

國立成功大學
地球科學系
碩士論文

1999 年集集地震前後(1991-2003)
台灣西北部地震活動性變化之研究

Seismotectonics of Northwestern Taiwan
Before and After 1999 Chi-Chi Earthquake

研究生：張繼元

指導教授：饒瑞鈞

中華民國九十三年七月

國立成功大學
碩士論文

1999年集集地震前後(1991-2003)
台灣西北部地震活動性變化之研究

研究生：張繼元

本論文業經審查及口試合格特此證明
論文考試委員

胡植慶

李建成

指導教授：饒瑞鈞

系(所)主管：黃奇瑜

中華民國九十三年七月十三日

摘要

台灣西北部地區，在地震分佈上有一西北-東南向長約 65 公里、寬約 15 公里的地震密集帶（三義-埔里地震帶）。於 1999 年集集地震後，在其北側出現了兩群地震密集區。三義-埔里地震帶和北側的兩個地震密集區，在地表上並無與這些地震分佈相符合的構造特徵，因此研究此地區的地體構造是一個相當重要的課題。本研究使用中央氣象局所提供之三分量短週期數位地震資料，藉由地震三維層析成像（seismic tomography）、地震重新定位、震源機制以及應力反演等方法來加以討探其地體構造。研究結果顯示，三義-埔里地震帶的構造特性，主要為左移之平移斷層與台灣褶皺逆衝帶雙重影響之下的產物；另外，集集地震前（震間時期）三義-埔里地震帶淺層地震所反映之應力狀態是受到地震帶控制，其 σ_1 方向（N97°）與地震帶走向（N140°）之夾角（43°），顯示出一弱斷層帶（weak fault zone）的特性，集集地震後應力釋放，使得三義-埔里地震帶淺層地震之 σ_1 方向由 N97° 改變為 N126°—與區域 σ_1 方向（N130°）近乎平行。集集地震後於三義-埔里地震帶北側的兩個地震密集區，其構造可能屬於疊加式走向滑移構造（strike-slip duplexes）的形式，而地震密集區所反映出之構造特性為西部麓山帶與雪山山脈造山過程中所形成東西向橫移斷層的一部分；其應力狀態於地震密集區北段的 σ_1 方向為 N136°，地震密集區南段的 σ_1 方向為 N135°，此一應力狀態造成地震密集區所在位置之舊構造的再次活動。

關鍵字：震源機制、應力反演、發震構造

誌謝

終於，這篇論文順利的完成，非常感謝指導教授 饒瑞鈞老師在學識上細心的指導，以及論文研究方向與觀念架構上的協助，同時也提供各項完善之軟、硬體設備，使此研究工作能順利的進行。

同時，承蒙口試委員：臺灣大學地質科學系 胡植慶老師與中央研究院地球科學研究所 李建成老師，提供諸多寶貴意見，讓本研究之內容更趨完整詳實，僅此致謝。

此外，還要感謝卉瑄、偉峰、國恩、徐兄、煥儒、穆申、小薩等學長姐，以及明翰、嘉仁、蛋姐等同窗好友與地震研究室的所有夥伴們，在這段期間裡的鼓勵與陪伴，對於論文的完成提供相當大的助益。

最後感謝我的父母及家人，提供我安穩的生活與良好的求學環境，更不斷的給予我信心和鼓勵，使我無後顧之憂的專心求學。感謝關心我的每個人，感謝你們！

目錄

摘要.....	I
誌謝.....	II
目錄.....	III
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VI
第一章 緒論.....	1
第二章 前人研究.....	5
2.1 研究區域之地質環境.....	5
2.1.1 西部麓山帶.....	5
2.1.2 雪山山脈.....	5
2.1.3 地表斷層概述.....	7
2.2 研究區域之相關研究.....	10
第三章 研究方法.....	13
3.1 地震資料之選取.....	13
3.2 一維速度構造.....	18
3.3 三維地震層析成像與地震重新定位.....	18
3.3.1 地震層析成像演算法原理.....	19
3.4 震源機制解.....	20
3.4.1 震源機制解原理.....	20
3.4.2 震源機制解的分類.....	23
3.5 應力反演.....	23

3.5.1 格點搜尋反演法.....	24
3.5.2 線性反演法.....	25
第四章 研究結果.....	27
4.1 一維速度構造.....	26
4.2 三維地震層析成像.....	31
4.2.1 阻尼值之決定.....	31
4.2.2 三維地震層析成像之結果.....	31
4.3 地震重新定位.....	43
4.4 震源機制.....	46
4.4.1 集集地震前.....	46
4.4.2 集集地震後 (SANPU)	54
4.4.3 集集地震後 (Area-A)	54
4.4.4 集集地震後 (Area-B)	63
4.5 應力反演.....	78
4.5.1 兩種應力反演法之比較.....	78
4.5.2 應力反演之結果.....	81
第五章 討論.....	84
5.1 三義-埔里地震帶之特性.....	84
5.1.1 集集地震前.....	84
5.1.2 集集地震後.....	87
5.2 集集地震後之北側地震密集區特性.....	88
5.2.1 地震密集區-A.....	88
5.2.2 地震密集區-B.....	93
5.2.3 地震密集區之發震構造.....	93

