

集集地震序列之震源參數分析

中央研究院地球科學研究所副研究員 高 弘

一、簡介

1999 年 9 月 21 日凌晨 1 點 47 分發生了台灣地區自建立現代化地震觀測網以來破壞力最大、生命財產損失最嚴重的一次地震。這次地震後來被中央氣象局地震測報中心命名為「921 集集地震」，其震央位於北緯 $23.86 \pm 0.01^\circ$ ，東經 $120.81 \pm 0.01^\circ$ [1]，地震的破裂面不但露出地表，而且綿延南北數十公里，伴隨地震所產生的地表位移高達數公尺，其所產生之地震波在全球各地的地震觀測站均清晰可見。

921 集集地震的發生固然帶來了巨大災害，但同時也產生了許多寶貴的地球物理及地質資料，提供地球科學及許多其它學門的學者一個嶄新的機會進行與地震相關的各項研究，並重新檢視與探討現存各種理論及模型的適用性。尤其是在過去的十年中，我國地震學界不遺餘力地提昇地震觀測的各項設備與能力，並積極建立快速的地震測報系統[2]。也正由於過去這些不為人知的努力，地震學界於本次地震期間收集到了空前豐富的資料，可以預見在未來的幾年內，與 921 集集地震相關的各項研究成果將大量出現。

中央研究院地球科學研究所自 1992 年起與國內外數個學術單位開始合作籌建「台灣地區寬頻地震觀測網」(Broadband Array in Taiwan for Seismology, 簡稱 BATS)。BATS 的建立是以多方面的學術研究為主要的考量，採用目前地震觀測設備中最先進的寬頻地震儀，能同時將各種週期的地動型態以數位方式記錄下來。寬頻地震站的設站條件非常嚴格，其目的在盡量降低背景噪音，提高地震信號之辨識能力。此外「世界地震網」(Global Seismic Network, 簡稱 GSN) 分佈於世界各地之地震站也於 1990 年代初期開始陸續換裝寬頻地震儀，其資料可透過電腦網路下載，滿足各地學者之研究需求。

本文之目的即在於介紹利用 GSN 及 BATS 所收集之寬頻地震資料求得 921 集集地震序列中主震及餘震之震源參數的相關研究結果。

二、集集地震主震的震源參數

我們利用 GSN 分佈在世界各地的地震站所收集的地震波形來分析地震主震的震源參數。基本原理是利用波動理論計算理論合成波形，再與觀測波形作比對，根據其間的差異重複修正震源參數，當達到理論合成波形與觀測波形的最佳擬合程度時，即停止計算。關於資料處理及研究方法的細節，讀者可參考相關的文獻[3,4]。

主震的波形反演結果顯示於圖 1，圖中理論合成波形(虛線)與觀測波形(實線)相當一致，地震斷層面解為 $18 \pm 13^\circ$ (strike), $19 \pm 5^\circ$ (dip), $80 \pm 14^\circ$ (rake)，呈現標準的低角度逆衝斷層型態，滑移方向為 $N60^\circ W$ ，與菲律賓海板塊相對歐亞板塊的運動方向幾乎一致，平均震源深度為 12 公里，震源釋放之地震矩(seismic moment)為 $17.7 \pm 0.4 \times 10^{19}$ N-m，相當於規模(M_w) 7.5 之強震。

從反演所得之震源時間函數(source time function)可以清楚看到主震巨大的地震矩並非均勻地釋放，而是呈現至少 5 個高峰，其中最早的一個其釋放之能量也最小，其後逐漸加大，第三及第四個子震則達到最大，從各高峰的分布可得各子震分別發生於初震之後 4.6 秒、11.1 秒、14.6 秒、及 22.6 秒。反演結果顯示，初震的震源機制解中包含少量的走向滑移分量。相對於這個初震，之後的第二、三、四、五子震分別發生於其北方 21、24、33、44 公里處，方位則分佈於 $N11^\circ E$ 及 $N50^\circ E$ 之間。其中較大的第三、四、五子震之震源機制解均為標準的低角度逆衝斷層，第二個子震的震源機制解則界於初震與第三個子震的結果之間。

