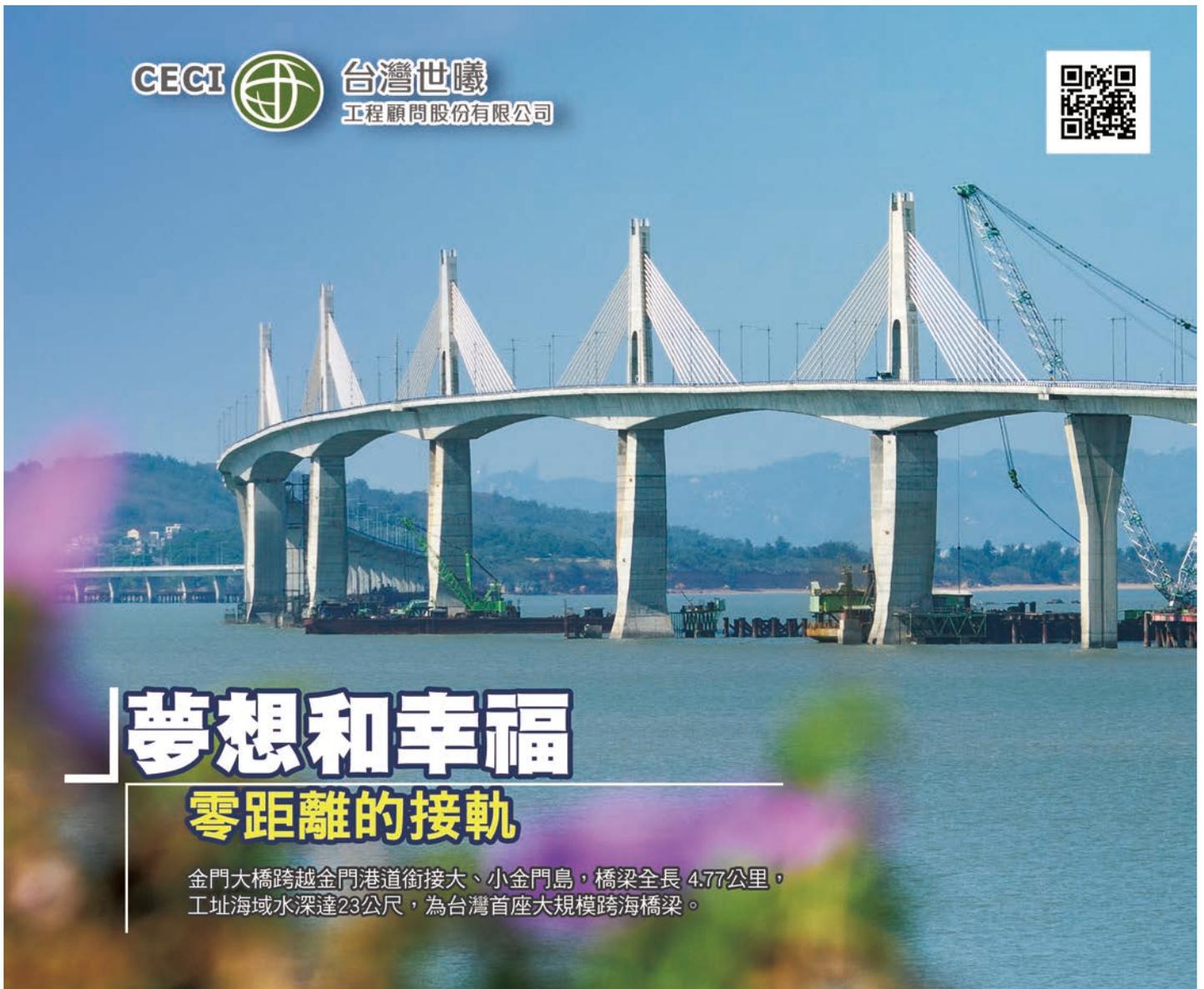


# 土木水利

The Magazine of The Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering

August  
2023

CECI  台灣世曦  
工程顧問股份有限公司

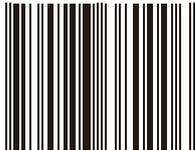


## 夢想和幸福

### 零距離的接軌

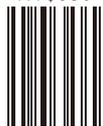
金門大橋跨越金門港口銜接大、小金門島，橋梁全長 4.77 公里，  
工址海域水深達 23 公尺，為台灣首座大規模跨海橋梁。

ISSN 0253-3804



9 770253 380006

NT\$350



Volume 50, No. 4

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

國道後續路段  
橋梁耐震補強工程

工程技術及發展

專 輯

離岸風電  
與  
海事工程

專訪世紀鋼  
賴文祥董事長

人物專訪

# 福清營造 全域獨到

國道4號C713標



翡翠原水管工程

興建大臺南  
會展中心



## 福清營造

SINCE 1975



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



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

第14屆公共工程金安獎

第21屆 公共工程

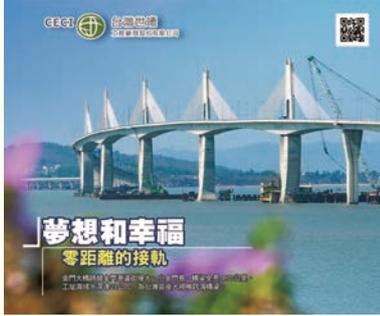
## 金質獎

2021 建築類 佳作



臺北自來水事業處工程總隊  
Engineering Agency, Taipei Water Department

111年度施工程品質績優獎



夢想和幸福 零距離的接軌  
台灣世曦工程顧問股份有限公司

# 土木水利



社團法人中國土木工程學會會刊

發行人：宋裕祺

出版人：社團法人中國土木工程學會

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

定價：每本新台幣350元、每年六期共新台幣1,800元 (航郵另計)

繳費：郵政劃撥00030678號 社團法人中國土木工程學會

會址：10055台北市中正區仁愛路二段一號四樓

電話：(02) 2392-6325 傳真：(02) 2396-4260

網址：<http://www.ciche.org.tw>

電子郵件信箱：service@ciche.org.tw

美編印刷：中禾實業股份有限公司

地址：22161新北市汐止區中興路98號4樓之1

電話：(02) 2221-3160

**社團法人中國土木工程學會第二十五屆理監事** (依姓氏筆劃排序)

理事長：宋裕祺

常務理事：伍勝園 高宗正 楊偉甫 廖學瑞

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

常務監事：呂良正

監事：王藝峰 李建中 沈景鵬 林其璋 邱琳濱 劉國慶

## 先進工程

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

## 永續發展

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

## 國際兩岸

- 國際活動及亞洲土木工程聯盟
- 兩岸活動
- 亞太工程師

## 教育學習

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

## 學會活動

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

## 出版活動

- 中國土木水利工程學刊
- 土木水利雙月刊

## 分會

- 土水學會
- 土水南部分會
- 土水中部分會
- 土水東部分會

## 中國土木工程學會任務

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

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

**中國土木工程學會和您一起成長！**

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

## 人物專訪

- 📖 永不放棄—專訪世紀鋼鐵結構股份有限公司 賴文祥董事長 3

## 「離岸風電與海事工程」專輯 (客座主編：楊瑞源教授/詹錢登特聘教授)

- 📖 專輯序言：離岸風電與海事工程 楊瑞源/詹錢登 8
- 📖 離岸風力發電場址調查及設計技術指引、資料庫平台及固定式支撐結構分析軟體研發簡介  
宋裕祺/蘇進國/劉小勤/盧明德/陳儀諺 9
- 📖 從淺海邁向深海，政府應開放多元離岸風電浮台做測試 李宏道/林琮盛/黃佩君/蔡幸芳/王詮文 20
- 📖 推動台灣浮動式風力發電的挑戰 徐璋克/李劍珩/陳振豪/陳俊仁/林勝利/曾昱嘉 24
- 📖 海事工程機具之測試與確證方法 Joost Remmers/丁柏村/姜鈺璋 32
- 📖 離岸風場之海底陣列電纜研究與應用 蘇郁琇/楊瑞源 37
- 📖 浮式風機平台設計製作與競賽 陳乃齊/孫詠鈞/戴紹捷/林奎瑛/鄭舜文/林昱蓁/楊瑞源 44
- 📖 消波塊型地震超材料設計及減震效果模擬分析 王聖翔/蘇于琪 51
- 📖 即時淹水範圍評估模式的開發與應用 李自強/李心平/詹錢登 58
- 📖 應用 Hyper KANAKO 模式模擬建物對土石流溢淹之影響—以臺東縣紅葉村為例 許汶芳/詹錢登 67

## 工程技術及發展

- 📖 國道後續路段橋梁耐震補強工程—施工精進作為解析 (以國道8號為例)  
潘小珍/林邦奎/林彤珈/林建志/黃永輝 7

## 50周年系列活動

- 📖 112.7.21 臺灣鐵道發展史研討會 36
- 📖 112.6.20 ~ 6.26 國際交流 MACE ANNUAL MEETING 2023 66
- 📖 50周年系列活動議程 84
- 📖 50周年慶祝大會議程 封底裡

## 廣告特搜

- 台灣世曦工程顧問股份有限公司 — 夢想和幸福 零距離的接軌 封面
- 台灣電力股份有限公司 — 為台灣爭光 台南鹽田 封底
- 福清營造股份有限公司 — 福清營造 全域獨到 封面裡
- 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 82
- 新北大眾捷運股份有限公司 — 幸福前進 永續前行 83



# 永不放棄

## 專訪 世紀鋼鐵結構股份有限公司

### 賴文祥董事長

在土木工程領域裡  
有一位傑出的領袖  
他的故事彷彿是一部勵志劇  
充滿著奮鬥、汗水和成功的篇章  
這位領袖就是世紀鋼公司的賴文祥董事長

從小就很刻苦耐勞的他，在16歲時離開家鄉，踏上台北的土地，開始了他的鐵窗工作生涯。透過不懈的努力，他建立了自己的事業版圖，初期從一個小型鋼構場開始，逐步發展壯大。然而，他的企業之路並未止步於此，他還將視野投向了更遠大的目標——離岸風電。踏入這個領域，他不僅成為了先驅，更是引領者，帶領企業邁向綠能領域的前線。在這篇專訪中，我們將深入探究賴文祥董事長的成長歷程，以及他如何由一名鐵窗工人蛻變成綠能產業的傑出領袖。

文字整理：廖芝萓

隨行攝影：陳英仁



## 前言

近年來，全球面臨著日益嚴重的氣候變化挑戰，而尋找可持續且環保的能源來源已成為不可推遲的任務。在這個關鍵的時刻，離岸風電作為一個擁有龐大商機的產業，備受矚目。

我們很榮幸邀請到在離岸風電領域中具有卓越見解和豐富經驗的專家——世紀鋼鐵結構股份有限公司賴文祥董事長，進行不同面向的訪談及對話，從技術創新到市場趨勢，以及台灣在市場下的商業機遇，分享他對於離岸風電這個新穎領域的獨特洞察力以及過人的見解能力。

賴文祥董事長，作為離岸風電下部結構製造領域的先驅，他的遠見和獨到想法在專訪中展現無遺。對於未來挑戰，他提出了一系列令人深思的見解，以下就宋裕祺理事長及賴文祥董事長訪談內容與讀者們分享。

### Q 您可否先介紹一下您的生涯歷練？

A 早年由於缺乏富裕的家庭背景，我們中南部的孩子可分成三類。第一類是極具讀書天賦，持續以優異成績獲得獎學金。第二類成績雖然不俗，卻未能進入國立大學，因而選擇成為軍官或警官。第三類，就像我一樣，因為家境貧寒，學業平平，只能選擇在國中畢業後就離鄉背井，四處尋找工作機會。



鐵窗學徒生涯

我十六歲那年踏入社會，以鐵窗學徒的身份起步。當時，每个月的學徒薪水是四百元。然而，這段苦力的學習過程中讓我深刻體會到，即使我不能在學業上有所成就，但在任何事情上，只要不甘示弱，勇於挑戰那些大多數人不願意嘗試、難度極高的事情，我一樣可以追求成功。

在 197 年時，我正式成立「世紀鋼構」。起初，只是一個小型鋼構廠，專營鋼骨結構工程，後來陸續承接台積電、聯電等項目的廠房建設工作，在 19 年完成台灣第一座 8 吋晶圓廠「臺灣積體電路製造股份有限公司」，展現了工程的專業技術。

但在 2008 年爆發金融風暴，使我們無法按原計畫興建許多大型建築，導致鋼構市場供過於求，迫使我們開始尋求突破口。幸運的是，在民國一百年時，政府開始推動海陸千架風機計畫，我們與經濟部 and 工業區合作，一步一腳印的做。儘管一開始對於鋼構的需求並不大，但我們不氣餒，也漸漸發現水下基礎製造將會是未來發展的契機。



賴董事長接受宋理事長訪談



我們努力不懈成為世界 Number One



開創事業就是靠決心跟霸氣

因為對於水下基礎領域的經驗有限，我們派員前往歐洲進行學習，發現不僅僅需要專業上的技術，擁有一個重件碼頭也是不可缺少的條件。然而當時離岸風電材料關稅和海運費用的高昂，重件碼頭的用地租金費用高，且需重新規劃廠房，在當時這個想法遭到了公司董事的反對，他們認為成本風險過大。然而，走到今天，隨著技術的成長及市場需求量的提升，才真正了解擁有重件碼頭是多麼重要，否則即便具備技術，也無法找到適當的場所加以應用。

**Q 那您在職涯中最值得驕傲的事情為何？**

**A** 我們值得驕傲的是，我們勇於挑戰那些他人不敢嘗試的事情，並毅然堅持下去。在這段路途中，我們也得到了眾多支持和幫助，包括經濟部、工業局及能源局從上到下持續的協助，業主也不吝分享經驗在技術方面作指導，這些都是我們的貴人。

近幾年來，我們在產能和品質方面取得了可觀的成就，並已超越日本。這使得我們在全世界各地備受矚目，各地前來參訪的人都對我們的工法表示敬佩。更令人驕傲的是，在 2020 年時，我們完成了在臺北港南碼頭第一期廠房的建造，使水下基礎能夠全程在室內組裝，至今全世界沒有一家廠商能跟我們一樣做到。

**Q 在經營的過程中，您覺得遭遇到最困難的挑戰是？**

**A** 我們認為經營最困難的挑戰是「資金」方面的問題。隨著事業的擴張，所需的資金也隨之增加。每一個合約的金額都相當龐大，尤其在這個新型產業中，我們需要投入資源來興建新的廠房、培訓新人、掌握新的工法等。在這其中，高達 90% 都是全新的投入，都需要大量資金。此外，土地的限制、最初階段國外廠商的競爭，一路走來可說是困難重重。尤其在離岸風電發展之初，國內銀行及保險公司對此產業大多既不熟悉也無信心，幸好隨著世界對綠電需求持續增加的趨勢，加上政府的大力推動及鼓勵，才慢慢逐漸減輕了銀行對此產業融資與放貸的疑慮。



經營最困難的就是錢



宋裕祺理事長、賴文祥董事長、吳江富總工程師



第一批國人自製的 Jacket Tower

**Q 您是國內廠商參與離岸風機技術的先驅，覺得台灣有無尚未無法解決的問題？我們可以如何突破？**

**A** 目前台灣在供應鏈方面存在一些挑戰，若欲推動產業更加蓬勃發展，我認為中南部企業有必要加入供應鏈體系，讓離岸風電的製造能從南到北有一連串的生產線，增加生產能力，讓台灣在這個領域創造出更好的成績，走向國際。但現階段，超大型鋼構無法在陸地運輸，而海運費高昂，初期投入成本亦居高不下，這可能是中南部企業難以進入的幾個原因。同時也希望政府對促進離岸風電落實本土化的政策能持續，以在未來可見全球供應鏈不足的情況下確保國內綠色能源建置的自主性。

對於那些欲參與此產業的企業，我希望能傳達台灣已在此領域取得領先成就。我鼓勵大家大膽投身此產業，攜手一起成長，共同推動台灣離岸風電產業持續發展。

**Q 您為何會有投資高級工業學校的想法？原因為何？**

**A** 除了目前政府強調的本土製造，我更期待人才也能實現本土化。因此，我投資了桃園的成功工商，積極擴充招生，這並非為了追求學校更大的利潤，而是為了培育年輕學子。我們從高中一年級開始培養，若他

們對學習有熱情，我們就引導他們持續升學，並考取國際認證的執照。如果有學生對書本不感興趣，我們就培養他們成為技術一流的鉚工，再逐步培訓他們成為訓練導師，可以訓練更多年輕人投入。

另外，我們也積極招收海外僑生。這是因為我們計畫未來在國際商業領域發展，預計在海外設立工廠。然而，要在東南亞等地與其他國家競爭，我們並不擁有充足的人力和土地等優勢。因此，透過培訓僑生，我們希望能夠在未來讓他們選擇在台灣工作或回到自己的家鄉工作。這兩種選擇對我們來說都將帶來很大的幫助。

**Q 如果要給年輕人或是後進說一句勉勵的話，您想說什麼？**

**A** 若要我鼓勵年輕人或是後進，我想說的是：在人生的旅程中，困難和挫折是無法避免的，但關鍵在於該如何應對不同的挑戰，無論遇到多麼艱難的局面，都要保持著對夢想的堅定信心，毫不氣餒。每一次的挫折都是通往成功的步驟，每一滴努力的汗水都是成長的痕跡。記住，追求目標的路上或許會曲折難行，但只要有意志力和耐心，勇敢地迎接挑戰，最終的勝利將會屬於堅持不懈的人。「永不放棄」，始終都是我堅守的信念，分享給大家。



那個人就是我



1983年從三個人的鐵工廠起家



1994年台積電第一座廠房



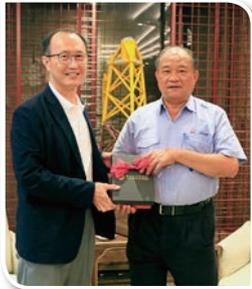
2009年當選第32屆青年創業楷模



進門就可以看到世紀鋼的歷史牆



賴董事長親自解說世紀鋼的發展史



宋裕祺理事長致贈紀念品



世紀鋼 - 讚!



賴董事長回贈紀念品

### 後記

專訪過程中，我們有幸與賴文祥董事長分享了他的心路歷程，以及他對離岸風電領域的獨特見解。他的貢獻對於台灣離岸風電的發展不可小覷。

「永不放棄」，是賴文祥董事長一直秉持的座右銘。這個信念伴隨著他的整個成長和事業發展，成為他突破困難和挑戰的動力。正是因為他堅持不懈的精神，他才能夠克服各種困難，走到今天的成就。

在離岸風電領域，賴董事長也表達了對於更多企業參與的熱切期望。他認為離岸風電不僅僅是一個商業項目，更是台灣共同的使命。他希望能夠看到更多的企業投身其中，共同努力，以確保這個領域的可持續發展。他表示願意分享自己的專業技術和經驗，以幫助其他企業在這個領域取得成功。

賴文祥董事長的故事和見解都彰顯著他對於台灣離岸風電領域的熱情和實踐。他的座右銘「永不放棄」在他的人生和事業中得到了完美的體現，並啟發著更多人去追求卓越、創新和可持續的未來。



# 離岸風電與海事工程 專輯序言

圖片來源：unsplash

**專輯客座主編** 楊瑞源／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

近半個世紀起，全球風力發電市場迅速發展，儼然已成為技術相較成熟且具經濟規模之再生能源選項。台灣亦從起先之示範獎勵階段進入第二階段潛力場址以及如今之第三階段區塊開發。同時場址也勢必從淺水域邁向深水區，風場之建置工程也將更具挑戰，因此需倚靠產學合作，結合業界力量，並仰賴不同領域如（土木、水利、海洋、電機、機械等）的跨域整合，方能產出乾淨、環保的綠色能源。

本專輯邀請國內外企業及學術機構共同著作而成，內容包含場址調查、水下基礎、浮台設計、海事工程機具、海底電纜之應用等。第一篇由台北科技大學離岸風電工程研究中心宋裕祺教授團隊介紹離岸風力發電場址調查及設計技術指引。第二篇邀請全本土離岸風場開發團隊台亞風能公司分享他們對於台灣將如何從固定式基座風機邁入浮動式風機之見解。第三篇邀請丹麥商凱得股份有限公司（K2 Management）闡述其作為工程顧問

公司放眼全球之風場經驗，分析台灣欲發展浮式風力發電可能遭遇之挑戰。第四篇邀請荷蘭商鈦務德工程設計有限公司（Temporary Work Design）介紹於離岸工程之海事機具該如何進行設計、測試與驗證方能確保海事工程之運行。第五篇及第六篇由成功大學水利海洋工程系離岸結構及再生能源研究室分享浮式風機陣列動態電纜之研究與分析；以及如何將所學運用於實務經驗，組團設計浮式風機載台並出國到荷蘭參加實海域進行安裝及運轉之國際競賽。

此外，本專輯也包含消波塊型地震超材料設計及減震效果模擬分析、即時淹水範圍評估系統的開發與應用、以及應用 Hyper KANAKO 模式模擬建物對土石流溢淹影響之研究等三篇文章。本專輯文章期望透過各領域專家學者之見解，強化產業界與學術界之交流，促成跨領域之合作，共同營造及維護台灣永續的生活環境。🇩🇪



# 離岸風力發電 場址調查 及 設計技術指引、資料庫平台 及 固定式支撐 結構分析軟體 研發簡介

宋裕祺\* / 國立臺北科技大學土木工程系 特聘教授 暨 離岸風電工程研究中心 執行長

蘇進國 / 國立臺北科技大學離岸風電工程研究中心 計畫經理

劉小勤 / 國立臺北科技大學離岸風電工程研究中心 計畫副理

盧明德 / 維三企業有限公司 總經理

陳儀諺 / 國立臺北科技大學土木工程系土木與防災研究所 博士生

國立臺北科技大學自 109 年開始接受經濟部標準檢驗局之委託，攜手國內大專院校、研究中心及工程顧問公司，一同編撰離岸風力發電場址調查及設計技術規範主文及解說，經專家學者和政府各主管機關長期審閱及修訂，逐步完善之並同時成立離岸風電發電技術指引資料庫平台。迄今，經濟部已於 112 年 2 月 13 日以技術指引方案公告實施，而資料庫平台亦於 112 年 3 月 31 日正式上線，並由經濟部標準檢驗局發函告知相關利害關係人。此外，研究團隊於執行過程中，為研析國際規範要求及其實質分析和設計方式，自發性研發一套固定式支撐結構分析程序，俾利帶動離岸風電設計能量在地化及自主化之風氣，並得推廣支撐結構設計過程要求及其細節，確保設計規範要求能徹底執行。爰此，本文主要簡介技術指引綱要內容、資料庫平台構架和分析軟體功能，冀能加強宣導臺灣對於風電再生能源開發之努力，亦祈對於離岸風電學術研究、工程設計實務、落實本土化和 2050 淨零排放等目標提供實質助益。

關鍵詞：離岸風電、場址調查、設計技術、資料庫平台、有限元素分析、OWPAS

## 前言

國家發展委員會於 2022 年公告「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」<sup>[1]</sup> 中，說明臺灣正面臨淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略，逐步實現 2050 淨零排放之永續社會，並於 112 年 1 月由行政院核定「淨零排

放路徑 112-115 年綱要計畫」<sup>[2]</sup>，針對淨零碳排目標進行各面向的減緩與調適。其中，推動轉型的十二項關鍵戰略中，即以風電與光電再生能源開發為主力。

臺灣離岸風電發展分為示範獎勵、潛力場址、區塊開發等三個階段，目前已進展至第三階段區塊開發，並以三期核配風場之規劃，每期共配發兩年的裝置容量共 3GW，第一期預計 2026、2027 年完工併網。另觀國內現行相關規範中，除專業技師依據「電業法」、「電業設備及用戶用電設備工程設計及監造範圍

\* 通訊作者，sungyc@ntut.edu.tw

認定標準」、「電業竣工查驗作業要點」及「技師法」進行設計與監造技師簽證外，亦由「離岸風力發電案場專案驗證審查示範輔導作業要點」和 CNS 15176 進行相關規範，惟大部分設計技術仍以國際規定為主，對於本土化議題及應有之技術規定仍相對闕如。

經濟部標準檢驗局（以下簡稱標準局），委託國立臺北科技大學（以下簡稱北科大）執行之「109 年度離岸風電場址調查與設計技術規則先期研析計畫」<sup>[3]</sup> 和「110 至 111 年度離岸風電場址調查及設計技術規範建置計畫」<sup>[4]</sup> 中，參考國際通用規範、世界各國規定和國內工程經驗，已建置離岸風電場址調查及設計技術規範，並經跨部會機關和專家學者審議後由經濟部以技術指引方式公告，而計畫內同步完成之離岸風電發電技術指引資料庫平台業於隔月正式啟用，說明臺灣不僅對外展現邁向淨零排放目標之決心，對內也持續建置更具韌性的設計技術規定，故將於本文簡介之。

另一方面，對於離岸風電支撐結構的分析軟體中，除美國國家再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）研發之風力發電機模擬軟體 FAST（Fatigue, Aerodynamic, Structures, and Turbulence）有限制開放外，其他大多由國外第三方驗證公司、軟體服務提供商或國際顧問公司等私人單位研發而成，分析軟體亦被視為機密並所費不貲。因離岸風電支撐結構承受之環境載重變異性較大，相關載重組合動則上萬組，常造成設計過程所需結構分析時間和產生之資料量過於龐大，現今雖可由雲端服務或平行運算方式加快速度，但卻也造成設計工程師無法取得執行過程資訊，常常僅能靜待最終計算結果，若具時程壓力或執行過程引致些微疏失，則需耗費更多心力解決問題。有鑑於此，本研究團隊於規範草案撰寫過程中，為以隨機變數模擬不確定參數，並利用機率密度函數表示系統需求與容量之機率分布，進而預測支撐結構破壞機率而完成可靠度分析，真正針對設計細節進行分析與模擬驗證，遂投入大量學研能量開發本土化離岸風電自動化分析軟體，現今研發結果有成故將一併概述此程式架構、執行範疇和主要貢獻。

## 離岸風力發電場址調查及設計技術指引簡介

離岸風力發電為我國重要的再生能源項目，目前將邁入區塊開發階段。我國離岸風力裝置發電量的快

速成長，得益於臺灣良好風場條件，以及政府對產業的積極推動，未來離岸風力發電將成為我國達成 2050 年淨零排放的重要助力。鑒於我國風場特有的本土議題，有別於國外風場設計條件，如颱風、地震、軟弱土層、砂波及海生物附著等，對離岸風場生命週期之設計、製造施工至運轉維護階段之參數設定或工法選定影響甚鉅。爰此，經濟部標準局借鏡國內外離岸風電相關法範、標準、指引等，並綜整考量我國特殊場址條件、法規環境、產業現況等因素，主導訂定「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」<sup>[5]</sup>、「離岸風力發電製造及施工技術指引」<sup>[6]</sup> 及「離岸風力發電運轉及維護技術指引」<sup>[7]</sup> 等三本技術要求（以下簡稱技術指引），作為國內離岸風力發電廠之開發業者、工程顧問公司、執業技師、驗證機構、製造商、施工團隊、運轉及維護等單位的重要參考依據。

為推動離岸風力發電技術指引，標準局邀請主管機關代表及產官學研各界專家，成立離岸風力發電技術指引指導審議會，負責各機關法源諮詢及監督腳色，並於其下項設立三個技術審議會，分別由北科大、財團法人船舶暨海洋產業研發中心、財團法人驗船中心負責編訂三本技術指引，北科大同步負責蒐集國內各機關部會之離岸場址紀錄資料並研發資料庫平台，俾利落實建置離岸風力發電技術規範之相關場址條件歷史資訊分析需求。離岸風力發電技術指引之組織架構如圖 1 所示。

北科大以作為我國工業立國搖籃的優良傳統著稱，自 109 年起致力發展離岸風電產業之各項核心技術，目前已成立離岸風電工程研究中心，並攜手中興工程顧問股份有限公司、台灣世曦工程顧問股份有限公司、國立臺灣大學、國立成功大學、國立臺灣海洋大學、國立高雄科技大學、私立淡江大學、財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心、行政院原子能委員會核能研究所等單位，建構橫跨產、學、研的離岸風電專業技術團隊，協助我國政府發展再生能源和推進淨零排放的長遠目標。

技術指引的內容架構如圖 2 所示，包括：第一章「總則」、第二章「離岸風力發電廠場址環境條件調查」、第三章「離岸風力發電廠性能與安全要求」、第四章「離岸風力發電廠場址環境條件評估」、第五章「離岸風力機支撐結構與電力系統設計」。每節內容均細部區分為正文和解說等兩大部分，相關內容簡述如下：

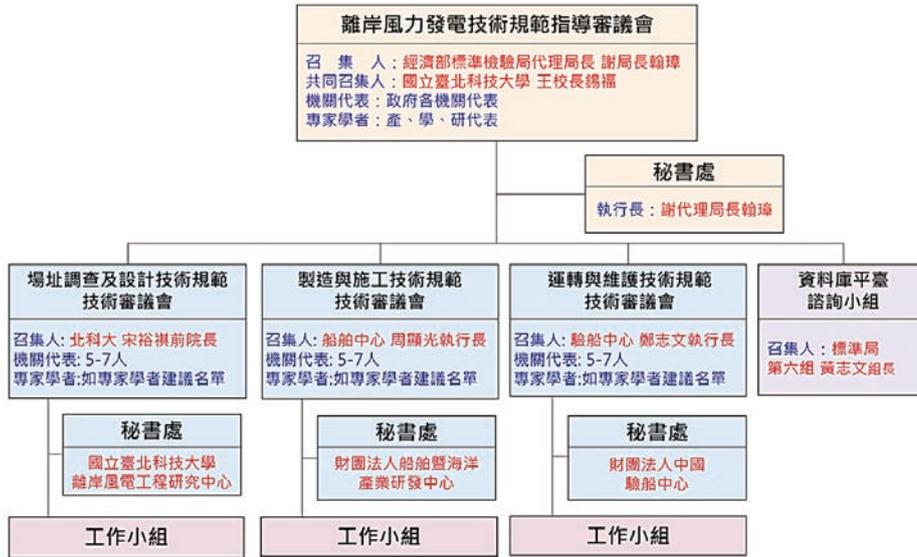


圖 1 離岸風力發電技術指引之組織架構

<p><b>第一章 總則</b></p> <p>1.1 目的</p> <p>1.2 主管機關</p> <p>1.3 適用範圍</p> <p>1.4 名詞與定義</p> <p>1.5 相關法令與標準</p> <p>1.6 設計、施工與運維之配合</p> <p>1.7 場址調查與設計階段送審文件</p> <p><b>第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查</b></p> <p>2.1 通則</p> <p>2.2 離岸風力發電廠場址環境條件調查</p> <p>2.2.1 一般規定</p> <p>2.2.2 風環境條件調查</p> <p>2.2.3 海洋環境條件調查</p> <p>2.3 水深地形及大地工程調查</p> <p>2.3.1 一般規定</p> <p>2.3.2 水深地形調查</p> <p>2.3.3 地球物理探勘</p> <p>2.3.4 大地工程調查與試驗</p> <p>2.4 其他環境條件調查</p> <p>2.4.1 腐蝕環境調查</p> <p>2.4.2 雷擊調查</p> <p>2.4.3 海生物附著調查</p> <p>2.5 特定場址環境條件資料提送</p> <p>2.5.1 一般規定</p> <p>2.5.2 風環境條件與海洋環境條件調查資料提送</p> <p>2.5.3 水深地形及大地工程調查與試驗資料提送</p> <p>2.5.4 其他環境條件調查資料提送</p>	<p><b>第三章 離岸風力發電廠性能及安全要求</b></p> <p>3.1 通則</p> <p>3.2 離岸風力發電廠驗證與審查</p> <p>3.2.1 一般規定</p> <p>3.2.2 專案驗證</p> <p>3.2.3 專案驗證審查</p> <p>3.3 離岸風力機性能及安全</p> <p>3.3.1 設計原則</p> <p>3.3.2 離岸風力機等級</p> <p>3.3.3 安全等級</p> <p>3.3.4 載重組合</p> <p>3.3.5 離岸風力機共振效應</p> <p>3.3.6 離岸風力機支撐結構附屬電氣</p> <p>3.4 變電站性能及安全</p> <p>3.5 輸電系統性能及安全</p> <p>3.6 其他要求</p> <p>3.6.1 安全警示及防護措施</p> <p>3.6.2 高壓氣體及壓力設備安全</p> <p>3.6.3 海洋公害防治</p> <p>3.6.4 運維船舶航行安全</p> <p>3.6.5 資訊安全防護</p> <p>3.6.6 環境與結構監測</p> <p><b>第四章 離岸風電場址環境條件評估</b></p> <p>4.1 通則</p> <p>4.2 風載重</p> <p>4.3 潮位</p> <p>4.4 波浪載重</p> <p>4.5 海流載重</p> <p>4.6 海床變動與淘刷</p> <p>4.7 海嘯載重</p> <p>4.8 地震載重</p> <p>4.9 土壤液化</p> <p>4.10 海洋附生物</p> <p>4.11 腐蝕</p> <p>4.12 其他載重</p>	<p><b>第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計</b></p> <p>5.1 通則</p> <p>5.2 離岸風力機支撐結構設計原則</p> <p>5.2.1 一般規定</p> <p>5.2.2 結構設計年限</p> <p>5.2.3 自然環境條件</p> <p>5.2.4 運轉操作條件</p> <p>5.2.5 臨時階段之設計考量</p> <p>5.3 離岸風力機支撐結構設計要求</p> <p>5.3.1 一般規定</p> <p>5.3.2 結構分析與模擬</p> <p>5.3.3 結構設計與檢核</p> <p>5.3.4 鋼結構強度及屈曲設計</p> <p>5.3.5 鋼結構疲勞設計</p> <p>5.3.6 結構接合設計</p> <p>5.3.7 灌漿接合設計</p> <p>5.3.8 運維船舶撞擊</p> <p>5.3.9 有限元素分析</p> <p>5.3.10 臨時階段之結構檢核</p> <p>5.4 大地工程設計</p> <p>5.4.1 一般規定</p> <p>5.4.2 樁基礎承載力與變位檢核</p> <p>5.4.3 群樁效應</p> <p>5.4.4 淘刷保護設計</p> <p>5.4.5 海墾槽溝設計</p> <p>5.5 防蝕保護</p> <p>5.6 電網連接及電力系統</p> <p>5.6.1 電網連接</p> <p>5.6.2 海底電纜</p>
---	--	--

圖 2 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」之章節架構

## 第一章 總則

總則主要說明指引訂定目的、主管機關、適用範圍、名詞與定義、相關法令與標準、設計及施工與運維之配合、場址調查與設計階段送審文件等。其中，此章除準確定義各項名詞與專業術語外，特別強調離岸風力發電廠於其全生命週期內之安全需求、使用性能與服務水準，而安全需求範圍包含離岸風力機結構共振評估、轉子機艙總成、離岸風力機支撐結構、海

上變電站結構、海纜等項目。此外，亦要求設計階段須揭櫫設計理念與對應的離岸風力發電廠全生命週期內各項需求與性能水準，編製明確的配套作業要求，以提供未來施工廠商編訂施工計畫書與開發商編訂運轉及維護計畫書之依據，並應於完成各項作業時提送相關調查報告與設計成果，經專業技師簽證及 / 或驗證機構核可後，提送主管機關辦理專案驗證審查並核定之。

## 第二章 離岸風力發電廠場址環境條件調查

離岸風力發電廠場址環境條件調查係以符合離岸風力發電廠於設計階段工程技術所需之條件進行調查，調查作業應涵蓋基本設計與細部設計等階段之需求，包含風環境條件與海洋環境條件調查、水深地形與大地工程調查及其他環境條件調查等。

風環境條件調查包含風速、風向、氣壓、氣溫、空氣濕度與淨輻射量等，海洋環境條件調查包含波浪、海流、水位與潮汐等；水深地形與大地工程調查包含水深地形調查、地球物理探勘與大地工程調查；其他環境條件調查包含腐蝕環境、雷擊與海洋附生物調查。

另外，對於特定場址環境條件資料，指引要求開發商應將調查成果提交至目的事業主管機關，提送資料應包含但不限於風況、波浪、海水水位、海流及潮汐等調查成果，以及水深、地形、地質及大地工程等調查與試驗成果，並須提送腐蝕環境、雷擊及海洋附生物等調查成果。

## 第三章 離岸風力發電廠性能與安全要求

離岸風力發電廠於其全生命週期內應符合預期的性能及安全等目標所需之工程技術要求。離岸風力發電廠性能及安全要求分類為 5 項：

- (1) 離岸風力發電廠驗證與審查：離岸風力發電廠之設計成果須完成專案驗證及專案驗證審查。專案驗證及專案驗證審查之目的，係以確認設計成果符合離岸風力發電廠預期之安全需求、使用性能與服務水準。
- (2) 離岸風力機性能及安全：離岸風力機於全生命週期內須至少應綜合考量離岸風力機的特性、等級及自然環境等設計條件，於設計年限內，不得因風、波浪、海流、颱風、地震、海嘯、土壤液化、腐蝕、雷擊與海洋附生物等作用，而損及原設計要求之性能，並維持其發電功能。
- (3) 變電站性能及安全：海上變電站須提供離岸風力發電廠電力併入電網之服務，並應避免變電站於結構破壞或功能失效，導致人員傷亡、環境嚴重汙染以及社會與經濟損失等後續效應，亦應考量人員使用空間、逃生通道與消防設備之安全，以提升人員與變電站設備之使用安全，而陸上變電站應符合輸配電設備裝置規則及國內相關建築設計法規。

- (4) 輸電系統性能及安全：輸電系統在責任分界點與電網相連，應符合台灣電力股份有限公司相關電網併聯要求與規範，而輸電系統應設置故障保護措施，另經考量電力系統之需求、重要性或系統穩定度分析確認有額外需要時，得增設保護設備。另對於海纜採埋設方式鋪設者，應設計適當埋設深度，確保足夠保護層厚度；採非埋設方式鋪設者，應避免海纜系統功能失效。惟無論採任何鋪設方式，均不得影響港口、航運及漁業使用，並應避免對現有管線造成影響。
- (5) 其他要求：包含安全警示與防護措施、液壓與氣壓設備安全、海洋公害防治、運維船舶航行安全、資訊安全防護、環境與結構監測等。

## 第四章 離岸風力發電廠場址環境條件評估

離岸風力發電廠之設計應考慮本節所述之環境條件，其中環境條件可分為風環境條件、海洋環境條件、水深地形與大地工程及其他環境條件等。風環境條件為影響轉子機艙總成結構完整性之主要外部環境條件。水深地形與大地工程為包含隨時間變化之海床移動、淘刷與其他海床不穩定要素。其他環境條件包含但不限於地震、海嘯、雷擊、腐蝕、土壤液化與海洋附生物等。

環境條件可分為正常環境條件與極端環境條件。正常環境條件一般代表風力機正常運作期間頻繁發生之情況，並與重複發生之結構載重狀況有關；而極端環境條件則代表罕見之情況，通常以 1 年或 50 年回歸期之極端值決定，惟在某些非常特殊之極端事件分析時，應特別注意統計資料之數量及品質是否具有代表性。

設計時應依特定場址之特性，統計分析離岸風力發電廠特定場址之風環境條件、海洋環境條件、水深地形及大地工程與其他環境條件等之數據，彙整於設計文件中。

## 第五章 離岸風力機支撐結構與電力系統設計

本章適用於固定式離岸風力機支撐結構與相關電力系統之設計。設計者可自行選擇國際普遍認可之固定式離岸風力機支撐結構設計標準 / 規範，如國際標準化組織 (ISO 19902)、歐洲 (如 EN 1993 與 NORSOK N-004 等) 或美國 (如 API RP 2A-LRFD) 等，並配合指引之相關規定進行結構設計，惟目前歐洲與美國採用不同的標準 / 規範系統，有關結構材料、載重與材

料因子、安全係數與製造公差等要求或有不同規定，設計者應採用單一或相同系統進行設計。除非可以確認具備較高或同等之可靠度水準，否則不得混用標準/規範。

## 離岸風電發電技術指引資料庫平台

臺灣海峽為全球矚目的優質離岸風場，惟位處颱風與地震等天然災害高潛勢地區，且環境中尚有如土壤液化、腐蝕條件及海生物附著等特殊場址條件，均有別於國外風場環境。爰此，因應各技術審議會之相關場址條件資料需求，北科大受標準局委託建置「離岸風力發電技術指引資料庫平台」<sup>[8]</sup>，透過跨部會資料庫架接方式，針對我國各部會、研究單位等之場址環境調查資料進行蒐集及整合，藉此落實技術指引內容中本土化特殊場址議題。

資料庫在初期（109年起）即辦理全國離岸風電相關資訊的盤點，由標準局帶領與海域場址條件原始數據資料庫主管機關進行接洽，並執行相關開放資料之架接工作。另於 110-111 年間，積極向開發商、製造商、專案驗證機構、設計顧問公司等利害關係人進行資料需求訪談，確保資料庫平臺的內容和形式滿足各方使用者需求。此外，考量相關資料之機敏性及授權使用規則，資料庫主要係以各部會之開放資料（Open Data）為基礎，並依前述需求訪談結果，採條件式蒐集及篩選與離岸風電工程設計相關之地質、地震、海洋氣象與海生物資料。

經過耗時兩年多的建置，離岸風力發電技術指引資料庫平台業於 112 年 3 月 31 日正式上線（網址 <https://www.owpdb.tw>），資料庫首頁如圖 3 所示。資料庫目前提供 8 個部會資料的檢索與查詢功能（圖 4 所示），包括交通部下屬之中央氣象局、運輸研究所，經濟部下屬之水利署、標準

檢驗局、中央地質調查所，內政部及下屬國土測繪中心，以及工業技術研究院，共計 32 項資料品項。

資料庫亦整合 Jupyter 開源技術，成為一個可交談的資料操作平臺，使用者可利用程式語言（如 Python、R）客制化地操作與應用資料，而得以拓展資料應用範疇，更加契合各使用者族群的需求，俾作為離岸風電工程實際應用之參考以及國內離岸風電工程研究及教育推廣用途。

資料庫已錄入北科大風工程團隊學研成果展示範例，藉以調用標準局臺中港測風塔資料，產製風場之正常及極端風況條件的流場基本參數：平均風速剖面、紊流強度剖面、紊流尺度剖面、風花圖（圖 5 以風花圖為例），著重進行我國風載重推估，建立「場址調查及設計技術指引」之不同設計限度狀態下的設計載重。藉由資料庫的資料操作平臺及驗算程式模組化操作，達成原始資料調用、模組計算、衍生圖表匯出流程，實現客制化地資料加值衍生操作。



圖 3 離岸風電發電技術指引資料庫平台首頁



圖 4 離岸風電發電技術指引資料庫平台檢索功能

資料庫亦納入三本技術指引，並建置了依據章節的指引條文查閱功能，如圖 6 所示。配合技術指引的章節，亦規劃「相關資料」檢索欄位（圖 7），包括相關參考文件、相關參考規範、相關參考資料的檢索資訊或連接，滿足使用者的資訊需求，方便使用者的衍生研讀。

北科大協助標準局建置之「離岸風力發電技術指引資料庫平台」，打造資料庫為離岸風電資訊服務平臺，提供離岸風力發電技術指引之場址條件資訊參考及示範例展示，並藉由風電資訊，輔助離岸風場政策規劃及落實，提升臺灣離岸風電技術發展，加速臺灣相關技術本土化，創造經濟發展、能源轉型多贏局勢的效益。

