

# 集集大地震破裂行為

馬國鳳

中央大學地球科學系

1999年9月21日凌晨1時47分，當大家正在沉睡時，台灣發生百年來陸上規模最大地震，其震央位於南投集集一帶，震源深度10公里，芮氏地震規模7.3，全島震度都在3以上，震央區震度達到6以上。圖一為921大地震時，台灣各區域震度分佈圖。中央氣象局自1993年以來，陸續在全島台灣布置了強震站。921地震發生時雖然大部分的人都在沈睡中，但這些強震站就相當於我們的眼睛，真實的紀錄了地震發生時的情況。圖一中的震度分佈圖即以各強震站所記錄的最大加速度為基準，所繪製的震度圖。

圖一中亦將沿著車籠埔斷層沿線強震站所記錄的加速度波形繪出。此由南至北的加速度波形，表現地震發生時，沿斷層南部相對於北部有較高的加速度且含較高頻的訊號。圖二為沿斷層沿線及上盤強震站之加速度、速度及位移波形（以東西分量為例）相較於加速度的分佈趨勢；地震發生時所造成的速度及位移由南往北遞增，與加速度的分佈趨勢相反。在近斷層北緣的兩個測站TCU052及TCU068，記錄了總速度及位移高達3 4.5公尺/秒及12公尺，此為世界自有地震觀測以來，所記錄的最大速度及位移值。但幸運的是，此大位移及速度，在此所在區域並無帶來重大災害，其災害大都限於沿斷層上盤的區域由於錯移所造成，並無太多加速度震動造成的災害。但也可能由於其較長週期訊號的特性，其鄰近附近有較高的大樓倒塌。此加速度、速度及位移的分佈特性及世界記錄的高速度及位移值，配合台灣高品質、高密度的強震站分佈，使得921地震的破裂特性引起世界地震界的注意及好奇。921地震提供世界地震界瞭解大地震（ $M>7$ ）破裂特性的重要機會。本人及相關研究人員利用高品質的強震資料作分析及反演，希望瞭解921地震發生時的破裂力學特性及得出斷層面之真實錯動分佈，並探討大地震破裂時之可能物理動力行為。

921集集大地震在車籠埔斷層沿線產生地表位移。車籠埔斷層，從南投縣的桶頭開始，向北經過竹山、名間、南投、中興新村、草屯、霧峰(穿過市區)、到豐原，過了豐原後向東彎了70度，轉而切過石岡、過大甲溪形成現今世界聞名的地震瀑布、再過大安溪，切入卓蘭鎮裡的內灣，全長估計約100公里。我們利用全台約30部強震站波形，反演出地震發生時車籠埔斷層面上之位移錯動分佈情形，如圖三所示。此位移錯動分佈為車籠埔斷層地平面以下傾角向東29度之斷層面。我們將斷層沿著其走向分為三段：西南向、南北向、及東北向。圖三中，顏色表示其位移錯動量，箭頭表示其滑移向量。由此分佈可知地震發生時，地震錯動在東北方轉折時，地震沿著轉折軸往上滑移，並造成大量位移。使得豐原、東勢一帶產生大量位移，造成埤豐橋及石崗壩的毀壞。造成此現象的機制，與斷層轉折所造成的幾何效應及其破裂時之物理動力因素（摩擦力、液壓變化等有關）。斷層主要破裂面為南北走向，及東北轉折之斷層。能量釋放 $2.23 \times 10^{27}$  達因 / 公分，相當於三十顆日本廣

島之原子彈能量。此地震破裂總長約 100 公里，寬度總長約 40 公里。此次斷層錯動破裂大多發生於深度地表 10 公里以內(圖三)。在震央處之錯動約為 3-5 公尺，斷層往南破裂約 30 公里，往北破裂近 70 公里，位於震央往北約 40 公里處(豐原一帶)，最大錯動高達 12 公尺，斷層繼續往東  $40^{\circ}$ ~ $70^{\circ}$  轉折約 30 公里。此反演的結果與地質地表調查之結果及大地衛星觀測之錯動量相當一致，表示反演結果有相當之可靠性。

圖四為地震當時每一秒斷層面上的錯動分部及其破裂波前的傳遞情形。在地震發生後的三秒，破裂波前停留在震央位置，在破裂後的 12 秒內，斷層同時往北及往南破裂，但往南破裂僅 30 公里。在第 13 秒後，地震僅往北破裂;在第 17 秒時，破裂波前抵達最北端且在當地停留約 10 秒，形成大的錯動量。整個斷層平均破裂速度約為 2.5 公里 / 秒，全長破裂時間約為 30 秒。當我們在睡夢中感受到地震波的同時，車籠埔斷層在短短 30 秒中，由南往北破裂形成約 100 公里長的地表錯動。