此外從各子震的震源機制解也可看出斷層面的方位(strike)有逐漸順時針轉向的趨勢。到了最後一個子震時，其旋轉量已達 90° 之多，這個結果與野外的構造地質調查不謀而合。

三、集集地震餘震序列的震源參數

與主震的震源參數研究相較之下，集集地震餘震序列的震源參數則大多係利用 BATS 的

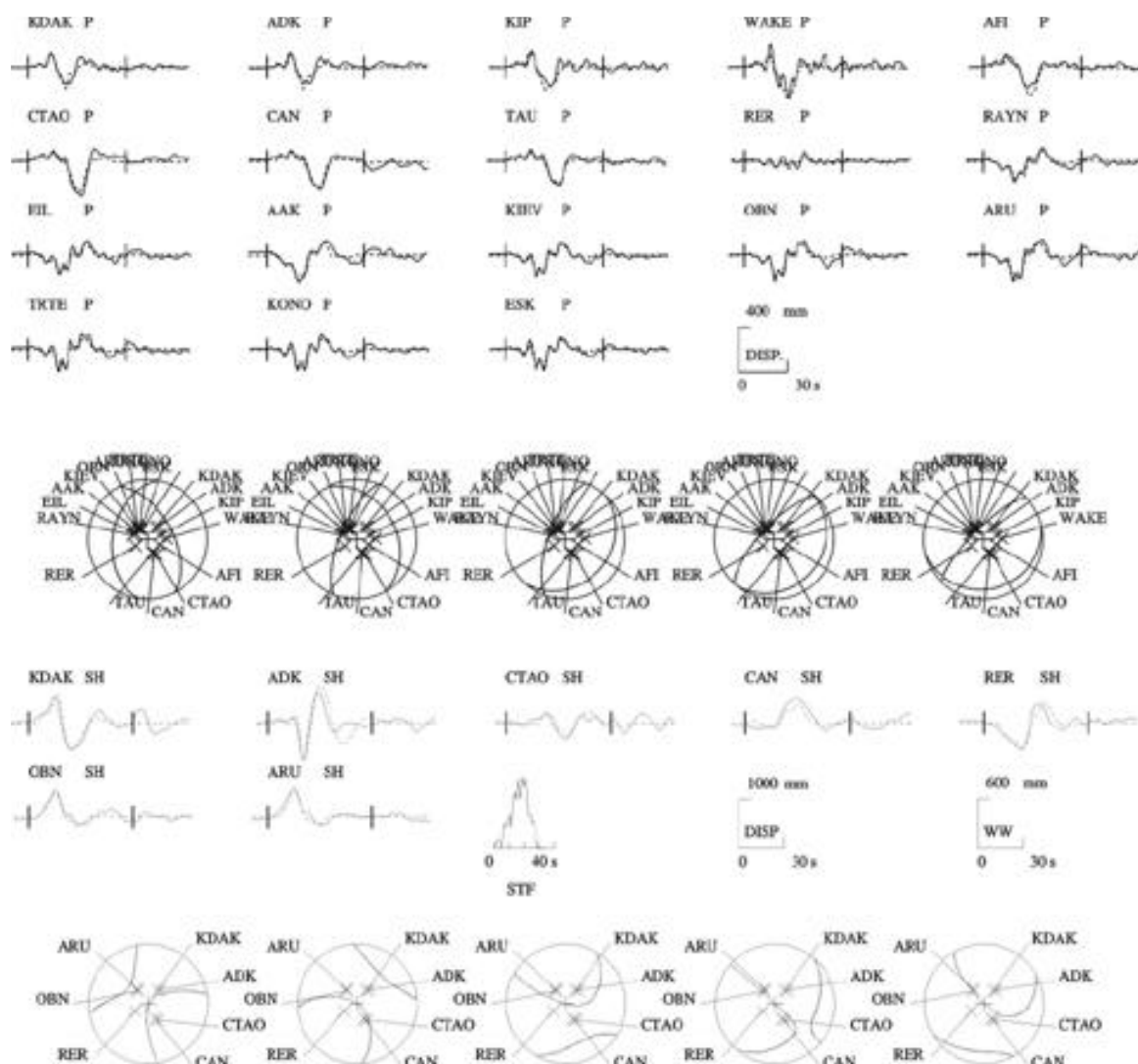


圖 1 利用 GSN 寬頻地震波形反演集集地震主震之震源參數的結果。圖中實線為觀測波形，虛線則為理論合成波形，上半部為反演使用之 P 波位移波形；下半部為 SH 波波形，其中 ADK 與 CTAO 兩站因資料處理的需要將寬頻地震資料轉換為 WWSSN 長週期波形(WW)，震源時間函數以 STF 標示，震源機制解以下半球投影表示。其結果為標準的低角度逆衝斷層，平均震源深度為 12 公里，震源釋放之地震矩 (seismic moment) 高達 $17.7 \pm 0.4 \times 10^{19}$ N-m，震源時間函數中有 5 個明顯的高峰，表示主震係由至少 5 個子震所組成。

寬頻地震波形資料反演求得。從反演理論上來看，二者並無不同之處，但資料的處理與分析及對不同參數的解析能力則相差較大，詳情請參考相關的文獻[4]。

圖 2 總結集集地震序列之震源參數的研究成果[5]。總體而言，集集地震餘震序列之分佈皆不在主震之震央所在，反而集中在其東側的中央山脈下方，部分餘震也發生於南、北兩側，整個餘震的分佈範圍超過一百公里。餘震序列所展現之震源機制解有幾個明顯的特徵：第一是發生於主震東側中央山脈下方的餘震均為東

西向或西北-東南向之壓縮性逆衝斷層，第二是發生於主震南側的餘震則大多呈走向滑移斷層，其最大壓縮軸與前述餘震群一致，即東西向或西北-東南向，但最大伸張軸則大多轉為南北向或東北-西南向。第三則是發生於主震北側的餘震，也是以走向滑移斷層為主，其中最大壓縮軸與伸張軸的分佈基本上與發生於主震南側的餘震之型態一致。在解釋上，應可視為車籠埔斷層向西逆衝於西部海岸平原之上的結果，南北兩端的走向滑移斷層基本上分別標示著這次車籠埔斷層系統南北的破裂邊界。

