

土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

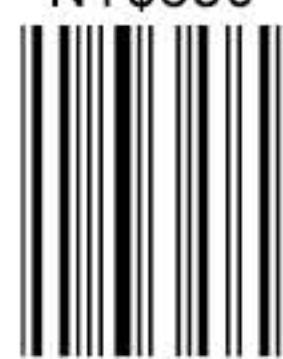
April
2024



ISSN 0253- 3804



NT\$350



Volume 51, No. 2

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

無人機影像
判釋河床質粒徑

工程技術及發展

專 輯

我國離岸風電海域
大地工程發展近況

哲人典範
功德圓滿

莫若楫博士
特別報導



亞新工程顧問股份有限公司
MOH AND ASSOCIATES, INC.

台北 | 台中 | 高雄 | 仰光 | 曼谷 | 新加坡 | 香港 | 澳門 | 北京

運輸工程 | 大地工程 | 數位工程 | 結構工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程



Tel: (886-2) 2696-1555 Fax: (886-2) 2696-1166 Website: www.maaconsultants.com E-mail: maagroup@maaconsultants.com

EARTHPOWER CONSTRUCTION CO., LTD.

義力營造股份有限公司

卓越
誠信
安全
技術
品質

義呈實諾 力呈卓越

創立於民國八十三年·甲等綜合營造業

深耕台灣，致力鑽研土木、環境、建築、區段

徵收、開發工程，秉持追求全員工安、品質提升的精神，在誠信踏實的經營態度之下，堅守營建道德崗位，各項工程實績屢獲優良工程金安獎、公共工程金質獎

土木工程

整地、道路、排水橋梁、隧道
護坡、植生景觀、管線工程

建築工程

辦公大樓、廠辦新建
特殊建築、集合住宅

環境工程

掩埋廢棄物分類清除、土壤污染改良
污水處理、復育工程、廢棄物分類機械製造

區段徵收

區段徵收工程
土地重劃、公設工程施工

開發工程

工業園區開發
社區開發、租售管理



優良廠商 / 優良營造業
金安獎、金質獎 雙獎特優

TEL: (04) 2435-0568

FAX: (04) 2435-0569

公司地址：
臺中市北屯區軍福11路553號1樓

郵箱: earth.powerld@msa.hinet.net
網址: www.earthpower.com.tw

土木水利

社團法人中國土木工程學會會刊



全球浮式離岸風場新增裝置容量統計圖



大地能源號



臺大浮臺



大地能量號

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
- 綠營建工程
- 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

發行人：高宗正

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二十六屆理監事（依姓氏筆劃排序）

理事長：高宗正

常務理事：朱惕之 余信遠 廖學瑞 賴建信

理事：王宇睿 王昭烈 林子剛 林祐正 林聰利 胡宜德 高銘堂

張荻薇 莊均緯 許泰文 陳仲賢 曾榮川 黃一平 楊正君

楊偉甫 歐善惠 謝尚賢 謝震輝

常務監事：宋裕祺

監事：王藝峰 吳文隆 呂良正 沈景鵬 邱琳濱 賴建宏

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

莫若楫博士 特別報導

- 📖 哲人典範 功德圓滿—亞新工程顧問公司創始人莫總裁若楫博士 3

「我國離岸風電海域大地工程發展近況」專輯 (客座主編：郭玉樹教授、詹錢登特聘教授)

- 📖 專輯序言：我國離岸風電海域大地工程發展近況 郭玉樹／詹錢登 8
- 📖 臺灣海峽離岸風場地質災害風險概述與地質資訊平台介紹 林亮甫／劉家瑄／許鶴瀚／陳憶萍／陳松春／陳家生 9
- 📖 離岸風場海床土壤地質調查技術引進與發展 黃宗宸 18
- 📖 離岸風場大地工程調查與詮釋實務簡介 劉浙仁／冀樹勇／譚志豪 24
- 📖 我國浮式風機繫泊系統與錨錠基礎選型考量初探 郭玉樹／張上君／曾玉修／許惠婷／紀昭銘 29
- 📖 浮式風機：臺大浮臺開發歷程 吳冠逸／馬開東 36
- 📖 臺灣西部海域應用重力式安裝錨的可行性評估 張宏駿／劉怡秀／林俊宏／馬開東／葛宇甯 42
- 📖 砂波對於嵌入式拖錨承载力影響分析 郭玉樹／金秉憲／張上君／紀昭銘／曾玉修 48
- 📖 離岸風場之開發、營運與管理 林庭宇／張景祥／王天佑 55
- 📖 離岸風電人才需求暨培育—以沃旭能源為例 陳韻如／詹家琪／李欣澄 59
- 📖 應用混響衰減估測於拖航水槽之材料吸音率評估 吳柏賢／陳冠宇 62
- 📖 基於計算流體力學 CFD 之水下載具線型最佳化設計 江易秦／洪翊菁／邱睦翔／蔡欣邦／陳永裕 72

工程技術及發展

- 📖 無人機搭載影像於河床質粒徑判釋之應用 蔡宗翰 81

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 封底
- 亞新工程顧問股份有限公司 — Our World Our Work 封面裡
- 義力營造股份有限公司 — 義呈實諾 力呈卓越 封面裡
- 駿宏工程顧問有限公司 — 建築結構工程之規劃・設計・分析 封底裡
- 財團法人中興工程科技研究發展基金會 — 科普・獎學・工程交流 41
- 財團法人臺灣營建研究院 — 知識・技術・傳承 54
- 台北市土木技師公會 — 專業・客觀・公益・永續 58
- 巨廷工程顧問股份有限公司 — 創新技術・價值服務・關懷環境・培訓人才・重視信譽 71



亞新工程顧問公司訂始人
莫總裁若楫博士 1931.8.19-2024.3.16

哲人典範 功德圓滿



國內外榮譽獎項

- | | |
|---|------------------------------|
| 1983年 中國土木水利工程學會工程獎章 | 2012年 中國工程師學會工程獎章 |
| 1983年 中華民國道路協會工程獎章 | 2016年 中華民國道路協會頒發終身成就獎 |
| 1999年 亞洲理工學院頒發榮譽博士學位 | 2016年 亞洲土木工程聯盟 (ACECC) 終身成就獎 |
| 2000年 亞澳道路工程協會 (REAAA) 榮譽會員 | 2018年 中國工程師學會會士 |
| 2003年 日本地盤工學會榮譽會員 | 2019年 中國土木水利工程學會程禹傑出工程師獎 |
| 2008年 亞洲及太平洋工程師組織
(Federation of Engineering Institutions of Asia
and the Pacific) 首位年度工程師獎 | 2022年 國立臺灣大學工學院傑出企業家獎座 |

榮登國內外名人錄

- | | | |
|-----------|-------------|------------|
| • 國際名人錄 | • 東南亞名人錄 | • 香港名人錄 |
| • 世界科學名人錄 | • 中華民國現代名人錄 | • 美國工程界名人錄 |

莫若楫先生 生平事略

莫若楫先生，1931年8月19日出生於上海，1953年畢業於國立臺灣大學土木工程學系，畢業後前往美國攻讀大地工程（Geotechnical Engineering）領域，1955年取得美國愛荷華大學碩士學位，並於1961年取得麻省理工學院博士學位，成為臺灣第一位大地工程博士。莫君完成博士學業後受邀至耶魯大學任教，成為該校最年輕的教授之一；1965年受美國政府派任，前往由多國籌資成立於泰國曼谷的東南亞公約組織工程研究所（SEATO Graduate School of Engineering）任教，並負責籌組建立該校大地工程專門領域科系。1967年因學校脫離 SEATO 獨立運作，莫君提出重新命名學校為亞洲理工學院（Asian Institute of Technology, AIT），並於該校同時肩負教學以及招生工作。莫君也在美國政府派任的十八個月期滿後持續留任至1975年，任職時間長達十一年；自擔任副教授起，陸續升任教授、系主任、副校長，教務長，學術成就斐然，為大地工程國際知名學者，著有論文一百五十餘篇，並且於曼谷機場計畫（Bangkok Airport Project）地質改良研究工作中，發現並定名「Bangkok Clay」。莫君除積極奔走亞洲地區各國招生外，更積極說服臺灣政府相關單位與企業並獲得支持，鼎盛時期曾同時有超過百位國人赴校就讀；多數學子於日後成為國內重要工程建設菁英，擔任各機關首長或局、處長者不計其數。1999年獲得 AIT 授予亞洲理工學院頒發榮譽博士學位，並於2017年至2022年間擔任亞洲理工學院董事。莫君亦以豐富之教育經歷，受聘為我國教育部大學土木工程學系評鑑委員、中華工程教育學會認證委員會委員、國家科學

委員會諮詢委員。於國際間亦曾受聘為新加坡南洋理工大學土木與結構學院諮詢委員、大地工程研究中心諮詢委員會主任委員，及香港理工大學訪問教授等要職。

有感於國內十大建設起步後需才殷切，莫君毅然於1975年東裝返台，與其兄長莫若礪博士共同以「亞洲新技術」為宗旨創立亞新工程顧問公司，積極延攬各領域專業人才並引進新工法、新技術在國內紮根，投入十大建設及諸多國家重大工程之規劃、設計及監造。1975年公司創立初期即導入最先進的混凝土強固技術，在七小時內完成松山機場滑行道整建工作，本案所採用的以服務建議書評選模式也奠定我國公共工程評選制度的雛型。1984年臺北市區執行全國第一段鐵路地下化工程，負責大地顧問及部分路段細部設計，在維持路面交通及地下管線正常運作的前提下順利完成此案。1985年率先執行大臺北盆地地層大地工程性質調查分析及研究工作，並於1987年自大臺北都會區捷運工程建設初期即擔任臺北捷運工程局大地總顧問（GESC），持續15年協助大臺北都會區捷運初期路網工程建設之大地工程分析評估、審查、建議及災害預防等卓有成效。1988年執行新光站前大樓建設專案管理工作，為國內首次由民間企業委託之專案管理案例，也為後續超高層大樓相關設計規範提供重要參考。1995年引入新技術以 ESA（毛毛蟲）工法完成臺北復興北路機場地下穿越道興建，使本案成為世界第一條於營運中機場跑道下方施工的地下道工程。1998年執行泰國曼谷第二國際機場之地盤改良工作，使用超過4,500萬公尺的垂直排水帶以及填築超過600萬立方的土方，使本計畫成為亞洲最大的軟土層地質改良案例，諸多論文的發表也成為後



2000年亞澳道路工程協會（REAAA）榮譽會員證書



2016年獲頒中華民國道路協會終身成就獎



2016年亞洲土木工程聯盟（ACECC）終身成就獎

續相關案例的參考典範。此外莫君也帶領亞新團隊陸續參與中山高速公路、第二高速公路、高速鐵路、台北大眾捷運系統、高雄大眾捷運系統等多項重大工程；由於服務品質優異，頗受業主肯定且獲獎無數。莫君深具前瞻性國際化視野，帶領亞新集團積極拓展海外業務，所設據點遍及新加坡、泰國、香港、馬來西亞、美國、緬甸以及中國大陸。國外具指標性工程包括美國洛杉磯 Badger Avenue Bridge（獲得 1996 傑出工程獎）、哥斯達黎加 Tempisque Bridge、澳洲 M5 號高速公路、清邁國際機場、柬埔寨國際機場，新加坡捷運、泰國捷運、越南南西貢區開發等等。莫君於工程界及教育界之卓越貢獻，使其於 1983 年獲頒中國土木水利工程學會工程獎章及中華民國道路協會工程獎章，2012 年獲得中國工程師學會工程獎章，2016 年獲得亞洲土木工程學會聯盟頒發第三屆個人成就獎，同年中華民國道路協會頒發終身成就獎，2018 年獲選為中國工程師學會會士，2019 年獲聘擔任中華仲裁國際中心仲裁院委員，同年獲得中國土木水利工程學會程禹傑出工程師獎，2022 年獲頒臺大工學院傑出企業家獎座殊榮。

莫君致力於建立工程技術國際平台，任職於 AIT 期間即於 1967 年召集泰國、馬來西亞、臺灣等七國成立東南亞大地工程學會（Southeast Asian Geotechnical Society, SEAGS），深化了東南亞各國大地技術交流；1980 年聯合中國工程師學會和中國土木水利工程學會主辦第六屆東南亞大地工程會議，2005 年加入亞太工程師組織（APEC Engineer Register）並獲選擔任中華

臺北監督委員會首屆主任委員；2008 年加入亞洲及太平洋工程師組織（Federation of Engineering Institutions of Asia and the Pacific），並獲頒首位年度工程師獎；2009 年加入國際工程師流動論壇（Engineer Mobility Forum），並擔任中華臺北監督委員會首屆主任委員。莫君遍及全球的專業足跡使其名列國際名人錄、美國科學名人錄及工程界名人錄、東南亞名人錄、中華民國現代名人錄及香港名人錄。

莫君為國內外令人尊敬的工程界耆老，一生作育英才無數，照顧與提携後進不遺餘力。同時帶領亞新團隊貢獻國家建設良多，長期為國內工程界發展與創建相關制度而努力，除貢獻國家工程建設良多外，亦為亞洲各國完成多項基礎建設。莫君處事嚴謹且重視誠信，在學術成就與工程實務留下的典範是大家學習的對象；堅持並勉勵 MAA 同仁應以「倫理、負責、專業、創新」的精神與態度認真服務國家社會。如今哲人已逝功德圓滿，是國家與工程界的損失，惟風範猶存令人感佩！



莫若樺總裁墨寶、也是其一生的寫照



113 年 4 月 18 日莫若樺總裁告別式，有超過 600 位國內外工程界代表到場致意。

懷念亦師亦友的莫若楫博士

歐晉德

2024年3月20日上午走進莫若楫先生的靈堂，默哀良久，很難接受他已經離開的事實。一個多月前不是還參加了亞新的尾牙，莫先生還神采奕奕地跟大家交談嗎？看著莫先生帶著微笑的照片，旁邊還放了一杯紅酒，往事不斷浮現。與莫先生亦師亦友、亦長官，將近一甲子的交往，心中有無限的不捨與懷念。

記得初次聽到莫若楫先生的大名，是在1966年暑假，當時我剛考進成大土木工程研究所，擬選土壤力學為主修，正巧莫先生應國科會邀請在台大客座講授土壤力學，遂大膽的到土木系去旁聽。那時莫教授才35歲，剛應亞洲理工學院之聘擔任教授，英俊瀟灑，令人心儀，他上課全程用英文，內容主要是麻省理工學院 Prof. Lamb 的土壤力學綱要，以 Stress Path 為主軸，我上了三個月，只聽懂一成不到，依然一頭霧水，對自己未來是否還要選此領域做為專業毫無信心，只知道這是尚待探討的領域。

再次見到 Dr. Moh，已是十年之後，那時我已在美國獲得學位回國服務。1976年某天晚上，與朋友應酬完，走在林森北路六條通的巷道，突然有人叫我，是中華顧問工程司的萬惟俊協理，也是我非常敬佩的長官，他給我介紹了當時和他一起的莫若楫博士，那時莫博士已在國際大地工程界相當知名，不但是亞洲理工學院的副校長，也是國際土壤力學與基礎工程學會的副會長，能巧遇且認識仰慕已久的莫博士，令我感到興奮。他很客氣的說，隔天是否可以跟我談談。次日我依約前往，他說他剛剛成立了亞新工程顧問公司，希望以大地工程為主要服務範圍，問我是否有興趣加入。當時亞新正是草創階段，在浩然大廈租了一間公寓，有一個小小的試驗室，只有一位工程師游坤。聽莫先生說明他的願景，我深受感動且因莫博士的邀約而感榮幸，於是抱著向大師近距離學習的心情，加入了當時僅有五人的新公司。

從此追隨 Dr. Moh 12 年，除了奔走台灣的業務外，最大的收穫就是打開自己專業的視野，看到國際大地工程界的進步，更看到 Dr. Moh 的影響力。猶記得 1977 年在東京出席國際土壤力學及基礎工程全球大會，由於大陸是正式會員，而 Dr. Moh 卻是國際學會的副會長，使得主辦國當時很緊張，生怕產生不必要的衝突，可是 Dr. Moh 從容大度，很得體地招呼大陸和台灣的代表，讓我學習到許多國際會議的禮節和交談方式；各國代表對 Dr. Moh 十分敬重，也讓我體會到國際學術界最重要的是專業成就，而不是政治考量。當時台灣正進行十大建設，由於台灣的地質條件特殊，也受到國際大地工程

界的重視，Dr. Moh 不但成為台灣與國際溝通的橋樑，亞新公司（Moh and Associates Co., MAA）也從此在亞洲、東南亞漸漸嶄露頭角。

1979 年年底，Dr. Moh 提到，東南亞地區將成為另一個工程快速成長的地區，亞新要在新加坡落點，同時也在香港建立基地，這樣可以在這些地區把台灣十大建設獲得的經驗與他們分享。於是在 Dr. Moh 的指示下，展開了我居留新加坡數年的工程生涯。初去時人生地不熟，完全靠著 Dr. Moh 當年教過的學生們協助，找工程計劃、解決各種工程需求和助手，更與香港、台灣三地相呼應，因有台灣創業經驗，加上 Dr. Moh 的指導，有計劃地順利推動在東南亞的工程業務，大約一年多以後，新加坡較困難或地工方面較複雜的工程，逐漸都由 MAA 取得。

Dr. Moh 在推動工程業務中，經常注意工程的特色，在解決困難之際，總是將解決問題的理論基礎敘述清楚，寫成論文與國際工程界分享，毫不藏私。我永遠記得，他曾提醒我，如果能把這些經驗與知識藏為己有，就會成為自己進步的障礙，在各種會議場合，與會者的質疑，要坦然面對，才會贏得大家的尊敬與信賴。

記得在 Dr. Moh 手下工作不久之後，有一天他要我把工作中的一些心得寫成論文，向國際性刊物投稿。我費了九牛二虎之力，好不容易用自己的破英文寫了一篇論文，請莫先生過目修改。幾天後莫博士把修改過的文章交還給我，只見幾乎全篇文章都被莫博士用紅筆改動得面目全非，看了改動後的文章，只覺不論是著眼點、所強調的理論等等都是我從未想到的，經莫博士一加修改，全篇文章有了全新的視野。我誠懇地向他請示，是否應該以他的名字為第一作者，莫博士只是輕鬆地回答說：這是你的文章，要用你的名字去發表。莫博士就是這樣不遺餘力地提攜後進，毫不居功。他的作為，深深地影響著我，後來我也學習他，盡力鼓勵年輕人，給他們機會。

這幾十年來，我與莫博士的交往，不僅僅止於工作上的，我們兩個家庭也常有往來，第二代也成為好友。莫博士很愛他的家庭，在台灣，他與么兒一家同住，而每天晚上八點鐘必與住在香港和上海的孫兒女通電話；每年全家必定一起出去旅遊。與他見面時，他總是開心又驕傲地秀出孫兒女的照片，這時他不是一位享譽國際的地工大師，而是一位疼愛子孫的慈祥爺爺。

莫博士對工程界學生們的愛護與提攜，我想每位受過他教導的學生都會銘感於心。他關懷著我們的國家和大地工程的發展，因此我簡單地用這兩句話來紀念莫博士：

心繫家國大地 德行永存人間

Dr. Moh，我永遠懷念您也感激您！

追憶莫若楫博士二三事

陳景文

事實上和莫若楫博士見面次數不多，對談次數也寥寥可數，但要講淵源，他可算是我的師祖輩，因我在成大土研所的碩論是莫博士得意門生胡邵敏博士所指導。回憶 50 年前的往事，表示對莫博士的緬懷和尊崇：民國 64 年我仍是成大土研所的碩士生，亞新也剛成立，某天莫博士來成大拜訪游啟亨教授後，順道來探當時在成大土研所客座胡博士的班，我們是下課時間，說好看一下就走，大家站在教室外，就談了整整一節的時間，事實上是聽莫博士講話，主要強調地工在當時的環境都 under 在土木結構部門內，對工程的執行不是很好，應該獨立出來自行一個部門，這就後續大地工程（應該是莫博士對 Geotechnical Engineering 的創始中譯）在台灣工程界被重視的濫觴。

另一講話重點就是亞新要 support 唸土壤力學組的研究生。說到做到，第二年成大唸土力的研究生就接受到亞新公司的獎學金，金額還頗豐，因我碩士畢業後留在土研所當助理研究員，亞新獎學金就由我負責發放，不少當今的產官學大老當年就得到莫博士的福澤，憶當年每到月初，大家圍著我叫我老大，「老大，亞新的錢來了沒？」記憶猶新，部分人士到現在還叫我老大。以一個剛成立應該還沒開始賺錢的公司就設立獎學金資助學生，至今仍屬罕見，莫博士的胸懷確值得大家的崇敬！

後來我接觸到不少工程界同儕，只要他們曾在亞新待過，都會相互問「亞新學號」，並引以為榮，這可以證明亞新的成功，也是大家對莫博士的尊敬！

AIT (Asian Institute of Technology) & SEAGS (Southeast Asian Geotechnical Society)

Three Giants of AIT Geotech' lauded at 21st Southeast Asian Geotechnical Conference

www.ait.ac.th gte@ait.asia f t i n @gteaitasia AIT GTE NEWS



Three Giants of AIT Geotech: Dr. Z.C. Moh, Prof. J. Nelson, Dr. E.W. Brand

三位教授是創設亞洲理工學院 Geotechnical Div. 的重要靈魂人物、都是國際級大師。上圖是三位巨人連袂參加 2023 年 10 在月曼谷舉行的 21st Southeast Asian Geotechnical Conference and 4th AGSSEA Conference。



On April 4, 2024, the Southeast Asian Geotechnical Society and AIT Geotechnical and Earth Resources Engineering jointly hosted a commemorative ceremony in honor of Dr. Za Chieh Moh at the Robert B. Bank Auditorium, located at the Asian Institute of Technology in Thailand. (courtesy of <https://www.facebook.com/SoutheastAsianGeotechnicalSociety?mibextid=LQQJ4d>)





我國 離岸風電海域 大地工程 發展近況 專輯序言

專輯客座主編 郭玉樹／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

自 2012 年 7 月政府公告實施之「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」至今，我國推動離岸風電已超過 10 年，目標是將離岸風電產業本土化。離岸風電產業結構的分工項目中，「水下基礎」是較適合我國投入的標的，工作項目包括：基礎佈設點位之土壤地質調查、水下基礎選型與設計、水下基礎製造與安裝等。在政府相關政策的規定下，我國本土產業在海域土壤地質調查與試驗、基礎選型與設計及水下基礎鋼構製造等方面已經獲得許多的工作機會，並從中累積豐富的寶貴經驗。

經濟部能源局於 2020 年 6 月及 2020 年 8 月辦理離岸風電區塊開發規劃說明暨意見徵詢會議，邀集開發商、系統商等利害關係人共同研商第 3 階段離岸風場區塊開發機制，最終定調於 2026 年至 2030 年優先推動水深 50m 以內的離岸風場開發；於 2031 年至 2035 年擴展到水深超過 50 m 之過渡深水區的離岸風場開發。能源局並於 2023 年 1 月 18 日「離岸風電浮動式風場示範規劃說明會議」說明將我國離岸風電將由目前固定式風力發電機推展至浮式風力發電機。浮式風力發電機所採用之水下基礎型式與固定式水下基礎之差異甚大，浮式風力發電機之浮台需要以繫纜連接固定於海床之錨錠基礎。為確保浮台穩定，錨錠基礎數量將多於目前固定式水下樁基礎數量，而且所佔地面積更為廣闊，這些條件均會影響海域土壤地質調查工作及規劃內容。我國工程顧問業與鋼結構製造業要提早準備並重新學習，做好投入浮式離岸風場開發的準備。

本專輯以「我國離岸風電海域大地工程發展近況」為題，邀請國內外企業專家及學術機構學者共同撰稿，第一篇文章林亮甫博士等人以「臺灣海峽離岸風場地質災害風險概述與地質資訊平台介紹」為題，分享參與固定式水下基礎離岸風場開發所獲得之海域地質災害風險判釋成果；第二篇黃

宗宸博士以「離岸風場海床土壤地質調查技術引進與發展」為題，說明我國目前最新之海床土壤地質調查技術，以及後續面對浮式離岸風場開發所面臨之挑戰；第三篇中興工程顧問社實務工程師以「離岸風場大地工程調查與詮釋實務簡介」為題，說明目前離岸風場開發時之水下基礎設計前置作業內容。前述 3 篇文章均為我國產學界透過積極參與固定式水下基礎離岸風場開發所累積之寶貴經驗。為了提早讓我國產業瞭解浮式風機水下基礎與固定式水下基礎之差異，第四篇文章由台灣世曦股份有限公司與成功大學水利及海洋工程學系共同合作以「我國浮式風機繫泊系統與錨錠基礎選型初探」為題，說明我國離岸風場天然環境最可能採用之繫駁系統與錨錠基礎型式；第五篇馬開東教授團隊以「浮式風機：臺大浮臺開發歷程」為題，介紹台灣大學投入浮式風機浮台開發之成果，以協助讀者瞭解浮式風機各部元件關連之面貌；第六篇林俊宏教授呈以「臺灣西部海域應用重力式安裝錨的可行性評估」為題，說明我國浮式風力發電機錨錠基礎選型相關參考資料；第七篇郭玉樹教授考慮嵌入拖錨之經濟性，以「砂波對於嵌入式拖錨承載力影響分析」為題，說明進行我國在浮式風力發電機錨錠基礎設計時，需將我國海床地形變動納入設計考量。

本專輯邀請風睿能源公司分享他們在「離岸風場之開發、營運與管理」之寶貴經驗（第八篇），亦邀請沃旭能源公司以「離岸風電人才需求暨培育」為題，介紹他們在離岸風電產業界人才培育所付出的努力（第九篇）。我們期許我國本土產業持續投入離岸風電相關工作的積極爭取，順利轉型銜接參與浮式離岸風場開發；透過持續的人才培育，穩定的參與風場開發與營運工作，進而達成我國離岸風電產業本土化目標。此外，本專輯也刊載「應用混響衰減估測於拖航水槽之材料吸音率評估」及「基於計算流體力學 CFD 之水下載具線型最佳化設計」等 2 篇文章與讀者分享。

通訊方式：郭玉樹教授 kuoyushu@mail.ncku.edu.tw

詹錢登特聘教授 cdjan@ncku.edu.tw



臺灣海峽 離岸風場 地質災害風險 概述 與 地質資訊平台 介紹

林亮甫* / 國立臺灣大學海洋中心 博士後研究員

劉家瑄 / 國立臺灣大學海洋中心 研究員兼執行長

許鶴瀚 / 國立臺灣大學海洋研究所 副教授、國立臺灣大學海洋中心 副研究員

陳憶萍 / 國立臺灣大學海洋中心 研究專員

陳松春 / 經濟部地質調查與礦業管理中心 科長

陳家生 / 捷聯科技有限公司 副總經理

過去數年間臺灣海峽的離岸風電蓬勃發展，累積了大量的地質、地球物理、工程地質調查資料與分析成果，使我國在臺灣海峽離岸風場有更豐富的地質資訊，也認知到更多臺灣與鄰近區域的地質災害風險特徵。本文探討臺灣海峽地質災害風險，從區域地質的角度出發，說明臺灣海峽的構造背景、沉積作用、氣候、海洋流場等自然條件，並列舉「地質構造發育」、「快速沉積物供應」、「動態海床地貌」、「流體活動」、「堅硬地層」等五項地質災害風險特徵來進一步說明臺灣海峽的地質作用如何對風場開發造成影響。對臺灣海峽地質特性有基本的認識後，文末介紹地質調查與礦業管理中心所建置的線上平台「地質與環境感知系統」，地礦中心透過該平台分享各種公開的地質資訊供各界查詢，其具備2維、3維展示功能，並有各種圖層資料可供套疊，可同時展示管制區、各種經濟活動、環境保護管制區、地質調查資料分布以及地質影響潛勢分布，除了有助於各界了解臺灣海峽的風場地質知識，也方便廠商將地質資訊應用於風場規劃、評估等工作。

關鍵詞：海域地質災害、台灣海峽、離岸風場、地質與環境感知系統服務平台

ABSTRACT

Due to the development of offshore wind farms in Taiwan Strait, abundant geological, geophysical, geotechnical data have been collected and analyzed. Our knowledge for the geology in this area has well been improved. In the same time, more geohazard issues are also noticed. This paper aims to introduce potential geohazard issues in the Taiwan Strait based on the knowledges gained in the past years. To discuss the potential geohazards, we start from the regional geology, explaining the tectonic settings, sedimentary processes, and metocean conditions of Taiwan Strait. The geological background is followed by further discussions focusing on geohazard issues regarding “structural develop-

ments”, “rapid sediment inputs”, “dynamic bedforms”, “fluid features”, and “hard rocks” across the offshore windfarm area. In the later part of this paper, the “wind power geological information system” established by Geological Survey and Mining Management Agency is introduced. The online WebGIS system is a platform for publishing the open-sourced geological data and analytical results. It displays georeferencing layers provided in 2D and 3D ways, including the windfarm areas, controlled zones for military, ecology, and environmental protection, the data distributions and geohazard risk levels across the windfarm areas. That helps to share the geological information about Taiwan Strait and can be a useful tool for developers to assess the windfarm sites they concerned.

Keywords: marine geohazard, Taiwan Strait, offshore windfarm, WebGis system

* 通訊作者，linlf@ntu.edu.tw

前言

離岸風力發電是我國極力推動的能源發展項目，國際工程顧問公司曾評估^[1] 全球風況最好的前二十處觀測地，便有十六處位於我國海域、均位於臺灣海峽，發電潛力受到世界各國能源公司的矚目。經濟部於 2012 年公告「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」後，便陸續有國內、外廠商相繼投入調查、開發工作，在 2016 年底完成了首座離岸風電示範機組，首座商轉離岸風場「海洋風電」更在 2019 年 10 月風機組裝完成開始運轉。目前第一、第二階段風場仍持續發展中，目標於 2025 年離岸風電的發電量達到 3GW，截至 2023 年 11 月初，臺灣海域的離岸風機已完成 270 座（經濟部公布資料）。

離岸風電場址的規畫、設計，需藉由場址（包含海纜路徑）的環境條件來考慮施工方式、成本、效率，更重要的是安全性。利用地球物理方法來探測地表、地下地質的特性以及利用工程地質調查技術來了解場址中沉積物、地層的物理特性，是風場開發前期非常重要的工作。經過過去十年的離岸風電發展，不論是由政府機關（如：能源署、地質調查與礦業管理中心）主導的跨風場海域基礎地質調查，或是各開發商針對有意開發的離岸風電場址進行精密的調查，都使得臺灣海峽的海域環境資料量大幅提升。而我們在擁有更豐富的地質資訊的同時，也認知到更多臺灣與鄰近海域地質條件所造成的地質災害風險。

海域地質災害為自然的地質條件或人為因素所引發的地質作用（圖 1），對於環境、生態、人類社會、經濟發展等領域所造成的危害，例如 2011 年日本東北大地震海嘯所造成的福島核電廠災難^[2]，或是 2009 年莫拉克

颱風侵台時海底土石流所造成的海底電纜斷裂與隨後的電訊問題^[3,4]。這個議題也因為離岸工程需求提高而越來越受到國際社會的重視，如歐洲海洋委員會（European Marine Board）海洋地質災害工作團隊的研究便將海域地質災害分為、地震（Earthquakes）、火山（Volcanoes）、海嘯（Tsunamis）、塊體崩移（Submarine mass movements）、流體活動（Fluid activity and its manifestations）、海床地貌變遷（Migrating bedforms）、人為與科技災害（Human induced and technological hazards）、連鎖事件（Cascading and/or cumulative events）等八類^[5]。該文件中也提到因各種地質作用的背景條件是經過千百萬年形成（地質時間尺度）而災害（地質作用）可能是短時間且不頻繁地發生，導致難以預測。因此，要探討風場當地（local）的地質作用應先從區域（regional）地質的角度出發，從各項背景條件來探討近代、淺層的地質作用與機制。臺灣大學海洋中心的研究團隊參與、執行臺灣海峽離岸風電的海域調查、資料分析等眾多相關計畫，撰寫本文分享過去數年間累積的知識與經驗，期望能幫助讀者對於臺灣海峽的地質條件與海域地質災害有更進一步的認識。

臺灣海峽地質條件

以地質歷史的角度來看，臺灣海峽介於歐亞大陸與臺灣島之間，屬南海東北部大陸邊緣的陸棚區域。這個陸棚在始新世時（約六千萬年前至三千萬年前之間）經歷華南古陸張裂活動，有一系列的正斷層與張裂盆地發育（如台西盆地、澎湖盆地）^[7,8]。在張裂活動停止之後至晚中新世（約三千萬年前至六百萬年前之間）形成後張裂時期、被動大陸邊緣的陸棚環境；晚

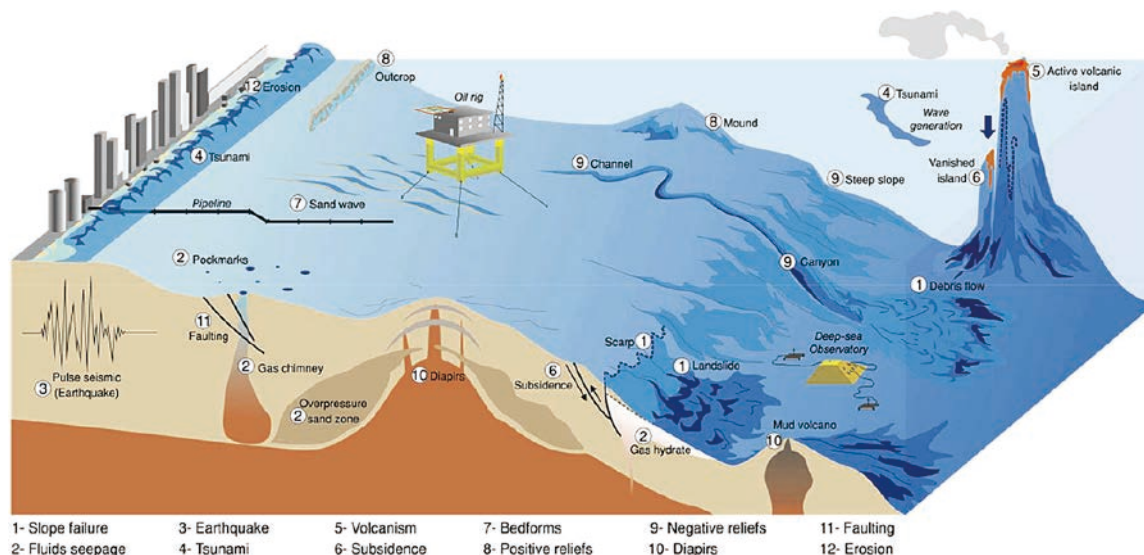


圖 1 各種可能成為災害的地質特徵與作用^[6]

中新世（約六百萬年前）之後因歐亞大陸與呂宋島弧在此碰撞，陸棚東緣隆，起形成了臺灣造山帶，逐漸隆昇的臺灣島與歐亞大陸間所來的水域便是現今看到的臺灣海峽。在臺灣造山帶形成的過程中，海峽東側因為造山帶的荷重，陸棚發生撓曲向東下凹，在海峽的東側形成了臺灣西部前陸盆地 [9-12]。藉由上述地史得以了解位在海峽中線以東的風場海域的地層架構，地層由深到淺依序出現張裂地塊與同張裂盆地沉積物，後張裂大陸邊緣的陸棚沉積物覆蓋於其上，最淺則是向東變厚的同造山的前陸盆地沉積物（圖 2）[8,10,12]。

以現代的角度來看，臺灣島仍是相當年輕、活躍的造山帶，大地的擠壓造成地震活動頻繁，屬環太平洋地震帶的一部分，容易造成山崩，也會破壞人造建築並造成生命危害。臺灣位處於亞熱帶季風區，容易出現災害性天氣，有梅雨季、春秋鋒面及夏季對流性降雨，都可能造成豪大雨，加速地表的侵蝕以及造成大量沉積物輸出，又是熱帶氣旋的主要路徑，平均一年有 3 到 4 個颱風侵襲臺灣，造成強風、豪雨、山崩、土石流等災害。地震與颱風，再加上活躍的造山抬升，使得臺灣陸上的山脈以極高的侵蝕速率生產了大量的沉積物，供應至周圍的海域 [13,14]。臺灣海峽東側的海床沉積物大部分是由臺灣西部的河系供應，其中濁水溪提供了最大的沉積物供應量，每年供給 30 ~ 60 百萬噸的沉積物至臺灣海峽（圖 3）[13,15,16]。

臺灣海峽平均深度僅約 60 公尺深，海水流場主要受到季風推動：夏、秋時分，西南季風造成南海海流向北注入臺灣海峽，與向北流的黑潮支流共同形成北向的強勁流場；秋末到初春時分，東北季風造成海峽西側向南流的中國沿岸流與海峽東側向北的黑潮支流混合，形成複雜的流場（圖 4）[17]。另外，臺灣海峽淺水域的狹長水體亦深受潮汐影響：臺灣海峽東半部南北向的水體運動（圖 4）[18]，漲潮會推動南邊水體向北、北邊水體

向南聚集於中臺灣外海，退潮時則反過來由海峽中部向南、向北兩側退去，因此在中臺灣（如台中港）有較大的潮差。整體來看，臺灣海峽的海流是季節流場、潮汐流場、以及即時氣象混合的結果，相當複雜。

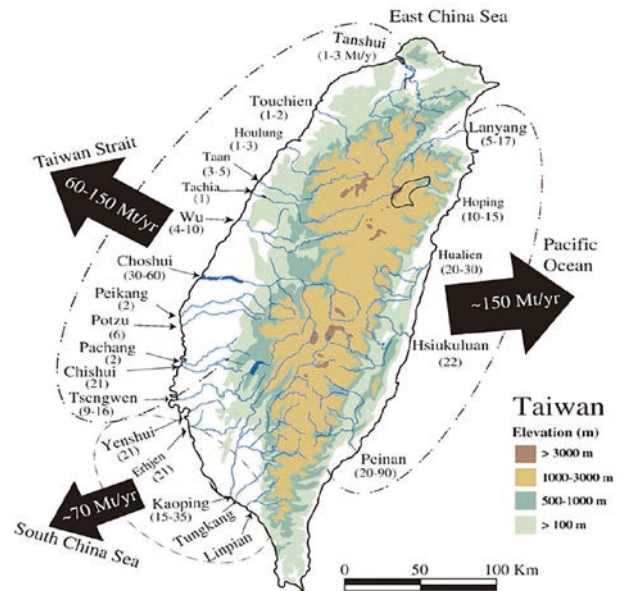


圖 3 臺灣的河系分布與主要河系每年沉積物供應量 [16]

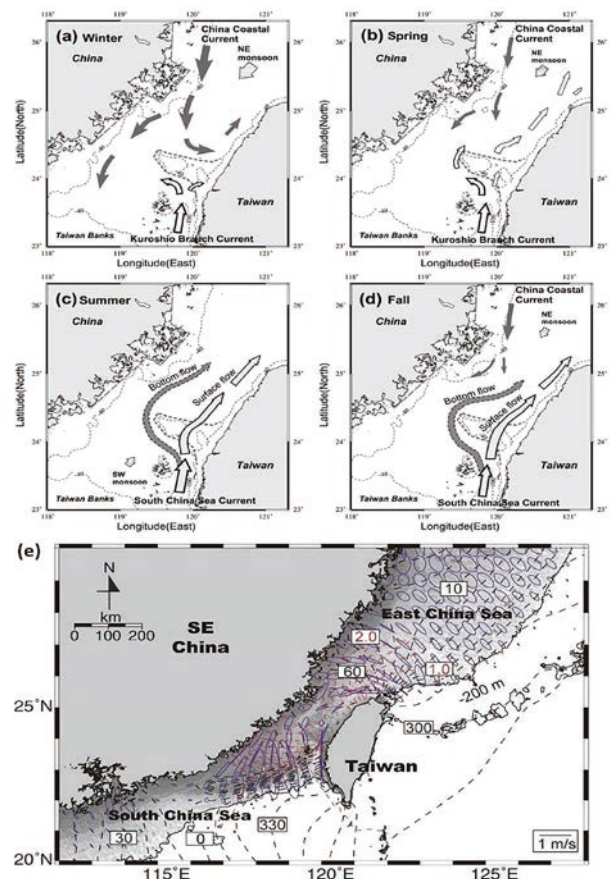


圖 4 臺灣海峽流場：(a)~(d) 個季節流場特性 [17]。(e) 臺灣海峽與鄰近海域潮流分布 [19]。紫色線為潮流橢圓，其長軸為潮流走向，紅色線與黑色虛線分別為等相位線與等潮線。

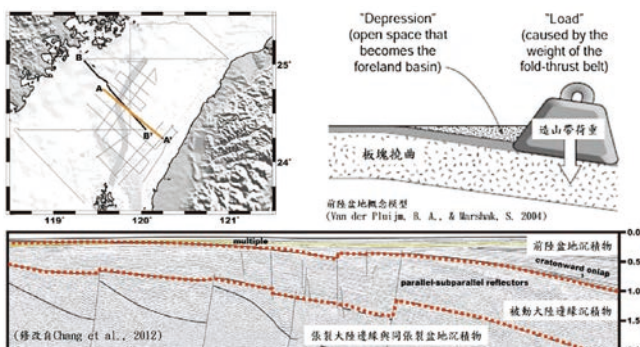


圖 2 臺灣海峽震測剖面與主要地層架構（修改自 Chang et al. [12]）

臺灣海峽的地質災害風險

臺灣海峽離岸風場的主要分布範圍位於海峽中線以東，南起澎湖、雲林，北至桃園觀音外海（圖 5），少數風場分別位於淡水、台南、高雄、屏東外海，因距離較遠、地質條件不盡相同，暫不在本文討論範圍。對於開發離岸風場來說，工程所及的深度多是海床底下一百米以內的地層，因此在這個深度範圍內的沉積物特性與地質作用在工程設計上特別受到關注。但地質作用不是僅發生在這個範圍內，斷層一般是從更深處的構造發育出來，流體向上移棲的現象也可能起因於更深處的過壓地層，這些造成沉積層變形或是物性改變的作用都是影響風場安全的要素。本文將風場範圍中各種地質作用分項，並說明其災害風險：



圖 5 臺灣海峽離岸風場分布範圍。咖啡色區塊為第二階段潛力場址，桃紅色區塊為第三階段開發潛力場址。（圖片截自地質與環境感知系統）

地質構造發育

臺灣西部有一構造前緣稱為「變形前緣」（圖 6），該構造線標示出造山帶擠壓應力環境的邊界，其東側為歐亞板塊與菲律賓海板塊聚合所造成的擠壓應力環境，地層多經過擠壓發育出逆衝斷層以及褶皺構造。臺灣西部的變形前緣大部分在陸上的山麓前緣，該構造線在新竹苗栗一帶向海域延伸^[20-23]，使得部分苗栗、新竹外海的離岸風場處於擠壓應力環境，透過地球物理資料，可在這些地方辨識出逆斷層構造與褶皺構造（圖 6c）。斷層為地層錯動後的破碎帶，斷層活動為地震的主因、也會造成地表變形，而褶皺被為地層受擠壓而彎曲變形、力學性質改變，常向上抬升改變地勢，抬升的褶皺經過侵蝕會使較老的地層出露，風場中構造活動性以及地層的力學性質須經過精密的地質資料來評估。

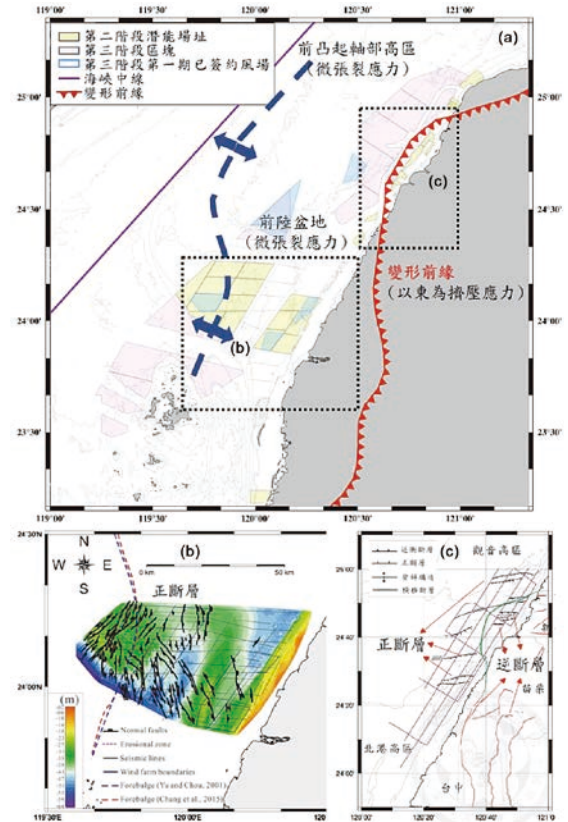


圖 6 (a) 台灣西部大地構造架構，紅色鋸齒線為變形前緣，劃分東側褶皺帶的擠壓應力環境與西側的前陸盆地微張裂應力環境；(b) 彰濱外海風場區域辨識出的正斷層特徵^[25]；(c) 新竹、苗栗外海風場區域辨識出的構造有變形前緣以西的正斷層與變形前緣以東的逆斷層與褶皺發育^[22]。

另一方面，變形前緣以西的地區大致上處於非擠壓應力環境，而是進到前陸盆地的討論範疇。臺灣造山帶重壓在歐亞大陸邊緣東側，因板塊撓曲而拱起的區域稱前凸起（forebulge）（圖 6），前凸起以東向造山帶下凹的空間便是前陸盆地主要的沉積空間^[10,12]，填充了來自造山帶的沉積物。前陸的應力環境，是板塊或淺部沉積層撓曲的輕微拉張環境，容易伴隨正斷層發育。透過風場場址中的構造分布研究^[24]（圖 6b），便能仔細繪製構造分布，若能搭配地層年代，更能討論這些斷層構造的活動性。一般來說，構造發育除了使地層受到破壞，產生地層、地表變形之外，斷層活動被視為天然地震的來源，但實際上在淺部發育的正斷層，年輕、鬆散的沉積層並沒有太高的強度與彈性在錯動時形成地震，因此臺灣海峽地震分布圖（圖 7）中幾乎不見近地表的淺層地震。

快速沉積物供應

臺灣海峽東邊鄰接活躍的臺灣造山帶，山脈抬升會使得地層不穩定，坡度改變加強河流的搬運力、侵蝕力，再加上地震、颱風及各種天氣條件引發山崩、

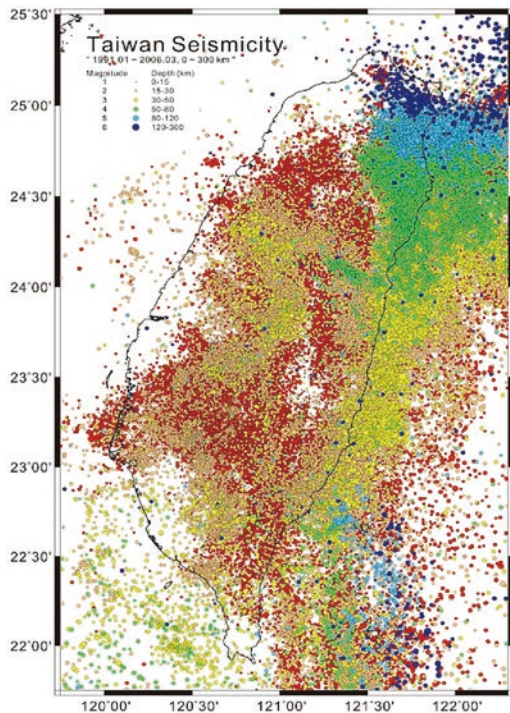


圖 7 台灣與鄰近地區的地震分布圖（地震資料來源為台灣地震科學中心）

土石流、加劇了臺灣的侵蝕作用。河流系統匯集水流、具有搬運力、為陸域最重要的沉積物運輸通道，能將山區的砂石帶往平原。在颱風、暴雨後水流量大、搬運力強的時候，短時間將大量沉積物沖入海域，特別是近年極端事件（extreme event）頻繁發生，例如濁水溪在敏督利颱風後排入 72 百萬噸的沉積物，短時間內造成部分地區兩米的地形變化（圖 8）^[15]，而莫拉克颱風沖入深海的濁流對海底電纜造成破壞^[3,4]等事件，未來離岸風場的海纜若需經過河口，將具有同樣的風險。

