

國立臺灣大學理學院地質科學系

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部

新竹地區之新期構造活動

Analysis of Neotectonics Based on 3-D Structural

Geometry and Geodetic Measurements

in Hsinchu area, Northwestern Taiwan

黃宣維

Hsuan-Wei Huang

指導教授：胡植慶 博士

Advisor: Jyr-Ching Hu, Ph.D.

中華民國 101 年 1 月

January, 2012

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部
新竹地區之新期構造活動

Analysis of Neotectonics Based on 3-D Structural
Geometry and Geodetic Measurements in Hsinchu
area, Northwestern Taiwan

本論文係 黃宣維 君 (R98224201) 在國立臺灣大學地質
科學系、所完成之碩士學位論文，於民國 101 年 01 月 03 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

朱徽祖

杓以明

黃旭燦

胡植慶

致謝

期待了兩年半，終於讓我寫到致謝了！太開心了！哈哈！這本論文得以完成，首先當然要謝謝胡植慶老師這兩年半來給我的指引、鼓勵以及照顧，最重要的是研究經費的供給，讓我可以心無旁騖於研究工作的進行；接著感謝三位口試委員們百忙中抽空分別從成大、中油探研所和地調所到台大口試，謝謝楊耿明老師於口試時提出的許多問題與觀念上的指點，確實點出了許多以前我沒有思考到的盲點，也釐清了我的觀念！感謝朱傲祖博士於口試時給予我的指正，包括新竹地區的地質背景與臺灣地體架構的概念，讓我對於台灣地質的概念有十足的進展，但也讓我了解到我還需要再多念好幾年的書啊！謝謝中油黃旭燦組長平時不厭其煩地教導我平衡剖面及竹苗地區地體構造的概念，著實讓我有更寬廣的視野，感謝您在苗栗這段日子裡的照顧與資料的提供，在這兩年半的歲月裡讓我叨擾了好幾天。

由衷地謝謝 Professor John Suppe 在碩士班後半時期給予我的指導，包括平衡剖面的概念、技巧及經驗論與地震分布的想法，而且非常有耐心地聽懂我的破英文，謝謝董家鈞老師於大三時對於研究的啟蒙，也感謝大學時期的專題老師詹瑜璋老師與張中白老師對於北台灣地質剖面的啟發，還有許多關於構造地質與研究觀念的指導，碩士班會繼續做平衡剖面的大半原因也是因為大學專題的沿伸。感謝曾經於 AGU 及地質年會給予建議的 Professor Tim Byrne、林殿順老師、李建成老師、洪日豪老師、李元希老師、葉恩肇學長及伍允豪學長(熊)等。最後，感謝中央地科系所有老師們四年來的訓練，奠定我地質知識的基礎。

感謝在中油那段日子裡，助理純菁及各位阿姨們總是以最快的速度載我到探研所與趕火車，還有中油各位叔叔伯伯及阿姨的照顧；謝謝曾經陪伴我在 308 度過夜晚與周末生活的各位一偉聖、亦修、奕翔、逸威、令和(阿和)；感謝所有實驗室夥伴們平時歡樂又嚴肅的味挺時光，還有台北到處吃吃喝喝的遊樂行程，當然還少不了研究室每次的 party 時光，著實為平時煩悶的生活帶來許多歡樂的氣氛；謝謝實驗室大總管雅琳和助理秀芳、妹琳(maple)的照顧，以及口試時用心準備的餐點，尤其 maple 真的教了我許多平衡剖面的技巧與概念！感謝這兩年半以來實驗室各位的陪伴與幫忙—彭肇、偉聖、琬君、致言、有忠、冠全、俊穎(蚯蚓)、昭榮、育雅老師、欽煌、致同、麗雯等，也很感謝以上幾位學長姐與盧佳遇老師於味挺或是討論中給的寶貴意見！另外也很謝謝曾在中研院照顧過我的秋月學姊、素卿學姊與廷潔學姊。

場景跳到中央大學，謝謝各位大學同學平時的飯局與烤肉遊玩行程，讓生活增添了许多色彩—蕭鈺、旻芯(金毛毛)、紀瑜、志杰(企鵝)、耕甯(維特)、若豪(若呆)、淵叔、益緯、廷毅(洪搞)、仁傑(小騷)、祐宗(小綜)等，還有中央的學長姐—勝雄(gy)、佳儀(John 的助理)、惠文、佳君(阿柯)、鎮源(鬢角)平時的幫忙與照顧，謝謝地科系小家每次家聚時聊八卦的歡樂時光—漢倫(黑輪)、建興、尹翎(tina)、泓群(老周)、有承、佳晉(小康)、盈靜、士鈞等，謝謝你們。

感謝從以前到現在所有好友們的陪伴與玩樂，不論是每年的聚會，或是放天燈及逛老街、聊心事，族繁不及備載的吃喝玩樂行程，科研社永遠的夥伴包括建成、博喻、傳佳、庭嘉、苑駿、盈安、若珊、上豪，以及敬家、爭青、靖琪、銘銘、彥汝、雪華、亞珊、秀君、詩穎、怡瑄、珮庭、而宜、詩涵、衍成，尤其亞珊根本就是我在學校永遠的飯咖，有你們這段時間的鼓勵與閒聊，讓我能夠一直保持著愉快的心情面對苦悶的研究生生活。很感謝余俊樑老師當初對我的啟發，讓我踏入地球科學這領域，這段期間也給了我不少打氣與鼓勵。另外，黃鐘同學從大學以來給我的支持、包容與鼓勵，還有一大堆疑難雜症的解惑與忍受我不定時的抱怨及胡言亂語，沒有他，我想這本論文是很難完成的，謝謝他，也謝謝各位。

最後，最重要的是要感謝我的爸媽及姊姊、妹妹，讓家鄉雖然就位於台北盆地的西南隅，還是讓我住在學校宿舍，有時候甚至忙到兩到三個禮拜才回家一次，感謝他們的體諒與關心，也很感謝住在台北的阿姨不時的噓寒問暖。

謹以此行感謝於後期經常被我搞到藍畫面的實驗室電腦(絕對不是我的問題！是電腦硬體相衝的問題！)，你好可憐也辛苦了！以及因為篇幅不足記載所有曾經關心過我的朋友們，謝謝你們！

對此論文有任何建議與指教，歡迎寄信與我討論！

我的信箱為 HsuanWeiHuang211@gmail.com。

中文摘要

斷層活動造成之同震地表變形以及地震規模與斷層幾何形貌有緊密之關聯，故了解各區域之斷層幾何形貌即成為研究新期構造活動與地震災防治之重要課題。台灣西部麓山帶之斷層幾何形貌於近年相關研究之下愈趨明朗，但多數研究僅止於二維剖面之建立，三維斷層形貌之討論較少，因此本研究之重點即為建立新竹地區麓山帶之斷層的三維形貌以及其時空演化關係。本研究區域北起新竹斷層及新城斷層，南至鵝公髻斷層與和平斷層，包括內麓山帶與外麓山帶的區域。新竹地區的構造特性，以內麓山帶的北北東—南南西走向之逆衝斷層與緊密褶皺為主，外麓山帶則以東—西走向的走向滑移斷層與平緩寬廣的褶皺，以地震地體構造而言，內麓山帶的地震分布明顯多於外麓山帶。本研究首先建構通過新竹斷層與新城斷層的剖面，並使用 2D Move 軟體回復剖面，了解地質構造的演育歷史；接著，本研究亦利用 GeoSec 3D 軟體整合新竹地區之構造平衡地質剖面，建立深部的三維斷層幾何模型，並整合二維的地質剖面與地震活動分布；最後，使用 GOCAD 軟體整合三維斷層模型與地震重定位資料，呈現斷層深部形貌與地震活動於時空分布的關係。

就盆地演化而言，以地質剖面重建分析的結果得知，新竹地區於早中新世時存在發達的正斷層活動，造成整體地層往東漸增厚的現象，而打鹿頁岩反而往東尖滅。根據回復地質剖面之結果，竹東斷層、北埔斷層、新竹斷層和新城斷層為逆時序發育之斷層，發育順序依序為軟橋斷層、竹東斷層及北埔斷層，接著先發育出青草湖背斜，再被新竹斷層切穿，最後新城斷層沿層間滑動衝出地表；由剖面地層之錯移量顯示新竹斷層之錯移量為 1318 公尺，新城斷層則為 887 公尺，假設此兩斷層最早活動時間為卓蘭層沉積結束時，則新竹斷層與新城斷層長期滑移速率分別為 0.43 mm/yr 及 0.37 mm/yr，又因為新城斷層之近期活動速率大於 0.37 mm/yr，因此新城斷層可能為近期新竹地區較活躍的構造；又跨過新城斷層的平均應變率為 $-0.05 \mu \text{ strain/yr}$ ，除大地震造成之剪應變降後，本研究認為新城斷層的再

現周期約為 600-6000 年。

由地震活動分布與地質剖面分析，以軟橋斷層為界，內麓山帶的地震明顯多於外麓山帶，軟橋斷層深部轉折處之團狀地震分布指示此為應力累積之處。三維空間地震分布與斷層模型則說明，軟橋斷層深部存在四圍時空相近之地震，由南往北依序於 1999 年、2007 年、2003 年及 2006 年發生地震事件。本研究建立之三維斷層模型顯示，新竹地區內麓山帶的斷層至深部變緩，外麓山帶的斷層往深部則變陡峭。而位在內麓山帶與外麓山帶邊界的軟橋斷層淺部為高角度斷層，至深部則呈現階梯狀形貌，因此，本研究建議新竹地區的基底滑脫面由西而東為 6 至 7 公里漸變為 10 公里深。

關鍵字：平衡剖面、三維斷層模型、新竹地區、斷層幾何模型、剖面回復、構造縮短量、三維空間地震分布



Abstract

Earthquake magnitude and coseismic deformation are strongly related to the geometry of the seismogenic fault. Consequently, the construction of a comprehensive 3-D fault geometry model for the linkage and interaction of fault systems becomes one of the essential topics in neotectonic studies. The Western Foothills of Taiwan is undergoing an active deformation of the Taiwan orogeny demonstrated by the frequent seismicity and destructive earthquake events. The study region includes several faults-and-folds systems from Hsinchu and Hsincheng faults in the north to Okungchi and Hoping faults in the south in the internal and external western Foothills in Hsinchu area. The structures in Hsinchu area show wide and gentle folds associated with NNW-SSW trending thrust faults in internal Foothills and tide and steep folds associated with the E-W trending thrust faults in external Foothills. From the seimostectonic viewpoint, the earthquakes frequently occur in internal Foothills than external Foothills. Therefore, the main purpose of this study is to investigate the linkage of subsurface structures between internal and external western Foothills in Hsinchu area. To this purpose, we restore a cross-section across Hsinchu and Hsincheng faults, and clarify the overall structural evolution of major fault systems based on this restoration. By integrating eleven CPC geological cross-sections and the profile in this study, we use GeoSec 3D software to construct 3D fault geometry model beneath Hsinchu area. Finally, we use GOCAD software to integrate 3D relocated seismicity and 3D fault model in order to explore the relationships between active structures and seismicities.

In terms of the profile reconstruction, the thickness of strata gradually increasing eastward was induced by abundant normal faults activating in early Miocene. However, Talu shale pinched out instead. According to restoration of balanced cross section, the Juanchiao fault, Chutung fault and Peipu fault are in-sequence fault systems, meanwhile

the Hsinchu and Hsincheng faults are out-of-sequence fault systems. The Chingtsaohu anticline formed following the Peipu fault. After that, Hsinchu fault cut through the Chingtsaohu anticline and Hsincheng fault, bedding fault, formed in the end. The displacements along the Hsinchu and Hsincheng faults are 1318 m and 887 m, respectively. We assumed the faults formed after the deposition of Cholan formation, therefore, the long term slip rates for Hsinchu and Hsincheng faults are 0.43 mm/yr and 0.37 mm/yr respectively. Also, short term slip rate of Hsincheng fault is larger than 0.37 mm/yr. As a result, it implies Hsincheng fault is possible a recently active structure in Hsinchu area. The average strain rate across Hsincheng fault is -0.05μ strain/yr, and the coseismic strain drop divided by strain rate gets 600-6000 years. Therefore, we suggest the recurrence interval of Hsincheng fault is 600-6000 years.

Base on the analysis of seismicity and geological profiles, the numbers of earthquakes are larger in internal than external foothills. Clusters at the bend of Juanchiao fault at depth imply that it is the location of stress generating. According to 3D seismicity and fault model, earthquake events occur northward in 1999, 2007, 2003, 2006. The 3D fault model indicates faults at depth become gentler in internal foothills, while faults in external foothills turn into steeper. The boundary fault, Juanchiao fault, shows subsurface high angle thrust and stepped fault geometry at depth. Furthermore, the detachment becomes deeper eastward, from 6-7 km to 10 km.

Key words: Balanced cross-section, 3D fault model, Restoration, Hsinchu area, shortening, 3D earthquakes distributions

目錄

口試委員會審定書	I
致謝	II
中文摘要	III
ABSTRACT	V
目錄	VII
圖目錄	IX
表目錄	XII
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	2
1.3 前人研究	11
1.3.1 地質構造剖面	11
1.3.2 區域構造反轉及斷層活化	16
1.3.3 震測及地表調查	20
1.3.4 大地測量	23
1.3.4.1 GPS 速度場及應變率	23
1.3.4.2 水準測量	25
第二章 地體構造與地質背景	28
2.1 研究區域	28
2.2 地質概況	33
2.2.1 地質構造	33
2.2.2 地層概況	37
2.3 活動構造	41
第三章 研究方法	44
3.1 地質構造剖面之建立及理論基礎	44
3.1.1 平衡剖面之建立	44
3.1.2 理論基礎	48
3.1.2.1 薄皮理論	48
3.1.2.2 褶皺急折帶理論	49
3.1.2.3 斷層相關褶皺	53
3.1.2.4 剪切斷層彎曲褶皺	59

3.2 構造平衡剖面之回復.....	61
3.2.1 平衡原則.....	61
3.2.2 回復方法.....	62
3.3 控制井位資料.....	65
3.4 地震資料.....	68
3.5 三維構造模型之建立.....	68
第四章 研究成果.....	70
4.1 地質剖面解釋.....	71
4.1.1 剖面 I 段.....	71
4.1.2 剖面 II 段.....	74
4.1.3 剖面 III 段.....	76
4.2 地質剖面回復.....	81
4.2.1 疊置構造之回復(Step 1).....	81
4.2.2 新竹斷層構造(HCUF)之回復(Step 2).....	81
4.2.3 新城斷層構造(HCEF)之回復(Step 3).....	84
4.2.4 竹東斷層構造(CTF)之回復(Step 4).....	84
4.2.5 北埔斷層構造(PPF)之回復(Step 5).....	84
4.2.6 軟橋斷層構造(JCF)之回復(Step 6).....	88
4.3 新竹地區地下三維構造模型.....	90
4.4 新竹地區地震活動特性.....	99
4.4.1 二維空間地震活動之特性.....	99
4.4.2 三維空間地震活動之特性.....	105
第五章 討論.....	111
5.1 新竹地區之地層層厚變化.....	111
5.2 新竹地區之構造縮短量.....	113
5.3 新竹地區構造演化史.....	115
5.4 軟橋斷層深部之地震群.....	121
第六章 結論.....	122
參考文獻.....	124
附錄 A.....	131
附錄 B.....	132

圖目錄

圖 1-1、2010 年中央地質調查所定義之活動斷層圖。.....	4
圖 1-2、臺灣地體構造架構及主要構造單元圖。.....	5
圖 1-3、台灣地區 1991 年到 2009 年重定位地震分佈圖。.....	6
圖 1-4、新竹區域的地震分布圖。.....	7
圖 1-5、新竹地區 2002-2010 年 GPS 速度場。.....	8
圖 1-6、新竹地區應變率變化圖。.....	9
圖 1-7、新竹地區區域地質構造圖。.....	10
圖 1-8、新竹地區前人文獻中各地質剖面位置。.....	12
圖 1-9、楊耿明等透過竹苗地區多條震測剖面建構之三維示意圖。.....	12
圖 1-10、NAMSON 建立之西部麓山帶一序列的地質剖面。.....	13
圖 1-11、LEE ET AL.根據井位資料及地表傾角解釋新竹地區的地下構造。.....	14
圖 1-12、黃旭燦等由震測及鑽井資料解釋之地質剖面。.....	15
圖 1-13、莊恭周等由震測與井位資料建立之地質剖面。.....	15
圖 1-14、新竹地區重力分布圖。.....	16
圖 1-15、新竹及苗栗外海南莊層頂部等時線圖。.....	17
圖 1-16、苗栗外海震測剖面圖。.....	17
圖 1-17、打鹿砂岩頂部的構造等深線圖。.....	18
圖 1-18、SUPPE 依據震測剖面解釋斷層相關之構造圖。.....	19
圖 1-19、上圖震測剖面解釋之褶皺與斷層關係示意圖。.....	19
圖 1-20、光達地形判識之構造圖。.....	20
圖 1-21、地表高程地形判識之頭前溪沿岸的河階圖。.....	21
圖 1-22、開挖通過新城斷層之槽溝。.....	22
圖 1-23、跨過新城斷層之槽溝解釋圖。.....	22
圖 1-24、石瑞銓等的淺層反射震測調查。.....	23
圖 1-25、新竹地區 GPS 連續觀測站之平均速度場。.....	24
圖 1-26、新竹地區 GPS 連續觀測站之主軸應變率與膨脹率。.....	24

圖 1-27、新竹地區 GPS 連續觀測站之旋轉率。	24
圖 1-28、新竹地區的兩條水準測線位置圖。	25
圖 1-29、縣 122、從新竹到五峰測線水準垂直速度圖。	26
圖 1-30、縣 117、新竹到峨眉的測線水準垂直速度圖。	27
圖 2-1、台灣三維地體架構圖。	29
圖 2-2、台灣地體架構與褶皺逆衝帶構造線分佈圖。	30
圖 2-3、研究區域主要構造線分布圖。	31
圖 2-4、地質圖套疊地形陰影圖。	32
圖 2-5、新竹地區活動構造分布圖。	43
圖 3-1、端成分示意圖。	47
圖 3-2、斷層傾角變化量 ϕ 和急折帶傾角 δ 示意圖。	47
圖 3-3、覆瓦狀構造的地層與斷層夾角關係示意圖。	47
圖 3-4、「推土機模型」及楔形體造山運動示意圖。	49
圖 3-5、斷層轉折處發展出急折帶示意圖。	50
圖 3-6、急折帶之軸面位置與地層滑移量比值示意圖。	51
圖 3-7、急折帶與斷層及地層夾角關係之折線圖。	51
圖 3-8、基底滑離褶皺沿褶皺翼旋轉及急折帶運動變形機制發育褶皺示意圖。	53
圖 3-9、與逆衝斷層相關的三種褶皺作用示意圖。	54
圖 3-10、斷層轉折前後與地層夾角關係示意圖。	57
圖 3-11、斷層轉折前後與地層夾角以及地層長度之關係示意圖。	57
圖 3-12、地層與轉折斷層夾角關係之折線圖。	57
圖 3-13、斷層彎曲褶皺演育示意圖。	58
圖 3-14、斷層擴展褶皺演育示意圖。	58
圖 3-15、標準、單剪、純剪斷層彎曲褶皺和混合形態的褶皺示意圖。	60
圖 3-16、早期平衡剖面法的發展用於計算基底滑脫面深度之示意圖。	62
圖 3-17、曲滑褶皺回復法平衡方法示意圖。	63
圖 3-18、斷層平行法回復步驟示意圖。	64
圖 3-19、本研究剖面位置及控制井位位置圖。	65

圖 3-20、由二維剖面建構的三維構造模型圖。.....	69
圖 4-1、本研究之地質構造剖面圖。.....	78
圖 4-2、本研究剖面位置圖及地質圖。.....	79
圖 4-3、本研究剖面之地表地質資料。.....	80
圖 4-4、斷層彎曲褶皺的兩種形貌圖。.....	80
圖 4-5、本研究構造剖面回復步驟圖之一。.....	82
圖 4-6、本研究構造剖面回復步驟圖之二。.....	85
圖 4-7、本研究構造剖面回復步驟圖之三。.....	89
圖 4-8、建構三維構造模型之地質剖面位置圖。.....	90
圖 4-9、新竹地區之三維地下構造形貌俯視圖。.....	92
圖 4-10、和平—內灣斷層系統與鵝公髻—紙湖斷層系統之地下構造形貌。.....	93
圖 4-11、鵝公髻斷層與鵝公髻斷層之地下構造形貌。.....	94
圖 4-12、新城斷層與竹東斷層、北埔斷層之地下構造形貌。.....	95
圖 4-13、新竹斷層、新城斷層與斗煥坪斷層之地下構造形貌。.....	96
圖 4-14、軟橋斷層與鵝公髻斷層之地下構造形貌。.....	97
圖 4-15、新竹地區基底滑脫面之地下構造形貌。.....	98
圖 4-16、新竹地區地質構造、地震活動分布與震源機制解圖。.....	101
圖 4-17、地質構造與地震活動分布剖面圖之一。.....	102
圖 4-18、地質構造與地震活動分布剖面圖之二。.....	102
圖 4-19、地質構造與地震活動分布剖面圖之三。.....	103
圖 4-20、地質構造與地震活動分布剖面圖之四。.....	103
圖 4-21、地質構造與地震活動分布剖面圖之五。.....	104
圖 4-22、地質構造與地震活動分布剖面圖之六。.....	104
圖 4-23、近軟橋斷層深部四團地震群分布圖。.....	106
圖 4-24、分布於 1999 年 9 月至 2000 年 3 月之間的地震群。.....	107
圖 4-25、最南邊的第一群地震(I)呈東北—西南走向的分布圖。.....	107
圖 4-26、2007 年 3 月地震時間和地震規模與地震數量分布。.....	108
圖 4-27、2003 年地震數量於 3、4 和 10 月有高峰值。.....	108

圖 4-28、2003 年 3、4 和 10 月地震數量與日期分布。	109
圖 4-29、2006 年地震數量與月份分布圖。	110
圖 4-30、2006 年 1 和 10 月地震數量與日期分布。	110
圖 5-1、台灣之桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層及頭嵙山層地層層厚變化。	112
圖 5-2、台灣西部麓山帶及西部海域前陸盆地不整合面之深度變化圖。	112
圖 5-3、台灣西部海域中生代地層層頂之深度變化分布圖。	113
圖 5-4、本研究建構剖面之構造演化歷史圖。	117

表目錄

表 2-1、台北、桃園地區與新竹地區的地層對比表。	40
表 2-2、新竹地區主要活動斷層之特性。	42
表 3-1、C-4 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	66
表 3-2、P-6 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	66
表 3-3、P-5 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	66
表 3-4、R-2 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	67
表 3-5、C-24 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	67
表 3-6、C-25 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	67
表 3-7、T-2 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。	67

第一章 緒論

1.1 前言

臺灣西北部為臺灣人口稠密及高科技發展的地區，新竹科學園區更是在臺灣經濟發展中占有一席之地，其中新竹科學園區包括超過四百家科技公司，災害防範便有其必要性；根據地調所 2010 年臺灣活動斷層的劃分，新城斷層為第一類活動斷層，新竹斷層則為第二類掩覆活動斷層(圖 1-1)，又新城斷層通過新竹科學園區的南緣且位於新竹斷層的上盤，若新竹地區發生災害型的地震，將對國家經濟發展造成極大的傷害。

由於臺灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的碰撞帶，菲律賓海板塊在台灣以每年約 8 公分的速度相對於澎湖白沙站向西北方向聚合(Yu et al., 1997)，長期的西北—東南向聚合作用下產生以東北—西南走向為主的褶皺逆衝斷層(圖 1-2)與東—西走向的走向滑移斷層(圖 1-3)，這些斷層作用與地震活動息息相關。此區的地震分布以內麓山帶較多，越往外麓山帶的地區則逐漸減少，地震的深度以淺部十公里以內為主，地震規模則主要介於規模三到五之間(圖 1-4)，地震震源機制解指示走向滑移斷層的特性，近內麓山帶的地區可明顯地顯示此特性。

新竹地區在歷史上曾經發生過許多災難性地震(圖 1-3)，包括 1935 年 4 月(芮氏規模 7.1，新竹縣關刀山，主震)、5 月(芮氏規模 6.0 及 5.6，後龍溪公館及大肚溪內橫屏山，餘震)及 7 月(芮氏規模 6.2，後龍溪河口，餘震)的新竹—台中烈震序列，這幾次主震與餘震震源機制解顯示走向滑移與逆衝的特性；相對於澎湖 S01R 測站，GPS 速度場指出新城斷層的上盤以每年 1 公分左右的速度向西北方移動，但跨過斷層後，速度場方向轉變為西北西方向，速度則減小為約每年 0.2 公分的速度(圖 1-5)，應變率分布則由新城上盤的東—西方向、約每年 0.2μ 壓縮，漸變為下盤垂直斷層的走向，且壓縮的應變率逐漸變大(圖 1-6)，新竹斷層上下盤皆以壓縮為主，下盤甚至以每年 0.4μ 到 0.5μ 的量壓縮。以上顯示此區的應變累積可以

造成規模較大的歷史災難性地震發生(圖 1-3)，因此，了解新竹地區孕震構造的發育形貌與三維地體構造的關係，將有助於未來了解斷層發震特性及地震潛勢評估。

地震發生時地表變形行為主要受控於斷層的地下幾何形貌，岩層與斷層的截切關係及傾角與斷層於地表出露的位置往往會反應在地表的變形情形，所以了解斷層地下幾何形貌有助於了解孕震構造與未來模擬斷層面的滑移速率。目前關於新竹地區區域地質構造的研究所中油公司的油氣探勘之調查與地表調查為主(黃旭燦等，2004)，以及開挖槽溝探討地震的再現週期及斷層滑移速率(陳文山等，2003)，並參考震測剖面解釋地下構造形貌(石瑞銓等，2003)，但缺乏剖面的平衡來討論構造發育歷史與斷層滑移情形，且新竹目前仍未有一完整的三維斷層模型之結果。平衡剖面法為目前一種迅速且直觀的方法，有助於重建地下構造形貌及討論斷層演育歷史，由二維剖面討論地下構造之外，目前已經發展到三維構造模型的建立與回復；本研究使用平衡剖面法來了解新竹地區斷層地下幾何形貌與斷層發育情形，使用地理資訊系統(GIS, Geographic Information System)及二維平衡剖面軟體(2D Move、GeoSec 2D)，三維構造模型軟體(GeoSec 3D)，建立新竹地區的地質構造剖面，以及重定位地震資料與斷層震源機制解，使用 GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) 軟體建立三維的地震構造間的關係，一窺此區地震地體構造之全貌，並有助於未來地震防災與評估斷層發育潛能之用。

1.2 研究動機

新竹地區的斷層分布主要以北北東—南南西走向的逆衝斷層分布於內外麓山帶，以及位於外麓山帶為主的東—西向走向滑移斷層(圖 1-7)；就褶皺形貌而言，內麓山帶為逆衝斷層伴隨較陡峭緊密的褶皺形貌，褶皺軸為北北東—南南西走向為主，外麓山帶則為平緩寬廣的褶皺，褶皺軸呈現東北—西南走向為主，顯示此區變形程度由東向西變小。

北北東—南南西走向的逆衝斷層為位於內麓山帶為主，斷層走向約略平行臺灣島長軸及區域構造走向，覆瓦狀斷層由東南向西北依序發育並伴隨緊密的褶皺；外麓山帶的近東—西向走向滑移斷層反應竹苗地區外海在古第三紀以來發育的一系列正斷層系統，於中新世晚期約五百萬年蓬萊造山運動以來(Teng, 1990)，因為斜向的弧陸碰撞而重新復活(Suppe, 1984)，使這些斷層反轉呈現逆衝帶有走向滑移的分量。這兩組斷層相互交織，斷層間彼此的交接關係為近東—西向走向滑移斷層在東側終止於北北東—南南西向的逆衝斷層，譬如：新竹斷層及斗煥坪斷層、後龍斷層東側分別終止於軟橋斷層及竹東斷層與北埔斷層、竹湖—軟橋斷層系統；北北東—南南西向的逆衝斷層在南北側終止於近東—西向走向滑移斷層，像是新城斷層北端止於新竹斷層，南段則終止於斗煥坪斷層；斷層走向由沿海向內麓山帶逐漸改變，方向由近東—西向逐漸變為東北—西南向，一直到北北東—南南西向的斷層，例如：斗煥坪斷層—竹東與北埔斷層—軟橋斷層，還有後龍斷層—竹湖斷層—軟橋斷層。目前雖有許多研究探討新竹地區斷層的地下構造(Namson, 1984; Suppe, 1984; Lee et al., 1993; Yang et al., 1996; 黃旭燦等, 2004; 莊恭周等, 2011)，桃園到台中地區之間也已建構幾個三維斷層模型(黃鐘, 2007)，但斷層在三維空間中地下的完整形貌仍不清楚，竹苗地區間轉換帶的斷層模型也不太明確。所以本研究整合新竹地區的地質剖面，建立垂直構造走向的地質剖面，對新竹地區斷層演育歷史探討之外，建構三維斷層模型，希望了解新竹地區這兩組走向滑移斷層與逆衝斷層之地下構造原始形貌以及彼此的截切關係。

1999年集集地震之後，目前已經有些研究討論地震分布與車籠埔斷層附近之地下構造的關係(Carena et al., 2002; Yue et al., 2005, 2009)，探討地震活動與活動斷層形貌之關聯性，但近來新竹地區地質剖面的地下構造研究仍沒有考慮地震分布的情形，所以本研究將使用新竹地區長期地震活動，參考地震分布作為剖面中斷層地下形貌之控制，並分析新竹地區地震活動情形與地下孕震構造特性之關聯性，探究潛在活動斷層的活動性。

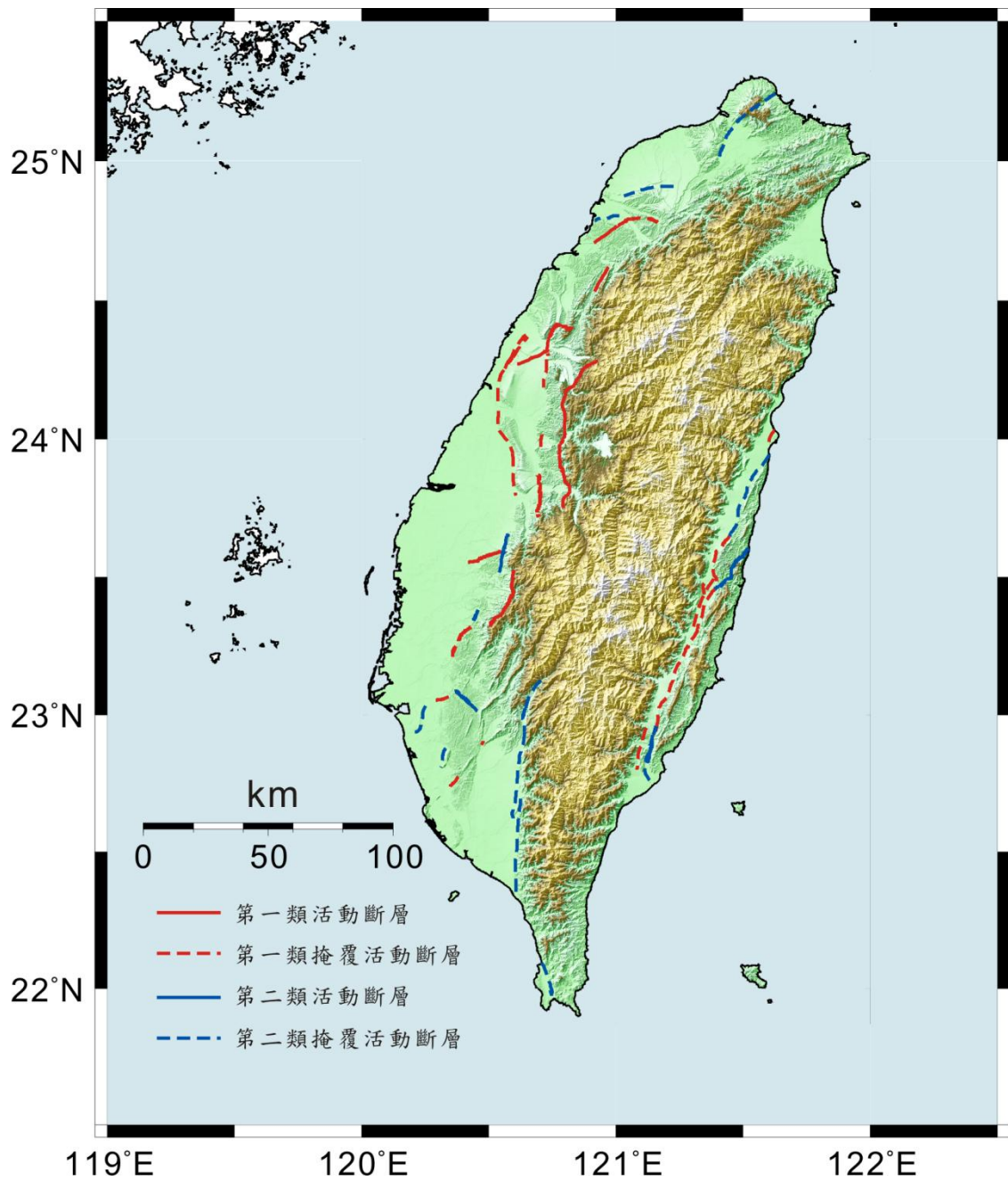


圖 1-1、2010 年中央地質調查所定義之活動斷層圖。新城斷層與新竹斷層分別屬於第一類與第二類活動斷層。

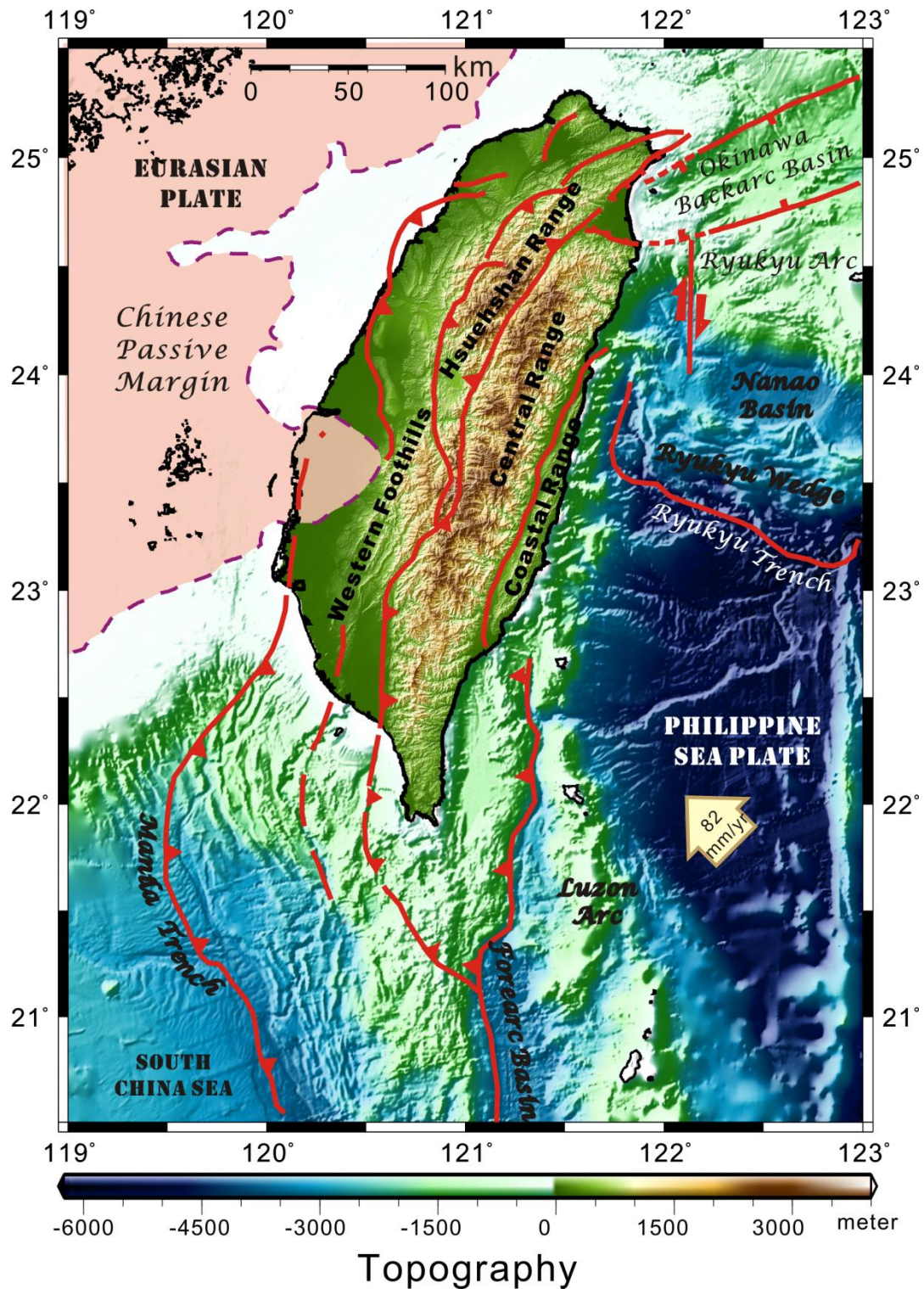


圖 1-2、臺灣地體構造架構及主要構造單元圖。紫色為臺灣地區之主要構造線(修改自 Malavieille and Trullenque, 2009)，藍色虛線為新生代沉積物 4 km 的深度線，即此線以西為基盤高區(引用自 Lin et al., 2003)，黃色箭頭指向為菲律賓海板塊相對歐亞大陸板塊的移動速度(Yu et al., 1997)。

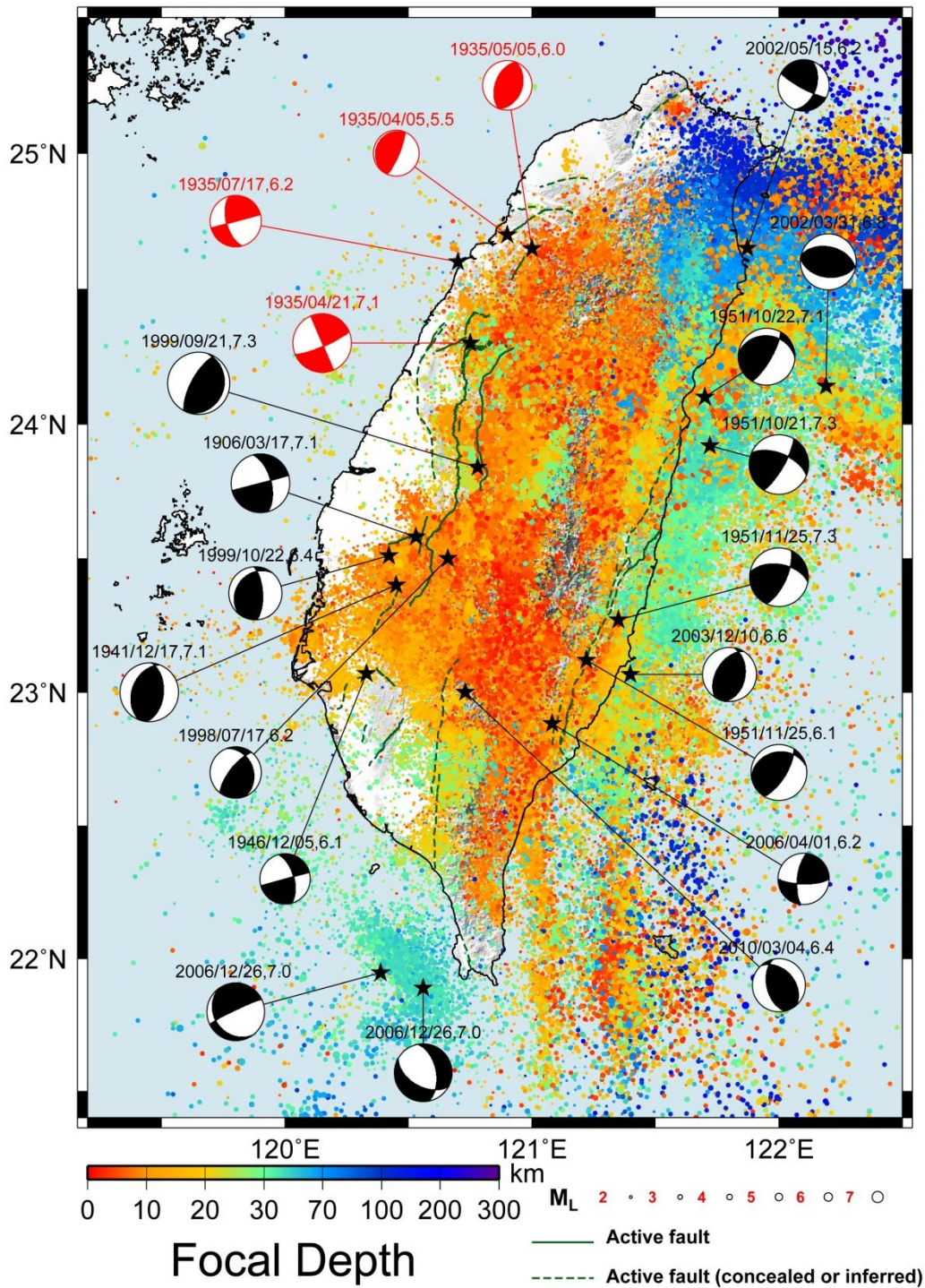


圖 1-3、台灣地區 1991 年到 2009 年重定位地震分佈圖。顏色及大小代表震源深度及地震規模；震源機制解為 1990 年以來台灣的歷史大地震，新竹地區災害性歷史地震為 1935 年 4 月 21 日規模 7.1 的主震與 5 月及 7 月的餘震(資料來源：Cheng and Yeh, 1989；中央氣象局)。

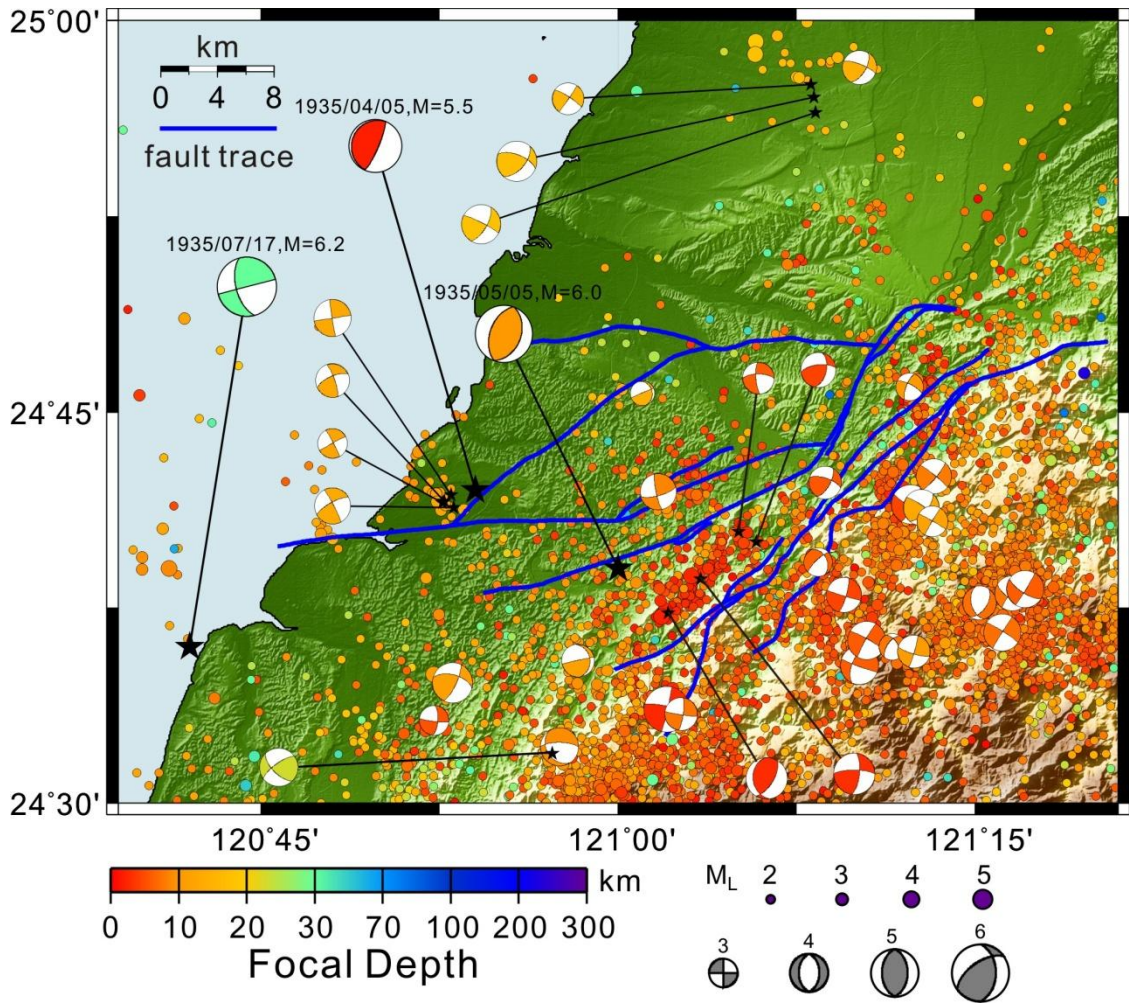


圖 1-4、新竹區域的地震分布圖。底圖為 40 公尺 DEM，藍線為斷層線。內麓山帶地震分佈較多地震，外麓山帶地震則較少。(資料來源：1991 至 2009 年氣象局 CWB 重定位的地震資料，震源機制解為 1991 至 2007 年氣象局地震資料及 1995 至 2011 年中央研究院台灣寬頻地震觀測網 BATS 資料；斷層線來自中油十萬分之一地質圖)。

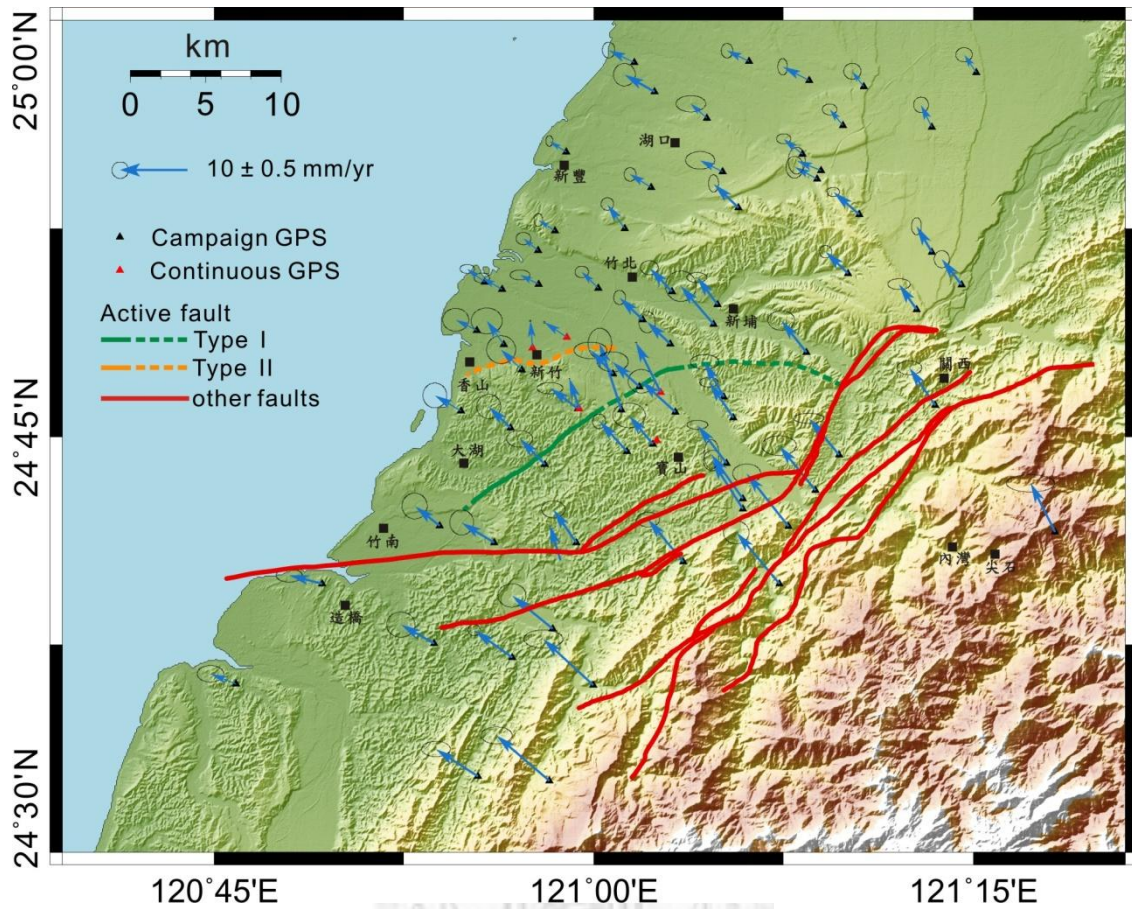


圖 1-5、新竹地區 2002-2010 年 GPS 速度場。速度場相對測站為澎湖 S01R 測站，綠線為 2010 年地調所定義的活動斷層，底圖為 40 公尺 DEM，在新城斷層上盤速度較快，方向為西北方，越往北方，速度越小且逐漸轉為西北西的方向(資料來源：胡植慶等，2010；饒瑞鈞等，2010)。

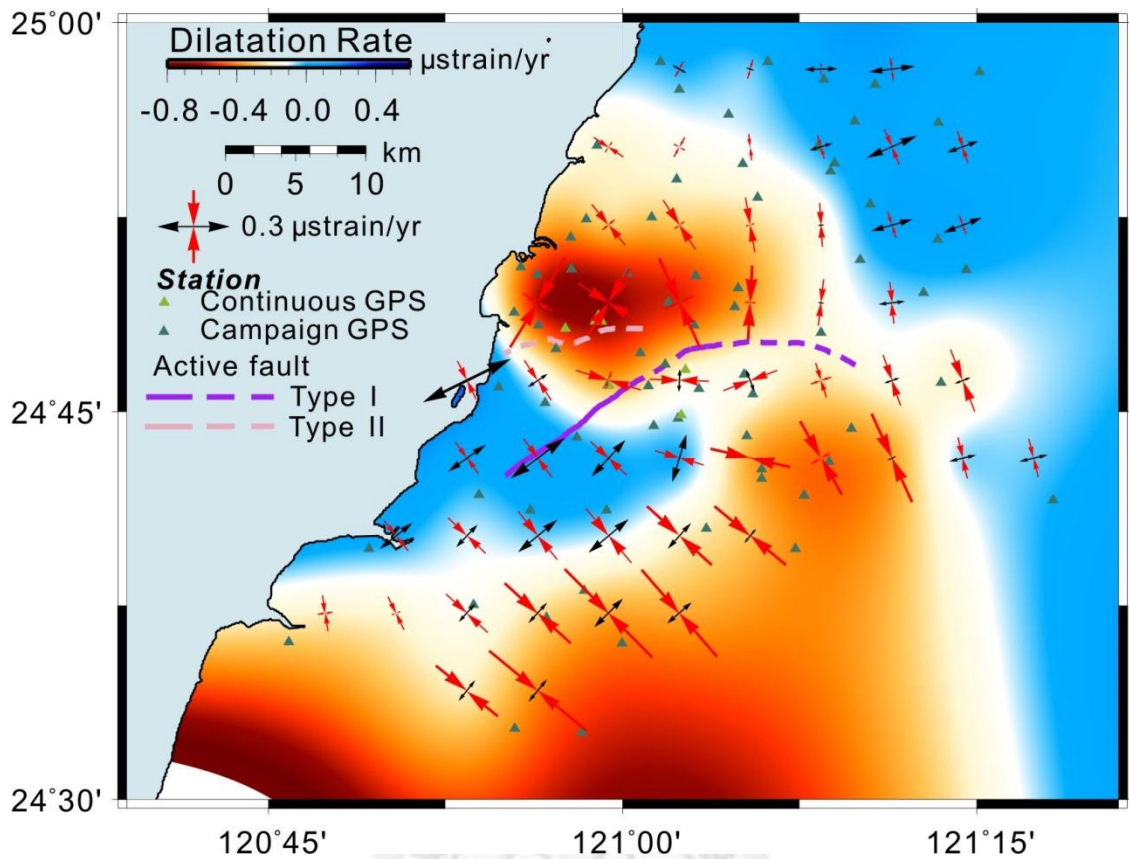
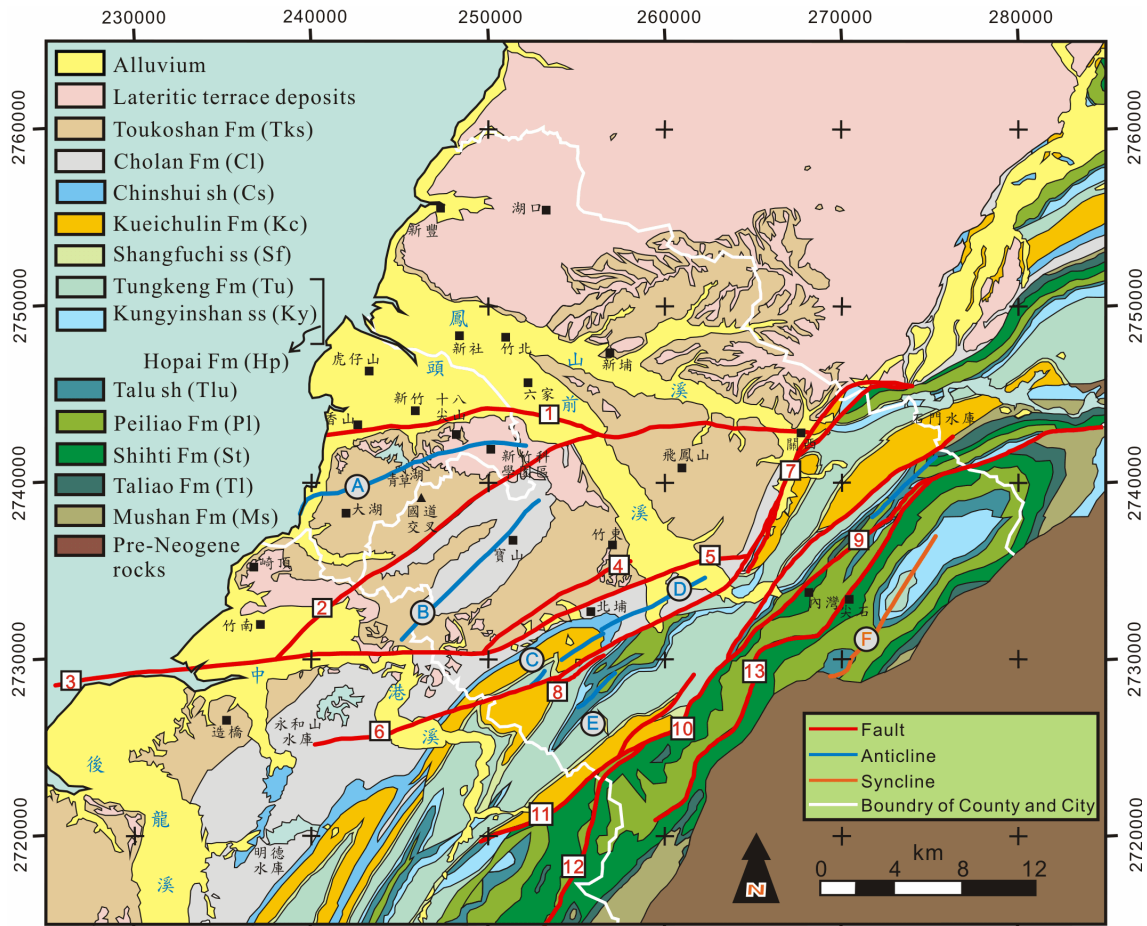