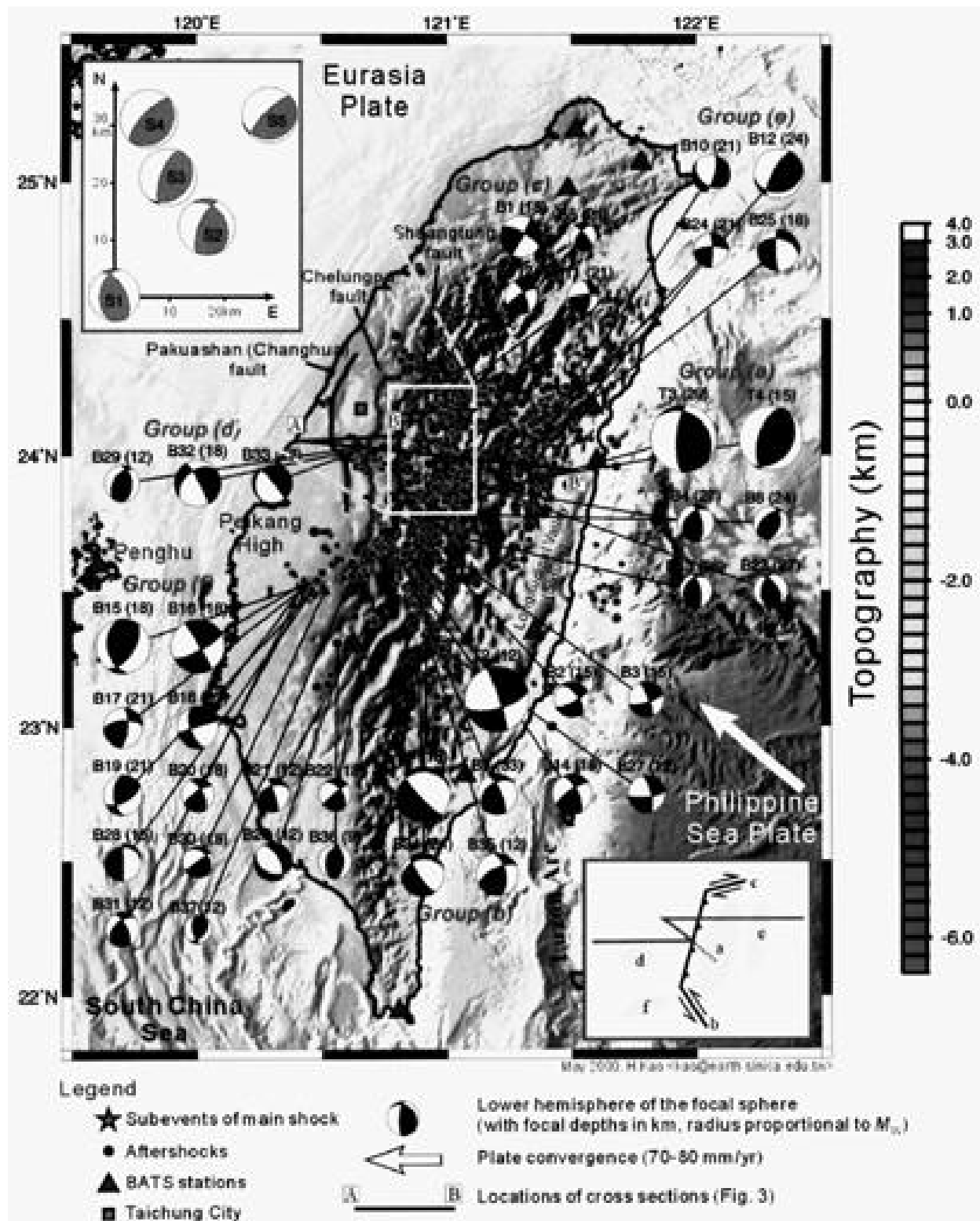


圖 2 利用寬頻地震波形反演集集地震序列之震源參數的總結。紅色三角形代表 BATS 各觀測站的位置。每個斷層面解上方的數字表示地震的編號，括弧內為深度。位在圖左上角的插圖則表示主震的震源特性，右下角的插圖則表示餘震分佈及震源機制的解釋示意圖。