短時間大量的沉積物堆積於海床上，同樣可能使海域中充滿水的沉積物瞬間荷重而造成地層孔隙壓力過高（過壓，overpressure），而導致沉積物顆粒間失去有效應力，出現液化（liquefaction）、流體化（fluidization）等行為^[26]，迫使沉積物變形洩壓，出現如液化構造、排水構造（dewatering structure）等特徵^[26,27]（圖 9），此類型的沉積構造也稱為軟沉積物變形構造（soft-sediment deformation structure）。由於這類型的沉積構造多為下伏沉積物向上攪入上覆沉積物中，常破壞沉積層的結構、造成沉積物物性在水平方向上的不連續或不規則分布。觀察到這些地質特徵的形成，代表沉積物已經過液化、洩壓，可能讓沉積物重新排列後變的更緊密，但也可能反映出該段地層相對容易發生液化作用，未來值得進一步探討。鄰近臺灣西海岸的風場有部分靠近河

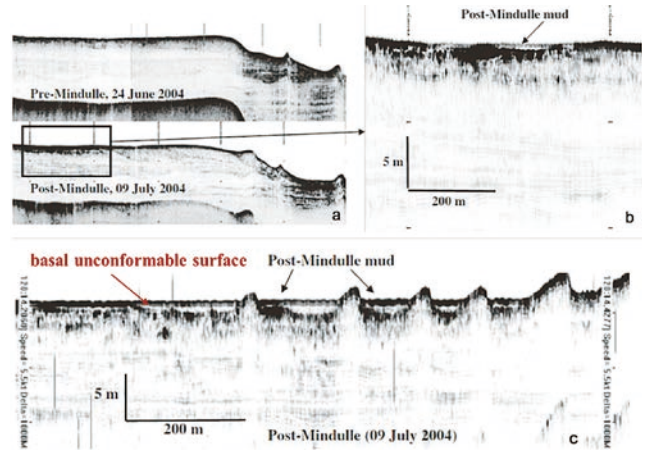
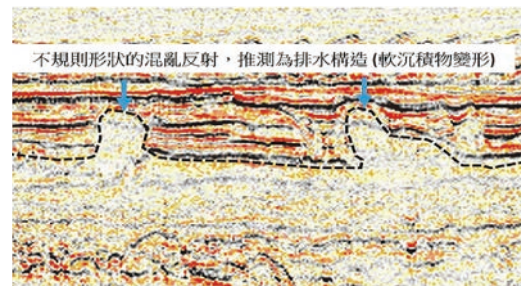


圖 8 敏督利颱風前後臺灣海峽沉積物及地形變化比較（修改自 Milliman *et al.* ^[15]）。由此底質剖面可觀察到颱風過後沉積物改變海峽原本的海底地形：(a) 為敏督利颱風前後同測線之淺部底質剖面資料；(b) 為放大 A 圖中敏督利颱風過後堆積的泥質沉積物；(c) 為敏督利颱風後大量沉積物堆積在颱風前的海床上。



Soft-sediment deformation structures		Driving force system	Trigger mechanism
D	Large-scale load-structures	Gravitationally unstable density gradient	Earthquake
E	Large-scale water escape structures	Vertical shear stress	Earthquake

圖 9 台灣海峽電火花震測剖面中觀察到向上突起的不規則形狀混亂反射特徵截斷上方水平連續反射地層（上圖），可能對比至下方表中的荷重構造（load structure）或排水構造（water-escape structure）^[28]。

口，當洪氾時沖入較大量的沉積物，地形便可能快速改變，也容易造成沉積物過壓或軟沉積物變形，過壓的沉積物同樣也可能在人為擾動時被觸發，例如風場施工時的敲擊或穿入，進而導致沉積物液化、洩壓、喪失強度，須謹慎評估。

動態海床地貌

除了上述的構造活動、沉積物注入會影響到海床的形貌之外，海床表面的沉積物受到海流不停的侵蝕、搬運、堆積，更容易形成極為動態的底形

(bedform) 變化。臺灣海峽的地形變化反映著海流流場的特性。大尺度來看，澎湖水道與烏坵凹陷的下凹地形是向北海流流場造成的侵蝕環境，而到雲林、彰化外海開始由於濁水溪供應的沉積物大量堆積，經過海流作用塑形成彰雲沙脊，彰雲沙脊具有南北向條帶狀沙體的特徵則反映南北向的潮流作用 [16,29-32]。

然而，較小尺度的觀察可見在彰雲沙脊頂部有大量沙波沉積構造發育 [29,33-36]，隨著臺灣海峽高流速的潮流，這些沙波變動性極高，常常在一天內就觀察到公尺級的變化量。研究這些沙波的動態需仰賴多次採集的高解析度地形資料。廖音瑄 [35] 針對濁水溪外海多次收集的高解析度水深資料進行沙波特徵與沙波移動的數值分析 (圖 10)，發現沙波的尺寸、波型、變化形式、移動速度與方向皆隨空間分布有所差異，70% 以上的沙波在兩年半內有超過 5 公尺的移動，最大移動量可達 95 公尺，最大高程變化達 6.7 公尺，這些都是風場工程無法忽視變動量，不論是基樁深度或是海纜路徑的規劃，需要謹慎評估；而針對單一沙波觀察，同一沙波可在兩個月後達到 10 公尺的移動量，但在兩

年半後總位移量公尺卻僅有 1 公尺，顯然臺灣海峽的流場複雜，沙波動態難以預測，各風場除了可能有各自沙波的形式與動態，頻率不足的地形觀測可能導致對沙波動態的誤判，唯有透過多次的高解析度地形觀測以及連續的流場資料進行分析、模擬才可能對於臺灣海峽的沙波動態有正確的掌握。

流體活動

海域地層中，沉積物間的孔隙本充滿水，然而地層的孔隙不僅會被水充填，自然界的各種化學、生物反應也會產生各種流體，例如火山氣體、熱液系統或石油天然氣系統等，臺灣西南海域的天然氣水合物賦集區域以及泥貫入體區域皆有出現大量的天然氣特徵 [37]，又或是臺灣東北外海沖繩海槽出現熱液及火山氣體的特徵，都是能產出流體的地質條件，世界各地相關研究也非常多。流體的活動是因密度差或壓力差造成，氣體、油密度低於水，在孔隙中遇到水自然會向淺處移棲；而聚集於緻密、低滲透性地層下方地層中的流體，由於不易向上滲漏，孔隙壓力逐漸累積，當地層開始過壓，壓力可能造成上覆地層被破壞，發生流體沿著破裂面或斷層向上移棲的現象，有時甚至形成深部流體向上移棲時固定的通道，如常見的氣煙囪、管狀特徵等。向上移棲的流體可能再次聚集於上方另一個緻密的地層下，也可能直接穿越海床進到海水層中。若這些流體、沉積物移動至海床，會在海床表面留下孔洞 (如麻坑) 或是沉積物堆 (如海底泥火山) 等地質特徵，甚至在水層中可觀察到氣泡柱或是被沖起的懸浮沉積物。

我們在臺灣海峽也有觀察到流體活動特徵，包括有淺層氣、垂直方向的流體通道、麻坑、氣柱等地質特徵 (圖 11)。臺灣海峽的流體可能的來自深部的盆地產出熱成熟油氣、火成活動 (如澎湖)、淺部的臺灣造山帶沉積物產出生物氣等等。聲學對於氣體的反應極為敏感，所以對於流體活動的掌握可以藉由大量的聲學資料來分析，例如透過震測剖面、海床底質剖面來了解地底流體的分布與移棲路徑，透過海床聲納調查以了解水層中是否出現流體滲漏，或是藉由精密的海床地形資料來判斷是否有流體洩漏的地形特徵 (圖 11)。曾湧翔 [38] 將濁水溪口震測剖面中觀察到的地層中流體特徵進行分類、解釋，其中有垂直向的流體通道、淺層的游離氣體富集帶等，藉由這些分析來了解淺部地層中的流體來源、移棲管道以及流體富集地層分布。對於風場工程來說，淺層氣雖然不會累積太大的壓力，不會導

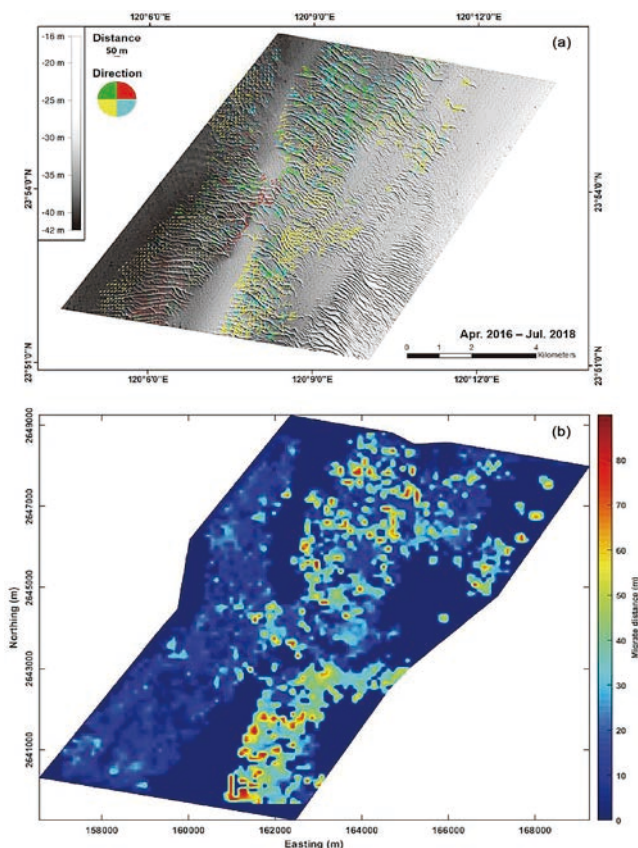


圖 10 三維海床地形數值分析結果 [34]：(a) 沙波三維移動圖，向量之長度可顯示其兩年半間之移動距離，而顏色則顯示其移動方向之差別；(b) 2016 年 4 月至 2018 年 7 月彰化外海沙波移動距離數值分析結果。

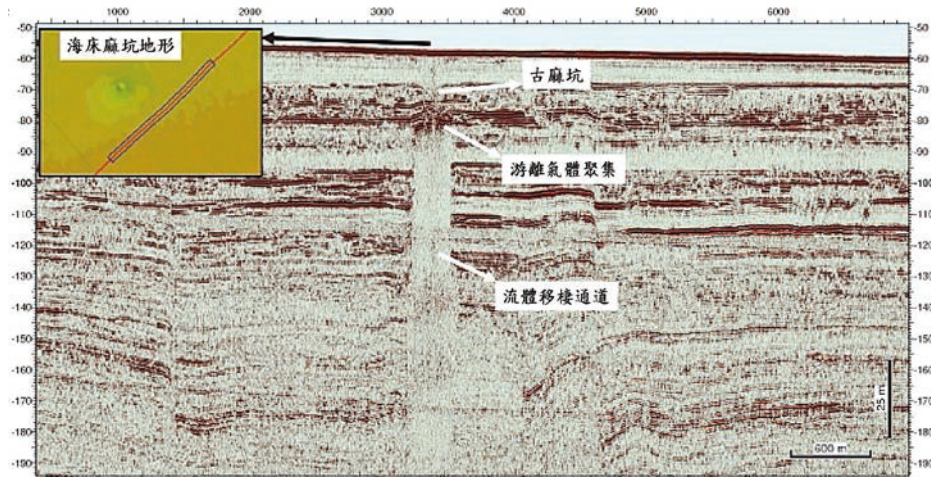


圖 11 台灣海峽電火花震測剖面中的流體特徵。左上角地形圖顯示該測線旁邊的海床上有麻坑特徵。

致如油氣田噴井的災難性危害，但富含流體的沉積層恐在人為觸發後洩壓而失去支撐力；而流體移棲管道大多是沿著地層中的裂隙發展，也可能持續有流體在這些通道間移棲，造成地層的擾動。而有流體活動特徵的地層是否可能指示其更深處的地層中有流體富集地層？短時間的大量沉積物堆疊是否可能再觸發這些流體活動？這些疑問應在風場規劃前詳細調查。

堅硬地層

臺灣海峽風場大多分布於前陸盆地的範圍，淺層多為年輕沉積物。然而，在風場範圍西側接近前陸盆地前凸起的區域，因前陸撓區而導致老的沉積岩基盤較淺。臺灣海峽南部的澎湖群島多為玄武岩質的火山島，因澎湖群島及鄰近區域位於前陸盆地前凸起的位置，並沒有在前陸盆地形成之後被深埋，在接近澎湖一帶的海床底下百公尺內，即發現有玄武岩體分布^[39]。這些海床下的玄武岩與澎湖玄武岩是同一火成事件形成，在前陸盆地形成之前便存在，在臺灣海峽中可能有廣大的分布範圍（未發表資料）。這些在海床下淺部地層出現的玄武岩體雖然不會造成地質災害，但火成岩堅硬的質地可能會造成離岸風電工程作業上的困擾，在風場場址調查中需要能明確掌握其分布，但也因為玄武岩與周圍的沉積岩物理性質差異較大，透過震測資料便能將其三維空間分布辨識出來（圖 12）^[40]。

離岸風電地質與環境感知系統服務平台

針對我國離岸風電發展所需的地質資訊，經濟部地質調查與礦業管理中心（原中央地質調查所，以下簡稱地礦中心）推動大型計畫，成立研究團隊在臺灣海峽離岸風場規劃區進行跨風場的全區域基礎地質調

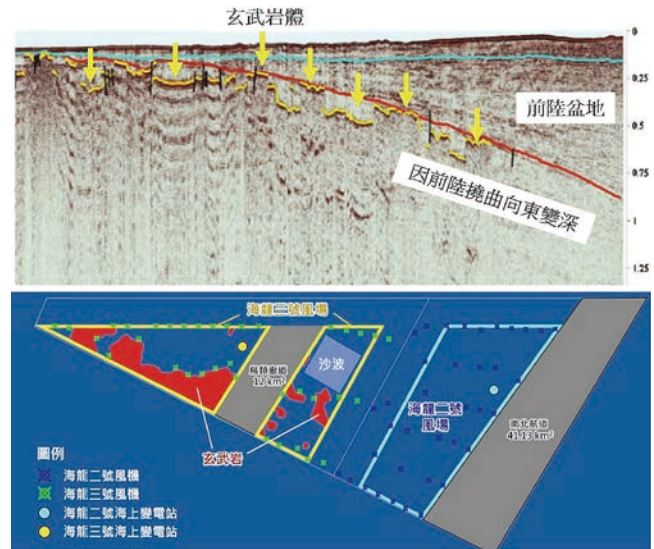


圖 12 澎湖北部的震測剖面以及風場範圍出現玄武岩分布。上圖顯示震測剖面中可辨識出的玄武岩分布，因前陸撓曲而向東有越來越深的趨勢。下圖顯示海龍風場中海床下 100 公尺以內遇到的玄武岩分布圖（節錄自環境資訊中心新聞稿 <https://e-info.org.tw/node/233912>）。

查，也同時建置「離岸風電地質與環境感知系統服務平台」（<https://windpower.geologycloud.tw/map>），整合各種尺度的地質及環境資料，並上網供各界查詢，除了有助於社會大眾了解臺灣海峽的風場地質知識，還可供廠商獲得政府公開的地質資訊，幫助風場規劃、提高開發效率與投資意願。

離岸風電地質與環境感知服務平台納入的地質資料包含沉積物岩心採樣資料、電火花震測資料、底拖聲納資料、多頻道反射震測資料，以及海床攝影等調查資料，除能了解資料分布之外，已公開的資料及分析成果可以直接在線上平台以 2 維或 3 維的方式展示（圖 13、圖 14）。做為地質資訊整合平台，系統中納

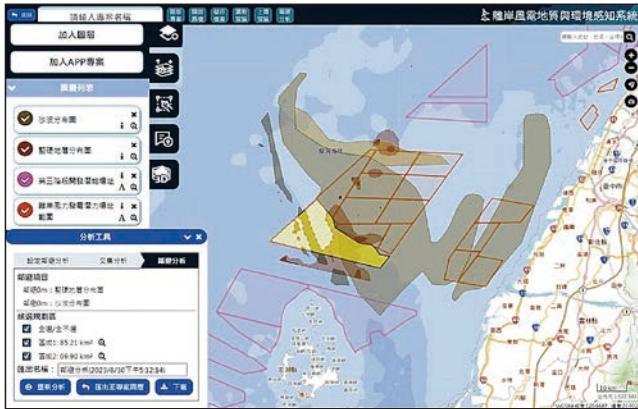


圖 13 地質與環境感知服務平台之 2 維資料展示，可快數將所需資訊套疊整合展示。圖中為風場區域疊上沙波分布與堅硬岩體分布後地展示。

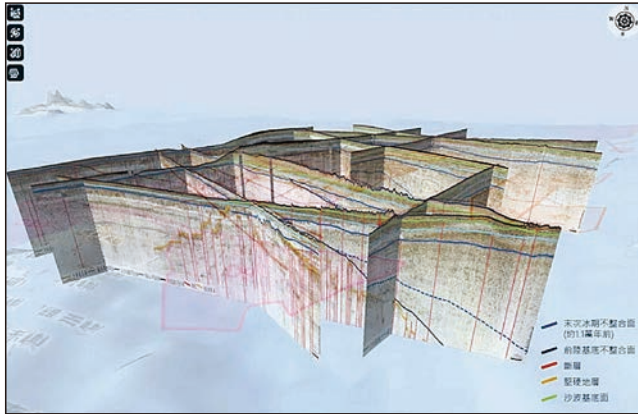


圖 14 地質與環境感知服務平台之 3 維資料展示，以最直觀的方式呈現地質架構，並可展示各類型地質特徵在地下的分布情況。

入許多相關資訊圖層，可套疊展示出各項資訊相對的地理關係，圖層資訊包含管制區（如領海、演習區、縣市管轄範圍等）、經濟活動（如風場區塊、風場開發進度、海底電纜及管線分布、航道等）、環境保育（如保護區、重要棲地、魚礁區、汙染管制區、活動斷層、地質敏感區等）、地質調查資料（如地質與地球物理資料分布、海床影像、沙波、堅硬地層、水深等分析成果分布）、地質影響潛勢圖層則包括了地礦中心評估的沙波、堅硬地層、流體、斷層等地質特徵對於離岸風場的災害潛勢分布情況。使用者能藉此快速掌握各項公開資料與特定風場的地理位置關係、資料情況、地質特徵分布等，更能直觀的了解不同風場的地質特性與災害潛勢，操作時能將圖資直接下載使用，做為調查、研究、分析、規劃之參考，若想更進一步研究原始資料，也能向地礦中心提出申請（詳細辦法見「經濟部中央地質調查所離岸風電地質與環境感知系統服務平臺資料提供及使用作業要點」）^[41]。

結論與展望

了解地質環境條件是發展離岸工程的基礎，本文從區域地質的角度切入，根據地質、地球物理資料的分析結果，提出臺灣海峽風場區域的地質作用以及潛在的災害風險。在離岸風場規劃區域主要可能發生的地質災害因子有正、逆斷層等構造發育，有快速沉積物供應能在短時間改變地形與造成液化活動，有強烈的海洋流場能造成動態的海床地貌變化，有地層中的流體活動會影響沉積層穩定性，另外還有可能影響工程規劃的淺部堅硬地層。每一項地質災害風險都有更多細節必須討論，本文僅統整過去觀測、分析結果，對臺灣海峽在風場場址可能潛在的地質災害進行簡要說明，盼有助於各界對臺灣海峽的地質作用有基本的認識。

如同文中提及，各別風場的關鍵地質問題須仰賴更多的觀察資料與更詳細的分析工作，研究結果能使我們對臺灣海峽的地質作用有更多的掌握，對地質風險有更進一步的潛勢評估。然而，各開發商擁有豐富的高解析度的地球物理資料以及工程地質資料、擁有各自的工程顧問，但這些資料大部分仍屬於商業機密，研究成果也未能公諸於世。為此，經濟部地礦中心或能扮演資訊統整的角色，除了做為政府提供地質資訊的窗口，也鼓勵各界與政府共享資料，明訂各界向政府申請原始資料的同時應提出回饋地礦中心的資料或成果，目標是能藉由更多的資料使臺灣海峽的地質資訊更加完善。正如同油氣探勘工業，離岸風電產業的發展勢必對於地質學的進展有所貢獻，開發商不妨在風場建置的同時，將資料提供給政府單位或學界來更進一步研究，或許能共同提升地質知識，也獲的未來風場運維時可參考的資訊。

參考資料

1. 4C Offshore (2014). "Global 23-Year Average Wind Speed Observation" report.
2. Goto, T. and Shibata, H. (2015). Changes in abundance and composition of anthropogenic marine debris on the continental slope off the Pacific coast of northern Japan, after the March 2011 Tohoku earthquake. *Marine pollution bulletin*, 95(1), 234-241.
3. Hsu, S.-K., J. Kuo, C.-L. Lo, C.-H. Tsai, W.-B. Doo, C.-Y. Ku, and J.-C. Sibuet, (2008). Turbidity currents, subma-rine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **19**, 767-772, doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.767(PT).
4. Su, C.C., Tseng, J.Y., Hsu, H.H., Chiang, C.S., Yu, H.S., Lin, S., and Liu, J.T. (2012). Records of submarine natural hazards off SW Taiwan. *Geological Society, London, Special Publications*, **361**(1), 41-60.
5. Kopp, H., Latino Chiocci, F., Berndt, C., Namik Ça atay, M., Ferreira,

- T., Juana Fortes, C., Grácia, E., González Vega, A., Kopf, A., Sørensen, M.B. and Sultan, N. (2021). Marine geohazards: Safeguarding society and the Blue Economy from a hidden threat.
6. Camargo, J.M., Silva, M.V., Ferreira Júnior, A.V., and Araújo, T.C. (2019). Marine geohazards: A bibliometric-based review. *Geosciences*, **9**(2), 100.
 7. Teng, L., S., Wang, Y., Tang, C. H., Huang, C. Y., Huang, T. C., and Ke, A. (1991). Tectonic aspects of the Paleogene depositional basin of northern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, **34**(4), 313-336.
 8. Lin, A.T., Watts, A.B., and Hesselbo, S.P. (2003). Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Research*, **15**(4), 453-478.
 9. Covey, M. (1986). The Evolution of Foreland Basins to Steady State. Evidence from the Western Taiwan Foreland Basin, Foreland Basins, 77-90.
 10. Chou, Y.W. and Yu, H.S. (2002). Structural expressions of flexural extension in the arc-continent collisional foredeep of western Taiwan. *Geological Society of America Special Papers*, **358**, 1-12.
 11. Lin, A. and Watts, A. (2002). Origin of the West Taiwan basin by orogenic loading and flexure of a rifted continental margin. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, **107**, B9, ETG 2-1-ETG 2-19.
 12. Chang, J.H., Yu, H.S., Hsu, H.H., and Liu, C.S. (2012). Forebulge migration in late Cenozoic Western Taiwan foreland basin. *Tectonophysics*, **578**, 117-125.
 13. Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.-L., Willett, S. D., Hu, J.-C., Horng, M.-J., Chen, M.-C., and Stark, C.P. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, **426**(6967), 648-651.
 14. Huh, C.-A., H.-L. Lin, S. Lin, and Y.-W. Huang, (2009). Modern accumulation rates and a budget of sediment off the Gaoping (Kaoping) River, SW Taiwan: A tidal and flood dominated depositional environment around a submarine canyon. *J. Mar. Syst.*, **76**, 405-416, doi: 10.1016/j.jmarsys.2007.07.009.
 15. Milliman, J.D., Lin, S.W., Kao, S.J., Liu, J.P., Liu, C.S., Chiu, J.K., and Lin, Y.C. (2007). Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge. *Typhoon Mindulle, Taiwan, July 2004. Geology*, **35**(9), 779-782.
 16. Liu, J.P., Liu, C.S., Xu, K.H., Milliman, J.D., Chiu, J.K., Kao, S.J., and Lin, S.W. (2008). Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait. *Marine Geology*, **256**(1-4), 65-76.
 17. Jan, S., Wang, J., Chern, C.S., and Chao, S.Y. (2002). Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Systems*, **35**(3-4), 249-268.
 18. Wang, Y.H., Jan, S., and Wang, D.P., (2003). Transport through Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999-2001). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**, 195-201.
 19. Chang, J.H., Hsu, H.H., Su, C.C., Liu, C.S., Hung, H.T., and Chiu, S.D. (2015). Tectono-sedimentary control on modern sand deposition on the forebulge of the Western Taiwan Foreland Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **66**, 970-977.
 20. Huang, S.T., Chen, R.C., and Chi, W.R. (1993). Inversion tectonics and evolution of the northern Taisi Basin, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, **28**, 15-46.
 21. Yang, K.M., Huang, S.T., Wu, J.C., Ting, H.H., and Mei, W.W. (2006). Review and new insights on foreland tectonics in western Taiwan. *International Geology Review*, **48**(10), 910-941.
 22. 沈玟劭 (2008)，新竹外海構造研究，國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文，共 46 頁。
 23. 吳宜欣 (2017)，臺灣新竹外海淺層構造初探，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共 83 頁。
 24. 謝欣崧、許鶴瀚、楊懿丞、盧翊維、陳姿婷、張日新、林哲銓、邱協棟、劉家瑄 (2018)，海洋地質及球物理調查於離岸風電場址評估之應用，海洋及水下科技季刊，第 42-47 頁。
 25. 台灣世曦工程顧問股份有限公司 (2017)，離岸風場區塊開發海域環境建構計畫 (1/4)，經濟部能源科技研究發展計畫 106 年度執行報告。
 26. Owen, G., (1987). Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones, M.E., Preston, R.M.F. (Eds.), Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks. *Geological Society Spec. Publ.*, **29**, 11-24.
 27. Lowe, D.R. (1975). Water escape structures in coarse grained sediments. *Sedimentology*, **22**(2), 157-204.
 28. Moretti, M., and Sabato, L. (2007). Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology*, **196**(1-4), 31-45.
 29. 廖宏儒 (2006)，彰雲潮流沙脊之形貌、沈積作用及演化模式，國立臺灣大學理學院海洋研究所學位論文，共 107 頁。
 30. Liao, H.R., Yu, H.S., and Su, C.C. (2008). Morphology and sedimentation of sand bodies in the tidal shelf sea of eastern Taiwan Strait. *Marine Geology*, **248**(3), 161-178.
 31. 邱瑞焜 (2009)，以海床回聲特徵探討台灣海峽及台灣西南海域之淺層沉積作用，國立臺灣大學理學院海洋研究所博士論文，共 136 頁。
 32. 邱瑞焜 (2000)，烏坵嶼附近海域的 3.5 千赫回聲型態及沈積作用，國立臺灣大學理學院海洋研究所碩士論文，共 61 頁。
 33. Boggs Jr, S. (1974). Sand-wave fields in Taiwan Strait. *Geology*, **2**(5), 251-253.
 34. Liao, H.R. and Yu, H.S. (2005). Morphology, hydrodynamics and sediment characteristics of the Changyun sand ridge offshore western Taiwan. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **16**(3), 621.
 35. 廖音瑄 (2020)，中臺灣海峽近岸區沙波的遷移及演化，國立臺灣大學理學院海洋研究所，碩士論文，共 138 頁。
 36. 楊懿丞、許鶴瀚、吳俊鼎、溫修敏、陳姿婷、連政佳、洪瑋廷、劉家瑄 (2020)，地形與震測地層剖面分析於離岸風電場址調查之應用，臺灣能源期刊，第七卷，第三期，第 253-268 頁。
 37. Lin, L.-F., Liu, C.-S., Berndt, C., Hsu, H.-H., Wang, Y., and Chen, S.-C. (2022). Gas hydrate and fluid-related seismic indicators across the passive and active margins off SW Taiwan. *World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins*. Springer.
 38. 曾湧翔 (2021)，彰濱外海高解析度震測地層及流體特徵分析，國立臺灣大學理學院海洋研究所，碩士論文，共 106 頁。
 39. 張頌平、林亮甫、Arif Mirza、劉家瑄、謝獻祥、許鶴瀚 (2021)，臺灣海峽玄武岩之震測特性初探。2021 地質地物年會暨學術研討會，臺北，11 月 22 ~ 24 日。
 40. 張頌平、許鶴瀚、張日新、劉家瑄、陳姿婷 (2023)，海域反射震測影像於鑽探場址調查之應用，土木水利期刊，第五十卷，第二期，第 42-44 頁。
 41. 經濟部中央地質調查所離岸風電地質與環境感知系統服務平臺資料提供及使用作業要點。



離岸風場 海床土壤地質 調查技術 引進與發展

黃宗宸* / 環球測繪股份有限公司 總經理

我國推動綠能政策以來，離岸風力發電成為了政策堆動中相當重要的一環，與離岸風場建置相關的供應鏈也在本土如雨後春筍般的萌芽。在離岸風場計畫展開前，除了須評估風場開發效益之外，確保風機能夠長久穩定立於海床的重要關鍵，在於對場址海床底下地層狀況的掌握，以及地質材料特性與參數的精確取得，由此可見離岸場址海床土壤地質調查的重要。本文以海事工程發展的角度切入，從需求面與管理面來和大家談談，海床土壤地質調查技術的引進與發展。

關鍵詞：海床土壤地質調查技術、離岸風場、探勘船

ABSTRACT

Since Taiwan began to bolster green energy policies, offshore wind power has become a crucial part of the policy, and supply chains related to the offshore wind farms construction and development have also grown and prospered locally. Before any offshore wind farm project is launched, in addition to assessing the benefits of wind farm development, ensuring the long-term stability of wind turbines on the seabed is the key. This has everything to do with the understanding of the geological conditions beneath the site's seabed, as well as the precise acquisition of geological material characteristics and parameters, which highlights the importance of seabed soil geological survey at offshore sites. This article begins from the perspective of maritime engineering development and talks about the introduction and development of seabed geotechnical Investigation technology from the aspects on both the demand and management.

Keywords: Seabed geotechnical investigation technology, Offshore windfarms, Exploration vessel

前言

離岸風場海床土壤地質調查技術的引進，其實是一個供需的問題，早期海事工程大多侷限在近岸，隨著國家海洋政策的調整，以及離岸風場開發的需求，使得許多海事工程技術與設備相繼的引進國內，也開啟了台灣

海洋工程新的篇章。本文從土壤地質調查的視角，由各個階段遇到海事工程發展的需求，就本身於相關設備與技術的引進以及未來發展，進行經驗分享。

緣起

我國四面環海，自古以來，不論在氣候、生活型態、文明發展、對外交通聯繫、漁業、對外通訊、海洋資源探索與開發等，都與海洋息息相關。早期國內在海事工程發展上，主要著重於近岸區域的開發，包含碼頭與海堤等港灣建設、通訊與輸電網路佈設、電廠冷卻管路設置、過港隧道等，當時由於開發區域水深較淺（多在 20 m 水深以內），就水域地質調查需求而言，所採用之載台與機具設備，以適用於水淺處施工為主，地質鑽探之載台，係以搭架（淺水處）（圖 1）、浮台（風浪影響較小處）（圖 2），或油壓自昇式固定平台（深水處）（圖 3）為主^[1-5]。

自離岸風電計畫開始推動後，在起初最早的兩個示範風場，由於場址水深約在 30 m 內，因此油壓平台尚可勉強執行地質調查工作，但後來隨著風場場址水深愈來愈深，許多調查位置水深已超出油壓自昇式固定平台能夠作業的限制（35 m），因此在進行地質調

* 通訊作者，Jasontchuang@pdc-offshore.com



圖 1 鑽探搭架



圖 2 鑽探浮台與小型鑽機



(a) 小型工作平台



(b) 中型工作平台

圖 3 油壓自昇式固定平台

查時，必須尋求更合適之載台。當時，由於國內尚無合適此水域進行地質調查之載台，若要執行地質調查工作，則必須委託國外的探勘船。為了讓本土也具備足夠的深水域地質調查量能，環球測繪股份有限公司（以下簡稱 PDE）於 2016 年自挪威購買了備有 DP2 動態定位系統之地質調查探勘船－大地能源號（MV Geo Energy）（圖 4），成為第一艘本國籍探勘船，自此為本土深海域地質調查技術與發展開啟新的篇章。



圖 4 探勘船－大地能源號

探勘船引進初期

大地能源號 2004 年建造於挪威，於 2015 年在新加坡完成月池（moon pool）（圖 5）改裝並裝配最新式的鑽探設備（圖 6），於 2016 年通過 DNV 與 CR 認證後變更為中華民國籍。

於現場離岸場址地質調查作業如火如荼展開之際，在本土化所遭遇到的第一個問題也悄悄地浮現：國內尚未有相應之供應鏈以及具備相關經驗的人才。

由於探勘船本身來自歐洲，所有的系統與機電設備皆為歐規，有相當多的零件在國內甚至亞洲都不太



圖 5 月池改裝

容易找到，得從歐洲採購，特別是許多關鍵備品下訂後的交期常長達 3 到 6 個月。而船載之鑽探設備，與國內常見之油壓鑽探設備（圖 7）有所不同^[4-6]，因此不論是設備零組件與耗材，於國內皆難以取得。由於當時本土尚未建立相關之供應鏈，相關技術人員的缺乏，加上所委外之船舶管理公司毫無探勘船管理經驗，使得剛起步時並不如預期的順利，調查作業也受限於原物料的供應、設備維修保養時程、自國外訂購零件的交貨期程，以及具備經驗的技術人員招募不易等因素，導致工作效率不彰，使得業主對本土場址調查量能產生疑慮，因此當時在離案場址地質調查的工作，開發商仍傾向於委託給國外廠商。

成長期

經過了剛開始幾年的辛苦經營後，除了在現場調查作業的經驗累積，也透過零配件倉儲的設置，以及本土供應鏈的建立，逐一解決了維修料配件與原物料供應的問題。

另外在現場作業管理、船舶與人員管理、以及合約管理上，也逐步有了經驗的累積，找出先前管理失當的各種原因後，經過大幅度的調整後，公司內成立了船舶管理部門、工務管理部門、環安衛（HSE）管理部門、人資管理部門、法務及合約管理部門，公司的營運管理自此上了軌道。

這些年來，由於整個團隊的通力合作，大幅的提高了現場調查作業之效率與品質，並在環安衛管理上屢屢獲得業主的肯定，自此在離岸地質調查領域站穩了腳步，也奠定了本土離岸地質調查的品牌形象，更終結了外來和尚比較會唸經的都市傳說。

離岸試驗室的成立

國內大地工程（土壤與岩石）試驗室，由於國內案件委託之試驗數量通常不大，加上國內試驗室也顯少接到國外的試驗委託，在需求有限的環境下，規模大多較國外試驗室小很多，特別是土壤動力學試驗設備更加稀少，僅在幾個比較具代表性的國家級試驗室，以及大專



圖 6 大地能源號搭載之塔架式鑽機設備



圖 7 鑽探平台搭載之油壓鑽機與 CPT 設備

院校裡供學術研究之試驗室才會備有，且頂多一兩部，加上土壤動力試驗之費用通常較高，因此在工程設計規劃時，若無特殊需求，通常很少會選擇進行土壤動力試驗，大多直接拿 SPT-N 經驗公式推估之結果來進行分析與設計。此外，由於土壤動力試驗之需求較少，國內擁有土壤動力試驗設備通常都未取得 TAF 認證。

由於離岸風機基礎在設計時，國外顧問公司通常會需要足夠的土壤動力參數^[7]，因此在大量土樣需進行土壤動力試驗的需求下，國內完全找不到能夠符合量能需求且具 TAF（或 DNV-GL）認證之大地工程試驗室，導致大多數的土壤樣品出現不得不送到國外進行試驗的窘境。

為配合國家本土化之政策，希望能夠將土壤試驗全部留在台灣執行，也希望能夠培養更多本土的土壤動力試驗人才，因此 PDE 與中興工程顧問社（以下簡稱中興社）決定攜手合作成立大型離岸大地工程試驗室^[8]。

中興社是國內最具規模的財團法人工程研究機構，長久以來肩負著國家發展的重責大任，也培養出許多國內優秀的試驗與研究人才，PDE 透過與中興社合作，自英國 GDS 公司採購了大量最新的自動化試驗設備，並全數通過 TAF 認證（圖 8），在土壤動力試驗的部分包含了：應力控制與應變控制之土壤動力三軸試驗儀、土壤反覆直剪試驗儀、土壤環剪試驗儀、共

振柱試驗儀、撓曲元素試驗套件等；而在土壤靜力試驗的部分則包含了：自動壓密試驗儀、定應變自動壓密試驗儀、土壤自動三軸試驗儀等。試驗室於 2021 年底開始營運，由於試驗機台數量較為龐大，試驗室隨即成為亞太地區量能前三大的離岸大地工程試驗室，為我國推動離岸風電本土化在大地工程試驗的部分奠定了穩固的根基。

地質調查供應鏈的整合與建立

PDE 在草創之初，除了致力於發展自己本身所專精的地質鑽探領域，更透過異業結盟的方式整合場址調查相關的夥伴，透過一條龍的方式提供給業主最專業的服務，整個團隊的組成，除了地質鑽探之外，尚包含環境監測、海洋與陸地測量及地球物理調查、大地工程試驗、專業大地工程顧問、物流倉儲、機電後勤維護、土樣保存等，大幅度的降低異業整合介面問題，獲得業主與其所委託之工程顧問公司的讚賞。

另外透過產學合作的方式，與臺灣大學、成功大學、臺灣海洋大學、陽明交通大學、中興大學、中山大學、臺灣科技大學等國內一流學府持續的進行交流，透過講座的方式和同學們分享，使離岸場址調查相關的技術能夠與學校所習得知識結合，引發同學們的興趣，藉以培養更多本土優秀人才。



圖 8 中興社離岸大地工程試驗室

環境挑戰與發展

臺灣是亞太地區發展離岸風電的領頭羊，目前也已進入第三期風場的場址調查階段，接下來準備要面對的是水深大於 50 m 較深海域之離岸風場開發，因此近年來國內也有許多的學者紛紛投入浮式風機與其錨定方法研究，希望能夠克服在深水域開發離岸風場所可能遭遇的各種困難。而浮式風機之設計主要係透過錨定的方式，將載有風機之浮台、浮筒或浮動框架固定於風場內（圖 9），依據各開發商不同之需求與設計，通常每支風機會設置 3 至 12 個錨定點，而每個錨定點皆需透過探勘與現地試驗調查取得固定端相關之設計參數。



圖 9 浮式風機（圖片來源：經濟部產業技術司 [9]）

雖然每個錨定點調查所需之貫入深度（約 30 m ~ 50 m）都不如淺水域之風場來得那麼深（通常 > 80 m），但由於每個風機需要調查的點數非常多，如果採

用目前的 Downhole 系統之鑽探設備進行可能會需要相當久的時間才能夠完成一個風機位置的調查工作。

為了解決這個問題，以及因應未來浮式風機場址調查量能之需求，PDE 再度投入大量資金，自挪威購得具備油電複合動力之探勘船—大地能量號（Geo Power）（圖 10），該船本身除了俱備比大地能源號面積更大的後甲板以及更多的船席外，最主要的差異在於其同時具備執行 Downhole CPT 與取樣之鑽探井架系統，以及一套能夠直接從海床連續貫入達 50 m 深之 Seabed CPT 系統（圖 11）。



圖 10 大地能量號

大地能量號目前規劃於 2024 年初完成船體改裝、鑽機系統設備安裝與測試，預計於 2024 年第二季初完成船檢並變更為中華民國籍後回到台灣，成為我國第一艘同時具備 Downhole CPT 與 Seabed CPT 雙系統之多功能探勘船。期待在未來與大地能源號相互搭配下，除能夠提高本土深海域海床地質調查之量能外，更能大幅提升我國離岸場址之地質調查技術。

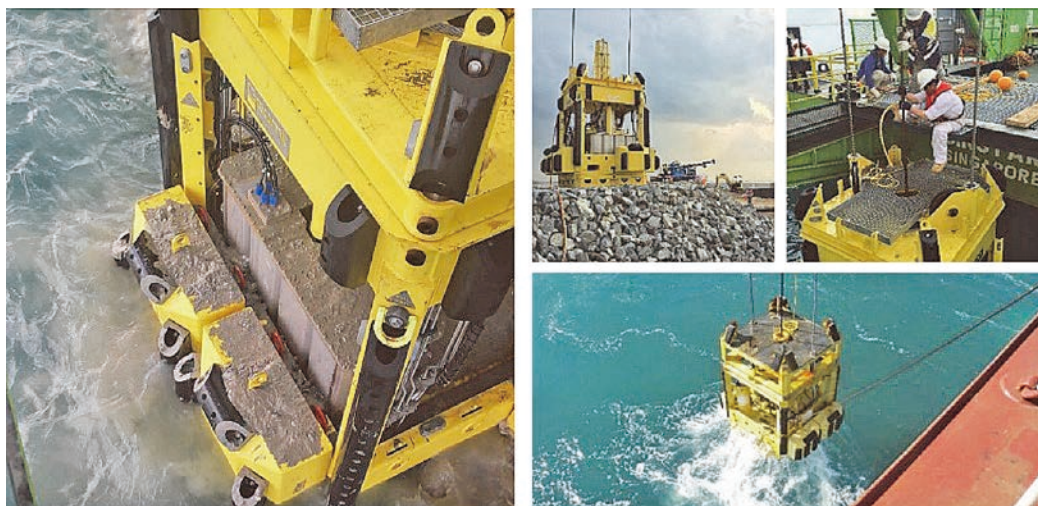


圖 11 大地能量號搭載之 Seabed CPT 系統（圖片來源：Geomil 公司設備 DM）^[10]

未來展望

由於我國離岸風電產業發展較鄰近國家早，目前有許多前期的風場已經完成場址調查與設計，正如火如荼地展開風機的建置工作，就整個產業鏈來說，未來海洋地質調查的需求應當會慢慢地萎縮，取而代之的會是需求越來越大的運維產業，照理來說在這個當下投資探勘船似乎好像與市場反其道而行，因此有許多的同業對於這個產業其實會有比較保守的看法。

對於 PDE 而言，由於長久以來專精在這塊領域，我們的看法可能與其他同業比較不太一樣，我們反而認為這是一個轉機，也是屬於我們臺灣離岸場址調查產業跨足國際的一個難得的機會。

由於我國在離岸海床地質調查的領域比鄰近國家投入要早，因此透過國內離岸風場執行調查的機會，讓我們能夠引進以往沒有的技術，也藉此機會累積許多寶貴的經驗、並且逐一的在國內與國際上建立起相關的供應鏈，特別值得一提的是本土離岸大地工程試驗式的設立，這讓位居東南亞與東北亞要衝的臺灣，有機會在未來，於土壤力學試驗的領域，具備超前其他國家試驗水準的機會，另外在本土離岸地質調查、大地工程以及特殊工作船舶人才的培養上，也能夠具備相當多的優勢。

另外，透過這些年執行離岸風場場址調查工作的機會，使臺灣隊能夠成功地打入國際離岸風場開發商之供應鏈，因此如果換個角度來看，現在正是我國離岸調查產業的最佳練兵的大好時機，雖然在接下來的未來，國內離岸場址調查的工作可能會越來越少，但因為有了這個時期的練兵，也讓國際的開發商與鄰近的國家，看到了我們國家隊先進的設備，以及堅強的調查能力與技術，因而造就了未來我們能夠有機會將台灣經驗帶到亞太地區其他的國家繼續發光發熱的機會。

結語

自我國開始推動離岸風電計畫開始，PDE 便積極地投入參與風場場址海床地質調查工作，從最早於示範風場時期，由於水深相對較淺，尚可透過油壓自昇式固定平台作為鑽探地查之載台，當時主要採用三腳架式油壓鑽機搭配固定於平台上之 CPT 進行調查；後來當風場場址水深不斷地加深，因此引進了我國第一艘 DP2 探勘船－大地能源號，透過塔架式鑽機搭配 Downhole 系統之 CPT 貫入儀與取樣器進行地質調查；

由於未來深水域風場浮式風機之調查需求，引進我國第一艘同時具備 Downhole CPT 與深孔 Seabed CPT 雙系統之油電混和動力 DP2 探勘船－大地能量號。

一路走來，其實 PDE 在調查技術引進與發展上，一直秉持著從需求與困境中來尋找方向，常言道：「危機就是轉機」，或許未來隨著風場的開發期程，海床地質鑽探調查的工作將會越來越少，不過這也是我們往國際市場佈局與發展的契機。

雖然一開始離岸的調查技術對於本土來說較不熟悉，但我們始終相信：「當用心投入某一件事情時，有天終將成為專家」。也是這種臺灣人堅韌不服輸的學習精神，讓我們得以在這個領域裡站穩腳步，找到許多志同道合的夥伴，共同整合場址調查上下游之供應鏈，並透過產學合作培養更多優秀的本土人才，組成陣容堅強的離岸地質調查臺灣隊。

所以，我在這個當下要做的結論是：未來地質調查的市場並沒有萎縮，而是擴大到了周邊鄰近的國家，在這業界的所有夥伴們，讓我們一起努力，把這些年我們一同在國內深耕的離岸風電臺灣經驗帶到海外，一起打進世界盃，讓我們所一同努力的這個產業成為新臺灣之光。

參考文獻

- 黃宗宸 (2015)，「海上地質鑽探機具」，地工技術，第 150 期，第 85-94 頁。
- 黃宗宸 (2019)，「離岸風力發電場址開發前期調查作業實務」，大地技師，第 18 期，第 22-33 頁。
- 黃宗宸 (2019)，「離岸風場工址調查概述」，地工技術，第 159 期，第 101-110 頁。
- 黃宗宸、黃新志 (2018)，「海洋地質調查技術」，台灣風能協會會員大會暨學術研討會，2018 年 12 月 7 日，國立成功大學，台南，台灣。
- 廖學瑞、張欽森、丁金彪、張上君、林淑寬 (2012)，「台灣西部海域海床地質調查技術初探」，中華技術，第 95 期，第 22-35 頁。
- 黃宗宸 (2015)，「海洋地質調查技術」，台灣風能協會會員大會暨學術研討會，2016 年 12 月 1 日，國立臺灣海洋大學，基隆，台灣。
- 郭玉樹、曾姿郡、Woerden (2014)，「海域大地調查於離岸風場規劃、設計與建置其間之角色」，地工技術，第 142 期，第 51-58 頁。
- 黃宗宸、盧泰維、高憲彰、林金成 (2022)，「離岸風電場址調查常見之大地工程試驗」，第十九屆大地工程學術研討會暨科技部成果發表會，2022 年 8 月 31 日～9 月 2 日，淡水，新北，台灣。
- 林晏平 (2019)，「全球浮體式離岸風電發展之推力與阻力分析」，網址：https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=215，經濟部產業技術司－產業技術評析，2019 年 1 月 9 日。
- Geomil Equipment，網站：<https://www.geomil.com>。



離岸風場 大地工程調查與詮釋實務簡介

劉浙仁*／財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 正研究員

冀樹勇／財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 主任

譚志豪／財團法人中興工程顧問社大地工程研究中心 資深研究員

目前國內已有 2 座離岸風場正式商轉，先後為海洋風場及台電離岸一期風場，商轉之總裝置容量為 237.2 MW，此外另有 7 座離岸風場業已完工，正處於試運轉測試階段，迄 2023 年 8 月已建置離岸風場之總裝置容量達 1,569 MW，且隨著第三階段區塊開發的展開，國內離岸風場正在穩健發展中，並創造許多離岸風場開發的工作機會，而國內廠商和工程顧問公司也正積極參與，站在國內經濟發展角度，自然希望提高本土廠商參與比例，並朝向自主開發的目標邁進。

離岸工程對於國內而言較為陌生，自離岸風場開發後，國內才陸續投入相關施工和製造能力，以及設計和評估之人才培育，因此本文針對離岸風機之大地工程調查與詮釋工作，由大地工程角度切入，介紹場址調查與大地工程詮釋的方法，並分享一些實務經驗。大地工程詮釋的目的在於將場址調查結果轉化為土壤的設計參數與條件，作為大地工程及結構設計的輸入，為風場開發中相當重要的環節。

ABSTRACT

At present, two domestic offshore wind farms have been operated in commercial scale, namely the Formosa 1 and the Taipower Offshore Wind Farm Phase 1, and their total installation capacity is 237.2 MW. In addition, another 7 offshore wind farms have been constructed and are in the testing stage for operation. As of August 2023, the total installation capacity of offshore wind farms has reached 1,569 MW. And with the unfolding of the third-phase development, domestic offshore wind farms are booming and creating many job opportunities in development. The domestic manufacturers and engineering consultants are also participating actively. From the perspective of domestic economic development, it is natural to expect the increase in participation of native companies and move towards the aim of domestic independent development.