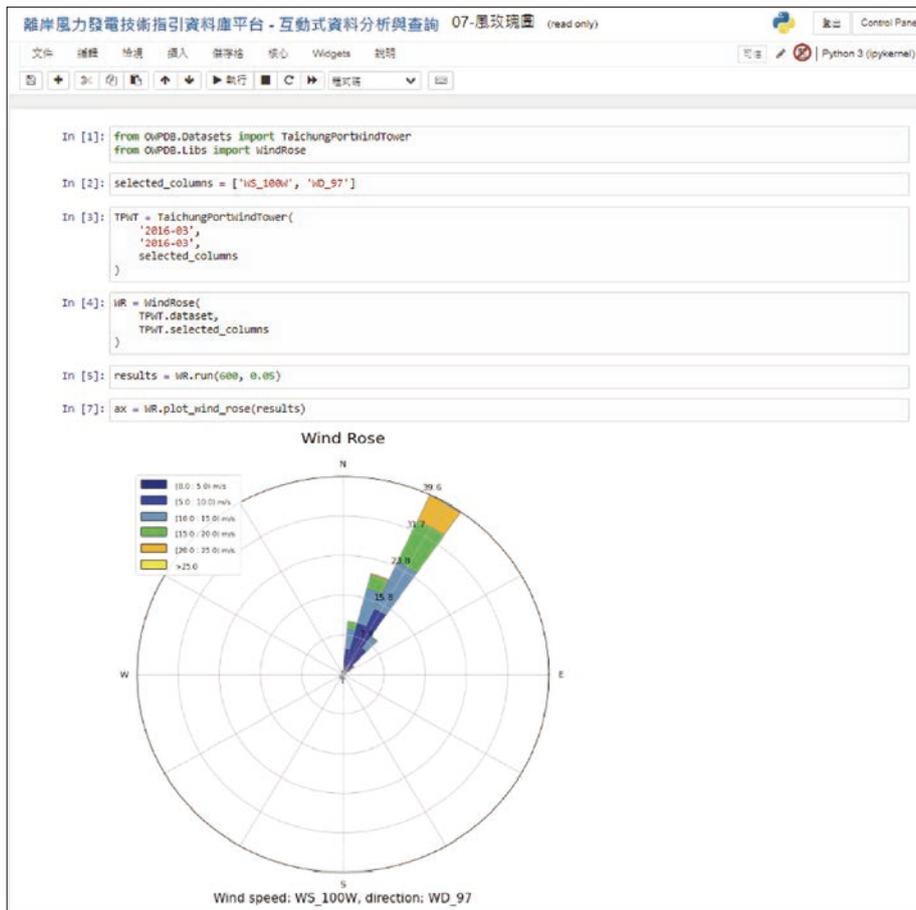


圖 5 資料庫資料操作平台客製風花圖



圖 6 資料庫技術指引檢索功能



圖 7 資料庫參考資料檢索功能

## 固定式支撐結構分析軟體研發架構及規劃

北科大離岸風電工程研究中心以有限元素結構分析軟體 Ansys 為求解器，依據固定式支撐結構設計過程常見之載重迭代分析 (Iteration Load Analysis, ILA) 程序，撰寫：(1) 前處理 (Pre-processing)；(2) 求解過程

(Solution)；(3) 後處理 (Post-processing)<sup>[9]</sup> 等各階段之自動化分析流程，並命名為 NTUT OWPAS (Offshore Wind Power Analysis System, 如圖 8)，專責整體支撐結構分析程序、管狀接頭疲勞應力計算及全自動批次處理工作。求解器 (如圖 9) 之功能說明如下：

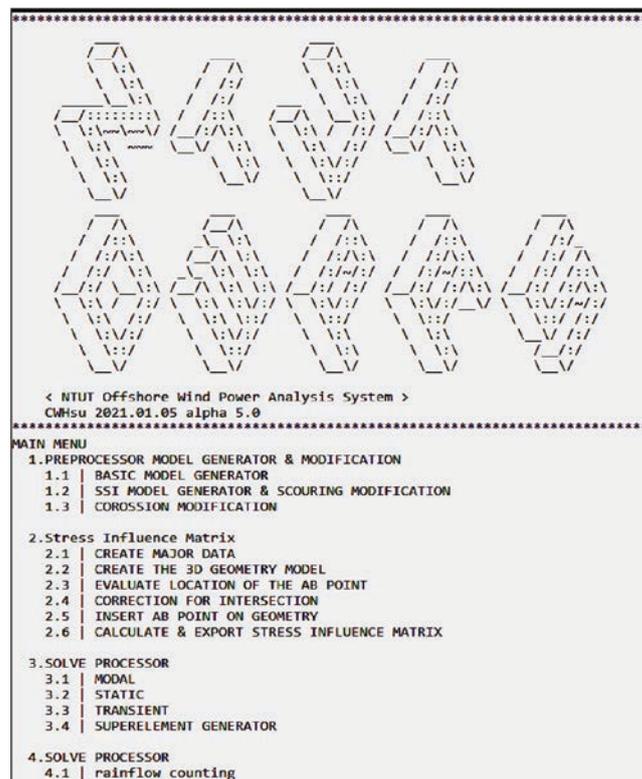


圖 8 NTUT OWPAS 原始處理視窗介面

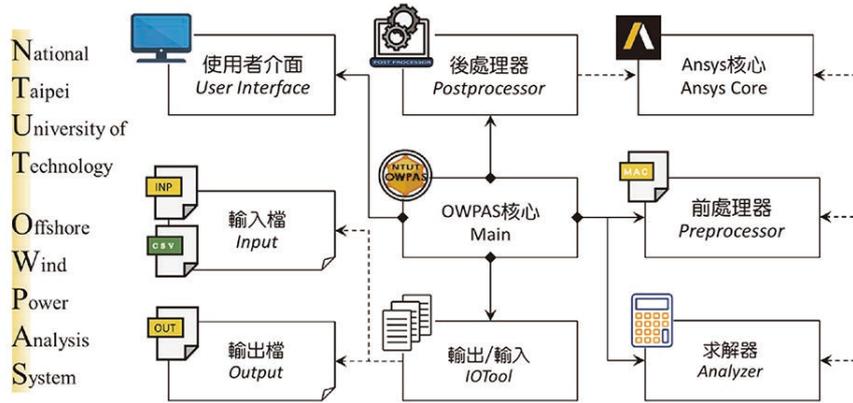


圖 9 OWPAS 求解器自動化分析流程

- (1) 前處理：工作主要目的為建立結構分析模型，以 APDL (Ansys Parametric Design Language) 程式語言，直接給定結構節點、桿件連接、材料屬性、指定元素類型及進行網格劃分等，同時研發 ILA 過程中所需之超元素 (Super Element, SE) 自動化產生語法，並進一步快速產出整體下部支撐結構之質量、阻尼、勁度和外力矩陣。
- (2) 求解過程：此階段需設定結構分析類型、分析選項和邊界條件。常見之結構分析類型包含靜力分析 (Static)、模態分析 (Modal)、暫態分析 (Transient) 和子結構 (Substructuring) 分析等，而邊界條件設定則提供以彈簧模擬土壤結構互制效應 (Soil-Structure Interaction, SSI)，俾利評估離岸風力支撐結構之共振模態及基樁承載力。

- (3) 後處理：Ansys 於求解過程後，將產生輸出文件 (Output file)、結果文件 (Results file) 及程式數據庫 (Program database)，俾利於後處理階段進行二次開發，或採圖形使用者介面 (Graphical User Interface) 查看分析結果。而後處理又分為一般後處理器 (General Postprocessor) 與歷時後處理器 (Time History Postprocessor)，一般後處理器能檢視特定時間下整體結構之分析結果，並得快速繪製等值線、向量場、變形圖等，而歷時後處理器則能查看特定位置在不同時間下之分析結果。後處理功能適用於桿件或接頭之應力檢核或使用率研析。

另一方面，ILA 程序主要係由離岸風電風場開發商、支撐結構工程設計顧問公司和風力機製造商等三者共同執行 (如圖 10)。一開始由開發商偕同第三方

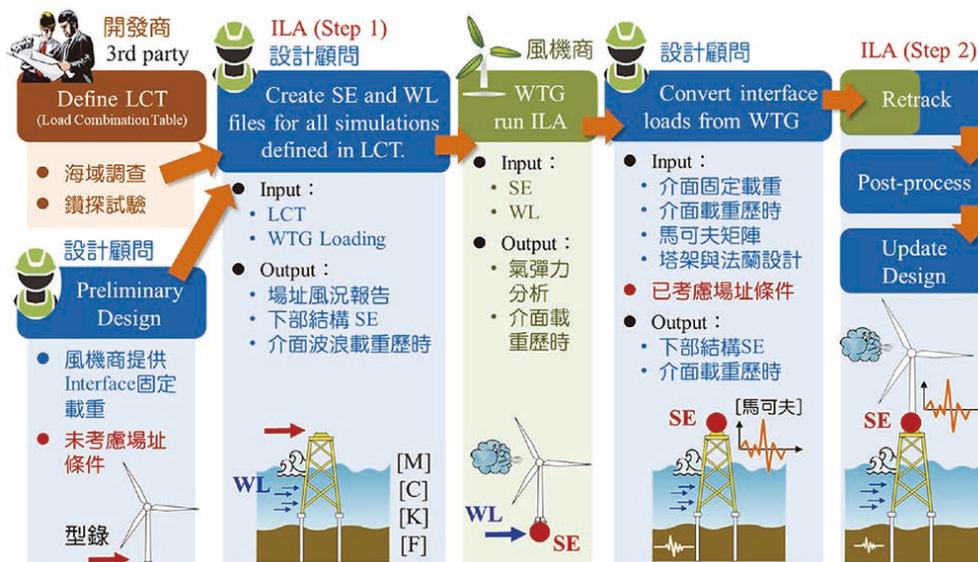


圖 10 載重迭代分析程序示意圖

驗證單位，經審視前階段可行性評估和環境影響評估的場址環境調查資料，訂定適當之載重組合表 (Load Combination Table, LCT) 或設計載重表 (Design Load Case, DLC)，另由風機商先提供數筆風力機傳遞至轉接段 (Transition Piece, TP) 之載重與風力機特性，再由顧問公司依據前述 LCT 及海況資訊，初步進行支撐結構設計，並將成果濃縮出下部結構之超元素 (Super Element, SE)，以及產出相應之質量、阻尼、勁度和外力等矩陣，開啟第一階段之 ILA。此後，風機商賡續其設計結果，重新進行氣彈力分析，取得更詳細之風載重歷時及風力機 SE，並傳回設計顧問公司進行確認，經資料反覆傳遞和設計成果收斂後，完成整體載重迭代分析程序。

根據前述 ILA 程序，以固定式支撐結構設計流程而言，除須先透過模態分析檢核支撐結構自然頻率之 1P 和 3P 外，為確保下部支撐結構在各程度狀態下之完整性，可進一步依據風場環境參數和設計載重條件對結構進行暫態分析，分析所須文件以及前處理、求解和後處理流程如圖 11 所示。其中，設計載重表係考量離岸風電之發電、發電及故障發生、啟動、正常停機、緊急停機、待機 (待機狀況或惰轉)、待機與故障情況、運輸安裝及維護修理、地震、颱風等設計情境，需設定風況、波浪、風與波浪方向、海流、水位、其他條件、分析種類和載重部分安全係數等，而載重組合可能高達上萬組，以自動化設定各式分析

載重實為重要。爰此，OWPAS 著重於開發分析過程所需之各種設定要求，諸如暫態分析設定、由風機商所提供之介面力、海洋環境條件和波浪理論設定等，待匯入支撐結構有限元素模型並設定斷面性質、材料特性和邊界條件後，即可利用 Mechanical APDL 完成分析工作。其中，海洋環境條件模擬與波浪理論設定最為重要，可利用 Ansys 中 OCTYPE 指令設定海洋環境條件類型，如海洋基本條件 (BASIC)、海流條件 (CURR)、波浪條件 (WAVE) 等，另利用 OCDATA 或 OCTABLE 功能進行水深條件、材料屬性編號、桿件浸水條件、平均海水面位置、附加質量係數、浮力係數、波浪行進方向及不同雷諾數或水深條件下採用之波浪力係數<sup>[10]</sup>。

最後，針對後處理與支撐結構程度狀態檢核，可在細分為：(1) 管狀接頭疲勞程度狀態檢核；(2) 支撐結構極限程度狀態檢核。相關應用說明如下：

(1) 管狀接頭疲勞程度狀態檢核

風力機支撐結構通常會面臨高週疲勞破壞 (High-Cycle Fatigue)，因此由有限元素模型評估管狀接頭疲勞損傷和壽命時，應依據規範之要求和建議計算管狀接頭銲接處之熱點應力，接而將熱點應力歷時以雨流計數法和 S-N 曲線，由應力振幅求失效次數和損傷量。基於暫態分析與局部管狀接頭有限元模型之疲勞分析流程如圖 12 所示，OWPAS 已完成自動化建立管狀接頭之 3D 模型 (如圖 13)，並得控制特徵點座標並

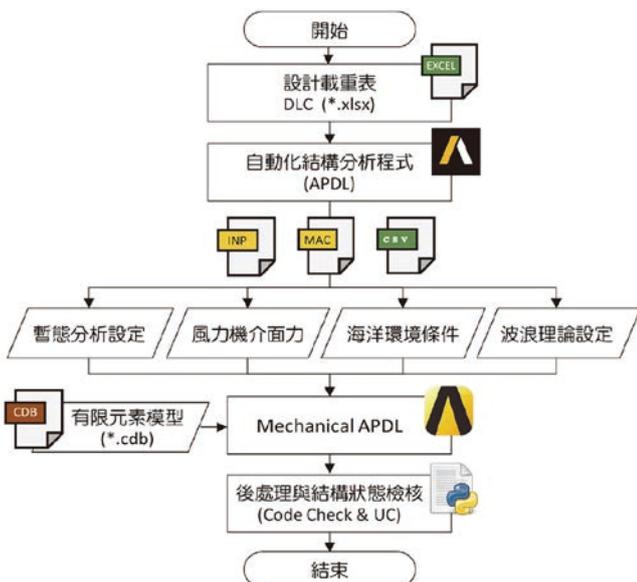


圖 11 依據設計載重條件建立暫態分析流程

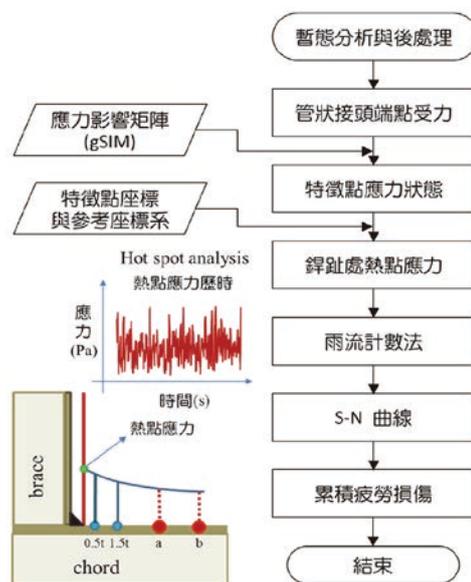


圖 12 基於暫態分析與有限元模型進行管狀接頭疲勞分析流程

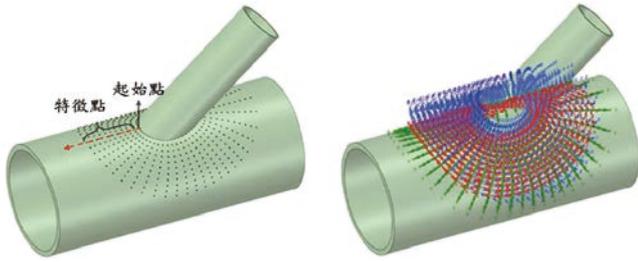


圖 13 管狀接頭三維建模與特徵點座標系建立

進行 mesh，俾利符合熱點應力取點要求，亦接續完成疲勞限度狀態檢核之功能<sup>[11]</sup>。

(2) 支撐結構極限狀態檢核

離岸風力機之下部結構檢核對象主要可以分為管狀桿件 (Tubular Member) 以及管狀接頭 (Tubular Joint)，若基於 ISO19902:2020 規範以一般管狀桿件檢核為例，可將相關分析方法與流程彙整如圖 14 所示。其中，首要工作為區分各元素屬於桿件或接頭，再由有限元素中擷取節點編號、座標、元素類型、質點座標與大小、斷面標號和材料參數等資訊。再者，針對檢核項目與使用率，主要係依據 ISO19902 規範以設計載重條件作用下，構件受力狀態 (Action Effects) 與結構設計強度 (Design Resistance) 之比值表示，本文將統稱為使用率 (Utilization)。而檢核項目則較為繁雜，需先審視構件載重作用類型為承受單一載重或複合載重，另經軸向拉力、軸向壓力、彎矩、剪力、扭矩、水壓或數種載重組合之檢核後，方能求得支撐結構各部位之使用率，而本團隊亦將所得使用率成果匯回 Ansys 中，藉此可由圖形及視覺化介面展現整體支撐結構使用率分布狀況 (如圖 15)。

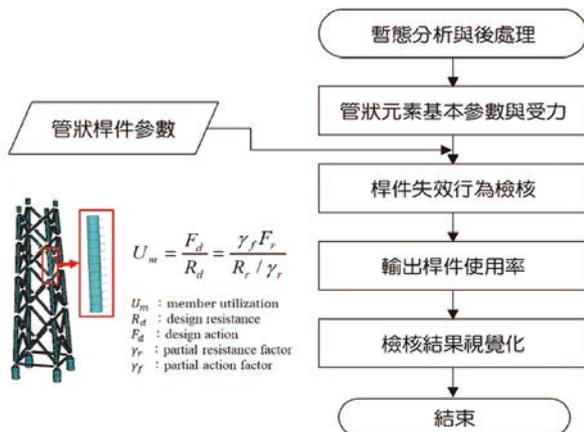


圖 14 完整無受損之一般管狀桿件分析檢核流程

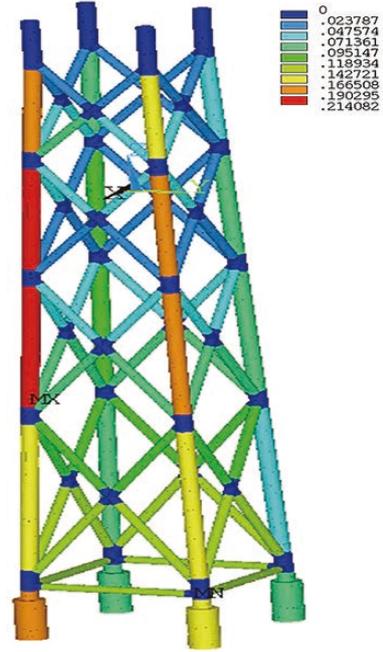


圖 15 管狀桿件使用率與檢核結果視覺化

結論與建議

本文主要以本土化離岸風電設計技術發展為基礎，簡介國內目前廣續公告之「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」、「離岸風電發電技術指引資料庫平台」及固定式支撐結構分析軟體 (NTUT OWPAS) 功能。茲提出相關結論與建議如下：

1. 「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」已於 112 年 2 月 13 日由經濟部頒布，此引指致力納入我國場址條件之特殊性考量 (如腐蝕、地震、颱風、軟弱土層及海生物附著等)，研析適合我國環境條件之設計作用力，發展本土化的支撐結構及基礎的分析設計方法，俾利保障離岸風力發電廠於其使用年限之安全需求、使用性能與服務水準等設計目標，除可符合國際通用標準之要求，亦藉此完善離岸風場專案驗證審查制度，進而提高能源自主性及創造產業效益。需特別說明的是，此技術指引目前僅適用於固定式離岸風電支撐結構，對於海上變電站和浮動式離岸風電而言，其相關內容刻正編撰中，待技術與指導審議會校閱並通過後方可能公告施行。
2. 「離岸風電發電技術指引資料庫平台」已於 112 年 3 月 31 日正式上線，其主要係以國內各部會之開放資料為主，經與開發商和設計顧問公司需求訪談後，針對中央氣象局、交通運輸研究所，水利署、標準檢驗局、中央地質調查所，國土測繪中心、工

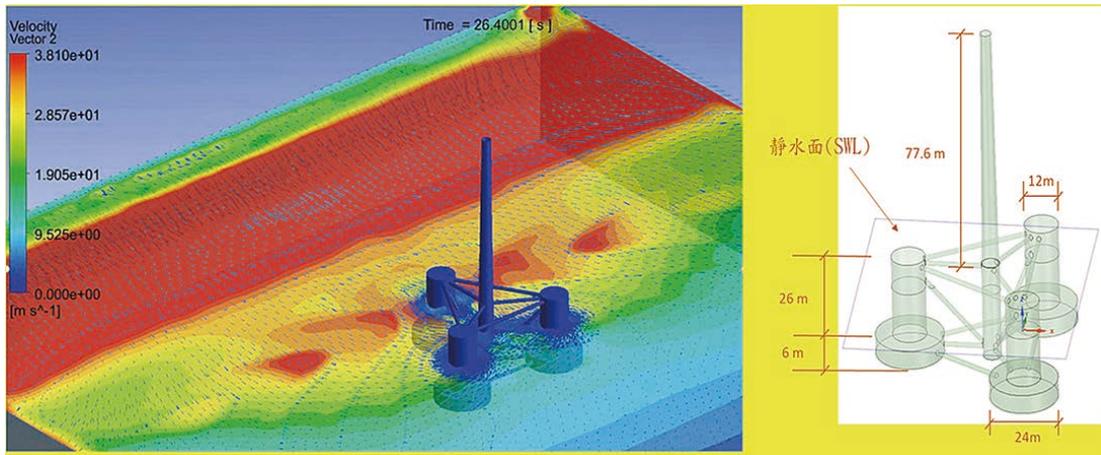


圖 16 浮動式離岸風電結構分析與評估

業技術研究院等 32 項資料基礎資料進行介接，致力於產出離岸風電相關之地質、地震、海洋氣象與海生物等衍生性資料。資料庫整合 Jupyter 開源技術，使用者可直接利用程式語言（如 Python、R）與資料庫平臺進行交談，除可由各部會切面或地圖系統切面進行基本參考資料檢索工作，亦得進一步利用程式語言求取客制化成果。資料庫目前業已完成前述三本離岸風力發電技術指引展示介面，並將各部會基礎資料及技術指引相關內容進行連結，目前積極完成風場正常及極端風況條件之流場基本參數產製示範例、地質調查之 SPT 及 CPT 液化評估法示範例、波浪觀測紀錄之施工窗期統計與暴潮偏差示範例等，冀能推廣直接由資料庫產製衍生性資料用途，為場址環境調查及設計技術提供更優質的參考依據。

3. NTUT OWPAS 屬於固定式支撐結構分析軟體，主要係以 Ansys 為求解器並進行前後處理研發工作，另參考開發商、風機商和設計顧問公司之 ILA 程序，編制快速建立結構模型、模態分析、超元素濃縮、波浪載重施加、三維管狀接頭模型建立、特徵點運算、雨流法計算、疲勞及極限應力檢核、使用率視覺化輸出、批次處理等全自動程式架構。另對於流固耦合、土壤結構互制、船體碰撞、管架局部加勁、轉接段有限元素分析、灌漿段分析、不同土層地震力歷時分析等案例，均得利用 OWPAS 進行實質運用。研究團隊目前亦已完成浮動式離岸風電之支撐結構排水量、吃水深、反應振幅運算子（Response Amplitude Operator, RAO）、附加質量、阻尼、自由振盪、浮筒加勁、繫纜系統等研析

工作（如圖 16），希望真正協助本土化固定式及浮動式離岸風電之工程設計實務工作。

## 誌謝

感謝經濟部標準檢驗局經由公開招標方式，委託國立臺北科技大學辦理「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」及成立「離岸風電發電技術指引資料庫平台」，並提供研究過程所需業務經費及協助，執行團隊謹致以衷謝忱。

## 參考文獻

1. 國家發展委員會，「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，2022 年 3 月 30 日，[https://www.ndc.gov.tw/Content\\_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76](https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=DEE68AAD8B38BD76)
2. 行政院，「淨零排放路徑 112-115 綱要計畫」，2023 年 1 月核定。
3. 經濟部標準檢驗局，「109 年度離岸風電場址調查與設計技術規則先期研析計畫」，國立臺北科技大學執行，2020 年。
4. 經濟部標準檢驗局，「110 至 111 年度離岸風電場址調查及設計技術規範建置計畫」，國立臺北科技大學執行，2022 年。
5. 經濟部，「離岸風力發電場址調查及設計技術指引」，國立臺北科技大學執行，中華民國 112 年 2 月公告。
6. 經濟部，「離岸風力發電製造及施工技術指引」，財團法人船舶暨海洋產業研發中心執行，中華民國 112 年 2 月公告。
7. 經濟部，「離岸風力發電運轉及維護技術指引」，財團法人中國驗船中心執行，中華民國 112 年 2 月公告。
8. 經濟部標準檢驗局，「離岸風電發電技術指引資料庫平台」，國立臺北科技大學執行，中華民國 112 年 3 月 31 日正式上線，網址 <https://www.owpdb.tw>。
9. E. Madenci and I. Guven, *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*, Springer (2015).
10. 劉伯紘，「離岸風力機套筒式支撐結構管狀接頭疲勞分析與極限狀態檢核」，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，宋裕教授指導，台北（2022）。
11. Po-Hung Liu, I-Yan Chen, Xiao-Qin Liu, Chin-Kuo Su, Chi-Wei Hsu, Dzong-Chwang Dzeng, Yu-Chi Sung, "Stress influence matrix on hot spot stress analysis for welded tubular joint in offshore jacket structure", *Ocean Engineering* 251 (2022).



# 從淺海邁向深海 政府應開放 多元離岸風電浮台 做測試

李宏道 / 台亞風能工程技術 總監  
林琮盛 / 台亞風能公共事務部 協理  
黃佩君\* / 台亞風能公共事務 資深經理  
蔡幸芳 / 台亞風能公共關係 資深經理  
王詮文 / 台亞風能海洋工程 工程師

台灣離岸風電發展進程從第一階段示範苗栗、彰化外海的示範風場開始，延續至潛力場址的開發，風場多分布於彰化外海的雲彰隆起海域，整體水深相對較淺（小於 50 公尺），藉此培養國內水下基礎—套管式基礎（Jacket）及水下基樁（Pin-pile）本土供應鏈；2022 年正式啟動第三階段—區塊開發，整體離岸風電發展進入快速成長期，但伴隨快速成長離岸風電進程而來的將會面臨適合固定式之海域在避開軍事區域、環境敏感區、航道等重要敏感區之後逐漸開發完成，以區塊開發 3-1 為例，共同參與並得標風場共計 10 案，其中包含風妙、海鼎二、海鼎三、加能、海盛、環洋、海峽、北能、達天、又德等 6 家開發商共計 10 案離岸風場開發計畫，未來若要持續開發勢必將面臨水深較深之海域，而原本的固定式工法將不適用，需要仰賴浮動式風場克服水深限制。

關鍵字：離岸風電、區塊開發、浮式風場

## ABSTRACT

The development of offshore wind power in Taiwan began with the demonstration wind farms in the first phase, located off the coast of Miaoli and Changhua. It then continued with the development of potential sites (phase II). The wind farms are mostly distributed on the coast of Changhua, with relatively shallow water depths (less than 50 meters). The Phase II strategy aims to cultivate a domestic supply chain for substructure foundations, such as jacket foundations and pin-pile. In 2022, the third phase, known as zonal development, was officially launched. The overall offshore wind development entered a period of rapid growth. However, with the rapid growth of offshore wind, suitable fixed seabed areas must be developed after avoiding military zones, environmentally sensitive areas, and important sensitive areas such as fairway channels. Taking zonal development 3-1 as an example, a total of 10 wind farms were awarded to

participating developers, including Feng-Miao, Formosa 2, Formosa 3, Jia-Neng, Formosa 4, Huanyang, Hai-Xia, Bei-Neng, Da-Tian, and You-De. To sustain future development, it will inevitably require exploring deeper water areas, where traditional fixed foundations will not be applicable. Floating wind projects will be necessary to overcome the water depth limitations.

Keywords: Offshore Wind, Zonal development, Floating Wind Farm

## 淺水區邁向深水區

台灣海峽受惠於台灣的中央山脈及中國的武夷山脈，形成管道束縮效應，結合穩定的東北季風及西南氣流，使得風速快速且長年穩定，故彰化外海的淺水區成為了各家開發商兵家必爭之地，但是隨著水深逐漸加深，單樁水下基礎（Monopile）早已不敷使用，而套管式水下基礎（Jacket type foundation）水下基樁

\* 通訊作者，lia.huang@tre.com.tw

表 1 浮動式平台技術 (台亞風能自行整理)

台亞風能	駁船式浮台	半潛式浮台	浮筒式浮台	張力腿式浮台	非傳統式浮台
	Barge type	Semisub type	Spar-buoy type	Tension leg type	Unconventional type
技術優勢	<ul style="list-style-type: none"> <li>外型簡單</li> <li>製造容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術成熟</li> <li>結構穩定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術成熟</li> <li>穩定性高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>穩定性高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新穎阻尼技術</li> </ul>
技術劣勢	<ul style="list-style-type: none"> <li>浮台重量較重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>焊接節點多建造難度高</li> <li>需有壓載系統</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>目標場址水深條件限制</li> <li>拖航階段工法較嚴苛</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>目標場址水深條件限制</li> <li>繫錨系統要求高</li> <li>成本較高尚未於離岸風電實際應用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術相對不成熟</li> <li>融資相對不容易</li> </ul>
繫泊系統	多採用懸鏈式繫泊系統			張緊式繫泊系統	取決於設計結果
錨碇系統	錨碇選擇多元			選擇較少(需抵抗垂直受力)	取決於設計結果
浮台示意					

除了面臨樁徑加大打樁噪音變高外，水下基礎的整體尺寸也會隨之加大，且在施工運輸階段所需要的船舶、設備要求提高，大型尺寸的水下基礎會導致整體的開發成本急遽上升，浮動式平台的技術就屬於未來發展的重點。

目前世界主流浮動式平台技術可分為五大技術群集 (如表 1 所示)，其中每一技術群集各自有數種不同技術，以致目前除了幾個已有浮動式風場 / 示範案實績的浮台技術，如 Equinor、Principle Power、BW Ideol 外，仍有數十種浮動式浮台技術存於市場中，實際穩定性仍有待完整驗證；浮動式平台技術源於石油天然氣產業，大多仍依據歐洲海域環境條件進行設計，對於好發颱風且海流較強的東亞地區而言是否可以在符合安全規範之下仍使整體專案具有經濟效應，必須進一步檢視。

## 深水區發展目標

### 在台灣發展浮式風電

接連第一階段示範階段及第二階段潛力場址後，

12 哩內 (如圖 1 所示) 離岸風電開發區域逐漸飽和，且固定式水下基礎佔地跨距將近三十公尺且基樁直徑超過四公尺<sup>(1)</sup>，海事工程安裝及國內既有港埠設施將面臨險峻挑戰，另外適合固定式基礎之場址多位於中彰外海 (如圖 2 所示)，避開環境敏感區、漁業作業區及國防安全禁限建等紅燈區之後，可開發面及逐漸趨於飽和，另外額外考量水深條件及海域底質狀況，中彰外海之海域閒置畸零地日益增加，無法有效利用海域空間創造最大開發價值。深水區及 12 哩外的可開發區域則是未來開發重點；浮式風電對於水深的限制性不若固定式一般敏感，且對於海洋環境噪音也遠低於固定式基礎在深水區開發所產生之影響，降低海洋噪音的影響大有益助，國內目前多數浮式風場多座落於竹苗外海緊鄰 12 哩線 (如圖 3 所示)，該處水域大多超過 60 公尺，且整體風能潛勢更甚，對於開發該處場域又是一大利多。另以國家發展層面來看，目前世界浮式風電發展進程以技術成熟度 (Technology Readiness Level, TRL) 來看，運轉中的專案多屬於 TRL 7- 原型規模試驗 (Prototype Scale)



圖 1 台灣海峽已公告風場 (圖片來源：台亞風能自行整理)

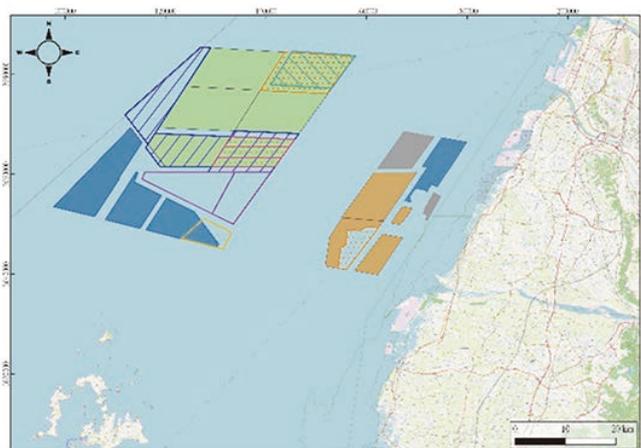


圖 2 中彰外海已公告風場 (圖片來源：台亞風能自行整理)

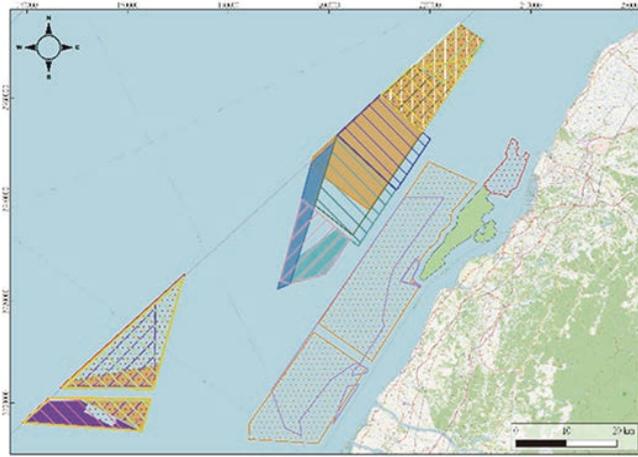


圖 3 竹苗外海已公告風場 (圖片來源：台亞風能自行整理)

或 TRL 8 – 準商業規模 (Pre commercial)，若我國可藉由示範案的機會在台灣海峽測試不同的浮動式平台技術，整合不同技術在台灣海峽多變的海氣象條件中運動表現及發電效應等資訊，充分掌握並建立自主國內資料庫，未來亞洲地區發展浮式風電台灣將處於領先地位並成為核心技術輸出中心。

經濟部於 2022 年公布「離岸風電浮動式示範計畫」，藉由會議與開發業者進行討論，共同建構最適合台灣的浮動式示範計畫，對於工程層面而言，開發業者可先測試前瞻技術，以小規模、具彈性的方式測試該技術之可靠性；以商業/經濟層面而言，可藉由示範案，先行檢視國內相關供應鏈，多元浮台技術相對應不同的供應鏈，若可藉由示範案這次機會，整合相關供應鏈，這不僅可以降低投資單一浮台技術之風險，亦可帶動除了固定式風電產業以外的產業鏈，建立更全面的離岸風電產業群集。

### 浮動式示範計畫面臨議題

示範案係以透過較高的躉購費率 (Feed-In Tariff, FIT) 吸引開發業者參與，計畫核心以測試技術為優先，但目前經濟部初步規劃：原則擇優選擇兩案，視情況開放第三案參與示範獎勵計畫，倘若獲選之三案示範計畫均以商業面進行考量，均選擇已有實績且同一類型浮台，恐怕會失去示範計畫 – 測試技術的核心本質，對於表 1 所示的五大技術群集無法達到充分演示。

浮筒式浮台 (Spar-bouy) 以簡單外觀且優異之浮台穩定性使其為現今布置容量最多的浮台形式，浮筒式浮台雖於擺動 (Yaw) 方向具有較大運動振幅但仍於

橫搖 (Roll) 及縱搖 (Pitch) 等兩方向之運動具有優異性能 (如圖 4 所示)，但是浮筒式浮台細長結構對於水深有一定程度要求，對於台灣海峽而言開發相對不易。

半潛式浮台 (Semi-submersible) 演變於油氣產業之鑽油平台，藉由多組浮筒 (Column) 及沉箱 (Pontoon) 組成浮台，但做為主要浮力提供來源之大型圓筒動輒超過十公尺直徑且高度超過二十公尺，另外整體浮台於建造階段所需要之要求，對於台灣現有供應鏈及港埠設施相對嚴苛，在生產製造上面會是一大挑戰，其結構如圖 5 所示。

駁船式浮台 (Barge type) (如圖 6 所示) 雖然整體浮台重量較重，但是在浮台材料除了鋼材以外亦可選擇混凝土作為浮台主要材料，搭配相對簡單之結構外觀及較淺吃水深的特性相對適合國內現有港口，整體生產成本仍具有一定競爭力。

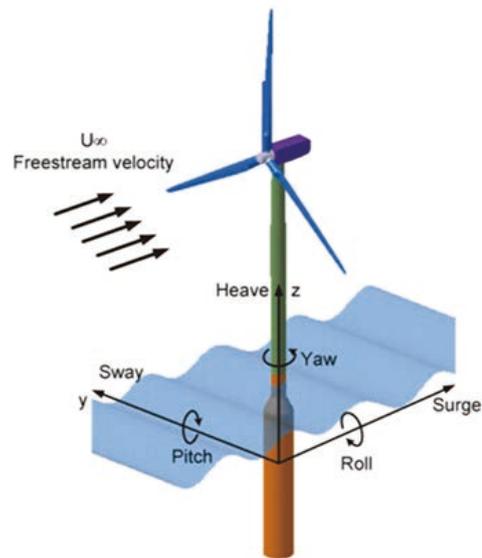


圖 4 浮筒式平台結構及座標系統示意圖 (圖片來源：Mareike, 2017<sup>[21]</sup>)

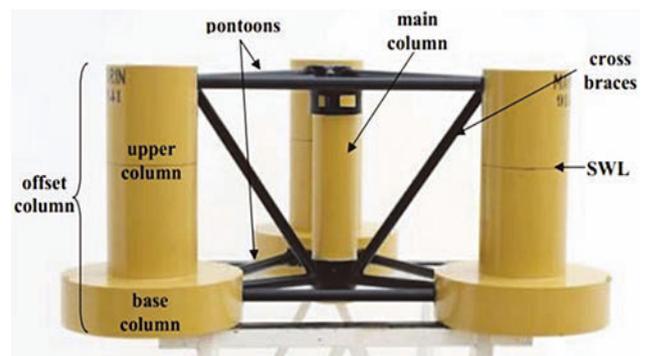


圖 5 半潛式浮台結構示意圖 (圖片來源：Watsamon, 2014<sup>[31]</sup>)



圖 6 駁船式浮台港口組裝示意圖 (圖片來源: BW Ideol 官方網站<sup>[41]</sup>)

不同群集技術都具有各自優劣勢，勢必透過通盤全面性的檢視，擇優選定台灣最適化浮台技術。

離岸風電案場開發動輒牽一髮動全身，不單只是測試技術可行性，亦須針對相關配套措施進行通盤檢核，現有幾個主要風電港，如台中港、高雄港、台北港都有需要調整之項目，若能藉由示範案重新激活國內現有之其他閒置港口，會提升台灣港埠設施使用率及協助閒置港口從原本較為單一的任務導向轉型為較多元任務導向港口，即便歐洲已經發展離岸風電行之有年，在面臨浮式風電的開發，亦是整合各個不同港口進行任務分工，以祈達到最佳利用效率，此一模式可供國內發展浮式風電計畫參考。

目前政府擬以躉購費率支持浮動式示範案開發，以政策鼓勵開發業者投入，但倘若在整體大環境不穩定的情況中，單靠躉購費率可能會導致誘因不足仍不足以吸引足夠開發業者共襄盛舉，勢必需要提供其他面向政策福利提高誘因，示範案雀屏中選之計畫可以藉由示範計畫資料與政府共享、測試技術可行性等資源共享機制，換取未來商業規模浮動式專案啟動招標時具有投標優勢，不失為一考量方向。

## 浮動式風電展望

台灣現在可成為亞洲地區發展離岸風電的領頭羊，皆仰賴政府完整規劃及土木、水利、海工等業界先賢共同努力，但日本、韓國、越南乃至澳洲等東亞、東南亞及大洋洲地區順應全球綠能意識，均在離岸風電產業急起直追，台灣若有意持續保持領頭羊的位置除了適當將固定式離岸風電產業相關條例穩健放寬回歸市場機制外，浮動式風電將會是下一階段發展重點，掌握多元的浮動式技術除可確保未來台灣能源自主更加獨立外，亦可佔據亞洲地區浮動式風電開發先驅者地位，結合台灣位於東亞中樞之優勢成為技術外銷中心，提高台灣土木、水利、海工等產業能力，攜手再創繼十大建設之後的下一個產業黃金世代。

## 參考資料

1. 環洋離岸風力發電計畫環境影響說明書
2. Leimeister, M. and Thomas, P. (2017). The OneWind Modelica Library for Floating Offshore Wind Turbine Simulations with Flexible Structures.
3. Sahasakkul, W. (2014). Development of a Model for an Offshore Wind Turbine Supported by a Moored Semi-Submersible Platform.
4. Ideol's Technology : An Easily Scalable Floater Solution. (2019, May 28). <https://www.bw-ideol.com/en/ideols-technology-easily-scalable-floater-solution>. 



# 推動 台灣浮動式 風力發電 的 挑戰

徐瑋克\* / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 台灣區總監  
 李劍珩 / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 資深分析師  
 陳振豪 / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 專案經理  
 陳俊仁 / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 專案經理  
 林勝利 / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 專案經理  
 曾昱嘉 / 丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司 專案經理

本文將介紹過往幾年在其他國家所執行之浮動式離岸風電計畫，包含挪威的 Hywind、蘇格蘭的 Kincardine、葡萄牙的 Windfloat Atlantic、及日本的 Fukushima Forward。藉由公開可供查詢之資料作為基礎，簡略說明該專案之緣由、規劃目標及其實施於案場的相關技術應用。歸納不同國家在技術、基礎建設及海域環境的選項，期許作為台灣未來在不同的自然與人為條件之下，接續固定式離岸風電計畫後，再次成功在台灣推動並實現浮動式離岸風電之開發潛力及並擴大離岸風電在台灣之發電量與工業產值。

關鍵詞：浮動式、離岸風電、台灣

This article is intended to collect relevant floating offshore wind projects planned and executed in the last years globally, including Hywind in Norway, Kincardine in Scotland, Windfloat Atlantic in Portugal, and Fukushima Forward in Japan. The study uses public available information as the basis to consolidate as a systematic comparison among all projects that were organized in different countries with the technology chosen under the differences of their own infrastructure and marine site conditions. With the compassion from different projects, we wish this could be a good lesson learned for Taiwan to shape another successful outcome and materialize the potential of floating wind energy production and the economic value following the massive fixed-bottom offshore wind projects currently under construction.

