標上，亦能量測得到公分等級精確度之水位高程資料^[6]，也是近年來逐漸被應用於海洋觀測上。其他傳統的接觸式觀測技術包含底錠式壓力或聲波計，水底的壓力與水位有關，因此藉由底錠式的壓力計量測壓力變化即可推得水位之高低變化，而聲波計則是利用聲波碰到水面反射回傳的時間差計算水位。在遙測觀測技術方面，常見的如光學（optics）系統和雷達波（radar）系統，Lehner *et al.*^[7]、Dankert *et al.*^[8] 應用衛星雷達影像或微波雷達影像去分析海洋中的極端大波浪（extreme wave），這種觀測技術具有空間的資訊，因此對同一個海域波浪長期統計具有其優勢在，但這方法無法應用至海岸邊瘋狗浪觀測。因此岸邊光學觀測是觀測海岸瘋狗浪的可能工具之一，岸基光學攝影機具有成本低與容易建置等特性，影像常被應用在海岸災害的監測，如裂流監測（Rip current）^[9-11]、海岸線變遷^[12,13]等，從觀測原理來看，應用光學攝影機監測海岸瘋狗浪是目前較為可行的方法。

台灣海岸瘋狗浪襲人落海事件頻傳，中央氣象局近年來規劃建置一套環台近岸異常浪光學觀測系統，目標在每個縣市至少有一站光學影像監視站，連續不間斷的監測瘋狗浪，目前各個縣市架設瘋狗浪監視站規劃如圖 2，圖中藍框的站點已完工或於 2022 年底前會完工，其餘站點已初步完成規劃，正在逐站建置當中。



圖 2 中央氣象局規劃全台近岸異常浪光學監測站

瘋狗浪成因與過去案例說明

近年來，台灣每年平均發生數起浪襲落海的案例，瘋狗浪落海事件發生地點統計結果如圖 3 所示，自 2000 年迄今本研究蒐集 398 件瘋狗浪落海事件，傷亡人數達 688 人，每年平均發生 17 事件，造成 29 人落海。在空間分布上，瘋狗浪案例遍布台灣四周海岸，其中以新北市、基隆市與宜蘭縣所處的台灣東北部海岸最多，共計有 207 件，佔全部事件 70% 左右。若考慮瘋狗浪事件時間分布，各月分發生分布結果如圖 4 所示，可發現瘋狗浪發生時間大多集中在東北季風盛行時期的 9~12 月，台灣東北部海岸就正對著季風所帶來的浪。本研究將對不同季節所發生的瘋狗浪進行統計，同時以春季為 3~5 月、夏季為 6~8 月、秋季為 9~11 月、冬季為 12~2 月進行劃分，瘋狗浪事件發生次數最多的季節為秋季，佔全部事件 42%，其次為冬季佔 26%，颱風警報發布期間所佔的比率並不高，反之在颱風季節，但未發布颱風警報時，亦有瘋狗浪發生的事件。

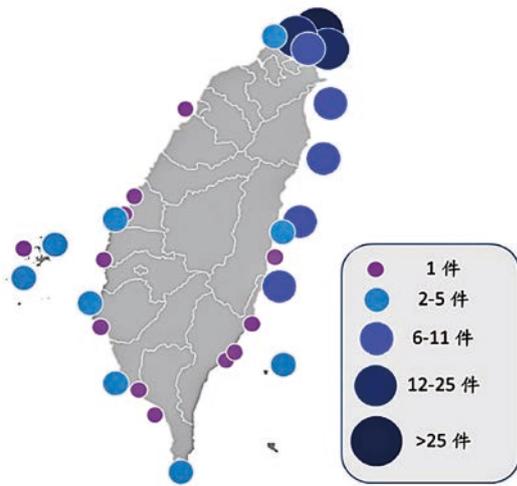


圖 3 臺灣海岸區域發生瘋狗浪襲人事件之位置圖 (資料時間：2000~2021)

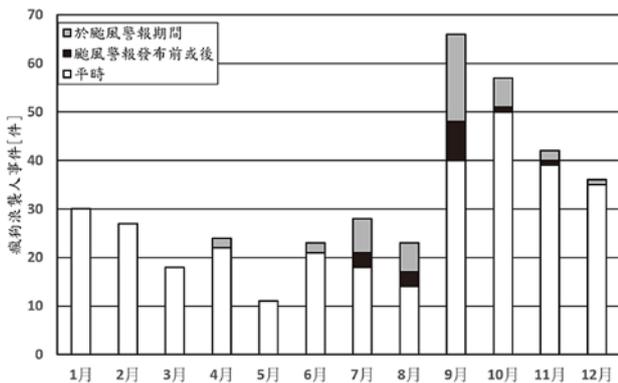


圖 4 各月份發生瘋狗浪襲人落海事件統計 (資料時間：2000~2021)

當風域距離海岸邊很遙遠時，在近岸區域並不會有很大的風浪存在，當波浪離開吹風區的浪後，會產生波與波之間時間週期較長得浪，又稱為湧浪或長浪，若這種浪傳至岸邊後，在近岸區域有可能會發生瘋狗浪，將岸邊人員捲入海中。在過去當西北太平洋海面上有颱風（尤其是強颱）時，台灣地區就會出現這種因長週期導致近岸瘋狗浪襲人的典型案例，例如 2017 年 9 月在基隆防坡堤所發生越堤的瘋狗浪事件，當天泰利颱風已轉向日本，且距離台灣 1,500 公里，但颱風中心傳來的浪花襲擊防坡堤上正在舉行釣魚比賽的選手，不僅造成百餘位釣客陷入險境，甚至將車輛打入海中，所幸並未有人員傷亡；2015 年 4 月於花蓮七星潭附近海域發生的浪襲事件，當則是有梅莎颱風像菲律賓海域前進。這種湧浪所引致的瘋狗浪能量非常的強大，在 2014 年 7 月距離台灣 800 公里處有浣熊颱風，而新北市野柳地質公園附近，即便周圍均有圍欄防護，仍有 7 名遊客被突如其來的大浪所打傷，所幸並未有人罹難。同年 10 月在黃蜂颱風期間，發生一件剛好被民眾拍攝記錄下來的瘋狗浪事件，甚至被媒體爭相報導，事件經過是當長浪接傳至基隆海洋大學防坡堤時，正好路過的摩托車騎士被瘋狗浪沖刷入海。然而並非所有事件都如上述案例沒有人罹難，在 2021 年 10 月巴比倫颱風在台灣外海向日本遷移時，位於宜蘭縣梗枋漁港海堤上，就出現將釣客連同車輛捲入海中的瘋狗浪浪襲事件，造成 3 人傷亡的慘劇。台灣有史以來最嚴重的瘋狗浪事件則是發生於 2013 年 11 月海燕颱風期間，該颱風當年被稱之為地表最強風暴，在距離台灣約 1,600 公里的菲律賓附近，在新北市龍洞鼻頭步道正在從事戶外教學的社區大學 16 人遭傳來的巨大長浪沖刷入海，造成 8 死 8 傷的慘劇。

長浪造成的落海傷亡事件相當常見，在台灣甚至年年發生，根據上述所蒐集近 20 年來台灣海岸發生的 398 件風狗浪案例中，共計有 78 件與長浪有關，然而當中僅有 14 件是發生在中央氣象局颱風警報發布期間，反之有 8 成（64 件）長浪引致的瘋狗浪事件發生在沒有警報時，倘若僅依照目前我國氣象局所能提供的颱風僅報訊息來評估海域安全實屬不足，顯而易見的便是長浪侵襲時並非颱風警報發布的期間，加上長浪是引起瘋狗浪常見的原因，若颱風仍距離台灣相當遙遠，或是長浪是發生於颱風發生前後，海岸區便會係屬高氣壓的好天氣，此時若突如其來一個大浪，意外就有可能發生。

瘋狗浪分析與觀測結果

本研究優先選用落海事件累積數量排名最高的新北市貢寮區龍洞海岸，過去累積發生 42 件案例，共 113 人落海。攝影機架設龍洞海岸，攝影機規格為 200 萬畫素，影像更新頻率為 25 fps (frame per second)，由於為光學攝影機，僅記錄白天時刻的海岸影像。

攝影機原始影像為記錄紅綠藍等三原色之全彩格式，本研究簡化其分析程序，將全彩影像進行灰階化，從灰度值 (gray scale value, GSV) 的變化進行浪花辨識，其分離的方法，本研究採取影像二值化的方法，將浪花的範圍從影像中分離出來，如此再進一步計算浪花邊界，即可得到浪花參數如單位水量、最大浪花高度、和水量變化率 (流量) 等等，並做為進一步評估是否為足以將人沖倒的瘋狗浪案例，詳細分析過程可參考中央氣象局 [14]。瘋狗浪是指在海岸地區會對人造成危害之浪花，過去有許多研究討論人在洪水中的穩定度，並以水深與流速定義人無法站立的臨界條件，用以評估洪水的危害性；而其概念與瘋狗浪類似，因此在前期研究中亦參考國外研究成果，定義出瘋狗浪的準則。

何種的浪花可稱之為瘋狗浪？若以高度來看，假設將浪花高度超過 1 倍人高視為瘋狗浪，人高假設為 165 公分，圖 5 顯示 2016 年 8 月 12 日 13 時在新北市龍洞一支岬頭觀測到的一組典型影像，從圖中可見有數位釣客站立於岬頭上，海況平穩，突然間出現的一個大浪花襲來，它從形成到消失在五秒以內，且超過一個人高度，該案例從浪花生成至消散過程均完整地被攝影系統記錄，從影像紀錄來看，此例可視為一個典型的瘋狗浪案例。此礁岩前方約 1 公里處有中央氣象局佈放之龍洞海氣象浮標，事件當時之海況觀測結果相當平穩，示性波高僅 0.75 m，平均週期為 5.5 秒，當時天氣也相當晴朗，平均風速為 3.7 m/s，因此即使海況平穩、天氣晴朗，海岸上仍有可能生成瘋狗浪。另外一個類似的案例，如圖 6 所示，該例為前案發生前數小時，波高小於 1 米，平均風速 5 m/s，從影像中可發現一位站立在礁岩上的釣客，受到突然出現的激浪衝擊，上述兩例反映一個事實，假使某時刻出現了瘋狗浪，其在短時間內 (如當天) 再現機率甚高。

除了前述這種突然激起的大浪以外，本研究檢視過去龍洞監視站影像紀錄，發現一種型態的激浪，波浪與礁岩交互作用後並非形成大浪花，而是海水沿著礁岩迅速爬升，其形態與波浪溯升或海嘯均有所類似，此類的



圖 5 典型瘋狗浪案例 (2016/8/12 13:00)



圖 6 典型瘋狗浪案例 (2016/8/12 08:17)

浪花亦具有危害性，可稱之為溯上型瘋狗浪，例如圖 7 為 2016 年 8 月 29 日下午 14 時發生的案例，這類型的瘋狗浪生成時，不一定會巨大浪花，波浪破碎後，沿著礁岩流動的海水高度並不深，在影像上較不顯著，與前述討論波浪與礁岩交互作用引起的浪花形態相當不同，但是假使它的流速夠快，亦足以將人衝倒入海。

龍洞海岸是東北季風直接影響的海域，每年東北季風吹拂時，台灣東北部地區風速強勁，本研究蒐集東北季風期間的影像，如圖 8 所示，由於受到強勁的東北季風影響，這期間龍洞影像顯示浪花高度約略為 2 個人身高，除風速較大外，示性波高均有 1 m 以上。圖 9 為湧浪較為顯著時的影像，可見該瘋狗浪的浪花水量較大，從鄰近龍洞浮標觀測結果顯示，該案例示性波高達 1.5 公尺以上，尖峰週期為 9 ~ 10 秒，風速約介在 5 m/s，顯示當時區域風皆不顯著，而尖峰週期達 9 秒以上，顯示有較長週期的湧浪能量傳抵該區域。

綜整上述，影像監視站觀測系統可清楚記錄瘋狗浪影像從生成至消散整體過程，分析過程中，發現瘋狗浪型態可能包含 2 種以上，第一是典型的巨大浪花型態，第二是沿著礁岩上溯的溯上型瘋狗浪。本研究從光學監



圖 7 溯上型瘋狗浪案例 (2016/8/12 08:17)



圖 8 東北季風期間影像瘋狗浪案例



(a) 2018/09/29 11:54



(b) 2016/08/11 09:49:58

圖 9 湧浪顯著期間影像瘋狗浪案例

測站分析得到之瘋狗浪案例影像，依照上述方法分析自建站以來至 2020 年的影像，分別得到 17,585 個，若配合波浪觀測，以一小時內出現一筆以上及當作該小時內有瘋狗浪發生的原則，將資料離散化整理，得到有 1,831 個小時出現瘋狗浪，估算瘋狗浪發生機率約為 16.4%。本研究亦探討瘋狗浪之出現與海氣象間的關係，考量龍洞海域分析所得之瘋狗浪案例較多，代表性較為充足，統計瘋狗浪發生時浪花高度與尖峰週期和波浪尖銳度之分布情形，如圖 10、圖 11。分析結果顯示，瘋狗浪之發生與波浪單一屬性並無顯著關係，或許係由 2 個或 3 個以上因素共同造成，有待後續進一步探討。

結論

海岸瘋狗浪的發生是岸上的釣客與活動民眾的潛藏危害，但是目前對於瘋狗浪監測的研究有限，且瘋狗浪不知何時何地會發生，相關案例資料取得不易。本研究以在岸邊架設光學影像監視設備的方式進行瘋狗浪監測，希望蒐集更多瘋狗浪案例。在海岸浪花影像分析的部分參考前期研究成果，並應用於龍洞光學監視站影像，分析 2016 年至 2000 年設置在新北市龍洞灣的攝影機影像，共分析獲得了 17,585 筆瘋狗浪，

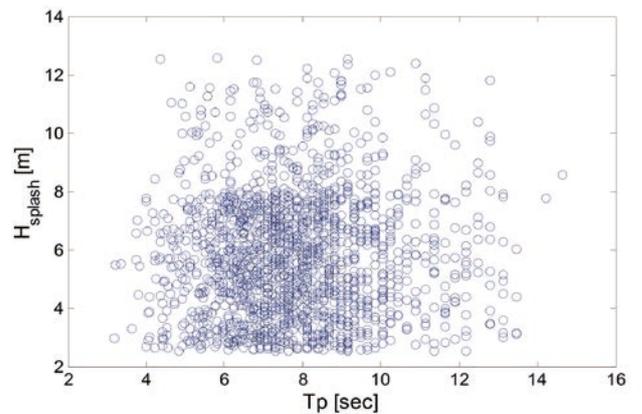


圖 10 瘋狗浪花高度與尖峰週期之比較 (現場資料: 龍洞浮標)

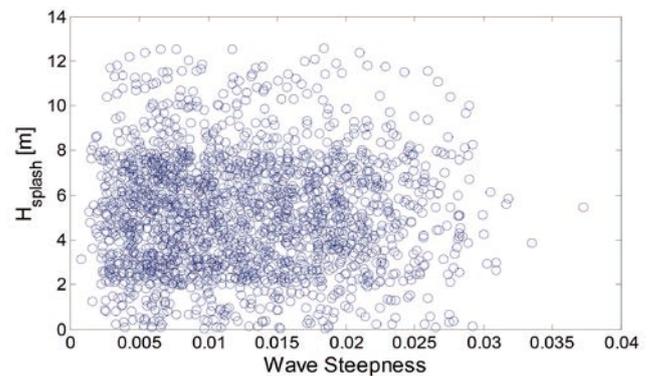


圖 11 瘋狗浪花高度與波浪尖銳度之比較 (現場資料: 龍洞浮標)

顯示瘋狗浪發生的頻率相當高，從觀測到的瘋狗浪影像，除了典型的瘋狗浪案例外，也發現了一種溯上型態的瘋狗浪，同樣具有危險性。本文亦分析所得之瘋狗浪案例時周遭的海氣象環境，發現瘋狗浪之發生與入射波浪的波高、週期並無關聯性，顯示瘋狗浪的發生機制並非僅受入射波浪所影響，尚有其它很多因子。本文引用前期研究提出之瘋狗浪分析方法，大量分析龍洞瘋狗浪案例，初步顯示可行。目前中央氣象局也正逐步建立瘋狗浪監測網，本研究認為可應用瘋狗浪影像分析方法，分析海岸光學影像，可蒐集到更充足的瘋狗浪案例，除了案例的特性分析結果，亦可作為後續研究對於瘋狗浪建立預警系統的基礎。

參考文獻

- Chien, H. W. A., Kao, C. C., and Chuang, L. Z. (2002), On the characteristics of observed coastal freak waves. *Coastal engineering journal*, 44(04), 301-319.
- Tsai, C. H., Su, M. Y., Huang, and S. J. (2004), Observations and conditions for occurrence of dangerous coastal waves. *Ocean engineering*, 31(5-6), 745-760.
- Doong, D.J., Peng, J.P., and Chen, Y.C. (2018), Development of a warning model for coastal freak wave occurrences using an artificial neural network. *Ocean Engineering*, 169, 270-280.
- Doong, D.J., Chen, S.T., Chen, Y.C., and Tsai, C.H. (2020), Operational Probabilistic Forecasting of Coastal Freak Waves by Using an Artificial Neural Network. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 165, doi:10.3390/jmse8030165.
- Liu, P. C., Chen, H. S., Doong, D. J., Kao, C. C., and Hsu, Y. J. (2009), Freaque waves during Typhoon Krosa. *Ann. Geophys*, 27, 2633-2642.
- Lin, Y. P., Huang, C. J., Chen, S. H., Doong, D. J., and Kao, C. C. (2017), Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas. *Sensors*, 17(1), 172.
- Lehner, S., Schulz-Stellenfleth, J., and Niedermeier, A. (2002), Detection of extreme waves using synthetic aperture radar images. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 3, pp. 1893-1895, IEEE.
- Dankert, H., Horstmann, J., Lehner, S., and Rosenthal, W. (2003), Detection of wave groups in SAR images and radar image sequences. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41(6), 1437-1446.
- Brander, R.W. (1999), Field observations on the morphodynamic evolution of low wave energy rip current system. *Mar. Geol.* 157, 199-217.
- Dalrymple, R.A., MacMahan J.H., Reniers A.J.H.M., and Nelko V. (2011), Rip currents. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43:551-81.
- Akila, D.S., Mori, I., Dusek, G., Davis, J., and Pang, A. (2021), Automated Rip Current Detection with Region based Convolutional Neural Networks. *Coastal Engineering* 166, 103859.
- Didier, D., Bernatchez, P., Augereau, E., Caulet, C., Dumont, D., Bismuth, E., Delacourt, C. (2017), LiDAR validation of a video-derived beachface topography on a tidal flat. *Remote Sensing*, 9(8), 826.
- Pugliano, G., Robustelli, U., Di Luccio, D., Mucerino, L., Benassai, G., and Montella, R. (2019), Statistical deviations in shoreline detection obtained with direct and remote observations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 137.
- 中央氣象局 (2021)·沿岸異常波浪預警系統之建置 (1/3)·研究計畫報告。

50週年系列活動議程預告

2023邁向50系列報導

2023.09.18 (Monday) ACECC 國際活動	morning	ACECC 45 th TCM	Howard Civil Service International House, Taipei
	afternoon	ACECC 45 th PCCM	
2023.09.19 (Tuesday) ACECC 國際活動	morning	ACECC 45 th ECM	Howard Civil Service International House, Taipei
	afternoon	Technical Tour for Foreign Guests	Danjiang Bridge (TBD)
	evening	Welcome Reception	
2023.09.20 (Wednesday) ACECC 國際活動	morning	2023 CICHE International Forum 3 to 4 Keynote Speeches	Everlight Building Taipei Tech University, Taipei
	afternoon	Two Parallel Sessions 1. TC-21: TDA Related Subjects 2. TC-29: Large-Scale Experimental Related Subjects 3. TC-26: Climate Change & Water Resource Related Subjects 4. Wind Farm Project Technical Section	
2023.09.21 (四) 50周年慶祝大會	上午	土木水利學會 50 周年慶 (The 50 th Anniversary of CICHE)	國際會議中心 (TICC, Taipei)
	下午	分論壇 1. 我國公共建設報告 (公路、高速公路、鐵路、高速鐵路、捷運、水利建設、自來水、電力、離岸風電等) (議程待定) 2. CICHE-JSCE WS / Future Leader Forum	
	晚上	大會晚宴 (Gala Dinner)	
2023.09.22 (五) 工程參訪	全天	工程參訪	新北捷運 (地點待定)



我國之近海水文監測與發展

董東璟／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授、近海水文中心 主任

黃清哲／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授、近海水文中心 顧問

高家俊／國立成功大學水利及海洋工程學系 名譽教授、近海水文中心 顧問

滕春慈／交通部中央氣象局海象測報中心 主任

吳益裕／經濟部水利署水文技術組 組長

海域水文資料日益重要，各機關、各領域均有資料需求且持續擴大中。近海水文的觀測主要包含海洋物理（風、波、潮、流、雨等）與海洋化學（溫、鹽、葉綠素、溶氧等）兩類要素，測站形式包含海洋資料浮標、觀測樁、潮位站、氣象站、雷達站等。我國之海域水文觀測始於民國五十年代，民國七十年代開始有系統性的全面建置，截至 2022 年底，站網含括有 50 座各類型測站，所有觀測儀器均為本土化所研發，測站資料均具有即時傳輸功能。本文說明近海水文觀測之發展進程，並說明觀測系統架構與各類型測站型式，最後呈現我國之近海水文觀測站網。

近海水文觀測的緣起

國內各項活動持續發展，在陸地資源逐漸飽和的同時，各項產業與民眾活動陸續向海岸地帶移動，如沿海的工業區、天然氣專用港、海埔地開發、再生能源開發、休閒遊憩活動等，為了確保經濟產業能順利開發、活動能順利進行，同時兼顧安全設計以及環境保育等問題，使能永續發展，海岸地區的環境觀測是必要的手段；再者，台灣地區海岸線長達一千六百餘公里，每年夏秋之際的颱風所引發的暴潮巨浪常造成莫大的災害，抗浪禦潮是政府重要的職責之一。而水文基本條件為各項水利海洋建設最重要的依據，倘無充分而精確之海洋水文資料，或是所應用之觀測資料不具代表性，則可能導致工程設計上之浪費或必須承擔較高之風險，因此，獲得正確且即時的近海水文觀測資料，掌握我國海洋水文情勢，是政府為了要減少旱澇災害損失、保障民眾生命財產安全、促進海岸經濟活動發展所進行的重要施政項目之一。

海洋研究可以從理論解析、物理模型水工試驗與現場觀測分析三個方法進行，其中現場觀測（in-situ measurement）是最重要的手段之一，現場觀測資料通

常被視為真值（ground truth），透過分析現場資料可以直接從事問題研究，也可以提供數據供理論計算驗證以及水工模型試驗參考。由於現場觀測所耗費的人力物力較巨，實施起來並不算太容易，在臺灣光復後的海岸工程研究工作一開始大多是利用水工模型試驗來進行，開始從事海象觀測的歷史必須回溯到民國五十年代（1960~）的嘉義海埔地開發以及台中港的興建時期，為了台中港的興建，早在民國四十六年（1957）間就開始用波高桿目測高潮時淺灘上的波浪，民國四十八年（1959）時改用直結式波高計觀測水深 7 m 處的淺海波浪，民國五十年（1961）才購置觀標式波高計，直到民國六十年（1971）在台中港北堤外海水深 19 m 處設置超音波波高計，這段期間的現場觀測作業是為了實施某個工程計畫所進行的短時觀測任務，在臺灣，真正開始從事長期有系統的海象觀測作業是從民國六十年代（1970~）後期開始，交通部中央氣象局在台北鼻頭角、台東成功、高雄小琉球島以及澎湖東吉島等四處設置底床超音波波高計，當時設置的目的是為瞭解臺灣鄰近海域的海象特性，提供海象預報參考之用。

民國七十年代（1980～）後期，由於人口增長，經濟發展，內陸資源逐漸不敷使用，環保意識的抬頭使得工業開發逐漸離開人們居住區域往海岸地帶發展，海岸開發行為愈來愈多，海岸侵蝕問題逐漸被重視，海岸地帶的管理問題也開始被廣泛討論，為了要安全且有效地進行開發、保護與管理海岸地區的工作，海洋資料的收集是最重要的工作之一。民國七十二二年（1983），國科會開始興建海洋研究船，從事海洋探測研究，受限於吃水深，海洋研究船難以到近岸淺水海域進行調查，且研究船非定點、非長期觀測工具，其調研結果對於海洋科學研究甚有助益，惟對於海岸管理所需之數據則難以供給。民國八十年（1991）第四次全國科技會議中，決議將海洋科技列入政府十二項重點科技發展計畫。民國八十二年（1993）行政院第十四次科技顧問會議中，加強海洋觀測技術發展被列為主要討論議題，決議將建立海氣象長期觀測網以及發展海氣象觀測儀器技術等列為重點工作項目；同年，中央氣象局成立海象測報中心，專責海象測與報的業務，開始較有系統地進行長期觀測，中央氣象局自民國八十六年（1997）開始，建置了以資料浮標（Data Buoy）為主的環島海氣象觀測網，以進行臺灣環島海域的海氣象預報為目的。民國八十三年（1994）全國水利會議結論中亦指出應加強從事水文基本資料調查，檢討台灣地區水文網，由專責單位執行水文網計畫等結論；同年，行政院核頒之「災害防救方案」實施要領中，明確列出加強建立水文氣象觀測資料。因此，經濟部提出「現階段水資源政策綱領」並於民國八十五年（1996）三月由行政院核定做為我國水資源發展的方針。經濟部水資源局（水利署前身）爰依據水資源政策綱領草擬「台灣地區水文觀測現代化整體計畫」^[1]，從學理與實務的角度考量，將水文觀測範疇同時涵括地面水、地下水以及近海水文之觀測，以符合台灣當時水利業務發展之實際需要。水文觀測現代化之主要意義在於應用先進之量測技術與方法，建立完整的水文觀測站網，結合自動化之儀器與電腦設備，並建立水文資料即時傳輸系統及高效率水文資料庫服務系統連上網路，以從事水文資料之量測、記錄、傳輸、存檔及統計分析與應用，而為永續經營台灣地區水資源，建立完整之水文基本資料。為達成上述目標，當時有兩個推動策略：觀測技術提昇和儀器技術本土化。第一部分屬於學理研究，針對我國特有水文環境，訂定出水文觀測規範，期使水文觀測所取得之數據符合與滿足政策擬訂及工程設計之需求；第二部分屬於儀器開發，透過技術本土化，掌握水文儀器關鍵性技術，開發適合臺灣水文環

境之本土化觀測儀器，建立儀器檢校維修能力，增進水文資料庫之數據品質，減少數據漏失率，同時進一步可培養儀器開發、製造能力，扶植水文儀器產業。「台灣地區水文觀測現代化整體計畫」於民國八十七年（1998）一月開始實施，分為兩期共十年完成，著手建置我國近海水文站網，以禦潮防災為主要任務^[2]。配合政府的政策，國立成功大學於同年正式成立近海水文中心，負責協助政府推動近海水文觀測現代化的工作。

水文觀測技術本土化

往昔之水文觀測作業中出現以下問題：(1) 儀器檢校週期不固定：觀測儀器除極少數外，絕大部分通常僅在儀器故障或送廠修理時，方附帶進行檢校工作，由於缺乏定期檢校，儀器精確度無從確定，數據品質掌握不易。(2) 儀器修復時間長：以往觀測儀器絕大部分自國外進口，儀器代理商限於資本，大多不具有儀器維修部門，儀器故障時，僅能連絡原廠，派員來台修理，或將儀器運回原廠修理，不但曠日費時，嚴重影響觀測數據之連續性，大幅降低資料庫之實用性，且進出口手續繁瑣，對作業單位造成困擾。(3) 儀器準確性不穩定：水文觀測項目繁多，各觀測項目之儀器廠牌型號亦非常繁多，政府採購制度以公開招標、低價得標為主軸，而儀器檢校、維修等影響觀測作業至鉅之售後服務能力卻難以列於採購條件中，使得代理商競相搶標，造成儀器品牌多而且雜，造成觀測準確性不穩定，此為傳統水文觀測作業中常見之情形。

水文觀測技術基本上係屬於一種系統整合（system integration）技術，由於觀測作業最基本之感測器（sensor）通常為市售的高精密商品元件，感測器核心部分往往涉及商業利益並不公開，而基於成本的考量，世界各國大多將觀測技術研發重點放在系統整合方面，利用市售感測器，透過系統整合技術，開發相關之硬體、軟體與軟體，針對整合觀測系統之電力、通訊、結構、耐環境性、作業安全性、維修便利性與穩定性等課題進行研究發展。由儀器研發掌握關鍵性技術，降低觀測成本，並建立自有維修能力，使具有本土化維修技術，縮短儀器維修時間，減少數據漏失率，減少受國外儀器廠商之束縛降低依賴性^[3]。因此，國立成功大學近海水文中心先後在國科會、交通部科技顧問室、中央氣象局、水利署等單位支持下，從事有關近海水文氣象觀測技術研發^[4,5]，研製了完全本土化的海洋資料浮標（Data Buoy）、海洋觀測樁（Pile Station）、新世代潮位站（Tide station）、海岸氣

象站 (Coastal meteorological station)、微波雷達遙測系統 (Microwave radar station)、光學影像監視系統 (Optical coastal watch) 等近海水文觀測儀器設備，從事海上風速風向、波浪、海流、潮 (水) 位、海溫、氣壓、濕度、雨量、漂砂、水質等海氣象水文要素之觀測。

近海水文監測系統架構

水文觀測儀器受區域性氣候環境之不同往往需要特殊設計，直接進口國外儀器並不一定能完全適合我國氣候或海象，因此儀器研發有絕對之必要性。為達到觀測自動化、作業化的目的，近海水文觀測系統包含下列幾項要素，(1) 觀測載台；(2) 儀測單元；(3) 能源單元；(4) 資料擷取與分析單元；(5) 資料傳輸單元，如圖 1 所示。

觀測載台

觀測載台係指觀測系統的主要外觀，如浮標的浮球殼體、觀測樁的樁體等，其作用是用來搭載感測器、電力單元、資料傳輸單元等酬載，在設計上必須考慮安全性、耐海性、運輸便利性及裝設簡便性。譬如海氣象資料浮標需考慮具有良好之隨波性，因此其觀測載台設計為軸對稱碟形，考慮到我國路運輸便利性及酬載量需求，直徑設計為 2.5 m，考慮安全性，資料浮標裝置了防撞護舷膠環，同時為避免海上碰撞，資料浮標配備有航行警示燈、雷達反射器。觀測本體必須靠錨錠系統來固定，資料浮標之錨繫系統包括錨鍊及錨碇兩部份，依照水深、佈放環境，錨鍊及錨碇之設計與作業方式需作適度調整。

儀測單元

包含海氣象量測儀器，此部分為現今商用市場上最新感測技術產品，如資料浮標上的三軸加速度計、陀螺姿態儀、電羅經、風速風向計、水溫計、氣溫計、大氣壓計及全球定位儀 (GPS) 等，潮位站之音波式潮位計、壓力式潮位計，氣象站雨量計、濕度計、日照計。為確保觀測準確度，儀測系統必須定期進行檢校與率定的工作。

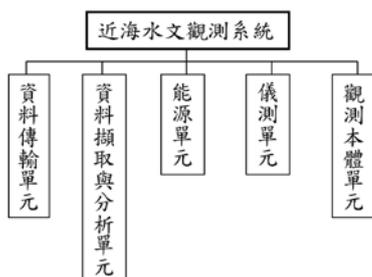


圖 1 近海水文觀測系統組成單元

能源單元

為使觀測系統能長期作業化的工作，必須配備完整充足的能源電力系統，在海上從事現場觀測的能源電力系統由太陽能板、充電電路及蓄電池組成，此一組合的特色是電力具有再生能力，不需經常更換蓄電池。當白天陽光充足時，太陽能板發電量較多，電壓高，除可供整個測站系統使用外，尚可將多餘電量儲存於蓄電池內，當夜晚或日照量不足時，則由蓄電池供應，以保長期操作，同時觀測系統電壓之訊息可讓監控品管中心瞭解能源耗損狀況而掌握觀測系統的運作狀況。

資料擷取與分析單元

無論是浮標觀測系統、樁體觀測系統、潮位觀測系統或是氣象觀測系統，資料擷取與分析單元為觀測系統核心，掌握此核心可使觀測作業具有高度擴充性與技術自主性，依照觀測任務之特殊性，資料擷取與分析單元為近海水文觀測系統核心，應要有技術自主能力能夠自製，如當感測器有更新時，自行研發之資料擷取系統可依最新感測器之規格調整，隨時都能結合最新感測器進行觀測作業。一般而言，掌握資料擷取與分析技術，即掌握了觀測主要技術。近海水文觀測設備之資料擷取及分析系統最好具有下列特性：(1) 設計模組化，容易維修與擴充；(2) 耗電量要低，穩定性要高；(3) 要能具有多管道 (channel) 資料擷取功能，提高觀測成功率；(4) 觀測資料儲存空間要足夠大以儲存長期與多樣的資料。

資料傳輸單元

為了將觀測結果從海上或岸邊傳送回品管中心，必須具備有資料傳輸系統，尤其為了禦潮防災的需要，必須獲得最新的現場觀測資料，因此即時 (real-time) 傳輸有其必要性。除此，作業化觀測系統的資料傳輸單元重視傳輸的穩定性，在經費及測站現場環境許可下，資料傳輸系統應盡量採用二個以上傳輸方式設計 (如電話、無線電、GSM、衛星通訊等)，如圖 2 所示。早期常見的資料傳輸方式是利用無線電通訊來進行資料傳輸工具，其原因是因為安裝容易、技術門檻較低，同時不需要通訊費用，適合於長期作業化需求，然而無線電之通訊品

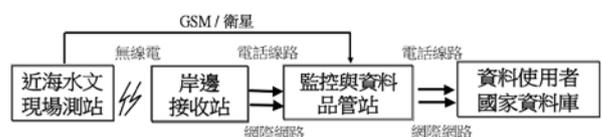


圖 2 近海水文觀測資料傳輸方式與流程

質較易受到天候與外在電訊之干擾，且傳輸距離受限，因此通常得設置岸邊接收中繼站。隨後，全球通訊系統（GSM）成為觀測資料傳輸的主流，GSM 是屬於先進的數位傳輸系統，不但耗電量低、通訊品質佳且不易受天候影響，但其傳輸成本高於無線電方式。近年，衛星通訊崛起，透過衛星通訊傳輸觀測資料無死角，離岸遠近均可進行，然而其通訊費為上述幾種常見通訊方式中最高者，未來低軌衛星（Low Earth Orbit, LEO）商業化之後，對於海洋觀測將會帶來劃時代的提升。

近海水文觀測儀器

海氣象資料浮標

資料浮標（Data Buoy）是一座海上的無人海氣象環境監測站，是國立成功大學近海水文中心參考美國海洋大氣總署之觀測方法，依據台灣海域環境特性所改良設計的本土化海氣象觀測系統。資料浮標具有直徑 2.5 公尺、高度 5.0 公尺，總重約為 1,300 公斤的碟狀外型，如圖 3。為了觀測作業與海上航行船隻的安全，資料浮標設置有航行警示燈與雷達反射器。同時，資料浮標下方裝設有錨鏈連接錨錠，固定於底床，使浮標僅能在一定範圍內自由漂浮，進行各種海氣象觀測作業。資料浮標可以佈放於任何水深海域，是一座多功能的工作平台，依據需求可以裝置各種量測儀器，在海上可以進行全自動長期觀測作業，觀測資料即時傳輸至監控中心，透過資料品管程序確保觀測資料品質^[3]。

資料浮標具有觀測波浪（波高、週期、波向、波譜）、風（風速、風向、陣風）、海流（各水層的流速、流向）、氣壓、氣溫、水溫等基本功能，波浪與風之取樣時間為十分鐘，海流為連續觀測，氣溫、氣壓、水溫之取樣時間為一分鐘，取樣頻率均為 2 Hz，由於資料浮標具有模組化之設計，可以依據需求，加裝水質、雨量、聲音等觀測儀器。在海洋與海岸工程設計中，波浪是最複雜也是最重要的外力之一，實際



圖 3 海氣象資料浮標（前景）與海氣象觀測樁（遠景）

海面上，由於波浪在空間及時間上呈現極度的紛紜性，為了描述複雜的紛紜波浪，通常採用波高或週期的特徵量（波浪統計值）來描述波浪狀態。資料浮標係量測水粒子不同方位之加速度，其波浪統計值由波譜（spectrum）計算而得，所得之波浪統計參數稱之為示性波高（significant wave height, H_s ）及示性週期。

海上觀測樁

海上觀測樁是一座固定於海上的海洋環境觀測平台，其外觀設計如圖 3，觀測樁具有獨立之電力系統、通訊設備與資料收錄系統，一般而言，觀測平台通常距離平均海面約 10 公尺左右，提供海洋或大氣現場觀測一個研究工作空間。海上觀測樁系統與資料浮標之功能相近，亦包含有觀測儀器單元、數據自動傳輸單元、數據分析與品管單元等，唯一不同的是資料浮標適用於任意水深，然而考量建置成本，觀測樁通常僅設置於近岸具有平坦砂質底床的地區。

海上觀測樁系統之觀測項目亦與資料浮標類似，包含有波浪（波高、週期、波向、波譜）、風（風速、風向、陣風）、氣壓、氣溫、水溫等。觀測樁與資料浮標之波浪觀測原理不同，在觀測樁上係設置陣列式超音波波高計來觀測波浪，波浪分析係利用零上切法（Zero-up crossing method）分析水位時序列，計算前三分之一較大波高之平均，以及對應之週期，稱之為示性波高與週期。除此，由觀測樁上量測水位變化除了可以分析波浪之外，若經過與陸域的水準系統串接，可以視為潮位的變化，相當於設立於海上的潮位站。

潮位站

近海水文潮位觀測系統係在民國八十九年（2000）交通部科技顧問室的支持下，引進美國國家海洋大氣總署的新一代音波式水位自動觀測系統之技術與觀念，經過改良使其適用於本地環境條件，成為本土化的音波式潮位自動觀測系統（圖 4）。新一



圖 4 潮位站外觀

代潮位儀對超音波量測原理作了大幅度改良，音波於固定距離先產生第一回波，藉以精準計算當時當地音速，提高量測準確度，並加入溫度校正其音波波速，提昇潮位觀測準確度，量測精度可達 mm 等級 [6]。藉由每年定期精密的水準測量檢測及儀器定位校正，加上高精度的新一代潮位儀器所測得觀測數據，可精確監控海水面變化，對於地層下陷或氣候變遷引起之海平面上升問題提供有用的資訊 [4]。同時，新一代音波式潮位觀測系統引用歐美國家強調的「備份儀器系統」觀念，以新一代音波式水位計為主，另增設壓力式水位計為輔，以提高數據觀測成功率。如同資料浮標與海上觀測樁，潮位觀測系統已完全模組化，除了觀測潮位資料外，可依需求增加氣壓、風速、溫度等觀測儀器。

氣象站

氣象站的研發技術在前述資料浮標等研發基礎下即顯得較為單純，一般而言，氣象站的基本觀測項目包括風速、風向、氣壓、氣溫等，由於模組化的設計，可以加裝雨量、溼度、日照等量測儀器（圖 5）。近海水文中心設置之氣象站與其它近海水文觀測系統相同，具有資料即時傳輸等功能，藉由最新的科技，提供水利署等決策單位能隨時掌握即時的岸邊氣象資訊，做為防災禦潮決策之參考。

近海水文觀測因應防災禦潮之需求，必須長期且作業化地進行觀測，考量觀測成本，目前海上浮標站每一小時進行一次觀測作業，而當颱風警報發布時，可透過監控端遙控資料浮標縮短觀測時距；而海上觀測樁、氣象站與潮位站亦為每小時觀測一次。進行完成觀測後，資料透過無線電傳送回岸邊的中繼站（潮位站與氣象站直接傳回監控品管中心），再透過網際網路或電話通訊系統將資料傳送至監控品管中心，進行資料品管工作，經資料確認後送達決策單位參考，同時將觀測資料儲存於資料庫中，一般而言，自觀測開始後，決策者在十分鐘內即可獲得最新的近海水文資訊。