Offshore engineering is relatively new to natives, and since the development of offshore wind farms, relevant capabilities of construction and manufacturing, as well as talent cultivation for design and assessment, have been developed. Therefore, this article focuses on the geotechnical investigation and interpretation for offshore wind turbine generators. From the perspective of geotechnical engineering, this article

introduces the methods of site investigation and geotechnical interpretation, and shares some practical experience. The purpose of geotechnical interpretation is to transform the site investigation results into design soil parameters and conditions, which can be used as inputs for geotechnical and structural design, and is a very important link in wind farm development.

前言

我國離岸風場自 2019 年海洋風場竣工後，於 2021 年開始逐年增加，迄 2023 年 8 月總裝置容量已達 1,569 MW（如圖 1），加上目前正在推展之第三階段區塊開發風場，我國離岸風場開發已正式進入蓬勃發展階段，並創造許多調查、設計、施工與製造相關之工作，由於離岸工程對於國內而言較為陌生，故國內離岸風場開發之執行單位多為國外大型公司，若以大型公共建設帶動產業及經濟發展為目標，則須提高本土公司參與比例，並朝向自主設計和建造離岸風場的目標邁進。

若依離岸風力發電區塊開發場址容量分配作業要點^[1]，經濟部將於 2026 年到 2035 年釋出 15 GW 容量

* 通訊作者，chejenliu@sinotech.org.tw

，並明確第 1 階段以 2026 年到 2031 年分 3 期釋出共 9 GW 辦理選商，目前已完成第 1 期風場分配，預計 2026 至 2027 年將有 7 座風場陸續完工併聯^[2]。一般離岸風場將於商轉約 20 年至 25 年後進行除役，除役後風場將成為新風場開發計畫之場址，因此離岸風場開發會持續進行，值得國內大型廠商與工程顧問公司作長期投入。

離岸風場的主要開發項目可分為離岸風機、海纜、以及離岸變電站等，依據各項目之設計與施工需求，會有不同之場址調查與評估項目，本文僅針對離岸風機之大地工程調查與詮釋工作，介紹其方法並分享實務上之經驗。

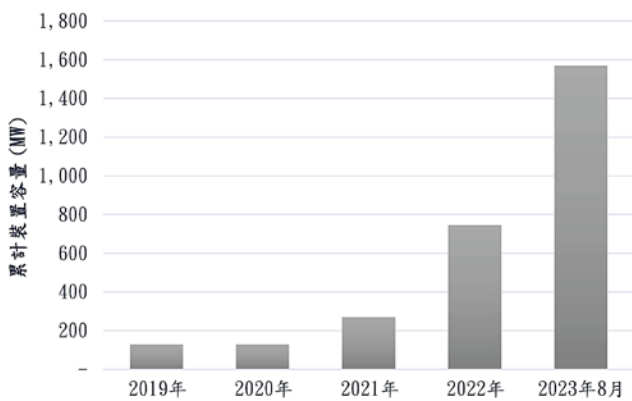


圖 1 國內離岸風場歷年裝置容量累計

(工業技術研究院綠能與環境研究所，再生能源資訊網站^[3])

大地工程調查與詮釋之目的

為滿足風機設計需求，風場開發會進行一系列之大地工程調查工作，調查結果經大地工程詮釋後，可轉化為設計土壤剖面與設計參數，作為基礎評估與結構計算之輸入。依據不同的設計標的，會安排不同類型或範圍之大地工程調查項目^[4]，例如樁基礎型式之風機會著重於樁周摩擦力相關的調查項目，且一般而言調查深度可能會達海床面以下 100 公尺；對於重力式基礎而言，則可能較著重於與沉陷量相關之調查，且相較於樁基礎，其調查深度較淺但範圍較廣。目前國內已商轉和正在建造階段之離岸風場皆採用樁基礎型式之風機，因此本文將針對樁基礎之調查項目作簡要介紹。

取得各項大地工程調查結果後，須依風場設計所用之各種設計方法，將調查結果轉化為各設計方法所需之輸入參數，此工作稱為大地工程詮釋，目的在於決定土壤的設計條件，一般會包含土壤的飽和單位重、相對

密度、過壓密比、側向土壓力係數、抗剪強度、勁度特性、反覆阻抗比、動態特性、反覆弱化行為、以及土和鋼的界面摩擦角等參數，由於大地工程詮釋過程中會將土壤進行工程土壤單元分類，且於指派試驗時會盡可能讓各工程土壤單元有足夠試驗數量進行統計，因此可獲得土壤參數之不確定性，進而導出參數之高估計值、最佳估計值、以及低估計值，設計單位可依需求選擇適當之估計值進行設計，例如進行極限程度分析時可能會考量土壤強度之低估計值，疲勞分析時可能會採用最佳估計，於檢核結構自然頻率時則會同時考量土壤勁度之高估計值和低估計值。

離岸風場大地工程調查方法

土壤參數可由現地試驗和室內試驗結果獲得，對於離岸風場而言，最重要的現地試驗為水壓錐貫入試驗 (Piezocone penetration test, CPTu)，其試驗結果可用於土壤分類，或可透過經驗公式估計各種重要靜態土壤參數，且其試驗結果為隨深度變化的連續量測值，可用於建立完整的土壤分層剖面，若於 CPTu 位置旁另施作一鑽探取樣孔，則可進一步安排室內試驗，並以試驗結果為「真值」進行 CPTu 經驗公式的校正，校正後公式可應用於整個風場，故只要有施作 CPTu 處，即可獲得設計土壤剖面及最佳推估之靜態參數。利用同樣的方式也可獲得風場內 CPTu 位置之剪力波速剖面，僅須挑選幾處於 CPTu 位置旁鑽孔進行懸盪式震測 (PS-Logging)，即可以實際量測到之剪力波速值校正 CPTu 經驗公式，並將其應用於整個風場。這種大地工程調查策略，可以較少的鑽孔數量，建立整個風場的設計用土壤參數，如此可縮短調查時間，並省下相當可觀的鑽探費用。雖然 CPTu 於風場開發中的應用層面相當廣泛，但鑽孔取樣後進行高階動態室內試驗，仍為獲得土壤動態參數之唯一途徑。

現地試驗

水壓錐貫入試驗 (Piezocone penetration test, CPTu)

於圓錐貫入試驗中，圓錐貫入器 (Cone penetrometer) 連接於圓桿之一端，以等速壓入土壤，並連續地量測貫入時圓錐 (Cone) 和摩擦套管 (Friction sleeve) 表面的阻抗值。若採用水壓錐貫入器 (Piezocone penetrometer)，水壓可能之量測位置有

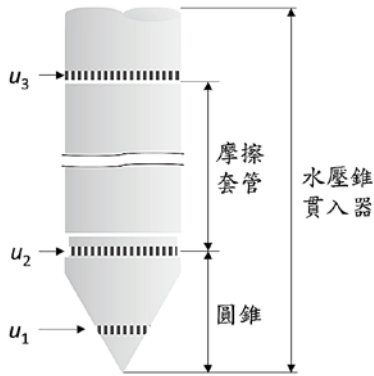


圖 2 水壓錐貫入器示意圖 [5]

三處，第一為位於圓錐上 (u_1)，其二為位於圓錐後方 (u_2)，最後為位於摩擦套管後方 (u_3)，詳細位置如圖 2 所示，但依據 ISSMFE 於 1989 發行之「International Reference Test Procedure」，其建議採用 u_2 水壓量測值，這也是目前業界的標準作法。由於 CPTu 的量測值為力學上的阻抗及對應之水壓，因此 CPTu 分類法係依土壤行為類別進行分類，可用以判斷土壤是否具有排水或不排水行為，有別於傳統上基於物理性質的土壤分類，CPTu 分類結果較能符合工程上對於選擇砂土或黏土公式的判斷準則。

懸盪式震測 (PS-Logging)

懸盪式震測系統為一種井測設備，呈長桿狀，其上包含 1 個震源和 2 個固定間隔之接收器，並以纜線垂吊，如圖 3 所示。纜線可支撐探測器並負責與紀錄 / 控制器間之訊號傳遞。首先將探測器置入鑽孔中達指定深度，然後震源於鑽孔流體中產生壓力波，此時壓

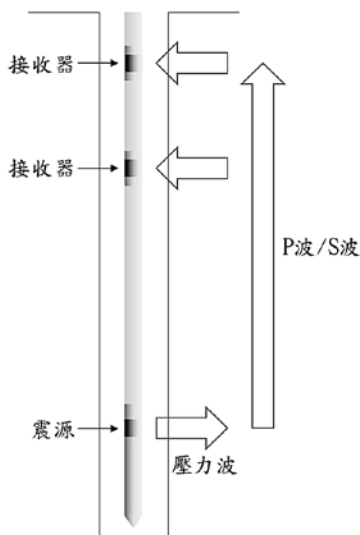


圖 3 懸盪式震測系統示意圖

力波會於井壁處轉換為地震波 (P 波和 S 波)，地震波接續沿著井壁傳遞，抵達接收器位置時又會於鑽孔流體中轉換回壓力波並被檢波器 (geophone) 接收，此時檢波器會將接受到之資料傳回紀錄器。波抵達兩接收器之時間差可用以決定鑽孔周圍接收器間隔高土壤柱之平均波速。PS-Logging 可以量測鑽孔位置隨深度變化之連續剪力波速值，剪力波速代表地盤的軟硬程度，為進行地盤反應分析之必要輸入參數。

鑽探取樣和室內試驗

為取得土樣進行室內試驗，風場開發於調查階段會進行海上鑽探調查，其中鑽探調查位置一般會以涵蓋風場為原則，並選擇進行載重迭代分析等之重要風機位置，主要考量為鑽探調查一般會進行全孔取樣，經土樣判釋後可獲得整孔土壤類型隨深度之變化，可用以比對 CPTu 土壤分層，並釐清可能造成非預期 CPTu 量測值的原因，例如小礫石造成之 CPTu 阻抗值突增，以及堅硬黏土或黏土中含礫石產生之負水壓量測值。

鑽探取樣

為能獲得現地土壤之力學特性，鑽探取樣時須避免土壤擾動，因此一般會採用薄管進行取樣，關於薄管取樣之規定可參考 ASTM D1587 規範，取樣管須以適當強度與耐蝕性之不銹鋼等材料製造，其厚度除應能承受靜壓而不致挫屈外，亦不可過厚而造成取樣時的土壤擾動。此外，薄管取樣器應為均勻圓管，管面須光滑清潔，不得有傷痕凹紋、銲縫、鐵銹或污物等，面層處理應於徹底清理之後行之，削口務須銳利，不得有裂口存在。在實務上遇土層含有小礫石時，可能會造成薄管的削口損傷，因此取樣時若使用舊薄管，應特別檢查削口的狀況。

室內試驗

依據土壤參數類型，可將室內試驗區分為 (1) 物理及化學類試驗、(2) 靜態力學類試驗、以及 (3) 動態力學類試驗，各類型試驗之說明如下：

(1) 物理及化學類試驗

試驗之目的為獲得土樣之物理和化學性質，例如含水量、單位重、粒徑分布、液塑性、雲母含量、碳酸鈣含量等，試驗結果主要作為土壤分類之依據，惟其中飽和單位重之估計相當重要，因其會直接影響現地垂直有

效應力的計算結果，現地垂直有效應力的應用面相當廣泛，除作為力學試驗之設定條件外，亦為大地工程評估和設計之重要輸入參數，另雲母含量和碳酸鹽含量會影響基樁之承載力，若風場內發現有高含量之雲母或碳酸鹽土壤，則須審慎評估其對於基樁之影響。

(2) 靜態力學類試驗

重要的靜態力學參數包含不排水剪力強度、 ε_{50} 、有效尖峰摩擦角、以及土－鋼界面摩擦角等，一般可透過三軸試驗和剪切試驗獲得，惟進行三軸試驗時，試體須經過飽和和壓密達穩定後才能進行壓縮，因此試驗所需的時間較長，其中若又採用異向壓密，則需更長時間才能達到穩定狀態。因此安排試驗時，可能須於計畫期程條件下，權衡試驗室能量後，進行試驗數量的增減。

(3) 動態力學類試驗

動態力學類試驗的主要目的為獲得土壤動態特性參數、特性參數隨反覆載重作用次數的變化、以及於反覆加載後的強度值，一般可透過共振柱試驗和動態三軸特性試驗獲得土壤的動態特性，並以反覆載重三軸試驗或反覆剪切試驗探討特性參數的變化，與靜態試驗結果比較後，可獲得土壤於反覆加載後的強度變化。安排反覆載重或反覆剪切試驗時，會先針對目標土樣進行 1 組靜態試驗，再安排多組不同平均應力比和反覆應力比條件之反覆試驗，因此須製作多組目標土樣的試體，若採用試體較長之反覆載重三軸試驗，則於安排試驗前須先確認有足夠長度土樣可進行試驗，但若採用反覆剪切試驗，則無土樣長度需求之壓力。

大地工程詮釋

大地工程詮釋係以工程應用為目的之土壤單元分類，採用基於統計之土壤參數模型，建立簡化具代表性分層之土壤設計剖面與參數，作為工程設計之輸入，其流程可參考圖 4。進行大地工程詮釋前，須先確認設計與相關評估工作所涵蓋之方法，了解各公式所適用土壤類型之條件，以及各方法所需之土壤參數。一般適用砂土類或黏土類公式係以排水和不排水條件作區分，因此進行工程土壤分類時，須明確定義所建立工程土壤單元屬排水或不排水單元，接著再使用室內試驗結果與 CPTu 經驗公式建立各單元之參數模型，最後使用所定義之工程土壤單元完成土壤設計剖面的分層，將各分層

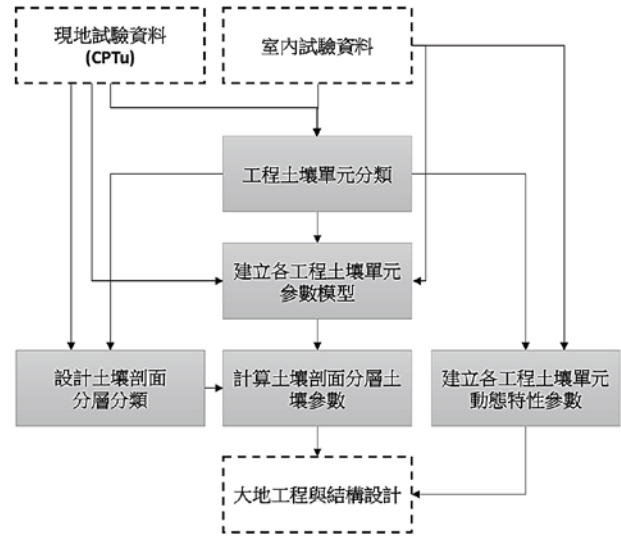


圖 4 大地工程詮釋流程圖

深度及對應之 CPTu 量測值代入該分層所屬工程土壤單元之參數模型，即可獲得該分層之設計參數。

定義工程土壤單元

因工程土壤單元須定義其具排水或不排水特性，因此一般會基於 CPTu 分類法建立工程土壤單元，並使用土壤行為分類指數 (Soil Behavior Type Index, I_{cn}) 作為判斷標準，當 $I_{cn} < 2.60$ 時土壤屬於排水行為類別，反之則為不排水。對於土樣而言，可依深度對應關係建立 ISO 分類 [6,7] 與 CPTu 分類之關聯，完成關聯後，即可將各深度之試驗結果分類到各類工程土壤單元中。一般實務上會建立兩類排水及兩類不排水工程土壤單元，由於各單元針對各項參數需要有一定的試驗數量進行統計，故單元愈多雖然可以獲得較精細的參數模型，但也因此須要安排更多的試驗，導致室內試驗時程延長。

建立土壤參數模型

由於各風機位置皆會進行 1 孔 CPTu，因此風場內各工程土壤單元皆有深度值及對應之 CPTu 量測值，當建立僅與深度相關之土壤參數模型時，則該參數模型可直接針對試驗結果分深度進行統計，建立深度與土壤參數之關係，若要建立與 CPTu 量測值相關之土壤參數模型，則須使用 CPTu 經驗公式推估土壤參數，並以試驗結果獲得之參數為「真值」校正經驗公式，校正後之經驗公式即可作為參數模型使用。由於參數模型

的估計值可與試驗結果比對，因此藉由統計方法可評估參數之高估計值、最佳估計值、以及低估計值，亦即可獲得量化之土壤參數不確定性。當土層之工程土壤單元分類、深度以及 CPTu 量測值皆為已知時，即可將前述已知條件代入各參數模型中獲得所需之土壤參數值。

土壤設計剖面與設計參數

取得 CPTu 量測資料後，先使用 CPTu 分類法進行分層分類，再套用工程土壤單元的定義，建立工程土壤單元的分層，此時可能會遇薄土層的情況，於工程應用上，由於薄土層對於樁土互制行為的貢獻甚低，且土壤模型中的薄土層可能造成數值求解上的問題，因此實務上會將土層作適當地整併。完成土層整併後即可獲得土壤設計剖面，接著使用所建立之土壤參數模型，將設計剖面中各分層之設計參數求出。

實務上的挑戰

台灣外海於東北季風旺盛期間皆不適於進行海上作業，而 6 至 10 月又可能遭遇颱風侵襲，依氣象局統計資料，每年約有 3 ~ 4 個颱風會侵襲台灣，颱風接近所造成之風浪會打斷海上調查作業，作業船隻必須回港作防颱準備，因此離岸調查工作易受不良海況影響而延宕，導致後續室內試驗以及大地工程詮釋工作期程被壓縮，為了應對可能之計畫期程緊縮，增進大地工程詮釋的效率即為一重要課題。

此外，大地工程調查包含各風機位置之現地試驗，以及近萬組之室內試驗結果，產出之資料量相當龐大，因此進行大地工程詮釋前，首要任務為資料的前處理及格式的轉換工作，雖然業界一般會採用英國大地工程和地質環境專家協會（Association of Geotechnical and Geoenvironmental Specialists, AGS）提出之通用資料交換格式，但於資料交換時，仍可能遇到 AGS 格式的版本差異以及廠商自定義格式的問題，特別是當有多家現地調查廠商參與風場開發計畫時，資料的前處理工作會更為繁重。

為進行大地工程詮釋，須與試驗室和設計單位相互配合，設計單位依選定之設計方法進行試驗規劃，試驗室則依據設計決定之試驗清單進行試驗，其中針

對高階動態試驗，設計單位先會確認土樣之工程土壤單元分類，並參考靜態試驗結果訂定動態試驗參數，且當試驗完成一定數量時，可先進行初步大地工程詮釋，以獲得各工程土壤單元的試驗數量，設計單位再據以修訂後續試驗清單，以確保有足夠試驗數量讓各參數估計值具有統計意義。因此進行大地工程詮釋時，與試驗室和設計單位的溝通界面相當重要，有效率的溝通方式可大幅縮減試驗等待時間，且確保各工程土壤單元的試驗數量後，可直接採用統計估計值，避免使用較保守之工程判斷方式估計參數值。

結語

為能進行離岸風場之大地工程設計，由大地工程調查開始，即應引入設計方法，依設計需求進行各項現地調查與試驗，再經過基於統計方法之大地工程詮釋，建立土壤設計剖面與包含高估計值、最佳估計值、以及低估計值之土壤設計參數。相較於工程實務面遭遇的挑戰，大地工程詮釋工作相對而言較為單純，惟仍須以深入之室內試驗與大地工程專業為基礎，判斷獲得之參數是否合理，並釐清非預期試驗結果的可能原因。

離岸風場的大地工程詮釋係以 CPTu 應用為主，採用統計方法結合室內試驗成果，提出基於土壤行為類別之分類與分層，可區分土壤具排水或不排水特性，並產出具統計意義之設計土壤參數，除可呈現土壤材料之不確定性外，亦可用於不同目的之設計檢核評估，值得國內大地工程業界參考。

參考文獻

1. 經濟部能源局，「離岸風力發電區塊開發場址容量分配作業要點」（2021）。
2. 台灣電力公司網站 <https://www.taipower.com.tw/tc/index.aspx>。
3. 工業技術研究院綠能與環境研究所，再生能源資訊網站 <https://www.re.org.tw/information/statistics.aspx>。
4. API RP 2GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations (2014).
5. Lunne T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M., Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic & Professional. First revision (1997).
6. ISO 14688-1, Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil—Part 1: Identification and description (2017).
7. ISO 14688-2, Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil—Part 2: Principles for a classification (2017). 



我國浮式風機 繫泊系統與錨錠基礎選型考量初探

郭玉樹*／國立成功大學 水利及海洋工程學系 教授

張上君／台灣世曦工程顧問股份有限公司港灣部 副理

曾玉修／超島環能有限公司 工程師

許惠婷／國立成功大學 水利及海洋工程學系 研究助理

紀昭銘／逢甲大學土木工程學系 助理教授

我國離岸風場開發已逐漸自近岸朝向水深接近百米之區域，目前已有數家離岸風電開發商規劃採用浮式風機爭取發開機會。由於我國尚無浮式風機水下錨錠基礎安裝經驗，本文參考目前國際常用之浮式錨錠基礎型式：表面重力式錨錠、吸力樁錨或吸力沉箱錨、嵌入式拖錨、板錨、動力安裝魚雷錨、打擊樁錨或鑽掘樁錨等，配合我國浮式風場潛在場址之水深條件，評估單柱浮筒式、駁船式、半潛式、張力腿平台式等浮式平台型式於我國之適用性。經與內專家學者會議討論，初步認為懸垂式錨繫系統、緊拉式錨繫系統或半緊拉式錨繫系統可能最適用於我國浮式離岸風場開發。上述繫泊系統其對於錨錠基礎施加之作用力方向均不相同，若將我國海域土壤條件納入評估，以打擊樁錨搭配懸垂式或緊拉式錨繫系統，結合半潛式浮動平台，可能適用於我國浮式風機之保守設計考量水下基礎型式選擇。然而，於施工成本考量下，採用懸垂式錨繫系統搭配嵌入式拖錨，亦可為浮式風機水下基礎之選型方案。此外，吸力錨或板錨亦可能於施工減噪等其他工程考量下，成我國浮式風機水下錨錠基礎之候選型式。

前言

我國天然環境條件嚴苛，高度仰賴進口能源，為了降低進口能源比例，同時因應國際《巴黎協定》（Paris Agreement, PA）減少碳排放量，發展再生能源為台灣能源政策首要目標之一。我國規劃再生能源配比於 2025 年達到我國能源供給 15.1% 之目標，其中風能佔 5.3%。考量我國陸域風場開發逐漸飽和，離岸風電將是我國於 2025 年達成碳減排目標的關鍵開發項目之一。

考量離岸風電開發具備高成本及高技術門檻之困難，經濟部參考國際風電開發經驗，秉持先陸域後離岸、先示範後區塊及先淺海後深海之推動策略，循序

開發我國離岸風力發電。依 2012 年 7 月公告實施之「風力發電離岸系統示範獎勵辦法」，評選台電公司、福海公司及海洋風電有限公司投入示範風場開發。而 2018 年 1 月公告之「離岸風力發電規劃場址容量分配作業要點」則採先遴選後競價的模式分配 5.5 GW 之潛力場址併聯容量，共計 8 家業者，13 個潛力場址獲選。上述離岸風場因所在區位水深均小於 50 m，故具有成本優勢之固定式水下基礎為其主要使用基礎型式。

承接示範及潛力場址開發，經濟部能源局陸續於 2020 年 6 月及 2020 年 8 月辦理離岸風電區塊開發規劃說明暨意見徵詢會議，邀集開發商、系統商等利害關係人共同研商第三階段離岸風場區塊開發機制，並於 2021 年 8 月 19 日正式公告「離岸風力發電區塊開發場址容量分配作業要點」。我國規劃於 2026 年至 2035 年

* 通訊作者，kuoyushu@mail.ncku.edu.tw

間逐年釋出 1.5 GW 開發量，累計完成 15 GW 之離岸風場區塊開發，開發場址將涵蓋 50 m 至 70 m 之過渡深水區，如圖 1 所示。

依據經濟部工業局提供之離岸風電區塊開發產業關聯規劃說明資料，浮式風機採用之浮動式平台及水下基礎均為國產化均為產業關聯方案在地化之項目。考量過渡深水區所在場址水深範圍，目前已有部分開發商表示可能採用浮式風機進行離岸風場開發。表 1 為目前我國各離岸風場開發商規劃投入第三階段區塊開發之進度現況。

雖然，最具有浮式風機設置經驗之萊茵再生能源已於 2023 年 5 月正式宣佈終止在我國之所有離岸風場投資計畫；目前仍有風睿能源、福廷綠能源、台亞風能、哥本哈根基礎建設金、貝富新能源（BlueFloat Energy）、伊比德羅拉（Iberdrola）表態考慮採用浮式風機投入第三階段離岸風場區塊開發。

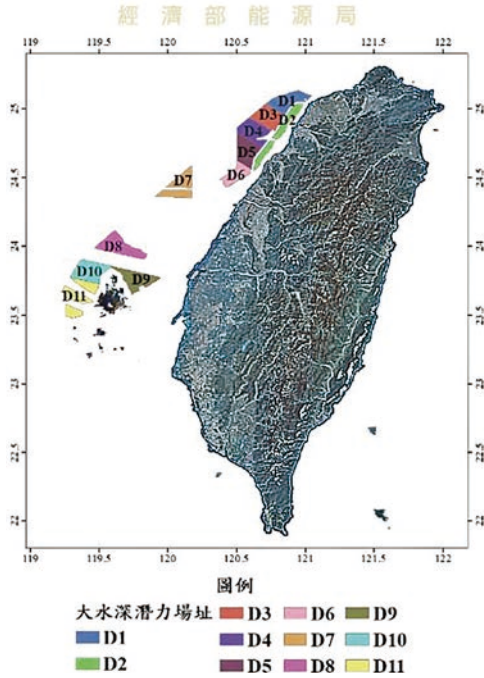


圖 1 過渡深水區可能開發場址^[1]

表 1 離岸風場區塊開發廠商投入現況

編號	開發案名稱	開發商	開發容量 (MW)	獲配容量 (MW)	水深 (m)			目前進度
					max	min	mean	
	風妙	哥本哈根基礎建設金	1800	500	71	52	60	2027 年併網
	風佑		600		47	21		通過環評
	風汎		750		96	70		環評審查中
	風成		750		92	46	-	環評審查中
	風利		1800		88	42	-	環評審查中
#11	海鼎一	科理歐永續能源	548		50.7	21.9	32.6	通過環評
#16	海鼎二		732	600	48.8	19.1	28.9	2026 年併網
#17	海鼎三		720		44.9	34	39.3	通過環評
	加能	北陸能源	602	500	60	52	-	2027 年併網
	北能		1204		71	56	-	通過環評
	環洋	台亞風能	440	440	45	15	-	2027 年併網
	環澎一		1065		72	50	-	公開會議
	環澎二		1065		75	52	-	公開會議
	環澎三		1500		91.7	38	-	公開會議
#28	海峽	天豐能源	300	300	37.5	22.2	30.0	2026 年併網
#16	達天		700	165	48.8	19.1	28.9	2027 年併網
#17	又德		700		44.9	34	39.3	通過環評
	美森	德能集團	240		60	50	-	通過環評
#13	大彰化東北	沃旭能源	570		43.9	34	40.6	通過環評
	旭風二		750		48.8	19.1	28.9	通過環評
	旭風三		750		44.9	34	39.3	通過環評
	沃能一		2400		70	45	-	通過環評
	沃能二		600		70	45	-	通過環評
	海盛 (Formosa 4)	風睿能源	1104	495	75	55	-	2027 年併網
	海碩 (Formosa 5)		1536		80	55	-	通過環評
	竹廷	福廷綠能源	1200		90	60	-	公開會議
	偉娜	韋能能源	1204		78	52	-	公開會議
	韋龍		600		62	40	-	公開會議
	新風	萊茵再生能源	900		95	65	-	公開會議
	萊風		950		90	65	-	公開會議
	彰風		900		65	45	-	公開會議
	萊中		600		60	50	-	公開會議
	海安		2500		70	55	-	公開會議

浮式風機全球發展現況及趨勢分析

現階段全球離岸風力發電機多採用固定式基礎，隨著近岸水深較淺之場域已於近年陸續開發，離岸風機朝大容量機組發展。於追求更穩定的風況條件與發電效益之目標下，離岸風場已逐漸朝向水深更深、離岸更遠之區域開發。根據 DNVGL^[2] 報告，截至 2020 年全球浮式風機總裝置容量約達到 100 MW，且預估於 2050 年浮式風機設置成本將比現今降低約 70%，使得固定式基礎離岸風機與浮式風機之開發成本逐漸接近，且浮式風機屆時之總裝置容量將超過 250 GW，佔離岸風電 20% 以上，約佔全球電力供應 2%。

表 2 彙整各國已開發之浮式風機離岸風場分佈、發電機容量、浮台型式、繫纜與錨錠基礎型式、水深條件

等資料^[3-5]，顯示目前已有許多國家投入浮式風機測試，包括挪威、葡萄牙、日本及美國外海均有相關測試機組；而法國與英國亦將陸續建置浮式離岸風場。其中，又以日本及法國最為積極投入。全球現階段營運及規劃中之浮式離岸風力場計畫詳如圖 2 所示。

2009 年 Statoil 公司在挪威裝置全球首座實機等級（Full Scale）浮式風力機，並於 2016 年取得蘇格蘭政府許可，在蘇格蘭設置 5 座柱狀浮筒（Spar-buoy）浮式風機。葡萄牙 2011 年建置的浮式離岸風場（WindFloat）為全球最早採用浮式風機之離岸風場，隨後蘇格蘭也於 2016 年建置高風風場（Hywind Scotland）。葡萄牙的大西洋風浮風場（WindFloat Atlantic）與蘇格蘭的 Hywind Scotland 風場是少數採用浮式風機的商轉離岸風場。Hywind Scotland 風場裝置容量為 30 MW，搭載 Siemens

表 2 目前已開發之浮式風機離岸風場

計畫名稱	國家	開發容量	運轉年	風力機	浮動平型式	錨錠基礎	離岸距離 (km)	水深 (m)
Hywind Demo	挪威	2.3 MW	2009	Siemens 2.3 MW	Spar-buoy	嵌入式拖錨	10	220
WindFloat1 prototype	葡萄牙	2 MW	2011 ~ 2016	Vestas 2 MW	Semi-submersible	嵌入式拖錨	5	50
Kabashima	日本	2 MW	2013	Hitachi 2 MW	Spar	—	—	—
Fukushima FORWARD (福島未來)	日本	2 MW	2013 ~ 2021	Hitachi 2 MW	Semi-submersible	嵌入式拖錨	20	100 ~ 150
Poseidon P37 Floating Power Plant	丹麥	0.03 MW	2013	—	—	—	—	—
SEM-REV	法國	8 MW	2014	—	—	—	20	35 ~ 40
Fukushima FORWARD (福島新風)	日本	7 MW	2015 ~ 2021	Mitsubishi 7 MW	Semi-submersible	嵌入式拖錨	25	100 ~ 125
Fukushima FORWARD (福島浜風)	日本	5 MW	2016 ~ 2021	Hitachi 5 MW	Spar-buoy	—	—	—
Hywind Scotland	英國	30 MW	2017	Siemens 6 MW	Spar-buoy	吸力錨	25	95 ~ 120
FloatGen	法國	2 MW	2018	Vestas 2 MW	Semi-submersible	—	—	—
Kincardine Pilot	英國	2 MW	2018	MHI Vestas 2 MW	Semi-Submersible	—	—	—
Eolink Prototype	法國	200 kW	2018	Eolink 0.2 MW	Semi-Submersible	—	—	—
Kitakyushu NEDO t	日本	3 MW	2019	Aerodyn 3 MW	Semi-submersible (Damping Pool)	—	—	—
WindFloat-Atlantic Phase2	葡萄牙	25 MW	2019	MHI Vestas 8.3 MW	Semi-submersible	—	—	—
Windfloat Atlantic No. 3	葡萄牙	25 MW	2020	MHI Vestas 8.4 MW	Semi-submersible	嵌入式拖錨	20	100
SeaTwirl S2	瑞典	1	2020	—	—	—	—	—
Dounreay Tri	英國	10	2020	10 MW	multi-turbine	—	—	—
Kincardine	英國	50	2020	MHI Vestas V80-2.0 MW MHI Vestas V164-9.5 MW	semi-submersible	嵌入式拖錨	30	60 ~ 80

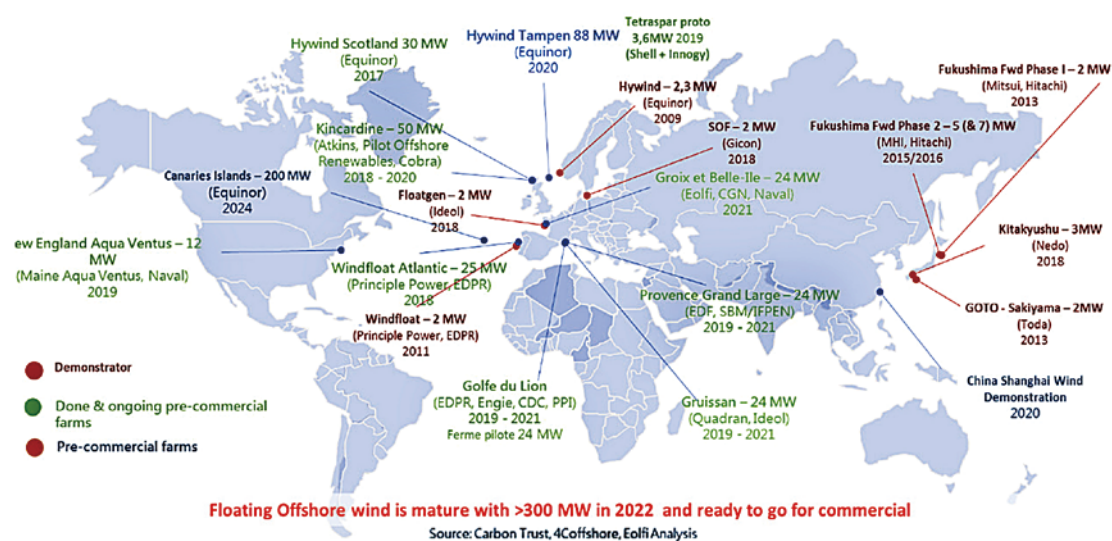


圖 2 全球浮式離岸風場新增裝置容量統計圖

資料來源：EOLFI, 2019 離岸風電工程技術服務交流國際研討會

公司 6 MW 風力發電機，於 2017 年啟用商轉。葡萄牙（WindFloat-Atlantic Phase1）則已於 2016 年完成除役。而積極建置先導型浮式風機的日本，其三座示範機組（福島未來、福島新風、福島浜風）均已除役，其原因在於三座風機之發電容量因數難以滿足商業開發目標至少容量因數達 30% 的經濟效益（2017 年 7 月至 2018 年 6 月福島新風的容量因數為 3.7%、福島浜風的容量因數為 18.5%、福島未來容量因數為 32.9%）^[6]，經日本政府協尋產業界投入資金接手營運未果之狀況下，最終決定於 2021 年完成除役。

浮式風機於 2009 年在挪威（Hywind Demo）安裝的 Siemens 2.3MW 至今日將在法國（EFGL）架設的 MHI Vestas V164-10.0 MW，其製造技術日益成熟，且受益於浮式風場的大量開發，商業化和標準化程度的提高亦有助於實質降低建置成本。參考潛在浮式開發商業者之統計資料，目前全球浮式風場仍多以示範離岸風機或商業化前示範風場為主，後續全球可能新增浮式風機離岸風場之發展累積裝置容量如圖 3 所示，其中，2025 年後將陸續有多個浮式風場達到商業化運轉之階段。

浮式風機之浮動平台、錨繫系統與錨錠基礎

浮式風機支撐結構包含塔架（Tower）、浮動平台（Floating Platform / Floater）、繫泊系統（Mooring System）與錨錠基礎（Anchor Foundation）。離岸風機之塔架主要由風力發電機系統商設計，浮動平台、繫泊系統與錨錠基礎

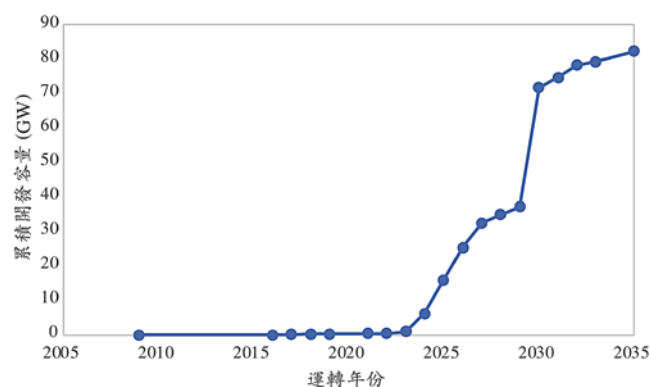


圖 3 全球浮式離岸風場累積開發容量

則需視風場開發區為環境條件進行選定。以下針對浮式風機之浮動平台、錨繫系統與錨錠基礎進行說明。

(1) 浮動平台

常見的浮式風機浮動平台型式包含單柱浮筒式（Spar-buoy）、駁船式（Barge）、半潛式（Semi-submersible）、張力腿平台式（Tension Leg Platforms, TLP），如圖 4。

(2) 繫泊系統

搭配浮台之繫泊系統主要可分三種類型：懸垂式錨繫系統（Catenary Mooring System）、緊拉式錨繫系統（Taut Leg Mooring System）或半緊拉式錨繫系統（Semi-Taut Mooring System）、以及張力式錨繫系統（Tension Leg Mooring System），如圖 5 所示，各類錨繫系統之適用性與優缺點比較如表 3，各錨繫系統說明如下：

懸垂式錨繫系統由三個部分組成，分別是懸浮在水中的懸浮段 (suspended line)、在海床上的平躺段 (lying line)、以及沒入土中的沉埋段 (embedded line)。此三段長度與受力會隨著安裝的進度或外力條件改變而有所不同，但維持適當長的平躺段是必要的，因為在沒入點 (dip-down point/mudline point) 的角度會影響拖錨的埋置深度，越大的沒入點角度將使得拖錨貫入深度變淺。因此，嵌入式拖錨不適合作為張力平台錨繫系統之錨錠基礎；若緊拉式錨繫系統擬以嵌入方式安裝錨錠基礎，則應審慎考量嵌入式錨錠基礎之安裝深度足以提供足夠之垂直抗拉力。

綜合浮動平台與錨繫系統之特性，表 4 整理浮動平台與錨繫系統之匹配性與適用水深條件。

(3) 錨錠基礎

一般常見之浮式結構錨錠基礎包括表面重力式錨錠 (surface gravity anchor) 及嵌入式錨錠 (Embedded anchor)。表面重力式錨錠以錨體自重與海床接觸摩擦力固定繫纜，常見之型式為包括箱狀錨錠 / 箱錨 (Box anchor) 及格柵式錨錠 (Grillage and berm anchor)；嵌入式錨錠則利用錨體貫入海床中，藉由錨體自重、接觸介面摩擦力或凝聚力及被動土壓力固定繫纜，包括打擊樁錨或鑽掘樁錨 (Driven or drilled and grouted pile anchor)、吸力樁錨或吸力沉箱錨 (suction anchor/caisson)、嵌入式拖錨 DEA (Drag Embedded Anchor)、板錨 VLA (Vertical Load Anchor) 或 SEPLA、動力安裝魚雷錨等，各類錨體型式如圖 6 所示，其優缺點整理如表 5。

我國浮式風機繫泊系統與錨錠基礎選型考量

我國離岸風場第三階段區塊開發對應場址水深條件多小於 100 m；因此，難以使用單柱浮筒及張力腿

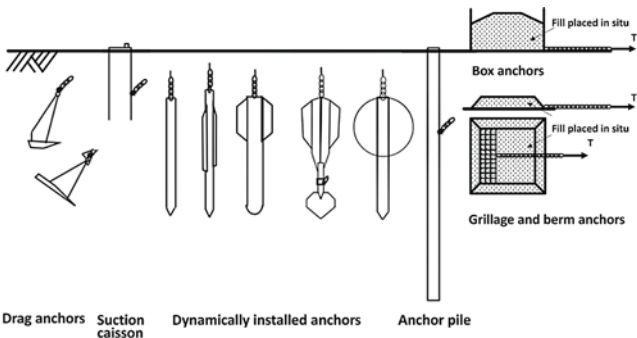


圖 6 常見離岸浮動平台錨錠基礎型式 (改繪自 Randolph and Gourvenec [8])

平台等需要大水深條件提供足夠浮力之浮台型式。因此，半潛式平台為我國西部離岸風場較適用之浮動平台型式。

若浮式風機採用半潛式平台，可搭配懸垂式錨繫系統或緊拉式錨繫系統；由於懸垂式錨繫系統之繫纜主要對於海床面施加水平拉力，而緊拉式錨繫系統則對海床面施加傾斜拉力；因此，當選用懸垂式錨繫系統或緊拉式錨繫系統時，可搭配嵌入式拖錨、板錨、吸力樁錨或吸力沉箱錨、打擊樁錨或鑽掘樁錨等錨錠基礎型式。由於嵌入式拖錨安裝簡易，於施工成本考量下，懸垂式錨繫系統搭配嵌入式拖錨可為浮式風機水下基礎之選型方案。

目前國際既有浮式風機亦多採用嵌入式拖錨，如葡萄牙的 WindFloat Atlantic 與日本福島離岸風場均採用 Vryhof 公司設計之拖錨基礎。如同石油天然氣工業，嵌入式拖錨最常用安裝於軟弱之均質黏土海床。然而，我國西部離岸風場表層海床土壤多為疏鬆無凝聚性土壤 [9-12]，或砂土與黏土互層之軟弱土層；由於砂質海床面地形易受海流作用而改變，我國西部彰化近海砂波運動活躍。郭玉樹等人 [12] 及 Liao [13] 以中能離岸風場提供之海床地形實測資料進行分析研究，於一年期間之彰化近海砂波運動引致海床高程變化可能高達 6.7 m，且砂波運動為週期性自然現象。由於嵌入式

表 4 浮式平台與繫泊系統之匹配性與優缺點

浮動平台	Semi-submersible Platform 半潛式平台	Spar-buoy 單柱浮筒式	Tension Leg Platform (TLP) 張力腿平台
搭配錨繫系統	懸垂式 / 緊拉式	懸垂式	張力腿
適用水深	60 m ~ 300 m	80 m ~ 300 m	50 m ~ 200 m
結構複雜度	中	低	中
優點	1. 淺水域至深水域均可裝置 2. 安裝僅需拖船 3. 可拖回港口進行維修	1. 結構簡單，易於大量製造 2. 平台穩定性高，不需要動態穩定系統	1. 結構較輕 2. 平台穩定性高，不需要動態穩定系統
缺點	1. 平台結構較複雜 2. 可能需要動態穩定系統 (active ballast systems) 導致成本較高	1. 安裝地點需具備足夠水深 2. 需要具起重能力之安裝船隻 3. 不易拖回港口進行維修	1. 安裝過程複雜，通常需要特殊設計之安裝船隻 2. 金屬錨鍊受反覆拉力易產生疲勞

表 5 錨錠基礎適用性與優缺點

錨錠	表面重力式錨錠	吸力椿錨或吸力沉箱錨、嵌入式拖錨、板錨、動力安裝魚雷錨	打擊椿錨或鑽掘椿錨
適用海床土壤條件	適合應用的土壤條件廣泛	軟弱黏土、均質土壤、砂質土壤（應用案例較少）	砂土、黏土
適用受力條件	垂直力	水平力、傾斜力（須審慎評估）：吸力錨、嵌入式拖錨、板錨 垂直力：動力安裝魚雷錨	水平力、垂直力、傾斜力
優點	1. 適合應用的土壤條件廣泛 2. 可提供較大之軸向反力且可以縮短繫泊纜繩之範圍 / 佔地面積 3. 施工材料易於獲得且具經濟性 4. 可容易配合案場條件進行現地施工 5. 繫泊纜繩連結處易於檢查和維修	1. 於石油天然氣工業已有大量使用經驗 2. 安裝簡易快速 3. 部分錨錠基礎型式可完全移除 4. 可搭配懸垂式、半緊拉式、緊拉式之錨錠	1. 可準確安裝基礎位置、方向與貫入深度 2. 可利用打擊椿之設計經驗 3. 已具完善的設計和安裝程序 4. 可搭配懸垂式、半緊拉式、緊拉式、張立腿之繫泊系統
缺點	錨錠基礎尺寸受搬運設備限制 側向抵抗能力低於其他錨錠基礎	1. 同時抵抗垂直作用力與水平作用力之能力較差 2. DEAs 大部分僅配懸垂式一起使用，因此所需的纜線布放範圍極大，此可能降低風機排列的密度，且適用水深、條件與環境等需與錨繫系統共同考慮。 3. 營運過程中可能影響鄰近海床的纜線、輸油管 4. 在五層土壤中的行為較不易精確掌握	1. 基礎體積與重量大，運輸與碼頭可能需要井架駁船。 2. 工程費用可能較高 3. 需注意分層土壤特性與較深之土壤鑽探資料

拖錨之貫入軌跡與海床土壤條件有關，一般嵌入式拖錨貫入砂質海床深度有限，台灣西部海域劇烈之砂波運動極可能使嵌入式拖錨之埋置深度淺化，造成承載力下降。

此外，由於我國位於強震區，考量我國西部離岸風場之海床表層均為無凝聚性土壤，故各風場均依照 CNS 15176-1^[14] 之要求，進行海床土壤液化潛勢分析。分析結果顯示，各離岸風場之表層 30 m 海床砂質土壤，於設計地震條件下，均可能具有厚度不等之可液化土層。若嵌入式拖錨、板錨、吸力沉箱之安裝深度小於可液化土層深度，則均可能於地震土壤液化後產生錨錠基礎埋置深度改變之狀況。

基於水深條件及海床土壤條件之考量，以打擊椿錨搭配懸垂式或緊拉式錨繫系統，結合半潛式浮動平台，將為我國浮式風機保守設計考量之水下基礎型式選擇。然而，安裝打擊椿錨所造成之水下噪音遠大於安裝嵌入式拖錨、板錨與吸力錨。因此，可提供足夠埋置深度與水平承載力之吸力椿錨，將為搭配懸垂式錨繫系統之另一可行之工程方案。而對於砂波運動與土壤液化影響程度較小之浮式離岸風場潛在區位，仍可能採用成本較低之嵌入式拖錨作為錨錠基礎。

考量懸垂式錨繫系統之佔地面積較廣，而我國第三階段過度深水區之離岸風場面積有限，若考慮達成國家再生能源發展政策之發電容量需求目標，則可能需採用緊拉式錨繫系統，以增加浮式風機設置數量；

則吸力錨、板錨將是較為合適的選擇。此時，需特別考量吸力錨與板錨於砂質土壤之安裝難度遠高於目前國際鑽油平台所處之凝聚性土壤海床條件。

參考文獻

- 張欽森、李信志、劉新達、張上君（2018），「離岸風場區塊開發海域環境建構計畫（1/3）」成果報告，經濟部能源局。
- DNVGL (2020), New Report - Floating Wind: The power to Commercialize.
- Fukushima Offshore Wind Consortium, <http://www.fukushima-forward.jp/>
- Quest Floating Wind Energy, <https://questfwe.com/>
- 4C Offshore, <https://www.4coffshore.com/>
- 松本真由美（2019），「福島・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業のいま」，國際環境經濟研究所。
- Golightly, C.R. (2017). "Anchoring for Floating Wind Turbines Future Offshore Foundations, Brussels." Paper presented at Offshore Future Foundation Windpower Monthly, Brussels, 8th November 2017.
- Randolph, M.F. and Gourvenec, S. (2011). "Offshore Geotechnical Engineering," Spon Press.
- 郭玉樹（2017），「區域地質模型建構及環境資料庫離型建置－區域工程地質比對、模式建置、應用與災害風險分析」成果報告，財團法人工業技術研究院。
- 郭玉樹（2018），「區域地質模型建構與大水深區海域環境資料庫建置－區域工程地質模型建置與應用」成果報告，財團法人工業技術研究院。
- 郭玉樹、柴駿甫（2018），「離岸風場地工設計參數資料庫建置與應用」成果報告，科技部與中國鋼鐵股份有限公司。
- 郭玉樹、劉家瑄、蘇志杰、張懿、苗君亦、呂宗行、蕭士俊、董東璟、李心平、許泰文、許丁友、徐子圭、柴駿甫、盧恭君（2018），「科技部第二期能源型國家科技計畫－離岸風機水下基礎設計暨維護決策資料庫與展示平台開發」成果報告，科技部。
- Liao, Y.-H. (2020). "Sand Wave Migration and Evolution in Nearshore Area of Central Taiwan Strait," Institute of Oceanography, National Taiwan University, Taiwan, 138p.
- 經濟部標準檢驗局（2021），「CNS 15176-1 風力機－第 1 部：設計要求」，中華民國國家標準。