Keyword: Floating, Offshore Wind, Taiwan

## 前言

在海上風場中，基礎可分為固定式和浮動式兩種。與固定式基礎相比，當水深大於 80 m 後，浮動式

基礎之成本不會因水深增加而大幅增加。因此，在水深約 80 m 左右的情況下，浮動式基礎相較於其他固定式基礎就浮現出經濟價值之起始點，遂可採用作為深水區海域之離岸風場開發如圖 1 所示。

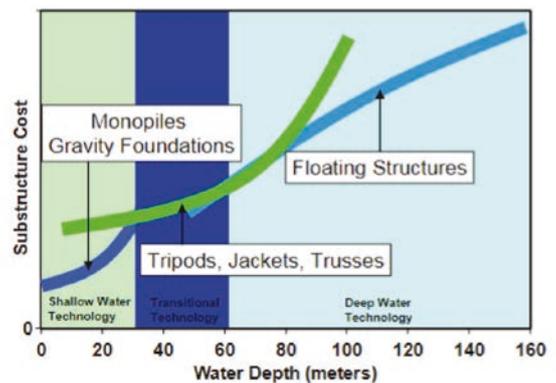


圖 1 離岸風電水下基礎型式造價與水深關係圖

(圖片來源：Dolan, D., MMI Engineering at Deepwater Wind Energy Workshop, Washington D.C. October 26-27, 2004)

\* 通訊作者，shu@k2management.com

相較於一般固定式離岸風力發電以固定於海床上之支撐結構提供承載力，浮式風力發電之下部支撐結構主要由浮動式平台（Floating Platform；又稱浮台，Floater）、繫纜系統（Mooring Line）及錨錠系統（Anchor）等三大組件所組成。其中又以浮台型式之種類最多，本文首先將針對目前較常見之幾種浮台型式進行探討，接著將彙整近幾年於世界各地執行浮式風場之經驗，探討未來於台灣開發浮式風電技術可能會面臨之難題與挑戰，並提供本公司之建議供產官學界參考。

浮動式風力發電技術近年由國際各大機構、學校已發展出多種型式的浮台，依其使用之技術型式，可細分為駁船式（Barge）、圓柱浮標式（Spar）、半潛式（Semi-Submersible）、以及張力腳平台式（Tension Leg Platform, TLP），如圖 2 所示。

各種浮台技術可依其穩定原理分為浮力穩定式（buoyancy stabilized）、壓載穩定式（ballast stabilized）、以及繫纜穩定式（mooring line stabilized），其中浮力穩定式係靠浮台吃水面積產生之浮力使其可穩定漂浮於海面上，如駁船式及半潛式浮台。而壓載穩定式係靠浮台較深吃水深度使其可穩定漂浮於海面上，如圓柱浮標式浮台。繫纜穩定式則因浮台承受浮力較小，因此必須直接依靠繫纜系統及錨錠系統使其穩定漂浮於海面上，如張力腳式浮台。以上三種原理皆需靠繫纜系統及錨錠系統加以固定浮台位置。

由於各浮台型式可適用條件不盡相同，開發商於專案開發時須基於場址限制條件以及投資成本等考量，研選最適合該案場之浮台型式，參考國外文獻針

對各型式浮台適用條件及特性如表 1 所示，其中圓柱浮標式因其穩定原理之緣故，該型式多適用於水深大於 100 m 之區域，且礙於港口水深條件之限制，相較於其他兩種型式吃水較淺，可先於碼頭邊進行風機預組裝，再拖航至案場進行安裝，多數碼頭較難滿足圓柱浮標式浮台吃水深度需求，因此需拖航至案場位置或港口外進行風機預組裝，再拖航至案場安裝，但這也將增加其運輸及安裝之成本<sup>[1]</sup>。

表 1 常見浮台型式研選準則

浮台型式	適用水深	定位系統	運輸安裝	風機組裝
半潛式	>40m	簡易繫纜設施，成本相較低廉	使用拖船/駁船運輸至案場進行安裝	可於碼頭邊組裝
圓柱浮標式	>100m	簡易繫纜設施，成本相較低廉	須使用拖船拖行至案場，並以起重船起吊安裝，成本相	須至外海使用起重船吊裝
張力腳式	>40m	複雜的繫纜及錨錠系統，成本高昂	使用拖船/駁船運輸至案場進行安裝	可於碼頭邊組裝

（表格來源：Floating Wind. Semi-Submersible, Spar, TLP - Empire engineering, 本文整理）

## 全球浮式風力發電之案例探討

過去幾年，世界各再生能源大國多戮力發展浮動風力發電技術，本文蒐集過去幾年於世界各地執行稍具商業規模之浮式風電專案，如挪威的 Hywind、蘇格蘭的 Kincardine、葡萄牙的 Windfloat Atlantic、以及日本的 Fukushima Forward，各案場相對位置如圖 3。

本文蒐集並整理上述各案之公開技術資訊如后，並進一步探討未來於台灣發展浮式風電技術可能會面對的挑戰與限制。

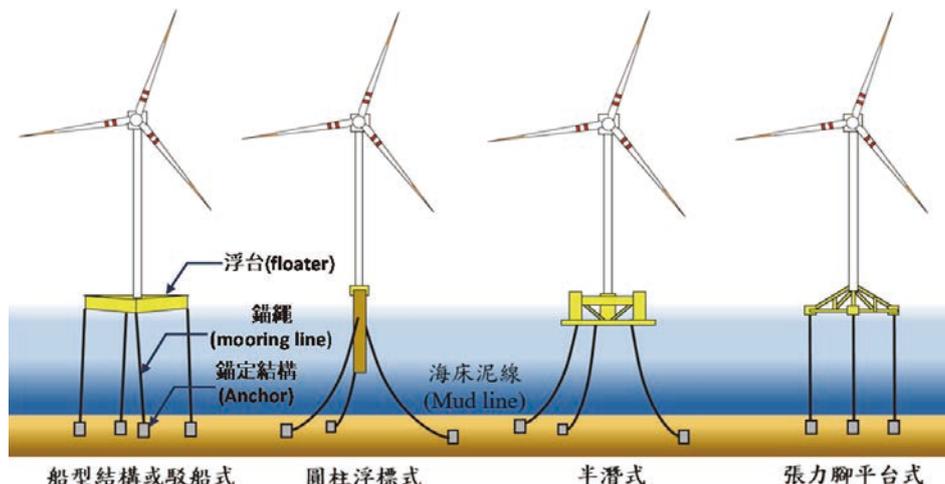


圖 2 常見之浮式風電浮台型式

（圖片來源：「離岸風電場址調查及設計技術規範\_本文含解說草案」，本文繪製）



圖 3 世界各地浮式風場相對位置圖 (圖片來源: 本文繪製)

### 挪威 Hywind

Hywind 浮式風力專案為挪威 Equinor 公司 (前身為 Statoil 及 StatoilHydro) 分三期專案進行開發, 三期專案分別為 Hywind DEMO、Hywind Scotland 及 Hywind Tampen。三個專案皆採用圓柱浮標式 (spar) 作為其浮台。其中 Hywind Scotland 及 Hywind Tampen 之風場位置及場址水深分別如圖 4 及圖 5 所示。

Hywind DEMO 為 Hywind 浮式風力專案之第一期專案, 場址位於挪威 Rogaland 郡 Karmøy 市離岸 10 km 處, 其水深約為 220 m, 選用 Siemens Wind Power 所生產之 SWT-2.3 MW 風機, 總裝置容量為一部風機之 2.3 MW, 使用之圓柱浮標式 (spar) 浮台長度約 117 m 直徑則為 6 m 至 8.3 m, 已於 2009 年完成啟用 [2,3]。

Hywind Scotland 為 Hywind 浮式風力專案之第二期專案, 場址位於蘇格蘭 Aberdeenshire 鎮 Peterhead 海岸離岸 25 km 處, 其水深約為 95 至 120 m, 選用 Siemens Wind Power 所生產之 SWT-6.0 MW 風機, 共裝設 5 台風機, 總裝置容量為 30 MW, 使用之圓柱浮標式 (spar) 浮台長度約 91 m 最大直徑為 14.5 m, 已於 2017 年完成啟用 [4-7]。

Hywind Tampen 為 Hywind 浮式風力專案之第三期專案, 此案之特色為案場生產之電力係供離岸石油天然氣鑽探平台使用而非民生用電, 因此其場址位於離挪威海岸 140 km 處, 其水深約為 260 至 300 m, 選用 Siemens Gamesa 所生產之 SG-8.0-167DD 風機, 共裝設 11 台 8.6 MW 風機, 總裝置容量為 94.6 MW, 使用之圓

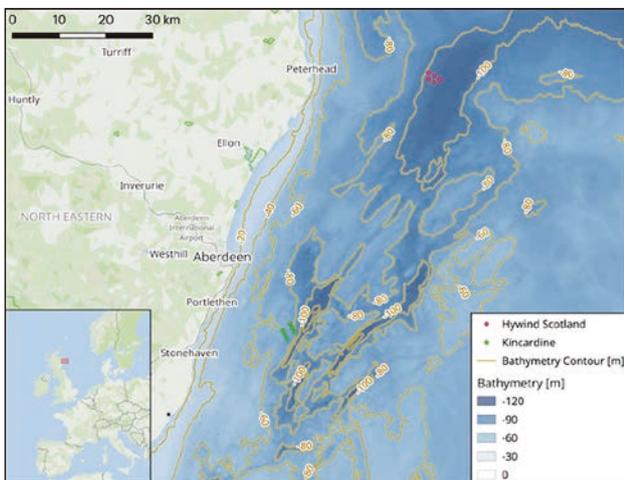


圖 4 英國 Hywind Scotland 風場風機佈置及水深圖 (圖片來源: 本文繪製)

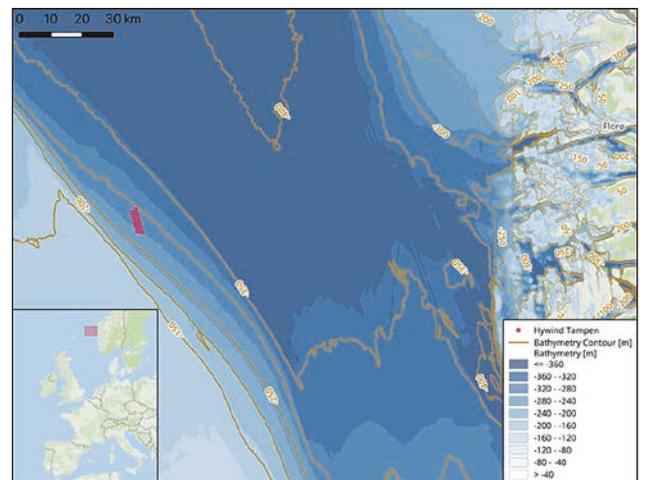


圖 5 挪威 Hywind Tampen 風場風機佈置及水深圖 (圖片來源: 本文繪製)

柱浮標式 (spar) 浮台長度約 91 m 最大直徑為 14.7 m，已於 2022 年完成 7 台風機組裝進行首次發電，剩餘 4 台風機預計於 2023 年完成安裝作業<sup>[8-11]</sup>。

另值得注意的是，Equinor 公司與其他合作單位於 2022 年提出之 Trollvind 浮式風力發電計畫已於 2023 年宣告因財務可行性及技術挑戰性暫停開發，其後續發展值得相關產學界持續關注<sup>[12,13]</sup>。

## 蘇格蘭 Kincardine

Kincardin 為英國目前最大之浮式風場，於 2020 年併網，併網容量約為 50 MW。年發電量為 218 GWh，此項目為當時全球首座使用超過 9 MW 額定容量之風機項目，由西班牙 Cobra Group 作為此案之統包合約商<sup>[14]</sup>。

Kincardine 位於 Kincardineshire 東南岸約 15 km，水深範圍介於 60 至 80 m 之間。占地 110 km<sup>2</sup>。風場位置及場址水深如圖 4 所示。風場內鋪設總長度約 30 km 之 33 kV 陣列海纜，並以約 18 km 長、33kV 之輸出海纜上岸<sup>[15]</sup>。該案場共建置六部風力發電機組，分為兩期專案執行。第一期採用一部 Vestas V80-2.0 MW 風機，於 2018 年併網發電；另因考量蘇格蘭港口條件及海岸地形，採取 Principle Power 所開發之第一代 Windfloat 半潛式浮台為基礎，長約 40.8 ~ 50 m，高 24 m，吃水深度 14 m。第二期採用 5 部 Vestas 供應之 V164-9.5MW 為風機，於 2020 年併網發電，其以 Principle Power 所開發之第三代 Windfloat 半潛式浮台為基礎，長為 75 m，高 30 m，吃水深度 20 m。此案於西班牙北部 Fene 船廠進行浮台製造，並以荷蘭海事工程公司 Boskalis 之運輸船 Fjord，將其運至鹿特丹港口進行風機組裝。組裝完畢後，再航行約 650 km，將風機拖運至案場安裝<sup>[16]</sup>。鹿特丹港口共 656 個泊位，碼頭總長 89 km，航道最深達 22 m，可停泊 54.5 萬噸特大型油輪（船長約 400 m）<sup>[17]</sup>。



圖 7 Windfloat Atlantic 風場預組裝及拖航照

(圖片來源：Windfloat Atlantic | Offshore wind energy (windfloat-atlantic.com))

## 葡萄牙 Windfloat Atlantic

Windfloat Atlantic 浮式風力發電計畫由 Windplus 投資開發，風場位置及水深如圖 6 所示，此專案主要由葡萄牙電力公司 EDPR 負責相關專案開發工作，於 2020 年 7 月完成所有機組併網發電，總裝置容量約 25 MW，由 3 部 MHI Vestas 8.4 MW，預計營運時間為 25 年。

該風場距葡萄牙 Viana do Castelo 海岸約 20 km，水深約 100 m，採用 Principle Power 的 Windfloat 半潛式浮台技術 (Semi-Submersible Floater)，浮台尺寸寬 50 m、高 30 m、吃水深 20 m<sup>[18]</sup>。

該計畫浮台於分別於葡萄牙及西班牙兩地製造組裝完成後，再將浮台拖航至西班牙 Port of Ferrol 外港區碼頭邊進行風機預組裝後拖至案場安裝。相關風機預組裝及拖航照片如圖 7 所示。

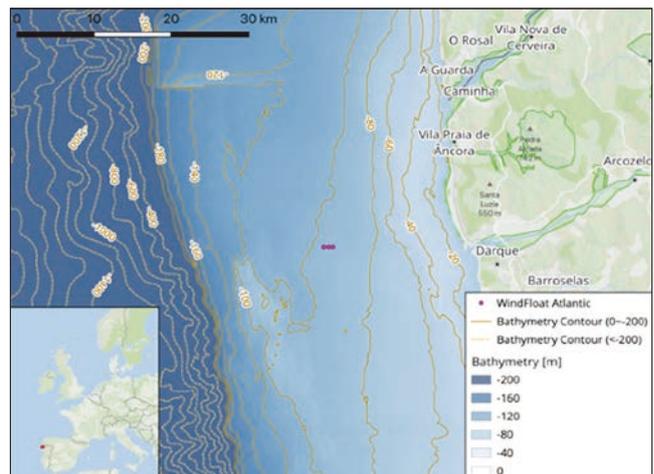


圖 6 葡萄牙 Windfloat Atlantic 風場風機佈置及水深圖

(圖片來源：本文繪製)

## 日本 Fukushima Forward

此專案為由日本經濟產業省贊助之示範風場案，其主要架構為三台浮動式風機（共 14 MW）和一座



浮動式變電站。案場地點為距福島縣近海 20 km 的海域，水深約 100 ~ 120 m 如圖 8 所示 [19,20]。

本案從 2012 年開始進行第一階段之開發，內容包含 2 MW 浮式風機以及世界首個 66 kV 浮式變電站和海底電纜。這些作業於 2012 年 10 月 31 日順利完成。第二階段於 2015 ~ 2016 年完成兩台風機之安裝（裝置容量分別為 5 MW + 7 MW）。風機及變電站配置如圖 9 所示。

此專案之風機浮台使用了結實型半潛式（2 MW）、圓柱浮標式（5 MW）、及 V 型半潛式（7 MW）平台。每台的規格如表 2 所示。

本專案風機與浮動式基礎之組裝在福島縣小名浜港執行。此專案另一特點為於安裝 7 MW 風機時，所使用之起重機為當時最大之起重機。小名浜港具有最大允許船長度約 250 m，最大吃水深約 13.5 m，最大載重噸位約 100,000 tonf。

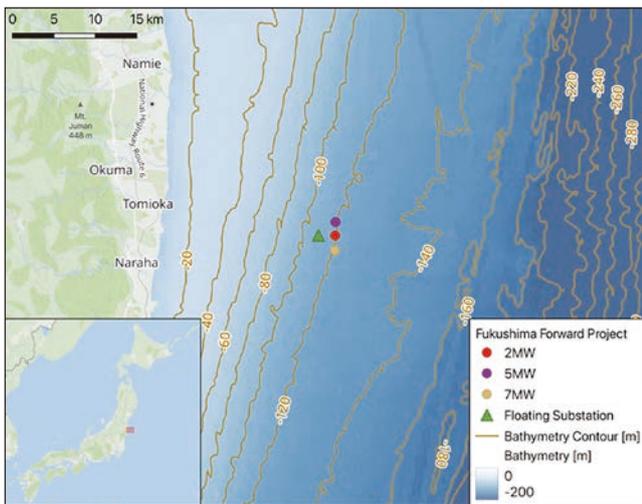


圖 8 Fukushima Forward 位置及水深等值線  
(圖片來源：本文繪製)

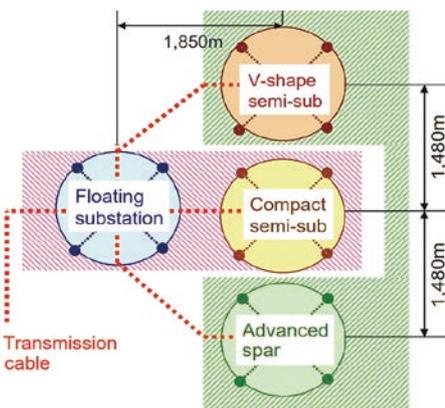


圖 9 Fukushima Forward 配置示意圖  
(圖片來源：Ishihara Takeshi 2016, The challenge to the world's first floating wind farm)

表 2 Fukushima Forward 浮動式基礎主要規格

專案階段	風機	水深 (m)	浮式基礎		
			類型	長度 (m)	吃水深 (m)
Fukushima Forward	1	2MW	結實型半潛式平台	64	16
	2	5MW		圓柱浮標式	59
		7MW	V型半潛式平台	150	17

(表格來源：本文整理)

### 小結

綜合以上各專案之介紹，整理各範例風場採用之浮台資訊如表 3 所示。

### 國內發展浮式風力發電之可能挑戰

近年來已有許多開發商投入我國浮式風電開發市場，本文彙整現階段各開發商公告之案場相關資訊如表 4 所示，現階段共有 7 家開發商 12 個案場正在規劃中，各案場風機單機組裝置容量介於 9 ~ 22 MW 間，水深除新北市及基隆外海水深介於 90 ~ 240 m 外，其餘西部外海各案水深皆小於 100 m，約介於 42 ~ 96 m 間。

由於目前各案仍在初步調查規劃階段，後續仍須通過環評審查及選商作業後，方能取得開發權，相關浮台型式亦須俟後續調查及設計成果完成後方能決定。惟依現有資料蒐集成果及表 1 浮台型式研選準則，本文初步評估如於台灣西部海域開發浮式風電案，由於水深較淺，各案採用半潛式或張力腳型式等吃水較淺之浮台之可能性應較圓柱浮標式還高，爰依此假設進一步檢視於國內發展浮式風場可能面臨之挑戰。

表 3 各範例風場之浮台資訊整理

專案階段	單機容量 (MW)	浮台型式	水深 (m)	長 (m)	高 (m)	吃水深度 (m)	結構重量 (kton)
Hywind	1	Spar	220	8.3	117	100	1.5
	2		95-120	14.5	91	78	2.3
	3		260-330	14.5	91	78	2.3
Windfloat Atlantic	1	Semi-Submersible	100	55	30	20	2.5
Kincardine	1	Semi-Submersible	60-80	50	24	14	1.3
	2			75	30	20	2.75
Fukushima Forward	1	Compact Semi sub	100-120	64	32	16	-
	2	Advanced Spar		59	48	33	-
	3	V-Shape Semi sub		150	25	17	-

(表格來源：本文整理)

表 4 國內潛在浮式風力開發案資訊整理

開發商	計畫名稱	計畫位置	風機裝置容量 (MW)	案場水深 (m)
Bluefloat	九降風	新竹	9.5~20	64~96
CIP	颯成	新竹	9~20	46~92
	颯汎	新竹	9~20	70~96
	颯利	苗栗	9~20	42~88
Flotation	竹廷	新竹	9~20	60~90
InfraVest	合儀	新北及基隆	10~20	110~200
	禾爾北	新北及基隆	10~20	90~130
	禾爾南	新北及基隆	10~20	100~240
RWE	新風	新竹	14~22	65~95
	萊風	新竹	14~22	65~90
SRE	海碩	苗栗	9.5~20	55~80
TRE	環亞	苗栗	9.5~20	50~85

(表格來源：環保署書件查詢系統行政院環境保護署「環評書件查詢系統」：首頁 (epa.gov.tw)，本文整理)

### 基礎設施之限制

根據我國目前離岸風電發展，國內目前各主要港口之碼頭主要規格及用途已規劃如下，相關條件整理如表 5 如示：

- 台北港：水下基礎製造與存放。
- 台中港：水下基礎製造與存放、風機組裝、訓練中心、維運基地。
- 布袋港：維運基地。
- 安平港：運儲。
- 高雄港：水下基礎製造與存放。

根據台灣港務公司於 2023 年 5 月最新規劃，將台灣西部海域 5 個港口，台北港、台中港、布袋港、安平港及高雄港納入離岸風電發展之港口；考量因素有以下 [21]：

表 5 台灣西部沿岸離岸風電港口各數據

港口	碼頭	碼頭長度	碼頭水深 (m)	碼頭乘載力 (ton/m <sup>2</sup> )	功能規劃
台北港	S08/S09	320	16	20	基礎生產與存放
	2	250	11	10	風機組裝
台中港	5A/5B	400	11	50	風機組裝
	36	340	12	20~40	風機組裝
	37 (興建中)	250	16	20	風機組裝
	38 (興建中)	330	16	40	風機組裝
	105	270	16	10~40	基礎生產與存放
	106	310	16	10~40	基礎生產與存放
	107	200	13	10~40	風機組裝
布袋港	N2/E1	130/140	<5	-	維運基地
	17	230	5	2	運儲
安平港	18	230	11	2	
高雄港	A06 (興建中)	-	-	-	基礎生產與存放

(表格來源：臺灣港務公司，本文整理)

- 水域：航道寬度、水深。
- 陸域：碼頭長度、水深、碼頭乘載力、腹地面積及裝船運送距離。
- 營運設備：起重設備、運輸、工作船舶。
- 其他：至風場距離、航空限高、作業時間等。

此外，綜合以上考量港務公司於 2022 年 10 月以 15 MW 的浮式風場作為基礎，評估基礎設施建議要求：水深 12 m 以上、碼頭長度 400 m 以上、碼頭載重建議 10 ~ 25 噸 / 平方米、後線土地建議 10 ~ 25 公頃，盤點既有港口適合資源成果如表 6 [22]，成果顯示唯台北港、台中港、高雄港較有可能作為發展浮式風機製造及組裝用途的港口。

惟為因應未來風機大型化之趨勢，RenewableUK 亦針對 17 MW 及 20 MW 規格之風機，預估半潛式浮台製造、組裝、以及風機預組裝等情境對於碼頭之需求，本文整理台灣港務公司及 Renewable UK 對於基礎設施之需求比較整理如表 7 所示 [23]。

考量目前國際間開發浮式風機之趨勢皆是傾向於港口進行浮台及風機之組裝；表 3 中的國際專案經驗，以吃水深度為基礎，台灣西部沿岸港口條件，以目前稍具規模的兩種型式來比較，台灣似乎較適合以半潛式浮台進行浮動式離岸風電專案規劃。然而部分

表 6 台灣西部沿岸離岸風電港口資源盤點

港口	航道寬度	碼頭長度	水深	碼頭載重	後線土地	拖船	SOV 或 CTV	作業時間	水域	風場距離	航高限制
高雄港		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
台中港	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
台北港	◎	◎	◎	◎	◎		◎	◎	◎	◎	◎
安平港			◎	◎			◎	◎		◎	
布袋港							◎	◎		◎	◎

(表格來源：臺灣港務公司公聽會簡報)

表 7 浮式風力之基礎建設需求比較

	台灣港務公司	RenewableUK	
單機裝置容量	15 MW	17 MW	20 MW
碼頭長度 (m)	400	400	440
航道寬度 (m)	-	230	260
航道水深 (m)			
碼頭水深 (m)	12	15	16.5
後線土地 (ha)	10~25	20	25
碼頭乘載力 (T/m <sup>2</sup> )	10~25	20	20

註：本表中 RenewableUK 係針對風機於碼頭邊進行預組裝之需求 (表格來源：臺灣港務公司公聽會簡報、Floating Offshore Wind Taskforce: Industry Roadmap 2040, RenewableUK，本文整理)

國際浮動式離岸風電計畫之浮台吃水深度超過 12 公尺，且面對每年能源局釋出的風場開發容量，即使近年港務公司積極改建碼頭及港口的目標下，國內基礎設施的條件限制及建置進度相對仍屬中長期之目標。因此各家開發商之浮台設計是否可以適合台灣現狀，並做出短期相應調整以滿足既有限制實為未來幾年的一大挑戰。

### 工作船之短缺

浮式風力發電之一大特色為浮台之運輸至繫錨系統之安裝均會使用到如圖 10 所示之錨索牽引補給船 (Anchor Handling Tug Supply vessel, AHTS)，當考量到浮式風力之需求，目前市場上符合需求之工作船可說是相當稀缺，以上述介紹之葡萄牙 Windfloat Atlantic 浮式風場為例，其使用之錨索牽引補給船 BOURBON ORCA 之繫纜拉力 (bollard pull) 規格為 183 tonf<sup>[24,25]</sup>，經參閱相關市場調查<sup>[26]</sup>，若以繫纜拉力 (bollard pull) 規格 220 tonf，則符合之船隻僅有 110



圖 10 Windfloat Atlantic 浮式風場之錨索牽引補給船施工案例<sup>[27]</sup>

艘，若是將需求調高至 300 tonf，則扣除美國及中國之船隻則僅剩 25 艘；更有甚者，浮式風場之運維階段亦可能有使用錨索牽引補給船之需求，考量全球對於建設離岸風電以及其他產業如石油天然氣對於工作船之大量需求，如何尋求國內外資源獲取錨索牽引補給船來台執行工程及其他相關工作之將是國內發展浮式風電一大挑戰。

### 供應鏈尚未成熟

目前，台灣正準備藉由示範獎勵計畫推動首座浮式離岸風電開發，在國內尚未具有製造浮台以及繫纜系統 (Mooring line) 及錨錠系統 (Anchor) 與動態海纜之供應商，且現有國內參與離岸風電之主要廠商之產能目前也都積極投產於固定式風力發電計畫之製造生產。考量供應鏈之生產學習曲線及有限量能，預計浮式風力專案主要組件採購於短期內參與示範獎勵計畫勢必得從海外進口，後續再依示範計畫需求再另行推動執行性較高的國產化項目。

另外，全球市場也正大力推動浮式風力發電開發，在此情勢下，台灣之案場如何在全球化競爭之下確保供應鏈之即時供給，將衝擊國內推動浮動式風力發電之進度。

### 結論與建議

1. 離岸風電最關鍵的關鍵即是各分項專業及利害關係人的完全透明開放的溝通及介面與風險管理，國內各機關與產官學界必須把台灣維持在國際離岸風電開發的領先地位放在首要任務，共同克服即將面對的挑戰。
2. 國內碼頭基礎建設鮮少是專為離岸風電打造，在既有條件不符浮式風力之未來使用需求下，短期內採示範獎勵計畫開放國產化之相關限制，雖可解決適應國內港口條件限制之規劃，未來商業化區塊開發之需求仍仰賴政府機關積極推動國內碼頭基礎建設進行升級，本文仍建議風力發電之開發設立專區，需同時考量浮式風力發電之需求，在接近風機組裝區域之前提下，就近發展以避免其與固定式風力發電之開發區域產生衝擊及排擠效應。

3. 儘管浮式風機之開發前景看好，但其與固定式相比開發費用仍然較高；且儘管浮式風機在技術層面上已驗證可行，但其商業開發之可行性則尚待驗證。技術上，本文建議示範獎勵計劃應就適合台灣氣候、海象及各種基礎建設限制之下，獎勵發展最適國內條件之設計及製造技術兩項，以台灣小而美製造業機動性，在台船公司國艦國造任務下，找出跳脫歐美大型造船場所才能生產浮台模式，建置技術及製造均可行的形式，並藉由在台兩大國際風機廠之在地生產優勢，推動單一形式之浮台設計與製造能力，並朝可量產及可模組化之方向進行推動。
4. 除了技術上之提升，最重要的就是建立屬於台灣的離岸風電商業模式絕對需要政府資金的挹注且維持一定比例躉購機制，甚或協助國內需求綠電採購大戶之信用保證機制，及國內官股銀行大量參與融資保證，絕對是台灣走向離岸風電下一步與國際同步最重要的措施。
5. 最後，離岸風電首重管理，包含風資源、海氣象與地質條件之調查與分析；風機之選型以及對應之水下基礎、電力系統、監控系統以及運維體系；並藉此衍生之採購及供應合約且依此規劃之施工計畫、融資計畫及售電計畫及對應之專案管理與風險管理，每一種專業都必須積極培養在地優秀人才，未來除了供應鏈國家隊之外，專案管理人才更是重中之重，推動年青學子，不論工程、商業、法務、語言及政治與環境背景都必須儘早與國際接軌，產學合作推動人才培育計畫刻不容緩，才有足夠人力支持台灣之 2050 年淨零碳排放目標。

## 參考資料

1. Semi-Submersible, Spar and TLP-How to select floating wind foundation types?, Floating Wind. Semi-Submersible, Spar, TLP-Empire engineering
2. StatoilHydro inaugurates floating wind turbine, <https://www.equinor.com/news/archive/2009/09/08/InnovativePowerPlantOpened>
3. Top Plants: Hywind Floating Wind Turbine, North Sea, Norway, <https://www.powermag.com/top-plants-hywind-floating-wind-turbine-north-sea-norway/>
4. Hywind Scotland, <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>
5. World's first floating wind farm has started production, <https://www.equinor.com/news/archive/worlds-first-floating-wind-farm-started-production>
6. Hywind Pilot Park, Aberdeenshire, <https://www.power-technology.com/projects/hywind-pilot-park-aberdeenshire/>
7. Hywind Scotland: cabling the world's first floating wind farm, <https://www.nexans.com/en/markets/power-generation/offshore-wind/hywind-scotland-cabling-world-first-floating-wind-farm.html>
8. Hywind Tampen, <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>
9. First power from Hywind Tampen, <https://www.equinor.com/news/20221114-first-power-from-hywind-tampen>
10. Adjusted assembly plan for the final four Hywind Tampen turbines, <https://www.equinor.com/news/20220713-adjusted-assembly-plan-for-the-final-four-hywind-tampen-turbines>
11. Hywind Tampen by FEW, <https://questfwe.com/wp-content/uploads/2018/08/Hywind-Tampen.pdf>
12. Equinor and partners consider 1 GW offshore wind farm off the coast of Western Norway, <https://www.equinor.com/news/20220617-considering-1-gw-offshore-wind-farm-off-western-norway>
13. Equinor put Trollvind on hold, <https://www.equinor.com/news/20230522-trollvind-on-hold>
14. Kincardine offshore windfarm, <https://www.nsenenergybusiness.com/projects/kincardine-floating-offshore-wind-farm-scotland/>
15. Kincardine documents, <https://pilot-renewables.com/kowl-documents/>
16. Kincardine installation route, <https://www.thebellman.co.uk/2021/01/25/kincardine-offshore-wind-farm-growing-in-size/>
17. Wiki, Port of Rotterdam, [https://en.wikipedia.org/wiki/Port\\_of\\_Rotterdam](https://en.wikipedia.org/wiki/Port_of_Rotterdam)
18. Windfloat Atlantic, Windfloat Atlantic | Offshore wind energy (windfloat-atlantic.com)
19. Fukushima FORWARD Consortium 2011~2016, Demonstration Project Brochure, accessed 20 May 2023, <<http://www.fukushima-forward.jp>>
20. Ishihara Takeshi 2016, The challenge to the world's first floating wind farm
21. TIPC, <https://www.twport.com.tw/chinese/>
22. TIPC 公聽會簡報, [https://drive.google.com/drive/folders/1JaWr306CALQtw0ToJU7SJ45E1jpkE2ie?usp=share\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1JaWr306CALQtw0ToJU7SJ45E1jpkE2ie?usp=share_link)
23. Floating Offshore Wind Taskforce: Industry Roadmap 2040, RenewableUK
24. WindFloat Atlantic Turbine No. 3 In Place, Ready to Be Connected, <https://www.offshorewind.biz/2020/05/29/windfloat-atlantic-turbine-no-3-in-place-ready-to-be-connected/>
25. BOURBON ORCA specification, <https://www.bourbonoffshore.com/sites/default/files/documents-associates/pdf/bourbon-orca-181-mt-bp-dp2.pdf>
26. Floating Offshore Wind and the Need for High-end AHTS, <https://www.oedigital.com/news/504813-floating-offshore-wind-and-the-need-for-high-end-ahts>
27. Installing Windfloat Atlantic, <https://dock90.com/windfloatatlantic/> 



# 海事工程機具之測試與確證方法

Joost Remmers / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司 資深工程師

丁柏村\* / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司台灣分公司 業務經理

姜炎璋 / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司台灣分公司 工程師

因應淨零碳排政策，各國政府皆致力發展綠色能源，而離岸風能亦於近年迅速發展。而海事工程更是離岸風能產業鏈中不可或缺的一環，如何使用適當的機具來建置風場，除了需要再前期進行設備之設計與優化，仍需進行測試來對機具進行驗證，並須確保機具在專案進行中有無損壞的發生以防範可能的事故，因此本文將介紹如何在海事工程的前、中、後期進行設計、測試及確證，以期讀者對海事機具如何運作於離岸風場能有更深入的了解。

關鍵詞：海事工程、設計確證與優化、採購流程協助、損壞偵測與防範

In response to the Net Zero Carbon Emission Policy, governments are committed to the development of green energy, and offshore wind energy has been developing rapidly in recent years. Among the industry, marine engineering plays an indispensable role in the supply chain. To adopt the appropriate equipment for windfarm construction, design and optimization would be applied in the early stage. While it is still necessary to carry out testing to validate the equipment and ensure the integrity of equipment to prevent possible accidents. Therefore, this paper will introduce how to design, test and validate the equipment in marine engineering to offer an understanding of how marine equipment operates in offshore windfarms.

Keyword: Marine Engineering, Validation & Optimization, Procurement Assistance, Damage Detection & Prevention

## 前言

根據國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 報告指出<sup>[1]</sup>，隨著技術快速發展，離岸風機將愈趨大型化，如下圖 1 所示。因此在風場規模逐漸擴大之趨勢下，若在設計、製造和運轉的過程中存在不確定性皆可能會帶來安全風險或導致經濟效益不彰。

而目前市場上可取得的解決方法，通常包括現有資料研究 (desk studies)、設計規範 (design codes) 和常規規則 (conventional rules) 等，並無法適用於世界上各種

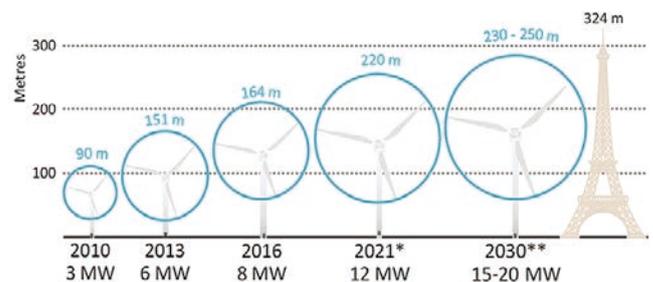


圖 1 風機大型化趨勢示意圖<sup>[2]</sup>

環境條件例如風速、水深、地形及地質條件的案場，除了無法達到最佳經濟效益外，亦可能帶來安全風險。

因此面對各式案場，在海事工程的機具設計及專案運作過程中皆須面對不同的挑戰，因此須根據常規並針對個案條件來進行設計及優化，再導入測試來進行相關驗證，固本司將透過以下幾個相關案例來分享過往的實務經驗。

## 設計確證與優化

即便不同的案場對於機具的需求皆有所不同，需要再視情況進行調整及優化，但依據本司從事參與海事工程的過往經驗中，許多機具結構的原理皆是藉由兩個介面之間的摩擦力方能進行運轉。舉例如：

\* 通訊作者，wtng@twd.nl

單樁海上繫固

(Monopile Seafastening)



塔架吊掛裝備

(Tower Handling Tools)



吊掛裝備

(Lifting Tools)



螺栓連接

(Bolted Connections)



同上所述，隨著時間的推移及產業技術的迅速發展，本司注意到離岸風能產業的共同趨勢即為風機尺寸的增加。近日中國更是在福建省外海建置目前世界上第一支裝置容量高達 16 MW 之離岸風機。由此可知，風場建置中對於海事工程的需求將不斷攀升，同時也需要更堅固的機具設計方能順利運作。而摩擦力在機具之運作中更是至關重要，若在摩擦係數上出現誤算除了導致額外的製作時間，降低工作效率外，最糟糕的情況下還可能產生安全上的疑慮。

因此，必須要對介面之間的摩擦力有更深入的了解及良好的掌握，如此一來方能在摩擦力的可行範圍內確保機具運作的工作效率，並可適當對機具進行優化及調整，以適應更嚴苛的海況及環境條件並延長使用壽命。

系統特性與材料特性

從過去海洋結構方面設計的經驗中，本司發覺在市場上現有的設計規範與實際操作之間仍存在一定的落差。由於遵循規範所產生的「標準化」摩擦力值並不一定正確且可能並不符合實際使用需求。摩擦力值可以受到許多因子之影響，例如接觸壓力 (contact

pressure)、粗糙度 (roughness)、濕度 (wetness) 和接觸面 (counter surface) 等。因此，我們將摩擦力視為一種系統特性 (system property)，而非單一的材料性質 (material property)。

案例：粗糙度對摩擦值的影響

如圖 2 範例所示，摩擦係數在某種程度上取決於接觸面的材料粗糙度。圖中展示了四種不同粗糙度的接觸面材料，從中可以檢測到不同的摩擦係數。由此可知，當專案運作過程中涉及運輸或吊掛物品時，若物品表面有烤漆或者產生鏽蝕時，皆會對摩擦係數造成影響，因此也需要在設計時納入考量。

案例：接觸壓力對摩擦值的影響

接觸壓力亦是影響摩擦力的另一因素。當兩種材料之間的接觸壓力增加時，摩擦係數則會相對減少 (如圖 3)。因此，接觸壓力在許多設計中都是需要被納入考慮的重要因素，如前所述之單樁海上繫固、塔架吊掛裝備和吊掛裝備等。而本司執行縮尺試驗與全尺寸試驗交互。結果如圖 3 所示，縮尺模型的測量與全尺寸的試驗結果有相同之趨勢。

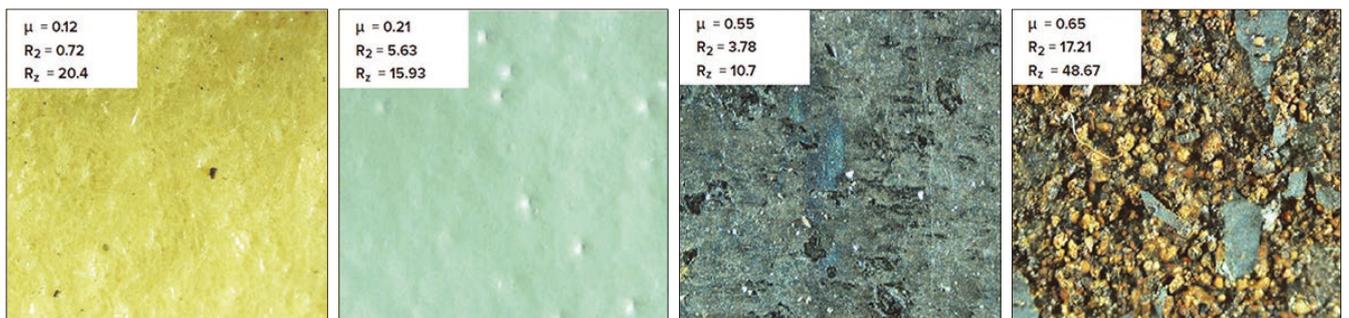


圖 2 不同表面類型對應的摩擦係數和粗糙度 [3]

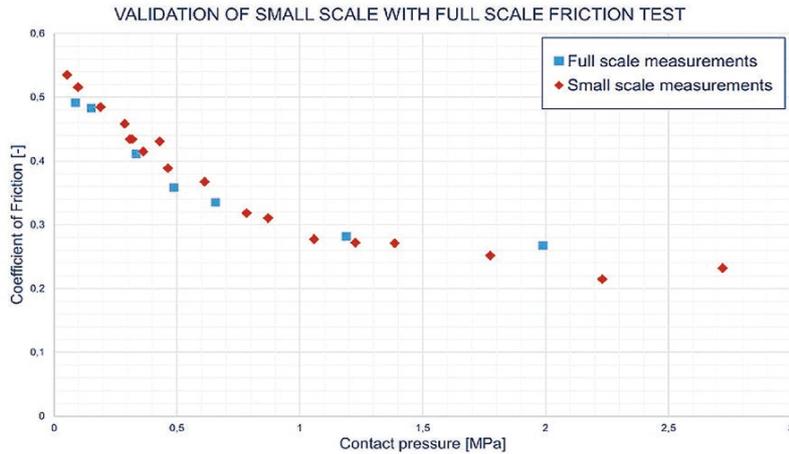


圖 3 通過接觸壓力減少摩擦之全尺寸與縮尺試驗驗證 [3]



圖 4 摩擦測試儀器 [3]

### 案例：摩擦力實驗

為了確保設計的安全性並優化工作效能，本司與台夫特理工大學（TU Delft）合作開發一套摩擦測試方法並已獲得 DNV 之第三方單位認證，能夠藉此測試方法獲取適用於不同作業條件的摩擦係數，如圖 4 所示。

### 摩擦機率測試

除了執行摩擦測試外，另有一種基於機率的摩擦確證方法。此方法藉由統計隨機試次之靜摩擦係數得出摩擦係數之機率分佈，在透過分析得出其位於 95% 信賴區間下之摩擦係數值。因此能夠將測量到的摩擦值直接納入設計計算中，從而提供更安全且具更佳的操作能力之設計。如圖 5 展示了在單樁運輸操作中使用的機率分析之一的範例。

### 採購流程協助

雖然大多數的海事工程設備都是由鋼鐵製成，但令人驚訝的是，這些結構中的關鍵接觸面（例如支撐墊、滾輪和滑動接觸面）往往由不同的異質材料製成。這些異質材料（例如聚合物、水密物和塑料）與鋼鐵並不相同，並不一定總是符合特定的材料標準和製造規範。

因此，當施加較大負載於關鍵接觸面並非鋼鐵的機具時，機具本身和接觸面的完整性將可能受損。因此，在採購過程中也須將此影響納入考量。

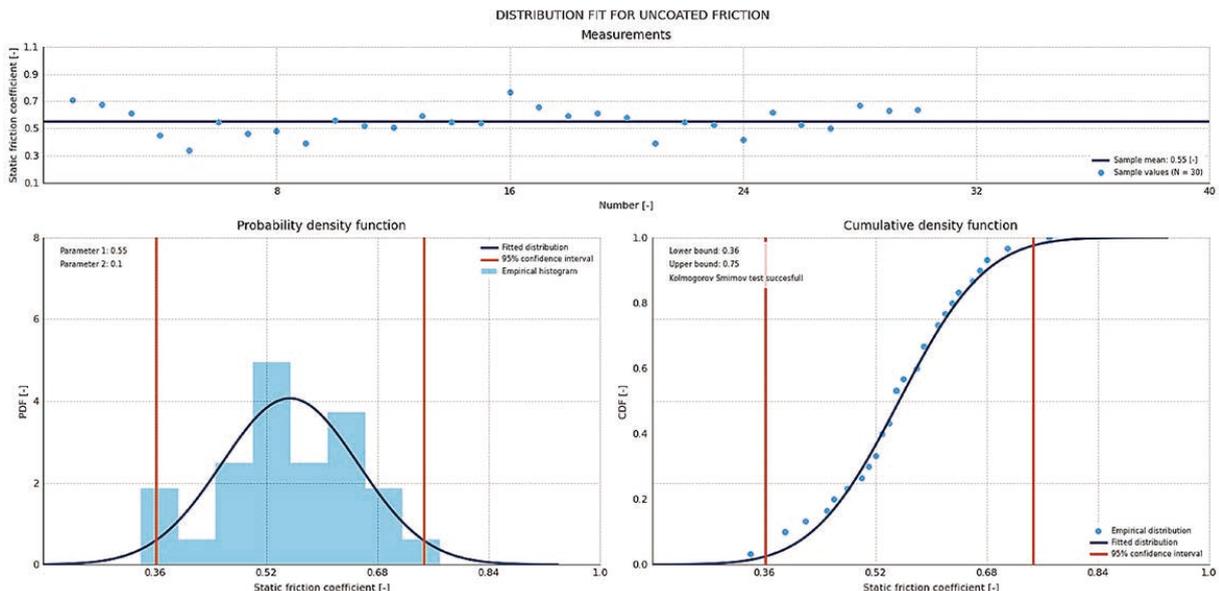


圖 5 單樁運輸中使用的摩擦係數的機率確證 [3]

## 縮尺測試

為了協助採購流程，一般來說，較直接且省時的方法即為進行縮尺試驗（如圖 6），如此方能在短時間之內驗證並比較所選擇的異質材料。

通過縮尺試驗將得出各種設計負載的性能表現，方能抉擇出最適合不同結構設計與作業條件下強度和剛性。由得出之結果可進一步協助採購流程，採購團隊可以根據上述數據做出最具經濟效益的採購方案。

### 案例：聚合物測試

在海事安裝中聚合物材料經常被用來支撐或引導風機組件（例如，通過繫固 / 吊掛葉片和單樁）。這些組件體積龐大而且通常較為脆弱。在安裝過程中，為確保組件的結構完整性，必須運用聚合物元素的剛性和強度之間的特性來進行確證。

在縮尺試驗中（如圖 7），可在短時間內運用設計負載來量測聚合物之正向力、剪力、隨時間之形變量和溫度效應。其結果可以用來確證在有限元素法下適當之材料模型。基於這些縮尺試驗的材料模型數據，可以預估全尺寸設計組件的於實際情況下之極限變形，以提高作業效能和安全性。

### 損壞偵測與防範

在海事工程的安裝和運輸過程中，若有任何損壞和延誤往往會導致高昂的成本，因此應盡可能避免。然而，離岸風力發電機組組件的介面負載更高，表面在風吹日曬下除了可能發生鏽蝕以外，也可能產生生物附着的情形，將有更高機率導致組件產生損壞（如圖 8）。



圖 6 全尺寸單樁支撐墊及縮尺模型<sup>[3]</sup>

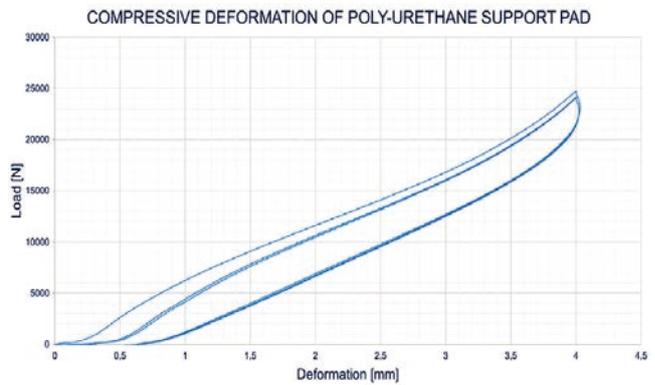


圖 7 材料變形與負載呈非線性之測試結果<sup>[3]</sup>

雖然因為這些微小的材料損壞而導致機組失效的案例並不常見，但要再次修復塗層損壞的成本可能非常高。因此，通常需要更深入的調查來了解損壞的原因，方能在事前訂定適宜的預防措施，減少事後修復的成本，以下將介紹調查之方法。

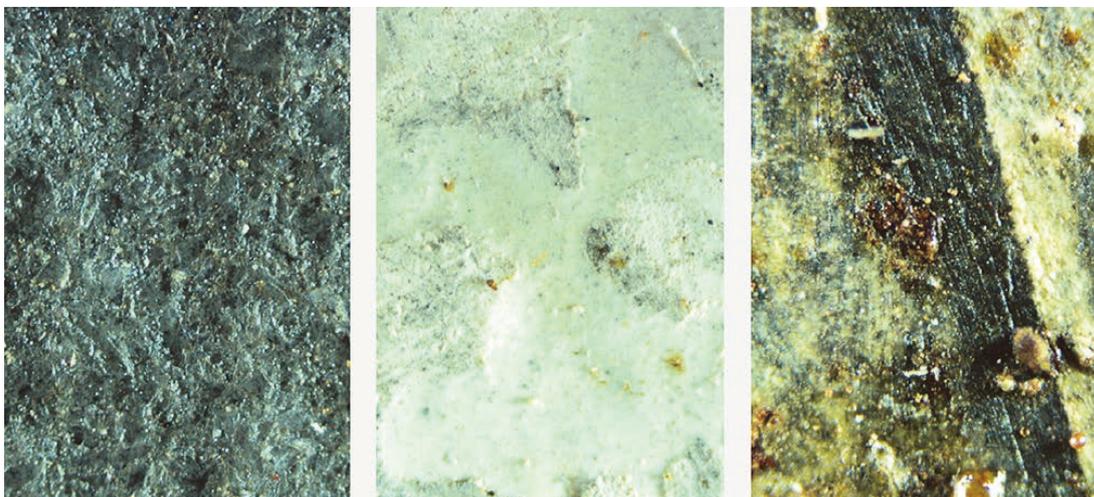


圖 8 通過微觀尺度下觀察到的材料損壞<sup>[3]</sup>

### 鑑識工程學 Forensic Engineering

為了解決並對抗塗層損壞的問題，通過鑑識工程學的方法及測試設施，可以評估指定項目之失效機制，以便從根本解決問題。

鑑識工程學將模擬在實際運營條件下預期的失效情況，並提供符合 ISO-4628 標準的測試結果。所有的測試都是通過小尺寸模型，並且可以在短時間內完成。在此過程中亦經常會出現各種不同的可能性成因。

由於鑑識工程學的做法會將所有方面即成因接納入考量，因此，藉由完整的調查過程，可以根據鑑識之結果進行有效的修正和調整。

#### 案例：塗層測試

在海事工程之運輸和安裝過程中，經常會發生界面塗層的損壞。通過模擬負載週期（如圖 9），可研究如何有效防止或緩解塗層持續損壞的方法。

每個測試項目通常只能從現有資料研究或現地調查著手。因此需將專業知識與現地數據相結合，以推導出可能的失效機制假設。再藉由鑑識設施進行縮尺試驗、即可快速且反覆地檢查表面壓力、剪力等。

然而如果發生塗層損壞，則會根據處理期間的設計負載，進行數個循環的壓縮和摩擦測試。方能找到損壞的根本原因。

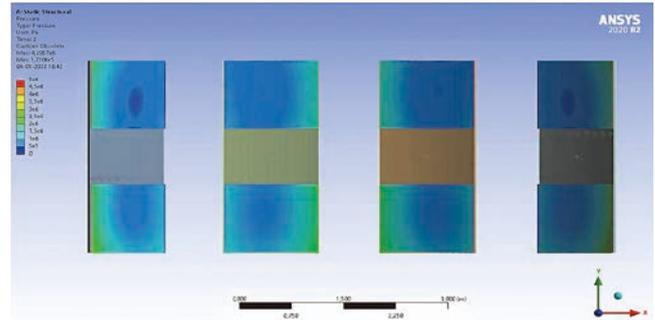


圖 9 有限元素法下單樁支撐墊之壓力分布分析 [3]

### 結論

如本文一開始所言，隨著風能產業日漸蓬勃，如何有效率地生產綠色環保能源已是國際上共同之課題。因此設計的過程若能對於可能風險的理解更高，便能夠有效降低意外發生以及損害發生時所引致的成本。

故本文先是介紹如何將摩擦力運用在海事工程機之設計，再闡述如何挑選適合的機具材料來完善採購流程，最後介紹損壞偵測之重要性，以期能把損害的可能性及傷害降到最低。

### 參考資料

1. Offshore Wind Outlook 2019 World. (n.d.). International Energy Agency. <https://www.iea.org/t&c/>
2. Lewis, M. (2023, June 29). The World's Largest Wind Turbine Is Now Installed in China. Electrek. <https://electrek.co/2023/06/29/the-worlds-largest-wind-turbine-is-now-being-installed-in-china/>
3. Remmers, J. (n.d.). TWD\_Testing & Validation. 