近海水文站網

各機關有其任務執掌，因此設置的現場觀測站的位置與觀測項目可能略有差異，但機關間為樽節國家資



圖 5 海岸氣象站外觀

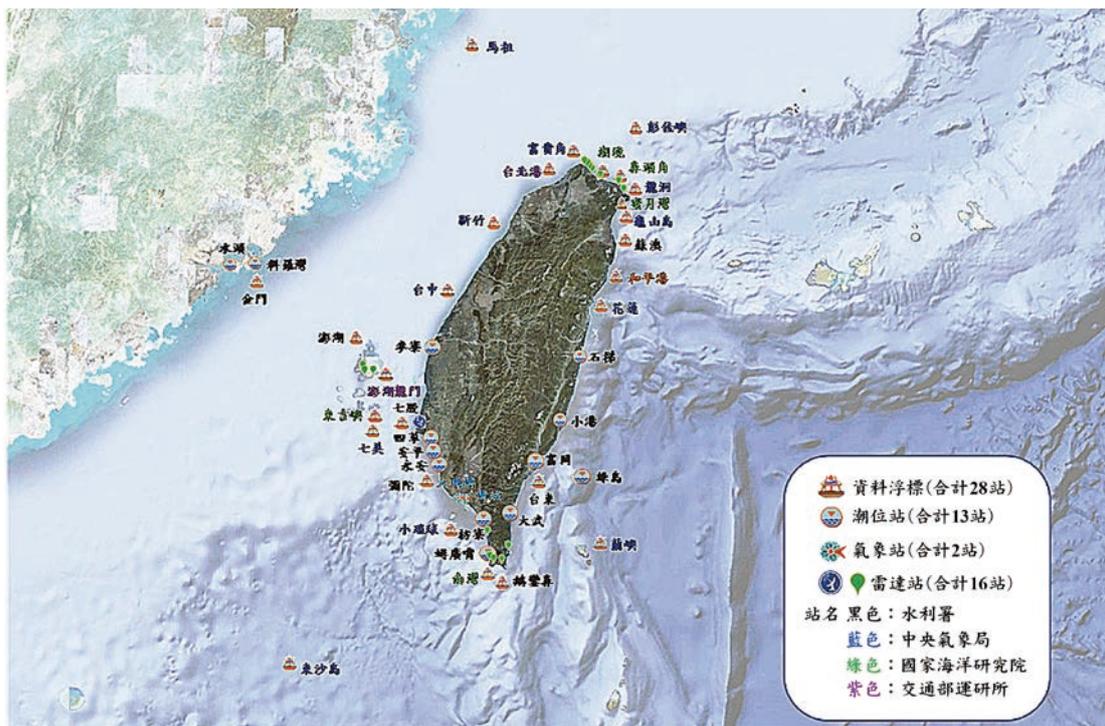


圖 6 近海水文觀測站網（2022 年 12 月）

表 1 我國近海水文站網測站清單 (僅列資料浮標站 (*) 和潮位站 (^) 兩部分)

站名	設站日期	位置 (水深)	站名	設站日期	位置 (水深)
蘇澳*	1999/09/29	宜蘭縣蘇澳區漁會北方約 5 公里水深 23 m 處	澎湖龍門*	2022/09/28	澎湖縣龍門漁港西堤外約 3.1 公里水深約 25 m 處
金門*	2000/07/25	金門縣料羅港南方約 4 公里水深 25 m 處	潮境*	2021/06/28	基隆市潮境公園東方約 0.4 公里水深約 25 m 處
澎湖*	2006/09/20	澎湖縣姑婆嶼北北西約 1 公里水深約 26 m 處	鼻頭角*	2021/06/29	新北市鼻頭角海濱公園西方約 0.9 公里水深約 32 m 處
七股*	2006/05/30	台南市七股頂頭額沙洲外海約 2.5 公里水深約 18 m 處	蜜月灣*	2021/06/30	宜蘭縣蜜月灣海水浴場東方約 4 公里水深約 31 m 處
彌陀*	2012/09/10	高雄市永安港西南外海水深 23 m 處	南灣*	2021/07/19	屏東縣南灣遊憩區南南西方約 1.5 公里水深約 28 m 處
鵝鑾鼻*	2000/11/17	屏東縣墾丁香蕉灣南方 3 公里水深 39 m 處	東吉嶼*	2021/07/20	澎湖縣東吉嶼東吉漁港西南方約 2.6 公里水深約 40 m 處
台東*	2010/09/14	台東市焚化爐外 1 公里水深 30 公尺處	料羅灣^	2000/11	金門料羅灣港外港區新一號碼頭
花蓮*	1997/05/21	花蓮縣七星潭外海離岸 1 公里水深約 20 m 處	水頭^	2003/09	金門水頭商港西防波堤碼頭
新竹*	1997/03/11	新竹縣海山漁港外海, 離岸約 6 公里水深約 27 m 處	蟳廣嘴^	2000/10	屏東恆春山海漁港南岸碼頭上
龍洞*	1998/10/13	新北市貢寮區龍洞遊艇港外海, 離岸約 1.0 公里水深約 32 m 處	富岡^	2000/10	台東市富岡漁港南岸碼頭
小琉球*	2003/10/03	屏東縣小琉球海子口外海距岸約 0.7 公里水深約 82 m 處	石梯^	2001/11	花蓮石梯漁港東外突堤碼頭
東沙島*	2010/05/25	高雄市西南外海 230 公里處水深約 2,600 m 處	綠島^	2001/10	綠島南寮漁港北岸碼頭
馬祖*	2010/08	連江縣馬祖東引島東南方約 4 公里水深約 58 m 處	永安^	2003/09	高雄永安中油 LNG 港防波堤頭
七美*	2015/07/16	澎湖縣七美鄉南方 48 公里水深約 105 m 處	大武^	2003/09	台東縣大武漁港南側防波堤
富貴角*	2015/07/29	新北市富貴角外海水深約 31 m 處	麥寮^	2005/10	雲林台塑六輕麥寮專用港西防波堤
蘭嶼*	2017/9/26	台東縣蘭嶼軍艦岩南南西方 0.9 公里水深約 38 m 處	小港^	2009/10/09	台東縣小港漁港內防波堤
彭佳嶼*	2019/07/09	基隆市彭佳嶼西南方 1.5 公里水深約 115 m 處	枋寮^	2021/10/7	屏東縣枋寮鄉枋寮漁港安檢所附近
台中*	2019/08/22	臺中港西南方海域水深約 19.2 m 處	四草^	2011/09/29	台南四草漁港出口堤岸
龜山島*	2002/05/15	宜蘭縣龜山島龜尾端西方 1 公里水深約 22 m 處	安平^	2021/05/14	位於安平漁港航道北側安檢所附近
台北港*	2021/01/14	新北市台北港北堤堤頭西北方約 1.5 公里水深 24.5 m 處			

源、資料共享, 因此, 在建站時共同協調, 以最省的國家經費建置站網, 且能滿足各機關的任務需求^[7,8]。我國的近海水文站網主要由中央氣象局、水利署、國家海洋研究院、港灣技術研究中心等機關共同建置, 如圖 6 所示, 目前共計有 28 座資料浮標站、13 座潮位站、2 座岸邊氣象站與 16 座微波雷達站, 測站位置自近岸水域 (如七股浮標位於 18 米水深) 至外洋海域 (如東沙浮標位於 2600 米水深); 測站類型也包含了單點實測站與岸基遙測站; 觀測項目更是包含了海洋物理要素 (風、波、潮、流、氣壓、雨量、濕度、日照)、海洋化學要素 (溫、鹽、葉綠素、溶氧、pH 值) 與其它要素 (如聲音、輻射濃度等)^[9,10], 測站清單如表 1 所示。

結論與建議

過去海域水文觀測較少被重視, 自民國八十六年 (1997) 開始出現了有系統性、有標準作業程序、有品管系統的近海水文觀測站, 迄今 (2022 年 12 月) 已累積建置超過 50 個測站, 有位於岸邊的遙測站, 大部分則是與海水有接觸的現場測站, 觀測海洋物理要素 (風、波、潮、流、氣壓、雨量、濕度、日照)、海洋化學要素 (溫、鹽、葉綠素、溶氧、pH 值) 與其它要素 (如聲音、輻射濃度等)。過去二十餘年來, 近海水文觀測站網的作業標準一致、品管標準一致、資料格式亦一致, 為目前我國最長期的海域水文資料庫, 實有持續運營、更新擴建之必要。

誌謝

近海水文觀測能順利完成、站網能成功建置, 歸功於經濟部水利署、交通部中央氣象局、國家海洋研究院、港灣技術研究中心等政府機關的支持, 以及國立成功大學近海水文中心所有同仁的努力實現, 在此致上無限的謝意。

參考文獻

1. 經濟部 (1997), 台灣地區水文觀測現代化整體計畫核定本。
2. 水利署 (2003), 近海水文網基本站之建置。
3. Doong, D.J., Chen, S.H., Kao, C.C., and Lee, B.C. (2007), Data Quality Check Procedures of an Operational Coastal Ocean Monitoring Network, *Ocean Engineering*, 34, 234-246.
4. Lin, Y.P., Huang, C.J., Chen, S.H., Doong, D.J., Kao, and C.C. (2017), Development of a GNSS Buoy for Monitoring Water Surface Elevations in Estuaries and Coastal Areas. *Sensors*, 17, 172. doi:10.3390/s17010172
5. Doong, D.J., Lee, B.C., and Kao, C.C. (2011), Wave Measurement using GPS Velocity Signal, *Sensors*, 11, 1043-1058.
6. 楊博堯、董東璟、陳盈智 (2018), 台灣海岸長期實測暴潮分析, 第 40 屆海洋工程研討會論文集, 高雄, 第 100-105 頁。
7. 吳立中、董東璟、滕春慈、吳益裕 (2021), 臺灣海域作業化海氣象資料浮標監測網, 海洋及水下科技季刊, 第 31 卷, 第 3 期, 第 9-14 頁。
8. 林演斌、蘇俊明、王仲豪、董東璟、高家俊 (2008), 海岸防災水情資訊系統, 海洋及水下科技季刊, 第 18 卷, 第 3 期, 第 47-55 頁。
9. Doong, D.J., Peng, J.P., and Babanin, A.V. (2019), Field investigations of coastal sea surface temperature drop after typhoon passages. *Earth System Science Data*, 11, 323-340.
10. Doong, D.J., Fan, Y.M., Chen, J.Y., and Kao, C.C. (2021), Analysis of Long-Period Hazardous Waves in the Taiwan Marine Environment Monitoring Service (TwMEMS). *Frontiers in Marine Science* 8:657569. doi: 10.3389/fmars.2021.657569



利用微波雷達回波反算近岸海域地形

吳立中／國立成功大學近海水文中心 副研究員

馬家麟／經濟部水利署水文技術組 科長

賴堅戊／國家海洋研究院海洋產業中心 研究員

王良生／國立成功大學近海水文中心 助理

近岸海域地形是近岸水動力、海岸溢淹、數值模擬等課題或工具亟需的資料，它具有高度時變特性，過去的觀測時常以小艇或遙控船進行測量，不但耗時較久，費用也較高且受海況影響有時不易作業。本研究提出一個以微波的 X-Band 雷達回波解算近岸海域地形的辦法，它是透過分散關係式反算獲得。本文說明雷達遙測原理，並舉在臺南鹽水溪橋進行實測驗證為例說明，驗證結果顯示了反算地形的水深誤差在 1 米以內，考量雷達的機動性與觀測結果的準確性，未來利用微波雷達反算近岸海域地形成為可行。

前言

近岸海域水深地形資料是探討水動力變化、海岸侵蝕、海堤溢淹等課題之必要數據，也是數值模擬亟需的輸入資料。過去在不同政府部會的努力下，陸續對臺灣近岸海域水深地形進行現場調查研究。然而由於海洋水體的持續流動，易造成海底床沉積物的搬移，進而導致海底地形的持續變化。時常在一個颱風侵襲前後海域地形即有顯著的不同，倘若缺乏系統性、全面性與持續性的調查，則無法全面地掌握海底地形實際狀況。

由於聲音是水下傳遞最有效的能量形式，目前主流之海洋水深地形調查設備多是基於水下聲波的發送與回波接收時間差再搭配水中聲速來反推水面到海底床間之距離。如圖 1 所示，透過使用聲波之波束寬度不同或是增加波束的數量，即可更有效進行大範圍水深地形之量測工作。側掃聲納還可以提供海床的聲波散射強度影像，對於海底地貌的探勘有很好的成效。

透過聲波量測水深地形的特點，需搭配船艦或其他適當之載具出海執行觀測作業。現場聲波量測可取得極為準確的水深地形資訊，然而海上作業需要搭配船艦來

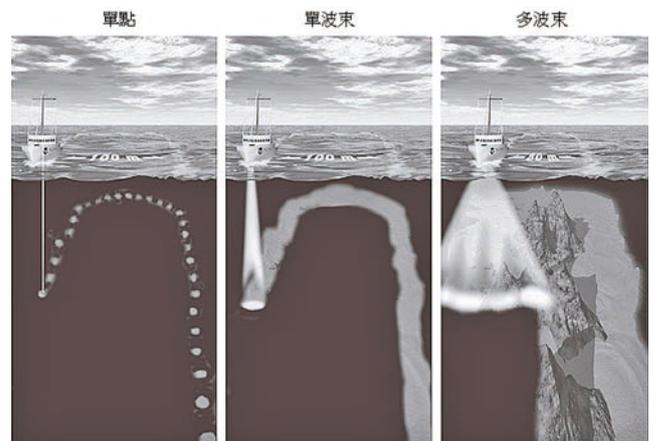


圖 1 各種現場水深地形聲學量測技術的海底觀測範圍比較 (資料來源：Dierssen and Theberge [1])

執行作業，其所耗費之成本，包括時間與人物力都很可觀。臺灣位處熱帶與亞熱帶交界處，海氣象條件複雜。每年夏、秋兩季恐受颱風威脅，冬季則受東北季風之吹拂，不利於中、小型船艦之海上量測作業。在近岸處的淺水區域，中、大型船艦在進行量測作業時，則有擱淺之風險。除了船艦在海上的作業安全有疑慮之外，海面波動對量測作業之影響，也是現場聲學量測所必須克服

之技術課題。如圖 2 所示，船艦在海上進行現場聲學量測作業時，必須持續修正觀測作業時刻的潮位變化以及波浪對船艦晃動所造成誤差影響。

為降低現場水深地形調查之作業風險與困難度，進而提升海域環境調查之作業效率，可仰賴非接觸式遙測科技。非接觸式觀測亦即遙測，一般泛指量測設備不與目標物直接接觸，藉由偵測目標物反射或散射的能量，據以判讀目標物物理性質的技術。相關遙測科技於二戰之後開始蓬勃發展，海洋的探測也開始走向遙測領域^[2,3]。在 1960 年代前後美蘇開始競相發射衛星開始，透過衛星或其他航空載具進行海洋遙測之方式被大幅應用於各種不同領域，其包括了波浪、全球海平面、海溫等海表面物理量之大空間範圍監測。由於遠離陸域的外洋水域空間尺度範圍大，衛星遙測在這樣的海洋環境研究上具有極大之潛力，早在 1970 年代德國研究團隊就嘗試應用衛星影像解算海面波浪參數^[4]。後續有許多研究團隊提出不同的衛星遙測影像演算技術，嘗試從衛星影像中解析不同的海洋環境特徵。

雷達 (Radio Detection and Ranging, 簡稱 Radar) 是透過發送特定頻率電磁波至目標區域，再同步接收目標區域內存在物體所反射以及散射之電磁回波，藉以獲取目標物資訊的一種觀測技術。雷達原被用來追蹤目標物，其實雷達訊號亦可用來分析海洋環境資訊。當雷達應用於海上船艦航行之用途時，海面雷達影像上所呈現之雜斑 (sea clutter) 是雷達電磁波與海水面交互作用下的所產生之現象。因海面雜斑易影響海上實際目標物之判識，商用雷達主機通常會設置濾波功能，將雜斑視為雜訊而濾除。但在海洋環境探測之研究領域，海面雜斑正是學界所感興趣而欲取得之訊號，也是解算水深地形的關鍵。

隨著海洋遙測技術的進步與發展，國內外皆有許多學者開始投入雷達遙測海表面影像的分析及其後端應

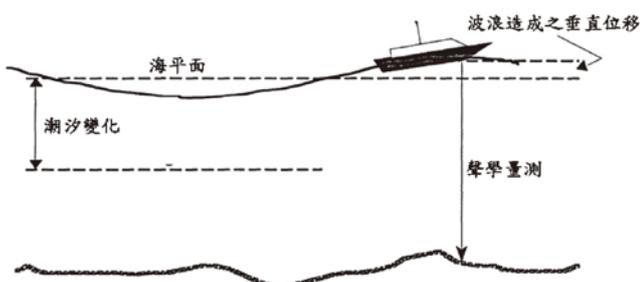


圖 2 現場聲學量測所必須克服之海面波動影響 (資料來源: Godin^[5])

用等研究議題，並輔以海洋相關理論，從雷達回波資訊中計算出風、浪、流等海氣象參數。不同頻段的雷達電磁波，可應用於不同領域的海洋遙測，國際上雷達觀測海洋環境之技術研發於近年來發展迅速，已達到實用階段。如國外海洋科學界發展出利用高頻 (HF) 雷達進行海表面流場的觀測，最大觀測範圍可達數百公里。相較於高頻雷達適用於大範圍海域的觀測，航海雷達設備大多使用 X-Band 之波段，此一電磁波段適合在小尺度區域內進行高空間解析度的海洋環境觀測。X-Band 電磁波在各種領域的應用廣泛。諸如：無線通訊、天氣探測、飛行目標監測等。在海上，因 X-Band 電磁波可精準定位不同方位之目標物，且能有效在海上目標物造成反射，進而在雷達影像中呈現出目標物，已成為航海雷達設備最常被使用之電磁波段。若將 X-Band 雷達設備架設於海岸地區，也就是岸基 (land-based) 雷達之型式，可連續不間斷地擷取空間範圍內的海面波紋特徵，屬於一種兼具一維度時間域與二維度空間域資訊的觀測技術。有鑑於 X-Band 雷達應用於海洋環境探測之優勢，國內也已開始投入此一遙測技術之相關研究^[6-15]。圖 3 顯示幾種遙測技術的優勢與其使用環境條件限制，針對航海雷達觀測技術，其空間解析度為公尺等級，而所能量測的水深範圍也在數十公尺之內，本文即是在發展以 X-Band 雷達反算近岸海域地形之技術。

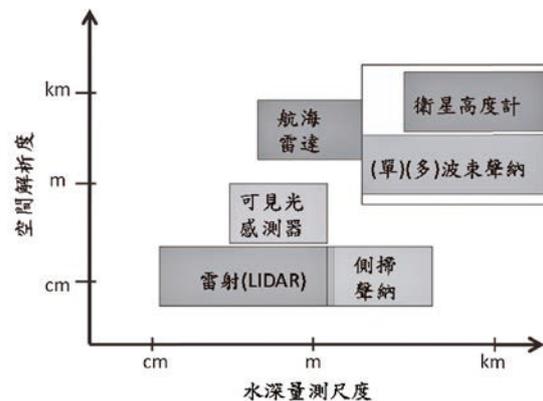


圖 3 各種水深地形量測技術的量測能力 (資料來源: Dierssen and Theberge^[11])

微波雷達觀測原理

本文使用的 X-band 雷達為一般船艦導航用之雷達，其硬體元件架構包括發射端、接收端兩部分。如圖 4，雷達發射機會產生一短暫時間之電磁脈衝波，透過雷達天線上的發射陣列點將電磁脈衝之能量聚成細束狀，並朝

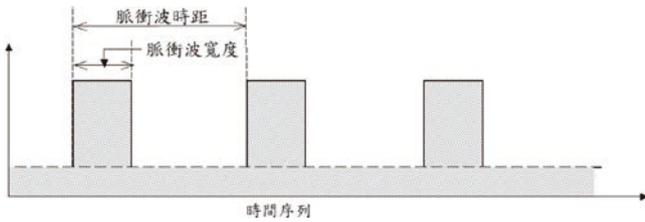


圖 4 雷達所發射之脈衝訊號示意圖

指定之方向發射。電磁波碰觸到位在此方向上的障礙物或是物體而反射或散射。反射或後向散射之電磁回波能量被雷達天線所接收，再傳送至接收機。一般而言，由天線送達之電磁回波訊號通常已相當地微弱，需要透過訊號放大技術將微弱之訊號進行增幅。不同用途的雷達會再針對增幅後的訊號進行不同形式的加工處理，藉以透過最有效之方式取得監測區域之電磁回波特徵。雷達探測距離遠近則由脈衝重複週期來決定，脈衝重複週期為前一個脈衝主波與後一個脈衝主波之相隔時間，其決定了雷達的最大測距。假定有一個目標離開雷達站非常遠，雷達仍可以收到從該目標反射回來的信號，不過回波可能是出現在第二個脈衝主波發射之後，如此則無法有效辨識出此一極遠目標物的真實距離。雷達測定的最短距離與雷達的發射脈衝寬度有關，當目標物離雷達站非常近，主波和回波可能相互靠攏合而為一，使無法分辨主波與回波，亦即無法測出很近的目標，此即為所謂的盲區。脈衝寬度較窄的雷達，其盲區會相對地較小。脈衝寬度除了和所能測定的最短距離有關外，還決定雷達的徑向之鑑別能力。譬如有二個目標，彼此間的距離小於脈衝寬度，那麼二個目標在螢光屏上的回波就合而為一，這樣就無法辨別到底是一個目標或兩個目標。脈衝的寬度愈狹窄，雷達的空間解析度就愈高。本研究所使用的雷達脈衝寬度為 70 ns，其對應之空間解析度可分辨出觀測範圍內二個徑向距離相距 10.5 m 的目標物。

要決定目標物的空間位置，除了要掌握目標物距離外，還需要確認目標物與雷達之間的方位角。由於航海用 X-band 雷達天線是屬於指向性天線，其發射的能量會盡可能集中為一波束，並向一個方向傳播。天線能量發射的角度大小稱為波瓣角。波瓣角愈小，就表示天線的方向性愈好。利用天線的指向性，可以測定出目標物所在的方位角，本研究所使用雷達的波瓣角於水平方向約 1.2°。

電磁波與海水面之間所產生的回波機制，已可歸納為兩種主要的物理現象。分別是鏡面反射 (Specular

reflection) 與布拉格散射 (Bragg backscattering)。當海面起伏大或波浪大時，較大波陡 (wave steepness)，也就是海浪波面的傾斜特徵讓海面形成類似鏡面之功能，將低掠角 (low grazing angle) 之雷達波射向鏡面產生反射。學界將這樣的雷達回波機制稱為 Tilt modulation，也就是不同傾角的波面對電磁波產生不同的反射現象。另一種電磁波與海水面之間的回波機制為布拉格散射 (Bragg Scattering)，當電磁波長與海面波動之波長滿足特定之比例關係時，電磁波會與海面波動的幾何形狀產生共振而導致強烈之回波。一般而言，雷達波的布拉格散射與主導海面電磁回波的機制 -Hydrodynamic modulation 有關。波浪在傳遞的過程中，水面下的水粒子也持續在運動。因迎波面與背波面水粒子運動方向之差異，造成迎波面上毛細波 (capillary wave) 的輻合 (convergence) 效應，進而增強了迎波面上的粗糙度。然而在背波面上的水粒子運動方向會造成背波面產生輻散 (divergence) 效應，致使背波面的毛細波減少，背波面會相對較迎波面平滑。而這些海面上的毛細波就是 X-band 電磁波產生布拉格散射 (Bragg scattering) 的主因。根據布拉格散射理論，當電磁波長 λ_r 與海面波長 λ_w 若滿足式 (1) 之數學關係時，電磁波與海面波動交互作用會產生較強烈的電磁波散射。

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2 \cos \theta_r} \quad (1)$$

上式中 θ_r 為雷達的觀測掠角。相較於衛星或其他空載方式，雷達無論是架設在岸邊或是船艦上的高度受限，電磁波路徑與海平面之間的夾角較小，也就是低掠角之狀況。此時 $\cos \theta_r \approx 1$ 。也就是說，海面波長條件為電磁波長的一半時就會產生布拉格散射。事實上，微波的電磁頻帶範圍很廣，介於 0.3 GHz ~ 300 GHz。X-Band 只是眾多微波頻段中的其中之一。X-Band 的頻率介於 8 GHz ~ 12 GHz 之間，換算其電磁波長則介於 3.75 cm ~ 2.5 cm 之間。一般航海雷達設備所選用的電磁波頻率大多為 9 GHz 左右，其對應的電磁波長約為 3 cm。在低掠角的條件下進行雷達觀測，其布拉格散射的波長條件約為 1.5 cm。有就是風之能量作用於海表面初期所生成的毛細波。對 X-band 雷達的工作波長而言，由於海面普遍存在的毛細波與 X-band 電磁波長之間所存在的布拉格散射關係，X-band 雷達相對於其他波段雷達於海面能有較好回波散射效果，進而在雷達影像中呈現出清晰之海面波紋特徵。

地形反算原理

由於雷達所發射之電磁波並無法穿透海洋水體抵達海底床，利用雷達技術獲取水深資料的原理是透過偵測海表面的波浪特徵來反算出水深值。波浪分散關係式 (wave dispersion relation) 描述出波浪因水深影響所產生變化之數學關係，是從海洋遙測波場影像解算水深資訊的關鍵方程式。

X-band 雷達遙測所得之海表面影像中包含有海面波浪的資訊於其中。透過波譜轉換理論能將三維海洋影像序列 $I(x, y, t)$ 轉換成三維度之影像波譜 $S^{(3)}(k_x, k_y, \omega)$ ，其中包含了波浪角頻率 ω 以及波數 $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 的資訊於其中。透過式 (2) 的波浪分散關係式，可利用波浪角頻率 ω 以及波數 \vec{k} 值解析出遙測影像區域的水深值 d ：

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (2)$$

式 (2) 中含有兩項未知數 - 水深 d 以及流速 \vec{U} 。圖 5 呈現出水深對波浪分散關係之影響。理論上透過單一組分散關係式無法解算出兩項參數，但水深 d 以及流速 \vec{U} 對於分散關係曲線的影響，分別是在低頻帶以及高頻帶。為避免海流影響到水深之解算，在應用式 (2) 時，需針對其低頻項進行分析與計算，藉此將海流值視為可忽略，方可獲得準確的資訊。為能更快速有效進行計算，Bell [16] 調整了分散關係式之表示方式，從中求解出水深資訊：

$$d = (L_0 / 2\pi)(C / C_0) \tanh^{-1}(C / C_0) \quad (3)$$

上式的 L_0 與 C_0 分別為深水區波浪的波長與相位速度。根據線性波理論，可透過波浪週期 T 推導出：

$$L_0 = gT^2 / 2\pi \quad (4)$$

$$C_0 = gT / 2\pi \quad (5)$$

式 (3) 的 C 為波浪相位速度。根據式 (3) 的數學關係可知，如何從雷達影像序列解算不同觀測位置的波浪相位速度，是求取海域水深資訊的關鍵。從影像序列資料計算特徵物速度的方法頗多，Bell [16] 曾利用影像序列中連續海面波紋影像的交錯相關分析 (cross-correlation analysis) 解算出波浪相位速度。Chuang and Wu [17] 則曾提出透過小波轉換數學理論計算影像能譜，再從影像譜中解算出波浪的相位速度。如圖 6 的等值線分布圖所示，為在固定角頻率條件下的雷達實測影像譜之能量密

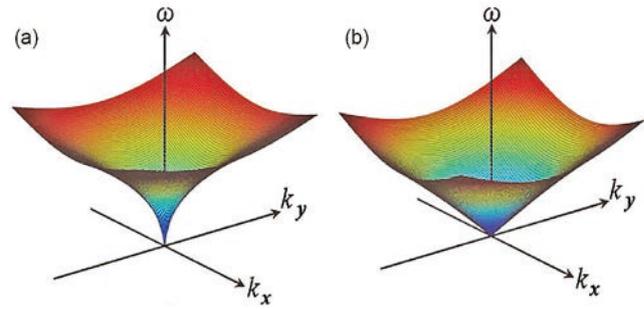


圖 5 水深條件對波浪分散關係之影響：(a) 深水條件；(b) 淺水條件

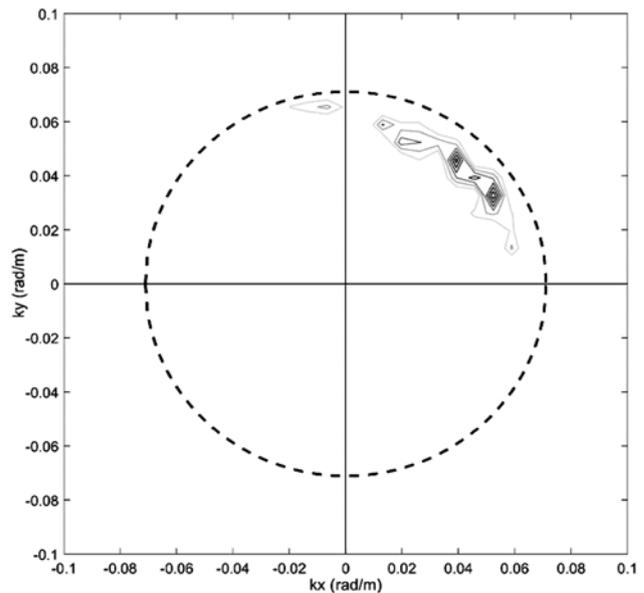


圖 6 雷達實測影像譜之能量密度分布 (固定角頻率條件)

度之分布特徵。圖中的圓形虛線框標記出深水條件下的波浪分散理論關係。由於雷達實際觀測區域為近岸淺水區域，致使能量密度分布之波數條件會與深水波浪分散理論關係之波數條件不同。透過雷達實測影像譜之尖峰能量密度所對應之波數資訊，搭配已知的角頻率 (ω) 條件，可計算出波浪相位速度 C 。

有別於前文所討論的交錯相關分析與小波轉換理論，本研究利用希爾伯特轉換 (Hilbert transform, HT) 作為波浪相位速度解算之依據。為便於討論，本文先將訊號簡化成單一維度進行討論。根據希爾伯特轉換數學理論，一維度訊號 $s(t)$ 的希爾伯特轉換可定義如下：

$$H\{s(t)\} = s(t) * (1/\pi t) \quad (6)$$

上式的符號 $*$ 代表函數之摺積 (convolution) 運算。根據希爾伯特轉換之理論，一維度訊號的瞬時相位 (instantaneous phase) 可透過訊號與其希爾伯特轉換後的關係來獲得：

$$\phi_i(t) = \arctan\left(\frac{H\{s(t)\}}{s(t)}\right) \quad (7)$$

一維度訊號的瞬時角頻率則可進一步透過訊號瞬時相位的微分求得：

$$\omega_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (8)$$

前述是透過希爾伯特轉換解析時序列訊號，並進一步解算出訊號的瞬時角頻率資訊。針對二維度空間影像，也就是本文所使用之海面雷達回波影像則可透過希爾伯特轉換，分別解析空間域中的 x 方向與 y 方向訊號，從中求解出空間域內所對應的局部 (local) 相位資訊，再進而求解出 x 方向與 y 方向的局部波數 k_x 與 k_y 。在影像處理領域， k_x 與 k_y 也被稱為空間頻率 (spatial frequency)。根據上述方法，求解出波浪瞬時角頻率 ω 以及局部波數 \vec{k} 的資訊，再透過下式解算出雷達觀測區域內不同空間位置的相位速度^[18]：

$$C = \omega / |\vec{k}| \quad (9)$$

透過上式，從雷達影像序列中解算出相位速度資訊之後，即可透過式 (3) 的數學關係解算出雷達觀測水域的水深資訊。

實例驗證

本文之雷達影像案例為 106 年 6 月 2 日於臺南鹽水溪河口所取得^[19]。由於臺南四草大橋為鄰近區域的制高點，雷達設備架設在四草大橋上進行觀測試驗，如圖 7 所示。圖 8 則為雷達回波圖之一例。

根據前文之方法，針對臺南鹽水溪河口所取得之海面雷達影像進行水深地形資訊的解算，其結果如圖 9 所示，解算之水深範圍大多在 15 m 以下。為能確認雷達



圖 7 現場雷達作業情形 (106 年 6 月 2 日)

解算水深結果之準確程度，蒐集了 105 年 5 月現場船測資料進行比對。比對結果如圖 10 所示，雷達解算水深結果與現場船測水深資料之間的相關係數為 0.91，均方根誤差則約 1.0 m。

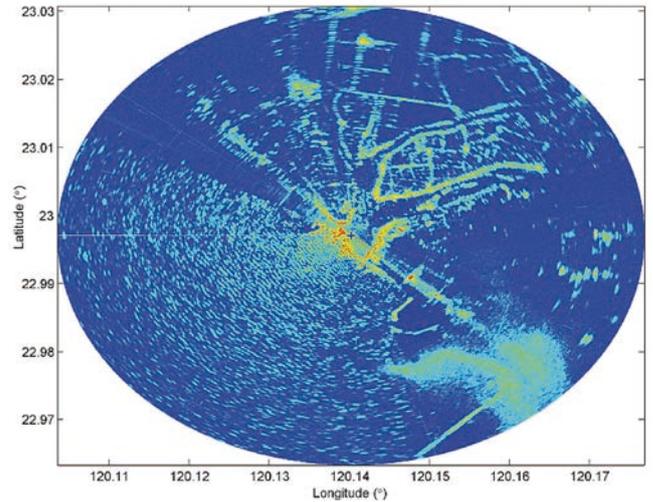


圖 8 雷達回波圖之一例 (106 年 6 月 2 日)

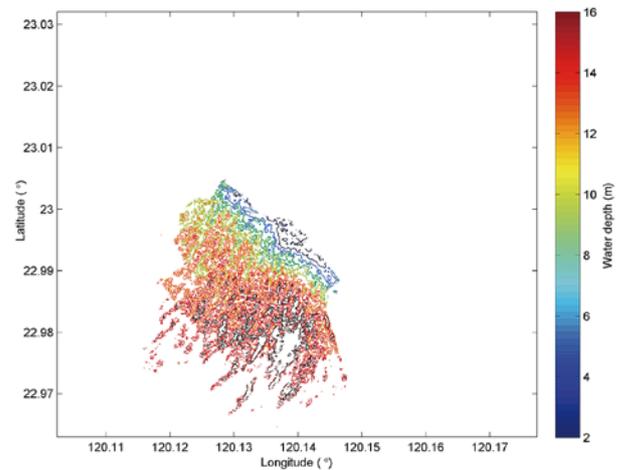


圖 9 鹽水溪河口案例之水深地形解算結果

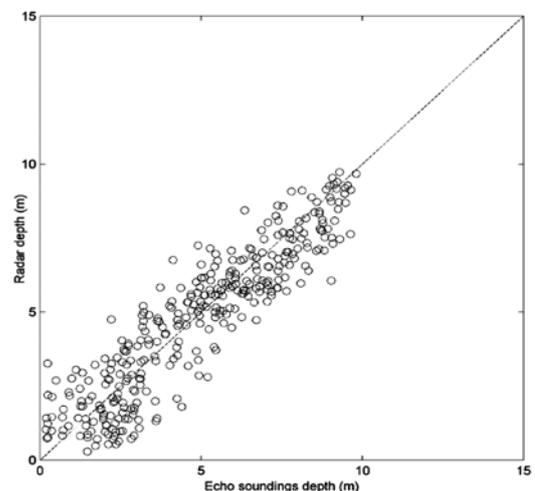


圖 10 鹽水溪河口案例之水深地形比對結果

除了上述所述之臺南鹽水溪口海域地形反算案例外，研究團隊還另外在多處地點進行測試研究，均獲得良好的結果，顯示根據微波雷達反算海域地形確為可行。少部分案例有較大偏差的原因研判是海面回波的強弱（即波紋清晰度）所影響，如前文所討論，9 GHz 等級的電磁波長，也就是 X-band 的波長易與海面上的毛細波產生布拉格共振，進而更有效獲得後向散射之電磁回波，並從雷達影像中獲得海面波浪紋路之圖像。依據風浪理論，海面風速約 2 ~ 3 級風以上即可引發海面毛細波。此外，根據電磁回波理論，雷達電磁波發射之方位若與波向反向，也就是 upwave 的情況下，雷達電磁波可鏡面反射回雷達天線端的機率較高，進而在雷達影像中產生較明顯的波紋，作為解算高準確度水深地形資訊的依據。然而，若雷達電磁波的行進方向與波浪行進方向接近正交（兩者方向相差約 90° 或 270°）時，雷達電磁波鏡面反射的機制不易產生或是回波會反射至其他方向，相對電磁波返回雷達天線端的機率較低，其所呈現影像的波紋則相對會較為不清晰。雷達回波強度因距離衰減的現象也會造成距雷達天線較遠處的波紋較不清晰。此外，若現場浪高過小，也將造成海面回波機制不足，致使影像中波紋會不清晰。從現場試驗所取得之影像波紋特徵可發現，在某些觀測區域的影像中的波紋特徵較為不清晰，判斷是造成水深解算誤差的原因之一。

結論與建議

為了取得近岸海域水深地形資料，本研究發展以 X-Band 微波雷達反算海域地形的技術，其優勢包含有：(1) 遙測屬於空間面的觀測技術，可獲取近岸大範圍海域的水深資訊；(2) 遙測設備可設置於岸邊，適合作為長期監控作業，維護成本亦較低；(3) 發展非接觸式水深遙測技術是國際間之趨勢，投入此項技術之研發能提升國內水文觀測技術的水準。當然更重要的是其觀測結果亦具有一定之準確性，本文舉在臺南鹽水溪橋上的觀測為例顯示雷達反算結果和實測結果比對之相關係數為 0.91，均方根誤差則約 1.0 m。相較於現場量測所獲得可視為最正確的真值（ground truth）之水深資訊，X-band 雷達觀測技術雖然還無法到達與現場量測一樣的精度等級，但在岸邊遙測即可在半小時內獲取方圓數公里近岸海域範圍內的水深資訊，未來可與現場水深量測技術相互配合，獲取範圍更廣的觀測資料，提供各類水利及海岸工程所需。

誌謝

本研究承蒙經濟部水利署與國家海洋研究院補助研究經費始得以完成，特表謝意。

參考文獻

1. Dierssen, H.M. and A.E.T. Jr. (2014), Bathymetry: Assessing Methods, in Encyclopedia of Natural Resources. Volume II – Water and Air, Y. Wang, Ed., New York: Taylor & Francis Group, pp. 1-8.
2. Tucker, M.J. and Pitt, E.G. (2001), Waves in Ocean Engineering, Elsevier, Oxford.
3. Kanevsky, M.B. (2009), Radar Imaging of the Ocean Waves, Elsevier, Oxford.
4. Alpers, W. and Hasselmann, K. (1978), The two-frequency microwave technique for measuring ocean-wave spectra from an airplane or satellite, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 13(1-4), pp. 215-30.
5. Godin, A. (1998), The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems, Technical Report No. 190, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.
6. 吳立中、董東環、錢樺、高家俊 (2002)，應用岸基測波雷達於方向波譜觀測之研究，第 24 屆海洋工程研討會論文集，第 517-524 頁。
7. 吳立中、董東環、高家俊、張國強 (2004)，發展微波雷達於海況觀測之研究，海洋及水下科技季刊，第 14 卷，第 1 期，第 55-60 頁。
8. 吳立中、董東環、高家俊、曾鈞敏 (2005)，應用航海雷達於空間波場觀測之研究 – 空間波流場之分析，第 27 屆海洋工程研討會論文集，第 28-34 頁。
9. 吳立中、董東環、林家豐、高家俊，(2006)，從雷達影像萃取近岸海域表面流場之研究，海洋工程學刊，第 6 卷，第 2 期，第 81-94 頁。
10. 吳立中、董東環、莊士賢 (2008)，雷達於海洋觀測之應用，海洋及水下科技季刊，第 18 卷，第 2 期，第 3-7 頁。
11. 吳立中、董東環、莊士賢、高家俊 (2009)，航海雷達應用於海面波流監測可行性之探討，水利，第 19 期，第 4-10 頁。
12. 吳立中、莊士賢、陳云瑄、孫永大、王心怡 (2020)，X-band 雷達監測近岸海底地形的季節性變遷 – 以七股潟湖海岸為例，第 42 屆海洋工程研討會論文集，國立臺灣海洋大學。
13. 簡昭群、馬家麟、王仲豪、吳立中、陳秋份 (2017)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發，第 23 屆水利工程研討會論文集。
14. 莊士賢、吳立中、孫永大、黃瓊珠、鍾育仁、蔡昀展、鄭仁杰 (2019)，X-band 雷達於近岸水深量測精度之改良，第 41 屆海洋工程研討會論文集。
15. 陳云瑄、莊士賢、吳立中、孫永大 (2020)，以卡爾曼濾波改良 X-Band 雷達近岸水深量測誤差，第 42 屆海洋工程研討會海報。
16. Bell, P.S. (1999), Shallow water bathymetry derived from an analysis of X-band marine radar images of waves, Coastal Engineering, Vol. 37(3-4), pp. 513-527.
17. Chuang, L.Z.H. and Wu, L.C. (2014), Study of Wave Group Velocity Estimation from Inhomogeneous Sea Surface Image Sequences by Spatio-temporal Continuous Wavelet Transform, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 39(3), pp. 444-457.
18. 財團法人成大研究發展基金會（成功大學近海水文中心）編著 (2016)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發 (1/2)，經濟部水利署出版。
19. 財團法人成大研究發展基金會（成功大學近海水文中心）編著 (2017)，海堤堤前與河口水深地形非接觸式觀測科技之研發 (2/2)，經濟部水利署出版。