浮式風機：臺大浮臺開發歷程

吳冠逸／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生研究助理

馬開東^{*}／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

台灣的綠能政策吸引大量國外開發商進入台灣，幫台灣進行風電建設，讓台灣的離岸風電裝置量快速成長，超越日韓，成為亞洲領頭羊，然而我們自己的產業呢？除了製造產業鏈，台灣留下了哪些設計能量？

2021年，現任臺大工學院院長江茂雄教授邀請，在美國、加拿大具有30年海洋工程業界經驗的馬開東博士回台受聘為玉山學者，開創台灣浮動式離岸風電研究的新局面。

從淺水區邁向賦有風能潛力的深水區

台灣現階段的離岸風場開發均是採固定式風機，但淺水海域面積有限，且深水區蘊藏穩定又強勁的風力資源，因此風電開發商開始涉足深度大於65m的深水海域，浮動式風機開始成為優於固定式風機的首選方案（圖1）。在世界各個設計開發團隊中，已經有好幾個浮式風機設計進入了建造規劃的階段。

國立臺灣大學、臺灣國際造船公司（CSBC）、財團法人船舶暨海洋產業研發中心（SOIC）的研究人員和工程師聯合，響應經濟部創新前瞻計畫以及科技部綠能研發計畫，共同組成了一個研發團隊，目標是設計可以承載15MW風機的浮臺，孕育臺灣本土的浮式風機設計能量。未來期待風電開發商，於臺灣海峽水深60至100公尺的風場規劃時，能以本土設計與建造的浮臺為首選，為開發商參與風場競爭的方案加值。

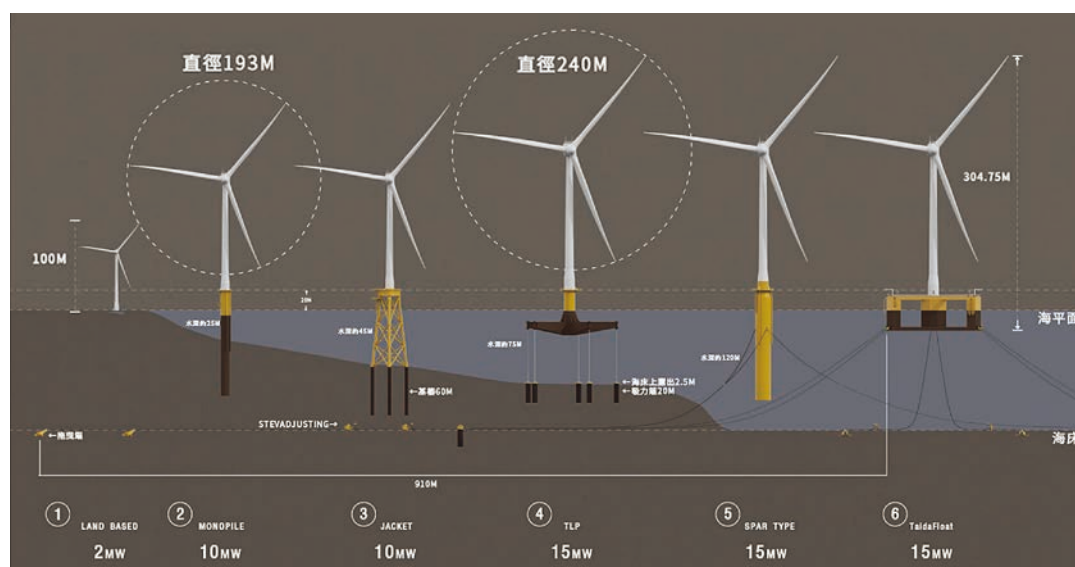


圖1 固定式與浮動式風機比較圖
圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

^{*} 通訊作者，kaitungma@ntu.edu.tw

最適合台灣海峽的浮臺種類—半潛式浮臺

在過去 50 年，浮動平臺已應用於石油和天然氣探勘產業中，且獲得充分實證。浮式風機的浮動平臺是基於風機的運轉需求加以設計改良，因此浮式風機的技術具有十足的可行性（圖 2）。

國際上常見的浮動平臺有四種

半潛式（Semi-Submersible）

半潛式平臺是由三或四個浮筒組成一個半沉潛的平臺，具有足夠的穩度，且安裝較方便，目前最廣為應用。半潛式平臺的吃水深，可以隨著壓載水量多寡調整吃水，適用於水深相對淺的台灣風電安裝港口，以及水深為 100 公尺以內的台灣海峽。

張力腿式（Tension-Leg, TLP）

張力腿式的繫泊錨鏈會完全垂直地被拉緊，連接於海床，施工安裝技術要求非常高，且需要可提供高拉力的大型安裝船，在現今安裝船緊缺的大環境下，施工安裝會是一大挑戰。由於繫泊錨鏈長時間處於高張力狀態，錨鏈受損斷裂的風險較大，任何一條錨鏈斷裂，將直接導致浮臺傾覆，造成風機無法挽回地傾倒入海中。張力腿式平臺適合水深 300 公尺以上的深水海域，較不適合水深為 100 公尺以內的台灣海峽。

浮筒式（SPAR）

浮筒式是一個很長的大直徑柱狀浮筒，浮筒底部藉由高密度物質壓載提高配重，藉由降低浮筒的重心，使

其具有良好的穩定性，類似不倒翁的原理，因此幾乎不會傾覆。由於浮筒很長，且壓載使浮筒吃水很深，因此對於安裝港口的水深要求高，在台灣發展風電產業的台中港水深不足，且台灣海峽的風場水深亦不足。

駁船式（Barge）

駁船式是一個大型的肥胖狀浮動平臺，由於受力表面積大，易受風、浪、流影響，因此須更粗的錨鏈承受拉力，且浮臺的飄移、起伏幅度大。在颱風等極端狀況，更容易發生傾覆或錨鏈斷掉的危險情況，鮮少列入浮式風機的設計選項。

在世界各個設計開發團隊中，已經有好幾個浮式風機設計進入了建造規劃的階段。2009 年，挪威國家石油公司（Equinor）進行了全球首個離岸浮式風機的原型機安裝，自那時起，至少有 13 個裝置容量超過 2 MW 的浮式風機原型機示範計畫（圖 3），其設計主要來自 7 個國家：挪威、美國、日本、法國、中國、丹麥及西班牙^[1]。

最具代表性的示範計畫是 WindFloat，因為這個計畫是許多計畫所效仿的榜樣。其原型機在葡萄牙外海示範運行的 3 年期間，遭遇了波浪達 17 公尺的風暴，仍順利度過比設計浪高要嚴苛的考驗。這個原型機計畫促使 2 個浮式風場成功執行，這兩個風場分別為葡萄牙外海的 WindFloat Atlantic 風場，有 3 架浮式風機，以及蘇格蘭外海的 WindFloat Kincardine 風場，有 5 架浮式風機。總結世界各地的示範計畫，13 個計畫中有 6 個採用半潛式浮臺，具代表性的 WindFloat 示範計畫同樣採半潛式浮臺，可知目前浮式風機的設計以半潛式浮臺為主流。

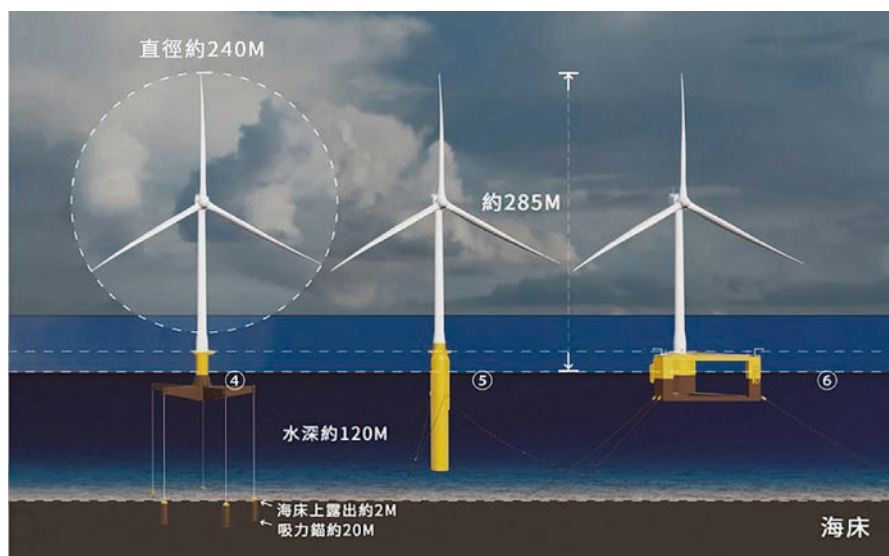


圖 2 浮臺種類（由左至右：半潛式、張力腿式、浮筒式）

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

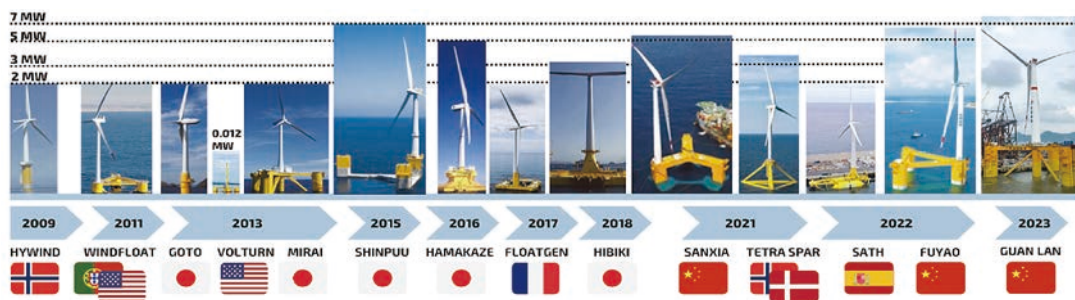


圖 3 全球浮式風機示範計畫發展歷程

圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

研發團隊在設計之初，即針對臺灣海洋環境、港口限制等條件，評估各式浮臺應用於臺灣的優劣勢，並審察世界現有具代表性的浮臺設計，總結目前常見的浮臺之中，以「半潛式」技術最為成熟，且適合台灣海峽 100 公尺內的水深，無疑是最適合台灣設置的浮動式平臺。

經過對世界知名設計的深入瞭解與分析，團隊隨即根據半潛式平臺的設計概念，決定浮臺的主要參數，從各個層面考量，進行一系列的深層設計，進而取得了現今最佳的優化產品「臺大浮臺」(Taida Float)，可承載 15 MW (兆瓦) 裝置容量的離岸風機 (圖 4)。

可 100% 國產化的臺大浮臺設計特色

相對於石油產業使用的 4 個立柱構成的方形海洋產油半潛式平臺，三個立柱的三角形結構配置已經成為離岸風電業界最典型的設計安排，可以減少鋼鐵材料的使用量。在臺大浮臺的設計配置中，風機將會由三個立柱之一承載，該柱稱為主柱，而未放置風機的稱為外柱，這種設計使得碼頭的起重機能相對輕鬆地將風機安裝上浮臺，減小對安裝碼頭設備的要求 (圖 5)；相反地，有些設計將風機放置在浮臺的正中心，但起重機和浮臺中心的距離較遠，也就是吊重力臂會增長，這使得港口必

須大規模整建，配置具有極高起重能力的吊重機，嚴重限制生產浮臺的便利性。

傳統上，半潛式浮式風機平臺的三個立柱都是圓柱體，2021 年下旬設計團隊提出結構外型具有獨創性的臺大浮臺，浮臺的三個立柱都是不規則的六角柱 (圖 6)，沒有弧形板或圓柱體，全部結構均由平板接合而成。此創新設計由臺大、台船和船舶暨海洋產業研發中心的設計團隊合作，共同完成浮臺前端工程設計，於 2022 年 3 月申請中華民國 (台灣) 專利與美國專利，並獲得中華民國 (台灣) 智慧財產局 (Intellectual Property Office, R.O.C. (Taiwan)) 的專利核准。

六角柱的平板浮臺設計優點在於有辦法 100% 國產化，且大幅縮短製造工時；大型圓柱構成的浮臺需要使用彎板機，建造流程非常耗時又耗工，且台灣目前並沒有足夠大型的彎板機可供使用。由於平板不需使用彎板機，易於採用自動或半自動的面銲接，一週的時間就可以銲接完成，在地上銲接完成後，到船屋屋塢裝配即可，因此可將製造流程充分簡化，大幅縮短製造工時以達成量產規模。平板設計除了便於製造，六角形立柱也方便工作船停靠，平板平臺更提供人員寬敞且連續的作業空間 (圖 7)。



圖 4 臺大浮臺

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

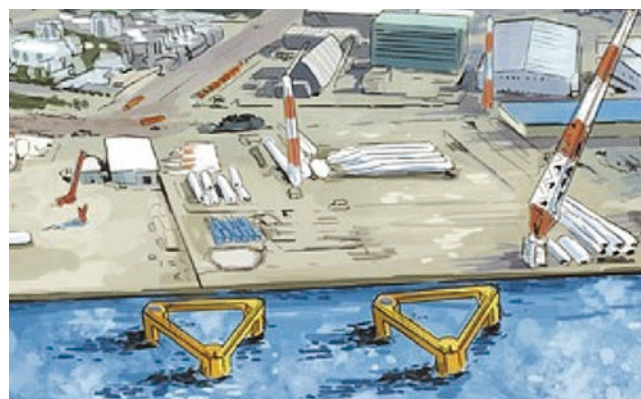


圖 5 浮臺主柱鄰近碼頭方便風機安裝

圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

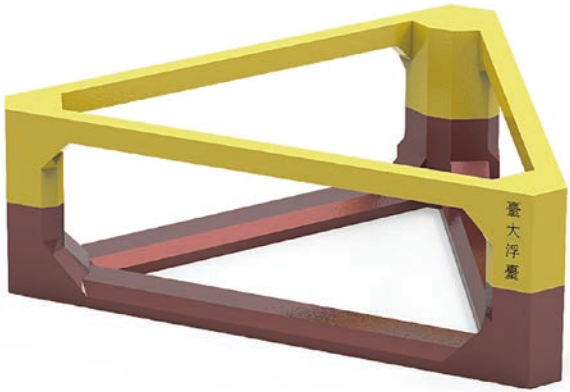


圖 6 臺大浮臺六角形立柱結構
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室



圖 7 臺大浮臺寬敞的甲板空間
圖片來源：浮式風機科普漫畫 / 御風任務

從經濟成本的角度來看，一個重要的指標是總排水量與風機（亦即葉片、塔架和 RNA（Rotor, Nacelle, Assembly）等）重量的比值。在下圖所示的各種設計中，實際安裝項目的比值大約在 9.0 和 15.0 之間。臺大浮臺的比值為 10.6，在該範圍中，屬於優質。另一個重要指標是浮臺空船重量與總排水量的比值，也就是鋼材重量（不包含風機）佔排水量的百分比，設計目標是盡可能節省鋼材的使用，並透過使用幾乎零成本的海水壓載，來獲得所需的排水量，臺大浮臺指標估計為 0.2，明顯地優於其他的設計（圖 8）。

如前述，在臺大浮臺的設計中，風機並非放置在浮臺的正中心，風機將會由三個立柱之一的主柱承載，風機重量會造成浮臺重心偏移。設計團隊針對 20 多種尺寸組合，進行詳細評估，考量船舶的穩定性，以及建造設備的限制，選定初版尺寸（圖 9）。

團隊在完成內部結構佈置後，為了確保有足夠的強度面對不同的作業條件和環境載荷，在設計期間即使用有限元素分析軟體對結構進行應力分析，依照滿載

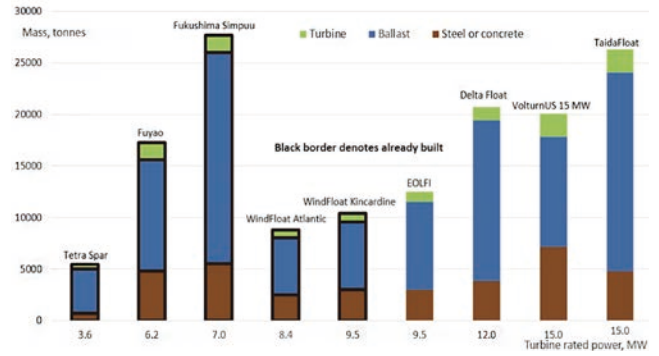


圖 8 臺大浮臺 (TaidaFloat) 與世界各國其他設計之重量分布的比較
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

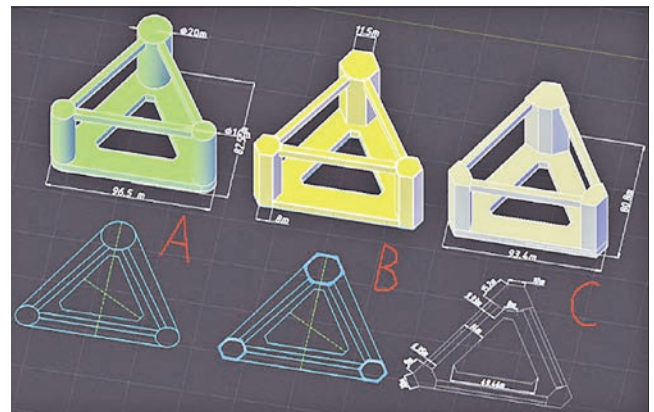
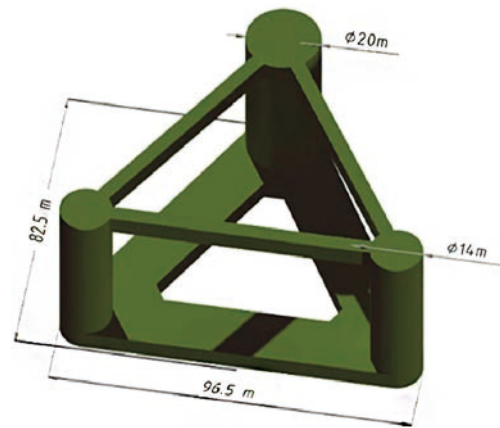


圖 9 臺大浮臺初版之 3D 模型圖
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

工作吃水情況，對結構進行大量的系列分析（圖 10）。

設計團隊所設計開發的半潛式浮臺繫泊系統，完全是以台灣的產業環境、生產製造能量、供應鏈與港口為設計，並能抵禦 50 年一遇的強烈颱風，即使在風浪中，浮臺也能保持平衡。對於整體浮臺結構的設計，在符合實際工程應用需求的前提下，設計團隊致力於在建造成本與結構外型之間取得最佳平衡，增加浮臺在船廠大量製造的可行性，同時有辦法 100% 國產化，推動台灣造船及重工產業的高質量轉型。

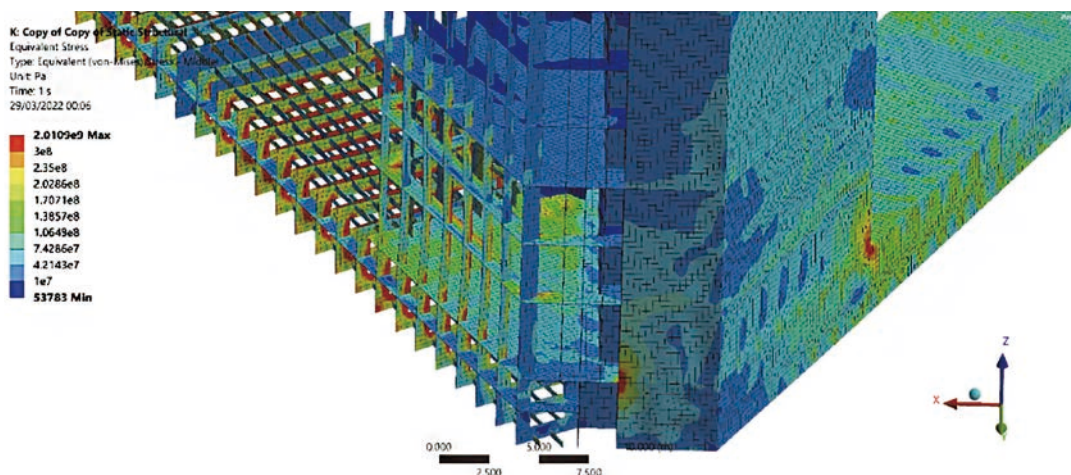


圖 10 臺大浮臺有限元素模型

圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

臺大浮臺設計獲得美國船級社的原則認可證書

為了使浮臺的設計滿足公認標準，設計團隊多方參考船級社規則，例如美國船級社（ABS）的設計規範。船級社的設計指南對浮動式風機在設計、建造、安裝和調查各方面都提供相對應的標準，設計指南主要涉及三個主要領域：浮臺結構、繫泊錨碇系統以及機械設備，大部分的船級社都有發布類似的規範。另外，船級社將提供相關設計工具，提高工作效率和完整性，幫助檢查新設計是否符合規範要求。設計團隊有系統地運用設計工具，遵循船級社規範中的設計公式進行內部構造設計，並通過有限元素分析，以提高細部設計的工作效率，實現最高效的浮臺結構設計。

2023 年 9 月臺大工學院江茂雄院長、玉山學者馬開東教授及台船副總經理周志明共同組成團隊^[2]，合力研發的「臺大浮臺」（Taida Float），在美國船級社（ABS）退休的吳顧問以及美國休士頓海洋工程專家陳顧問、程顧問的輔導下，浮臺結構和繫泊系統的設計獲得美國船級社的原則認可證書（圖 11），為台灣在離岸風電浮式風機領域寫下新里程碑。

臺大浮臺原型機實際海域驗證 JIP 計畫

根據 ISO 的技術成熟度等級（Technology Readiness Level, TRL），臺大浮臺的技術研發已經達到 TRL 第四級，研發團隊下一步計畫打造臺大浮臺的原型機（Prototype），於實際海域驗證設計（圖 12），同時搜集



圖 11 臺大浮臺獲得美國船級社（ABS）的原則認可證書（圖片來源：台船）

參數以優化設計，目標達成 TRL 第七級，確立臺大浮臺於實際場域作業的可行性，最終邁向商業化量產。

基隆海洋大學外海為實際海域驗證的候選場域之一，目前已經完成基礎海域調查，掌握海床地形、水深、地質剖面等關鍵數據，近期將展開鑽探調查。由於風機裝置容量預計採用 2 MW 至 8 MW，較原浮臺設計承載的 15 MW 風機小，且基隆外海的海氣象與浪高較台灣海峽更加嚴苛，因此設計團隊針對基隆外海的環境數據與新的風機尺寸，客製化設計臺大浮臺原型機，持續推動原型機實際海域驗證計畫的實踐。

團隊期待以產業聯合開發計畫（Joint Industry Project, JIP），聯手產業界的能量一同參與，共同合作完成臺大浮臺的原型機海上驗證計畫，讓台灣成為浮式風機的第八大工業強國！誠摯邀請各界加入臺大浮臺原型機 JIP 計畫。

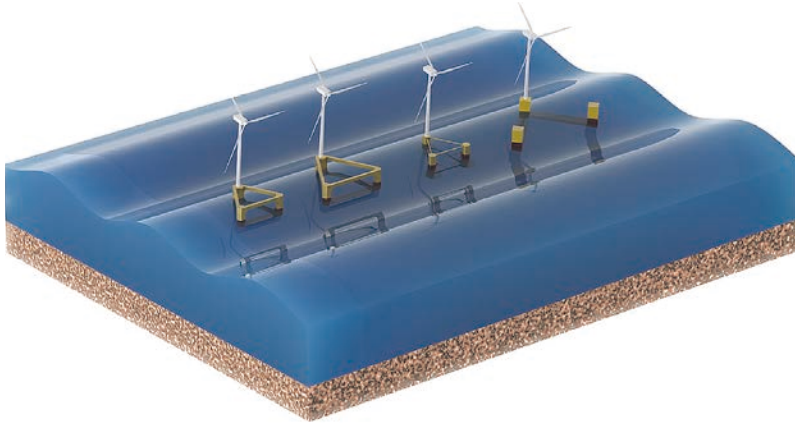


圖 12 臺大浮臺原型機與其他設計之外型尺寸比較
(左至右：臺大浮臺原型機、臺大浮臺、WindFloat、日本 Shinpuu)
圖片來源：臺灣大學離岸結構與錨泊工程實驗室

參考文獻

1. 馬開東、雲在天、劉怡秀、吳冠逸 浮式風機的全球技術競賽—台灣急起直追 2023.03.09 WindTAIWAN (https://www.windtaiwan.com/ArticleView.aspx?ID=ART01113&adminView=24771935&fbclid=IwAR056ev_fi-0Etq6dXz1iLpYiMzSCpLMTJeA8tg_cm2xdY-Z0WnYtrgldYU_aem_AbDVtjgZzPC-kufz1WWJBXNzO1Ct5J_4UDiXAAr3x_iYvHJ7072pbOjRBAXK6YbtHg)
2. 馬開東、周志明、周顯光、江茂雄，浮動式風機平臺—嶄新的台灣綠能科技產品 2022.04.22 WindTAIWAN (<https://www.windtaiwan.com/ArticleView.aspx?ID=ART00607>) 

SINOTECF

- 刊行工程科技技術書刊 / 專題研究、工程技術書刊編撰、翻譯。
- 工程科技及學術交流活動 / 專題演講、參訪交流。
- 工程建設研參活動 / 工程技術現地觀摩活動、海外重要工程現地見習活動。
- 提供獎助學金 / 國內研究生獎助學金及其他具體贊助、培養本國高階工程建設人才。

科普 / 獎學 / 工程交流

Sinotecf



創設宗旨
中興工程科技研究發展基金會係由中興工程顧問社
捐助成立之非營利、經濟事務財團法人。
以提升我國工程科技水準，配合國家政策
促進經濟建設之發展及科技之普及推廣為宗旨。

財團法人
中興工程科技研究發展基金會
SINOTECH FOUNDATION FOR RESEARCH & DEVELOPMENT
OF ENGINEERING SCIENCES & TECHNOLOGIES

10595 臺北市松山區南京東路四段186號4樓之9
電話：(02) 2577-4567 傳真：(02) 2577-3667
E-mail: sinotecf@ms32.hinet.net <https://www.sinotecf.org.tw>





臺灣西部海域 應用 重力式安裝錨 的可行性評估

張宏駿／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生

劉怡秀／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生

林俊宏*／國立中山大學海洋環境及工程學系 助理教授

馬開東／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

葛宇甯／國立臺灣大學土木工程學系 教授

近年來，風電開發商將重心轉向深海域發展浮動式離岸風機。浮動式風機主要以繫泊系統中之錨碇固定於海床上，相關可行之錨碇技術眾多，其中重力式安裝錨中，魚雷錨除了具備經濟及安裝快速的優點外，也有容易導入本土化產業鏈的優勢。如今魚雷錨的應用案例已經有上千個，但是皆於巴西深海，水深大約 500 至 1,000 公尺，且海床為黏土之環境條件下安裝成功。本研究透過理論計算衝擊海床速度，並搭配縮尺模型錨的空氣投放試驗，以與海床土壤種類相關的經驗式，針對重力式安裝錨在臺灣海峽 70 公尺水深及海床為粉土質砂土之環境條件下的貫入深度進行可行性評估。評估結果顯示，在此水深內，重力式安裝錨具有整體貫入海床的能力，可達到基本需求，但由於其仍有錨碇力以及錨鍊反覆作用對重力式安裝錨於砂層中的影響等不確定因素，因此仍有待進一步的探討，期待未來可實際應用於臺灣西部海域的浮式風機場址中。

ABSTRACT

In recent years, offshore wind energy developers have shifted their focus towards the development of floating offshore wind turbines in deep-sea areas. Floating wind turbines are primarily anchored to the seabed using various feasible anchoring technologies. Among these, the torpedo anchor, in addition to its economic advantages and rapid installation, also offers the advantage of easy integration into the local industrial chain. Currently, over 1,000 torpedo anchors have been installed offshore Brazil. They are installed in environments with water depths around 500 ~ 1,000 meters and clayey seabed. This study conducts feasibility assessments of seabed impact velocity and penetration depth for gravity-based torpedo anchors in the Taiwan Strait under environmental conditions with a water depth of 70 meters and the seabed composed of silt and sandy soil, using scaled model air-drop tests and theoretical calculations. The results show that the torpedo anchors have the ability to

fully penetrating into the seafloor but some uncertainty are still remain, for example, the holding capacity in sands, the influence of oscillations caused by the mooring lines to the sandy seabed and etc. It would be confidential to apply the torpedo anchoring technology in floating windfarm after the improvement in the understanding of the behavior of the torpedo anchor in sandy seabed.

浮式風力發電之發展現況

全球離岸浮式風機安裝示範計劃發展至今，至少有 13 個裝置容量超過 2 MW 的浮式風機示範計劃，其設計主要來自 7 個國家：挪威、美國、日本、法國、中國、丹麥及西班牙。近年來國內亦積極投入自行開發的行列，財團法人船舶暨海洋產業研發中心、台灣國際造船股份有限公司與臺灣大學馬開東教授博士帶領之離岸結構與繫泊系統研究團隊致力於設計適合臺灣產業供應鏈，並且能夠承載 15 MW 風力發電機的半潛式浮臺（Semi-submersible）—臺大浮臺（Taida Float）。

* 通訊作者，chlin.geo@mail.nsysu.edu.tw

臺大浮臺之浮臺結構和繫泊系統的設計已於今年 10 月，獲得美國船級社（ABS）的原則認可證書，此浮臺繫泊系統之設計條件為水深 70 公尺，預計使用 3×3 的垂鍊式（Catenary system）繫泊系統，可能部署於新竹、彰化或基隆外海，且底質為砂土或硬質黏土的環境條件，如圖 1 所示。

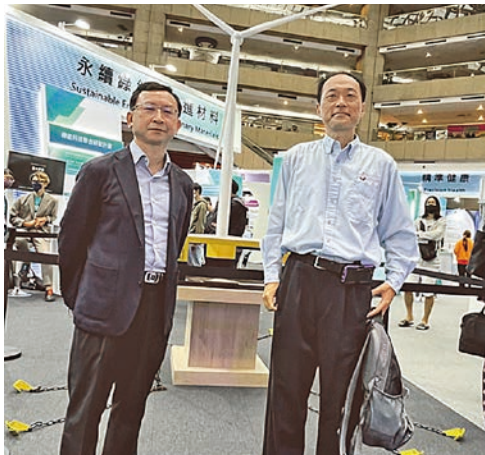
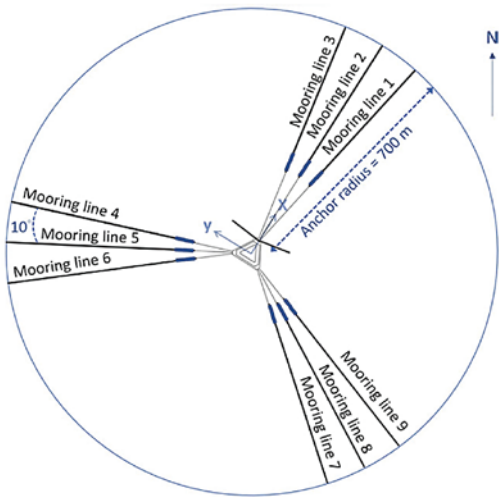


圖 1 臺大浮台模型參展（左為臺灣大學江茂雄教授，右為馬開東教授），以及其繫泊系統的示意圖（上）^[1]

常見之錨碇技術

繫泊系統基本是由錨碇（Anchor）以及繫纜（mooring lines）所組成，浮臺之受力（風、波、浪、流、風機等力）會經過繫纜轉移到錨碇上，透過錨碇將浮臺固定在設計的位置不發生漂流。選擇合適的錨碇除須考量其可提供足夠的錨碇力外，亦同時需要兼顧經濟性與可靠性。目前常見之錨碇種類（如圖 2 所示）根據其錨碇力來源、錨碇力方向性以及安裝方式的不同有重力式（dead weight）、打擊式基樁（Driven pile）、拖曳錨（Drag embedded anchor）、吸力樁（Suction anchor）、重

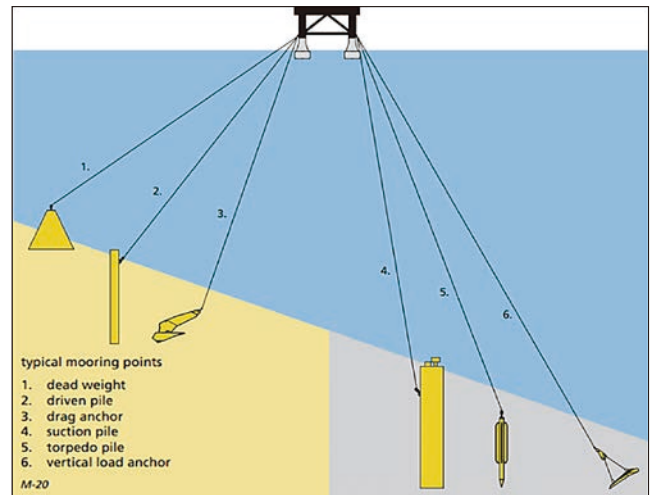


圖 2 各式常見之錨碇總類^[2]，作者於巴西外海安裝吸力錨

力式安裝錨（或稱魚雷錨，torpedo anchor）等多種，各技術之優缺點比較如表 1 所示。錨碇選用會依據錨碇力需求、安裝場址水深，土壤條件不同等而有所差異，為了選擇符合臺大浮臺繫泊系統之應用需求，對於各種錨碇技術於臺灣海峽應用可行性的議題在馬開東教授的推動下逐步展開。本文後續將針對重力式安裝錨於台灣海峽海域應用的安裝可行性評估進行說明。

重力式安裝錨介紹

重力式安裝錨是在 20 多年前由巴西國家石油公司所發明的，發明的過程非常戲劇化，其實是因為在巴西外海鑽探油井時發生事故而意外發現的新技術，當時海上鑽井船不小心把一根油井鋼管掉落到海底，之後嘗試各種辦法想要取回鋼管，只能發現鋼管已經牢牢的插入海床之中，無法取回。回報總公司之後，反而讓系泊部門運用巧思，宣佈發現了一種最快速安置海錨的全新方法，並且將這一種海錨命名為「魚雷錨」。到目前為止，巴西石油公司已經在巴西的深水海域，成功地安裝了超過 1,000 支的魚雷錨。

表 1 各式錨碇總類優缺點比較 [3,4]

特性	重力式錨碇	拖曳錨	板錨	樁（打擊樁、吸力樁）	重力式安裝錨（魚雷錨）
錨碇力方向	無特定方向	水平特定方向	無特定方向	無特定方向	無特定方向
安裝複雜性	中等	易	易	複雜（吸力樁中等）	易
可回收性	可	可	可	不可（吸力樁可）	不可
經費	低	中	中～高	高	低
優點	- 單位費用低 - 可提供垂直向錨碇力 - 可搭配拖曳錨作為沉塊	- 高度成熟之技術 - 具有完整之尺寸與型式 - 高水平錨碇力 - 安裝失敗可重新進行	- 較高之單位重量錨碇力 - 重量較輕 - 較正確之錨碇位置定位	- 可提供較大之垂直與水平向錨碇力 - 可有較小的錨碇半徑	- 可提供較大之垂直與水平向錨碇力 - 可有較小的錨碇半徑 - 安裝過程相對單純
缺點	- 可能須有較大尺寸，但會受限於運輸與起吊設備 - 相較其他錨碇法，水平錨碇力較低 - 錨碇力受海床坡度影響嚴重	- 無法提供垂直錨碇力 - 不適合較堅硬的海床 - 可能會因海床沖刷而錨碇失敗 - 須較大的錨碇半徑 - 可能產生非等量之錨碇系統受力 - 不易控制最後錨碇點	- 須詳細之海床土層資料 - 可能受板錨本身金屬疲勞或磨損的破壞	- 需要特定設備進行安裝 - 須詳細之海床土層資料 - 較昂貴 - 打擊樁受限於擊打設備 - 一旦錨碇力不足產生拉出破壞，錨碇力將降為零	- 受水深及土壤條件限制安裝可行性 - 一旦錨碇力不足產生拉出破壞，錨碇力將降為零 - 須詳細之海床土層資料

重力式安裝錨具有安裝快速且經濟的優勢。重力式安裝錨安裝過程是由安錨船將重力式安裝錨運至投放點並進行自由落體投放，透過錨本身的重量在下落過程中所獲得的動能衝擊海床並貫入土層，透過其貫入土層形成如同樁的構造提供繫泊系統所需的負載，由於其可提供水平與垂直的錨碇力，因此可適用於懸鏈式與張緊式繫泊系統。重力式安裝錨貫入土層深度受到外部海床土壤種類、釋放高度以及其自身質量、長徑比（與衝擊海床速度有關）、鰭片長寬比、鼻端形狀等因素影響，最常見之重力式安裝錨為魚雷錨，典型外觀如圖 3 所示，整體呈現細長幾何外觀，鼻端具尖錐狀，為保持其下落過程中的穩定，通常具有三或四個鰭片。其是由巴西石油公司所發想之一個創新概念，具有安裝快速、經濟的優勢，資料顯示，魚雷錨與吸力錨（suction pile）相比約可減少 40% 之成本。目前在巴西外海已安裝有許多魚雷錨作為永久繫泊之錨碇使用。美國驗船協會（ABS）已針對黏土質海床發表魚雷錨之安裝與設計技術規範。

由重力式安裝錨的錨碇力來源可知，貫入海床足夠的深度為此錨碇技術之最基本需求，因此在對於重力式安裝錨的可行性評估中，本文著重在探討魚雷錨在台灣西部

70 公尺水深之海域，針對砂質、粉土質類海床評估魚雷錨在投放後之衝擊海床速度及貫入深度。在方法上，首先藉由理論水動力分析方式求得魚雷錨衝擊海床之速度，並進一步探討鰭片面積相同下，鰭片長寬比對衝擊速度造成的影響。貫入深度部分則探討 5 種不同鼻端形狀對於貫入深度的影響，由於尚未有詳細的預計安裝浮臺海域的海床地質資料，因此粗略以土壤種類的不同，根據空氣投放結果整合文獻結果推估經驗公式，藉此評估貫入海床深度。

重力式安裝錨於台灣海峽海域之海床衝擊速度估算

魚雷錨在水中自由落體時的運動情形，得力於計算流體力學的發展，可有效採用數值模擬方式進行計算 [6]，然而在魚雷錨後端具有錨眼（padeye）以與繫泊纜繩連接，實際安裝時繫泊纜繩材質會採用以鋼鐵製作之錨鍊，魚雷錨在自由落體時後端的錨鍊同時下落，若要將此一併納入數值模擬中計算則會十分困難，因此在此將透過理論計算的方式進行估算。

假定魚雷錨在水中自由落體時作用於錨上之力包括重力、浮力及阻力，則在初始速度為零的情況下，其垂直下落速度 v 與時間 t 之關係可以下式獲得

$$v = k \frac{1 - \exp\left[\frac{-2kb}{m}t\right]}{1 + \exp\left[\frac{-2kb}{m}t\right]}$$

(1)

$$u = \int v dt$$

(2)

其中， $k = \frac{2W}{Cd \cdot \rho \cdot A_{ip}}$ 、 W 為錨碇塊水中重量、 ρ 為水



圖 3 典型之魚雷錨 [5]

的密度、 $b = \frac{Cd * \rho * A_{ip}}{2}$ ， u 為位移， A_{ip} 為魚雷錨截面積， ρ 為海水單位重， C_d 為魚雷錨水中阻力係數。魚雷錨本身之單位阻力係數可透過數值模擬結果與上式比對後獲得 [6]，而透過文獻 [7-9] 可蒐集到不同錨鍊尺寸與其單位阻力係數之關係得知其在 0.015 ~ 0.02 間，透過已知採用之錨鍊長度則可將錨鍊整體之阻力影響納入。為了解考慮錨鍊與否對於衝擊海床速度的影響，以及確認此概念的可靠性，採用巴西石油公司實際使用之魚雷錨 T-98 實際投放案例 [10] 進行比對，如圖 4 所示，圖中黃線為魚雷錨在水中自由落下之速度隨著時間增加的現場觀測數據，綠線為不考慮錨鍊阻力，採用數值模擬所得到的落下曲線，在投放 6 秒後，兩者間的速度有明顯差距存在。若將錨鍊阻力係數設為 0.02 後，與單純魚雷錨之阻力係數加總後，以公式 (1) 計算，結果如圖中藍線所示，其投放後 6 秒的速度較單純僅考慮魚雷錨之速度更為接近現場量測結果，但仍有差異，為更進一步了解現場觀測到之速度偏低的原因，根據案例 [10] 中觀測到投放過程中魚雷錨的下降角度偏移狀況，假設魚雷錨釋放後持續受到 15 度之傾斜角度，數值模擬計算獲得其阻力係數後加上錨鍊之阻力係數影響，則可獲得藍色虛線。雖然在整體下降過程的速度變化曲線非完成吻合，但在衝擊海床前的投放後第 6 秒時的速度已與現場觀測接近，顯示，魚雷錨釋放過程中的旋轉擺盪，是另一項可能影響衝擊海床速度的因子。

在透過案例獲得可靠之計算成果後，將此方法用於考量在臺灣海峽海域進行施放的衝擊海床速度估算。由文獻 [11-13] 參考魚雷錨之尺寸與幾何形狀，除考量 T-98 的設計外，另設計出 T-120、T-120.ver 兩種鰭片面積相同，但鰭片長寬不同的魚雷錨進行比較（相關尺寸如表 2 所示）。由於臺大浮臺設計水深為 70 公

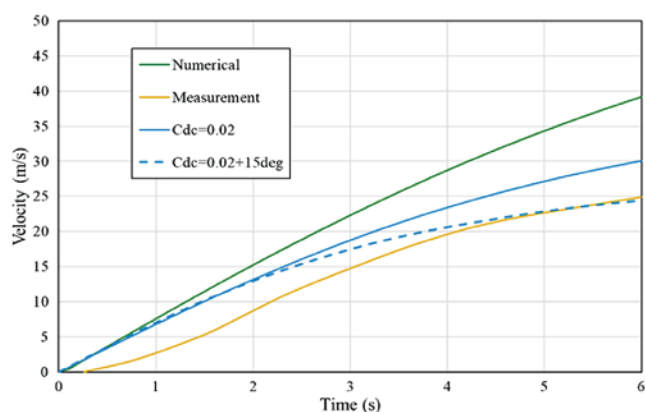


圖 4 T-98 實際投放與理論計算速度變化圖

尺，扣除其佈放時所需的起吊深度以及避浪深度，假定其水下自由落下之落距為 50 公尺，此外，假定採用 100 公尺長，單位阻抗係數為 0.02 之錨鍊，其落距與速度之關係如圖 5 所示，T-98、T-120、T-120.ver 在 50 公尺的落距下達到衝擊海床速度分別為 17.4、17.1、16.9 公尺/秒，差異並不顯著。透過此處獲得之衝擊海床速度將可進一步估算其貫入深度。

表 2 各式魚雷錨尺寸

錨型	質量 m	直徑 D	總長度 L	尖端角度 θ	鰭片 (長×寬)
T-98	98 噸	1.07 公尺	17 公尺	60 度	10 × 0.9 公尺
T-120	120 噸	1.2 公尺	20 公尺	30 度	11.4 × 1 公尺
T-120.ver	120 噸	1.2 公尺	20 公尺	30 度	8.3 × 1.5 公尺

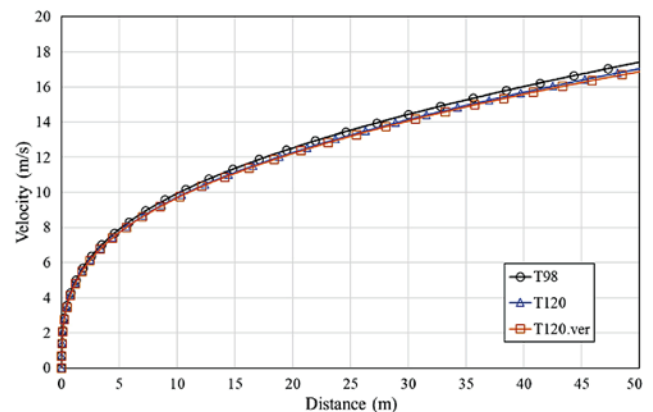


圖 5 落距 50 公尺（錨頭部距海床距離）時速度與距離之關係

重力式安裝錨於台灣海峽海域之貫入深度估算

對於魚雷錨在貫入海床深度的估算上，當有詳細的安裝位置海床資料時，可採用 True [14] 的估算法，亦可透過大地工程承载力理論以及樁身摩擦理論為基礎的數值模擬方法 [7,15] 進行估算。但有鑑於目前對於安裝海域之海床並未有詳細的鑽探資料，僅由既有台電一期、二期離岸風場之海床鑽探結果推估，台灣海峽之海床土壤有大概率由砂或粉土所組成，因此在對於貫入海床深度的估算上將採用僅考慮土壤種類的經驗法 [16] 進行。為了解經驗法中相關數據與國內砂樣數據的差異，規劃有縮尺模型錨的空氣投放試驗做為比對參考。

空氣投放試驗

為了解魚雷錨在海床中的貫入行為，主要是其衝擊速度與貫入深度的關係，本室內模型錨試驗目的主要是透過已知的土壤種類，驗證文獻與貫入深度的估算方式具可行性。由於貫入土層之行為牽涉到土壤材

料，土壤材料有其顆粒大小的物理作用與化學作用並存，並無法進行縮尺，一般在水工模型中的縮尺概念較不適用，通常會需要採用離心機以加大 G 值的方式進行縮尺模型，但受限於國內並無大型離心機設備，因此只能在 $1G$ 的環境下，採用不同頭部形狀之模型錨進行比較。空氣投放試驗之實驗配置如圖 6 所示，所用砂樣之平均粒徑中值 (D_{50}) 為 0.5 mm ，採用 MIT 土壤分類為中砂 (Medium sand)。

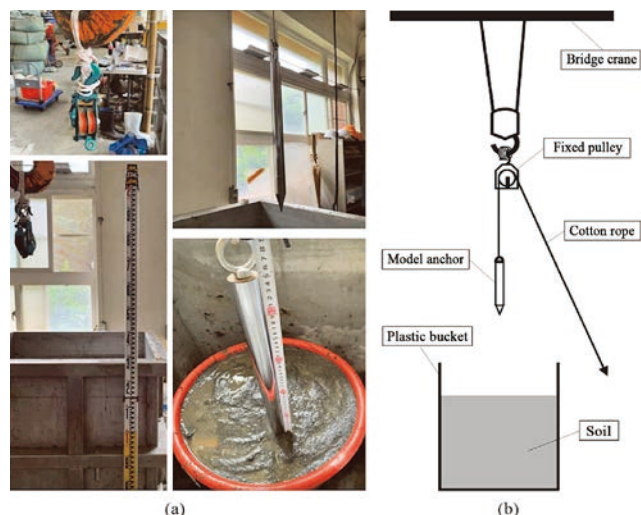


圖 6 空氣投放試驗：(a) 使用設備；(b) 實驗配置

此試驗中選擇了五種頭部形狀不同的模型錨幾何形狀分別為橢圓型、拋物線型、子彈型及圓錐型，模型錨之原型是參考 Fernandes, *et al.* [17] 所討論的錨長徑比 (L/D) 為 15，縮尺比例約 1:25，材料使用 304 不鏽鋼製造，模型錨之錨型如圖 7 所示。空氣投放試驗中所有錨型貫入深度整合結果如圖 8 所示，可發現尖型前端（子彈型、30 度圓錐型 60 度圓錐型）整體來說，比起鈍型前端（橢圓型、拋物線型）之頭部形狀具有更優良的貫入能力，而 60 度圓錐型與拋物線型表現的貫入趨勢相當接近。綜合實驗結果，當頭部形狀為 30 度圓錐型時可明顯達到較深的土壤深度，故為使魚雷錨衝擊海床後得到較高的錨碇能力，將頭部形狀設計為 30 度圓錐型是最佳選擇。

貫入深度估算

將上述試驗結果整合入 Zhang and Evans [16] 以數值模擬、室內試驗以及現地實尺寸試驗之資料整理方式，可得到圖 9。由圖中可見，在此圖中，先不考量本次試驗成果，過壓密黏土 (OC clay) 與砂的資料是在同一趨勢線上，而粉土 (silt) 則是另一個趨勢，且圖中顯示粉土為最難以貫入的土壤種類。若將本次試驗