圖 1-6、新竹地區應變率變化圖。斷層線為地調所 2010 年定義之活動斷層，紫線為新城斷層，粉紅線為新竹斷層。新城斷層下盤壓縮較上盤稍大，且以垂直斷層的走向為主，新城斷層的上盤以西北—東南向為主，近斷層處方向不一致，下盤的地方則偏南北向，（GPS 資料來源：胡植慶等，2010；饒瑞鈞等，2010）。



- | | | |
|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 Hsinchu Fault | 7 Juanchiao Fault | 13 Hoping-Neiwan Fault |
| 2 Hsincheng Fault | 8 Taping Fault | A Chingtsaohu Anticline |
| 3 Touhuanping Fault | 9 Okungchi Fault | B Paoshan Anticline |
| 4 Chutung Fault | 10 Okungchi Fault | C Fangpokeng Anticline |
| 5 Peipu Fault | 11 Chihhu Fault | D Chutung Anticline |
| 6 Chuhu Fault | 12 Tunglohsi Fault | E Taping structure |
| | | F Chienshih syncline |

圖 1-7、新竹地區區域地質構造圖。白線為縣市邊界。主要斷層：1、新竹斷層 (Hsinchu Fault, HCUF)；2、新城斷層 (Hsincheng Fault, HCEF)；3、斗煥坪斷層 (Touhuanping Fault, THPF)；4、竹東斷層 (Chutung Fault, CTF)；5、北埔斷層 (Peipu Fault, PPF)；6、竹湖斷層 (Chuhu Fault, CUHF)；7、軟橋斷層 (Juanchiao Fault, JCF)；8、大坪斷層 (Taping Fault, TPF)；9~10、鵝公髻斷層 (Okungchi Fault, OKCF, 此斷層有分支)；11、紙湖斷層 (Chihhu Fault, CIHF)；12、銅鑼溪斷層 (Tolunghsi Fault, TLHF)；13、和平—內灣斷層系統 (Hoping-Neiwan Fault, HPF-NWF)。主要褶皺為：A、青草湖背斜 (Chingtsaohu Anticline, CTHA)；B、寶山背斜 (Paoshan Anticline, PSA)；C、番婆坑背斜 (Fangpokeng Anticline, FPKA)；D、竹東背斜 (Chutung Anticline, CTA)；E、大坪構造 (Taping Structure, TPS)；F、尖石向斜 (Chienshih Syncline, CSS) (修改自中油十萬分之一地質圖，座標系統為二度分帶 TWD 67)。

1.3 前人研究

新竹地區雖然地震活動相對台灣其他地區少，但前人仍有許多研究討論新竹地區的活動構造與斷層延伸情形，許多研究透過野外地質調查與數值地表地形 (DTM) 之判釋討論斷層活動性與構造的特性，也有許多研究利用地球物理方法了解斷層地下形貌，包過反射震測及折射震測、地電探勘，輔佐以鑽井的井位資料，建構地質構造平衡剖面討論斷層地下幾何形貌，以下分三類說明：

1.3.1 地質構造剖面

新竹地區麓山帶地質構造的研究以討論斷層地下幾何形貌及其與褶皺發育的關係，對於新竹地區主要斷層地下幾何形貌有諸多不同解釋。Yang et al. (1996) 認為新城斷層在地底深部分支成兩支低角度逆衝斷層(圖 1-9)，並且沿著錦水頁岩的底部滑動，而新竹斷層在地底深部則分支成三個高角度的逆衝斷層，其中最北邊、傾角最陡的分支斷層是早期正斷層重新活化的結果，而新竹斷層與新城斷層在北邊合併的部分則認為是新城斷層的一個側滑坡；Namson (1984) 認為新竹斷層是盲斷層(圖 1-10)，在比較地底深部是高角度逆衝，近地表處則沿著河排層底部發育並在其上盤拱起斷層彎曲摺皺形成的青草湖背斜，而新城斷層則沿著錦水頁岩底部發育，上盤發育出寶山背斜，寶山背斜的地底深部在基底滑脫面上存在覆瓦狀斷層，使新城斷層底下拱起一對稱的背斜。番婆坑背斜深部逆衝斷層之單純轉折 (simple-step) 造成低起伏的對稱背斜，竹東斷層的活動形成上盤一西翼較陡的番婆坑背斜；大坪構造則是由兩個不對稱的陡峭褶皺所構成。此區地層層厚變化有由西向東變厚的情形。

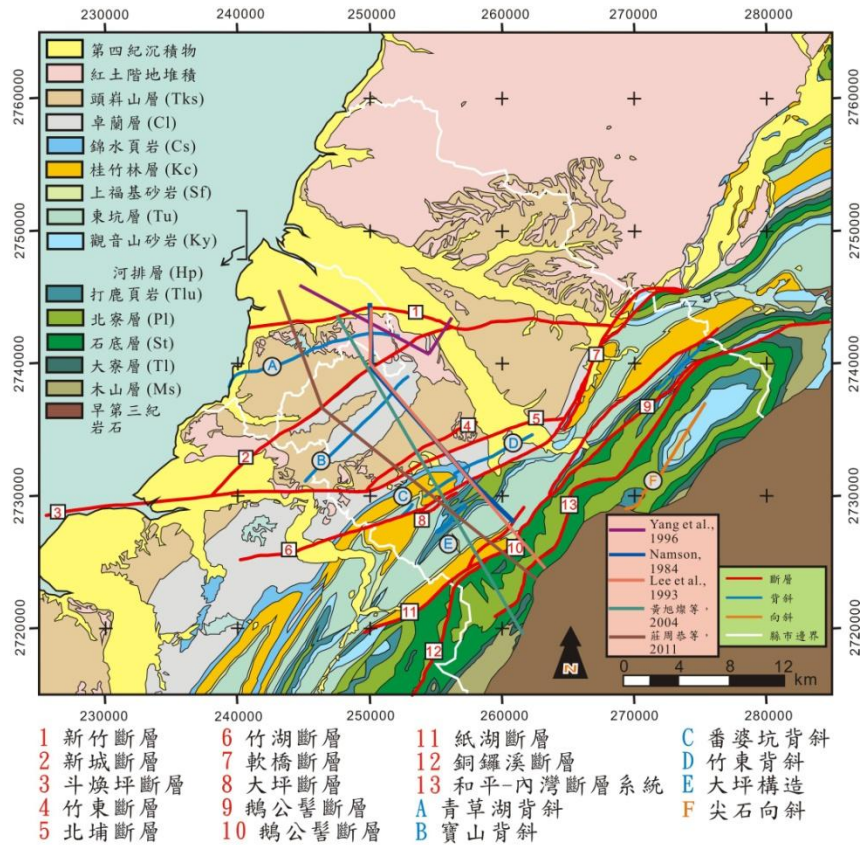


圖 1-8、新竹地區前人文獻中各地質剖面位置。圖例依序為圖 1-9 到圖 1-13。

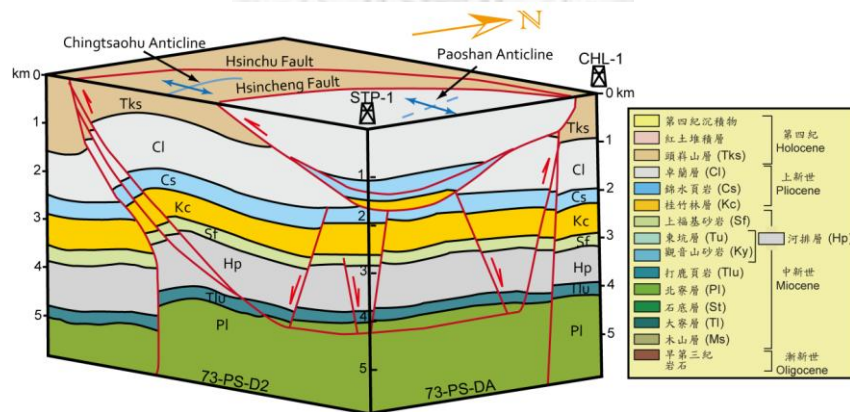


圖 1-9、楊耿明等透過竹苗地區多條震測剖面建構之三維示意圖(修改自 Yang et al., 1996)。

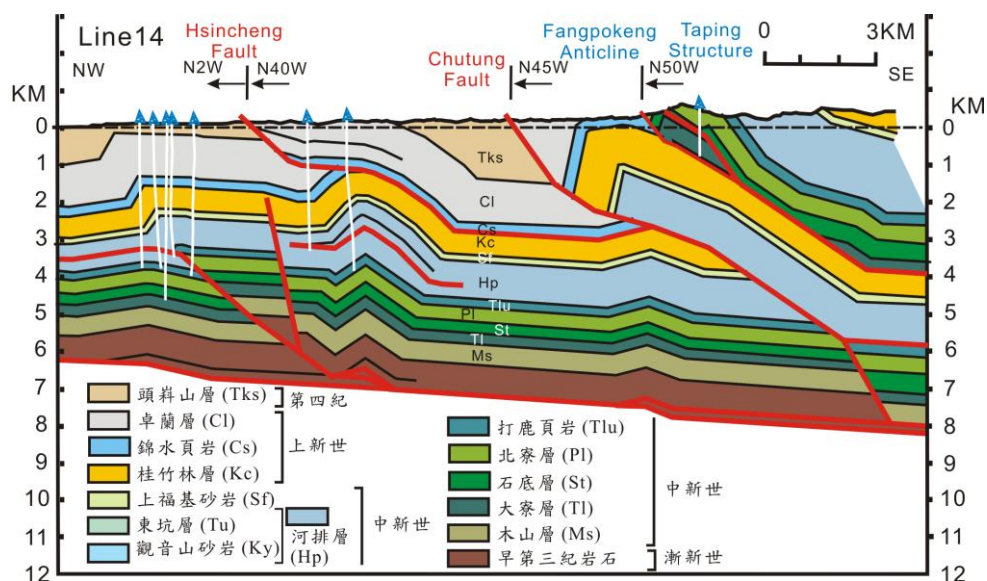


圖 1-10、Namson 建立之西部麓山帶一序列的地質剖面。基底滑脫面位於八~九公里深，新竹斷層為盲斷層，未切穿到地表，在三到四公里處是沿著河排層底部滑動，新城斷層則沿著錦水頁岩底部發育(修改自 Namson, 1984)。

Lee et al. (1993)解釋的新竹斷層和 Namson (1984)所推斷的構造型態大致上類似(圖 1-11)，上盤拱起一平緩的青草湖背斜，由井位控制認為新竹斷層上盤的石底層較厚，深部高角度的新竹斷層認為是重新活化的逆衝斷層，於三到四公里深處沿河排層間發育，往西邊方向發育並於青草湖背斜西邊切穿到地表；寶山背斜的發育和基底滑脫面上兩個低角度的覆瓦狀斷層有關；由河排層東邊較厚及石底層東邊稍薄的情形，認為深部的高角度逆衝斷層是早期正斷層重新復活的，而新城斷層的解釋和 Namson (1984)差不多，都是在錦水頁岩底部活動並切穿以上的地層。竹東背斜為一不對稱背斜及斷層彎曲褶皺，它受控於地下低角度逆衝斷層及兩高角度逆衝斷層—北埔斷層與軟橋斷層，北埔斷層及竹東斷層為近期發育的逆衝斷層，而軟橋斷層則為早期正斷層活化的逆衝並帶有右移分量的斷層。最東邊的大坪構造為兩個向西發育、陡峭的褶皺組成，形貌受控於基盤的變形行為，且位於軟橋斷層與番婆坑斷層之間，番婆坑斷層也是早期正斷層重新復活的高角度逆衝斷層。

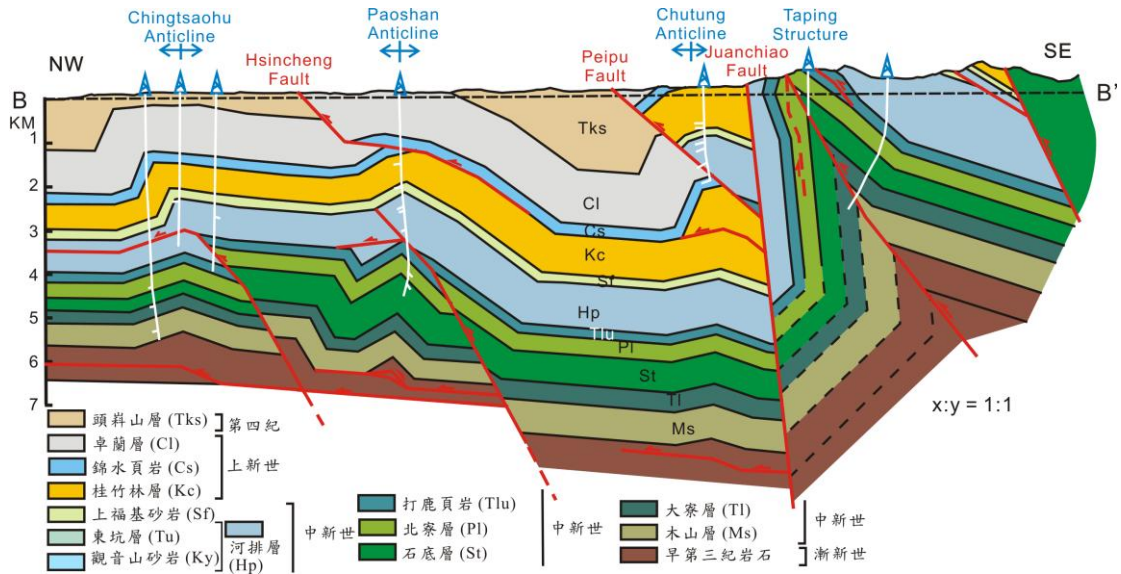


圖 1-11、Lee et al. (1993)根據井位資料及地表傾角解釋新竹地區的地下構造。新竹斷層的解釋和 Namson (1984)類似，但新城斷層深部存在一高角度重新活化的逆衝斷層，造成河排層層厚在東邊比較厚(修改自 Lee et al., 1993)。

黃旭燦等(2004)認為新城斷層在地底分為兩支低角度逆衝斷層(圖 1-12)，分別在河排層中段與桂竹林層底部轉成層間斷層，下盤由震測解釋出現早期正斷層，且新城斷層上下盤均受到五指山層底部楔形體的摺曲作用而變形；參考震測資料顯示竹東斷層與北埔斷層在淺部合而為一，軟橋斷層為一斷距大的高角度斷層，而北寮層沿著鵝公髻斷層逆衝到桂竹林層之上，認為可延伸至南邊的紙湖斷層。

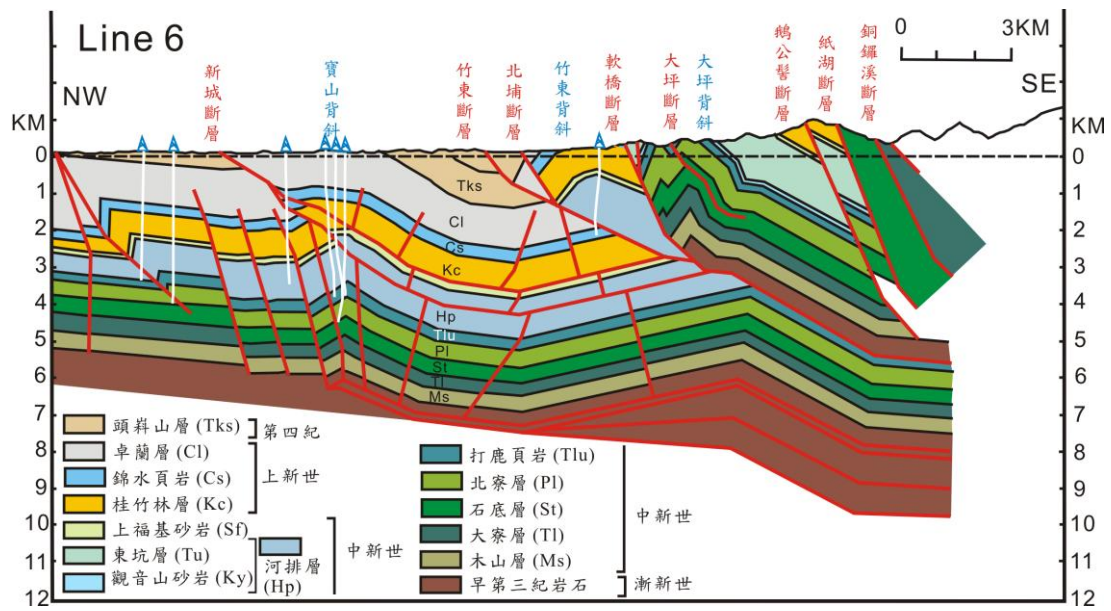


圖 1-12、黃旭燦等由震測及鑽井資料解釋之地質剖面(修改自黃旭燦等，2004)。

近期的地質剖面研究加入正斷層活動造成上下盤地層層厚變化的觀念來討論。莊恭周等(2011)討論番婆坑構造儲集層之特性(圖 1-13)，由井位資料及震測解釋顯示，河排層和打鹿頁岩上盤較厚的情形說明新竹斷層為老的正斷層，新城斷層上盤河排層較厚亦說明新城斷層是復活反轉下的產物；寶山背斜與竹東背斜間有一未命名的正斷層，造成斷層上盤地塊持續沉陷而沉積了較厚的頭嵛山層與卓蘭層，重力亦顯示此區為負的異常區(林書帆，2007，圖 1-14)。

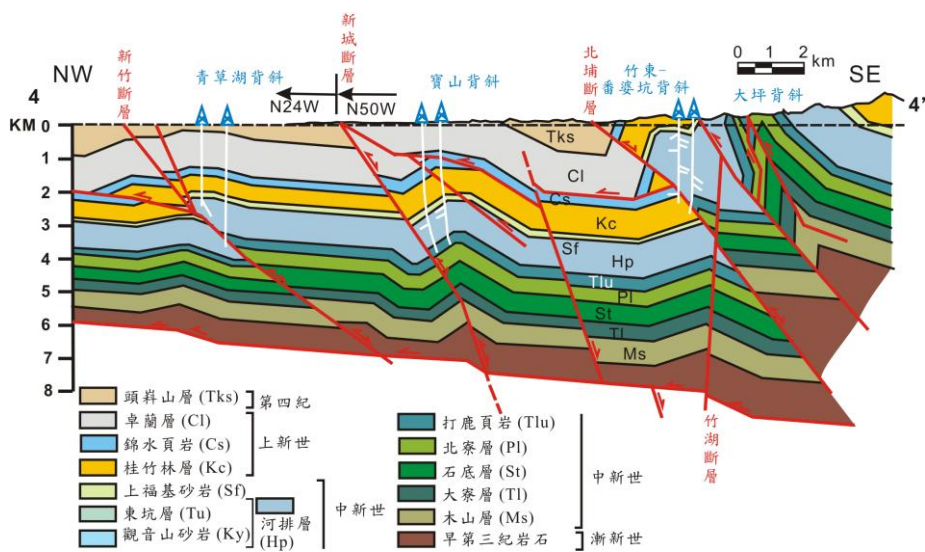


圖 1-13、莊恭周等由震測與井位資料建立之地質剖面(莊恭周等，2011)。

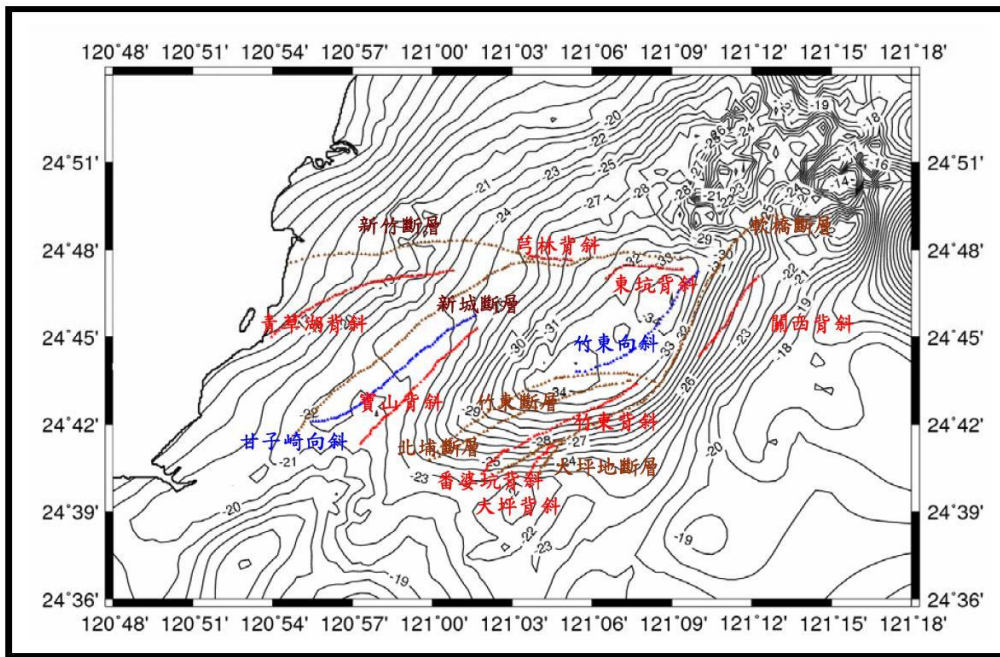


圖 1-14、新竹地區重力分布圖。寶山背斜東翼與竹東背斜顯示為重力負值區(摘自林書帆，2007)。

1.3.2 區域構造反轉及斷層活化

Huang et al. (1993)指出在竹苗地區的西北外海(圖 1-15, 圖 1-16), 於始新世早期到中新世中期處於張裂環境之下, 形成一系列近乎東西走向(N79E)排列正斷層組成之地塹與地壘, 其年代甚至早於始新世; 而到了中新世晚期的蓬萊造山運動開始, 逐漸轉為擠壓的應力, 使這些東西向的正斷層先轉變為逆衝斷層或走向滑移斷層, 較晚期時地塹也開始收縮, 主要受到逆轉的應力作用以靠近陸域的區域為主, 逆轉的特徵從新竹往南日島脊方向、觀音高區往大甲外海逐漸減弱。同時他也指出, 靠近陸域幾條重新活化的逆斷層可以向東延伸, 並連接到陸域的幾條東北東-西南西走向的高角度逆衝斷層, 例如: 斗煥坪斷層、新竹斷層以及湖口斷層。

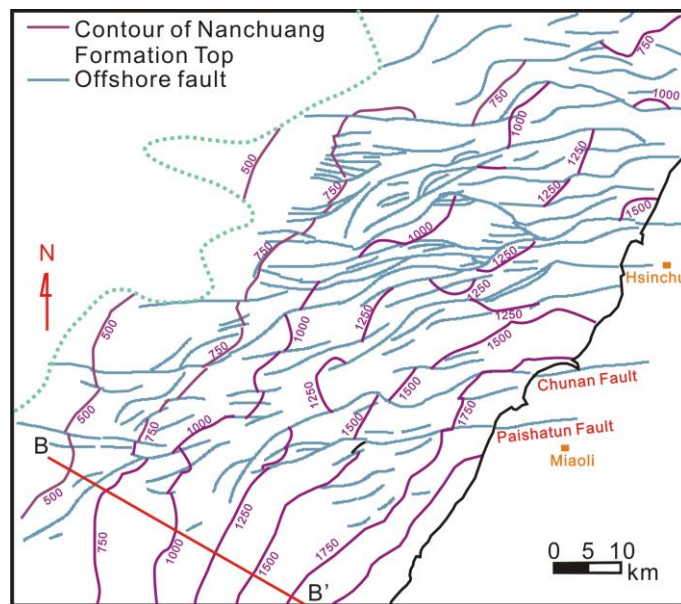


圖 1-15、新竹及苗栗外海南莊層頂部等時線圖。在南莊層堆積的時期雖然仍然以近乎東西走向的正斷層系統為主，但已有部分西北西走向正斷層重新活化為逆衝斷層，其中有些逆斷層更可以延伸到內陸(修改自 Huang et al., 1993)。

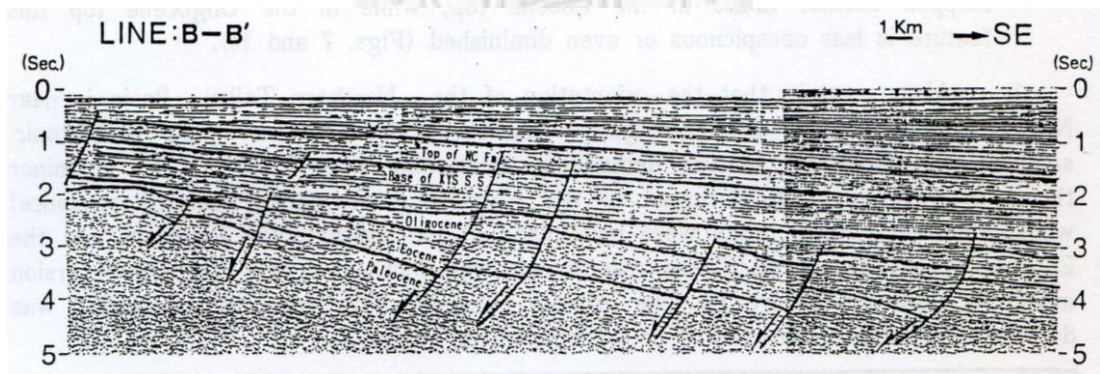


圖 1-16、苗栗外海震測剖面圖。剖面位置見圖 1-15，此剖面通過苗栗南部外海，西北—東南走向，古新世到漸新世可見明顯正斷層系統造成較大的層位落差，而中新世以後的地層受重新復活的斷層轉變為逆衝斷層，導致地層的層位落差較小，南莊層頂部甚至不受斷層作用(Huang et al., 1993)。

Lee et al. (1993)指出台灣西北部外海存在一系列東—西走向的地塹及地壘與正斷層系統是早期發育的正斷層後來復活成逆衝斷層(圖 1-17)，並有構造反轉

(Inversion) 的變形發生，其中部分斷層帶有走向滑移的分量；而南莊層與觀音山砂岩的層厚變化認為是東—西走向的正斷層系統影響 (Lee et al., 1993; Huang et al., 1993)，打鹿砂岩於斷層層位落差可見明顯的右移斷層形貌。

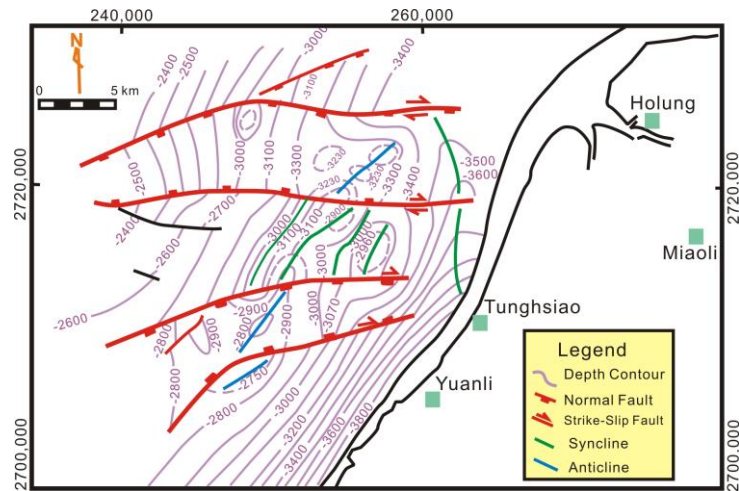


圖 1-17、打鹿砂岩頂部的構造等深線圖。一系列東—西走向的地塹與地壘及正斷層系統是造山運動造成之重新活化的斷層，其中斷層帶有右移分量(修改自 Lee et al., 1993)。

Suppe (1984)由新竹地區的震測剖面討論與斷層相關(fault-related)的構造及褶皺發育情形(圖 1-18, 圖 1-19),他認為新竹地區有兩個基底滑脫面(detachment)，淺部的位於雙程走時約 1.3 秒(上福基砂岩底部)，深部的則在 2.7 秒(五指山層底部)的位置，由青草湖背斜的形貌認為它早期有一斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)沿著五指山層底部發育，發育到早期的正斷層後停止，這些正斷層切過新竹地區中新世的地層，並於後期活化成逆衝斷層；更新世時再沿著淺部的滑脫面(detachment)發育斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)拱起的青草湖背斜，其中因為褶皺有向西北剪切的分量(shear)，造成較寬且平緩的後翼(back limb)。

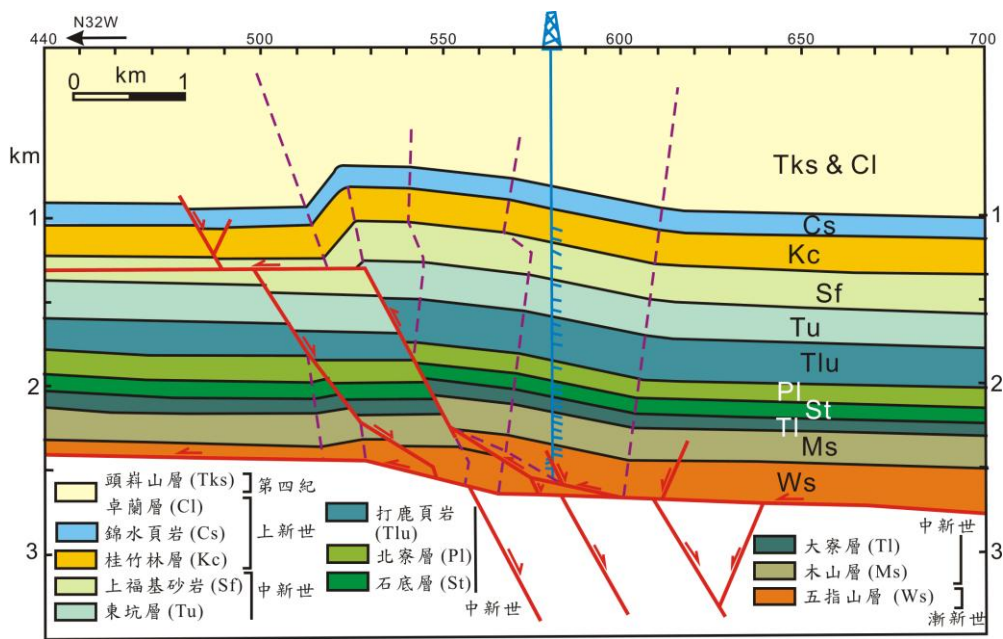


圖 1-18、Suppe 依據震測剖面解釋斷層相關之構造圖。他認為中新世的地層有一系列正斷層切過，這些正斷層並受到後期擠壓重新活化成逆衝斷層，造成斷層的垂直滑移量較小(修改自 Suppe, 1984)。

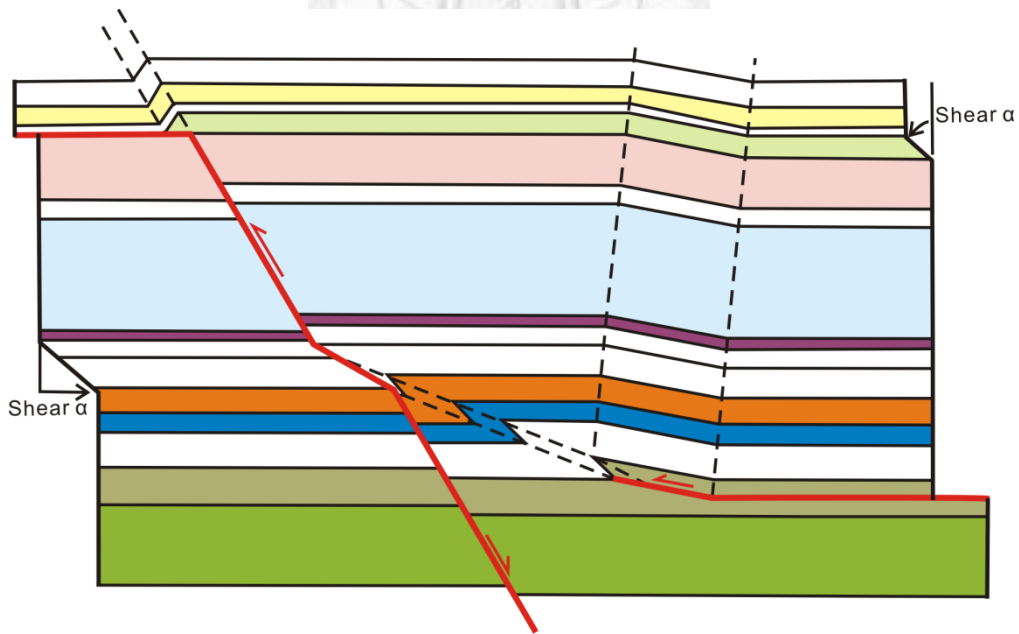


圖 1-19、上圖震測剖面解釋之褶皺與斷層關係示意圖。淺部地層有向西北方(圖的左方)的剪切分量 (shear)，造成上福基砂岩(淺部淺綠色地層)有剪切的情形(修改自 Suppe, 1984)。

1.3.3 震測及地表調查

Chan et al. (2007)由高精度地形資料討論新城斷層於頭前溪南岸區域的斷層形貌特性(圖 1-20)，認為新城斷層於頭前溪以南比以北的形貌複雜，新城斷層切過年輕的河階亦顯示它是年輕的構造及全新世以來曾經有活動過的跡象，由河階錯移的形貌也認為新城斷層是一逆衝帶左移分量，且河階出現平緩的褶皺與新城斷層發育有關。Chen et al. (2004)由地形判識認為頭前溪存在一較近期活動的扭轉斷層(wrench fault) (圖 1-21)，甚至比新竹斷層與新城斷層還活躍，而新竹斷層與新城斷層為逆衝帶右移分量的斷層，由斷層活動截切之地層與判釋之河階高度判斷，新竹斷層與新城斷層沿斷層之最小滑移速率分別為 0.45 及 0.7 m/ka，比台灣中部小，顯示此區逐漸受到沖繩海槽伸張的應力影響；而撓曲河階面也指示草湖背斜與寶山背斜等構造均分布於頭前溪以南的地區。

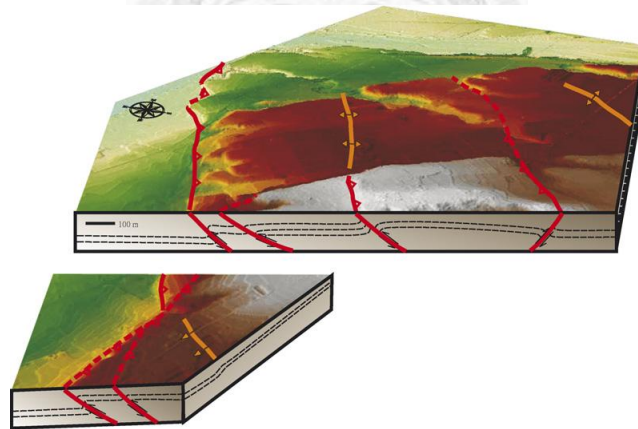


圖 1-20、光達地形判識之構造圖。Chan et al. (2007)由光達(LiDAR)地形資料判釋認為之新城斷層形貌與此區的構造特性，圖片左邊為北方，由河階錯移情形認為新城斷層南邊有出現一背衝斷層(back-thrust)，並指出有一區域性的開花狀構造(pop-up structure)。

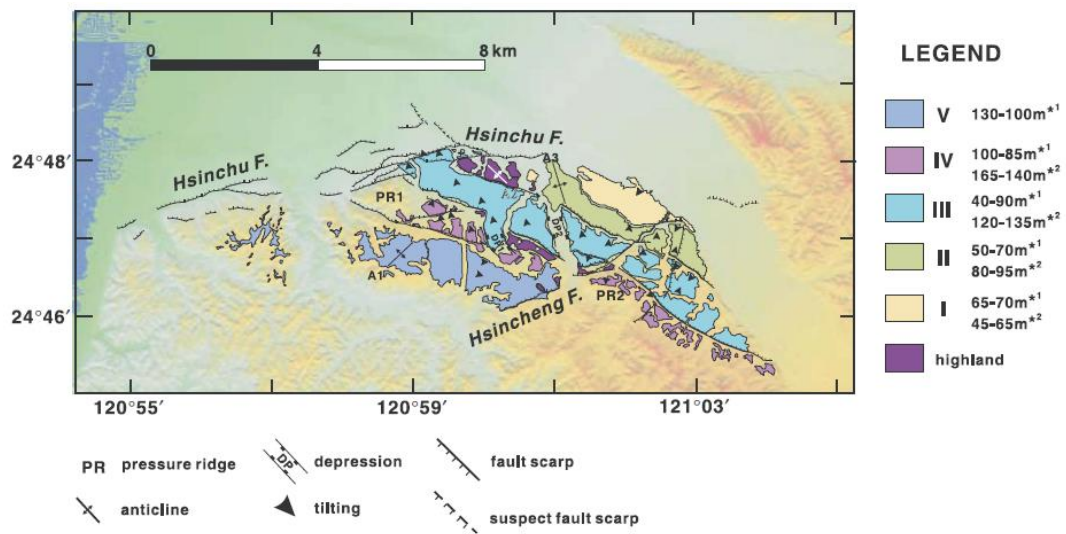


圖 1-21、地表高程地形判識之頭前溪沿岸的河階圖。Chen et al. (2004)由四十公尺 DEM 判釋出五階的河階，新竹斷層與新城斷層切過較年輕的河階顯示其活躍性，此兩斷層亦顯示逆衝帶右移分量的特性，其中判釋出頭前溪存在活躍的扭轉斷層（wrench fault）。

石同生等(2003)認為新城斷層跡分布於頭前溪以南，以北的部分仍待確認，並於全新世活動過，推估斷層滑移速率約為 0.7 mm/yr ~ 1.6 mm/yr，由斷層一次活動的淨滑移量約為 3.2 公尺(李元希等, 2002)，粗估斷層再現週期約 2000 年左右；依斷層活動性分類應為第二類活動斷層，並極可能為第一類活動斷層。陳文山等(2003)由槽溝開挖討論新城斷層的古地震活動(圖 1-22、圖 1-23)，最近一次地震活動發生於 300 年以來，造成的地表垂直抬升量約 1.3 到 1.85 公尺，而由新城斷層切過判識的最老河階年代 66.9 ~ 63.4 ka 與斷層兩側高度差 70 公尺推斷，新城斷層上盤平均抬升率約 1 mm/yr。



圖 1-22、開挖通過新城斷層之槽溝。槽溝顯示卓蘭層逆衝到晚更新世的砂礫層之上，斷層傾角向東南方(陳文山等，2003)。

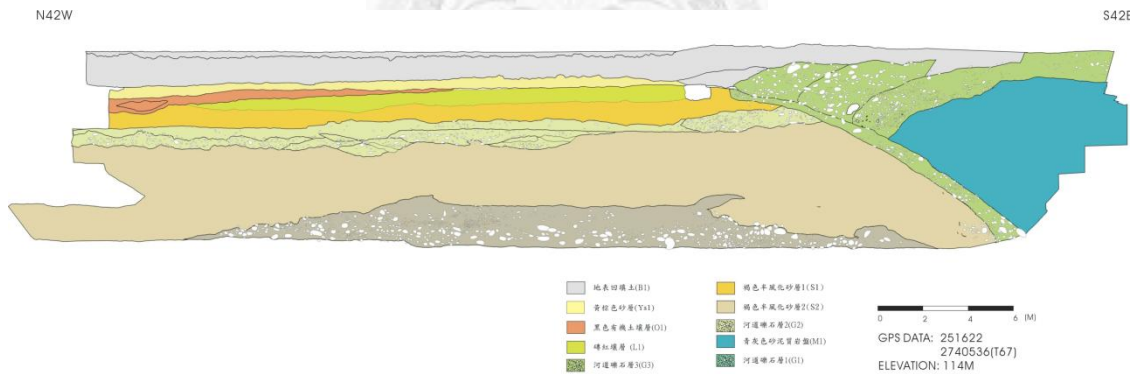


圖 1-23、跨過新城斷層之槽溝解釋圖。圖 1-22 的槽溝位於此解釋圖剖面東南側的部分。

新城斷層為一向東南傾沒的逆衝斷層，北段呈東北東走向，斷層露頭不佳，由關西南方延伸到頭前溪北邊，而南段露頭良好，由頭前溪一直延伸到頭份一帶，斷層傾角約四十度向南(林啟文，2000；盧詩丁，2000)。石瑞銓等(2003)利用 P 波與 S 波淺層反射震測調查認為新城斷層為東北—西南走向(圖 1-24)，上下盤的地層皆向東南傾沒，但上盤地層的傾角較下盤稍大。

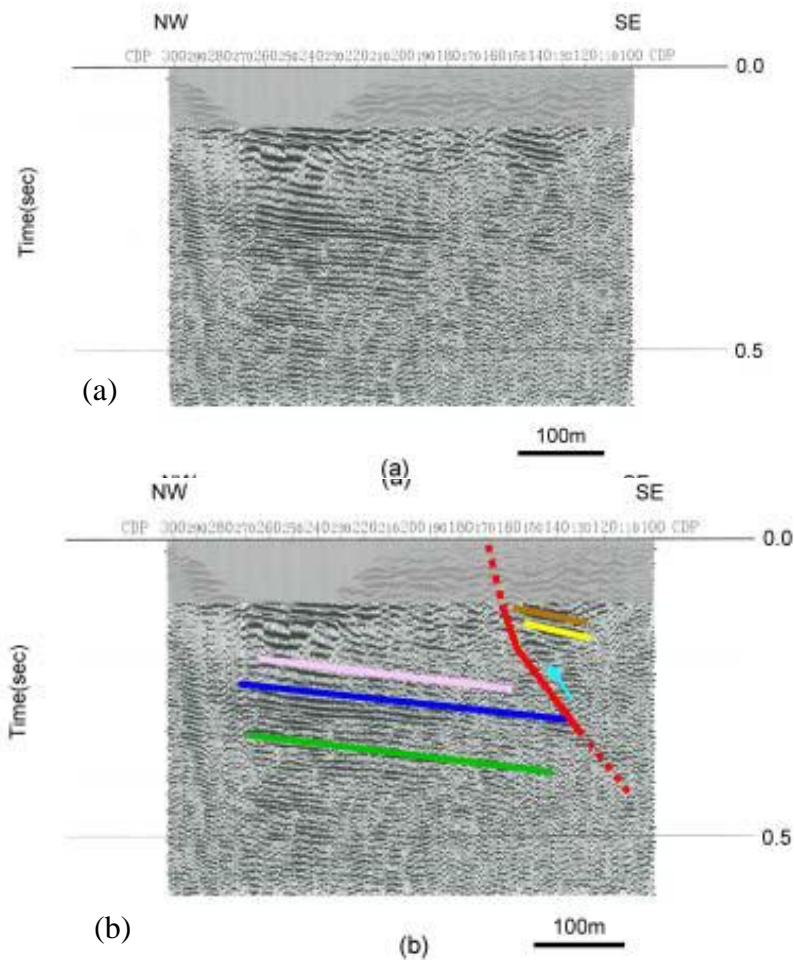


圖 1-24、石瑞銓等的淺層反射震測調查。(a) 原始震測剖面。(b) 解釋後震測剖面。紅色為斷層線，其餘為地層線，剖面中岩層一致往東南方傾沒，斷層上盤地層傾角較高，而下盤地層角度稍小(石瑞銓等，2003)。

1.3.4 大地測量

1.3.4.1 GPS 速度場及應變率

新竹地區的 GPS 連續觀測站多介於新城斷層兩側，相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場，新城斷層兩側速度介於 3.6 到 6.4 mm/yr 之間，向北北西的方向，平均速度場為 4.9 mm/yr，平均方位角為 330 度(圖 1-25)；新竹與竹北地區皆呈現明顯的壓縮之主軸應變，最大面膨脹率為 1.42 μ strain/yr，新城斷層的上下盤之測站計算出平均應變率為 -0.05 μ strain/yr，應變率指示新城斷層皆為壓縮應力，顯示此斷層為逆衝斷層(圖 1-26)；在旋轉率方面，跨過新城斷層有些微的逆時針旋轉(圖

1-27)，其餘地區皆不明顯(胡植慶等，2010)。

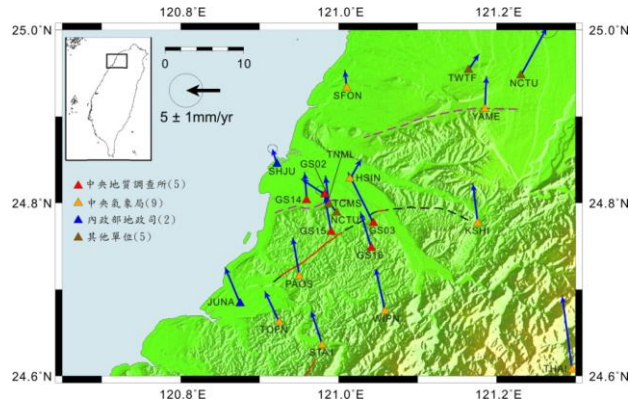


圖 1-25、新竹地區 GPS 連續觀測站之平均速度場(摘自胡植慶等，2010)。

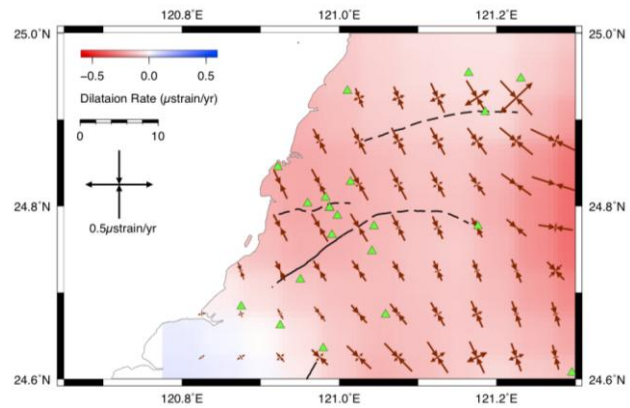


圖 1-26、新竹地區 GPS 連續觀測站之主軸應變率與膨脹率。雙箭頭向內表示壓縮主軸應變軸，向外則為伸張主軸應變軸，底圖為面膨脹率，紅色為壓縮，藍色為伸張，三角形為計算應變率之測站位置(摘自胡植慶等，2010)。

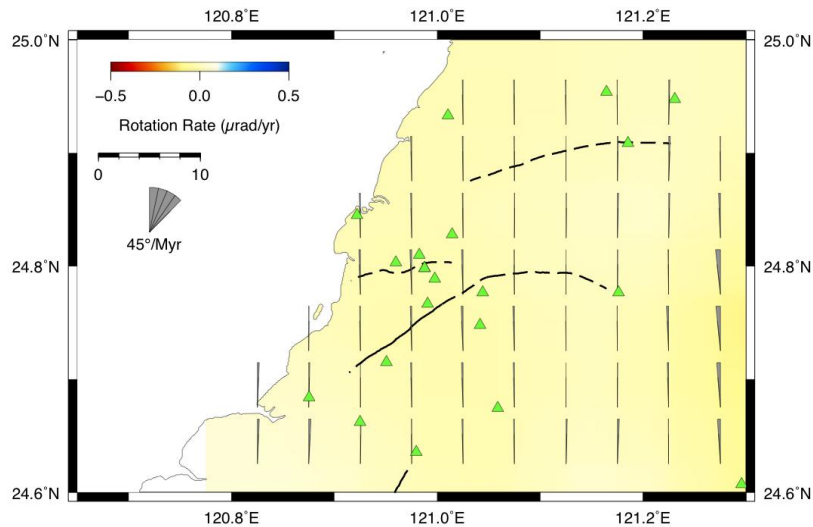


圖 1-27、新竹地區 GPS 連續觀測站之旋轉率。扇形向右與向左分別為順時針與逆時針旋轉(摘自胡植慶等，2010)。

1.3.4.2 水準測量

新竹地區的兩條水準測線包括縣 122、從新竹到五峰以及縣 117、新竹到峨眉的測線(饒瑞鈞等, 2010, 圖 1-28), 縣 122 測線顯示(圖 1-29), 於 2002 年、2004 年、2005 年、2006 年、2008 年、2009 年與 2010 年的七次測量中, 垂直方向速度變化落於 0 到 4 mm/yr 之間, 且時間序列的趨勢線大致相似, 指示此區於 2002 年到 2010 年間斷層活動並不明顯; 縣 117 測線指出(圖 1-30), 整條測線的垂直速度皆無明顯變化, 唯 2005-2006 年間高程變化與其他時段不同, 認為疑似與 2006 年 7 月的凱米颱風之降雨有關。