## 50 周年系列活動報導 — 112 年 7 月 21 日 臺灣鐵道發展史研討會



宋裕祺理事長 開幕致詞



伍勝園局長 致歡迎詞



胡政務次長宋理事長與主持人合影



主持人與貴賓於鐵道光廊合影



# 離岸風場之海底陣列電纜

## 研究與應用

蘇郁琇 / 國立成功大學水利及海洋工程系 碩士生

楊瑞源\* / 國立成功大學水利及海洋工程系 教授

台灣近來致力於發展離岸風能產業，以期能產生乾淨、環保的綠色能源，而在離岸風場中，海底電纜扮演電力輸送的重要角色，如何更有效率的輸送電力一直是值得深耕的方向，無論是固定式風場還是未來的浮動式風場，如何佈放及安裝電海底電纜都是風場建置不可或缺的一部份。因此，本文將介紹海底電纜的參數特性、形狀配置，並說明如何以力學角度來進行電纜的初步設計，最後將以三種配置來進行極端條件模擬並比較其結果。

關鍵詞：浮動式風場、陣列電纜、動態電纜

Recently, Taiwan has been dedicated to develop offshore wind industry to generate green energy. In offshore wind farms, cable system plays an important role in transporting the electricity for both fixed and floating foundation. Therefore, how to install the cable system is a crucial part when constructing a wind farm. In this research, the feature and configuration of cable system would be covered to express the way of conducting a cable design. Numerical simulation of three cases under extreme conditions will also be included to offer a general concept through cable system.

Keyword: Offshore wind farm, Inter-array cable, Dynamic cable

### 前言

近年來由於能源議題興起及 2050 年淨零碳排政策，綠色能源如風能、太陽能等被大力提倡。其中台灣海峽因天然地形條件，形成極具發展離岸風電之潛力場址，如下圖 1 所示<sup>[1]</sup>。2019 年，台灣位於苗栗外海之第一座離岸風場海洋風電 (Formosa 1) 正式商轉。由於台灣海峽風能密度較高之處多位於水深 60 ~ 90 米，但建置固定式風場的成本亦會隨著水深而增加，故近年來亦陸續規劃西部外海之浮動式風場開發，經濟部能源局已於 2023Q1 召開浮動式風場示範規劃說明會議，預計於今年 Q4 完成選商，並於 2028 年完工併網。

在離岸風場中，電纜系統扮演著致關重要的角色，風機運轉所產生之電能需藉由電纜傳輸並整合至

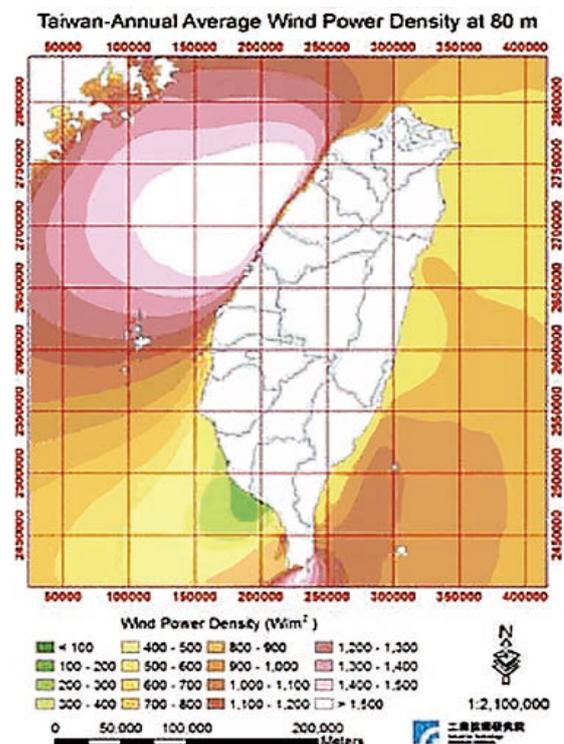


圖 1 台灣海峽風能密度圖

(圖片來源：陳美蘭、胡哲魁<sup>[1]</sup>)

\* 通訊作者，ryyang@mail.ncku.edu.tw

電網或變壓裝置。然在離岸風場中的海底電纜，可分為陣列電纜 (Inter-array cable) 以及輸出電纜 (Export cable)，如圖 2 所示<sup>[2]</sup>，陣列電纜負責風機間及風機與變電設施間之電力輸送，出口電纜則負責變電設施到上岸端之電力傳輸。

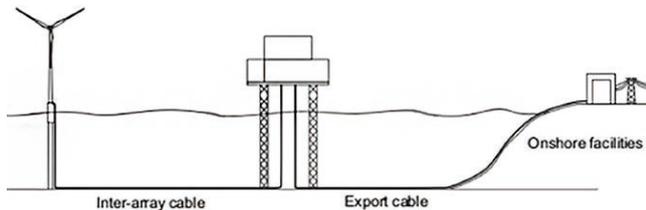


圖 2 離岸風場電纜系統示意圖  
(圖片來源:Srinil<sup>[2]</sup>)

就力學角度而言，在設計時常針對電纜之長度及上升段之形狀配置來進行考量。而距離部分，電纜長度與連接物的間距呈正相關，然風機間距須考慮尾流效應來做設計，電纜長度建議值約略為風機間距之 1.1 倍左右<sup>[3]</sup>；而連接變電設施之電纜長度則較不受限，端看使用需求而定。形狀配置部分最常見的則為懸垂式 Catenary 及 Lazy wave 形式，如圖 3 所示，然仍需參考諸多因素來考量，例如建置成本、複雜性、當地風波流條件等等來做出因地制宜的選擇，故本文將針對長度與形狀配置需考慮的不同因素來做介紹與探討。

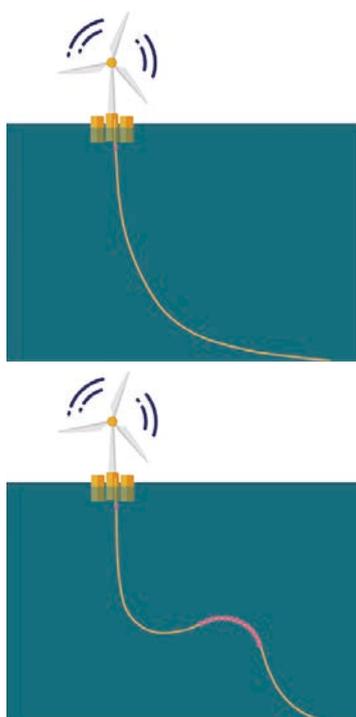


圖 3 Catenary (上) 及 Lazy wave (下) 示意圖  
(圖片來源: COREWIND<sup>[3]</sup>)

## 離岸風場之海纜材質參數

### 電壓

為了減少在電力傳輸過程中所產生的能量損失，故通常會採取高電壓低電流的方式來進行電力輸送。因此在離岸風場中的建置亦是如此，一般來說，風機運轉所產生之電力會在塔架內先進行初步升壓，早期多為 33 kV，然隨著科技進步，為了尋求更有效率的傳輸電力方式，近期亦開始將風機之升壓裝置提升至 66 kV 再匯入陣列電纜系統。

以台灣電力公司離岸風力發電第二期計畫為例<sup>[4]</sup>，即是採用輸出電壓為 66 kV 之 Vestas 9.5 MW 離岸風力發電機組，透過陣列電纜傳輸至海上變電站並升壓至 161 kV，再藉由輸出電纜將電力傳送至陸上設施。

### 電纜參數及材質

電纜外面由絕緣層保護，並可依照導線數量分為單芯電纜以及三芯電纜，若輸送電壓在 132 V 以下，多採用三芯電纜；反之若輸送電壓高於 132 kV，則較適用單芯電纜。同樣以台電二期為例，該場址分別採用 66 kV/131 kV 之三芯電纜分別作為風機間陣列電纜與輸出海纜，海纜構造如圖 4 所示，電纜參數如表 1 所列。



圖 4 三芯海纜構造圖  
(圖片來源:台灣電力公司<sup>[4]</sup>)

表 1 電纜規格資料表

項目	規範值	單位
額定電壓	66	kV
心數	3/C	-
導體截面積	630	mm <sup>2</sup>
銅導體直徑	29.8	mm
絕緣體厚度	9.0	mm
絕緣體直徑	50.6	mm
鉛絕緣層厚度	2.0	mm
完成外徑	157.0	mm
電容量	0.32	uf/km
充電電流(每相)	3.7	A/km
電感量	0.33	mH/km
電纜重量	52.0	kg/m

(資料來源:台灣電力公司<sup>[4]</sup>)

## 靜態電纜與動態電纜

由於近岸風場會漸趨飽和，未來勢必會往更深水區域發展，隨著水深漸增，若同樣採用固定式風場的電纜佈放方式來進行埋設、鋪設，除了成本增加、施工較為不易，日後若需要進行修繕也是極大的困難。故 Lerch *et al.* [5] 中，針對觸地段使用靜態電纜與動態電纜（如圖 5）來進行各方面的比較，而兩者的差異在於有無使用 Joint 來對電纜進行固定、以及埋設作業的差異。

圖 6 數據為每公尺的靜態與動態電纜的成本與能量損失比較圖，藍色代表於觸地段採用靜態電纜、而紅色則代表採用動態電纜。根據分析顯示，因為靜態電纜需在觸地段兩端加裝 Joint 來做固定並且進行埋設的工項，所以在採購及安裝項目的費用都高於動態電纜。然在其他方面的成本與能量損失兩者則相同，此研究結果顯示動態電纜在成本上會比靜態電纜更有發展潛能，故本文接下來將針對動態電纜來進行更多介紹。

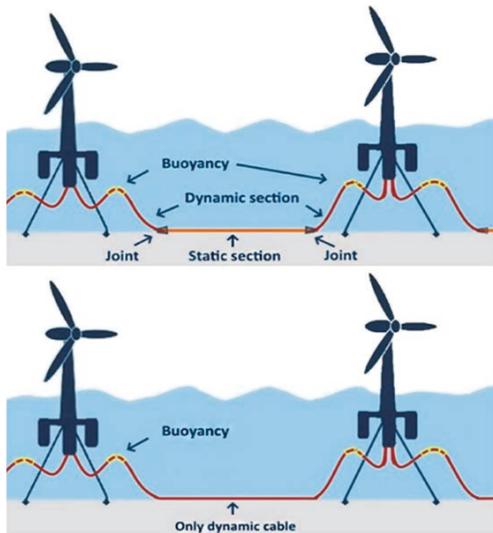


圖 5 靜態電纜（上）與動態電纜（下）示意圖  
（圖片來源：Lerch *et al.* [5]）

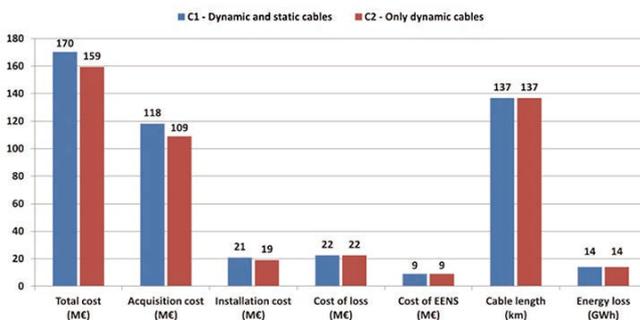


圖 6 靜態與動態電纜成本及損耗比較圖  
（圖片來源：Lerch *et al.* [5]）

## 電纜長度設計

### 尾流效應 (Wake Effect)

在離岸風場中尾流效應係指當風經過位於上游處的風機後，造成風速下降並在葉片後方形成紊流區，致使下游區的風機發電效率降低的現象，如下圖 7 所示 [6]，因此風機機組佈放的間距需考慮此效應來做設計，以免下游處風機發電效率不彰，大幅影響風場的運作及效益。



圖 7 尾流效應示意圖  
（圖片來源：Vattenfall [6]）

### 機組間距與葉片直徑

風機機組間的距離與風機的大小息息相關，通常會參考的指標是風機的葉片直徑 (Rotor Diameter, DR)，為葉片運轉的圓直徑，即是葉片長度的兩倍，如圖 8 所示。此數值會隨著風機的機組容量提高而變大，以 6 MW 的風機為例其 DR 約為 150 m，15 M 風機則約 240 m。

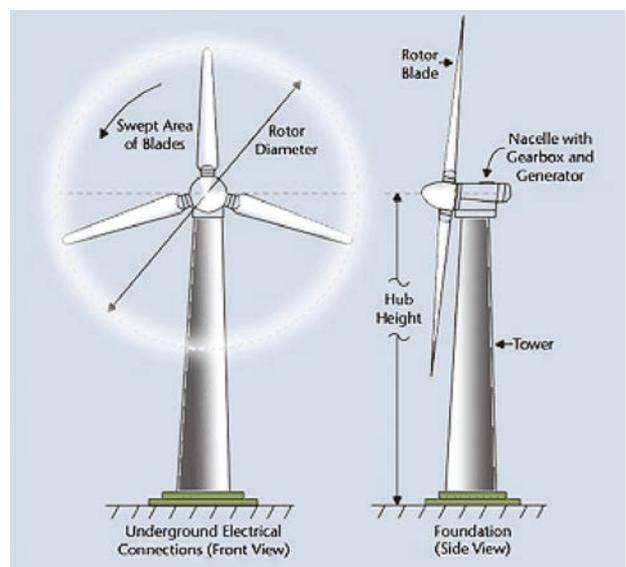


圖 8 葉片直徑示意圖  
（圖片來源：Courtesy of ESN [7]）

根據 Ahmad<sup>[8]</sup> 指出，在盛行風向下，風機間距建議為 DR 的 7 倍，而非盛行風向至少為 DR 的 4 倍方能使尾流效應所造成的能量損失降至 20% 以下，由此可知 DR 為設計離岸風場時很重要的參考數據，若以 15 MW 的風機為例，機組間距則會高達 1,500 公尺以上。

## 電纜長度

機組間距決定了之後，設計適當的電纜長度仍是重要的關鍵，若長度過長或過短容易造成過大的張力、能量損耗增加或成本方面的問題。因此根據 Corewind 指出，電纜的最大長度不應超過機組間距的 1.1 倍，故進行電纜設計時可以此作為一個參考依據。

## 動態電纜設計與形狀配置

### 增設浮球段

由於電纜若以自身重量垂放至海床，容易在連接風機平台處（Fairlead）以及觸地點（Touchdown point）形成較大張力以及曲率，在長期受外力條件作用下，容易累積疲勞，提高電纜的損壞機率。

因此若在電纜上增設浮球段，可以藉由浮球於水中所產生之浮力，改善 Fairlead 及 Touchdown point 的張力曲率，延長電纜之使用年限。

### 動態電纜設計檢核與規範

由於目前尚未有針對動態電纜之設計規範，故目前設計電纜時，通常會對電纜之最小破斷力（Minimum Breaking Load, MBL）以及其最大允許曲率（Maximum Allowable Curvature, MAC）來進行檢視，而此兩數值會因電纜的材質、外徑而有所不同，若電纜的在外力作用下的張力與曲率超過自身之 MBL 及 MAC，則電纜遭到損害的機率將大幅提高，故進行動態電纜設計

及數值模擬時常針對此兩項參數來進行檢視。

## 動態電纜常見型式

現今國際上較常見之動態電纜型式約有以下將介紹的幾種型式，其中又以 Catenary 與 Lazy wave 更為常見，電纜配置會依據當地的風浪條件、安裝複雜度、成本考量等因素來決定適合的方案。

### Free Hanging (Catenary) 懸垂式

懸垂式（如圖 9）是常見的電纜型式之一，無須額外增設浮球段，即以自身電纜重量垂放置海床上，因此，最大的優點即為施工上較為簡單，成本也較低。但隨著水深若變深，長度變長重量也隨之加重，容易在連接浮台處（Fairlead）以及觸地點（Touchdown point）產生較大張力值，且也容易隨著浮台運動產生曲率過大的情形，因此容易累積疲勞，減少使用年限。

### Lazy wave

Lazy wave 亦是目前被廣泛運用的電纜型式，如圖 10 所示，相較於 Catenary 型式，Lazy wave 在電纜的中間增設浮球段來提供浮力，以防電纜因本身自重而造成過大的張力及曲率，也因此更適合運用於深水區域。但由於整體電纜呈現彎曲形狀，因此於不連續材質連接處容易出現較高曲率值，故會藉由防彎器、限彎器等相關配件來維持電纜之形狀；且佔用之海域空間範圍也較 Catenary 型式來的大，故採用 Lazy wave 型式時須更加注意是否會影響船隻行經範圍，占用生物棲地等議題。

### Steep wave

Steep wave 與 Lazy wave 有著相似的設計概念，都是藉由增設浮球段來增加浮力，減輕因電纜自重而產生的張力，兩者之差異在於觸地點之角度（如圖 11 所示），Steep wave 較趨於垂直、而 Lazy wave 較趨於平緩。因此

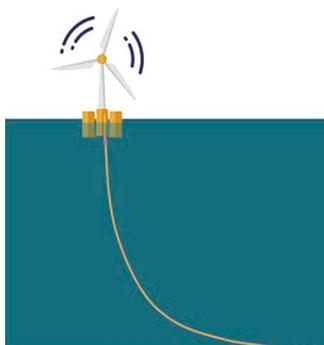


圖 9 Free Hanging (Catenary) 示意圖  
(圖片來源: COREWIND<sup>[31]</sup>)

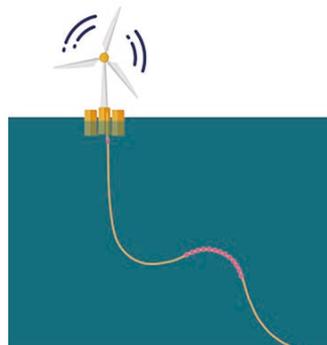


圖 10 Lazy wave 示意圖  
(圖片來源: COREWIND<sup>[31]</sup>)

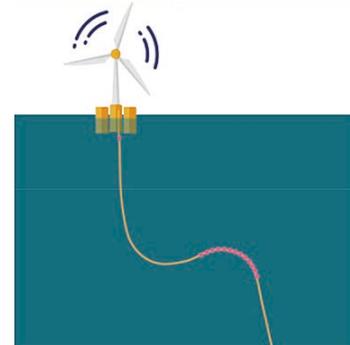


圖 11 Steep wave 示意圖  
(圖片來源: COREWIND<sup>[31]</sup>)

Steep wave 可以減少電纜占用的海域空間，但需額外增設限彎器等配件來維持此形狀，施工成本及工項較多。

### 其他型式

其他型式像是 Lazy S 或是 Tethered wave (如圖 12)，都屬於針對電纜特定部分做增強設施的配置，像是在觸地段或電纜中間段增加支撐固定，可以防止觸地段過度淘刷、避免電纜懸垂段過重、抵抗側向流能力較強等。

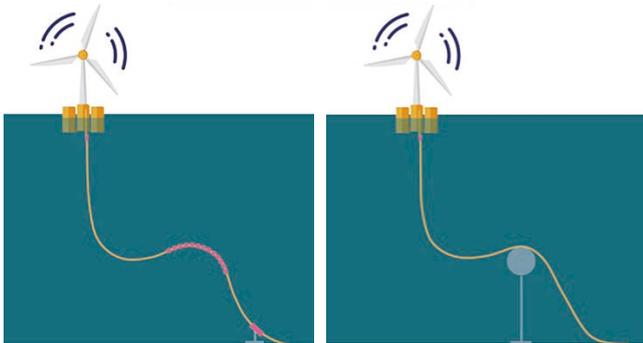


圖 12 Lazy S (左) Tethered wave (右) 示意圖  
(圖片來源: COREWIND [3])

### 新型動態電纜配置

然近年來亦有其他新型提出的動態電纜概念，Srinil, N. [1] 於 2016 提出如圖 13 所示之 W 型配置。此種配置藉由增設一段或多段浮球使整條動態電纜浮於水體中，其優點在於無須於海底床進行鋪設、埋設等施工作業，因此可以減少施工噪音，同時亦保護海底床之生物棲地，正因其無須於海底床進行電纜安裝作業，故也不受水深之限制，因此若運用於深水區時，亦不會因電纜延伸至海底床而增加過多安裝成本。

然而仍需注意因為此種配置整段浮於水體中，會占用較多海域空間，因此可能需要視當地海域使用需求來訂定電纜與海面及海底床之最小距離，方能避免生物纏繞，妨害船隻行進等問題。

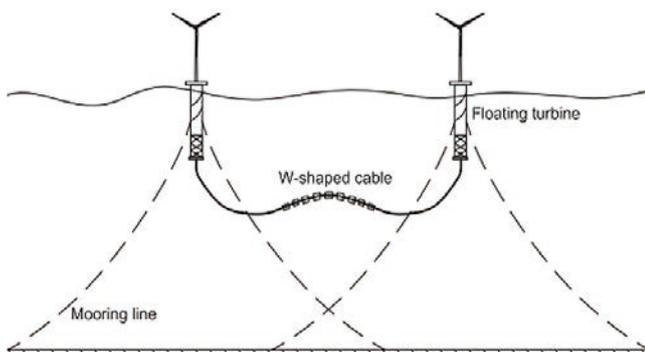


圖 13 W shape 動態電纜示意圖  
(圖片來源: Srinil, N. [2])

然 Ruan *et al.* [9] 提及與 Lazy wave 型式相似的 Multiple Lazy wave 型式，即增加第二段浮球段 (如圖 14 所示)。由於隨著使用年限增加，電纜的彎曲剛度減小時會再觸地段累積更多疲勞，然根據其分析指出此種型式比起 Lazy wave 可更有效減少觸地段的疲勞累積，因此長久下來的電纜抗疲勞表現可能會優於 Lazy wave 型式。

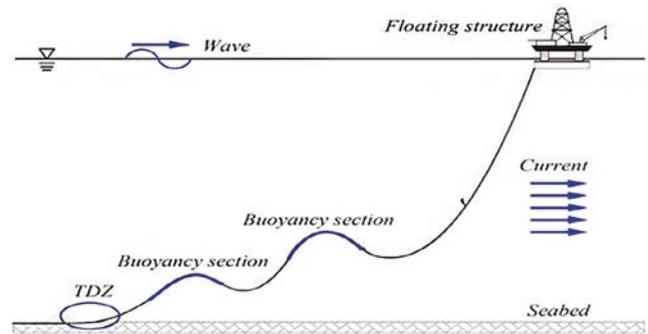


圖 14 Multiple Lazy wave 示意圖  
(圖片來源: Ruan [9])

### 數值模擬案例分析

綜上所述，本研究將使用 Ansys AQWA 以及 Orcina Orcaflex 兩套數值軟體來進行數值分析，模擬中平台為多項外力耦合計算，包含環境外力、平台水動力、繫纜繩拉力對平台的作用力、動態電纜的受力與彎曲情形等。因此平台之水動力參數需於 ANSYS AQWA 中先完成頻率域上求解，再把數據導入 Orcina OrcaFlex 中進行時域上求解。

### 水動力理論與計算

ANSYS AQWA 透過有限元素或邊界元素法進行勢能流水動力數值求解。計算流程為輸入浮台模型參數，設定環境參數如水深、波高、週期、浪向後並進行計算平台水動力參數，而浮台的運動方程式可表示為：

$$M(p, a) + C(p, v) + K(p) = F(p, v, t)$$

式中： $M(p, a)$  為浮台之慣性力， $C(p, v)$  為浮台之阻尼力， $K(p)$  為浮台的剛度力， $F(p, v, t)$  為浮動式結構物所受之外力， $p$ 、 $v$ 、 $a$  則分別為位置、速度向量、加速度向量， $t$  為模擬時間。

### 時域計算與分析

時間域上的數值模擬將使用 Orcina OrcaFlex 來進行分析，該模式以非線性有限元素法模擬繫纜運動，可計算每構件彎曲、位置與張力，目前已被廣泛運用

於船體穩定性評估與錨碇系統設計（如船舶、浮動風機、波浪發電系統、鑽油平台等）。

若以重心位置代表整個平台，其運動方程式可表示為：

$$m\ddot{X} = F_{wext}(t) + F_{hyd}(t) + F_{me}(t) + F_{damp}(t) + F_{cable}(t)$$

其中  $m$  為浮體質質量矩陣； $\ddot{X}$  為浮體位移與轉動加速度向量； $F_{wext}$  為波浪作用力與扭矩向量； $F_{hyd}$  為浮體重力 / 浮力與扭矩向量； $F_{me}$  為莫里森力與扭矩向量； $F_{damp}$  為非黏性阻尼力與扭矩向量； $F_{cable}$  為繫纜繩的作用力與扭矩向量。

### 案例配置及計算結果

本次研究選用 Catenary、Lazy wave、Multiple Lazy wave 三種型式來做比較，分析三種配置的張力及曲率結果，配置圖如圖 15。

此次模擬採用新竹外海浮標資料，並以 50 年回歸期之風波流極端條件、水深 100 米來進行分析，浮台則選用緬因大學（UMaine University）所設計開發之半潛式平台搭載 15-MW 風機<sup>[10]</sup>，由於電纜的最大張力值通常發生在與平台的連接處，因此本次研究將針對連結兩個平台的 End A 及 End B（位置如圖 16 所示）來探討三種配置對於張力的差異，分析結果如下。

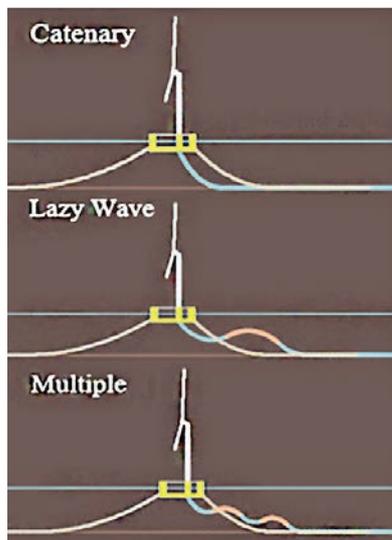


圖 15 三種方案配置圖



圖 16 浮式機組間動態電纜配置圖

從圖 17 及圖 18 中可以看到在同樣的外力條件下，在兩個連接平台的接點處，Catenary 的張力表現都極度震盪，且多次超過電纜的最小破斷力（MBL），因此可推斷較不適用於較深水之海域，或者需要其他設備配件來減輕因電纜自重而引起的張力。

而 Lazy wave 及 Multiple 型式相較之下的張力表現則穩定的多，兩者皆未超過電纜之最小破斷力，且 Multiple 型式的張力表現最佳，因此可推論將浮球段分段來安裝可能會更有效率的減緩連接平台處的張力。

然在曲率部分，本研究將檢視電纜上升段在整個模擬期間的最大曲率是否超過電纜的最大允許曲率（MAC）。下列對照圖中，黑色線條為電纜在模擬期間的平均位置側視圖，藍色線條則為其對應位置所發生的最大曲率。

如圖 19 至圖 21 所示，三種配置皆遠小於電纜之最大允許曲率 0.5 rad/m，而 Lazy wave 在曲率的表現上略優於其他兩者，另可發現在不連續材料面前後、觸地點是較容易產生較大曲率的位置，故如何減少觸地點的疲勞累積，是在日後設計及佈放海底電纜時需多加注意的地方。

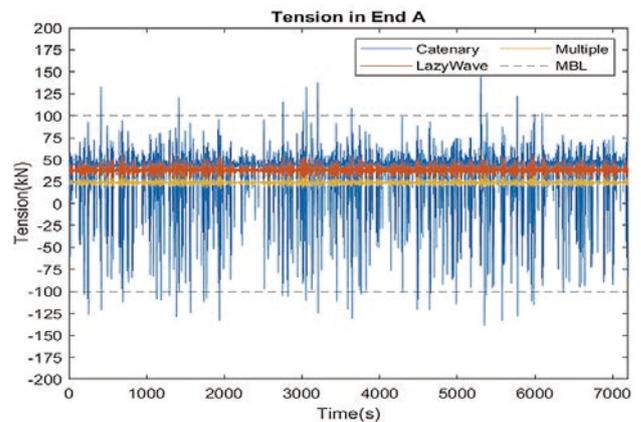


圖 17 End A 張力時序列比較圖

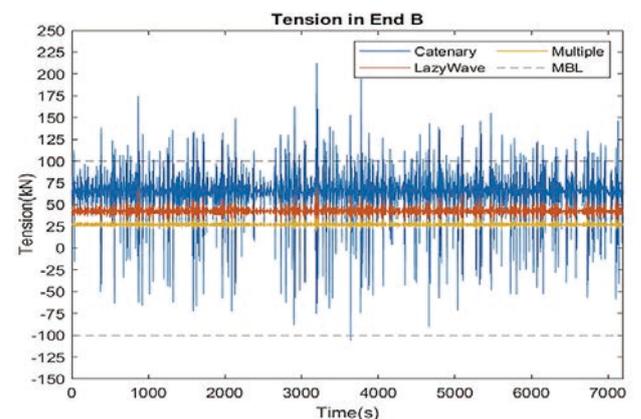


圖 18 End B 張力時序列比較圖

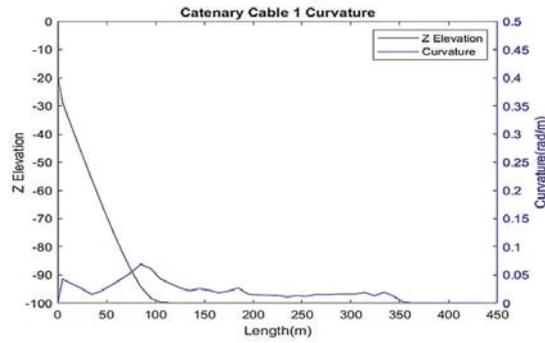


圖 19 Catenary 最大曲率對照圖

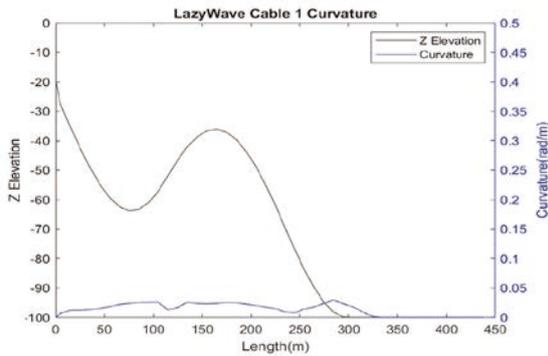


圖 20 Lazy wave 最大曲率對照圖

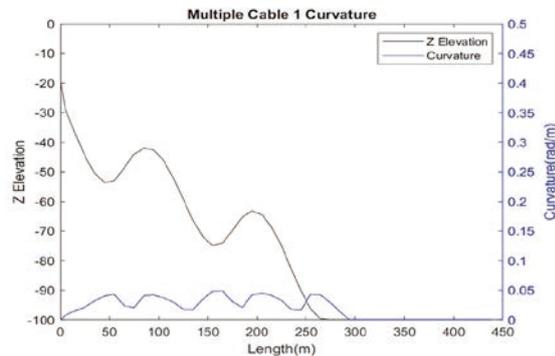


圖 21 Catenary 最大曲率對照圖

## 結論與未來展望

隨著國際上對於能源議題愈加重視，台灣也致力於運用本身的地理條件優勢來發展離岸風能產業，從陸上風機到海上風機；從固定式風場到如今浮動式也已嶄露頭角。如何更加安全、有效率地來發展台灣的風能產業、建立本土化的技術與經驗是當前所面臨的課題。

故本研究以海底動態電纜為主要研究對象，介紹其材質、配置以及實際佈設於風場時會面臨的情形，並以三種配置分別為 Catenary、Lazy wave、Multiple Lazy wave 來進行模擬並比較在極端條件下三者在張力及曲率上的差異，由分析結果可得出以下結論：

1. 電纜的最大張力通常發生在與平台連接處，而三種配置的張力表現以 Multiple Lazy wave 最佳，Lazy wave 表現次之，而 Catenary 則容易超過電纜的最小破斷力。
2. 電纜的最大曲率通常發生於不連續面、觸地點，而曲率表現以 Lazy wave 略優於其他兩者，但三種配置的表現接近，皆遠小於電纜的最大允許曲率。
3. 在安裝總長度相同的浮球段下，分段安裝 (Multiple) 的表現可能比單一浮球段 (Lazy wave) 來的好。

因此在未來的研究，可以針對台灣的海域特性，來挑選適合台灣的動態電纜配置，並加入常態海況、

東北季風海況等條件來進行模擬，使模擬情況更貼近實際海況，作為國內建置離岸風場的參考依據。

## 參考資料

1. 陳美蘭、胡哲魁 (2014)，台灣地區風能評估與離岸風電開發潛能分析，No.103, 38-49.
2. Srinil, N. (2016). Offshore Wind Farms Technologies, Design and Operation. Cabling to Connect Offshore Wind Turbines to Onshore Facilities, 419-440. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007792000131>
3. Corewind. (2020). Review of the State of the Art of Dynamic Cable System Design.
4. 台灣電力公司 (2018)，離岸風力發電第二期計畫可行性研究。
5. Lerch, M., de-prada-gil, mikel, and Molins, C. molins a. (2021). A Metaheuristic Optimization Model for the Inter-Array Layout Planning of Floating Offshore Wind Farms. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 131, 107-128.
6. (N.d.) VATTENFALL. <https://group.vattenfall.com/>
7. (2016). DavidDarling. [https://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE\\_swept\\_area.html](https://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_swept_area.html)
8. Ahmad, I. B. (2022). Optimisation of Suspended Inter-Array Power Cable Configurations for Floating Offshore Wind Turbines.
9. Ruan, W., Shi, J., Sun, B., and Qi, K. (2020). Study on Fatigue Damage Optimization Mechanism of Deepwater Lazy Wave Risers Based on Multiple Waveform Serial Arrangement. Ocean Engineering, 228 (108926).
10. Allen, C., Viselli, A., Dagher, H., Goupee, A., Gaertner, E., Abbas, N., Hall, M., and Barter, G. (2020). Definition of the UMaine VoltturnUS S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine. Technical Report. 



# 浮式風機 平台設計 製作與競賽

陳乃齊／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
孫詠鈞／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
戴紹捷／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
林奎瑱／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
鄭舜文／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
林昱蓁／國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士生  
楊瑞源\*／國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

傳統風能發電多半建立於陸地或近岸的固定基礎上，但浮動風能技術採用了更為創新的方式，它將風力發電機安裝在浮動結構上，使其能夠在深海區域進行發電。這樣的技術可以克服水深限制，開闢更多適合風能開發的區域，同時也能更好地捕捉更強的風能，提高能源產量。在浮式風機平台設計中，一般遵循著五個步驟：概念設計、數值模擬、水工縮尺模型試驗、平台安裝與運輸的可行性評估，以及效益分析。本文主要分享這次競賽平台的設計概念，並以本模型為案例，介紹數值模擬、以及進行水工縮尺實驗的必要性。同時，也將分享我們在競賽中所獲得的寶貴經驗，供大家參考。

關鍵字：浮式風能、模型試驗、數值模擬、載台設計、國際競賽

## ABSTRACT

Traditional wind power generation is mostly built on fixed foundations on land or near the coast. However, floating wind energy technology employs a more innovative approach: it installs wind turbines on floating structures, allowing them to generate power in deep-sea regions. This technique can overcome water depth limitations, open up more areas suitable for wind energy development, and also enhance the capture of stronger winds, resulting in increased energy production. In platform design, there are generally five steps followed: conceptual design, numerical simulation, hydraulic scale model testing, feasibility evaluation of platform installation and transportation, and cost-benefit analysis. This article primarily aims to share the design concept of the competition platform, using our model as a case study, to introduce the importance of numerical simulation and the necessity of conducting hydraulic scale model experiments. Additionally, we will also share the valuable experiences gained during the competition for everyone's reference.