圖 7 試驗用縮尺模型錨

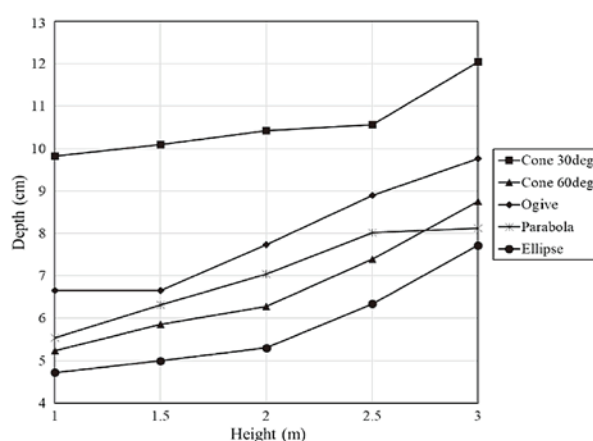


圖 8 模型錨之土壤貫入趨勢

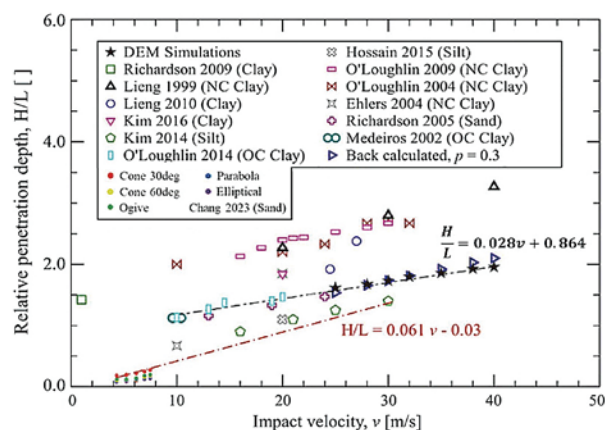


圖 9 模型錨試驗衝擊速度與貫入深度之關係
(改繪自 Zhang and Evans [16])

成果一併觀察，本次試驗採用試驗土樣為中砂，其落於接近粉土的貫入趨勢上，但顯然更低，在此尚無法說明此狀況是否是因為在縮尺模型錨 $1G$ 的試驗情況下所造成的尺寸效應，但就保守的評估可言，可將此資料一併納入後，進行回歸得到貫入深度的下邊界，而過壓密黏土與砂的趨勢線則為貫入深度的上邊界（假定台灣海峽海域並無厚黏土層的海床）。

則在此經驗式的上邊界趨勢線為，

$$\frac{H}{L} = 0.028v + 0.864 \quad (3)$$

其中 H 為貫入深度， L 為錨長， v 為衝擊速度。在此狀況下，T-98、T-120、T-120.ver 在 50 公尺的落距下所能達到的衝擊海床速度，可分別貫入 22.98、26.86、26.74 公尺，表示此三種錨型在偏向砂質海床土壤中能夠完整貫入，且魚雷錨最末端上方尚具有 5.98、6.86、6.74 公尺的土壤覆蓋。而在此經驗式的下邊界趨勢線為

$$\frac{H}{L} = 0.061v - 0.03 \quad (4)$$

T-98、T-120、T-120.ver 在粉土質分別可貫入 17.53、20.26、20.02 公尺，雖然在錨身之端部上方尚有 0.5 公尺的覆土存在，勉強達到可行性的標準，但由於此處並未考量鰭片與土壤間的摩擦力影響，很可能最後無法整根沒入海床中。

結論

台灣離岸風場之開發朝大水深邁進，浮式風機之系統為可能之考量，臺灣目前已有自行開發之臺大浮臺可做為浮式風機系統之浮臺使用，而其中，其配合之錨碇技術為一關鍵考量重點。本文章針對具本土化潛力之魚雷錨，先行針對在 70 米水深，落距 50 公尺之砂性土壤海床進行安裝可行性評估，在考量魚雷錨末端繫掛有錨鍊的情況下，以單純與土壤相關之經驗式方式進行貫入海床深度推估，魚雷錨具有整體沒入海床之能力，具有高度可行性。但目前為考量穩定魚雷錨用之鰭片可能產生的貫入深度影響，需進一步試驗以獲得更為肯定之成果；另方面，本研究下一步將針對魚雷錨於砂質土壤中貫入後所具有之錨碇力，以及魚雷錨受錨鍊反覆作用下，對其在砂層中錨碇力的影響。惟繫纜系統在錨碇技術的選擇上除須達到功能性以及經濟性外，其可靠性亦須一併納入考量，前述中對於魚雷錨的不確定性，仍有待時間進行改善提升，在具有執行期程壓力下，雖然魚雷錨之使用仍具潛力，但在採用臺大浮臺的實海域測試計畫中，將先行採用拖曳錨技術。

希冀後續可進一步完善魚雷錨在台灣海峽海域之應用探討，收集桃竹苗外海深水區的實際海床土壤資料，以了解沙層的存在及厚度所造成的影響，來進行正式的可行性分析，並最終提供開發商和工程顧問公司，做為未來台灣海峽大水深浮式風機錨碇選擇之一。

誌謝

本研究由教育部的玉山學者（Yushan Fellow），以及科技部計畫編號 NSTC112-2218-E002-049 之我國浮

動式離岸風機 TRL5-7 實海域測試機組設計分析及場域規劃 (I) 計畫提供研究資金。

作者群感謝感謝美國海洋工程業界的專家吳哲芳博士和陳東輝博士提供寶貴的意見與評論。另外，感謝巴西魚雷錨 DELP 公司 Thomas Agnevall 提供的資料及指導。最後，也感謝荷蘭 Vryhof Anchors 海錨公司 Leo Bello 的長期技術諮詢。

參考文獻

- Chen, C.A. and others. (2023). Specification of Mooring & Anchor System Ver. 1.1.1. Energy Research Center, National Taiwan University, January 2023.
- Vryhof Anchors B.V. (2015). VRYHOF MANUAL–The Guide to Anchoring.
- Oregon Wave Energy Trust (OWET). (2009). Advanced Anchoring and Mooring Study.
- Rodriguez, R., Gorrochategui, I., Vidal, C., Guanche, R., Cañizal, J., Fraguera, J.A., and Diaz, V. (2011). Anchoring Systems for Marine Renewable Energies Offshore Platforms. OCEANS 2011 IEEE-Spain.
- de Aguiar, C.S., de Sousa, J.R.M., Ellwanger, G.B., Porto, E.C., Junior, C.J., and Foppa, D. (2009). Undrained load capacity of torpedo anchor in cohesive soils. Proc., 28th Int. Conf. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, New York, 2009-79465.
- 張宏駿 (2023)，重力式安裝錨於臺灣海峽之可行性評估，國立臺灣大學碩士論文。
- O'Beirne, C., O'Loughlin, C., and Gaudin, C. (2017). A release-to-rest model for dynamically installed anchors. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**(9), 04017052p.
- Liu, J., et al. (2018). Experimental investigation on hydrodynamic characteristics of gravity installed anchors with a booster. *Ocean Engineering*, **158**, pp. 38-53.
- Blake, A. and O'Loughlin, C. (2015). Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(9), pp. 1270-1282.
- Brandão, F., et al. (2006). Albacora Leste field development-FPSO P-50 mooring system concept and installation. Offshore Technology Conference. OnePetro.
- Anchortec. (n.d.). Anchortec Torpedo Piles. Retrieved from <https://anchortecsolutions.com/torpedo-piles/>
- de Araujo, J.B., Machado, R.D., and Medeiros Junior, C.J. (2004). High holding power torpedo pile: results for the first long term application. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- American Petroleum Institute. (2005). Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures. API Recommended Practice 2SK.
- True DG. (1975). Penetration of projectiles into seafloor soils. DTIC Document.
- NACFAC. (2011). Handbook for marine geotechnical engineering. Naval Facilities Engineering Command Port Hueneme CA Engineering Service Center.
- Zhang, N. and Evans, T.M. (2019). Discrete numerical simulations of torpedo anchor installation in granular soils. *Computers and Geotechnics*, **108**, pp. 40-52.
- Fernandes, A.C., Araújo, J.B., Almeida, J.C.L., Machado, R.D., and Matos, V. (2006). Torpedo Anchor Installation Hydrodynamics. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **128**(4), 286-293.



砂波對於嵌入式拖錨承载力影響分析

郭玉樹*／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授
金秉憲／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生
張上君／台灣世曦工程顧問股份有限公司港灣部 副理
紀昭銘／逢甲大學土木工程學系 助理教授
曾玉修／超島環能有限公司 工程師

我國已宣布第三階段離岸風電區塊開發相關規劃，於 2026 年至 2035 年擬開放共 15 GW 的發電容量。同時，初步規劃三個浮動式風場示範計畫，其開發水深介於 60 m 至 80 m 之間。對於建構於砂質海床上的浮式風機離岸風場，以懸垂式繫纜系統搭配嵌入式拖錨（DEA）為一適合台灣西部海床土壤的水下錨錠基礎型式。由於台灣離岸風場海床地形常因砂波運動造成週期性的高程變化，浮式風機錨錠基礎設計時應將砂波運動造成之海床高程變化納入之安裝深度與承载力計算考量。本研究以有限元素法建立嵌入式拖錨貫入海床之數值分析模型，計算嵌入式拖錨之貫入軌跡與承载力。透過改變砂波引致之地形高程，將大地應力對土壤參數造成之影響納入拖錨－土壤互制分析模型，評估嵌入式拖錨於砂波運動引致海床高程變化對拖錨貫入深度與承载力之影響。初步分析結果顯示，於砂波運動造成海床面降低後進行安裝，將使嵌入式拖錨之貫入深度變淺，且承载力下降。

關鍵詞：嵌入式拖錨、砂波、貫入軌跡、承载力

前言

國際對氣候變遷議題高度重視，各國皆陸續提出「2050 淨零排放」的宣示與行動，我國於 2022 年 3 月正式公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，同時順應國際《巴黎協定》（Paris Agreement, PA）減少碳排放量，發展再生能源並擴大再生能源設置，提升自產能源占比，目標使進口能源依存度由 2021 年 97.4%，降至 2050 年 50% 以下，降低國際能源市場衝擊與價格波動對我國能源安全影響，同時透過發展離岸風電與太陽光電帶動綠能產業鏈促成產業轉型。

隨著陸域風場開發逐漸飽和，離岸風電將是我國於 2025 年達成碳減排目標的關鍵開發項目之一。考量離岸風電開發具備高成本及高技術門檻之困難，經濟部參

考國際風電開發經驗，秉持先陸域後離岸、先示範後區塊、先淺海後深海之推動策略，循序開發我國離岸風力發電。依循我國離岸風場開發規劃，目前風場開發區域均為水深 50 m 以內之淺海區域，受開發場址區位與環境條件影響，現階段各離岸風場開發案採用之離岸風機基礎型式均為固定式基礎，如多樁套管基礎、大口徑單樁基礎等，考量第二階段潛力場址開發過程中，許多開發商因航道、生態、社會環境等因素被迫取消或終止風場開發，因此於第三階段區塊開發時，能源局將依據綠能、航道、生態及社會環境等多元面向，將海域空間劃設為低度、中度、高度敏感區，明確規範業者可開發場址，以及應排除之範圍。由於水深 50 m 以內之離岸風場已逐漸飽和，台灣的離岸風場開發正逐漸走向水深更深、離岸更遠的區域，浮動式離岸風機有機會成為我國第三階段離岸風場區塊開發的風機型式。

* 通訊作者，kuoyushu@mail.ncku.edu.tw

我國西部離岸風場之水深條件多小於 100 m，若採用浮動式離岸風機進行離岸風場開發時，風機浮體結構可能需要多組繫纜搭配錨錠基礎進行安裝；於單一機組之錨錠基礎設計時，即可能需要考量多點的海床土壤地質調查規劃。根據我國第一階段與第二階段以固定式基礎離岸風機進行離岸風場開發經驗，我國海床土壤條件複雜，表層多為無凝聚性土壤，且於水平方向的土壤條件變異性高；於後續進行浮動式離岸風機錨錠基礎設計與安裝時，尤其需要了解海床土壤之地工設計風險，以選擇合適之錨錠基礎型式。

考量我國離岸風場海床表層土壤多為疏鬆砂土且砂波運動劇烈，故本文以最常用於懸垂式繫纜之嵌入式拖錨為錨錠基礎案例型式，初步探討嵌入式拖錨於砂波運動劇烈海床使用時可能面臨之設計風險。

浮動式風機繫纜系統與錨錠型式

浮動式風機搭配之錨繫系統主要可分三種類型：懸垂式錨繫系統（Catenary Mooring System）、緊拉式錨繫系統（Taut Leg Mooring System）或半緊拉式錨繫系統（Semi-Taut Mooring System）、以及張力式錨繫系統（Tension Leg Mooring System），如圖 1 所示，

一般常見之浮動式風機錨錠基礎可分為表面重力式錨錠（surface gravity anchor）及嵌入式錨錠（Embedded anchor）。表面重力式錨錠以錨體自重與海床接觸摩擦力固定繫纜，常見之型式為包括箱狀錨錠 / 箱錨（Box anchor）及格柵式錨錠（Grillage and berm anchor）；嵌入式錨錠則利用錨體貫入海床中，藉由錨體自重、接觸介面摩擦力或凝聚力及被動土壓力固定繫纜，包括錨樁（Driven or drilled and grouted pile anchor）、吸力式沉箱錨（suction anchor/caisson）、嵌入式拖錨 DEA（Drag Embedded Anchor）、垂直拖錨 VLA（Vertical Load Anchor）等，各類錨體型式如圖 2 所示。

對應我國離岸風場水深條件及土壤條件，表 1 列出適用於我國浮動式風力發電機適合匹配的錨錠基礎型式。其中，由於混凝土重力錨佔地廣，環評不易通過，而另外，新型式動力安裝魚雷錨（Torpedo Anchor）則

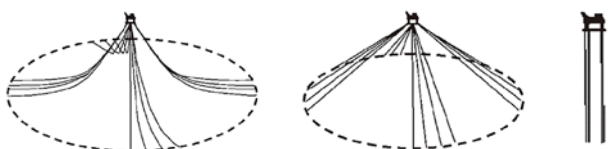


圖 1 懸垂式錨錠、緊拉式錨錠、張力平台錨錠^[1]

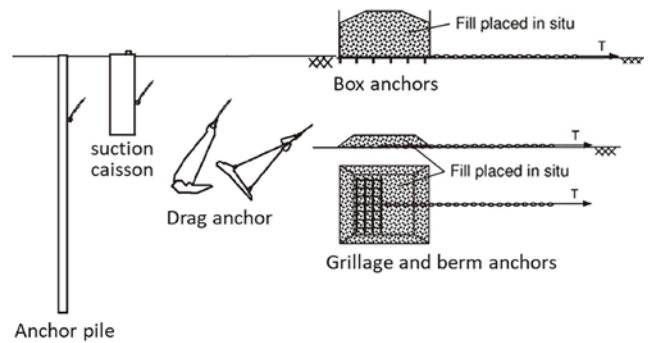


圖 2 常見離岸浮動平台錨體型式（改繪自 Randolph and Gourvenec^[11]）

可能因施放水深不足，易偏轉造成貫入深度不足，因此較不適用於台灣海域環境。

透過與離岸風電專家研討後，初步篩選最為可行之錨錠基礎型式為嵌入式拖錨及樁錨（包含打擊樁與吸力樁）。同時，依照全球浮動式風機案例可知，拖錨基礎為最為常見之錨錠基礎應用型式，包含 WindFloat1、Fukushima FORWARD、Kincardine 等，其次則為吸力樁錨，如 Hywind project。

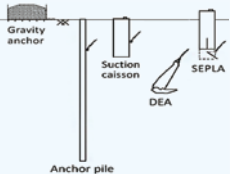
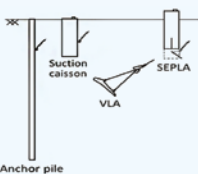
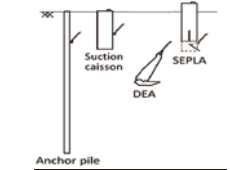
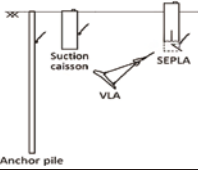
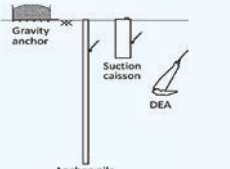
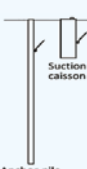
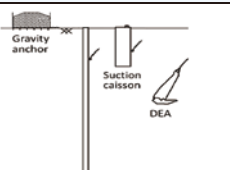
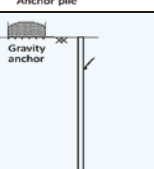
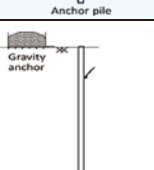
我國西部離岸風場海床砂波運動與海床地形變動

台灣西部近海離岸風場海床表層多為中等緊密之無凝聚性土壤且砂波活動頻繁^[2]，廖音瑄^[3]以中能離岸風場提供之海床地形實測資料進行分析研究，於一年期間之彰化近海砂波運動引致海床高程變化可能高達 6.7 m。砂波運動為週期性自然現象，主要造成海床地形隆起或降低，如圖 3 所示。砂波運動除了會改變海床地表高程，亦將造成土壤緊密程度與土壤力學性質改變。對於固定式基礎離岸風機之水下基礎，砂波運動將造成基礎埋置深度增加或減少，直接影響整體支撐結構的自然振動頻率。

對於採用嵌入式拖錨搭配懸垂繫纜之浮式風力發電機，若於砂波運動形成之海床面淤高時進行嵌入式拖錨安裝，可能於砂波運動再度侵蝕海床後，造成嵌入式拖錨之埋置深度減少，承載力下降。若於砂波運動形成之海床面侵蝕時進行嵌入式拖錨安裝，可能於砂波再度運動淤高海床後，造成嵌入式拖錨之埋置深度增加，承載力提升。

本研究透過彙整各離岸風場（含申請開發但未獲配開發容量之場址）之環境影響評估、地質調查、基礎設計等相關報告內容，收集範圍包括台電離岸一期、海洋竹南、福海、竹風（#4）、海能（#5-6）、海鼎（#11、16-17）、大彰化（#12、15）、大彰化東北（#13）、大彰

表 1 錨錠基礎選型適用條件

錨錠			懸垂式	緊拉式	張力腳
(1) 適用水深條件			淺 (50 m ~ 150 m)、 中 (150 m ~ 1,000 m)、 深 (>1,000 m)	淺 (50 m ~ 150 m)、 中 (150 m ~ 1,000 m)、 深、極深 (>1,000 m)	深、極深 (>1000 m)
(2) 海床面作用力			水平		垂直
(3) 搭配錨錠基礎					
(4) 土壤條件	clay	soft			
		hard			
	sand	loose			
		dense			
	Soft rock				

化 (#14)、海龍 (#18-19)、彰芳福芳 (#27-28)、彰化西島、中能、雲林等離岸風場，將各離岸風場調查與分析所得之海床表層砂波厚度列如表 2。其中，可知我國西部離岸風場砂波厚度由 0.5 m 至 9 m 不等，根據本計畫團隊執行科技部「離岸風機水下基礎設計暨維護決策資料庫與展示平台開發」計畫，我國西部近岸離岸風場（如中能風場），每年砂波運動劇烈，海床地表高程年變動量可達 5 m 以上。

砂波對於土壤力學參數之影響

本文參考 Lin *et al.* [4] 針對淘刷引致之土壤參數變化，應用至砂波移動侵蝕海床使海床土壤轉成為過壓密土壤的現象。假設砂波移動造成海床土壤高程降低前之土壤初始有效單位重 γ'_{int} ，透過式 (1) 即可得到土壤中各深度垂直主應力。假設淘刷前之均質土壤有效摩擦角 ϕ'_{int} ，透過式 (2) 可得土壤之水平主應力。將式 (1) 及式 (2) 之計算成果，結合式 (3) 即可得砂波移動侵蝕海床前之平

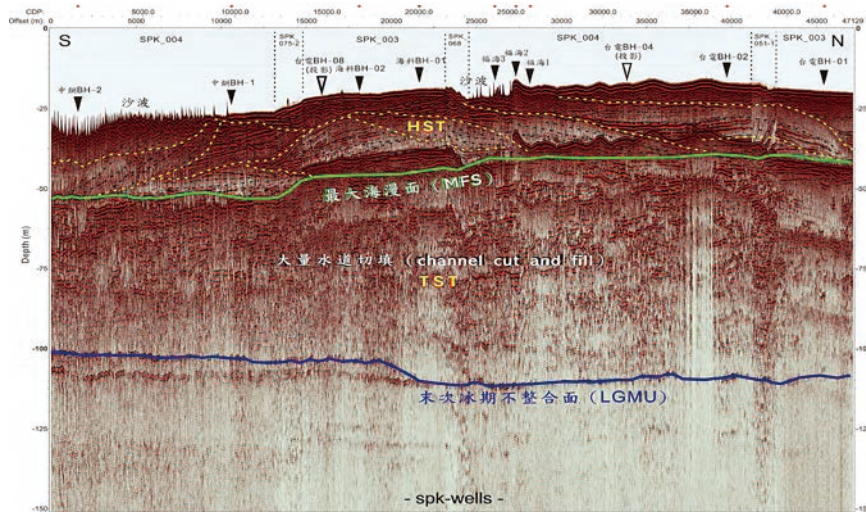


圖 3 砂波測掃剖面圖 [2]

表 2 我國離岸風場砂波厚度資料彙整

離岸風場	表層砂波條件	調查時間
台電離岸一期	2 m ~ 5 m	2006/07-2006/10 2008/03-2008/06
海洋竹南	—	
福海	3 m ~ 5 m	2014/05
竹風 (#4)	0.5 m ~ 1.5 m	2016/11
海能 (#5-6)	—	
海鼎 (#11, 16-17)	3 m ~ 10 m	2017/03
大彰化 (#12, 15)	0.2 m ~ 4 m	2016/08
大彰化東北 (#13)	0.3 m ~ 0.7 m	2016/08
大彰化 (#14)	0.3 m ~ 6 m	2016/08
海龍 (#18-19)	5 m ~ 9 m	2016/10
彰芳福芳 (#27-28)	2 m ~ 6 m	2016/06
彰化西島	6 m	2016/06
中能	3 m ~ 5 m	2016/09
雲林	2 m ~ 5 m	2016/10

均主應力 P'_{int} ，且假設殘餘摩擦角 ϕ'_{cs} 。將上述參數帶入式 (5) 進行相對密度 $D_{r,int}$ 的迭代計算，使方程式左右相等，即可獲得初始相對密度隨深度的分佈。

$$\sigma'_v = \gamma'_{int} \cdot z \quad (1)$$

$$\sigma'_h = K_{0n} \cdot \gamma'_{int} \cdot z = (1 - \sin \phi'_{int}) \cdot \gamma'_{int} \cdot z \quad (2)$$

$$P'_{int} = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} = \frac{\gamma'_{int} \cdot z(3 - 2\sin \phi'_{int})}{3} \quad (3)$$

$$D_{r,int} = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4)$$

$$\phi'_{int} = \phi'_{cs} + 3D_{r,int} \left[10 - \ln \left(p'_{int} / \left(1 - \frac{2\sin \phi'_{int}}{3 - \sin \phi'_{int}} \right) \right) \right] - 3 \quad (5)$$

假設砂波侵蝕海床地形造成海床高程降低量為 S_d ，藉由式 (6) 至式 (9) 所計算出之成果，可由式 (10) 計算出海床高程變動後的平均主應力 P'_{sc} 。式 (11) 由海床高程變動前之平均主應力 P'_{int} 以及變動後之平均主應

力 P'_{sc} 計算出孔隙比變動值 Δe 。而式 (12)、(13) 藉由基本定義計算高程變動前後之孔隙比 e ，當其變化量與式 (11) 成果一致時，即得海床地表高程降低後之有效單位重 γ'_{sc} 。將迭代後之相對密度以及平均主應力代入式 (15)，可迭代計算淘刷後之有效摩擦角 ϕ'_{sc} 。

$$\sigma'_{v,sc} = \gamma'_{sc} \cdot (z - S_d) \quad (6)$$

$$\sigma'_{h,sc} = K_{0c} \cdot \gamma'_{sc} \cdot (z - S_d) \quad (7)$$

$$K_{0c} = (1 - \sin \phi'_{sc}) \cdot OCR^{\sin \phi'_{sc}} \quad (8)$$

$$OCR = \frac{\gamma'_{int} \cdot z}{\gamma'_{sc} (z - S_d)} \quad (9)$$

$$P'_{sc} = \frac{\sigma'_{v,sc} + 2\sigma'_{h,sc}}{3} = \frac{\gamma'_{sc} \cdot (z - S_d) \cdot (1 + 2K_{0c})}{3} \quad (10)$$

$$\Delta e = -k \cdot \ln \left(\frac{P'_{sc}}{P'_{int}} \right) = e_{int} - e_{sc} \quad (11)$$

$$e_{int} = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{\gamma'_{int}} - 1 \quad (12)$$

$$e_{sc} = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{\gamma'_{sc}} - 1 \quad (13)$$

$$D_{r,sc} = D_{r,int} - \Delta e \quad (14)$$

$$\phi'_{sc} = \phi'_{cs} + 3D_{r,sc} \left[10 - \ln \left(p'_{sc} / \left(1 - \frac{2\sin \phi'_{sc}}{3 - \sin \phi'_{sc}} \right) \right) \right] - 3 \quad (15)$$

嵌入式拖錨貫入軌跡分析數值模型

為初步探討砂波對於嵌入式拖錨承载力影響，本研究以 Lin *et al.* [4] 建議之方法，將海床土壤移除造成土壤垂直有效應力之改變，納入計算土壤強度變化，結合本研究以商用有限元素數值分析軟體 ABAQUS 建立之嵌入式拖錨貫入軌跡分析模型，評估砂波運動對嵌入式承载力之影響。

有限元素數值分析模型

本研究採用有限元素數值分析商用軟體 ABAQUS 建構嵌入式拖錨三維數值分析模型，以 ABAQUS/explicit 運算方式結合 CEL 元素模擬拖錨貫入土壤造成之大變形行為。土壤模型總高 12 m，為節省計算資源，模型中之土體於後半段之寬度減為 0.85 m。土體模型上部為 1 m 厚之 void 層，使拖錨基礎於貫入過程中土壤可隨其位移移動至 void 層中。錨板及錨柄組合成之錨錠於 CEL 法中被定義為拉格朗日網格，以便追蹤其在貫入過程中之網格位移。而與土壤接觸之錨錠基礎則因剛性極大，被定義為剛體。土體被定義為歐拉網格，土壤在錨錠基礎貫入時，於歐拉網格內部流通，網格不隨錨錠基礎貫入土壤而發生變形。嵌入式拖錨貫入軌跡分析有限元素數值分析模型配置如圖 4 所示。

本研究參考依循 Liu and Zhao [5] 與許偉勛 [6] 建立簡化拖錨基礎貫入海床土壤數值分析模型，錨板長 L_f 為 2 m、錨板寬 W_f 為 2 m，錨板厚 t_f 為 0.1 m，錨柄長 L_s 為 2.4 m，錨柄寬 d_s 為 0.2 m，錨板與錨柄夾角 θ_{fs} 為 45° 。模型土體長 85 m，前段寬 3 m，後段寬 0.85 m，土壤模型尺寸如圖 5 所介紹。錨錠與土體所組成之有限元半對稱模型如圖 4 所示。嵌入式拖錨採用鋼材模擬，表 3 為嵌入式拖錨之材料參數。

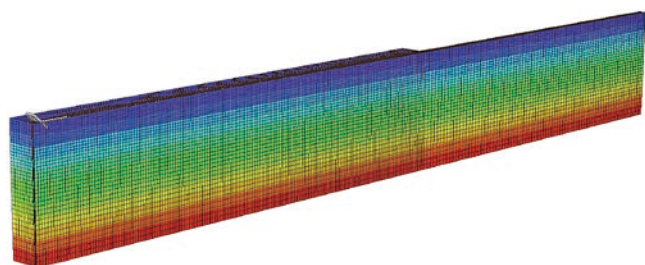


圖 4 嵌入式拖錨有限元半對稱模型

表 3 嵌入式拖錨模型材料參數表

材料	參數	數值 (單位)
鋼材	浸水單位重	68 (kN/m ³)
	彈性模數	2.1E + 08 (kPa)
	柏松比	0.3

模擬條件與土壤參數給定

砂波侵蝕海床面後造成土壤有效摩擦角以及有效單位重變化於海床表層發生劇烈變化，其值隨著具海床面深度增加逐漸趨於與原海床土壤參數條件。為考慮砂波運動造成土壤特性變化對嵌入式拖錨貫入深度與承载力之影響。本研究考量如圖 6 之兩種情境進行模擬，(1) 嵌入式拖錨於砂波淤高之海床面進行貫入與 (2) 嵌入式拖錨於砂波造成海床面降低高程 S_d 為 5 m 處貫入。

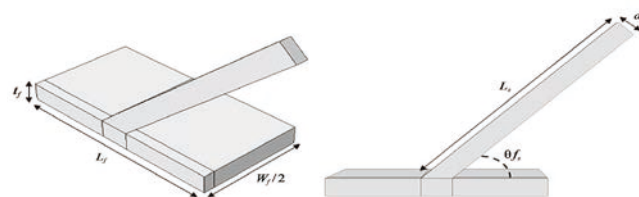


圖 5 錨錠基礎模型：半對稱整體圖 (左)；側視圖 (右)

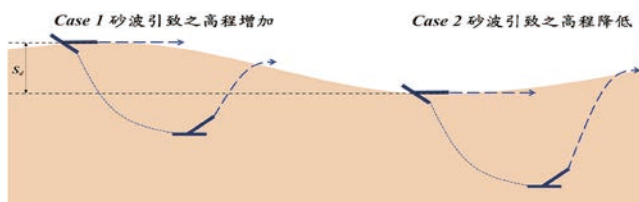


圖 6 嵌入式拖錨貫入砂波引致不同海床高程之模擬條件示意圖

根據張欽森等人 [2] 及廖音瑄 [3] 之研究，砂波波長可長達 295 m。於高程變化量 S_d 為觀測最大值 6.7 m 時，砂波之坡度 θ_s 可小於 1.3° 。圖 7 及圖 8 之示意圖分別代表情境 (1) 以及情境 (2) 之模擬條件，本研究採用之初始計算參數如表 4 所示，透過求得砂波侵蝕海床面發生前後有效單位重 γ'_{int} 、有效摩擦角 ϕ'_{int} 以及相對密度 $D_{r,int}$ 隨深度變化圖，圖 8 顯示在砂波造成海床面降低後土壤有效摩擦角 ϕ'_{sc} 以及孔隙比 e_{sc} 會隨著深度改變。

表 4 本研究採用之海床土壤初始參數

參數 (單位)		條件	
		未考慮砂波	考慮砂波 (top/bottom)
砂土	浸水單位重 (t/m ³)	0.9	0.895/0.8975
	摩擦角 ($^\circ$)	30	30.75/30.4
	彈性模數 (kPa)	5000	5000/5000
	柏松比	0.25	0.25/0.25
	剪脹角 ($^\circ$)	0	0/0

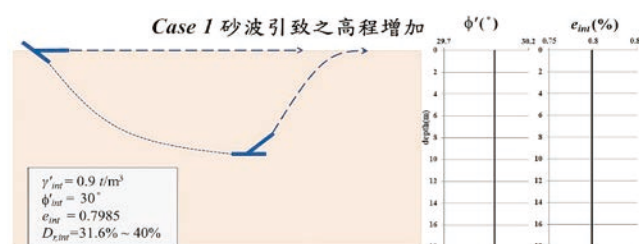


圖 7 未發生砂波條件下之模擬條件

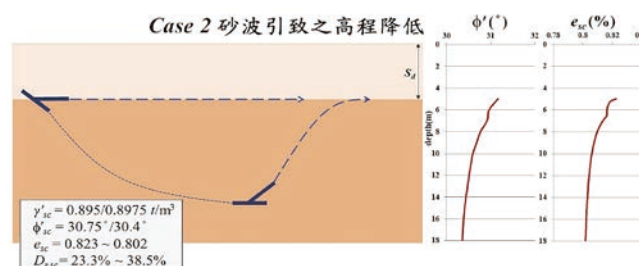


圖 8 砂波淘刷厚度 S_d 為 5 m 條件下之模擬情境圖

由圖 9 分析成果顯示土壤有效摩擦角由砂波侵蝕海床面前的 30° 變為隨深度遞減且逐漸趨近於原地表高程對應之有效內摩擦角；由圖 10 可知土壤有效單位重從砂波侵蝕海床面前的 9 kN/m^3 變為從 8.84 kN/m^3 隨深度遞增圖 11 顯示。由圖 11 可知海床土壤緊密程度則由砂波發生前的相對密度 $D_{r,int}$ 為 19.3% 持續向更深處遞增變為淘刷後海床面相對密度 $D_{r,sc}$ 為 23.3% 向下遞增，可見當砂波發生後海床土壤緊密程度上升。而砂波後之緊密程度會隨深度接近砂波前。

本模型建立考慮砂波淘刷後之土壤模型總高為 12 m 於海床面下 7.5 m 處分層，藉由其參數隨深度變化圖取其特徵值進行模擬。上層土壤有效摩擦角 ϕ'_{sc} 為 30.75° ，有效單位重 γ'_{sc} 為 8.95 kN/m^3 。下層土壤有效摩擦角 ϕ'_{sc} 為 30.4° ，有效單位重 γ'_{sc} 為 8.975 kN/m^3 。砂波後土壤有效摩擦角及有效單位重如表 4 所示。

本研究使用莫爾庫倫破壞準則 (Mohr-Columb failure criterion) 堆砌土壤破壞準則。於數值模型中，DEA 貫入速率較慢，砂土為排水條件，應可直接給定砂質土壤之有效內摩擦角，但參考許偉勛^[6] 進行數值模型校正後建議，下文採用等效之無凝聚性土壤剪力強度模擬嵌入式拖錨於砂質土壤中之貫入行為，更符合嵌入式拖錨所受拖曳力與貫入深度之關係。

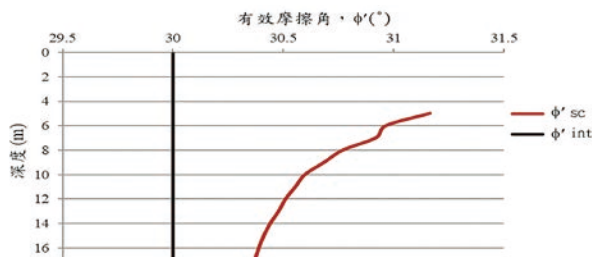


圖 9 砂波厚度 5 m 條件下有效摩擦角隨深度變化圖

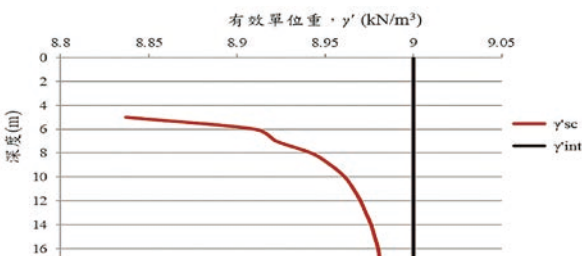


圖 10 砂波厚度 5 m 條件下有效單位重隨深度變化圖

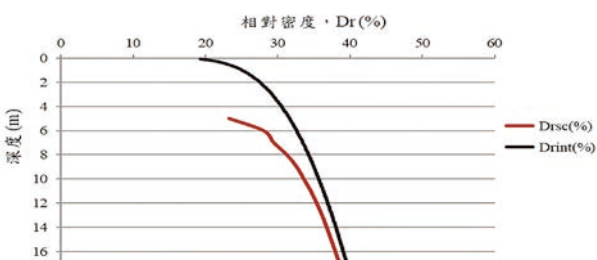


圖 11 砂波厚度 5 m 條件下相對密度隨深度變化圖

$$S_u = \frac{2K_0 + 1}{3} \gamma' z \tan \phi' \quad (16)$$

將砂波造成海床高程降低前後之土壤摩擦角以及有效單位以式 (16) 計算，即可得到等效深度之不排水剪力強度。考量本數值模型現階段之材料組合律之限制，土壤強度將給予分層簡化，並給定特徵值模擬砂波造成土壤參數之變化。砂波使海床高程降低前不排水剪力強度 S_u 於 0 至 4 m 深分層給定 6.24 kPa ，4 至 12 m 之不排水剪力強度則給定 24.94 kPa 作為特徵值。砂波使海床高程降低後不排水剪力強度於 5 至 12.5 m 分層給定 11.98 kPa ，12.5 m 至 17 m 之不排水剪力強度給定 31.07 kPa 作特徵值進行模擬。

砂波對嵌入式拖錨承载力之影響

本文藉由 Lin *et al.*^[4] 提出淘刷後土壤轉變過壓密土壤之參數模擬 DEA 於砂波運動使海床面降低時進行貫入行為之變化。砂波使海床高程降低前 (Case1) 之貫入深度為 9.19 m 深，承载力為 731.46 kN 。砂波使海床降低後 (Case2) 之 DEA 貫入深度為 7.47 m，承载力為 583.72 kN 。嵌入式拖錨於 Case2 之條件下比 Case1 之貫入深度減少 1.72 m，承载力降低 147.74 kN 。顯示嵌入式拖錨在砂波使海床降低後之土壤貫入時，其貫入深度與承载力均會降低，如圖 12 與圖 13 所示。

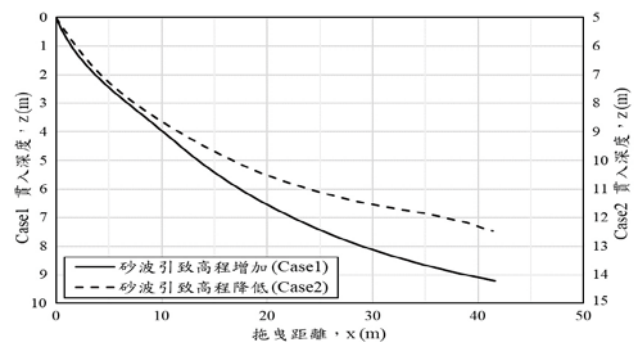


圖 12 砂波發生前後於不同海床高程貫入拖錨之貫入軌跡變化圖

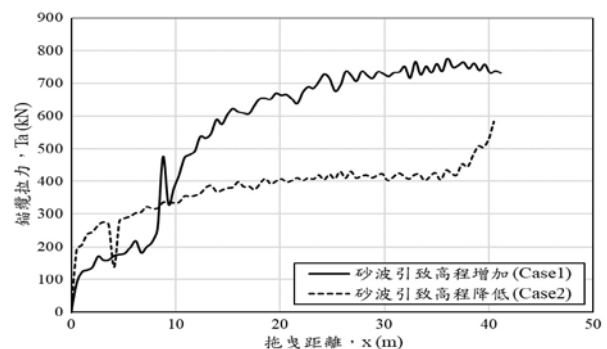


圖 13 砂波發生前後錨纜承载力變化圖

小結

本研究以有限元素數值模型建立耦合歐拉 - 拉格朗日法 (CEL) 網格進行嵌入式拖錨貫入海床土壤大變形分析, 本數值模型之模擬結果藉由塑性分析法之理論貫入軌跡進行驗證。再藉由 Lin *et al.* [4] 提出之淘刷改變土壤參數之方法模擬砂波使海床面下降 5 m 時, 嵌入式拖錨貫入海床行為。

將嵌入式拖錨於兩種因砂波引致之海床高程條件進行貫入, 經初步模擬成果顯示, 拖錨的貫入軌跡與承載能力均會受到砂波引致海床地形高程變化影響。當嵌入式拖錨於砂波引致海床高程下降之區位進行貫入時, 將使得其貫入深度減少, 且承载力下降; 此結果顯示, 於海床砂波活動劇烈區域進行嵌入式拖錨設計時, 須審慎考慮海床高程地形變動對其設計承载力之影響。

誌謝

感謝科技部及台灣世曦工程顧問股份有限公司產學合作計畫「浮式風機錨錠基礎設計與安裝風險評估研究 (II)」之研究經費支持, 以及感謝國研院國網中心提供高速計算與雲端儲存資源, 以協助此研究順利進行。

參考文獻

1. Randolph, M. and Gourvenec, M.R.S. (2011), Offshore Geotechnical Engineering, Taylor & Francis.
2. 張欽森、張上君、李信志、林淑寬、劉新達 (2017), 「離岸風場區塊開發海域環境建構計畫 (1/4)」成果報告, 經濟部能源局。
3. 廖音瑄 (2020), 「中臺灣海峽近岸區沙波的遷移及演化」, 臺灣大學海洋研究所學位論文。
4. Cheng Lin, Caroline Bennett, Jie Han, Robert L. Parsons. (2010). "Scour effects on the response of laterally loaded piles considering stress history of sand," Computers and Geotechnics, 37, 1008-1014.
5. Liu, H.-X. and Zhao, Y.-B. (2014). "Numerical study of the penetration mechanism and kinematic behavior of drag anchors using a coupled Eulerian-Lagrangian approach," Geotechnical Engineering, 45, 29-39.
6. 許偉勳 (2022), 「嵌入式拖錨貫入行為數值模擬」, 國立成功大學水利及海洋工程研究所學位論文。



財團法人臺灣營建研究院
TAIWAN CONSTRUCTION RESEARCH INSTITUTE
231 新北市新店區中興路二段190號11樓 www.tcric.org.tw

歡迎向本院洽詢
TEL: (02) 8919-5000
FAX: (02) 2911-3541

業務範圍

本院以問題導向之整合研究為出發點, 將基礎研究的成果加以拓展, 並轉化成產業界立即可用之服務推廣和教育訓練, 以服務營建產業中相關之廠商、行政單位以及研究單位, 以滿足其在運作上之需求。另一方面, 亦同時加強與國內外產官學界之交流合作, 以掌握最新的產業發展資訊, 並加強與世界之互動關係。

驗證發展

2006/12	推動資源再利用驗證制度
2003/08	推動中華民國營建科技審查制度(CETES)
2001/04	推動GRCS優質鋼筋混凝土建築工程驗證制度
2000/03	推動GRMC優質標準制度
1998/07	執行營建類ISO稽核

現正推動業務

- 碳盤查及碳足跡計算與輔導認證
- 離岸風機技術整合研究計劃
- 無人機影像辨識與人工智慧之應用
- 竹產業關鍵技術發展整合計畫



我們的服務

工程技術與管理研究所

1. 非破壞性檢測技術之應用研究
2. 施工困難工程之處理研究
3. 設施維護管理之參數分析與管理研究
4. 工程災害及工程風險之規劃與評估研究
5. 永續生態工程研究
6. 大地構造物設計程序及規範研究
7. 新材料 / 工法應用可行性分析
審查與驗收 / 規範產出與市場化服務
8. 兩岸合作交流服務
9. PMIS雲端系統服務
10. BIM建築資訊模型導入服務
11. 工務資訊系統導入服務

產業資訊與推廣處

1. 工程概估資料庫建置與維護
2. 常用價格資料庫建置與維護
3. 維護策略檢討及維護預算編列
4. 規範維護與管理標準化服務
5. 促參案件評估與輔導活動
6. 履約及專案管理
7. 都市更新及規劃顧問諮詢服務
8. 教育訓練及工程品質訪視輔導
9. 設施安全鑑定與產品性能驗證

工程鑑識中心

1. 施工損害鄰房鑑定
2. 建物結構安全評估、監測 / 監控鑑定
3. 建物瑕疵修補及估價鑑定
4. 給付訴訟之價格及數量鑑定
5. 大地工程或特殊地質鑑定
6. 建材規範衍生之爭議鑑定
7. 跨領域之事故鑑定 (土建工程事故涉及機電、化工或其他特殊領域)
8. 起訴前或訴訟中之展延工期事由評估、衍生費用評估

出版品



營建知訊



營建物價



綠建材專刊



植栽手冊



離岸風場之開發、營運與管理

林庭宇／風睿能源股份有限公司事業發展及投資 總監

張景祥／風睿能源股份有限公司運維 副總工程師

王天佑*／風睿能源股份有限公司基礎技術 總監

本文以開發商之觀點，分享離岸風場之開發、營運及管理之經驗。並總結離岸風場開發之成功因素，主要在於以技術為基礎，進行風險規避以及財務規劃之安排。風睿能源（SRE）立足台灣放眼亞洲，積極擴展海外版圖，陸續在日本、韓國、澳洲等市場與當地區域夥伴洽談合作開發機會。其中，許多當地夥伴看重的是風睿能源（SRE）能將發展一個從零到有的市場逾十年的實戰經驗帶到新市場，希望能共同推動亞太地區能源轉型，達到淨零碳排的永續目標。

關鍵詞：離岸風電、區塊開發、風險管理

ABSTRACT

The experience of offshore wind farm development, operation and maintenance were shared in this article based on offshore wind farm developer's view point. The success factors of offshore wind farm development were summarized as performing risk avoidance and financial planning based on technology. Synera Renewable Energy (SRE) is a leading developer who standing in Taiwan and developing offshore wind farm among Asia-Pacific region including Japan, Korea and Australia. Many international partners value SRE's more than 10 years of experience in developing markets from scratch. SRE's vision is to jointly promote the energy transformation in the Asia-Pacific region and achieve the sustainable goal of net-zero carbon emissions.