5.3 地震潛能評估.....	100
第六章 結論.....	101
參考文獻.....	103
附錄.....	A-1
A. 本研究震源機制之參數表.....	A-1
B. 本研究之震源機制解.....	B-1
自述.....	C-1

表目錄

表 3-1 中央氣象局地震品質分類表.....	13
表 3-2 震源機制解之分類準則.....	23
表 4-1 本研究所求得之一維速度構造.....	25
表 5-1 本研究所使用之地震潛能經驗式參數表.....	99

圖目錄

圖 1-1 集集地震前後研究區域地震活動圖.....	2
圖 2-1 研究區域集集地震前之地震活動與區域地質圖.....	6
圖 2-2 斜聚合和嵌入構造環境的變形示意圖.....	8
圖 2-3 台灣西部地區之西北-東南向的轉換斷層帶.....	11
圖 3-1 本研究之流程圖.....	14
圖 3-2 本研究地震事件之 P 波及 S 波觀測量統計圖.....	15
圖 3-3 本研究之 P 波及 S 波觀測值與理論值之殘差值分佈圖.....	16
圖 3-4 Wadati Diagram	17
圖 4-1 逆推一維速度構造之地震震源、測站分佈圖.....	28
圖 4-2 本研究與 Rau and Wu 之 P 波速度構造比較圖.....	29
圖 4-3 一維速度構造可信度測試圖.....	30
圖 4-4 集集地震前三維地震層析成像之地震震源、測站分佈圖.....	32
圖 4-5 集集地震後三維地震層析成像之地震震源、測站分佈圖.....	33
圖 4-6 三維地震層析成像之阻尼值 (damping) 分析圖.....	34
圖 4-7 集集地震前之 P 波速度構造圖.....	38

圖 4-8 集集地震後之 P 波速度構造圖.....	39
圖 4-9 集集地震前之 V_p/V_s 比值圖.....	40
圖 4-10 集集地震後之 V_p/V_s 比值圖.....	41
圖 4-11 集集地震前後， V_p 變化圖與 V_p/V_s 比值變化圖.....	42
圖 4-12 集集地震前地震重新定位後之震源分佈.....	44
圖 4-13 集集地震後地震重新定位後之震源分佈.....	45
圖 4-14 集集地震前所有震源機制之平面與剖面圖.....	47
圖 4-15 集集地震前之 NF 形態震源機制平面圖.....	49
圖 4-16 集集地震前之 SS 形態震源機制平面圖.....	50
圖 4-17 集集地震前之 TF 形態震源機制平面圖.....	51
圖 4-18 集集地震前各種形態震源機制之 P、T 軸分析圖.....	52
圖 4-19 集集地震後所有震源機制之平面圖.....	55
圖 4-20 集集地震後三義-埔里地震帶震源機制之平面與剖面圖.....	56
圖 4-21 集集地震後三義-埔里地震帶 NF 形態震源機制之平面圖.....	58
圖 4-22 集集地震後三義-埔里地震帶 SS 形態震源機制之平面圖.....	59
圖 4-23 集集地震後三義-埔里地震帶 TF 形態震源機制之平面圖.....	60
圖 4-24 集集地震後三義-埔里地震帶震源機制之 P、T 軸分析圖.....	61
圖 4-25 集集地震後地震密集區-A 所有震源機制之平面圖.....	64
圖 4-26 集集地震後地震密集區-A 之 NF 形態震源機制平面與剖面圖.....	65
圖 4-27 集集地震後地震密集區-A 之 SS 形態震源機制平面圖.....	67
圖 4-28 集集地震後地震密集區-A 之 TF 形態震源機制平面圖.....	68
圖 4-29 集集地震後地震密集區-A 震源機制之 P、T 軸分析圖.....	69
圖 4-30 集集地震後地震密集區-B 所有震源機制之平面圖.....	71
圖 4-31 集集地震後地震密集區-B 之 NF 形態震源機制平面與剖面圖.....	72
圖 4-32 集集地震後地震密集區-B 之 SS 形態震源機制平面圖.....	74

圖 4-33 集集地震後地震密集區-B 之 TF 形態震源機制平面圖.....	75
圖 4-34 集集地震後地震密集區-B 震源機制之 P、T 軸分析圖.....	76
圖 4-35 集集地震前兩種應力反演法之比較分析圖.....	79
圖 4-36 集集地震後兩種應力反演法之比較分析圖.....	80
圖 4-37 集集地震前之應力反演結果.....	82
圖 4-38 集集地震後之應力反演結果.....	83
圖 5-1 大陸岩石圈之脆塑性轉換帶示意圖.....	85
圖 5-2 集集地震前之平移斷層形態震源機制.....	86
圖 5-3 集集地震前應力反演之結果平面圖.....	89
圖 5-4 應力-斷層夾角 (α) 與摩擦係數 (μ) 關係圖.....	89
圖 5-5 集集地震後應力反演之結果平面圖.....	90
圖 5-6 集集地震後地震密集區-A 之平移斷層形態震源機制.....	91
圖 5-7 集集地震後地震密集區-A 之正斷層形態震源機制.....	92
圖 5-8 複合式走向滑移構造 (strike-slip duplexes) 示意圖.....	95
圖 5-9 集集地震後地震密集區-B 之平移斷層形態震源機制.....	96
圖 5-10 集集地震後地震密集區-B 之正斷層形態震源機制.....	97
圖 5-11 研究區域之地質圖.....	98
圖 5-12 雪山山脈的共軛橫移斷層.....	99