全國海灘環境調查與安全評估

余佳鍇／國立成功大學近海水文中心 助理

陳威成、王敘民／國立成功大學水利及海洋工程學系 博士

陳沛宏／國家海洋研究院海洋產業中心 助理研究員

廖建明／國家海洋研究院海洋產業中心 主任

為推動向海致敬政策，鼓勵人民知海、近海到進海之目標，本研究進行全國大規模的海域遊憩環境安全調查與風險評估，調查方式以現場踏勘實地調查為主，以現有資料蒐集分析和數值模擬為輔，藉由掌握海域遊憩安全環境資訊，讓民眾前往海濱遊憩時，可對當地環境與危害潛勢有所掌握，達成資訊透明目標，協助國民安全走向海洋。調查與分析結果顯示：我國共有 100 個濱海鄉鎮區，海灘型態的海岸有 307 處，考慮危險度和脆弱度因子進行評估，透過風險因子選定、風險分析、風險評量到風險處理四個階段過程，以專家問卷和模糊德爾菲法以及 AHP 權重分析法，篩選出有共識的危險度 10 項與脆弱度 12 項因子，估算各因子造成風險的影響程度，完成全台 517 處海岸區位之風險評估作業，結果顯示各類型海岸以中度風險發生機率最高。

前言

行政院於民國 109 年推出「向海致敬」政策，鼓勵人民「知海」（知道海洋）、「近海」（親近海洋）及「進海」（進入海洋），確保海洋永續發展，讓台灣因海而無限遠大。根據內政部資料，我國（含外島）海岸線全長 1,988 公里，扣除河口、港口、軍事管制區、禁止水域遊憩活動之海洋保護區以及依「水域遊憩活動管理辦法」第 6 條公告禁止之水域遊憩活動區等區位，民眾可自由前往之海岸線尚有 1,700 餘公里，國人假期前往水域遊憩比前往山區車程更短等因素導致愛海親海的趨勢顯著，政府主管機關也積極推動相關海域遊憩活動與配套措施之建設，期能提供國人安全、美好的休閒遊憩空間。

本研究團隊從水域遊憩活動面向著手，為了達成向海致敬政策中，將海域環境資訊「透明」地提供民眾週知，並把海域遊憩活動場域可能之「風險」讓民眾掌握之目標，本文目的為以現場實地踏勘方式，系統性地調查全國海域遊憩環境現況並評估其風險，風險評估所需之危險度與脆弱度因子資料藉由歷史資料分析與現場調查所得，未有資料或無法在短時間內完成調查者則以數值模擬技術取得。

全國海灘調查作業

調查項目與方法

海岸調查的目的在於掌握從事海域遊憩活動時，所需了解的地文、水文特徵以及安全設施等現況，譬如環境現況、海灘狀況、看板、救生設施、遊憩活動設施、安檢所、海巡隊與救難設施等因子，上述因子均需由現場調查獲得。而現場調查內容區分為五大類：分別為基本資料、危險度因子調查、脆弱度因子調查、其他調查及影像記錄。其中，基本資料主要記錄海灘範圍與概述；危險度因子調查包含地形、地質、環境與設施與生物；脆弱度因子調查包含環境承载力、易達性、安全設施、個人習慣、個人遊憩裝備；其他調查包含海灘海岸概況與可能影響遊憩安全之項目說明；影像紀錄則包含入口座標、基礎設施點位之平面和環景影像作紀錄。而每個調查區位除調查上述項目，團隊亦進行現場抽樣訪談，訪談的目的是在於了解遊客的遊憩經驗以及其自救能力，如遊客是否曾受有毒生物攻擊經驗及其自我評估之自救能力等，彙整後產出調查紀錄表（圖 1）。

海灘現場調查工作分為三大項，第一項為現場環境勘查，針對危險度因子之海岸型態、海岸坡度、砂礫種類、

砂礫之歧異性、環境與設施、植被覆蓋情形進行照片與點位之記錄，其中海岸坡度以 GNSS 衛星接收儀測量海灘

國家海洋研究院 向海致敬
全國海灘及釣點環境調查與安全評估作業
【海灘型態海岸】安全環境現場調查紀錄表

一、基本資料	
海灘名稱：	調查時間： 年 月 日 ~ 時
行政區： 縣/市 鄉/鎮/區	天氣： <input type="checkbox"/> 晴 <input type="checkbox"/> 陰 <input type="checkbox"/> 雨
海灘位置敘述：	海灘範圍座標：(以 4-6 個座標紀錄)
	N _____, E _____, N _____, E _____
	N _____, E _____, N _____, E _____
調查人員：	
海灘概述：	
二、危險度因子調查	
地形 <input type="checkbox"/> 已拍照記錄	
1. 海灘型態： <input type="checkbox"/> 常態斜坡沙灘 <input type="checkbox"/> 沙丘型沙灘 <input type="checkbox"/> 淹沒型沙灘 <input type="checkbox"/> 其它 _____	
2. 海灘坡度：(於主要入口處或為中心進行量測高程，並於現場量測後內業計算坡度)	
A	高灘點位 座標：N _____, E _____, 高程：_____
	潮線點位 座標：N _____, E _____, 高程：_____
	坡度：_____
3. 狀況說明：_____	
地質 <input type="checkbox"/> 已拍照記錄 (單獨砂子及整體照各一張)	
1. 海灘砂粒種類：(於主要入口處取樣比對服務建議書圖 16)	
B	<input type="checkbox"/> 泥(<62.5μ) <input type="checkbox"/> 細沙(62.5μ-0.5mm) <input type="checkbox"/> 粗砂(0.5mm-2mm) <input type="checkbox"/> 礫石(2mm-64mm) <input type="checkbox"/> 卵石(>64mm)
2. 海灘砂粒歧異性：(於主要入口處取樣比對服務建議書圖 15)	
	<input type="checkbox"/> 極純 <input type="checkbox"/> 高純 <input type="checkbox"/> 中純 <input type="checkbox"/> 不純 <input type="checkbox"/> 極不純
3. 狀況說明：_____	
環境與設施 <input type="checkbox"/> 已拍照記錄 <input type="checkbox"/> 已定位	
1. 垃圾與整潔(譬如垃圾、漂流木、廢棄物架等)：(需進行定位，並描述位置/數量分布)	
<input type="checkbox"/> 有，說明：_____	
C	區位 1
	座標 1：N _____, E _____, 座標 2：N _____, E _____
	座標 3：N _____, E _____, 座標 4：N _____, E _____
	區位 2
	座標 1：N _____, E _____, 座標 2：N _____, E _____
	座標 3：N _____, E _____, 座標 4：N _____, E _____
<input type="checkbox"/> 無	
2. 海灘上是否有有人工結構物：(需進行定位，並描述位置/數量分布)	
突堤： <input type="checkbox"/> 有，說明：_____	
	區位(記錄起始位置)
	起點：N _____, E _____, 迄點：N _____, E _____

圖 1 海灘現場調查紀錄 (節錄)

主入口的高、低潮之高程進行計算；脆弱度因子方面，則記錄海灘之寬度、小徑數量與路況、安全救生設施、警告告示牌、海岸資訊告知牌以及其它對於人員遊客會造成安全或舒適度影響的設施如步道、廁所、停車場或涼亭等基礎設施；第二項則是對現場遊客進行訪談，包含遊客曾從事幾項遊憩活動、是否具游泳能力以及有無對該海岸遊憩安全之相關經驗等資訊進行隨機問卷調查；第三項則是影像紀錄，除了針對危險度因子與脆弱度因子調查項目進行拍攝外，於各海灘之主要入口、左側及右側皆會進行前、後、左、右四方位之影像，另於主要入口處會額外以全景照相機進行環景之拍攝，記錄現場之情況。

現場調查成果

海灘海岸部分調查共完成 307 處調查作業，將各海灘調查成果記錄於現場調查紀錄表中，並將每一海灘蒐集之重要因子拍照記錄，包含海灘人工結構物、垃圾與廢棄物、植生與防風林、小徑、安全救生設施、告示牌、基礎設施和入口處平面與環境照，參照統一規則命名後按照每區位之調查表繪製 GIS 遊憩海灘的圖資供 (圖 2 左) 使遊客及主管機關更直觀的了解海灘相關設施之位置分布。為了將資訊大眾化，國家海洋研究院 (以下簡稱國海院) 將調查結果套疊至國海院的海洋遊憩風險資訊平臺 (GoOcean) 使調查資訊能有更佳的途徑提供給遊憩民眾參考 (圖 2 右)。

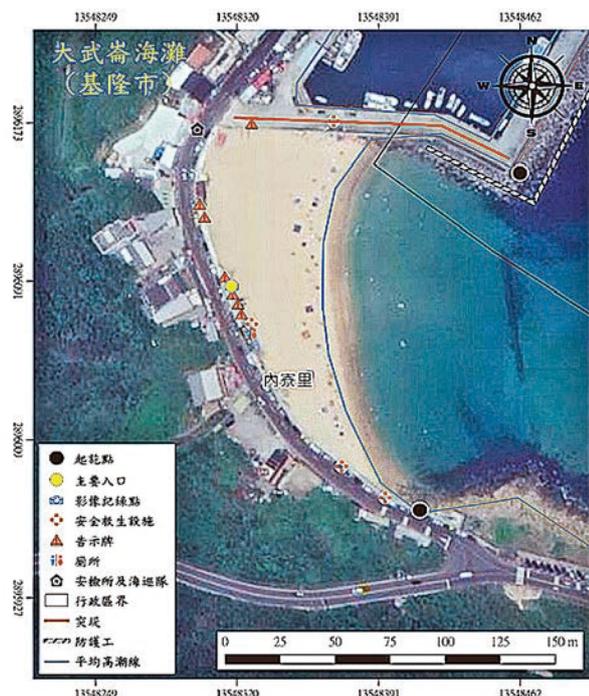


圖 2 基隆市大武崙海灘 GIS 圖資 (左)，圖資套用至國海院 GoOcean 平台應用成果 (右)

其它調查與資料蒐集分析

團隊在調查同時也蒐集了其它的資料，如海洋遊憩活動救難資料、歷史資料（波潮流資料、海底地形資料、水質與生態資料、社會經濟資料、暴潮與海平面資料）及數值模擬等，利用這些資料了解各縣市遊憩區域的水文、地文、歷史救難案件機率及醫療院所的遠近等。

依海洋遊憩活動救難資料為例 103 至 108 年各縣市地區發生意外事件次數、傷亡人數和海岸線長度比例分析意外事件稠密程度和嚴重性，如圖 3 所示，在嚴重性上全台平均每一起落水事件會造成 1.3 人損傷，其中以金門縣和苗栗縣最嚴峻，平均每一次意外事件均會超過兩人以上傷亡，其次新北市和臺南市嚴重性亦有 1.5 人 / 次以上，而單一意外事件事故人數最多的前三名均是發生在新北市；而在事案稠密程度上，全台平均每 5.4 公里就有一件意外事件的發生，其中以基隆市和新北市意外事件發生稠密程度最高，分別為 0.2 km/ 件和 0.7 km/ 件。若從風險評估進行分析，以金門縣為例其嚴重性位居各縣市之冠，代表事件發生後之嚴重性較高，故潛在之脆弱度可能較高；而新北市無

論是嚴重性或是事件稠密程度均位於各縣第二，則代表該縣市是潛藏極高的風險層級。

然意外發生時的海氣象經統計長年海氣象累積機率結果與意外事件之相關性，結果如圖 4 至圖 6 所示，在事件發生當下示性波高值大於累積機率分布 50% 的佔所有案例有 185 件，超過累積機率 75% 的有 84 件，而超過 90% 累積機率的有 32 件，該結果顯示其實無論在何種波高條件下均有意外事件發生，而風速和表面流速的情形與示性波高相似，在超過長期統計累積機率的 50% 佔所有事件的四成左右。綜整上述，從意外事件發生當下之海氣象資料可大致歸納出事件發生時之臨界值，藉此結果可針對不同海氣象條件進行風險分級標準劃分，但即便是在風和日麗的情況下亦不能稱之為毫無風險或無危險性，因此遊憩者在從事水域遊憩活動時無時無刻均是潛藏風險的。

海灘環境風險評估

風險評估方法

聯合國災難救難協調員辦事處 (UNDRO^[1]) 提出之災害風險公式：「風險 (Risk) = 危害度 (Hazard) × 脆

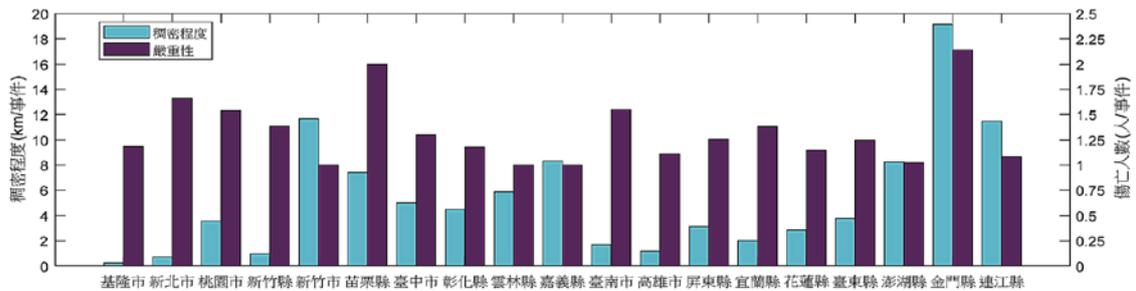


圖 3 103~108 年海域意外事件嚴重性與稠密性分析結果

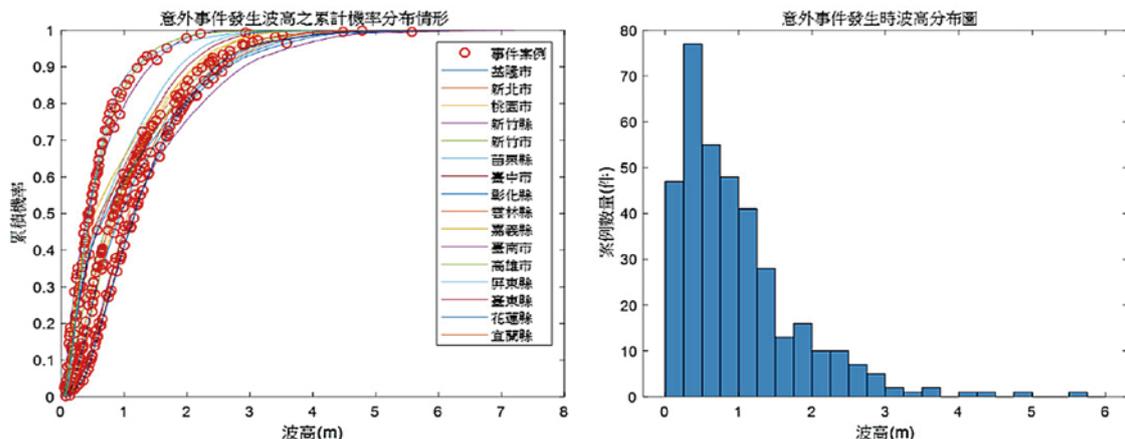


圖 4 各縣市意外事件 103~106 年波高和長年波高統計累積機率分布圖

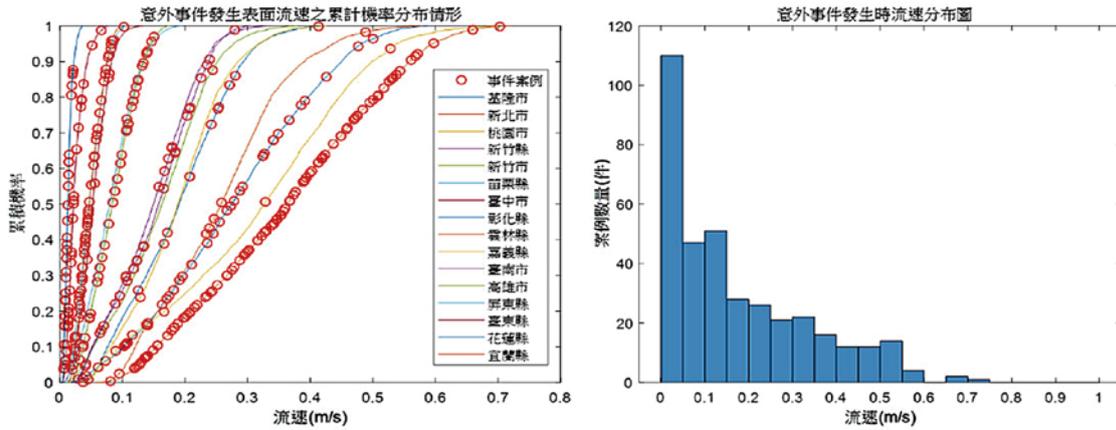


圖 5 各縣市意外事件 103~106 年流速和長年流速統計累積機率分布圖

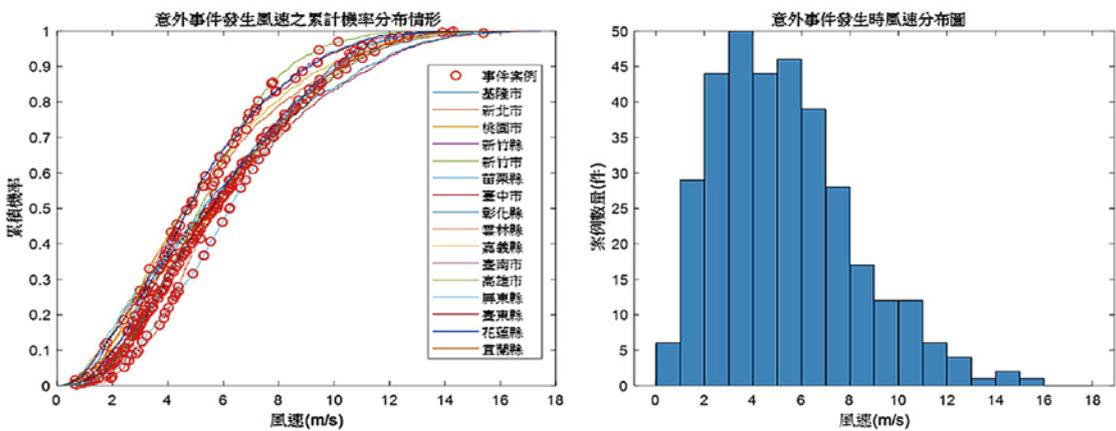


圖 6 各縣市意外事件 103~106 年風速和長年風速統計累積機率分布圖

弱度 (Vulnerability)」為風險評估之架構，風險 (Risk) 的高低與危險度和脆弱度有關，其中危險度為造成風險的主要成因，危險度越大風險越高；脆弱度表示受危險因素影響時，其負面影響的程度，脆弱度越高風險越大。而風險評估的流程除了蒐集因子資料庫等前置作業，從風險因子之選定、風險分析、風險評量到風險處理有四個階段：

風險因子之選定

風險評估首先需要界定造成風險發生的可能因素，進而有效地進行風險處理，因此，本團隊取得 18 份模糊德爾菲專家有效問卷並彙整國內外相關文獻，分析適當的風險影響因子，建立風險之評估指標及篩選出危險度 (10 項) 及脆弱度 (12 項) 影響因子 (如表 1)。

風險分析

透過專家問卷篩選出風險影響因子後，以定性、定量以及半定量分析訂定各個因子分級的條件，在分

級上分為五個等級，分別為 1 至 5 分，再根據蒐集資料、數值模擬以及現場調查的結果，檢視各個因子的影響程度，5 分為影響程度最嚴重，反之 1 分為影響程度最輕微。而各項因子對目標對象的影響程度不一，因此需進行權重分析，獲得各因子權重值之關係。

風險評量

完成各項風險因子分級訂定及權重關係後，即可應用於調查區位，並計算其危險度與脆弱度分數，將上述兩項分數代入至風險矩陣，獲得該地區之風險高低，最後透過地理資訊系統 (GIS) 繪製風險地圖。

風險處理

風險評估結果能提供給政府機關作為海岸風險管理之參考依據，對風險評量結果須要改善者，能進行風險處理並研擬具體可行之對策，包含減低風險、規避風險、移轉風險、抑制風險，同時，也能依據其急迫性與重要性來評估現有之人力、物力與時間來提出計畫之時程、實施內容和預期效益。

表 1 海灘型態危險度（左）、脆弱度（右）影響因子篩選成果表

危險度因子分析			脆弱度因子分析		
評估準則	評估因子	專家共識值 G^i	評估項目	評估指標	專家共識值 G^i
海氣象特性	風	6.8	社會面	遊憩活動合法業者	6.4
	波浪	7.9		醫療院所完備性	6.3
	海流	7.1		與醫療院所距離	7.4
	潮汐	6.0		與海巡隊消防隊距離	7.4
	裂流	7.5	環境面	公共交通發展程度	6.3
	碎波型態	6.8		安全救生設施	7.9
海岸環境	近岸海底坡度	6.2		公共意外保險	6.8
	海灘坡度	6.8	基礎設施發展程度	6.4	
生化特性	具攻擊性生物	6.1	海岸資訊提供	7.5	
歷史災害	歷史災害事件	6.74	遊客面	個人自救能力	6.9
				個人遊憩能力	6.1
				個人遊憩裝備	7.7

風險評估過程

海灘型態海岸風險分析經由模糊德爾菲法^[2]，風險辨識選定代表影響因子後，為能區分各風險影響因子所代表之可能性或嚴重程度，本文藉由定性分析、定量分析以及半定量分析，針對風險影響因子進行系統性分級，以量化危害度及脆弱度風險等級與風險分數。各風險分數值最大為 5；最小為 1。

在海氣象特性準則中，風及海流因子係參考危險海域劃設原則^[3]針對各類水域遊憩適合之海氣象條件作為分級依據，如針對游泳活動而言，小於 4 級風速 (< 7.9 m/s) 為適合從事此類遊憩活動的氣象條件，因此在風的因子分級以每小時大於 7.9 m/s 的占比進行等級的劃分，前 20% 代表相對最安全以 1 分計，20% ~ 40% 為 2 分，依此類推分 5 級；海流和風速類似，是以每小時大於 0.514 m/s 的占比進行排序並等分成 5 級（如上述風速等級畫分一致）；在波浪因子上，參考中央氣象局在波浪的分級標準，並加入極端波高作為分級條件；裂流因子則是以發生時之海氣象條件，同時考慮各類型海灘產生裂流的時空間分布頻率，計算一年內符合該條件之時間，以等間距劃分為 3 個等級；瘋狗浪因子則是以各類型波浪條件、堤前坡度及堤前消波塊孔隙率與其對應之越堤浪花特性進行分析與模擬，以發生機率分為 3 個等級；在暴潮因子上，則是依據台灣環島實測暴潮分析^[4]對於歷年的暴潮偏差量進行分級；在生化特性準則中，在從事海域遊憩活動時，有毒生物與具攻擊性的生物出沒於海域活動範圍內，將影響人民生命安全，經資料蒐集統計後，在等級劃分上，將曾經出沒或為有毒生物、具攻擊性生物分布之海域訂定為 5 分，反之則 1 分；意外事件發生原因除了惡劣的自然環境外，民眾對於水域環境的不熟悉和活動安全觀念不足等人為因素亦是導致意外

事件發生的潛在因素，考量危害有再次發生的可能性，在歷史災害因子中，以 103 年至 108 年期間蒐集到有關海域遊憩活動之傷亡人數進行排序，並等間距的劃分為三個等級分別為 1、3、5 分。

在社會面準則的部分，為保障民眾從事各類水域遊憩活動時，能夠安心遊玩且維持遊憩品質，在合法業者因子，以該縣市之合法業者概況進行分級；在醫療院所完備性因子中，考量遊客溺水或意外事件發生後是否能夠及時且妥善的獲得治療，採距離各海灘主要入口最近的醫療院所等級進行等級劃分；在醫療院所之距離及海巡隊安檢所消防隊距離因子中，以發生溺水或進行各類遊憩活動時受到任何傷害時能否提供即時救援，依照黃金救援時間 15 分鐘為原則，對各醫療或救災單位距離調查區位的遠近訂定其脆弱度分數；在環境面部分，在公共交通發展程度因子上，藉由主要入口處之交通易達性，以道路級別作為分級依據，在安全救生設施因子上，考量民眾面對他人溺水意外發生時，能否及時提供協助及救援，以調查區位之安全救生設施數量進行分級，而該區域是否有公共意外保險對於民眾發生意外發生後能夠提供賠償的保障外，也有效提升整體環境品質，因此在分級上分為兩級，有提供公共意外保險其脆弱度分數為 1 分，反之為 5 分，在基礎設施發展程度，檢視各調查區位內是否具備公有廁所、停車場、洗浴設施、照明設備以及通訊品質是否良好作為分級標準，在海岸資訊提供因子中，針對警告標示或告示牌設立情形進行等級劃分；在個人自救能力、個人遊憩能力與個人遊憩配備因子上，皆影響遊客面對危險時應對能力及反應程度，因此透過現場調查詢問當地遊客與交通部觀光局各級水域遊憩活動管理機關是否有公告「活動注意事項」作為依據。

我國行政院對風險評量方法之指引建議事業單位可依其製程、活動或服務之規模及特性選擇採用 3 × 3、5 × 5 等矩陣模式，將危害事件之風險做較多程度的分級。國外在進行海域風險評估時亦有採用風險矩陣的概念，量化各海岸段或遊憩區域不同程度之風險，例如 Ferrari *et al.* [5] 評估義大利西北部沿岸之海域風險時，危害度與脆弱度組成 (4 × 5) 的風險矩陣。

上述對海灘海岸進行危險度與脆弱度之分析，將風險因子分數與對應權重相乘後累加，即可得各區位之危險度與脆弱度分數，依分數高低分為五個等級，分別為極低、低、中、高、極高，最後藉由上述風險矩陣概念，將風險值兩大變數－危險度與脆弱度結合，獲得在該處海岸從事遊憩活動之風險等級。

風險評估成果

海灘型態海岸共計有 307 處海灘，風險等級比例之統計結果表 2 所示，在危險度上，海灘多屬中度及高

度等級，其占比分別為 41% 及 33%；脆弱度則是以中度等級為主，占全部海灘 46%，其次為低度等級，為 32%；整體風險而言，約有 8% 海灘為極高風險，20% 海灘為高度風險，30% 海灘為中度風險，29% 海灘為低度風險，13% 海灘為極低風險。

綜整前兩節成果以新北市為例，團隊對新北市 25 處海灘進行風險評估成果顯示，有 4 處海灘為高度風險、10 處海灘為中度風險、9 處海灘為低度風險以及 2 處海灘為極低風險。其中危險度等級介於中度至高度等級，脆弱度等級介於極低等級至中度等級。將新北市 25 處海灘之風險評估結果運用地理資訊系統呈現於各海岸段，如圖 7 所示。

分析危險度較高原因與權重高的因子如裂流、具攻擊性生物、近岸海底坡度及歷史災害因子有關，其中裂流發生機率落在 30% 左右，分數落於 3 分至 4 分，而歷史災害傷亡案例高居 342 件，分數皆為 5

表 2 307 處海灘海岸風險分級比例

分級	極低 (數量/比例)	低 (數量/比例)	中 (數量/比例)	高 (數量/比例)	極高 (數量/比例)
危險度	3 處 (1%)	76 處 (25%)	126 處 (41%)	102 處 (33%)	0
脆弱度	14 處 (5%)	98 處 (32%)	142 處 (46%)	53 處 (17%)	0
風險分級	39 處 (13%)	87 處 (29%)	93 處 (30%)	62 處 (20%)	26 處 (8%)

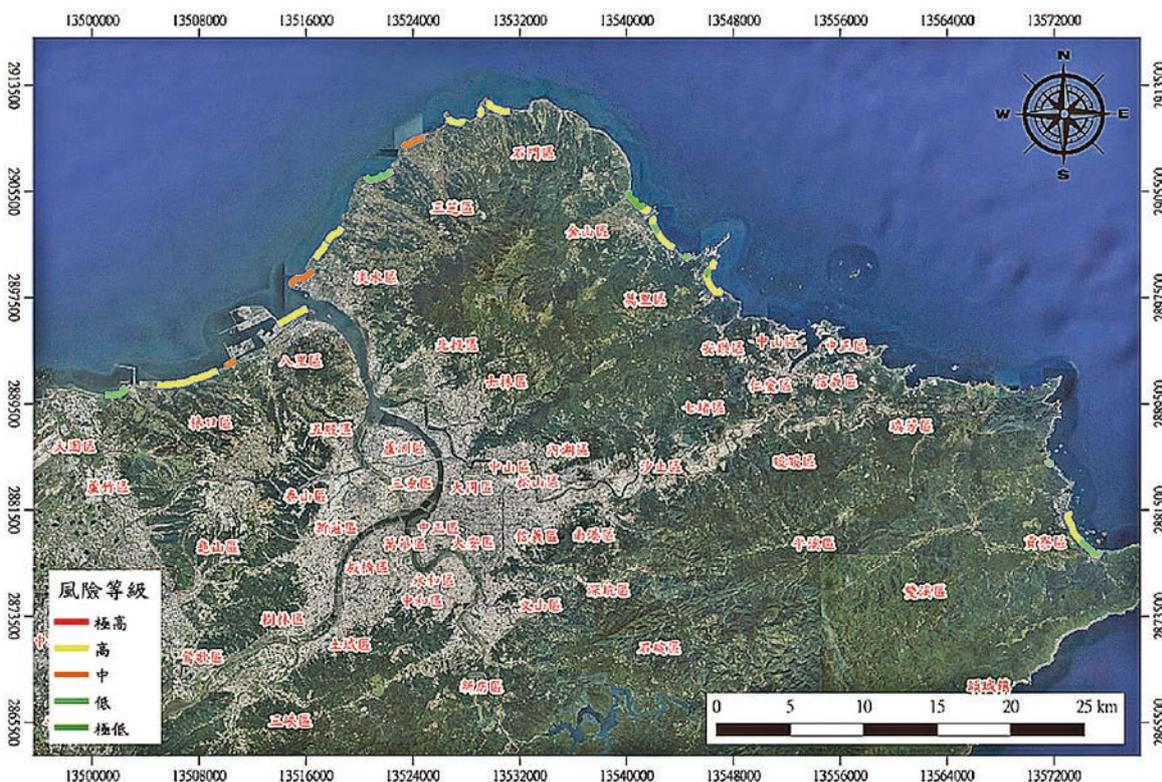


圖 7 新北市海灘海岸遊憩環境風險圖

分。在脆弱度部分，各海灘距醫療院所、海巡隊消防隊不遠，因此海灘基礎設施是否完善、安全設施的數量及影響脆弱度的重要關鍵，以三芝區的淺水灣海濱公園海灘而言，在安全救生設施、基礎設施發展、海岸資訊提供對照因子分級表皆為最低分數（1分），表示該海灘的救生圈數量及告示牌的內容、設立數量完善，雖然所處位置之危險度為高度等級，但經由脆弱度因子的調適，風險分析結果為低度風險；而同樣位於三芝區的大田寮海灘其安全及基礎設施缺乏且交通易達性稍低，使得脆弱度等級為中度等級，風險分析結果為高度風險。

海域遊憩安全管理策略

根據「水域遊憩活動管理辦法」，水域遊憩活動若在風景特定區、國家公園所轄範圍內者，水域遊憩活動的主管機關為該特定管理機關，如觀光局所屬的國家風景區管理處、內政部所屬的國家公園管理處；活動範圍在前述特定管理機關轄區範圍以外者，主管機關為直轄市或縣（市）政府。

當各海域活動風險等級劃設後，應針對各級風險海域擬定對應之管理政策，此處之策略係針對降低意外事故之管理，並非針對活動舒適性或器具之管理。防災管理可從政府與民眾兩方面著手，目前政府主管機關針對水域遊憩活動已經實施的防救災措施包含 (1) 設置警示看板；(2) 提供即時海象資訊；(3) 制訂各項水域遊憩注意事項；(4) 海域活動安全巡查；(5) 設置救生員、派遣巡守員。上述五點是目前在部分海域實施中的防救災措施，預期皆可以達到不同程度之效益，但為求防減災的作為更加完善，本團隊提出幾點建議，強化海域活動之防減災措施，期望降低民眾受災風險包含 (1) 增設更多站台提供海氣象即時資訊；(2) 健全證照制度（包含業者、教練和民眾）；(3) 強化海域安全教育；(4) 建立一站式全國海域活動安全資訊網。然上述建議仍需主管機關、業者和民眾之間的配合與推動，而實際應用受不同水域遊憩活動而略有差異，為達實際防減災制訂的防災措施方針或相關規定必須具有執行的可能性與功效。

除政府提供完善的防災資訊與管理辦法仍需民眾實際遵守和配合外，根據莊和張^[6]指出，意外事件造

成嚴重的生命財產損失時常並不是災害本身，而是民眾欠缺危機意識，面臨災害時也有對應的方法，能使傷害降到最低。以下提出幾點民眾自主防災作為 (1) 活動前掌握海域環境：不僅須注意天氣，如地形、常見的有毒生物等；(2) 對自我能力的評估：需評估自己對此項遊憩的適宜性，甚至諮詢該活動專家或教練之建議等；(3) 線上通報活動內容：針對要從事的遊憩活動先行登記，對於主管機關的災害掌控較為精確。

當海域遊憩活動場域劃分風險等級後，隨後的策略則可依風險等級予以調整，其原則建議為：主管機關應當提供民眾海域遊憩活動風險訊息以及即時海氣象資訊，針對高中低風險海域宜有對應之管理策略。對於高風險海域，施以較嚴格但不頻繁之安全管理措施；對於低度風險海域，施以一般性但較密集之安全管理措施，如表 3，這主要是受到遊憩人口影響所設定的管理策略。風險海域劃設的核心理念是不論風險等級高低，均開放水域提供遊憩活動使用。一般民眾見到高風險海域可能因此會降低遊憩的興趣，在前往這些高風險海域時有所顧忌，換句話說，當地若公告為高風險的海域遊憩活動，則遊憩人口數勢必降低；相反地，低度風險海域的遊憩人口數目理應較多。三個風險海域分級管理的核心理念是「資訊充足且即時」、「納入民眾自主防災作為」、「強化教育與證照概念」。經團隊彙整在三種風險海域中政府與業者民眾之管理措施行為簡表如表 4。

表 3 各級風險海域之遊憩人口數評估以及管理強度和頻率的規劃

	遊憩人口	管理強度	管理頻率
高風險海域	少	強	高
中風險海域	中	中	中
低風險海域	多	弱	高

結論與建議

結論

全國合計 307 處海灘，以台東縣有 44 處海灘最多，全國海灘平均長度為 1.89 公里，最長者為花蓮縣七星潭海灘（13,100 公尺）；平均海灘寬度為 72.9 公尺，最寬者為高美濕地海灘（1,430 公尺）。而北部海岸的海灘平均坡度為 53%；中部海灘則為 22%；南部的海灘平均坡度則為 21%；東部為 27%；外島（澎湖）平均為 77%。

表 4 各級風險海域對應之管理措施簡表

	政府作為	民眾作為
高風險 海域	強化即時海氣象水文資料提供 建立入口網站 強化警示告示牌與救生圈 制定各單項活動應注意事項 熱點海灘設置救生員 派員巡查（高頻率）	需滿足有教練帶領、有證照、或已經教育訓練課三者之一 掌握場域海氣象水文資訊 線上登錄從事之水域遊憩活動詳情 線上填寫健康評估書 遵守各項活動應注意事項
中風險 海域	強化即時海氣象水文資料提供 建立入口網站 強化警示告示牌與救生圈 制定各單項活動應注意事項 熱點海灘設置救生員 派員巡查（不定期）	掌握場域海氣象水文資訊 線上登錄從事之水域遊憩活動詳情 線上填寫健康評估書 遵守各項活動應注意事項
低風險 海域	強化即時海氣象水文資料提供 建立入口網站 強化警示告示牌與救生圈 制定各單項活動應注意事項 熱點海灘設置救生員 派員巡查（高頻率）	掌握場域海氣象水文資訊 遵守各項活動應注意事項

全國海灘平均坡度中，以連江縣西引東澳海灘為最大（223%）。另海灘平均坡度不到千分之一之海灘多集中於西部海灘（如高美濕地海灘等濕地）。粒徑部分北部海灘多為細沙組成的常態型斜坡海灘，中部則較多屬於淹沒型海灘（潮間帶），其底質以泥為主，南部則都是高純度細沙組成的海灘，東部海灘則以粗砂或礫石為主，離島地區的金門及連江縣以細沙海灘為主，而澎湖海灘則變化廣泛，粗沙、礫石及卵石海灘均有。

海灘環境風險評估參考聯合國災難救難協調辦事處（UNDRO^[1]）提出之災害風險公式，建構一套風險評估之架構，包含危害度（Hazard）與脆弱度（Vulnerability）兩部分，風險評估的流程從風險因子之選定、風險分析、風險評量到風險處理有四個階段。風險因子之選定由 18 份專家問卷，以模糊德爾菲法從因子庫中選出了會影響海岸以及釣點活動安全之風險因子，海灘型態海岸選出 10 個顯著的危險度因子和 12 個顯著的脆弱度因子；而風險估算部分蒐集 14 份專家問卷，以 AHP 權重分析法估算海岸或釣點風險因子造成風險的影響程度。影響海岸的危險度因子以海岸災害（如裂流、瘋狗浪潛勢）和海岸環境中之近岸海底坡度、礁岩濕滑程度為主；在脆弱度因子以安全救生設施、海岸資訊提供和個人自救能力等因子為主；風險估算部分從結果顯示，海灘型態海岸分析結果相似各海域中度風險發生機率最高，高風險以上的海域主要出現在東部、北部和澎湖縣。

建議

由於環境及建設會隨時間變動，建議類似本現場調查工作與風險評估應定期更新，譬如每五年可重新調查 1 次。

從事水域遊憩活動之風險等級劃設結果，建議後續主管機關可依據實務上之問題，每三至五年進行一次滾動式修正，以更完善風險分級結果。

若欲提昇海域遊憩活動安全管理，建議中央主管機關可增設更多海氣象即時觀測系統，根據海洋委員會方法依照本研究對海域風險分級之流程進行即時分析，可進行動態水域遊憩活動安全管理。

參考文獻

1. Office of United Nations Disaster Relief Co-Ordinator (UNDRO), UNDRO (1979), Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting. Switzerland.
2. 鄭滄濱（2001），「軟體組織提昇人員能力之成熟度模糊評估模式」，國立台灣科技大學資訊管理研究所。
3. 國立成功大學（2019），危險海域劃設原則之研究，海洋委員會。
4. 楊柏堯（2018），「台灣環島實測暴潮分析」，碩士論文，國立成功大學。
5. Ferrari, M., Carpi, L., Pepe, G., Mucerino, L., Schiaffino, C. F., Brignone, M., and Cevasco, A. (2019), A geomorphological and hydrodynamic approach for beach safety and sea bathing risk estimation. Science of The Total Environment, 671, 1214-1226.
6. 莊文華、張育璋（2003），「台灣地區海域活動安全維護之探討」，第 68 期大專體育，第 66-68 頁。



海洋資料浮標站網之建置

范揚洺／國立成功大學近海水文中心 副研究員

王得根／國立成功大學近海水文中心系統組 組長

林演斌／國立成功大學近海水文中心研發組 組長

陳秋份／國立成功大學近海水文中心品保組 組長

吳立中／國立成功大學近海水文中心計畫組 組長

李嘉文／經濟部水利署水文技術組 副工程司

我國自 1997 年起開始陸續於臺灣附近海域海洋資料浮標站，至今已有 26 座資料浮標站在海上長期運作，即時提供海氣象與水下環境資料。為提供穩定且高品質的資料，本研究應用先進之量測技術與方法，結合自動化之儀器與電腦設備，建立水文資料即時傳輸系統及高效率水文資料庫服務系統。本文說明資料浮標站的建置過程、資料浮標監測站網、波浪分析方法，並介紹其他近海水文觀測系統，最後說明資料品管。