Keywords: Offshore Wind, Zonal development, Risk Management

台灣離岸風電之發展歷程

溫室氣體減量以及發展替代能源已是國際共同目標及趨勢，其中離岸風電開發是台灣為提升再生能源自主比例，達成 2050 年淨零碳排之長期願景目標的重要再生能源來源。離岸風電產業於台灣以「先示範、次潛力、後區塊」逐步建置我國離岸風力之基礎。針對第一階段示範獎勵，我國於 2016 年完成兩座示範機組、2019 年

底完成首座離岸風電示範風場（即海洋風場）建置正式營運，台電離岸風電第一期風場續於 2021 年完工，完成示範階段性任務；潛力場址開發階段亦規劃在 2025 年以前完成 5.7 GW 離岸風場設置；透過示範風場成功建置以及潛力場址順利啟動與建置，政府已於 2021 年公布 2026 年至 2035 年開發 15 GW 容量分配規劃，經由第三階段區塊開發選商與分期開發以達成對離岸風電長期設置裝置量 40~55 GW 之政策目標，參見圖 1。

離岸風場開發經驗

風睿能源（SRE）從海洋風場即參與與主導風場之開發規劃，成功建置台灣首座營運中之離岸風場，是目前台灣離岸風電產業中唯一兼具本土開發、規劃、



圖 1 區塊開發選商規劃（圖片來源：摘自能源局網站 [1]）

* 通訊作者，ty.wang@sreglobal.com

設計、施工與運維等完整面向量能之開發商。且自 2019 年由 Stonepeak 入主成為主要股東後，即在風場開發具有堅強的財務支援為後盾；且透過多年實際開發經驗累積，在開發前、中、後各階段對於離岸風電開發相關之利害關係人亦有獨到之溝通協調能力，重視產業與社群環境高度融合，務實地包納在地意見，反饋於技術或整體專案規劃中。於 2023 年亦完成容量達 376 MW 之海能風場成功併網。目前正著力於 2022 年獲配容量的海盛風場開發工作，預計於 2027 年完成安裝及併網。對預計於明（2024）年投標之區塊開發二期，風睿能源亦積極評估及準備中。

離岸風場之開發工作，就時間上而言，大致可劃分為開發、建置以及營運維護三大階段，如圖 2 所示。開發階段及建置階段係以獲得融資到位（Financial Close, FID）時間點作為劃分；而風場完成建置並併網（Date of Commission, COD）後，即進入營運維護階段。

在開發階段之主要工作著重於各種規畫及準備工作，包括取得環評、水下文資、漁會以及相關單位之同意及許可、電力供應合約（Power Purchase Agreement, PPA）之洽談、工址調查、工程設計、承商發包等等作業。其主要目標為完成認證（Certification）、建立合理之商業模型，並對可能的潛在風險進行辨識及管理，以取得融資方的認同後提供融資。

在風場之建置階段，主要工作即轉化為合約及施工管理。由於離岸風場涉及之供應商數量及種類繁多，常用之合約模式有大統包（Turnkey EPCI）、分類統包以及獨立多合約（Multi-Contract）等模式。大統包由於介面及風險管理係由承商負責，通常發包金額較高；獨立多合約方式雖然總發包金額較高，惟其介面及風險管理係由開發商承擔，其總成本未必較大統包方式低，因此合約執行模式之選擇，實則見仁見

智，需視開發時期之環境條件，如法規要求及供應鏈現況等因素調整。

如同大型工程一般，風場建置時，其進度、預算及時程控制為重要因素。相較於一般之陸上工程，離岸作業時，天氣風險常佔施工費用之很大部分，尤其施工船隻通常均有船期之限制，如因天氣因素使船隻之使用時間延長，常常造成合約之爭議與執行上之困擾。因此在合約制訂與洽談時須著重於考量天氣風險可能帶來之影響。

離岸風場之經營及運維

離岸風場之經營，除了與各公、私部門或團體之充分溝通協調外，其經營成效更有賴於完善的運維及管理策略。離岸風場之設置因設施及功能的不同可概分為風力機（Wind Turbine, WTG）、以及除風力機以外之所有設施，BoP（Balance of Plant），包括風力機基礎結構、海陸纜設施、海上及陸域變電站、運維中心及倉庫等，風場之運維旨在透過妥適之運維策略，在適當的時機經由各式船機設備及人員對風場各項設施進行檢測與維護，以確保各項設施均能發揮其應有功能，俾能正常穩定供電。離岸風場運維主要內容詳圖 3 所示。

離岸風場之維護方式依類型之不同可概分為預防性維護及矯正性維護等兩種；預防性維護主要係透過事先的規畫，針對個別設備的狀態監測或以定期實施的方式，對各項設施及其功能進行檢測與維護，以降低風場各項設施發生故障或損壞之風險，確保所有設施均能穩定發揮其應有功能，預防性維護亦為離岸風場於運維階段所採取最主要之維護方式；矯正性維護則係用於處理各項非預期之故障或損壞，期能透過妥適且有效之維護及修復措施，盡速恢復其應有功能。有關風場運維分類請參見圖 4。



圖 2 離岸風場開發階段（SRE）



圖 3 離岸風場運維主要內容
(圖片來源：摘自 Awareocean 網站 [2])

自從第一階段示範風機及示範風場正式商轉進入運維階段以來，風睿能源（SRE）已投入進行離岸風電運維市場超過六年了，身為台灣首座商轉之離岸風場的運維管理團隊，一路走來我們面臨了法令的不健全、人才的不足、產業供應鏈及運維資源的短缺、當地民眾的不了解、以及社會對離岸風電的各項質疑等各項挑戰，再加上運維相關實務經驗的不足，在營運初期造成了非常大的考驗。面對各項內、外在條件的衝擊，團隊成員除努力充實運維專業技術與管理技能外，亦積極投入與地方之溝通協調及地方各項公益活動，在消弭各方對離岸風電產業疑慮、致力經營地方關係的同時，也配合進行綠能教育之推廣，協助建立正確綠能產業知識；而在運維產業在地化上，也透過年度維護合約之執行媒合國外有經驗廠商與本土廠商之技術合作，或促進國外廠商雇用本地人員並設立分支機構，希望能協助逐步建立本土運維產業供應鏈，充實本土產業量能，目前各運維服務供應商主要技術人員均係以本土人員為主，已初具成效。

近幾年來隨著相關法令及規範的逐漸完備，再加上各風場陸續將完成開發進入運維，運維市場將日趨擴大與成熟。風睿能源作為第一個投入風場開發之本土廠商，在過去累積了多年的運維管理經驗，培養了大量的運維專業人才，也具備最富經驗之運維管理團隊，在發

展風場運維的同時也未忘記善盡企業及社會責任，積極投入地方參與及公益活動，並努力扶植本土產業，在未來仍將一本初衷，持續對台灣的風電產業做出貢獻。

風場開發之成功要素

離岸風場開發之成功要素，主要在於以技術為基礎，進行風險規避以及財務規劃之安排。大致包括四個主要方向：

政府與利害關係者

就過去開發經驗而言，可信賴的法律架構、清楚的審批要求、必要的基礎建設以及良好的利害關係人管理均為影響風場開發的重要因素。在早期的台灣風場開發中，由於法令規章及政府各種許可之申請要求未臻完善，在申請時常無所適從。因此政府的決心與政策的一致性常為最主要的因素，此外基礎建設（如港口、電網建置）的時程及完整性、與地方的共生共榮及環保團體等利害關係者之溝通及共識，均對開發過程具有舉足輕重之影響。

統包商與供應鏈管理

在歐洲離岸風力發電已為一經濟且成熟之能源供應技術，正在朝盡量降低成本方向努力。惟在台灣之產業鏈尚在蹣跚學步之階段，多以引進國外之資源來加速國內產業成熟之方向進行。因此在開發成本上，尚無法與歐洲市場看齊。

為使風場建置工作順利並減少爭議，開發商通常偏好選用具施工相關管理經驗之統包廠商。且統包商應對其下包行為負連帶責任；若是聯合承攬，更應負共同連帶責任。其目的在於如期、如質、如預算地完成任務，必避免有重大訴訟或爭議。為確保專案融資之可行性，選商時亦須考量其長期之供應能力與國際信用評等，母公司之擔保通常也是必須的項目。

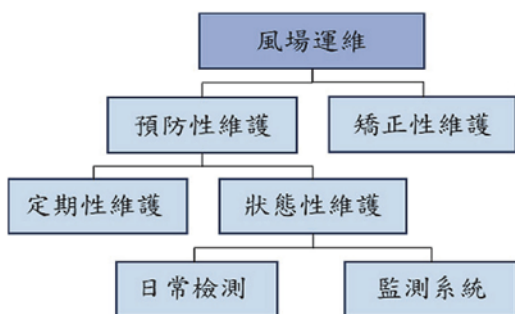


圖 4 風場運維類型

在地化的專案開發

在地化的專案開發是任何風場開發過程中，必須直接面對的問題，舉例來說，區塊開發的產業關聯方案即為是否可取得開發權的主要影響因素。除此之外，攸關設計的颱風、地震海氣象資料、地質及海床條件；升壓站及變電站之電網要求、建築法規與社區關係等，以及風機基礎組件、風機預組裝所需要的港口碼頭條件，甚至陸地運輸之需求，均須在地化的專業人員與利害關係者進行調查、溝通與規劃，才達到對人文及環境最友善的方式，進行風場開發。

財務與融資

離岸風場的融資動輒以新台幣百億計，國內銀行過去受限於法規，無法對離岸風場直接進行融資。由於有經驗的國際銀行可提高流動性、吸引出口擔保銀行的參與等因素，因此專案融資多採有經驗的輸出銀行與國際銀行團隊合作的方式進行。為順利完成專案融資之目的，前述開發階段之重要工作，如各種許可、電力供應

合約、工址調查、工程設計、承商發包及認證等等作業。以建立合理之商業模型，並對可能的潛在風險進行辨識及管理，均為控制開發專案成敗之重要因素。

台灣離岸風電市場對其他鄰近新興市場可提供之利基點，以風睿能源（SRE）自身為例，風場所需前期開發之技術、財務團隊皆從台灣提供既有資源，不僅文化、時區上的差異小，也因交通鄰近方便，可多與當地夥伴安排面對面會議或共同拜訪地方關係人，風睿能源（SRE）透過台灣既有風場處於不同開發、工程、運維的階段，可先提供台灣的實戰經驗再讓他們去打亞洲盃，長期穩定輸出台灣人才至亞太地區參與離岸風場開發各個階段的工作。

參考文獻

1. 能源局網站，https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=96475
2. Awareocean 網站，http://www.awareocean.com/doc/170613_SI_of_Underwater_Environmental_Monitoring_and_IRM_for_BOP_in_Offshore_Wind_Farm--Awareocean.pdf



開路架橋 穿山越水
治河理川 穩土固石



專業、客觀
公益、永續



台北市土木技師公會

Taipei Professional Civil Engineers Association

歡迎掃碼，獲知我們最新消息！





離岸風電人才需求暨培育

— 以沃旭能源為例

陳韻如／沃旭能源股份有限公司 人力資源總監

詹家琪／沃旭能源股份有限公司 企業傳播總監

李欣澄／沃旭能源股份有限公司 數位傳播經理

台灣自 2012 年開始推動離岸風電發展，除了透過產業關聯性政策推動離岸風電供應鏈發展，各法人機構以及風場開發商和業者也積極培訓離岸風電人才。沃旭能源於 2016 年在台灣設立亞太總部，致力打造台灣離岸風電產業生態系，引進全球資源並透過與本地教育機構的產學合作，從無到有培育離岸風電在地人才庫，包括風能世代實習計畫、綠能教育列車、離岸風電供應商輔導金等，更打造台灣運維團隊，確保風場最佳營運效能也開創運維能量在地化，在風場數十年營運期間攜手台灣在地社區開創共榮永續未來。

前言

全球離岸風電領導企業沃旭能源在離岸風電產業擁有超過 30 年經驗，是唯一從風場開發、建置、運維到除役皆有豐富經驗的離岸風電公司，企業願景為創造一個完全以綠能運作的世界，預計 2025 年前實現能源生產業務及企業營運碳中和目標，整體產業價值鏈碳足跡預計 2040 年達到淨零排放。

2016 年沃旭在台灣設立亞太總部深耕在地，2019 年底與合資夥伴完成台灣首座商業規模離岸風場 128 MW 海洋風電。目前正在建置全台最大的 900 MW 大彰化東南及西南第一階段離岸風場，與 920 MW 大彰化西南第二階段及西北離岸風場，完工併網後預計可提供 1.82 GW 乾淨能源，相當於兩百萬台灣家戶一年用電，協助台灣落實淨零轉型。

建立台灣綠能人才庫

建立離岸風電在地人才庫是推動再生能源產業穩步且永續發展的關鍵。我們持續招募在地人才加入沃旭能源，在台北、台中及彰化等地設有辦公室，並打造多元化跨領域的專業團隊，包括運維、工程建設、在地利害關係人管理以及其他領域的台灣人才。沃旭能源提供多樣人才培育計畫，藉由培訓與綠能教育，從零開始培育離岸風電人才庫。

打造運維台灣隊

沃旭能源擁有開發建造運維離岸風場的全方位商業模式，投注額外資源，為台灣儲備世界級的運維能量，確保未來風場在至少 30 年的生命週期中能穩定供應大規模乾淨能源，同時創造優質工作與長期價值。

我們是台灣唯一培育在地離岸風電運維團隊的企業。從 2019 年便開始為離岸風場的運維階段超前部屬，重要進展包括簽訂合約打造全球首艘台灣籍離岸風電運維船、在台中港建造亞太區首座世界級離岸風場運維中心、招募在地人才成立台灣本地運維菁英團隊，目前已有超過 40 人且 100% 為台灣籍。這些努力代表沃旭能源長期深耕台灣、致力為台灣打造全方位離岸風電產業價值鏈的最佳例證^[1]。



沃旭能源打造離岸風電運維台灣隊

全球綠能菁英培訓計畫

本計畫專為應屆碩士畢業生人才（畢業一年內）設計，為期二年，提供二至三次職務輪調機會，體驗不同部門、市場以及不同職務的工作內容，實際參與離岸風場計畫，躋身亞太及國際離岸風電舞台。為了加速推動沃旭能源在全球市場的發展，從零開始培育人才將是重中之重。「全球綠能菁英培訓計畫」職缺依當年度需求進行招募，開放包括台灣在內的全球優秀人才申請。

從 2019 年至今，已有 12 位台灣學生參與此培訓計畫（2019 年 6 位，2020、2021 各 2 位，2022 共 2 位）。全球綠能菁英培訓計畫將持續推出，透過詳盡的培育計畫，協助有興趣的台灣人才藉由此機會累積實際經驗^[2]。

風能世代實習計畫

為培育年輕人才協助推動沃旭能源在台建置離岸風電，公司於 2017 年啟動風能世代實習計畫，為希望在離岸風電產業累積實務經驗，有高度熱忱，善於與多國文化的同事共事，樂於挑戰新事物的研究生提供實習機會。自計畫啟動以來，已有超過 36 位實習生加入，其中 10 位在計畫結束後透過申請、面試，在沃旭正式開展綠能職涯。

沃旭能源大葉大學「離岸風電學徒制計畫」

2019 年開始，沃旭能源和大葉大學合作推動全台首個落實運維人才在地培育的產學合作計畫「離岸風電學徒制計畫」，這是沃旭在亞太地區創辦的第一個學徒制，透過與彰化地區的大學合作，結合我們領先全球的產業經驗與台灣堅實的教育系統，共同攜手培育離岸風電運維人才，促使彰化成為台灣綠能重鎮。入選的學生能得到完整的訓練，表現傑出，且具意願的學生入選為大葉「離岸風電學徒制」計畫之後，從大三起享有學雜費、住宿費及生活費補助。到了大四跟隨沃旭專家參與大彰化離岸風場之風機保養維修實習。受訓合格的學徒也有機會成為沃旭正式員工^[3]。

沃旭綠能獎學金

沃旭綠能獎學金從 2019 年舉行至 2022 年總共舉辦 4 屆，每年提供 8 個名額，以鼓勵獲獎者在學術研究領域的傑出表現，協助他們進行離岸風電相關的學習和研究，促進台灣離岸風電及再生能源產業發展，

為台灣離岸風電產業單一受獎者獲獎金額最高的獎學金計畫。此外為協助獎學金得主能和沃旭能源的全球專業網絡接軌，我們運用全球資源安排沃旭能源專家擔任專屬導師，全力培育台灣年輕人才發展離岸風電的專業知識和技能^[4]。

「能源轉型－彰化真風神」綠能教育列車

沃旭能源的願景是創造一個完全以綠能運作的世界。永續力就是競爭力，為了讓彰化子弟了解在地優勢並與世界接軌，沃旭能源 2022 年與彰師大深化合作，共同規劃綠能教育課程，根據 108 課綱精神設計，經過彰師大、國中小教師及相關專家審議，成為可被國小教師運用的環境與綠能教學素材，作為正式課程之補充。

彰師大與沃旭透過本次教育合作，培訓深入彰化 60 位綠能種子教師，共同推動再生能源教育普及化，讓綠能教育從小紮根落地彰化。為彰化下一代提供獨一無二的學習機會，藉由手作實際探索，讓孩子主動快樂學習，得到最尖端的離岸風電知識，培養淨零時代必備的永續思維^[5]。

兒童綠能教育繪本

沃旭能源 2019 年特別引進榮獲丹麥圖書設計大獎的原創環境教育繪本《這是我的家嗎？》，協助父母與 5 至 8 歲的孩子們氣候變遷相關知識，創造家庭成員主動討論環境保護話題的良機。《這是我的家嗎？》的故事中小女孩為了尋找「這是我的家嗎？」的答案，經由生活在不同環境的動物引領之下展開旅程。故事內容引領孩子一步一步思考，我們的家不只限於居住的房子，而是整個地球，並與所有生物共享。人人都應以實際行動愛護周遭的環境生態，守護自己的家園。



「能源轉型－彰化真風神」綠能教育列車培訓 60 位綠能種子教師共同推動再生能源教育



沃旭能源以榮獲丹麥圖書設計大獎的原創環境教育繪本《這是我的家嗎？》傳遞氣候變遷知識



沃旭能源提供離岸風電供應商輔導基金為健全本土供應鏈注入關鍵能量

2021 年四月我們與入圍金鐘獎最佳兒少節目主持人的米可白合作，以其豐富的肢體表情，具有感染力的聲音為為彰化家扶中心 56 位家長及兒童讀繪本說故事，引導孩子們認識氣候變化，啟蒙環境保護意識，讓環境教育向下扎根^[6]。

離岸風電供應商輔導基金

沃旭致力推動台灣離岸風電價值鏈發展，對於有意加入離岸風電產業鏈下游的本地企業，「離岸風電供應商輔導基金」額外提供專業與資源，為健全供應鏈本土化注入關鍵能量。透過培育本土離岸風電專業人才以及推動離岸風電技術本土化，支持這些潛力供應商提升技術和標準、訓練培育人才，成功跨入離岸風電產業，進一步推動並建立產業發展良好環境。

2020 年起共 18 個月，協助超過 40 家在地企業提升技術能量，橫跨離岸風電產業供應鏈。其中包括 108 位在地人才通過國際風能組織（Global Wind Organisation, GWO）離岸風電基本安全訓練，並輔導 82 位焊接技師取得高階焊工證照，健全離岸風電產業在台發展^[7]。

結語

沃旭能源期盼藉由開發中的離岸風場計畫，協助台灣加速能源轉型、對抗氣候變遷。同時持續打造兼顧自然環境、以人為本的健全離岸風電產業生態系，攜手在地社區開創共榮永續的未來。

參考文獻

1. Ørsted sends first batch of Taiwanese O&M technicians for training secondment in the UK, <https://orsted.tw/en/news/2021/05/first-taiwanese-technicians-training-in-uk>
2. 沃旭能源培育風電新世代啟動全球綠能菁英及電力人才培訓計畫, <https://orsted.tw/zh/renewable-energy-solutions/offshore-wind/our-projects/greater-changhua/chw1/news/2020/12/2020-graduate-and-els-programme>
3. Ørsted, Da-Yeh University select first batch of students to begin Apprenticeship Programme, <https://orsted.tw/en/news/2021/08/first-batch-apprentice>
4. Green Energy Scholarship Programme, <https://orsted.tw/en/about-us/education-training-and-r-d/green-energy-scholarship-programme>
5. Ørsted and NCUE activate first joint green energy syllabus, bringing offshore wind into school classrooms throughout Changhua, <https://orsted.tw/en/news/2022/02/green-syllabus>
6. 共讀繪本－啟蒙兒童環保意識, <https://orsted.tw/zh/news/2021/04/childrens-book-event-cff>
7. Ørsted awards Offshore Wind Industrial Development Fund to support practical training and technological upgrade projects, <https://orsted.tw/en/news/2021/01/idf-awardee>





應用混響衰減估測於拖航水槽之材料吸音率評估

吳柏賢* / 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 助理教授

陳冠宇 / 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

混響時間是指聲音強度由初始強度下降 60 dB 所需的時間，為評估封閉空間內部聲學特性的重要參數之一，根據聲音強度衰減曲線的生成方式不同，大致可區分為直接量測之噪音中斷法以及間接量測之脈衝響應積分法。本研究針對單頻、最大長度序列 (MLS) 訊號應用於噪音中斷法，以及 MLS、指數掃頻 (ESS) 訊號應用於脈衝響應積分法，於拖航水槽之水下環境中進行混響衰減估測分析，討論各種訊號處理參數（如：訊號週期長度、步階長度）對混響時間估算的影響。此外，更進一步將混響衰減估測技術應用於水下材料吸音率評估，實驗於成功大學大系統及船舶機電工程學系之拖航水槽中進行，結果顯示出各種方法對於估測混響時間的一致性，皆可有效運用於水中材料之吸音率評估，但使用寬頻訊號可在相同準確性下，大幅縮短量測時間，提高整體試驗效率。

關鍵詞：混響時間、最大長度序列訊號、指數掃頻訊號、脈衝響應積分法

前言

科技快速發展雖然帶來了國人生活水準的提高，不過也同時帶來了噪音汙染問題，一些科技產品與設備可能會產生噪音，例如：車輛噪音、建築工地、機械設備等，人們在生活與工作的環境中充斥著各種噪音源，這可能對他們的生活品質和健康造成負面影響，因此，科技發展帶來的噪音汙染問題需要得到重視。評估一個空間受到噪音汙染的程度，除了直接量測噪音分貝數之外，另一個方法就是分析該環境的混響時間 (Reverberation Time, RT)，混響時間是指聲音強度由初始強度下降 60 dB 所需的時間 (T_{60})，為了控制室內空間的混響時間，避免混響時間過長對人們生活品質造成影響，最常見的方式就是在空間中配置吸音材料，而要得知吸音材料的吸音效果，也可以透過測量混響時間來評估其吸音率。混響時間的量測過程，一般可透過分析聲音強度的衰減曲線，根據聲衰減曲線

的生成方式不同，大致可區分為直接量測之噪音中斷法 (Noise Interrupt Method) 以及間接量測之脈衝響應積分法 (Impulse Response Integration Method)。

噪音中斷法^[1]是計算當音源關閉時，聲音強度下降 60 dB 所經歷的時間，由於音源關閉瞬間容易伴隨著一段脈衝訊號，因此通常會擷取低於音源強度 5 dB，作為衰減曲線的初始值，並設定高於背景噪音 10 dB 作為衰減曲線的終點，避免背景噪音影響量測結果。初始點連接到終點的部分即為聲音衰減曲線，不過實際情形下，音源要產生高於背景噪音 60 dB 以上的聲音，是比較難達成的，通常可計算 T_{20} 或 T_{30} 來反推 T_{60} 。獲得衰減曲線後，可透過衰減曲線斜率分析混響時間。

六點法^[1]是另一種以噪音中斷法為基礎的分析方法，該方法由衰減曲線中選取前 3 點及後 3 點（共 6 個點），並匯集各筆資料、各通道內的 6 點衰減參數，利用最小平方誤差法 (LMS) 進行線性回歸曲線擬合，分析衰減曲線斜率與混響時間。該方法優點是一次處理全部資料，分析數據較方便且快速。

* 通訊作者，z11008010@ncku.edu.tw

脈衝響應積分法^[2]是假設空間聲場為一個線性非時變系統 (Linear Time-Invariant Systems, LTI)，系統的輸出訊號 $y(t)$ 是根據輸入訊號 $x(t)$ 和脈衝響應 $h(t)$ 通過捲積方式計算出來，其中 $y(t)$ 代表麥克風接收訊號、 $x(t)$ 代表喇叭輸出訊號，通過量測空間脈衝響應可分析空間中的聲學性質，如房間的混響時間和清晰度參數等。對於一個 LTI 系統進行量測，最理想方式是產生一個理想脈衝於系統中，但現實中不存在一個無限窄、且無限高峰值的脈衝，聲學常用的脈衝訊號有：鼓掌聲、槍聲、氣球爆破聲，但這類訊號仍非無限寬頻，通常會在低頻上有缺失，且不易產生相同訊號，不利於重複性實驗。

本研究採用兩種寬頻訊號於脈衝響應積分法，第一種寬頻訊號為最大長度序列 (Maximum length sequence, MLS)，MLS 具有自相關函數 (Auto correlation function) 近似於脈衝訊號的特性，當喇叭輸出為 MLS，藉由將麥克風接收訊號與喇叭輸出訊號進行交相關運算 (Cross correlation)，理論上即可獲得系統的脈衝響應。第二種寬頻訊號為指數正弦掃頻訊號 (Exponential Swept-Sine, ESS)，ESS 可在任意選定頻寬範圍內形成調頻波，並且其反函數濾波器具有解析解，文獻表示該訊號對於雜訊與非線性效應具有良好的抑制能力^[3]。

獲得空間聲場之脈衝響應後，對其做積分處理可得到聲場衰減曲線，其中脈衝響應積分的衰減模式近似於指數衰減，雜訊則會隨時間積分長度縮短而減少，因此聲場衰減曲線由非線性聲場衰減與線性雜訊衰減兩條曲線共同組成，需使用非線性回歸進行曲線擬合，分離出非線性聲場衰減曲線斜率與混響時間。其中脈衝響應積分的衰減模式近似於指數衰減，雜訊則會隨著時間經過所剩的訊號長度縮短而減少。

吸音率的量測方法主要分成兩種，分別是阻抗管法及迴響時間法，阻抗管法主要測量正向入射吸音率，混響時間法則可測量平均吸音率。本研究將使用混響時間法於水下環境，藉由量測吸音材料置入拖航水槽前後的混響時間變化，評估水中材料的吸音率。此外，研究中也將導入噪音減少係數 (Noise reduction coefficient, NRC)

與吸音平均值 (Sound absorption average, SAA) 作為水中材料吸音效率的量化指標。

聲學理論

擴散聲場模型

根據簡正模態理論，當聲源頻率越高，需要更多簡正模態相互疊加來描述聲場，此時聲場近似均勻分布，可改以聲線方式描述聲場。當聲線經過數次反射與透射後，聲場達到穩定狀態，聲場內任一點能量密度幾乎相同，且任一條聲線傳遞至各方向的機率幾乎相同，此狀態稱為「擴散聲場」或「迴響聲場」。假設聲場中一個能量包，其體積為 dV ，以球座標 (r, θ, ϕ) 表示，如圖 1 所示。

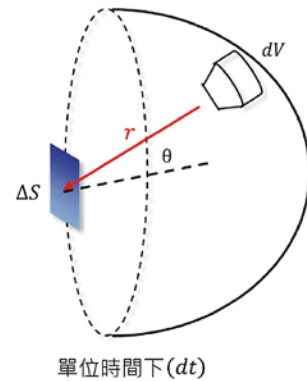


圖 1 擴散聲場模型示意圖

$$dV = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, dr \quad (1)$$

上式中， $r = Cdt$ ， C 為聲速， dt 為單位時間。若能量以法線角度 θ 入射到邊界微小面積 ΔS ，則面積 ΔS 接收到的能量為：

$$\Delta E = \frac{\varepsilon dV}{4\pi r^2} \cos\theta \, \Delta S \quad (2)$$

上式中， ε 為聲場能量密度。考慮半球體內，所有能量入射到面積 ΔS 的能量總和為：

$$dE = \int \Delta E = \frac{\varepsilon C}{4} \Delta S dt \quad (3)$$

單位時間入射到單位面積邊界上的能量 (隨機入射聲強) 可表示如下：

$$I_r = \frac{dE}{\Delta S dt} = \frac{\varepsilon C}{4} \quad (4)$$

單位時間內，空間邊界上吸收到的總能量 (聲功率) 可表示如下：

$$E = \frac{\varepsilon C}{4} A \quad (5)$$

上式中， $A = \bar{\alpha} S$ 為總吸音量 (或稱有效吸音量)， $\bar{\alpha}$ 為平均吸音率，其範圍介於 0 到 1 之間的數值，當 $\bar{\alpha} = 0$ 代表聲音能量經過材料時完全被反射，相反的， $\bar{\alpha} = 1$ 代表聲音能量完全被材料給吸收，吸音率越高，代表材料吸收聲音的能量越強。根據能量守恆關係，擴散聲場的動態方程式可近似為一階微分方程：

$$V = \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{AC}{4}\varepsilon = W \quad (6)$$

上式中，等號左側第一項表示聲場能量增加的部分，等號左側第二項表示邊界吸收能量的部分，等號右側為音源輸出功率。假設聲源於 $t = 0$ 時刻開啟，式 (6) 可表示為：

$$V\dot{\varepsilon} + \frac{AC}{4}\varepsilon = Wu(t) \quad (7)$$

擴散聲場的一階微分方程解為：

$$\varepsilon(t) = \frac{W}{AC} \left(1 - e^{-\frac{AC}{4V}t} \right) \quad (8)$$

當時間 $t \rightarrow \infty$ ，擴散聲場達到：

$$\varepsilon(\infty) = \frac{W}{AC} \quad (9)$$

假設聲源於 $t = 0$ 時刻關閉，式 (6) 可表示為：

$$V\dot{\varepsilon} + \frac{AC}{4}\varepsilon = V\varepsilon(\infty)\delta(t) \quad (10)$$

擴散聲場的一階微分方程解為：

$$\varepsilon(t) = \frac{W}{AC} \exp\left(-\frac{AC}{4V}T_{60}\right) = \frac{W}{AC} \exp(-\bar{\alpha}Nt) \quad (11)$$

上式中， $N = C/MFP$ 為聲音在空間中每秒的反射次數， $MFP = 4V/S$ 為平均自由路徑 (Mean Free Path)， V 為聲場體積， S 為聲場表面積。在空間中，聲波撞擊到邊界時，一部份的聲音會被邊界吸收，另一部份的聲音會被邊界反射，經過多次反射後，聲波會以各種不同角度持續撞擊邊界且均勻分佈於空間，此時關閉音源，可測得混響時間。根據 T_{60} 定義，聲壓位準降低 60 dB (或聲場能量密度降低 10^{-6} 倍) 所需時間，代入式 (11)：

$$\exp\left(-\frac{AC}{4V}T_{60}\right) = 10^{-6} \quad (12)$$

式 (12) 經整理，得混響時間：

$$T_{60} = \frac{24V \ln 10}{CA} = \frac{55.262V}{CA} \quad (13)$$

上式又稱為沙賓公式 (Sabine's Formula)。

艾寧公式

假設空間中的平均吸音率為 $\bar{\alpha}$ ，時間 $t = 0$ 時聲強為 I_0 ，當聲音經過 n 次反射後，聲強可表示為：

$$I_n = (1 - \bar{\alpha})I_{n-1} = (1 - \bar{\alpha})^n I_0 \quad (14)$$

根據 T_{60} 定義，聲壓位準降低 60 dB (或聲場能量密度降低 10^{-6} 倍) 所需時間，代入式 (14)：

$$(1 - \bar{\alpha})^n I_0 = 10^{-6} I_0 \quad (15)$$

$$n = \frac{-6 \ln 10}{\ln (1 - \bar{\alpha})} \quad (16)$$

則混響時間：

$$T_{60} = \frac{n}{N} = \frac{-55.262V}{CS \ln (1 - \bar{\alpha})} \quad (17)$$

上式又稱為艾寧公式 (Eyring's Formula)。

平均吸音率估算

材料之平均吸音率可透過混響時間進行估測，假設 T_{60}^I 代表空環境下的混響時間， T_{60}^{II} 代表環境加入吸音材料後的混響時間，當待測聲場邊界的平均吸音率很低時 ($\bar{\alpha} < 0.2$)，可使用式 (13) 之沙賓公式估算材料的平均吸音率，表示如下：

$$\bar{\alpha}_M = \frac{55.262V}{CS_M} \left(\frac{1}{T_{60}^{II}} - \frac{1}{T_{60}^I} \right) \quad (18)$$

上式中， S_M 為吸音材料的表面積。當待測聲場邊界具又一定吸音率時，則需要考慮邊界二次以上反射吸音所造成的影響，聲場邊界的平均吸音可使用式 (17) 之艾寧公式進行估算，表示如下：

$$\bar{\alpha}_B = 1 - \exp\left(\frac{-55.262V}{CS_B T_{60}^I}\right) \quad (19)$$

上式中， S_B 為聲場的表面積。材料之平均吸音率可使用 Milington-Sette 公式進行估算，表示如下：

$$T_{60}^{II} = \frac{-55.262V}{C[S_B \ln (1 - \bar{\alpha}_B) + S_M \ln (1 - \bar{\alpha}_M)]} \quad (20)$$

$$\bar{\alpha}_M = 1 - \exp\left(\frac{A^{II} - A^I}{S_M}\right) \quad (21)$$

其中

$$A^I = S_B \ln (1 - \bar{\alpha}_B) = \frac{-55.262V}{CT_{60}^I} \quad (22)$$

$$A^{II} = \frac{-55.262V}{CT_{60}^{II}} \quad (23)$$

訊號處理分析

聲壓位準

水聽器可接收水下聲波所產生的微小壓力變化，通常取一定週期內的均方根值 (Root mean square, RMS) 來量化聲壓大小，表示如下：

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (24)$$

上式中， $p(t)$ 為水聽器接收訊號， T 為週期時間長度。對聲壓均方根值進行對數運算，聲壓位準 (Sound pressure level, SPL) 定義如下：

$$SPL = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right) \quad (25)$$

上式中， P_{ref} 為參考聲壓，空氣中定義為 2×10^{-5} (Pa)，水中定義為 1×10^{-6} (Pa)，聲壓位準之單位為 dB。

最小平方法

經由噪音中斷法測量聲場的混響衰減聲壓訊號，再透過聲壓位準計算，並參考衰減曲線擷取法則，擷取低於音源強度 5 dB，作為衰減曲線的初始值 (SPL_0)，並設定高於背景噪音 10 dB 作為衰減曲線的終點 (SPL_N)，即可獲得混響衰減曲線，如圖 2(a) 所示。假設聲強呈指數衰減，聲強與時間關係可表示成：

$$I(t) = I_0 \times e^{-\tau t} \quad (26)$$

上式中， $I = P_{RMS}^2$ ， τ 為衰減曲線斜率。對式 (26) 進行對數運算，得：

$$10 \times \log_{10} \left(\frac{I(t)}{I_{ref}} \right) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{I_0 \times e^{-\tau t}}{I_{ref}} \right) \quad (27)$$

或

$$SPL(t) = SPL_0 - 10\tau t \times \log_{10}(e^\tau) \quad (28)$$

其中， $SPL_0 = 10 \times \log_{10}(I_0/I_{ref}) = 20 \times \log_{10}(P_0/P_{ref})$ 。

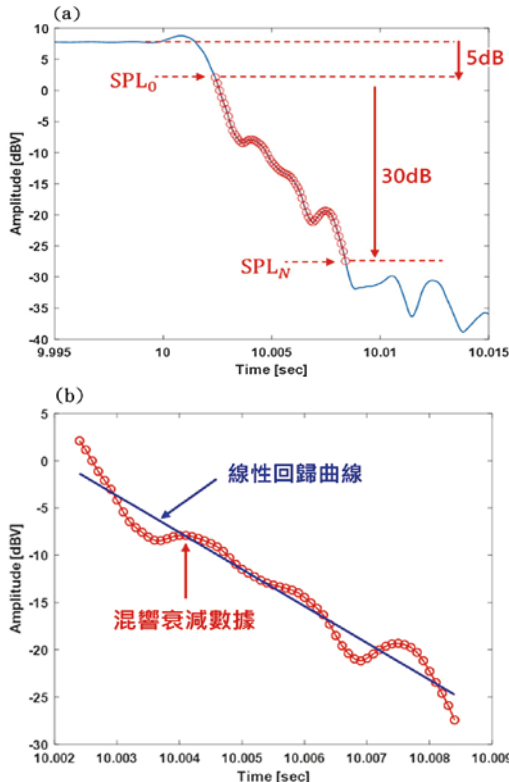


圖 2 最小平方法示意圖：(a) 混響衰減數據擷取；(b) 混響衰減曲線擬合

實際量測之混響衰減曲線可以向量與矩陣形式表示：

$$\begin{Bmatrix} SPL_0 \\ \vdots \\ SPL_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10t_0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 10t_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} SPL_0 \\ \log_{10}(e^\tau) \end{Bmatrix} \quad (29)$$

或

$$\{SPL\} = [T]\{X\} \quad (30)$$

當向量 $\{SPL\}$ 與矩陣 $[T]$ 為已知時，可利用最小平方法 (Least squares method, LSM) 對混響衰減曲線進行線性回歸曲線擬合，如圖 2(B)，表示如下：

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{Bmatrix} = ([T]^T [T])^{-1} [T]^T \{SPL\} \quad (31)$$

則混響衰減時間，計算如下：

$$T_{60} = 6 \ln(10/\tau) \quad (33)$$

上式中，衰減曲線斜率 $\tau = \ln(10^{x_1})$ 。

脈衝響應積分

當聲場的聲音強度呈指數衰減，表示聲場的脈衝響應亦為指數衰減，考慮實際量測之脈衝響應序列包含雜訊，定義如下：

$$h(s) = h_i(s) + n(s) \quad (34)$$

上式中， $h_i(s)$ 為理想脈衝響應函數，為 $n(s)$ 雜訊。定義離算化衰減函數如下：

$$D(t_k) = \sum_{s=t_k}^L h^2(s) \quad (35)$$

上式中， t_k 代表離散時間，單位離散時間 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 可以盡量小已獲得精確的衰減函數，但不可小於取樣率分之一 ($1/F_s$)， L 代表積分長度且必須足夠長，確保 $h(L)$ 中混響脈衝能量可以被雜訊能量所覆蓋。對式 (35) 進行正規化處理^[4]：

$$d(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{s=t_k}^L h^2(s) = 1 - \sum_{s=0}^{t_k} h^2(s) \quad (36)$$

其中

$$N = \sum_{s=0}^L h^2(s) \quad (37)$$

將式 (34) 代入式 (36)，並假設 $h_i(s)$ 與 $n(s)$ 為統計不相關，得：

$$d(t_k) \approx \frac{1}{N} \sum_{s=t_k}^L h_i^2(s) + \frac{\overline{n^2}}{N} (L - t_k) \quad (38)$$

上式中，等號右邊第一項對應於理想脈衝響應函數之衰減函數，可由以下模型表示：

$$f_1(t_k) = a_1 \exp(-a_2 t_k) \quad (39)$$

式 (38)，等號右邊第二項為線性遞減的雜訊功率函數模型：

$$f_2(t_k) = a_3 (L - t_k) \quad (40)$$

將式 (39)、(40) 代入式 (38)，衰減函數可表示為一個非線性函數：

$$F(a, t_k) = a_1 \exp(-a_2 t_k) + a_3 (L - t_k) \quad (41)$$

上式中， $0 \leq t_k \leq L$ ， $a = \{a_1, a_2, a_3\}$ 。式 (41) 之非線性函數可利用 MATLAB 軟體中的非線性最小平方方法套件 (lsqnonlin) 進行求解，脈衝響應積分流程如圖 3 所示。根據式 (33) 定義，混響時間可由下式計算：

$$T_{60} = 6 \ln(0/a_2) = 13.8/a_2 \quad (42)$$

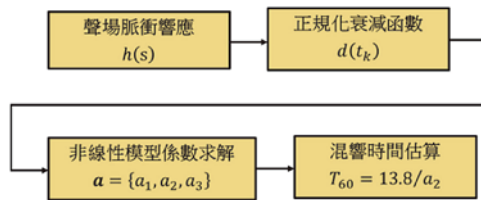


圖 3 脈衝響應積分流程圖

最大長度序列

最大長度序列 (Maximum length sequence, MLS) 屬於一種偽隨機的週期序列訊號，由於其具有自相關函數近似於脈衝函數的性質，因此經常被使用於系統模型鑑別。本研究選擇 MLS 作為音源輸出訊號，通過將麥克風接收訊號與 MLS 進行交相關運算 (Cross-Correlation)，即可獲得聲場脈衝響應，如圖 4(a) 所示，優點是 MLS 具有規律公式，有利於重複性實驗，以降低背景雜訊對於量測的影響。考慮一多項式運算：

$$P(z) = z^n + b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0 \quad (43)$$

MLS 可由以下遞迴公式計算得出：

$$s_{k+n} = a_{n-1}s_{k+n-1} + \dots + a_0s_k \quad (44)$$

例如，使用多項式 $x^3 + x + 1$ 為基礎，則遞迴公式為 $s_{k+3} = s_{k+1} + s_k$ ，並生成以下序列：

$$\{1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, \dots\} \quad (45)$$

應用於音訊處理，0 和 1 的二進制狀態將變更為 ± 1 ，將 0 用 1 取代、1 用 -1 取代，就能得到一段週期長度為 7 的 MLS 訊號：

$$s(t) = \{-1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, \dots\} \quad (46)$$

指數正弦掃頻序列

指數正弦掃頻序列 (Exponential swept-sin, ESS) 屬於一種頻率調變訊號，通常設計在一定頻寬範圍內，由低頻逐漸往高頻增加的正弦波，由於有規律公式，因此有利於重複性實驗。此外，ESS 較 MLS 具有更佳的雜訊比與非線性抑制能力，脈衝函數計算流程如圖 4(b) 所示。ESS 定義如下：

$$\begin{aligned} s(t) &= \sin \left[2\pi f_1 \int_0^t \exp \left(\frac{t'}{L} \right) dt' \right] \\ &= \sin \left\{ 2\pi f_1 K \left[\exp \left(\frac{t}{K} \right) - 1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (47)$$

上式中， f_1 為 $t = 0$ 時的起始頻率、 K 為頻率指數增加率。根據瞬時頻率 (Instantaneous frequency) 與群延遲時間 (Group delay time) 定義：

$$\begin{aligned} f_i(t) &= f_1 \exp \left(\frac{t}{K} \right) \\ t_f(f) &= K \log \left(\frac{f_i}{f_1} \right) \end{aligned} \quad (48)$$

假設起始頻率 f_1 與結束頻率 f_2 間的時間長度為 T ，根據式 (48)，得：

$$\begin{aligned} T &= K \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \\ K &= T / \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

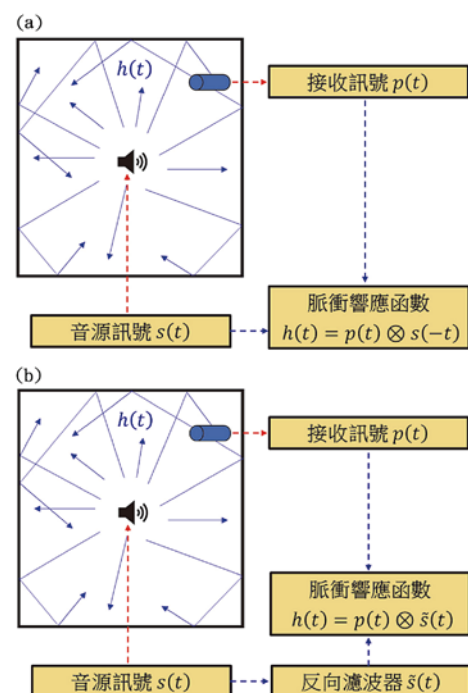


圖 4 脈衝響應計算流程：(a) MLS 訊號；(b) ESS 訊號

參考文獻^[5]，ESS 的反向濾波器可表示為：

$$\tilde{s}(t) = \frac{f_1}{K} \exp\left(-\frac{t}{K}\right) s(-t) \quad (50)$$

數位帶通濾波器設計

由於 MLS 與 ESS 訊號皆屬於寬頻訊號，所求解得到的脈衝響應函數亦為寬頻下的聲場反應，若要了解特定頻寬下的混響時間，則需針對寬頻脈衝響應進行濾波處理。本研究使用數位帶通濾波器進行處理，以下簡述數位濾波器原理，理想低通濾波器之頻率響應定義如下：

$$H(\omega)_{low-pass} = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (51)$$

上式中， ω_c 為頻率上限。式 (51) 經由反傅立葉轉換 (Inverse Fourier transform, IFT)，可得到理想低通濾波器：

$$h(t)_{low} = \frac{\omega_c}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_c}{\pi} t\right) \quad (52)$$

帶通濾波器可由兩個不同頻率之低通濾波器相減獲得：

$$h(t)_{band} = \frac{\omega_2}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_2}{\pi} t\right) - \frac{\omega_1}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_1}{\pi} t\right) \quad (53)$$

上式中， ω_1 為頻率下限， ω_2 為頻率上限。本研究參考三分之一八度音階 (One third octave band) 進行帶通濾波器的頻率上、下限設定，頻率上、下限與中心頻率定義如下：

$$f_c = 2^{\frac{1}{6}} \times f_{\min} = 2^{-\frac{1}{6}} \times f_{\max} \quad (54)$$

例如，中心頻率 $f_c = 125$ Hz，則頻率上限 $f_{\max} = 140.6$ Hz，則頻率下限 $f_{\min} = 111.6$ Hz。

混響聲學實驗

本實驗分別使用單頻弦波、MLS 訊號應用於噪音中斷法，以及 MLS、ESS 訊號應用於脈衝響應積分法，比較不同實驗聲源訊號、實驗方法上的差異。實驗將先於空氣中進行量測與驗證，確認實驗方法可行性後，再於水中環境進行試驗。空氣中，實驗場景包括：一般教室、大型演講堂，聲源頻率涵蓋 125 Hz ~ 12,500 Hz，實驗過程與結果詳述如下。

一般教室

實驗於長 5.7 公尺、寬 5.6 公尺、高 2.7 公尺的一般教室中進行實驗，共架設 9 支麥克風，麥克風擺放

位置於實際課程之同學坐位，各麥克風左右距離 2 公尺、前後相距 1.5 公尺、距離地面 1.3 公尺，如圖 5、圖 6 所示。本實驗包含兩個場景，場景一為無窗簾聲場，場景二為有窗簾聲場，預期可通過混響時間量測，評估窗簾的吸音率。

實驗結果如圖 7 所示，不同實驗聲源訊號與實驗方法，在中、高頻 (630 Hz ~ 1,250 Hz) 皆呈現出一致性，但在低頻範圍則噪音中斷法與脈衝響應積分法開始出現明顯差異，其中又以噪音中斷法之單頻訊號差異最大。可能原因在於教室空間限制，因此低頻的聲場分布主要仍由空間模態主導，與擴散聲場理論假設不符，但使用寬頻訊號 (MLS, ESS) 仍會因各模態相互干擾，降低單一模態造成的影響，因此有較準確的混響時間估算結果。

圖 8 為窗簾開啟前後之各量測方法比較，結果顯示各方法在窗簾開啟後所測得的混響時間，皆低於窗簾開啟前的混響時間，符合實際結果，僅脈衝響應積分法之 ESS 訊號於 160 Hz 及脈衝響應積分法之 MLS 訊號於 400 Hz 出現不合理的估測結果，應為低頻模態影響所導致。

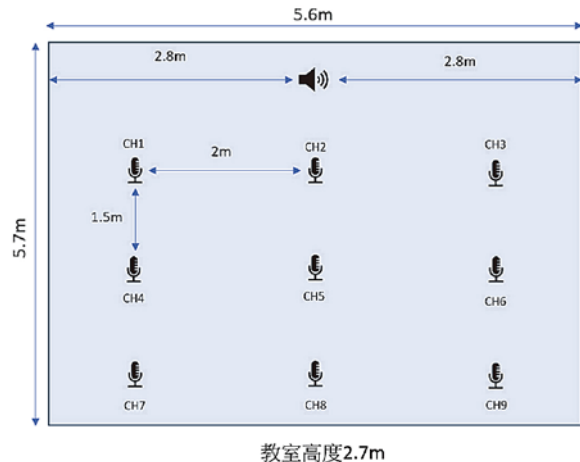


圖 5 一般教室實驗配置示意圖

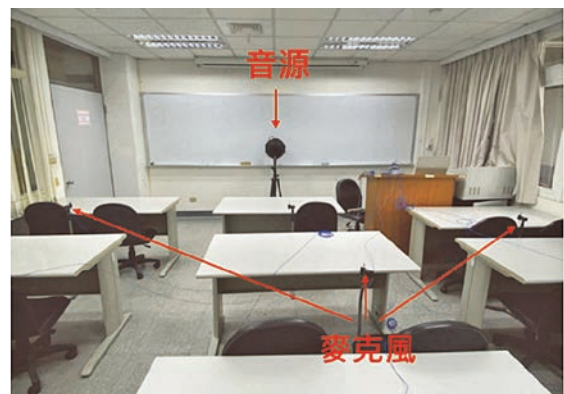


圖 6 一般教室實驗設備配置

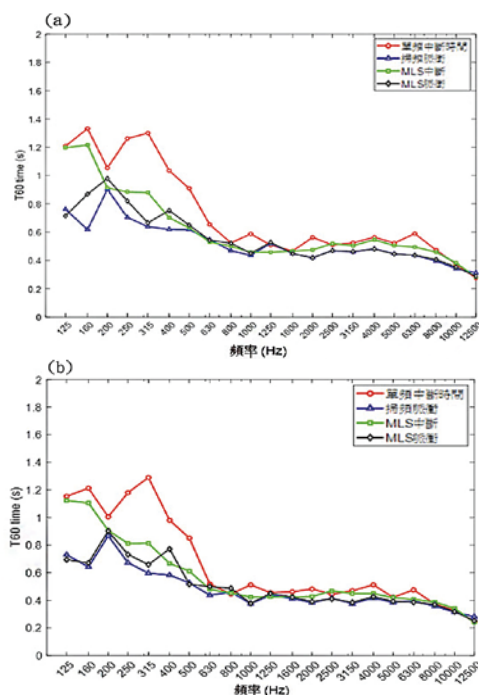


圖 7 一般教室之混響時間分析：(a) 無窗簾；(b) 有窗簾

由式 (18) 可以估算出窗簾的吸音率，如圖 9 所示。

根據 NRC 與 SAA 定義，NRC 是測量材料在 250 Hz、500 Hz、1,000 Hz、2,000 Hz 四個頻率下的平均吸音率，並已接近 0.05 的倍數表示，SAA 則是取 200 Hz ~ 2,500 Hz 共 12 個頻率下的平均吸音率，並已接近 0.01 的倍數表示。窗簾之吸音性能結果如表 1 所示，使用 NRC 時，各方法所評估的吸音率有些微差異，當使用更高標準 SAA 時，各方法結果則更為接近。

表 1 一般教室之 NRC、SAA 吸音率比較

量測方法	音源訊號	NRC	SAA
噪音中斷法	單頻	0.10	0.13
	MLS	0.10	0.11
脈衝響應積分法	MLS	0.20	0.14
	ESS	0.20	0.16

大型演講堂

本實驗單純量測演講堂的聲場混響狀態，實驗於長 23.5 公尺、寬 5.6 公尺、高 2.7 公尺的演講堂中進行，共架設 9 支麥克風，佈置如圖 10 和圖 11 所示。一般而言，以語音為主的環境，需要設計成較短的混響時間，以提升語言的清晰度，以音樂為主的環境，需要設計成較長的混響時間，以增加聽覺的豐富度。因此，播音室、錄音室通常設計混響時間在 0.5 秒以內，講堂、電影院則設計在 1 秒左右，音樂廳會將混響時間拉長至 1.5 秒。