此次集集大地震發生後，在一個月內發生約一萬次的餘震，其中發生近四百次有感地震，包括五個規模大於 6 的餘震，其中有三個餘震規模達 6.8，再度造成嚴重災害。其餘震分佈範圍長達約 100 公里，寬約 30 公里。餘震大多發生於主震破裂帶之周圍，大多在車籠埔斷層東方及震央南方一帶。圖五(a)為其餘震分佈與主震破裂分布的關係，較大餘震 ( $M>6$ ) 的滑移量發生於主震發生時無錯動帶。應力分析得出此地震在近地表處幾乎釋放其全部累積應力。圖五(b)為計算所得之地震發生時之應力降量分佈，在大量位移處即斷層北部近地表處其應力降高達 30-50MPa。

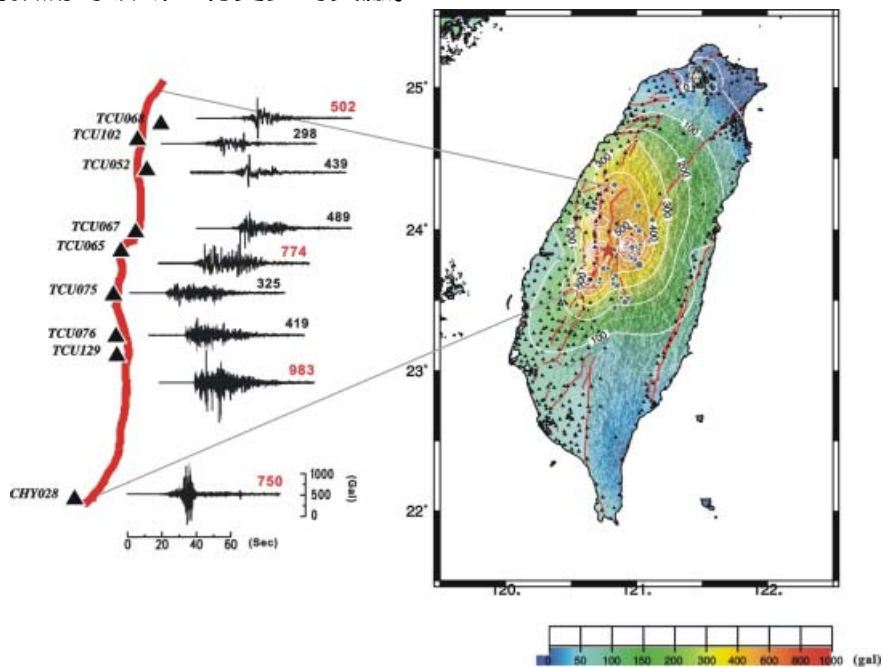
如前所述，921地震發生時，斷層北部及南部的破裂特性有明顯的不同。斷層北部，記錄了極大的速度及位移值，但伴隨著較低的加速度值及低頻訊號。為了瞭解造成此現象的物理特性，我們由空間及時間的高解析度錯動分佈，進而得出斷層面上的最大滑移速度值如圖六(a)所示。圖中顯示，當地震發生時，在震央附近的滑移速度約為 0.5 公尺/秒，當其近地表及往北破裂時，滑移速度漸增，在斷層北方滑移速度高達 3 4.5 公尺/秒，與近斷層的地震站 (TCU052, TCU068) 所記錄的數值相當。我們應用一般力學上的潤滑模型 (lubrication model)，來解釋此現象。此模型考慮兩薄面中間夾帶有黏滯性的液體時，利用 Navier-stokes 方程式，可計算出當兩薄面產生錯動時造成的液壓及由此液壓造成兩薄面間空間的拉張。此液壓增加量與兩面的錯動速度有關。

由於液壓的增加，造成潤滑作用使其產生因潤滑作用而造成的位移，如果位移量大於斷層錯動 (彈性位移) 所造成的位移，潤滑作用將造成滑移的主要力學因素。在此狀況下，由於潤滑作用，將使得斷層形成大量位移及滑移速度;在此同時，由於斷層空間的增加，使得兩層面間的接觸面減少，而有較少高頻的加速度訊號。