第一章 緒論

台灣造山帶為菲律賓海洋板塊與歐亞板塊斜向碰撞的產物 (Suppe, 1984)，菲律賓海洋板塊以 $N54^{\circ}W$ 的方向，每年大約 8.2 cm 的速度向歐亞板塊擠壓 (Yu *et al.*, 1997)。在台灣西部，北港高區扮演著構造的障礙物阻擋了向西北方前進的造山帶，並在沿海地區造成了對稱的變形前緣 (Meng, 1971; Biq, 1992)；此外，根據野外地質調查與地震觀測的研究，北港高區呈現向東凸出的半圓形 (Tang, 1977)。因為它的獨特構造背景，響應了台灣造山帶的擠壓聚合，而沿著北港高區的北緣與南緣各自展開的構造逃脫作用 (tectonic escape processes) (Biq, 1992)，北港高區的北緣被模擬為受橫移壓縮 (transpressive) 與南緣受橫移伸張 (transtensive) 作用所限制的構造環境 (Burke and Sengör, 1986)。Deffontaines 等人 (1994) 利用多重方法的地形學研究定義出在西部麓山帶鄰近北港高區的西北方，有一走向 $N140^{\circ}E$ 具左移分量的三義轉換斷層帶 (Sanyi transfer fault zone, STFZ)；他們更進一步研究該地區的微構造與地震活動，認為三義轉換斷層帶可能為現今北港高區的北側邊界，且承受了左移的剪切分量以及繼承自被動大陸邊緣的伸張基盤之脆弱帶的再活動 (Deffontaines *et al.*, 1997)。

台灣西北部地區有一明顯西北-東南向呈線性分佈的地震活動，此地震活動位於三義-埔里沿線上，其地震帶分佈長約 65 公里、寬約 15 公里，我們稱此地震活動分佈為「三義-埔里地震帶」(圖 1-1)，但沿著三義-埔里地震帶，地表上並無與此地震帶走向相同的構造出露。觀察其深度剖面可以發現三義-埔里地震帶為一岩石圈尺度且具有雙層地震活動之地