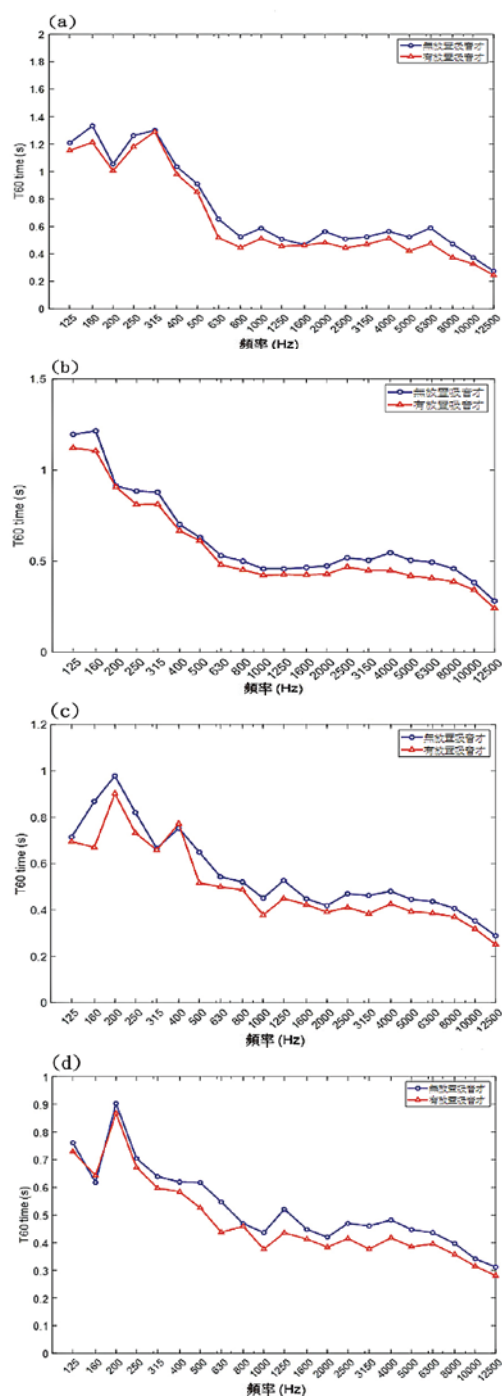


圖 8 一般教室之混響時間分析：(a) 噪音中斷法－單頻；(b) 噪音中斷法－MLS；(c) 脈衝響應積分法－MLS；(d) 脈衝響應積分法－ESS。

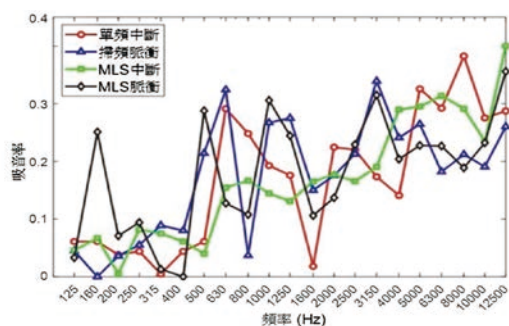


圖 9 一般教室之窗簾吸音率分析

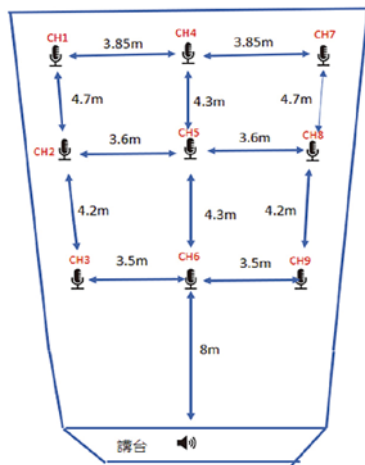


圖 10 大型演講堂實驗配置示意圖



圖 11 大型演講堂實驗設備配置

實驗結果如圖 12 所示，不同實驗聲源訊號與實驗方法，在全頻帶皆呈現出良好一致性，其原因在於演講堂的室內空間體積較一般教室大，聲場分布更均勻且不易受模態影響，因此更符合擴散聲場假設。但仍可發現，在某些頻段下（1,800 Hz ~ 2,000 Hz），噪音中斷法 - 單頻訊號較其他方法容易高估混響時間，因此實際應用上，無論採取何種量測方式，聲源訊號皆需要選擇寬頻訊號為佳。圖 13 是採取六點法之混響時間估算結果，儘管最小平方方法與六點法應用於噪音中法量測上的估算結果差異不大，但仍可提供更為平滑、精確的估算結果。透過上述兩項實驗，驗證本研究所使用的架構與方法可應用於空氣聲場。

拖航水槽

本實驗嘗試於水下環境進行混響時間量測試驗，實驗於成大系統系拖航水槽中進行，水槽尺寸為長 155 公尺、寬 8 公尺、水深 3.4 公尺。由於實驗場景由空氣轉移至水下，相關實驗設備也需更改為水下專用設備，本研究使用 Neptune T335 換能器作為水下音源，B&K 8104 水聽器進行水下收音，如圖 14 所示。實驗於水槽中間段進行，音源放置於水槽底部並且發射面朝上（水面），並於距離 8 公尺至 15 公尺配置三個水聽器進行量測，如圖 15 所示。

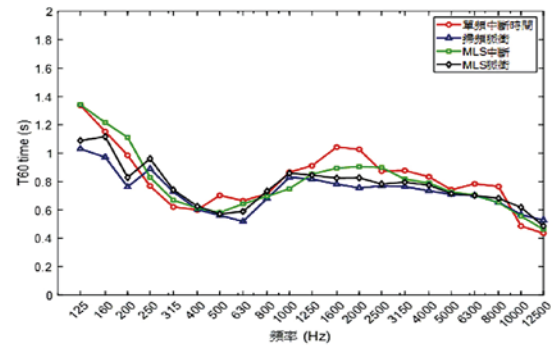


圖 12 大型演講堂之混響時間分析

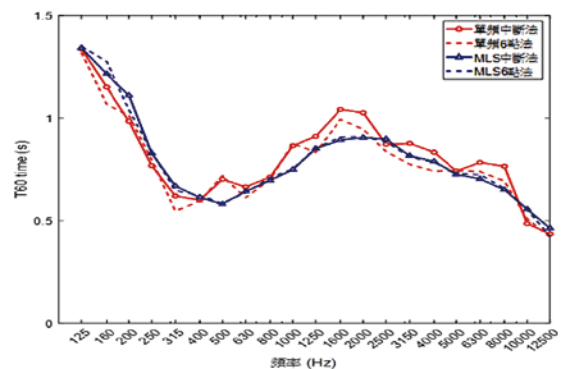


圖 13 大型演講堂之混響時間分析（六點法 vs 小平方法）

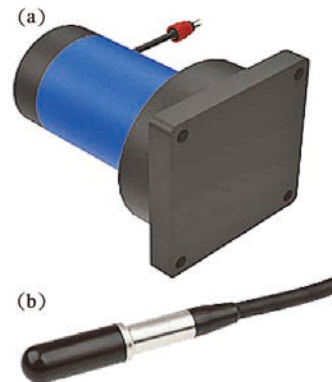


圖 14 (a) Neptune T335 換能器；(b) B&K 8104 水聽器

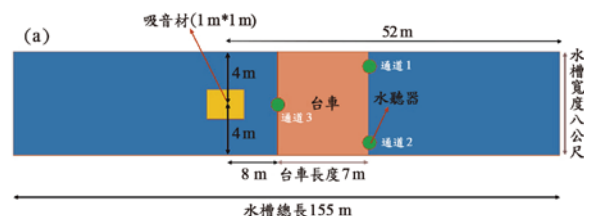


圖 15 拖航水槽實驗：(a) 配置示意圖；(b) 現場

實驗包含兩個場景，場景一為無材料聲場，場景二為有材料聲場，預期可通過混響時間量測，評估水下材料的吸音率。實驗結果如圖 16 所示，不同實驗聲源訊號與實驗方法，在 1,000 Hz ~ 10,000 Hz 皆呈現出一致性，但值得注意的是，水槽在低頻範圍 (1,000 Hz ~ 1,600 Hz) 的混響時間較低，此現象與一般認知 (混響時間隨頻率降低而增加) 有差異，需待後續進一步了解。

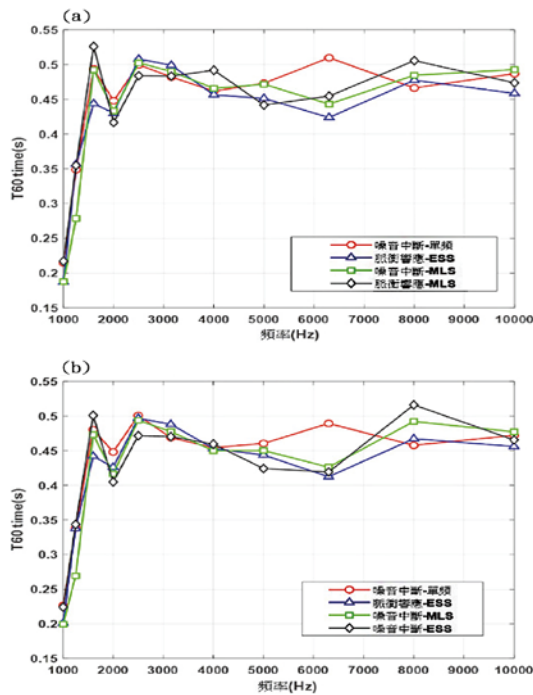


圖 16 拖航水槽之混響時間分析；(a) 無放置材料；(b) 有放置材料。

圖 17 ~ 20 為材料放置於聲場前後之各量測方法比較，圖 21 ~ 24 為混響時間差值分析，結果顯示各方法在低頻 1,000 Hz 皆呈現負的混響時間差，表示材料放置後的聲場吸音率不增反減，此為不正確的量測結果。推測原因仍與聲場模態有關，由於水中聲速較快 (約為空氣的 4.4 倍)，水中 1,000 Hz 與空氣中 226 Hz 的聲波具有相同波長，因此該現象符合一般教室的實驗結果。此外，噪音中斷法-單頻訊號 (2,000 Hz / 2,500 Hz)、噪音中斷法-MLS 訊號 (8,000 Hz)、脈衝響應積分法-MLS 訊號 (8,000 Hz) 也出現負的混響時間差，而脈衝響應積分法-ESS 在 1,250 Hz ~ 10,000 Hz 皆呈現正的混響時間差，較其他三種方式具有更正確的混響時間估算結果。

本實驗使用脈衝響應積分法之 ESS 訊號估算的混響時間差值進行吸音率估算，在水槽體積聲速材料表面積已知條件下，可利用式 (19)-(23) 估算材料吸音率，結果如圖 25 所示。

結論

本研究針對單頻、最大長度序列 (MLS) 應用於噪音中斷法，以及 MLS、指數掃頻序列 (ESS) 應用於脈衝響應積分法，於一般教室、大型演講堂等環境中進行混響衰減估測分析，研究中除了於空氣環境中進行實驗，更進一步應用於水中混響時間估測與水下材料吸音率量測，水下實驗於成大系統拖航水槽中進行。

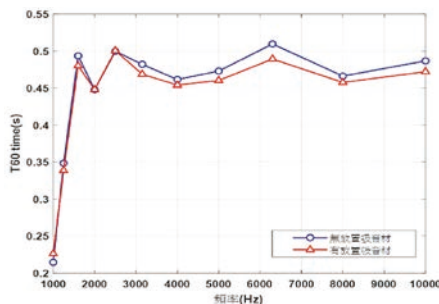


圖 17 水槽之混響時間分析
(噪音中斷法-單頻)

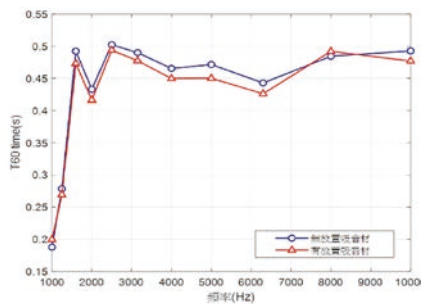


圖 18 水槽之混響時間分析
(噪音中斷法-MLS)

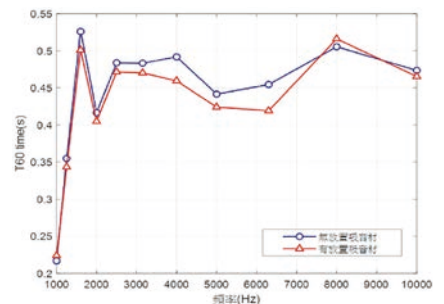


圖 19 水槽之混響時間分析
(脈衝響應積分法-MLS)

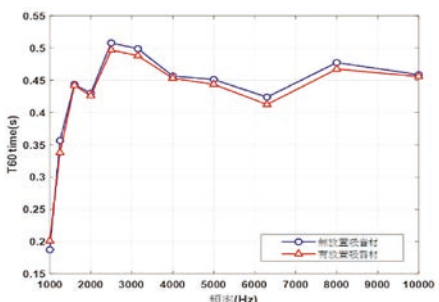


圖 20 水槽之混響時間分析
(脈衝響應積分法-ESS)

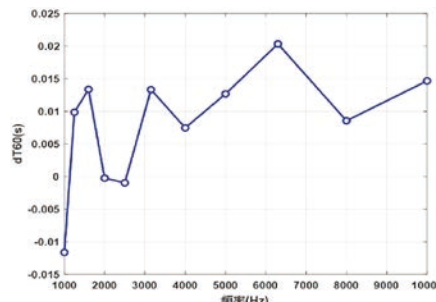


圖 21 水槽之混響時間差值分析
(噪音中斷法-單頻)

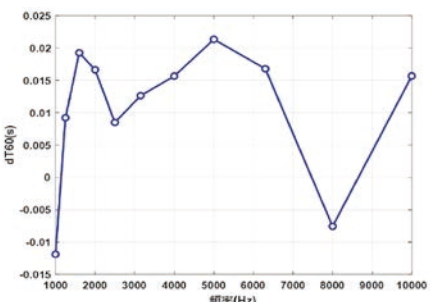


圖 22 水槽之混響時間差值分析
(噪音中斷法-MLS)

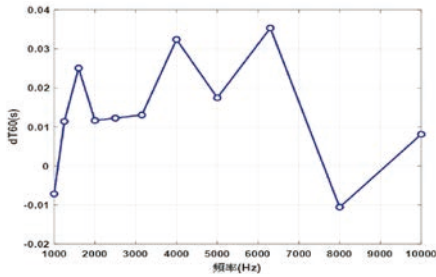


圖 23 水槽之混響時間差值分析
(脈衝響應積分法-MLS)

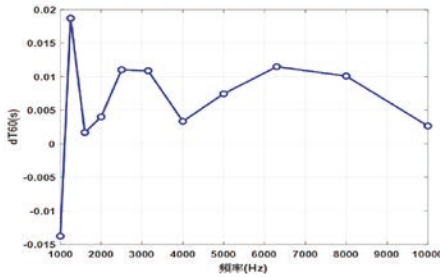


圖 24 水槽之混響時間差值分析
(脈衝響應積分法-ESS)

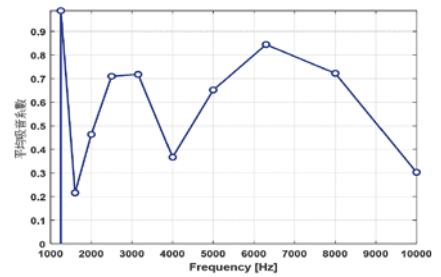


圖 25 水槽之材料吸音率估算
(脈衝響應積分法-ESS)

根據空氣實驗結果，量測環境空間需足夠大，各種方法的混響時間估測結果才能具有良好的一致性，當空間較小時，估測結果容易受聲場模態所影響，其中又以單頻訊號受影響的程度最大，寬頻訊號（MLS, ESS）則因各頻率間的模態相互抵銷，以至於受影響程度較小，因此實驗建議使用寬頻訊號，可維持實驗結果的準確性並縮短量測時間。

根據水槽實驗結果，同樣呈現寬頻訊號具有較佳的估測準確性，此外，根據混響時間差值與材料吸音率估算結果，又以脈衝響應積分法結合 ESS 具有最佳的量測結果。因此，本研究建議使用脈衝響應積分法與 ESS 音源訊號，作為空氣、水下之混響時間量測方法。

參考文獻

1. Massimo Viscardi, Maurizio Arena, "Determination of the Reverberation Time Using the Measurement of Sound Decay Curves," *Appl. Sci.*, **13**(15), 8607 (2023).
2. Ning Xiang, "Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach," *J. Acoust. Soc. Am.* **98**, 2112-2121 (1995).
3. P.Guidorzi, L. Barbaresi, D. D'Orazio, M. Garai, "Impulse Responses Measured with MLS or Swept-Sine Signals Applied to Architectural Acoustics: An In-depth Analysis of the Two Methods and Some Case Studies of Measurements Inside Theaters," *Energy Procedia*, **78**, 1611-1616 (2015).
4. W.T.Chu, "Comparison of reverberation measurements. using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method" *J. Acoust. Soc. Am.* **63**, 1444-1450 (1978).
5. Antonin Novak, Laurent Simon, Frantisek Kadlec, Pierrick Lotton "Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal," *IEEE*, **59**, 2220-2229 (2009).



GTI TEAM

巨廷工程顧問股份有限公司

G T International

監造服務作業
文宣及動畫製作
工程可行性規劃
總顧問及諮詢服務
工程基本及細部設計
技術轉移及教育訓練
計畫許可申請及審查資料
研討會/座談會/工作坊

台北公司

台北市中山區南京東路三段
215號2樓
(02)8712-8966

台中公司

台中市西屯區大墩十九街
186號2樓之1
(04)2328-3866



服務領域

防災預警
水質處理
水文技術
設施營運

管路系統
綜合治水
施工管理
河道治理

永續水庫
防洪排水
海綿城市
水力發電

環境影響
水資源規劃
水環境營造
集水區治理



基於計算流體力學 CFD 之水下載具線型最佳化設計

江易秦／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

洪翊菁／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

邱睦翔／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

蔡欣邦／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

陳永裕^{*}／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 教授

在進行水下載具外型設計時需要考量到許多部份，包含能夠降低水阻的流線型外型、耐水壓結構、重心與平衡、防水密封及能源儲存分佈等項目。為了達成降低水阻力並提高水下載具運動效率以節省能源消耗，水下載具外型的設計必須透過流場分析來了解水下載具在各種航行條件下的受力狀態。為了完成此受力分析，本研究採用 ANSYS Fluent 軟體計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）來進行載具流場模擬與受力分析。水下載具流場採用 CFD 模擬具備多項便利的分析優點。例如，CFD 模擬能夠評估不同外型的水下載具對流場的影響，包含流場壓力、流場速度、流場溫度及流體的力學特性等。透過調整各種的測試場景及操作條件，便能夠評估水下載具在不同場景中的性能變化。此外，CFD 模擬還提供了結構耐水壓的評估，以確認水下載具在不同場景中所承受相應的水壓。這有助於確保水下載具的結構在實際應用中的安全性和可靠性。總的來說，運用 CFD 除了有效節省實驗成本與時間外，同時能夠透過 CFD 模擬結果分析水下載具的操作性能變化，確保水下載具的整體航行性能及可靠度。本研究旨在運用 CFD 模擬進行水下載具外型設計分析，以取得外型最佳化設計，並獲取水下載具之系統模型參數供後續水下載具之控制系統設計。

關鍵詞：水下載具、最佳化設計、計算流體力學、網格細化

前言

本研究預計藉由水下載具線型設計，介紹運用 CFD 軟體進行模擬的流程。此次水下載具線型設計將參考現今服役之多功能型水下載具，如波音 Echo Seeker 以及瑞典紳寶集團（SAAB）-Double Eagle 系列遙控潛水器（ROV）-MKIII PVDS 等，作為主要參考對象，直接根據其外型進行相似性繪圖與流場分析。本研究將使用 ANSYS Fluent 軟體進行 CFD 模擬。研究目標則是透過數值研究來提高水下載具在特定航速下的最佳船體性能，例如：低阻力及高體積效率等。

最佳化水下載體性能的完成，最為重要的設計標的為水下載具所受到的阻力須盡量降低。因水下載具裸船阻力佔總阻力的 70% 左右，故本研究水下載具的線型效能分析將會著重於水下載具裸船外型與阻力間的關係建立。考慮到加工成本和難易度，且多數海軍潛艇及 ROV 皆使用 PMB 型^[1]，因此本研究以此船型方程式為基礎來拉伸圓柱狀 PMB 型水下載具，以達到相似外觀設計的需求。本研究經由改變水下載具方程式中的參數獲得不同的船體外型後，再針對船體進行流體力學模擬，以驗證水下載具在特定線形下之船體性能。本研究將使用 ANSYS Fluent 軟體內建之不可壓縮、三維且穩態的納維爾史托克方程式（Navier-Stokes Equation）來模擬流場環境，輔以 SST $k-\omega$ 模型產

^{*} 通訊作者，yungyuchen@mail.ncku.edu.tw

生紊流，再透過有限體積法（Finite Volume Method, FVM）計算水下載具在水下運動時之受力情形。本計畫預計設計的水下載具外型規格參考對象為瑞典紳寶集團（SAAB）—Double Eagle 系列遙控潛水器（ROV）—MKIII PVDS：「長度 3 m、寬度 1.2 m 及高度 1.3 m」，如圖 1。



圖 1 SAAB Double eagle ROV-MKIII PVDS

由於此款水下載具於前端部分外加裝了偵搜水雷之聲納系統模組，安裝於水下載具船艙的模組會造成載具線型阻力的不易模擬分析，故於以下之研究介紹中將以平滑船艙代替。此款水下載具著重於模組化設計，為了增加艙體空間並兼顧阻力最佳化設計，採參考^[2]之水下載具的長寬比：7-10 為阻力長寬比，並選擇 PMB 水下載具長寬比 7 作為設計基礎做拉伸，以形成扁平化水下載具。

標準水下載具運動數學模型

為了完整描述及分析如圖 2 之水下載具於水中航行時所承受阻力之狀況及其穩定性。於此研究中，將採國際水下載具標準運動數學模型^[1]來探討此次預計開發之水下載具運動行為，設計完成後再進行實體加工製作與拖航水槽阻力實測驗證。此水下載具模型因水阻力係數的不同，其代表之載具外型也不同。

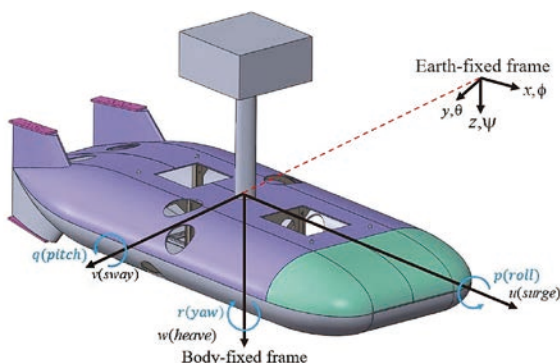


圖 2 水下載具位置與姿態說明

根據前文所定義的水下載具座標系統，可將水下載具的三維運動狀態變數定義為：

$$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1 \ \boldsymbol{\eta}_2]^T = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (2)$$

其中， $\boldsymbol{\eta}$ 為透過大地參考座標系統描述之水下載具位置以及姿態的狀態向量，而 $\mathbf{v}$ 為水下載具以船體座標系統描述之載具本身速度以及角速度量值的狀態向量。

本研究所採用的國際水下載具標準 6 個維度的運動模型為 Fossen 所提出並表示如下^[2]：

$$M\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{ocean} \quad (3)$$

其中， M 是系統的慣性矩陣， $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 為科氏力和向心力的矩陣， $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 為水阻尼矩陣， $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 為系統回復力以及重力， $\boldsymbol{\tau}$ 為輸入水下載具的控制力，而 $\boldsymbol{\tau}_{ocean}$ 則是水下載具航行於海中所受的隨機擾動，如海流。

以下，本研究將說明上述水下載具運動模型中需藉設計與實際量測之流體動力係數有哪些。

模擬目的

運用 CFD 可以模擬水下載具受水阻力之影響，也可以藉由拖航水槽架設力計量測水阻力在各速度下水下載具之受力狀況，即可估算水阻尼矩陣 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 中之水阻力係數。實務上，水下載具六自由度運動行為，其阻尼特性呈現高度非線性和耦合。假設水下載具上述之運動行為可拆解為非耦合運動，擁有三個對稱平面，並且水阻尼矩陣 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 中之參數高於二次項的階次可以被忽略。則 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 將具備對角結構性質，亦即僅在對角線上存在線性一次和二次項阻尼項。

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} - \text{diag}\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\} \quad (4)$$

由 (3) 之水下載具六自由度非線性運動可知 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 矩陣為系統模型中扮演重要的角色。故由 CFD 模擬與估算出各條件下的 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 矩陣參數，可以了解水下載具於巡航階段之受力狀況，並根據分析出之效能進行載具外型修正。

統御方程式

CFD 模擬水下載具於流體中運動的行為，必須符合基本的物理定律，如：質量守恆定律、動量守恆定律和能量守恆定律。因船模水槽拖航實驗通常在等溫情況下進行，故不將能量方程式納入考量。

以下為水下載具於流場中受力分析模擬必須考慮之方程式組合，包含連續方程式、動量方程式及紊流模型等。

連續方程式

連續方程式描述一個流場中的質量守恆，假設一個固定的控制體積，則控制體積內質量隨時間變化率等於控制體積中流體的淨流入率，如式(5)所示：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

其中， u 、 v 、 w 分別為 x 、 y 、 z 方向的速度分量， t 表示時間而 ρ 為流體密度。於此研究的流場模擬程序中，合理假設流場為不可壓縮且定常流，且流體密度不隨時間變化。故，上式可簡化如式(5)所示：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式(6)可進一步改寫成式(7)之向量表示式，

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

其中， $\mathbf{V} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}$ 而 $\nabla \equiv \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z}$ 。

動量方程式

根據牛頓第二運動定律可得動量方程式描述之控制體積的流體動量時變率等於控制體積上的合力。若流體為不可壓縮流，則可以表示如式(8)：

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (8)$$

其中， μ 為黏滯係數， P 為壓力，以及

$$\mathbf{g} = g_x \bar{i} + g_y \bar{j} + g_z \bar{k} \quad (9)$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (10)$$

方程式(8)也就是著名的納維爾史托克方程式，其各項之物理意義如下：

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] : \text{單位體積之慣性力}$$

∇P ：單位體積之壓力

$\rho \mathbf{g}$ ：單位體積之物體力

$\mu \nabla^2 \mathbf{V}$ ：單位體積之黏滯力

紊流模型

當雷諾數逐漸增大時，流體慣性力的影響會逐漸主導流場特性，從而發生流場在固定位置上的物理量（如

速度、壓力等）隨著時間改變而不規則變動，此現象為紊流。為了更精準的模擬各種流場狀況，研究人員根據觀察到的不同情形，開發出了多款的紊流模型。

本研究模擬條件之雷諾數皆大於 10^7 ，故流場為紊流，因此需要使用適當的紊流模型來模擬實際的流場狀況。於此研究中，吾人將採用雷諾平均納維爾史托克方程式（Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS）作為流場模擬用之紊流模型，並使用 SST $k-\omega$ 剪應力傳輸模型求解雷諾應力項。根據文獻^[3]所述，RANS 紊流模型對於 PMB 型水下載具的阻力預測最適合且精準。於 ANSYS Fluent 軟體設定中，本研究紊流模型選定後，相關參數與環境設定如圖 3 所示。

雷諾平均納維爾史托克方程式（RANS）

如式(10)所示，RANS 是對納維爾史托克方程式做時間平均處理，亦即將物理量 ϕ 表示成平均物理量 $\bar{\phi}$ 與瞬時物理變動量 ϕ' 之和，而平均物理量的定義如式(11)所示。

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (11)$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(t) dt \quad (12)$$

將紊流的速度及壓力以式(11)及式(12)的方式改寫並代入連續方程式及動量方程式則可得到雷諾平均納維爾史托克方程式如下式：

$$\rho \nabla \cdot (\bar{u} \bar{\mathbf{V}}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left[\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right] \quad (13)$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{v} \bar{\mathbf{V}}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left[\frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right] \quad (14)$$

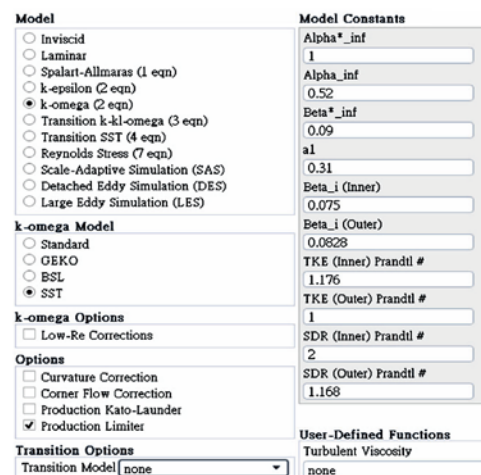


圖 3 紊流模型設定

$$\rho \nabla \cdot (\bar{w} \bar{\mathbf{V}}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right] \quad (15)$$

RANS 相較於納維爾史托克方程式，額外多出的項為紊流的瞬時物理變動量造成的影響，稱之為雷諾應力，可以矩陣表示如下：

$$\mathbf{R}_{ij} = \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式 (16) 之雷諾應力可透過 SST $k-\omega$ 模型求解。其優勢在於結合了 $k-\varepsilon$ 模型的完全發展紊流和 $k-\omega$ 模型流固邊界紊流之優點^[4]。這使得 SST $k-\omega$ 模型具備在遠場及流固邊界皆能很好的描述紊流現象的性質。

數值方法及求解器

本研究使用 ANSYS Fluent 模擬水下載具的流場和受力狀況。Fluent 使用有限體積法 (Finite Volume Method, FVM) 將控制方程式先離散化，以利於電腦計算。其優點在於網格適應性佳，且有良好的守恒性^[5]，因此可有效地解決複雜的工程問題。然而，在流場的數值模擬中，可能出現因離散化的操作，形成截斷誤差進而產生數值擴散。根據國際拖航水槽會議 (International Towing Tank Conference, ITTC) 的建議，二階迎風法 (Second Order Upwind, SOU) 在準確性和穩健性方面具有良好的表現，故在求解對流離散化時被廣泛運用^[6]。

在 ANSYS Fluent CFD 軟體中，常用的流體力學求解演算法，包含 SIMPLE (semi implicit method for pressure linked equations)、SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Consistent)、PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 及 Coupled。

以下介紹較常被運用於求解的方法：SIMPLE 與 SIMPLEC。

SIMPLE 與 SIMPLEC 演算法

SIMPLE 為計算流體力學中常用的求解流場的數值方法。流體力學的基本控制方程式是基於質量守恒定律、動量守恒定律及能量守恒定律。連續方程式代表質量守恒定律，納維爾史托克方程式代表動量守恒定律，能量方程式代表能量守恒定律。

SIMPLEC 演算法的核心概念是從連續方程和動量守恒方程推導出壓力項，並通過修正速度場以滿足連續方程，其演算流程如下：

1. 速度場求解：求解動量守恒方程以得到速度場，此速度場尚未完全滿足連續方程。
2. 壓力場求解：接著，將求解得到的速度場代入帕松方程，進行壓力場的求解。
3. 速度場修正：利用求解得到的壓力場，修正速度場，以確保速度場滿足連續方程。
4. 迭代收斂：如果修正後的速度場仍未滿足動量守恒方程，則進行迭代，返回至第一步，繼續優化速度場，直至速度場收斂。

本研究採用 SIMPLEC 演算法，SIMPLEC 是一種源於 SIMPLE 演算法的改進版本。通過有限體積法將計算域離散為網格，然後使用 SIMPLEC 演算法解出離散的雷諾平均納維爾史托克方程式 (RANS)。SIMPLEC 和 SIMPLE 的流程相同，差別在於壓力修正的處理方式。SIMPLEC 的壓力修正因子 (pressure correction under relaxation factor) 固定為 1，而 SIMPLE 的壓力修正式為

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (17)$$

其中 p 為壓力， p^* 為壓力估計值， α_p 為壓力修正因子， p' 為壓力修改項。SIMPLEC 的優勢在於迭代收斂速度較快，但相對而言對網格的偏度 (skewness) 要求較高。簡單來說，SIMPLEC 以一個固定的壓力修正因子為基礎，能夠更有效地推進流場解的收斂，但同時對於網格的結構要求較為嚴格。

本研究壓力速度耦合求解器使用的是 SIMPLEC。使用的原因為提高流體動力模擬的效率及準確性。透過 SIMPLEC 能夠克服傳統壓力速度耦合方法常面臨的數值不穩定性、高計算成本及對非結構網格的適應性不足等限制，並在處理不同流場情境時取得更穩健的結果。其穩定性確保了模擬結果在動態環境中的收斂性和準確性。於梯度離散計算上使用基於網格中心的最小平方法 (Least Square Cell Based)；壓力離散計算則使用二階 (Second Order)；而動量、紊流動能及比耗散率的離散計算皆使用 SOU。相關設定如圖 4 所示。

計算域及邊界條件

根據 ITTC 所提出的計算域建議^[6]，船艏至入流邊界至少需要一到兩倍的船模長度，以保證均勻入流；船艉到出流邊界至少需要三到五倍的船長，其餘四邊皆需要一到兩倍船長，避免受到邊界效應的影響。根據^[7]之研究，水下載具在深度大於 5 倍直徑時，可忽略自由液面效應對水下載具的影響。本實驗之計算域如圖 5 所示。

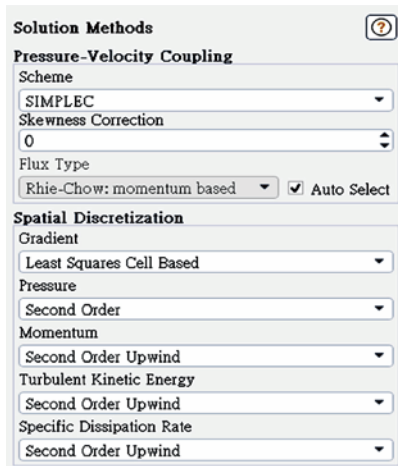


圖 4 ANSYS Fluent 求解器設定

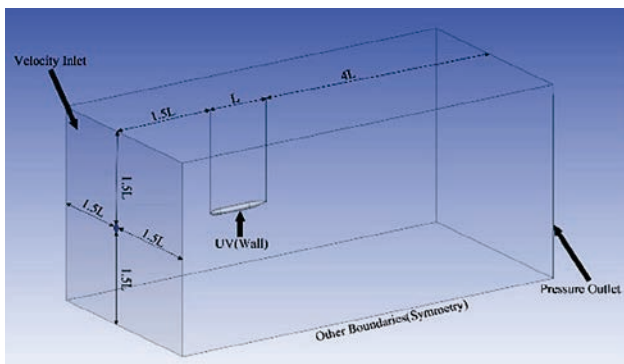


圖 5 計算域及邊界條件示意圖

邊界條件設定在節省計算時間，且不影响模擬準確性的前提下，欲使模擬數據近似於實際物理現象，吾人做以下假設：

1. 流場中流體為水，為一穩態 (Steady)、均勻 (Uniform)、不可壓縮 (Incompressible) 之流體，密度恆定為 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ，黏度為 $\mu = 0.001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ；
2. 船模實驗為等溫情況，無溫度變化；
3. 船模為剛體；
4. z 方向重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

本研究之邊界條件設定如下：水下載具為無滑動之壁面 (No-Slip Wall)，其流體與固體邊上速度為零；圖 5 中左側邊界為速度入流速度定為設計目標 5.144 m/s (10 節)；圖 5 中右側邊界為壓力出口，錶壓力定為零；其餘四邊設置為對稱 (Symmetry) 邊界，以模擬無限水深下之環境。

網格劃分

在流場模擬前處理過程中，網格劃分是相當關鍵的步驟。網格品質不佳或網格密度不夠，都有可能造成計算無法收斂亦或是無法準確描述實際物理狀況。所以如何依照不同的模擬條件使用適當的網格劃分技巧，都需

要研究人員的經驗累積及不斷的嘗試。網格主要分為兩類：(1) 結構性網格與 (2) 非結構性網格。在本計畫的阻力模擬中與實際實驗阻力數據相比，使用非結構性網格的阻力計算較比結構性網格的阻力計算準確 [8]。因此，本研究選擇非結構性網格將計算域進行分割。

網格獨立性分析

有限體積法在相同計算域內計算結果受網格數量多寡的影響甚大。正常情況下，網格數量增加有助於提升計算結果的正確性，但是隨著網格數量的增加，計算時間也隨之增加。因此，為了選出對本研究最合適的網格大小及數量，於參考 [9] 及 [10] 的作法後，透過調整 Face Sizing 的 Element Size，漸漸縮小水下載具周圍網格平均邊長，進而達到增加網格數量的目的。於考量時間成本下，上述網格獨立性分析，在確認網格數增加不再使計算結果有顯著的改變後，流場模擬程式即停止運算。

使用本次獨立性分析設計的水下載具，於期望目標航速 5.144 m/s 進行模擬。藉由上述 CFD 設定，再分別以 200 萬、300 萬、...、1,000 萬之網格數進行模擬。可得水下載具所受的阻力在不同網格數下的變化結果，如圖 6 所示。

由圖 7 可以看到，當網格數高於 600 萬後，相鄰網隔間阻力差異斜率降低，並呈現收斂之趨勢。而 690 萬網格與 940 萬網格阻力誤差僅為 0.36%。最後選擇 690 萬做為後續阻力分析標準。水下載具 600 萬網格分佈如圖 7 至圖 10。

考量時間成本與阻力差值，因為載具計算流場較大的原因，水下載具另外使用 Body Sizing 加密載具四周之網格，大幅減少網格數。

表面網格加密分析

透過在水下載具表面使用膨脹層 (Inflation) 功能，向外生成數層薄柱狀網格，可更精準地計算出邊界

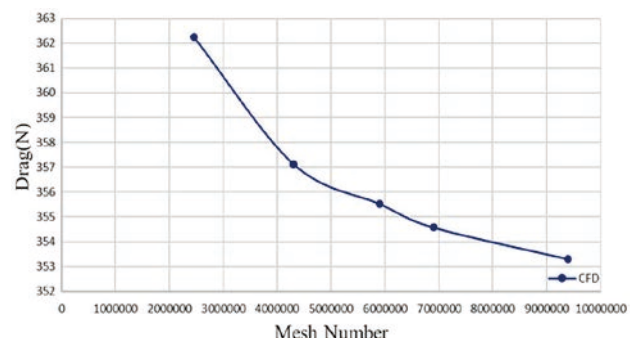


圖 6 水下載具阻力隨網格數變化圖

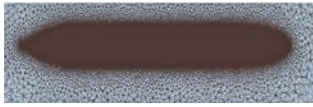


圖 7 水下載具 600 萬網格分佈

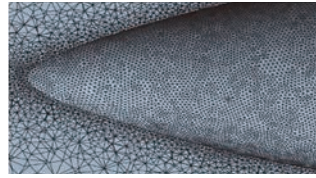


圖 8 艙部細節

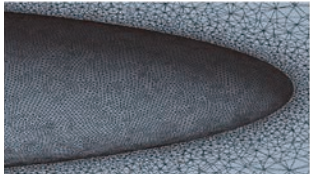


圖 9 艙部細節

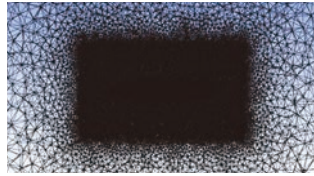


圖 10 增加 Body Sizing 加密載具四周流場

層內流場情形。此外，膨脹層高度必須高於邊界層，如圖 11。以確保能完全的模擬邊界層內物理量變化的特性。膨脹層的控制方法是根據邊界層厚度、期望 y^+ 和總層數 (Maximum Layers, N)。使用式 (18) 及式 (19)，可計算出第一層網格厚度 (First Layer Height, $2y_p$) 及網格生長率 (Growth Rate, G)。將求出值，輸入 Fluent 軟體後即可生成出滿足邊界層厚度的膨脹層加密網格。

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \quad (18)$$

$$\delta_{99} = 2y_p \frac{1-G^N}{1-G} \quad (19)$$

其中， u_τ 為摩擦速度， δ_{99} 為邊界層厚度， y_p 為表面外第一個網格節點與表面的距離如圖 12，而 y^+ 為 y_p 的無因次化，可作為表面網格加密程度的指標。選擇適當的 y^+ 可以細緻捕捉邊界層內真實的流場速度及壓力的梯度。

表面網格加密分析需要有實際拖航實驗的數據進行比對，礙於目前尚未有相同尺度及相同航速的拖航實驗數據。如表 1，DARPA SUBOFF Model 5470 之構型 1 (Bare Hull) 的阻力實驗相關實驗數據。在相近

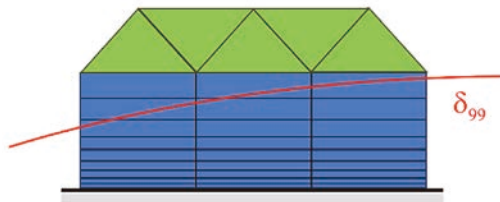
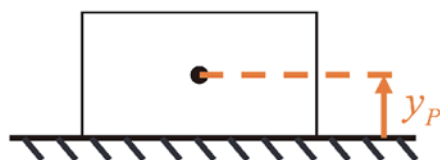


圖 11 膨脹層示意圖

圖 12 y_p 示意圖表 1 DARPA SUBOFF Model 5470 構型 1 阻力實驗結果^[12]

速度 (節)	速度 (m/s)	雷諾數	阻力 (N)
5.92	3.045	1.32×10^7	87.4
10.00	5.144	2.23×10^7	242.2
11.84	6.091	2.64×10^7	332.9
13.92	7.150	3.10×10^7	451.5
16.00	8.230	3.57×10^7	576.9
17.99	9.254	4.01×10^7	697.0

的雷諾數情況下，會有雷諾相似性 (Reynolds' Law of Similarity)^[11]。

也就是在相似形狀的物體，在相近的雷諾數情況下，會有相近的流場情況。本研究的條件下雷諾數為 1.28×10^7 ，與速度為 5.92 節的 SUBOFF 的雷諾數誤差僅為 3%，故選擇 DARPA SUBOFF Model 5470 之構型 1 作為驗證對象，並以 5.92 節的航速進行網格獨立性分析和表面網格加密分析。

SUBOFF 的網格獨立性分析如圖 13 所示，由此圖可看出在網格數大於 600 萬時，阻力差異趨於收斂。於此同時也能清楚觀察到：「隨著網格數的增加，模擬結果越接近實測結果」。考量時間成本因素，本研究後續分析將選擇以 600 網格數進行表面網格加密分析。

由於上述測試並未對表面進行加密，以致於 SUBOFF 表面附近流場的模擬結果並非最佳。為了能準確模擬與計算 SUBOFF 的阻力，研究團隊需再進一步探討在不同期望 y^+ 下，所劃分出的網格進行模擬時與真實拖航實驗阻力結果比較之相似性。考量此因素之模擬結果如圖 14 所示，在期望 y^+ 為 30 時阻力與拖航實驗阻力最為接近；於此分析中，測試期望 y^+ 分別為：1、5、11、20、30、40、50、80、100 及 300。經觀察， y^+ 為 30 附近可能存在最佳結果。故，後續多進行了期望 y^+ 為 29 和 31 的模擬。經此驗證，更能確定期望 y^+ 30 為最佳。

為了將上述分析之最佳期望 y^+ 應用於本研究之水下載具流場模擬之可能性，吾人將進一步探討流場的

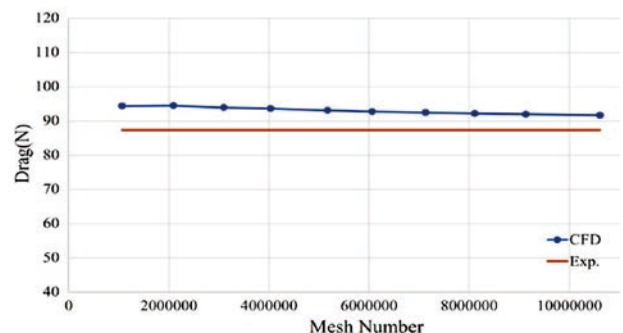


圖 13 DARPA SUBOFF Model 5470 構型 1 模擬阻力隨網格數變化圖

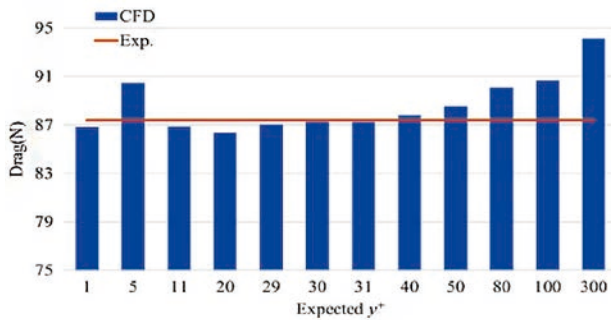


圖 14 DARPA SUBOFF Model 5470 構型阻力隨期望 y^+ 變化圖

相似度。將本研究之 10 節期望航速的水下載具與 5.92 節航速的 SUBOFF 以不同期望 y^+ 進行阻力模擬。由圖 15 可知，隨著期望 y^+ 變化，水下載具與 SUBOFF 之阻力有著相近的變動趨勢。由此可得知，在相近雷諾數的條件下，邊界層流場情形也會相近。因此，SUBOFF 在期望 y^+ 為 30 時有最接近實驗之阻力，則本研究預計開發之水下載具也選擇期望 y^+ 為 30 進行模擬設定。可以預期的，以此條件進行之模擬結果會與後續拖航實驗的阻力結果相近。期望 y^+ 為 30 的水下載具網格分佈如圖 16 至圖 19 所示。

網格品質檢查

網格品質的好壞對模擬的計算結果精準度有明顯的影響，甚至過於不良的網格會導致計算發散。因此，每次網格劃分後，皆須要透過不同的度量標準分析網格。ANSYS Fluent 軟體提供幾個檢查項目，供使用者檢查網格的品質，例如：正交品質（Orthogonal Quality）、單元傾斜度（Skewness）等。

正交品質（Orthogonal Quality）^[13]，依據網格法向量進行分析的標準，對每個面的法向量（ $\vec{A}_i$ ）和從該單元重心到該面重心的法向量（ $\vec{f}_i$ ）進行正交計算，並對每個面的法向量（ $\vec{A}_i$ ）和該單元重心到共享該面的相鄰單元重心的法向量（ $\vec{c}_i$ ）進行正交計算，再取最小值就是正交品質。正交品質其值介於 0 到 1 之間。網格正交計算向量

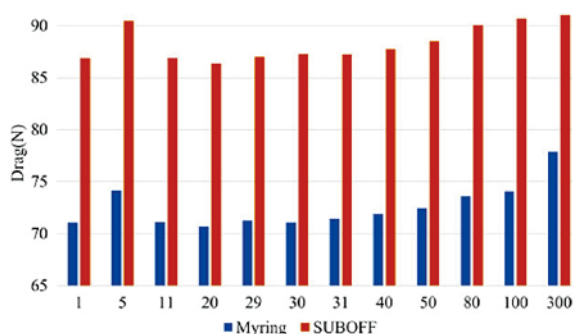


圖 15 阻力隨期望 y^+ 變化圖

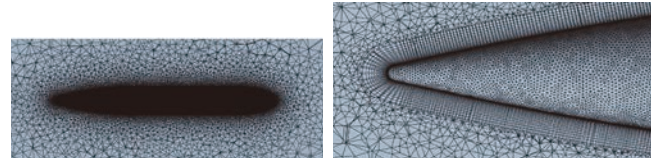


圖 16 水下載具期望 y^+ 網格分佈

圖 17 艉部細節

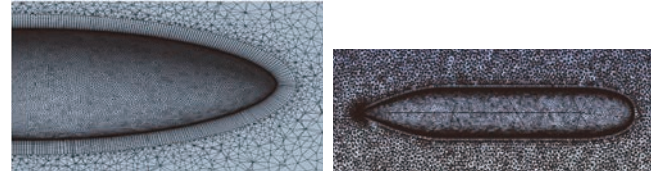


圖 18 艏部細節

圖 19 水下載具生成邊界層之網格分佈

示意圖如圖 20 所示。而單元傾斜度（Skewness）^[14]，由式(20)及圖 21 所定義，其值亦介於 0 到 1 之間。

$$\text{Skewness} = \frac{\text{Optimal cell size} - \text{Actual cell size}}{\text{Optimal cell size}} \quad (20)$$

