



# 海域 反射震測影像 於 鑽探場址調查 之應用

張頌平／國立成功大學地球科學系 助理教授

許鶴瀚／國立臺灣大學海洋研究所 助理教授

張日新／國立臺灣大學海洋研究所 助理教授

林亮甫／國立臺灣大學海洋中心 博士後研究員

劉家瑄／國立臺灣大學海洋中心 名譽教授

陳姿婷／Applied Ocean Physics and Engineering, Woods Hole Oceanographic Institution, USA 博士後研究員

近期臺灣海峽許多海域的土木工程，收集了密度高的地球物理探勘資料。其中反射震測影像在解析地層側向延續和岩層聲學特徵上，具有許多優勢。本文利用玄武岩層的反射震測特徵，結合地質鑽井和地工現地試驗等參數，綜合建立區域性的地下空間分佈，並用於場址調查和地質模型上。用以強調海域的土木工程如整合地球物理探勘之結果，可在海域工程上大幅增加風險評估的準確性。

## 前言

近年來，臺灣海峽大量設置離岸風場，如何在安裝風機和纜線之前，精準評估場址的地下地質成為重要的課題。目前興建的風場中，水下文化資產調查規範收集地質鑽探和地球物理探勘等資料，成為了建立地質模型重要的資料來源<sup>[1]</sup>。地球物理探勘提供場址地下地層的各種物性，反射震測資料解析海床下地層反射面的幾何樣貌。利用二維或三維的施測方式，有效提供各岩層空間分布的重要基礎資訊<sup>[2]</sup>。如進一步結合地質鑽探和現地試驗資料，更可將井位的參數側向延伸至場址內的其他位置，推算出地質模型內的各地層的地工參數。海域的石油工程和近期臺灣海峽興建的離岸風力發電廠址皆廣泛應用在場址調查和建置地質模型上<sup>[3-5]</sup>。本研究以最近臺灣海峽海域進行的反射震測的地質調查為例，說明地球物理探勘在地質調查和場址調查上的重要性。

## 海域反射震測施作方法

海域地質調查使用的反射震測為主動聲源，聲波傳播至具聲學阻抗差異的介質邊界，隨即產生反射波傳回海面上的接收器。因此在震測剖面上可描繪出隨深度的地質構造。依不同頻率波段提供不同尺度的解析能力，本研究展示高頻的火花式放電和低頻的空氣槍（圖1）。其中火花式放電的理論解析度可達到達到1公尺<sup>[6]</sup>，在海域鑽探達百公尺的工程很適合使用此聲源。接收器可由數量分成單頻道或多頻道反射震測，或是增加多條接收器形成三維震測，如P-cable。皆是透過增加接收器數量，或是接收三維空間的反射波，更準確掌握地下地層的特徵。經過後續的資料處理，包含聲源和接收器的定位、濾波、消除雜訊、同反射點訊號疊加等，可將地下地層的幾何與聲學特徵描繪出來。

## 反射震測資料於臺灣海峽海域之應用

臺灣海峽在彰雲沙脊區域水深淺於 50 公尺深，因此遠離海岸線仍然適合成為離岸風力發電的場址。該區域靠近澎湖的海域在風機安裝基樁的深度內，會在淺層

地層中鑽遇玄武岩層，厚度估計可達數十米不等<sup>[7]</sup>，可與澎湖群島上陸域的玄武岩層做對比（圖 1）。而根據岩漿噴發和入侵的特性，該岩層侷限分佈在部分區域，水平連續性不佳，導致場址內地層物質不均向性高。