Keywords: Floating wind energy, Model experiment, Numerical simulation, Platform design, International competition

\* 通訊作者，ryyang@mail.ncku.edu.tw

## 前言

近二十年來全球於再生能源的發展愈加蓬勃且迅速，尤其是離岸風電的部分。離岸風電是一種利用海上風力發電的技術，可以為我們的能源需求提供可持續的解決方案。隨著風場選址逐漸擴展至越來越深的海域，為了降低離岸風機的水下基礎結構成本，以及降低施工上的困難，浮式平台技術成為大家積極研究的解決方案，歐洲亦有許多有志之士舉辦浮式平台設計競賽，為這項技術的發展提供了更多創新與進步的契機。

歐洲有個 OffshoreWind4Kids (OW4K)，它是一個教育項目，旨在向孩子們介紹和推廣離岸風電的知識。2022 年 OW4K 發起了浮式平台設計建造競賽 (Floating Wind Challenge)，鼓勵全世界的年輕工程師踴躍參與。

「Floating Wind Challenge」是一個旨在推動浮動式風能技術發展的倡議和競賽活動。由於 2022 年的競賽成果獲得了廣大的反響，2023 年擴大舉行比賽，在 5 月 7 日，荷蘭的斯海弗寧恩海灘 (Scheveningen beach) 舉行。斯海弗寧恩海灘是一個緩坡海灘，據統計，當地 5

月的平均風速為 9 節 (約 5 m/s)，最大陣風可達 16 節 (8 m/s)，有效波週期為 3 ~ 7 秒。

今年 (2023 年) 的比賽要求浮式風機模型平台要能夠搭載 400W Vevor 的風力發電機，量測 30 分鐘內風機的發電量，而且安裝位置的水深超過一公尺深。我們在國立成功大學水利與海洋工程楊瑞源教授的指導下組團參加這次的競賽。本篇文章說明我們的浮式風機平台設計概念、製作、實驗測試、數值模擬以及參加競賽經驗。

## 浮式風機平台 - Orein

我們將參賽的浮式風機平台命名為「Orein」，它是楊瑞源教授海洋結構與可再生能源實驗室 (OSREL) 的學生自行設計出來的。Orein 的「O」象徵八邊形平台形似於圓形，「rein」顯示團隊對於平台在實海域的運轉的企圖與信心。楊教授的 OSREL 研究室主要研究離岸風電，特別是浮台繫泊系統的設計，執行過多項專案，並擁有大量水工模型實驗的經驗。

### 設計流程

如圖 1 所示，我們依照 8 個步驟進行) 進行風機平台設計：(1) 設計評估及初步結構設計、(2) 概念測試、(3) 全尺寸模型設計、(4) ULS 生存測試、(5) 繫覽設計<sup>[1]</sup>、(6) 結構設計、(7) 安裝及運輸可行性評估、(8) 成本效益分析<sup>[2]</sup>。

### 浮台形狀選型

考慮到出國參加競賽安裝模型地點的環境條件以及出國參加競賽運輸方式及成本後，決定使用 1 : 60 比例尺進行設計。這將導致示性週期 4 ~ 7 秒之波浪在模型放大回全尺寸時，其所面臨之示性週期約為 23 ~ 53 秒。

浮體式離岸風電適用於水深 50 ~ 150 公尺 (或延伸至 200 公尺) 之離岸風電技術。浮體式離岸風電技



圖 1 浮式風機平台設計流程圖

術核心為浮體平台，技術分類一般可分為 Spar-buoy (柱狀浮筒)、Tension Leg Platform (TLP, 張力腳平台)、Semi-submersible Platform (半浮式平台) 三類，以及不屬於上述三類之其他形式<sup>[3]</sup>。設計參考文獻 DNV-RP-0286 是由挪威船級社 (Det Norske Veritas, 簡稱 DNV) 所制定的一個技術建議實踐文件，主題涉及風能產業中的「海上風機結構設計」。這份文件提供了有關海上風機結構設計的指導方針、建議和最佳實踐，以確保風機在惡劣海洋環境下的安全性和可靠性。該文件涵蓋了許多方面，包括結構設計的荷載計算、材料選擇、施工和安裝過程中的技術要求等。表 1 列出 DNV-RP-0286 測計參考文件中有關不同浮台型式之自然週期範圍。Spar 以及 Semi-submersible 高機率達到共振，而 TLP 受到潮汐影響，在安裝上成本昂貴且不易安裝。因此採用 Barge 型式設計並透過下部掛載改善 Barge 所面臨之缺點。

### Orein 風機平台主要元件

我們的 Orein 風機平台主要元件包括：八邊形平台、阻尼池、垂盪板、下部掛載系統、模組化設計，如圖 2 所示。

#### (1) 八邊形平台

八邊形平台與方形結構相比，八邊形平台受到的波浪及海流影響較小，且製造過程比圓形設計簡單。此外，八邊形較不容易受到渦流引致振動 (VIV) 的影響，從而減少損壞風險並延長平台的壽命。

表 1 不同浮台型式之自然週期範圍 (DNV-RP-0286)

Type of motion	Spar	Semi-submersible	TLP	Barge
Units	[s]	[s]	[s]	[s]
Surge	~100(catenary)	~100(catenary)	15-60	~100
Heave	25-40	15-25	1-2	5-10
Pitch	25-40	25-40	2-5	9-16
Yaw	5-20	50-80	8-20	50-100

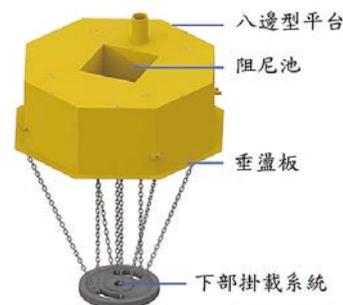


圖 2 浮式風機 Orein 平台示意圖

(2) 阻尼池

阻尼池的設計可以使得水體的振動與波浪產生的激振力相互抵銷，以降低平台上下起伏。此外，阻尼池的設計還可以減少所需材料用量，達到提高成本效益的目的。

(3) 垂盪板

為了進一步抑制平台的上下起伏，在平台底部安裝垂盪板。在平台起伏時產生一個反作用力來抑制運動，可增加平台的穩定性。

(4) 下部掛載系統

下部掛載系統可降低浮台重心，進而增加其穩定性。此外，單擺運動產生的相位差可減少平台傾仰 (pitch)，從而提高風機發電效率<sup>[4]</sup>。

(5) 模組化設計

我們將結構體設計成相同的小單元，使其能統一製造，並且每個單元相互獨立，可以單獨進行配重。這些模組可以被視為獨立的積木，它們可以快速地組合在一起形成完整的模型，方便運輸，節省時間成本 (圖 3)。

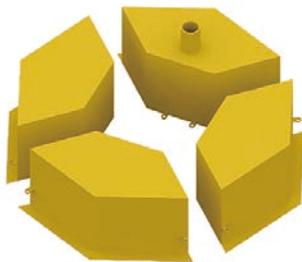


圖 3 Orein 平台模組化示意圖

數值分析

應力分析

我們使用 ANSYS Workbench 靜態結構分析來驗證模型的結構強度，確保其應力和變形水平是可接受的。通過利用有限元法 (FEM)，靜態結構分析能夠使用最小位能定理和靜態函數定理來轉換線性方程組進行計算。儘管在複雜的邊界條件及幾何形狀，FEM 也能夠提供可行的解決方案。

共振頻率分析

自由衰減實驗收集時間序列數據，並通過傅立葉變換將其轉換為頻譜。頻譜中觀察到的峰值對應於結構的自然周期，當外力的周期 (如：波浪) 與的自然周期接近時，結構的振幅將明顯增加，這被稱為共振。共振可能導致結構疲勞和損壞，對發電效率產生負面影響。因此，自然周期是浮式平台非常重要的設計參數。

由於結構體的傾仰和上下運動對發電效率影響較大，在設計時，會使結構體的傾仰和上下起伏週期避開真實海域的波浪週期範圍。我們利用 AQWA 軟體模擬後，設計傾仰和上下運動的自然周期分別為 1.879 秒和 1.291 秒，避開當地有效波週期 3 ~ 7 秒的範圍，如圖 4 及圖 5 所示。

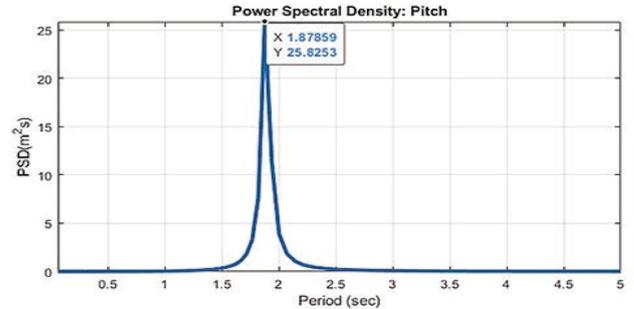


圖 4 數值模擬的能量波譜 (傾仰)

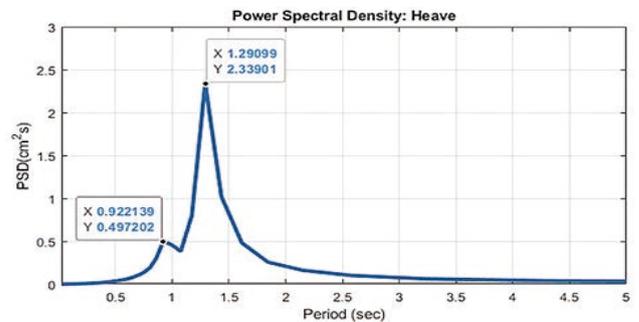


圖 5 數值模擬的能量波譜 (上下運動)

生存測試

我們使用流體動力學軟體 OrcaFlex 來模擬浮動結構的運動狀態，OrcaFlex 可應用於多種分析，包括錨泊動力系統、立管系統以及浮式平台或船舶的動態分析，OrcaFlex 以勢流理論為基礎，假設流體不可壓縮、無黏滯性和無渦旋的。

根據 DNVGL-ST-0119 標準，對浮式風機進行安全評估時，使用 50 年颱風重現期進行評估。根據 DNV-RP-0286 標準，建議進行長達 3 小時的模擬，以準確模擬非線性、二階效應和緩慢變化回饋等影響。根據 DNVGL-OS-E301 和 Corewind D2.1 標準，我們審查 Orien 平台的運動和繫泊張力性能，確保其符合規格<sup>[5]</sup>，如表 2 所示。

表 2 數值模擬結果與 DNVGL-OS-E301 標準比較

	俯仰	前後	繩張力 (一般情況)	繩張力 (極端情況)
標準	< 15°	< 30 ~ 60 m	< 30380.8 kN	< 30380.8 kN
模擬	13.8°	30.85 m	29340.4 kN	22997.3 kN
設計檢查	Pass	Pass	Pass	Pass

## 水工模型試驗

本研究試驗在國立成功大學水工試驗所的大型造波水槽進行（圖 6）。試驗包含共振頻率試驗及生存測試。



圖 6 在國立成功大學水工試驗所的大型造波水槽進行試驗

## 共振頻率試驗

在共振頻率試驗方面，我們使用陀螺儀和影像辨識進行自由衰減試驗，以獲得浮式平台的固有周期。該實驗包含以下步驟：

1. 在浮式平台上放置陀螺儀，以測量平台的傾仰及上下運動運動資料。
2. 使用 gopro 追蹤浮式平台的運動軌跡，並使用 MATLAB 軟體進行影像分析，將平台的運動軌跡轉換成二維座標系統。
3. 導出由陀螺儀測量及影像分析得到的平台運動時間序列資料。
4. 使用傅立葉變換得到時間序列頻譜，從而得知。

水工試驗結果如圖 7 及圖 8 所示。比較數值模擬與模型試驗試驗結果，數值模擬傾仰的自然週期 1.88 秒，試驗試驗傾仰的自然週期 1.98 秒，誤差約為 5%；而數值模擬起伏的自然週期 1.29 秒，試驗試驗傾仰的自然週期 1.33 秒，誤差約為 3%，如表所示。由於 OrcaFlex 以勢流理論作為基礎，不考慮流體黏性，因此數值模擬的自然周期略小於實驗結果，符合預測（表 3）。

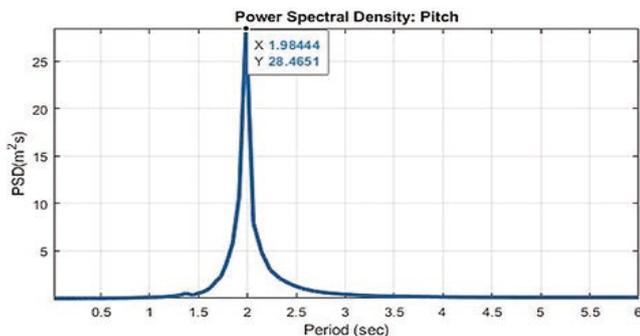


圖 7 水工實驗的能量波譜（傾仰）

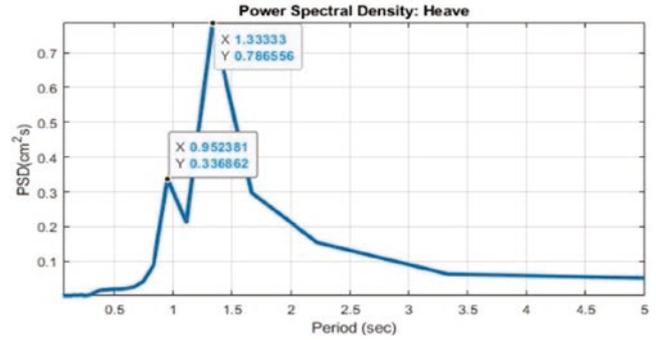


圖 8 水工實驗的能量波譜（起伏）

表 3 數值模擬結果和水工試驗結果自然週期比較

尖峰週期	數值模擬	水工試驗	誤差
傾仰	1.88 sec	1.98 sec	5.29 %
起伏	1.29 sec	1.33 sec	3.15 %

## 生存測試

在生存測試方面，競賽時模型被安裝在近岸水域，為了模擬競賽現場 Scheveningen 海灘的波浪狀況，我們在大型水槽中生成 3 秒和 6 秒周期的波浪，分別觀察平台對短周期和長周期的波浪反應。在沿岸區域，我們採用了 JONSWAP 頻譜，其中峰值增強係數  $\gamma$  為 1.5，我們在風浪流水槽中造風，模擬 Scheveningen 海灘平均 5 m/s 的風速，同時生成 2.4 秒週期的波浪，以測試風與波浪的耦合效應，如表 4 所示。

編號 JH15T03 實驗的最大傾仰角大約 12 度，編號 JH15T06 實驗的最大傾仰角大約 6 度，比較兩個試驗，由於 JH15T03 試驗 3 秒的波浪周期，較接近平台的自然周期，導致平台更大的傾仰及上下運動。表示 Orein 在海洋中的長周期波浪條件下具有較高的穩定性及發電效率，（圖 9、圖 10）。

編號 JH08T24 實驗為風與波浪耦合的實驗試次，我們先進行造風，在平台達到穩定後開始造波。在波流耦合的影響下，最大傾仰角為 12 度（圖 11）。

## 參加競賽

### 事前準備

回顧整個比賽的籌備過程，我們不僅限於學習與比賽有關的實驗及設計，更多的是在這之外林林總總的行前規劃細節，像是如何出關、報帳等。

表 4 試驗編號及相關參數

試驗編號	示性波高 Hs	波浪週期 Ts	峰值增強係數 $\gamma$	風速
JH15T03	15 cm	3 sec	1.5	0
JH15T06	15 cm	6 sec	1.5	0
JH08T24	8 cm	2.4 sec	1.5	5 m/s

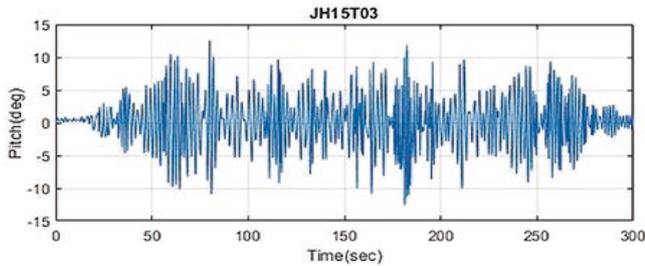


圖 9 編號 JH15T03 試驗傾仰角資料

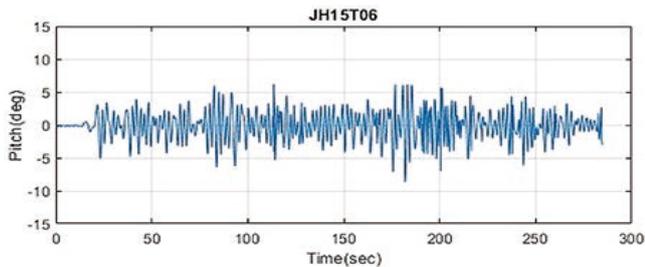


圖 10 編號 JH15T06 試驗傾仰角資料

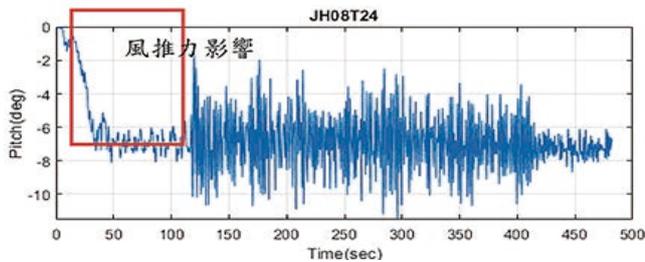


圖 11 編號 JH08T24 試驗傾仰角資料

從接獲比賽資訊後我們團隊就開始進行文獻探討，鞏固相關的背景知識，將大家獲得的資訊在第一時間透過小組會議分享，並逐步開始策畫如何將想法實體化。

首先利用 Solidworks 製圖並計算物理特性，再將結果匯入水動力軟體 AQWA、海事工程軟體 OrcaFlex 模擬來驗證猜想。由於設計出來的平台是許多新想法的融合，僅透過模擬軟體驗證，並無實際實驗過，有鑑於比賽是需要將模型實體化來進行，因此我們決定先進行初步驗證，確保實驗數值與模擬數值的差異不至於太大，在確定浮台的尺寸後，先以容易取得之材料，如水盆、塑膠桶等素材來進行簡單加工，模仿駁船式 (Barge type) 平台特有的阻尼池 (Damping Pool)，並於平台四個角及底部黏上導纜孔來掛載纜繩，另外，風機及掛載造成的力矩影響則透過加上槓片的方式做可行性評估 (圖 12)。

我們將模型運至位於安南區的成大水工試驗所進行配重定位、吃水、自然衰減等測試，確認其為可行之後再啟動造波機，觀察其下部掛載在受到不同波高及週期下的規則波後，能否提供良好的抑制效果。



圖 12 浮式風機平台簡易模型及試驗

由於比賽條件是現地場域，因此可能遇到碎波、突然之側風等無法於實驗室中預期之狀況，且比賽當天有 90 分鐘之安裝時間限制，故我們盡可能地去有效擬定實地安裝之流程與分工，並評估應該要準備的耗材數量，以避免影響安裝速度。在討論過後，我們決定先前往台南市安平區漁光島，進行現地組裝及測試 (圖 13)。同時由於需走入水深約 1 米位置，對於安全的考量我們也租借救生衣等設備防止意外發生。

關於比賽模型要特別感謝金屬中心的工程師們在比賽籌備期間的大力支持，協助我們製作並對細部進行優化，大幅減少在模型製作上的問題。而對於實地安裝之比賽模型測試，我們於比賽前也有至成大水工所，於風波流水槽進行配重的定位及風推力曲線的量測，來確認於現地風況下平台受風機推力影響下，其穩定度是否可接受。

對於安裝的流程測試及水槽的造波實驗，我們於大型斷面水槽進行規則波測試，觀察當頻率接近模型之自然週期時，其運動姿態的改變是否可接受，以確認後續是否需要做改善或調整配重 (圖 14)。我們也按現地近岸浪況進行非規則波之測試，盡最大可能的確保對於比賽當天的把握度。



圖 13 在台南市漁光島進行水上測試



圖 14 在成大水工所進行 Orein 浮式風機平台試驗

由於我們是第一次參與國際競賽，對於模型的托運、出入境等流程較為陌生，因此我們力求分工明確，各自堅守崗位並對自己的工作負責任。由於風浪的不確定性，走船運可能會有延遲等問題，因此在討論之後我們決定採用托運的方式，配合裝箱及推車將整組模型帶上飛機，也因為有部分金屬零件及尖銳物品，保險起見，出入境進行申報，得以順利通關（圖 15）。



圖 15 浮式風機模型部分金屬零件及尖銳物品托運包裝

## 競賽經過概要

到了荷蘭當地，從阿姆斯特丹機場拖著數十件的行李及模型移動至海牙，途中在叫計程車時，因為行李繁多，有遇到被司機拒載的窘境（圖 16）。因此，為避免比賽當天，遇到相同的情況，我們團隊決定自己在當地租車，消除可能遇到的不確定性，確保比賽當天都能順利的往返。租車之後，行動上就變的彈性許多，我們於比賽前一天先到比賽場地場勘，觀察海邊的浪況，並事先裝好用來當作錨碇的沙桶，為隔天的比賽組裝時預留更多時間應變突發狀況。

比賽當天，我們一早起來清點所有工具、模型配件、零件，並開車提早載著所有的用具到比賽場地。主辦單位承租一家沙灘邊的俱樂部，供每個參賽隊伍



圖 16 出國參加競賽浮式風機平台模型及行李

享用午餐，之後便開始了開幕儀式，總共有 10 支來自各個國家的隊伍，有日本、阿拉伯、印度及比利時等等，鄰近國家的隊伍興師動眾，人數十分眾多，而亞洲國家的隊伍大多僅一兩位導師帶隊。雖然人數不比對方，但我們對自己的團隊十分有信心。

很快地我們便開始著手組裝模型，並將組裝好的模型協力從沙灘上搬至海岸邊準備下水。而到了海岸邊，我們看到的是比平常更惡劣海況，相較前一天來場勘時惡劣許多，在碎波帶的浪況是水位在腰部而當浪打來時是會蓋過頭部的程度，這對每個隊伍的模型都是一個巨大的挑戰。本以為等待一下浪況就會漸漸好轉，但事實卻與想像的相悖，浪況反而逐漸嚴峻，所以我們六個人喊過聲：「123，成大加油！」之後，就決定放手一搏，下水！在佈設浮台的過程中，我們事先都有分工好每個人的工作，四個作為錨碇用的沙桶分別由四個人拿並抓取適當的距離定位，剩餘的兩人則是負責穩定浮台、風機以及下部的槓片掛載（圖 17）。

大家頂著風浪一步一步得朝海中前進，任由海浪的拍打才終於有驚無險得安裝完成，回到岸邊。這時觀察身旁的幾個隊伍，有的隊伍因為惡劣浪況，模型在海中解體了，有的隊伍甚至沒有下水安裝，而我們則是少數隊伍中有成功安裝並且成功在海上讓風機旋轉發電的隊伍（圖 18）。



圖 17 比賽現場進行模型安裝



圖 18 我們的風機平台在海上漂浮及發電情形

## 競賽結果

最後公布比賽的結果，我們獲得書面報告的第二名（圖 19）及實作安裝的第三名（圖 20）的佳績。這個結果遠遠超乎我們的預期。其實對於第一次來參賽的我們，最初給自己的設定目標就是將浮台成功安裝、風機能穩定的在海上發電，不要翻倒便大功告成，因為相較於其他歐洲國家的隊伍，我們模型需要經過長途運輸過程才能抵達荷蘭，所以模型的設計就較為受限，最後靠著模塊化的想法來克服運輸的困難，在評審視察組裝狀態時，不論對於我們的結構、下部掛載的設計、模塊化、以及浮台的選擇都有高度讚賞，能有這樣的成績每個人都功不可沒。



圖 19 比賽結果書面報告第二名



圖 20 比賽結果實作安裝第三名

## 結語

參加國際競賽對我們來說是一個難得且難忘的經歷。從接獲比賽資訊到預備階段，整個籌備過程充滿挑戰，但同時也讓我們團隊成員之間更加凝聚和成長。我們不僅為了比賽的規劃和設計做了充分的準備，更是在行前規劃的細節上下足了功夫。從初步的比賽會議開始，我們就展開了文獻探討和觀察商業化平台，希望能在了解整個領域的同時，增加我們設計的創新性。整個過程讓我們充分感受到了領域研究的重要性，也明白了深入了解背景知識對於設計的幫助。

面對融合多種元素及特點的離岸風機平台設計，我們深知理論上的驗證不能完全代替實體效果，於是我們著手進行平台的實驗，進行縮尺模擬，並進行不同方式的測試。在這個過程中，我們遇到了許多問題，但也正是這些問題讓我們不斷學習、調整，並找到最佳的解決方案。這種實踐的過程讓我們對於自己的設計更加有信心，也對於工程領域有了更深刻的體會。

在海上實際參賽場地和時間限制為我們帶來了新的挑戰，我們需要在限制內充分發揮，有效安排安裝流程和分工。讓我們學會了如何在壓力下保持冷靜和專注，以及在不熟悉的環境下應變突如其來的問題，更是深刻了解到團隊合作的重要性，團隊裡的任何一個人都是不可或缺的。

## 誌謝

能夠順利完此次離岸風機平台設計的競賽，我們要感謝楊瑞源教授研究室、成大水工試驗所、金屬中心，還有贊助廠商，在設計、製作、試驗及參賽過程中的各種支持，給予我們機會參賽和挑戰。

## 參考資料

1. Ma, K. T., Luo, Y., Kwan, C. T. T., and Wu, Y. (2019). Mooring system engineering for offshore structures. Gulf Professional Publishing.
2. Ghigo, A., Cottura, L., Caradonna, R., Bracco, G., and Mattiazzo, G. (2020). Platform optimization and cost analysis in a floating offshore wind farm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 835.
3. 康志堅 (2017)，浮體式離岸風電技術發展現況與未來展望，能源知識庫網頁，<https://km.twenergy.org.tw>。
4. Yang, Y., Bashir, M., Wang, J., Michailides, C., Loughney, S., Armin, M., and Li, C. (2020). Wind-wave coupling effects on the fatigue damage of tendons for a 10 MW multi-body floating wind turbine. *Ocean Engineering*, 217, 107909.
5. Chuang, T. C., Yang, W. H., and Yang, R. Y. (2021). Experimental and numerical study of a barge-type FOWT platform under wind and wave load. *Ocean Engineering*, 230, 109015. 



# 消波塊型地震超材料

## 設計及減震效果 模擬分析

王聖翔／國立成功大學土木工程研究所 碩士生

蘇于琪\*／國立成功大學土木工程研究所 副教授

目前地震工程的隔減震技術多針對單一建築進行加固與消能，例如加強結構的強度與韌性、在底部使用隔震支承、利用消能元件吸收震動能量等。近十年來，以波傳與複合材料角度切入的地震超材料 (Seismic Metamaterial, SM) 研究在國外逐漸興起，其特色在於地震超材料的減震不需接觸建築物本身，而在社區外圍建立屏障阻隔特定頻段的地震波，此方法對於具有大量老舊建築的台灣特別適用。因此，本文針對地震超材料的設計進行研究。文獻上現有的地震超材料多使用特殊的幾何與材料，常面臨昂貴成本導致實際應用的困難。本研究以常見的土木材料－混凝土、消波塊體、圓板與半球為元素，組合出新穎的消波塊型地震超材料，透過頻散分析與全域暫態模擬，驗證此設計對地震表面波的衰減效果。

關鍵詞：地震超材料、隔減震技術、消波塊、地震工程、暫態分析

### 研究背景

台灣位於環太平洋地震帶，每年都會發生數萬次地震<sup>[1]</sup>，過去數十載中也造成許多嚴重災害，如1999年集集大地震、2016年高雄美濃地震、2018年花蓮地震等，其產生的地表破裂、土壤液化、土木構造物損壞等，皆造成人民的生命安全威脅與經濟損失，因此如何減少地震造成的影響為一重要課題。地震波大致可分為體波 (Bulk Waves) 與表面波，表面波又為造成地震災害的主因。目前在土木工程中常見的隔減震技術如安裝側向支撐、被動式調質阻尼器 (Passive Tuned Mass Damper) 或主動式調質阻尼器 (Active Tuned Mass Damper) 等<sup>[2,3]</sup>，其原理在於增加土木結構物之側向勁度或是消能系統，然而這些設備皆必須安裝於土木構造物內部，對於某些老舊或是不易安裝的構造物有實行上的困難。

近十年來，學界發展一種新型的隔減震技術—地震超材料 (Seismic Metamaterial, SM)，其利用幾何結

構或是材料間的差異性，在不與結構物本身接觸的情況下，透過週期性排列的地震超材料包圍結構物，形成地震保護帶<sup>[4-6]</sup>。如圖1所示，若在欲保護的社區外圍圍一圈地震超材料，即藍色標示的地震保護帶，其可以不接觸建築物本體的方式，達到阻隔地震波的目標。目前各國的先進模擬與試驗，皆證實地震超材料可使地震波發生偏轉，或是由地震超材料吸收地震波的能量，具備成為新的隔減震技術之潛力。

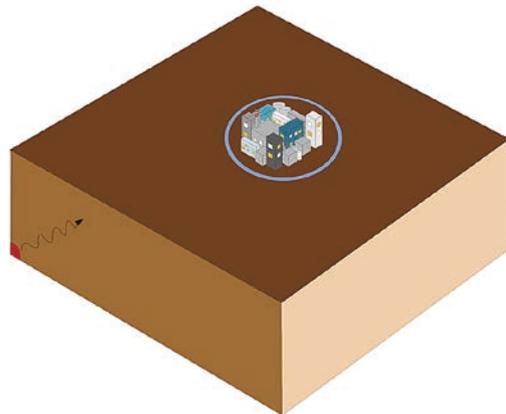


圖1 社區外圍圍一圈地震超材料 (藍色) 保護社區示意圖

\* 通訊作者，yuchisu@gs.ncku.edu.tw

## 地震超材料減震原理

地震超材料的減震原理為局部共振，即地震波在特定頻段內，通過局部共振器之共振，與主系統產生反向運動，降低主系統的動態響應，從而阻止地震波的傳播。其中地震波無法通過的頻段被稱為「帶隙 (Bandgap) [7]」。

此一局部共振器的概念，類似於台北 101 大樓的諧調質量阻尼器 (Tuned Mass Damper)，利用諧調阻尼器的局部共振，來降低主系統的反應。但地震超材料與協調阻尼器的不同在於地震超材料並不接觸建築結構本身，其主系統為土體，地震超材料本身為局部共振器，利用設計局部共振器，在欲保護的建築外圍設置地震保護屏障。也由於地震超材料不需接觸建築結構，其相較於諧調阻尼器的減震有四個優勢：(1) 地震超材料並不附著於主建築物，因此其質量大小並無限制，進而可達到相較諧調阻尼器更寬、更低頻的減震頻段。(2) 地震超材料設置於保護建築的外圍，維修與替換容易。(3) 地震超材料可針對老舊建築以非侵入的方式進行減震，相當適合在台灣發展。最後，(4) 地震超材料的保護對象不限於單一建築物，可保護一整個既有社區。

## 地震波的種類

若將地球整體視為一個巨大的球形固體，地震波可分為在固體中傳遞的體波 (Body Waves)，以及在固體表面傳遞的表面波 (Surface Waves)。依照質點運動方向與波傳方向的不同，體波可分為 P 波與 S 波。如圖 2 所示，P 波為固體上的質點運動方向與波傳方向平行，而 S 波為質點運動方向與波傳方向垂直。表面波亦分為質點運動方向在波傳垂直面的 Rayleigh 波，以及質點運動方向質點在波傳水平面的 Love 波。

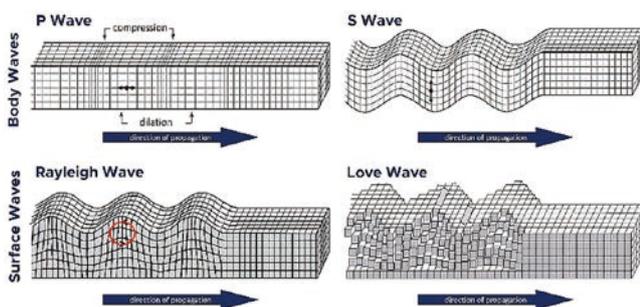


圖 2 地震波種類 [8]

若將地殼單獨取出分析，其可視為一個薄板，而在此薄板上傳遞的波，稱為板波。板波與體波、表面波的不同在於其有明顯的邊界效應。因此，在數值模擬時，若欲針對體波或表面波，建立模型時會採用足夠大的固體，甚至施加低反射邊界以去除邊界效應。但若欲模擬板波，模型則會使用足夠小的厚度，而使厚度方向形成駐波。依照質點運動的類型，板波又可分為 Lamb 波與 SH 波，如圖 3 所示，左邊與中間的圖為 Lamb 波，觀察此二圖板上下表面的質點，其運動方向為反對稱與對稱模態，此為 Lamb 波的兩種型式。而最右邊的圖為板的 SH 波。

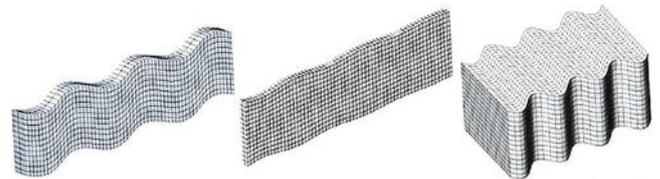


圖 3 Lamb 波 [9]

在地震超材料的研究中，多針對將地球整體視為一個固體的 Rayleigh 波，以及針對地殼的 Lamb 波作分析，尚未出現單一地震超材料即可阻隔所有地震波的設計。本研究亦專為阻隔 Rayleigh 波所提出的地震超材料設計。

Rayleigh 波由 P 波與 S 波互相干涉所產生，質點在地表垂直面上則呈現橢圓形震動。由於 Rayleigh 波具有低頻率、長波長、大振幅且不易隨著地表傳遞距離而衰減等特性，容易對於結構造成嚴重災害。為模擬 Rayleigh 波，我們施加  $z$  方向的面外點位移，另外，為使點位移產生的體波與 Rayleigh 波解耦，我們透過增加模型的深度以及拉長波源與接收點的位置，以確保傳播至接收點的波為 Rayleigh 波。

## 關於地震超材料的文獻回顧

地震超材料可分為四種類別 [10]：土壤設計型 (Seismic Soil Metamaterials)、埋入型共振器 (Buried Mass Resonators)、地上型共振器 (Above Surface Resonators) 以及拉脹材料 (Auxetic Materials)。事實上，類似地震超材料的波阻隔概念最早可追溯至 1970 年，Richart 等人 [11] 提出利用單排或多排的圓形孔洞阻擋地震波的構想。2011 年，Alagoz [12] 提出將聲子晶體尺寸放大至常見的土木工程材料尺寸，並以時域有限差分法模擬證實「帶隙」的存

在。2014年，Finocchio等人<sup>[13]</sup>提出以碗型結構內部放置質量塊的地震超材料設計，並將其埋入土壤。他們證實此設計產生的局部共振可形成等效負質量，進而達到衰減地震S波的效果。2015年，Yan等人<sup>[14]</sup>建立鋼筋混凝土包覆橡膠與鋼塊的單元，並以三維週期性排列成結構基礎，以有限元素分析證實其可有效衰減低頻率的P波與S波造成的地表結構加速度。

在2016年，Colombi等人<sup>[15,16]</sup>利用光學折射的原理提出從1 m到14 m高度漸增或是漸減的地震超材料設計，使地震表面波的波傳方向偏轉，轉而成為剪力波，並以原始森林為例，利用實驗與數值模擬驗證表面波轉換為剪力波的機制。同年，Miniaci等人<sup>[17]</sup>提出挖空十字的土壤設計型地震超材料，以及在土壤中埋入橡膠與混凝土圓柱的埋入型共振器，分別以不同的深度、圓柱半徑及材料係數，探討其對帶隙範圍的影響，並以Abaqus模擬暫態反應驗證衰減效果。同年，Palermo等人<sup>[18]</sup>提出在土壤中埋入混凝土空心圓柱，並於內部安置市售橡膠墊與鋼圓柱的埋入型共振器。藉由不同的材料參數進行數值模擬，他們驗證其設計可提供5~7 Hz的帶隙。他們亦將提出的地震超材料以三角形週期性排列組成一維陣列，以暫態模擬驗證其效果，發現其可衰減約60%的地表位移，並透過輸入5 Hz的簡諧波探討增加陣列數目對衰減率的影響。同年，Achaoui等人<sup>[19]</sup>提出利用橡膠連接半徑0.74 m的鋼球組成的1立方公尺正立方體單元，將其排列成三維週期性結構，並置於保護物基礎的下方，以數值模擬驗證其可提供8~49 Hz的帶隙。

在2017年，D'Alessandro等人<sup>[20]</sup>提出類簡支梁受集中載重的地震超材料設計。同年，Du等人<sup>[21]</sup>以空心圓鋼樁、空心方鋼樁及空心方鋼樁內部填充混凝土，以二維週期性排列分別埋入土壤中建立邊長10公尺、深度20公尺的單元，並由數值模擬驗證可阻擋8~20 Hz的Lamb波，並在頻域發現以80個單元組成的陣列可達有效衰減。同年，Achaoui等人<sup>[22]</sup>提出若將鋼製的地震超材料埋入土壤與打入岩盤中，可有效抵禦地震表面波，並提供起始於0 Hz的低頻寬帶隙。他們利用數值模擬驗證，若使用直徑1.2公尺、深度15公尺的鋼圓柱，以間距2公尺的正方形二維週期性排列埋入土壤，並打入深度5公尺的岩盤中，其可提供0~4.5 Hz的帶隙。此外，若將鋼的圓形斷面改為十字形，則可以提供0~26 Hz的帶隙。

在2018年，Zeng等人<sup>[23]</sup>提出了於土壤表面放置I型鋼柱的地表共振器地震超材料，藉由數值模擬驗證其設計可以有效阻擋地震表面波，並提供6.2~8.2 Hz及10.7~13.0 Hz的帶隙。同年，Du等人<sup>[24]</sup>提出在土壤表面放置H型鋼的地上型共振器，並以H型鋼為基礎在翼板處向外連接較小的H型鋼，以數值模擬驗證其可以提供0.35~0.6 Hz及6.8~12.0 Hz的帶隙。同年，Cheng與Shi<sup>[25]</sup>提出在建築物的基礎加入垂直向與水平向的週期性局部共振器地震超材料，發現其設計除可以有效抵禦表面波，亦能大幅減少保護物的垂直及水平向位移。藉由輸入簡諧波與地震歷時加速度，以數值模擬探討加入地震超材料後，對建築物的垂直及水平加速度的衰減。同年，Pu與Shi<sup>[26]</sup>探討中國上海當地分層土壤的參數對地震超材料的影響，指出表面波的傳遞主要由第一層土壤控制。他們亦以常見的土木材料所構成的圓樁埋入分層土壤中，並個別對埋入深度、圓樁半徑、波源距離、單元晶格的長寬比進行參數分析，發現當長寬比增加時，帶隙有上限會降低；圓樁半徑增加時，帶隙上限會增高；埋入深度增加則衰減程度會增加，但會趨於平緩；波源距離對衰減程度無明顯效果。

在2019年，Chen等人<sup>[27]</sup>提出將圓鋼樁打入楊氏係數比為1:20:400，且厚度皆為2公尺的分層土壤中，發現楊氏係數較大的土壤可以與鋼柱互相約束，進而使帶隙的頻率下降。同年，Zeng等人<sup>[28]</sup>將橡膠包覆鋼樁埋入土壤中，並分別以Lamb波與Rayleigh波進行數值模擬。結果發現當以邊長1.5公尺、深度4.5公尺的橡膠包覆邊長1.35公尺、深度4.2公尺的鋼樁，其可阻擋3.5~10 Hz的Lamb波及Rayleigh波。同年，Muhammad等人<sup>[29]</sup>提出利用I型鋼樁互相垂直交疊與在翼板處加厚的設計理念，以數值模擬分析將地震超材料在放置單一土壤與分層土壤表面的帶隙差異。結果發現，分層土壤的帶隙相對於單一土壤可以提供較大的帶寬。他們也在時域上輸入簡諧波，驗證帶隙內的地震波經過此地震超材料後，表面位移衰減超過50%。同年，Muhammad與Lim<sup>[30]</sup>提出以兩片鋼板夾住橡膠墊的局部共振地震超材料，並嵌入薄混凝土中的地震超材料設計。他們發現帶隙可由布拉格散射產生的擬帶隙(Pseudo Badgap)，以及由局部共振產生的完全帶隙組成。2020年，李冠慧等人<sup>[31]</sup>針對921地震提出對應相對高頻與低頻地震的地震超材料單元結構，並以有限元

素分析評估其在帶隙頻率的減震效益。Zeng 等人<sup>[32]</sup>以俄羅斯娃娃的概念，提出最外層為空心鋼圓柱，往內交互包覆同心橡膠圓柱及鋼圓柱，並放置土壤表面的地上型共振器。根據數值模擬，當交互層數增加時帶隙有下降的趨勢，其中三層阻擋 5.29 ~ 6.95 Hz、7.12 ~ 10.80 Hz 及 10.90 ~ 13.10 Hz 的 Rayleigh 波。

在 2021 年，Huang 等人<sup>[33]</sup>提出將拉脹材料包覆空心鋼柱的 Lamb 波地震超材料設計。模擬結果發現，若以長寬 10 公尺、深度 20 公尺的拉脹材料包覆長寬 8.5 公尺的空心鋼柱，其可提供 0.515 ~ 6.070 Hz 的帶隙。同年，Li 等人<sup>[34]</sup>提出以矩形、T 形及 I 形對 Z 軸旋轉一圈的地震超材料，並埋入土壤中且與矩形斷面的地震超材料進行比較。在 Rayleigh 波的模擬中，矩形的旋轉地震超材料相對於無旋轉的帶隙頻率有很明顯的下降，且帶寬也有增加的趨勢；在 Lamb 波的模擬中，若將地震超材料旋轉一圈，則帶隙也有下降的趨勢。在時域方面，以五層矩形旋轉地震超材料包覆測量點，並輸入地震歷時資料，其中可以衰減超過 50% 的地表加速度，頻域上帶隙內振幅也有很明顯的衰減。同年，Zhang 等人<sup>[35]</sup>提出在土壤中埋入十字形、矩形的鋼柱地震超材料，分別探討實心與空心對帶隙的影響。在數值模擬中以無限域分析地震超材料模型，並週期性條件模擬地震超材料對 Lamb 波的帶隙。根據數值結果，帶隙是由布拉格散射所產生，且對於兩種幾何實心地震超材料，可以提供較大範圍的帶寬與較低頻的帶隙。

在 2022 年，Amanat 等人<sup>[36]</sup>在圓柱混凝土的基礎上，提出埋入方形空心混凝土樁的地震超材料，並指出在相同體積下，該地震超材料藉由提升剪切變形的勁度，不僅可保留圓柱形地震超材料將 Rayleigh 波（第一、三模態）轉至體波的性能，也可以將 Love 波（第二、四模態）轉至體波，進而提升帶隙的範圍。在數值模擬中，方形空心混凝土地震超材料可以提供 20 Hz 以下的帶隙，但對於 3 Hz 以下的超低頻震動無法提供較好的減震效果，不過可以藉由增加地震超材料數目，或是增加的埋入深度提升衰減率。同年，Maheshwari 與 Rajagopal<sup>[37]</sup>提出在土壤埋入深度 2.5 公尺的圓鋼樁，且在深度 2.5 公尺處向下埋入厚度 0.5 公尺的混凝土塊，利用混凝土塊與土壤之產生互制，形成類似將樁打入岩盤中的效果，使 Rayleigh 波轉至體波，藉此產生零頻帶隙。在數值模擬中，分別以正方形晶格、蜂巢晶格及六角形晶格的週期性條件模擬地

震超材料，其中六角形晶格可以提供 0 ~ 1.15 Hz 的帶隙。此外，三者皆可以將 20 Hz 以下的 Rayleigh 波轉至體波。同年，Su 與 Wu<sup>[38]</sup>提出雪人型地震超材料設計，指出其相比於文獻上表現最好的單一材料的地上型共振器 - T 型地震超材料，雪人的幾何形狀能產生更低頻的帶隙。在 2023 年，Su 與 Wang<sup>[39]</sup>設計容易製作的 V 型與 N 型地震超材料，並使用高度漸增的方式拓寬地震超材料的帶隙。

## 研究目的

目前地震超材料設計普遍採用特殊的幾何與材料達到期望的低頻帶隙，在實際量產與維護上可能稍有困難。因此本文以常見的土木材料、元件以及簡單的幾何為基礎，提出了新穎的地震超材料設計。

## 地震超材料模型

圖 4 為本研究提出之消波塊型地震超材料單元，其由一個消波塊以及嵌上半徑 0.3 公尺半球的圓板組成，圓板的厚度為 0.3 公尺，半徑 0.9 公尺。

圖中灰色區域為混凝土材料，質量密度為 2,500 kg/m<sup>3</sup>，楊氏係數 30 GPa，蒲松比 0.25，咖啡色部分為土壤，質量密度設為 1,800 kg/m<sup>3</sup>，楊氏係數 20 MPa，蒲松比 0.3。地震超材料單元的尺寸列於表 1。

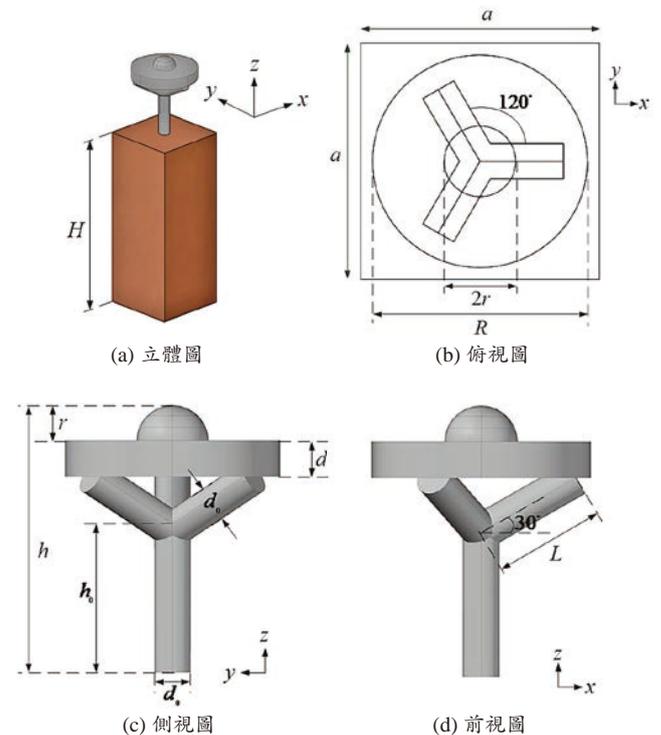


圖 4 本研究提出的消波塊地震超材料模型

表 1 本研究提出的消波塊地震超材料模型尺寸表

$a$	2 m
$d$	0.3 m
$d_0$	0.3 m
$h$	2.25 m
$h_0$	1.2 m
$H$	100 m
$L$	0.9 m
$r$	0.3 m
$R$	0.9 m

### 頻散圖與對應之振動模態

我們將地震超材料模擬正方晶格的排列進行週期性的配置，根據 Bloch 定理<sup>[40]</sup>，頻散分析時可取一最小不重複單元，並於其周圍施加週期性邊界。二維週期性結構的掃頻範圍可應用布里淵區<sup>[41]</sup>，將掃頻路徑簡化為  $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ ，如圖 5 所示，即可求得頻散圖。我們利用有限元素法軟體 COMSOL Multiphysics 進行上述頻散分析，其網格資料列於表 2。