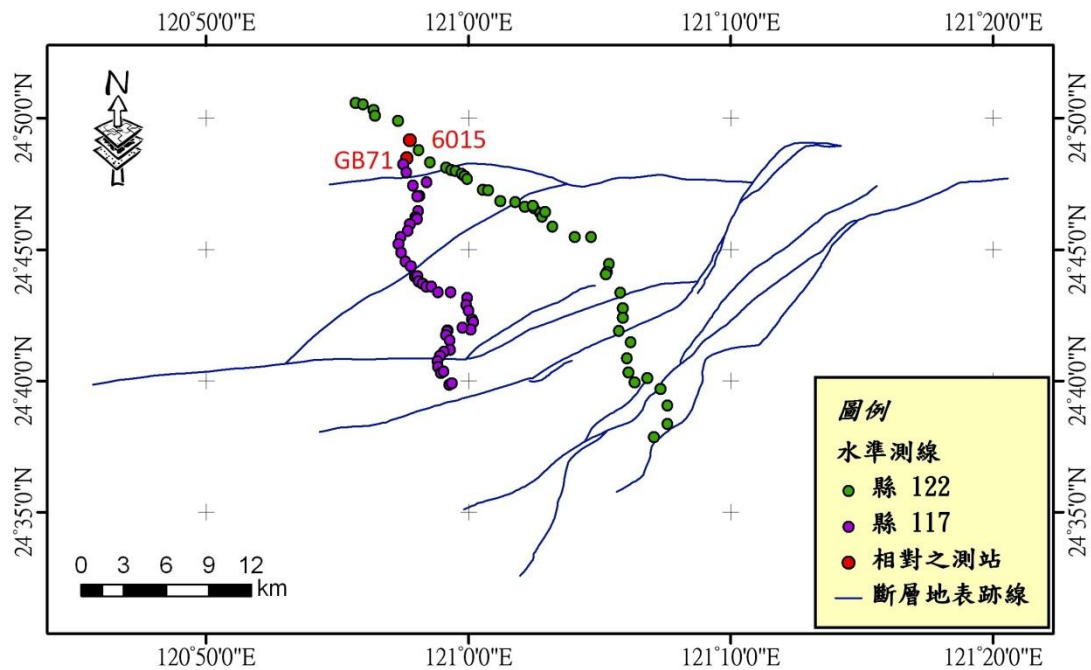


圖 1-28、新竹地區的兩條水準測線位置圖。綠色與紫色分別為縣 122 及縣 117。

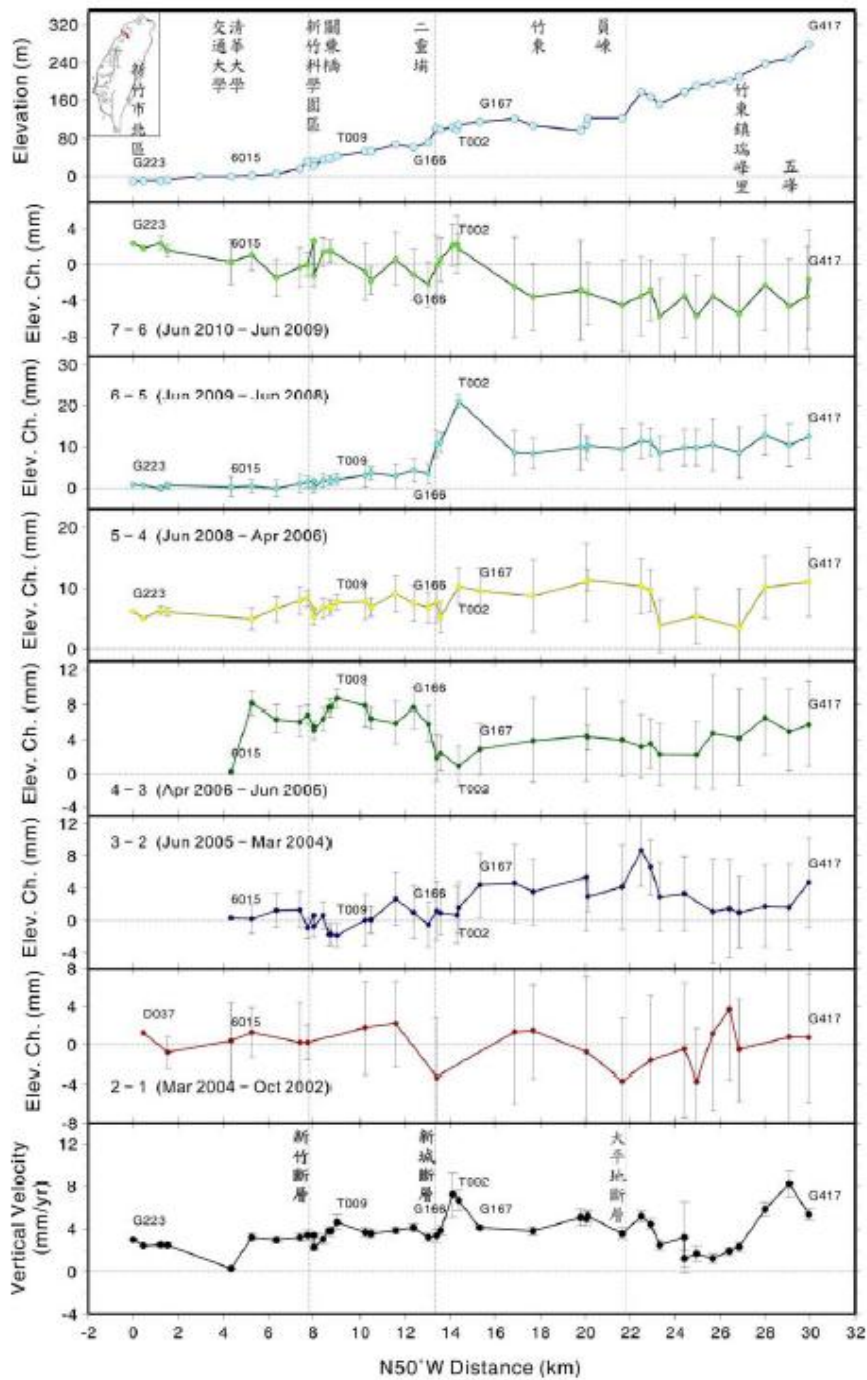


圖 1-29、縣 122、從新竹到五峰測線水準垂直速度圖。測線位置見圖 1-28(饒瑞鈞等, 2010)。最上欄為固定最西側之測點高程為 0 公尺之地形變化, 最下欄為相對於澎湖 S01R 測站之精密水準抬升速率, 中間各欄為相鄰兩次測量之高程變化差的曲線, 垂直虛線為地調所公布之活動斷層地表出露位置, 水平虛線為垂直速度與高程為零之位置, 測線長度為投影於垂直斷層剖面展示之距離。

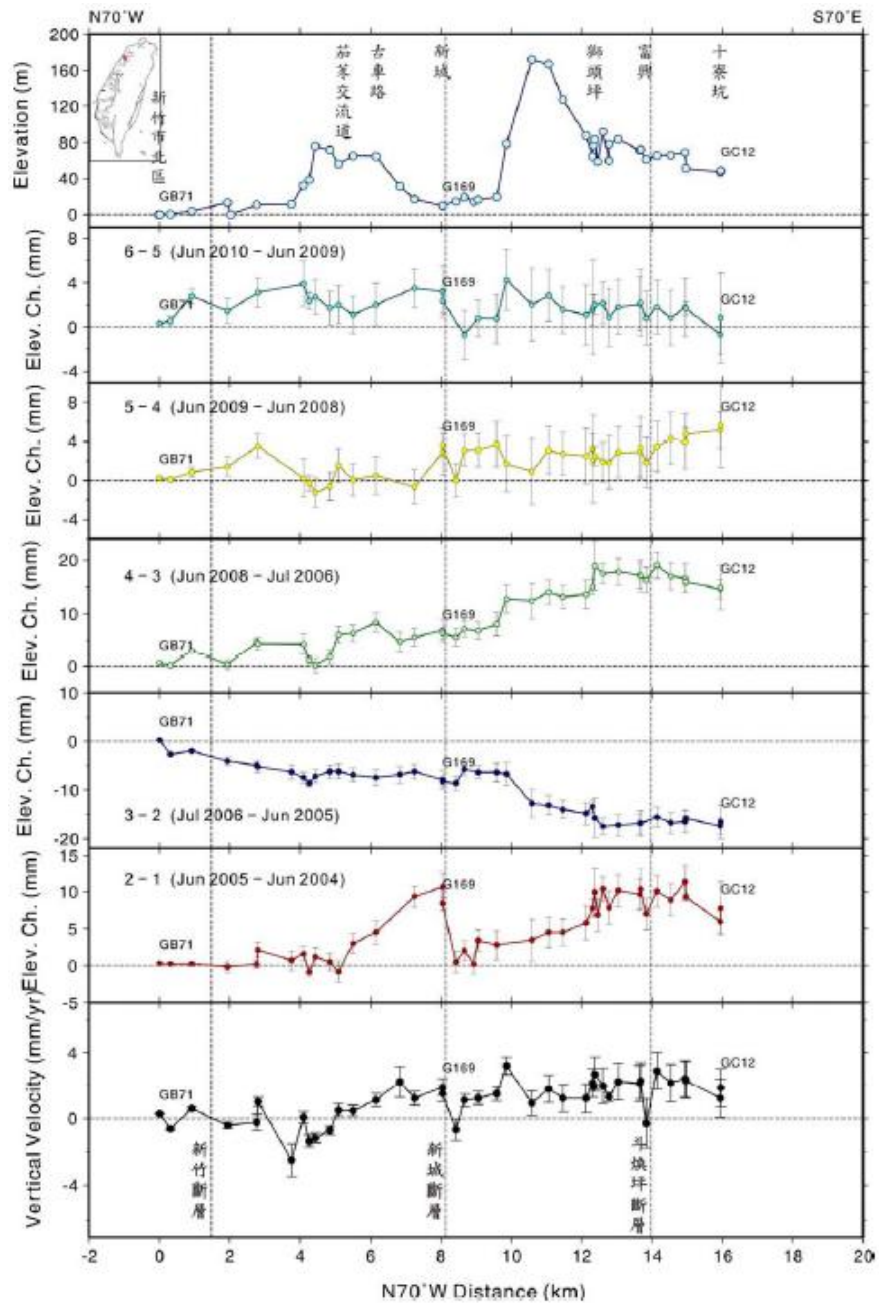


圖 1-30、縣 117、新竹到峨眉的測線水準垂直速度圖。測線位置見圖 1-28 (饒瑞鈞等, 2010)。圖例同圖 1-29。

第二章 地體構造與地質背景

2.1 研究區域

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的交界，菲律賓海板塊以每年 8.2 公分的速率相對於澎湖向西北方向靠近(Yu et al., 1997)，兩板塊的隱沒造成台灣北部與南部兩不同方向的隱沒系統(圖 2-1)。台灣東北方的琉球弧溝系統為菲律賓海板塊向北隱沒到歐亞大陸板塊之下，伴隨沖繩海槽的弧後張裂系統，沖繩海槽的伸張中心已向西延伸到台灣內陸的蘭陽平原，台灣南部的呂宋島弧系統則為歐亞大陸板塊向東隱沒至菲律賓海板塊之下。由於兩板塊擠壓方向為由東南向西北方向推進，造成了台灣主要地體架構為東北—西南走向(圖 2-2)，並由東向西分為四個主要地體構造單元(何春蓀，1986)，包括屬於菲律賓海板塊、島弧火山系統為主的海岸山脈，包含東半部大南澳變質雜岩與西半部板岩帶的中央山脈，接著是一序列褶皺與斷層作用的西部麓山帶，最後是最西邊以沉積物為主的海岸平原。

本研究區域新竹地區包括西部麓山帶及海岸平原，西部麓山帶的構造又可以分為內麓山帶與外麓山帶兩部分(圖 2-3、圖 2-4)，內麓山帶以北北東—南南西走向的逆衝斷層為主，伴隨發育的是緊密與不對稱的褶皺系統，斷層的上下盤斷距通常很大，外麓山帶則為新期活動的構造為主，包括寬闊且開放型態的褶皺，以及東北—西南走向的逆衝斷層系統，此斷層系統的南北側被東—西走向的走向滑移斷層所截切；內外麓山帶通常以界線斷層做區隔，在新竹地區的邊界斷層為軟橋斷層；褶皺由緊密到開放性的型態，顯示西部麓山帶變形的程度由東向西逐漸變小。新竹外海的台西盆地則分布著一系列東—西走向為主的高角度逆衝斷層系統，乃中新世正斷層作用重新活化的結果(Suppe, 1986，圖 2-2)。

本研究區域北界為軟橋斷層北端的石門水庫一帶，南至銅鑼溪斷層與紙湖斷層南端，緯度大約與明德水庫相等，東邊則到和平—內灣斷層系統為止。

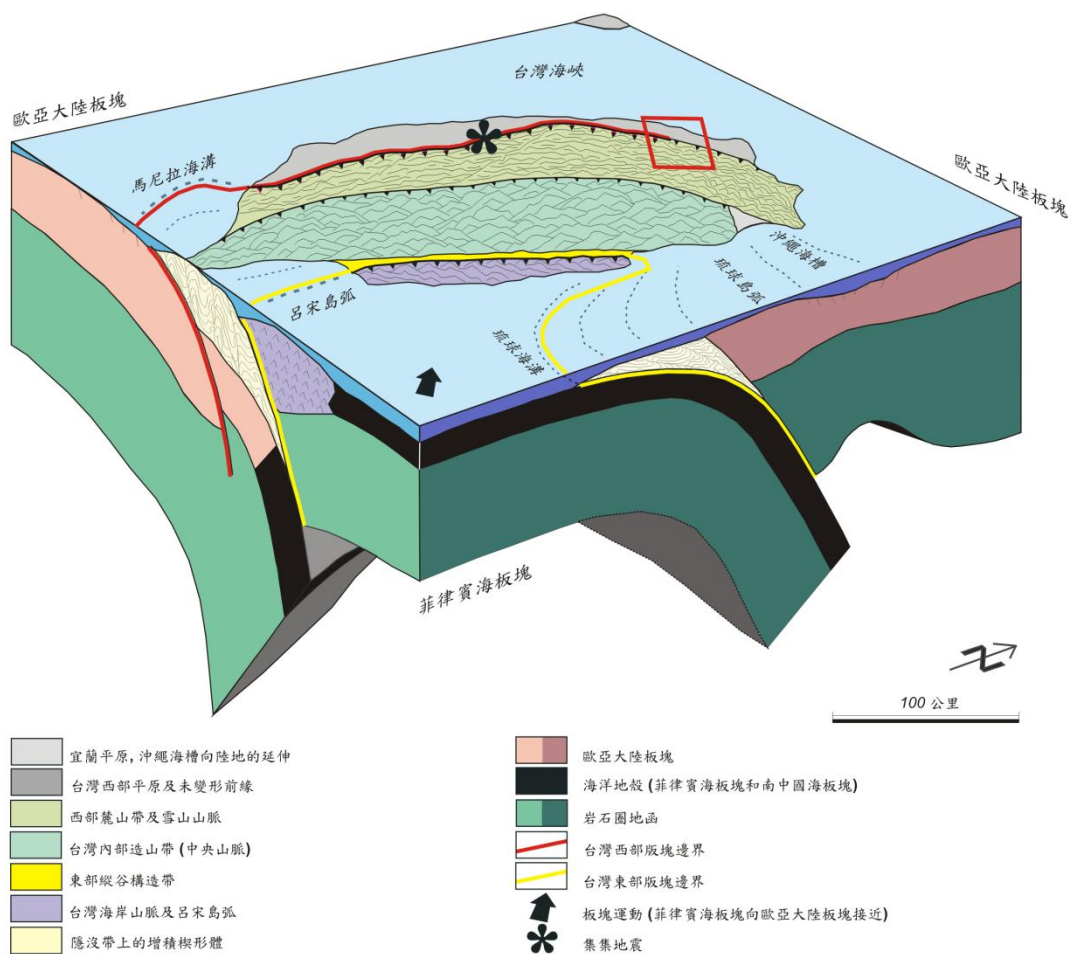


圖 2-1、台灣三維地體架構圖。地質分區主要分為四區，包括最東邊由火山島弧組成的海岸山脈，中間以花東縱谷與變質岩為主的中央山脈做分隔，往西邊是褶皺及斷層交錯分布的西部麓山帶，最後是最西部以沖積層為主的海岸平原；紅色區域為本研究區域新竹地區(修改自 Angelier et al., 2001)。

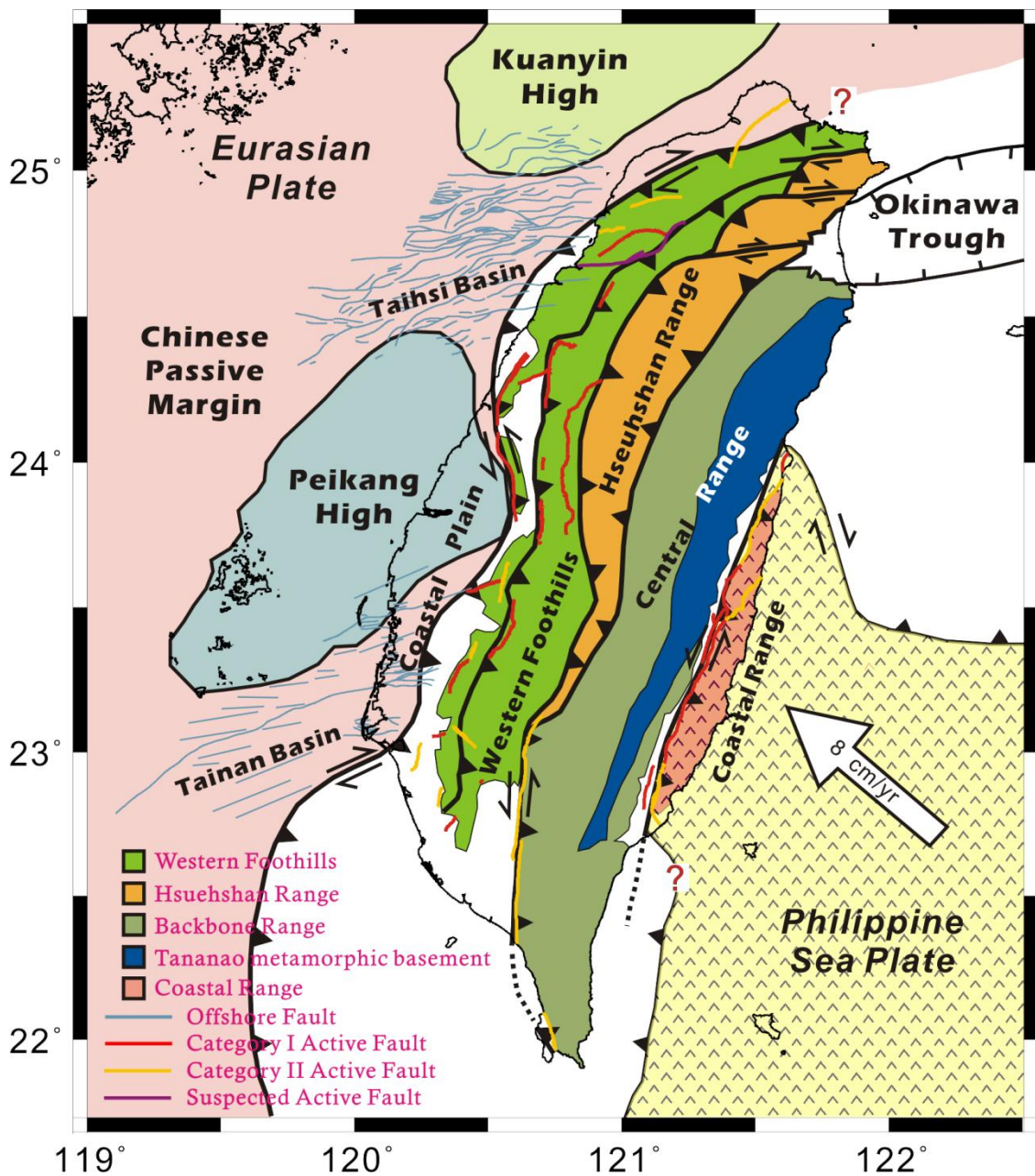


圖 2-2、台灣地體架構與褶皺逆衝帶構造線分佈圖。由於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊聚合方向為西北—東南向，故造成台灣主要構造呈東北—西南走向，並呈現 S 形，內凹處臨北港高區，其南北側朝平原區凸出處則與台西盆地與台南盆地相接，新竹外海的台西盆地分布一系列東—西走向的正斷層系統，台南盆地也分布著東—西走向的斷層為主(修改自 Lacombe et al., Lee et al., 2002, 以及 Huang et al., 1993, 活動斷層為 2010 年經濟部中央地質調查所定義)。

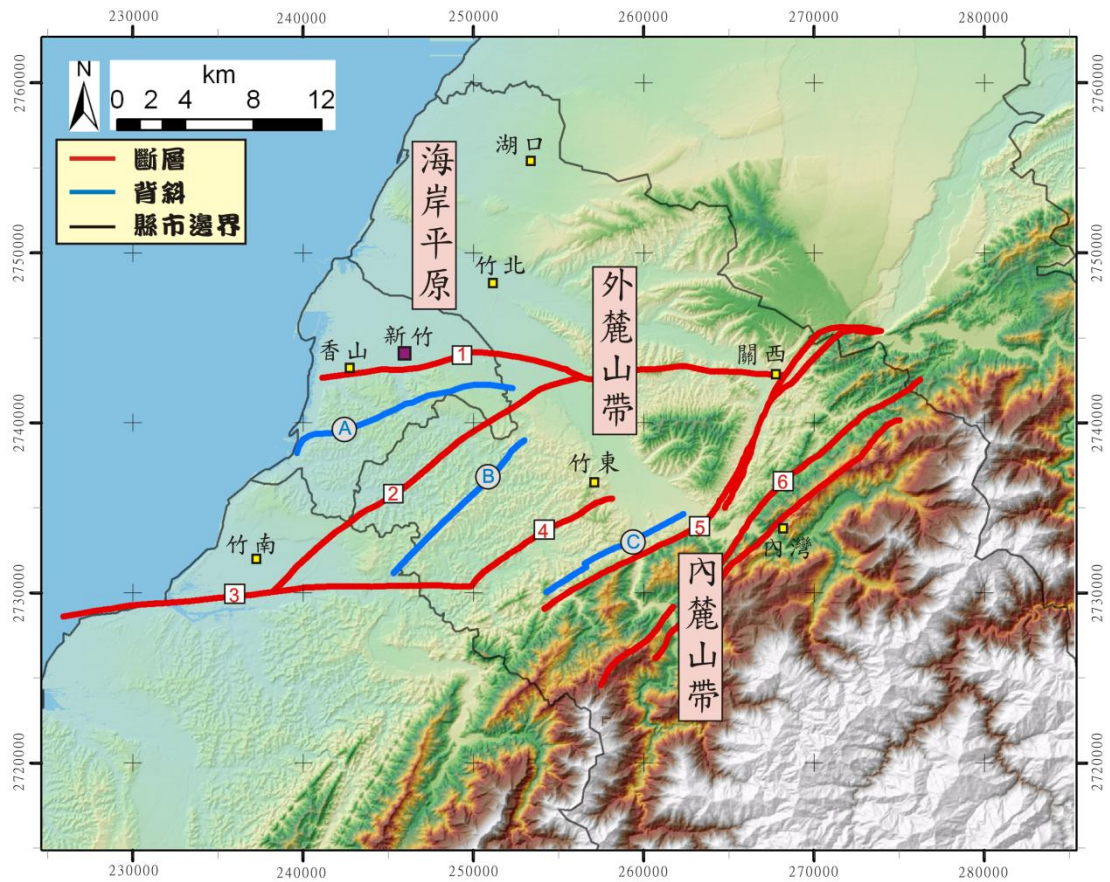


圖 2-3、研究區域主要構造線分布圖。以軟橋斷層為界，分為內麓山帶與外麓山帶。

1：新竹斷層；2：新城斷層；3：斗煥坪斷層；4：竹東斷層；5：軟橋斷層；
 6：鵝公髻斷層；A：青草湖背斜；B：寶山背斜；C：竹東背斜（資料來源：
 構造線數化自中國石油公司十萬分之一地質圖，中國石油公司，1978，1994；
 地形陰影圖為台灣四十公尺數值高程模型）。

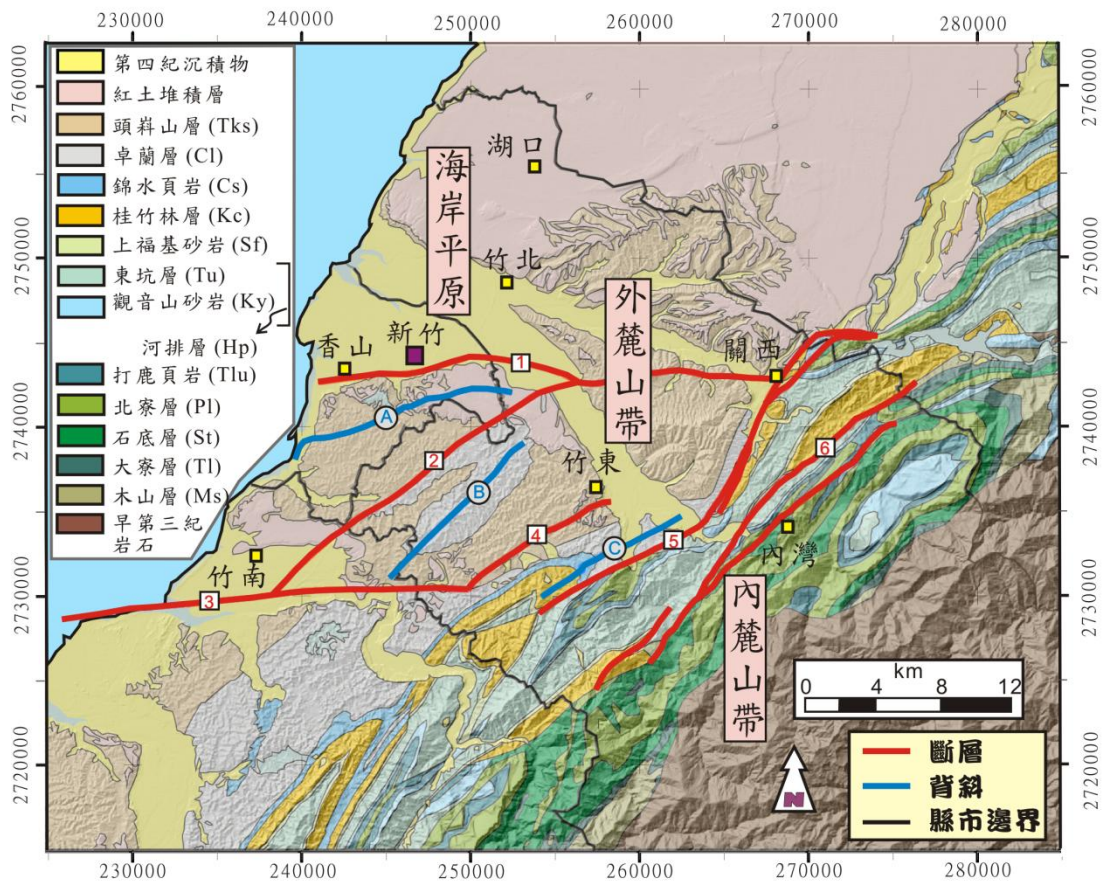


圖 2-4、地質圖套疊地形陰影圖。1：新竹斷層；2：新城斷層；3：斗煥坪斷層；4：竹東斷層；5：軟橋斷層；6：鵝公髻斷層；A：青草湖背斜；B：寶山背斜；C：竹東背斜(資料來源：地質圖與構造線來自中油十萬分之一地質圖，中國石油公司，1978，1994；地形陰影圖為台灣四十公尺數值高程模型)。

2.2 地質概況

2.2.1 地質構造

研究區域內的斷層包括新竹、新城、斗煥坪、竹東、北埔、竹湖、軟橋、大坪、鵝公髻、紙湖、銅鑼溪、和平及內灣斷層等，其中地調所 2010 年定義的活動斷層包括新竹斷層、新城斷層與斗煥坪斷層，林啟文等(林啟文等，2007)提到的台灣北部活動斷層及存疑性活動斷層除了上述三條之外，還包括軟橋斷層(又名大平地斷層)與竹東斷層；軟橋—大坪—竹湖斷層系統為分割外麓山帶與內麓山帶的重要邊界斷層，新竹地區的構造、地形與地層分布以此斷層系統作為主要分界；主要褶皺構造為青草湖背斜、寶山背斜、番婆坑背斜、竹東背斜與大坪構造等(圖 2-3、圖 2-4)。以下分述主要斷層及褶皺特性：

1、新竹斷層(HCUF)

斷層近東西走向，截切青草湖背斜的北翼，且約略平行青草湖背斜褶皺軸面走向，兼具右移與逆衝特性(Chiu, 1970；Tang and Hsu, 1970)，地表斷層沿頭前溪南岸分布，位於竹東丘陵的北緣；斷層面向南傾斜約 50 度(Chiu, 1970)，斷層向東延伸與新城斷層相連，為新城斷層發育時的側向滑坡(lateral ramp)(Yang et al., 1996)；斷層上下盤皆出露頭嵙山層，上下盤層位落差約六百公尺到七百五十公尺不等(Chiu, 1970；Tang and Hsu, 1970)；新竹斷層為中央地質調查所 2010 年所定義的第二類活動斷層。

2、新城斷層(HCEF)

新城斷層平行寶山背斜並截切其西翼(Yang et al., 1994)，以頭前溪為界，北段走向呈東北東走向，斷層長約十六公里，南段則為東北走向，長約十六公里，為逆衝斷層，新城斷層為中央地質調查所 2010 年所定義的第一類活動斷層。北段斷層上下盤皆為頭嵙山層，飛鳳山丘陵出露明顯露頭，上盤岩層向東南方高度傾斜，下盤則為平緩向西北傾沒的砂岩夾薄頁岩(林啟文等，2005)；南段為卓蘭層逆衝

到頭嵛山層之上(陳文山等, 2003), 在頭前溪距離中正大橋西側約四百公尺河床有良好露頭, 頭前溪南岸的岩層垂直移距量可達 3.4 公尺, 斷層截切年代 300 年的階地礫石層, 顯示近期 300 年內曾經活動(李元希等, 2002)。

前人文獻指出本區震測與鑽井資料顯示新城斷層傾角約 30 到 40 度(Namson, 1984), 新城大啟村的震測結果與淺層反射震測結果斷層傾角約 40~60 度(楊潔豪與郭泰融, 1991; 王乾盈等, 1991)。槽溝開挖結果顯示至少有兩次古地震事件, 最近一次地震造成地表垂直錯距約 1.3~1.85 公尺, 上盤平均抬升速率約每年 1 公厘(陳文山等, 2003), 貝殼與炭質物炭十四定年則顯現斷層垂直位移速率大於 0.73 公厘/年, 而淨滑移速率大於 1.3 公厘/年(李元希等, 2002)。

3、斗煥坪斷層(THPF)

東西走向斷層, 逆衝斷層兼具右移性質, 出露的地層為頭嵛山層和卓蘭層, 斷層東段岩性差異大, 較易判斷斷層位置, 斷層南側為卓蘭層的砂頁互層, 北側則為頭嵛山層的厚層砂岩; 斷層西段因階地堆積而不易確認斷層出露位置; 斷層東側止於竹東斷層和北埔斷層, 斗煥坪斷層上盤(南側)出露地層較厚且以褶皺為主, 而北埔斷層上盤則為覆瓦狀逆衝斷層為主, 顯示出斗煥坪斷層可能截切北埔斷層, 即斗煥坪斷層發育晚於北埔斷層(林啟文等, 2007); 斗煥坪斷層為中央地質調查所 2010 年所定義的存疑性活動斷層。

關於斷層傾沒特性, 由井位資料與地表地質特性、震測判斷, 斗煥坪斷層為高角度逆衝斷層(Tang and Hsu, 1968; Chen, 1974), 其他人則認為是高角度近乎垂直的右移斷層, 斷層向南傾斜(Chiang, 1970; Chang, 1972); 楊耿明等(Yang et al., 1997)認為斗煥坪斷層是一撕裂斷層(tear fault), 而且是西南邊鹿廚坑斷層的側向滑坡(lateral ramp)。

4、竹東斷層(CTF)

斷層呈東北—西南走向，斷層南端止於斗煥坪斷層，斷層傾角約 50~60 度向東南傾沒(Yang et al., 1997)，上下盤皆出露頭嵙山層；早期竹東斷層被認為是沿著向斜軸發育的高角度逆衝斷層(Tang, 1968; Chen, 1974; 塗明寬與陳文政, 1991)，李重義則認為竹東斷層為北埔斷層上盤的一向斜構造(Lee, 1993); 震測剖面的結果顯示，竹東斷層與北埔斷層為兩平行向下延伸的斷層，竹東斷層至錦水頁岩底部轉變為層間斷層(bed-sliding fault)，並與北埔斷層連接。

目前尚未發現更新世晚期的活動證據，列為存疑性活動斷層(林啟文等, 2007)。

5、軟橋斷層(JCF)

臺灣北部重要的分界斷層，分隔西部褶皺逆衝帶的內外帶，以東為較緊密構造，地層傾角較高，以西則為開闊、寬廣形態的褶皺及構造，無覆瓦狀斷層；斷層為北北東—南南西走向的高角度逆衝斷層，於九讚頭以東無法觀察到斷層跡，斷層埋於沖積平原以下，斷層傾角於地表約七十度左右，到深部則呈平緩的十五度(塗明寬與陳文政, 1991)。斷層上盤出露的地層包括東坑層、北寮層、打鹿頁岩、觀音山砂岩，下盤的地層則為卓蘭層、錦水頁岩、桂竹林層等較年輕的上新世地層為主。

6、鵝公髻斷層(OKCF)

斷層為北北東—南南西走向的逆衝斷層，斷層面呈高角度向東南傾沒，上盤出露的地層為石底層與北寮層為主，下盤則為東坑層、桂竹林層和上福基砂岩，層位落差約一百公尺以內，斷層北端止於九芎坪斷層，南端則被陸家斷層所錯移(塗明寬與陳文政, 1991)。

7、青草湖背斜(CTHA)

青草湖背斜大約從香山往北延伸到關東橋附近，位於新竹斷層與新城斷層的中間，褶皺軸約呈北北東走向，青草湖位於褶皺軸的西北翼中間；背斜向兩端傾

沒，中間為一構造高區，背斜呈一寬廣平緩的褶皺形貌，褶皺翼的傾角大約十度左右(劉桓吉，1989)；背斜於東北被紅土台地所掩蓋，台地並呈現些微的拱起，顯示造山運動在紅土台地堆積後仍在進行中(劉桓吉，1989)；Namson(1984)由地下鑽井與地面地質資料認為此背斜為一斷層彎曲褶皺(Fault-bend fold)。青草湖背斜的西北翼有小規模的背斜及向斜出現，可能為伴隨青草湖背斜產生的拖曳褶皺(劉桓吉，1989)。

8、寶山背斜(PSA)

平緩開闊的褶皺，褶皺兩翼傾角小且約略相等，大約十度到三十度之間，越接近軸部傾角越小(傾角約五度左右)，岩層越平緩，褶皺軸呈東北—西南走向，其東北端二重埔附近漸消失(塗明寬與陳文政，1991)，也就是過了頭前溪以北褶皺軸已不明顯，南端則被斗煥坪斷層所切過(何信昌，1994)；接近軸部出露的地層為卓蘭層，兩翼的部分則出露頭嵛山層，東南翼被竹東斷層截切，西北翼則與柑子崎向斜相鄰，並於西北側被新城斷層切過。

9、竹東背斜(CTA)或鹿廚坑背斜

此背斜經中國石油公司(中油)命名為竹東背斜(中國石油公司台灣油礦探勘總處，1978)，但中央地質調查所則將中油命名的竹東背斜與番婆坑背斜合命名為鹿廚坑背斜(劉桓吉，1989；塗明寬、陳文政，1991)，由於本研究剖面的製作採用中油的地表地質與地下鑽井資料，基於資料統一性之緣故，因此以竹東背斜作為該構造之名稱。竹東背斜呈東北—西南走向，位於竹東及北埔斷層與軟橋斷層之間，並約略平行這三條斷層，褶皺軸向東北傾沒，竹東背斜為不對稱褶皺，西北翼傾角約五十到七十度，東南翼則較緩，大約二十到四十度之間(塗明寬與陳文政，1991)；褶皺軸部出露地層為東坑層、上福基砂岩、桂竹林層，兩翼則為錦水頁岩及卓蘭層，地層的分布約平行褶皺軸。

2.2.2 地層概況

本研究區域出露的地層以第四紀更新世沉積層至漸新世晚期地層為主，以軟橋—紙湖斷層系統為界，斷層以東之內麓山帶的地層為漸新世晚期到中新世晚期的地層為主，包括漸新世晚期到中新世早期的木山層(Ms)，以及由較老到年輕之中新世地層—大寮層(Tl)(相當於碧靈頁岩，Plg)、石底層(St)(相當於出磺坑層，Thk)、北寮砂岩(Pl)、打鹿頁岩(Tlu)、觀音山砂岩(Ky)、東坑層(Tu)、上福基砂岩(Sf)，斷層以西的外麓山帶則以中新世晚期至第四紀的沉積物為主，包括上新世的桂竹林層(Kct)、錦水頁岩(Cs)、更新-上新世的卓蘭層(Cl)及更新世頭嵙山層(Tk)與現代沖積層。此區地層命名依循台灣中北部新竹與苗栗地層系統(圖 2-4、表 2-1)，整合前人研究(何春蓀，1986；中國石油公司台灣油礦探勘總處，1978，1994)並於以下由地層老到新分別說明各地層特性：

1、木山層(Ms)

木山層的標準地層位於基隆市郊，濱海沉積相地層，厚度變化由台灣北部 450 公尺到 700 公尺延伸到新竹及苗栗北部為約 600 公尺，是台灣北部三個含煤層中最下面的地層，由淡灰色至灰白色細粒到中粒砂岩與深灰色頁岩互層，北部木山層顯著的白砂岩到此區只局部或連續性小的出露。

2、大寮層(Tl)及碧靈頁岩(Plg)

標準地層在台北縣三峽，海相地層，由厚塊砂岩和不同層厚的頁岩或粉砂頁岩以約一比一比例互層，砂岩呈淺灰色到淺青色，頁岩則為深灰色；富含孔蟲、貝類、海膽化石，化石富集帶常為野外判斷大寮層的指標，最北部厚度約 500 至 550 公尺，到桃園減為 300~400 公尺；頁岩往南增加，到新竹及苗栗地區變為純頁岩的碧靈頁岩，厚度約 300~400 公尺，暗灰色到黑色緻密頁岩組成。

3、石底層(St)

竹苗地區的地層厚度大概四百到四百五十公尺，往東南逐漸變厚，台灣主要

含煤層，煤帶厚度約三十到六十公分；標準地層位於新北市平溪區基隆河的石底，是屬於海陸混合相沉積，富植物化石、海相化石稀少、砂岩顯著波痕、煤層發育均顯示為海陸交接地帶，岩性為深灰色和炭質頁岩與深灰色到灰白色的砂岩。

4、北寮砂岩(P1)

厚度約三百到四百公尺，淺灰色到淡青灰色細粒砂岩，砂岩分為泥質和石灰質；上部砂岩富含泥質，海相化石多，砂頁互層的情形比較多，層理不明顯，且砂岩常形成陡崖或峽谷。

5、打鹿頁岩(Tlu)

厚度三百五十公尺左右，灰色到深灰色頁岩夾有少許透鏡狀砂岩或粉砂岩，頁岩富含孔蟲和海相化石，透鏡狀砂岩在西邊較厚，往東到苗栗盆地中心、八卦力背斜，砂岩完全消失而成為打鹿頁岩，是重要的含油氣地層；為南港層重要的岩性指準層，因為頁岩抗侵蝕能力弱，易造成地形低陷區。

6、觀音山砂岩(Ky)

厚度一百五十到三百公尺，與北寮砂岩和打鹿頁岩合稱為南港層，青灰色到淡灰色細粒石灰質砂岩夾有深灰色頁岩與砂頁岩薄互層組成，塊狀砂岩常形成陡峭山脊，石灰質砂岩中富含孔蟲和貝類化石。

7、東坑層(Tu)

標準地層在苗栗縣後龍溪畔福基至汶水間的東坑，薄砂岩頁岩互層為主，偶爾夾帶厚砂岩，砂岩內夾帶大量泥質團塊或頁岩碎片，此層厚度約兩百到三百公尺，相當地層為台灣北部的下部南莊層，東坑層與觀音山砂岩合稱河排層。

8、上福基砂岩(Sf)

標準地層位於苗栗縣的上福基，以中粒至粗粒白色砂岩為主，夾灰色頁岩與煤層，常呈不規則的塊狀砂岩，膠結鬆散，為玻璃的材料，層厚約三百到四百公尺；南莊層為上福基砂岩與其下部的東坑層所組成。

9、桂竹林層(Kct)

標準地層位於出磺坑油田，淺海相，在台灣中北部被分為兩段，厚層塊狀砂岩，細粒、深青灰色且富含泥質，砂岩常由砂質和泥質成分以不同比例組成，砂岩中常見到深灰色頁岩，厚度可達十公尺。

10、錦水頁岩(Cs)

標準地層位於錦水天然氣油田附近，此層為西部地層對比的重要指準層。最大厚度約四百至五百公尺，深灰色頁岩，具有發育良好的球狀剝離構造，夾帶有暗灰色透鏡狀砂岩，淺海相環境沉積，化石包含有孔蟲類及珊瑚等。

11、卓蘭層(CI)

標準地層在苗栗縣卓蘭鎮，平均厚度約兩千公尺，由砂岩、粉砂岩、泥岩和頁岩的互層組成，由於砂頁岩抗蝕能力不同，故常形成單面山，岩性為淡青灰色或淡灰色的細粒砂岩與青灰色頁岩、泥岩，此層上部夾有透鏡或薄層礫岩，向上礫岩增加，漸變為頭嵛山層；交錯層和波痕的存在顯示此區為淺水相，富含化石。

12、頭嵛山層(Tk)

厚度約一千到一千五百公尺，分為火炎山相(礫岩)與香山相(砂岩和頁岩)，火炎山相為塊狀礫岩為主，夾有薄層砂岩，香山相則是砂岩和頁岩夾礫石薄層；此層重要特徵為化石群顯示不同沉積相的環境，包括海膽類、有孔蟲類、貝殼及哺乳類，指出此層沉積環境可以有河相、濱海相和淺海相。

表 2-1、台北、桃園地區與新竹地區的地層對比表(修改自何春蓀，1986；地體構造參考自 Suppe, 1984 及 Teng, 1990)。

年代 (Ma)		台北&桃園 Taipei & Taoyuan Domain	新竹&苗栗 Hsinchu & Miaoli Domain	圖示 Unit	構造 Tectonic
0.012	第四紀 Quaternary	現代沖積層 Alluvium	現代沖積層 Alluvium		碰撞造山 collision
		頭嵙山層 Toukoshan Fm Tks	頭嵙山層 Toukoshan Fm Tks		
0.5	更新世 Pleistocene	卓蘭層 Cholan Fm Cl	卓蘭層 Cholan Fm Cl		碰撞造山 collision
1		錦水頁岩 Chinshui Sh Cs	錦水頁岩 Chinshui Sh Cs		
2	上新世 Pliocene	桂竹林層 Kueichulin Fm Kc	桂竹林層 Kueichulin Fm Kc		碰撞造山 collision
3		南莊層 Nanchuang Fm Nc	上福基砂岩 Shangfuchi Ss Sf		
4		南港層 Nankang Fm Nk	東坑層 Tungkeng Fm Tu		
5	中新世 Miocene	南港層 Nankang Fm Nk	觀音山砂岩 Kuanyinshan Ss Ky		伸張 Rifting
8		打鹿頁岩 Talu Sh Tlu			
11		北寮層 Peiliao Fm Pl			
12		石底層 Shihtsi Fm St			
15	早期 Early	大寮層 Taliao Fm Tl	大寮層 Taliao Fm Tl		伸張 Rifting
18		木山層 Mushan Fm Ms	木山層 Mushan Fm Ms		
20	漸新世 Oligocene	五指山層 Wuchishan Fm Ws			伸張 Rifting
25					
30	古第三紀 Paleogene				

2.3 活動構造

依據經濟部中央地質調查所「台灣北部的活動斷層—二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書」(林啟文等, 2007)所述, 新竹地區的新竹斷層與新城斷層分別為第一和第二類活動斷層(分別為過去一萬及十萬年以來曾經活動過的斷層), 大平地斷層(中油公司稱之為軟橋斷層)、竹東斷層與斗煥坪斷層則為存疑性活動斷層(過去五十萬到十萬年以來曾經活動過的斷層)(圖 2-2 及圖 2-4、表 2-2)。

Shyu et al. (2005)由數值高程模型(DEM)判斷河階錯動的特性, 認為新竹地區主要活動的構造位於頭前溪以南, 包括新竹斷層與新城斷層皆為逆衝斷層的特性, 以及走向滑移特性的斗煥坪斷層, 而地形證據也顯示此區是台灣目前地殼受到壓縮的最北界(圖 2-5)。Chan et al. (2007)由高精度地形證據(LiDAR)指出新城斷層切過年輕的河階, 顯示其全新世以來曾經活動過, 新城斷層的活動並造成河階的變形。Chen et al. (2004)由地形判識認為頭前溪以南的新城斷層是新竹地區較活躍的構造, 而新竹與新城斷層的斷層滑移速率相對於台灣中部的車籠埔斷層慢, 顯示此區受到的壓縮逐漸減少, 取而代之的是沖繩海槽擴張伸張應力的影響。

陳文山等(2003)的槽溝剖面顯示新城斷層至少有兩次古地震事件(圖 1-22、圖 1-23), 最近一次地震事件發生於 300 年以來(全新世), 並造成地表垂直位移約 1.3 到 1.85 公尺左右, 由最老的階地與斷層兩側高差計算得到, 新城斷層上盤平均抬升率約為 1 mm/yr 左右。

大地測量研究方面, 陳建良等(2008)關於新竹地區的 GPS 與水準測量指出, 相對於澎湖白沙 S01R 測站的水平速度場, 整體而言, 水平位移均小於 20 mm/yr, 在新竹斷層附近更是小於 10 mm/yr, 水平速度場整體是朝西偏北的方向, 由軟橋斷層以東往沿海方向, 速度逐漸變小。新竹—五峰與新竹—峨眉兩條水準測線顯示, 以測線起始點為參考點, 新城斷層上盤均有局部下陷的情形, 新竹—五峰測線(2002 到 2006 年間)指出新竹斷層上盤以 1.5~2.8 mm/yr 的速率抬升, 新城斷層上盤以 4.1 mm/yr 的速率下陷, 而新竹—峨眉測線(2004 到 2006 年間)顯示, 新竹

斷層附近以 1.1~2.4 mm/yr 的速率下陷，新城斷層上盤以 1.2~4.3 mm/yr 的速率下陷。

關於新竹地區主要活動斷層上下盤位移的情形(林啟文等，2007)，大平地斷層(軟橋斷層)兩側均為向西北方向位移，小於 10~20 mm/yr，斷層兩側變化量小，斷層為壓縮形式；新竹斷層上盤以 5~15 mm/yr 向東南位移，下盤為往東南或南方位移；竹東丘陵上的南段新城斷層為相對壓縮作用，新城斷層下盤往東南方位移，位移速度為 5~15 mm/yr，上盤則以 10 mm/yr 以內的速度往西北或西北西方位移；斗煥坪斷層下盤往東南方位移，位移速度小於 10 mm/yr。跨斷層相對運動量皆不大，顯示新竹斷層、新城斷層、竹東斷層、斗煥坪斷層與大平地斷層在 2002~2006 年間皆為鎖定狀態。

表 2-2、新竹地區主要活動斷層之特性(摘自林啟文等，2007)。

斷層	分類	長度(公里)	滑移特性	最近一次活動時間
大平地斷層 (軟橋斷層)	存疑性	25	逆移	更新世中晚期
新竹斷層	第二類	9	逆移兼右移	更新世晚期
新城斷層	第一類	28	逆移	<300 年
竹東斷層	存疑性	9	右移	更新世中晚期
斗煥坪斷層	存疑性	10	右移	更新世中晚期

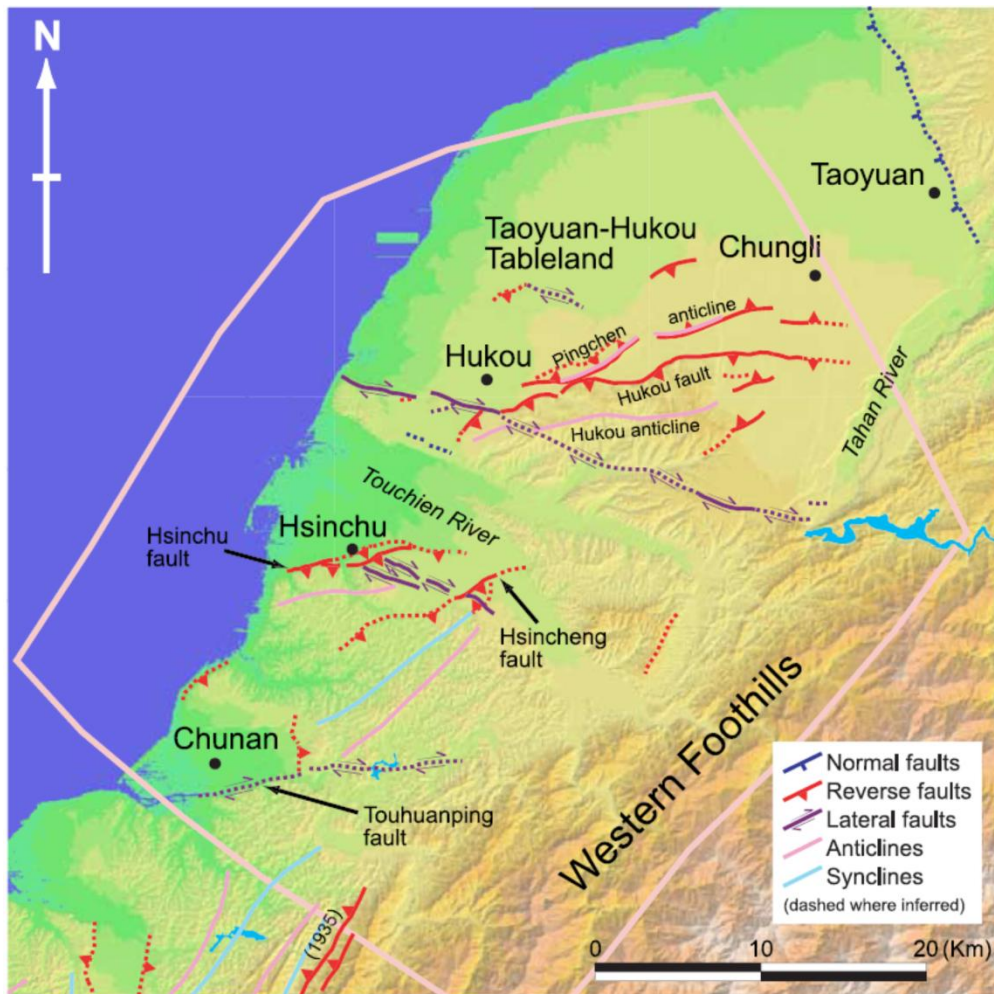


圖 2-5、新竹地區活動構造分布圖。地形證據指示新竹地區的活動構造位於頭前溪以南，包括逆衝斷層特性的新竹斷層與新城斷層，以及走向滑移特性的斗煥坪斷層 (Shyu et al., 2005)。

第三章 研究方法

本研究建立一條地質構造剖面以及利用平衡剖面法進行剖面回復，根據下列所述各種理論來建構剖面，這些理論明確地闡述關於斷層與褶皺、地層間的夾角關係，若剖面依據這些理論的關係來建立的，就理論而言，這會是條合理的剖面，而且此剖面可以被平衡，而平衡剖面法(balance cross section)是用以再次檢視構造平衡剖面的合理性，再次確認合乎這些理論的剖面是可以被回復的。

3.1 地質構造剖面之建立及理論基礎

構造平衡剖面是一種利用剖面沿線附近的地層位態求得各地層與構造間存在之數學幾何關係，來重建地下構造的方法，配合從地質圖上地層與斷層、褶皺截切關係，得到各構造發育順序，構造平衡剖面可以清楚地提供地下構造變形行為資訊。接著將建立之剖面進行回復，剖面的回復稱之為平衡剖面(balance cross section)，平衡剖面的概念是假設剖面變形前後地層的長度、體積、面積和厚度守恆，將剖面回復以檢視剖面合理性與正確性。利用地層間角度相關公式建立出的構造平衡剖面若無法回復至原始變形前的形貌，即代表該剖面幾何上存在不合理之處；反之，若地層可回復至原始變形前的形貌，則代表該剖面可能代表該區域之構造幾何。

3.1.1 平衡剖面之建立

本研究地質剖面之建立採用急折帶方法(kink-band method)的觀念，剖面建立時先收集剖面沿線的地質與地球物理資料，包括地層和斷層的邊界、地表地層投影到剖面的視傾角、投影至剖面之鑽井資料、剖面鄰近的震測剖面與重定位地震分布；根據以上現有的控制資料，應用及對照到以下理論之各種褶皺與斷層的關係，也就是說由斷層與地層傾角的大小關係與構造分布，推測斷層上盤可能之褶

皺形貌，例如：由震測剖面推測斷層傾角遠大於上盤地層傾角，而上盤地層為很平緩及寬闊的背斜，則此種背斜可能是剪切斷層彎曲褶皺(shear fault-bend fold)的情形(Suppe et al., 2004；Yue et al., 2005；Shaw et al., 2005；Suppe, 2011，個人討論)。

因此，由現有資料對照理論的構造形貌，將地表地層傾角延伸建立分角線，分角線所在位置即為地層轉折之處；最後根據地表地層傾角、地層和斷層邊界與褶皺及斷層之間的關係將地表的資料向地底深部延伸。地下深部構造的型態一方面要考慮地表位態資料，另一方面參考震測剖面以了解斷層與上下盤地層的截切關係(cutoff)。