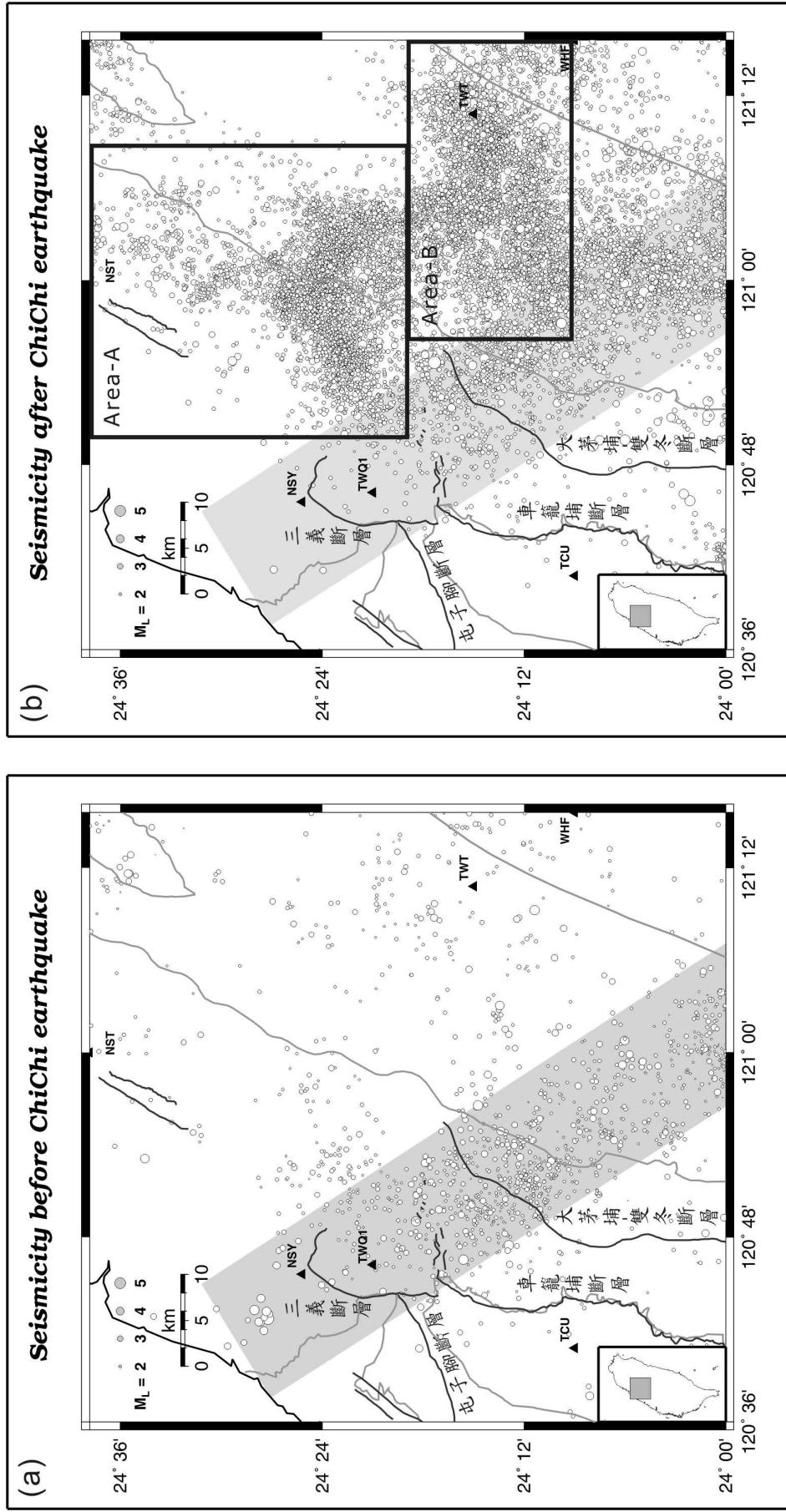


圖 1-1：(a)集集地震前之地震活動（空心圓），(b)集集地震後之地震活動。圖中灰色陰影為三義—埔里地震帶之範圍，黑色三角形是地震測站，黑色實線為地表斷層，灰色實線為地質分區線。

震帶；此外，三義-埔里地震帶的分佈範圍正好位處於前人描述之北港高區的北緣 (Biq, 1992)，亦與三義轉換斷層帶 (Deffontaines *et al.*, 1997) 走向平行，另外，其西北-東南的走向與台灣褶皺逆衝帶斜交。

台灣本地時間西元 1999 年 9 月 21 日凌晨 1 時 47 分，於台灣中部發生了芮氏規模 7.3 的地震，震央位於集集鎮附近，地震觸發了車籠埔斷層再次活動，並引發了一系列的餘震活動 (Kao and Chen, 2000)。集集地震發生後，在三義-埔里地震帶的北側陸續發生了許多地震，藉由觀察台灣西北部地區西元 1999 年 9 月 21 日至 2003 年 1 月的地震活動分佈，可清楚的將這些地震群區分為 A、B 兩個地震密集區 (圖 1-1)。然而於集集地震之前，該地區的地震活動性是較低的，且地表亦無與其相符的構造出露。

台灣的地震觀測開始於 1973 年中央研究院建立現代化地震觀測網 (TTSN)，並在 1991 年與中央氣象局全省地震觀測網結合成為台灣地震觀測網 (Taiwan Seismic Network, TaiSeiN)，並於 1994 年全部升級為三分量短週期之數位地震測站，目前共 71 個測站 (中央氣象局地震季報, 2004)；此外，加上研究區域內頻繁的地震活動，提供了我們良好的條件用以研究台灣西北部地區之地震地體構造。

本研究將運用地震三維層析成像 (seismic tomography)、地震重新定位、震源機制以及應力反演等方法，加以分析探討此地區之構造特性，以期解決以下的問題。三義-埔里地震帶的發震機制與變形模式為何？其特性是否與走向滑移斷層有關，因而反映出沿海地區構造逃脫的特徵？而集集地震的發生，對於三義-埔里地震帶有何影響？集集地震後，於地

震帶北側的地震密集區其構造特性為何？為什麼北側的地震密集區在集
集地震後才出現，其發震機制為何？最後，台灣西北部地區各發震構造
所能造成最大規模的地震有多大？若我們能清楚地解析此地區的地體構
造與地震潛能，在地震防災上必有一定程度的幫助。

第二章 前人研究

2.1 研究區域之地質環境

本研究之地帶密集帶位於三義-埔里沿線上，橫跨西部麓山帶與雪山山脈。此外，三義-埔里地震帶與數條地表斷層有所交會，分別為三義斷層、屯子腳斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層（圖 2-1）。

2.1.1 西部麓山帶

西部麓山帶是海岸平原和中央山脈之間的過渡帶，主要是一個高度低於 2000 公尺的丘陵區，只有在阿里山一帶局部高度可達到 2700 公尺。麓山帶為一褶皺逆衝帶（何春蓀, 1986），地質構造主要為在淺部地殼環境下，受到水平壓應力作用後變形的結果（林慶偉, 1995），呈現由一連串近乎南北走向，呈疊瓦狀排列的褶皺與逆衝斷層組成。不論地形的高度及岩層的變形程度，都有由西向東逐漸增高的趨勢（鄧屬予, 1997）。受到觀音與北港兩高區及歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊斜向聚合的影響下，構造上呈現擠壓構造和逃脫構造（escape tectonics）的特徵（畢慶昌, 1992；盧佳遇等人, 1996；Lu, 1994；Lu and Malavieille, 1994）。