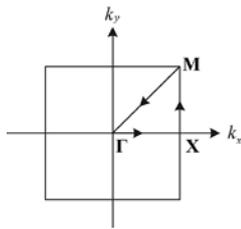


圖 5 掃頻路徑：最簡布里淵區

表 2 頻散分析網格資料

最大元素尺寸	最小元素尺寸	最大元素成長率	曲率因子	狹區解析度
2.52	0.0225	1.3	0.25	0.9

圖 6 為頻散分析後的結果。由於本研究專注於表面波，體波不在探討範圍內，因此，我們利用 Sound cone<sup>[42]</sup> 將體波部分以藍色區域蓋住。頻散圖中有兩個低頻帶隙：0.58 ~ 1.26 Hz 與 8.30 ~ 10.66 Hz，可用於阻隔地震的表面波。為探討帶隙產生的原因，圖 7 顯示頻散圖中每條通帶（Passing Band）對應的共振模態。

圖 7 中的模態 A 為左右傾倒，模態 B 為前後傾倒，由於模型的對稱性，左右與前後傾倒的自然振動頻率重合，造成模態 A 與 B 的頻散曲線完全重合。模態 C 為上下伸縮；模態 D 為收縮膨脹與旋轉模態的耦合；模態 E 與 F 為基座在不同方向的擺盪；模態 G 為淺層土壤振動。在阻隔地震表面波的帶隙中，第一帶隙由模型的傾倒與上下伸縮模態的頻率差所產生：0.58

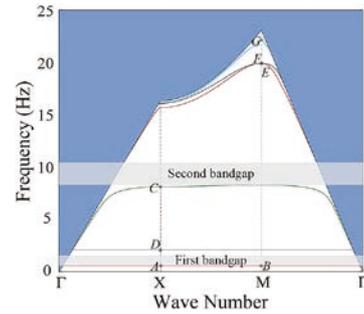


圖 6 頻散圖

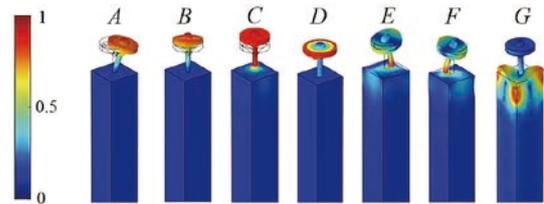


圖 7 頻散圖對應之共振模態

~ 1.26 Hz，第二帶隙則由模型的上下伸縮與基座擺盪的頻率差產生：8.30 ~ 10.66 Hz。

### 全域暫態模擬

由於頻散圖的計算原理是將無限多個地震超材料單元以週期性排列的方式得出，而實際應用上使用的地震超材料單元數目為有限個，因此，藉由以下的暫態模擬，我們可探討有限個地震超材料單元對波傳的影響。我們先建立暫態全域模型，並使用由頻散圖得出的帶隙，轉換成特定函數作為波源函數輸入至模型中，分別以無地震超材料模型與有地震超材料模型進行暫態模擬，以驗證帶隙的存在與其對於波傳能量的衰減效果。

我們利用兩個高斯波包函數（Gaussian Wave Packet）組合做為位移點波源的輸入函數，調整參數使其頻域內含恰為消波塊型地震超材料的兩個帶隙區間：

$$u(t) = e^{-\left(\frac{t-t_{s1}}{t_1}\right)^2} \sin(2\pi f_1(t-t_{s1})) + e^{-\left(\frac{t-t_{s2}}{t_2}\right)^2} \sin(2\pi f_2(t-t_{s2}))$$

其中， $t_{s1} = 6.52 \text{ sec}$ ， $t_1 = 2.5 \text{ sec}$ ， $f_1 = 0.92 \text{ Hz}$ ， $t_{s2} = 6.86 \text{ sec}$ ， $t_2 = 0.5 \text{ sec}$ ， $f_2 = 9.48 \text{ Hz}$ 。

圖 8 顯示此位移點波源的時域與頻域反應。圖 8(a) 含有兩個高斯波包函數，主導波型的為中心頻率在  $f_1 = 0.92 \text{ Hz}$  的高斯波包函數，而中央顏色較深的高頻部分，為中心頻率在  $f_2 = 9.48 \text{ Hz}$  的高斯波包函數所造成。圖 8(b) 為圖 8(a) 經由快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform）轉至頻率域的結果。由圖可觀察此輸入函數除了在兩個頻段有值之外，其他的頻域反應

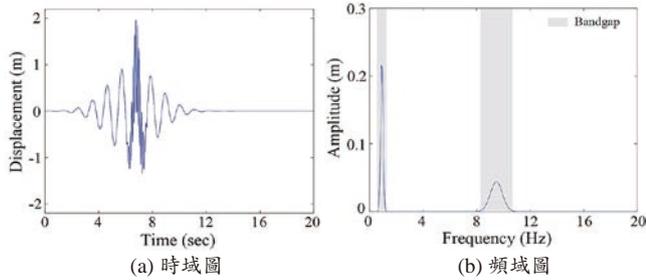


圖 8 點位移輸入函數

幾乎為零。此兩頻率範圍恰為消波塊型地震超材料的帶隙區間。圖 8(b) 的灰色區間為圖 6 的頻散分析求得之帶隙區間：0.58 ~ 1.26 Hz 及 8.30 ~ 10.66 Hz。

圖 9 為本研究建立的暫態全域模型，其中，土壤長度為 100 m、寬度 20 m、深度 100 m，其深度確保波傳可將 Rayleigh 波與 Lamb 波區隔。我們將消波塊型地震超材料單元以 5 列 10 行的正方晶格排列，並使用圖 8(a) 的波源函數以點位移的方式在表面進行垂直向振動，使表面波往各方向傳遞。點波源設定距離地震超材料陣列 56 m 處，其距離可確保陣列的局部共振由表面波產生，而接收點則設置在陣列後方 4 m 處。接著，為了避免反射波影響結果，在模型底部與四邊設為低反射邊界，並將暫態模擬時間設置為 20 sec，時間步階則設置為 0.001 sec，網格切割資訊如表 3。最後由 COMSOL Multiphysics 提供的隱式廣義 alpha 進行數值積分<sup>[43]</sup>。

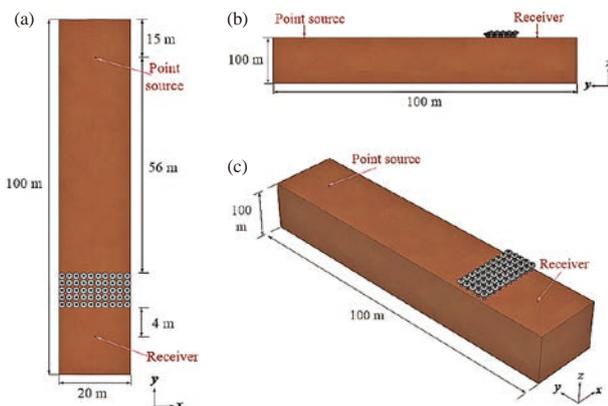


圖 9 全域暫態模型：(a) 俯視圖、(b) 側視圖、(c) 立體圖

表 3 暫態分析網格資訊

最大元素尺寸	最小元素尺寸	最大元素成長率	曲率因子	狹區解析度
4	0.07	1.4	0.1	1

圖 10(a) 為由 COMSOL Multiphysics 進行全域暫態模擬後，由接收點獲取 z 方向位移值的結果。圖 10(b) 為以圖 10(a) 之數值由快速傅立葉轉換所得之頻域資料。從時域圖可以看出相對於無超材料，有超材料的

接收點 z 方向位移有很明顯的衰減。無超材料時，時域的 z 方向位移最大值為 4.6 mm，加入 5 列的地震超材料後，z 方向位移最大值變為 2.5 mm，衰減值達 45.22%。須注意由於此衰減值會隨著地震超材料擺放的排數增多而增加，若欲達到更多的地震波衰減，可增加擺放的地震超材料數量，然而，增加超材料的擺放數量亦會需要更多的空間作為代價。我們由圖 10(b) 的頻域響應也可發現表面波的振幅在帶隙範圍內有明顯的衰減，驗證實消波塊型地震超材料可阻擋 0.58 ~ 1.26 Hz 與 8.30 ~ 10.66 Hz 的表面波。其中，由於 0.58 ~ 1.26 Hz 的地震表面波波長較長，衰減效果並不明顯，此現象可透過增加地震超材料的數量改善。

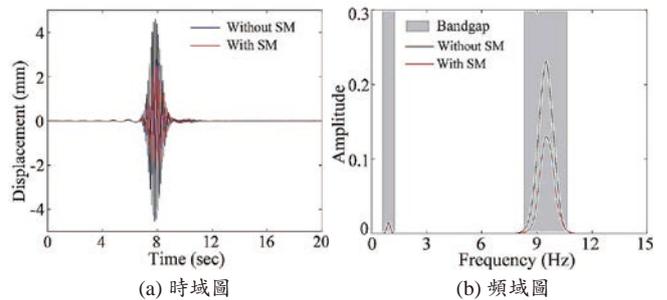


圖 10 暫態模擬結果

## 結論

本研究應用超材料局部共振時可阻擋特定頻率的概念，發展土木規模的消波塊型地震超材料。此地震超材料設計以常見的消波塊為主體，於其上加入圓板與半圓球，達成阻隔低頻地震波的目的。由於所有製作的材料均為混凝土，相較於現有文獻的地震超材料設計，消波塊型地震超材料在成本上較為廉價，具備市場競爭力。本研究利用有限元素模擬分析阻隔地震波的帶隙區間，其中第一帶隙由模型的傾倒與上下伸縮模態的自然頻率差所產生：0.58 ~ 1.26 Hz，第二帶隙由模型的上下伸縮與基座擺盪的自然頻率差產生：8.30 ~ 10.66 Hz。藉由全域暫態分析，我們驗證消波塊型地震超材料能夠阻擋 0.58 ~ 1.26 Hz 和 8.30 ~ 10.66 Hz 的地震表面波。

本研究提出的地震超材料設計使用有限元素法進行分析，未來預計先進行縮尺模型實驗，驗證其波衰減效果，再進行全尺寸的現地試驗，以期將地震超材料的研究推展至實務面，與現有的地震工程隔減震技術相互補足。

## 誌謝

本研究承蒙科技部 112 年度「地震超材料結構的隔減振屏蔽：理論架構、數值模擬及實驗」地震超材料

的設計與分析」研究計畫惠予補助，計畫編號：MOST 110-2221-E-006 -056 -MY3，特此申謝。

## 參考文獻

- 中央氣象局地震測報中心網站 <https://scweb.cwb.gov.tw/zh-TW/Guidance/FAQdetail/55> (last visited 2023/8/14).
- Li, J., Zhang, H., Chen, S., and Zhu, D., "Optimization and sensitivity of TMD parameters for mitigating bridge maximum vibration response under moving forces," *Structures*, Vol. 28, pp. 512-520 (2020).
- Chen, Z., Fang, H., Han, Z. and Sun, S., "Influence of bridge-based designed TMD on running trains," *Journal of Vibration and Control*, Vol. 25, pp. 182-193 (2019).
- 蘇于琪、汪向榮、張文忠、林子剛、林正洪、吳東諭、張國鎮、陳東陽，「地震超材料的隔減震技術」，*結構工程期刊*，第三十七卷，第三期，第 66-80 頁 (2022)。
- Qahtan, A.S., Huang, J., Amran, M., Qader, D. N., and Fediuk, R., "Seismic composite metamaterial: a review," *Journal of Composites Science*, Vol. 6, pp. 348 (2022).
- Holliman Jr, J.E., Schaeff, H.T., McGrail, B.P., and Miller, Q.R., "Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications," *Materials Advances*, Vol. 3, pp. 8390-8406 (2022).
- Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y., Yang, Z., Chan, C.T., and Sheng, P., "Locally resonant sonic materials," *Science*, Vol. 289, pp. 1734-1736 (2000).
- Wikipedia: seismic wave. [https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Seismic_wave) (last visited 2023/8/14).
- The guided wave innovation company: plates and shells. <http://www.gwultrasonics.com/knowledge/plateshell/> (last visited 2023/8/14).
- Brülé, S., Enoch, S., and Guenneau, S., "Emergence of seismic metamaterials: current state and future perspectives," *Physics Letter A*, Vol. 384, pp. 126034 (2019).
- Richart, F.E., Hall, F.J.R., and Woods, R.D., "Vibrations of soils and foundations," Prentice-Hall (1970).
- Alagoz, B.B. and Alagoz, S., "Towards earthquake shields: a numerical investigation of earthquake shielding with seismic crystals," *Open Journal of Acoustics*, Vol. 1, pp. 63-69 (2011).
- Finocchio, G., Casablanc, O., Ricciardi, G., Alibrandi, U., Garesci, F., Chiappini, M., and Azzeroni, B., "Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators," *Applied Physics Letters*, Vol. 104, pp. 191903 (2014).
- Yan, Y., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., and Shi, Z., "Three dimensional periodic foundations for base seismic isolation," *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 075006 (2015).
- Colombi, A., Colquitt, D., Roux, P., Guenneau, S., and Craster, R.V., "A seismic metamaterial: the resonant metawedge," *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 27717 (2016).
- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., and Craster, R.V., "Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances," *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 1-7 (2016).
- Miniaci, M., Krushynska, A., Borgia, F., and Pugno, N.M., "Large scale mechanical metamaterials as seismic shields," *Journal of Physics*, Vol. 18, pp. 083041 (2016).
- Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A., and Daraio, C., "Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves," *Scientific Report*, Vol. 6, pp. 1-10 (2016).
- Achaoui, Y., Ungureanu, B., Enoch, S., Brülé, S., and Guenneau, S., "Seismic waves damping with arrays of inertial resonators," *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 8, pp. 30-37 (2016).
- D'Alessandro, L., Belloni, E., Ardito, R., Braghin, F., and Corigliano, A., "Mechanical low frequency filter via modes separation in 3D periodic structures," *Applied Physics Letters*, Vol. 111, pp. 231902 (2017).
- Du, Q., Zeng, Y., Huang, G., and Yang, H., "Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves," *AIP Advances*, Vol. 7, pp. 075015 (2017).
- Achaoui, Y., Antonakakis, T., Brülé, S., Craster, R.V., Enoch, S., and Guenneau, S., "Clamped seismic metamaterials: ultra low frequency stop bands," *New Journal of Physics*, Vol. 19, pp. 063022 (2017).
- Zeng, Y., Xu, Y., Deng, K., Zeng, Z., Yang, H., Muzamil, M., Du, Q., "Low-frequency broadband seismic metamaterial using I-shaped pillars in a half-space," *Journal of Applied Physics*, Vol. 123, pp. 214901 (2018).
- Du, Q., Zeng, Y., Xu, Y., Yang, H., and Zeng, Z., "H-fractal seismic metamaterial with broadband low-frequency bandgaps," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 51, pp. 105104 (2018).
- Cheng, Z.B. and Shi, Z.F., "Composite periodic foundation and its application for seismic isolation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 47, pp. 925-944 (2018).
- Pu, X. and Shi, Z., "Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils," *Construction and Building Materials*, Vol. 180, pp. 177-187 (2018).
- Chen, Y., Qian, F., Scarpa, F., Zuo, L., and Zhuang, X., "Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps," *Materials & Design*, Vol. 175, pp. 107813 (2019).
- Zeng, Y., Xu, Y., Deng, K., Peng, P., Yang, H., Muzamil, M., and Du, Q., "A broadband seismic metamaterial plate with simple structure and easy realization," *Journal of Applied Physics*, Vol. 125, pp. 224901 (2019).
- Muhammad, Lim, C.W., and Reddy, J.N., "Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium," *Engineering Structures*, Vol. 188, pp. 440-451 (2019).
- Muhammad and Lim, C.W., "Elastic waves propagation in thin plate metamaterials and evidence of low frequency pseudo and local resonance bandgaps," *Physics Letters A*, Vol. 383, pp. 2789-2796 (2019).
- 李冠慧、汪向榮、蘇于琪、游忠翰、張國鎮、陳東陽，「地震超材料設計之減震分析及效益評估」，*中國土木水利工程學刊*，第三十二卷第七期，第 597-607 頁 (2020)。
- Zeng, Y., Xu, Y., Yang, H., Muzamil, M., Xu, R., Deng, K., Peng, P., and Du, Q., "A Matryoshka-like seismic metamaterial with wide band-gap characteristics," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 185, pp. 334-341 (2020).
- Huang, T.T., Ren, X., Zeng, Y., Zhang, Y., Luo, C., Zhang, X.Y., and Xie, Y.M., "Based on auxetic foam: A novel type of seismic metamaterial for Lamb waves," *Engineering Structures*, Vol. 246, pp. 112976 (2021).
- Li, L., Jia, Q., Tong, M., Li, P., and Zhang, X., "Radial seismic metamaterials with ultra-low frequency broadband characteristics," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, pp. 505104 (2021).
- Zhang, K., Luo, J., Hong, F., and Deng, Z., "Seismic metamaterials with cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps," *Engineering Structures*, Vol. 232, pp. 111870 (2021).
- Amanat, S., Rafiee-Dehkharghani, R., Bitaraf, M., and Bansal, D., "Analytical and numerical investigation of finite and infinite periodic lattices for mitigation of seismic waves in layered grounds," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 173, pp. 103655 (2022).
- Maheshwari, H.K. and Rajagopal, P., "Novel locally resonant and widely scalable seismic metamaterials for broadband mitigation of disturbances in the very low frequency range of 0-33 Hz," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 161, pp. 107409 (2022).
- Su, Y.C. and Wu, C.K., "A snowman-like seismic metamaterial," *Journal of Applied Physics*, Vol. 132, pp. 105106 (2022).
- Su, Y.C. and Wang, S.S., "Gradient V-Shaped and N-Shaped seismic metamaterials," *Materials*, Vol. 16, pp. 3074 (2023).
- Bloch, F., "Über die quantenmechanik der elektronen in kristallgittern," *Zeitschrift für Physik*, Vol. 52, pp. 555-600 (1929).
- Brillouin, L., "Wave propagation in periodic structures," Dover Publications (2003).
- Khelif, A., Achaoui, Y., Benchabane, S., Laude, V., and Aoubiza, B., "Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface," *Physical Review B*, Vol. 81, pp. 214303 (2010).
- COMSOL, BDF, Generalized Alpha, and Runge-Kutta Methods. <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1062> (Last visited 2023/7/7).



# 即時淹水範圍評估模式的開發與應用

## Development and Application of Real-time Flood Inundation-Area Assessment Model

李自強 / 國立成功大學防災研究中心 助理研究員  
 李心平 / 國立成功大學防災研究中心 副主任  
 詹錢登\* / 國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

台灣地區受到氣候變遷的影響，極端降雨事件頻傳，降雨強度與 / 或累積雨量均較以往劇烈，並常造成嚴重的坡地災害及淹水災情。災害應變期間如能切實掌握災害的點位、規模、影響範圍等資訊，將有助於災害決策的分析與救災資源的調度，減低災害可能的損失。本篇文章說明我們在經濟部水利署經費支持下所開發的即時淹水範圍評估模式及其應用情形。當從災情通報獲取積淹水位置後，可以透過此淹水評估模式即時評估出該處附近的淹水範圍、淹水深度及可能受到淹水影響的住戶，如搭配淹水感測器則可得到淹水範圍時序列資料。此模式採用洪水填充法，模式評估結果的準確性與淹水分析網格有密切之關係，適宜的淹水分析網格才會有好的分析結果。此模式實際應用的經驗反映，後續需要善加利用淹水感測器的即時資訊、以及掌握最新數值地形圖及土地利用變遷資料，即時更新淹水分析網格，以提升淹水範圍的評估結果。

### ABSTRACT

Taiwan is being affected by climate change, with frequent occurrences of extreme rainfall events. The intensity and/or accumulated rainfall during these events are more severe than in the past, often leading to serious slopeland disasters and flooding. During disaster response, if the information regarding the location, scale, and scope of the disaster can be effectively grasped, it will aid in the analysis of disaster management decisions and the allocation of rescue resources, thereby reducing potential losses from disasters. This article explains the real-time flood extent assessment model that we have developed with the support of funding from the Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. When inundation locations are obtained from disaster reports, this flood assessment model can promptly evaluate the nearby flood extent, water depth, and potentially affected residents. When combined with flood sensors, it can provide temporal sequence data of flood extents. The model employs a flood-fill method, and the accuracy of the

assessment results closely depends to the flood analysis grid. A suitable flood analysis grid is essential for obtaining accurate analysis results. The practical application experience of this model reflects the need to make good use of real-time information from flood sensors and to keep abreast of the latest digital elevation maps and land use change data. By updating the flood analysis grid in real-time, the assessment results of flood extents can be enhanced.

### 前言

#### 降雨特性與積淹水災情

臺灣四周環海，地勢陡峭，百分之七十的面積為海拔高於 100 公尺的山區，地處於海洋與陸地之間，橫跨熱帶及亞熱帶，造就天氣的複雜性及多元性。夏天除了梅雨鋒面還有西南季風，帶來潮濕溫暖的氣流；冬天有東北季風，帶來寒潮和雨量；除了季風，還有從太平洋生成的颱風，登陸或從旁經過台灣，這些多元的氣候特

\* 通訊作者，cdjan@mail.ncku.edu.tw

色為台灣帶來每年約 2,500 mm 的降雨量，大約是世界各國平均值的 3 倍，部分山區的年雨量甚至可達 5,000 mm 以上。台灣雖然降雨豐富，但降雨空間與時間分布並不平均，大部分降雨集中於每年 5 月至 10 月之間，受到梅雨鋒面、颱風侵襲或是西南氣流的影響，常帶來高強度長延時的特大豪雨，或是短延時高強度的強降雨。這些豐沛的雨量常造成嚴重的淹水災害及坡地土砂災害。

這幾年受到氣候變遷的影響，極端降雨事件愈趨頻繁。例如民國 106 年的 0601 豪雨事件（降雨期間 6 月 1 日至 5 日），豪雨主因為梅雨鋒面滯留於臺灣上方數日，且西南氣流於此時增強並影響。此豪雨事件降雨期間（106 年 6 月 1 日至 5 日）造成臺北、新北、彰化、雲林等有許多地區的最大時雨量高於 100 mm，日雨量（24 小時雨量）大於 600 mm，有 15 個雨量站測得的此豪雨事件累積降雨量高於 1,000 mm，其中高雄市桃源區南天池雨量站測得最大累積雨量達 1,446 mm。就降雨重現期距而言，此降雨事件是超過 200 年一遇的降雨事件。此次降雨遠超過都市及非都市排水系統的設計保護標準，在基隆市等 12 縣市內共造成 1,181 處積淹水災情<sup>[1]</sup>。

再以民國 107 年 0823 豪雨事件為例，它是熱帶低壓帶來的水災，8 月 23 日台灣海峽南部熱帶低壓北移進入屏東東港，經由彰化鹿港出海，再加上連續數天（8 月 27 至 29 日）西南氣流增強，造成臺灣西南部之劇烈降雨。此近 10 天的豪雨事件（8 月 22 日至 31 日）在嘉義、臺南、高雄、屏東等縣市降下豪大雨（圖 1），有 10 處測站測得時雨量超過 100 mm，有 15 處測站測得日雨量（24 小時雨量）超過 700 mm，有 30 處測站測得累積雨量超過 1,000 mm，其中屏東縣春日鄉土文測站測得最大累積雨量達 1,415 mm。此超大降雨遠超過排水系統的負荷能力，導致多處淹水災情；另在嘉義、台南沿海區地勢低窪區域又適逢大潮，積淹水問題更為嚴重。此豪雨事件在台南市等 9 縣市內共造成 1,572 處積淹水災情<sup>[1]</sup>。

前述案例是屬於高強度長延時降雨事件，接著要說明的案例是民國 107 年 0908 豪雨事件，它是屬於是短延時高強度的降雨事件。受到鋒面過境的影響，大台北地區在民國 107 年在 9 月 8 日及 9 日發生短延時高強度的極端降雨事件。整場事件最劇烈的降雨發生在 8 日傍晚，大台北地區許多的雨量站測得時雨量高於 90 mm，其中台北市挹翠雨量站測得最大時雨量達 130.5 mm，新北市五指山雨量站測得最大時雨量達 106 mm，基隆雨量站測得最大時雨量達 93.5 mm。此 0908 豪雨是來得又急又快的降雨事件，它的日雨量不算太大（8 日及 9 日的最大日雨量分別小於 350 mm 及 500 mm），但是時雨量特別大，已經超過台北市下水道排水設計標準 78.8 mm，使得雨水無法順利從排水溝到中排出，溢流出溝道造成 259 處積淹水事件，其中台北市 200 處為最多，積淹水以台北市信義區、大安區、中正區、新北市永和區及基隆市最為嚴重<sup>[2]</sup>。受到氣候變遷的影響，這類短延時高強度的降雨事件及其導致的積淹水事件愈趨頻繁。

交通部中央氣象局為了讓大家了解所在地方發生不同等級雨量時，可能出現的天氣現象及災情，期能提高大家對災害的警覺性，按照規模大小將降雨現象分成大雨、豪雨、大豪雨及超大豪雨四個級別。(1) 大雨：24 小時累積雨量達 80 mm 以上，或時雨量達 40 mm 以上之降雨現象；(2) 豪雨：24 小時累積雨量達 200 mm 以上，或 3 小時累積雨量達 100 mm 以上之降雨現象；(3) 大豪雨：24 小時累積雨量達 350 mm 以上，或 3 小時累積雨量達 200 mm 以上之降雨現象；(4) 超大豪雨：24 小時累積雨量達 500 mm 以上之降雨現象。依據交通部中央氣象局及經濟部水利署相關資料，我們彙整及統計台灣地區近十年豪雨以上的降雨事件次數及其曾經導致積淹水事件的次數，如圖 2 所示，豪雨以上的降雨事件次數介於 33 至 71 之間，積淹水事件的次數介於 11 至 35 之間。近年積淹水事件有增加的趨勢。

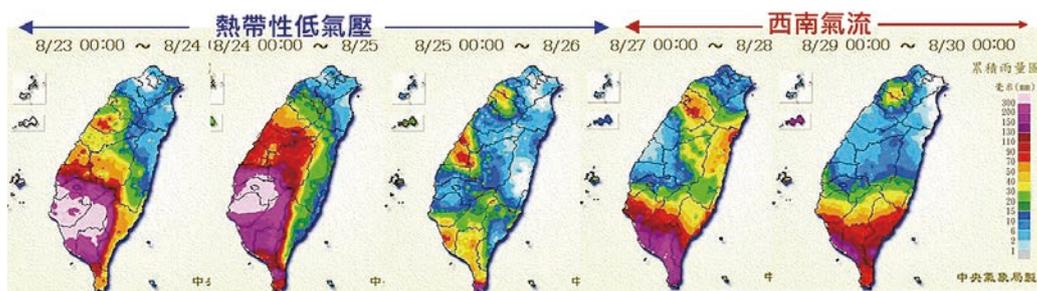


圖 1 民國 107 年 0823 豪雨事件降雨期間全台灣日雨量分布情形，前階段的降雨（8 月 22 ~ 26 日）主要是熱帶低氣壓所致，後階段的降雨（8 月 27 ~ 31 日）主要是西南氣流帶來的雨量。（資料來源：中央氣象局、國家災害防救科技中心）

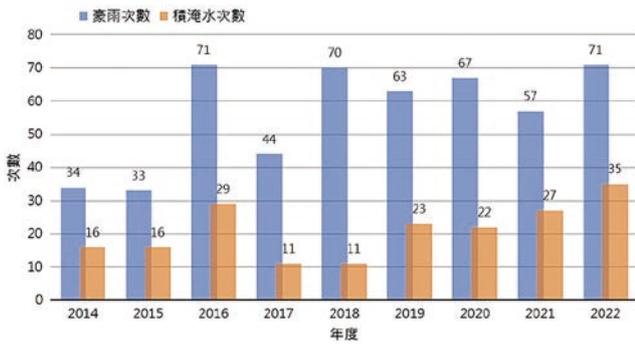


圖 2 台灣地區近十年歷年豪雨以上降雨事件及其曾經導致積淹水事件的統計分析

### 淹水範圍評估與防救災應變

由前述說明可知豪雨或強降雨發生比以往頻繁，所帶來的積淹水災害也愈趨嚴重，災中若能即時掌握可能淹水影響範圍，將有助於決策判斷及防減災資源調度，以避免或減少災害的人員生命或財物的損失。降雨事件在空間上及時間上具有高度的不確定性，再加上地形特性及排水能力的差異，積淹水災害的發生時間及地點距有相當高的不確定性。在空間上積淹水災害可能發生在某個小區域、或是多個區域、或是遍及全臺；在時間上積淹水災害發生的時間可能相同或相近、或是有段時間的差異。在災害應變期間受災資料的蒐集及即時分析、災後災情的統計分析及現地勘查，皆需在短時間內動員大量的人力與物力資源<sup>[3]</sup>。然而，面對人力與物力資源有限及人員安全考量，不容易做好災中災情的即時評估及災後受災的完整調查。因此，如何利用現代先進技術來快速且有效掌握積淹水地點及其規模是非常重要的<sup>[4,5]</sup>。快速且有效掌握積淹水災情不但可以作為防災應變決策及資源調度之參考，也可以作為災後災情統計分析及災後現地調查規劃之重要依據。

已經有許多學者使用水文及水理模式再配合地文條件及相關邊界條件來進行淹水模擬分析<sup>[3-8]</sup>。例如，楊偉甫等人<sup>[3]</sup>以自行開發的地文性淹水-排水模式模擬八掌溪以南堤防至曾文溪以北堤防範圍內於颱風豪雨事件下之淹水情形。何明錦<sup>[7]</sup>的研究團隊以自行研發的數值水理模式，考慮地表逕流、河道渠流、雨水下水道等多種不同流況，模擬台北市洪水事件下之淹水情形。李欣輯等人<sup>[6]</sup>以曾文溪流域為示範區域，使用商用軟體 SOBEK 水理分析程式來模擬極端降雨事件

下曾文溪流域淹水情形，並使用國家災害防救科技中心（NCDR）颱風災損評估系統（TLAS）來評估淹水可能造成損失。前述這些淹水模擬都可以得到合理的模擬結果，但是需要比較詳細的地文資料及相關土地利用資料，而且需要比較多的演算時間，因此他們比較適合災前的情境分析或是災後的模擬分析，但是不適合災中的即時分析。

災害應變期間無論以現地調查或是查通報回傳之災情資訊，僅能反映出災害發生時間、災害發生地點和災害發生程度等訊息，若要再進一步瞭解災害影響範圍，常需花費較長作業時間以人工作業處理後方能完成。為了掌握災害應變期間防減災作為的時效性，期望能夠即時從災情通報或災情監測（如人工通報或是淹水感測器回報）的災情點資料，用比較簡單快速的方法，來快速掌握災情面資料（積淹水的範圍），以協助防減災決策者的防減災判斷及資源調度。本文將介紹我們在經濟部水利署水利防災中心支持下開發出來的「即時淹水範圍評估模式」及其應用情形。此淹水範圍評估模式的主要目的是由淹水災情通報點資料，快速透過模式即時評估出淹水災害影響範圍，作為後續防救災資源調度的參考依據（圖 3）。由淹水範圍評估模所得的淹水位置、水深及範圍資訊，可即時協助抽水機的妥善調度，於最短時間內減除積水；亦可作為淹水災害戶數的評估手段，協助評估後續救援人力物力等防救災資源及經費與災後淹水救助評估之參考。

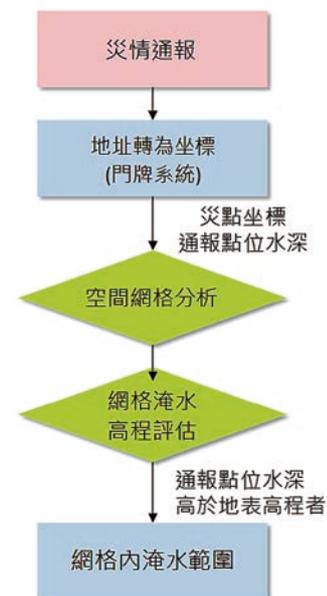


圖 3 即時淹水範圍評估模式分析流程圖

## 淹水範圍評估模式

### 即時淹水範圍評估模式之基本原理

為了簡化演算過程與演算時間，本研究即時淹水範圍評估模式不是使用完整的水理模式求解，而是利用淹水處的高程及水深與其鄰近土地的關係來建立簡單快速的評估模式。此模式使用洪水填充（Flood Fill）演算法，由已知某位置點的淹水水位，以水往低處流的基本原理，直接讓水向鄰近較低的位置點流去。水流向鄰近位置點的處理方式可分為四路演算法（不考慮對角線方向）和八路演算法（考慮對角線方向）兩大類。使用此方法先要有高解析度的數值地形高程圖，考量分析範圍內地形、地貌、道路、水系及相關水工設施等要素，建置適宜大小的淹水分析網格，標記每個分析網格的中心點座標與高程。

當已知某位置點的淹水水位時，如圖 4 所示，不考慮流動時間及速度，直接以洪水填充方式，將洪水水位攤給鄰近較低高程的網格點，而取得淹水範圍及對應之淹水深度。假設淹水通報點的高程為 18 m，通報淹水深度為 0.9 m，淹水通報點的水位高程為 18.9 m，淹水通報點鄰近高程小於 18.9 m 的淹水分析網格都被視為淹水區。洪水填充法的分析網格沒有需要固定形狀，可以是三角形網格、四角形網格或是多邊形網格。

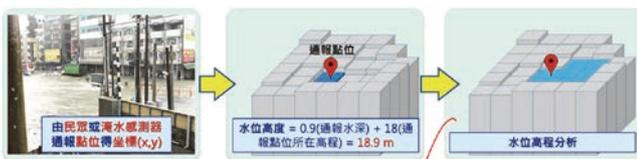


圖 4 洪水填充法推估淹水範圍示意圖。將已知點的淹水水位直接攤給鄰近較低高程的網格以獲取淹水範圍及對應的淹水深度。

### 淹水分析網格的建置

本研究以 5 m 解析度數值地形高程圖（DEM）來建置淹水分析網格，初步先依據地形、地貌、道路街廓、土地利用等特性進行劃分，後續再根據堤防、水系、水利設施、坡地、畸零區域等進行細部調整，必要時進行現地勘查以掌握微地形之特殊變化，以建置合理的淹水分析網格，如圖 5 所示。同一個淹水分析網格內的高程及水位是一樣的。

很顯然，洪水填充演算法的準確性取決於淹水分析網格的合理性，好的淹水分析網格才会有好的分析結果。以下說明幾項淹水分析網格的編修處理方式：



圖 5 淹水分析網格的建置及依地形地貌特徵進行網格修訂示意圖

### 道路與堤防的修正

將原先初步按照 5m-DEM 建置的淹水分析格網，與道路、堤防及水系等圖籍進行套疊，必要時進行細分或調整原先的淹水分析網格。淹水分析網格與堤防線套疊後，進行網格修訂，若遇到道路、堤防及水系等圖籍不完整時，配合運用 5m-DEM 生成的 Hillshade 陰影圖與衛星影像或航照等遙測影像，以人工方式協助判斷道路、堤防及水系的位置，必要時進行分析網格的修正，如圖 6 所示。

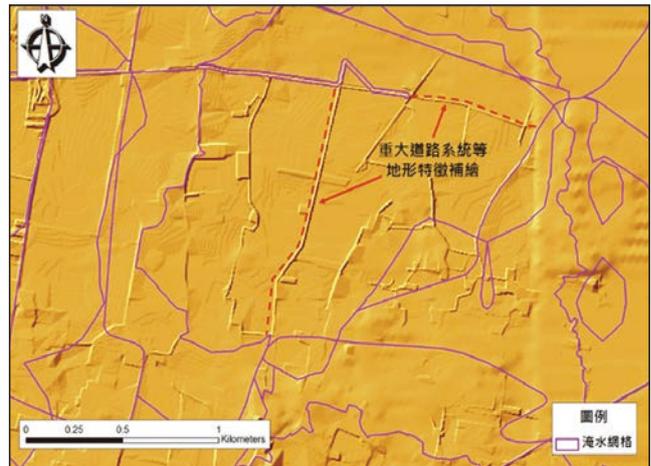


圖 6 初步建置的淹水分析網格與 DEM 陰影圖套疊協助判斷道路、堤防及水系的位置，必要時進行分析網格的修正。

### 平緩區高程差的控制

在坡度較平緩的地區，淹水分析鄰近網格間的高程差，以不大於 2 m 為原則（最好在 1 m 以下），以避免出現淹水分析網格過大的情形。過大的分析網格容易出現淹水範圍高估的情形。調整方式是將原先初步判定的淹水網格與該區域的等高線圖進行套疊，若發現鄰近往隔間的高程差有大於 2 m 的情形，則進一步配合 GIS 操作工具細分淹水分析網格，避免分析網格出現過大的情形。圖 7 為初步建置的淹水分析網格與等高線圖套疊進行網格修訂。

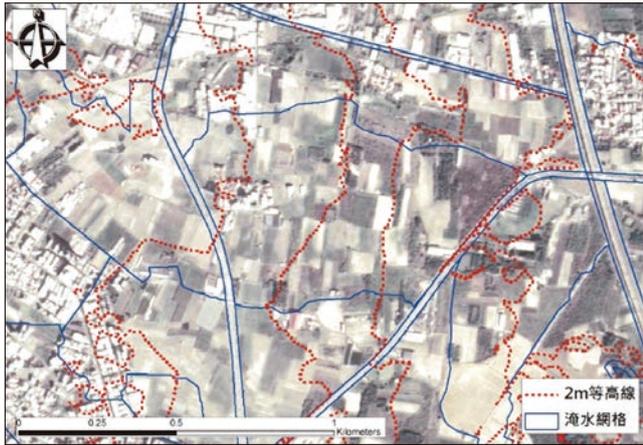


圖 7 淹水分析網格與等高線圖套疊以人工檢視方式進行修訂

### 台地與其鄰近坡面的區隔

為有效反應出丘陵地附近淹水的情形，需要掌握台地與其鄰近坡面之邊界，然而目前 GIS 套疊方式無法自動分出台地與坡面之邊界，因此目前以坡度分析方式計算各淹水網格之坡度分布狀況，再檢視各網格坡度分布比例，判斷各網格是否同時具有台地與坡面地形，然後再人工方式進行修正。處理方式先以數值高程 DEM 產製坡度圖，再和淹水分析網格套疊（圖 8），分析各淹水網格內的坡度比例，若單一淹水網格內一級坡比例與其他級坡比例相當，代表該淹水網格內同時具有台地及坡面之特性（同時具有平緩區及坡面區），則需再以衛星影像或 DEM 資料為輔助去判斷平緩區與坡面區之邊界，再以人工方式編修淹水分析網格（圖 9）。

### 分析網格過大或土地利用迥異的修正

檢視所建置的淹水分析網格，若出現有網格過大或土地利用迥異的情形，需進一步將淹水分析網格與

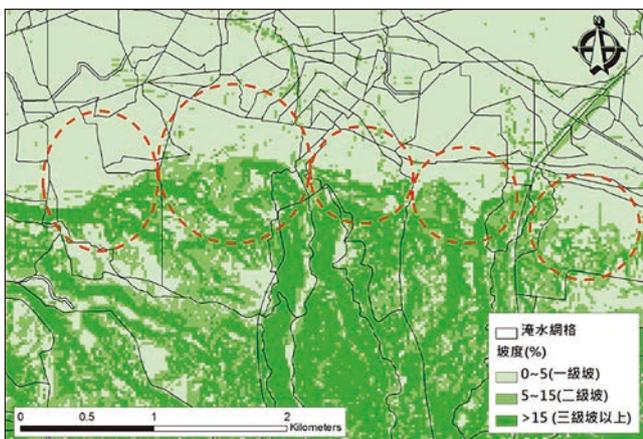


圖 8 淹水分析網格與坡度分布圖套疊以人工檢視方式進行網格修訂

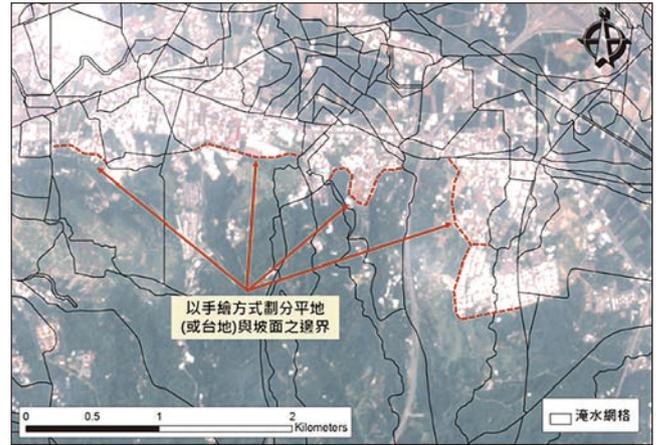


圖 9 以衛星影像為輔助判斷平緩區與坡面區邊界再以人工方式編修淹水分析網格

衛星影像及土地利用等圖資進行套疊，再依循地表特性以人工編修方式細分或調整淹水分析網格。如圖 10 所示，原先淹水分析網格中有部分網格過大且包含兩種迥異土地利用（住宅與農作）的情形，可運用遙測影像以人工編修方式細分或調整淹水分析網格。

圖 11 是雲林縣口湖鄉港東村附近的淹水分析案例，港東村海天宮設有 1 支淹水感測器，該淹水感測器在民國 109 年有 6 次淹水通報記錄（通報最大淹水深度為 18 cm），按原先淹水分析網格進行分析結果，如圖 11（左圖）所示，有大面積的淹水區域，但是這與實際的淹水狀態不符合，實際上淹水僅侷限於淹水感測器附近的小區域內。經調查了解，原先淹水分析網格有過大且包含兩種迥異土地利用（聚落、魚塢與田地）的情形，感測器所處位置正是聚落中的局部低窪處。使用空拍影像圖將原先淹水分析網格進行細分修正，使用空拍影像圖將聚落區和魚塢與田地區區隔出來，以避免高估淹水範圍，或誤將魚塢與田地視



圖 10 運用衛星影像以人工檢視方式進行淹水分析網格的編修

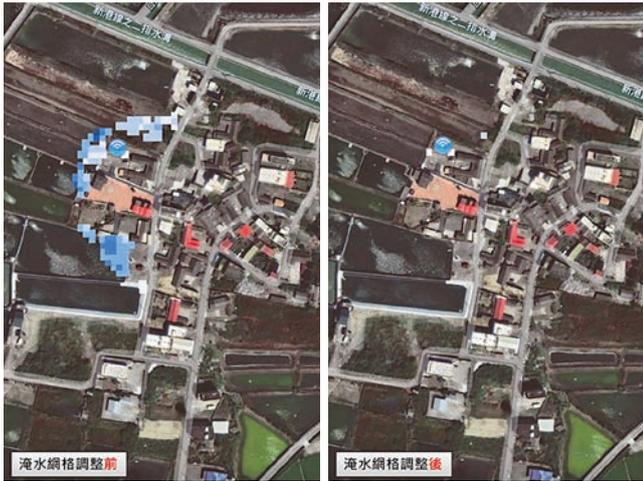


圖 11 口湖鄉港東村附近淹水分析網格調整前(左圖)及調整後(右圖)淹水範圍評估結果之比較。左圖顯示淹水範圍有高估情形，右圖合理反映出淹水區域落於該聚落的局部低窪處。

為需要關注的淹水區域。淹水分析網格經過妥善調整後，重新以通報淹水深度 18 cm 進行淹水影響範圍分析，可合理反映出淹水區域落於該聚落的局部低窪區域，如圖 11 (右圖) 所示，不再將淹水區域涵蓋到旁邊農田及魚塢區內。

### 淹水範圍評估模式的驗證

依據我們執行水災災情蒐集服務團計畫的經驗 [8-13]，即時淹水範圍評估模式的產出結果的驗證，除了參考媒體披露的實際淹水範圍，主要是以水利署河川局或縣市政府水利單位的淹水調查資料為依據進行淹水範圍的比較。即時淹水範圍評估模式的運作是結合了數值地形高程、門牌系統資料庫與淹水網格，為使該模式產出淹水位置、淹水範圍、淹水深度及受淹水影響戶數能夠合理反應實際淹水情形，需定期檢視數值地形高程、門牌系統資料、排水系統、土地利用等異動，必要時進行淹水分析網格的調整。圖 12 說明即時淹水範圍評估模式分析結果與實際淹水比對的檢核流程。

依據我們的經驗，模式淹水範圍評估結果與實際淹水範圍發生差異較大的原因主要可以歸納出下列幾點原因：(1) 淹水通報災害點位的正確性：包括淹水深度資訊正確性、災點定位正確性、通報災點數量是否足夠等因素，其中通報災點數量與搭配的淹水網格大小是否適當有關；(2) 災後淹水調查資料無法滿足比對需求：淹水調查報告所提供調查範圍與通報災點並非為同一區，以致於無法進一步比較；(3) 淹水分析網格