另外，三維空間中地震資料可以提供斷層位置之參考。因為重定位的地震位置存在著些許誤差，水平方向解析度比垂直方向好，所以垂直方向呈現面狀分布的地震有可能是位於同一深度之地震定位造成的誤差，使用 GoCAD (Geological Object Computer Aided Design)軟體找出三維空間中的地震是否存在一區域性平面狀的分布，即可能存在的斷層面之位置，作為剖面中斷層位置之參考(Carena et al., 2002)，並以地震分布建立三維斷層面，將平面狀分布的地震投影到剖面上。

剖面建立時還須考慮到以下特性(Suppe, 2011，個人討論)：

- (1) 一般認為台灣未受變形的地層不是呈現完全水平，而是存在區域性的向東傾，此傾角大約小於六到七度。
- (2) 剖面走向若非垂直構造走向(即斜交)，則剖面中的褶皺可能會變成較為寬廣的褶皺，而與原本的褶皺形貌有些許差異，例如：本研究剖面中的青草湖背斜與寶山背斜(圖 1-7)。
- (3) 當斷層附近的井位資料沒有通過斷層時，剖面中斷層的傾角受到附近井位資料的控制，而使其傾角大小只可能落在一區間內，則傾角最小與最大處稱為端成分(end member)，圖 3-1 中紅色斷層東邊有井位控制，而井並未通過斷層，則此斷層最陡會位於 A 處，最緩只會到 B 處，A 與 B 稱為端成分，斷層

的傾角會介於 α 到 β 之間。此為當斷層形貌無良好震測資料控制時可用以考慮的情形。

- (4) 斷層面由地底深處到淺部轉折的傾角變化量 ϕ ，而斷層轉折處產生之急折帶(kink band，理論見 3.1.2.2 所述)的傾角 δ ， ϕ 和 δ 約略相等(圖 3-2)。
- (5) 台灣中部台中車壟埔斷層一帶基底滑脫面深度約略十公里(Yue et al., 2005)，而往北到新竹一帶的基底滑脫面深度漸變為六至七公里(Chou et al., 2009)。
- (6) 新竹外海的震測剖面顯示在中新世時有正斷層作用(Suppe, 1984)，故可能造成斷層上盤較厚的中新世地層，也就是地層厚度在上下盤不一定相同。
- (7) 比較理論之褶皺與斷層之間的關係與現有的井位和地表傾角控制資料，對於同一個褶皺，嘗試應用理論中各種褶皺形貌，找出最合理的解釋(Yue et al., 2005)。
- (8) 根據褶皺與斷層之理論建構的剖面(Suppe, 1983; Suppe and Medwedeff, 1990; Suppe et al., 2004)，是可以被進行回復的，故平衡剖面法是用以重新檢視已建立剖面之合理性。
- (9) 在覆瓦狀構造(imbrication)的情形(圖 3-3)中，斷層發育時先沿著層間滑動(m 及 n 段)，發育到前端時上盤地層(C 斷塊)與斷層則有截切關係(cutoff, k 段)，此時斷層 k 段與地層的夾角為 β_1 ，斷層轉折處(m 及 n 段相接處)所夾的銳角為 α_1 ， θ_1 則為斷層 n 段與下盤地層的夾角，接著，將剖面反過來看，就上述同一條斷層(k、m 及 n 段)而言，此時 B 斷塊是上盤，C 斷塊則是下盤，上盤地層與轉折前斷層(m 段)之夾角為 θ ，與轉折後斷層(n 段)之夾角為 β ，斷層轉折處(m 及 n 段相接處)之地層所夾的銳角為 α ，此時 β_1 、 θ_1 及 α_1 角會分別近乎相等於 β 、 θ 及 α 角，也就是說這個夾角關係可以用來決定覆瓦狀構造發育時，前後斷塊的地層與斷層的夾角關係。

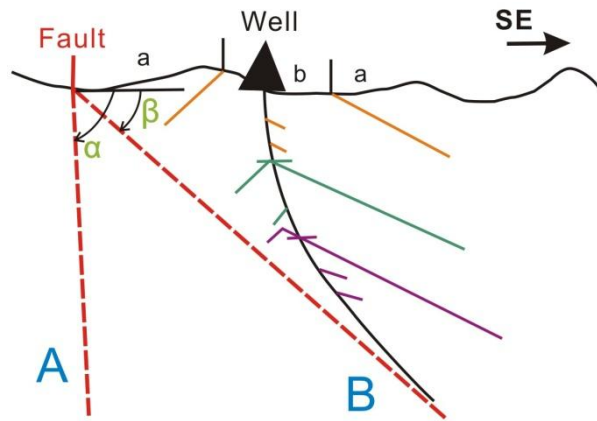


圖 3-1、端成分(end member)示意圖。因為斷層東邊有井位控制，而井並沒有通過斷層，故 A 與 B 分別為斷層形貌最陡時(此時斷層傾角為 α)與最緩時(此時斷層傾角為 β)的情形，斷層形貌會落於 A 到 B 之間，斷層的傾角會介於 α 到 β 之間。

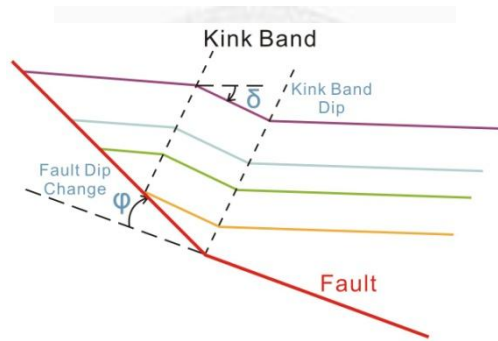


圖 3-2、斷層傾角變化量 ϕ 和急折帶傾角 δ 示意圖。 ϕ 與 δ 約略相等。

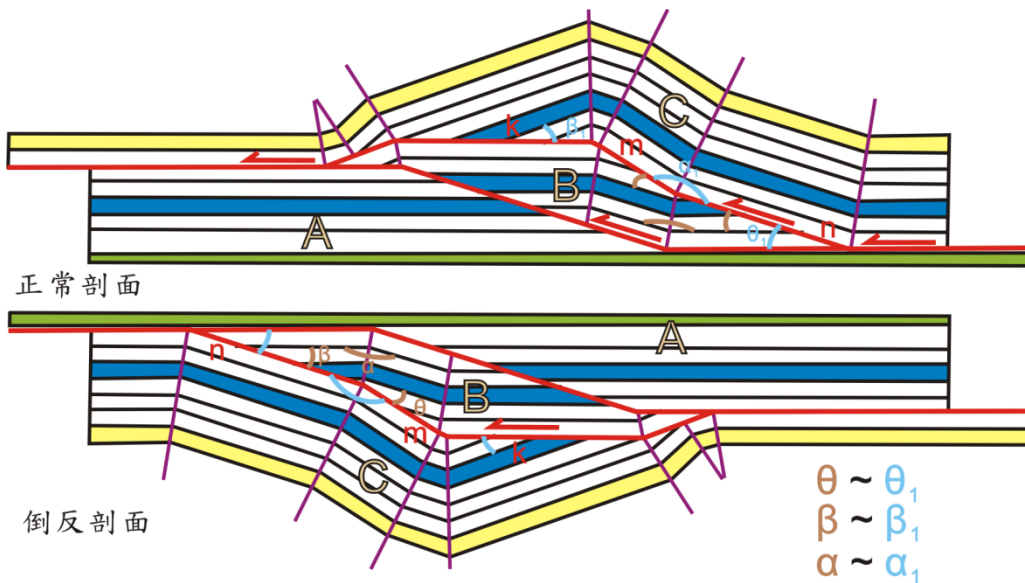


圖 3-3、覆瓦狀構造的地層與斷層夾角關係示意圖。

3.1.2 理論基礎

薄皮構造理論(thin-skin tectonics)說明台灣造山帶的變形行為發生在一基底滑脫面(detachment)以上，所以建立之剖面中斷層與褶皺作用皆位於此平面以上，而斷層與褶皺之發育彼此相伴而形成，即褶皺是隨著斷層的發育而形成，隨著斷層逐漸發育而產生不同之形貌，在斷層轉折之處地層產生急折帶(kink band)以因應斷層形貌的改變，上盤地層受到不同的剪切力，也使上盤地層與斷坪(flat)及斷坡(ramp)產生不同關係，而造成上盤各種形貌的褶皺。

3.1.2.1 薄皮理論

薄皮理論(thin-skinned tectonics)由 Suppe 等人發展出的理論(Chapple, 1978; Suppe, 1981; Davis et al., 1983; Dahlen, 1990; Barr and Dahlen, 1990)，他們認為台灣西部之變形作用主要發生在深度十公里以上的淺部地層，在這種變形機制下，地表的主要斷層面都會向下連接到十公里至稍淺的深度，一個較為平緩的基底滑脫面(detachment)上，而岩層的變形不涉及到此面以下的基盤(basement-involved)；基底滑脫面通常位於岩性較脆弱的岩層中，像是頁岩、泥岩與岩鹽，或是岩性差異大的岩層界面之間，此面的岩層呈現塑性變形，而且比上覆的地層還要脆弱(Chapple, 1978)。Suppe(1981)從力學與運動學的觀點，定量化地解釋了褶皺逆衝帶發育的機制及楔形增積岩體的變形行為。

薄皮理論即俗稱的「推土機理論」，造山運動的運動機制類似一個推土機在後面推擠著前方的岩層(土堆)，岩層呈楔形體的變形，較接近褶皺逆衝帶發育處的楔形體會比前方的岩層還厚，楔形體的幾何形貌會符合下列關係式(Chapple, 1978, 3.1 式，圖 3-4)；此理論說明褶皺逆衝帶由長而平的斷坪(flat)與向地表發育的較陡之斷坡(ramp)交替組成，斷坪與斷坡相接之處常是應力累積的地方，地震往往發生於此處，例如：九二一集集地震。

造山運動時前緣產生之楔形體寬度與傾角、地層厚度符合以下關係式：

$$W = \left[\frac{2hVt}{\tan(\alpha + \beta)} \right]^{1/2} \approx \left[\frac{2hVt}{\alpha + \beta} \right]^{1/2}, \quad \rho \text{ 為砂體的密度} \quad (3.1)$$

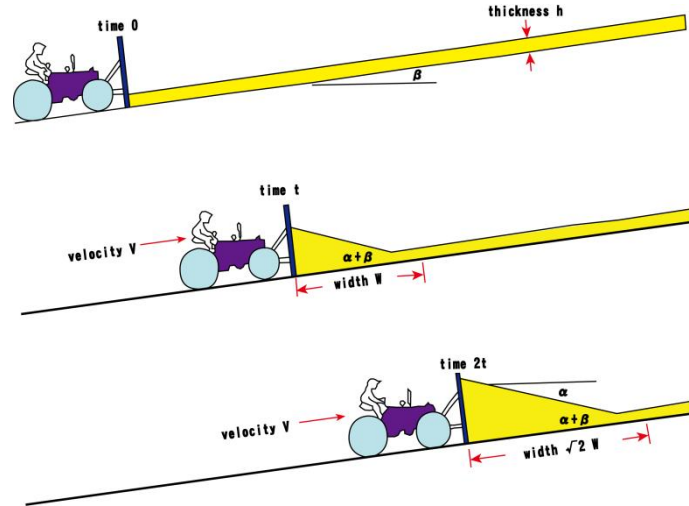


圖 3-4、「推土機模型」及楔形體造山運動示意圖。未受擠壓變形的地層厚度為 h ，地層沉積時已存在的區域性傾角 β° ，造山運動的速度為 V ，楔形體前緣地層的傾角 α° ，楔形體前緣地層與此區的區域性傾角之夾角為 $\alpha^\circ + \beta^\circ$ ，楔形體寬度 W 及 $\sqrt{2}W$ ，當造山運動進行時， $\alpha^\circ + \beta^\circ$ 角不隨時間而改變(修改自 Dahlen, 1990)。

3.1.2.2 褶皺急折帶理論

剖面中斷層發育時出現轉折，假設上盤地層是剛體的塊體，模擬剛體變形行為時，當上盤地層沿著轉折後之斷層滑動，則會造成塊體底端出現地層缺失(void, 圖 3-4 B)，相對地，若地層沿著轉折前的斷層滑動，上部地層則會出現地層重覆(overlap, 圖 3-5 C)，這兩種情形在剖面回復時都是不合理的情況，故在斷層轉折處發展出急折帶(kink band)以因應地層缺失及重複的情況出現(Shaw et al., 1994, 2005)。

根據 Medwedeff and Suppe (1997) 提出之理論，在斷層轉折形成急折帶時，下盤是剛體，上盤地層受平行地層方向的曲滑作用(flexural slip)，急折帶的地層厚度

與傾角固定，但寬度會隨著地層沿著斷層的滑移量增加而增大，同時位於急折帶的斷層長度也會影響滑移量的大小，急折帶前後的軸面各定義為活動軸面(active 或 trailing axial surface)及不活動軸面(inactive 或 leading axial surface)，活動軸面固定於斷層轉折處，此軸面前後速度改變而形成急折帶之褶皺，不活動軸面則隨著地層滑移而漸遠離活動軸面，此軸面的位置可表示原本位於活動軸面的地層往前滑移的多寡，故急折帶的寬度和斷層滑移量呈正比(圖 3-6 C)(Medwedeff and Suppe, 1997)。

由於急折帶的產生會累積部分滑移量，故斷層轉折前後的滑移量並不一定相同，因此定義了參數 R (圖 3-6 B)，是斷層轉折後地層的滑移量與轉折前地層的滑移量之比值，背斜形貌的急折帶之 R 小於一，也就是斷層轉折後的滑移量小於轉折前的滑移量，反之向斜形貌的 R 則大於一，兩者的 R 值與褶皺各個角度參數的關係如圖 3-7 所示。

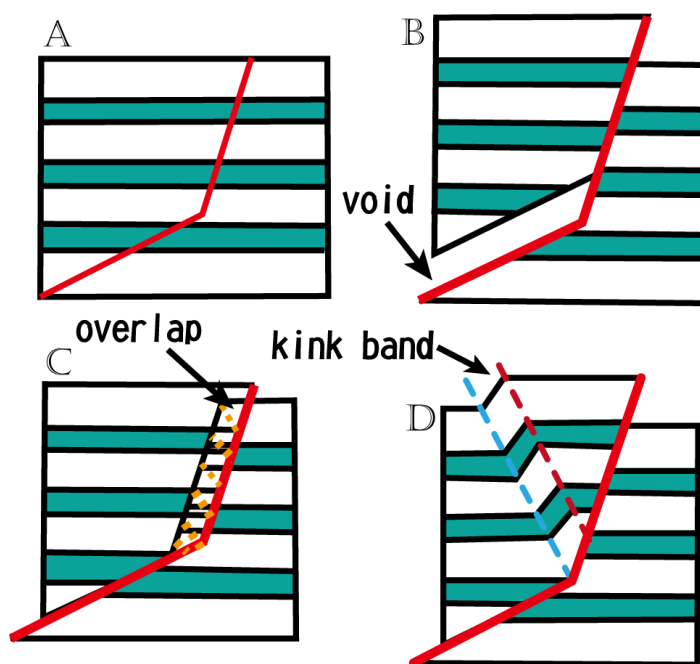


圖 3-5、斷層轉折處發展出急折帶示意圖。斷層轉折時上盤地層產生急折帶(Kink band)以防止地層缺失(B)或地層重複(C)的情形出現(修改自 Shaw et al., 1994, 2005)。

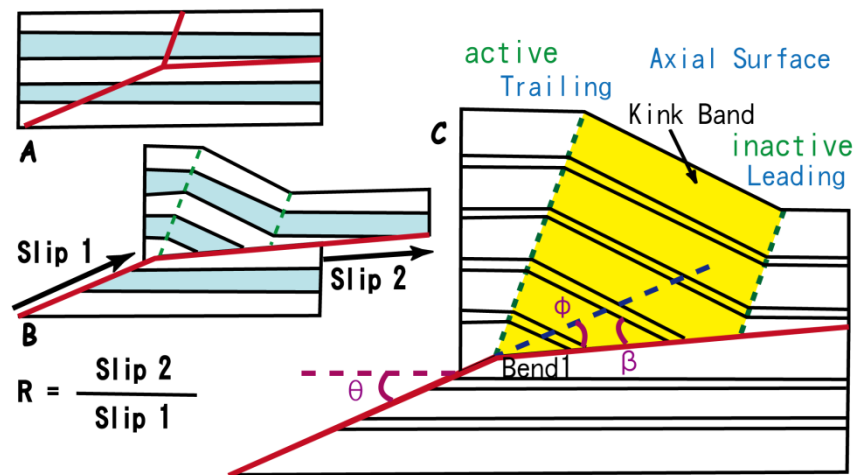


圖 3-6、急折帶之軸面位置與地層滑移量比值示意圖。 θ 為斷層轉折前與上盤地層之夾角， β 為斷層轉折後與上盤地層的夾角， ϕ 為斷層轉折前後斷層傾角的變化量。(A) 剖面變形前形貌；(B) 斷層轉折前後地層沿著斷層的滑移量可用一比值 R 表示；(C) 急折帶(kink band)的兩軸面：活動軸面與不活動軸面(修改自 Medwedeff and Suppe, 1997)。

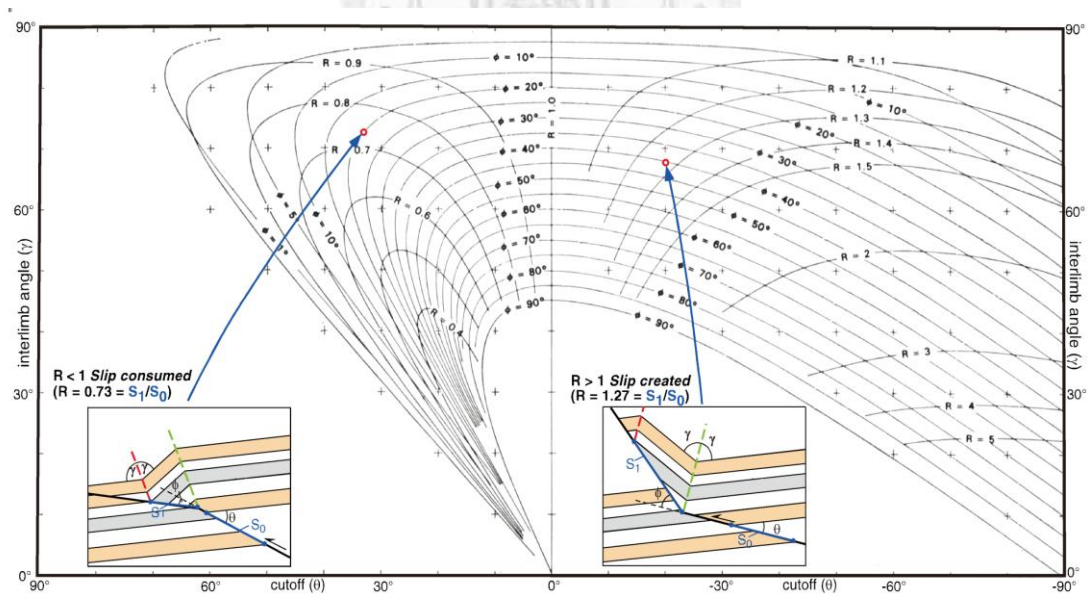


圖 3-7、急折帶與斷層及地層夾角關係之折線圖。背斜形貌與向斜形貌的急折帶(kink band)與斷層轉折前地層與斷層之夾角 θ 和軸面角 γ 的關係圖(摘自 Shaw et al., 2005)。

在基底滑離褶皺中，位於基底滑脫面上面上下方無束制之硬層(competent layer)，隨著斷層發育的過程，在斷層發育前端藉由地層傾角改變或是褶皺翼長度變化而形成不同形貌之褶皺(圖 3-8)，地層長度、厚度及面積在此層中不會改變；而相對較軟弱的塑性地層(incompetent layer)則因為地層中的物質較易流動，地層的厚度及長度可能會改變，只有在基底滑脫面深度改變或是地層所受壓縮量改變的情形之下，塑性地層的面積才會固定。

根據褶皺兩翼長度與傾角的變化可以分為三種，包括褶皺翼旋轉(Limb rotation)、急折帶運動(Kink-band migration)與兩者混合(Limb rotation and kink-band migration)三種類型。

(1) 褶皺翼旋轉：

顧名思義是褶皺兩翼旋轉漸漸變陡、但褶皺翼的地層長度不變以累積地層受到的壓縮。隨著褶皺發育的進行，地層中會有一部分的物質沿著軸面移動，而產生部分急折帶運動，地層的軸面長度不變，但傾角有些許的改變，只有在基底滑脫面深度改變或是地層所受壓縮量改變的情形之下，塑性地層的面積才會固定不變(圖 3-8 A)。

(2) 急折帶運動：

相對於褶皺翼旋轉，急折帶運動是褶皺兩翼傾角固定、但褶皺翼長度漸漸變長以累積地層的壓縮量，褶皺逐漸發育時，地層中的物質隨著兩向斜軸面移動而移動，只有在基底滑脫面深度改變或是地層所受壓縮量改變的情形之下，塑性地層的面積才會固定不變(圖 3-8 B)。

(3) 褶皺翼旋轉及急折帶運動混合類型：

混合前兩種類型，褶皺發育時兩翼的地層傾角變大、褶皺翼長度也變長，但是褶皺兩翼地層長度以比例關係增長，地層中的物質隨兩向斜軸面移動而移動(圖 3-8 C)，軸面傾角也跟著改變，此種類型中，塑性地層的面積是固定的。

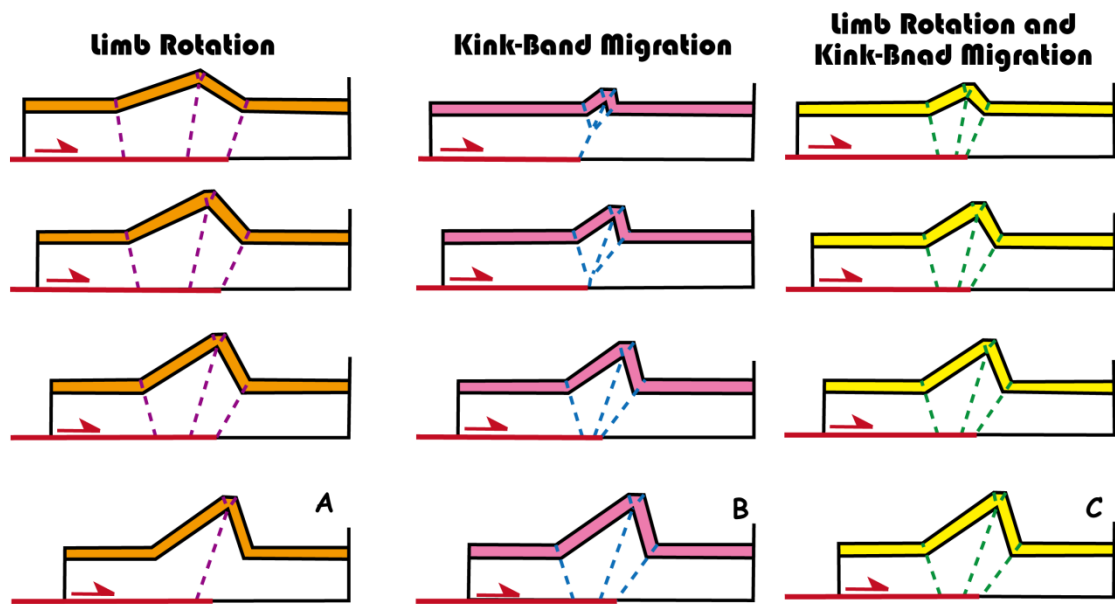


圖 3-8、基底滑離褶皺沿褶皺翼旋轉及急折帶運動兩種變形機制發育褶皺之示意圖。

- (A) 褶皺翼旋轉(Limb rotation); (B) 急折帶運動(Kink-band migration);
 (C) 混合類型(Limb rotation and kink-band migration)(修改自 Shaw et al., 1994, 2005)。

3.1.2.3 斷層相關褶皺

褶皺逆衝帶發育的褶皺一定會伴隨著斷層的發生，也就是褶皺的發育與斷層作用相關，在造山帶變形前緣發育的褶皺因為斷層的滑移作用而形成，斷層發育產生階梯狀(step)的形貌時，上盤地層也會藉由伸張(stretch)或彎曲(bend)作用產生褶皺並沿著階梯狀的斷層發育。由褶皺的構造形貌與形成機制(圖 3-9)可以分為三種，分別為斷層彎曲褶皺(fault-bend fold, Suppe, 1983)、斷層擴展褶皺(fault-propagation fold, Suppe and Medwedeff, 1984; Suppe, 1985)與基底滑離褶皺或底滑褶皺(detachment fold)。但就實際情形而言，這三種褶皺作用會因為斷層演育的形貌而形成混合的類型，也就是不會只存在單一種褶皺型態。以下就各褶皺型態之特性敘述如下：

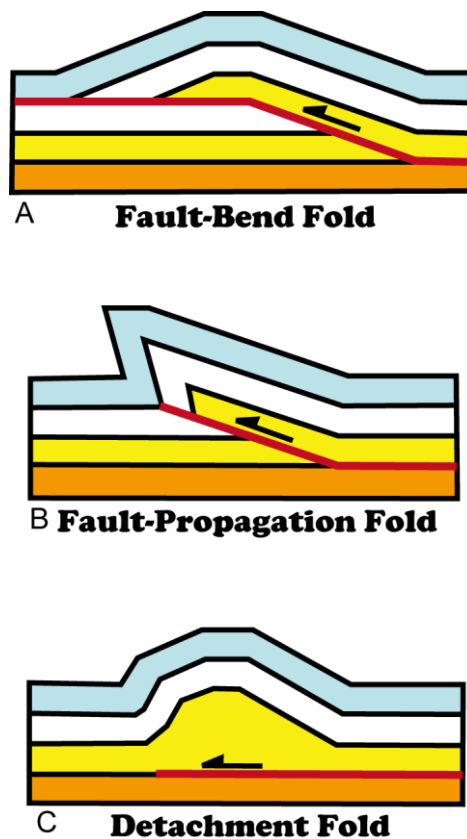


圖 3-9、與逆衝斷層相關的三種褶皺作用示意圖(修改自 Yang et al., 1994)。(A) 斷層彎曲褶皺(fault-bend fold)；(B) 斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)；(C) 基底滑離褶皺或底滑褶皺(detachment fold)。

(1) 斷層彎曲褶皺(fault-bend fold)：

斷層彎曲褶皺(圖 3-9)的觀念於 1983 年首先由 Suppe (1983)提出，他利用三角函數的數學式得到地層長度與地層和轉折斷層之夾角的關係(圖 3-10、圖 3-11、圖 3-12)，斷層傾角改變的轉折處會造成上盤地層的轉折(圖 3-10)，斷層轉折前後與地層夾角分別為 θ 及 β ，又 θ 角稱為截止角(cutoff angle)，斷層轉折改變的角度為 ϕ (逆時針方向為正值)，上盤地層轉折的軸面分角線平分成兩個角度 γ ，如圖 3-11 所示，斷層轉折前為紫線，轉折後為紅線，未轉折則為粉紅色線，地層隨斷層轉折後為藍線，未轉折為橘線，綠線為分角線，故地層長度 $bc = bd = L$ ，所以由地層長度和斷層與地層的夾角之三角函數關係可以推得以下關係式(Suppe, 1983)：

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{-\sin(\gamma-\theta) [\sin(2\gamma-\theta) \sin \theta]}{\cos(\gamma-\theta) [\sin(2\gamma-\theta) - \sin \theta] - \sin \gamma} \right] \quad (3.2)$$

$$\beta = \theta - \varphi + (180 - 2\gamma) \quad (3.3)$$

當在標準斷層彎曲褶皺(simple-step fault-bend fold)的情形時，即斷層轉折傾角的改變 φ 與轉折前的地層與斷層夾角 θ 相等，則兩者有以下的關係式：

$$\varphi = \theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sin 2\gamma}{1 + 2 \cos^2 \gamma} \right] \quad (3.4)$$

根據以上角度的關係，他討論了斷層轉折凸起與內凹的形貌(圖 3-12)，分別造成上盤地層背斜與向斜的形貌，橫軸為截止角(cutoff angle) θ ，縱軸為上盤地層的軸面角(axial angle) γ ，根據圖 3-12 的關係，可以由已知的 θ 及 γ 推得 β 和 φ 角，換句話說，在建立剖面時如果已知斷層轉折後與地層夾角 β 及地層軸面角 γ ，即可以推得斷層轉折前與地層的夾角 θ 及斷層轉折的傾角變化 φ 。

根據 Suppe(1983)，斷層彎曲褶皺的演育是建立在三項假設上，包含上盤地層的層厚及長度固定、水平地層間沒有扭曲行為以及傾斜地層只受平行地層方向的滑動；此種褶皺的特性為後翼會平行斷坡，前翼的長度比後翼短且陡峭，而且下盤地層仍維持水平狀態。斷層彎曲褶皺發育的過程如下所述：

- (A) 在底部斷坪(flat)先形成於脆弱地層中，斷坡(ramp)再往上切穿較堅硬的地層，到上部斷層轉折為斷坪(flat)，X 和 Y 為下盤的截止點(hanging-wall cutoffs)，X'和 Y'為上盤的截止點(footwall cutoffs)，A、A'和 B、B'為地層轉折的分角線軸面；當上盤地層要開始往上爬到斷坡(ramp)時，在 Y 點會形成一向斜形貌的急折帶(kink band)，並漸漸往斷坡方向延伸變寬，同時在斷坡頂點處 X 點也產生一狹窄的急折帶(kink band)(圖 3-13 A)。
- (B) 褶皺逐漸發育時，兩急折帶(kink band) AA'和 BB'會逐漸變寬，構造高度(structural relief)也逐漸變高，上盤的截止點 X'(footwall cutoffs)漸漸往淺部的斷坪(flat)前方運動，上盤地層沿著斷層的滑移量會有一部分用來增加褶皺的寬度(圖 3-13 B)。

(C) 當 Y' 點通過 X 點時，構造高度(structural relief)就不再變高，但褶皺的急折帶(kink band)寬度仍逐漸變寬(圖 3-13 C)。

(2) 斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)：

斷層由底部的斷坪(flat)向上發育到斷坡(ramp)，斷層沿著斷坡往前發育時，在斷坡的終止處(fault tip)產生不對稱的褶皺，也就是上盤地層在底部造成的縮短量到上部被褶皺作用所取代，褶皺包含一組共軛的急折帶(kink band)AA'和 BB'；斷層與褶皺幾乎是同時形成，此褶皺的前後翼會隨斷層往上及往前擴展而逐漸加長，也就是 A' 軸面與 B 軸面固定不動，但 A 軸面與 B' 軸面不斷往前移動來增加急折帶的寬度，前翼甚至出現倒轉(overturn)的情形。

斷層終止處(fault tip)與褶皺兩翼的急折帶(kink band)軸面的聚合點(圖 3-14，A 軸面與 B' 軸面聚合處)位於同一地層層位中，褶皺後翼的傾角與斷坡的傾角相同，下盤地層仍是水平未受變形的狀態；斷層擴展褶皺系統可以分為三個部分，包括最底部單純由斷層作用的斷坪(flat)、中段部分為斷層造成的褶皺(faulted fold)以及最上部還未受斷層作用的褶皺(unfaulted fold) (圖 3-14)。

(3) 基底滑離褶皺(detachment fold)：

在褶皺逆衝帶中於基底滑脫面上形成的不對稱褶皺，沒有斷坡(ramp)形成；滑脫面(detachment)形成於很脆弱的地層中或是兩地層交界處，通常是位於較軟和脆弱的頁岩中；此種褶皺屬於區域性分布，褶皺的波長(fold wavelength)隨滑脫面發育時磨碎地層的厚度增加而變大(Fischer, 1992)，隨著滑脫面往前發育，褶皺越來越狹窄(Mitra, 2002)；有時候在褶皺演育後期時會發育出逆衝斷層，此逆衝斷層往前切穿已經存在的基底滑離褶皺的前翼(圖 3-9 C)。

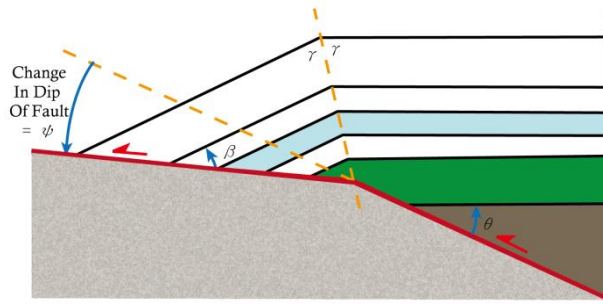


圖 3-10、斷層轉折前後與地層夾角關係示意圖。斷層轉折前後與地層夾角分別為 θ 及 β ，斷層轉折改變的角度為 φ ，斷層傾角改變方向以逆時針為正值(修改自 Suppe, 1983)。

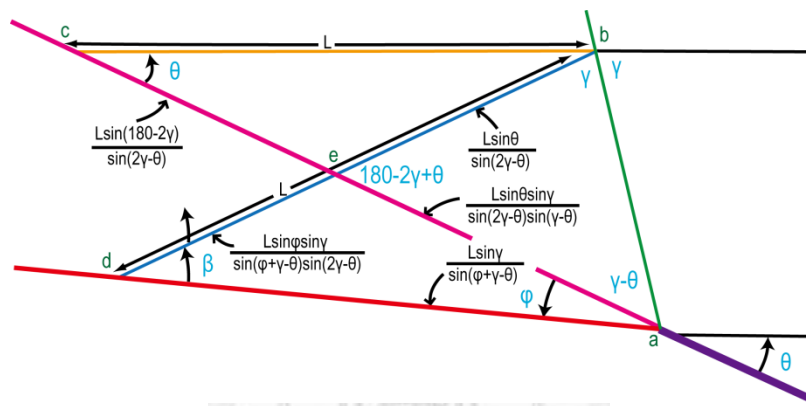


圖 3-11、斷層轉折前後與地層夾角以及地層長度之關係示意圖。由地層長度 L 與地層與斷層間夾角關係 θ 及 β ，利用三角函數關係可以求得各斷地層長度與夾角的關係(修改自 Suppe, 1983)。

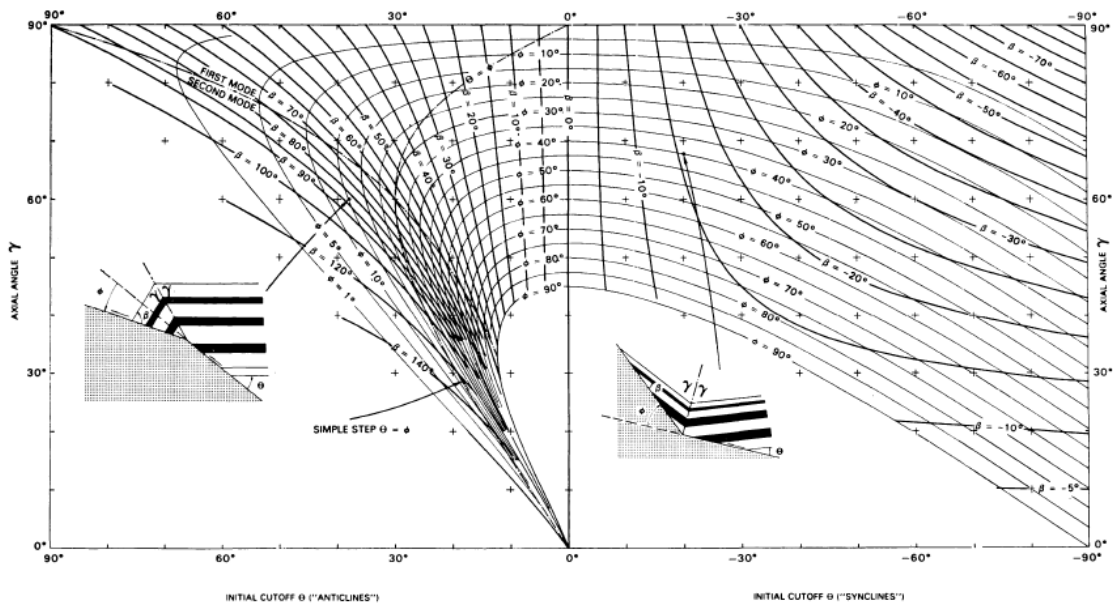


圖 3-12、地層與轉折斷層夾角關係之折線圖。根據角度的數學關係式，可以由已知的 θ 及 γ 推得 β 和 φ 角(摘自 Suppe, 1983)。

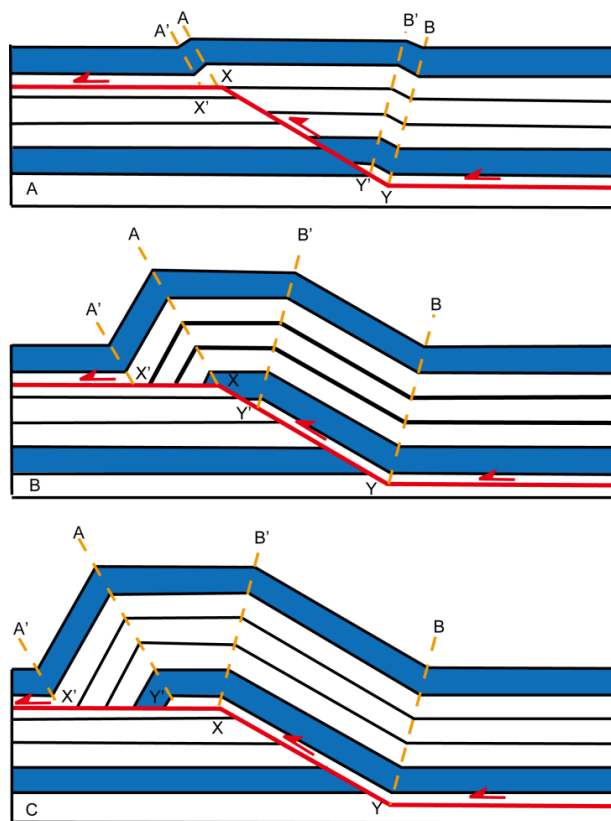


圖 3-13、斷層彎曲褶皺(fault-bend fold)演育示意圖(修改自 Suppe, 1983)。

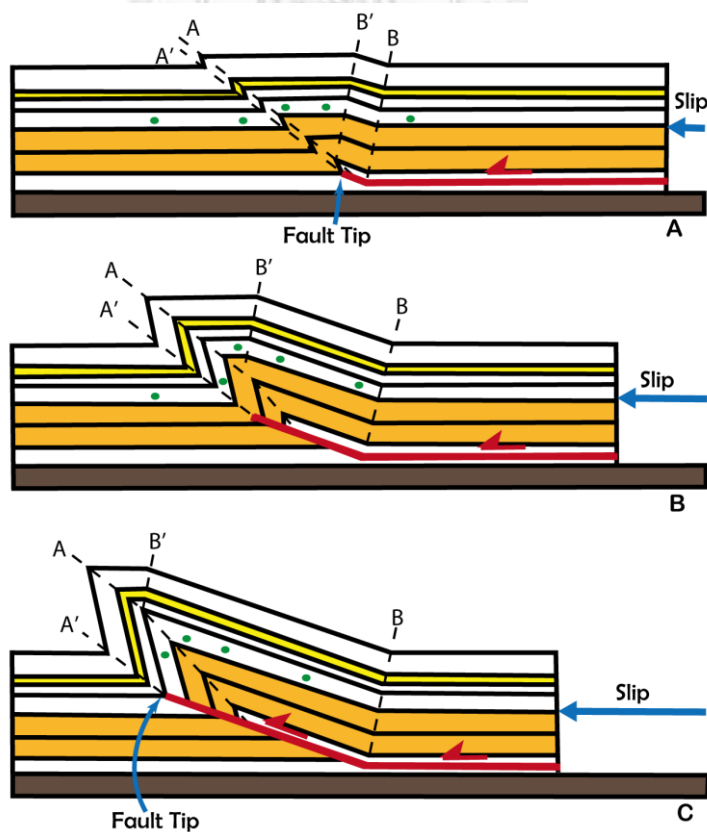


圖 3-14、斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)演育示意圖(修改自 Suppe, 1985)。

3.1.2.4 剪切斷層彎曲褶皺

剪切斷層彎曲褶皺(shear fault-bend fold)是近年來提出的概念(Suppe et al., 2004)，此種褶皺的形成原因是位於基底滑脫面上較軟弱的地層受到剪切力，此地層形成類似斷層的剪切帶(shear zone)，在斷層上盤造成厚翼長且緩、前翼則較為陡峭的褶皺，此種褶皺最主要特性是褶皺後翼的傾角會比斷層傾角小，而且傾角通常是差異很大的情形，前述標準的斷層彎曲褶皺(fault-bend fold)是剪切斷層彎曲褶皺於剪切角(shear angle)為零時的情形，也就是沒有受到剪切作用。依照斷層受剪切後的褶皺形貌可以分兩種，分別為單剪斷層彎曲褶皺(simple-shear fault-bend fold)和純剪斷層彎曲褶皺(pure-shear fault-bend fold)(圖 3-15)。

這兩種褶皺共同特性為斷層上的地層長度與厚度在褶皺發育時是固定的。受到平行地層面的剪切力而形成單剪斷層彎曲褶皺，受剪切力作用的只有底部的橘色地層(圖 3-15 A)，褶皺發育時此層的層厚不變，此種褶皺底部沒有平行地層的斷層面，只有向上切穿地層的斷坡(ramp)，隨著褶皺發育時，斷坡底部的滑移量為零，斷坡底部正好位於地層的分角線之處；純剪斷層彎曲褶皺的發育則為底部橘色地層受到純剪力(pure shear)(圖 3-15 B)，橘色地層受到平行地層方向的壓縮，相對地斷坡上三角形範圍的地層有垂直地層方向的增厚，褶皺底部存在明顯平行地層的斷層面，但受剪切之地層的轉折線不位於斷層分角線上，這是這兩種褶皺最主要不同之處；由縮短量討論(圖 3-15 A 及 B)，純剪中基底滑脫面上地層的縮短面積(dh)為單剪的(dh/2)兩倍，換言之，在同樣壓縮量(d)之下，純剪斷層彎曲褶皺的發育會比單剪的情形快(Suppe et al., 2004)。

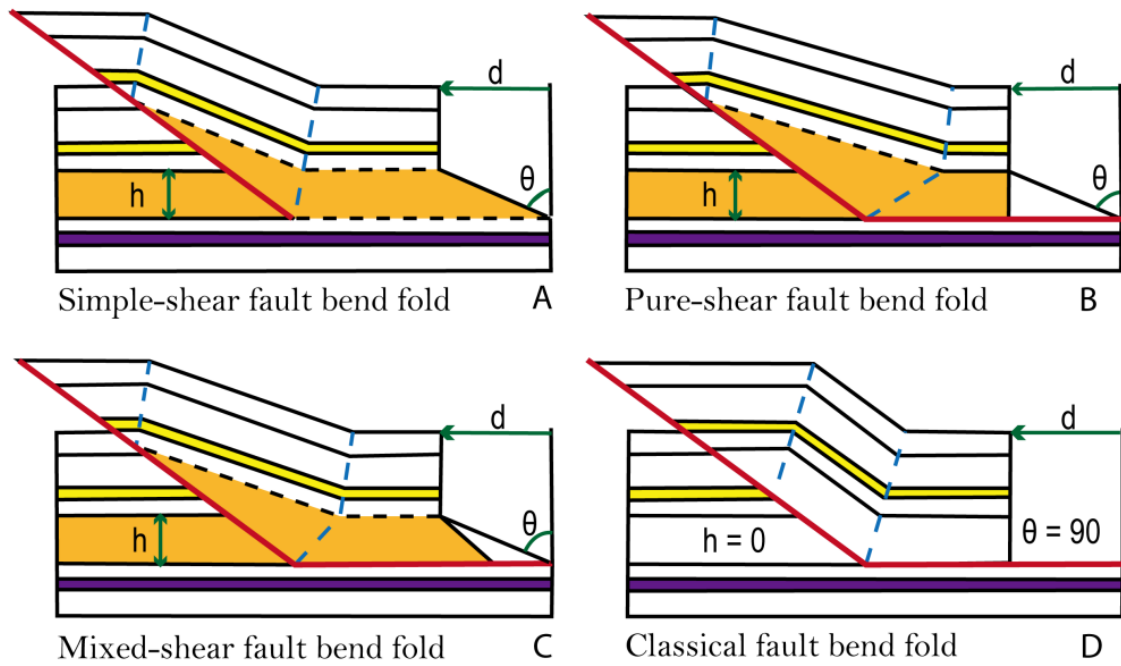


圖 3-15、標準斷層彎曲褶皺、單剪斷層彎曲褶皺(simple-shear fault-bend fold)、純剪斷層彎曲褶皺(pure-shear fault-bend fold)和混合形態的褶皺示意圖(修改自 Shaw et al., 2004)。藍線為地層轉折線，d 為縮短量。

3.2 構造平衡剖面之回復

3.2.1 平衡原則

平衡剖面法的觀念源自於計算同心圓形褶皺下的基底滑脫面(detachment)深度(Chamberlin, 1910, 1919; Bucher, 1933; Dahlstrom, 1969; Hossack, 1979)，後來被運用於褶皺逆衝帶的變形行為及計算造山運動的地層縮短量。早期運用平衡剖面法計算基底滑脫面之深度的概念如圖 3-16 所示，地層變形前的長度 $AB=L$ ，變形後長度 $A'B'=L'$ ，地層變形前後的基底滑脫面深度分別為 d_0 及 d_1 ，剖面縮短量 OB ，在面應變假設下，也就是剖面中物質流動方向平行剖面， $A'B'C'D$ 的面積會等於 $ABCD$ ，即橘色面積 K 會與紫色面積 K' 相等，最後可以得到剖面縮短量 OB 與地層變形前基底滑脫面深度 d_0 有以下關係式： $OB = \frac{K}{d_0}$ ，換句話說，可以由剖面縮短量來推得基底滑脫面的深度，或者可利用剖面面積及地層層厚推得原始地層長度。

本研究主要利用 Miland Valley Exploration 公司發展的 2D Move 軟體進行剖面之建立與回復，對於褶皺逆衝帶地區的剖面平衡法，主要平衡原則如下(Hossack, 1979; Suppe, 1988; 王佳彬與楊耿明, 2004)：

- 1、剖面變形前後地層長度及體積守恆。
- 2、垂直剖面的方向上並無物質流入或流出。
- 3、構造回復時符合地層沉積時的合理原貌，變形前後地層可配合得很好。
- 4、斷層由斷坪(flat)和斷坡(ramp)組成，斷層可被恢復，恢復後符合斷層與褶皺間的構造原理。
- 5、岩體體積只會受侵蝕作用或岩體壓密作用改變，而壓溶作用或構造擠壓改變的體積可被忽略。
- 6、急摺形或同心圓形褶皺是順著層面滑移所致，與斷層彎曲與終止有關，即褶皺作用均與斷層作用有關。

7、主要變形機制為脆性破壞。

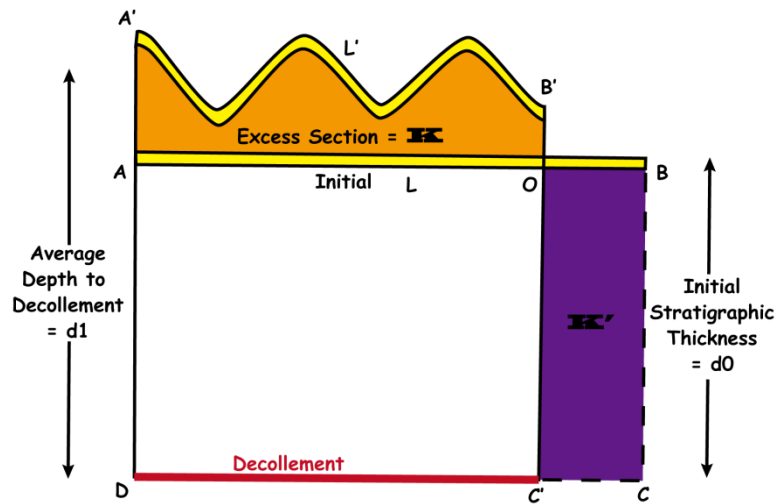


圖 3-16、早期平衡剖面法的發展用於計算基底滑脫面深度之示意圖(修改自 Hossack, 1979)。

回復剖面時先使用剪紙的方式，分別將每條斷層間塊體之地層剪貼並拼湊成水平的狀態，此種方法可以用以檢視斷層形貌的正確性與地層是否有重覆和缺失的情形，再由地層的分布，推測出可能的斷層形貌，進而修改斷層的幾何形貌；再者，可以利用向量繪圖軟體控制地層的長度與厚度，將所有地層回復成水平的狀態，此種方法是用來確認斷層間每個塊體的地層長度是否適宜，並檢視斷層的幾何形貌(Suppe, 2011，個人討論)。

3.2.2 回復方法

本研究使用的回復方法為 2D Move 軟體內的曲滑褶皺回復法(flexural slip unfolding)及斷層平行回復法(fault parallel flow)，主要的回復概念如下所述。

1、曲滑褶皺回復法(flexural slip unfolding)

此方法為等地層厚度回復法，適合用在複雜的地質構造模型，目的是將褶皺回復成變形前的狀態，回復原則包括地層長度守恆、維持地層厚度固定及剖面中褶皺的面積不變(圖 3-17)。

- (A) 紫色為斷層，黃色地層(Template bed, TB)為最後要壓平的地層，綠色及褐色地層(Passive bed)則為其他地層，其他地層須配合 TB 地層變化而改變形貌。
- (B) 設定地層固定線(紅色箭頭，Pin line)維持地層厚度固定，其餘紅線為地層分角線(Bisector)，建立一系列平行 TB 地層的平行線，綠色地層幾乎平行這些平行線，而左段褐色地層則有相交。
- (C) 將黃色地層回復後的結果，綠色地層因為幾乎與黃色地層平行，所以綠色地層也被壓平，而左段的褐色地層有較大的向下量以維持地層厚度不變，右段則因為和 TB 地層平行也回復成水平狀態；所有地層以地層固定線(pin line)為基準，故該處地層會維持不動。

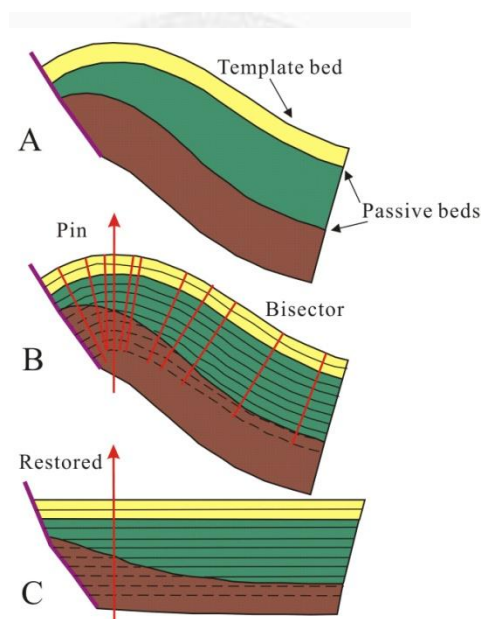


圖 3-17、曲滑褶皺回復法(Flexural slip unfolding)平衡方法示意圖。假設要把黃色地層(Template bed)回復成水平狀態，而剩下的地層為 Passive bed，設定一條 pin 線控制地層厚度固定，C 圖為回復成水平時的狀態，右側的褐色地層因為和黃色地層平行，所以也被回復成水平狀態，而為了要維持地層厚度固定，左側褐色地層則往上翹起(修改自 2D Move 使用手冊)。

2、斷層平行回復法(fault parallel flow)

斷層上盤的變形由斷層平行剪切(fault-parallel shear)造成，假設地層中物質流動平行斷層面及剖面（面應變之假設），地層中的變形是層間滑動(也就是 flexural slip)造成；此種回復方法適合用在褶皺逆衝帶與伸張的環境，斷層形貌不一定只限定於斷坪—斷坡(flat-ramp)的形貌，也可適用於複雜的斷層幾何形貌。

此種平衡方法藉由建立一序列平行斷層面的流線，上盤的地層沿著這些流線運動，上盤的地層遇到斷層面的分角線時轉折而改變運動方向，給定地層沿著斷層的滑移量或是指定上盤地層回復到相對應之下盤地層，以進行剖面的回復(圖 3-18)。

- (A) 現今之構造幾何形貌，紅線為斷層，藍色箭頭為構造擠壓方向。
- (B) 建立平行斷層面的流線，粉紅色線為斷層轉折的分角線，地層沿著流線運動，遇到分角線就轉折。
- (C) 平衡之後的結果，設定地層回復時的剪切角度(shear angle)以維持地層層厚固定以及使淺部與深部地層滑移量不同之情形。