前言

隨著國內經濟活動持續發展，在陸地資源逐漸飽和的同時，經濟產業陸續向海岸地帶移動，如沿海的工業區、天然氣專用港以及海埔地開發區域，為了確保這些經濟產業能順利開發，同時兼顧安全設計以及環境保育等問題，促使能永續發展，海岸地區的環境觀測是必要的手段；再者，台灣地區海岸線長達一千六百餘公里，每年夏秋之際的颱風所引發的暴潮巨浪常造成莫大的災害，抗浪禦潮亦是政府重要的職責之一。水文基本條件為各項水利海洋建設最重要的依據，倘無充分而精確之海洋水文資料，或是所應用之觀測資料不具代表性，則可能導致工程設計上之浪費或必須承擔較高之風險，因此，獲得正確且即時的海洋觀測資料，掌握我國海洋水文情勢，是政府為了要減少旱澇災害損失、保障民眾生命財產安全、促進海岸經濟活動發展所進行的重要施政項目之一。

海洋觀測主要是瞭解和掌握海洋自然環境的變化規律、同時也瞭解和掌握人類活動對海洋環境的影響，並以保護人民安全與海洋環境為主要目的。海洋監測是以海洋自然環境要素中的各項因子及變量為監

測對象，廣義來講，對海洋環境造成破壞或影響的因子都是監測的對象。監測（Monitoring）具有「控制、管理」的意義，與觀測（Observing）僅有「觀察、注意」的意思是不同的。海洋監測的目的是要即時、準確、可靠、全面地反映近岸海域的狀況及其變化趨勢，為海洋保護和管理、海洋資源開發利用，提供具體之科學依據。鑑於觀測技術影響觀測資料良窳，應革新觀測儀器與科技，以增進觀測能力；又為掌握各項異常水文現象資訊，應建置水文觀測資料即時傳輸系統，以即時取得各項水文觀測資料，並建立預警通報系統。國立成功大學近海水文中心（以下簡稱近海水文中心）長久以來致力於海洋觀測技術的研發，同時引進國際上最新的水文觀測技術，依據本土環境與作業的需求，掌握關鍵技術並將觀測技術本土化，以達到促進我國海洋監測現代化的目的。

資料浮標觀測系統

資料浮標介紹

資料浮標為一位於海面、無人操控之海氣象觀測站，其任務為蒐集海面海氣象要素，提供海岸及海洋

工程所需之基本海氣象資料，圖 1 為在海上的資料浮標站及其示意圖，基本觀測項目包括風速、風向、大氣壓力、氣溫、水溫、示性波高、平均週期、波向、流速、流向，由於資料浮標具有模組化之設計，可以依據需求，加裝水質、雨量、聲音等觀測儀器。資料浮標特性如下：

1. 為一無人海上自動觀測站，能源自足，能長期自動觀測多項海氣象資料。
2. 配備多元即時通訊系統，觀測資料即時傳送至客戶端，可配合海象測報作業與災害預警的需求。
3. 設站位置較不受限制，能廣泛運用於各種海域。
4. 浮標體隨波性佳，適用於波浪觀測。
5. 儀器系統體積小，省電性佳。

資料浮標觀測技術基本上係屬於一種系統整合技術，由於觀測作業最基本之感測器 (sensor) 通常為市售的高精密商品元件，感測器核心部分往往涉及商業利益並不公開，而基於成本的考量，世界各國大多將觀測技術研發重點放在系統整合方面，利用市售感測器，透過系統整合技術，開發相關之硬體、軟體與軟體，針對整合觀測系統之電力、通訊、結構、耐環境性、作業安全性、維修便利性與穩定性等課題進行研究發展。由儀器研發掌握關鍵性技術，降低觀測成本，並建立自有維修能力，使具有本土化維修技術，縮短儀器維修時間，減少數據漏失率，減少受儀器廠商之束縛並降低依賴性。資料浮標佈放前須進行系統整合測試，系統儀器在實驗場地完成儀器組裝後，至少須進行連續五天以上的測試以驗證其作業穩定性。又由於浮標體需在海中長期作業，為確保儀器室內儀器不受水氣侵襲，資料浮標出廠前最重要之作業之一為進行標準氣密測試。完成整合測試後，即可依據海況安排佈放時程。

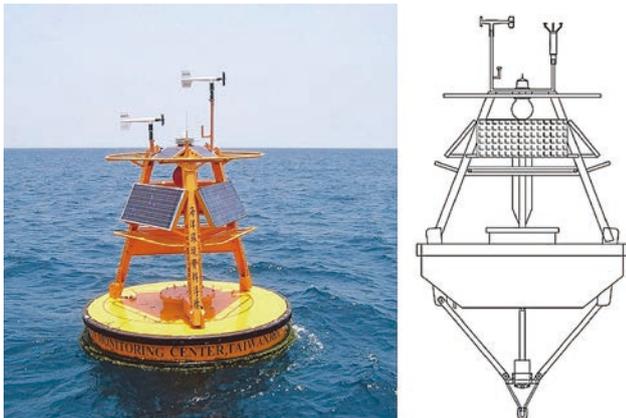


圖 1 海氣象資料浮標 (左) 與其示意圖 (右)

資料浮標的佈放依地點遠近分為遠洋及近海兩種方式，近海區域主要以小型機動船筏以拖曳方式佈放，遠洋區域無法以拖曳方式佈放，必須由大型工作船以載運方式佈放。海象資料浮標在佈放前已在近海水文中心完成組裝測試，但為了避免運送至港口的過程儀器毀損，觀測儀器會先暫時拆卸，抵達港口後再次進行浮標組裝測試，如圖 2 所示，組裝完成後須經由品管人員確認資料無誤才出海佈放。佈放完成後，資料浮標還需進行各項系統測試作業以確認系統可以正常作業，如電源測試、通訊測試、軟體測試等，並與品管人員聯繫，確認觀測數據可以從海上傳輸回品管中心。



港邊組裝浮標錨繫及錨碇



組裝浮標控制箱及接線



組裝浮標太陽能板與 AIS 警示燈



組裝海流儀

圖 2 資料浮標佈放之現場組裝過程

資料浮標監測站網之建置

近海水文中心在臺灣四周海域布建達 26 座資料浮標站(如圖 3)，主要由中央氣象局、水利署、國家海洋研究院，以及港灣技術研究中心等機關共同建置。中央氣象局自 1997 年起建置海氣象資料浮標站，目前操作測站共有 12 站，包括在馬祖東引島與蘭嶼等外島地區以海氣象資料浮標來蒐集即時海氣象資訊，提供外島地區航運及漁撈作業參考應用，也在七美及東沙島海域布放深水資料浮標^[1]，作為海象預報之修正應用，更於 2017 年起整合海氣象觀測資料建置臺灣海象災防環境資訊平台^[2,3]，做為海象災害預警與應變依據。水利署自 1998 年起，已建置了 7 座海氣象資料浮標站，即時觀測資料可做為防災禦潮決策之參考^[4]，長期的觀測資料加值編纂近海水文應用圖冊、近海水文年報等。國家海洋研究院自 2021 年起建置了 5 座海氣象資料浮標站，透過 GoOcean 平台服務水域遊憩活動民眾^[5]。港灣技術研究中心自 2021 起陸續建置了 2 座海氣象資料浮標站，提供船舶進出港參考^[6]。

當資料浮標佈放點接近漁撈作業範圍時，觀測設施的保全與維護有賴當地相關機關單位的協助與漁民的支持，有時漁民因不了解測站建置目的而阻礙作業之進行，或因好奇心之驅使而損壞觀測設備。因此，資料浮標佈放前需與當地之漁會、海巡單位及地方意見領袖等溝通，說明海洋觀測之重要性，並聽取漁民意見，以不侵害漁民漁業權為原則，適當調整浮標佈放點，會同漁民代表出海會勘。資料浮標觀測推動之初確曾遭遇漁民單位的阻礙，透過長期的溝通與經營，資料浮標站附近的漁會、海巡單位等均相當支持政府機關從事海氣象觀測作業，主動照顧近海水文觀



圖 3 資料浮標監測站網圖

測設備，發現損害情形時漁民朋友會主動通知近海水文中心，若有緊急之需求求助漁民，均可以獲得樂意之協助，此為多年來在進行觀測作業的同時從事漁民宣導的成果。

由於觀測資料均已設置自動回傳系統，於觀測後規定時間內將初步整理過後的資料回傳。回傳方法主要以行動通訊(4G)為主，以衛星通訊為輔，資料傳輸流程包括資料運算、編碼、傳輸、資料回補、品管、匯入資料庫等程序，如圖 4 所示。其中各項資料除了潮位資料資料為 6 分鐘外，其餘更新頻率均為每小時更新。而波浪、風、氣壓之觀測頻率為每小時 1 筆，海流及潮位的觀測頻率為 6 分鐘 1 筆，海流資料配合資料浮標上的傳輸排程，故其資料與波浪、風、氣壓等海氣象觀測資料一併回傳。資料維持完整也是人工品管作業的重要任務，資料浮標系統之資料傳輸

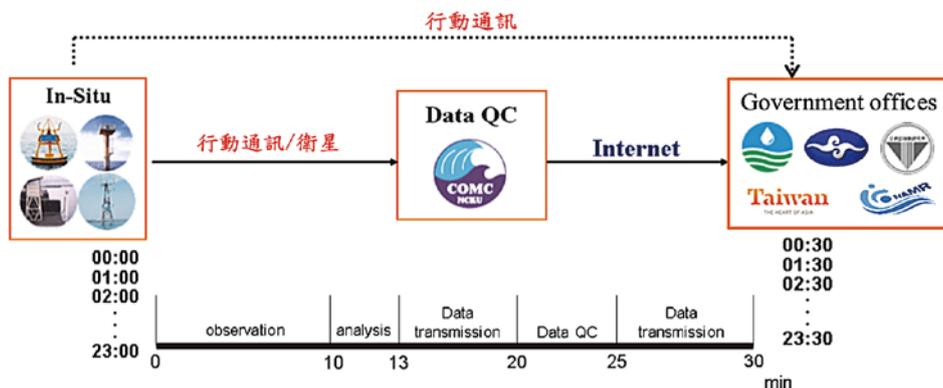


圖 4 資料傳輸流程圖

已內建回補機制，能自動檢查指定天數內是否短缺資料，並加以回補。執行資料監控作業時，若發現資料因通訊品質、網路、或其他外部因素導致資料未自動回補，則可利用人工補傳功能進行回補，待回補完成再執行人工品管作業，最後產製作業化檔案並匯入資料庫。

近海水文觀測站網自建站迄今已逾 20 年，測站的維護程序及觀測技術逐年精進，並建立一貫化作業程序，藉由文件化的流程管理，嚴格控管各項作業的品質，減低人為疏忽，落實品質制度，提供後續資料品質追溯之依據。測站歷年的觀測成功率如圖 5，自 2006 年起皆保持在 95% 以上，即落實一貫化作業程序的成果。由圖 5 顯示 2012 年觀測成功率雖仍保持在 95% 以上，但相較之下似乎降低，主要原因為 2012 年遭受 7 個（強、中、輕度）颱風侵襲破壞所致。

方向波譜分析

波浪觀測是資料浮標觀測項目中最重要項目，其測得的資料是海洋工程和海岸工程規劃設計之重要參考；此外，對於後續的學術研究，亦是相當重要的背景資料。在時間上或空間上之不規則變量可以序率過程來表示，此種過程則以能譜來表示最為適切。以本研究波浪觀測為例，利用線性疊加，將雜亂之海面波浪視為各種頻率之正弦波所組成，由於各成份波的能量與其振幅約二次方成正比，而各成份波能量與波浪頻率的關係即可稱為波譜。波譜函數即是表示波浪全體能量分配於各種成份波狀況的分佈函數。方向波譜進一步描述了每一頻率上波浪能量在方向上之分佈，為海面上紛紜的波浪現象描述上提供更多的細節。

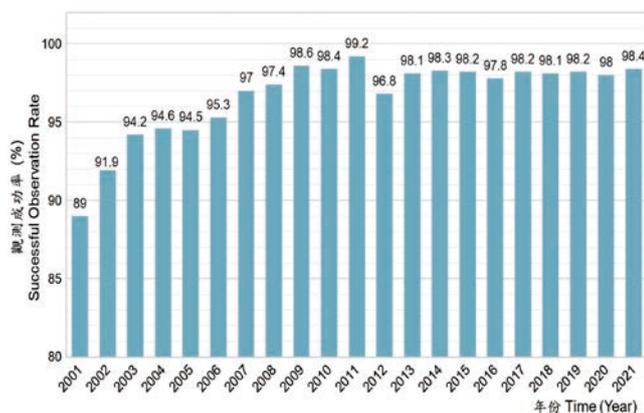


圖 5 觀測成功率

本研究利用快速傅利葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析法計算浮標加速度譜，再以浮標加速度譜計算一維水位譜，最後利用一維水位譜及方向分布函數求得方向波譜。其中欲求方向波譜，則分析之重點為推求方向分佈函數，本研究採用 Longuet-Higgins [7] 以浮標測波時所發展的方向波譜分析方法。傅立葉級數法假設波浪於每一個頻率下的方向分佈為有限階的傅立葉級數：

$$D(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^m (a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)) \quad (1)$$

依據傅立葉級數之階數 m 有 $2m + 1$ 個未知數，故傅立葉級數最多可解至 $m = 2$ 階。係數解得如下：

$$a_0 = \frac{C_{11}}{(2\pi f)^4 \pi} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{-Q_{12}}{(2\pi f)^2 k \pi} \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{-Q_{13}}{(2\pi f)^2 k \pi} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{C_{22} - C_{33}}{k^2 \pi} \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{2C_{23}}{k^2 \pi} \quad (6)$$

其中 C_{11} 為加速度同位譜 (co-spectrum)； Q_{12} 為加速度與 x 方向傾角轉向譜 (quadrature spectrum)； k 為波數； Q_{13} 為加速度與 y 方向傾角轉向譜； C_{22} 為 x 方向傾角同位譜； C_{33} 為 y 方向傾角同位譜； C_{23} 為 x 方向傾角與 y 方向傾角同位譜。

波數則由下式表示：

$$k = \left(\frac{C_{22} + C_{33}}{C_{11}} \right)^{1/2} \quad (7)$$

波浪示性波高、平均週期、尖峰週期與一維水位譜間存在定量關係，依據式 (9) 與式 (10) 分別計算示性波高及平均週期，其中 m_0 為一維水位譜總能量， m_2 為一維水位譜二次矩：

$$\text{示性波高 } H_s = 4.004 \times \sqrt{m_0} \quad (8)$$

$$\text{平均週期 } T_z = \sqrt{m_0 / m_2} \quad (9)$$

利用一維水位譜能量密度數據計算尖峰週期，利用方向波譜能量密度計算波向。

其他近海水文監測系統

除了海洋資料浮標站外，近海水文中心還運作 13 座潮位站、2 座海岸氣象站、16 座微波雷達站，以及 4 座光學影像站。所有系統儀器在實驗場地完成儀器組裝後，如同資料浮標系統一樣，至少須進行連續五天以上的測試以驗證其作業穩定性。而這些測站的建置相較於資料浮標單純，利用陸上運輸工具將觀測系統元件載運至現場進行組裝，建置作業包括管路鋪設、靜水井安裝、觀測儀器安裝、收錄系統安裝、通訊設備安裝、線路連結、避雷設施及接地設備設置，系統安裝完成後，啟動觀測系統，並開始測試作業，所有系統設置完成後兩週內均為重點觀察期。

潮位站

潮位資料對海岸防災工程設計極有幫助，為了提昇潮位觀測準確度，潮位站系統架構係引進美國新一代音波式水位計，並結合近海水文中心研發完成的觀測技術，量測精度可達公釐 (mm) 等級 [8]。此套潮位站系統包括一套音波式水位計、一套壓力式水位計。目前作業化的潮位站麥寮、四草、安平、永安、枋寮、蟬廣嘴、大武、富岡、石梯、綠島、水頭、料羅灣、小港等 13 座潮位站。

海岸氣象站

岸邊及外海的風速風向資料對風沙之估算及波浪推算極為重要，因此有別於一般的氣象觀測，觀測重點為與海水、波浪等較有密切關係之要素。其海洋氣象觀測包括：氣溫、氣壓、風、濕度、日照、雨量。目前作業化的海岸氣象站有大鵬灣、灣域等 2 座。

微波雷達站

相較於海上現場觀測，雷達可固定架設於岸邊，提供穩定電力即可在時間上持續觀測大範圍空間面上的海面狀況，屬於一種兼具時間與空間海象資訊的三維度觀測技術 [9]。目前作業化的微波雷達站包括七股、潮境、外木山、萬里、風箏坪、中角灣、龍洞、福隆、觀音亭、鎖港、青灣、社皆坑、關山下、後壁湖、船帆石、佳樂水等 16 座微波雷達站。

光學影像站

當海岸邊有裂流的出現，海面上就會出現與平時不一樣的特徵，因此裂流的觀測可以透過影像中海面特徵的變化或反算海表面流速來進行觀測。加上近年來隨著人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 的發展，只要所觀測的目標可從影像中擷取特徵，便可以透過 AI 技術進行判釋。因此裂流在發生時，海面上會有明顯的特徵變化，即可透過人工智慧的方法進行判釋。

即時資料監控品管

觀測資料品質是決定觀測成果優劣的因素之一，不準確甚至錯誤的資料會影響決策之判斷與工程設計結果。為維持作業化觀測系統正常運作，並確保觀測資料的正確性，必須進行資料品管程序，往昔資料的檢驗流程較為分散，本研究將觀測資料的品管流程整合為八個區段，包括前端品管、訊號傳輸、健康度檢驗、即時品管、人工檢核、長期檢驗、品管檔案建構及回補記憶卡資料 (如圖 6)。

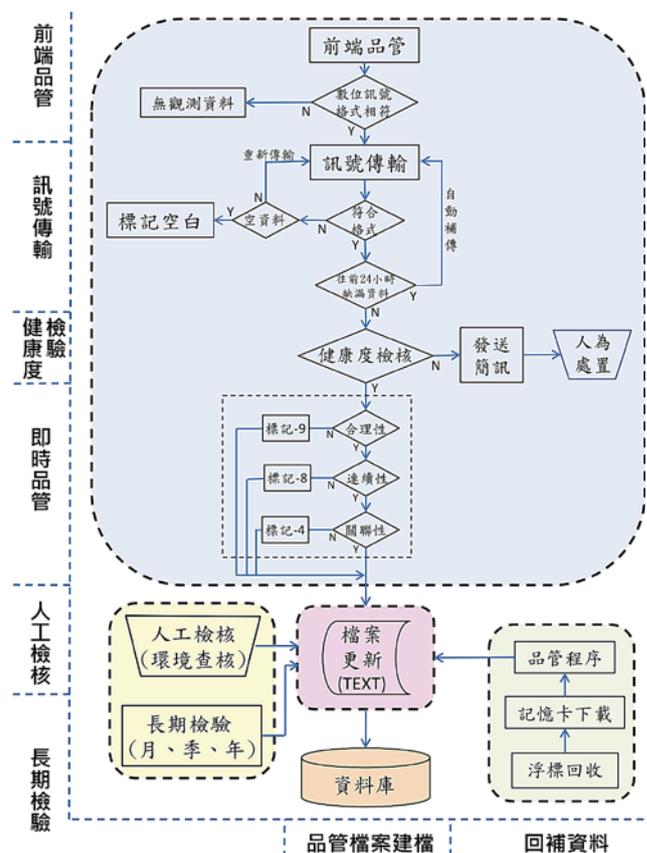


圖 6 海氣象觀測資料品管程序流程圖

前三個區段為針對系統的品管，前端品管係指資料在擷取階段即先對資料進行處理，避免造成 GIGO (garbage in garbage out) 的情形，依處理訊號分為訊號濾波 (類比訊號, Analog Signal) 與字串編碼檢核 (數位訊號, Digital Signal); 訊號傳輸部分，由於觀測站遍布臺灣沿海甚至遠洋，所採用通訊均為無線通訊，而資料傳輸過程中可能因天線、數據機機體、訊號品質、外部干擾或其他因素造成資料無法正確傳輸，因此需透過訊號傳輸過程中的多項檢驗以確保資料正確；又作業化近海水文觀測站布設後，要維持穩定的觀測資料輸出，除了儀器本身的耐用性外，亦須注意資料通訊及電力是否正常，且資料浮標是以錨繫固定於海上預定位置，隨時掌握是否有斷纜漂移的可能性，因此必須進行健康度檢驗。一旦超過預設門檻值，即會自動發送 SMS 簡訊通知相關人員，使監控人員第一時間掌握狀況以及進行後續應變。

對於資料的部分，即時自動品管之目的是利用運算快速的計算機對觀測資料篩選過一次，找出可疑資料以減少人工檢測時間。觀測資料透過程式中的演算法判斷實測資料的正確性，其判斷依據包括資料的合理性、連續性、關聯性等三個原則，將任何異常或是可疑的資料加以註記即時自動化品管程序。關聯性檢驗是檢驗所量測之資料與其他相關物理量之關係是否有異常現象；人工檢核項目除了驗證自動品管的正確性及訊號異常狀況之研判，亦針對劇烈天氣、大氣系統、地球物理、水深地形、洋流等環境查核項目，進行資料比對檢核；除了前述逐時與逐日品管外，有些觀測項目會因儀器老化或系統誤差，資料發生緩慢偏移狀況，需要較長期間檢核觀測資料的正確性，因此進行長期檢核，依月、季、年及長期等時間尺度，分別檢核確保觀測資料的正確性。

最後兩個區段為資料管理部分，資料檔案建檔與管理是資料品管的重中之重，目前主要以一般文書格式 (TXT) 進行存檔，其具有可用任何文書編輯軟體讀寫的方便性，而為了資料獲得更即時的展示，也會存成資料庫格式 (SQL) 有利於資料快速檢索。因應觀測項目越來越多樣化，且須更完善多重資料品管標記，目前規劃加入標籤化語言格式 (例如 JSON)，其具有可讀性、易處理的優點，對於觀測資料運作流程頗有助益。

結論與建議

由於以往對於海氣象水文的觀測屬於任務性質的較多，觀測資料的品管與處理過程不一致，觀測資料並分散於不同單位保管。自從近海水文中心協助中央氣象局、水利署、國海院、港研中心等政府機關執行近海水文觀測業務以來，研發本土化近海水文觀測儀器，建置我國海域近海水文監測網，建立近海水文即時資料傳輸系統，提昇海岸災害防救能力。觀測資料的品管與管理流程均按照標準作業程序進行，使用者可以相當容易地取得需要的資料進行研究或應用，對國家海岸工程建設與人民安全維護助益甚多，未來仍應繼續從事觀測資料的研究探討，對於海岸災害的預警與減輕提供更有用的研究成果。

誌謝

國立成功大學近海水文中心所有同仁多年努力協助建置海洋資料浮標站網，在此致上無限的謝意。

參考文獻

1. 饒國清、施孟憲、黃清哲、滕春慈、林燕璋、呂理弘 (2011), 「作業化深海資料浮標建置與觀測成果」, 第 33 屆海洋工程研討會論文集, 國立高雄海洋科技大學, 高雄。
2. Fan, Y.M., Wu, E.C., and Kao, C.C. (2018), Marine Disaster Prevention Information Service Platform, EGU General Assembly 2018, 20, EGU2018-1842.
3. Doong, D.J., Fan, Y.M., Chen, J.Y., and Kao, C.C. (2021), Analysis of Long-Period Hazardous Waves in the Taiwan Marine Environment Monitoring Service (TwMEMS). *Frontiers in Marine Science* 8:657569. doi: 10.3389/fmars.2021.657569
4. Huang, C.J., Chang, Y.C., Tai, S.C., Lin, C.Y., Lin, Y.P., Fan Y.M., Chiu, C.M., and Wu, L.C. (2020), Operational Monitoring and Forecasting of Wave Run-up on Seawalls. *Coastal Engineering*, 161, 103750.
5. 范揚銘、陳聖學、傅科憲、王博賢、楊文昌 (2021), 「東吉嶼海域海表溫度驟降成因探討」, 第 43 屆海洋工程研討會論文集, 國立中央大學, 桃園, 第 148-153 頁。
6. 吳立中、饒國清、羅冠顯 (2021), 「臺北港資料浮標監測剖面流場特徵之初探」, 第 43 屆海洋工程研討會論文集, 國立中央大學, 桃園, 第 50-54 頁。
7. Longuet-Higgins, M. S. (1963), The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 17(3), pp. 459-480.
8. 楊博堯、董東璟、陳盈智 (2018), 「台灣海岸長期實測暴潮分析」, 第 40 屆海洋工程研討會論文集, 國立高雄科技大學, 高雄, 第 100-105 頁。
9. Doong, D.J., Wu, L.C., and Lai, J.W. (2018), Determination of the Spatial Pattern of Wave Directions in the Inhomogeneous Coastal Ocean by Marine Radar Image Sequences, *IEEE Access*, 6, 45762-45771. 



結合近海漂沙觀測與ROMS模式探討 河口泥沙傳輸過程 — 以卑南溪為例

鮑俊宏 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 博士候選人

陳佳琳 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 助理教授

施孟憲 / 國立成功大學近海水文中心 研究助理

廖敬元 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士

河川由上游帶至下游的土砂為海岸漂砂之砂源提供來源之一，而河口與海岸漂砂機制影響海岸地形侵蝕變化，同時攸關砂灘後側的海岸防護設施安全，本文透過一套可以自動且長期觀測漂砂之實測資料以及三維數值模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System)，據以探討河道漂砂與海岸漂砂之間的關係，瞭解河道漂砂入海後之運移情形。實測數據指出不論卑南溪口北側或南側海域底床附近之漂砂懸浮載濃度約介於 100 ~ 300 mg/L 之間，南站略高於北站。再以數值模式設定 3 個案例進行模擬，分別模擬冬季平時基流量 (案例 1)、一般颱風期間 (案例 2)、以及極端颱風期間 (案例 3)。模擬結果顯示：在冬季基流期因流量較小，河口之沈積物懸浮濃度偏低，地形變化受河口輸砂影響幾乎可以忽略不計，此時期地形變化尺度遠小於颱風時期之變化尺度。一般颱風期間河口的懸浮值濃度可達 4,380 mg/L，其他時期懸浮值濃度皆小於 100 mg/L。極端颱風模擬結果顯示，河口表層濃度之高懸浮載濃度 (> 10g/L)，伴隨高流速作用下可傳送至外海；河口底層較高濃度沈積物造成之地形變化，受潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示其輸砂方向偏南。

關鍵詞：河口漂砂、漂砂觀測、ROMS、卑南溪口

前言

小型河流向全球海洋輸送大量陸源沉積物，並影響著長短期海岸及海床特徵。特別是高濃度的沉積物堆積時可能引發海底土石流並伴隨發生高濃度濁流，這在某些沿海地區經常觀察到^[1]。一個很好的例子是台灣山區的小河流，每年輸送 1.8 至 3.8 億噸來自陸源的沉積物^[2-4]。特別於颱風季節時，大量河水和沈積物從陸地排出，此時河流洪水和沈積物量體大於旱季好幾個數量級，造成海岸地形劇烈變遷^[5,6]。海岸地形變遷為一複雜的海岸動力過程，受當地地形、氣象、海象

及人為結構物等影響，特別是河口地區更有地形、漂砂與水動力機制間彼此交互作用，地形變動更會進一步改變水動力機制，進而影響河川輸砂入海之型態^[7]。

泥砂依其運動方式主要分成懸浮載 (suspended load) 與底床載 (bed load) 兩部分。底床載為靠近底床以滾動、滑動、或躍動方式運移之沈滓；懸浮載則為距離底床較遠，懸浮於水流中，隨水流被攜往下游運動之沈滓。懸浮載通常為粒徑較小之沈滓，其運動速度大致與水流速度相同，但在水深方向之濃度分佈並不均勻，通常靠近水面附近之懸浮載濃度較靠近底床附近者為

小。因底床載觀測不易，其觀測資料在時間及空間上之代表性低；相較之下，懸浮載觀測採樣技術較成熟、觀測可行性較高，並可藉由懸移質泥砂濃度（Suspended Sediment Concentration, SSC）推估底床載泥砂輸移量，進而推估河道泥砂總載輸移量。但在天然水體之現地觀測環境，懸浮載觀測技術之即時與自動化仍有許多瓶頸，現階段之懸浮載觀測仍偏重於人工操作^[8]，因此現階段發展漂砂自動作業化觀測有其重要性。

現場漂砂觀測實務上常受限於經費，僅能在少數點位進行觀測，難以全面佈點。因此要瞭解河川輸送至海域的漂砂運移過程，數值模式是最好的方式之一。透過數值模式之模式可精細地模擬整個時空過程，對於河川漂砂的運移能有詳細地分析。如運用 Princeton Ocean Model (POM) 模式配合現場觀測資料，探討曾文溪河口淡水和懸浮沈積物濃度於兩組颱風事件高流量時之濃度擴散行為，可看出河口舌流（river plum）的擴散趨勢是受潮汐與風的交互作用所主導，並指出高潮與低潮期間，河口舌流會有不同的傳輸方向^[9,10]。

台灣東部由於河川陡峭，於颱風暴雨期間常常挾帶豐沛土石流入海洋，成為補充沿岸漂砂最大之來源，又因東部海岸坡度水深，河川輸砂瞬間即為海流輸送至深溝處，造成沿岸補充不易而引發侵蝕問題。陳文俊等人^[11]之研究指出台東縣境內主、次要及普通河川共約有 30 條，其中最主要的河系分別是卑南溪、太麻里溪等，因其輸砂量大，河口外側形成廣大三角洲，卻因東部海岸坡度水深，河川輸砂瞬間即為海流輸送至深溝處，造成沿岸補充不易而引發侵蝕問題。另指出台東海岸漂砂數量及運移方向之觀測記錄較為缺乏，更應加強此一方面的觀測規劃。因此本研究以卑南溪為標的，建置漂砂自動作業化觀測系統。囿於觀測點位較無法全面性解析整體輸砂動態，因此本研究採用廣泛應用於近岸河口等海域之海洋學^[12-14]區域海洋模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System)，結合 2019 年於卑南溪口之現場作業漂砂觀測數據，共

同研討河口輸砂時空分佈現象，提供未來海岸工程設計之相關參考依循。

研究方法

本研究以卑南溪為例，發展自動化海域漂砂觀測系統，並以三維數值模式結合其河川水文特性與海岸漂砂等各項監測數據，釐清河口輸砂與海岸漂砂之相關性，進而解析台灣東部河口之輸砂時空分佈特性。

研究區域

卑南河流域面積約 1,603 平方公里，主流全長約 84.35 公里，河床平均坡降約 1/165，其河面遼闊、河水流量豐富，其支流的沖積扇於花東縱谷中規模僅次花蓮流域。

現場觀測

河道漂砂觀測

本研究蒐集經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口海岸地形變遷趨勢評估基本資料補充調查」^[15]調查卑南溪河口漂砂資料，該調查分別於夏季、颱風季和冬季進行懸浮質漂砂濃度調查（每次僅量測 24 小時），有關河川流速、懸浮質調查、中值粒徑、輸砂量成果如表 1，據以作為數值模式相關參數使用。

河川水位、流速與海域漂砂觀測

經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」^[16]發展自動化海域漂砂觀測系統，此系統與河川量測系統不同，因其錨碇於海底必須有良好水密性，且海底觀測資料無法即時傳輸，因此設置即時傳輸浮球，將觀測結果每小時即時回傳。觀測系統包含：(1) 儀器支架載台；(2) 具水密性之控制與電力系統；(3) 感測器元件以及 (4) 即時傳輸浮球（架構如圖 1）。其中感測器之漂砂濃度量測採用雷射粒徑濃度儀 LISST-Acoustic Backscatter Sensor（簡稱 LISST-ABS）、流速量測使用聲波式都卜勒流速儀 AUQADOPP，

表 1 卑南溪河道流速及懸浮質調查表

期間	流量 (cms)	懸浮質濃度 (mg/L)	中值粒徑 (μm)	輸砂量 (公噸)
夏季	39 ~ 50	768 ~ 3,671	12 ~ 13	7,955
颱風豐水期	1,123 ~ 1,699	河道 10,494 ~ 16,876	15 ~ 24	1,447,000
		河口北側 310 ~ 6,710		
		河口南側 130 ~ 4,380		
冬季	96 ~ 108	1,663 ~ 4,694	28 ~ 29	27,394

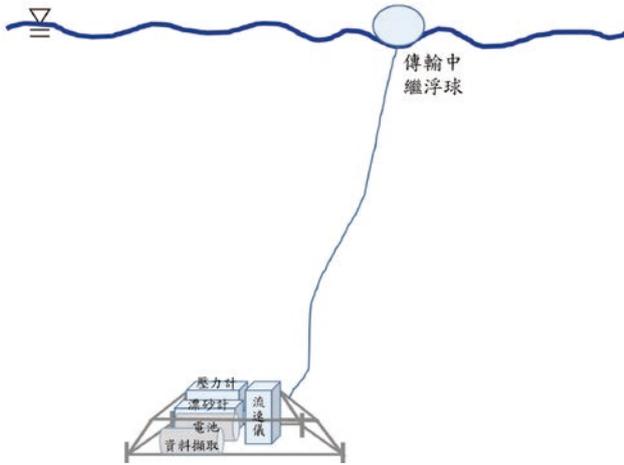


圖 1 卑南溪口海域漂沙觀測系統架構圖



圖 2 卑南溪口海域漂沙觀測點位示意圖

潮位和波浪變化則使用壓力計 JTK-620 型號，再透過零切法 (zero-crossing method) 分析得波高和週期。

為探討河口泥沙傳輸現象，於卑南溪口南北各設置一處海域漂沙觀測點位如圖 2，分別完成了 36 與 42 日之累積觀測日數。觀測期間底床懸浮載濃度皆介於 100 ~ 300 mg/L 之間 (圖 3)，而白鹿颱風期間 (2019 年 8 月 23 日同日發布並解除海上路上颱風警報) 曾測得 3,772 mg/L (圖 4(c))。

為分析整體河川輸砂動態，同時於鄰近出海口之台東大橋佈設河川輸沙觀測點，與海域同步觀測。從

其水位時序列觀測圖 (如圖 4(a))，可見颱風前最低水位為 26.05 m，受白鹿颱風主要的降雨自 8 月 24 日上午開始發生，因此水位自 24 日起明顯驟升，25 日達峰值最高水位為 30.07 m，整體降雨為卑南溪河川水位抬升了 4.02 m。再從流速時序列觀測圖 (如圖 4(b)) 可知平時河川表面流速不及 1 m/s，當小幅度降雨發生時 (如 8 月 10 日前後)，流速略升高至 3 m/s 上下，而颱風期間暴雨導致之洪峰表面流速最快達 6.59 m/s。巨量且湍急之洪水衝擊下終造成海域漂沙觀測儀器於 8 月 25 日上午後遺失 (如圖 4(c))。

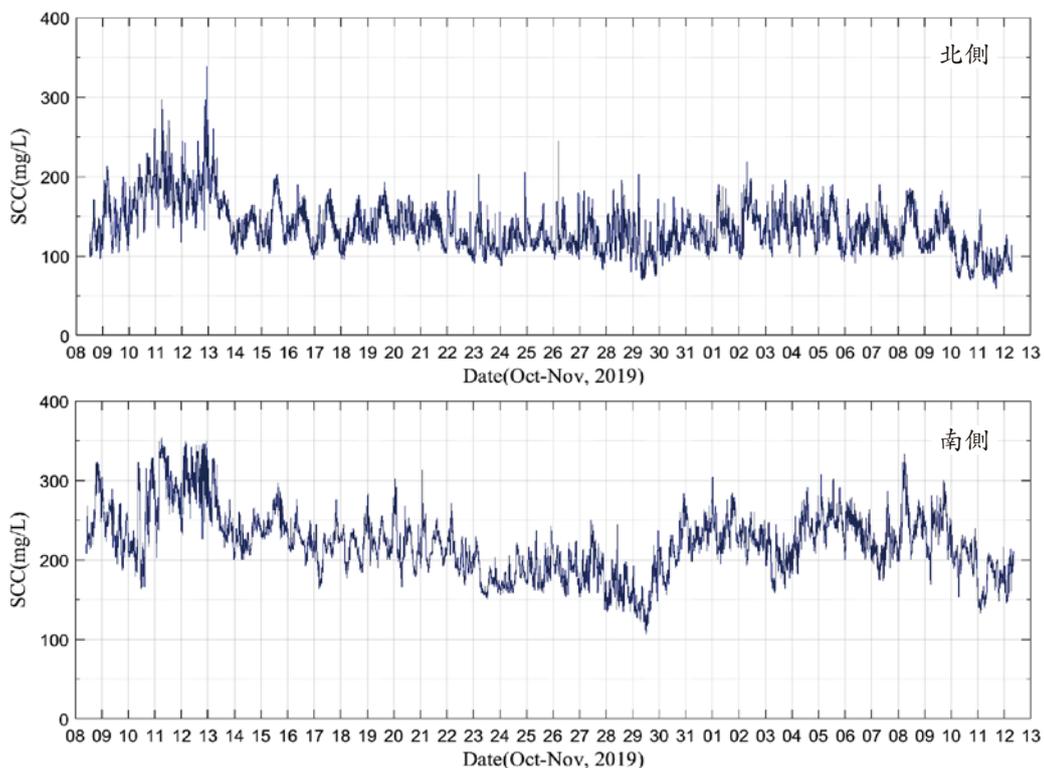


圖 3 卑南溪河口南北側海域 (2019/10/8-2019/11/12) 觀測時序列圖

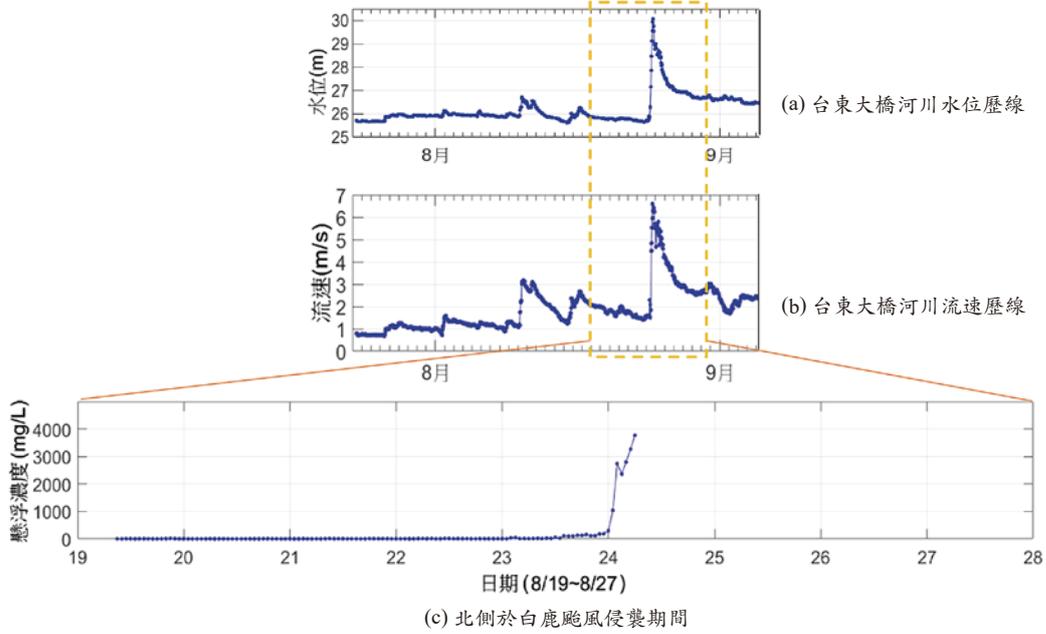


圖 4 卑南溪河口水位、流速歷線與海域懸浮濃度於白鹿颱風期間時序列觀測圖

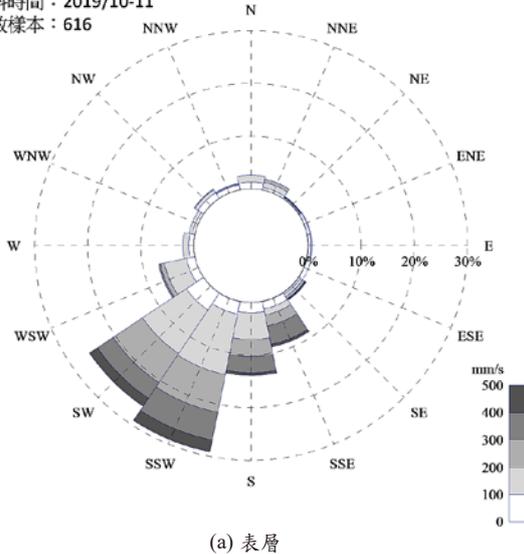
海域流速觀測

前揭海域觀測站點同時紀錄水位、波高、流速、流向等資料，為討論流速與流向對於輸沙之影響，以玫瑰圖分別展示北側站點和南側站點於表層與底層流速之分布如圖 5 和圖 6。二者之表層流速較底層劇烈，而北側海域流向多為西南向與南南西向，整體水流顯著向南；南側海域流向多為東北與西南向，較強流速經潮位比對可知發生於新月前幾天，且往東北向之流速分量明顯高於向南分量。

泥沙傳輸數值模式

本文的數值模式是採用 ROMS 三維模式，李汴軍等人^[7]指出 ROMS 也是採用靜水壓的原始方程組 (RANS equations)，為了簡化方程式 ROMS 運用了兩個假設：第 1 個假設為水體內部的密度差異可以忽略，除非這個差異是由重力所引起，此為布氏近似 (Boussinesq approximation)；第 2 個假設為流體的重量與其壓力梯度平衡，即為靜力假設 (hydrostatic assumption)。此模式可以模擬不同尺度的運動，例如全球尺度的環流模擬、中尺

測站名稱：卑南溪北岸(表層)
資料時間：2019/10-11
有效樣本：616



測站名稱：卑南溪北岸(底層)
資料時間：2019/10-11
有效樣本：835

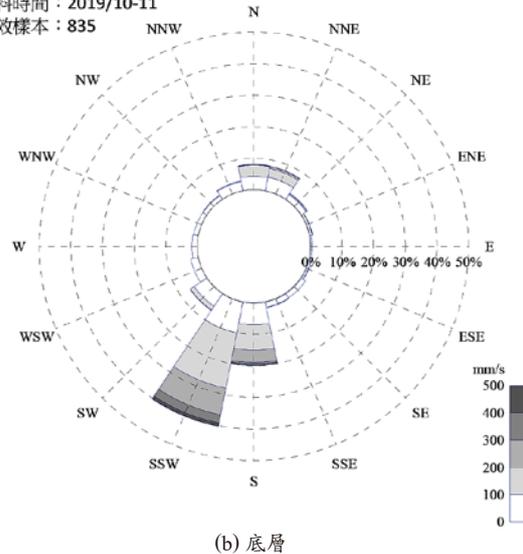


圖 5 卑南溪河口北側海域之流速分布 (觀測時間：2019/10/8-11/12、流向定義為流去方向)

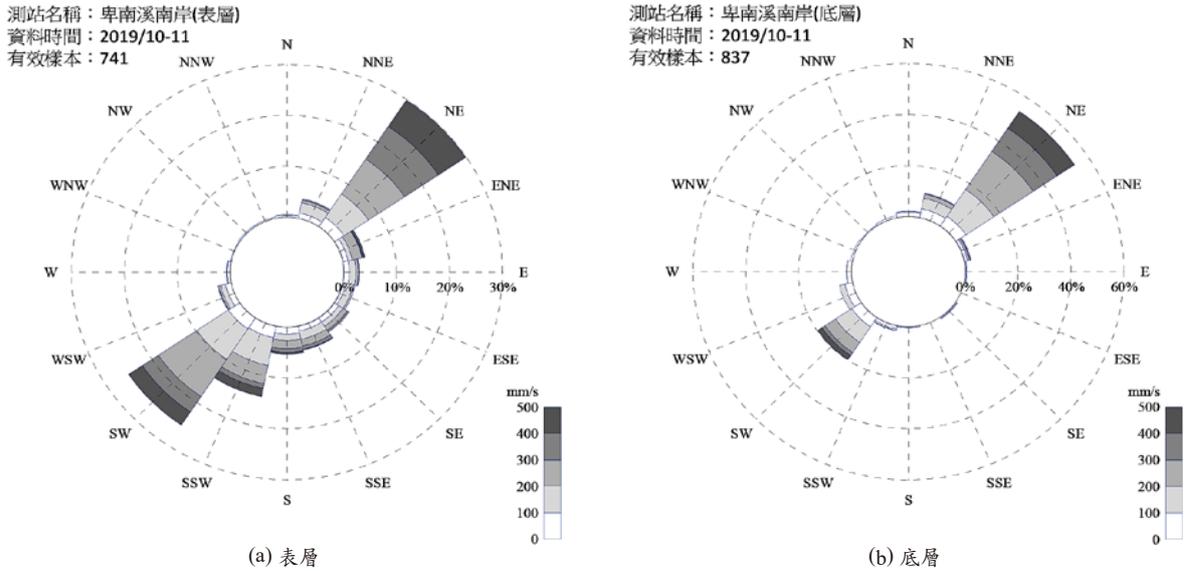


圖 6 卑南溪河口南側海域之流速分布 (觀測時間：2019/10/8-11/12、流向定義為流去方向)

度由氣象因素或是天文潮所引起的水位與流場變化，也可以計算小尺度河川渠道等的水理運動，可適用於推算河口表層與底層等不同垂直向之泥沙濃度分布。前人研究如 Warner *et al.* [18] 曾使用該模式，成功模擬美國喬治亞州溼地（河海交界）之案例。Liu *et al.* [19] 亦曾應用 ROMS 模擬美國路易斯安那州南端海域，並與現地實測之鹽度進行驗證，據以探討 Atchafalaya 河口至近海船型淺水域之泥沙傳輸現象。研究發現於 1 年的模擬期間下，源自河川渠道的泥沙幾乎不會直接沉積於外海淺水區，反而多半是於河口—堰洲島（Barrier Island）—淺灘之間的動態循環，堰洲島群最西側的浣熊島（Raccoon Island）附近水域在接近水體底部的懸浮濃度值普遍較高。

模式數值地形

為模擬卑南溪出海後的泥沙傳輸動向與周遭地形之交互作用，依據卑南溪出海口實測地形水深資料，建構數值地形（如圖 7）供模式使用。黑色線為等深線，深度每 50 公尺增加一條，並且一直延伸到深海水深八百米區域。河口區域網格經過加密處理，垂直網格分為 20 層（sigma-coordinate），水平網格 dx 最小為 56.9 公尺，dy 最小為 55.6 公尺，時間步距為 10 秒。

起始與邊界條件

模式的三個開放邊界以 OSU（Oregon State University）的 Tidal Model Driver（TMD）（Martin *et al.* [20]）所提供之調和常數與全球潮位預報相對應時間之潮位水位，以作為邊界條件。潮汐變化是依據模式所設定之計算區域邊界坐標之 K1, O1, P1, Q1, K2, M2, N2,

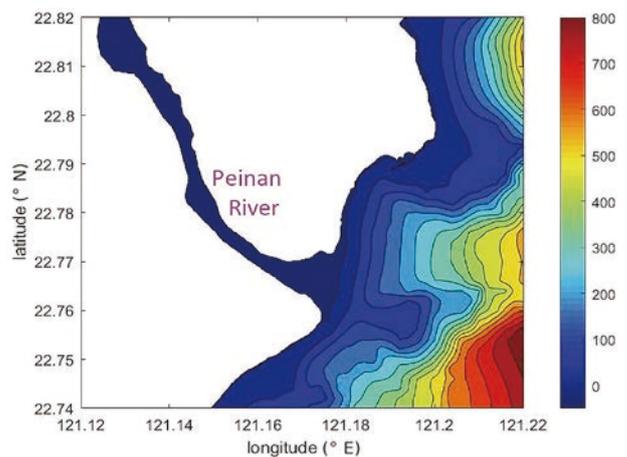


圖 7 數值模式 ROMS 中卑南溪數值地形圖

S2 等十三項分潮組合推估的天文潮位，做為潮汐邊界條件。與富岡漁港之實測水位所求得之調和常數相比，TMD 提供之北邊界振幅較富岡漁港之振幅小，但差距皆在 10 cm 以內。陳佑廷 [21] 曾使用 TMD 模式與台灣沿海 28 個潮位站之調和常數進行比較，經計算預報水位與實測水位其相關係數在西海岸可達 0.98。

結果與討論

為探討不同期間之河口輸沙分佈，本研究分 3 種情境模擬（如表 2），分別為案例 1 冬季基流期、案例 2 一般颱風事件、案例 3 特殊颱風事件，起始流量位置為卑南溪立吉橋，而起始流量、懸砂濃度以及沉積物粒徑分佈皆參考表 1 之實測資料所設定，D50 皆設為 15 μm ，模擬情境時間皆為 24 小時。

表 2 模擬情境對應流量與懸砂濃度

CASE	模擬情境	起始流量 (CMS)	懸砂濃度 (g/L)	圖面展示
案例 1	冬季基流期	108	5	表層分佈
案例 2	一般颱風事件	1,700	17	表層 / 底層 (高 / 低潮)
案例 3	特殊颱風事件	3,000 (參考 2005 年海棠颱風期間觀測結果)	35 (參考歷年流量與輸砂量之迴歸公式)	表層 / 底層 (高 / 低潮)

冬季情境模擬結果

模擬結果皆顯示河口含沙量低於 1 g/L，與實測結果相符。圖 8 顯示案例 1 模擬結果，該圖包含四個子圖，分別顯示 (a) 水體表層懸砂濃度、(b) 地形變化、(c) 表層鹽度及 (d) 深度平均流速之空間分佈結果。結果可發現冬季基流期間由於河川流速較小，河口流速受潮流作用明顯，退潮時期河口流速增大，方向向外，有助於傳輸河口沈積物至沿海區域，由於此處分潮振幅較小，造成之潮流速度亦不大，此時期之地形變化尺度遠小於颱風時期之變化尺度。

一般颱風情境模擬結果

探討案例 2 颱風期間卑南溪之輸砂過程，案例 2 模擬之第 4 個小時結果如圖 9，從該結果可知，海水與淡水混和之交界鹽度約為 20 ppm 左右，在出海口處，隨著時間的推演，河川淡水會從河口處向海洋大面積擴散，使得周圍表層海水鹽度逐漸降低，離河口越遠鹽度越高，而從水體表層懸砂濃度分佈圖 (圖 9(a)) 可

知，河道中斷面較狹窄處至出海口這一段的懸砂濃度 (接近 20 g/L) 比源頭 (17 g/L) 更高，從底床地形變化推斷，高濃度懸浮載源自於被刷深之河道，除了上游源頭提供之沈積物之外，河道亦提供了懸浮沈積物至下游河口。

模擬第 7 個小時結果如圖 10，出海口之懸砂濃度達到 5 g/L 左右，模擬結果顯示颱風期間，河口附近懸浮值濃度最高達 4.38 g/L，此濃度對比表 1 (河口南北側) 調查資料尚為合理。

圖 11 顯示第 24 小時的模擬結果，可知河川內水體表層的鹽度接近 0 ppm，代表此時河川內幾乎為淡水無海水，而在出海口附近，100 公尺等深線上方之表層海水鹽度降到 5 ppm 左右，由於懸浮沉積物多分佈於底層而非表層，河川夾帶著懸浮沉積物流出海後，從河口處向海洋擴散，不過在接近出海口處，因流速減緩，河流之承載能力下降，造成底層懸浮濃度下降，表層懸浮濃度提高形成羽狀流，沉積物在出海口附近積聚，造成河口之地形改變。

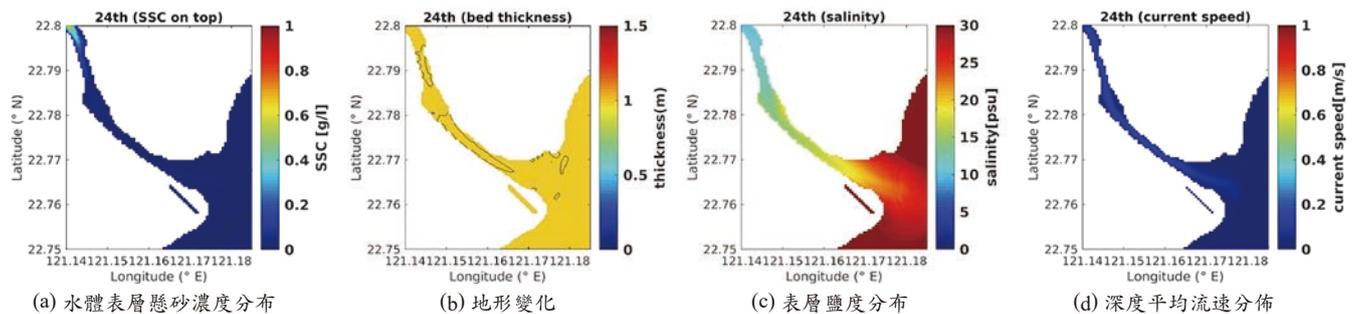


圖 8 案例 1 冬季基流期間第 24 小時模擬結果

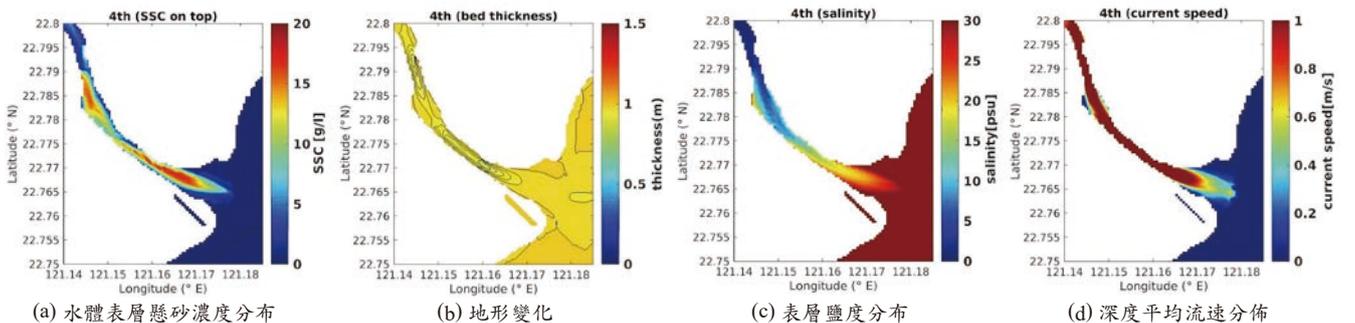


圖 9 案例 2 颱風期間第 4 小時模擬結果

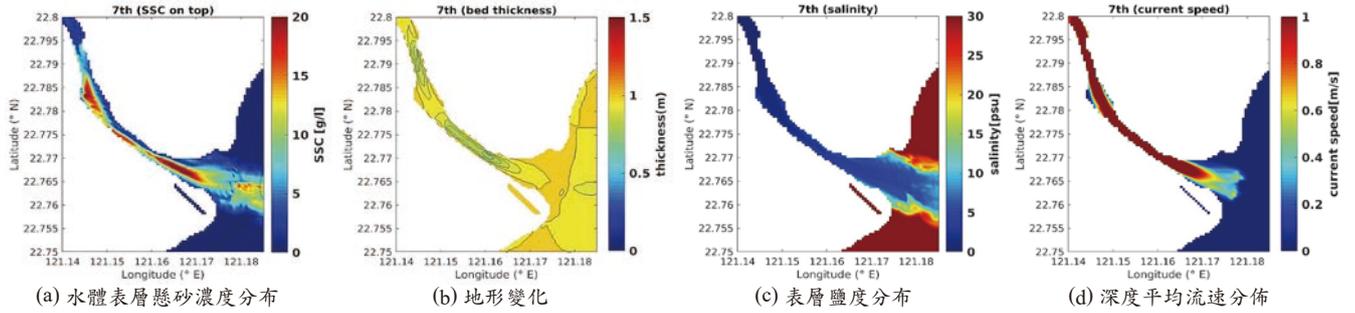


圖 10 案例 2 颱風期間第 7 小時模擬結果

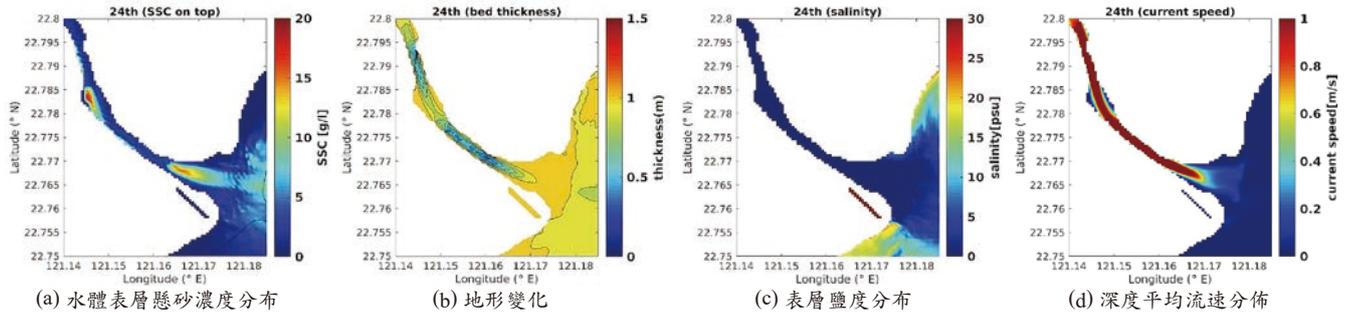


圖 11 案例 2 颱風期間第 24 小時模擬結果

另就高低潮時期探討不同垂直向之懸砂濃度分佈情形。首先為表層懸砂濃度圖（高潮：圖 12(b)，低潮：圖 12(d)），表層濃度之懸浮載濃度可藉高流速 (> 2 m/s) 傳遞至外海。再從底層懸砂濃度圖（高潮：圖 12(a)、低潮：圖 12(c)）中發現，在河口處由於地形擴張流速減緩，底層懸砂濃度由 20 g/L 下降至 5 g/L 以下，表層懸砂濃度由速度較快之表層沖淡水帶往外海且濃度不高（約為 < 5 g/L），河川輸砂主要影響中下游河道部分之地形變遷較明顯，但對河口海岸部分之影響較為有限。

極端颱風情境模擬結果

案例 3 以 2005 年海棠颱風期間尖峰流量約為 3,000 cms，作為數值模式中卑南溪的代表例子。從表層懸砂濃度圖（圖 13(b)、13(d)）中可知，表層濃度之高懸浮載濃度 (> 10 g/L) 可藉高流速 (> 2 m/s) 影響可傳遞至外海。因地形的作用，河口部分較淺或較狹窄處模擬之表面流速可達 4 m/s。從底層懸砂濃度圖（圖 13(a)、13(c)）中發現，河道中斷面較狹窄處至出海口前的懸砂濃度比源頭更高 (> 40 g/L，超過異重流發生之臨界

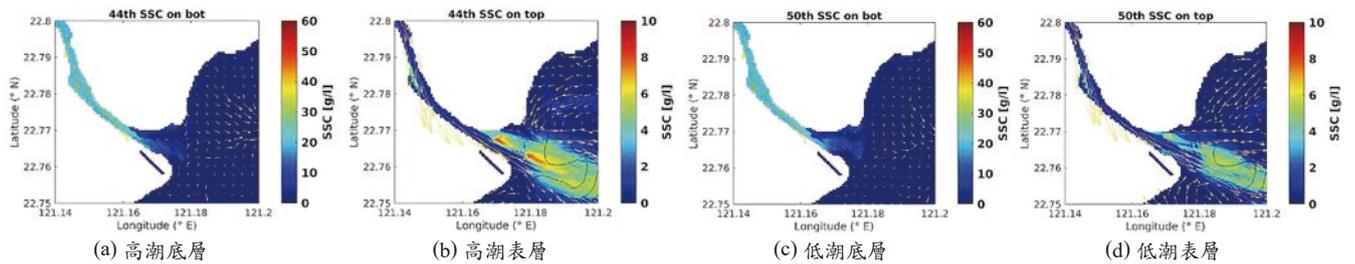


圖 12 案例 2 在高低潮時期懸砂濃度底層與表層分佈圖

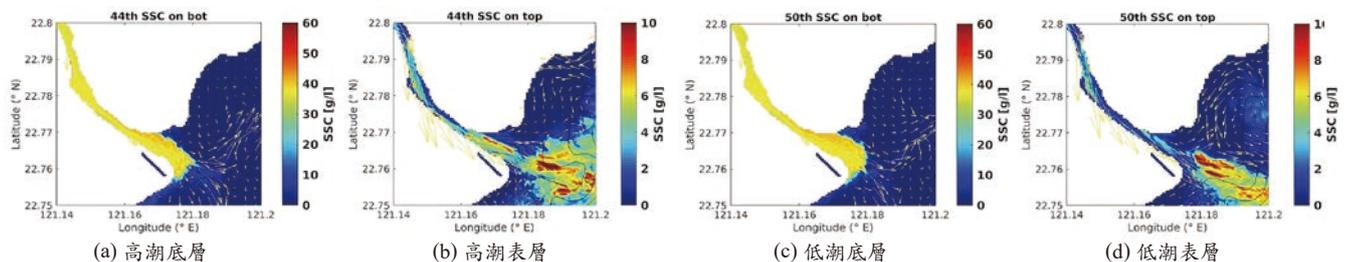


圖 13 案例 3 在高低潮時期懸砂濃度底層與表層分佈圖

值)。從底床地形變化推斷除來自上游之砂源外，河道亦提供大量砂源至河口，且多數高濃度之沈積物沈積於河口處並形成河口砂洲。受沈積物造成之地形變化及潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示河口底層之較高濃度輸砂方向偏南，推斷卑南溪上游之輸砂可補充河口南側的砂源。

結論

為瞭解卑南溪河道漂砂入海後之運移與分布，本計畫使用 ROMS 數值模式進行模擬，並設定 3 種情境進行模擬，模擬結果顯示：

1. 非颱風時期因流量小，河口懸砂濃度偏低，地形變化受河口輸砂影響幾可忽略不計，此時地形變化主要由潮汐及波浪作用所主導。
2. 颱風期間河口的懸浮值濃度可達 4,380 mg/L，其他時期懸浮值濃度皆小於 100 mg/L。
3. 颱風期間，河道會因較強流速而有刷深現象且供給砂源，但河口流速因河道變寬而減弱，造成沈積物堆積於河口附近。
4. 極端颱風波浪模擬結果顯示，河口表層濃度之高懸浮載濃度 ($> 10 \text{ g/L}$)，伴隨高流速作用下可傳送至外海。河口底層較高濃度沈積物造成之地形變化，受潮流方向和科氏力之影響，模擬結果顯示其輸砂方向偏南。

誌謝

本研究係經濟部水利署水利規劃試驗所「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」(計畫編號：MOEAWRA1081101N) 計畫案之研究成果，感謝水利規劃試驗所經費支持，使研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Osadchiv, A. A., Korotenko, K. A., Zavialov, P. O., Chiang, W.-S., and Liu, C.-C. (2016), "Transport and bottom accumulation of fine river sediments under typhoon conditions and associated submarine landslides: case study of the Peinan River, Taiwan," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 41-54.
2. Dadson, S., Hovius, N., Pegg, S., Dade, W. B., Horng, M. J., and Chen, H. (2005), "Hyperpycnal river flows from an active mountain belt," *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110, F04, 016.
3. Kao, S.-J., Chan, S. C., Kuo, C. H., and Liu, K. K. (2005), "Transport-dominated sediment loading in Taiwanese rivers: a case study from the Ma-an Stream," *J. Geol.*, 113, 217-225.
4. Kao, S.-J., Jan, S., Hsu, S.-C., Lee, T.-Y., and Dai, M. (2008), "Sediment budget in the Taiwan Strait with high fluvial sediment inputs from mountainous rivers: New observations and synthesis," *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 19, 525-546.
5. Warrick, J. A. and Milliman, J. D. (2003), "Hyperpycnal sediment discharge from semiarid southern California rivers: implications for coastal sediment budgets," *Geology*, 31, 781-784.
6. Mirabito, C., Haley Jr., P., Lermusiaux, P. F. J., and Leslie, W. G. (2012), "A River Discharge Model for Coastal Taiwan during Typhoon Morakot", Rep. MSEAS-13, MIT, Cambridge, MA.
7. Zhang, M., Townend, I., Zhou, Y. X., and Cai, H. Y. (2016), "Seasonal variation of river and tide energy in the Yangtze estuary, China," *Earth Surface Process and Landforms*, Vol. 41, pp. 98-116.
8. 許盈松、蔡俊鋒、魏綺瑪、黃宏甫 (2007)，「水庫泥沙濁度與濃度率定關係研究—以石門水庫為例」，農業工程學報，第 53 卷，第 1 期。
9. Korotenko, K., A. Osadchiv, P. Zavialov, R. Kao, and C. Ding, (2014), "Effects of bottom topography on dynamics of river discharges intidal regions: Case study of twin plumes in Taiwan Strait." *Ocean Sci.* 10: 863-879.
10. Liu, J., S. Chao, and R. T. Hsu, (2002), "Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume," *Cont. Shelf Res.* 22: 1745-1773.
11. 陳文俊、郭金棟 (2005)，「台東海岸線變遷分析」，第 27 屆海洋工程研討會論文集。
12. Flores, R. P., Rijnsburger, S., Horner-Devine, A. R., Kumar, N., Souza, A. J., and Pietrzak, J. D. (2020), "The formation of turbidity maximum zones by minor axis tidal straining in regions of freshwater influence," *Journal of Physical Oceanography*, 50(5), 1265-1287.
13. Moriarty, J. M., Harris, C. K., and Hadfield, M. G. (2014), "A hydrodynamic and sediment transport model for the Waipaoa Shelf, New Zealand: Sensitivity of fluxes to spatially-varying erodibility and model nesting," *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 336-369.
14. Warner, J. C., *et al.* (2005), "Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment," *Journal of Geophysical Research: Oceans* 110(C5).
15. 詮華國土測繪有限公司 (2018)，「卑南溪河口海岸地形變遷趨勢評估基本資料補充調查」，經濟部水利署水利規劃試驗所。
16. 財團法人成大研究發展基金會 (2019)，「卑南溪河口輸砂及海岸漂砂連續監測及相關性研究」，經濟部水利署水利規劃試驗所。
17. 李汴軍、范揚銘、馮智源 (2010)，「ROMS 海洋模式應用於南灣海域潮流流場模擬」，海洋工程學刊，第 10 卷，第 2 期，第 201-217 頁。
18. Warner, J. C., Defne, Z., Haas, K., and Arango, H. G. (2013), "A wetting and drying scheme for ROMS," *Computers & geosciences*, 58, 54-61.
19. Liu, H., Xu, K., Ou, Y., Bales, R., Zang, Z., and Xue, Z.G. (2020), "Sediment Transport near Ship Shoal for Coastal Restoration in the Louisiana Shelf: A Model Estimate of the Year 2017-2018," *Water*, 12, 2212.
20. Martin, P.J., Smith, S., Posey, P.G., and Dawson, G.M. (2009), "Use of the Oregon State University Tidal Inversion Software (OTIS) to generate improved tidal prediction in the East-Asian Seas," *Naval Research Laboratory, Oceanography Division, Stennis Space Center, MS, USA.*
21. 陳佑廷 (2011)，「台灣海域一公里網格調和常數再探討」，碩士論文，國立臺灣海洋大學海洋環境資訊學系，基隆。



水庫安全蓄水線及其於乾旱預警之應用

虞國興／台灣水資源與農業研究院 院長

朱志彬／農田水利署 簡任正工程司

李元喻／農田水利署 正工程司

受氣候變遷影響，全球極端氣候與罕見水文事件發生頻仍。今（2022）年歐洲面臨 500 年來最嚴重旱災，包含歐洲大陸西部、中部和南部地區近半個歐洲均遭受嚴重乾旱影響。我國在 2020～2021 年亦歷經一場百年大旱，而今（2022）年入夏以來，全台的降雨量偏少，目前南部水庫之入流量與蓄水量持續下降，水情不容樂觀。本文回顧 2022 年歐洲大旱過程中利用傳統 SPI 進行各區域之乾旱監測方式，嘗試採用「變動尺度之 SPI」之乾旱監測方法，以改善提升 SPI 評估乾旱之持續性與嚴重度之研判能力。此外，本文又提出「水庫安全蓄水線」之概念，作為乾旱預警之評估方法。本文以石門水庫灌區為案例，實際應用於 2020 年二期作之停灌決策；經由 2020～2021 年水庫之實際蓄水量驗證結果可知，水庫安全蓄水線在供灌決策實務上確實可行，可提供作為研判未來可能發生之嚴重乾旱狀況，及早預警並啟動各種因應抗旱措施之實務應用參考。

前言

近年全球遭受氣候變遷的衝擊不斷地加劇，極端氣候與罕見水文事件頻仍發生，今（2022）年歐洲面臨 500 年來最嚴重旱災，由歐洲聯盟委員會聯合研究中心（Joint Research Centre, JRC）透過不定期發佈乾旱分析報告（Drought in Europe/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report）^[1,2]，提出歐洲仍有近 3 分之 2 的地區處在乾旱警戒或警報狀態。其中有 47% 的地區面臨乾旱風險，土壤水分明顯不足；另有 17% 的地區處於更嚴重的警報狀態，如圖 1 所示。有不少氣候條件惡化，最嚴重乾旱地區是位處已在 2022 年春季受到乾旱影響的地區，包括義大利北部、法國東南部及匈牙利與羅馬尼亞的部分地區。由乾旱報告數據顯示，即便 8 月至 10 月歐洲部分地區迎來正常的降雨量，仍不足以讓歐洲各地區從超過半年的嚴重乾旱中完全恢復。

同樣地，我國亦連續三年受反聖嬰現象影響，各種颱風似乎只要接近台灣必然會轉向，過去常見 8～9 類之各種侵台颱風路徑，全部消聲匿跡，而造成這幾

年台灣發生乾旱的頻率特別高。在 2020～2021 年才剛經歷了一場超過 300 天之百年大旱，2020 年颱風未侵台使得前一年水庫蓄水量不足，隔年春季降雨亦不如預期且梅雨遲至，至 5 月底全台水庫幾近枯竭，全台依賴水庫灌溉之農業區域幾乎全數停灌，水情異常嚴峻^[3]。今（2022）年入夏以來，全台的降雨量仍然偏少，北部直至 9 月及 10 月幾波颱風環流伴隨東北季風效應，才挹助了水庫蓄水量，目前石門水庫幾近滿庫；但是卻沒有為南部帶來顯著足夠降雨，曾文一烏山頭水庫的入流量與蓄水量持續下降，水情不甚樂觀。

在面對未來頻繁發生的乾旱事件與供灌缺水風險不斷升高之各種嚴峻挑戰，能否運用過去歷史發生的乾旱監測記錄資料，透過大數據分析建立可靠度高之相關乾旱指標與預警評估機制，充分運用所能掌握之即時氣象與水庫堰壩之水文監測資訊，預先研判未來可能發生之乾旱情勢，及早預警並啟動部署各種因應之抗旱措施^[4,5]，減少大規模之停灌發生，以降低乾旱所造成之農業生產損失及農民生計影響。

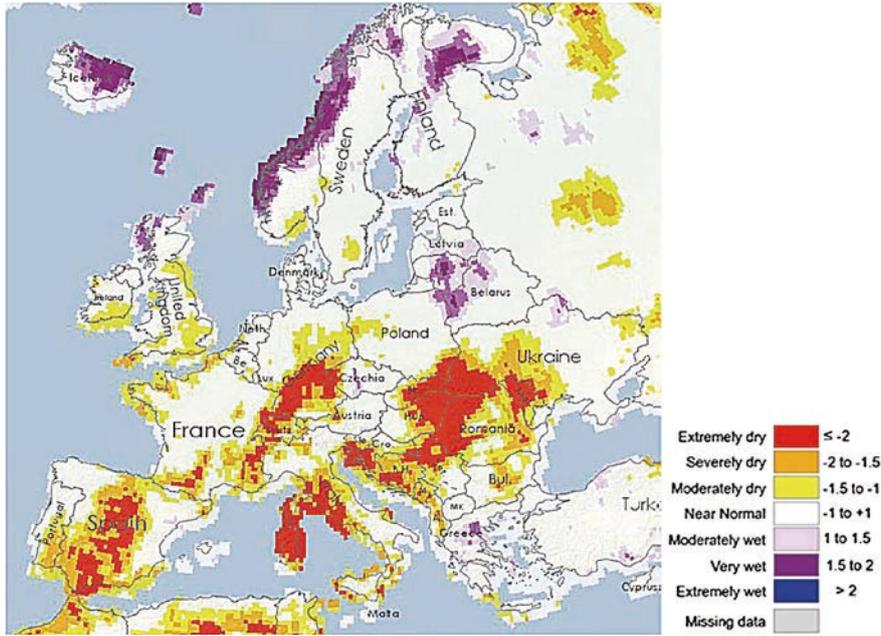


圖 1 歐洲乾旱監測分布圖

(資料來源：Drought in Europe August 2022, JRC GDO: Standardized Precipitation Index SPI-3, three months ending 10th of August 2022. ^[1])

桃園地區乾旱情勢分析

不論是在 JRC 分析歐洲乾旱警戒或警報狀態之報告中或者國內外相關乾旱分析之研究中均常見到以標準化降雨指標 (Standardized Precipitation Index, SPI) 作為乾旱監測及研判嚴重程度之重要指標。SPI 為 McKee 於 1993 年首次於應用氣候學大會上介紹，並於世界氣象組織 (WMO) 乾旱指標手冊中 ^[6] 建議採用之一種標準化降水指數，可用來監測乾旱的嚴重程度並提供早期之預警。傳統上任何地點的 SPI 計算只需要有長期的降雨記錄，並將不同時間尺度 (1, 3, 6...月) 之降雨量機率函數轉化為常態分布，以使其平均 SPI 為零。因此，當 SPI 負值代表雨量偏少，乾旱嚴重程度可根據 SPI 的負值大小來劃分等級，SPI 負值愈大表示乾旱愈嚴重，如表 1 所示。

表 1 利用標準化降雨指標 SPI 之乾旱嚴重度等級

乾旱嚴重度等級	SPI 值範圍
降雨正常	> -0.5
輕度乾旱	-0.5 ~ -1.0
中度乾旱	-0.5 ~ -1.0
重度乾旱	-0.5 ~ -1.0
極度乾旱	< -2.0

過去在利用 SPI 上，常在選擇何種合適之時間尺度而產生困擾，也就是說選太短時間 (如 1 旬)，可能降一場雨 SPI 就轉為正值，無法反應乾旱持續性；若選較長

之時間尺度 (如 6 個月以上)，似乎又無法反應近期的降雨情形。因此，Lin *et al* ^[7] 提出變動尺度 SPI (Variable-scale Standardized Precipitation Index)，以水文年 (每年 5 月至隔年 4 月) 為每年乾旱監測之時間，以旬 (Ten days period, TDP) 為基本時間尺度單位，計算步驟如下：

1. 先計算當旬 (1 TDP) 之 SPI，即 SPI-1
2. 若 SPI-1 < -0.5，則累計推求 2 旬之 SPI，即 SPI-2
3. 若 SPI-2 < -0.5，則須累計推求至 3 旬之 SPI，即 SPI-3
4. 依此類推，若乾旱持續越久，則將累計越多 n (1 ~ 36 旬) 降雨量之 SPI，即 SPI-n (如表 2)
5. SPI-n 能夠兼具反應近期之動態降雨現況，但也不會因短暫之降雨量就立即解除乾旱，故能夠偵測出乾旱持續性的真實狀態，以研判乾旱的嚴重程度

以桃園地區 2020 ~ 2021 年在遭遇百年大旱時期與今 (2022) 年之乾旱水情監測為例，如圖 2 所示。變動尺度能夠真正反應乾旱的持續嚴重程度，如 109 (2020) 年下半年開始發生之乾旱現象持續發生至 110 (2021) 年 5 月已達到極度乾旱之嚴峻程度；同時，觀察到今年 111 (2022) 年至 9 月上旬幾乎快達到重度乾旱等級之狀態，後來幾波颱風環流及東北季風帶來豐沛雨量，才恢復至正常的水情狀態。圖 2 亦顯示桃園地區自 109 年 5 月至 111 年 10 月，於長達二年半期間水情正常之月份極少，氣候變遷改變桃園地區降雨分布已十分明顯。

表 2 變尺度 SPI 隨不同時間尺度之累計降雨量計算 SPI-n

時間	第 j 旬	第 $(j+1)$ 旬	...	第 $(j+n-1)$ 旬
降雨量	r_j	$r_j + r_{j+1}$...	$r_j + r_{j+1} + \dots + r_{j+n-1}$
變尺度 SPI	SPI-1	SPI-2	...	SPI-n

水庫安全蓄水線之建構

灌溉用水範圍因具有較大彈性調整之特性，為滿足區域整體水資源之需求，灌溉水量常須配合調整以支援其他用水標的用水，故目前民生及工業用水量具有較優先之使用順位，水庫必須優先保留供應給民生、工業之用水量後，剩餘之水量才是可供灌溉之水量。因此，為確保民生工業用水無虞，各時期水庫應有之蓄水量，稱之為「水庫安全蓄水量」，可作為評估未來是否可能發生乾旱缺水之早期預警。

一般在枯水期期間，若不考慮水庫蓄水量，僅依賴水庫之入流量則無法滿足民生及工業之用水量需求，然而進入豐水期後，基本上僅靠水庫之入流量即能滿足其需求。以石門水庫為例，若各旬以超越機率 90% 之入流量 $Q_{90,t}$ 與民生及工業之用水量需求比較（如圖 3 所示）可知，水庫之入流量低於民生及工業之用水量主要是發生在 1~4 月，不足量 S_E 約為 3,400 萬噸。

因此，若將枯水期之 11/1 設定為基準日，為確保 11 月到 4 月（枯水期）之民生與工業用水 S_E ，同時再保留 5、6 兩個月之用水無虞（平均 3,000 萬噸/月 \times 2 月），則基準日安全蓄水量 S_0 可設定為： $S_0 = S_E + 6000$ ；安全蓄水量 S_t 計算如下：

$$\begin{cases} S_t = S_{t-1} + Q_{90,t} - D_t & t=1 \sim 20, 30 \sim 35 \\ S_t = S_{20} & t=21 \sim 29 \end{cases}$$

其中， $t = 0$ 為基準日 11 月 1 日； $Q_{90,t}$ 為各旬超越機率 90% 入流量； D_t 為各旬民生工業用水。即假設在各旬水庫入流量均以超越機率 90% 之嚴重偏低流量情境下，必須確保各時期之水庫蓄水量大於安全蓄水量 S_t ，基

本上自枯水期 11 月開始至少需保留 9,400 萬噸（即 $S + 6000$ ， S 約為 3,400 萬噸），超出的蓄水量部分即為可供灌溉利用之水量。原則上，每年 6~8 月（ $t = 21 \sim 29$ ）為颱風季（或豐水期），其入庫流量 Q_{90} 遠大於民生與工業用水需求，若此豐水期間之入庫流量 Q_{90} 恰等於民生與工業用水需求，即 $S_t = S_{20}$ ， $t = 21 \sim 29$ ，表示豐水期降雨已不如預期，如再低於此， $S_t < S_{20}$ ，即顯示水庫蓄水量已呈現不足現象，如圖 4 所示。

枯水期基準日 11/1 之蓄水量 S_0 為變數，若假設 S_0 為 1 億噸（大於水庫需保留之安全蓄水量 9,400 萬噸），並以 107 年~108 年實際之蓄水量為例，如圖 5 所示；圖中，紅色線即為各時期之水庫安全蓄水線，黑色線為 107 年~108 年之實際蓄水量，藍色區間範圍即為可利用之農業水資源（即超出水庫安全蓄水線至實際蓄水量之範圍）。

水庫安全蓄水線之乾旱早期預警

本研究進一步將「水庫安全蓄水量」方法實際應用在 109 二期作之停灌決策評估，如圖 6 所示。當時中央在 10 月 11 日做出停灌決定，由圖可知，石門水庫之蓄水量自 10 月 1 日起即低於水庫安全蓄水量，應予以停灌，故水庫安全蓄水量線可適用在評估是否停灌決策上之實務應用。

此外，進一步由 109 年至 110 年石門水庫之實際蓄水量驗證可知，即便 109 年 10 月中旬二期作已停灌，接續 110 年一期作僅供灌桃三而其餘停灌下，雖然水庫在 1 月上旬蓄水量曾短暫回升至 1 億噸，但水庫在 4 月下旬仍已低於水庫安全蓄水線，5 月下旬水庫幾乎乾涸見底，如圖 7 所示。由此可知，若當時沒有做出停灌之決定，石門水庫必發生空庫情形，桃園地區用水將達無法想像之窘迫情勢。因此，透過水庫安全蓄水線之評估方式，確實可達到早期乾旱預警之目的，及早做出正確之用水決策研判，降低缺水風險之發生。