一般來說，最小正交品質（Orthogonal Quality）必須大於 0.1，且最大單元傾斜度（Skewness）要小於 0.95。其參考標準如圖 22 所示。本研究的網格品質皆在標準的 Acceptable 以上。

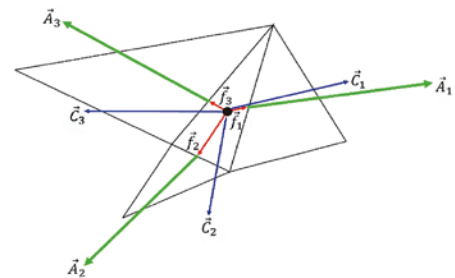


圖 20 網格正交計算向量示意圖^[13]

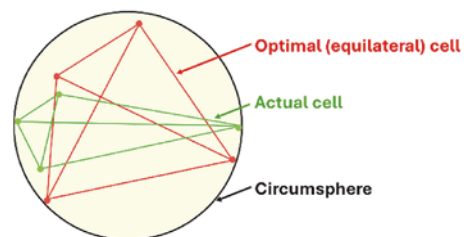


圖 21 網格傾斜度檢驗^[14]

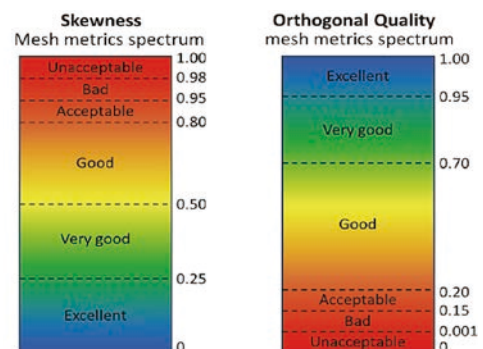


圖 22 網格品質度量標準^[14]

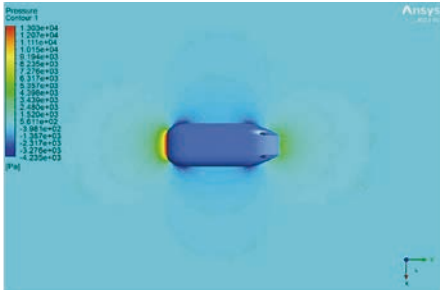


圖 23 載具四周流場壓力圖

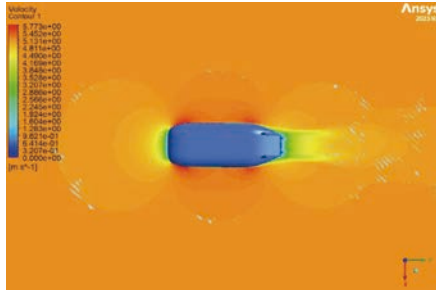


圖 24 載具四周流場速度圖

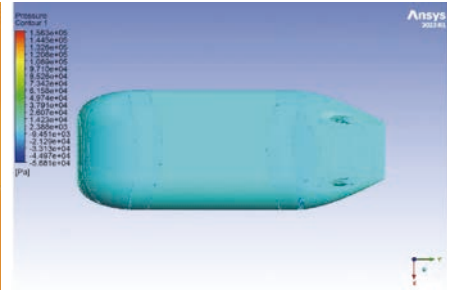


圖 25 載具外壓力圖

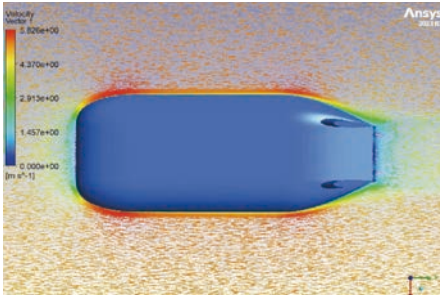


圖 26 載具四周流場速度向量圖

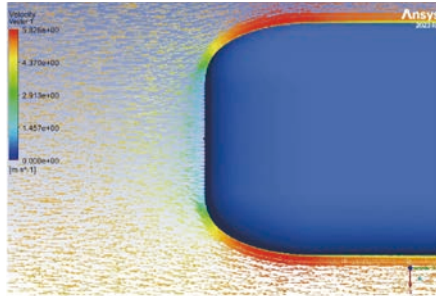


圖 27 載具船艙速度向量圖

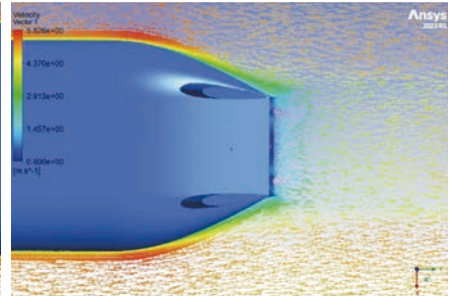


圖 28 載具尾部流場速度向量圖

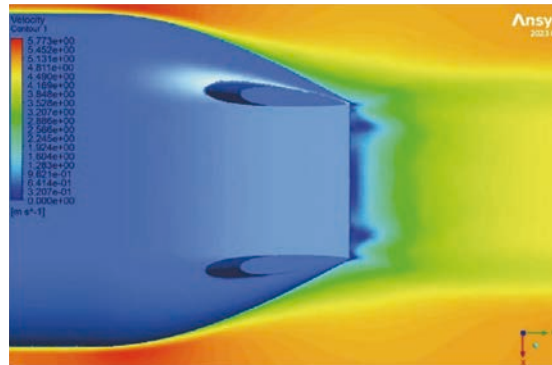


圖 29 載具尾部流場速度圖

水下載具模擬結果與分析

以下為本研究對水下載具，包含流場壓力、流場速度、外壓力、流場速度向量圖等的相關模擬成果。

圖 23 至圖 29 為本研究預計開發載具之 CFD 模擬結果。由上述結果模擬可看出，此水下載具的流場平滑，並無特殊壓力及速度流場現象發生。圖 29 模擬顯示回收型載具尾部之流場變化。在增加翼板後，載具尾部之低壓區，呈現不規則狀。仔細確認可發現翼板影響載具尾部流場，其低壓面積之形狀與翼板之區域相關。流場壓力過渡平順且連續性高。據此，可評估此 CFD 流場模擬結果應為正確。

模擬數據後處理

以 CFD 模擬水下載具於各速度下的阻力後，考量

水下載具模型之阻尼矩陣：

$$D(v) = -diag\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ -diag\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\} \quad (21)$$

此式中水阻尼與速度方向為非耦合，因此可以分別模擬水下載具六自由度下之各方向水阻力，並分別以單一自由度運動計算其水阻尼矩陣內係數。以水下載具 surge 運動為例，其水阻尼矩陣單一自由度運動可分解如下式。

$$\tau_{Dx} = -X_u u - X_{u|u}|u|u \quad (22)$$

其中， τ_{Dx} 為 CFD 模擬水阻力。

經過 n 次 CFD 模擬於不同速度之 surge 自由度運動狀況，可得 n 組水下載具於不同速度下之阻力變化

並表示為：

$$\begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} = -X_u \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} - X_{|u|u} \begin{bmatrix} |u_1|u_1| \\ |u_2|u_2| \\ \vdots \\ |u_n|u_n| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中， ε 為各個速度下之水阻力偏差。

整理上式得：

$$\begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

運用最小二平方法（ ε 最小化）計算向量 $\begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|u} \end{bmatrix}$ ，可得以之結果：

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|u} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

此方法可計算載具巡航時各姿態下之阻力方程式。在設計水下載具的外型時，阻力和體積皆為相當重要的考量，可以同時描述這兩個參數的「Semnan Coefficient」定義如下^[2]：

$$\text{Semnan Coefficient} = \frac{(\text{Volume})^{1/3}}{\text{Drag Coefficient}} \quad (26)$$

Semnan Coefficient 也可以被稱之為體積效率（Volume Efficiency）。設計良好的水下載具時，此係數的最佳化是相當重要的，因為它同時將阻力及體積進行了最佳化。此係數越大代表在相同的體積下有越小的阻力，也是越佳的設計。

結論

此研究旨在揭露，新型水下載具開發的初期，水下載具外型不同下，流場模擬已取得最佳設計之水下載具線型是不可或缺的設計步驟。尤其設計前期，於尚未有

實體水下載具外型可進行水槽測試的情況下，使用 CFD 準確模擬出水下載具在不同方向，所受的水下阻力與水阻力係數，相當於找出水下載具阻力矩陣，在 x 、 y 、 z 方向的速度分量所相應係數。故，善用 CFD 流場模擬工具能夠達成水下載具初期設計的規格跟最佳化設計成果，故可以節省大量的時間與花費。本文藉由 ANSYS 軟體的 Fluent 功能，可模擬出水下載具在水中航行時所受的流場壓力、外壓力、流場速度、及流場速度的向量圖，這些訊息可以觀察出水流作用在水下載具上的情況。此外，於相同的求解器、計算域與邊界條件的情況下，可以匯入各式相似外型的水下載具進入流場模擬環境內。亦或是在確定外型的水下載具外型上進行區域性的部件的微調，與於外型上的不同設計尺寸進行變化，再由 CFD 模擬出該狀態形成的水下阻力與水阻力係數。根據不同參數形成的結果，進行比對後可以決定出最終的最佳化外型設計。

參考文獻

1. M. Moonesun and Y. Korol (2017). Naval submarine body form design and hydrodynamics. (Fossen) LAP LAMBERT Academic Publishing.
2. M. Moonesun, Y. Korol, and H. Dalayeli (2015). "CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance," International Journal of Maritime Technology, Vol. 3, pp. 1-16.
3. Thor I. Fossen (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, Wiley.
4. F.X. Song, L.H. Zhang, Z.L. Wu, and L. P. Wang, "On resistance calculation for autonomous underwater vehicles," in Advanced materials research, 2011, Vol. 189: Trans Tech Publ, pp. 1745-1748.
5. F.R. Menter (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
6. F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish (2016). The finite volume method. Springer.
7. ITTC (2014). "Recommended Procedures and Guidelines: Practical guidelines for ship CFD applications," ITTC Report: 7.5-03 02-03.
8. M. Moonesun, M. Javadi, P. Chardmooz, and K.U. Mikhailovich (2013). "Evaluation of submarine model test in towing tank and comparison with CFD and experimental formulas for fully submerged resistance".
9. M. Karim, M. Rahman, and M. Alim (2009). "Computation of turbulent viscous flow around submarine hull using unstructured grid," J. Ship Technol, Vol. 5, No. 1, pp. 973-1423.
10. 曹翔皓 (2019).「潛體阻力之三維數值模擬與紊流流場特性之分析」，成功大學系統及船舶機電工程學系學位論文，第 1-93 頁。
11. H.-L. Liu and T.T. Huang (1998). "Summary of DARPA SUBOFF experimental program data," Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda MD Hydromechanics
12. K. Alam, T. Ray, and S.G. Anavatti (2012). "A new robust design optimization approach for unmanned underwater vehicle design," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 226, No. 3, pp. 235-249.
13. H. Schlichting and J. Kestin, (1961). Boundary layer theory. Springer.
14. A. Inc. (2013). "ANSYS fluent user's guide," Ansys Fluent, Vol. 15317, 2498p. 



無人機搭載影像於 河床質粒徑判釋之應用

蔡宗翰* / 經濟部水利署水利規劃分署 副工程司

河床質粒徑為河道變遷的重要基本地形因子，目前實務上，河床粒徑調查仍依賴傳統現地局部開挖篩分析調查（體積法）為主，惟受限於人力、安全性、空間、時間及成本等因素，分析成果資訊有限且無法達到全面性，因此對於數模水理演算或物模水工模型試驗建置，河道糙度常以假設值（經驗值）或歷史舊調查資料概估，間接亦增加成果的不確定性風險。臺灣河川卵礫石質河床，受豐枯水季節流量差異及颱風暴雨影響，存在河床粒徑變異大與表層粗化現象的普遍共同特性，因此表面法亦是一個較佳的調查選擇方法。近年無人載具空拍軟硬體技術成熟，值得利用其高空間解析度正射影像自動判釋河床粒徑、短作業時間效率且具有空間資訊之優勢，進一步對於河床質調查研究應用探討，本文就目前空拍法規高度限制、市售無人機性能、粒徑判釋軟體應用及河床材料空拍實務上常見情境等進行測試與探討，期以作為後續實務使用之參考。

關鍵字：UAV、河床質調查

河床質調查方法評析

河床質採樣調查方法眾多，Bunte and Abt^[1] 針對礫石河床的河床質採樣，大致可區分「體積法」及「表面法」兩類，其中「體積法」係以人工挖掘固定量體試坑（常為 1 m × 1 m × 1 m），透過不同標準篩進行篩分計算重量比例，優點為可得到垂直向沉積分層材料之完整粒徑分佈狀況，且適用礫石質或砂質各種材料；「表面法」係於選定的單位面積下，以採樣繩測距、步伐測距、框網交錯點等方式標註，進行撿拾及量測通過篩號尺寸，進行數量比例計算而求得河床質粒徑分佈，亦有以人工近距離照相、軟體圈繪進行小面積量測粒徑尺寸的方法，各採樣方法特性如表 1。臺灣因季節豐枯差異且受地形坡度影響，河床粒徑沉積

過程中，不同尺寸礫石無法完全淘選而沉降，然而存在河床質表層粗化及變異度高的現象，因此對於礫石質河床，表面法提供了一套快速且可靠的調查方法。

綜觀體積法或表面法採樣調查方式，大致存在調查時間冗長、需花費大量經費及人力、成果資料範圍小（不具代表性或變異性）且易受個人習慣影響，甚至遇淺水域需危險涉水調查等缺點。然而隨著無人飛行載具發展，掛載相機鏡頭配備提升或航測精度躍進，因此陸續有相關研究以無人飛行載具（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）進行河道表面顆粒特徵的影像拍攝，配合自動化的影像處理（image processing）來辨識顆粒的輪廓，經由影像判釋出顆粒代表長度及統計分析來求出河道的粒徑分佈特性，試圖建立一個安全且高效率的河道粒徑調查方法，亦具有相當多的參考文獻^[2,3]，但在臺灣實務執行應用調查，確鮮少相關案例，

* 通訊作者，tthan@wrap.gov.tw

表 1 表面採樣方法特性比較

調查方法	網格式卵石採樣 (Pebble counts)	方型網格採樣 (Grid smapling)
施做方式	1. 步伐測距採樣 2. 採樣繩測距採樣	1. 網框採樣 2. 照相採樣
採樣方式	等距離增加方式，採集預定數量的顆粒	採集網框所有格點下的樣品
採樣面積	相對大範圍，可至 100 m ²	相對小範圍，約 1~10 m ²
樣品大小	適用礫石與大卵石，不適用於砂	適用礫石，不適用砂
工作時間	現場調查時間長，不需實驗室時間	網框採樣現場調查時間長，不需實驗室時間 照相採樣現場時間短，實驗室時間長

推究其原因，大致可歸列以下幾點因素：(1) 航高越高，成果易存在信賴度較低的缺點；(2) 受限於無人機法規，部分河段空域需繁瑣解禁申請程序；(3) 以往研究皆以專業高階無人機進行探討，目前市售無人機性能提升且易取得，是否可取代推廣運用？(4) 相關研究之測試條件皆以乾燥且乾淨的河床面，對於實務上常遇到的不同情境條件下（如水文事件或雨後材料高含水、植生影響、深槽段部分積水淺水域等），尚待進一步探討；(5) 粒徑自動判釋專業軟體多為收費制，難以推廣使用之窘境；(6) 相關文獻著重於學術研究，實務上執行應用較少案例，調查人員接受度低。

本案例選定一處礫石質河段進行應用驗證測試，為符合空拍法規要求，採用一致性通用的低航高（60 m 以下），模擬河床內各不同尺寸粒徑、不同淘選度、材料乾溼、植生及積水影響的情境下，空拍後進行自動判釋，並以傳統表面法（網格式採樣繩測距採樣）相對應作驗證比較，瞭解其精度與適用性，工作流程如圖 1。

基本設定條件率定與判釋軟體選用

航高設定

本次測試以 Autel Robotics 公司產製且易取得之市售無人機（型號 EVO II）為例，具有 1" CMOS 影像感光元件、2,000 萬畫素且可外掛 RTK 模組。根據此無人機性能計算影像解析度最低要求（約 42 m 高可達 1 公分的地面解析度）、臺灣飛行活動空域限制、飛航任務軟體操作功能限制，同時考量河床面植生或水工構造物異物影響，故採「15 公尺、30 公尺及 50 公尺」三種航高情境進行設定探討。

判釋軟體選用

判釋軟體的選用，為符合後續能有效推廣運用，以

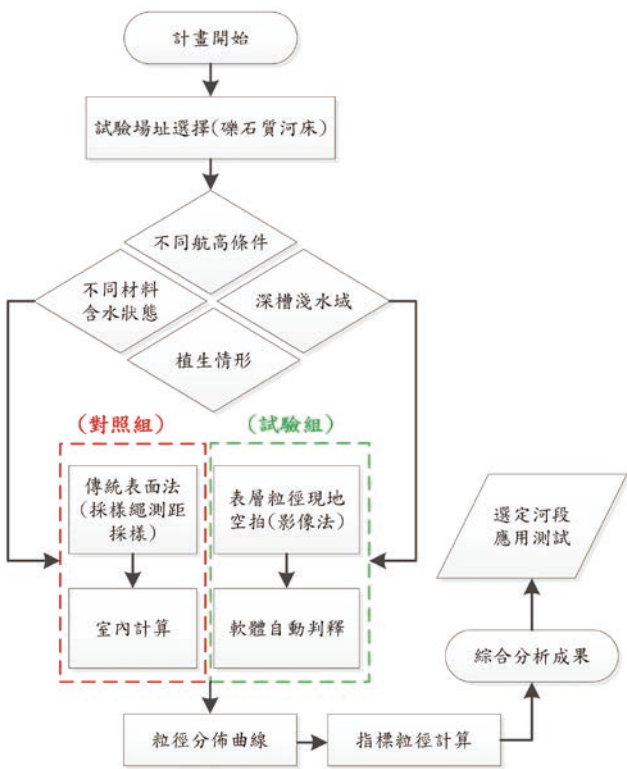


圖 1 工作流程示意圖

免費開源軟體為優先選擇，綜合考量其判釋能力高低、修改的功能性、操作介面友善性、軟體維護有效性及分析成果資料應用加值性等面向，優選「BASEGRAIN」套裝軟體使用，BASEGRAIN 由瑞士蘇黎世聯邦理工學院（ETH Zurich）水力水文及冰河研究室（Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, VAW）之 M. Detert and V. Weitbrecht 於 2012 年發表之免付費開源影像判釋軟體^[4]，以 MATLAB 為基礎建立之物件導向式分析工具，用於對河流礫石層的俯視圖照片進行粒度分析。

對照方法驗證

為驗證空拍判釋可靠度，本文採用現有傳統表面法（採樣繩測距採樣）為標準值進行比較，為提高傳

統表面法結果的可信賴度，試驗之單元面積提高至 10 公尺 × 10 公尺大小，同時加密檢拾網格間距為 0.5 公尺（共 400 個取樣點，註：Wolman^[5] 研究指出，採樣 100 顆粒網格式卵石採樣方法（pebble counts）可當作表面顆粒採樣的標準方法）並以同一操作者進行，如圖 2 示意圖，以降低人為誤差影響。

空拍判釋部分，分為內外業進行，外業於進行傳統表面法（採樣繩測距採樣）前，先進行外業空拍影像取得，依照率定三種航高（15 公尺、30 公尺、50 公尺）對同一單元點位進行拍攝。內業再進行影像匯出、原始影像基本調整處理（灰階化及增亮）、載入 BASEGRAIN 進行判釋及檢視後處理，以完成粒徑分佈資料，實際操作流程如圖 3。

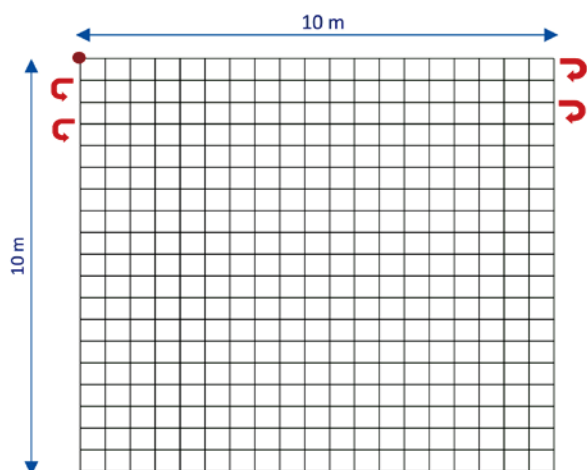


圖 2 10 m × 10 m 採樣範圍及施作順序示意圖

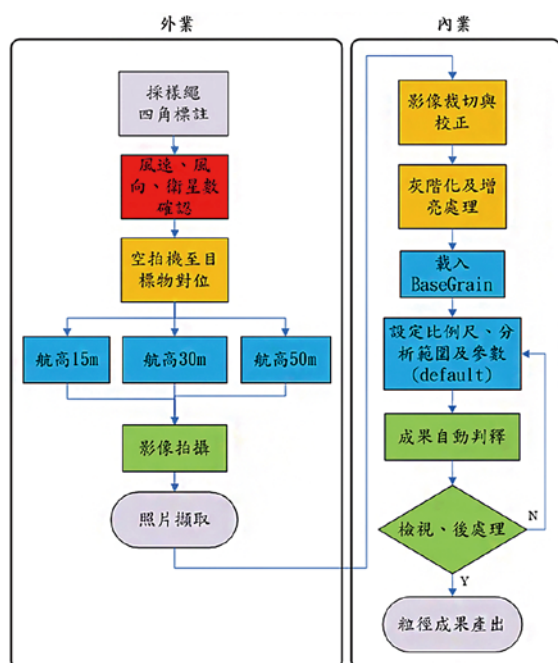


圖 3 空拍影像判釋內外業作業流程

成果探討

現場施作情形

選定清水溪礫石質河段進行，選點原則為以人員可進入河床及涵蓋實務上空拍可能會遇到的各種情境為主，從濁水溪匯流口至上游鯉魚大橋附近，共計完成 8 處場域測試（編號 A ~ G），如圖 4。

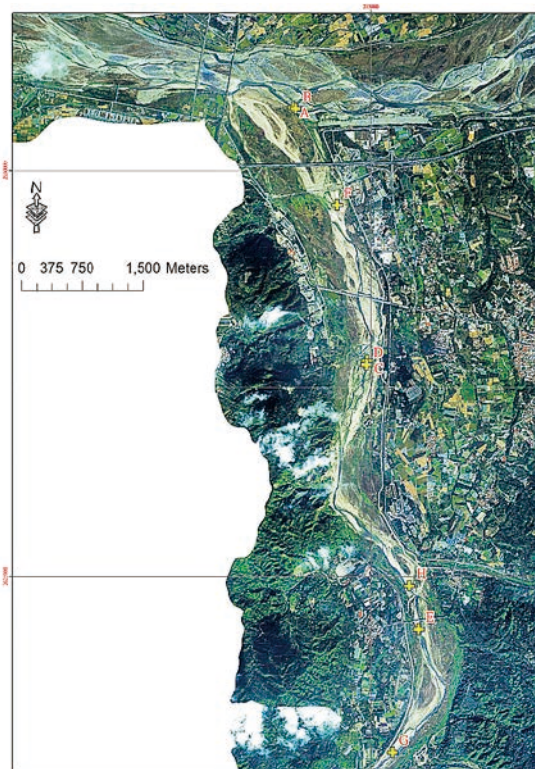


圖 4 現地試驗樣區位置圖

粒徑尺寸與航高關係

可發現航高由高至低，粒徑分佈曲線呈現規律左至右變化，相當於航高越低，判釋軟體對細粒材料分離程度能力高，整體粒徑呈現細化分佈，且曲線分佈情形，與傳統表面法相近，如圖 5。而不同航高最小可判釋尺寸相當於 4 ~ 5 倍地面解析度（GSD）。

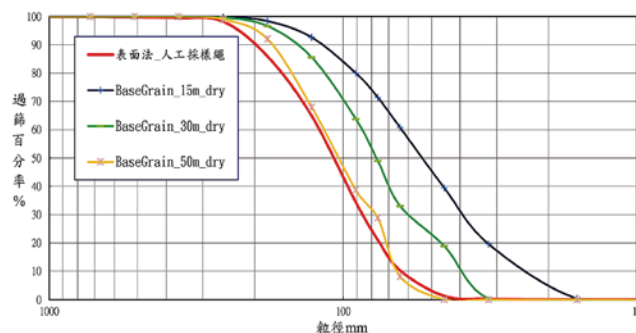
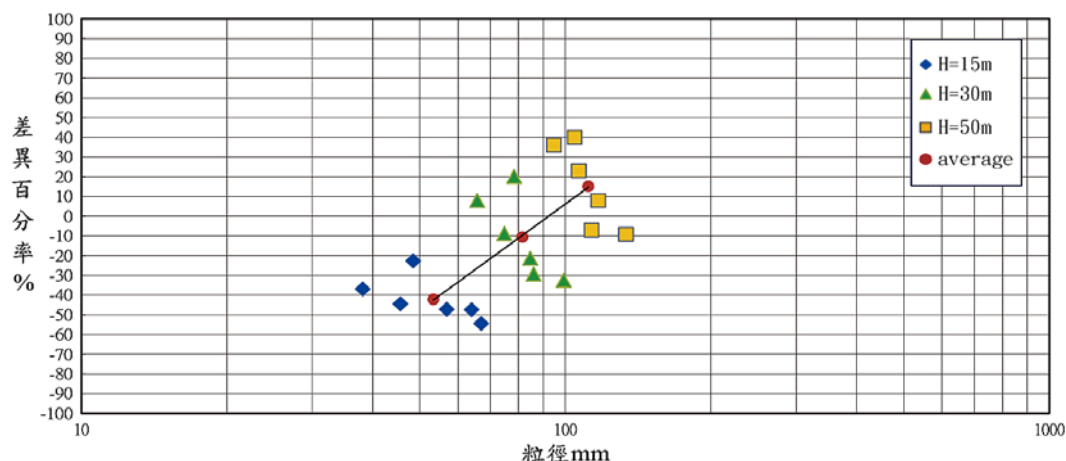


圖 5 粒徑尺寸影響之成果粒徑分佈圖（樣區 E 為例）

圖 6 各航高之平均粒徑 (D_m) 與表面法人工採樣差異分佈圖

若以傳統表面法（測距採樣）認定為基準母值與空拍判釋成果比較，採平均粒徑 D_m 探討，其航高 30 m、50 m 平均差異百分率介於 10% ~ 15% 之間，對於河床粒徑應用於可接受範圍，而航高 15 m 平均差異百分率約 42%，顯示過低航高與且傳統表面法反而有較顯著的差異性存在，一定高度（30 m 以上）成果，對於河床粒徑應用於可接受範圍，且 D_m 成果同時顯示資料分群集中（離散度低），如圖 6。

粒徑高含水情境

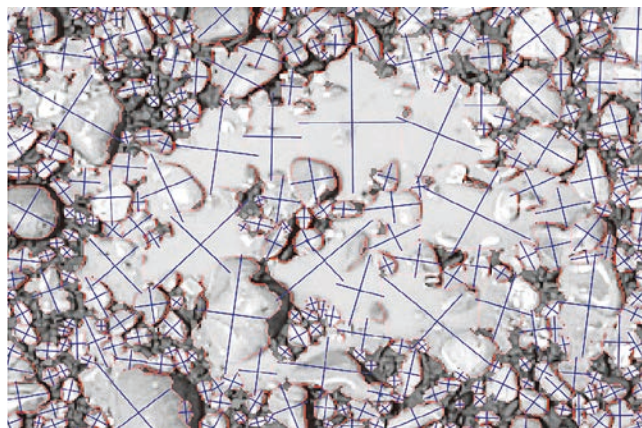
就近河道的樣區抽取河水噴灑，以進行情境模擬，成果顯示對於中礫石以上粒徑，其降雨後材料顆粒飽和含水狀態，與乾燥狀態比較，兩者差異不大，且航高越高差異性越低；但對於細礫易有積淹現象（特別於含砂或含泥區域），局部放大可發現易有誤判情形，若現場選取判釋區域無法避免時，建議可利用軟體內建功能手動編修功能移除修正，如圖 7。

河床內植生情境

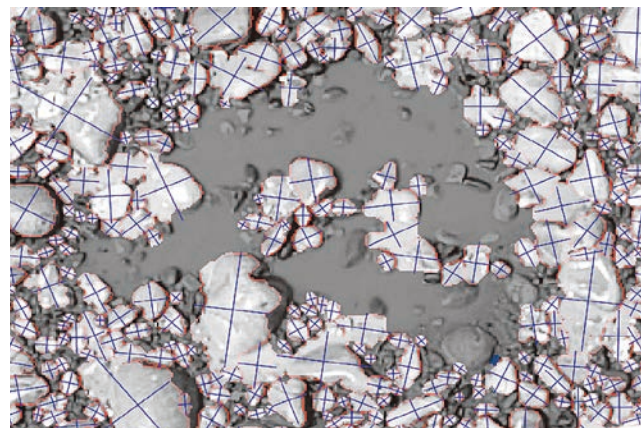
一般對於礫石質河床，夾縫中偶會遇見植生影響判釋的情形，對於低矮植生（高約 30 cm 內），經放大檢視後，不同航高尚仍可以有效判釋，如圖 8，主要係判釋原理取決於顆粒輪廓為主，因此這類型植生影響不大；對於叢狀植株（約 1 m 高不等），因遮蔽效應影響，航高 15 m 以下高解析度容易誤判為細小顆粒，30 m ~ 50 m 則有佳的擬合情形，如圖 9，因此對於高叢狀植株，建議應拉高航高進行拍攝。

淺水域情境

對於近河道深槽處的河床質，易存在淺水域積淹水的情形，此類型狀況雖進行影像強化前處理（灰階化增亮），水域面仍易有少量誤判為大粒徑或存在無法判釋顆粒情形，惟本項誤判率對整體占比不多，與傳統表面法比較，判釋結果仍有一定代表性。但為避免淺水區誤判的少數大粒徑誤導，仍建議透過局部手動



細礫積淹誤判（編修前）



手動編修後

圖 7 細礫積淹現象影響情形

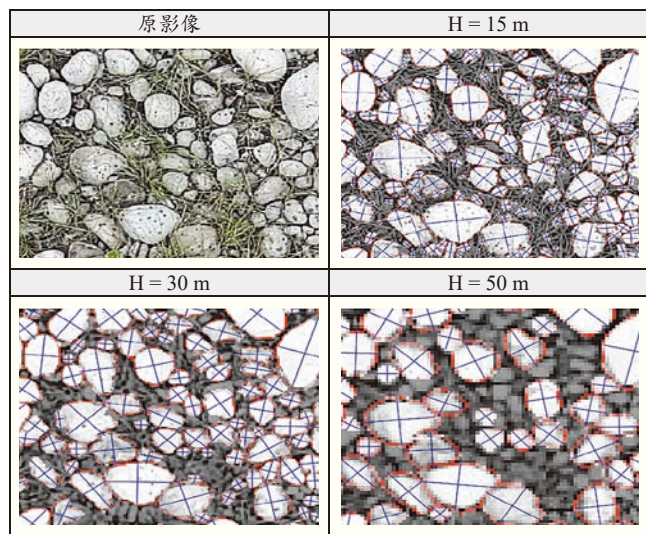


圖 8 低矮植生判釋成果局部放大情形

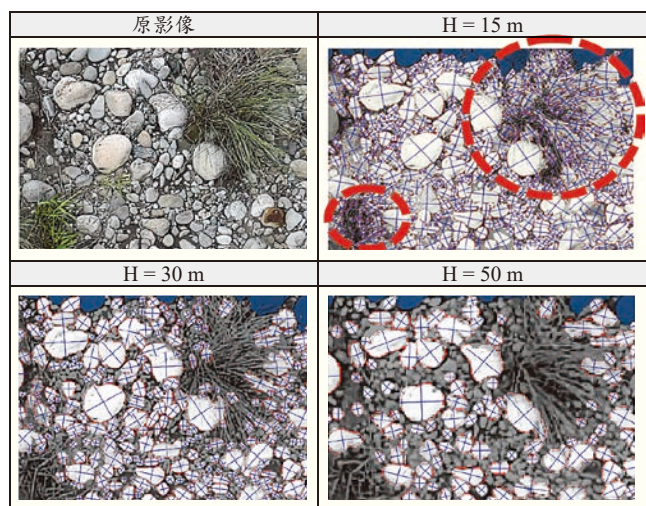
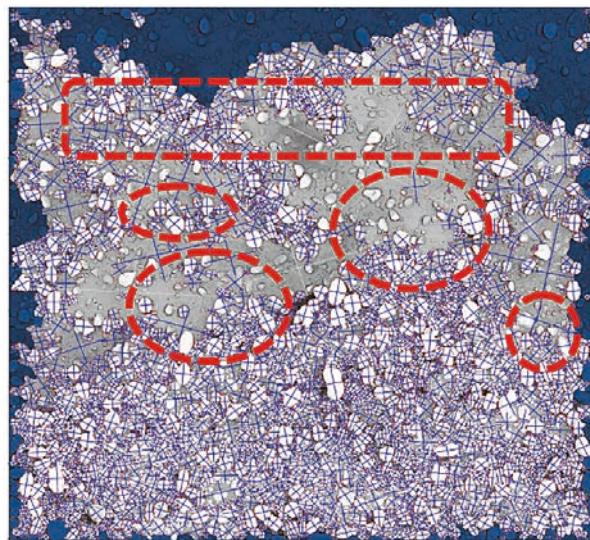
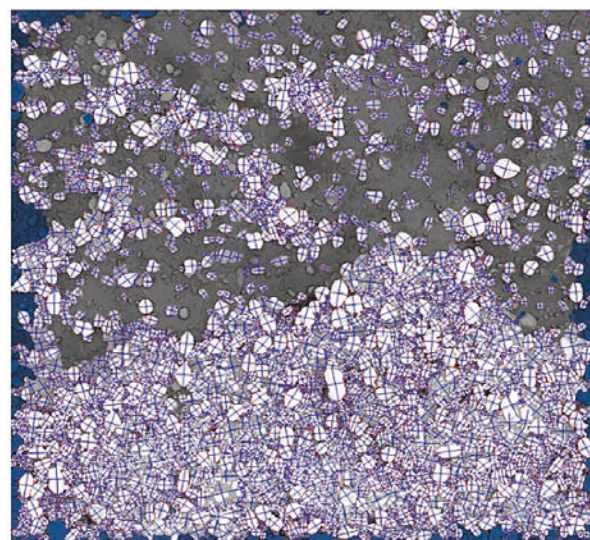


圖 9 叢狀植生判釋成果局部放大情形



自動判釋成果



輔助判釋後處理

圖 10 淺水域判釋及後處理情形

輔助判釋後處理，移除誤判大粒徑（使大尺寸篩號通過率提高），如圖 10，分布曲線較符合傳統人工表面法採樣分布情形。

選定河段試作應用

為進行全河段大範圍空拍試作應用，選定清水溪龍門大橋河段為例（涵蓋斷面 23 及 24），展示如何進行快速取得河床質資料。經航線規劃及取得空拍成果後，進行解算正射影像並依據河床質調查作業參考手冊（水規所^[6]）選點方式及本計畫判釋注意原則，於灘地段及深槽段各萃取兩處（ZoneA 及 ZoneB）影像，如圖 11，匯入 BASEGRAIN 軟體進行判釋成果分析，快速得到兩處判釋圈繪成果及粒徑分佈情形，如圖 12 及圖 13。



圖 11 正射影像成果及萃取判釋範圍圖

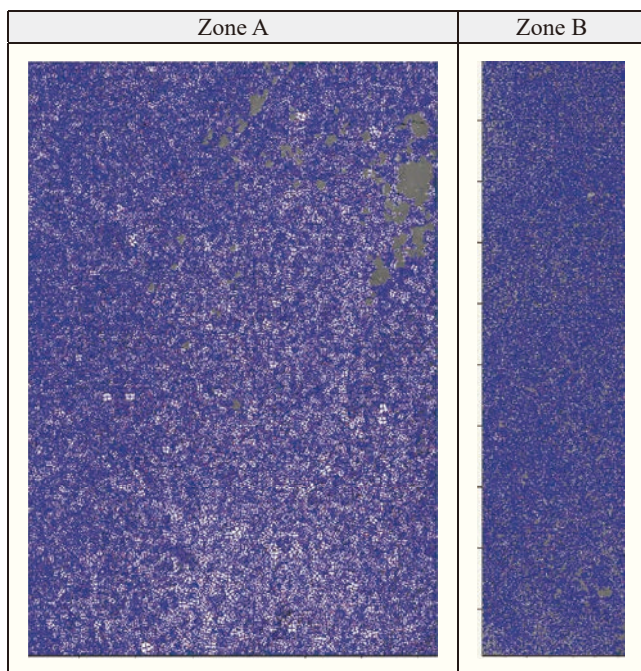


圖 12 Zone A 及 Zone B 粒徑判釋圖繪成果

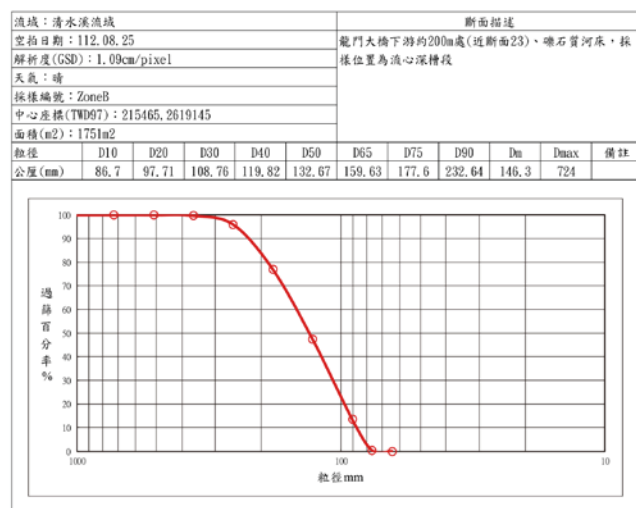
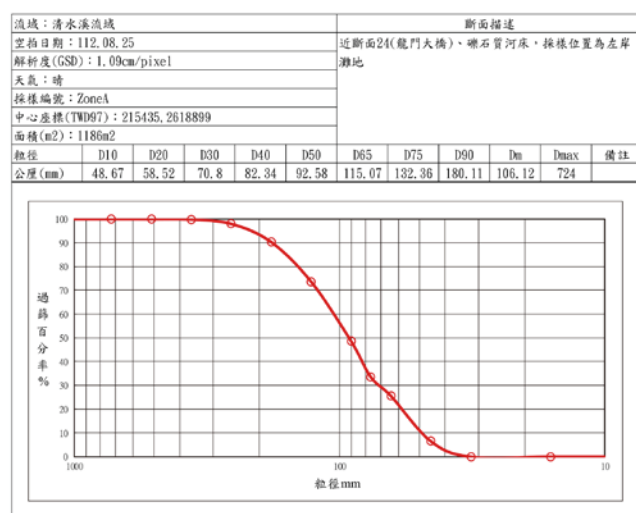


圖 13 Zone A 及 Zone B 粒徑分佈曲線圖

結論

- 對於「廣域」表面河床粒徑調查，實務上尚無有高精度標準方法可供對照比較，本計畫係與業界常使用的傳統表面法（採樣繩等距取樣）進行探討，以平均粒徑（ D_m ）而言，航高 30 m ~ 50 m（地面解析度約 7 ~ 12 mm/pix）平均差異百分率可達 10% ~ 15% 差異準確度，且粒徑分佈趨勢與傳統表面法相近，已可符合業務使用需求。
- 空拍判釋方法於河床質之最小可判釋粒徑尺寸約為航高的 4 ~ 5 倍 GSD（Ground Sampling Distance）。
- 對於現場常遇到情境，建議作以下考量，若無法避免，則應利用軟體內建功能進行局部手動編修後處理：
 - 細礫石河床於雨天過後（或水文事件後），採樣位置應避開積淹水範圍（特別是含泥或含沙區域）。
 - 河床內叢狀植株植生，採樣選定位置時，應避免或適度拉高航高。
 - 深槽段採樣位置，應盡量避免涵蓋於淺水域範圍。
- 目前市售行業應用型且具航測規劃功能無人機（建議選定 1" CMOS 感光元件、2,000 萬畫素以上解析度相機單元），已可符合此等業務需求，推廣性高。
- 目前粒徑光篩判釋軟體已發展成熟、操作介面友善，且為開源免付費軟體，於推廣使用較無障礙。
- 對於空拍影像判釋應用於河床質調查，確有其高效率、可接受精度及具有空間資訊之優勢，對於人力無法到達或短時間迫切需求時，可提供一套快速方法。

參考文獻

- Bunte K. and Abt, S.R. (2001). "Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring," General Technical Report RMRS-GTR-74. Fort Collins, Colo.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428 p.
- 行政院農業委員會水土保持局（2019），「無人載具高解析影像及點雲於山區河川表層粒徑分析之可行性研究」。
- Shoji HIRAO, Toshikazu AZAMI, Makoto YOSHIMURA, Yuuki NISHIGUCHI, Sarii KAWAI (2018), UAV 撮影画像処理による河床表層粒度分布把握に関する基礎的研究，河川技術論文集，第 24 卷。
- <https://basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html>
- Wolman, M.G. (1954). "A method of sampling coarse river bed material," *Transactions of the American Geophysical Union*, **35**(6), pp. 951-956.
- 經濟部水利署水利規劃試驗所（2007），「河床質調查作業參考手冊之研擬專題報告書」。



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
社團法人中國土木水利工程學會

「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：

○ 51.3 ○ 51.4 ○ 51.5 ○ 51.6 ○ 52.1 ○ 52.2 共 次
(6月) (8月) (10月) (12月) (2月) (4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：
商號

(請蓋公司印)

負責人：

地 址：

廣告聯絡人：

電 話：

廣告訂單聯絡：社團法人中國土木水利工程學會 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	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
通訊欄 (限與本次存款有關事項)									收款戶名 社團法人中國土木水利工程學會								
繳納會費 ☐ 常年會員年費 1,200 元 ☐ 初級會員年費 300 元									寄 款 人								
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									姓名								
訂閱中國土木水利工程學刊，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									地 址								
									電話								
									經辦局收款戳								
虛線內備供機器印錄用請勿填寫																	

◎ 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	

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 ☐ 常年會員年費 1,200 元 ☐ 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 ☐ 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
身分證號碼			訂閱中國土木水利工程學刊，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
卡 別 ☐ VISA ☐ MASTER CARD ☐ 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。

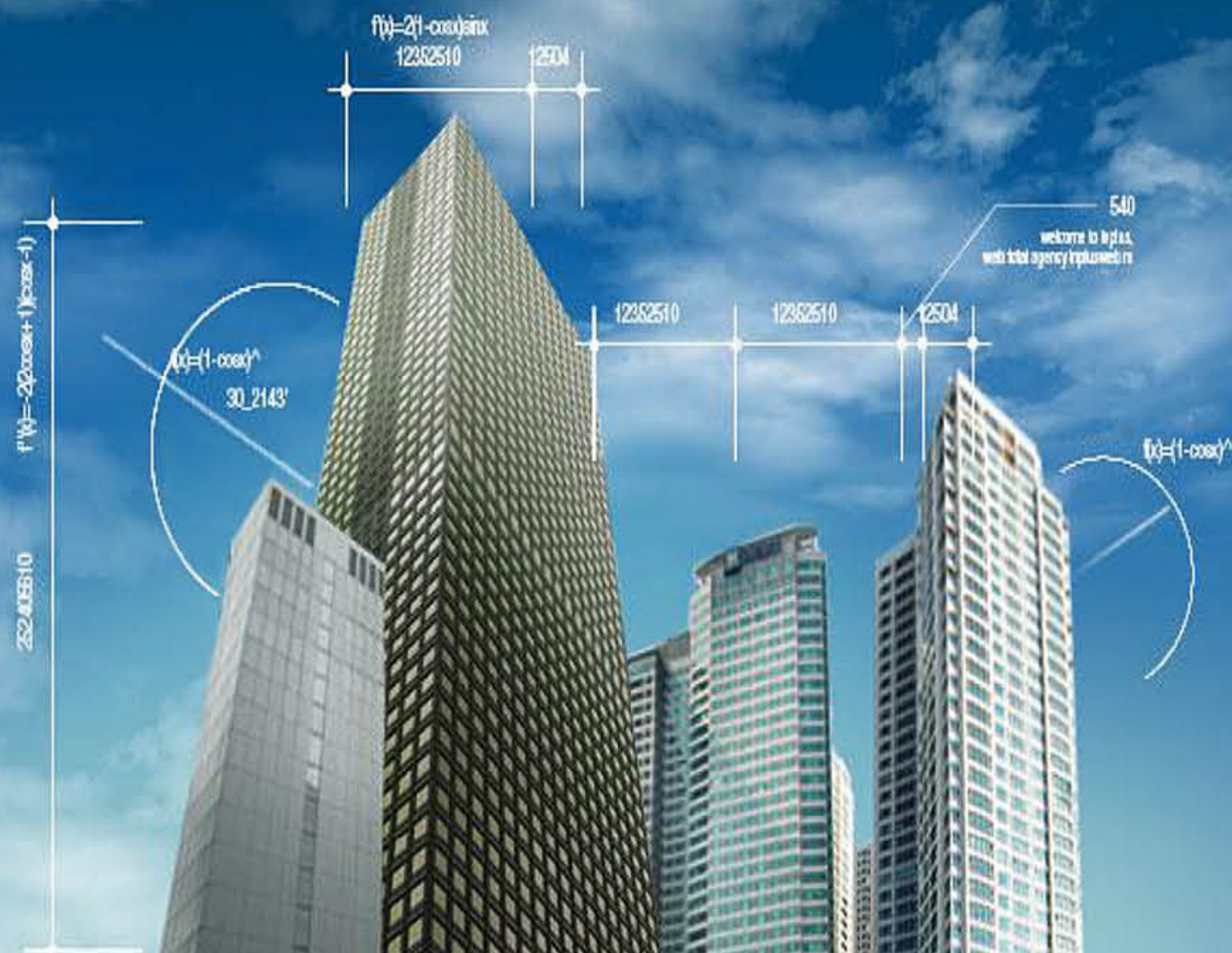
交易代號：0501、0502現金存款 0503票據存款 2212劃撥票據託收

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)



駿宏工程顧問有限公司

Giant Home Engineering & Consultants



專業工程結構顧問服務

建築結構工程結構體設計服務

丁類危險性工作場所評估報告撰寫與送審服務

地下室開挖工法、擋土設施、施工構台之規劃、設計、分析

建築物採用消能元件補強設計及監造技術服務

結構耐震能力評估及補強設計暨監造服務

建築物公共安全耐震能力初步評估檢查服務

「駿宏工程顧問有限公司」前身「駿宏結構土木技師事務所」創立於 1997 年（民國 86 年），初期由邱華宗技師獨立主持，主要從事建築結構設計，隨後為擴大業務承攬範圍，於 2001 年（民國 90 年）改登記為「駿宏工程顧問有限公司」。

公司營業項目除原有建築結構設計外，陸續增加土木工程規劃設計監造（共同管線、道路、排水、橋梁、水土保持等）、丁類危險性工作場所評估、建築物耐震能力詳細評估分析、建築物補強工程設計、自動倉儲設計、輸送設備轉運塔等設計、台電鋼構鐵塔設計、空調水電管路支撐設備結構設計、台電保護架結構設計…等。

本公司聘有多位結構技師及土木技師，設計人員大多為國內知名國立大學土木工程相關系所碩士，繪圖人員亦多畢業於國內各大專院校土木工程相關科系，專業學養及工程設計、監造經驗豐富，目前公司團隊人員已逾 20 人。

我們重視每一位夥伴，除了有良好的工作環境、也提供學習及成長的空間，歡迎優秀的朋友一起加入我們的工作行列。

駿宏工程顧問有限公司

地址：403 台中市西區自立街 113 號

電話：04-23782158 信箱：jh889@ms19.hinet.net

夢想和幸福

零距離的接軌

技術必須經得起考驗，專業來自於永不妥協的堅持，
夢想的城堡、幸福的家園，就座落在不遠的前方，
台灣世曦和您一起攜手而行，用築夢的心、關懷的情，
戮力建設出每一項希望的工程。



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity