



米崙斷層鑽井計畫

— 跨米崙斷層帶 地震監測系統

林彥宇／國立中央大學地球科學系、地震災害鍊風險評估及管理研究中心 助理教授

郭俊翔／國立中央大學地球科學系、地震災害鍊風險評估及管理研究中心 助理教授

2018年花蓮地震造成嚴重地震災害，許多前人的研究顯示，此地震的滑移分布在多個斷層上，而主要造成破壞為花蓮市附近之美濃斷層滑移產生之速度脈衝波。在中研院關鍵突破計畫及教育部高教深耕計畫經費支持下，「花蓮米崙斷層科學鑽探：地震活動及前兆井下監測計畫」於2021年起，開始於米崙斷層北段花蓮七星潭區域進行科學鑽探。此鑽探計畫於米崙斷層之上盤及下盤各鑽700公尺（井A）及500公尺（井B）之科學探測井。本計畫於井A、井B中及地面佈設跨斷層帶之地震監測系統，內含光纖地震儀與井下地震儀，是世界首例之「跨米崙斷層帶地震監測系統」，開啟地震觀測「光」世代。本計畫主要監測目標為米崙斷層構造探索、米崙斷層的複癒行為、斷層帶微地震震源特性、花蓮外海區域強地動特性及場址效應。

前言

2018年2月6日15時50分41.6秒(UTC)，花蓮北部外海發生芮氏規模6.3之地震。此次地震雖然僅為中型地震，但卻重創花蓮市區，造成17人罹難、291人受傷、5棟大樓倒塌及多棟房舍受損。許多前人的研究顯示，2018花蓮地震的滑移分布在多個斷層上，其主要的滑移區域(asperity)位於深度8~10公里傾角向西之斷層面，部分滑移分布於淺部之米崙斷層上^[1-4]，然淺部之米崙斷層同震位移造成之速度脈衝波(pulse-like velocity ground motion)最大振幅為~150 cm/s，為造成花蓮市重大災情的罪魁禍首^[5,6]。雖然米崙斷層本身錯動產生的地震矩(seismic moment)僅佔2018花蓮地震之25%，相當一個規模5.9之地震，卻主導了整個花蓮市地災情^[6]。相似的情形發生於1951年M7.3花蓮地震，地震震央亦為花蓮外海且接近2018年花蓮地震震央，當時米崙斷層同震位移2公尺(林朝棨^[7]；中央地質調查所^[8])並造成85人傷亡。此歷史地震資料顯示，米崙斷層有潛力發生比2018年花蓮地震更大

之同震位移及產生振幅更大的速度脈衝地動^[6]，對於目前人口密集之花蓮市勢必會造成重大災損，急需列為國家防災的重點區域。

在中研院關鍵突破計畫及教育部高教深耕計畫經費支持下，由馬國鳳老師帶領的「花蓮米崙斷層科學鑽探：地震活動及前兆井下監測計畫」(Milun Fault Drilling and All-inclusive Sensing project，簡稱MiDAS計畫)於2021年起，開始於米崙斷層北段花蓮七星潭區域進行科學鑽探。此鑽探計畫於米崙斷層之上盤及下盤各鑽700公尺(井A)及500公尺(井B)之科學探測井，並於井A旁30公尺處，加鑽700公尺深之井C，用以觀測斷層帶的水氣變化。本計畫於井A、井B中及地面佈設跨斷層帶之地震監測系統，內含光纖地震儀與井下地震儀，是世界首例之「跨米崙斷層帶地震監測系統」，開啟地震觀測「光」世代。圖1為MiDAS地震觀測系統地表觀測設置位置，而圖2為東西向剖面圖，其中內含9部井下地震儀及總長7,500公尺光纖地震儀。

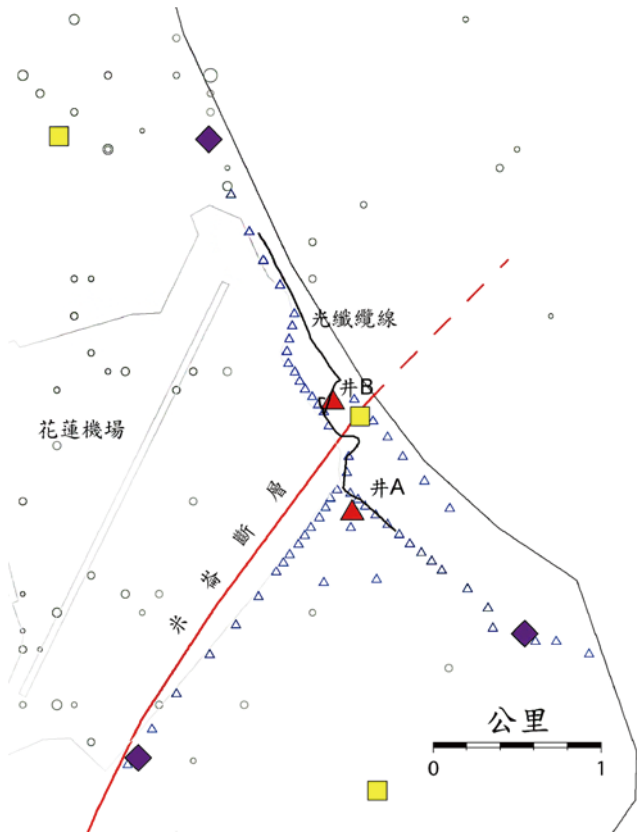


圖 1 跨米崙斷層帶地震監測系統地表設置圖。紅色三角形為井場位置；紫色菱形為地表短週期地震儀；黃色方框為地表強震儀；黑色粗線為光纖地震儀纜線；藍色三角形為臨時地震站 Smartsolo 位置。灰色空心圓圈為背景地震活動。

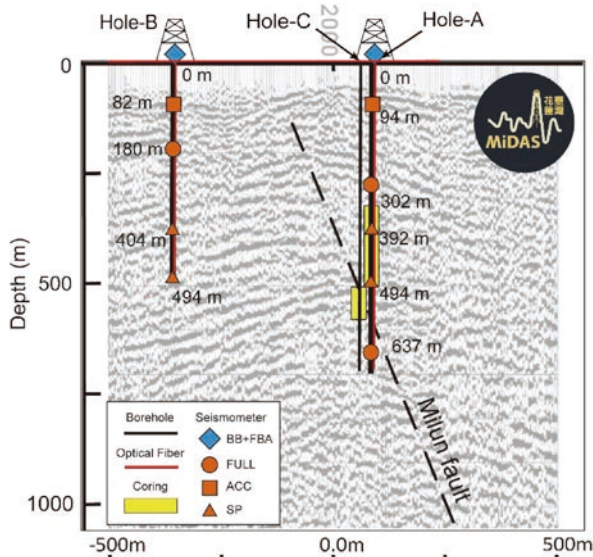


圖 2 跨米崙斷層帶地震監測系統垂直剖面圖。黑色粗線為米崙鑽井；橘色符號表井下地震儀儀器位置；三角形表短週期地震儀 (SP)；方型代表強震儀 (ACC)；圓圈代表全頻段儀器 (FULL)；紅色線為光纖地震儀系統配置；黃色區域為鑽井取岩心深度位置；藍色菱形為地表強震儀 (FBA) 和寬頻地震儀 (BB)。背景震測剖面修改自張文彥等人^[9]之成果。

光纖地震儀及井下地震儀配置

整體跨斷層帶地震監測系統已經於 2022 年 11 月中全部設置完畢。光纖地震儀量測光纖沿著傳輸方向之動態應變率 (dynamic strain-rate) 隨時間的變化，其中每 4 公尺一個應變率記錄節點，7,500 公尺長的光纖線纜則提供 1,875 個記錄節點，為跨斷層帶提供超高空間解析度的資訊。其中光纖線纜於地表沿馬路或步道佈設，而井下則安裝於套管 (casing) 外，由地表佈設至地底並繞回至地表以接續其他光纖線纜。其中一些應變率節點與井下地震儀測站共站，則可以比較應變率與地動速度值的轉換方式，並提供井下深度校準。光纖地震儀的記錄器採用英國 Silixa 公司的 iDAS (intelligent Distributed Acoustic Sensor) 設備，其空間分辨率可達 10^{-12} 公尺，可量測非常精準且細小之變化。目前時間取樣率為每秒 1,000 資料點。而井下地震儀部分，本計畫於上盤井 A 中配置兩部全頻段儀器 (Full band sensor set) 於深度 302 及 637 公尺，其中包含三分量光學加速度儀 (optical accelerometer) 及 4.5 Hz 短週期地震儀 (short-period borehole seismometer)；兩部 4.5 Hz 短週期儀器於深度 392 及 494 公尺，其中位於 494 公尺之短週期地震儀位於米崙斷層帶中；一部光學加速度儀於 94 公尺。下盤井 B 中，裝設兩部 4.5 Hz 短週期儀器於深度 404 及 494 公尺；一部全頻段地震儀於 180 公尺及一部加速度儀於 82 公尺。記錄器採用 REF TEK Wrangler，以連續紀錄的方式運行，資料取樣率與光纖地震儀一致為每秒 1,000 資料點。圖 3 為發生於井場附近之規模 3.8 的光纖地震儀應變率與井下地震儀加速度紀錄比較圖，圖中可以看到光纖地震儀的高頻儀器雜訊較井下地震儀紀錄大，但應變率與地動加速度於 P 波的相位非常類似但極性相反。

米崙斷層構造探索及微地震監測

本計畫主要監測目標為米崙斷層構造探索、斷層帶微地震震源特性及花蓮外海區域強地動特性。目前米崙斷層系統之構造仍有許多的討論，但利用「跨米崙斷層帶地震監測系統」配合震測 VSP (Vertical Seismic Profiling) 及區域地震訊號，則有機會瞭解米崙斷層系統之形貌、米崙斷層與外海斷層之聯繫與中央山脈斷層之位置等議題。此外，透過不同時間的施測，可解

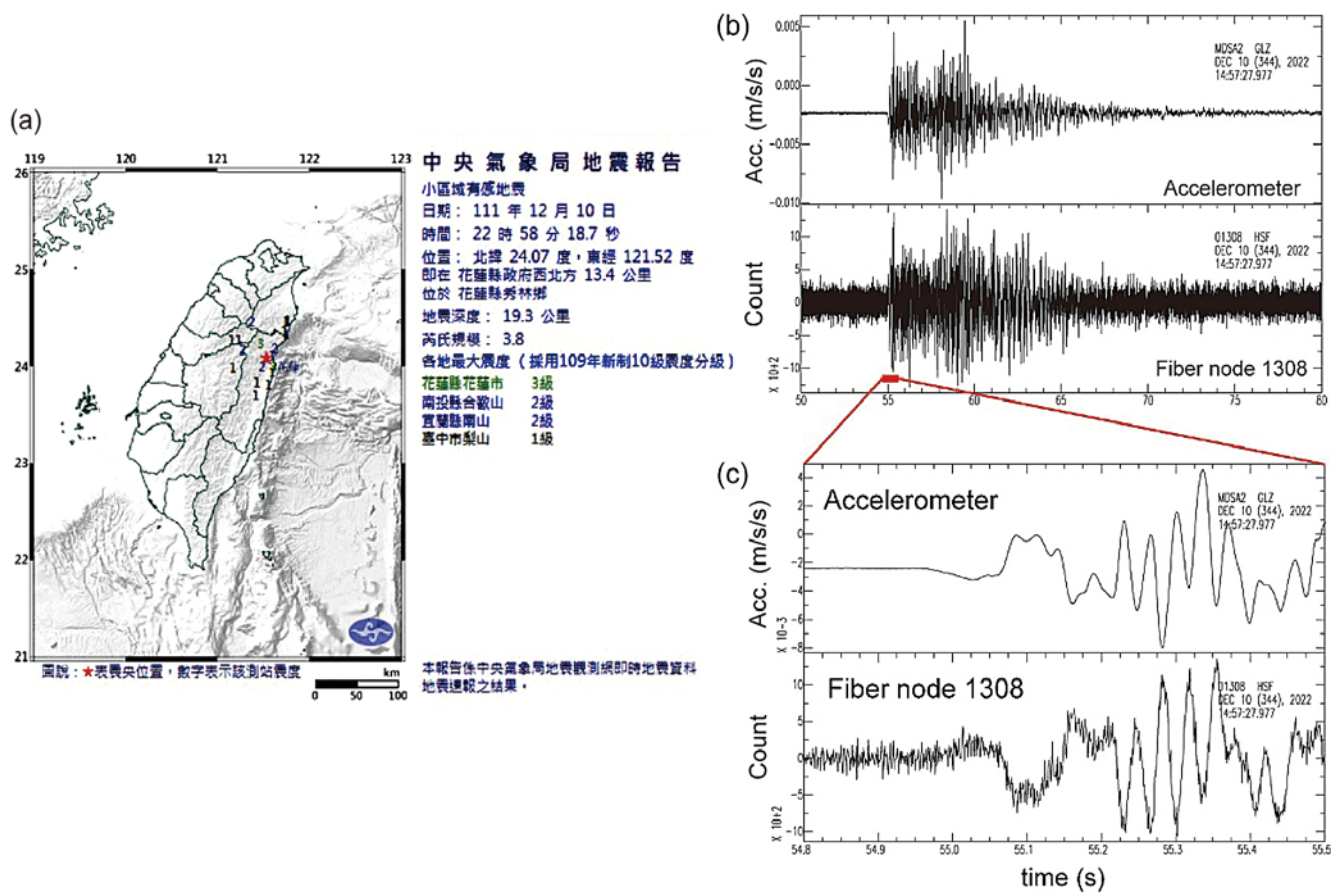


圖 3 2022 年 12 月 10 日規模 3.8 地震之 (a) 氣象局地震報告、(b) 井下強震儀及光纖地震儀 Node 1308 紀錄及 (c) 其 P 波波形。

析米崙斷速度構造隨時間變化，用以瞭解米崙斷層的複癒情況，這有幫助我們瞭解米崙斷層之物理特性。圖 4 為「跨米崙斷層帶地震監測系統」包覆米崙斷層斷層之三維透視圖。

此外本計畫將利用「跨米崙斷層帶地震監測系統」監測活動週期短之米崙斷層帶上的微地震活動，這些地震因振幅太小無法被地表地震站所記錄到。這些微地震活動隨時間的變化為米崙斷層即時的活動資訊，而微地震活動的區域與米崙斷層的破碎帶亦有關聯，這些監測可研究重複滑移週期（recurrence interval）僅有 60 年的米崙斷層，在間震期是否有特殊物理意義的微地震活動及可能的地震前兆模式。此外，透過「跨米崙斷層帶地震監測系統」監測區域地震，也可瞭解米崙斷層與深部其他斷層的連結及外海斷層之連結，這些資訊可幫助理解所謂 2018 年花蓮地震發生時，許多專家稱米崙斷層為「被動滑移」之物理意義。另外，由於花蓮地區及外海地震活動頻繁，「跨米崙斷層

帶地震監測系統」對於淺層地震波傳遞時，因場址效應放大的行為有非常高空間解析度的波形紀錄，這可幫助地震學家更瞭解淺層低速帶對於地震波振幅放大的因子及特性，對地震工程領域研究甚有幫助。

「跨米崙斷層帶地震監測系統」內含高空間解析度之光纖地震儀系統及傳統之井下地震儀，與過去傳統之地表地震網有更高的空間及時間解析度，勢必能將臺灣地震學研究推向另一個新的境界，在此感謝 MiDAS 團隊努力不懈的付出。

參考文獻

- Huang, M.H. and Huang, H.H. (2018). The complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in east Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 45(24), 13-249.
- Lee, S.J., Lin, T.C., Liu, T.Y., and Wong, T.P. (2019). Fault to fault jumping rupture of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in eastern Taiwan. *Seismological Research Letters*, 90(1), 30-39.
- Lo, Y.C., Yue, H., Sun, J., Zhao, L., and Li, M. (2019). The 2018 Mw6. 4 Hualien earthquake: Dynamic slip partitioning reveals the spatial transition from mountain building to subduction. *Earth and*

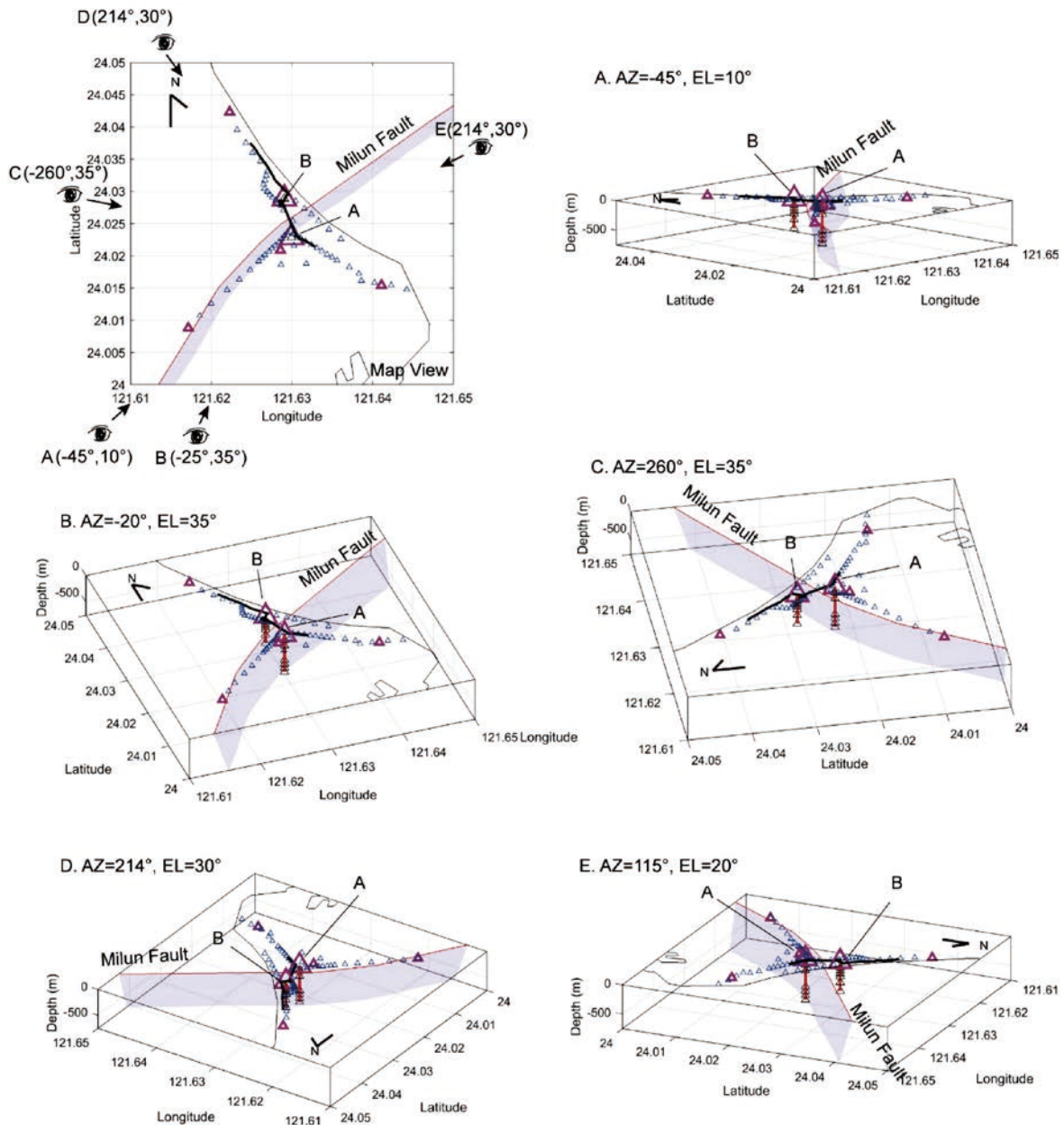


圖 4 地震測站及米崙斷層三維示意圖。米崙斷層三維模型（紫色區塊）取自台灣地震模型（Taiwan Earthquake Model）2020 年版^[10]。紫色大型三角形為米崙鑽井井場 A 及 B；紫色小三角形為地表短週期測站；紅色線及黑色線為光纖地震儀系統於井下及地表位置；黑色三角形為井下地震儀；藍色三角形為地表臨時 Smartsolo 測站；黑色細線為海岸線。

Planetary Science Letters, 524, 115729.

4. Wen, Y.Y., Wen, S., Lee, Y.H., and Ching, K.E. (2019). The kinematic source analysis for 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan earthquake. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 30, 377-387.
5. Kuo Chen, H., Guan, Z.K., Sun, W.F., Jhong, P.Y., and Brown, D. (2019). Aftershock sequence of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in eastern Taiwan from a dense seismic array data set. *Seismological Research Letters*, 90(1), 60-67.
6. Lin, Y.Y., Kanamori, H., Zhan, Z., Ma, K.F., and Yeh, T.Y. (2020). Modelling of pulse-like velocity ground motion during the 2018 M w 6.3 Hualien earthquake, Taiwan. *Geophysical Journal International*,

223(1), 348-365.

7. 林朝榮 (1962)，花蓮地方的第四系—臺灣之第四紀研究（三）。國家長期發展科學委員會研究報告，共 42 頁。
8. 中央地質調查所 (2018)，20180206 花蓮地震地質調查報告。
9. 張文彥、王乾盈、馬國鳳 (2020)，2018 花蓮地震米崙斷層震測調查、地震觀測及台灣東部地震研究中心、前兆觀測園區維運計畫（1/3）期中進度報告，共 57 頁。
10. Shyu, J.B.H., Yin, Y.H., Chen, C.H., Chuang, Y.R., and Liu, S.C. (2020). Updates to the on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 31(4).