2.1.2 雪山山脈

雪山山脈位在中央山脈西側，是一個彎曲變形的山脈，山脈前緣呈現 S 型的轉折，出露於台灣中部至北部。Lu and Malavieille（1994）使用三維的砂盒模型模擬台灣造山帶的構造演化，利用一不對稱的嵌入體與大陸邊緣的岩石產生斜碰撞，其主要效應為發展一不對稱的楔狀逆衝增積體，結果顯示變形的過程有收縮、橫移、冒起、旋轉和書疊式走滑斷層。

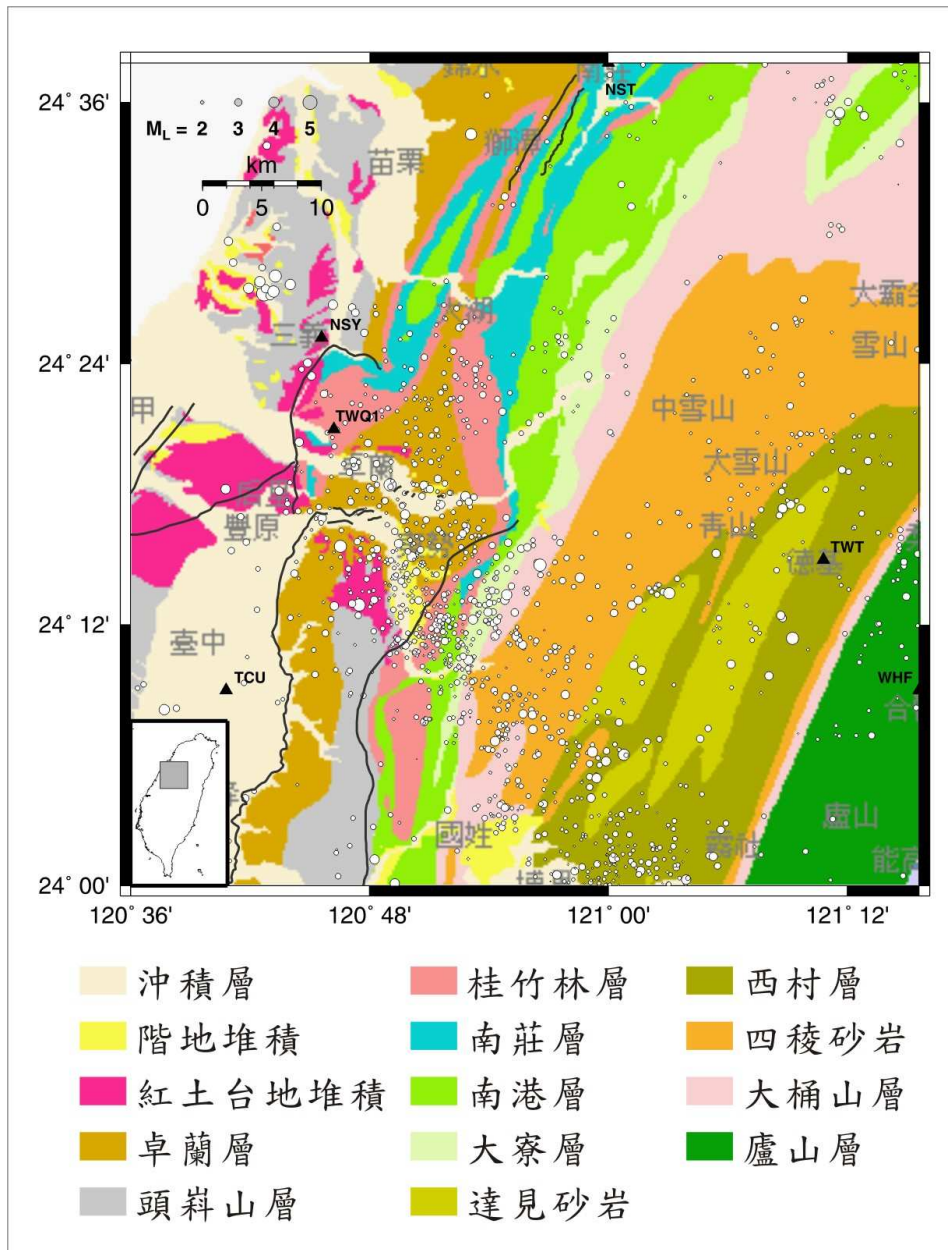


圖 2-1：研究區域集集地震前之地震活動與區域地質圖（經濟部中央地質調查所, 2000）

Lu 等人 (1997) 根據野外調查、構造分析、地球物理資料、以及模型分析結果，解釋雪山山脈彎曲造山帶先後經過擠壓變形（伴隨著壓縮、逆衝斷塊堆積及橫移斷層）加上漸增的塊體旋轉，書疊式橫移斷層及伸張變形（圖 2-2）。亦即，雪山山脈弧狀造山帶為一不對稱楔狀嵌入體嵌入變形的結果（朱傲祖等人, 1996）。