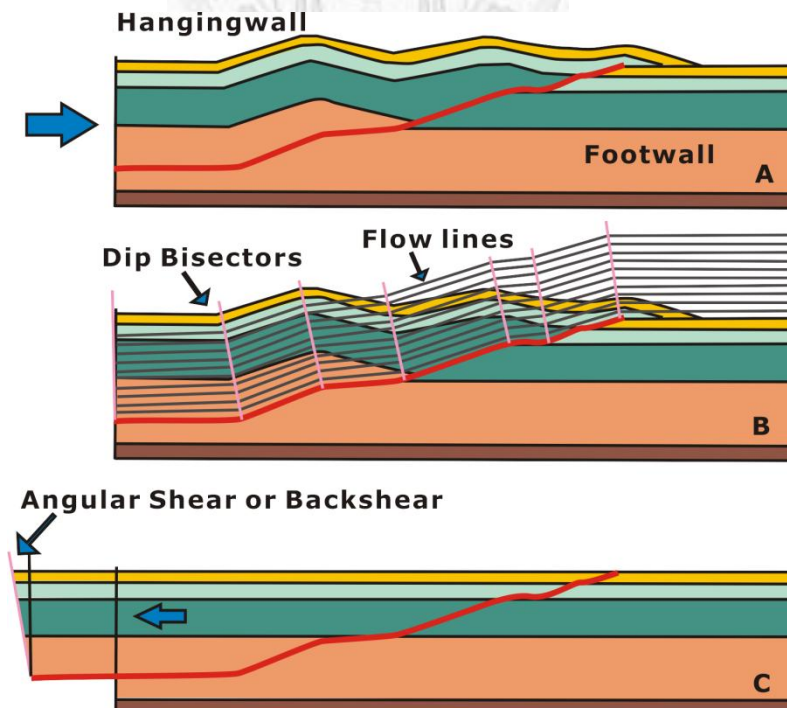


圖 3-18、斷層平行法(fault parallel flow)回復步驟示意圖(修改自 2DMove 使用手冊)。

3.3 控制井位資料

本剖面使用地表地質資料為中油二萬五千分之一地質圖，並參考中油十萬分之一桃園—新竹地質圖幅(中國石油公司，1978)及苗栗地質圖幅(中國石油公司，1994)；剖面沿線包含七口井位資料(圖 3-19)，由北到南分別為青草湖四號井(C-4)、寶山六號井(P-6)、寶山五號井(P-5)、R-2 井、竹東二十四號井(C-24)、竹東二十五號井(C-25)與大坪三號井(T-3)，各井位鑽井深度(measure depth)所遭遇之斷層與地層如表 3-1 到表 3-7 所示。

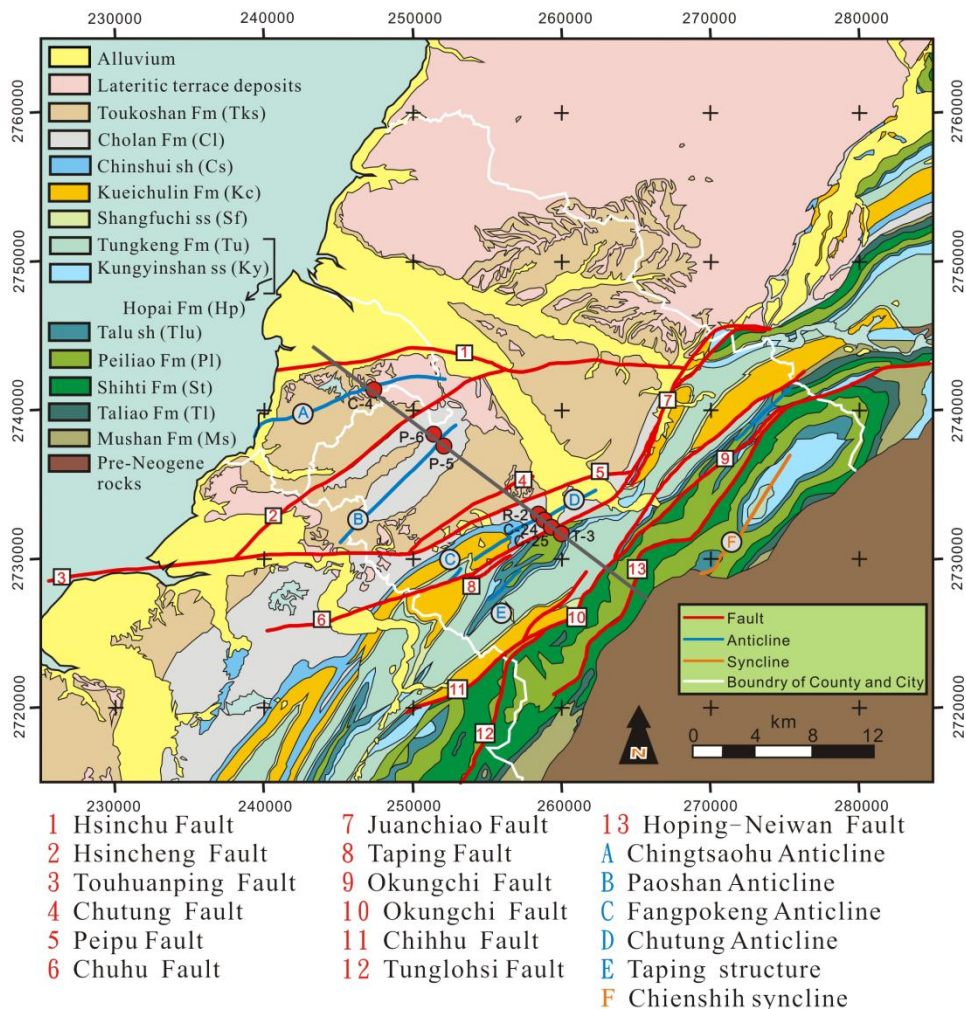


圖 3-19、本研究剖面位置及控制井位位置圖。地質圖數化自中油十萬分之一地質圖，灰線為本研究剖面位置，共有七口控制鑽井資料，由北到南分別為 C-4 井、P-6 井、P-5 井、R-2 井、C-24 井、C-25 井及 T-3 井。

表 3-1、C-4 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

C-4 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-375	頭嵒山層	
	375-1461	卓蘭層	
	1461-1724	錦水頁岩	
	1724-2257	桂竹林層	
	2257-2415	上福基砂岩	
	2415-2879	河排層	6° NW (2704 m)
			16° NW (2853 m)
	2879	斷層	
	2879-3027	桂竹林層	20° NW (2994 m)
	3027-3170	上福基砂岩	
	3170-3747	河排層	13° NW(3439 m)

表 3-2、P-6 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

P-6 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-1011	卓蘭層	
	1011-1137	錦水頁岩	
	1137	斷層	
	1137-1742	卓蘭層	4° NW (1649 m)
	1742-2029	錦水頁岩	
	2029-2682	桂竹林層	5° NW (2482 m)
	2682-2836	上福基砂岩	
	2836-3375	河排層	5° NW (2967 m)

表 3-3、P-5 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

P-5 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-1028	卓蘭層	
	1028-1334	錦水頁岩	
	1334-2111	桂竹林層	10° SE (1740 m)
			33° SE (2056 m)
	2111-2282	河排層	26° SE (2483 m)
			46° SE (2767 m)
	2850	斷層	
	2850-3633	河排層	55° SE (3031 m)
	3633-3974	打鹿頁岩	20° SE (3940 m)

表 3-4、R-2 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

R-2 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-74	卓蘭層	
	74-295	錦水頁岩	
	295-1238	桂竹林層	
	1238-1391	上福基砂岩	
	1391-1746	河排層	65° NW (1546 m)
			70° NW (1695 m)

表 3-5、C-24 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

C-24 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-49	卓蘭層	
	49-268	錦水頁岩	
	268-1244	桂竹林層	10° SE (1179 m)
	1244-1393	上福基砂岩	
	1393-2513	河排層	10° SE (1561 m)
			10° SE (1933 m)
			60° NW (2203 m)
			72° NW (2513 m)

表 3-6、C-25 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

C-25 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-215	卓蘭層	
	215-451	錦水頁岩	
	451-1452	桂竹林層	
	1452-1606	上福基砂岩	
	1606-2720	河排層	
	2720-3012	打鹿頁岩	
	3012-3523	北寮砂岩	18° SE (3161 m)
			12° SE (3413 m)
			24° NW (3523 m)

表 3-7、T-2 井鑽遇各地層及斷層之深度與地層視傾角。

T-2 探井	鑽深(公尺)	地層	沿剖面方向地層傾角
	0-416	北寮砂岩	
	416-1099	石底層	
	1099-1896	大寮層	
	1896-3409	木山層	

3.4 地震資料

本研究使用的地震資料範圍為東經 120.74 度到 121.36 度及北緯 24.52 度到 24.98 度，地震震源機制解的資料取自 1995 至 2011 年中央研究院台灣寬頻地震觀測網(BATS)資料，也包括吳逸民等人處理強地動觀測網(TSMIP)與中央氣象局短期觀測網(CWBSN)1991 至 2009 年間的地震資料(Wu et al. 2007)所得到的台灣地區三維速度模型得到重定位地震與震源機制解。

3.5 三維構造模型之建立

早期的西部麓山帶構造研究以二維剖面為主，目前已漸趨成熟階段，但對於三維構造模型的研究著墨並不多。本研究使用 Paradigm Geotechnology 公司發展的剖面處理軟體 Geosec 3D，收集前人文獻已建構之二維地質構造剖面，整合本研究之剖面建立三維斷層模型。Geosec 3D 是一套整合地質構造剖面的軟體，可以利用多條二維剖面中斷層與地層線的資料，內插及外插成三角網格式的平面，將二維剖面資料轉成三維的構造模型(圖 3-20)。

因為是三維立體空間的構造模型，考慮到垂直方向為長度單位，故座標系統必須使用二度分帶座標；除了統一定義所有剖面中的地層與斷層外，剖面的座標必須經過修正，才能得到詳細的剖面端點座標，包括剖面轉折點的座標。建構過程中必須考慮斷層之間的截切關係與先後發育順序，做適度的切割與延伸，故建構三維斷層模型有助於了解地下構造的延伸情形，一窺主要活動構造的全貌，進而討論活動機制及運動行為。

接著使用由 Gocad Research Group 發展的 GOCAD 軟體，找出三維空間中重定位地震面狀分布的情形，即為可能存在的斷層面位置(Suppe, 2011, 個人討論)，整合建構之三維斷層面，對照地震的分布做適時的修改，找出新竹地區地下構造與地震活動空間分布的關連性。

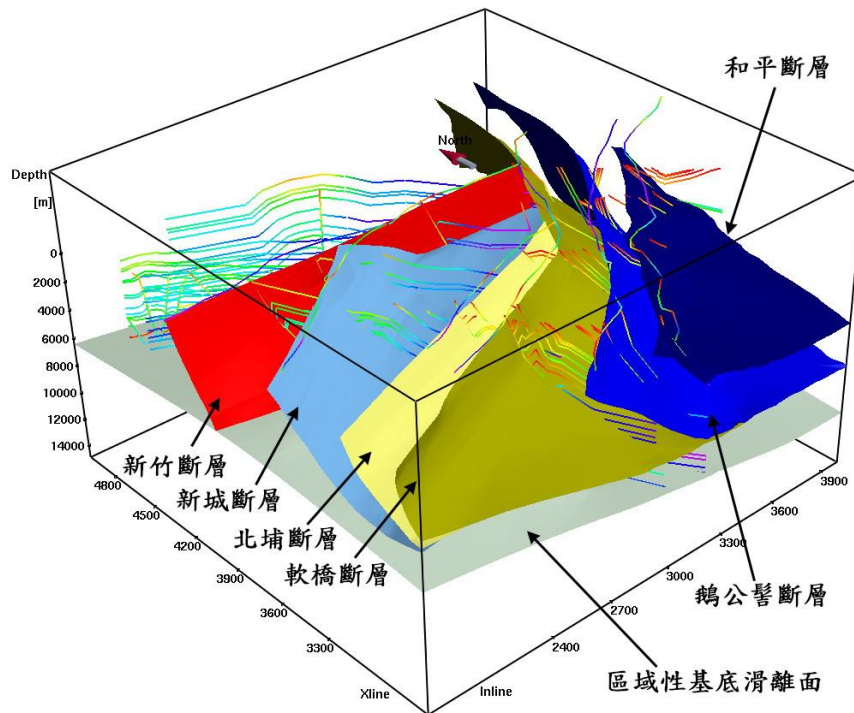


圖 3-20、由二維剖面建構的三維構造模型圖。新竹地區目前之三維斷層模型的初步成果(摘自黃旭燦等, 2004)。

第四章 研究成果

本研究成果共分為四個部分，包括（一）地質剖面重建、（二）地質剖面回復、（三）新竹地區三維斷層幾何模型的建立以及（四）新竹地區地震活動特性與地質構造之關連性。地質剖面的結果顯示，此區為順時序發育，新城斷層之深部斷層與新竹斷層為早期正斷層之反轉構造。竹東斷層於 2-3 公里深匯入北埔斷層，北埔斷層上盤的桂竹林層與河排層增厚，說明此兩層堆積時北埔斷層有區域性、短時間的正斷層活動。軟橋斷層於中新世早期有正斷層活動，並造成北寮層以下層序增厚，打鹿頁岩於斷層以東逐漸尖滅消失。根據剖面的回復結果，各剖面之水平縮短量：新竹斷層 0.85 公里、新城斷層 0.38 公里、竹東斷層 0.17 公里、北埔斷層 3.44 公里及軟橋斷層 4 公里，新竹斷層與新城斷層沿斷層之滑移量為 1318 公尺及 887 公尺；詳見章節 4.1 及 4.2。

整合新竹地區的地質剖面，三維斷層模型重建的結果顯示，此區基底滑脫面西向東由 6 公里增加至 10 公里，內外麓山帶以軟橋斷層為界，均呈現覆瓦狀構造形態，但斷層形貌不太相似，內麓山帶的斷層，包括鵝公髻斷層—紙湖斷層系統及和平—內灣斷層系統，至 3-4 公里深處變緩，並且沿層間滑動而呈平行分布，外麓山帶的新城斷層、竹東斷層與北埔斷層，後兩者於 2-3 公里處匯聚，新竹斷層則於 4-5 公里深處匯聚於北埔斷層，此區亦有新竹斷層與斗煥坪斷層較近期活動的斷層；詳見章節 4.3。

根據新竹地區二維剖面與三維空間的地震活動特性，此區內麓山帶的地震數量明顯多於外麓山帶，內麓山帶的地震以走向滑移為主，軟橋斷層深部轉折處明顯的地震群分布，說明為應力累積之所在，鵝公髻斷層及和平斷層深處也有團狀分布地震，地震活動分布最深約 10-14 公里，軟橋斷層深處可見四團分別發生於 1999、2003、2006 和 2007 年的地震群，1999 年的地震發生於集集地震後七個月內，故此群地震可能與集集地震相關；詳見章節 4.4。

4.1 地質剖面解釋

本研究剖面為 1:1 的比例，由西向東依序為以下構造：新竹斷層、青草湖背斜、新城斷層、寶山背斜、竹東斷層、竹東背斜、軟橋斷層、鵝公髻斷層與和平斷層，竹東斷層與軟橋斷層於深部合併於一條稍緩的斷坪(flat)，深部呈現階梯狀斷層面，並且與新竹斷層及新城斷層在深處合併到一條滑脫面上，基底滑脫面呈現大約 5 度的傾角(圖 4-1)。本研究以竹東斷層(CTF)與軟橋斷層(JCF)為分界，分為三段西(I)、中(II)及東(III)討論(圖 4-2、圖 4-3)，竹東斷層以西為平緩且寬廣的青草湖背斜(CTHA)與寶山背斜(PSA)，竹東斷層與軟橋斷層之間為一陡峭的竹東背斜，軟橋斷層以東則屬於一系列逆衝斷層與其相關構造的內麓山帶部分。

4.1.1 剖面 I 段

平原區以東到竹東斷層為本剖面 I 段(西段)，包括新竹斷層(HCUF)、新城斷層(HCEF)與青草湖背斜(CTHA)、寶山背斜(PSA)四個主要構造，十八尖山及牛埔山位於此區，新竹斷層以西為平原沖積層，此區的青草湖背斜與寶山背斜皆屬於開闊、寬廣且平緩的褶皺型態，此種褶皺型態為外麓山帶褶皺的特性，此區有三口井位控制，包括青草湖四號井(C-4)、寶山六號井(P-6)和寶山五號井(P-5)。

1、新竹斷層(CHUF)及其下盤

新竹斷層以西下盤的部分，因為地表覆蓋沖積層，無地表傾角資料，下盤地層層厚除了上福基砂岩有青草湖四號井(C-4)的控制，大約二百到三百公尺厚，其餘各層的厚度乃參考臺灣地質概論(1986)中各地層層厚之平均值；近斷層處因為青草湖四號井的控制，在桂竹林層(Kc)、上福基砂岩(Sf)與河排層(Hp)中有向西傾沒 15~20 度不等之傾角(圖 4-1)，另外，使此處呈現一背斜形貌，而非只有單純井位控制的向西傾沒的地層之原因在於，為了維持打鹿頁岩(Tlu)至五指山層(Ws)層序與頭嵛山層(Tks)至河排層(Hp)層序，地層沿著新竹斷層的滑移量一致(即使

整個地層層序沿著新竹斷層的滑移量相仿)，若此處僅存在向西傾的地層形貌，則打鹿頁岩(Tlu)至五指山層(Ws)層序沿著新竹斷層的滑移量會小於其上地層層序的滑移量，本研究認為此背斜為五指山層底部基底滑脫面上疊置構造發育時造成的(圖 4-1)。

新竹斷層(HCUF)形貌的決定，考慮新竹地區外海震測顯示此區存在許多重新活化的高角度正斷層系統，並有延伸到內陸的情形(Suppe, 1984)，以及參考黃旭燦等(2004)及 Yang et al. (2006)參考震測所建立的剖面；另外，也有新竹斷層上盤之地層形貌，斷層發育時發生轉折，會導致上盤的地層也跟著轉折，而發展出急折帶(Suppe and Chang, 1983；Shaw et al., 2004, 2005)，或者上盤地層也可能藉著擠壓變形與壓縮來因應斷層發育，此處新竹斷層上盤的地層有地表位態的控制，而造成地層有三個轉折，故本研究認為這幾個地層轉折是斷層發育時轉折造成的，再者，新竹斷層的轉折也依循斷層彎曲褶皺(fold-bend fold)理論(Suppe, 1983)中地層與斷層的夾角關係(圖 3-7)。

2、青草湖背斜(CTHA)

在地表跡線上，青草湖背斜位於新竹斷層東南側，與新竹斷層約略平行，呈現東北東—西南西走向(圖 4-2)，背斜軸出露於頭嵙山層(Tks)，西北翼被新竹斷層所截切，東南翼則被新城斷層截切，地表地質資料顯示西北翼往西北邊逐漸變緩到近水平($5^{\circ}\sim 1^{\circ}$)，在近新竹斷層側形成一平緩的向斜，東南翼則較陡峭，傾角約 $7^{\circ}\sim 11^{\circ}$ ，呈現西北翼陡峭而東南翼寬廣的背斜形貌，根據背斜的前翼陡峭而後翼平緩，且前緣的新竹斷層呈現高角度、斷層傾角遠大於背斜後翼傾角的形貌而論(Suppe, 2004；Shaw et al., 2004, 2005)，認為此背斜為剪切斷層彎曲褶皺(Shear fold-bend fold)的形貌。

寶山六號井(P-6)鑽井結果指出(圖 4-1)，近新城斷層的錦水頁岩(Cs)、桂竹林層(Kc)、上福基砂岩(Sf)與河排層(Hp)呈現向西傾約 4° ，寶山五號井(P-5)鑽井結果顯示，位於新城斷層深部的打鹿頁岩(Tlu)向東傾約 20° ，由此兩口井的結果

與地表位態可以說明，青草湖背斜東翼接近新城斷層處，必須存在一向斜與深部較陡峭的背斜。另外，上福基砂岩(Sf)通過寶山六號井時有逐漸變薄的趨勢，地層變化大約從180公尺減薄到150公尺，而其上的桂竹林層(Kc)與其下的河排層(Hp)則相對變厚，可以說明新城斷層以東桂竹林層與河排層逐漸變厚的情形。

3、新城斷層(CHEF)

震測資料(黃旭燦等, 2004; Yang et al., 2006)顯示新城斷層在地底分支為兩條低角度的逆衝斷層，這兩條斷層分別於桂竹林層(Kc)底部與河排層(Hp)層間滑移，深部存在一高角度逆衝斷層，是為中新世時期的正斷層活動，而後重新復活成逆衝斷層的結果(Suppe, 1984)。地表地質顯示(圖 4-2)，新城斷層地表跡線與寶山背斜(PSA)軸面處的卓蘭層(CI)層面近乎平行，但截切近新城斷層處的卓蘭層(圖 4-2)，顯示斷層沿著深部地層面滑移，但往地表方向截切較年輕的卓蘭層。

4、寶山背斜(PSA)

寶山背斜軸部出露卓蘭層(CI)，西北翼為一向斜，東南翼則出露卓蘭層及頭嵛山層(Tks)為主(圖 4-2)，背斜軸西北翼傾角約 5° ，往東南翼方向，過了寶山五號井(P-5)之後，地層傾角則由 15° 逐漸變陡到 30° 左右，是一個前翼緩而後翼陡的背斜形貌。寶山五號井(P-5)的井位說明，寶山背斜近軸部的地層，從地表的卓蘭層大約 7° ，往深部逐漸變陡為桂竹林層(Kc)的 25° 及河排層(Hp)的約 33° ，桂竹林層與河排層都顯示較陡的傾角，而附近皆有斷層通過(圖 4-1)，所以認為此為斷層活動的擾動造成，故寶山背斜軸部的地層傾角仍依循地表位態資料。

由寶山背斜軸部附近卓蘭層(CI)層面分布、背斜軸的位置與地表位態資料顯示(圖 4-2)，此為向東北傾沒的背斜形貌，唯地層傾角變化不大，背斜軸附近的地層傾角大約落於 4° 到 7° 之間；而寶山背斜西北翼的向斜，向斜軸部附近位態也說明此特性，此向斜亦為向東北傾沒的褶皺，褶皺軸附近的地層傾角由南邊的 20° 減緩到北邊約 2° ，中油地質圖並未定義此向斜名稱，而中央地調所命名為柑子崎向斜(劉桓吉, 1989; 塗明寬與陳文政, 1991; 何信昌, 1994)。本研究剖面通過

的柑子崎向斜軸部和寶山背斜軸部皆出露卓蘭層，柑子崎向斜特性在剖面中不明顯，向斜的西翼與東翼之地層傾角約東傾 3° 及西傾 9° ；背斜與向斜均向東北傾沒，可用以說明同一地層在此區的北邊地層之深度深於南邊之地層，以及淺部同一個基底滑脫面於此區北邊在較年輕的地層底部滑動。

4.1.2 剖面 II 段

竹東斷層以東至軟橋斷層為本剖面 II 段(中段)，主要構造包括竹東斷層(CTF)、北埔斷層(PPF)、竹東背斜(CTA)與軟橋斷層(JCF)，總共有三口井位控制，包括 R-2 井、竹東二十四號井(C-24)及竹東二十五號井(C-25)，竹東斷層與北埔斷層間的地層呈現地層倒轉的情形，相較於青草湖背斜與寶山背斜，竹東背斜為較陡峭的背斜形貌，軟橋斷層受制於東側的大坪三號井(T-3)，斷層傾角無法太緩，故呈現高角度斷層的形貌。

1、竹東斷層(CTF)與北埔斷層(PPF)

竹東斷層(CTF)與北埔斷層(PPF)間呈現地層倒轉的情形，東傾約 50° - 60° ，指示東側竹東背斜(CTA)的發育模型是斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)或是斷層彎曲褶皺(fault-bend fold)的模型二(mode II, Suppe, 1983, 圖 4-4)，因為此兩種褶皺模型的前緣常會有地層倒轉(Overtuned)的形貌。

此兩斷層中間出露的地層為頭嵛山層(Tks)，近竹東斷層(西北側)為較年輕之火焰山相(Tk2)，近北埔斷層(東南側)則為較老之香山相(Tk1, 圖 4-1)，竹東斷層的地表斷層線由西南到東北依序切穿香山相至火焰山相，並使之逆衝至位於下盤的火焰山相之上，切穿的地層越向北越年輕，顯示竹東斷層發育時南段的滑移量大於北段，而北段上下盤均在火焰山相中，表示斷層滑移量非常地微小，甚至沒有滑移。

北埔斷層上下盤地層傾角指示該斷層為發育於竹東背斜前緣的軸面斷層，斷層沿著較脆弱的軸面破裂而形成，由於位在斷層地表跡線東邊的三口井均未鑽穿

斷層，因此推測北埔斷層深部之傾角可能較高，地表跡線說明斷層由南到北均為將卓蘭層(CI)逆衝到頭崙山層(Tks)之上(圖 4-2)，斷層跡線近乎平行上盤的錦水頁岩(Cs)、桂竹林層(Kc)與上福基砂岩(Sf)之層面，說明斷層在深部為層面斷層，再往地表發育切穿卓蘭層，由以上所述重建北埔斷層地下形貌，在近地表呈現高角度斷層，到深部轉為沿著北寮層底部滑動，最後與軟橋斷層合併；竹東斷層與軟橋斷層在深部大約於卓蘭層(CI)底部合併為一條斷層，參考自黃旭燦等(2004)及 Yang et al. (2006)的震測剖面。

2、竹東背斜(CTA)

竹東背斜為西翼陡東翼緩之褶皺，地層傾角由西翼的西傾約 40° 、西傾 11° - 18° 到背斜軸以東的 11° - 16° (圖 4-1)，剖面通過的背斜軸出露地層為卓蘭層(圖 4-2)，南段的竹東背斜則出露錦水頁岩(Cs)至東坑層(Tu)層序，背斜軸往北到頭前溪漸漸不明顯，而背斜軸兩翼出露的地層與地表位態顯示，竹東背斜軸為向東北傾沒的情形，背斜軸兩翼的地層傾角由南邊的 80° (西翼)及 70° (東翼)變緩到北邊的 30° (西翼)及 20° (東翼)，此背斜於南邊被竹湖斷層(CHF)所截切，而產生只有一半形貌的背斜；西北邊的北埔斷層跡線近乎平行於背斜西翼的錦水頁岩(Cs)、桂竹林層(Kc)與上福基砂岩(Sf)層面(圖 4-2)，而截切卓蘭層(CI)，可以解釋北埔斷層發育時於深部先沿著層間滑動，後來才向上切穿卓蘭層至地表。

竹東背斜共有三口井位控制，包括 R-2 井、竹東二十四號井(C-24)以及竹東二十五號井(C-25)，與竹東斷層以西的地層比較，這三口井顯示桂竹林層與河排層均有增厚的情形(圖 4-1)，厚度分別為 940 公尺和 1100 公尺，此現象可以說明北埔斷層為早期正斷層反轉的逆衝構造；由於竹東斷層與北埔斷層間地層有反轉的現象，再者有井位與地表傾角的控制，所以認為竹東背斜的形態屬於斷層彎曲褶皺的模型二(圖 4-4)。

3、軟橋斷層(JCF)

軟橋斷層為新竹地區內麓山帶與外麓山帶的分界斷層，軟橋斷層以東的褶皺

波長較短，以西褶皺波長則較長。根據中油十萬分之一地質圖，地表斷層跡線可以分支為主要斷層及南北末端各一條小分支斷層(圖 4-2)，軟橋斷層上盤地層通過大坪三號井(T-3)，但鑽井未通過斷層，所以地表的軟橋斷層必須為較陡峭的形貌(圖 4-1)；沿線出露最老的地層為北寮層(P1)，南段斷層斜交並截切上盤背斜的兩翼，顯示軟橋斷層發育時切穿上盤地層至地表，另外，軟橋斷層東西兩側地層增厚的現象，暗示軟橋斷層與新竹苗栗地區其餘斷層類似為中新世早期正斷層反轉之逆衝構造 (Suppe, 1984；Yang et al., 1996)；由於內麓山帶出露的地層較老且受到較多褶皺變形作用，斷層必須經過非常大的滑移才能將地層逆衝至地表，若斷層太陡峭，不太可能有如此大之應力累積使地層逆衝，故深部斷層傾角勢必減緩，或是經過階梯狀斷層發育至地表。

由上述重建斷層地下形貌，在地表為高角度斷層形貌，向深部逐漸轉為平緩的斷坡(ramp)，並與前緣之北埔斷層與竹東斷層合併，在約六公里深處再轉為陡峭之斷坡(ramp)，顯示軟橋斷層在東側是由至少十二公里深的深度往上發育至地表的，呈現階梯狀斷層的形貌。

軟橋斷層下盤存在之背斜參考黃旭燦等(2004)之鑽井控制的剖面，井位顯示下盤有向西傾沒之地層；此處地層厚度參考何春蓀(1986)，推測此背斜為近代造山運動時，深部基底滑脫面上的疊置構造發育拱起，並且也影響了軟橋斷層深部的形貌。

4.1.3 剖面 III 段

軟橋斷層(JCF)以東為本剖面 III 段(東段)，位於內麓山帶，此區出露河排層(Hp)到石底層(St)地層層序，主要的斷層包括鵝公髻斷層(OKCF)與和平斷層(HPF)。內麓山帶受到強烈的擠壓變形作用，產生一系列擠壓褶皺構造，重建過程中依循地表傾角與斷層的夾角關係，以及由地表傾角推測地底之斷層與斷層以下深部地層之形貌。

1、軟橋斷層(JCF)至鵝公髻斷層(OKCF)之間

此區呈現平緩之背斜與向斜的形貌，地層傾角由西向東由東傾 30° 、東傾約 40° 到最右邊的東傾約 30° ，近軟橋斷層有大坪三號井控制地層厚度(圖 4-1)，此斷塊的地層厚度明顯厚於軟橋斷層以西之地層，打鹿頁岩較薄，大約 150 公尺厚；最東邊那段地層僅有地表一較緩的傾角控制，與鵝公髻斷層深部的斷層近乎平行。

此段存在一條位於北寮層中的未命名斷層，此斷層地表位置正好位於上下盤的地形變化劇烈之處(圖 4-1)，由地表地質資料顯示，此斷層跡線與打鹿頁岩及觀音山砂岩(它與上覆的東坑層合稱河排層)近乎平行，說明此斷層為沿著地層間滑動的層間斷層。

2、鵝公髻斷層(OKCF)與和平斷層(HPF)上盤的兩斷塊

因為近內麓山帶缺乏震測資料，故鵝公髻斷層與和平斷層上盤的斷層與地層之形貌，依照斷層彎曲褶皺(fold-bend fold)理論(Suppe, 1983)中地層與斷層的夾角關係重建(圖 3-7)。鵝公髻斷層上盤的地層由東傾 40° 、東傾約 35° 到最右邊的東傾約 20° ，故鵝公髻斷層也隨著地層傾角的改變，而有兩個轉折處，地表斷層線呈現東北—西南走向，由南到北依序將石底層逆衝到桂竹林層、上福基砂岩至東坑層之上(圖 4-2)。鵝公髻斷層的地表斷層跡線分岔為三支斷層(圖 4-2 中的 9 及 10)，位於本研究剖面南邊，最南邊的分支斷層顯示上下盤有桂竹林層、上福基砂岩至東坑層層序的重覆，而且上下盤地層皆為傾向東南方，說明此段斷層於桂竹林層沉積之後有正斷層活動。

和平斷層上盤的地層變化由東傾 45° 減緩為東傾 30° ，因此，根據斷層彎曲褶皺理論，和平斷層在地底應有一個轉折處，而從地表斷層上下盤地層接觸關係可知和平斷層上盤之石底層逆衝至北寮層之上(圖 4-2)，指出和平斷層是剖面之中最早開始活動之斷層。

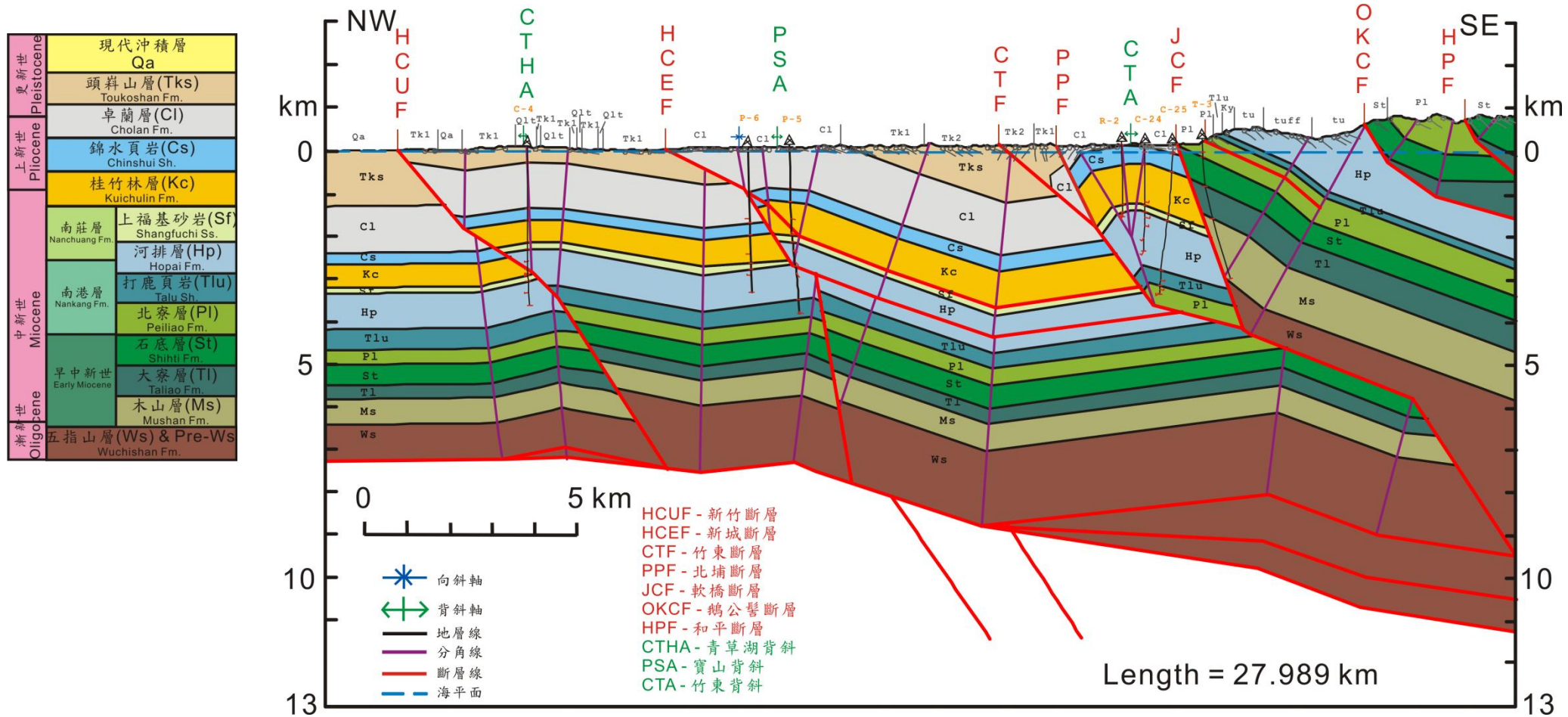


圖 4-1、本研究之地質構造剖面圖。竹東斷層以西為波長較長之褶皺，包括青草湖背斜與寶山背斜，其中新城斷層為層間滑移斷層，竹東斷層與軟橋斷層間為陡峭的竹東背斜，此兩斷層於約五公里合併，再一起於十公里的深部匯入基底滑脫面上，軟橋斷層以東則為一系列逆衝構造所組成。

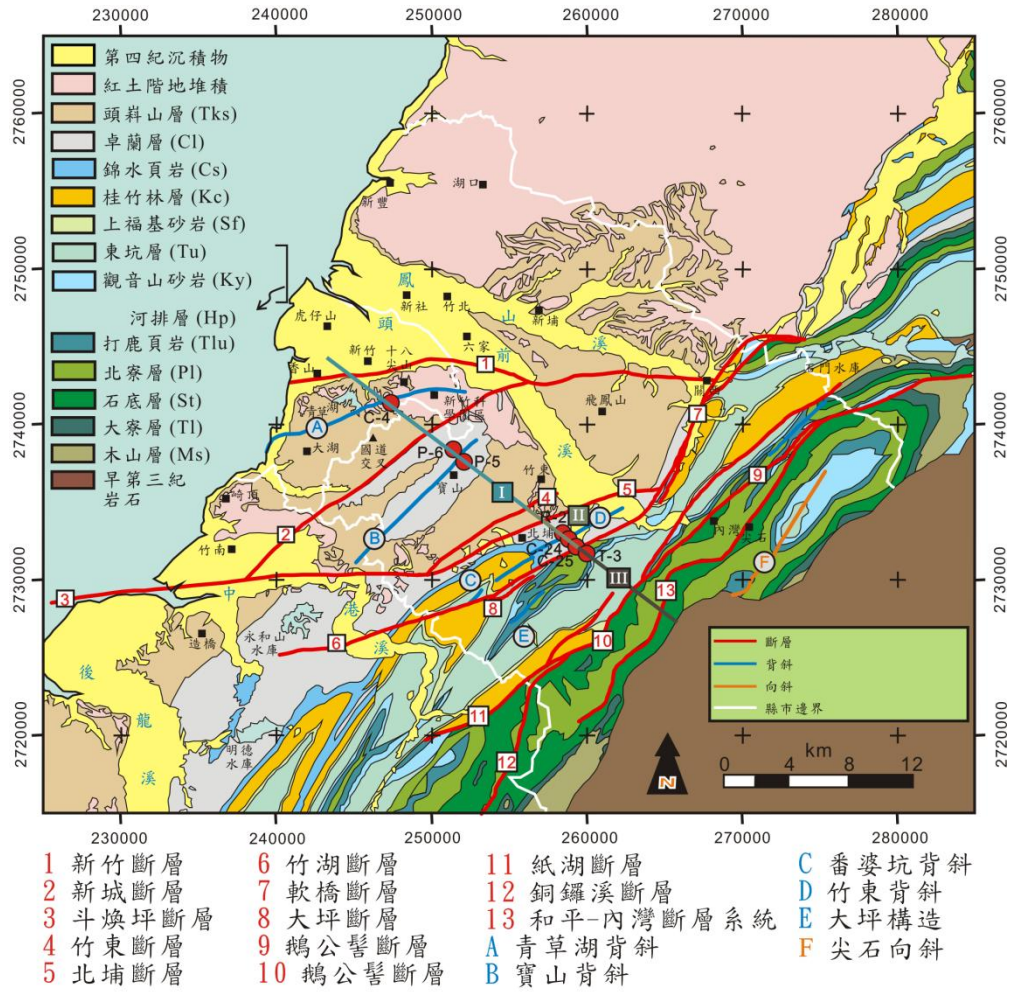
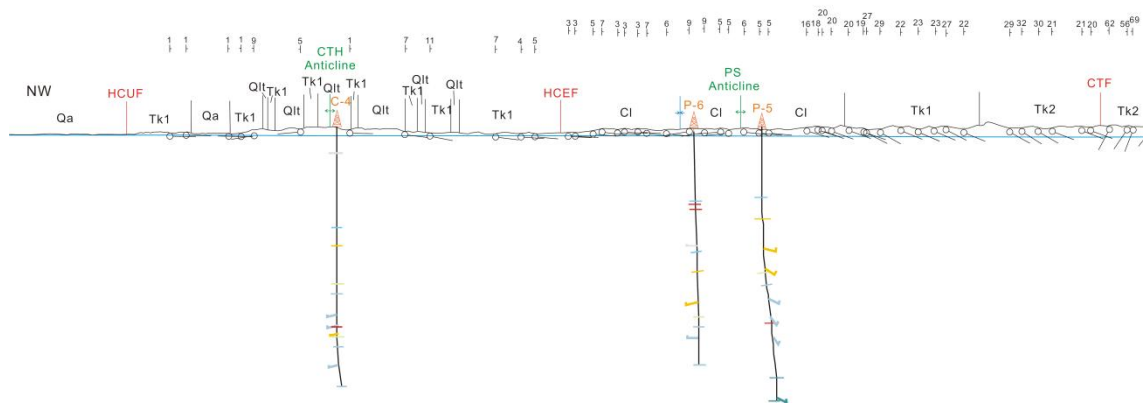
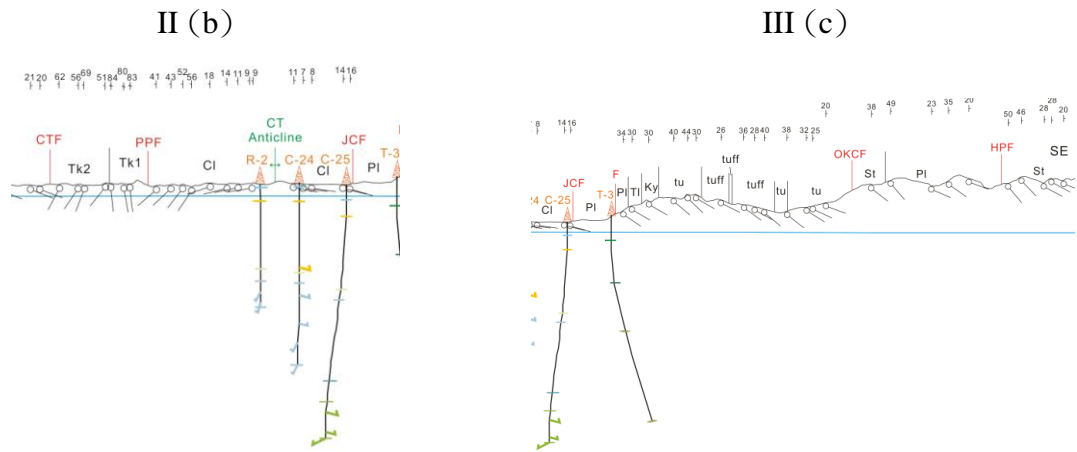


圖 4-2、本研究剖面位置圖及地質圖。剖面沿線紅點為剖面的七口控制井位之位置，地質資料包括紅色斷層線、藍色背斜及橘色向斜，剖面由西向東依序以竹東斷層與軟橋斷層為界，分為 I、II 和 III 三段。

I (a)





(d) 原始紙本剖面(部分)

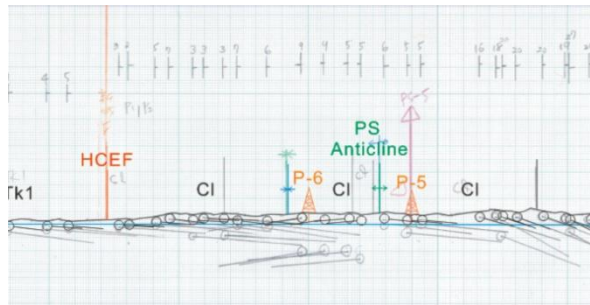


圖 4-3、本研究剖面之地表地質資料。數化自原始紙本剖面(d)，包括地表地形、地層視傾角、斷層及褶皺軸位置以及井下資料，剖面由西向東依序以竹東斷層(CTF)與軟橋斷層(JCF)為界，分為 I(a)、II(b)和 III(c)三段。

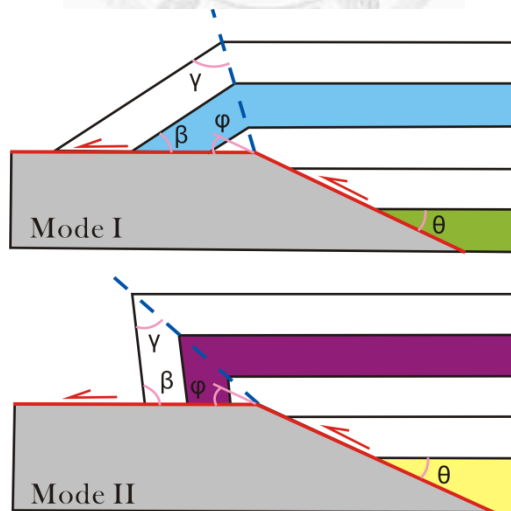


圖 4-4、斷層彎曲褶皺的兩種形貌圖。此兩種模式的截切角(cutoff angle) θ 及斷層轉折角 ϕ 相同，自然界中存在較多的模式一，而模式二形貌較類似斷層擴展褶皺，背斜前翼有地層倒轉的現象(修改自 Suppe, 1983)。

4.2 地質剖面回復

本剖面使用 2D Move 軟體進行構造平衡剖面的回復，檢驗構造剖面幾何型態上的合理性與估算斷層之滑移量與剖面縮短量，共分為六個步驟回復，以下分述如下：

4.2.1 疊置構造之回復(Step 1)

首先回復位於新竹斷層(HCF)下盤以及軟橋斷層(JCF)深部，基底滑脫面上之疊置構造，疊置構造分別位於約 8 公里及 9-11 公里深，此構造導致新竹斷層下盤及軟橋斷層下盤的背斜拱起，竹東斷層、北埔斷層及軟橋斷層的合併，在 9 公里左右匯入軟橋斷層下盤的疊置構造中(圖 4-5 (a), Step 1)。本研究利用曲滑褶皺回復法(flexural slip unfolding)將地層攤平，回復的結果，剖面由原始的 27.99 公里增加為 28.67 公里，故此兩個疊置構造的形成造成上方兩個背斜共有 0.68 公里的收縮量。

4.2.2 新竹斷層構造(HCUF)之回復(Step 2)

新竹斷層(HCUF)為高角度逆衝斷層，為中新世早期正斷層反轉之構造，在此先不回復正斷層的作用，僅回復後期逆衝斷層的影響。利用斷層平行回復法(fault parallel flow)與曲滑褶皺回復法將地層沿著新竹斷層拉回並對齊錦水頁岩(Cs)的頂部，並可見打鹿頁岩(Tlu)至五指山層(Ws)層序有正斷層作用造成微小的垂直落差(圖 4-5 (b), Step 2)，回復結果顯示，地層沿著新竹斷層滑移量為 1318 公尺，剖面由 28.67 公里增至 29.52 公里，新竹斷層逆衝活動及青草湖背斜的形成造成 0.85 公里的壓縮量。

(a) 疊置構造之回復 (Step 1)

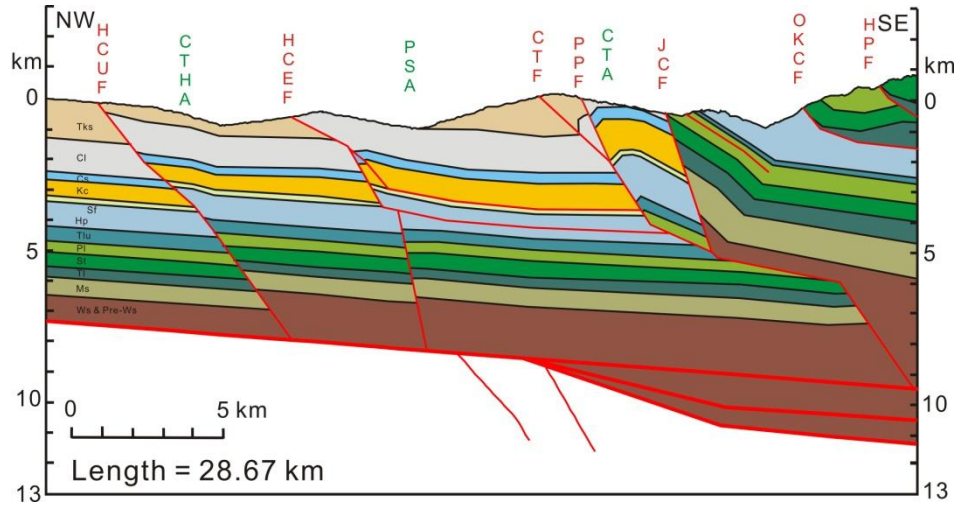
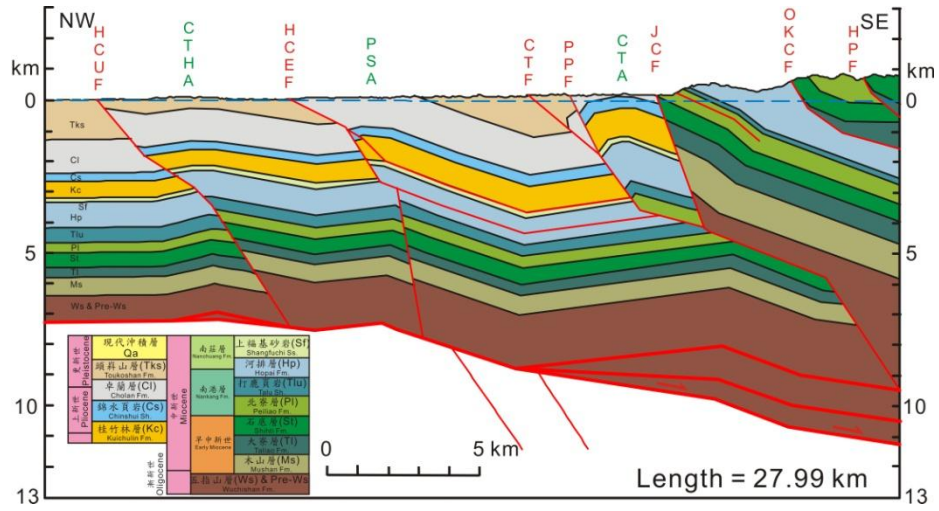
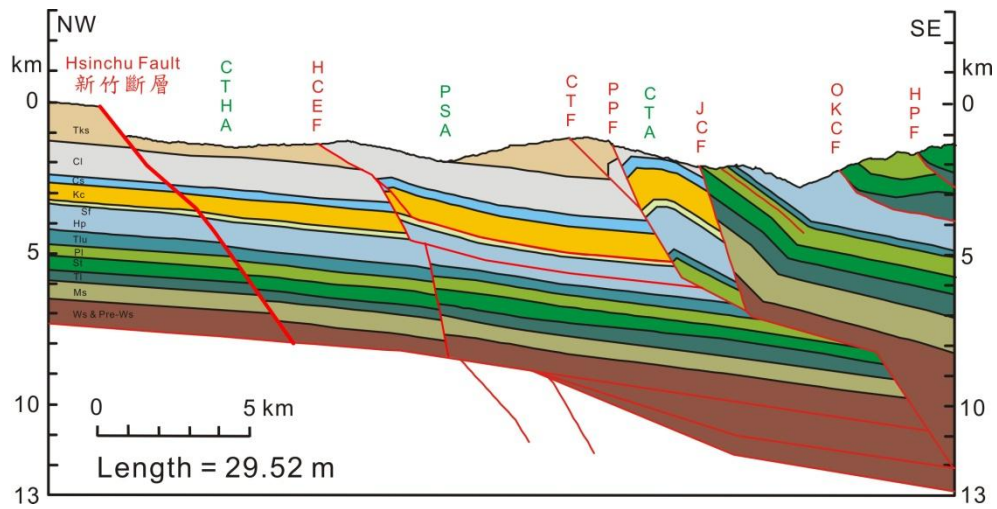
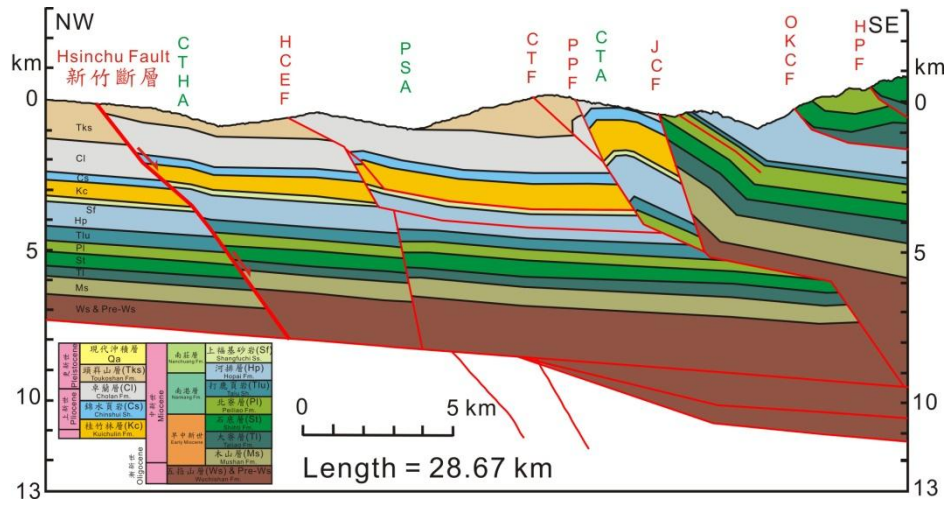