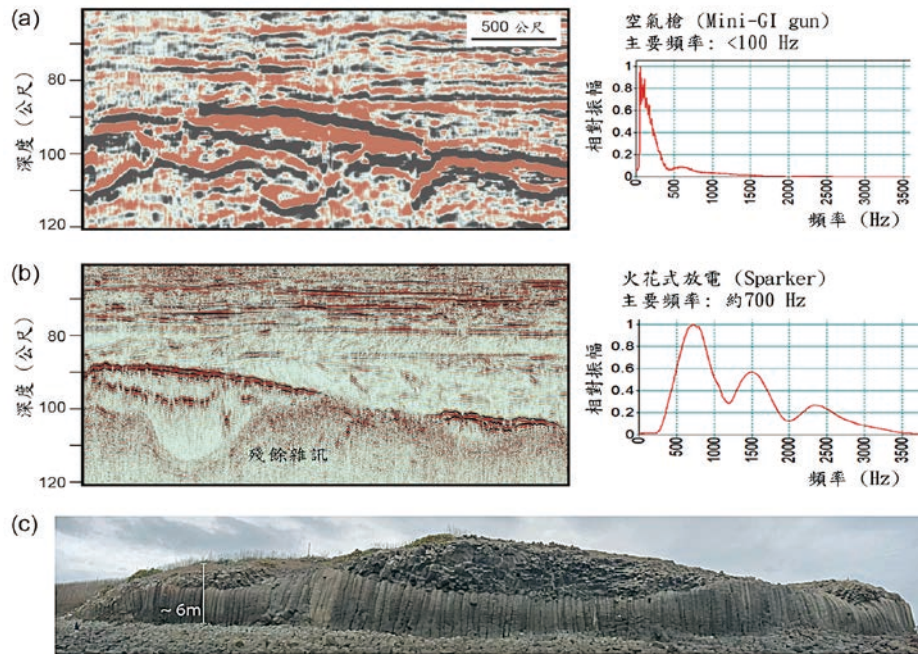


圖 1 不同聲源之反射震測影像，(a) 空氣槍與 (b) 火花式放電的剖面 and 對應之主要頻率；(c) 澎湖群島上陸域出露至地表之玄武岩層。

為了有效的獲得玄武岩層的空間分布，本研究使用測線間距密的二維震測資料進行評估。利用玄武岩層傳播波速和密度高的特性，在反射震測影像中解析該岩層頂部和底部兩個強振幅的反射面，分別為圖 2 (b) 紅色色塊的上界和下界。相同反射層往剖面的東側延伸，此兩個反射面則會逐漸尖滅。在強振幅反射面的深度，地質鑽井和 CPT 圓錐貫入試驗的地工資料也有相同對應的試驗結果，取得玄武岩岩石。在兩振幅尖滅的位置，鑽井獲得受侵蝕風化的玄武岩礫石。另外在圖二最東側的井位，在相同反射層取得砂泥岩互層的岩層，並可對應至震測影像上弱振幅的反射層。確認有強振幅反射層出現的地方多為玄武岩層的位置

除了辨識玄武岩等堅硬地層之外，在建立地質模型也能起非常重要的資料來源。如覆蓋在玄武岩層之上的後期沈積物可大致依照震測相 (Seismic Facies) 區分成兩期地層 (圖 2(b))，分別為下層的大陸棚和上層的三角洲沉積物。顯示反射震測剖面可以很有效的掌握地下岩層的聲學特性，並且解析各地層的側向分

佈。能進一步將這些水平連續良好的地層分層套用至場址區域，並且搭配地質工程井取得的岩性資料，能建立各層序的岩性與現地試驗的各個參數。

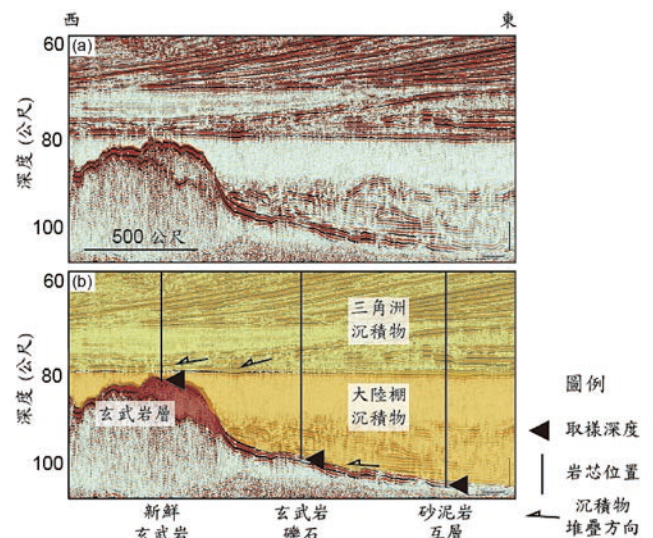


圖 2 火花式放電聲源之反射震測原始影像 (a) 和地質解釋 (b)。剖面中解釋出玄武岩層和後期覆蓋在上面的兩期沉積物。圖修改自<sup>[7]</sup>。



圖 3 經濟部地質調查所建置之反射震測影像資料庫。畫面截至離岸風地質與環境感知系統網站。

## 未來發展

臺灣因地體構造活躍，許多地質作用導致許多地層並非水平方式分布，導致地質的側向岩性不均性高，玄武岩即為一個例子。因此在建立地質模型時，除了使用地質鑽探和現地試驗建立的二維和三維柵狀剖面，可以結合反射震測剖面顯示的地下地層幾何樣貌，掌握鑽井之間的地層變化。且此資料皆為水下文化資產保存法規必要收集的資料，一同納入地質模型建置可減少地質模型內部的不確定因素。近期國內外更利用人工智慧演算法，將部分區域的地工參數套入至整個場址，成為初始地質模型<sup>[8-10]</sup>。並在施工的過程中，隨時將新增的地質井更新約束此初始模型。

經濟部中央地質調查所於 2023 年，公開臺灣海峽海域震測資料與其他地質資訊的線上資料庫（圖 3）。在反射震測資料上有空氣槍和火花式放電等兩種聲源，將海域的地下地質資訊提供初步且珍貴的地質資訊。除了如玄武岩層等堅硬地層之外，如在鑽探階段發現未預期的地質條件不佳的場址，可在反射震測影像判釋為何種地層的深度以及反射特徵，並了解其側向延伸的範圍。將可有效的做出風險評估和場址調查等多項事項，也建立地質模型確立各層序之空間分布。

## 結論

反射震測資料有效的提供地下岩層的側向分佈，在地質鑽井之間的岩層延伸，成為有利提供地下地質的重要資料。本文以臺灣海峽為例，利用玄武岩層的

聲學特徵和反射層分佈，有效的辨識出場址內的玄武岩層分佈。成為風機站位選擇和建立地質模型等方面，皆提供重要的地質數據。未來可以與地工現地試驗和地質鑽井結合，大幅提升地質模型中的準確性。

## 參考文獻

1. 吳章諾、丁哲庸（2022），離岸風力發電場址地質調查方法適用性初探與三維地質模型建置案例介紹，大地技師線上期刊，第 25 期。
2. 謝欣崧、許鶴瀚、楊懿丞、盧翊維、陳姿婷、張日新、林哲銓、邱協棟、劉家瑄（2018），海洋地質及球物理調查於離岸風電場址評估之應用，海洋及水下科技季刊，第 42-47 頁。
3. 邱協棟、馬玉芳、許鶴瀚、陳姿婷、劉家瑄、姚大鈞（2015），高解析地層剖面調查於填海造陸工程之應用，海洋及水下科技季刊，第 25 卷，第 2 期，第 16-21 頁。
4. 連誌航、許鶴瀚、張頌平、劉家瑄（2022），高精度海床與震測資料探討南觀音凹陷淺層流體移棲特徵，2022 臺灣地球科學聯合學術研討會，臺北南港，6 月 7~9 日。
5. 曾湧翔（2021），彰濱外海高解析度震測地層及流體特徵分析。國立臺灣大學理學院海洋研究所，碩士論文，共 106 頁。
6. 楊懿丞、許鶴瀚、吳俊鼎、溫修敏、陳姿婷、連政佳、洪瑋廷、劉家瑄（2020），地形與震測地層剖面分析於離岸風電場址調查之應用，臺灣能源期刊，第七卷，第三期，第 253-268 頁。
7. 張頌平、林亮甫、Arif Mirza、劉家瑄、謝獻祥、許鶴瀚（2021），臺灣海峽玄武岩之震測特性初探，2021 地質物年會暨學術研討會，臺北，11 月 22~24 日。
8. Han, W., Lu, Y., and Lo, S. (2020). Seismic prediction of soil distribution for the Chang-Bin offshore wind farm in the Taiwan Strait. Interpretation, 8(4), T727-T737.
9. Vardy, M.E., Clare, M.A., Forsberg, C.F. and Dix, J.K. 2018, Seismic Inversion for Site Characterisation: When, Where and Why Should We Use It, OTC-28730-MS.
10. Klinkvort, R.T., Sauvin, G., Forsberg, C.F. and Vanneste, M. (2019), Integrated ground modelling from a geotechnical perspective, 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Austin, Texas, USA.