Biq (1989) 指出雪山山脈除了具有由分支斷層密集而成之沿邊斷層束、由橫移斷塊再經壓縮而向西北逆衝之逆斷層，還有由橫移斷塊楔形尾部張裂而成之成群盆地，皆為雪山山脈內部及兩側高傾角之逆斷層亦為左移斷層的證據，也顯示了雪山山脈為一大型剪切帶。

2.1.3 地表斷層概述

三義斷層：三義斷層起於大窩，向西延伸經雙連潭、重河、三義後，轉向南南西方延伸至新屋、水美、西湖、上湖、伯公坑後，再轉為南北走向沿鯉魚口、中城、后里台地東緣至大甲溪北岸，全長約 19 公里。此斷層有明顯的線性特徵，斷層跡兩側的山脈形貌及嶺線走向差異極為顯著，且三義斷層的形成影響其周圍地區地形的形貌與河系的發育（林朝榮, 1957）。此外，斷層兩側岩層岩性及位態明顯不同，並發現其斷層露頭，為明顯存在的斷層。根據地球物理資料顯示三義斷層為向東傾斜約 20~40 度的逆衝斷層（邱華燈, 1962; Yeh *et al.*, 1984）。

屯子腳斷層：屯子腳斷層為右移斷層，兼具逆移性質，呈 N60°E 走向。斷層北由后里台地東北隅的泰安車站附近，向西南西方向延伸，經下后里、內埔（屯子腳），越過大甲溪而至大肚台地北段之清泉崗附近，全長約 14 公里。其出露在枕頭山地表的斷層崖經野外實測結果，高差約 60 公尺，而崖面兩側則高差達 70.4 公尺（潘國樑等人, 1983）。