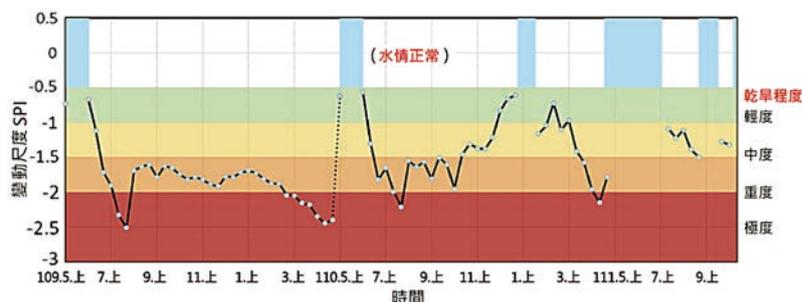


圖 2 桃園地區變尺度 SPI 乾旱指標
（資料來源：台灣水資源與農業研究院整理繪製；參考 Lin et al [2]）

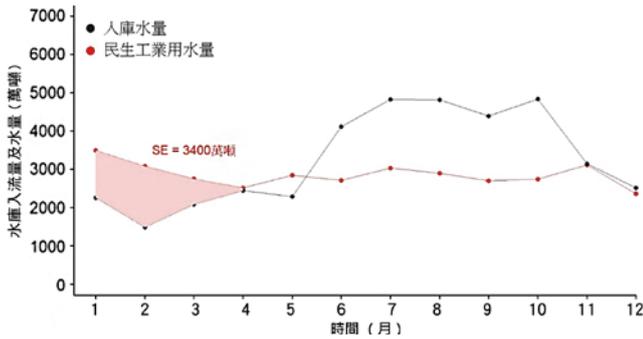


圖 3 石門水庫全年水庫入流量與民生及工業用水量需求比較圖 (以超越機率 90% 之入流量為例)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

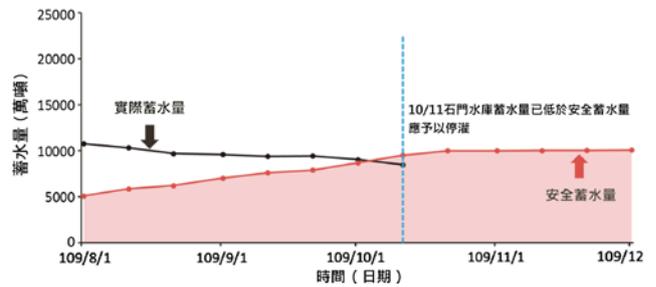


圖 6 以水庫安全蓄水線實際應用在 109 年二期作停灌決策之評估 (資料來源:台灣水資源與農業研究院)

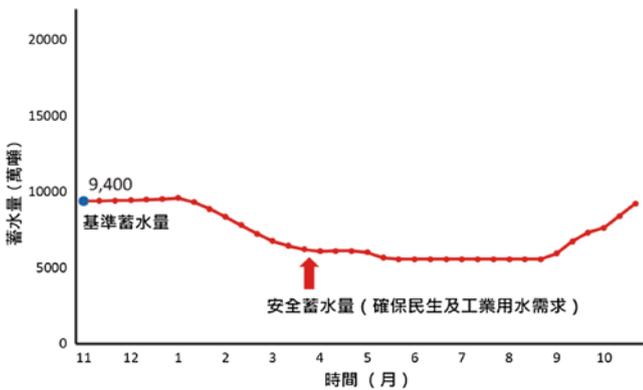


圖 4 石門水庫安全蓄水量線圖 (基準蓄水量 S0 為 9,400 萬噸)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

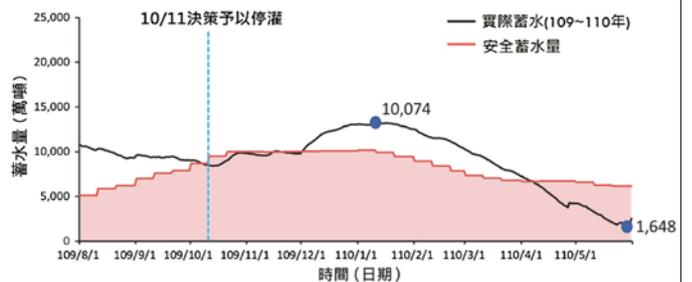


圖 7 以石門水庫 109 年至 110 年實際蓄水量驗證供灌決策之結果
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

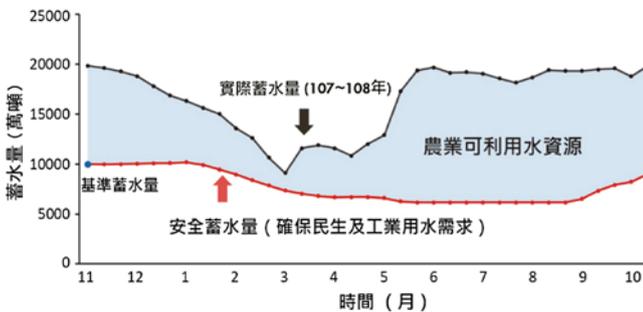


圖 5 水庫安全蓄水線與農業可利用水資源關係圖 (S0 為 1 億噸; 以石門水庫 107~108 年之實際蓄水量為例)
(資料來源:台灣水資源與農業研究院)

結語

針對目前農業水資源必須配合水庫優先滿足民生及工業用水之供水政策下,提出「水庫安全蓄水線」作為兼具滿足農業灌溉用水之早期乾旱缺水之預警方法。本文以石門水庫灌區為案例,推導水庫安全蓄水線作為乾旱預警與供灌決策之評估方法,並實際應用於 2020 年二期作之停灌決策研判。經由 2020~2021 年實際蓄水量之驗證結果可知,水庫安全蓄水線在供灌決策實務上確實可行,可提供未來農業水資源灌溉實務上作為早期乾旱預警與決策研判之應用參考。

參考文獻

1. Joint research centre(JRC), Drought in Europe/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report, August 2022. https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/news/GDO-EDODrought-News202208_Europe.pdf
2. Joint research centre(JRC), Drought in northern Italy/Global Drought Observatory (GDO) Analytical Report, March 2022. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC128974>
3. Tsai SF, Hung MT, Chu CB, Hsieh LS, Wang PJ (2022) The hydrological processes of Taiwan's severe drought event during 2020-21 and the experience of irrigation strategies for fighting drought. Transactions of the 24th ICID International Congress on Irrigation and Drainage, Adelaide, Australia – Abstract Volume: Question 62, 63, and Special Session, 177-178.
4. IPCC, 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., et al. (Eds.), Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Inter- governmental Panel On Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
5. Joint Research Centre (JRC) science for policy report. Karmen Poljanšek, Ainara Casajus Valles, Montserrat Marín Ferrer, Juergen V. Vogt, Maureen Wood, 2019. Recommendations for national risk assessment for disaster risk management in EU: Approaches for identifying, analysing and evaluating risks.
6. World Meteorological Organization(WMO), 2012. Standardized Precipitation Index User Guide, WMO-No. 1090. https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_en_2012.pdf
7. Lin, Teng-Wei, Ke-Sheng Cheng, 2020. Drought Monitoring and Early Warning Using Variable-Scale Standardized Precipitation Index and Stochastic Rainfall Simulation. Master Thesis Report, National Taiwan University.



全國首創水利工程碳預算管理方法

賴建信／經濟部水利署 署長

許朝欽／經濟部水利署 組長

陳加榮、林哲震／經濟部水利署 正工程師

因應溫室氣體排放逐年攀升所致全球暖化效應，如何有效降低其排放甚而達到淨零排放之目標，儼然為全球所倡議及推動之浪潮，爰此，水利署響應我國同步全球之意志，實踐 2050 年淨零排放之願景，於今（111）年 2 月依工程生命週期執行階段率先頒訂「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」，系統性推動工程減碳（Carbon Reduction），並透過逐年設定量化減碳目標，使整體減碳策略及施政方針得以具體落地，尤其為達量化管制目的，水利署更於每年推動眾多水利工程無法逐案盤查之困境下，首創「碳預算管理」方法，透過數據分析、自動程式輔助及工程碳排量審查流程，實質掌握國內水利工程自預算提報與設計階段即依年度減碳量化目標，檢討核定碳排量上限，使工程設計過程可滾動檢討減碳效益，有效鼓動第一線工程人員整合納入低碳工法、減碳設計、綠色經費、減碳施工等具體減碳策略與思維。綜論水利署實質推動系統性工程減碳作業，經統計截至 10 月止今年已發包之 105 件工程，皆符合年度減碳目標設定，且針對全國首創之碳預算管理方法學，更於同年 11 月榮獲第三方公正單位英國標準協會台灣分公司（BSI）查證，闡明水利署已具體且客觀的落地執行，並朝水利工程淨零排放之目標邁進。

前言

聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於今（111）年 8 月公布第六次評估報告（IPCC AR6）揭示人類活動所產生之溫室氣體排放影響已毋庸置疑且造成加速全球氣候暖化現象，而對於排放濃度不斷提升之現況，更全面衝擊人類未來的生存環境，是以，攸關抑制碳排放量持續攀高已儼然成為全球各國需嚴正面對之重要課題。盱衡聯合國於去年召開之第 26 屆聯合國氣候變遷大會（COP26），各國皆倡議面對如此嚴峻挑戰，唯一可能的關鍵即應針對經濟與能源徹底檢討轉型，並放眼「2030 年中期溫室氣體減排、2050 年長期淨零排放」之目標共識，換言之，鑒於近年世界各地極端旱澇事件及熱浪等氣候異常現象頻仍，於各國政府皆展現 2050 年淨零排放之施政決心下，身為海島國家之臺灣，面對淨零轉型的工作更將勢如破竹，誠如蔡英文總統於民國 110 年 4 月 22 日「世界

地球日」出席「永續。地球解方—2021 設計行動高峰會」開幕典禮時表示：「因應氣候變遷，國際上一股新的趨勢正在形成，當世界上多數的國家在談論 2050 年淨零轉型的目標，臺灣亦將不會落後於國際趨勢，積極以系統性部署達到 2050 年淨零排放目標的可能路徑。」因此，水利署作為以利水、治水、親水、活水為核心目標之行政（主管）機關，更有感於面對氣候變遷所帶來氣候災害之各項嚴峻挑戰，尤其去年臺灣遭逢自民國紀年（西元 1911 年）以來全年累積雨量僅 880.4 mm（如圖 1）之百年大旱，使水利署深刻的體認到唯有正視未來氣候變遷的威脅，並同步我國今年 3 月公布「2050 淨零排放路徑及策略總說明」之內涵，積極推動落實淨零轉型目標，才有機會使臺灣擁有更好的耐受能力與韌性，援引氣候專家 James P. Bruce 提出「如果氣候變遷是一條鯊魚，水資源就會是牠的利牙」之呼籲，面臨 2050 年淨零排放之減碳挑戰水利署責無旁貸。

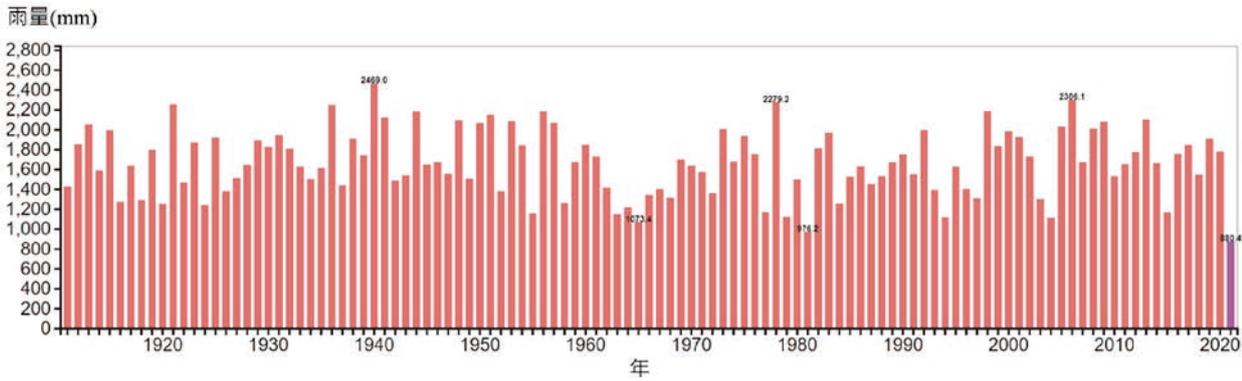


圖 1 全臺歷年累積雨量直條圖
資料來源：氣象局提供（民國 110 年）

水利工程減碳目標

因應碳排放量持續攀升，溫室氣體效應導致全球暖化及氣候變遷，水利署超前部署率先推動水利工程落實節能減碳，以 2050 淨零碳排為核心目標，貫徹水利工程生命週期減碳之管理思維（概念圖詳圖 2），整體概念架構由實質減碳政策引導，使工程生命週期之各階段逐步朝減量規劃、減碳設計、減碳施工及營運節能等面向推動多元化之減碳策略，尤以今（111）年 2 月水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」，並於同年 11 月通過 BSI 查證後函頒修訂第二版，具體研提碳排放管理辦法及整體減碳策略（包括綠色經費佔 5% 經費以上、混凝土規範礦物摻料提升等）供各所屬機關依循推動。

然而，欲達水利工程淨零碳排之目標並非一蹴即至，雖水利署已函頒指引且提倡各項減碳策略，惟針對水利工程整體減碳之目標設定，仍須藉由明確之淨零時程、關鍵里程碑設定與減碳路徑規劃，始能掌握

推動成效及檢討施政方針，本文取以英國 2008 年制定「氣候變遷法」(Climate Change Act, CCA) 之溫室氣體排放管理手段，除立訂氣候變遷法奠定排放減量之法律約束力外，針對淨零時程亦明確以 2020 年減量達 37%（相較於 1990 年的水準）、2025 年達 51% 及 2030 年達 57% 之目標，以便實現 2050 年完成淨零排放，同時為確達目標更採 5 年為期，設定排放上限 (Cap) 及制定各項管理機制與流程^[1-4]，顯示透過總量管制及實踐永續管理之作法，為減碳策略布局之可行作為，遂水利署為落實水利工程減碳願景，以工程標案之預算書中所載與碳排放有關之各項活動資訊，採數據分析方法盤點民國 108 年至 110 年發包工程之年平均碳排放量，以為基期碳排放進行總量管制，並分別訂以 2022 年減碳基期碳排放 20%、2023 年減碳基期碳排放 30%、2030 年減碳基期碳排放 40%，直至 2050 年減碳基期碳排放 50%，並搭配轄管土地植樹固碳等措施，同步全球達成碳中和目標。



圖 2 水利工程生命週期減碳概念圖

水利工程「碳預算管理」方法

對於工程減碳之實質方法，經回顧國內外案例多為個案工程執行碳盤查，並進一步設定減碳目標與方案為主，如我國「蘇花改計畫工程」（圖 3(a)）、英國「Dymchurch Frontage A 河堤工程」（圖 3(b)），即透過規劃階段估算碳排放量，並由第三方碳管理單位輔導減碳設計，及施工期間執行碳盤查（ISO14067）建構完整碳管理架構^[5]，反觀水利署每年平均核辦 300 餘件工程之規模，案件繁多實難以一概之，或逐案導入碳盤查作業推動減碳作業，為此，水利署今（111）年獨步全國首創提出「碳預算管理」方法，以因應工程減碳之量化管理及目標設定，整體方法主要建構於碳排放量估算方式與流程之率定，透過盤點過去民國 108 年至 110 年水利署推動水利工程之碳排放量（平均每年排放約 58.7 萬 tCO₂e），作為基準值（基期碳排放量）率定逐年減碳目標，並進一步以工程發包年相應減碳目標，逐案設定各類工程碳排放量上限及減碳量，而其碳排放量上限則為本文所定義之碳預算，又碳預算管理方法則自工程勘評階段，即與經費核定方式同步各別審核容許碳排放量，並進行個案及總量碳排管控，具體掌握及限制核辦後設計階段之工程碳排放量，且倘遇個案工程因特殊原因致無法達標，則可由各執行單位所建立之推動協調小組，循以各所屬機關為單位，進行內部工程案碳額度交易（調整）審議或報署協調管控，達成碳排放量總量管制之目的。

工程碳排放量審查程序

由於水利工程執行面向廣泛且種類不勝枚舉，為使前揭「碳預算管理」之系統性管理模式，具體實踐減碳策略於所推動之各類工程，經考量執行單位、工程類別及採購方式等屬性，概可分為河海工程（包含河海類工程、集水區保育治理工程及一般疏濬工程）、水資源小型工程及水資源大型報院計畫工程等類別^[6-8]，適性制定各類別工程減碳審查流程，且考量工程採購作業、執行期程及規模之差異，除水資源大型報院計畫工程採專案列管外，對於河海工程及水資源小型工程之減碳作業推動與審查流程（如圖 4），依序可分為碳預算管理目標確立、提報工程碳排放量盤點、執行檢核設計及檢核、工程發包及造冊列管等，逐步規範及檢視各類別推動工程之碳排放量，使管制作業確符目標需求。

碳預算管理目標確立

水利工程減碳為水利署推動之精神核心，本階段可謂碳預算管理之最高政策指導原則，對於目標之確立主要為碳預算上限訂定，又訂定依據除參考我國減碳路徑規劃外，對於年度工程推動之碳排總量，更依據水利署數據分析民國 108 年至 110 年推動之河海工程、水資源小型工程碳排放量（基準值佔基期碳排放量約 46.1 萬 tCO₂e），並循各年度減碳目標之設定（2022 年減少 20%、2023 年減少 30% 等）計算水利署目標年容許碳排總量，並依數據分析中所得，各執行單位歷年



圖 3(a) 火車替代卡車運輸土石之蘇花改計畫工程
資料來源：公路總局



圖 3(b) 採預鑄及水運方式之 Dymchurch Frontage A 河堤工程
資料來源：UK Environmental Agency, 2010, Construction Carbon Calculator in practice.

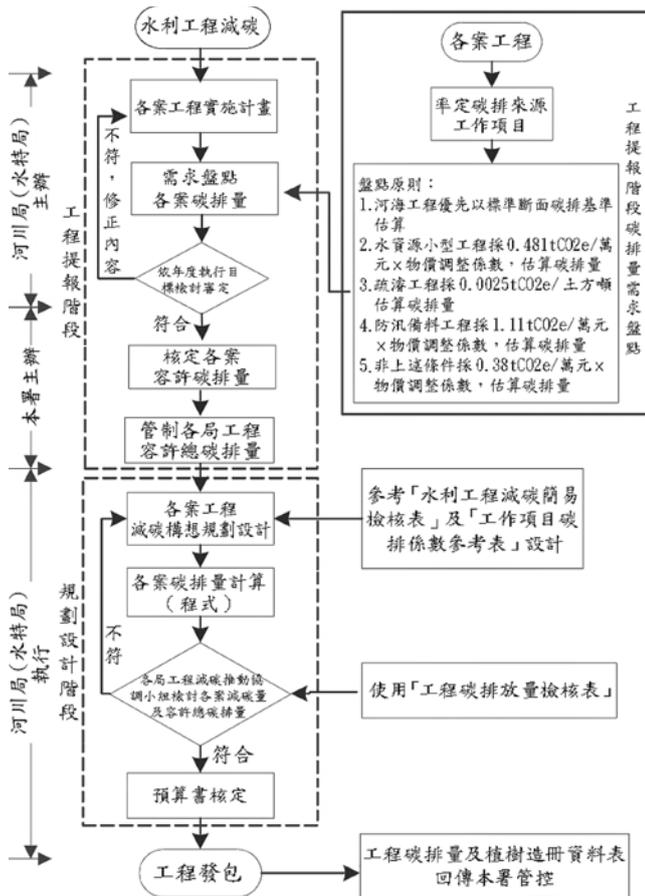


圖 4 河海工程、水資源小型工程碳排量審查流程圖

推動水利工程之數量與規模等數據經驗，由水利署統籌分配容許總碳排量，以確立碳預算管理目標，使整體機制分權分工的落地管制。

提報工程碳排量盤點

執行單位於工程計畫進入提報階段時，首先應確認工程實施必要性，並依特性於實施計畫中納入減碳思維之規劃及說明，提出耐久性、易維護、減少營運耗能之節能減碳構想，至水利署啟動提報工程先期作業時，各執行單位需盤點碳排來源工作項目，並透過「水利工程減碳作業參考指引」中建議之標準斷面碳排基準，或循基期數據分析所得之各類別碳排量回歸成果（疏濬工程約 0.0025 噸 CO₂e/ 土方噸、防汛備料工程約 1.11 噸 CO₂e/ 萬元、水資源小型工程約 0.481 噸 CO₂e/ 萬元、非上述條件約 0.38 噸 CO₂e/ 萬元）估算各案工程碳量後，據以提報由水利署依年度減碳目標，召開會議檢討及審定各案容許碳排量（與經費核定方式同步）。

執行減碳設計及檢核

完成工程容許碳排量之審定後，工程設計人員即

依實施計畫之節能減碳構想，參照「水利工程減碳作業參考指引」減碳策略、「水利工程減碳簡易檢核表」及「工作項目碳排係數參考表」，進行工程減碳構想規劃設計，並於編列工程預算書時運用經費電腦估價系統（簡稱 PCCES）編碼編列成果^[9-11]，以及水利署開發之碳排量計算工具，實際計算與填報工程碳排放量檢核表，以提送各執行單位成立之工程減碳推動協調小組檢討碳排量，同時針對超過所核容許碳排量者，則應重新檢討減碳構想規劃設計、修正工程內容或執行工程間碳額度交易後，由各局自行核定，以達成總控管目標。

工程發包及植樹造冊控管

最後，透過前開程序自構思減碳構想、提報工程審議，乃至於執行單位成立推動協調小組，逐層檢討減碳量及執行總量管制，所辦工程即可依程序核定預算書及發包執行，實踐減碳設計理念及落實思維於施工階段，而其中為使植樹固碳之效益得以如實彰顯，對於工程內所辦種植之灌木、喬木皆由各執行單位於 1、4、7、10 月上旬前彙整前一季數量後，提報水利署造冊控管各項植栽養護工作。

專案列管之水資源大型報院計畫

有別於前開河海工程及水資源小型工程，水資源大型報院計畫工程因每年經費與核定期程不確定性高，為避免該類工程碳排量計列於發包年度，所致碳排量突增之失真現象，管制作為以專案列管並採容許碳排量平均攤入至各年度進行總量管控，而整體減碳效益則俟全數細部設計完成後，再與計畫報院規劃階段之總碳排量進行差異分析與檢討。故水利署循前開專案列管方式，經數據分析民國 108 年至 110 年推動之有關計畫工程，碳排量基準值佔基期碳排量約 12.6 萬 tCO₂e，並為達整體減碳之目標，各案工程碳排量審查流程如圖 5，由流程圖中可見，各類水資源大型報院計畫工程之減碳構思從報院計畫中即由執行機關與水利署、水利規劃試驗所共同參與，提前將減碳作為納入規劃考量（包含計畫經費、期程、總碳排量等），又於實質推動過程中，各執行單位工程減碳推動協調小組應依年度執行目標檢討審定後，於設計階段依採購策略之差異，率定切符實際之檢視程序，例如涉及非統包工程，碳排量審查程序適用河海工程及水資源小型工程審查程序，而對觀統包工程則因於決標後始辦設計，故採各階段細部設計時估算實

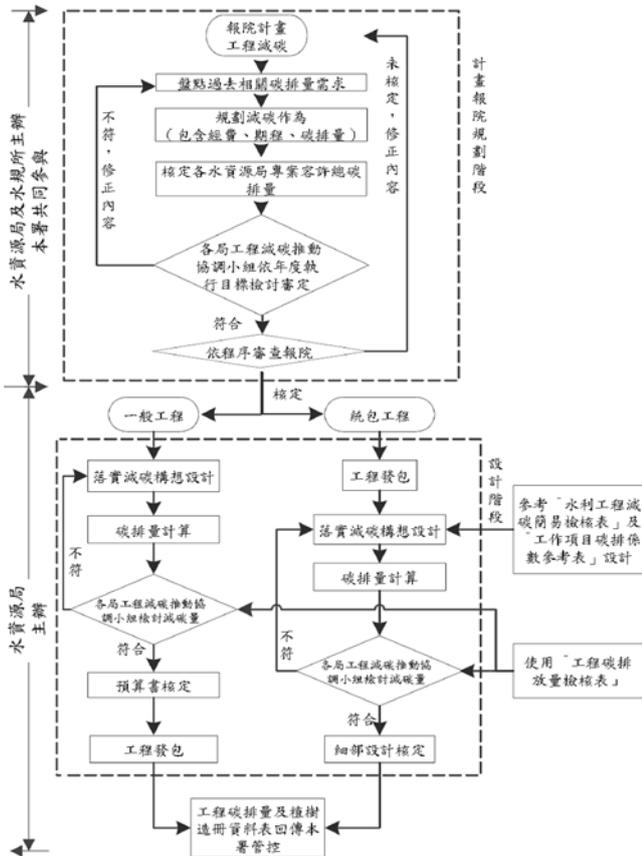


圖 5 水資源大型報院計畫工程碳排量審查流程圖

際碳排量，並由各局工程減碳推動協調小組檢討減碳量後分階段核定執行後，再於全數完成細部設計時，將工程減碳量及植樹造冊資料表回傳水利署統籌管控，以整體呈現減碳成果。

碳排量估算方式與流程

綜理前揭各項減碳目標及量化管制作為與程序，究其根本皆立基於碳排量之估算原則與水利工程各工作項目碳排係數之建立，考量工程各階段可蒐集之數據精細度及涵蓋範圍完整性，影響工程碳排量推估及減碳成效評估之客觀性，對於水利工程設計之碳排量估算，主要根據英國標準協會（British Standards

Institution, BSI) 公布之 PAS 2050 準則，採以「排放係數法」由各工作項目的「活動強度」乘以「碳排係數」所得之合計加以估計二氧化碳當量 (CO₂e)，即

$$\text{碳排量 (CO}_2\text{e)} = \sum \text{活動強度} \times \text{碳排係數}$$

式中「活動強度」(Activity Intensity) 泛指一段時間內之生產量 (或能源消耗量或服務量) 大小；而「碳排係數」(Emission Factors) 則指每單位原 (物) 料、燃料使用量、產品產量或其他操作量所排放造成之溫室氣體排放量。

循上揭推估方式，針對水利工程設計資料之材料用量及機具操作時數耗能而產生的二氧化碳當量，可細究工程中各工作項目之單價分析，根據水利署頒定之「水利工程工資工率分析參考手冊」(民國 108 年) (簡稱工資工率手冊) 內容 [12]，工程預算書中單價分析即囊括「機具」(含電力 / 燃料使用)、「工料」、及「人員」等三大類，同時依其組成之活動強度，並透過文獻或公開資訊提供之碳排係數資料 [13,14-16]，以單位長度、體積或重量中原料含量，乘以現有的原料碳排係數進行轉換，進而求得各工作項目之碳排當量 (或作工作項目碳排係數)，其中考量「人員」部分為既存碳排來源，不因工程實施而加計於工項碳排量，故「人員」單位碳排量採計為 0，再以坡面工工作項目為例，詳表 1，透過工料內容組成並選用適當之單位碳排量，即可求得該工作項目之碳排係數。因此，整體估算作業可流程化如圖 6，首先依據工程預算書等內容作為估算資料來源，分析其工作項目活動單位與數量，並率定出工項活動強度及碳排係數等資訊，同時透過各工作項目之組成進行工程排放量計算以及探討與分析。

承續前項訂定之方法基礎，整體工程碳排量估算之客觀性亦取決於邊界之立訂，援引環保署「溫室氣體排放量盤查作業指引」(民國 111 年) 規定，進行溫室氣體盤查可界定範疇原則，定義工程之碳排量估算

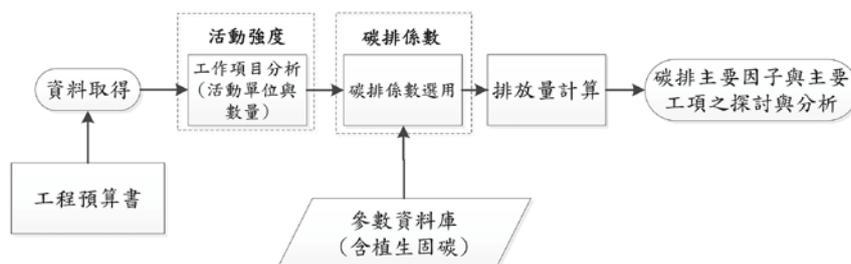


圖 6 碳排量估算流程圖

表 1 坡面工工作項目單位碳排量範例

工作項目：坡面工，混凝土，厚 20 cm		單位：M2		計價代碼：0238510302	
工料名稱	單位	數量	單位碳排量	碳排量 (kgCO ₂ e)	編碼 (備註)
產品，預拌混凝土材料費，175 kgf/cm ²	M3	0.200	193.145	38.629	
技術工	工	0.005	0.000	0.000	
普通工	工	0.010	0.000	0.000	
開挖機，0.70~0.79 m ³	時	0.022	49.068	1.079	
零星工料	式	1.000	0.000	0.000	
合計	M2	1.000		39.708	
人工：	機具：	碳排係數 (kgCO ₂ e / M2) 計		39.708	
材料：	雜項：				

資料來源：「水利工程工資工率分析參考手冊」(民國 108 年)

歸納為「範疇一之直接排放」、「範疇二之能源間接排放」及「範疇三之其他間接排放」，並各工程碳排邊界圖如圖 7，具體估算內容如下^[5-14,17-21]：

1. 直接排放：指施工機具設備或現場燃料使用後產生之碳排量。
2. 能源間接排放：指工區範圍內之外購能源所產生之碳排量。
3. 其他間接排放：指工程所需之工程材料（包含工區內因運輸行為使燃料耗用）碳排量總和。

邊界圖涵蓋內容原則以工區範圍為界，包括工區範圍、工務所等，並考量水利工程複雜性及不可控制因素，為提供規劃設計人員簡易計算，碳排量認定原則為就直接工程費（主體工程部份）進行估算，不包括間接工作費（環境保護措施費、職業安全衛生費、品質管制作業費、廠商管理費、營造綜合保險費、營業稅等）之內容，同時機電、設備類回歸生產端考量，以利效推動及落實於設計階段之執行；另植樹固碳部分，則以灌木及喬木植樹復育之固碳量，率定喬木齡採 30 年估算，並灌木採 5 年估算每株於工程生命週期中之固碳量^[9]，而估算時依其樹量（平均單株）

進行估算加總，嗣於工程規劃設計階段計算排碳量予以扣除（固碳量），以落實強化植樹固碳及減碳理念。

綜上所述，為能有效且快速進行各案水利工程之碳排量估算，於完整率定估算流程、邊界及確認資料來源之前提下，本文進一步藉由行政院公共工程委員會開發既有之 PCCES 架構，透過系統中各工作項目編碼之格式化過程，以其編碼作為碳排係數自動化代入估算之索引，進行 Microsoft Office 之應用程式 Visual Basic for Application（簡稱 VBA）開發，同時透過可拆解率（程式擷取計算碳量之項目經費 / 預算經費）之指標設定與控制，估計民國 108 年至 110 年全署推動約 930 件水利工程之碳排量，並進而於考量工程屬性及其物調指數等特性下，線性迴歸單位經費下之碳排量，供各執行單位於工程提報階段憑辦估列需求之數據經驗參考，經分別根據過去三年所執行之工程經驗，進行線性迴歸分析結果，河海工程（不含疏濬、防汛備料工程）碳排量約為 0.38 tCO₂e / 萬元（詳圖 8）、防汛備料工程碳排量約為 1.11 tCO₂e / 萬元（詳圖 9）、水資源非專案工程碳排量約為 0.48 tCO₂e / 萬元（詳圖 10），另疏濬工程則因工程屬性與活動內容與經費無相關性，故採以土方處理量進行碳排量迴歸計算，並依迴歸結果碳排量約 0.0025 tCO₂e / 噸（詳圖 11）。

依分析所見，相較於防汛備料或疏濬工程，雖河海工程受工程性質差異所影響致離散度（相關係數約 0.59）較大，惟依工作項目之經費規模與碳排量之關係趨勢，仍具一定程度之關聯性，爰作為提報階段估計需求使用，並進一步於設計階段實際估算碳排量，仍可發揮量化管制及系統性減碳之效果，至於提高該類工程迴歸分析之相關性，則將於後續進一步納入工程性質、預算金額與碳排放量辦理相關性分析及敏感度分析。

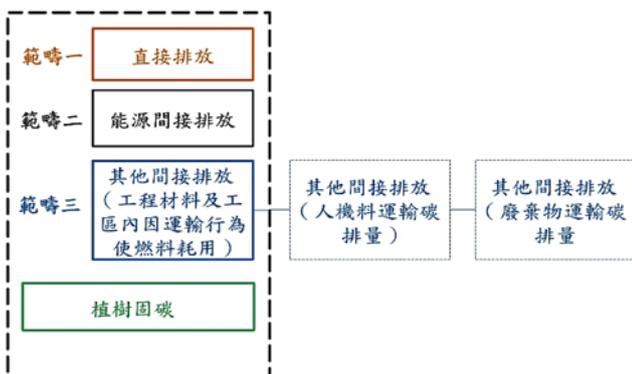


圖 7 工程碳排邊界圖

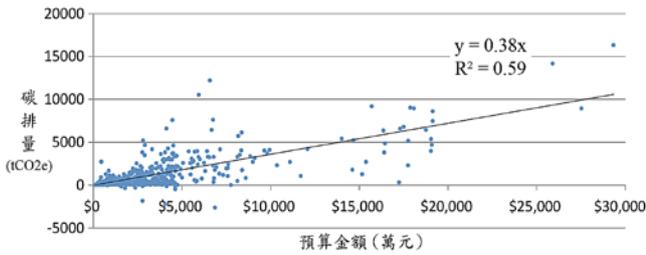


圖 8 河海工程碳排量及經費分布圖

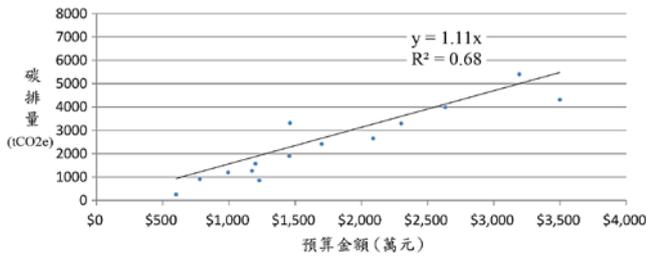


圖 9 防汛備料碳排量及經費分布圖

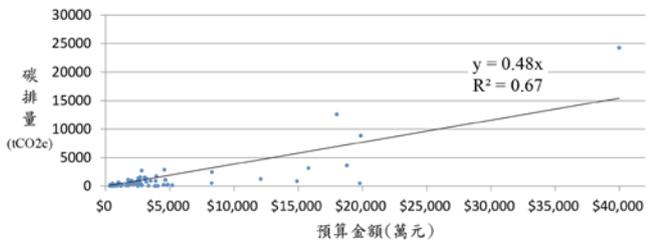


圖 10 水資源非專業工程碳排量及經費分布圖

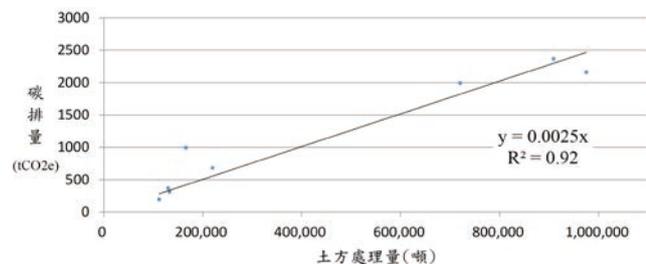


圖 11 疏濬工程碳排量及經費分布圖

水利工程碳排量計算方法驗證

為確認前揭碳排量計算方法符合實際，本文引以水利署第七河川局於民國 111 年 3 月 15 日發包執行，並於同年 7 月 20 日完工在案之「旗山溪溪洲河段河道整理工程」為驗證案例，進行碳排量估算成果與施工日誌登載實際機具活動碳排量之差異分析，該工程期間工程實施項目囊括河道整理、河道疏通整理、施作臨時護岸、堆置等作業，工項多以土方之挖方工作為主，經統計整體處理土方量（活動強度）約為 222,014 m³，爰依水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引」所載之碳排係數（0.981kg CO₂e/m³）換算，挖方工作之碳排量約為 217.9 tCO₂e/；又調查該工程於施工計畫及施工日誌所登載之機具管理資訊，可知實際出工機具計為每日 5

台挖土機，並實際施作工期為 112 天，經洽承攬廠商推估表示平均能源耗油量約 600.0 L/天，挖土機所產生之總耗油量約為 67,200 L，並以環保署於「產品碳足跡資訊網」公佈之單位碳排量（約 3.48 kgCO₂e/L），總碳排量約 233.9 tCO₂e，因此，經比較本文率定之碳排量計算方法與實際盤查施工日誌登載之挖土機使用能源耗油量換算碳排量，整體差異約為 7.3%，顯見水利署首創之水利工程碳預算管理方法，可準確應用導入碳排量計算，藉此使設計階段達到量化掌握實際碳排量之效果，提高節能減碳觀念導入及減量設計之效率，惟針對工項碳排係數資料庫之擴充，水利署仍將持續輔以工程碳盤查，逐步蒐集水利工程各工項之有關特性與數據，使管理方法可適地適性的計算與管制碳排量。

小結

水利署透過函頒「水利工程減碳作業參考指引」及 VBA 程式開發，已於今（111）年全面啟動碳預算管理方法，有效將減碳思維及推動流程與方法落實於各所屬機關執行，根據年度之目標設定，如 111 年以 46.9 萬噸作為管控上限，即以基期碳排量（58.7 萬噸）減碳 20%，於各案工程規劃設計階段全數納入減碳策略因地制宜落實減碳設計，同時透過利用碳排量估算程式，在預算書成立時即能自行檢視碳排量，避免超過總量上限或啟動碳額度交易機制，除個案管控碳排量外，於總量管制上亦可充分掌握及深度管理，以今年度為例，截至 10 月已核辦水利工程計 177 件，並目前發包 105 件工程皆符合減碳量 20%，且合於總量管制之 46.9 萬噸以下，可謂水利署經由初始目標設定、律定碳排量計算模式及總量管控等碳預算管理方法，確可朝淨零目標逐步落地推動。

因地制宜推動減碳策略

為落實水利署戮力推動之減碳目標及各項減碳行動構想架構，並考量工程規劃設計階段即納入減碳思維最具效益，水利署除落實量化估計及數據管理外，對於水利工程減碳策略亦因地制宜施以具體方針，本文綜理水利工程減碳方針略可歸以綠色材料、綠色能源、綠色工法、綠色環境等面向，並實質內容除積極導入再生材料、減廢、營建自動化、生態、節能、固碳、耐久等多元措施與概念外^[18,22]，推動過程中更擬具「水利工程減碳簡易檢核表」（圖 12）供各執行單位於規劃設計階段檢視依循，以強化相關概念之落實，同時為展決心，水

節能減碳之綠色工法

於水利工程設計時即因地制宜使用自然材料，並詳細評估營建材料的使用量，充分降低對於環境衝擊，及減少工程廢棄物產生，而實質作為如廣泛應用回包式加勁工法、土工沙腸袋工法、石籠工法及搭配現地土石或取自工區河床自然石材之砌石工法等，同時拆除既有構造物之混凝土亦可運至堤前進行坡腳保護，創造表面之天然綠化植生面積並有效減少混凝土用量，另對於水利工程常見之土方工作，則以土方挖填平衡方式設計或透過公共工程土石交換，降低土方開挖量或棄土量，並減少土方運入或外運，減少載運所衍生之汙染與能源消耗；至於施工階段除建議透過工程管理手段，對妥善規劃營建材料之供應、動線及配置，提升裝卸效率外，對於施工方式亦鼓勵採用自動化、標準化作業，如使用系統模板或導入預鑄品等。

自然為本之綠色環境

聯合國教科文組織（UNESCO）的國際水文計畫（IHP）從過去的研究發現，水資源水文循環與生態系統彼此連結緊密，透過良好建全的生態系統，得有完善的水文循環功能。因此，水利工程導入「基於自然的解決方案」（Nature-based Solutions, NbS）之設計理念，以適合當地特色、資源能有效被利用的方式，增強生態系統服務效益及增加韌性，如採用濕地減洪提供調節、淨水及維持棲地外，更具固碳效益，尤其整治工程可以復育取代，如利用造林與植生保護河岸邊坡或控制沖蝕情況等，以利用自然或生態系統服務的設計來實現綠色環境目標；另針對工區及周邊進整體環境評估，除避免破壞生態環境外，實施水利工程時，應優先栽種在地高固碳原生種及多樣性的喬木、灌木，強化碳匯功能，營造永續和諧生態環境。