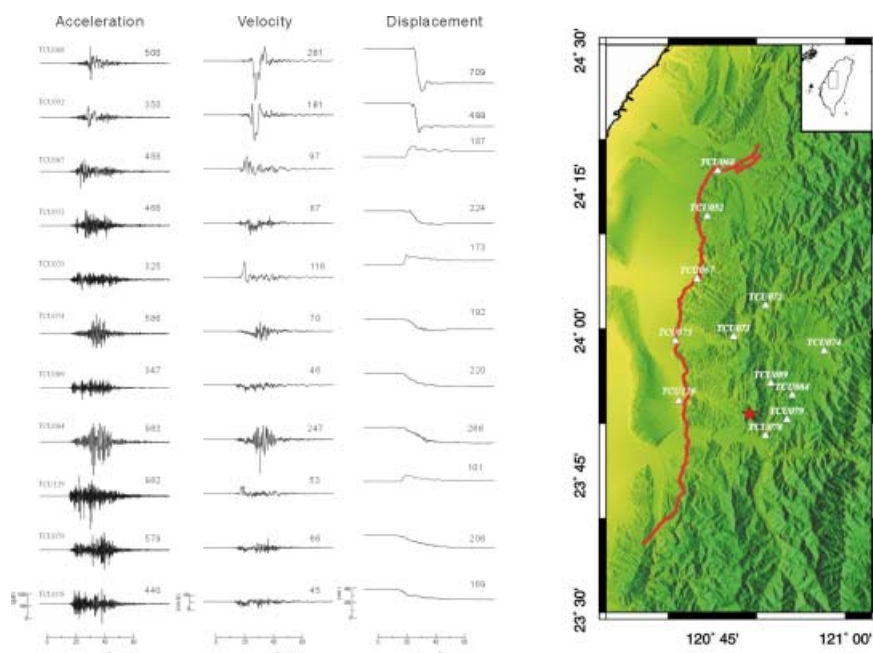
根據上述所得出的滑移速度分佈，及潤滑模型之理論，我們估算出斷層面上可能產生潤滑作用的區域如圖六(b)中所示。相對於地表觀測的測站，此可能產生潤滑作用的區域，大約位於 TCU052 及 TCU068 測站的下方。因此，我們認為此兩測站所記錄的高位移及速度，但相對較低的高頻加速度訊號，可由潤滑作用的力學模式加以解釋。此結果，亦建議

對於較大地震 ( $M > 7$ )，此非線性的潤滑作用，產生較長週期及較大的滑移速度的訊號可能為極重要的現象，尤其在工程上不能加以忽略。

大地震的力學特性，一直以來為地震學家所關注的方向。在 921 地震之前，世界上並無任何大地震的近場地震記錄，此 921 地震之研究結果，將可成為大地震力學研究中重要的文獻參考。由於車籠埔斷層的滑移特性（大量近地表錯動及傾斜逆衝斷層），及良好的研究成果，不僅在在地質、地球物理等背景研究，使得車籠埔斷層為研究大地震破裂特性之重要斷層，相信在最近的未來，我們將會學習到更多大地震破裂行為特性，以其在地震防災及地震行為預測的領域上有更多的貢獻。