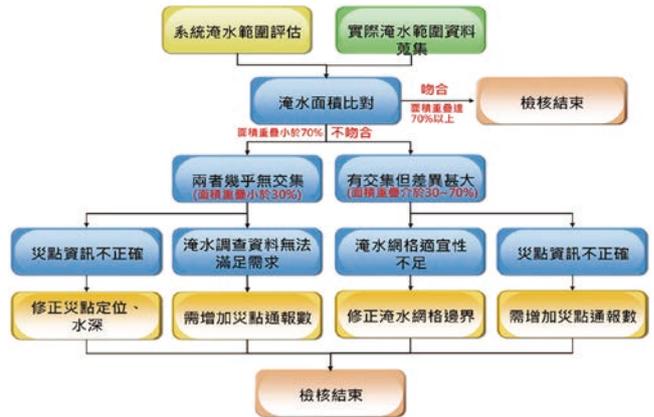


圖 12 即時淹水範圍評估模式產出與實際淹水範圍的檢核流程

之適宜性不足：淹水分析網格的邊界判斷要注意，若網格涵蓋到坡地、農田、魚塢等地勢低窪區，容易發生淹水範圍高估的情形。淹水評估模式產出與實際淹水範圍出現較大差異時，屬原因 1 之差異，則需提升各單位淹水災情通報的精準度；屬原因 2 之差異，則須進一步透過現地查核或淹水補償戶資料來比對；屬原因 3 之差異，則可透過淹水網格之調整來使評估結果更加精確 [9-15]。

### 模式應用案例與成效分析

#### 民國 107 年 0823 豪雨事件

民國 107 年 8 月 22 日至 31 日熱帶低壓及西南氣流帶來的豪雨 (0823 豪雨) 事件為例，8 月 23 日台灣海峽南部熱帶低壓北移進入屏東東港，經由彰化鹿港出海，再加上連續數天增強，造成臺灣西南部之劇烈降雨。近 10 天大量降雨造成台灣各地許多的積淹水事件及坡地災害，總計曾積淹水處所高達 1,544 處，造成 6 人死亡、148 人受傷，其中淹水情況最嚴重的地區為嘉義縣、臺南市及高雄市 [16-18]。我們以其中臺南市仁德區及新營區的積淹水事件為例，進行淹水範圍評估模式產出與實際淹水範圍的檢核，實際淹水範圍調查資料取自水利署第六河川局的提送報告。

圖 13 為臺南仁德交流道附近仁德里和裕聖里的淹水範圍推估結果，圖中內容標記淹水通報災點、淹水推估範圍、淹水調查範圍及淹水救助戶。仁德里可分成兩區塊 ZONE 1 和 ZONE 2，其中 ZONE 1 為南邊鄰近中正路一帶，ZONE 2 則為北邊裕義路一帶，這兩區塊的模式推估淹水範圍略小於河川局的實際調查淹水範圍，推估吻合率分別為 76% 及 83% (表 1)。在仁德區北邊裕聖里模式推估淹水範圍偏低，推估吻合率約只有



圖 13 民國 107 年 0823 豪雨事件臺南市仁德區之模式評估淹水範圍與淹水調查範圍之比較

表 1 民國 107 年 0823 豪雨事件臺南市推估淹水範圍與實際調查淹水範圍之比較

行政區	模式評估淹水範圍 (ha)	淹水調查範圍 (ha)	吻合率 (%)
仁德區仁德里 (1)	5.9	7.8	76
仁德區仁德里 (2)	3.5	4.2	83
仁德區裕聖里	1.3	3.6	36
新營區護鎮里	42.0	27.7	100
新營區忠政里	31.8	19.5	100
新營區王公里	22.3	22.8	98
新營區新東里	2.8	10.0	28

36%。新營區淹水範圍檢核區域包含護鎮里、忠政里、王公里和新東里等處，淹水範圍評估模式產出與實際淹水範圍的比對如圖 14 所示。表 1 中呈現各區淹水範圍評估模式產出與實際淹水範圍的吻合程度，其中仁德區裕聖里及新營區新東里這兩區的模式推估淹水範圍偏低一些，可能是此區的淹水通報資料較少的原因。

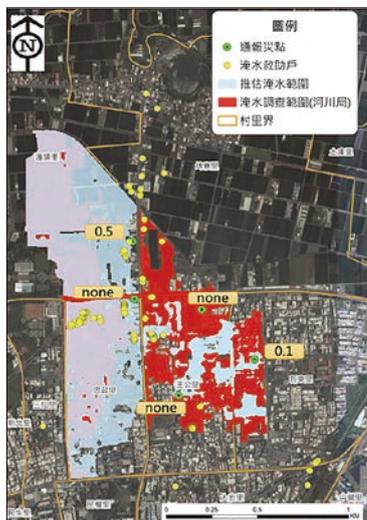


圖 14 民國 107 年 0823 豪雨事件臺南市新營區模式推估淹水範圍與淹水調查範圍之比較

## 民國 110 年 0604 豪雨事件

民國 110 年 6 月 4 日台灣北部地區受梅雨鋒面與彩雲颱風引進西南氣流影響，當天下午發生短延時強降雨事件。臺北市大安、信義、文山、南港、內湖及松山等 6 區的最大時雨量超過 100 mm (表 2)，其中大安、信義及文山區出現三小時累積雨量高於 200 mm 的情形，超過臺北市雨水下水道排水能力 (時雨量 78.8 mm)，造成排水系統不及宣洩，出現多處積淹水事件。臺北市全市計有 277 戶積淹水，深度超過 100 公分計有 55 戶、50 至 100 公分有 28 戶，主要集中在信義及大安區 [19]。此次降雨事件在雙北市的市區道路出現多處積淹水及交通阻斷災情，例如新北市板橋區漢生東路 (圖 15)、臺北市信義區在松山文創園區 (圖 16) 及吳興街 (圖 17) 都有道路積淹水災情。

表 2 民國 110 年 0604 豪雨事件臺北市時雨量高於 100 mm 的行政區雨量統計表

行政區 / 雨量站	最大 1 小時雨量 (mm)	最大 3 小時雨量 (mm)
大安區 / 福州山	137.5	2050
信義區 / 挹翠山莊	129.5	203.0
文山區 / 文山	116.0	202.0
南港區 / 舊庄國小	109.5	178.5
內湖區 / 潭美國小	106.0	173.0
松山區 / 松山	101.5	188.5



圖 15 民國 110 年 0604 豪雨事件新北市板橋區漢生東路附近積淹水情形



圖 16 民國 110 年 0604 豪雨事件臺北市信義區松山文創園區附近積淹水情形



圖 17 民國 110 年 0604 豪雨事件臺北市信義區吳興街附近積淹水情形



圖 19 民國 110 年 0604 豪雨事件臺南市麻豆區南 57 線高速公路涵洞附近積淹水情形

民國 110 年 0604 豪雨事件後，緊接著受鋒面南移的影響，南部地區 6 月 6 日清晨起雷雨不斷，出現短延時、強降雨的極端降雨事件；高雄市大寮測站最大時雨量高達 127.5 mm，前鎮區最大時雨量達 108.0 mm，造成市區多處積淹水災情傳出。例如，高雄市三民區澄清路近文鳳路口一帶，該路口處所處位置低窪，是積淹水的熱區，設有淹水感測器，雖然淹水推估範圍與現地調查範圍不一致，但根據蒐集媒體報導照片也證實路口確實有發生積淹水（圖 18）。圖 19 及圖 20 分別呈現臺南市麻豆區南 57 線高速公路下涵洞附近及雲林縣西螺鎮福來路 8 巷附近的積淹水情形，此兩處模式推估的淹水影響範圍與調查範圍大致相符。



圖 20 民國 110 年 0604 豪雨事件雲林縣西螺鎮福來路 8 巷附近積淹水情形



圖 18 民國 110 年 0604 豪雨事件高雄市三民區澄清路附近積淹水情形

### 結論與建議

本研究的即時淹水範圍評估模式以淹水分析網格為基礎，用災點通報淹水資訊，以洪水填充方式，能夠即時推估出淹水範圍及淹水深度的資訊，有助於防災應變期間即時掌握淹水災害範圍。實際應用經驗

反映出有民眾災情通報位置不夠精確造成淹水範圍評估的誤差，淹水感測器的妥善布置可以避免災點通報資訊不正確的問題。在實務應用上災點通報可以淹水感測器通報為主，以民眾的通報為輔，提升淹水範圍評估的正確性，如配合淹水感測器除可得到更精確的淹水範圍外還可產製淹水範圍時序列資料提供淹水動態資訊。很顯然，本研究即時淹水範圍評估模式準確性取決於淹水分析網格的合理性，好的淹水分析網格才會有好的分析結果。為了精進提升淹水範圍評估結果，後續需要持續與實際淹水資料比對檢視淹水分析網格的妥善性、善加利用淹水感測器的量測資料來提升淹水範圍的評估結果、以及掌握最新數值地形圖及土地利用變遷資料即時更新淹水分析網格。反之，即時淹水範圍評估模式的結果也可以作為淹水調查位置及調查範圍之參考，以取得正確的實際淹水資料，或著用以協助判斷淹水調查位置及範圍是否有到位。

### 誌謝

本研究承蒙經濟部水利署水利防災中心連續多年委託計畫的經費支持，特此致謝。

### 參考文獻

1. 經濟部水利署水利災害應變學習中心網頁 (<https://llc.wcdr.ntu.edu.tw>)。
2. 黃紹欽、朱容練、陳淡容、余宜強、吳宜昭、吳佳純 (2018)，台灣極端天氣事件回顧與分析，行政院國家災害防救科技中心研究成果報告。
3. 楊偉甫、張國強、鄭欽韓、蔡長泰、羅偉誠 (2008)，地文性淹水 - 排水模式應用於颱風豪雨事件之研究，經濟部水利署，水利，第 18 期，第 3-16 頁。
4. 張哲豪 (2019)，提升即時淹水模擬效能之研究，經濟部水利署水利規劃試驗所委託研究報告。
5. 楊鈞宏、陳偉柏、張子瑩、蘇文瑞 (2021)，虛擬實境技術於淹水模擬應用—以寶來溪為例，土木水利，第 48 卷第 5 期，第 54-59 頁。
6. 李欣輯、魏曉萍、劉俊志、楊昇學、葉克家、黃熾蓁 (2013)，極端降雨事件之淹水模擬分析與損失評估，國家災害防救科技中心。
7. 何明錦 (2012)，洪災事件下都市防災系統應用研究 - 淹水潛勢模擬分析，內政部建築研究所協同研究報告。
8. 羅偉誠 (2018)，極端降雨引致都市洪水即時預警模式與減災調適技術整合應用研究，內政部建築研究所委託研究成果報告。
9. 經濟部水利署 (2016)，105 年水災災情蒐集服務團計畫，國立成功大學。
10. 經濟部水利署 (2017)，106 年水災災情蒐集服務團計畫，執行單位國立成功大學。
11. 經濟部水利署 (2018)，107 年水災災情蒐集服務團計畫，執行單位國立成功大學。
12. 經濟部水利署 (2019)，108 年水災災情蒐集服務團計畫，執行單位國立成功大學。
13. 經濟部水利署 (2020)，109 年水利署災害應變服務計畫，執行單位國立臺灣大學及國立成功大學。
14. 經濟部水利署 (2021)，水災災情資訊整合與複合積淹水預警指標研擬與應用，執行單位國立成功大學。
15. 經濟部水利署 (2022)，多元水災災情資訊整合與應用，執行單位國立成功大學。
16. 經濟部水利署 (2018)，0823 熱帶低氣壓豪雨淹水檢討報告。
17. 臺北市政府消防局 (2018)，0823 熱帶低壓水災災害應變處置作為暨災後檢討報告 (<https://www-ws.gov.taipei/Download>)。
18. 國家災害科技防救中心 (2019)，2018 年 0823 豪雨災害事件報告 (NCDR 107-T06)。
19. 臺北市災害防救辦公室 (2021)，0604 水災臺北市應變處置作為暨災後檢討報告 (<https://www-ws.gov.taipei/Download>)。



## 50 周年系列活動報導 — 112 年 6 月 20 日 ~ 26 日 國際交流 MACE ANNUAL MEETING 2023



宋理事長發表演講



蒙古理事長致贈感謝狀



世曦蔣啟恆資協演講



全體大合照



圓桌論壇各國代表大合照



# 應用 Hyper KANAKO 模式 模擬建物對土石流溢淹之影響 — 以臺東縣紅葉村為例

## Application of Hyper KANAKO Model to Simulate the Influences of Buildings on Debris-Flow Flooding— A Case Study in Hongye Village, Taitung County

許汶芳 / 國立成功大學水利及海洋工程學系 碩士

詹錢登\* / 國立成功大學水利及海洋工程學系 特聘教授

本研究使用 Hyper KANAKO 模式，以紅葉村土石流潛勢溪流（東縣 DF166）為模擬對象，探討流路上建物阻擋對土石流溢淹範圍之影響。考量土石流規模、流路上建物存在與否及建物排列形式等不同條件，分成四種方案進行模擬。方案一以 2016 年莫蘭蒂颱風土石流出流量為輸入條件進行模擬，並將模擬結果與實際土石流溢淹情形進行比對；方案二與三是按土石流流出量與集水區面積關係設定出四種不同土石流可能流出量，模擬無建物（方案二）及有建物（方案三）在此四種不同流出量條件下的溢淹情形；方案四在兩種土石流流出量及四種不同建物排列（三角形排列、倒三角形排列、長矩形排列與寬矩形排列）條件下，探討建物排列形式對於土石流溢淹範圍之影響。方案一的模擬主要用於參數率定及模式驗證，結果顯示土石流溢淹情形的模擬結果與實際狀況約有 80% 的吻合率，顯示 Hyper KANAKO 模式具有良好的模擬效果。由方案二與三的模擬結果，可知流路上建物的存在會阻礙土石流的流動，迫使土石流往橫向流動並擴大溢淹範圍。方案四的模擬結果則顯示建物排列形式會影響溢淹範圍，尤其是前段建物的阻擋效應會影響到後續土石流流動方向及溢淹範圍。

關鍵字：土石流、Hyper KANAKO 模式、建物阻擋、溢淹範圍

### ABSTRACT

This study utilizes the Hyper KANAKO model to investigate the impact of buildings obstructing debris flow paths on inundation areas, using a debris-flow-prone stream in Hongye Village (Taitung DF166) as the simulation target. Four simulation scenarios were conducted under various conditions, including debris flow scale, the presence of buildings along the flow path, and building arrangement configurations. Scenario 1 simulates the debris flow caused by

Morakot Typhoon in 2016, compared with the actual debris-flow inundation situation. Scenarios 2 and 3 consider four different debris flow discharges, based on the relationship between debris-flow total volume and its corresponding watershed area. These scenarios simulate inundation situations without buildings (Scenario 2) and with buildings (Scenario 3) for these four discharge levels. In Scenario 4, simulations are conducted for two debris flow discharge levels and four different building arrangements to investigate the impact of building arrangements on the debris flow inundation. The outcomes of the Scenario 1 show an approximately 80% agreement between the simulated and actual debris flow

\* 通訊作者，cjl an@mail.ncku.edu.tw

inundation areas, demonstrating the effective capability of the Hyper KANAKO model in debris flow simulation. Results from the Scenarios 2 and 3 simulations suggest that the presence of buildings along the flow path obstructs debris flow, compelling it to move laterally and expand inundation area. Results from the Scenario 4 simulation reveal that building arrangements significantly affect the extent of inundation, especially the obstructive effect of upstream buildings impacting the subsequent direction of debris flow and inundation area.

Keywords: Debris flow, Hyper KANAKO model, Buildings obstruction, Inundation areas

## 前言

在 2016 年 9 月莫蘭蒂颱風 (Typhoon Meranti) 侵襲台灣期間，臺灣東部降下超大豪雨，最大總累積雨量及最大 24 小時累積雨量均發生於屏東縣泰武鄉西大武山雨量站，分別為 86.5 mm 及 800.5 mm<sup>[1,2]</sup>。莫蘭蒂颱風帶來的高強度豪雨導致發生一些坡地土砂災害及淹水災情，其中台東縣延平鄉紅葉村部落上方發生崩塌，引發土石流，對紅葉村造成嚴重的災害衝擊，村內建物遭大量土砂堆積與掩埋。事後災害調查發現，土石流流動受到流路上建築物的阻擋，有改變流動方向及溢淹範圍的情形。

本研究考量土石流規模、流路上建物存在與否及建物排列形式等不同條件，以紅葉村土石流潛勢溪流 (東縣 DF166) 為例，使用 Hyper KANAKO 模式，探討流路上建物阻擋對土石流溢淹範圍之影響。一般文獻有過說明土石流對於流路上建物的衝擊與破壞<sup>[3,4]</sup>，但是鮮少文獻提到有關土石流流路上建築物阻擋對土石流流動方向及溢淹範圍的影響。Hyper KANAKO 開發者發表的文章中提到當土石流衝擊房屋時，會有擴散溢淹及土砂常在房屋之間堆積的現象<sup>[5]</sup>。本文利用 Hyper KANAKO 模式針對實際災害及假設多種建物排列方式進行土石流模擬，藉此了解此模式於紅葉村集水區受建物影響之土石流流動特性及可能溢淹範圍，以統整出不規則排列 (實際建物) 及不同排列形式之建物對土石流溢淹之影響，期望模擬結果對土石流防災工作之推動具有正面價值，並可供日後評估區域內設有建物時受災風險之參考，提高土石流區域事前災害預防作業之效能。

## 研究區域

本研究區域紅葉村集水區位於臺東縣延平鄉紅葉村之東部地區 (圖 1)。紅葉村位於延平鄉西南部山

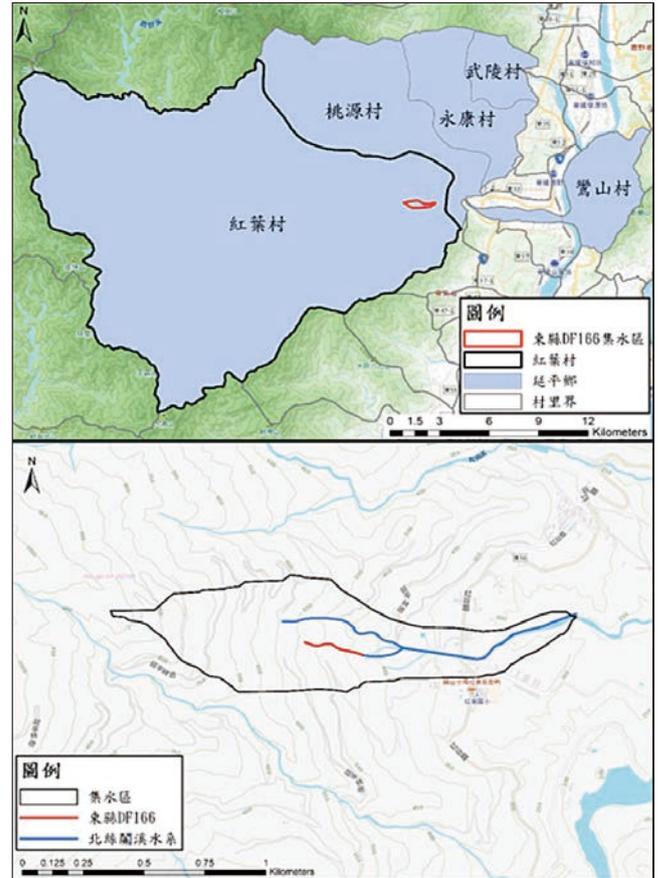


圖 1 台東縣紅葉村及東縣 DF166 集水區地理位置圖

區，占地約 328.2 平方公里，約為延平鄉土地面積之 68.3%，村內多為山地地形。本研究以 2016 年紅葉村土石流為模擬對象，其災害溪流原發生於紅葉村及紅葉國小西端上游處之蝕溝，此蝕溝受 2016 年莫蘭蒂颱風影響而發生了大規模崩塌和土石流災害<sup>[2]</sup>。農委會水土保持局 (現已經升格更名為農業部農村發展及水土保持署) 已於 2017 年正式公告此處為「土石流潛勢溪流東縣 DF166」(表 1)，其位於紅葉村集水區上游，與集水區山區南邊的北斯蘭溪支流上游處幾乎重疊，隸屬於北絲蘭溪 (又名鹿野溪) 流域，為卑南河流域之支流，再於卑南溪下游處流入臺灣東部海域，如圖 1 所示。

表 1 東縣 DF166 土石流潛勢溪流相關基本資料

土石流潛勢溪流	東縣 DF166
地理位置	臺東縣延平鄉紅葉村
地標	紅谷橋
鄰近道路	東 36 縣
初估保全戶數	五戶以上
風險等級	高
公開年份	2017
降雨警戒值 (mm)	450
溪流災害種類	溪流型

(資料來源：土石流防災資訊網)

## 研究方法

### 使用模式之概述

本研究所使用的 Hyper KANAKO 數值模式係由日本京都大學之 Kana Nakatani 教授<sup>[6]</sup> 團隊所開發之土石流模擬套裝模式。以 2008 年發表的 KANAKO 2D 模式為基礎<sup>[7,8]</sup>，於 2012 年提出進階版之 Hyper KANAKO 土石流模擬模式。Hyper KANAKO 模式可直接匯入數值高程模型 (DEM) 進行土石流模擬，適用於土石流預測模擬、防砂壩興建規劃及現有防砂壩之管理等，模式結合 QGIS 地理資訊系統，整合二者的操作介面，使圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI) 更為簡潔且便於操作，大幅簡化操作程序，提高使用者在操作視覺上的流暢度<sup>[5,9-11]</sup>。此外，Hyper KANAKO 模式具有設定及模擬一維與二維區域的功能。

Hyper KANAKO 模式是以高橋<sup>[12]</sup> 所提出的控制方程式為基礎進行開發，其中包含連續方程式、動量方程式等。土石流模擬過程中，控制方程式用以確定土石流之流速、流深、土砂濃度和河床水位等，而這些值為時間及空間的函數。自土石流發生到流動和堆積過程的控制方程式，皆使用與時間和空間相關之偏微分方程式來表示，其分別由連續方程式及動量方程式所組成，如方程式 (1) 至 (5) 所示。

### 連續方程式

土石流總體積：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = i \quad (1)$$

土石流土砂濃度：

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t} + u \frac{\partial (Ch)}{\partial x} + v \frac{\partial (Ch)}{\partial y} = iC_s \quad (2)$$

河床高程變化：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (3)$$

式中， $h$  為流動深度； $t$  為時間； $u$ 、 $v$  為  $x$ 、 $y$  軸流速； $i$  為侵蝕或堆積速度； $C$  為土砂體積濃度； $C_s$  為底床體積濃度； $z$  為河床高度。

### 動量方程式

X 軸方向 (主流流動方向)：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (4)$$

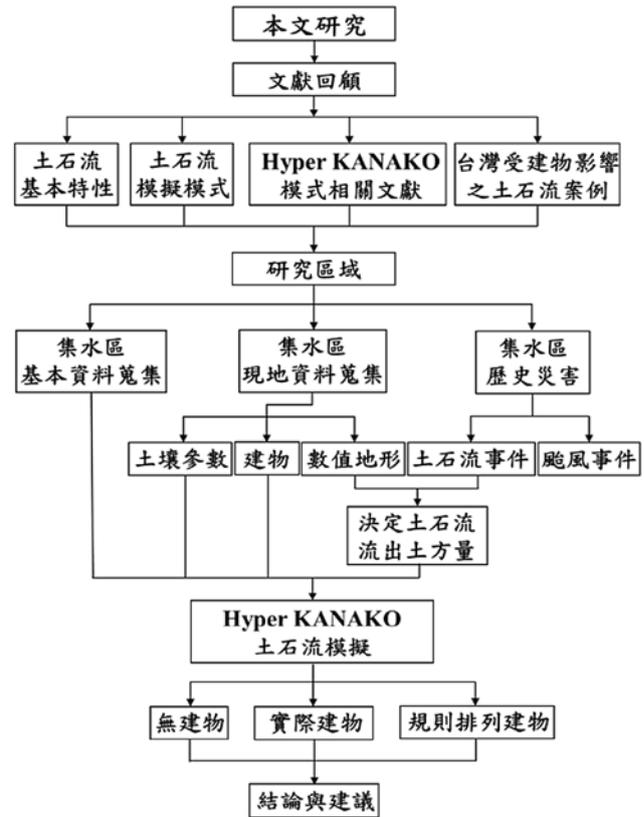


圖 2 本研究流程圖

Y 軸方向 (橫向流動方向)：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (5)$$

式中， $H$  為流體高程， $H = h + z$ ； $g$  為重力加速度； $\rho$  為清水密度； $\tau_x$ 、 $\tau_y$  分別為  $x$ 、 $y$  軸河床剪應力。

### 研究架構與流程

本文之研究流程圖，如圖 2 所示。首先蒐集土石流相關案例、文獻及模擬模式，最後選定使用 Hyper KANAKO 模式，並以台東縣延平鄉紅葉村作為研究區域。接著蒐集紅葉村之地文與水文特性，包含集水區地形地勢、現地資料及歷史土石流災害等，供模式模擬使用。根據現地土壤參數、建物、數值地形與實際災害設定案例進行參數設定。針對四項假想情境案例，模擬土石流受建物影響之流動情況。最後綜整模擬結果，以利後續土石流模擬或防減災參考。

### 模式相關參數設定

#### 初始地形設定

本研究使用內政部地政司衛星測量中心之全臺灣 5 公尺網格的數值高程模型 (DEM) 資料，並以 ArcGIS

繪製研究區域之集水區範圍，進而從中獲取集水區坡度、坡向、面積、高程等地形參數，以供後續相關參數設定及模式演算使用。Hyper KANAKO 模式與 QGIS 整合共用操作介面，因此進行模擬時可匯入數值地形資料供模式讀取使用。

### 地文參數設定

在模式中相關地文參數的設定在 Dem · Dams · Observation 工作表中進行。參數敏感度分析結果顯示土石流濃度、內摩擦角及曼寧粗糙係數等土壤參數容易影響模擬結果，因此在輸入這些參數時應謹慎斟酌其適用性來做合理設定。

表 2 為本研究使用的相關參數，地形參數中所採用之現場取樣資料，有些參數參考「105 年重大土砂災害紀錄及資料分析成果報告」<sup>[13]</sup> 中的現地土壤參數資料。此外，相關參數的設定也參考河道泥沙運移學<sup>[14]</sup> 及前人相關土石流模擬的經驗<sup>[12,15,16]</sup>。

表 2 本研究基本地文參數設定

No.	Parameter	Value
1	Time interval of calculation (sec)	0.01
2	Mass density of sediment (kg/m <sup>3</sup> )	2650
3	Mass density of fluid phase (kg/m <sup>3</sup> )	1000
4	Concentration of material	0.65
5	Manning's roughness coefficient	0.04
6	Simulation continuance time (sec)	1800
7	Diameter of material (m)	0.007
8	Internal friction angle (deg)	38
9	Time interval of input hydrograph data (sec)	2
10	Time interval of output result data (sec)	5

- (1) 演算時間間隔：本研究使用其預設值每 0.01 秒演算一次。
- (2) 土石密度：採用 2650 kg/m<sup>3</sup>。
- (3) 流體密度：採用清水密度 1000 kg/m<sup>3</sup>。
- (4) 底床體積濃度：此模式中 0.6 至 0.7 皆為合理設定範圍，採用中間值 0.65。
- (5) 曼寧粗糙係數：參考水土保持手冊進行設定。研究區域屬於無內面工，溝內物質屬於溝身整齊者稀疏草生，故取其平均值設定曼寧粗糙係數為 0.04。
- (6) 模擬連續時間：臺灣地區坡度較陡且流程較短，一次土石流流動約在 15 分鐘內結束<sup>[3]</sup>。故本研究將此設定為 30 分鐘（1800 秒），以確保集水區內模擬之土石流流動皆完整結束。
- (7) 材料粒徑：參考現地踏勘調查報告中各取樣點之泥沙粒徑資料，因各取樣點都位於溪流中游，故採用各粒徑曲線中 d<sub>50</sub> 之平均值作為代表粒徑，泥沙粒徑約為 7mm。
- (8) 內摩擦角：此參數同材料粒徑之取樣點資料，並取各泥沙取樣點之內摩擦角平均值設定，內摩擦角約為 38 度。
- (9) 水文數據輸入時間間隔：控制土石流流量歷線中擷取水文數據輸入上游邊界條件之時間間隔，本研究設定為每 2 秒提供一筆土石流流量數據給邊界條件使用。
- (10) 結果數據輸出時間間隔：模擬結果會以數據及圖片的方式輸出，為得到更詳細之演算結果，本研究設定每 5 秒輸出依筆模擬演算結果。

### 河道參數設定

在河道演算使用 Hyper KANAKO 模式中的一維河道模式進行模擬演算，在模式的 River Bed 工作表設定有關河道的相關資訊，包括一維河道河床高程、一維河床寬度及不穩定土層厚度等等。

1. 河道河床高程：模式會自動偵測 DEM 中的一維溪溝並輸入河道高程。本研究使用 5 公尺網格地形數據，自溪流起始點起，將每 5 公尺設置一模擬點至一維河段下游端結束點處。
2. 河床寬度：本研究藉由 ArcGIS 軟體自現地航拍圖及正射影像中量測河道寬度，河寬約為 10 公尺。
3. 不穩定土層厚度：其初始值為 0 公尺。若於動床模擬時，可以於定床上添設此參數作為可沖刷土壤深度。本研究僅使用定床模擬，故沒有更改此項參數。

### 土石流入流歷線設定

#### (1) 土石流總體積

使用 Hyper KANAKO 模式進行土石流演算需要上游的土石流入流量及入流歷線。本研究使用前人所建立之集水區面積 (A) 與土石流流出土方量 (V) 之間的經驗關係式，來估算研究區土石流潛勢溪流（東縣 DF166）發生土石流的規模。根據日本建設省日本國內 550 處土石流災害進行現場調查結果，集水區面積 (A) 與土石流流出土方量 (V) 之關係，如圖 3 所示。蔡元芳<sup>[17]</sup> 曾經比對臺灣地區與日本地區土石流資料（圖 3），建議採用不被超過機率 0% 或 9% 來估算臺灣土石流潛勢溪流可能流出土方量。

本研究土石流潛勢溪流（東縣 DF166）的集水區面積為 0.336 km<sup>2</sup>，採用迴歸方程式（表 3），可以估算出 V<sub>50</sub>、V<sub>70</sub>、V<sub>90</sub> 及 V<sub>99</sub> 等四種土石流土砂流出體積，依序分別為 69、1394、3649 及 141240 m<sup>3</sup>。

表 3 土石流流出量與集水區面積迴歸式

土石流流出量 不被超過機率	迴歸方程式 (A : km <sup>2</sup> , V : m <sup>3</sup> )
50%	V <sub>50</sub> = 13600 A <sup>0.61</sup>
0%	V <sub>70</sub> = 2064 A <sup>0.61</sup>
80%	V <sub>80</sub> = 13600 A <sup>0.61</sup>
9%	V <sub>90</sub> = 69 A <sup>0.61</sup>
9%	V <sub>95</sub> = 11368 A <sup>0.61</sup>
9%	V <sub>99</sub> = 2720 A <sup>0.61</sup>

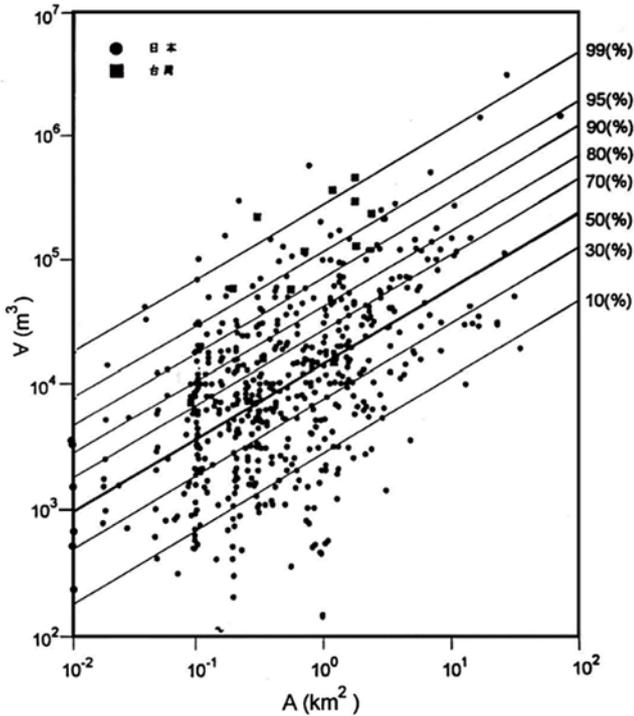


圖 3 土石流流出土方量與集水區面積關係圖<sup>[17]</sup>

依此所得土石流土砂流出體積，用 Hyper KANAKO 模式開發者 Nakatani 教授建議的方法計算土石流尖峰流量公式<sup>[18]</sup>，估算對應之尖峰流量，並據以建立土石流入流之流量歷線。土石流尖峰流量公式，如 (6) 及 (7) 所示。

$$\sum Q = \frac{V_d C_*}{C} \quad (6)$$

$$Q_p = 0.01 \sum Q \quad (7)$$

式中， $\sum Q$  為土石流總流量 ( $m^3$ )； $V_d$  為流出土方量 (包含空隙) ( $m^3$ )； $C_*$  為底床體積濃度； $C$  為土石流土砂體積濃度； $Q_p$  為土石流尖峰流量 ( $m^3/s$ )。

(2) 土石流流動濃度

本研究根據 Takahashi<sup>[19]</sup> 提出之平衡濃度 ( $C_\infty$ ) 公式來判斷集水區之土石流體積濃度，此公式必須在  $\tan\phi > \tan\theta$  的條件下方可成立，且  $C_\infty$  大於 0 並小於 0.9。如果公式計算結果出現  $C_\infty > 0.9$  的情形時，則令  $C_\infty = 0.9C_*$ 。另外，詹錢登<sup>[3]</sup> 提及土石流的泥沙體積濃度約介於 0.27 至 0.80 之間；水土保持手冊 (2017) 中說明一般土石流之體積濃度可取 0.3 至 0.7 之間<sup>[20]</sup>。本研究以 Takahashi 公式估算得出之土石流流動的體積濃度為 0.32。

建物設定

本研究區域內之建物除了紅葉派出所及紅葉國小外，其餘多為住宅，因此本研究於建物之設定以房屋為主，不針對房屋以外之建物進行模擬。此外，Hyper KANAKO 模式中建物皆設定為不可摧毀，且建物內部無法設定空隙，故模擬結果將不會發生建物遭衝擊毀損倒塌，及土砂堆積於建物內的情況。

建物的設定，為了配合模擬網格之方位及大小，將根據災害後之正射影像及航照圖所繪製的實際建物 (圖 4) 進行簡化 (圖 5)。建物簡化之標準為根據單一網格內原始建物所占的面積來進行。若單一網格內，原始房屋所占的總面積超過該網格面積的二分之一，則保留此網格為建物；反之，若該建物於單一網格中所佔面積小於網格面積的一半，則刪除此網格內之建物，而當該棟建物皆不佔據任一網格面積的二分之一，則整棟建物予以忽略。簡化後的建物如圖 6 所示。根據當地建物之平均高度，假設建物高度均為 6 公尺來進行模擬。

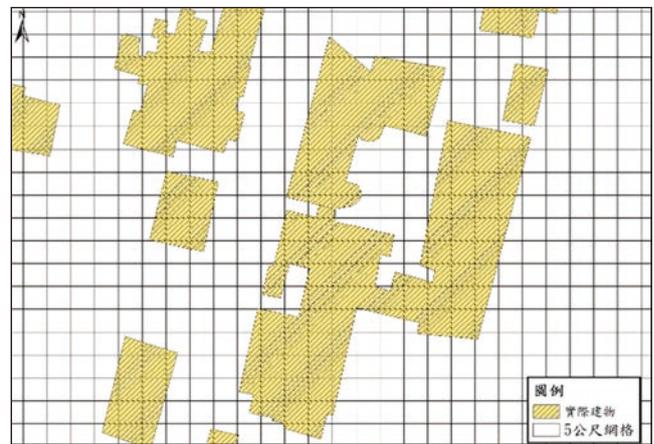


圖 4 實際建物平面形狀示意圖 (以紅葉國小為例)

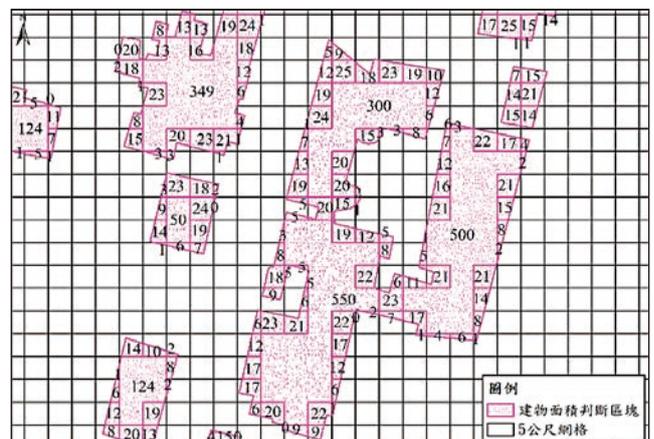


圖 5 簡化建物範圍判斷示意圖 (以紅葉國小為例)

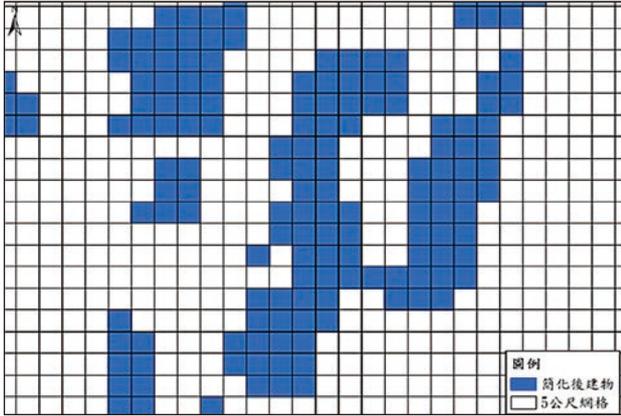


圖 6 簡化後建物平面形狀示意圖（以紅葉國小為例）

### 模擬案例

本研究分為 CASE 1、CASE 2、CASE 3 及 CASE 4 等四種不同案例進行模擬，相關條件如表 4 所示。各模擬案例的條件分別簡要說明如下：

#### 模擬方案一

方案一（CASE 1）以 2016 年紅葉村土石流對應的條件進行模擬，根據農委會水土保持局<sup>[2]</sup>公布之該處土石流災害報告，採用土石流土砂總量為 800 00 m<sup>3</sup> 進行模擬。模擬時分流路上無建物與有建物兩種情境，模擬結果再與紅葉村土石流溢淹災情比對，用以驗證 Hyper KANAKO 模式於研究區域之適用性，以及探討流路上無建物與有建物對土石流流動情形的影響。

#### 模擬方案二及三

按土石流流出量與集水區面積關係，設定四種不同土石流流可能出量  $\nabla_{50}$ 、 $\nabla_{70}$ 、 $\nabla_{90}$  及  $\nabla_{99}$ 。方案二（CASE 2）與方案三（CASE 3）分別進行模擬無建物（CASE 2）及有建物（CASE 3）在此四種不同流出量條件下的溢淹情形。比較及分析於不同土石流流量下，無建物及設立簡化後建物之土石流溢淹範圍與土石流流動深度。

#### 模擬方案四

方案四（CASE 4），以土石流流出土方量為  $\nabla_{90}$  及  $\nabla_{99}$  兩種條件下，模擬紅葉村中土石流流路上設有不同建物排列方式阻擋下土石流流動情況。建物布置在分析網格上，採四種不同排列方式，包含三角形排列、倒三角形排列、長矩形排列與寬矩形排列等不同排列形式，如圖 7 所示，用以模擬觀察建物排列方式對土石流流動是否有顯著差異。

表 4 本研究四種模擬案例及對應條件

案例	流出土方量	建物
CASE 1	80000 m <sup>3</sup>	無建物 簡化之建物
CASE 2	$\nabla_{50}$ 、 $\nabla_{70}$ 、 $\nabla_{90}$ 、 $\nabla_{99}$	無建物
CASE 3	$\nabla_{50}$ 、 $\nabla_{70}$ 、 $\nabla_{90}$ 、 $\nabla_{99}$	簡化之建物
CASE 4	$\nabla_{90}$ 、 $\nabla_{99}$	三角形排列
		倒三角形排列
		長矩形排列 寬矩形排列

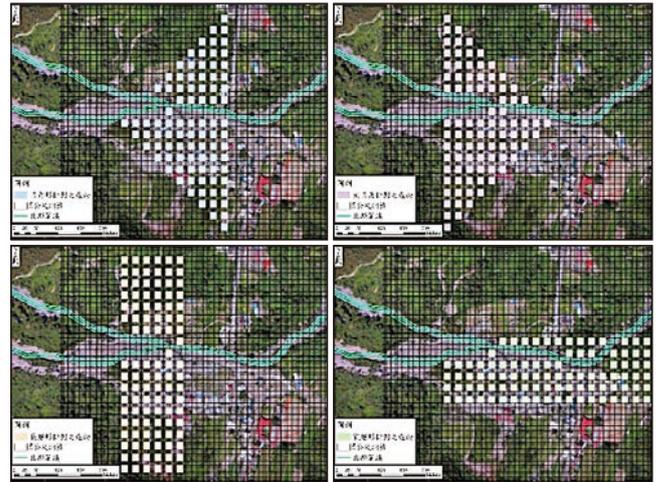


圖 7 模擬方案四土石流流路上四種建物的排列形式

## 結果與討論

### 紅葉村土石流溢淹範圍

本研究使用災害後正射影像，判釋實際土石流事件之溢淹範圍，並與 CASE 1 土石流模擬結果進行比較（模擬結果土石流流動深度小於 5 cm 者予以省略），比較結果列於表 5。無建物模擬所得溢淹範圍略高於有建物模擬所得溢淹範圍（約 5.4%）。無建物模擬及有建物模擬所得溢淹範圍與實際溢淹範圍之差異分別為 30.3% 及 26.3%，模擬所得溢淹範圍高於實際溢淹範圍。模擬結果顯示模擬土石流溢淹範圍與實際土石流溢淹情況大致相近。在吻合率方面，無建物及有建物模擬所得溢淹範圍與實際溢淹範圍之吻合率分別為 79.9% 及 79.7%，顯示 Hyper KANAKO 模式具有良好的模擬效果。

表 5 實際與模擬土石流溢淹範圍之比較

案例 CASE 1		無建物模擬	有建物模擬
實際土石流溢淹範圍	ha	11.22	11.22
模擬土石流溢淹範圍	ha	16.11	15.23
溢淹範圍差異百分比	%	30.3	26.3
溢淹重疊範圍面積	ha	8.9	8.9
模擬與實際溢淹範圍吻合率	%	99	97

### 方案二及三模擬結果比較

方案二、三及四 (CASE 2、CASE 3 及 CASE 4) 分別進行模擬無建物、有建物及不同建物排列方式對土石流溢淹範圍之影響。為了方便比較及討論模擬結果，在模擬範圍內由上游至下游針對入流點、河道轉彎處、溪流匯流點設立 4 個土石流模擬觀測點 A、B、C 與 D，如圖 8 所示。



圖 8 土石流模擬 4 個觀測點位置 (2016 BigGIS)

當土石流土砂總量為  $\nabla_{50}$  ( $69 \text{ m}^3$ ) 時，模擬結果顯示可流動土砂量較小，土石流僅在河道內流動。當土石流土砂總量為  $\nabla_{70}$  ( $13,914 \text{ m}^3$ ) 時，模擬結果顯示上游段觀測點 B 附近及中游段發生少許溢淹情況。當土石流總量增加為  $\nabla_{90}$  ( $36,499 \text{ m}^3$ ) 時，模擬結果顯示土石流廣泛溢淹到河道四周，衝擊到鄰近建物，溢淹面積大幅增加。當土石流總量增加為  $\nabla_{99}$  ( $141,240 \text{ m}^3$ ) 時，模擬結果顯示土石流溢淹範圍大幅擴大。如表 6 所示，其土石流溢淹範圍與土石流流入總量有密切之關係。不同規模土石流總量的模擬結果可以看出此集水區中容易遭受土石流溢淹的區位，有利於後續土石流觀測及防減災之規劃。