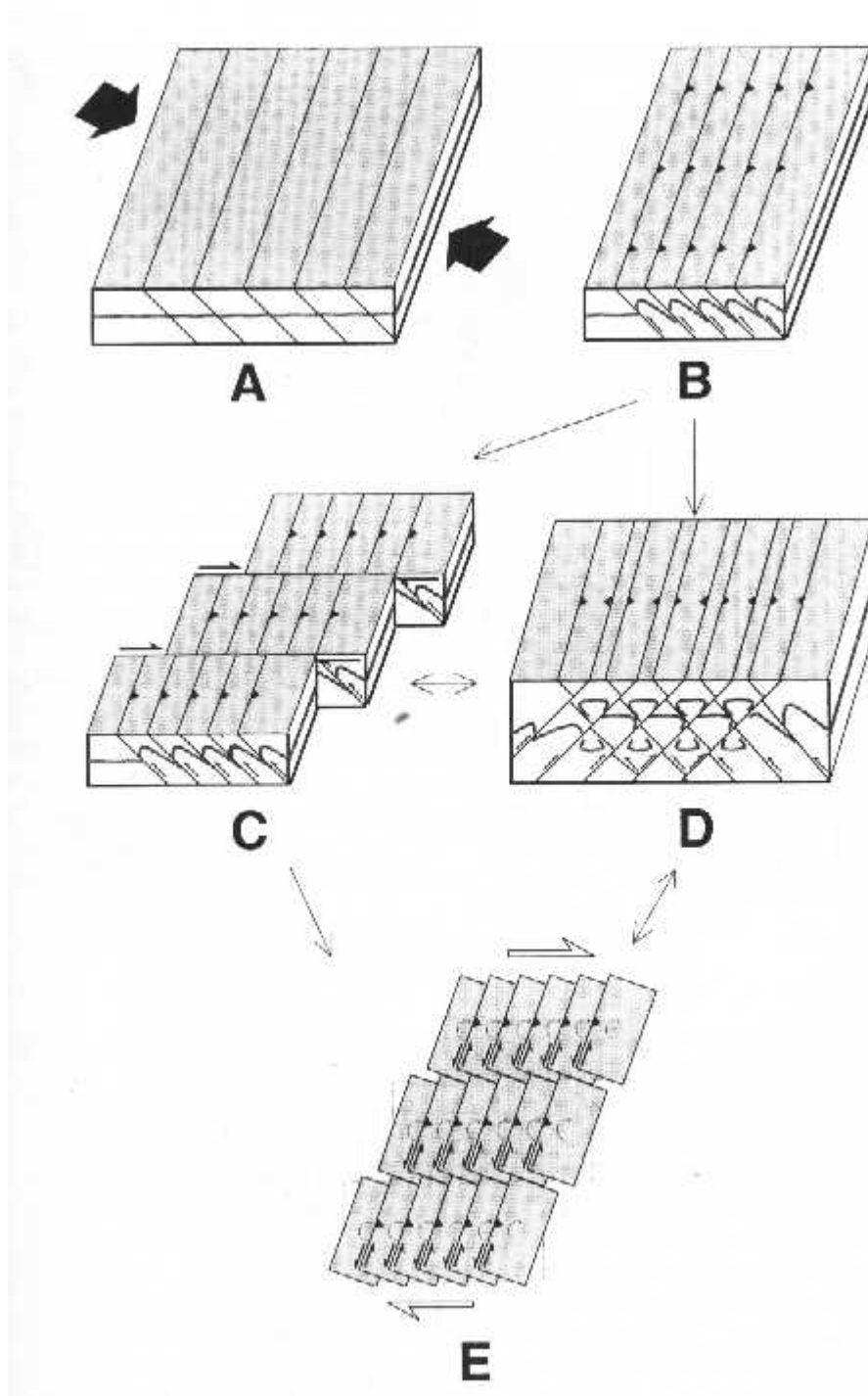


圖 2-2：斜聚合和嵌入構造環境的變形示意圖。A.西北向斜聚合的最初態；B.收縮變形；C.橫移變形；D.鼓起變形；E.旋轉變形和書疊式走向滑移斷層。(Lu *et al.*, 1997)

車籠埔斷層：車籠埔斷層大致呈南北走向，位於台灣中部西部麓山帶，北連三義斷層，南接觸口斷層。車籠埔斷層上盤為一系列向東傾斜，中新世到更新世的地層，逆衝於台中盆地的現代堆積層之上（Chang, 1971）。斷層上盤地層包括出露地層為中新世晚期到上新世桂竹林層、上新世的錦水頁岩、上新世的卓蘭層及更新世的頭嵙山層。桂竹林層以砂岩為主。錦水頁岩厚約 160 公尺。卓蘭層以砂岩為主間夾頁岩，厚約 1400 公尺。頭嵙山層以砂岩至礫岩為主，厚度因地而異。就岩層層序而言，錦水頁岩大致為被動大陸邊緣與活動大陸邊緣的交界，卓蘭層中已可發現源自東側中央山脈來源的物質，頭嵙山層以砂岩及礫石為為主為典型前陸盆地沈積，因此頭嵙山層厚度隨著盆地位置的不同厚度有極大的差異（Teng, 1990）。此次集集地震地表破裂在近地表處大致沿著錦水頁岩或卓蘭層底部滑動，但在北端的埤豐橋以東，地表斷層轉為東西至北東走向延伸至東勢，斷層破裂於卓蘭層中，此東西走向至北東向斷層在以往調查中並未被發現，在南段（瑞竹以南），轉為中新世至上新世的桂竹林層為滑動面，逆衝於頭嵙山層之上。台灣中部前陸盆地的界限為雙冬斷層，但由於構造西移，前陸盆地在向西遷移過程中受車籠埔斷層及彰化斷層截切，彰化斷層為台灣中部地區的變形前緣，由於此次斷層活動沿著車籠埔斷層活動，因此此次集集地震為脫序斷層（out of sequence faulting）（Kao and Chen, 2000）。

大茅埔-雙冬斷層：大茅埔-雙冬斷層起於雙崎南方處，往西南延伸經三叉坑、雲仙洞、麻竹坑、頭汙角及下段，過大甲溪後往南延經雙連潭、水涵坑、竹內腳、赤崁頭、風吹下、牽牛路、龜子頭及石灼巷至烏溪，長約 41 公里。此斷層兩側岩層岩性及位態明顯不同，並發現數處斷層露頭及斷層線鞍部，為明顯存在的斷層（Chiu, 1972; 經濟部中央地質調查

所, 1999)。其性質為逆移斷層，最大落差約 3000 公尺（何春蓀, 1986），且於集集地震時有再活動的證據。

2.2 研究區域之相關研究

根據中國石油公司的鑽井與震測資料顯示，北港高區代表著第三紀沉積物沉積於早第三紀中國大陸基盤岩淺部的構造環境（Hsiao, 1971; Tang, 1977），其沉積層序向東加深且呈現向東凸出之半圓形的幾何形貌。Chou（1973）對台灣西部上新世地層分析的結果顯示，碰撞所造成的陸地沉積物具有廣大的空間分佈是由於受到北港高區幾何形貌所控制。另一方面，中新世地層則是顯示被動大陸邊緣的碰撞前沉積物，且地層從彰化往三義方向朝西北方加深（Chou, 1973）。不管這些地質觀察對北港高區有多麼詳細的描述，依舊無法找到主要的地表構造來加以確定北港高區北界的精確位置。

Deffontaines 等人（1994, 1997）利用多重資料（multisource）的方法找尋台灣西部麓山帶第四紀轉換斷層存在的証據，其使用資料包括野外地質調查、數值高層模型（Digital Elevation Model, DEM）、水系流域異常分析（Drainage pattern and anomalies analysis）、航空照片分析、側視雷達（Side-looking airborne radar, SLAR）影像分析、衛星（SPOT）影像分析以及地震構造分析。提出台灣西部一系列西北-東南向的轉換斷層帶（transfer fault zone）（圖 2-3），從北到南分別為三義轉換斷層帶（Sanyi transfer fault zone, STFZ）、八卦轉換斷層帶（Pakua transfer fault zone, PTFZ）、嘉義轉換斷層帶（Chiayi transfer fault zone, CTFZ）、旗山轉換斷層帶（Chishan transfer fault zone, ChiTFZ）、鳳山轉換斷層帶（Fengshan transfer fault zone, FTFZ）和高雄轉換斷層帶（Kaohsiung transfer fault zone,