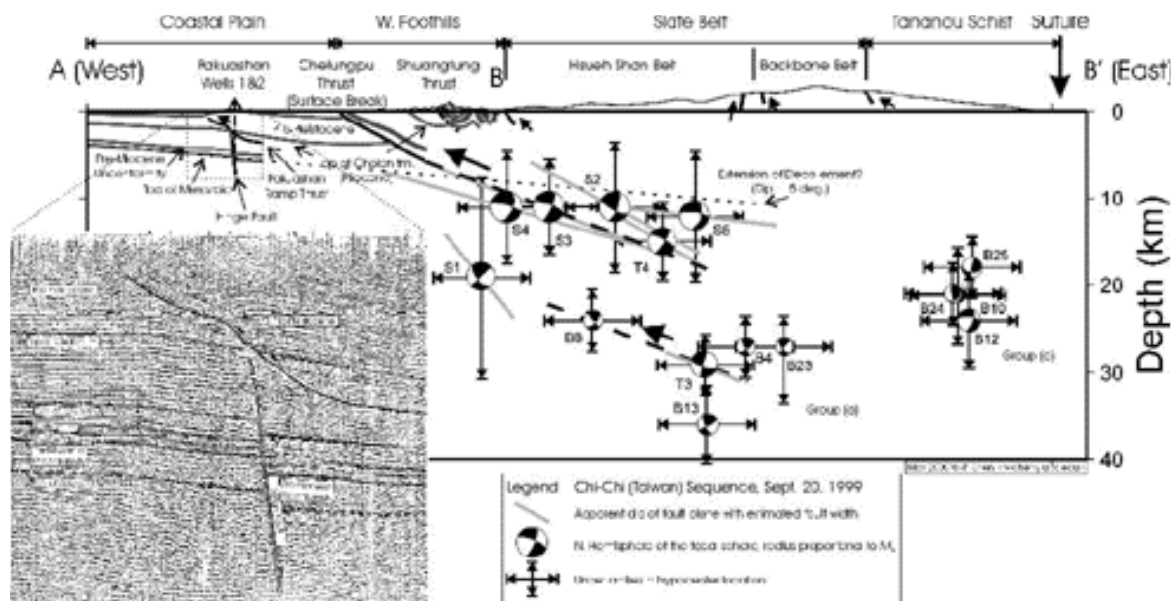


圖 3 顯示集集地震序列的東西向剖面圖。餘震的分佈呈現深、淺兩個發震構造，其中較淺的車籠埔斷層，由地表向下延伸至約 15 公里深處。而較深的一群則為新發現的發震構造，約略與車籠埔斷層平行，但在其下約 15 公里處，亦即地表之下 30 公里深處。

餘震序列中也有少數幾個正斷層，分別位於主震東側之餘震群的更東邊（即中央山脈東側下方）及主震西側之斷層下盤內，這些正斷層的發生代表整個台灣中部地區之應力場在集集大地震發生後都處在重新調整的階段，至於這種調整如何影響周遭的斷層系統？是否會局部提昇某些斷層系統發生地震的機率？則是值得更進一步深入探索的課題。

四、深、淺雙發震構造

集集地震序列的震源參數研究有一項重要的發現，即是我們找到明確的證據可以證實除了沿著發生主震的車籠埔斷層有大量的變形外，許多餘震是發生在更深的位置。換言之，集集地震序列的餘震分佈顯示出有深、淺兩個發震構造，而非單純的只有較淺之車籠埔斷層而已。從剖面圖（圖 3）可以看出，較淺之車籠埔斷層（即發生集集主震的構造）係一低角度逆衝斷層，由地表向下延伸至約 15 公里處。而較深的發震構造則約略與車籠埔斷層平行，但位居其下約 15 公里（即地表之下 30 公里

處）。將這個構造向西延伸，則恰好可連接至地表的彰化斷層，但是目前並沒足夠的證據及理論基礎可支持這種說法。無論如何，這個新發震構造的發現足以證明至少有深部地殼、甚至上部地函的變形參與集集地震序列的變形活動，至於其在整個台灣造山運動中所扮演的角色則有待後續的研究再詳加分析探討。

五、參考文獻

- [1] H. Kao, R.-Y. Chen and C.-H. Chang, *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **11**, 576 (2000).
- [2] Y.-M. Wu, T.-C. Shin, C.-C. Chen, Y.-B. Tsai, W.H.K. Lee and T.L. Teng, *Seismol. Res. Lett.*, **68**, 931 (1997).
- [3] H. Kao, and W.-P. Chen, *J. Geophys. Res.*, **96**, 443 (1991).
- [4] H. Kao, P.-R. Jian, K.-F. Ma, B.-S. Huang, and C.-C. Liu, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3619 (1998).
- [5] H. Kao, and W.-P. Chen, *Science*, **288**, 2346 (2000).