表 6 比較無建物 (CASE 2) 及有建物 (CASE 3) 條件下土石流溢淹面積之比較

溢淹面積		CASE 2	CASE 3
$\nabla_{50}$	ha	6.09	6.04
$\nabla_{70}$	ha	8.32	8.29
$\nabla_{90}$	ha	12.51	11.6
$\nabla_{99}$	ha	20.48	19.9

由上述土石流模擬結果，比較無建物考量 (CASE 2) 及有建物考量 (CASE 3) 模擬流動深度在前述四個

觀測點上的差異。當上游邊界條件為  $\nabla_{90}$  時，如圖 9 所示，觀測點 A 及 C 的流動深度沒有差異，觀測點 B 的流動深度增加 0.3 公分，觀測點 D 的流動深度增加 1.7 公分。簡言之，當上游邊界土石流土砂入流總量小於等於  $\nabla_{90}$  時，無建物考量及有建物考量對於之流動計算結果沒有太大差異。

但是當上游邊界土石流土砂入流總量增加為  $\nabla_{99}$  時，無建物考量及有建物考量的模擬結果有較大的差異。如圖 10 所示，觀測點 A 的流動深度增加 3.6 公分，觀測點 B 流動深度減少 22.5 公分，觀測點 C 流動深度增加 53.6 公分，觀測點 D 的流動深度減少 5.1 公分。這是因為觀測點 C 下游處開始有建物阻擋土石流流動，導致土石流往兩側溢淹。

此外，CASE 2 在觀測點 C 與 D 段溪流中土石流流動深度介於 3 ~ 5 公尺，溪流呈現滿流狀態，左岸溢淹約 0.2 公頃。但在 CASE 3 時卻有 150 公尺長的河段土石流流動深度降為 1 ~ 3 公尺，這是因為有建物阻擋土石流流動，引導土石流往兩側溢淹。這說明建築物會影響土石流的流動深度、流動方向及溢淹區位。

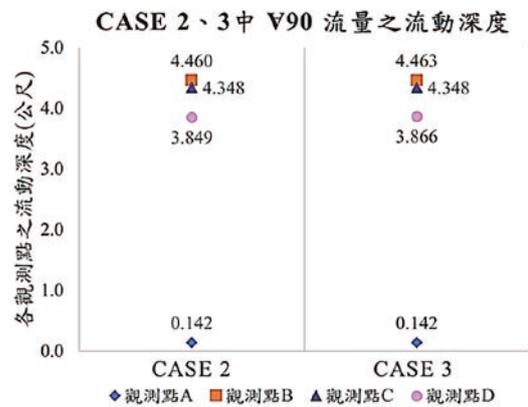


圖 9 比較無建物 (CASE 2) 及有建物 (CASE 3) 條件四個觀測點的土石流流動深度

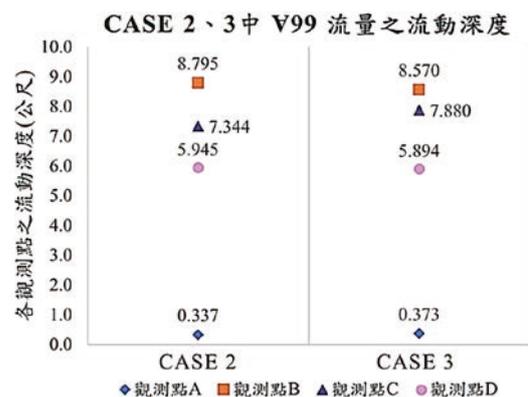


圖 10 方案二及三在  $\nabla_{99}$  流量下四個觀測點之土石流流動深度

### 方案四模擬結果分析

方案四 (CASE 4) 的模擬是想探討土石流流路上建物排列形式對土石流流動及溢淹範圍的影響。在兩種土石流流出量及四種不同建物排列條件下，探討建物排列形式對於土石流溢淹範圍之影響。由前述案例模擬結果可知此研究區域若欲模擬土石流受建物之影響，要考量大於  $V_{90}$  的土石流規模，才能清楚觀察土石流受建物之影響。因此 CASE 4 僅針對土石流體積為  $V_{90}$  及  $V_{99}$  兩種情況進行模擬，探討不同建物排列對土石流溢淹範圍及流動深度的影響。建物排列方式包含三角形排列、倒三角形排列、長矩形排列與寬矩形排列等四種。

土石流體積為  $V_{90}$  及  $V_{99}$  兩種情況的模擬結果以觀測點 A、B、C 與 D 等四處的流動深度進行比較，分別如圖 11 及圖 12 所示。圖 11 顯示土石流體積為  $V_{90}$  時，四種建物排列方式都沒有影響到觀測點 A 及 B 兩處的流動深度；觀測點 C 及 D 兩處的流動深度受到建物的排列方式比較大，尤其是觀測點 C 在倒三角形建物排列情況時的流動深度比其他三種排列方式的流動深度多出 40 公分左右。

圖 12 顯示土石流體積為  $V_{99}$  時，四種建物排列方式下的四處觀測點流動水深的比較。很顯然，相對於土石



圖 11 在  $V_{90}$  條件下比較四種建物排列對土石流流動深度的影響



圖 12 在  $V_{99}$  條件下比較四種建物排列對土石流流動深度的影響

流體積為  $V_{90}$ ，當土石流體積為  $V_{99}$  時，四處觀測點流動水深大幅增加，觀測點 A 流動水深約增加 2.6 倍，觀測點 B 流動水深約增加 2.2 倍，觀測點 C 流動水深約增加 1.9 倍，而觀測點 D 流動水深變化要大約增加 1.7 ~ 2.2 倍。

當土石流土砂總量為  $V_{90}$  時，模擬結果顯示自觀測點 B 開始土石流受建物影響改變流動方向，往南方建物密集區溢淹。當土石流土砂總量為  $V_{99}$  時，模擬結果顯示觀測點 A 及 B 之間即開始出現土石流大量溢淹，流動深度超過 20 公分之溢淹範圍到達超過 450 公尺以外之紅葉國小。由模擬結果顯示，相較於倒三角形與長矩形建物排列，寬矩形與三角形兩種建物排列方式對於土石流流動的阻擋影響較小一些，大部分土石流流動趨勢較為集中的帶往下游處流動，建物之間的土砂堆積較為集中，如圖 13 及 14 所示。在土石流土砂總量為  $V_{99}$  時的模擬結果中，觀測點 B 及 C 在倒三角形建物排列時有較大的流動深度；而觀測點 D 則在寬矩形建物排列時有較大的流動深度。

探討倒三角形排列建物時觀測點 C 流動深度高於其他案例之原因，由各建物排列型態可看出倒三角形排列為越往下游建物分布越少，建物減少相當於影響土石流溢淹的因素減少，使土石流更能沿著原河道流動，土砂也更能堆積於主河道不被擴散，便堆積於地勢相對平緩之 C 點附近。觀測點 D 在三角形排列建物時的土石流流動深度最高之情況，這也是建物排列造成的原因。

### 誌謝

本研究承蒙國科會計畫經費補助 (111-2625-M-006-012)，特此致謝。

### 結論與建議

本研究使用 Hyper KANAKO 模式，以紅葉村土石流潛勢溪流 (東縣 DF166) 為模擬對象，分成四種模擬方案來探討流路上建物阻擋對土石流溢淹範圍之影響<sup>[21]</sup>。研究結論與建議如下：

方案一 (CASE 1) 模擬結果顯示土石流溢淹範圍與實際溢淹範圍吻合率達 80%，此結果顯示 Hyper KANAKO 模式對於土石流有良好的模擬效果。

方案二 (CASE 2) 與方案三 (CASE 3) 模擬流路上無建物及有建物阻擋條件下土石流的溢淹情形。模擬結果顯示建物的存在會阻擋土石流的流動情況，使土石流往橫向流動，影響土石流擴散溢淹的範圍。土石流模擬分析時應該要考慮建物的影響。

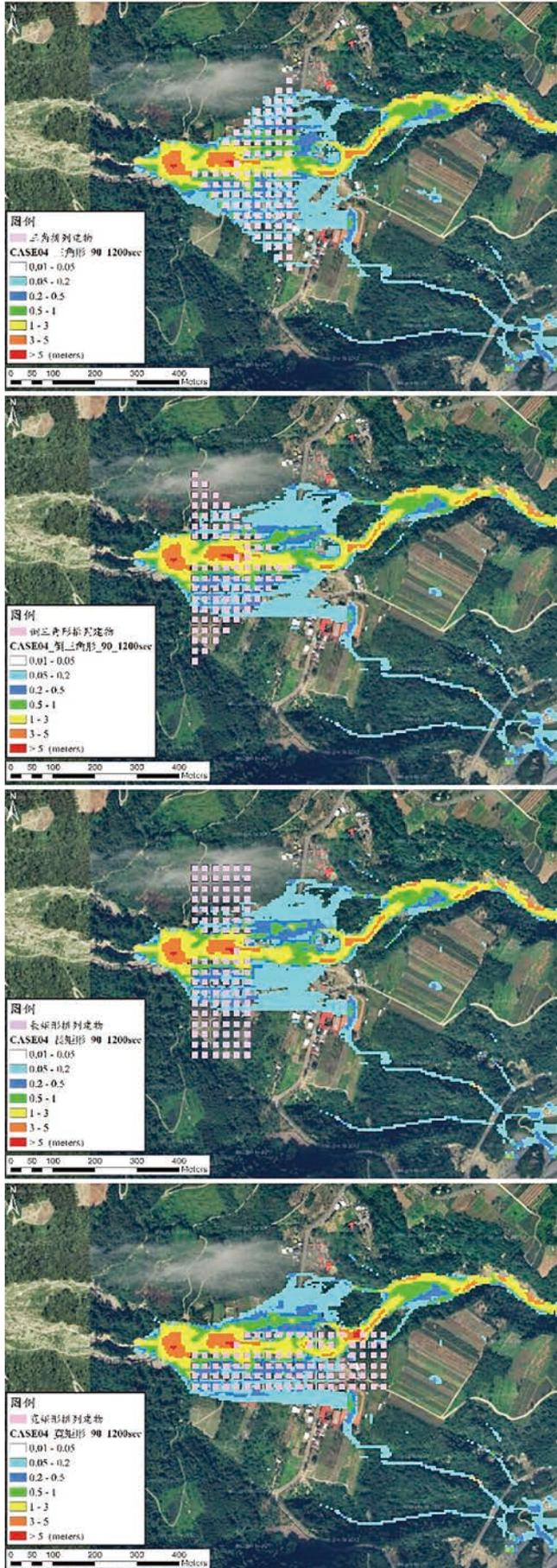


圖 13 在  $V_{90}$  及四種建物排列條件下土石流溢淹情形之比較

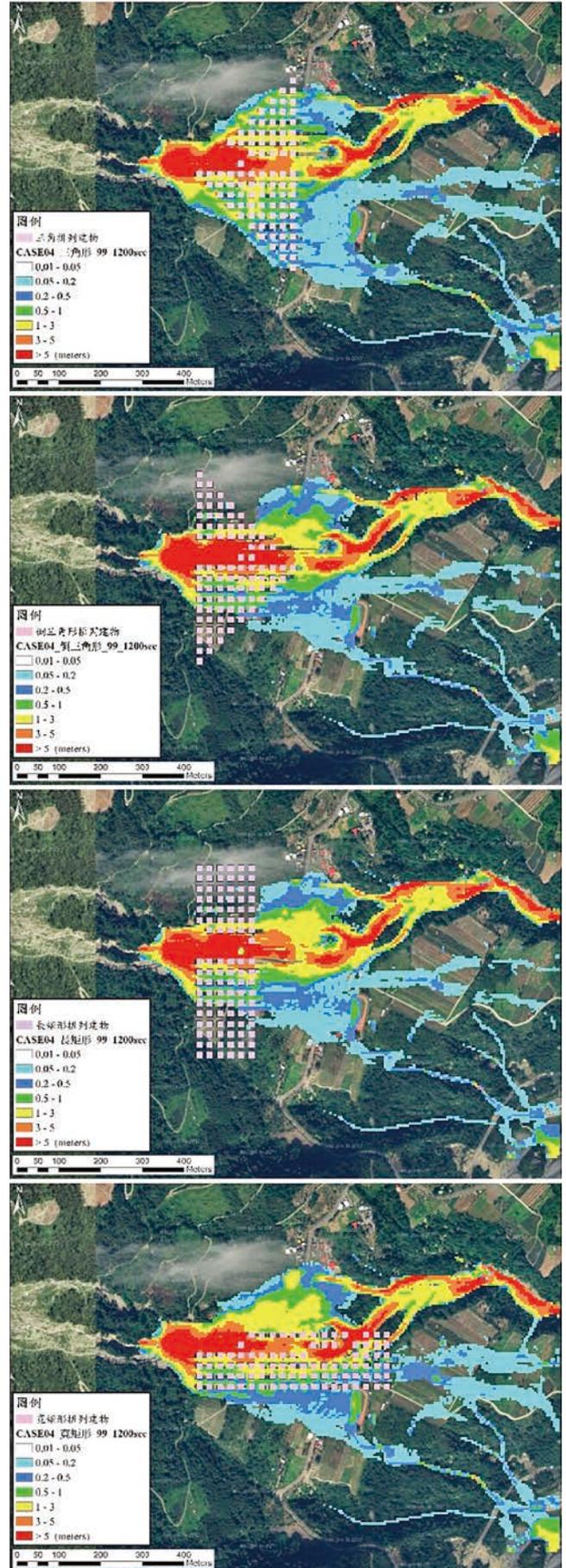


圖 14 在  $V_{99}$  及四種建物排列條件下土石流溢淹情形之比較

方案四 (CASE 4) 探討流路上四種建物排列形式對於土石流溢淹範圍之影響，結果顯示建物排列形式也會影響土石流溢淹範圍及流動深度。前段建物的阻擋會影響到後續土石流流動方向及溢淹範圍，其中以在倒三角形建物排列對於土石流溢淹範圍及流動深度的影響較大。

此外，本研究使用 5 m 的 DEM 來建置分析網格，進行土石流模擬，若能取更高解析度的 DEM 數值地形圖，可能可以提升模擬效果。另外，建議將 HyperKANAKO 模式模擬結果與其他模式 (例如 FLO-2D) 模擬結果進行比較，以探討模式間的差異及使用限制。

### 參考文獻

1. 經濟部水利署水利災害應變學習中心網頁 (<https://llc.wcdr.ntu.edu.tw>)。
2. 水土保持局 (2016), 「105 年莫蘭蒂颱風重大土砂災情摘要報告」, 行政院農業委員會。
3. 詹錢登 (2000), 「土石流概論」, 科技圖書股份有限公司。
4. Jan, CD. and Chen, CL. (2005). Debris flows caused by Typhoon Herb in Taiwan. In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg.
5. Nakatani, K., Kosugi, M., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2016), "Debris flow flooding and debris deposition considering the effect of houses: disaster verification and numerical simulation", International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 9 (4), 145-154.
6. 中谷加奈 (2010), 「GUI を実装した汎用土石流数値シミュレーションシステムの開発と適用 (Dissertation\_全文)」, 京都大學, 學位論文 (日文)。
7. Nakatani, K., Wada, T., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2008), "Development of "Kanako 2D (Ver.2.00)," a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface", International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 1(2), 62- 72.

8. Nakatani, K., Iwanami, E., Horiuchi, S., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2012), "Development of "Hyper KANAKO", a debris flow simulation system based on laser profiler data", 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble, France.
9. Nakatani, K., Okuyama, Y., Hasegawa, Y., Satofuka, Y., Mizuyama, T. (2013), "Influence of housing and urban development on debris flow flooding and deposition." Journal of Mountain Science Vol. 10, 273-280.
10. Nakatani, K., Iwanami, E., Horiuchi, S., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2014), "Application of "Hyper KANAKO," a debris flow simulation system using laser profiler data", 13th Congress INTERPRAEVENT 2014, Nara, Japan.
11. Nakatani, K. (2019), "Study on hazard mapping of landslide dam breaking and debris flows with simulations", 108 年堰塞湖及土砂災害防治技術研習會 (in Japanese) .
12. Takahashi T. and Nakagawa H. (1991): Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall. International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 4(3), 12-19 (in Japanese).
13. 青山工程顧問股份有限公司 (2016), 「105 年重大土砂災害紀錄及資料分析成果報告」, 行政院農業委員會水土保持局。
14. 詹錢登 (2018), 「泥沙運行學」, 五南圖書股份有限公司。
15. 詹錢登、蕭凱文、徐郁超、曾國訓 (2015), 「應用 FLO-2D 與 Debris 2D 模擬羌黃坑集水區內土石流流動特性差異之研究」, 中華防災學刊, 第 7 期第 2 卷。
16. 賴承農、鍾佩蓉、陳盈守、陳振宇 (2011), 「探討土石流堆積物分布範圍與體積濃度推算之關係」, 第二十屆水利工程研討會。
17. 蔡元芳 (1999), 「土石流扇狀地形特性之研究」, 國立成功大學水利及海洋工程學系研究所, 博士論文。
18. 國土技術政策總合研究所 (2016), 「砂防基本計畫策定指針 (土石流・流木對策編) 解說」, 國土交通省, 國總研資料第 904 號, 第 25-28 頁 (日本)。
19. Takahashi T. (1991): Debris flow. Balkema, Rotterdam: 165p.
20. 水土保持局 (2017), 「水土保持手冊—土石流篇」, 行政院農業委員會。
21. 許汶芳 (2022), 「應用 Hyper KANAKO 模式模擬建物對土石流溢淹之影響—以臺東縣紅葉村為例」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文 (指導教授: 詹錢登)。



# 土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: [service@ciche.org.tw](mailto:service@ciche.org.tw) 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。



# 國道後續路段 橋梁耐震補強工程 — 施工精進 作為解析（以國道8號為例）

潘小珍／交通部高速公路局第二新建工程處第三工務所 主任

林邦奎／宏義工程股份有限公司 總經理

林彤珈／宏義工程股份有限公司 職安部主任

林建志\*／台灣世曦工程顧問股份有限公司高工處 計畫經理

黃永輝／台灣世曦工程顧問股份有限公司高工處 主任

台灣地狹人稠地形起伏變化大，綿密的交通路網已成為經濟發展及區域聯繫之主要依據，橋梁功能的維持更是確保經濟活動及交通運轉主要關鍵，考量台灣位處環太平洋地震帶，1999年921集集大地震、2016年0206美濃大地震、2019年南方澳大橋無預警斷落意外，均造成重大經濟和人民財產損失，尤其集集大地震造成許多橋梁損毀、交通運輸中斷，救援資訊、人力、物品無法及時運送，顯見全台橋梁安全維護仍有精進提升的空間。揆諸台灣整體防災計畫，國道扮演至關重要的防災運輸生命線，災變時肩負維生功能，成為輸送救災物資、傷患之交通命脈，隨著耐震規範與施工技術與時俱進，高公局耐震補強工程執行迄今已累積一定程度橋梁施工成果，本案有幸參與勞動部112年優良工程金安獎（國道後續路段橋梁耐震補強第M81標—國8全線暨國3新化段），藉由施工精進作為實務分享，期能在資源有限與成本效益的考量下，使用經濟合理之費用使得國道橋梁達到耐震安全的標準，冀望為後續國道相關補強作業，貢獻心力。

## 國8耐震補強工程之施工精進作為

原國道8號1988年完工通車，全橋東西向，主線里程1k+622~14k+617，全長12,995公尺，為標準跨徑40公尺之PC箱形橋梁，惟因規範變革致原橋耐震能力不足（原支承強度、橋墩韌性不足，1988），本案透過「小震不壞、中震可修、大震不倒」耐震設計（2019）理念施工，採增設力量分散裝置、圍束包覆及調整支承系統的方式補強後，改變整體結構型式之思維，成功滿足現行耐震規範需求<sup>[1,2]</sup>，相關創新應用成果（安全看的見、安全聽的見、科技守護），如后述，提供作為後續耐震評估及補強工法之施工參考。

## 採用國土安全監測平台—整合防災資源及變位監測，提供全面安全資訊

近年來各地天災頻繁，全球氣候與環境的改變使得降雨強度、分布與過去之特性相異，而台灣正好位於板塊邊界，造成活躍的造山與斷層活動，地質相對破碎，而強降雨、地震、崩塌、地層下陷等問題持續考驗著交通建設、國道橋梁、坡地等各項設施的安全性。本工程秉持研發創新、服務卓越、永續經營、正直誠信四大施工理念，深入國8每一角落，為南科生活家園的便捷與舒適，擴大幸福文明的視野，提升社會經濟發展與整體競爭力；同時，接地氣深耕台南、

\* 通訊作者，pq k@ceci.com.tw



圖 1 國 8 國土安全監測平台執行成果

服務人群，體現傾聽大自然的聲音，與大地對話，創造人與土地的和諧永續<sup>[3]</sup>。

國 8 耐震補強工程導入整備防、避、減災及復建工程技術，運用國土安全監測平台（圖 1）整合國內各專業技術，自 2017 年起，快篩沿線 50 餘座橋梁之耐震性能風險分級，優先針對地震、洪水常損壞道路關鍵節點之國 8 橋梁，搭配 LiDAR/InSAR 與光學影像等遙測技術比對，掌握受損橋梁基本資訊（斷層、地質、環境、土壤液化），協助維管單位迅速研判適當救災、復舊對策，有效回饋補強工程之專業技術支援，成功驗證橋梁與坡地等關鍵基礎設施之位移變化趨勢<sup>[4]</sup>。

國土安全監測平台可快速篩選橋梁與周邊地盤長期地表形變，操作者可在系統中將地圖移動到台灣的任一點位進行點選，擷取周圍地表變位歷史紀錄，無論是液化潛勢或是 InSAR 變形圖皆一覽無遺；此外，系統亦已整合國 8 的地質鑽探、地震颱風、特殊救災資源（如水下切割工、大型抽水機）等，一站式定期監測健康狀態，提供機關安全防護判斷，並榮獲 2020 年國家新型專利的肯定。

### 採用 PMIS 專案管理平台—建構國 8 透明及效率的工程產業環境

因應創新經濟與全球化競爭發展，運用數位科技推

動營建產業升級轉型已成趨勢，揆諸國 8 全生命週期各階段所需管理資訊眾多，憑藉 5G 網路及資訊技術之優勢，導入 PMIS 簡易、快速、明確、可行之資料蒐集介面，使主辦機關、監造、廠商能各盡其責、各盡其力共同營造有利系統互通及資料共享之整體環境，並透過管理資訊整合與價值再利用進而衍生更多創新工程服務，加乘發揮工程管理電子化應用之整體效益（詳表 1）。

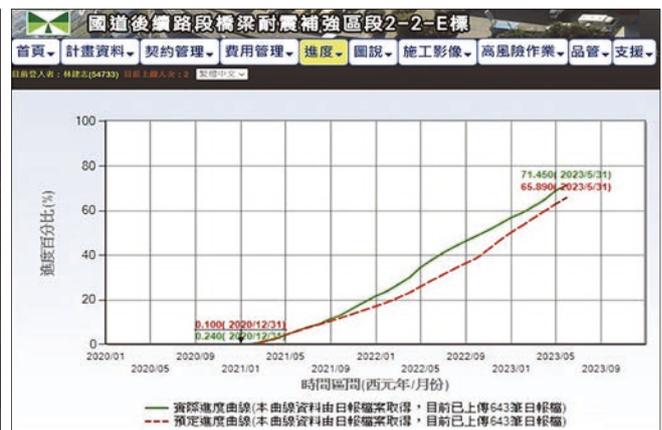
本案落實公共工程工地管理資訊化，實際用於「進度管理」、「計畫書送審管制」、「預警提醒」及「工作報告」，例如**運用即時監控搭配行動裝置，透過標示問題同步系統追蹤，有效掌握現況資訊（同時留置紀錄以利追溯）**，成功驗證 PMIS 專案管理系統（詳圖 2），促進工程資訊更緊密連結、彙整與更快速分流應用，有效提升執行效率，促成營建產業整體再升級之綜效。

### 人工智能載具輔助工地安全管理—機器人局限空間應用

勞動部職業安全衛生署統計指出台灣重大職業災害引起傷病、失能或死亡人次最高的行業為土木營建業，自 2004 ~ 2022 年綜合統計土建業常見的重大職災分別為局限空間、墜落滾落、物體倒（崩）塌、感電、物體飛落等。前車之鑑，本工程團隊對於工地管理、安全事件預防與避免皆是戰戰兢兢面對，畢竟每一個重大職業

表 1 國 8 之 PMIS 整體效益

項次	項目	要點說明
1	設計	編列工程管理資訊化平台及作業費。
	決標	計畫組織建構及專案開立。
	開工	啟動 PMIS 平台架設，選定主要操作人員受訓。
	施工	a. 即時顯示現地資訊（工地戰情室），簡易操作快速更新。 b. PMIS 平台包含「即時進度、文件管理（日報與圖說）、工作管理（會議與影像）、協同作業（列管專案與涉外單位事項）、施工紀錄（變更、估驗、品管、職安）等」管理平台。
	竣工	竣工資料統整匯出，快速彙整。
2	維護人力	a. PMIS 是由既有表報擷取資料，均屬各參與方原應保存資料，只是換成集中平台，建議 1 人/月。 b. 另可視計畫規模及資訊需求，配置作業管理人力。
		a. PMIS 資料目錄為樹狀結構，可匯出所有文件，封裝為實體檔案的竣工資料，移交維管單位使用。 b. 可採離線查詢系統，檔案移轉安裝至維管單位自備電腦環境（無縫接軌），方便管理。
3	意見管理	PMIS 設有線上問題反映機制，使用者可隨時將遭遇問題或回饋建議，線上發送管理人員處理回應，作為系統調校優化的參考。
4	儲存容量	a. PMIS 上傳量無限制，下載量平均為 50 G，符合一般計畫需求。 b. 若有超量需求，可循序擴充。
5	分權管理	PMIS 訂有權限管理機制，可依權限設定資料檔案，系統會記錄留存資料更動的人員與時間。



項次	文件名稱	版本	大小(KB)	日期	上傳者	文件說明
1	藍圖計畫V4.2.pdf	(0)	71,202	2023-06-01	林德強	藍圖計畫V4.2.pdf
2	09107-001-096-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	9,764	2023-06-01	林德強	09107-001-096-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf
3	09107-001-091-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	6,615	2023-06-01	林德強	09107-001-091-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf
4	09107-001-091-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	4,083	2023-06-01	林德強	09107-001-091-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf
5	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	18,175	2023-06-01	林德強	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf
6	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	10,670	2023-06-01	林德強	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf
7	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf	(0)	6,768	2023-06-01	林德強	09107-001-090-108+174-108+214(F109-P110) 橋梁施工機檢施工量及權力估驗計算.pdf

圖 2 國 8 之 PMIS 平台展示成果

災害的背後，都代表著一處工地環境之人員疏失、不安全行為、危險狀態所造成的傷害與遺憾；透過它案隱含的災害訊息，本文冀望透過科技管理，歸納工程特性、作業環境差異及安全意識等多元複雜成因模式，列舉**局限空間**示範人工智能載具輔助工地安全管理，達到科技守護國 8，**橋安、路安、人平安**。

隨著智慧科技時代來臨，數位技術結合營建產業，工地安全管理推展至新的高度儼然成形，加上近年 COVID-19 疫情因素，營建業正面臨設計、監造、施工人才世代交替、人力不足及流動情況加劇，既有專業人員分身乏術等情形，國 8 工程團隊亟思，在人力資源有限情境下如何藉由現行數位科技、資訊技術應用導入，

提高營建業職業安全衛生管理方法、強化管理作業，提供先進措施來施行危害預防、執行安全防護，終於，AI 機器人局限空間應用，悄然萌芽而生。

綜觀工地危險預防仰賴專業人員及監視系統，進行施工現場檢查、監控及事後檢討，但國8工地往往有不同工種的人員（機電、植筋、水刀、銲接、鉛支、鋼構）來來去去，現場受限專業工安及監控人力有限，盤點現行多以監視系統監控工地（搭載人臉辨識），並導入感測器蒐集工地資訊，再透過人工智慧相關技術進行影像辨識與分析代替人員監看，雖以自動化輔助取代傳統人力，惟工地安全風險仍有強化空間（存在盲區）。揆諸國8橋梁耐震補強工程因有進出箱梁施工之必要（如管線遷移、植筋鑽孔），依**職業安全衛生設施規則規定**，「勞工從事局限空間**作業前**，應確認該局限空間有無可能引起勞工缺氧、中毒、感電、塌陷及火災、爆炸等危害」；爰此，工程團隊採用全自動機器人搭載氣體偵測器及360°廣角鏡頭進入箱梁場域巡檢（詳圖3），遙控偵測確認氧氣濃度（18%以上）、一氧化碳（35 ppm 以下）、危害物質濃度（硫化氫 10 ppm 以下），確保施工人員進入局限空間安全無虞，現場經機器人分層分區實作結果，成效良好。

### 特殊優良機制—安全看的見、安全聽得見、科技守護

日本厚生勞動省每5年會公布一次營造業減災策

略計畫，指出「只要運用一些小技巧，使營造場所的危險源與安全措施可視化，就能有效預防職災事故」，提倡預防事故從小技巧做起，鼓勵事業單位將工作場所的危險源可視化，提高安全措施的防範能力，展現亮眼減災成效<sup>[5]</sup>。

鑒於工程發展趨勢，數位科技是提高營造業職業安全衛生管理能力的有效方法，具有極高的發展潛力，這些數位科技包含地理資訊系統（GIS）、建築資訊模型（BIM）、物聯網（IoT）、沉浸式科技（AR/VR）、人工智慧（AI），屢屢證實「行政管制」、「消除與替代」、「工程管理」、「個人防護具」等風險控制層級上發揮良好功效；藉本文分享3項工地的成功應用作為，共同促進台灣營造業職業安全衛生管理能力（詳圖4）。

#### 1. 安全看的見（氣體貯存區分色管理）

氣體貯存區規劃安全色彩種類，率定**綠色為氧氣**、**黃色為空瓶**、**紅色為乙炔**，工地安全措施加入顏色管理，提升施工人員安全辨識能力。本項色彩管理自推行以來，讓實際作業的工作者直觀地感受到儲放位置，顯眼性高，獲得協力廠商、設備供應商的肯定與支持，展現出亮眼的管理成效。

#### 2. 安全聽的見（施工機具作業半徑警示系統）

施工機具配置警示系統，當施工人員誤入機具作



圖3 國8之人工智能科技應用（局限空間氣體偵測）



圖 4 特殊優良機制（安全看的見、安全聽得見、科技守護）

業半徑範圍內，系統立即發出聲響，提醒機具操作者暫停動作，警示誤入人員盡速離開。營造業是勞力密集產業，作業時需有健康的體並全神貫注，然而人員普遍高齡化，加上流動率高，形成管理上的隱憂，本項透過安裝在機具上的感知器與搭配聲音警示，降低視覺盲區，提升工作者安全監控的目的<sup>[6]</sup>。

### 3. 科技守護（全測站自動監測系統）

國 8（1k ~ 3k）上構補強墩數 226 墩，更換鉛心橡膠支承（LRB）達 244 組，施工時，必須避免交通中斷，減小封路衝擊，常有穿著衣服改衣服之感，此為補強工程與新建工程最大差異之處。本項工程團隊自主研發「橋梁垂直變位及水平位移自動監測系統」，搭載 5G-IoT 自動連續監測（簡訊秒傳），保障用路行人車安全，體現科技管理，即時掌握橋梁健康狀態。

### 結語

1. 國 8 橋梁耐震補強工程是交通、科技、智能防災與國道美學的展現，其發包策略、設計理念、監造品質、施工技能、複合材料使用、隔減震技術等經驗，均有助於臺灣後續橋梁工程技術的增進與提升。
2. 本案工程團隊積極導入先進遙測技術，結合空間

大數據建置「國土安全監測平台」，透過長期性的監測及資訊整合分析，達到平時趨吉避凶、災時逢凶化吉，防範災害於未然，一同守護國人的安全，善盡社會責任，成功提升國家防災技術量能。

3. 工程團隊努力的汗水，成長了豐碩的果實，主辦機關、顧問公司、營造廠三位一體，持續維持道安、推動多項精進作為，品質的盡心付出、安全的貼心作為，台南安定區的民眾都看在心裡，藉本文給辛苦的工程人員，讚美喝采。

### 誌謝

本文承蒙交通部高速公路局第二新建工程處與第三工務所之指導及支持，謹致謝意。

### 參考文獻

1. 交通部高速公路局（2021），橋梁耐震補強設計注意事項。
2. 陳章丞（2018），國道橋梁應用隔減震支承系統耐震補強之案例分析與探討，台北：第 14 屆結構工程研討會。
3. 交通部高速公路局（2018），橋梁耐震補強設計及維護管理手冊。
4. 台灣世曦工程顧問股份有限公司（2023），中華技術第 138 期，空間技術與跨域創新。
5. 勞動部職安署（2023），淺談日本的安全可視化運動。
6. 勞動部職安署（2020），數位科技在臺灣營造業職業安全衛生管理的應用。

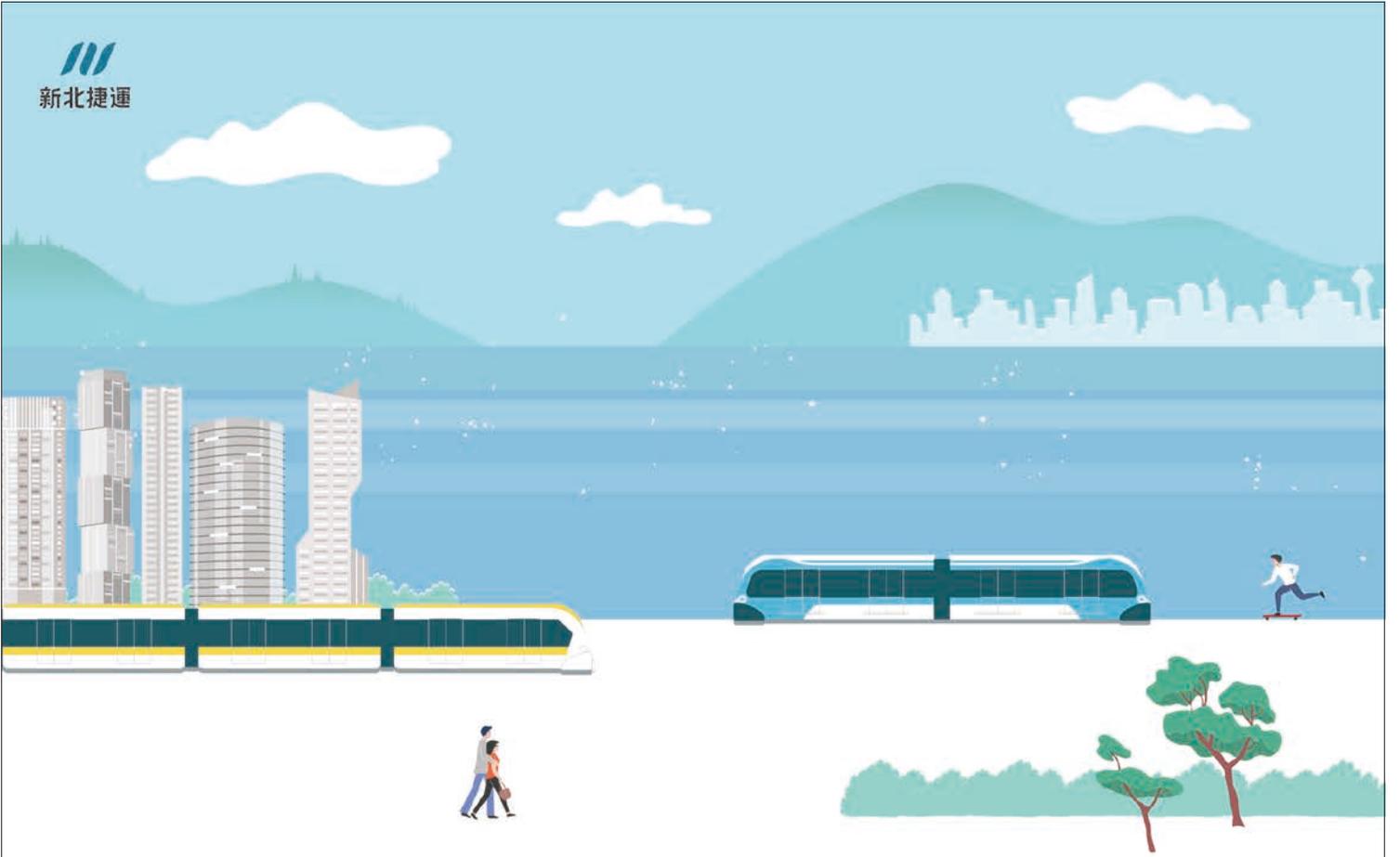
# 夢想和幸福

## 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



# 幸福前進 永續前行





## 中國土木水利工程學會 50 周年慶系列活動議程



敬邀報名參加

日期	時間	活動	地點
2023.9.20 (三) 2023 土木水利 國際論壇 <i>Global Challenges vs. Local Solutions: Infrastructure Development for the Future</i>	9:00-12:00	<b>2023 土木水利國際論壇</b> <b>2023 CICHE International Forum</b> Keynote Speeches (JSCE, KSCE, CICHE)	北科大 億光大樓 2F 感恩廳
	13:00-17:30 (三個分論壇)	TC-21 session: <i>Exploring the Synergy: Innovation and Transdisciplinary Approaches in DRR</i> (organized by JSCE) TC-26 session: <i>Impacts of Climate Change on Sustainability of Water Resources in Asian Region</i> (organized by ASCE) TC-29 session: <i>Network Construction and Joint Utilization of Large-Scale Experimental Facilities</i> (organized by KSCE) Future Leader Forum: <i>Frontier Innovative Technology in Civil Engineering</i> (organized by EA)	<b>2023 CICHE-JSCE the 5th Workshop</b>  <i>Civil Engineering on Green Energies</i>
	18:00-21:00	<b>桌遊之夜</b> 青年工程師及學生國際交流活動 (付費參加)	IEAT 會議中心
2023.9.21 (四) 50 周年 慶祝大會	9:00-12:00	<b>中國土木水利工程學會</b> <b>50 周年慶祝大會</b>	臺北國際會議中心 2F (TICC)
	13:00-16:45	<b>我國公共建設報告及有獎徵答</b> 鐵路、高鐵、捷運、公路、高速公路、水利、自來水、電力、風電	
	17:00-20:30	<b>大會晚宴</b> (付費參加)	臺北國際會議中心 3F (TICC)
2023.9.22 (五) 工程參訪	8:30-17:30	<b>工程參訪</b> 淡江大橋 + 環狀線-十四張站南機廠 + 捷運三鶯線 + 新北美術館 (付費參加)	

國際論壇、慶祝活動、公共建設報告免費參加 (桌遊之夜、大會晚宴、工程參訪付費參加)

◎ 報名網址：<https://reurl.cc/p68kn4> ◎ 學會官網：[www.ciche.org.tw](http://www.ciche.org.tw) 連絡電話：02-2392 6325



## 中國土木水利工程學會 50 周年慶大會議程

上午 9:00-12:00 50 周年慶大會

(台北國際會議中心 2F)

時間	議程
09:00-10:00	報到與聯誼交流、我國公共工程建設回顧展覽
10:00	大會開始
10:00-10:05	土木水利學會 50 周年開幕影片
10:05-10:15	理事長致詞
10:15-10:35	貴賓致詞
10:35-10:45	籌備委員會報告
10:45-10:55	50 周年系列活動報導
10:55-12:00	歡慶儀式 - 各外國學協會共同簽署合作協議書 - 全國各校聯合編撰土木通識教材啟用儀式 - 慶祝活動、切蛋糕

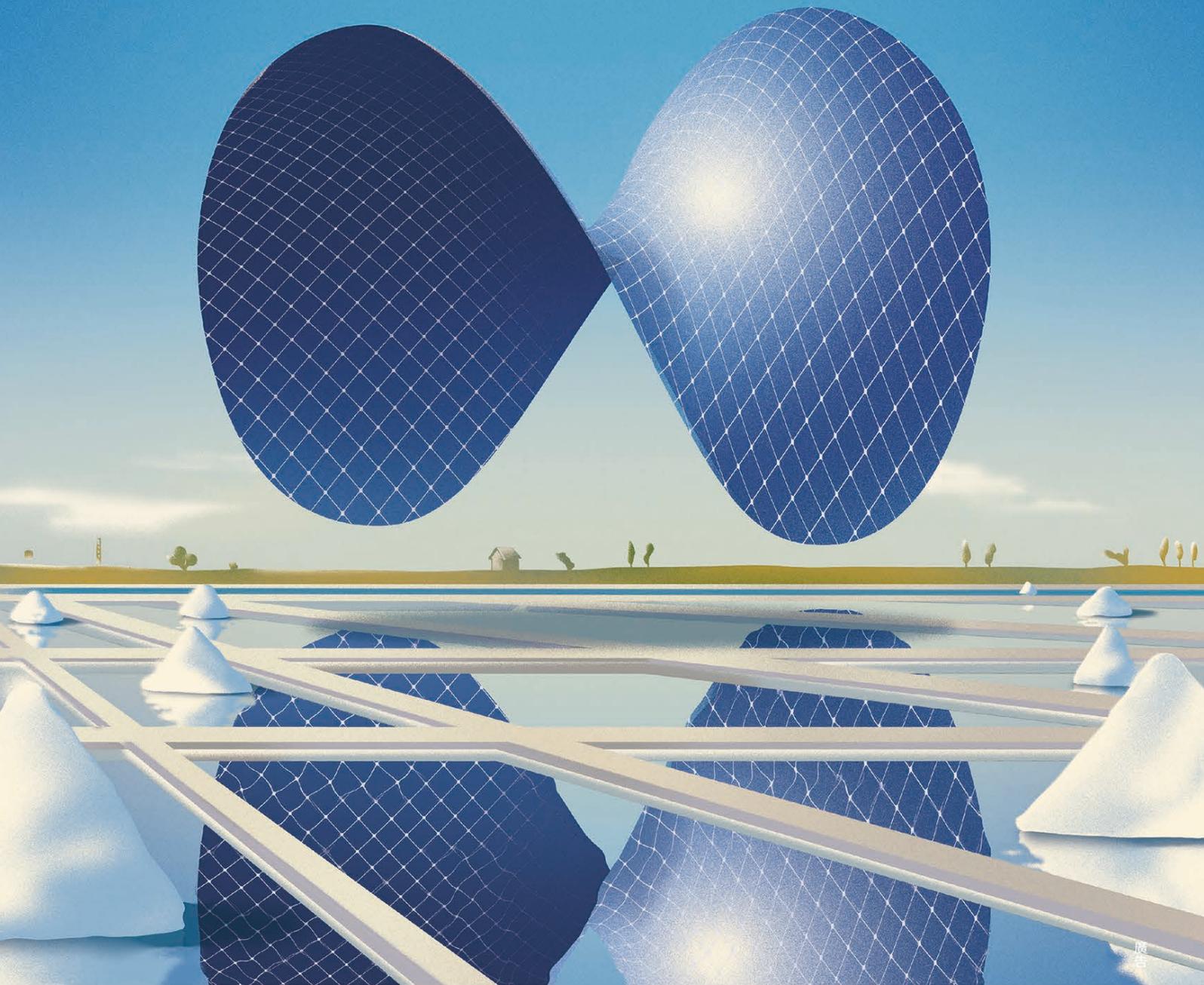
下午 13:00-16:45 我國公共工程建設回顧分享及有獎徵答

(台北國際會議中心 2F)

時間	議程	講者
13:00-13:30	報到	
13:30	研討會開始	
13:30-13:45	貴賓致詞	
13:45-14:00	鐵路工程回顧及分享	鐵道局
14:00-14:15	高速鐵路工程回顧及分享	高鐵公司
14:15-14:30	有獎徵答 及 中場休息	
14:30-14:45	捷運工程回顧及分享	台北市捷運工程局
14:45-15:00	公路工程回顧及分享	公路總局
15:00-15:15	有獎徵答 及 中場休息	
15:15-15:30	高速公路工程回顧及分享	高速公路局
15:30-15:45	水利工程回顧及分享	水利署
15:45-16:00	有獎徵答 及 中場休息	
16:00-16:15	自來水管線工程回顧及分享	自來水公司
16:15-16:30	電力工程回顧及分享	台電公司
16:30-16:45	有獎徵答	
16:45	閉幕	

下午 17:00-20:30 大會交流及晚宴

(台北國際會議中心 3F)



📍 台南鹽田

# INFINITY LIGHT

為台灣爭光

台南鹽田光電站利用將軍、七股區廢棄的214公頃鹽灘地，使用48萬片高效率太陽能板，打造裝置容量達150MW的光電站，同時保持既有鹽灘地滯洪功能，平均每年可發出2億度電，提供近5萬個家庭全年用電，每年更有超過10萬公噸減碳效益。