圖 4-5、本研究構造剖面回復步驟圖之一。回復過程如圖 4-5 至圖 4-7 所示，共分八個步驟。(a) Step 1：疊置構造之回復；(b) Step 2：新竹斷層構造(HCUF)之回復。

(b) 新竹斷層構造(HCUF)之回復 (Step 2)



4.2.3 新城斷層構造(HCEF)之回復(Step 3)

淺部的新城斷層(HCEF)在地底分支為兩條斷層，分別沿著桂竹林層(Kc)底部與河排層(Hp)層間滑動，本研究認為此兩斷層是幾乎同時發育而成的，深部高角度逆衝斷層為早期正斷層反轉之構造，利用曲滑褶皺回復法回復並對齊錦水頁岩(Cs)的頂部。回復的結果指出，深部高角度斷層清楚地顯示中新世早期的打鹿頁岩(Tlu)至五指山層(Ws)層序有正斷層作用，地層沿著新城斷層滑移量為 887 公尺，剖面由 29.52 公里增加至 29.90 公里，表示寶山背斜的形成與新城斷層的逆衝造成 0.38 公里的縮短量(圖 4-6 (a), Step 3)。

4.2.4 竹東斷層構造(CTF)之回復(Step 4)

由於竹東斷層(CTF)上下盤之地層皆為頭嵛山層火焰山相中(Tks, Tk2)，故竹東斷層造成的地層落差不大，依據曲滑褶皺回復法的回復，剖面增至 30.07 公里，上盤地層沿著竹東斷層的滑移量僅有 36 公尺(圖 4-6(b), Step 4)。

4.2.5 北埔斷層構造(PPF)之回復(Step 5)

北埔斷層(PPF)截切竹東背斜前翼，將竹東背斜拱起並發育到地表，斷層上下盤桂竹林層(Kc)與河排層(Hp)的地層厚度變化相當明顯，而在此兩層之間的上福基砂岩(Sf)則厚度一致，顯示在桂竹林層與河排層沉積時有區域性、短時間的生長正斷層，但在上福基砂岩沉積時則沒有斷層活動，故推測生長斷層分別在桂竹林層與河排層頂部時停止陷落；使用曲滑褶皺回復法回復的結果，剖面增加為 33.51 公里，北埔斷層發育及竹東背斜的形成造成 3.44 公里的壓縮量，另外，上盤地層沿著北埔斷層的滑移量為 2004 公尺(圖 4-6 (c), Step 5)。

(a) 新城斷層構造(HCEF)之回復 (Step 3)

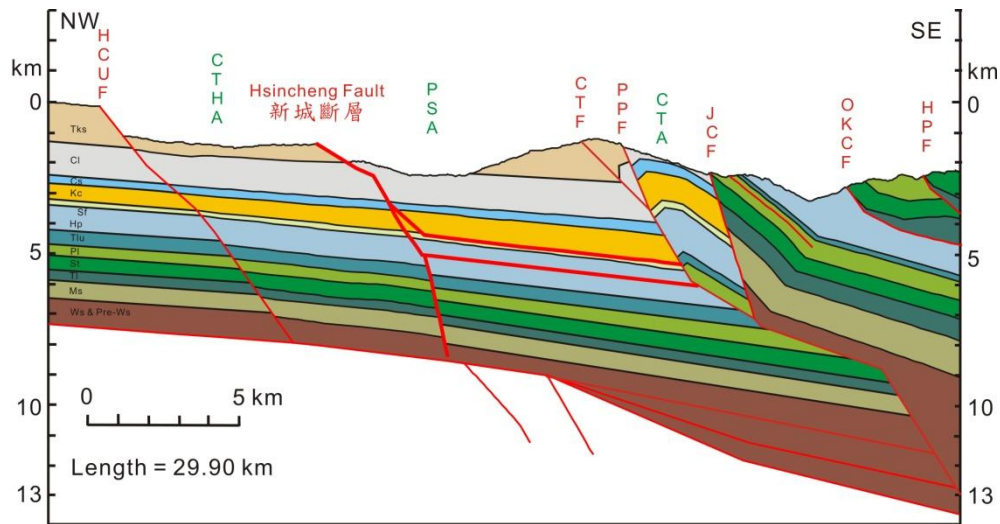
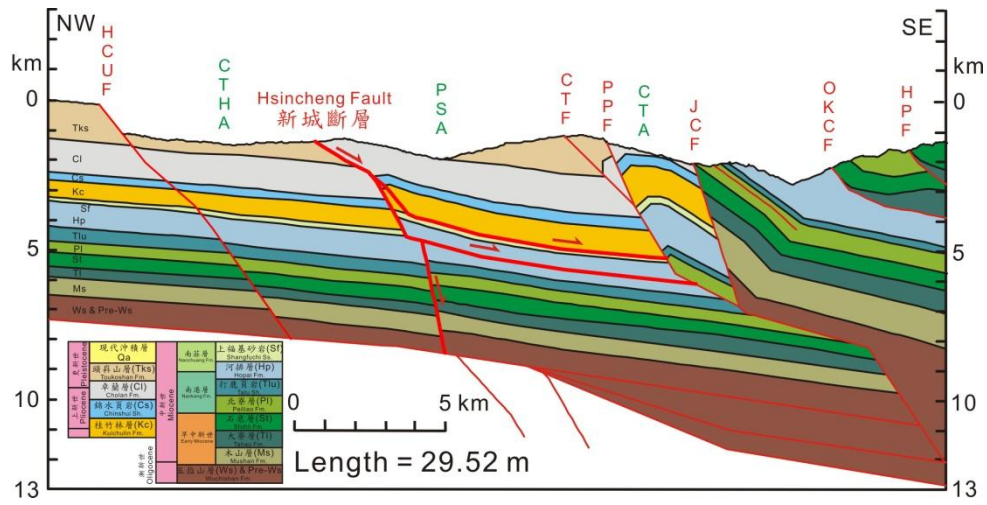
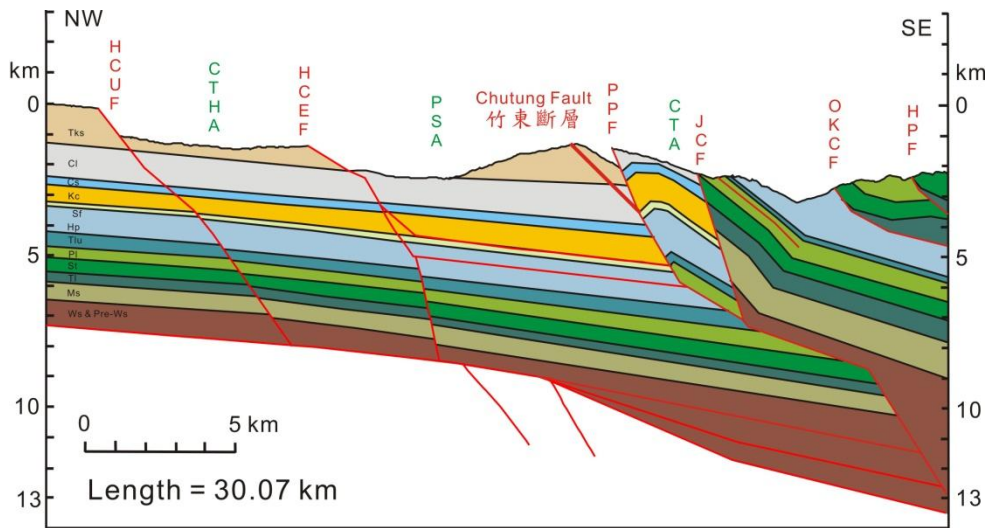
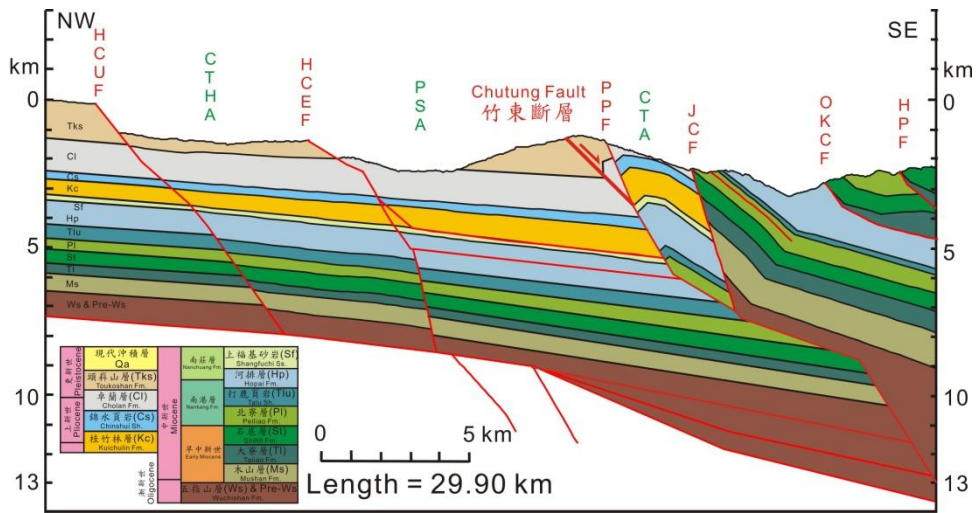
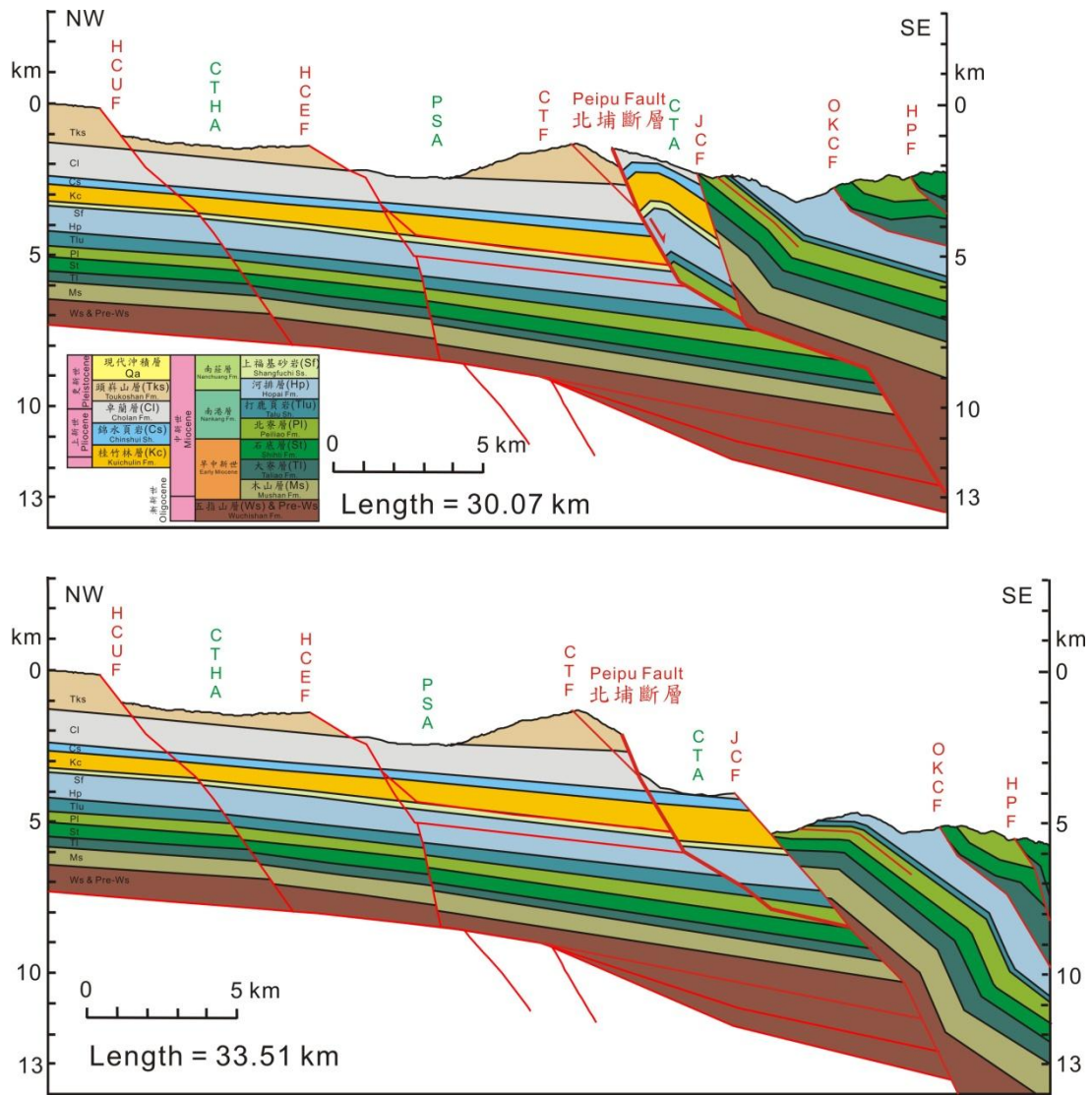


圖 4-6、本研究構造剖面回復步驟圖之二。(a) Step 3：新城斷層構造(HCEF)之回復；(b) Step 4：竹東斷層構造(CTF)之回復；(c) Step 5：北埔斷層構造(PPF)之回復。



(b) 竹東斷層構造(CTF)之回復 (Step 4)



(c) 北埔斷層構造(PPF)之回復 (Step 5)

4.2.6 軟橋斷層構造(JCF)之回復(Step 6)

軟橋斷層(JCF)截切北寮層(Pl)以下層序，將北寮層逆衝到頭嵛山層(Tks)之上，軟橋斷層上盤的河排層(Hp)及北寮層以下層序稍微增厚，但中間的打鹿頁岩(Tlu)則反而較薄，可以說明軟橋斷層為早期反轉的構造，生長斷層造成北寮層以下層序增厚，而打鹿頁岩則往東邊逐漸尖滅，根據曲滑褶皺回復法回復的結果，剖面增加為 37.51 公里，斷層發育造成 4 公里的縮短量，另外，上盤地層沿著軟橋斷層的滑移量為 4073 公尺(圖 4-7, Step 6)。

由於內麓山帶的證據及控制條件較少，鵝公髻斷層與和平斷層的斷層形貌不確定性較高，無法確切推估斷層於深部的斷坪與斷坡之形貌，因此本研究僅回復到軟橋斷層為止。

根據地質剖面的回復，依時序演化依序為和平斷層及鵝公髻斷層、軟橋斷層、北埔斷層、竹東斷層、新城斷層、新竹斷層與深部疊置構造共六個階段各剖面之水平縮短量：新竹斷層 0.85 公里、新城斷層 0.38 公里、竹東斷層 0.17 公里、北埔斷層 3.44 公里及軟橋斷層 4 公里；新竹斷層與新城斷層沿斷層之滑移量為 1318 公尺及 887 公尺。

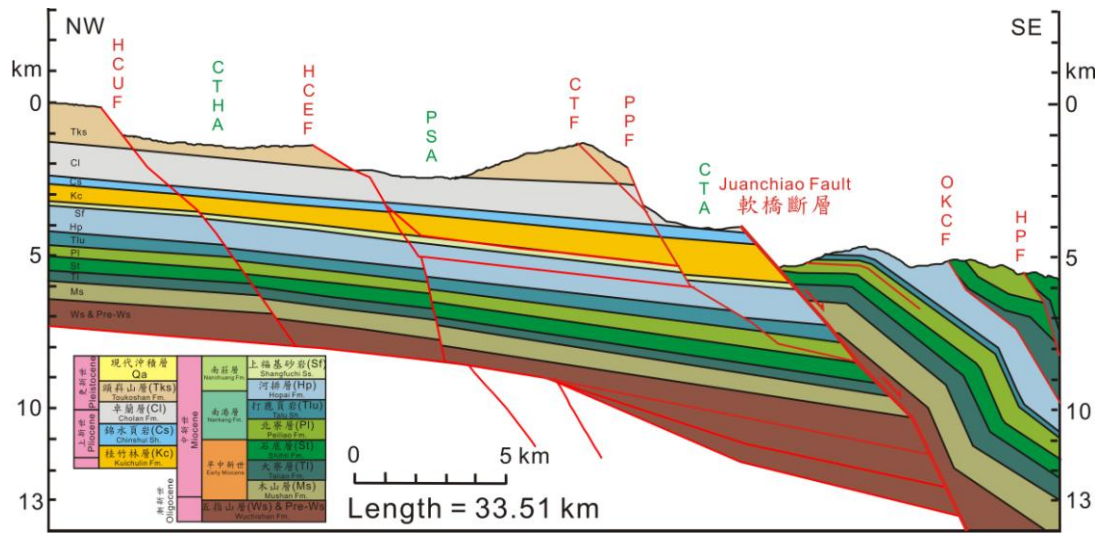
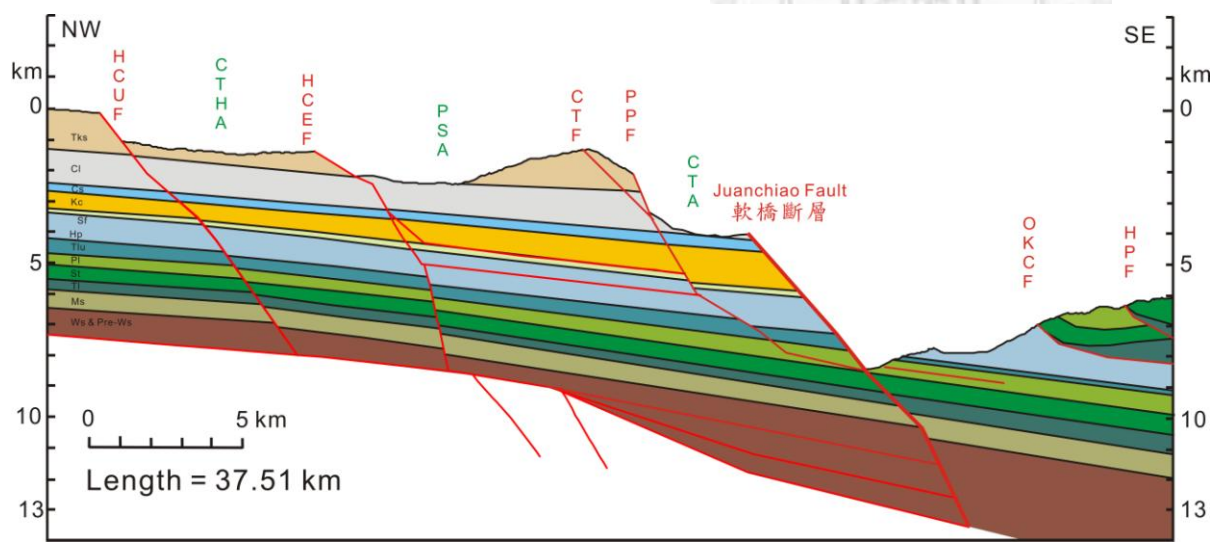


圖 4-7、本研究構造剖面回復步驟圖之
三。Step 6：軟橋斷層構造(JCF)
之回復。



4.3 新竹地區地下三維構造模型

本研究整合新竹地區的地質構造剖面，包括東北—西南向剖面的黃旭燦等 (2004) 之 Line 3-7 及南北向的 Line N4 (黃旭燦等, 2004)，利用以上共六條剖面建立三維斷層構造模型(圖 4-8)，斷層模型重建時考慮彼此先後發育順序與截切關係，早期發育的斷層會被晚期發育的斷層所截切。

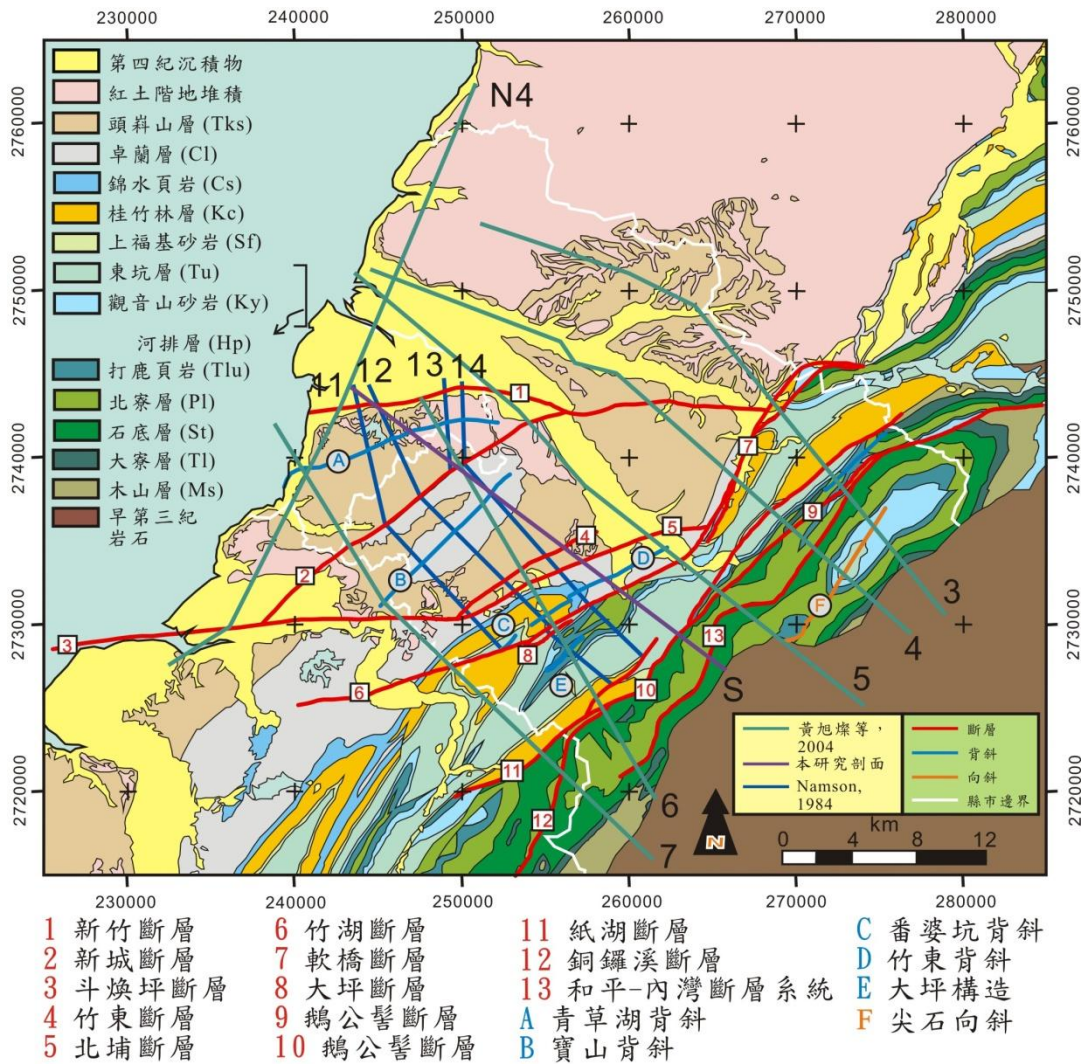


圖 4-8、建構三維構造模型之地質剖面位置圖。綠色線為 Line 3-7 及 Line N4 (黃旭燦等, 2004)，藍色線為 Line 11-14(Namson, 1984)，紫色的 Line S 為本研究建構之剖面。

重建三維斷層模型的結果顯示(圖 4-9)，以軟橋斷層為界，以東的內麓山帶的鵝公髻斷層(北段，n)、鵝公髻(南段，s)—紙湖斷層系統與和平—內灣斷層系統形成一系列覆瓦狀構造，斷層形貌越往內麓山帶逐漸變緩，並轉為層間斷層(黃旭燦等，2004)，兩者呈近乎平行的傾角往地底延伸(圖 4-10)，鵝公髻斷層約於本研究建構之剖面北邊分支成兩支斷層(圖 4-11)，北段的鵝公髻斷層(n)之南段與南段的鵝公髻斷層(s)匯聚，北段(n)則往北逐漸變陡峭；軟橋斷層以西，新城斷層、竹東斷層與北埔斷層亦呈現覆瓦狀構造形貌，不同的地方在於斷層往深部稍微變陡峭(圖 4-12)，竹東斷層與北埔斷層匯聚於深部 2-3 公里處，而新城斷層與北埔斷層於深部則匯聚於深部 4-5 公里處。

新城斷層的南北端分別終止於斗煥坪斷層與新竹斷層(圖 4-13)，新城斷層沿著東段的新竹斷層滑移，東段之新竹斷層為新城斷層的側滑坡(lateral ramp)，而東段的新城斷層往深部延伸與軟橋斷層近乎平行，而止於鵝公髻斷層北段的高角度斷層面；軟橋斷層為此區重要的邊界斷層，淺部呈現高角度斷層形貌，大約深度 4 公里處斷層轉折成較平坦的斷坪(flat)，一直延伸到 5-6 公里深處，斷層的北段則在約 2 公里深處就止於鵝公髻斷層(圖 4-14)；新竹地區的基底滑脫面整體有向東傾斜的趨勢，由西向東滑脫面深度由 6-7 公里加深為 10 公里左右(圖 4-15)。

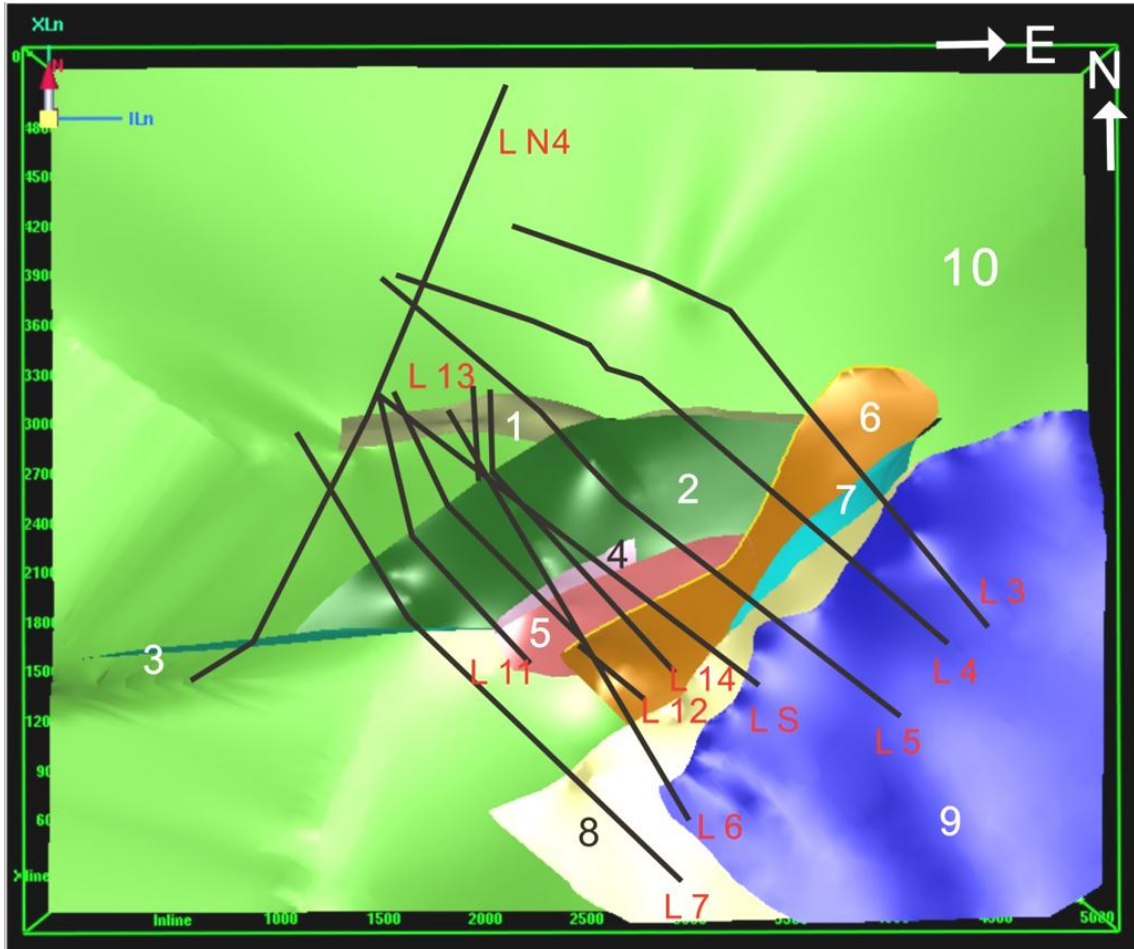


圖 4-9、新竹地區之三維地下構造形貌俯視圖。所有斷層模型圖中左上角的方向表示為：綠線或紅色箭頭為北方，藍線方向為東方，而紫線為深度方向 z(在此圖不明顯)，1：新竹斷層，2：新城斷層，3：斗煥坪斷層，4：竹東斷層，5：北埔斷層，6：軟橋斷層，7：鵝公髻斷層，8：鵝公髻—紙湖斷層系統，9：和平—內灣斷層系統，10：基底滑脫面。

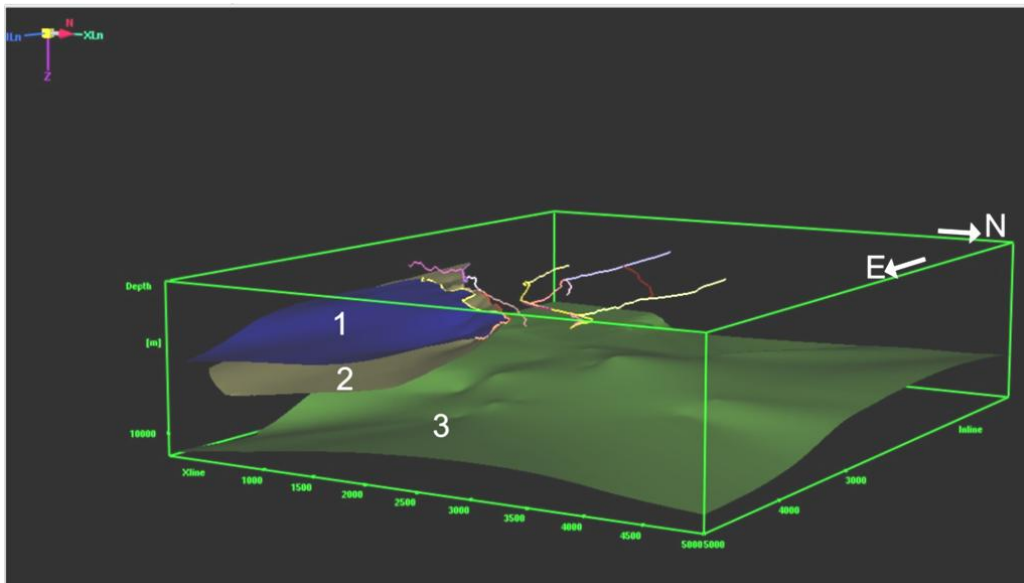
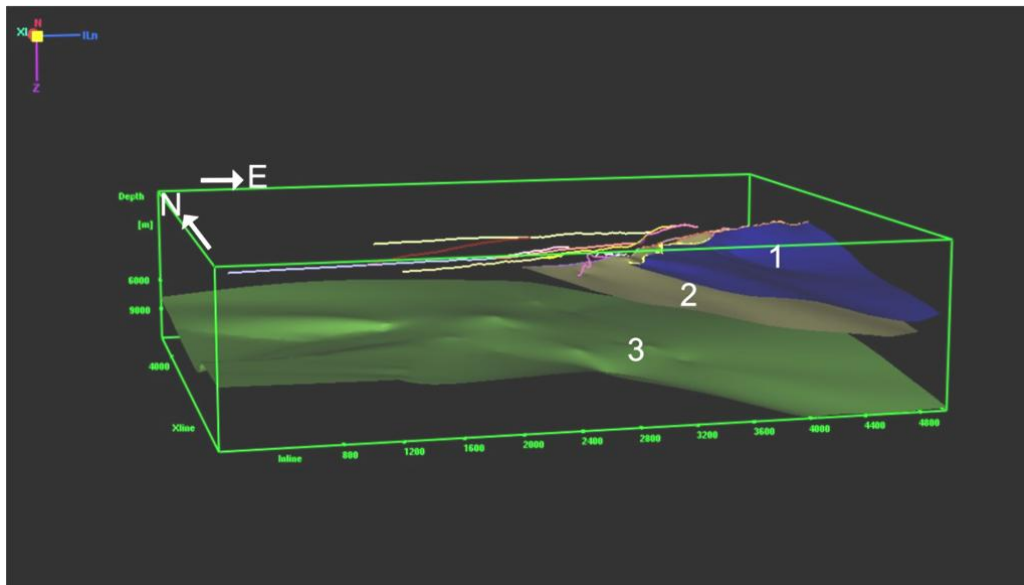


圖 4-10、和平—內灣斷層系統與鵝公髻—紙湖斷層系統之地下構造形貌。其餘線條為新竹地區主要斷層地表跡線，1：和平—內灣斷層系統，2：鵝公髻—紙湖斷層系統，3：基底滑脫面。

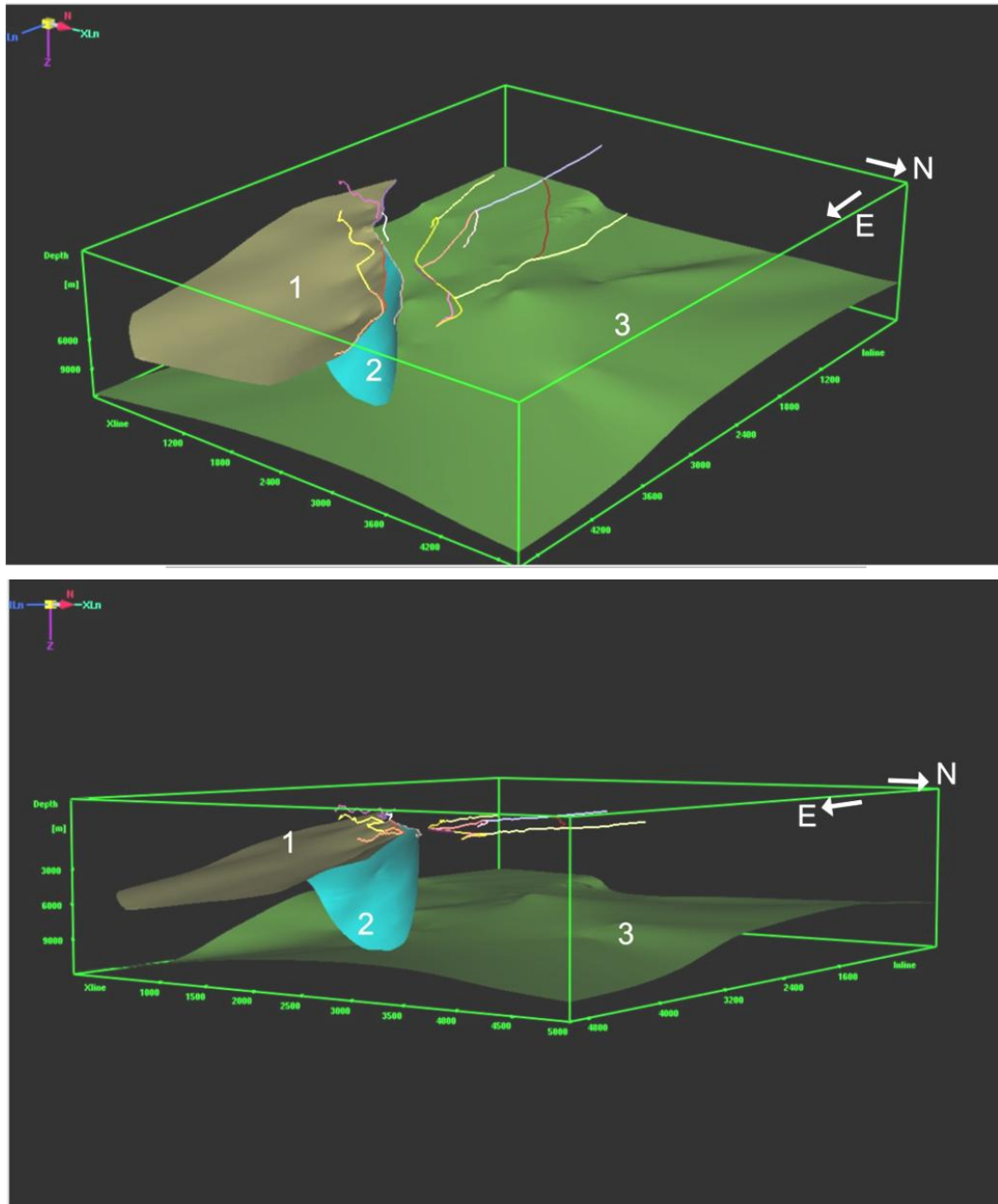


圖 4-11、鵝公髻斷層(北段，n)與鵝公髻斷層(南段，s)之地下構造形貌。其餘線條為新竹地區主要斷層地表跡線，1：鵝公髻斷層(南段，s)，2：鵝公髻斷層(北段，n)，3：基底滑脫面。

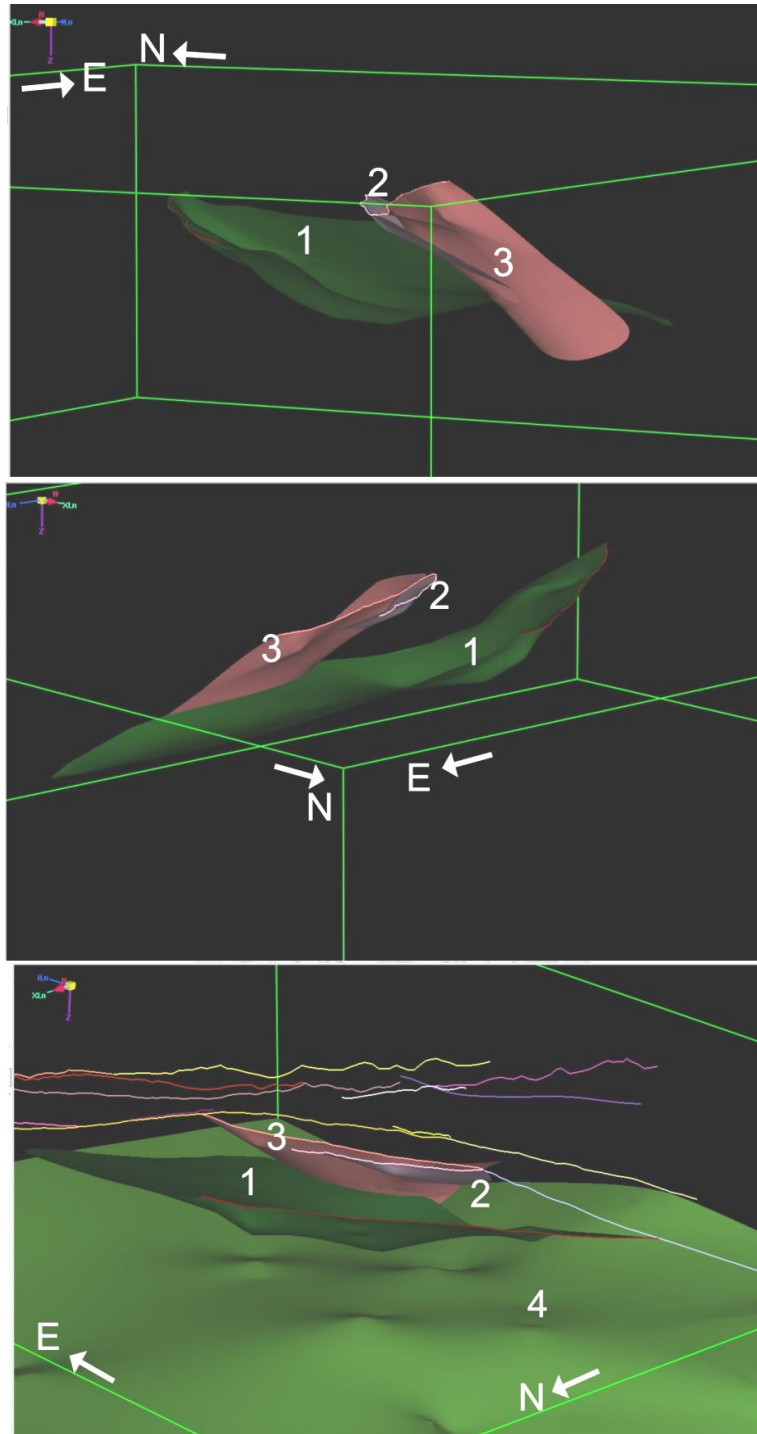


圖 4-12、新城斷層與竹東斷層、北埔斷層之地下構造形貌。其餘線條為新竹地區主要斷層地表跡線，1：新城斷層，2：竹東斷層，3：北埔斷層。

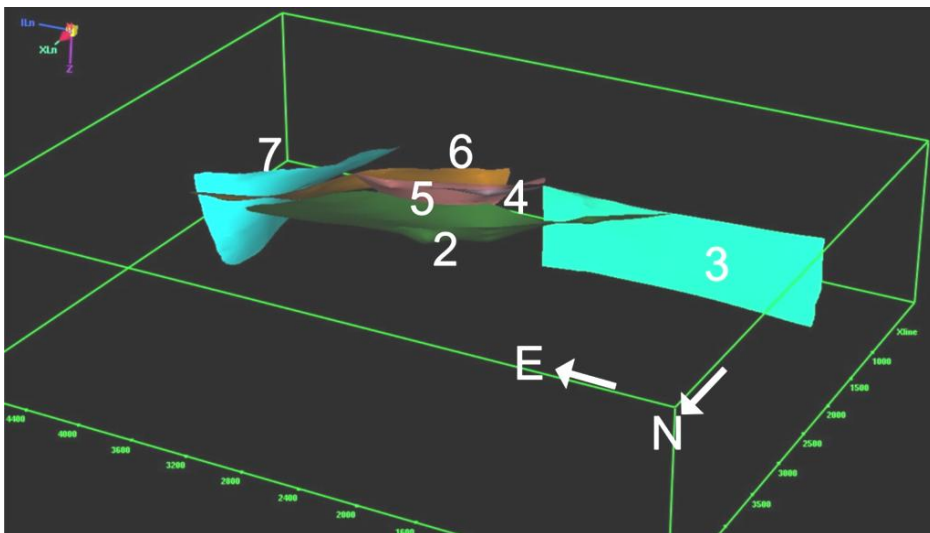
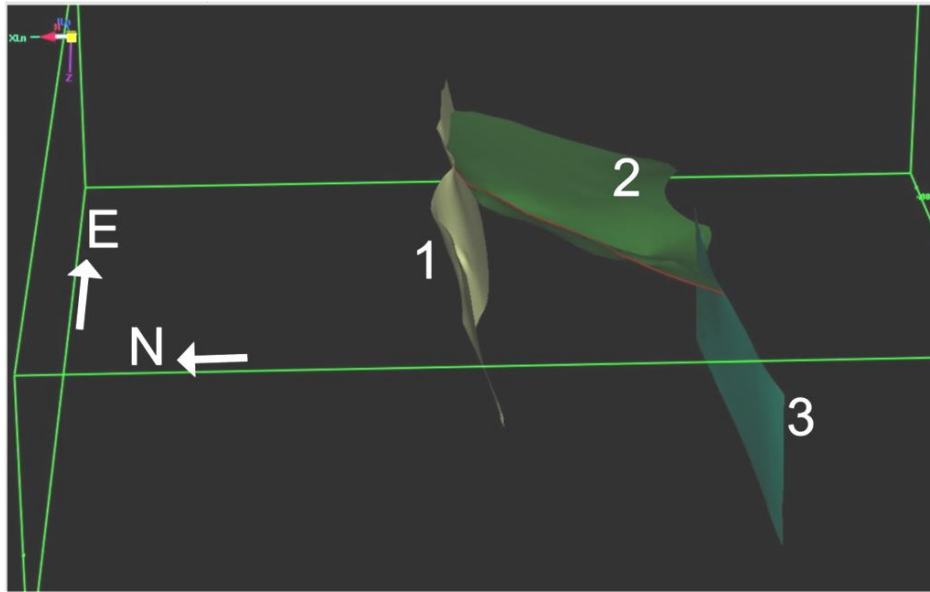


圖 4-13、新竹斷層、新城斷層與斗煥坪斷層之地下構造形貌。1：新竹斷層，2：新城斷層，3：斗煥坪斷層，4：竹東斷層，5：北埔斷層，6：軟橋斷層，7：鵝公髻斷層。

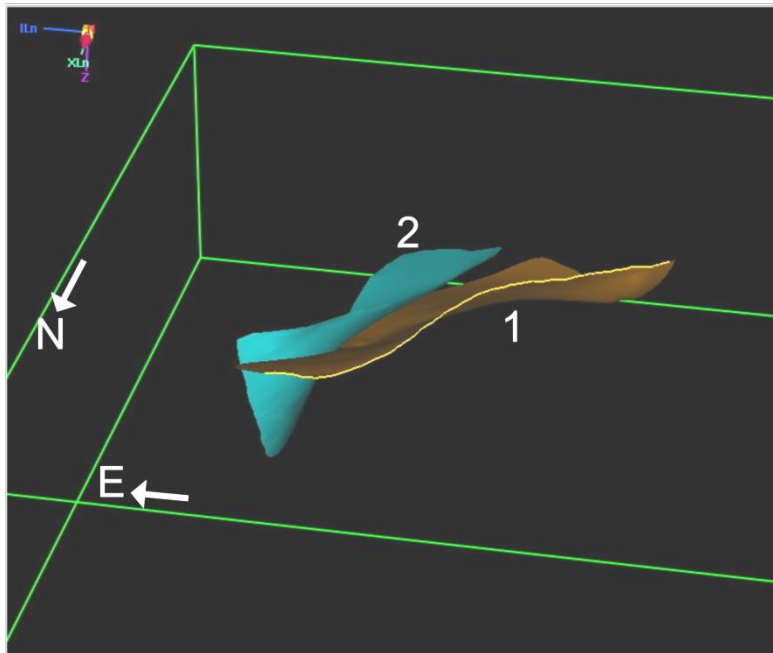
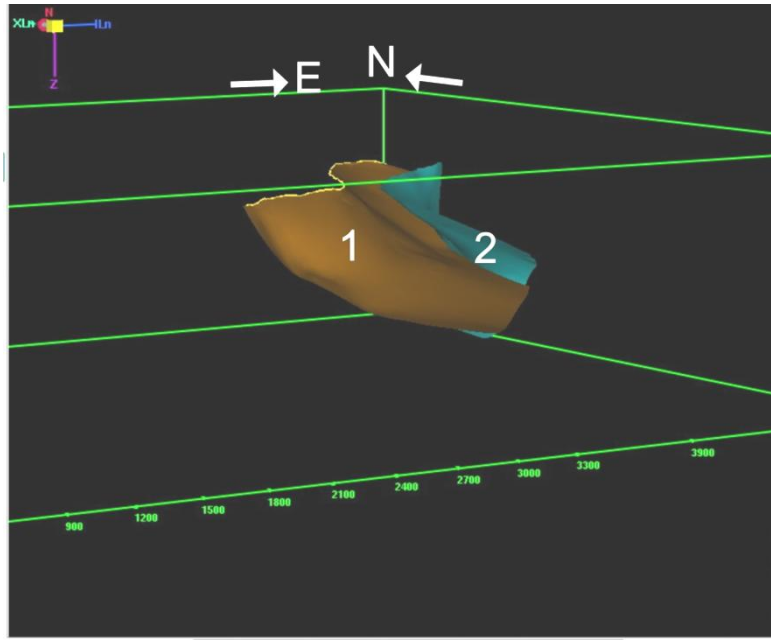


圖 4-14、軟橋斷層與鵝公髻斷層之地下構造形貌。1：軟橋斷層，2：鵝公髻斷層。

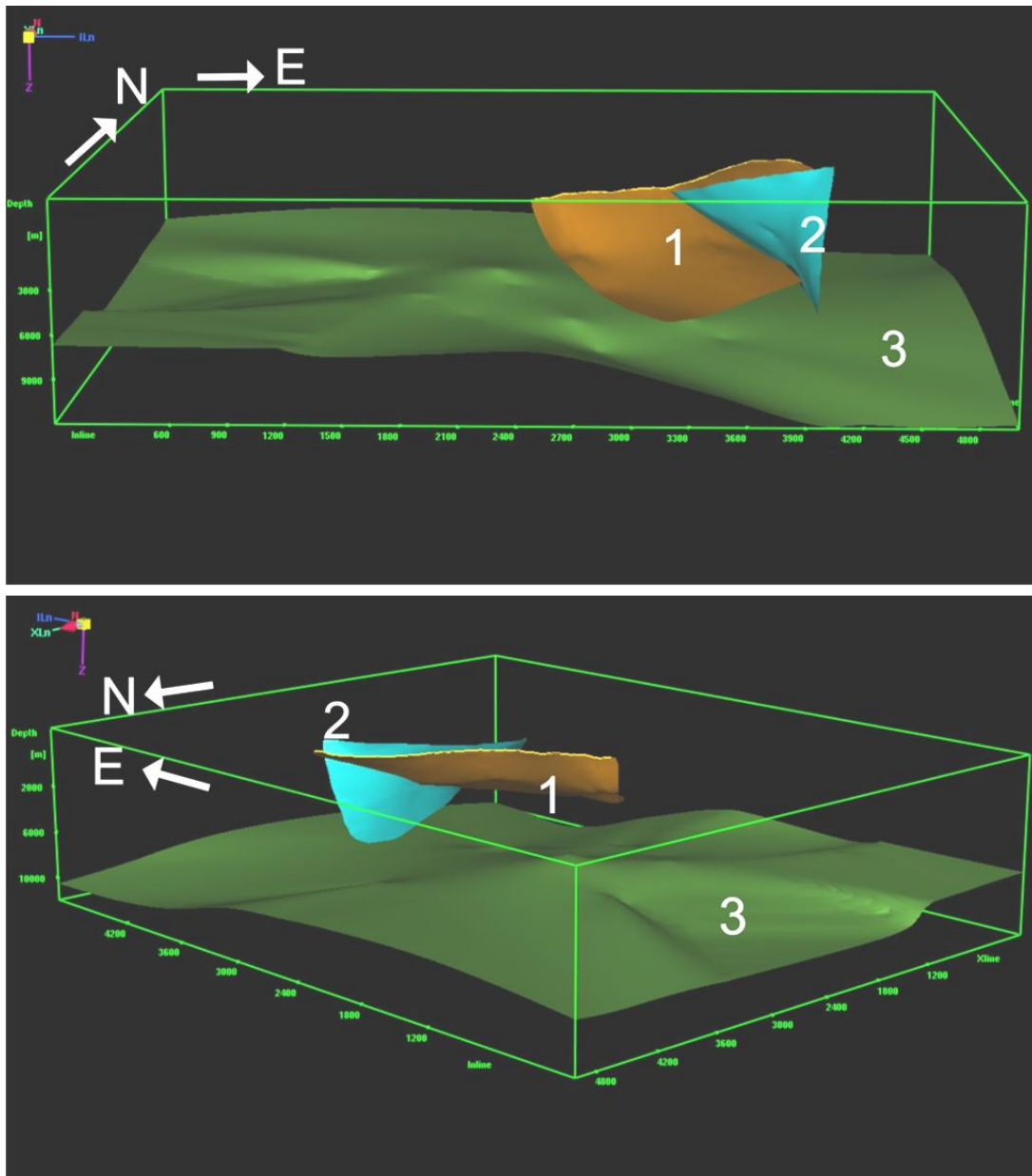


圖 4-15、新竹地區基底滑脫面之地下構造形貌。1：軟橋斷層，2：鵝公髻斷層，3：基底滑脫面。

4.4 新竹地區地震活動特性

4.4.1 二維空間地震活動之特性

透過六條橫跨新竹地區內麓山帶與外麓山帶的剖面，展現地震深度分布位置，剖面由北至南為 Line A 至 Line F(圖 4-16)，其中 Line D 為本研究建構之剖面，整合三維斷層模型與地震活動的空間分布，針對新竹地區的地震構造活動分布進行討論。

本研究所使用的地震資料為吳逸民處理之強地動觀測網與中央氣象局重定位的地震，時間區間為 1991 至 2009 年間，地震震源機制解的資料則取自 1995 至 2011 年中央研究院台灣寬頻地震觀測網的資料(Wu et al., 2007)，剖面地震使用資料繪圖軟體 GMT (Generic Mapping Tools) 投影沿剖面垂直距離十公里的地震至剖面上。

從新竹地區地震的平面分布圖來看，地震活動的分布大致以軟橋斷層為界，軟橋斷層以東，地震分布接近構造線的走向呈團狀分布，本研究之剖面南段所經過的東北邊有一團地震密集地分布，軟橋斷層(JCF)南端與竹湖(CUHF)斷層相接之處也有團狀分布，這團地震在三維空間分布中更為明顯，軟橋斷層以西的部分，地震相對較少，僅新城斷層南端近斗煥坪斷層處與竹東斷層中段各有一團較密集的地震分布(圖 4-16)；此區地震規模以 2-3 為主，最大的地震規模也只有 4 點多；從震源機制解來討論，新竹地區的地震有一組東北—西南走向的走向滑移斷層，分布於內麓山帶為主，另一組為東西走向，分布於斗煥坪斷層西段近沿海處以及東段和竹東斷層相連的附近，第三組分布於研究區域的南部，斷層走向較不一致，包括走向滑移斷層與逆衝的形態(圖 4-16)。