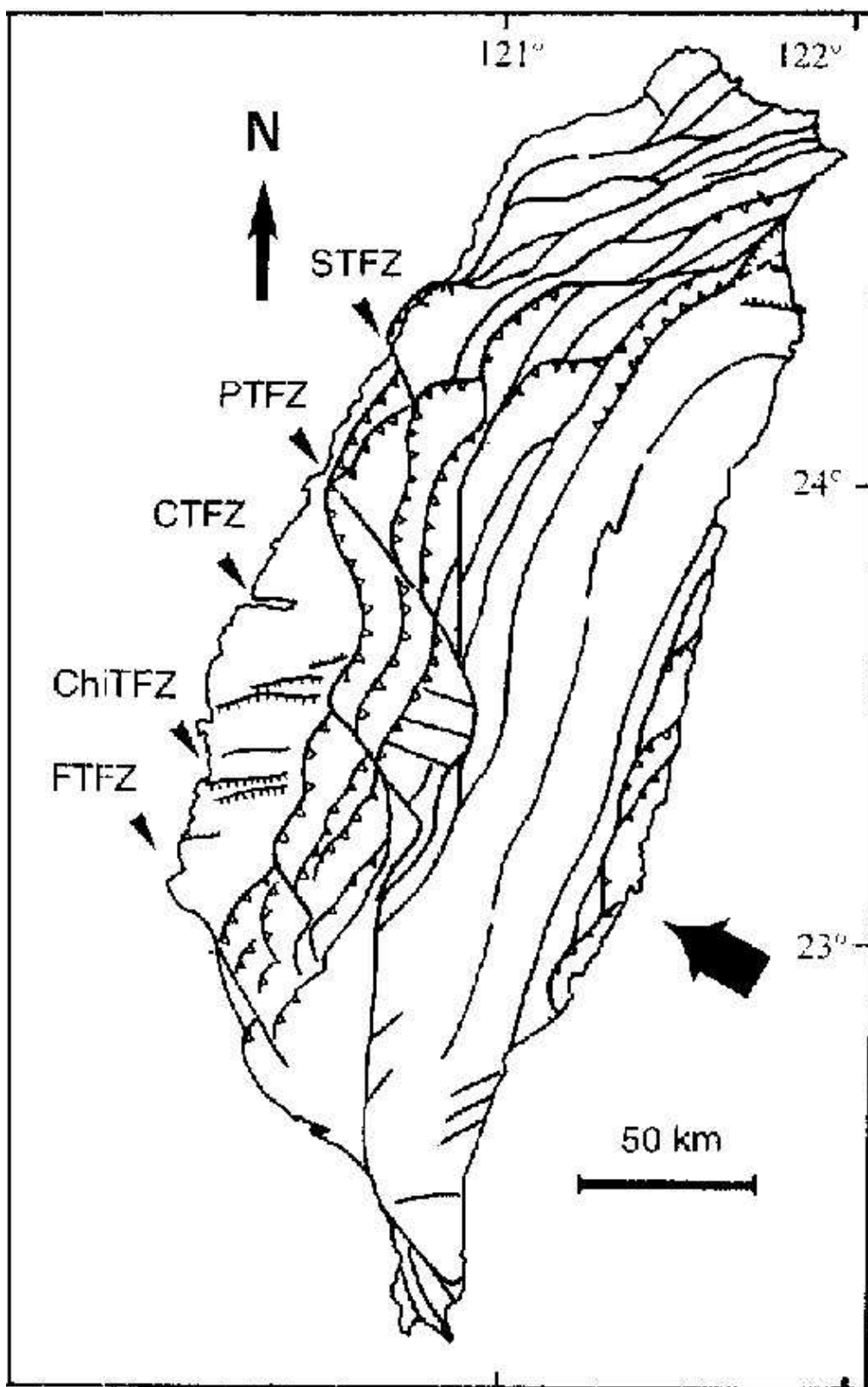


圖 2-3：台灣西部地區之西北—東南向的轉換斷層帶
 (Deffontaines *et al.*, 1997)

KTFZ)。這些轉換斷層的成因可能為(1)歐亞被動大陸邊緣在上次的板塊碰撞，(2)或是原先存在的正斷層帶在最近這次的板塊碰撞中所造成。他們並認為其中的三義轉換斷層帶即為北港高地之北側邊界。這些西北-東南向的構造其實早在先前 SLAR 的研究中就已經曾經被定義 (Liu and Yuan, 1982)，但是因為並無其他相關的地質資料支持，因此一直無法被學者們接受。不過，Biq (1992) 仍提出沿著北港高區的北緣與南緣，由於受橫移壓縮 (transpressive) 與橫移伸張 (transtensive) 作用影響，台灣沿海地區呈現一逃脫構造 (escape tectonic) 的特徵。