圖一 921 震度分析及沿車籠埔斷層之強震加速度記錄。



圖二 沿斷層線沿線及上盤強震站之加速度、速度及位移波形（以東西分量為例）。

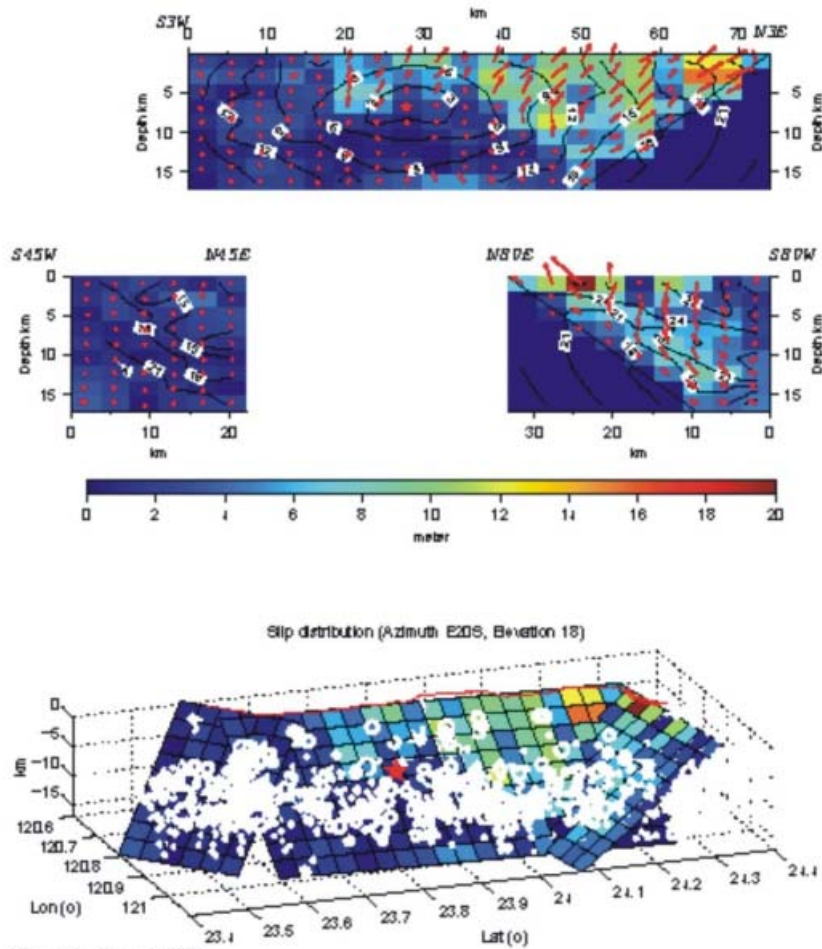
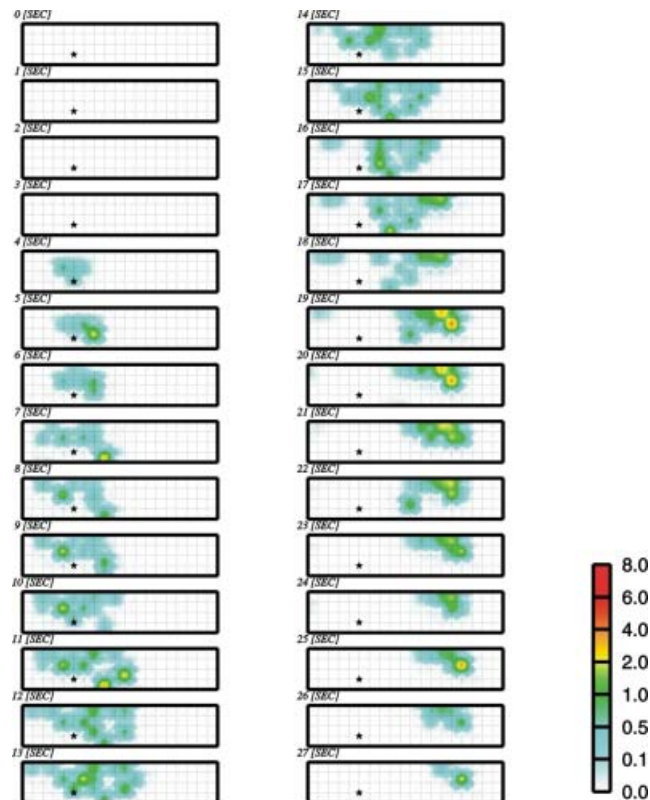


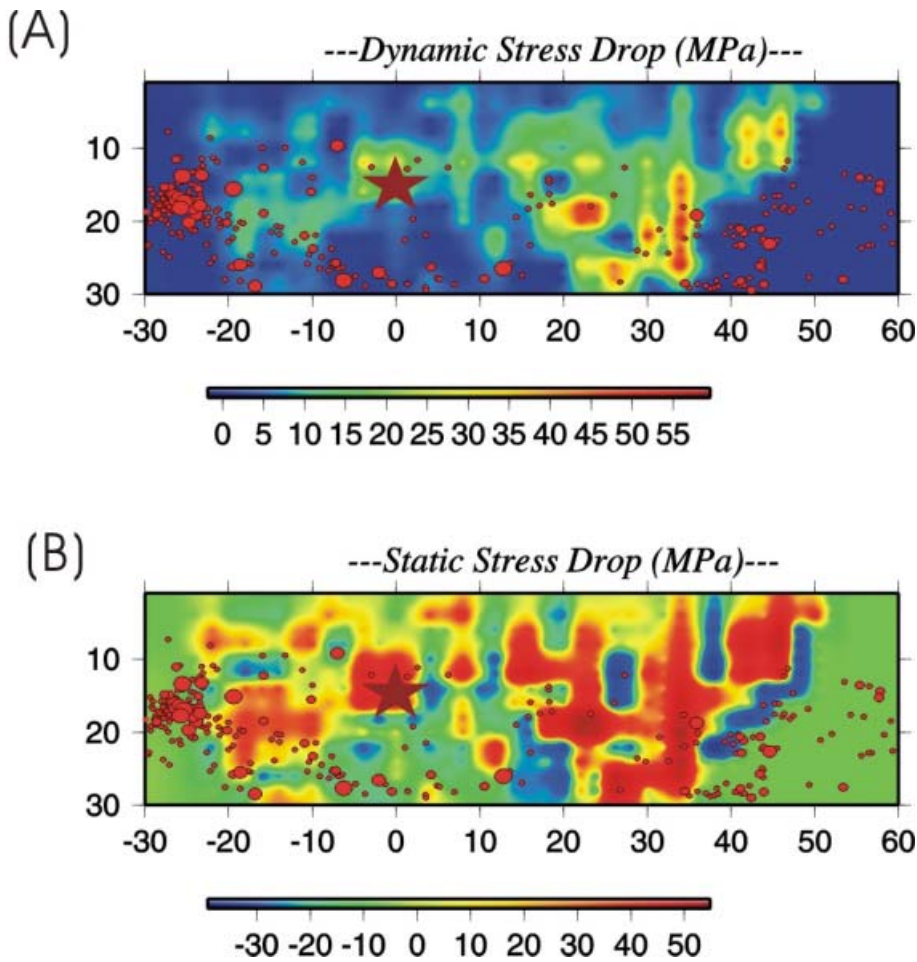
Figure 4. Ji et al, 2001.