地震深度分布的剖面圖顯示，整體而言地震活動最深只到深度 10-14 公里(圖 4-17 至圖 4-22)，軟橋斷層(JCF)以西，地震大多分布在深度 5-10 公里左右，其中 Line C 及 Line E (圖 4-19，圖 4-21)顯示，深度 5-10 公里的地震大部分分布於新城斷層(HCEF)下盤的河排層以下之地層層序，Line B 中的新竹斷層(HCUF)有零星沿斷層線分布的地震(圖 4-18)；軟橋斷層附近有明顯的沿斷層之線狀分布(圖 4-17 至圖 4-19, Line A-C)，到了深度 3-4 公里的斷層轉折處有很明顯的團狀地震分布(圖 4-18，圖 4-19，圖 4-21, Line B, C, E)，暗示此處應該是應力累積的地方；內麓山帶的鵝公髻斷層(OKCF)與和平斷層(HPF)的附近，深度四公里以下

有明顯的垂直團狀分布的地震群(圖 4-17 至圖 4-19, Line A-C)，此地震群最深入到 10-13 公里左右，但往南邊到了 Line E(圖 4-21)則不明顯。

綜合以上的結果，新竹地區地震活動特性大致為，內麓山帶地震明顯多於外麓山帶，軟橋斷層南端有一小團明顯地震分布，主要位於斷層深部的轉折處，暗示此處為應力累積的地方，鵝公髻斷層與和平斷層的深部亦有一大團明顯的地震分布，此團地震分布最深處到 10-13 公里，整體而言新竹地區的地震活動分布最深只到 10-14 公里左右，暗示此為基底滑脫面的深度。



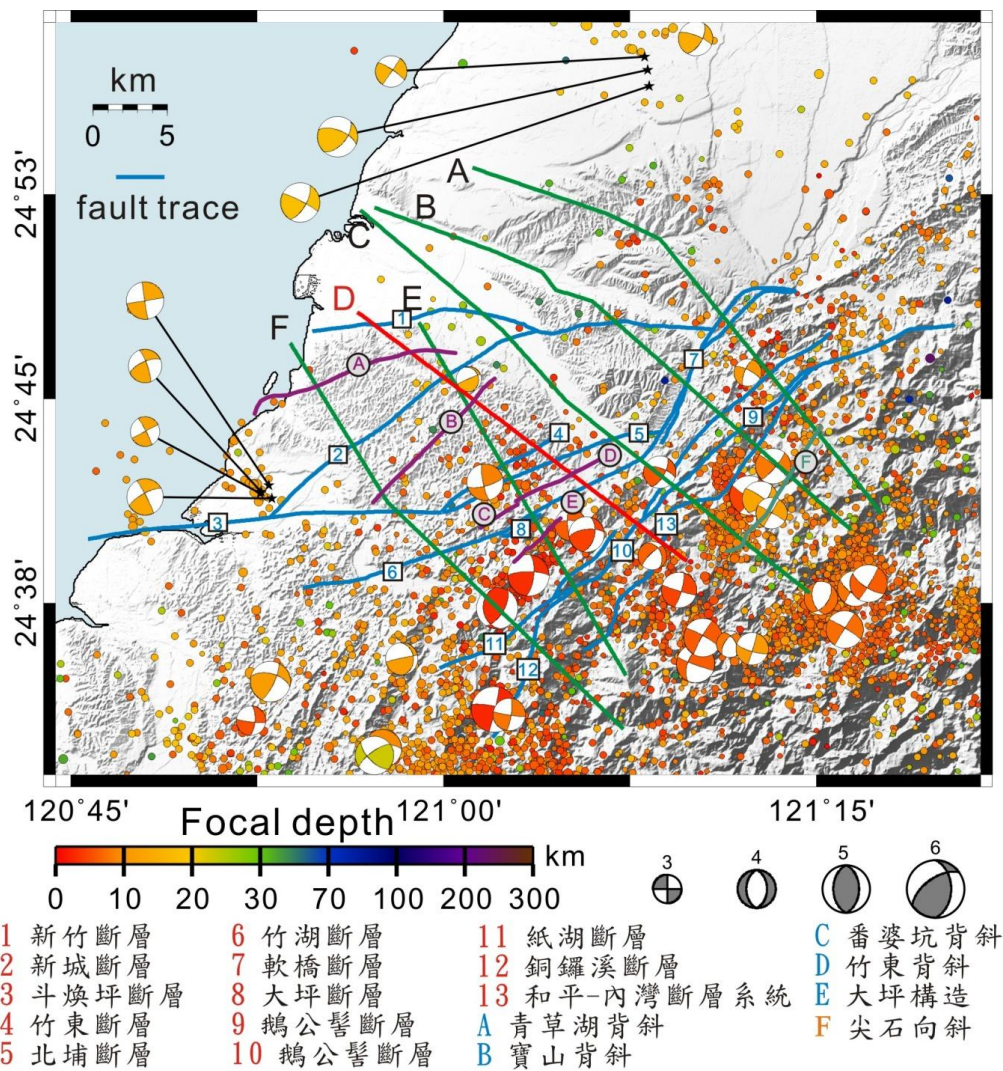


圖 4-16、新竹地區地質構造、地震活動分布與震源機制解圖，地震資料取自中央氣象局 1991 至 2009 年間的重新定位地震，震源機制解則為中央研究院之 BATS 從 1995 至 2011 年的資料。圓點為震央分布，內麓山帶地震明顯多於外麓山帶，此區有兩團明顯的地震群，包括軟橋斷層(7)南段與竹湖斷層(6)相接處的東南方有一群地震，以及鵝公髻斷層(9, 10)與和平斷層(13)之間很明顯的近南—北走向分布的地震群，剖面 Line D 為本研究建構之剖面，Line A-C 及 Line E-F 為黃旭燦等(2004)之剖面。

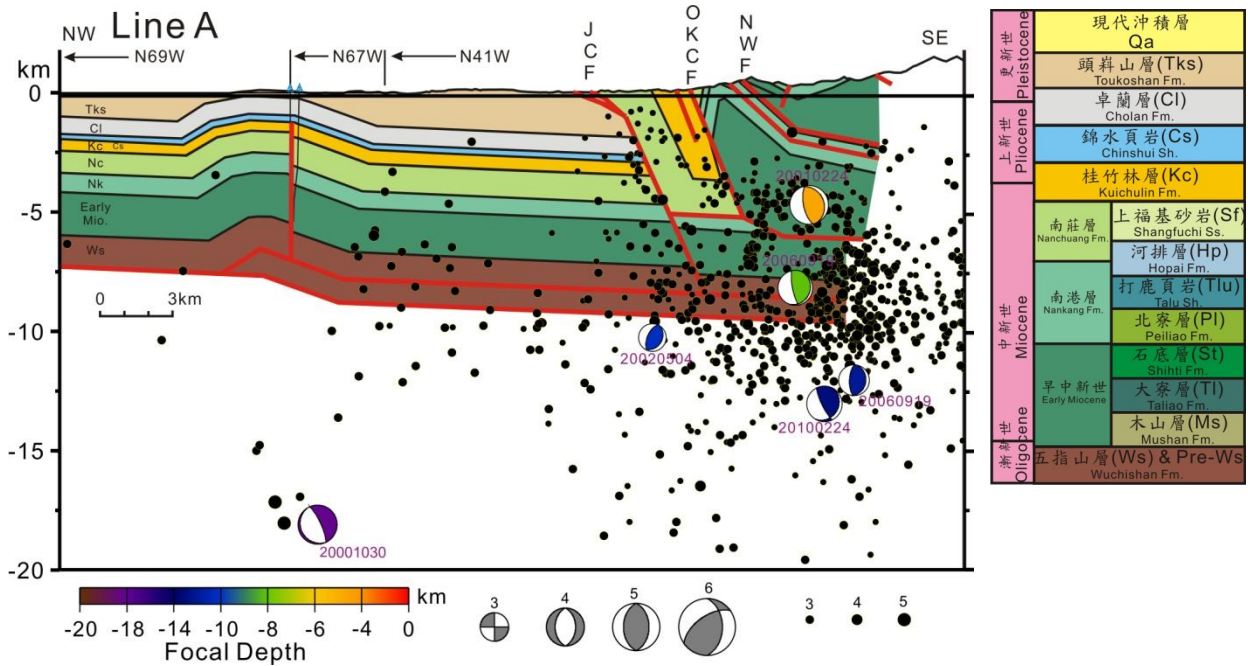


圖 4-17、地質構造與地震活動分布剖面圖之一。圓點為震源分布。沿地質構造剖面 Line A 之地震活動分布。

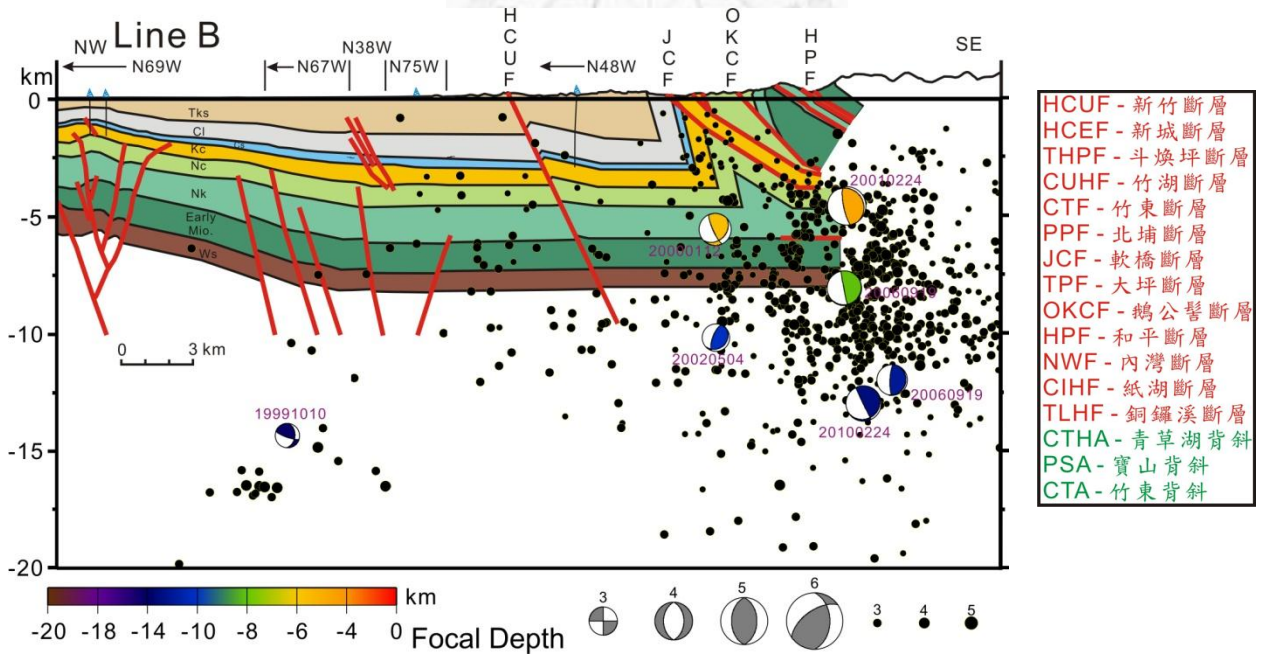


圖 4-18、地質構造與地震活動分布剖面圖之二。圓點為震源分布。沿地質構造剖面 Line B 之地震活動分布。

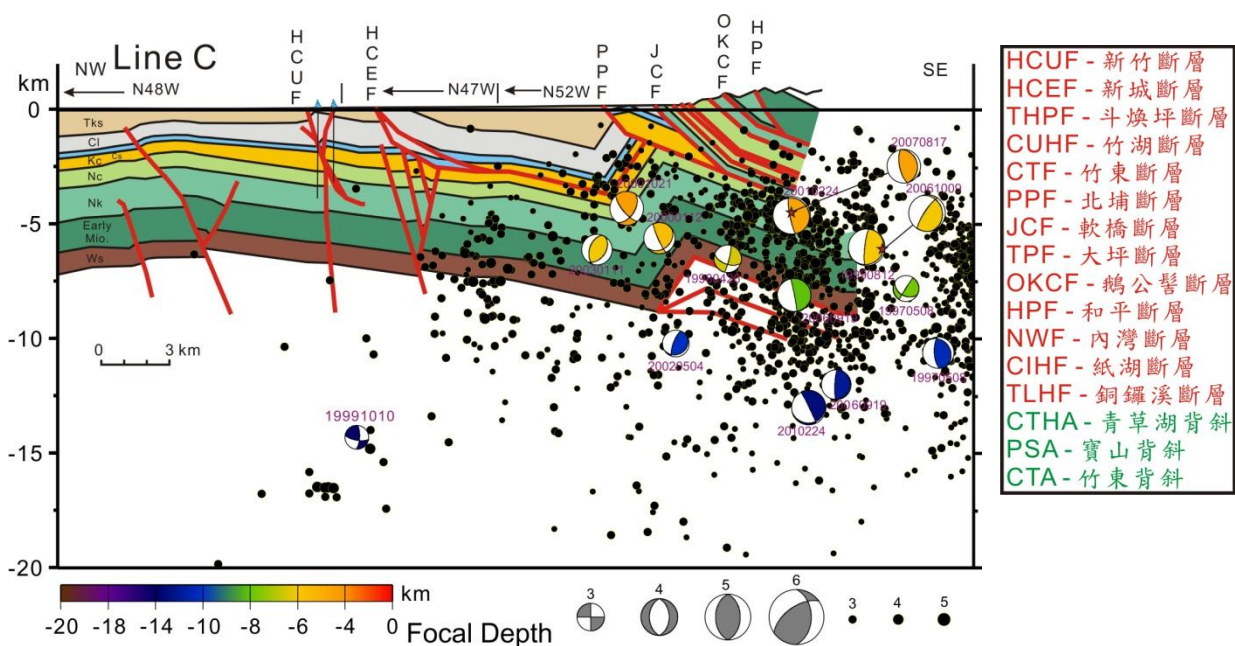


圖 4-19、地質構造與地震活動分布剖面圖之三。圓點為震源分布。沿地質構造剖面 Line C 之地震活動分布。

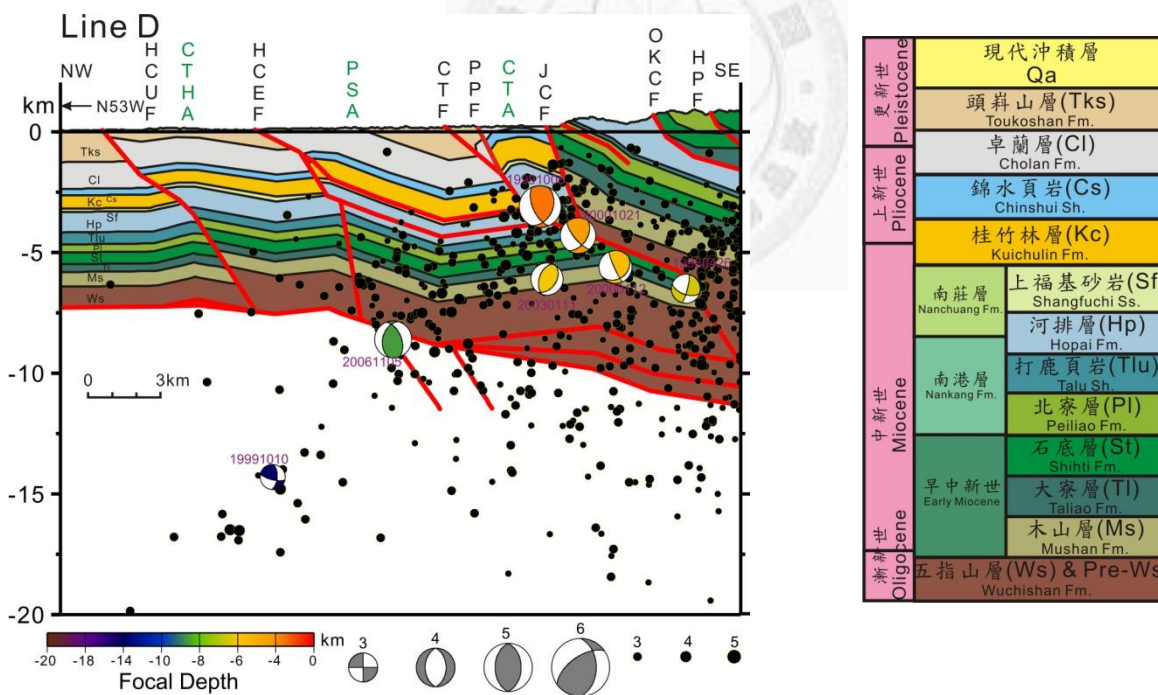


圖 4-20、地質構造與地震活動分布剖面圖之四。圓點為震源分布，震源機制解中最大的地震規模為 4.3，位於軟橋斷層底部、剖面中最淺的那顆地震，軟橋斷層底部很明顯地分佈一團地震。沿地質構造剖面 Line D 之地震活動分布。

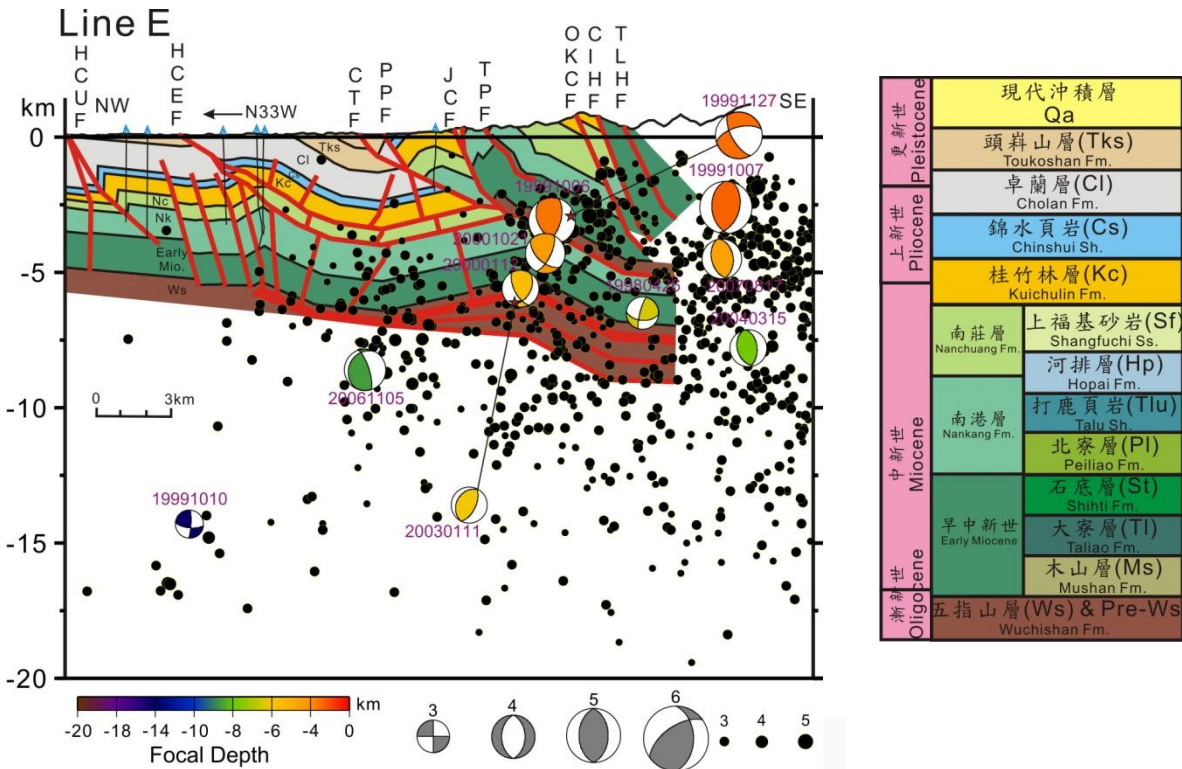


圖 4-21、地質構造與地震活動分布剖面圖之五。圓點為震源分布。沿地質構造剖面 Line E 之地震活動分布。

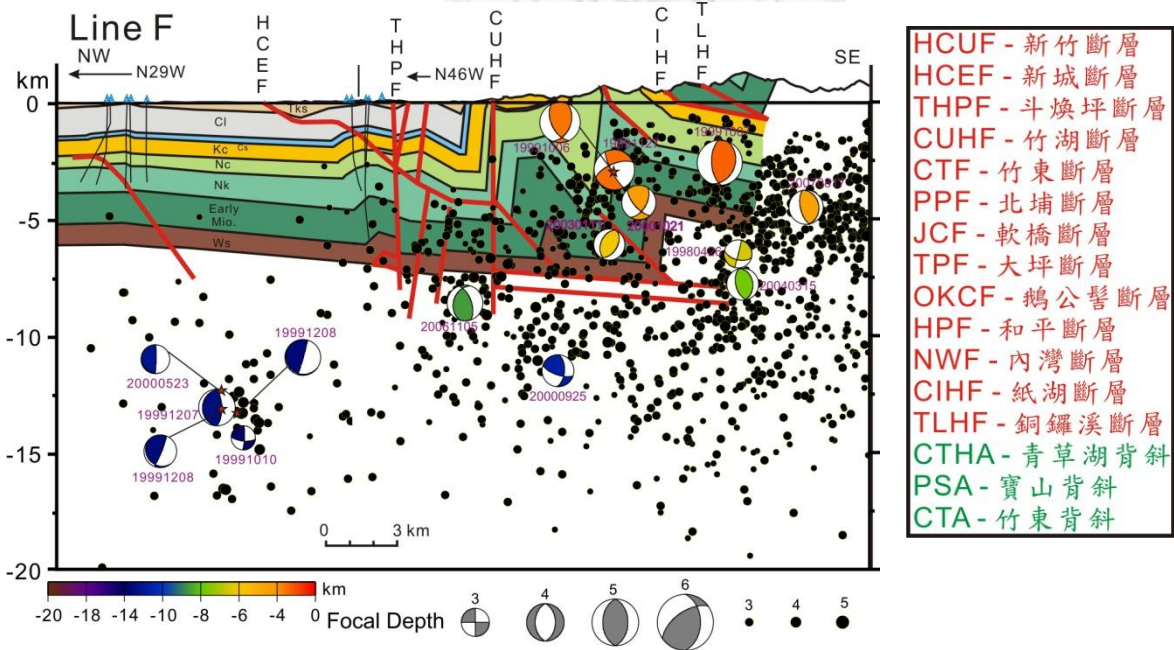


圖 4-22、地質構造與地震活動分布剖面圖之六。圓點為震源分布。沿地質構造剖面 Line F 之地震活動分布。

4.4.2 三維空間地震活動之特性

由於軟橋斷層(JCF)為新竹地區內外麓山帶的邊界斷層，故本研究特別著重在軟橋斷層附近的三維空間地震與時間分布特性。在軟橋斷層附近發現了四團重要的地震群(圖 4-23)，最南邊的第一群(I)位於軟橋斷層南端與竹湖斷層相連接之處，地震分布俯視圖可以明顯地看出(圖 4-16)，此團地震發生在 1999 年 9 月到 2000 年間，而且發生的時間集中於 1999 年 9 月 21 日到 2000 年 3 月間(圖 4-24)，地震的面狀分布約略呈現高角度東北—西南走向(圖 4-25)，故推測此團地震很可能是受到集集地震觸發而產生的餘震；往北邊的第二團(II)地震位於深度約 3-14 公里深，此團地震發生時間落於 2007 年 3 月的 17-22 日(圖 4-26 (a))，這短短的五天內發生了十五次地震事件，但規模均很小，大約只有規模 1 至 3 左右(圖 4-26 (b))。

再往北的這團狀分布的地震群(III)，震源深度介於 5-12 公里，皆發生於 2003 年，但是發生時間並不完全接近，在 3 月、10 月和 4 月有三個數量高峰群(圖 4-27)，3 月的地震密集發生於 19-26 日之間，10 月與 4 月的地震整個月份幾乎都有零星的地震發生(圖 4-28)，但是 10 月 9 日及 21 日有地震數量的峰值；最北邊的這群地震(IV)均發生於 2006 年，分布於深度 3-12 公里，在一月及十月有兩個地震數量的高峰(圖 4-29)，1 月的地震群集中發生在 17-21 日之間，10 月的地震群則在 4-12 日有七次密集的地震事件(圖 4-30)。

綜合以上的觀察結果，在軟橋斷層的深部可以發現四群地震，發生的時間依序為地震 I(1999 年)、地震 III(2003 年)、地震 IV(2006 年)及地震 II(2007 年)，地震 I 發生於九二一集集地震後密集的 7 個月內，故推測這群地震與集集地震有關，地震 III 於 2003 年 3 月底有密集的地震事件發生，地震 IV 則於 2006 年 1 月 17-21 日及 10 月 4-12 日有密集的地震事件發生，最後，地震 II 集中發生於 2007 年 3 月的 17-22 日。

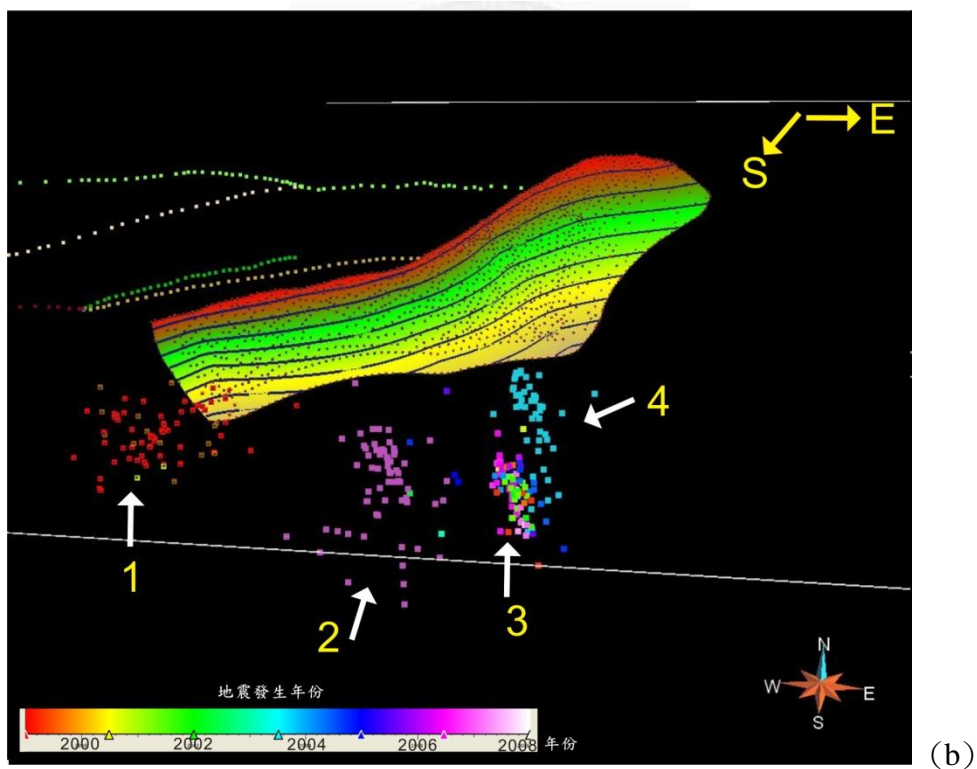
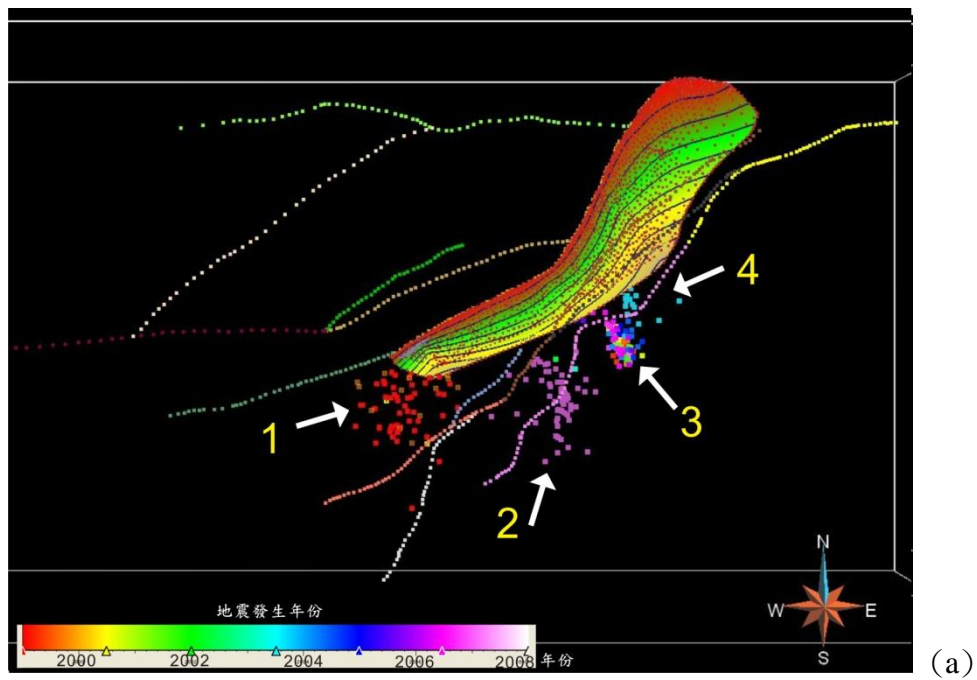


圖 4-23、近軟橋斷層深部四團地震群分布圖。其餘點分佈為地表斷層跡線，地震的顏色表示地震發生的年代，紅色為 1999 年，白色為 2009 年，軟橋斷層面上的顏色表示深度，線條則為斷層面上的等深度線，等深度線間距為五百公尺，最深的線為 3500 公尺。(a) 四群地震的俯視圖，其餘的點為地表斷層跡線；(b) 四群地震的平面分布近看圖。

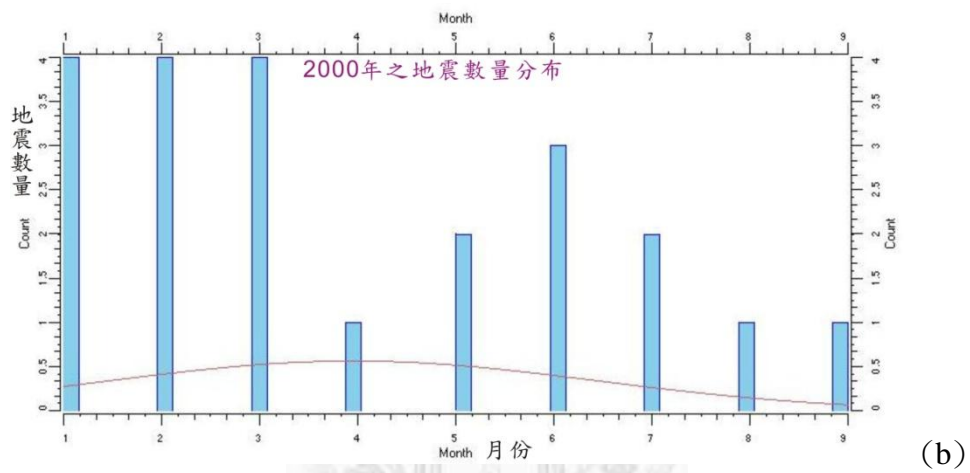
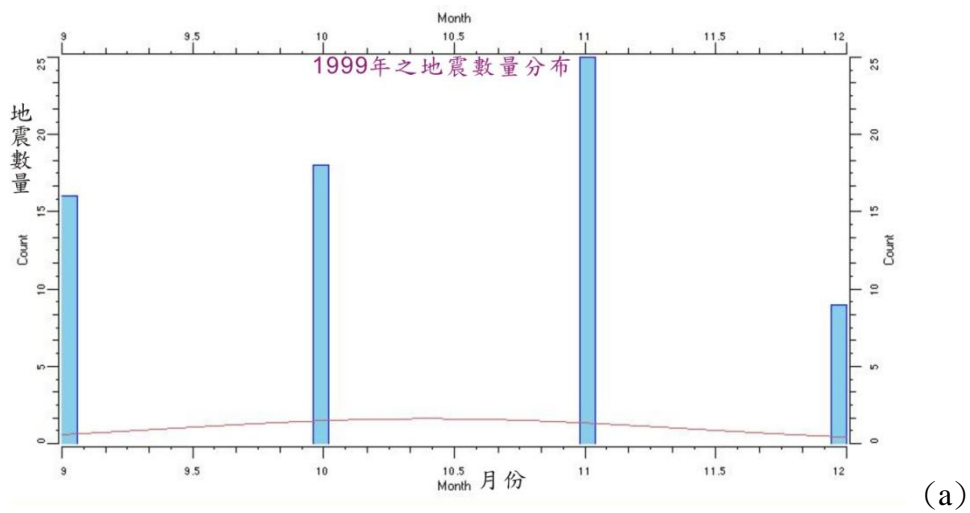


圖 4-24、分布於 1999 年 9 月至 2000 年 3 月之間的地震群。以下所有地震數量分布圖中的紅線為趨勢線。(a) 1999 年 9 月之後有大量的地震事件；(b) 2000 年 3 月以前亦有地震事件的峰值。

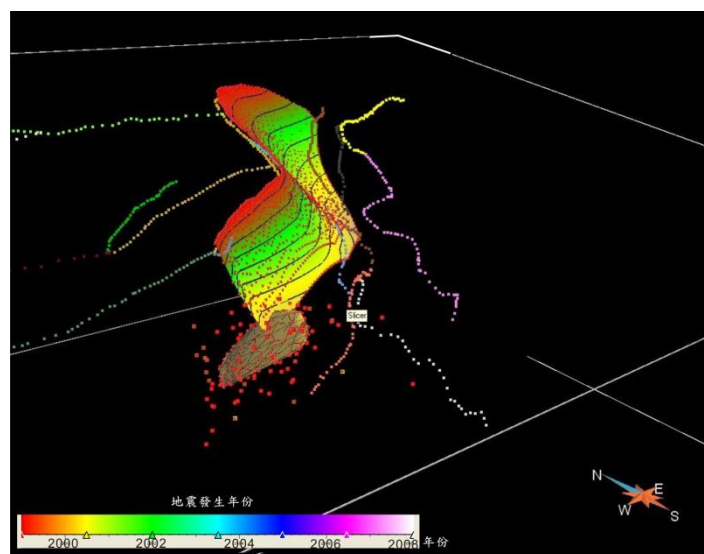


圖 4-25、最南邊的第一群地震(I)呈東北—西南走向的分布圖。

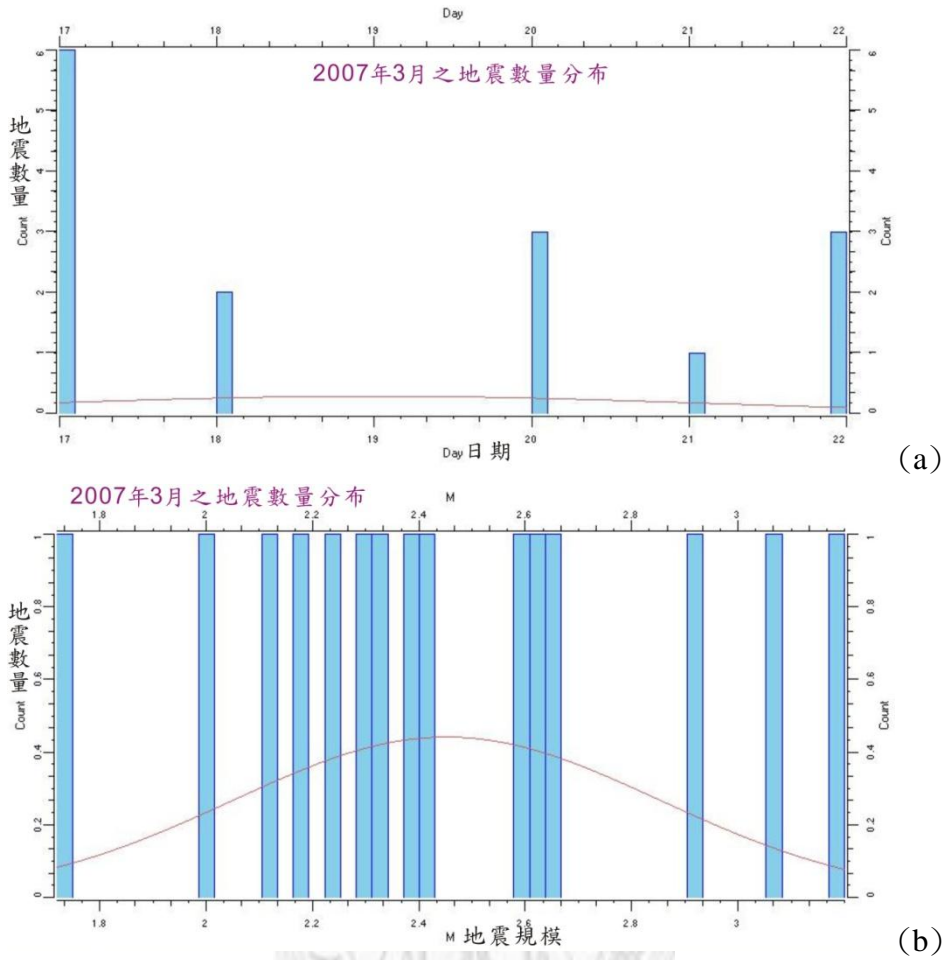


圖 4-26、2007 年 3 月地震時間和地震規模與地震數量分布。(a) 2007 年 3 月的地震集中於 17-22 日間發生；(b) 2007 年 3 月的地震規模介於 1-3 之間。

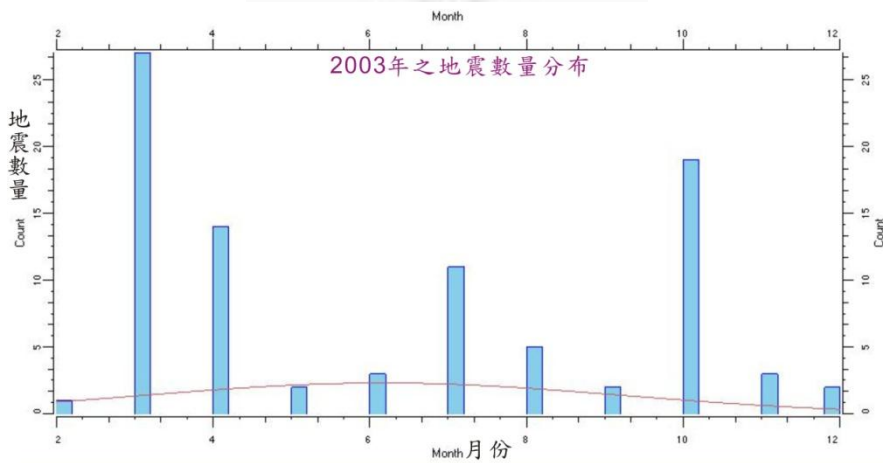


圖 4-27、2003 年地震數量於 3、4 和 10 月有高峰值。

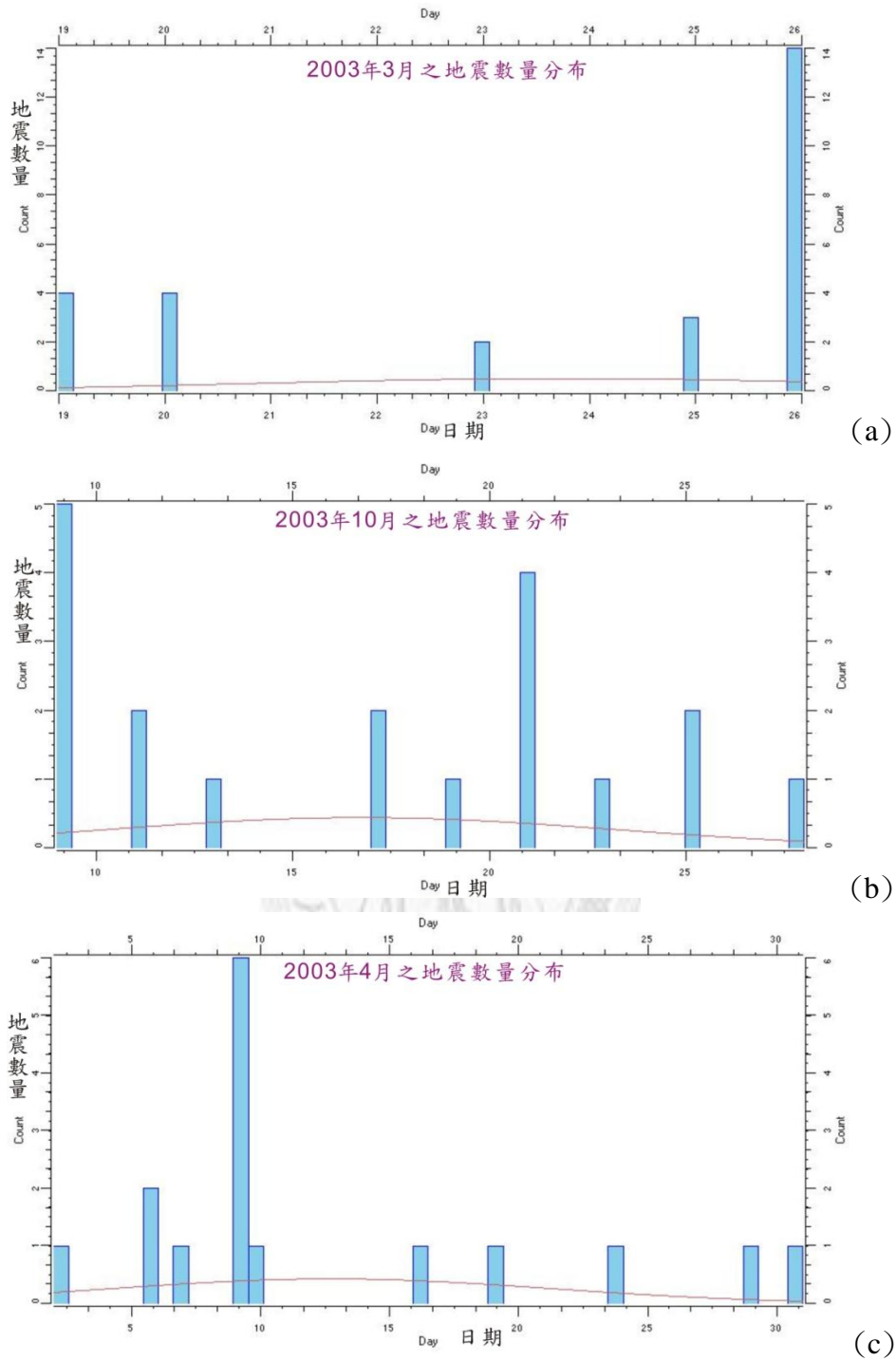


圖 4-28、2003 年 3、4 和 10 月地震數量與日期分布。(a) 3 月的地震數量集中於 19-26 日之間發生；(b) 10 月 9 日及 21 日有地震數量的峰值；(c) 4 月地震數量零星分布在整個月。

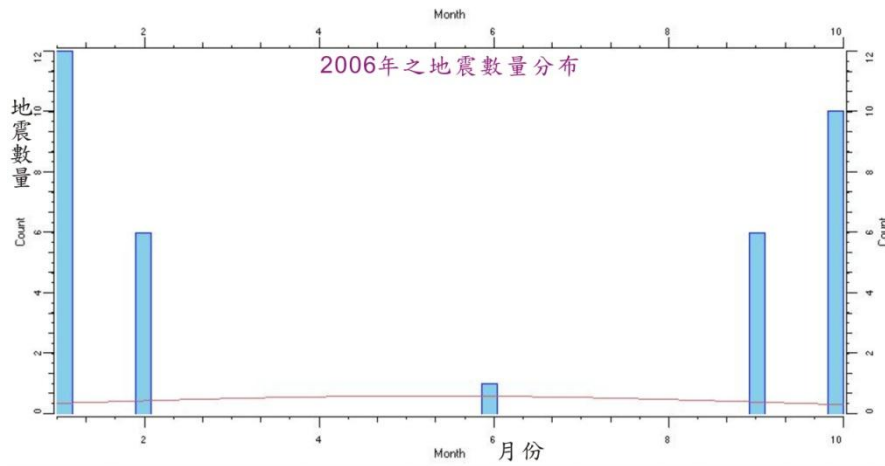
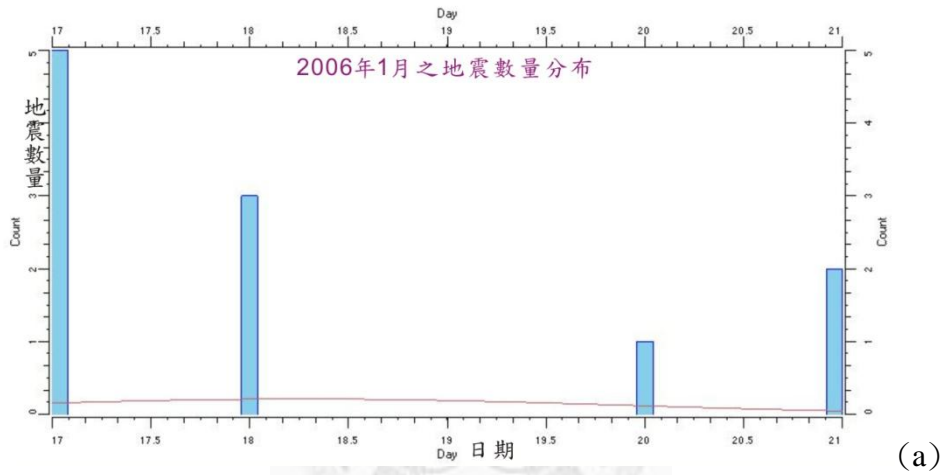
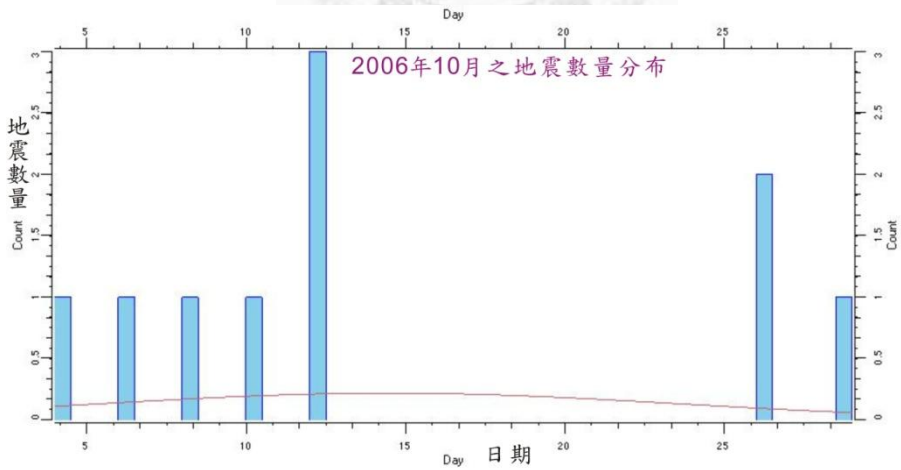


圖 4-29、2006 年地震數量與月份分布圖。



(a)



(b)

圖 4-30、2006 年 1 和 10 月地震數量與日期分布。(a) 2006 年 1 月的地震事件集中於 17-21 日發生；(b) 2006 年 10 月的地震事件集中於 4-12 日發生。

第五章 討論

5.1 新竹地區之地層層厚變化

本研究所建構之剖面顯示新竹地區的桂竹林層、河排層以及北寮層至木山層層序，有往東逐漸增厚的現象，前人研究指出台灣西北部中生代地層層頂之深度變從內陸的新竹地區往西到西北海域的台西盆地的趨勢為厚度逐漸變薄(Simoes and Avouac, 2006; Lin et al., 2003; 圖 5-1、圖 5-2、圖 5-3)，此現象與本研究觀察到的層厚往東變厚的趨勢相符。但軟橋斷層上盤的打鹿頁岩卻反而變薄而逐漸尖滅(圖 4-1)，可能反應打鹿頁岩沉積時小區域盆地地貌。

本研究剖面之構造溯源結果顯示，新竹斷層、新城斷層的深部、北埔斷層與軟橋斷層於中新世早期的打鹿頁岩至五指山層沉積時發生正斷層活動，而這些正斷層作用造成軟橋斷層以東的北寮層至木山層層序的增厚(圖 4-7)，說明沉積北寮層至木山層層序時軟橋斷層上盤的斷塊正在沉陷。Yang et al. (1996) 認為新竹斷層為早期的正斷層，後來重新活化成高角度逆斷層，故現在所見位移的垂直落差不大，震測亦顯示新城斷層深部存在許多高角度的正斷層(黃旭燦等, 2004; Yang et al., 2006)，這些正斷層的活動最淺甚至影響到上新世的桂竹林層，此現象可以用以說明因為區域性正斷層作用造成本研究建構之剖面中，北埔斷層上盤的上新世桂竹林層與中新世晚期河排層增厚的情形(圖 4-7)。Suppe (1984)認為新竹地區外海存在許多高角度的正斷層，斷層活動切穿東坑層至五指山層層序，於後期活化成逆斷層，這些斷層活動的發育可以延伸至內陸的新竹地區(圖 1-17、圖 1-18)，這部分與本研究觀察到中新世早期的正斷層作用相同，由以上結果可以推論出，新竹地區在中新世早期有發達的正斷層活動，上新世到更新世時的造山運動沿著這些斷層重新復活成高角度逆斷層。

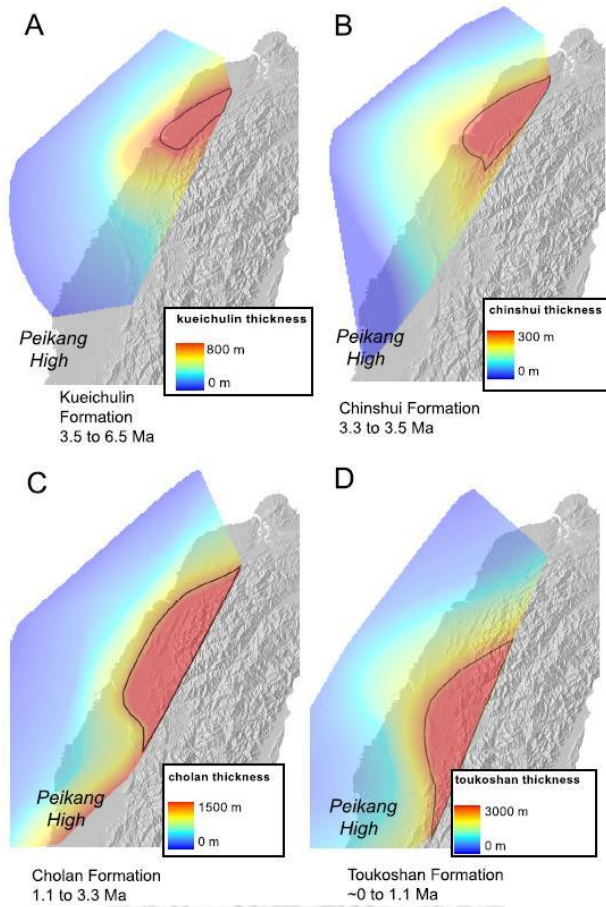


圖 5-1、台灣濁水溪以北桂竹林層(A)、錦水頁岩(B)、卓蘭層(C)及頭嵛山層(D)之地層層厚變化(摘自 Simoes and Avouac, 2006)。

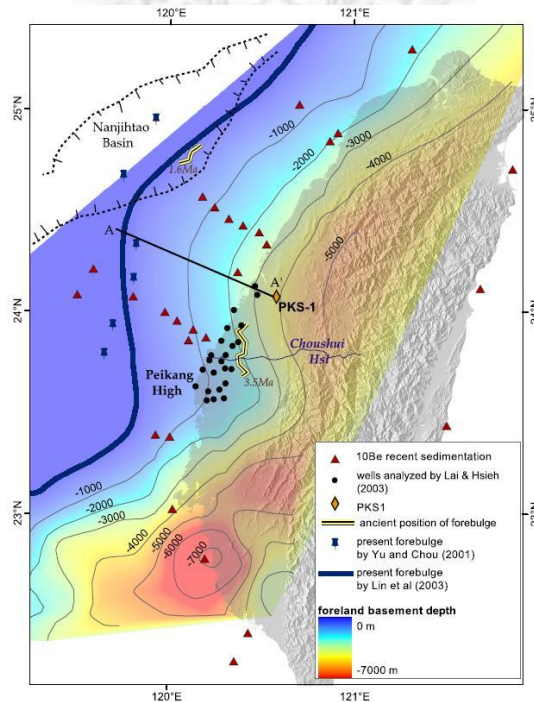


圖 5-2、台灣西部麓山帶及西部海域前陸盆地不整合面之深度變化圖(摘自 Simoes and Avouac, 2006)。

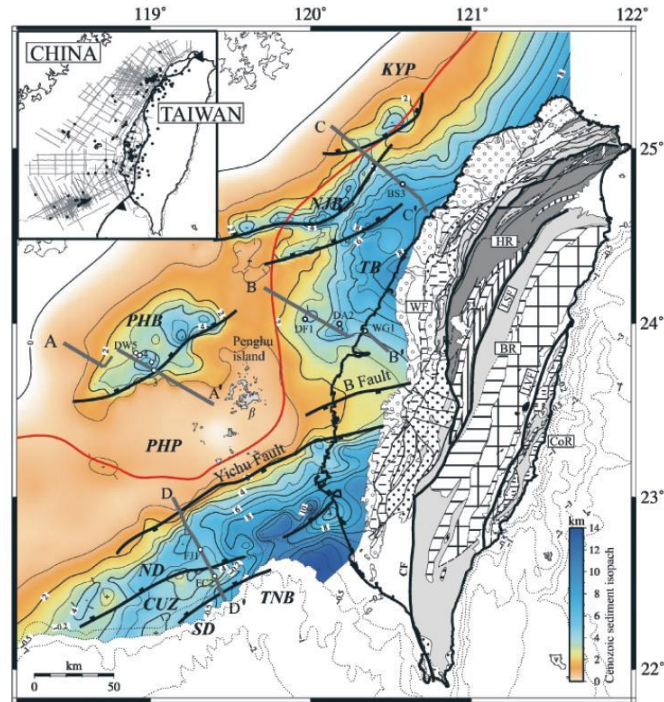


圖 5-3、台灣西部海域中生代地層層頂之深度變化分布圖，近竹苗地區海域的新生代地層厚度為八公里左右(摘自 Lin et al., 2003)。

5.2 新竹地區之構造縮短量

根據台中、苗栗及新竹地區地質溯源剖面的結果(表 5-1)，由南到北依序為：
 (1)台中盆地上、濁水溪以南的 Line 16 剖面(黃旭燦等，2004)，彰化斷層與車籠埔斷層共縮短 12.6 公里；(2)台中盆地上、員林一帶的 Line 13 剖面(黃旭燦等，2004)，彰化斷層與車籠埔斷層共縮短 19.75 公里；(3)苗栗三義、大安溪一帶的 Line 11 剖面(黃旭燦等，2004)，三義斷層、小南勢斷層與細道邦構造共縮短 19.75 公里；(4)苗栗三義、大安溪北邊的 Line 10 剖面(黃旭燦等，2004)，三義斷層與上盤之細道邦構造共縮短 19.75 公里；(5)新竹地區之青草湖附近的 Line 6 剖面(黃旭燦等，2004)，新城斷層、竹東斷層、北埔斷層與軟橋斷層總共縮短 8.4 公里。