第三方公正單位（BSI）查證

為確保水利署數據蒐集模式及減碳目標設定可落地，確認成效可達預期，且整體減碳方法學符合 PAS 2050 / ISO 14067 之規範，需委託第三方公正單位協助提供獨立、公正的專業查證服務，以取得產品與服務生命週期階段之溫室氣體評估之查證活動，故水利署委託 BSI 辦理查核確認作業。BSI 於 1901 年成立於英

國倫敦，至今已逾 120 年歷史，為英國皇家特許之國家標準制訂機構與歷史最悠久的國際性標準發行機構，更是全球第一個國家驗證機構和國際標準化組織的核心成員，BSI 制定的標準除被國際 ISO 組織所認可，亦是臺灣制定符合國內現況標準時所引用的標竿，其所制定之標準一般皆為 ISO 國際標準之前身，例如 BS 5750（ISO 組織引用為 ISO 9001）、BS 7750（ISO 組織引用為 ISO 14001）及 OHSAS 18001（ISO 組織引用為 ISO 45001）等，於全球化方面，BSI 通過約 20 個地區或國際系統的認證，且已通過財團法人全國認證基金會（TAF）認可，並取得產品碳足跡查驗機構認證證書，是最具公信力的第三方公正查證單位。

水利署減碳機制經 BSI 分三個階段查核（文件審查、第一階段查核及第二階段查核），透過審查「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」內容，與水利署減碳團隊的訪談，並更進一步詳細檢視減碳基準與目標設定、整體碳管理之流程與機制、碳排係數引用來源及數值正確性、工作項目碳排係數之組成、迴歸曲線分析及水利工程碳排計算程式系統建置及使用等，查核確認結果表示水利署減碳機制可提供規劃設計階段合宜的碳足跡估算方式，減碳機制已具十足公信力，以全國首創之系統性碳預算管理手段，通過第三方公正單位檢視，確保減碳效益評估模式及各項碳排係數更接近事實，且可落地執行以達所設定之短、中長期減碳目標，提升管理之效度。

水利工程減碳推動實績

現地土方續利用，環境衝擊再降低——

111 年度湖山水庫周邊設施改善工程

湖山水庫於 105 年開始蓄水，為維持正常營運及例行性維護工作，水利署中區水資源局（簡稱中水局）依據年度之設施檢查成果報告建議改善事項，提報「111 年度湖山水庫周邊設施改善工程」（預算金額 2,200 萬元）辦理湖山水庫周邊環境及既有設施構造物改善，確保水庫設施構造物安全及設施功能，實質工程內容主要為例行性進行周邊設施排水強化及邊坡保護等工作。嗣經中水局考量本案類屬水資源小型工程，估計需求碳排放量約為 869.37 tCO₂e，並循水利署 2022 年設定之基期減碳 20% 目標，核以碳排上限量 695.50 tCO₂e 為目

標制定減碳策略，中水局透過水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引」之內容，朝「現地土方續利用，環境衝擊再降低」之核心減碳思維，於規劃設計階段即納入土方平衡及餘方近運利用配合加大工程種植高固碳喬木等理念，將引水隧道出口渠道設施強化部分，以河道清淤之土石方設置箱型土石籠（總長度 156 m）取代混凝土護岸（如圖 13 所示），同時搭配種植在地高固碳原生喬木烏柏 110 株，除強化植樹固碳及大幅減少混凝土用量外，其效果更外溢於有效解決土方去化問題，此外，本案工程亦針對其他工區所辦新設消能池、集水井、排水箱涵、排水溝、紐澤西護欄及擋土牆等周邊設施排水強化及邊坡保護工作，採以清水模板（總面積 973.3 m²）系統化作業，大幅減少營建廢棄物及施工能耗，最後，以水利署開發之 VBA 程式計算，本案設計後碳排量較核定碳排上限減幅達 63.7%（252.59 tCO₂e；可拆解率為 93%），顯示水利署推行之水利工程碳預算管理方法，除能有效達到量化管理外，對於減碳思維及策略亦能產生實質之落地效果。



圖 13 引水隧道出口渠道土石籠護岸施工現場圖

烏日河畔新風貌，旱溪水岸綠廊道——旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程併辦土石標售

旱溪排水為純都會型之平地區域排水系統，屬臺中地區重要區域排水，為能營造河川安全及友善生態之水環境，水利署第三河川局展開一系列旱溪排水治理工程，其中「旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程併辦土石標售」（預算金額 9,888 萬元）即為實施代表作之一，該工程依提報階段估計需求碳排放量約為 2,647 tCO₂e，並循水利署 2022 年設定之基期減碳 20% 目標，核以碳排上限量 2,118 tCO₂e 為目標制定減碳策略，案經執行單位以「河畔新風貌，水岸綠廊道」為減碳與環境營造設計理念，該工程透過河道護岸部分採半重力式護岸搭配混凝土砌石護坡取代傳統混凝土護岸之手段，並水域部分以回填現地土石保護，不僅有效減少邊坡開挖及混凝土使用量（如圖 14 及圖 15 所示），對於生態環境之營造更創造出多孔隙生物棲息空間，降低環境的衝擊，同時，護岸綠帶之設計部分更搭配大量種植茄苳、黃連木、烏心石、苦楝、光臘樹、鐵冬青、流蘇樹等高固碳原生樹種（共計 238 株）及大面積種植喬木類植物 1 萬 8,164 株增加固碳量，透過整體減碳作為之構思及友善生態環境策略之落實，依設計成果計算總碳排放量約為 1,905 tCO₂e（可拆解率為 87%），碳排量較核定碳排上限減幅達 10.1%，結果顯示透過現地土石應用及強化植樹固碳之理念，即可有效達到減碳效果，而兼顧防洪保護及友善生態之手法，亦能帶給當地居民一條安全、固碳及生態兼具的水岸廊道。

未來展望與結語

全球氣候變遷已成為不爭的事實，隨著極端氣候加劇，減碳工作在做與不做間必須要有明確的抉擇，雖然我國減碳 12 項關鍵戰略及 2050 淨零排放路徑皆尚未明確規範水利工程領域相關減碳策略或執行內容，但面對生存環境的惡化，水利工程無疑地必須在減碳上竭盡心力。目前「水利工程碳預算管理方法」已完成第三方公正單位的查證，其中碳預算管理方法中之碳排係數，亦將配合水利署全面推動與實質逐步執行，輔以個案工程碳盤查佐證檢討擴充及滾動檢討

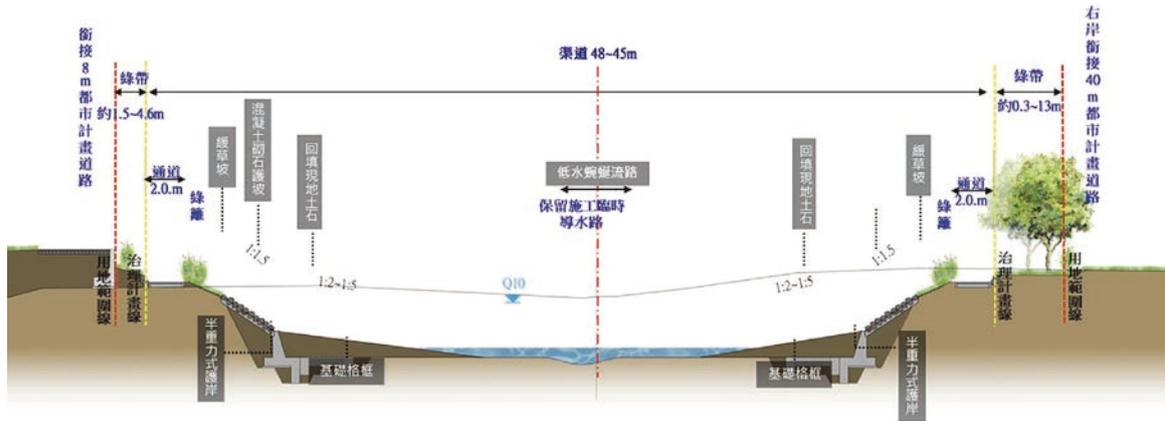


圖 14 旱溪排水河道設計斷面圖



圖 15 旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程現場照片

整體方法資料庫，使減碳制度轉化為工程人員之減碳思維；又為深化水利署減碳意識，工程人員除了挹注減碳思維外，更能身體力行投入減碳工作，後續將配合推動需求進一步規劃「ISO14067 產品碳足跡主任查證員訓練課程」培訓水利署同仁（60 位）取得相關資格，而面對 2050 淨零之挑戰，未來水利署亦將投入更多人力、經費全面思考工程減碳創新作為，如低碳水泥（淤泥）材料與工法之研究、節能監控技術開發，以及建構完善之智慧節能設計及智能監造系統，將綠色轉型（Green Transformation, GX）與數位轉型（Digital Transformation, DX）結合同步發展，配合以自然為基礎解決方案（Nature-based Solutions, NbS），強化工程減碳力道，逐步實現水利綠工程及淨零排放目標邁進。

參考文獻

1. "Building a low-carbon economy – the UK's contribution to tackling climate change." by CCC.
2. 2009, "Advice on the fourth carbon budget." by CCC, 2011, "Advice on the fifth carbon budget." by CCC, 2015.
3. UK Environmental Agency (2012), Carbon calculator for construction

activities. <http://www.environment-agency.gov.uk/business/sectors/37543.aspx>

4. 英國氣候變遷委員會（Climate Change Committee, CCC）官網，<https://www.theccc.org.uk/>，於 2021 年 10 月 6 日造訪。
5. 「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」委託研究案—成果報告減碳規則篇，行政院公共工程委員會，民國 101 年。
6. 碳排放資訊於水資源有效利用之評估，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年。
7. 永續水利工程評估指標推廣與碳盤查作業研究，經濟部水利署，民國 104 年。
8. 水利署及其所轄機關設施碳中和潛力評估研究，經濟部水利署，民國 106 年。
9. 應用公共工程經費電腦估價系統（PCCES）架構估算工程二氧化碳排放量委託研究案成果報告，行政院公共工程委員會，民國 102 年。
10. 公共工程碳排放量試辦計畫，行政院農業委員會水土保持局，民國 103 年。
11. 水資源工程計畫碳管理制度研究（總報告），經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 104 年。
12. 水利工程工資工率分析手冊，經濟部水利署，民國 108 年。
13. 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程之鋪面工程生命週期排碳特性分析，鋪面工程 16 卷 2 期，民國 107 年。
14. 製造業產品環境足跡及資源永系資訊專區（網站），經濟部工業局，民國 110 年。
15. 綠色企業（<https://www.cht.com.tw/zh-tw/home/cht/esg/environmental-sustainability/5g-green-enterprise>），中華電信。
16. 產品碳足跡資訊網（<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/LoginPage.aspx>），行政院環境保護署。
17. 產品與服務碳足跡計算指引，行政院環境保護署，民國 109 年。
18. 永續公共工程政策白皮書—修正版，行政院公共工程委員會，民國 110 年。
19. 新興公共工程計畫落實節能減碳評估，行政院農業委員會林務局，民國 110 年。
20. 水庫系統碳足跡與水資源工程溫室氣體排放量評估（總報告），經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年。
21. 溫室氣體排放量盤查作業指引，行政院環境保護署，民國 111 年。
22. 「公共工程納入節能減碳與綠色能源之策略及作法」簡報資料，公共工程委員會，民國 109 年。





國道4號 豐原潭子段橋梁

通過三義活動斷層之國際首例

陳國隆／交通部高速公路局 副局長

羅財怡／交通部高速公路局 簡任正工程司

郭呈彰／交通部高速公路局第二新建工程處 處長

張瑜超／交通部高速公路局第二新建工程處第四工務所 主任

曹永德／中興工程顧問股份有限公司三鶯捷運工程處 副經理

林素芳／中興工程顧問股份有限公司結構工程部 工程師一

黃能偉／中興工程顧問股份有限公司大地工程部 地質師一

國道4號臺中環線豐原潭子段第C714標潭子高架橋(1)有2個橋梁單元通過三義活動斷層，分別為橋台A1～橋墩P3單元通過支斷層(跨徑配置為 $66 + 103 + 73 = 242$ 公尺)，橋墩P3～橋墩P7單元通過主斷層($82 + 140 + 106 + 68 = 396$ 公尺)。而三義斷層被歸類為第一類活動斷層，且本路線與該斷層約略正交，在此區域之斷層帶寬度約300公尺，也由於路線通過三義斷層路段之路面與地表之高程差較大，若採路堤型式填築所需用地範圍較大，將造成龐大之拆遷規模，為降低對沿線居民之影響，選擇以橋梁型式通過三義斷層應是最佳方案。在沒有國際前例可循的情況下，本計畫透過詳細地質調查與危害度分析，採用大跨徑鋼床板箱形連續梁及混凝土雙柱橋墩之橋梁型式，設計可克服斷層活動可能產生1.1公尺錯動量之影響，並完全跨越斷層帶且無損橋梁之交通功能，故本文僅簡要說明設計概念，作為後續工程推廣應用之參考。

前言

1999年9月21日南投縣集集鎮發生芮氏規模7.3之地震，此地震為車籠埔斷層錯動所造成，台灣中部橋梁大量的落橋及損毀，大地震的破壞力帶給我們無法想像的體驗。震後有大量的勘災、重建等工作，也帶動產、官、學界多次的研討會，研擬未來橋梁規範與設計的改進作法，大致簡略為(1)道路路線盡量避開斷層線，(2)避無可避的情形下，路線避免平行斷層線，必要時相交於一點，可減低災害的程度，(3)路線相交於斷層線時，盡量以路堤或路塹的方式通過，受災可以快速復原，(4)橋梁以簡支梁(Simply supported beam)型式相交且跨越斷層線，可減低災害的範圍並容易復原。可見震後初期多以減低災害的觀點，採用穩健保守的思考方式，進行工程的規劃與設計。

前交通部臺灣區國道新建工程局(以下簡稱「前國工局」，已於民國107年2月12日併入高速公路局)參據「國道4號臺中環線豐原潭子段綜合規劃」之成果辦理後續工程設計暨配合工作，並成立「國道4號臺中環線豐原潭子段工程設計暨配合工作」(以下簡稱本計畫)，並於民國103年12月委託中興工程顧問股份有限公司辦理本項服務工作。

車籠埔斷層自北而南大致沿臺中盆地東側丘陵區之山腳處，縱貫本計畫區，發生於1999年之921集集大地震即是車籠埔斷層活動所引起，故被歸類為第一類活動斷層。該次地震產生之地表破裂長達約92公里，於計畫區域內造成垂直位移量約4~5公尺，局部地區伴隨有水平位移量約2.5~5公尺。

三義斷層線自北而南大致沿臺中盆地東緣之平原

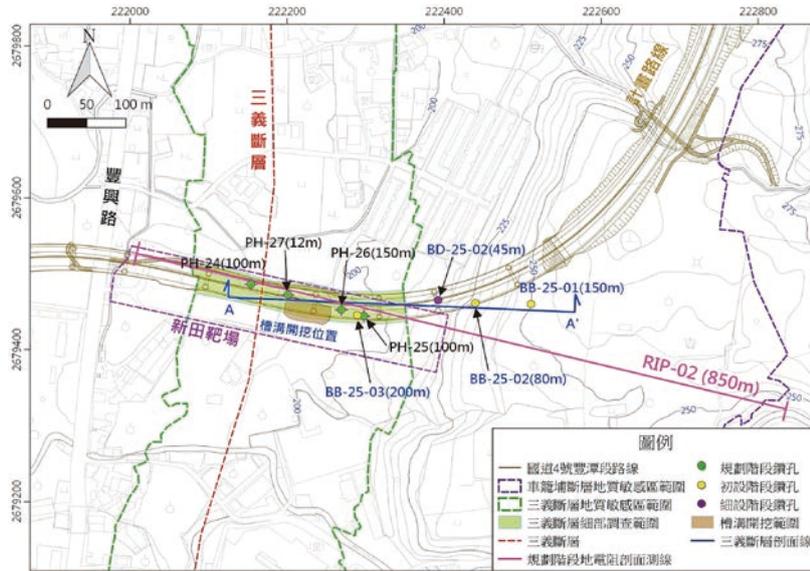


圖 2 三義斷層相關鑽孔及槽溝開挖位置圖

表 1 三義斷層與路線交會處相關地質鑽孔資訊表

鑽孔編號	鑽孔座標		鑽孔深度 (m)	鑽孔方向	取樣方式
	E	N			
DB-25-02	222393.187	2679464.669	45	垂直	HQ
BB-25-01	222510.715	2679460.832	200	垂直	HQ
BB-25-02	222439.756	2679461.309	80	垂直	HQ
BB-25-03	222293.982	2679444.669	150	垂直	HQ
PH-24	222153.930	2679486.140	100	垂直	HQ
PH-25	222297.620	2679444.180	100	垂直	HQ
PH-26	222269.060	2679452.550	150	70度斜孔向西	不取心
PH-27	222200.590	2679472.160	12	垂直	HQ

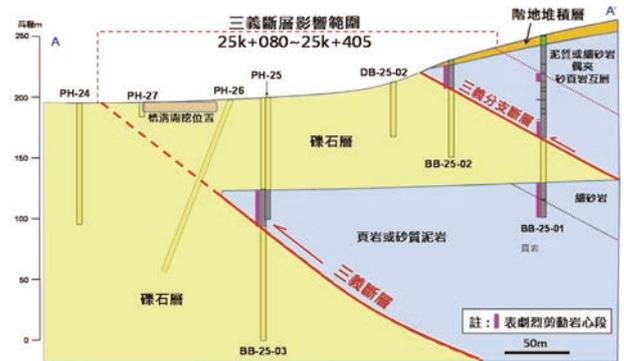


圖 3 三義斷層與路線交會處地質剖面圖(沿計畫路線)



槽溝開挖



槽溝清理作業



槽溝開挖完成全貌



LiDar 掃描測量

圖 4 槽溝開挖作業影像

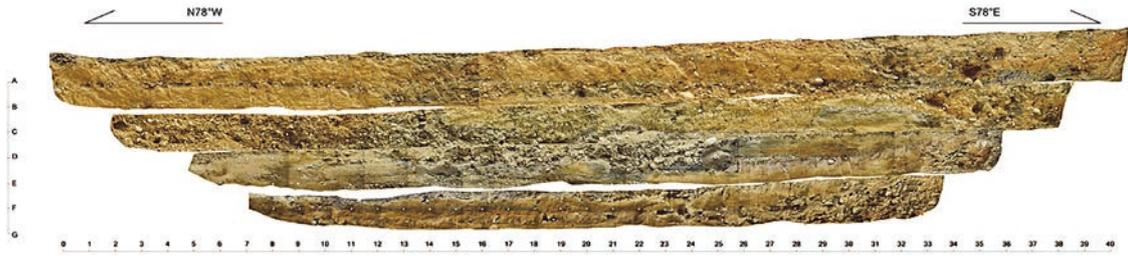


圖 5 槽溝北牆面地質剖面圖



圖 6 槽溝南牆面地質剖面圖

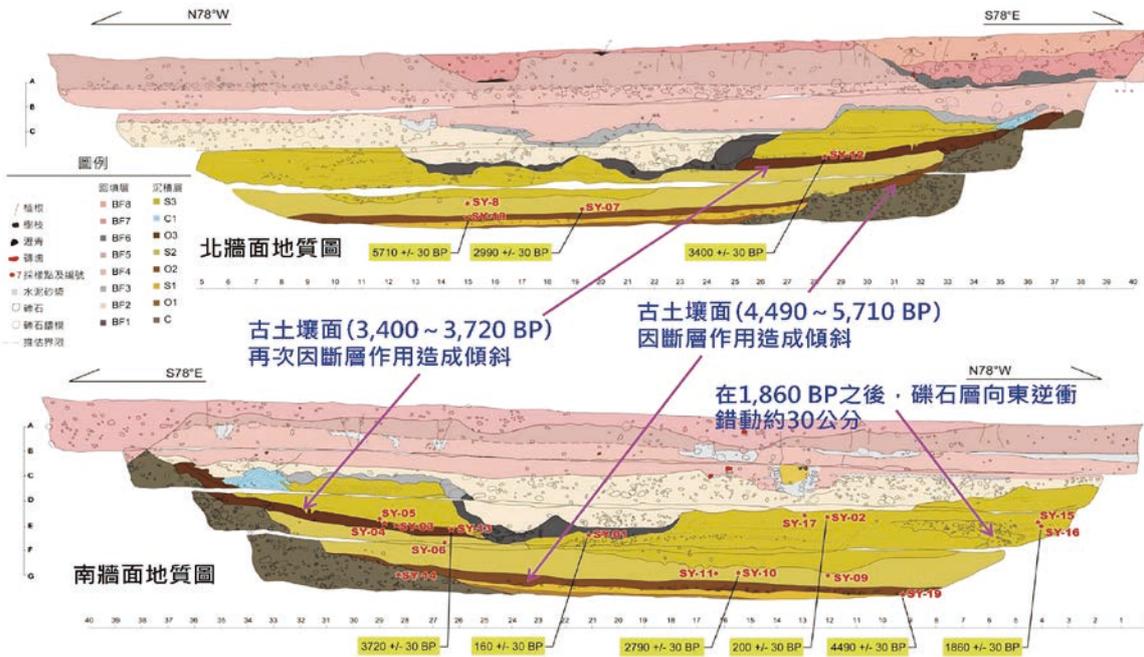


圖 7 槽溝中含碳物質破十四定年成果及地質事件解釋圖

震活動事件，其定年成果及地質事件解釋詳見圖 7。最早一次為 4,490 ~ 5,710 BP 之後，第二次事件在 3,400 ~ 3,720 BP 之後，第三次事件則在 1,860 BP 之後，前兩次造成沈積層的局部傾斜，第三次則造成一處礫石層被逆衝錯移約 30 公分。此外，配合受影響之沉積層定年資料，推算得斷層活動再現週期約為 1,620 年，然

實際之再現週期可能更小。以本槽溝剖面中分層之最大位移落差與可能活動年代估算，其垂直抬升速率約 0.78 公厘 / 年；依推估斷層面角度約 60 度推算，則沿斷層面之滑移速率約為 0.9 公厘 / 年，實際滑移速率可能更大。綜合槽溝及相關地質鑽孔資料，推算得三義斷層活動性相關參數如表 2 所示。

表 2 三義斷層活動性相關參數推估表

斷層名稱	斷層角度	斷層性質	最近可能發生年代 (BP)	垂直變動速率 (mm/yr)	長期滑移速率 (mm/yr)	再現週期 (年)
三義斷層	近地表處約為 60 度； 以下推估約 40 度。	逆衝	1,860BP 之後	0.78	0.9	小於 1,620 年

斷層位移危害度分析及設計位移量 [2]

位移危害度評估之目的為計算工址遭受斷層錯動可能引發之地表位移大小，評估方法可區分為機率式以及定值式。定值式分析為利用位移量與地震規模、斷層機制以及斷層距離等參數之迴歸公式，推估斷層發生設計地震時，工址之位移量大小；機率式分析除了計算位移量外，並配合歷史地震之統計資料，將地震發生機率與位移量進行連結，提供位移量之發生機率。而本計畫採用地震法機率式斷層位移危害度分析及定值式位移分析法進行比較分析。

經活動斷層調查所得參數進行危害度分析，三義斷層之機率式位移危害度曲線如圖 8 所示，依耐震設計規範之地震水準，表 3 列出設計地震（回歸期 475 年，年平均發生次數 0.0021）與最大考量地震（回歸期 2500 年，年平均發生次數 0.0004）之斷層位移量。三義斷層於設計地震情況下可能遭受之地表位移量遠小於 1 公分，於最大考量地震情況下可能遭受之地表位移量約 1 公分。

表 3 三義斷層設計地震與最大考量地震位移量

斷層	地震水準	
	設計地震	最大考量地震
三義斷層	<< 1 cm	約 1 cm

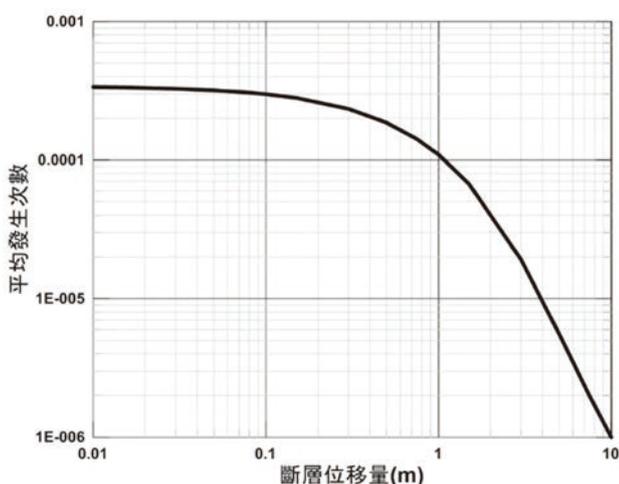


圖 8 三義斷層之機率式位移危害度曲線

而定值式分析結果彙整如表 4 所示，三義斷層採用之地震規模，採用特徵地震規模 6.85 及 6.95，計算所得位移量介於 0.79 公尺至 1.08 公尺。

本計畫之斷層設計位移量，參照美國加州運輸部之斷層位移量取捨建議，採用機率式分析與定值式分析結果之較大值進行設計，故本計畫針對三義斷層之設計位移量建議採用 1.1 公尺。

表 4 三義斷層定值式位移量分析成果表

斷層	地震規模 Mw	位移預測公式	位移量 (m)	位移量範圍 (m)
三義斷層	6.85	Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.79	0.79 至 1.08
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.84	
		Wells and Coppersmith (1994)		
	6.95	Moss and Ross (2011)	1.01	
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.94	
		Petersen <i>et al.</i> (2011)	0.99	
Wells and Coppersmith (1994)				
		Moss and Ross (2011)	1.08	

設計說明

結構概述

國道 4 號臺中環線豐原潭子段第 C714 標主線潭子高架橋 (1) 之第一橋梁單元為橋台 A1 ~ 橋墩 P3 通過支斷層，跨徑配置為 66 + 103 + 73 = 242 公尺，第二橋梁單元為橋墩 P3 至橋墩 P7 通過主斷層，跨徑配置為 82 + 140 + 106 + 68 = 396 公尺，東、西行線為雙向共構之鋼床板箱形梁，橋梁平面及立面如圖 9 及圖 10 所示；橋寬 27.72 ~ 34.35 公尺，梁深 2.6 ~ 6.5 公尺，上部結構剖面如圖 11 所示；下部結構為混凝土雙柱橋墩，柱高 5.85 ~ 41.0 公尺，橋墩平、立面如圖 12 所示；橋台型式為懸臂式橋台，基礎型式為井式基礎，該標工程於 2017 年 12 月開工，預計於 2022 年 11 月完工，橋梁現況如圖 13 所示。

連續梁橋具有結構穩定性較佳（靜不定度較高）的優點，可相對降低地震時落橋之機率，較能保障路人的安全。

因鋼材除具有優良之抗壓、抗張、材料强度高、韌性佳等能力，與混凝土橋比較具有質量輕之特點，可減少下構所受地震力造成之巨大彎矩及剪力。

梁柱接合採鉸接型式，在帽梁設置工作平臺及預留可調整橋面高程的機制，以備斷層錯動後的復原之用。

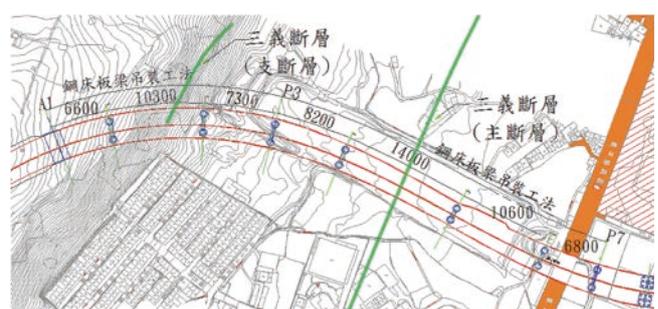


圖 9 潭子高架橋 (1) 橋台 A1 ~ 橋墩 P7 平面圖

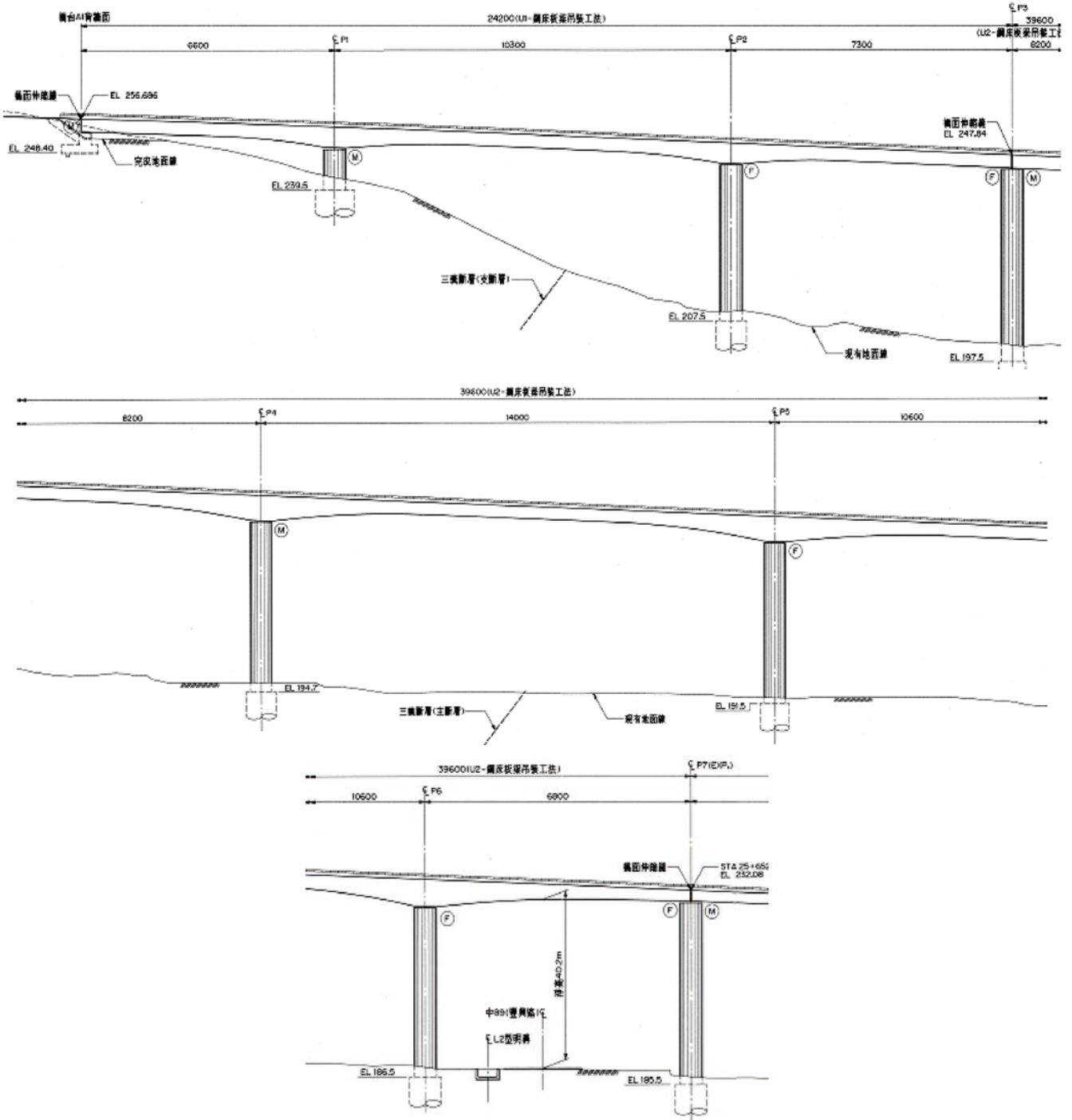


圖 10 潭子高架橋 (1) 橋台 A1~橋墩 P7 立面圖

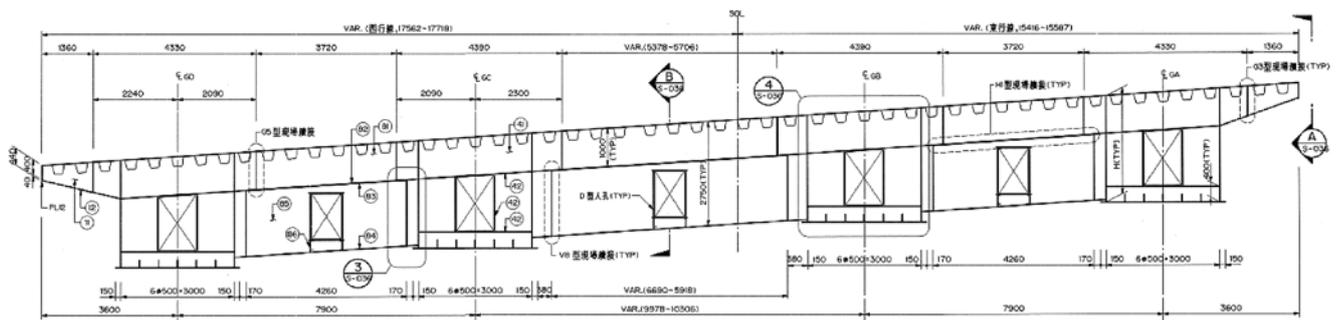


圖 11 潭子高架橋 (1) 上部結構剖面圖

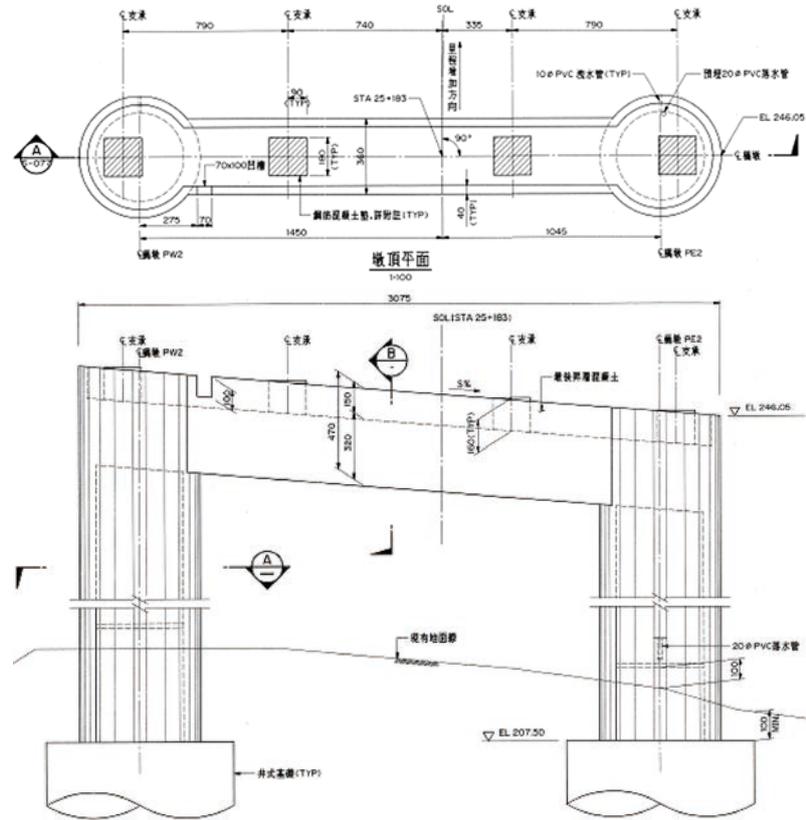


圖 12 潭子高架橋 (1) 橋墩平、立面圖

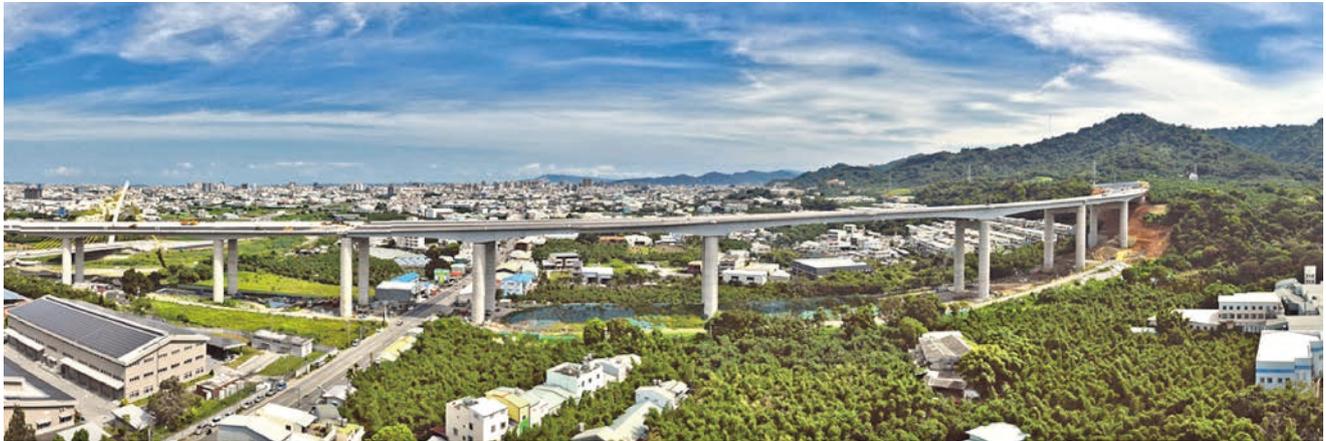


圖 13 潭子高架橋 (1) 橋台 A1~橋墩 P7 現況圖

在經濟性及施工安全性的考量下採用混凝土雙柱橋墩及帽梁，落墩位置以橋墩距離支斷層及主斷層較遠為原則，考量大跨徑配置以符合落墩位置的原則，故主跨徑 103 公尺跨越支斷層以確定 P1 與 P2 的墩位，主跨徑 140 公尺跨越主斷層以確定 P4 與 P5 的墩位，其餘邊跨配合主跨以經濟性為考量，大約為 0.6 ~ 0.7 倍主跨的長度，以確定 P3 的墩位。另以跨徑 106 公尺跨越此處的地質敏感區以確定 P6 的墩位，以跨徑 68 公尺跨越中 89 豐興路以確定 P7 的墩位。

克服斷層錯動說明

三義斷層為逆衝斷層，逆衝斷層的下盤沿著斷層面相對於上盤逆衝移動，設計的斷層錯動量為 1.1 公尺，係沿斷層面之位移量。斷層角度近地表處約為 60 度，其下推估約 40 度。以 60 度角及錯動量 1.1 公尺的水平位移為 0.55 公尺及垂直位移為 0.95 公尺，以 40 度角及錯動量 1.1 公尺的水平位移為 0.84 公尺及垂直位移為 0.71 公尺，因應結構分析程式的考量，採取最大水平位移為 0.84 公尺及垂直位移為 0.95 公尺，納入橋梁的設計。

以第二橋梁單元之橋墩 P3 至橋墩 P7 通過主斷層為例，橋墩 P3 至橋墩 P4 位於斷層的上盤，與上部結構接合為滑動支承 (Sliding or Roller Support)，橋墩 P5 至橋墩 P7 位於斷層的下盤，與上部結構接合為固定支承 (Fixed or Hinge Support)。當主斷層有 0.95 公尺垂直位移相當於相鄰橋墩 P4 及 P5 的滑動或固定支承皆有約 0.35 度的相對轉動，如圖 14 所示；當主斷層有 0.84 公尺水平位移相當於橋墩 P4 往橋墩 P5 的方向移動 0.84 公尺，但橋墩 P4 的滑動支承同時滑動了 0.84 公尺，上部結構完全未受到擠壓縮短的力量，如圖 15 所示。以上述的機制克服斷層錯動量 1.1 公尺的挑戰。

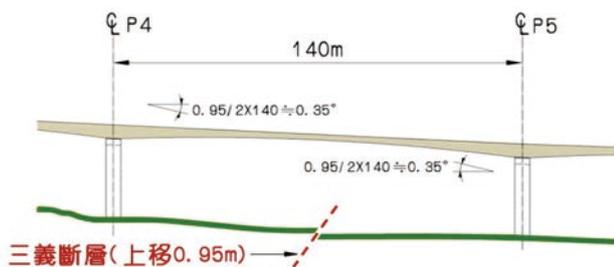


圖 14 斷層垂直位移量之橋梁構想圖

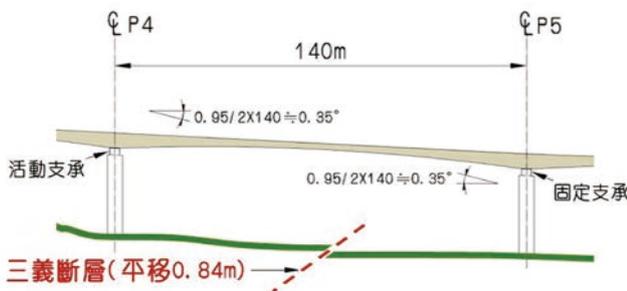


圖 15 斷層水平位移量之橋梁構想圖

橋梁設計之整體考量

1. 要求路線通過三義斷層盡量與斷層線垂直，以簡化位移量之考量，實際路線與主斷層線接近垂直，與支斷層線略有斜交角度，已是路線之最佳設計。
2. 橋梁以最大跨徑 140 公尺跨過主斷層，橋墩 P4 與橋墩 P5 盡量與主斷層線等距離；橋梁以最大跨徑 103 公尺跨過支斷層，橋墩 P1 與橋墩 P2 盡量與支斷層線等距離。考量橋墩距離斷層線越遠越好，維護橋墩的安全為首要考量。
3. 為維護橋墩的安全，採用量體及勁度最大的井式基礎為基礎型式。