圖三 車籠埔斷層面上之位移錯動分佈，此位移錯動分佈為車籠埔斷層地平面以下傾角向東 29 度之斷層面。我們將斷層沿著其走向分為三段：西南向、南北向、及東北向。顏色表示其位移錯動量，箭頭表示其滑移向量。

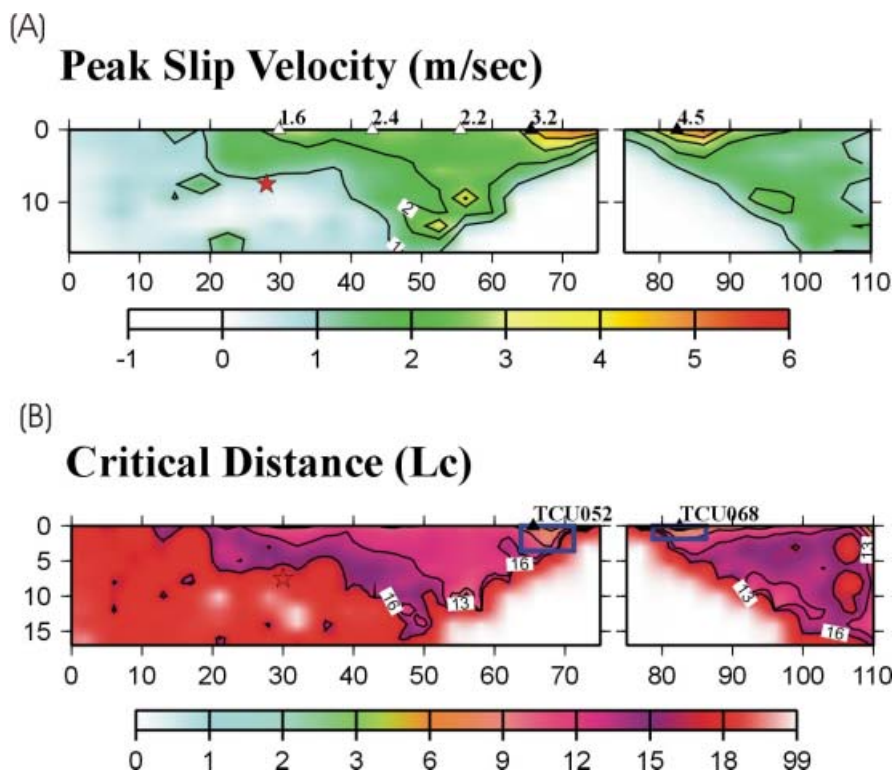


圖四 地震當時每一秒斷層面上的錯動分佈及其破裂波前的傳遞情形。





圖五 (a)為其餘震分佈與主震破裂分布的關係，較大餘震(M>6)的滑移量發生於主震發生時無錯動帶。(b)為計算所得之地震發生時之應力降量分佈，在大量位移處即斷層北部近地表處其應力降高達30-50MPa。



圖六 斷層面上的最大滑移速度值。(b) 斷層面上可能產生潤滑作用的區域。