以上縮短量結果顯示，本研究剖面 Line S 回復的結果與 Line 6 剖面相近，而南邊的苗栗和台中地區縮短量皆大於新竹地區，推測可能原因為，一、新竹地區存在許多中新世早期的正斷層活動，後期的逆衝斷層沿著這些高角度斷層復活，

故剖面回復的結果為最小之縮短量，二、本研究建構之剖面 Line S 與黃旭燦等(2004)之剖面 Line 6，皆斜交構造線走向(圖 4-8)，故剖面回復得到之縮短量為實際構造壓縮量的分量，亦低估了縮短量的大小。

就斷層長期滑移速率而言，新城斷層沿斷層面的錯移為 887 公尺，斷層近地表的傾角約 33 度(石同生等，2003)，根據剖面，假設斷層最早開始活動的時間為卓蘭層沉積結束後(2 Ma, Chen et al., 2004)，因此新城斷層長期滑移速率為 0.37 mm/yr，Chen et al. (2004)及石同生等(2003)分別推估新城斷層的近期滑移速率約 0.7 mm/yr 及 0.7 mm/yr ~ 1.6 mm/yr，而這些數據明顯高於本研究推算之結果，因此暗示新城斷層於近期活動速率有增加的趨勢。新竹斷層沿斷層面的錯移為 1318 公尺，新竹斷層向南傾斜約 50 度(Chiu 1970)，根據剖面，假設斷層最早開始活動的時間為卓蘭層沉積結束後(2 Ma, Chen et al., 2004)，因此新竹斷層長期滑移速率為 0.43 mm/yr，與 Chen et al. (2004)估算新竹斷層最小近期滑移速率的 0.45 m/ka 相仿，因此代表新竹斷層之滑移速率較為穩定。新竹斷層的錯移量大於新城斷層，暗示近期新竹斷層開始活動年代比新城斷層早。

就短期速度場討論，胡植慶等(2010)之 2003-2010 的連續 GPS 結果指示，新城斷層相對於澎湖白砂 S01R 站之速度場，跨過新城斷層兩側的速度介於 3.6 至 6.4 mm/yr (圖 1-25)；胡植慶等(2010)計算出跨過新城斷層兩側的平均應變率約 $-0.05 \mu\text{strain/yr}$ ，又根據 Kanamori and Brodsky (2004)研究指出由大地震引發的剪應變改變(同震應變降)大約是 $3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$ ，故將剪應變改變除以斷層的應變率，即為大地震發生的再現周期。本研究推測新城斷層的再現周期約為 600-6000 年，而陳文山等(2003)由槽溝之垂直位移量及階地定年結果，指出新城斷層的再現周期為 1000-1500 年，石同生等(2003)整合定年與野外資料推估斷層滑移速率約為 0.7 mm/yr ~ 1.6 mm/yr，由斷層一次活動的淨滑移量約為 3.2 公尺(李元希等, 2002)，粗估斷層再現週期約 2000 年左右，以上均與 GPS 之應變率結果吻合，暗示此間隔極可能為新城斷層之活動回歸周期。

表 5-1、台中、苗栗與新竹地區地質構造剖面回復結果(整合黃旭燦等, 2004)

剖面 編號	地區	縮短量 (km)	剖面水平縮短量	備註
Line 16	台中 盆地	12.60	彰化斷層0.7公里, 車籠埔斷層11.5 公里。	楊耿明等, 2003
Line 13	台中 盆地	19.75	彰化斷層7.2公里, 車籠埔斷層12.6 公里。	楊耿明等, 2003
Line 11	苗栗 三義	14.40	三義斷層上盤收縮量 14.4 公里	楊耿明等, 2003
Line 10	苗栗 三義	18.60	三義斷層及細道邦構造至少縮短 18.6公里。	楊耿明等, 2003
Line 6	新竹 北埔	8.40	新城斷層1.2公里, 竹東及北埔斷層 4.4公里, 軟橋斷層2.8公里。	楊耿明等, 2002
Line S	新竹 地區	9.52	新竹斷層 0.85 公里、新城斷層 0.38 公里、竹東斷層 0.17 公里、北埔斷 層 3.44 公里及軟橋斷層 4 公里。	本研究之 剖面

5.3 新竹地區構造演化史

台灣西部麓山帶的地質構造為覆瓦狀逆衝構造, 斷層的發育時序大致上由東向西, 即往前陸的方向發育, 本研究剖面跨越內外麓山帶, 剖面北起青草湖附近, 南至和平—內灣斷層系統附近為止, 沿線經過的地質構造由東向西包括和平斷層、鵝公髻斷層、軟橋斷層、北埔斷層、竹東斷層、新城斷層與新竹斷層, 除了軟橋斷層以西之構造為逆時序發育, 其餘為順時序發育, 以下說明僅就各斷層的上下盤之塊體分別討論; 由於軟橋斷層以東的內麓山帶無法確認斷層地下的幾何形貌, 故本章節僅討論軟橋斷層開始活動以來的構造。

首先是軟橋斷層的發育(圖 5-4 a), 軟橋斷層發育之前, 東側的和平斷層與鵝公髻斷層已發育, 並將早期中新世的地層逆衝上覆於河排層之上; 整體地層沉積時存在向東約 6 度的傾角, 軟橋斷層於早中新世為正斷層活動, 此時同時也有沉積作用, 故上盤的石底層以下層序隨著斷層一面活動而造成較厚的地層, 後期沿著正斷層復活往地表發育, 形成高角度逆斷層, 將河排層至五指山層層序之岩系

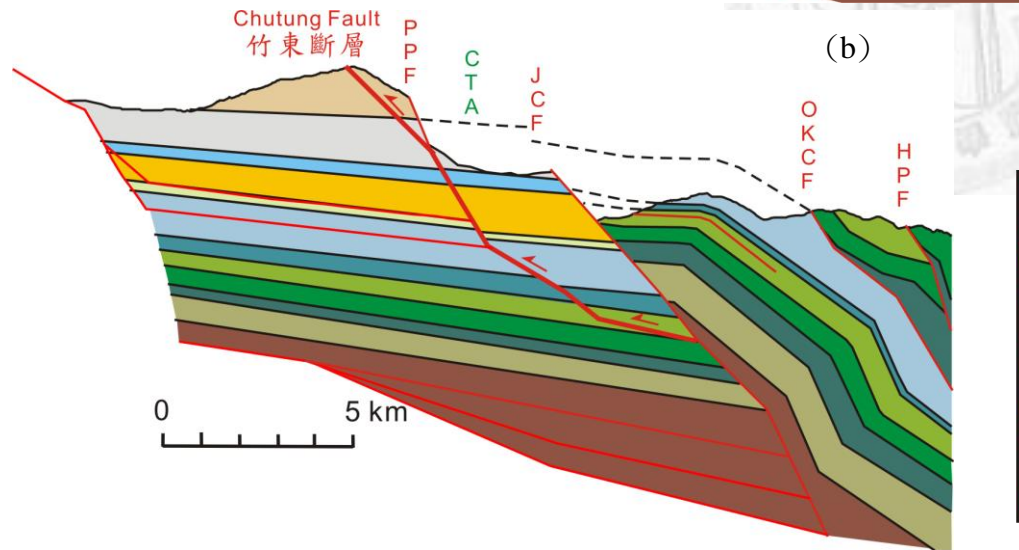
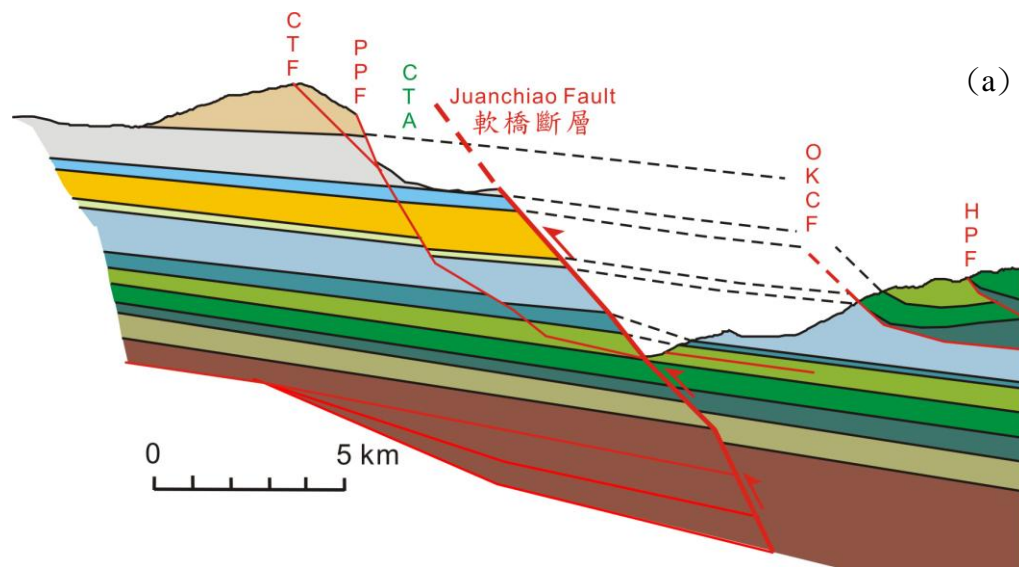
逆衝上來，故軟橋斷層的逆衝至少於河排層沉積結束後才開始活動。

軟橋斷層的下盤開始發育竹東斷層(圖 5-4 b)，竹東斷層沿北寮層底部滑移，再向上切穿打鹿頁岩，發育時上盤地層形成竹東背斜，竹東背斜為斷層彎曲褶皺中模型二之類型，背斜前翼出現倒轉地層，斷層發育至沉積河排層時有區域性及短時間的正斷層活動，造成河排層增厚，桂竹林層沉積時亦有同樣的情形，最後竹東斷層再沿高角度斷層面衝出地表；北埔斷層沿著竹東背斜前緣的軸部切穿卓蘭層與頭嵛山層至地表，故為軸面斷層(圖 5-4 c)。

新竹斷層於早中新世有正斷層作用(圖 5-4 d)，北埔斷層停止活動後，青草湖背斜拱起(圖 5-4 d)，之後再被新竹斷層切穿(圖 5-4 e)，故新竹斷層上下盤有相似之背斜形貌；後期造山運動沿著新竹斷層早期之正斷層復活成高角度逆衝斷層，向上衝出地表，新竹斷層發育時使青草湖背斜形成剪切斷層彎曲褶皺的形貌。

新竹斷層上盤開始發育新城斷層(圖 5-4 f)，新城斷層於早中新世存在正斷層作用，造成打鹿頁岩以下層序的錯移，後期造山運動時這些高角度斷層被低角度逆斷層截切(Yang et al., 1996)，並反轉成逆斷層的形式，同時淺部也沿著河排層間及桂竹林層底部發育兩逆衝斷層，上盤地層並同時拱起寶山背斜。寶山背斜形成時，位於基底滑移面上部之東傾高角度斷層受到背斜東翼順時針旋轉之作用造成斷層傾角之增加。新城斷層在南段沿著河排層與桂竹林層底部滑移，往北漸變為沿著錦水頁岩底部滑移，則是由於寶山背斜軸向東北傾沒，因此背斜北段出露之地層構造深度較淺所致(圖 1-9 至圖 1-11)。

演化的後期，斷層沿著基底滑脫面滑動(圖 5-4 g)，並在軟橋斷層深部拱起疊置構造，此背斜改變竹東背斜附近的構造，最後形成現今的地質構造形貌(圖 5-4 h)。新竹地區由西而東的基底滑脫面深度由 7 公里漸變為 12 公里左右(圖 5-4 h)，三維空間之地震分布顯示新竹地區的基底滑脫面約位於 6-7 公里(Chou et al., 2009)，與本研究剖面相符合。



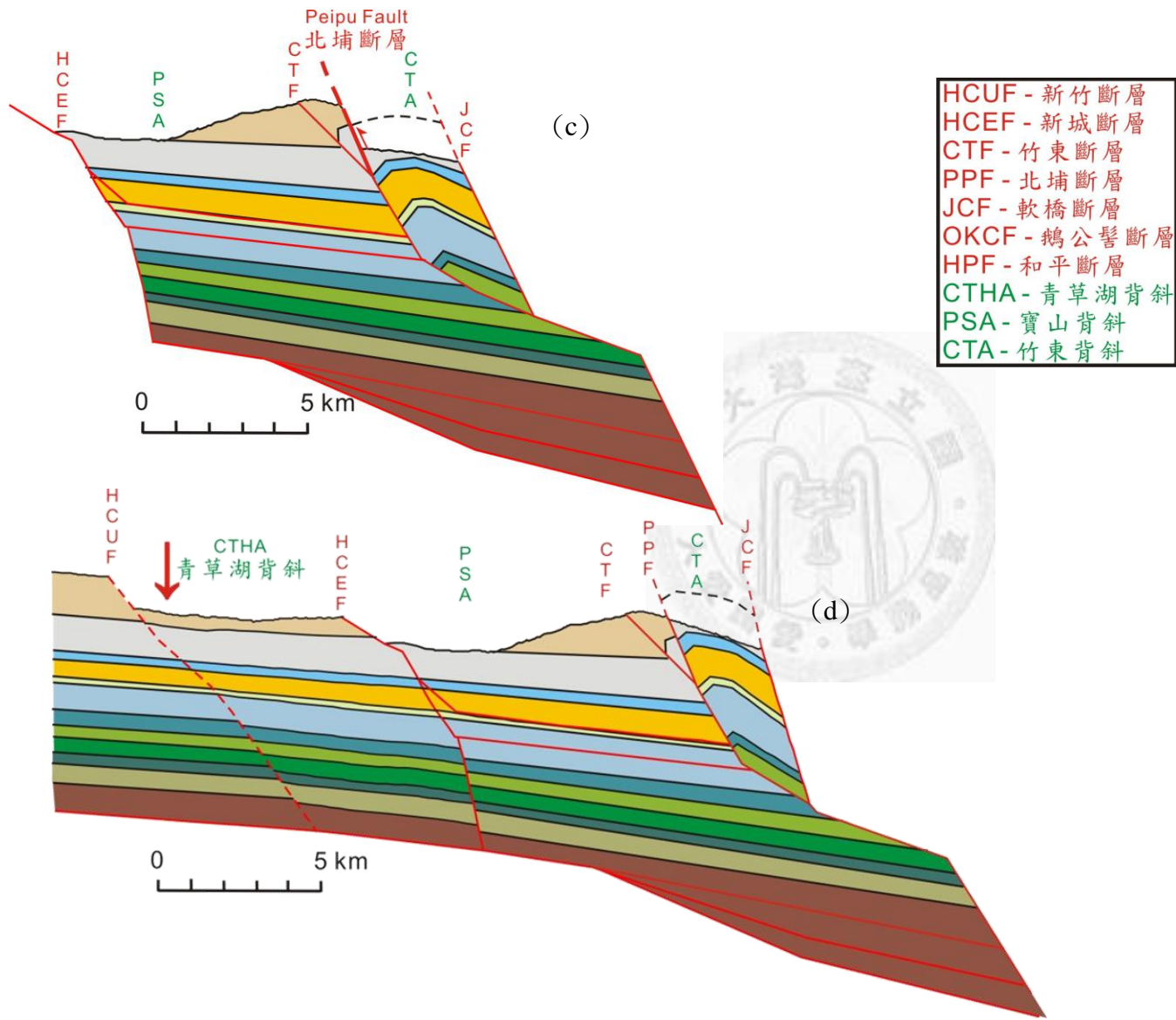
更新世	現代沖積層 (Qa)
Pleistocene	頭嵙山層 (Tks) / Toukoshan Fm.
	卓蘭層 (Cl) / Cholan Fm.
	錦水頁岩 (Cs) / Chinshui Sh.
上新世	桂竹林層 (Kc) / Kuichulin Fm.
	上福基砂岩 (Sf) / Shangfuchi Ss.
中新世	南莊層 (Nanchuang Fm.)
	河排層 (Hp) / Hopai Fm.
	打鹿頁岩 (Tlu) / Talu Sh.
	北寮層 (Pl) / Peiliao Fm.
早中新世	石底層 (St) / Shidi Fm.
	大寮層 (Tl) / Taliang Fm.
漸新世	木山層 (Ms) / Mushan Fm.
	五指山層 (Ws) & Pre-Ws / Wuchishan Fm.

HCUF - 新竹斷層
HCEF - 新城斷層
CTF - 竹東斷層
PPF - 北埔斷層
JCF - 軟橋斷層
OKCF - 鵝公髻斷層
HPF - 和平斷層
CTHA - 青草湖背斜
PSA - 寶山背斜
CTA - 竹東背斜

圖 5-4、本研究建構剖面之構造演化歷史圖。

剖面為一比一的比例，黑色虛線為原始地層，紅色虛線為早期之斷層軌跡，以下分別就各塊體討論。

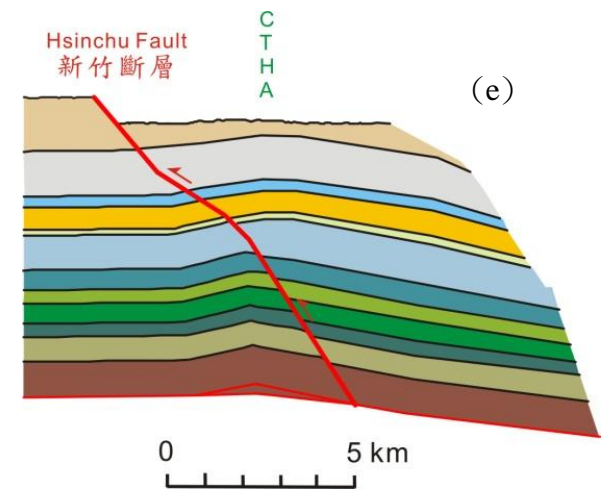
- (a) 軟橋斷層 (JCF) 發育；
- (b) 竹東斷層 (CTF) 發育；
- (c) 北埔斷層 (PPF) 發育；
- (d) 青草湖背斜 (CTHA) 發育；
- (e) 新竹斷層 (HCUF) 發育；
- (f) 新城斷層 (HCEF) 與寶山背斜 (PSA) 發育；
- (g) 基底滑脫面上疊置構造發育；
- (h) 現今之地質構造。



- HCUF - 新竹斷層
- HCEF - 新城斷層
- CTF - 竹東斷層
- PPF - 北埔斷層
- JCF - 軟橋斷層
- OKCF - 鵝公髻斷層
- HPF - 和平斷層
- CTHA - 青草湖背斜
- PSA - 寶山背斜
- CTA - 竹東背斜

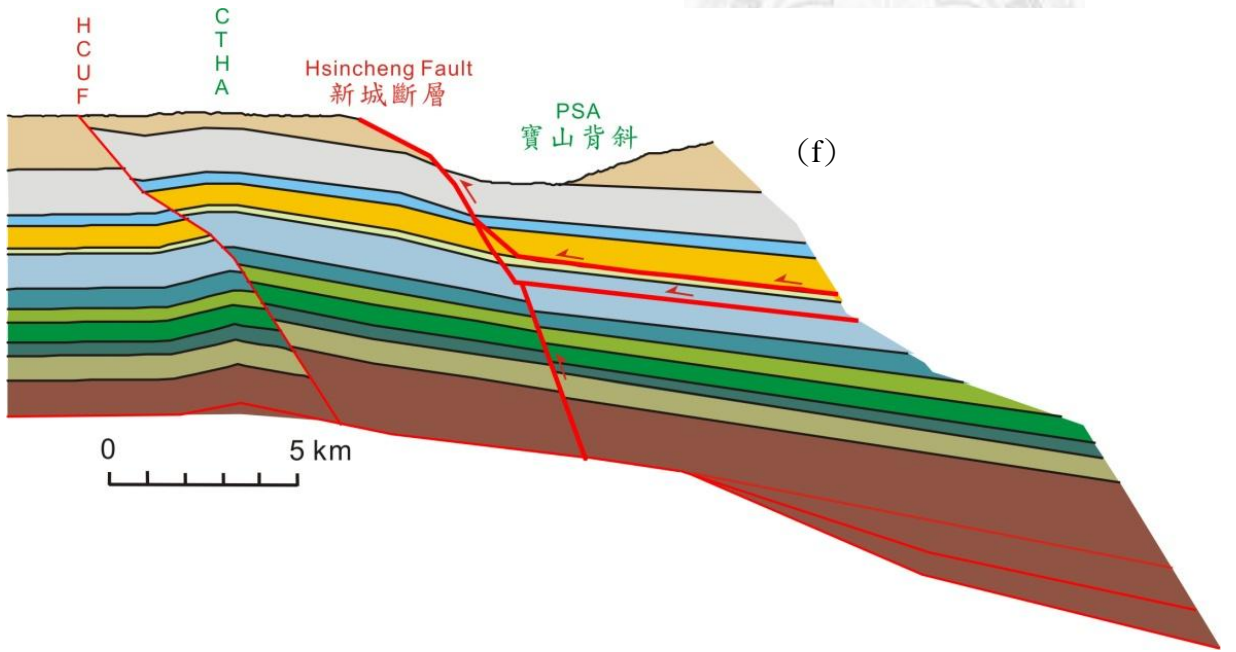
更新世	現代沖積層	Qa
	頭嵙山層(Tks)	Toukoshan Fm.
上新世	卓蘭層(CI)	Cholan Fm.
	錦水頁岩(Cs)	Chinshui Sh.
	桂竹林層(Kc)	Kuichulin Fm.
中新世	南莊層	上福基砂岩(Sf) Shangfuchi Ss.
		河排層(Hp) Hopai Fm.
	南港層	打鹿頁岩(Tlu) Talu Sh.
		北寮層(PI) Peiliao Fm.
		石底層(St) Shihtsi Fm.
	早中新世	大寮層(TI) Taliao Fm.
		木山層(Ms) Mushan Fm.
漸新世	五指山層(Ws) & Pre-Ws	Wuchishan Fm.

圖 5-4 續。



(e)

- HCUF - 新竹斷層
- HCEF - 新城斷層
- CTF - 竹東斷層
- PPF - 北埔斷層
- JCF - 軟橋斷層
- OKCF - 鵝公髻斷層
- HPF - 和平斷層
- CTHA - 青草湖背斜
- PSA - 寶山背斜
- CTA - 竹東背斜

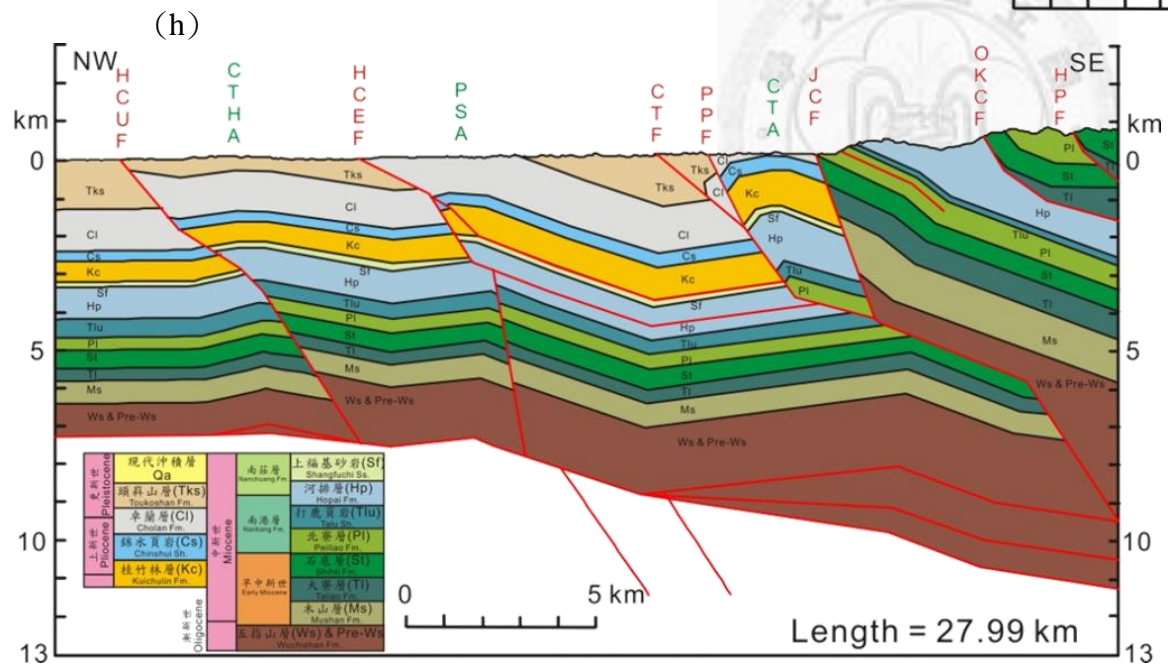
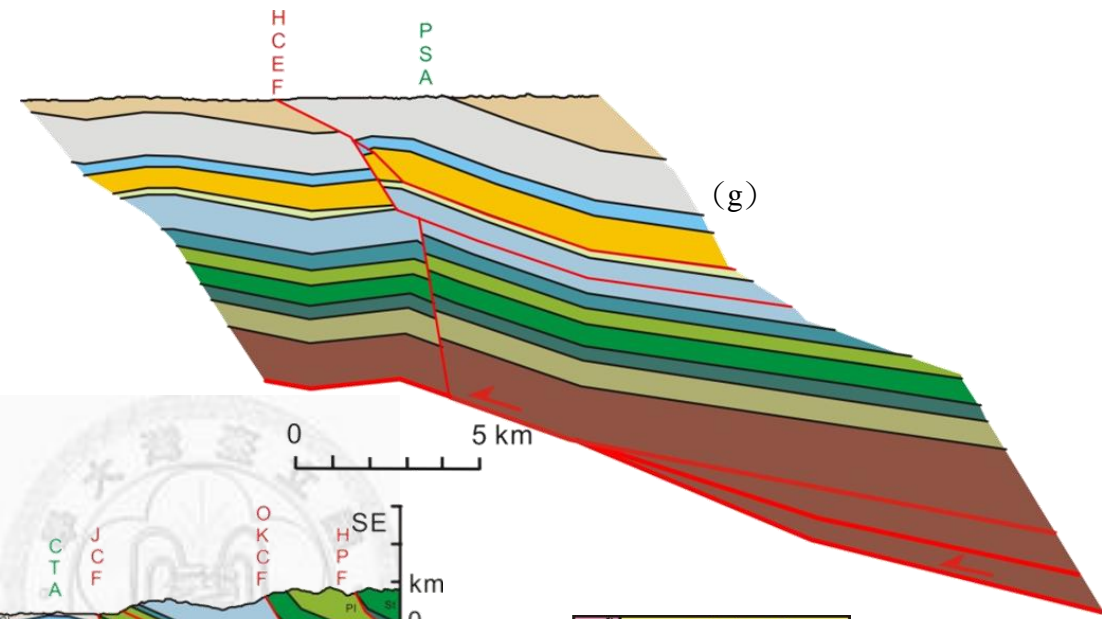


(f)

更新世	現代沖積層	Qa
	頭嵙山層(Tks)	Toukoshan Fm.
上新世	卓蘭層(CI)	Cholan Fm.
	錦水頁岩(Cs)	Chinshui Sh.
中新世	桂竹林層(Kc)	Kuichulin Fm.
	南莊層	上福基砂岩(Sf)
	Nanchuang Fm.	Shangfuchi Ss.
		河排層(Hp)
		Hopai Fm.
	南港層	打鹿頁岩(Tlu)
	Nankang Fm.	Talu Sh.
		北寮層(PI)
		Peilliao Fm.
		石底層(St)
	Shihtl Fm.	
早中新世	大寮層(TI)	Taliao Fm.
	木山層(Ms)	Mushan Fm.
漸新世	五指山層(Ws) & Pre-Ws	Wuchishan Fm.

圖 5-4 續。

- HCUF - 新竹斷層
- HCEF - 新城斷層
- CTF - 竹東斷層
- PPF - 北埔斷層
- JCF - 軟橋斷層
- OKCF - 鵝公髻斷層
- HPF - 和平斷層
- CTHA - 青草湖背斜
- PSA - 寶山背斜
- CTA - 竹東背斜



更新世 Pleistocene	現代沖積層 Qa	現代沖積層 Qa
	頭嵛山層(Tks) Toukoshan Fm.	頭嵛山層(Tks) Toukoshan Fm.
	卓蘭層(CI) Cholan Fm.	卓蘭層(CI) Cholan Fm.
上新世 Pliocene	錦水頁岩(Cs) Chinshui Sh.	錦水頁岩(Cs) Chinshui Sh.
	桂竹林層(Kc) Kuichulin Fm.	桂竹林層(Kc) Kuichulin Fm.
中新世 Miocene	南莊層 Nanchuang Fm.	上福基砂岩(Sf) Shangfuchi Ss.
	南港層 Nankang Fm.	河排層(Hp) Hopai Fm.
		打鹿頁岩(Tlu) Talu Sh.
		北寮層(Pl) Peiliao Fm.
		石底層(St) Shidi Fm.
		大寮層(Tl) Taliao Fm.
早中新世 Early Miocene		木山層(Ms) Mushan Fm.
		五指山層(Ws) & Pre-Ws Wuchishan Fm.
漸新世 Oligocene		

圖 5-4 續。

5.4 軟橋斷層深部之地震群

本研究發現，軟橋斷層的深部有四個時間區間的地震分布(圖 4-23)，由南到北分別為地震群 I(1999 年)、地震群 II(2007 年)、地震群 III(2003 年) 及地震群 IV(2006 年)，除了地震群 II 之外，地震事件發生的時間由南往北的順序，唯地震事件的規模都不大，地震規模僅在 1-3 不等的範圍內。

綜合以上討論，1999 年、2007 年、2003 年及 2006 年由南到北依序引發地震，其中 1999 年的地震群發生時間為九二一集集地震後密集的 7 個月內，故本研究認為此群地震與集集地震有關；這四群地震發生在比較深部且呈現高角度形貌，所以表示軟橋斷層於深部存在高角度的斷坡。



第六章 結論

本研究透過地質構造剖面的重建與回復、三維斷層模型建構以及地震活動於二維及三維空間的分布，不僅了解新竹地區現今構造演育的歷史及斷層活動性，也建構出複雜的三維地下構造，以及地震活動與現今構造之分布關係，針對新竹地區的研究，我們得到以下結論：

1. 依據剖面重建結果，新竹地區的主要構造中，新竹斷層為高角度逆斷層，斷層的發育導致上盤青草湖背斜形成剪切斷層彎曲褶皺的形貌，新城斷層為沿著桂竹林層底部及河排層間發育的層面斷層，而軟橋斷層為階梯式發育的斷層。新竹地區於中新世早期發達的正斷層活動，導致軟橋斷層上盤的地層增厚，上新世到更新世時的造山運動沿著這些斷層重新復活成高角度逆斷層。新竹地區整體的地層往東增厚，打鹿頁岩卻往東尖滅消失。
2. 剖面回復結果顯示，新竹斷層與新城斷層造成沿斷層的錯移分別為 1318 公尺及 887 公尺，得到斷層長期滑移速率分別為 0.43 mm/yr 及 0.37 mm/yr，故可以推得新竹斷層的發育早於新城斷層，新城斷層近期滑移速率比長期滑移速率大，代表新城斷層近期較為活躍。跨過新城斷層的平均應變率約 $-0.05 \mu \text{ strain/yr}$ ，與剪應力計算後，本研究認為新城斷層的再現周期約為 600-6000 年。
3. 在構造演育歷史方面，新竹地區首先發育內麓山帶之斷層與軟橋斷層，接著先後發育出竹東斷層及北埔斷層，同時也拱起竹東背斜，青草湖背斜於前緣地區拱起，而後新竹斷層切穿青草湖背斜衝出地表，接著，新城斷層沿著新竹斷層上盤的桂竹林層底部及河排層間發育，並切穿早期的正斷層，最後，疊置構造沿著軟橋斷層深部發育，並拱起深部之背斜，因此，竹東斷層、北埔斷層、新竹斷層和新城斷層為逆時序發育，新城斷層為新竹地區近期之活動構造。
4. 三維斷層模型的重建，新竹地區主要構造地下形貌，以軟橋斷層為界，內麓山帶的斷層至深部變緩，並呈現近乎平行之形貌，外麓山帶的斷層往深部則變陡峭，竹東斷層與北埔斷層匯聚於深部 2-3 公里處，新城斷層與北埔斷層則匯聚

於 4-5 公里深處，而軟橋斷層近地表為高角度斷層，深部轉為階梯式之形貌。

新竹地區基底滑脫面的深度，由西而東從 6-7 公里漸變為 10 公里。

5. 綜合地質構造與地震活動分布特性分析，以軟橋斷層為界，新竹地區內麓山帶的地震明顯多於外麓山帶，軟橋斷層深部的轉折處有團狀地震群分布，為應力累積之處，鵝公髻斷層與和平斷層深部亦存在團狀地震，最深的深度約 10-13 公里；整體而言新竹地區的地震活動分布，最深僅到 10-14 公里左右，指示此深度為基底滑脫面的深度。
6. 軟橋斷層深部存在四群空間上與時間上相近的地震群，1999 年、2007 年、2003 年及 2006 年由南到北依序發生，其中，1999 年的地震群發生在九二一集集地震後七個月內的時間，因此，本研究認為此群地震與集集地震有關。



參考文獻

中文部分：

地質圖

- 何春蓀，1986，臺灣地質概論，臺灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，共 163 頁。
- 中國石油公司，1978，桃園—新竹地質圖 (1:100,000)，中國石油公司台灣油礦探勘總處出版。
- 中國石油公司，1994，苗栗地質圖 (1:100,000)，中國石油公司台灣油礦探勘總處出版。
- 何信昌，1994，臺灣地質圖及說明書，苗栗圖幅(1:50,000)，經濟部中央地質調查所。
- 塗明寬、陳文政，1990，臺灣地質圖及說明書，中壢圖幅(1:50,000)，經濟部中央地質調查所，共 53 頁。
- 塗明寬、陳文政，1991，臺灣地質圖及說明書，竹東圖幅(1:50,000)，經濟部中央地質調查所。
- 劉桓吉，1989，臺灣地質圖及說明書，新竹圖幅(1:50,000)，經濟部中央地質調查所。

碩博士論文

- 江婉綺，2005，竹苗地區地質構造之砂盒物理模型研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 104 頁。
- 林書帆，2007，竹東重力低區成因之探討，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 92 頁。
- 黃姝琳，2009，台灣南部嘉義地區麓山帶構造型態轉換之研究，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 101 頁。
- 黃鐘，2007，台中盆地北側斷層構造與同震地表變形研究，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 106 頁。
- 劉力豪，2004，竹東丘陵的活動斷層古地震及相關活動性研究，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 90 頁。

期刊、專書及報告

- 王佳彬、楊耿明，2004，構造平橫剖面分析在石油探勘的應用，石油季刊，第 40 卷，第 3 期，1-11 頁。
- 王乾盈、楊榮堃、蔡道賜，1991，爆竹震源淺層反射震測探測新城斷層，第 3 屆

- 台灣地區地球物理研討會論文集，382-395 頁。
- 石同生、盧詩丁、林偉雄、李元希，2003，新城斷層定位與斷層活動性研究，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，37-52 頁。
- 石瑞銓、王維豪、李元希，2009，地震地質與地變動潛勢分析，斷層帶地下構造調查研究(3/4)，經濟部中央地質調查所報告，共 184 頁。
- 石瑞銓、陳文山、林啟文，2003，新竹東方新城斷層之 P 波與 SH 波淺層震測調查，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，1-9 頁。
- 何春蓀，1986，台灣地質概論第二版-台灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所出版，共 164 頁。
- 李元希、石同生、盧詩丁、林燕慧、林偉雄，2002，新城斷層與新竹斷層活動性研究，「台灣之第四紀」第九次研討會論文集，12-15 頁。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，台灣活動斷層概論—五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版，經濟部中央地質調查所特刊，第十三號，共 122 頁。
- 林啟文、陳致言、石瑞銓，2003，臺灣北部斗煥坪斷層與大平地斷層的野外觀察，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，53-65 頁。
- 林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧，2007，台灣北部的活動斷層：兩萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第十九號，共 130 頁。
- 林啟文、鍾瑋、侯進雄，2005，臺灣北部新城斷層與新竹斷層的一些構造特性，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，49-60 頁。
- 胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞、張午龍、陳卉瑄、鄭錦桐，2010，斷層活動性觀測研究第二階段，斷層監測與潛勢分析研究(2/4)，經濟部中央地質調查所報告，共 253 頁。
- 莊恭周、張渝龍、周定芳、陳若玲、陳彥宏、許輝文、張政欣、余政國，2011，番婆坑構造之裂縫儲集層研究計畫，經濟部石油基金獎勵石油開發技術研究發展期末報告，共 157 頁。
- 陳文山、陳于高、石瑞銓、胡植慶、詹瑜璋、李建成、洪淑蕙，1992，新竹科學園區活動斷層地震地質學研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共 93 頁。
- 陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生，2003，新城斷層的古地震研究，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，11-23 頁。
- 陳建良、林啟文、侯進雄，2008，台灣西北部桃竹苗地區地殼變形初步研究，經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，223-251 頁。
- 黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏，2004，斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)—台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析，經濟部中央地質調查所

報告，共 72 頁。

楊貴三、蔡怡真，2003，台灣北部新竹與新城斷層之地形學研究，經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，25-35 頁。

楊潔豪、郭泰融，1991，新城斷層之地球物理研究，第 3 屆台灣地區地球物理研討會論文集，337-352 頁。

盧詩丁、石同生、林啟文、黃文正、陳華玟、陳致言、張徽正，2000，台灣北部新竹地區活動斷層調查，中國地質學會 89 年年會論文集，308-310 頁。

饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文，2006，地震地質調查與活動斷層資料庫建置計畫，活動斷層監測系統計畫(5/5)，經濟部中央地質調查所報告，共 256 頁。

饒瑞鈞、李元希、胡植慶，2010，地震地質與地變動潛勢分析，地變動監測分析(4/4)，經濟部中央地質調查所報告，共 414 頁。

英文部分：

書籍

Bucher, W. H. (1933), *The Deformation of the Earth's Crust: An Inductive Approach to the Problems of Diastrophism*, 518 pp., Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.

Shaw, J. H., Connors, C., and Suppe, J. (2005), *Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds*, 156 pp., AAPG, Tulsa, Oklahoma.

Suppe, J. (1985), *Principle of Structural Geology*, 537 pp., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

期刊

Angelier, J., Lee, J. C., Chu, H. T., Hu, J. C., Lu, C. Y., Chan, Y. C., Lin, T. J., Font, Y., and Deffontaines, B. (2001), Le séisme de Chichi (1999) et sa place dans l'orogène de Taiwan, *C. R. Acad. Sci. Paris, Earth Planet. Sci.*, 333, 5-21.

Barr, T. D., and Dahlen, F. A. (1990), Constraints on friction and stress in the Taiwan fold-and-thrust belt from heat flow and geochronology, *Geology*, 18, 111-115.

Carena, S., Suppe, J., and Kao, H. (2002), Active detachment of Taiwan illuminated by small earthquakes and its control of first-order topography, *Geology*, 30(10), 935-938.

Chamberlin, R. T. (1910), The Appalachian folds of central Pennsylvania, *J. Geol.*, 18(3), 228-251.

Chamberlin, R. T. (1919), The building of the Colorado Rockies, *J. Geol.*, 27(4), 225-251.

- Chan, Y. C., Chen, Y. G., Shih, T. Y., and Huang, C. (2007), Characterizing the Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: Detailed geomorphic features and their structural implications, *J. Asian Earth Sci.*, 31(3), 303-316.
- Chapple, W. M. (1978), Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 89, 1189-1198.
- Chen, J. S. (1974), Seismic study of the Paoshan structure, Hsinchu, Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(11), 183-195.
- Chester, J. S., and Chester, F. M. (1990), Fault-propagation folds above thrusts with constant dip, *J. Struct. Geol.*, 12(7), 903-910.
- Chiu, H. T. (1970), Structural features of the area between Hsinchu and Taoyuan, northern Taiwan, *Proc. Geol. Soc. China*, 13, 63-75.
- Chou, C. Y., Suppe, J., Carena, S., and Huang, S. T. (2009), Advances in 3D imaging of the geometry of the Chi-Chi earthquake thrust system in western Taiwan, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T33B-1896.
- Dahlen, F. A. (1990), Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 18, 55-99.
- Dahlstrom, C. D. A. (1969), Balanced cross sections, *Can. J. Earth Sci.*, 6, 743-757.
- Davis, D., Suppe, J., and Dahlen, F. A. (1983), Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *J. Geophys. Res.*, 88, 1153-1172.
- Dolan, J. F., Christofferson, S. A., and Shaw, J. H. (2003), Recognition of paleoearthquakes on the Puente Hill Blind thrust fault, *California Sci.*, 300, 115-118.
- Fischer, M. P., Woodward, N. B., and Mitchell, M. M. (1992), The kinematics of break-thrust folds, *J. Struct. Geol.*, 14(4), 451-460.
- Homza, T. X., and Wallace, W. K. (1995), Geometric and kinematic models for detachment folds with fixed and variable detachment depths, *J. Struct. Geol.*, 17(4), 575-588.
- Hossack, J. R. (1979), Use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction - review, *J. Geol. Soc.*, 136, 705-711.
- Huang, S. T., Chen, R. C., and Chi, W. R. (1993), Inversion tectonics and evolution of the northern Taihsi basin, Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(28), 15-46.
- Hung, J. H., and Wiltschko, D. V. (1993), Structure and kinematic of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan,

Petrol. Geol. Taiwan(28), 59-96.

- Kanamori, H., and Brodsky, E. (2004), The physics of earthquakes, *Rep. Prog. Phys.*, 67, 1429-1496.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., Chu, H. T., and Lee, J. C. (2003), Frontal belt curvature and oblique ramp development at an obliquely collided irregular margin: Geometry and kinematics of the NW Taiwan fold-thrust belt, *Tectonics*, 22(3).
- Lee, C. I., Chang, Y. L., and Coward, M. P. (2002), Inversion tectonics of the fold-and thrust belt, western Taiwan, *Geol. Soc. Am. Spec. paper*, 358, 13-30.
- Lee, J. C., Chu, H. T., Angelier, J., Chan, Y. C., Hu, J. C., Lu, C. Y., and Rau, R. J. (2002), Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: Influence from inherited fold belt structures, *J. Struct. Geol.*, 24(1), 173-192.
- Lin, A. T., Watts, A. B., and Hesselbo, S. P. (2003), Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region, *Basin Res.*, 15, 453-478.
- Liu, C. H., and Pan, Y. S. (1984), Seismic stratigraphic study on the Tertiary sequence in the Hsinchu basin, Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(20), 97-112.
- Malavieille, J., and Trullenque, G. (2009), Consequences of continental subduction on forearc basin and accretionary wedge deformation in SE Taiwan: Insights from analogue modeling, *Tectonophysics*, 466(3-4), 377-394.
- Marrett, R., and Bentham, P. A. (1997), Geometric analysis of hybrid fault-propagation/detachment folds, *J. Struct. Geol.*, 19(3-4), 243-248.
- Medwedeff, D. A., and Suppe, J. (1997), Multibend fault-bend folding, *J. Struct. Geol.*, 19(3-4), 279-292.
- Mercier, E., Outtani, F., and De Lamotte, D. F. (1997), Late-stage evolution of fault-propagation folds: Principles and example, *J. Struct. Geol.*, 19(2), 185-193.
- Mitra, S. (1990), Fault-propagation folds: Geometry, kinematic evolution and hydrocarbon traps, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 74(6), 921-945.
- Mitra, S. (2002), Structural models of faulted detachment folds, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 86(9), 1673-1694.
- Namson, J. (1981), Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (I) southern part, *Petrol. Geol. Taiwan*(18), 31-51.
- Namson, J. (1983), Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu

- area, Taiwan: (II) central part, *Petrol. Geol. Taiwan*(19), 51-76.
- Namson, J. (1984), Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan: (III) northern part, *Petrol. Geol. Taiwan*(20), 35-52.
- Shaw, J. H., Hook, S. C., and Suppe, J. (1994), Structural trend analysis by axial surface mapping, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 78(5), 700-721.
- Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y.-G., and Liu, C.-S. (2005), Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 110(B8), B08402.
- Suppe, J. (1980), A retrodeformable cross section of northern Taiwan, *Proc. Geol. Soc. China*, 23, 46-55.
- Suppe, J. (1981), Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan, *Mem. Geol. Soc. China*, 4, 67-89.
- Suppe, J. (1983), Geometry and kinematics of fault-bend folding, *Am. J. Sci.*, 283(7), 684-721.
- Suppe, J. (1984), Seismic interpretation of the compressively reactivated normal fault near Hsinchu, western Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(20), 85-96.
- Suppe, J., and Chang, Y. L. (1983), Kink method applied to structural interpretation of seismic sections, western Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(19), 29-49.
- Suppe, J., and Medwedeff, D. A. (1990), Geometry and kinematics of fault-propagation folding, *Eclogae Geol. Helv.*, 83, 409-454.
- Suppe, J., Connors, C. D., and Zhang, Y. (2004), Shear fault-bend folding, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, 82, 303-323.
- Suppe, J., Sabat, F., Munoz, J. A., Poblet, J., Roca, E., and Verges, J. (1997), Bed-by-bed fold growth by kink-band migration: Sant Llorenç de Morunys, eastern Pyrenees, *J. Struct. Geol.*, 19(3-4), 443-461.
- Tang, C. H. (1968), Photogeological observations on the low hilly terrain and coastal plain area of Hsinchu, Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(6), 71-79.
- Tang, C. H., and Hsu, C. H. (1970), Subsurface geology and petroleum deposits in the Hsinchu area, *Petrol. Geol. Taiwan*(7), 89-101.
- Teng, L. S. (1990), Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, *Tectonophysics*, 183(1-4), 57-76.
- Wu, Y. M., Chang, C. H., Zhao, L., Shyu, J. B. H., Chen, Y. G., Sieh, K., and Avouac, J. P. (2007), Seismic tomography of Taiwan: Improved constraints from a dense network of strong motion stations, *J. Geophys. Res.*, 112, B08312.

- Yang, K. M., Ting, H. H., Wu, J. C., and Chi, W. R. (1997), Geology model for complex structures and its implications for hydrocarbon exploration in northwestern Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(31), 1-42.
- Yang, K. M., Huang, S. T., Wu, J. C., Ting, H. H., and Mei, W. W. (2006), Review and new insights on foreland tectonics in western Taiwan, *Int. Geol. Rev.*, 48(10), 910-941.
- Yang, K. M., Wu, J. C., Ting, H. H., Wang, J. B., Chi, W. R., and Kuo, C. L. (1994), Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation, *Petrol. Geol. Taiwan*(29), 47-74.
- Yang, K. M., Wu, J. C., Wickham, J. S., Ting, H. H., Wang, J. B., and Chi, W. R. (1996), Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural mode and evolution in foothills belt, northwestern Taiwan, *Petrol. Geol. Taiwan*(30), 111-150.
- Yu, C. Y., Yang, C. H., Yang, K. M., Cheng, R. C., and Huang, S. T. (2009), A study of complex substructures in a foothill belt of northwestern Taiwan using two-dimensional gravity multiple-source model inversion, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20(6), 791-798.
- Yu, S. B., Chen, H. Y., and Kuo, L. C. (1997), Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, 274(1-3), 41-59.
- Yu, S. B., Kuo, L. C., Punongbayan, R. S., and Ramos, F. G. (1999), GPS observation of crustal deformation in Taiwan-Luzon region, *Geophys. Res. Lett.*, 26(7), 923-926.
- Yue, L.-F., Suppe, J., and Hung, J.-H. (2005), Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6), *J. Struct. Geol.*, 27(11), 2058-2083.
- Yue, L. F., Suppe, J., and Hung, J. H. (2009), Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, 94, 1-34.

附錄 A

表 A-1、地震剖面之端點直角座標，使用 WGS 84 全球定位座標系統。

地質剖面	西端	東端	備註
Line A (Line 3)	X: 121.019237	X: 121.293434	黃旭燦等，2004
	Y: 24.891224	Y: 24.679735	
Line B (Line 4)	X: 120.953634	X: 121.273379	黃旭燦等，2004
	Y: 24.866813	Y: 24.669646	
Line C (Line 5)	X: 120.944206	X: 121.245542	黃旭燦等，2004
	Y: 24.865314	Y: 24.631052	
Line D	X: 120.942292	X: 121.203832	本研究剖面
	Y: 24.803002	Y: 24.622769	
Line E (Line 6)	X: 120.983543	X: 121.122389	黃旭燦等，2004
	Y: 24.796749	Y: 24.580715	
Line F (Line 7)	X: 120.897230	X: 121.120735	黃旭燦等，2004
	Y: 24.784131	Y: 24.547824	



附錄 B

表 B-1、三維斷層模型使用之地質剖面之端點直角座標，使用 TWD 67 TM 2 全球定位座標系統。

地質剖面	西端	東端	備註
Line 3	X: 251114.62	X: 278866.83	黃旭燦等，2004
	Y: 2753935.85	Y: 2730543.09	
Line 4	X: 244485.89	X: 276839.47	黃旭燦等，2004
	Y: 2751232.65	Y: 2729421.37	
Line 5	X: 243533.11	X: 274029.78	黃旭燦等，2004
	Y: 2751066.97	Y: 2725141.48	
Line S	X: 243336.82	X: 269808.425	本研究剖面
	Y: 2744165.49	Y: 2724217.235	
Line 6	X: 247507.18	X: 261566.72	黃旭燦等，2004
	Y: 2743471.65	Y: 2719549.74	
Line 7	X: 238779.42	X: 261402.41	黃旭燦等，2004
	Y: 2742077.90	Y: 2715906.68	
Line 11	X: 243520.35	X: 252226.13	Namson, 1984
	Y: 2744305.77	Y: 2728633.24	
Line 12	X: 244393.55	X: 255267.89	Namson, 1984
	Y: 2744305.09	Y: 2729863.38	
Line 13	X: 248922.68	X: 249334.07	Namson, 1984
	Y: 2744631.92	Y: 2739073.27	
Line 14	X: 249996.51	X: 260866.36	Namson, 1984
	Y: 2744533.44	Y: 2728049.9	