4. 橋梁上部結構的 4 支鋼箱形梁皆以盤式支承抵抗地表振動的橫向地震力，規劃下部結構為混凝土雙柱橋墩，提供橋梁橫向較高的靜不定度及橋墩的剛度，橋墩為立體剛構架可形成力偶，提升橋梁橫向的耐震性。
5. 橋梁上部結構縱向規劃為多跨連續鋼箱形梁，提供橋梁較高之韌性，構想上部結構與下部結構連接適當的盤式支承型式，斷層上盤的橋墩及鋼箱形梁隨斷層錯動而動，斷層下盤的橋墩及鋼箱形梁皆不動，鋼箱形梁未受力而擠壓、挫屈 (Buckling) 或變形，橋梁能抵抗地表振動的縱向地震力及斷層錯動，不僅不會落橋及損毀，且能快速復原為高速公路要求 100 公里 / 小時的道路縱向線形，滿足安全的交通需求。
6. 雙柱混凝土橋墩頂部以帽梁連接，帽梁四周有女兒牆，考量橋梁復原之施工空間及安全；帽梁頂部有較高的鋼筋混凝土墊，以短柱受力為設計依據，可適當的增高或降低，可以較快速且安全的施工完成。

結論

國道 4 號豐原潭子段橋梁通過三義活動斷層之設計考驗，在細部設計投標期間遭遇種種難題，也沒有國際前例可循的情況下，中興工程顧問公司投入了大量的活動斷層調查與評估的工作，團隊合作並用盡腦力克服難題，當然也從中獲取不少的經驗；另一方面，也因為國內橋梁工程未曾有過此類的案例，高速公路局基於國內橋梁建設發展的理念，不吝將本工程之經驗分享各方專業單位及人員，也期望工程前輩及先進不吝指導。基於此信念，相信在可見的未來，受到高速公路局帶頭示範效應的影響，國內會有愈來愈多進步的橋梁設計，讓台灣的橋梁設計躍上國際工程舞台。

參考文獻

1. 「國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程設計暨配合工作」細部設計階段大地工程調查綜合評估報告 (2017)，交通部臺灣區國道新建工程局。
2. 吳富洵、鄒瑞卿、黃能偉、吳東錦 (2020)，公路工程活動斷層調查與評估案例介紹，大地技師，第 20 期。
3. 劉彥求、李奕亨 (2006)，三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析，2006 年臺灣地區地球物理學術研討會摘要集，第 97 頁。



IoT 物聯網 結合 BIM 模型 元件模組化應用

陳哲仲 / 泛亞工程建設股份有限公司 BIM 中心 經理

依據美國邁肯錫公司所做的一項調查報告指出；營建產業數位化程度遠遠落後其他產業。事實上目前國內營建產業現況確實如此。三十年前筆者自軍中退役投入營建產業時，那時的建築施工方式跟現今似乎沒什麼差別。測量儀器依舊，只是功能稍微再強一些。當初繪圖一樣使用 CAD，現在依舊還是 CAD 為主力，雖然目前進步到有 BIM 技術的導入，但是真正用在施工端又有多大助益？

或許創新動力不足？或是國內營建產業誘因不足？似乎在這塊的創新應用卻始終沒國外來的先進。

以 VR、AR 甚至 MR 技術來說；我經常在工地看到勞安工程師非常認真地教育新進的工程師或新到崗的保全或勞務工班等工區相關「危害告知」，也經常看到同仁辛苦製作大字報或投影片跟新進人員告知「何處」有墜落危害、「何處」有飛落物品意外風險…但事實上；有多少人知道？往往事故發生了，有人從開口掉下或有人被飛落物體給砸傷了，那時；當事人才知道勞安工程師口中所講的開口原來在這裡。BIM 模型是開工初期建置最完整的東西，難道我們不能換個模式讓工人戴著 VR 頭盔體驗看看？凡事走過必留下「印象」，這是我對工程的創新應用的一個小小建議。

前言

BIM 技術在台灣發展已超過十幾年，長久以來 BIM 在施工端的應用多僅止於契約所規定的應辦事項；諸如干涉碰撞檢討、4D 施工模擬甚至還有數量統計或計算。常常契約所規定的模型細緻程度，多半被業主或監造、專管 (PCM) 給放大解釋，造成國內 BIM 技術發展愈是往牛角尖裡面鑽。一般中小型營造廠普遍遇到合約內的 BIM 項目，也絕大多數都一腳踢給專業建模公司來承包，而營造廠只管賺取 BIM 項目裡的發包價差。不管是公部門或是有心發展 BIM 技術的單位，花了政府那麼多的公帑，但到最後所拿到的「竣工模型」卻是一顆在我個人看起來華而不實的精美模型罷了。而最後這些竣工模的歸處，多半也只能依約存放光碟或特定的雲端儲存位置或平台供後人調閱。目前台灣除了六都部分建管單位會用竣工模持續深化在物業管理端的發展與應用外，但其他的公部門呢？

再談談專業的建模公司吧！沒錯！近來政府普遍在一定契約價金以上之專案多半會導入 BIM 技術，縱使契約沒有。近來拜最有利標所賜，往往大型營造公司也都會主動導入 BIM，以提昇自我的價值，好跟同業做個市場區隔。除此之外；市場似乎也嗅到這股商機，一些中、小型建模公司或工作室也如雨後春筍般的竄出，而彼此間嘶殺的程度也樂得營造廠更捨去自辦而改以轉包的方式獲取更多價差與利潤。而事實上在發包後卻又是建模公司一連串惡夢的開始；業主或是專管、監造為展現對 BIM 的獨特認知，就會有模型為什麼沒把外牆鷹架模型給畫進去？或是窗簾為什麼沒畫進去？傢俱怎麼沒全放進去？外牆磁磚為什麼沒一塊塊貼上去？磁磚、地磚的數量怎麼沒出來？施工前各樓層的鋼筋數量？模板數量呢…？

沒錯，上面這些應用在 BIM 軟體有些東西如果要做確實應該都不成問題，但是放那麼多東西，你確定這顆模型還跑得動嗎？

20 多年前在沒有 BIM 的那個年代，有很多資訊公司開發了一系列 AutoCAD 外掛軟體進行所謂的數量計算，再加上當時在建設公司都會有些媽媽桑級的 CAD 高手，熟練的左手鍵盤、右手滑鼠兩手開攻下，再困難的磁磚分割排佈與數量計算都難逃她們的魔手。更重要的是：數量產出絲毫不會輸給現今的 BIM 軟體。那是不是還有這個必要在 BIM 軟體裡面做這檔事？

繼續回到專業建模公司這個話題；在拿在合約後或許沒寫到的、沒說到的… 應該都不能算是合約的一部分。但是往往營造廠在不懂 BIM 的核心價值，又再業主無理的脅迫下，那些專業建模公司如果遇到好的營造廠多半還能收到一小筆追加款應付業主的需求，但怕的是；那些無理要求有些已超出軟體的功能必須額外再做開發才能達成；此時哪怕你說不做，營造廠不給錢最大。之後的標案專業建模公司再把這種不確定性的風險都加到報價去，換來的是更難拿到案子。這種惡性循環如今卻還是不停的上演著。

難道 BIM 在施工階段就只能一而再，再而三的去精雕那顆模型，非得把所有的裝修項目都在這顆模型給一次搞定？個人認為如果它確實有讓你節省很多時間，但又不會拖累整體模型圖顯效率，利用 BIM 軟體確實可達預期功效，那它就會是一個不錯的工具。但相反的，它不但增加你的工作量，卻又拖累整個模型的圖顯的流暢度，哪你為何不改用別的軟體來達成你的目的？

「智慧工地」

營造業界目前所稱「智慧工地」一詞的認定非常廣泛，但在我們所定義的「智慧工地」的機制是要將

傳統必須由人力到場才能獲知的資訊轉變由現場 IOT 元件主動告知，也就是「化被動為主動」概念。再利用目前人手一機的個人手持行動裝置的助力下，實現「一機在手，彈指間掌握工地大小事」的境界。簡單地說；也就是過去現場工程師都要去工地實地查勘才能獲知的現場狀況，如今都可經由現場的智慧裝置主動告訴你；它在做什麼？什麼事情發生？發生的地點在哪？狀況如何？處理結果又如何？一來可以立即有效控制風險、二來可有效遏止人為疏忽所造成的意外，並降低人力成本的付出，一舉數得。

以往智慧工地系統多屬客製化（圖 1），一旦工地有任何變化而觸動感測裝置就必須更動主系統來調整事件（EVENT）發生所在位置，否則只有事件推報，但卻無實際對應事件發生所在位置，無法立即有效阻止事態持續擴大。比方說；今天工地配電盤漏電，此時配電盤裡的感測裝置主動經由通訊模組發送一個告警訊號到雲端管理程式，經由程式邏輯關係判斷後，再由雲端伺服器主機經網際網路傳送告警訊息至個人行動裝置。人員接獲告警資訊後儘速通知管理人員過去現場瞭解原因或排除，但此時；這配電盤若在施工中有做任何型式或位置的更動。則系統跳圖所產生之事件位置，絕對與現場位置不一致（若 ID 不同；甚至連盤資訊都無法顯示，造成無謂之困擾。除非重新調整 BIM 模型該配電盤所在位置並改寫程式碼對應之 ID，否則無法做有效之連動）。

傳統這都必須由現場電氣專責人員或勞安人員主動巡檢後，發現問題再做即時處置，但事故往往發生都在一瞬間。倘若今天能藉由科技的手段時時監視配



圖 1 泛亞工程嘉義鐵路高架化 C602 標「智慧工地管理系統」

電盤任何狀況，而且還能主動在事故發生前提前發出示警。那麼人員感電意外或許就能提前預警防範，降低施工風險。而這也就是我們所定義的「主動式」智慧工地管理系統。

為降低智慧工地系統客製化成本因工地環境變化或新的案件開始執行又得重覆花費幾乎相同設施與成本。經由我們近兩年來吸取先前開發客製化智慧工地系統的經驗，我們嘗試將 BIM 模型的元件 (Element) 與實體的 IoT 感測元件進行綁定，日後工區環境一有變化或案件結束更替至新的案場，都可輕易地進行搬遷而無須再重新修改主程式及實際執行後的除錯 (DEBUG) 程序，加快智慧工地系統的部署 (Deploy)。關於這一路來的開發歷程，我將就系統架構、模組化、BIM 與 IoT、通訊訊號、通訊協定等五個面向來說明。

智慧工地管理系統架構

圖 2 是我們最新開發出的「模組化智慧工地管理系統」架構圖。其中每個物件或感測元件都有一個無線通訊模組進行感測元件的訊號推送任務。該通訊訊號的選定牽涉到系統穩定，後面在介紹通訊訊號時我會再做詳盡的介紹。此外還有通訊協定的選用，也涉及感測器與通訊模組選用型號的依據，因此彼此間緊密關連，任一環節遇有問題，都會卡到之後整個系統的開發。

初期我們嘗試開發了一些模組，例如溫、溼度 (熱危害) 監測模組、智慧配電盤模組、水位監測模組、抽水機啟停偵測模組、AI 智能影像監視模組、風速計監測模組及光達電子圍籬監視模組。

上述所有模組均可在不同的工地任意轉換位置安裝。只要 BIM 模型內該相關元件與被綁定的工區實體感測元件所在位置相同，則現場之告警訊號也就可以在行動裝置實現監視告警的推播任務。

經由實測後結果證明，該模組化感測元件可不受地域限制進行重新組合，只要實體感測元件與虛擬的 BIM 模型元件進行異地遷移與重置，則後台管理程式即可連線待命。遇有事件發生，也會在重新組合之新場地 (工地) 裡正常推播告警訊息至該場域管理人員的手機中。

模組化概念與模組的開發

正如一開始所介紹的，過往的智慧工地系統多為專屬工地量身訂做。或是單一感測元件對接固定群組之通訊軟體或簡訊進行告警訊息之推送。無法整併所有的告警訊息與事件發生位置等資訊。失去獲取資訊全貌與發生位置之取得。故能透過 BIM 技術將元件資訊與實體感測元件進行綁定，才能有效自 BIM 模型元件中獲取更多資訊與事件發生位置所在。打個比方：就像綜合感冒藥物膠囊包裹者各自不同功效藥劑粉末 (此處類比各種屬性資料) 經由膠囊投送至身體。而該膠囊正是我們所認知的「載體」(此處類比 BIM 元件屬性欄的資訊，經由元件；例如：柱、梁、版、牆封包組成為一個體。而該柱、梁、版、牆就是我們所稱的「載體」；如圖 3 所示)。此一概念正也跟物聯網的理論有所雷同，物聯網即是透過感測器偵測數據後，並將數據經由通訊裝置傳送至監控端。而 BIM 則是將每個獨立單元或個體 (這邊我們稱做「元件」Element) 的資訊藉由軟體或程式的撈取分析或統計模型中所有

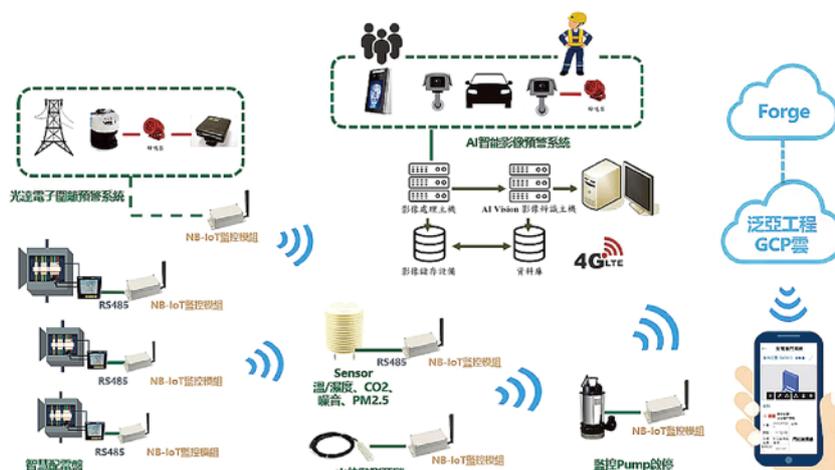


圖 2 智慧工地管理系統架構圖

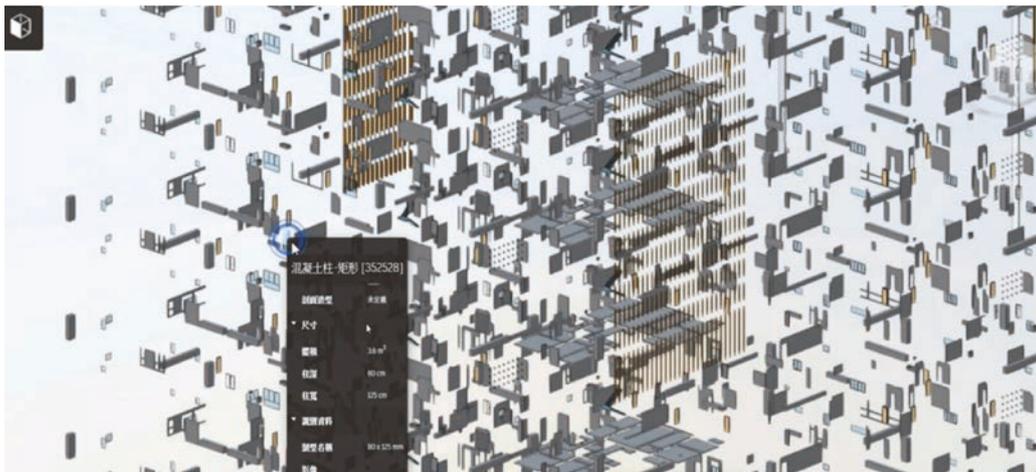


圖 3 建築物 BIM 模型分解後每一個元件都帶有詳細資料

獨立單元的資訊，以做為後續成本數量統計或材料採購之依據，以加速傳統作業模式之進化。

而物聯網最重要的一個環節就是如何把數據拋送至監控端？又是使用何種語言與監控端互聯？這個時候就需要機械與機械（簡稱：M2M）或機械與人之間的語言溝通，這邊我們叫「通訊協定」，稍後文章中我會再做說明。

圖 2 所示的每一個感測元件旁邊都會有一個叫通訊模組的東西，它的主要的工作是將感測器所搜集到的資訊傳遞至雲端，當然與雲端伺服器間還是要有一定的通訊協定進行溝通，才能將訊息傳送至雲端進行發佈或儲存到事件資料庫中，以做未來資料分析統計之使用。而我們所開發的模組不只如此，它還必須對應到 BIM 模型的元件，因為它還必須讀取元件特殊的編碼，才能有效查詢事件所發生的位置進行圖形顯示。而這個圖形顯示的動作在工業自動控制中的術語就叫「跳圖」。因此整個模組的開發會比工業自動化控制採用的方法稍微再複雜一些些。

BIM 技術與 IoT 物聯網之關係

上圖（圖 3），我們看到分解後的 BIM（建築資訊模型）是由數千甚至上萬個元件所組成。而其中的每一個元件中又帶有諸多的資訊，在這些資訊中我們不但可以取得感測元件或配電盤的製造商資訊，甚至可以取得操作維護手冊、安裝圖...等資訊。再把這些資訊與感測器進行綁定後，這樣一旦因現場感知器探測到異常或原先所設定的條件，即會將感知器所得的資訊連同被綁定的 BIM 元件資料一併顯示到我們行動手持裝置的使用者介面中，讓我們可以在一個裝置中一目瞭然即時告警訊息，以便做相對應的處置。這也就是我們為什麼要將 BIM 元件與實際 IoT 感測元件進行綁定的目的。下圖（圖 4）就是我們所開發出來的模組，其實表中的模組型號對應著是與它連結的感知器與 BIM 元件的組合。這樣就是我們所定義的模組。

模組型號									
對應感測器	五合一環境偵測器	配電盤漏電偵測(1)	配電盤漏電偵測(2)	LiDAR電子圍籬(1)	LiDAR電子圍籬(2)	LiDAR電子圍籬(3)	排水泵浦啓閉偵測	水位偵測器	自動水霧
感測器信號輸出	Modbus(RS-485)	Modbus(RS-485)	Modbus(RS-485)	Hi/Low(5V或12V)	Hi/Low(5V或12V)	Hi/Low(5V或12V)	繼電器(ON/OFF)	二段斷電器(ON/OFF)	繼電器(ON/OFF)
輸出/入模組訊號型式	AI	AI	AI	DI	DI	DI	DI	DI	DO
MQTT(Topic)	PA/ZONE1/1 (示例)	PA/ZONE1/2 (示例)	PA/ZONE1/3 (示例)	PA/ZONE1/4 (示例)	PA/ZONE1/5 (示例)	PA/ZONE1/6 (示例)	PA/ZONE1/7 (示例)	PA/ZONE1/8 (示例)	PA/ZONE1/9 (示例)
BIM ID	54321	54322	54323	54324	54325	54326	54327	54328	54329
模組編碼	IoT-01	IoT-02	IoT-03	IoT-04	IoT-05	IoT-06	IoT-07	IoT-08	IoT-09

圖 4 BIM 元件綁定 IoT 通訊模組的情況

資訊的傳遞—簡談通信訊號

通信訊號種類繁多，又分為有線與無線部分。因其已屬資通訊專業，這邊就不另贅述。僅就本公司開發智慧工地管理系統部分所接觸之通信訊號在此說明。

因工地環境特殊，多半現場佈線不易，經常因施工不慎而斷線狀況甚多。因此大多選用無線通訊。而無線通訊中大家耳熟能詳就以 WiFi 訊號為主；然而 WiFi 經常受限於傳播距離與障礙物之阻隔無法全面發揮其在工地中的效用。以土木工程為例；一般道路、隧道、橋梁等標案工區動輒 2 ~ 3 公里以上距離，遇有隧道工程又因群山阻隔致距離太遠訊號傳送不易。因此必須選用之訊號更應注意此一特性來做選用。

圖 7 所示之通信訊號，除了 WiFi 之外；另像藍芽 (Bluetooth)、ZigBee 雖然也常為使用，但因其功率小、傳輸距離短、傳輸速率不佳，比較適合一般短距且環境因素不致太差的室內環境使用。而像 2G、3G、4G 甚至 5G 專網等... 雖各項條件均不錯，但其建置成本過高，不太建議在施工環境使用。而 LPWAN (Low-Power Wide-Area Network, 低功耗廣域網路)，或許就是一個不錯的選擇。

一般工業物聯網所選用的訊號多以 LPWAN (Low Power WAN) 低功耗廣域網路；像 LoRa、SigFox 及 NB-IoT 為主。而其中又以 LoRa 更為企業選用，因其訊號為免費之頻譜，只要有收受及發送裝置即可無償使用。且該頻譜之訊號在遠距不受阻隔或外在電磁波 (例如高壓電塔、變電站等...) 干擾下，確實可獲得不錯之表現。但事實上工地環境變異因素過多，經常在使用後發現其結果並非大家所想像的那回事。以我們曾經在建築物密佈堪稱都市叢林的「台北市廣慈整體開發園區」所做過的一系列驗證測試後，事實證明；LoRa 訊號很容易因棟與棟之間的阻隔或是外牆鷹架大面積金屬表面所阻擋，訊號丟包情況非常嚴重 (詳圖 5 和圖 6)。幾經測試與考量後改以向電信公司申請 NB-IoT 訊號 (門號) 最終才獲解決。

機械到機械 (Machine to Machine, 常縮寫為 M2M) — 簡談通訊協定

人與人溝通用的是語言，同樣地機械與機械或人與機械之間的溝通也是透過特殊的語言來達成。以人類語言來說就有數百種之多，而機械與機械或機械與



圖 5 LoRa 增益值調整



圖 6 LoRa 信號傳送 / 接收實測

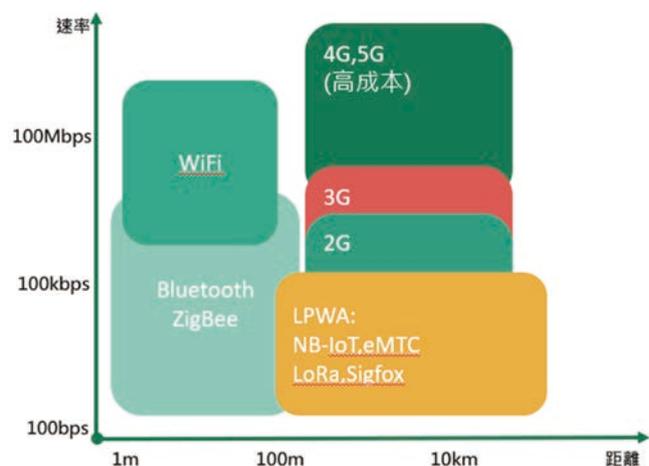


圖 7 常用通信訊號比較圖

人之間的溝通語言同樣種類繁多，通常這種語言我們稱做「通訊協定」(communications protocol)，常見的有像 Modbus、OPC UA、HTTP、MQTT... 等 (詳圖 8)。而目前工業物聯網較為人們使用的通訊協定是以輕便簡單的 MQTT 協定較為廣泛使用。而這正也是我們目前所開發出的智慧工地系統裡現場感測元件與雲端後台程式主要溝通的語言之一。



圖 8 工業物聯網一般常見通訊協定

MQTT^[1,2] 其實最初代表的意思是 Message Queuing Telemetry Transport（訊息佇列遙測傳輸），現在已經不用這種說法。MQTT 是 OASIS 標準的訊息通訊協定（Message Protocol），這是架構在 TCP/IP 通訊協定上，針對機械與機械的輕量級通訊協定。MQTT 可以在低頻寬網路和高延遲 IoT 裝置來進行資料交換，特別適用在 IoT 物聯網這些記憶體不足且效能較差的微控制器開發板。基本上，MQTT 是使用「出版和訂閱模型」（Publish/Subscribe Model）來進行訊息的雙向資料交換，如下（圖 9）所示：



註：發佈者也可以是訂閱者；同樣訂閱也可以是發布者

圖 9 MQTT 信訊傳遞方式

以大家所熟知的 YouTube 來解釋，就像你今天喜歡上某一個頻道，你按了「訂閱」、「小鈴鐺」之後，日後這個頻道上有最新的影片就會在你的手機進行推播，通知你即時收看頻道最新影片的道理一樣。而 MQTT 所謂的訂閱者（Subscriber）就是你，那個頻道的影片創作人就是發佈者（Publisher），他透過 YouTube 平台傳遞訊息給你，這個平台就是 MQTT 所稱的代理人（Broker）。再對應到實際情況就是現場感測模組就是發佈者、你手機因為裝了專屬 APP，所以只要感測器發送訊息就會經由雲端推送該訊息給你，這裡的雲端就是代理人。而整個 MQTT 的協定原理就是這麼單純。

模組化智慧工地管理系統的優缺點

導入模組化智慧工地系統，其優點是感測模組可不同工地移轉使用。不因系統設定之工地位置而調整，無需改動主程式碼，節省建置成本。亦不須專業資訊工程師的協助即可輕易進行調整。除此之外；可提高感測元件的重覆使用性，不因工地結束就需重新購置與設定感測器的困擾（詳圖 10）。

優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 一次性模組開發可任意場域變換使用 ➢ 不因模組位置變換而改寫平台主程式碼 ➢ BIM 雲端平台衍生性加值運用 ➢ 加速物聯網與工地勞安、品保設施的串接 ➢ 降低營造廠開發「智慧工地」系統門檻及建置成本 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 初期模組開發費用成本較高 ➢ 必須熟稔工業自動控制成員的加入 ➢ 系統整合及相關通訊訊號的選定 ➢ 系統穩定度/可靠度的維持 ➢ 施工包商配合度

圖 10 一般智慧工地系統與模組化系統之比較

然而它的缺點；像是一開始開發模組的所需花費的成本較高（因為包含可靠度與穩定度的驗證及人力成本的支出），此外模組與主系統的連線測試或通訊協定內容的調整都需專業工程師或是廠商的協助才能順利導到工地使用。

模組化智慧工地管理系統異地移轉使用

前面已將我們開發出的模組化智慧工地管理系統完整介紹過，接下來必須說明是我們如何利用眾多的「獨立」模組來完成整套智慧工地系統的運做？那不同工地間模組遷移後系統是否仍能正常運作？我們用下面幾張影片截圖來做說明（圖 11 至圖 16）。

前面（圖 2）已說明整個智慧工地系統的所有架構，基本上這系統是由多個「模組」所組合而成。為證明它可不同工地變換使用，而不受原有程式束縛，可任意調度移動，我們就以高雄、桃園兩工地實際配電盤調動後，原先在高雄工地手機 APP 裡的配電盤將離線，同時在 BIM 模型中該配電盤元件也必須移除（圖 11 和圖 12）。之後移至桃園工地後將該配電盤元件自樣板檔裡中直接取用與放置（圖 13 和圖 14），經後台模型移轉後（圖 15）該配電盤日後發生任何事件（例如：配電盤門開啟或漏電）將會在桃園工地的手機 APP 直接跳圖並發出告警資訊（圖 16 和圖 17）。

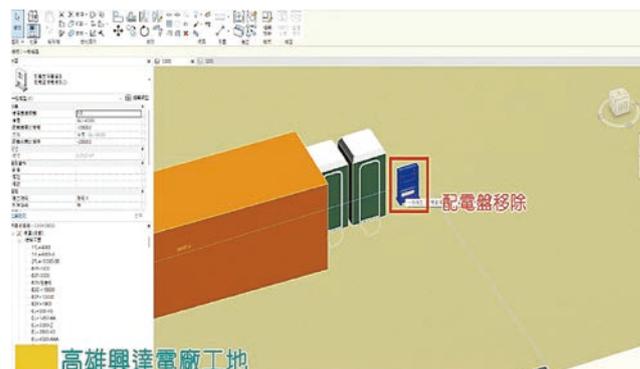


圖 11 原安裝於高雄工地的配電盤因需要遷移至桃園

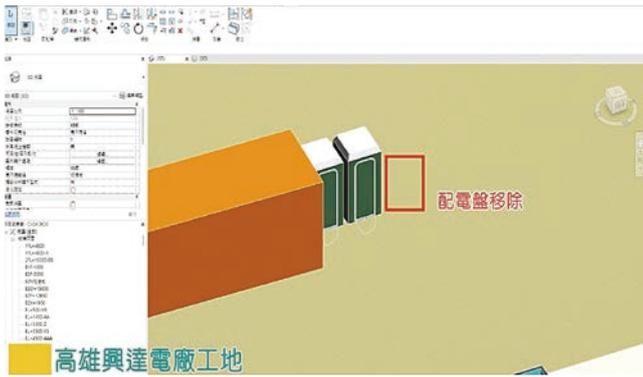


圖 12 在 REVIT 中將配電盤元件移除

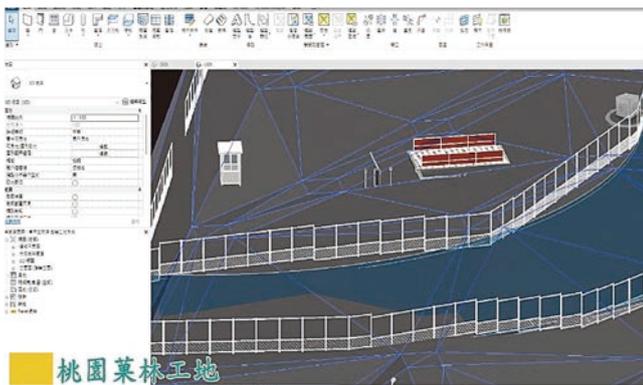


圖 13 在樣板檔裡取用原編號 (IoT-18) 配電盤元件

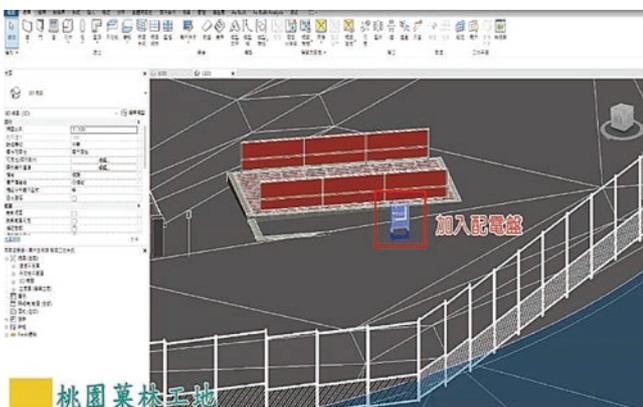


圖 14 放置工地相同位置



圖 15 後台物聯網模組偵測到 NB-IoT 模組訊號後連線成功



圖 16 手機接獲「事件」即時跳圖告警畫面



圖 17 配電盤即時電壓、電流、功率及漏電值訊息 (漏電值大於 30 mA 會再另跳告警訊息)

綠電新概念—系統穩定

地球暖化議題日趨嚴重，政府也預計在 2050 年達成碳中和目標。而營建產業又因高耗能、高污染常令人詬病。如能朝 ESG 企業永續發展的目標前進，將會是提昇營建產業競爭力的最佳途徑，也為環境氣候變遷的改善盡一份心力。

當然營建業要在一朝一夕改變所有的程序來達到淨零減排的目標實屬不易，但若不勇敢邁出第一步，則永遠不可能達到淨零減排的未來。基於此一想法，我們義無反顧的踏出第一步，嘗試在艷陽高照的南台灣—「高雄興達電廠專案」開始做起，而智慧工地系統就是我們試圖減排的一個試煉基地。

基於傳統工地經常因人為因素或施工不慎反倒挖斷自己施工所或現場貨櫃辦公室電源的情況時有所聞。而我們智慧工地系統卻是要時時確保不斷電情況下供給電力予相關現地伺服器、閘道器、網通等相關設備電力。因此我們構思了太陽能電力做為主要電力來源，而即有的台電電力反倒是我們的第二備用電源。現場的儲電裝置一旦電力消耗殆盡，則透過系統自動切換開關 (ATS) 轉供台電電力供給網通設備與伺服器使用 (詳圖 18)。確保電力源源不絕供給，不致因斷電因素影響現場伺服器或感測器作業，間接削弱系

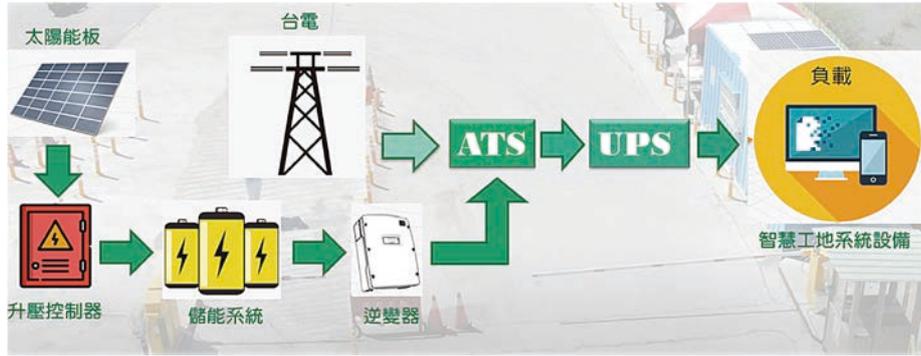


圖 18 智慧工地管理系統現場設備採用綠電與台電雙迴路架構圖

統的穩定性與可靠度。

此外藉由綠電的供給踏出營建產業施工端節能減碳的第一步，並同時確保的系統的穩定，一舉數得。

未來展望

回到我們一開始的初衷，營建產業走向未來自動化、數位化的趨勢已然不可擋，更沒有走回頭路的理由。提昇工程創新是我們一直努力的目標，未來希望除了勞安衛施工安全的智能化、自動化的腳步必須再

努力外，在品管與工程進度的控管，是另一個創新的課題，我們將持續努力。也期許台灣營建產業共創一個全新的未來。

而前面所談到的淨零減碳部分，在未來已成為必然的趨勢，同為營建產業的我們，更應為這議題認真努力思考未來。

參考文獻

1. 「Node-RED 視覺化開發工具」陳會安 著 / 博碩文化
2. 「物聯網系統開發」付強 著 機械工業出版社

AD減隔震系列

AEC 碳纖維

建築修復結構補強

STRUCTURE REPAIR & REINFORCE SYSTEM

AEG 錨固系列

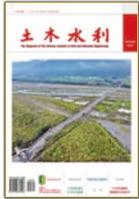
AE 結構補強系列

AM 智能監測

AC 無收縮水泥
AEX 樹脂砂漿

專業·品質·服務

免費服務電話 台北 02-29813223 台中 04-23810055 高雄 07-3500090
0800-009-666 桃園 03-4022192 雲林 05-5967603 上海 021-54370088
更多的資訊請上安固官方網站 www.anchors.com.tw



茲附上廣告式樣一則
請按下列地位刊登於貴會出版之「土木水利」雙月刊

此致
社團法人中國土木工程學會

「土木水利」雙月刊
廣告價目表

(費率單位：新台幣元)

刊登位置	金額 (新台幣元)	敬請勾選
封面全頁 彩色	60,000	
內頁中間跨頁 彩色	80,000	
封底全頁 彩色	50,000	
封面裏/封底裏 全頁彩色	40,000	
內頁全頁 彩色 (直式)	30,000	
內頁半頁 彩色 (橫式)	15,000	
內頁 1/4 頁 彩色 (直式)	8,000	
折扣	3 期 9 折， 4 期以上 8.5 折	

刊登月份：

50.1 50.2 50.3 50.4 50.5 50.6 共 次
(2月) (4月) (6月) (8月) (10月) (12月)

註：稿件請提供設計完稿之廣告稿；
相片、圖片等請提供清楚原件或電腦檔。

上項廣告費計新台幣 元整

隨單繳送請查收摺據
請於刊登後檢據洽收

機構名稱：(請蓋公司印)
商號

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木工程學會 電話：(02) 2392-6325 email: service@ciche.org.tw

98-04-43-04

郵政劃撥儲金存款單

收款帳號	0 0 0 3 0 6 7 8	金額 新台幣 (小寫)	仟	萬	拾	萬	仟	佰	拾	元
------	-----------------	-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

通訊欄 (限與本次存款有關事項)

繳納會費

- 常年會員年費 1,200 元
 初級會員年費 300 元

訂閱土木水利雙月刊，一年六期

- 國內·個人會員 新台幣 300 元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800 元
自第 卷第 期起， 年期雙月刊 份

訂閱中國土木工程學刊，一年八期

- 國內·個人會員 新台幣 1,600 元
 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600 元
 國外·個人 美金 80 元
 國外·機關團體 美金 200 元
自第 卷第 期起 年期學刊 份

收款戶名	社團法人中國土木工程學會	
姓名	寄 款 人	
地 址	主管：	
電 話	經辦局收款戳	

- ◎ 寄款人請注意背面說明
◎ 本收據由電腦印錄請勿填寫

郵政劃撥儲金存款收據

收款帳號戶名	
存款金額	
電腦紀錄	
經辦局收款戳	

虛線內備供機器印錄用請勿填寫

社團法人中國土木工程學會

信用卡繳納通知書

姓名		款別 註：入會時請先填入會申請書，傳真學會審查，我們會立即通知您，資格符合時請繳費， <u>入會費一人僅需繳交一次</u>	繳納會費 <input type="checkbox"/> 常年會員年費 1,200元 <input type="checkbox"/> 初級會員年費 300元
會員證號碼			訂閱土木水利雙月刊，一年六期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 300元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 1,800元 自第__卷第__期起，__年期雙月刊__份
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，一年八期 <input type="checkbox"/> 國內·個人會員 新台幣 1,600元 <input type="checkbox"/> 國內·非會員及機關團體 新台幣 3,600元 <input type="checkbox"/> 國外·個人 美金 80元 <input type="checkbox"/> 國外·機關團體 美金 200元 自第__卷第__期起__年期學刊__份
卡別	<input type="checkbox"/> VISA <input type="checkbox"/> MASTER CARD <input type="checkbox"/> JCB		白天聯絡電話
信用卡卡號			通訊地址
信用卡末三碼			
信用卡有效期限	(月/年)		
信用卡簽名			
繳費金額			

回覆請利用傳真：(02) 2396-4260 或 email：service@ciche.org.tw

回覆後請務必電話：(02) 2392-6325 確認，謝謝！

郵政劃撥存款收據

注意事項

- 一、本收據請詳加核對並妥為保管，以便日後查考。
- 二、如欲查詢存款入帳詳情時，請檢附本收據及已填妥之查詢函向各連線郵局辦理。
- 三、本收據各項金額、數字係機器印製，如非機器列印或經塗改或無收款郵局收訖章者無效。

請寄款人注意

- 一、帳號、戶名及寄款人姓名地址各欄請詳細填明，以免誤寄；抵付票據之存款，務請於交換前一天存入。
- 二、每筆存款至少須在新台幣十五元以上，且限填至元位為止。
- 三、倘金額塗改時請更換存款單重新填寫。
- 四、本存款單不得黏貼或附寄任何文件。
- 五、本存款金額業經電腦登帳後，不得申請撤回。
- 六、本存款單備供電腦影像處理，請以正楷工整書寫並請勿摺疊。帳戶如需自印存款單，各欄文字及規格必須與本單完全相符；如有不符，各局應婉請寄款人更換郵局印製之存款單填寫，以利處理。
- 七、本存款單帳號與金額欄請以阿拉伯數字書寫。
- 八、帳戶本人在「付款局」所在直轄市或縣(市)以外之行政區域存款，需由帳戶內扣收手續費。

交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

本聯由儲匯處存查 600,000 束 (100 張) 94.1.210 × 110mm (80g/m² 模) 保管五年 (拾大)



泛亞工程建設股份有限公司
PAN ASIA (ENGINEERS & CONSTRUCTORS) CORPORATION

穩健創新

台北市大安區忠孝東路四段 219 號 7 樓
電話：02-2771-7417 傳真：02-2721-9148

遠揚營造 工程股份有限公司

創新工法

www.fegc.com.tw

客家在地特色

遠東百貨竹北
新世紀購物中心新建工程

自動爬架

板橋通訊園區
集合住宅新建工程

預鑄制震

板橋通訊園區
停車塔新建工程

無支撐圓形預鑄