



國立臺灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Department of Geosciences  
College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

褶皺逆衝帶上衝褶皺塊體的構造演化：

台灣中部國姓地區褶皺、斷層、及節理分析

Development and evolution of folds, faults and joints within a  
thrust sheet in fold-thrust belt, Guoshing, central Taiwan

葉佳鴻

Chia-Hung Yeh

指導教授：盧佳遇 博士

李建成 博士

Advisor : Chia-Yu Lu, Ph.D.

Jian-Cheng Lee, Ph.D.

中華民國 105 年 6 月

June, 2016

# 國立臺灣大學碩士學位論文

## 口試委員會審定書

褶皺逆衝帶上衝褶皺塊體的構造演化：  
台灣中部國姓地區褶皺、斷層、及節理分析

Development and evolution of folds, faults and joints within a  
thrust sheet in fold-thrust belt, Guoshing, central Taiwan

本論文係葉佳鴻君（學號 R02224112）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 105 年 06 月 22 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：

盧佳鴻

（指導教授）

李建成

朱徵祖

葉國ழ

李士偉

## 誌謝



能夠順利完成這本論文，最先要感謝的是兩位恩師—李建成老師與盧佳遇老師，他們不厭其煩地教導，不僅是學業上，同時在生活上也給予我諸多鼓勵與啟發，在待人處事上也學到了很多，由衷感謝兩位指導教授；在研究期間，感謝口試委員朱爺、葉恩肇老師與王士偉老師的幫助，不論是野外的提點還是文章的修改，都給了我非常多的幫助，另外也要感謝瑜璋老師、鄧屬予老師在研究成果上的建議，讓人獲益匪淺。

研究路上需要眾多強力的後援，感謝中研院的牟牟學姐、致同學長、冠翔學長、廷潔學姐、秋月學姐、淑貞學姐及思謹，如果沒有你們平日的幫忙，我的研究工作不可能這麼順利；感謝台大研究室的伙伴們，警安、之諾、智承與阿賢，R205A 的酸甜苦辣只有自己明白！

野外工作是辛苦的，感謝國姓李太太讓我有地方住，紀先生與炸麵阿嬤的幫忙真的很受用（還因此發現新露頭！）；感謝李聰榮先生，兩年前在河床上的巧遇是我研究過程最大的轉折點！還有一同在野外工作的伙伴們，柑仔、承鴻、之諾、警安、譯禾、翊展與柏傑，當我野外需要幫忙時你們總是義不容辭，感謝野外的幫忙與打屁聊天！還要謝謝泰迪和張冕學姐，在我研究卡關時願意與我聊聊，使我有繼續走下去的動力；當然一切的起源還是來自於五年前的中研院暑期生計劃，若沒有與鄧涵、承鴻一起學習，也許就不會選擇研究所這條路；還有B98、B99與R02的同窗們，七年來受到大家各式各樣的幫忙（忍受我奇怪的問題與毛病），在此一併致謝！同時也要感激B00、B01、B02、B03的學弟妹們，三年的助教生活真是一大磨練！希望你們不要覺得我很雷哈哈哈哈，在當助教的這段過程中，不僅與大家拉近感情，同時還學會各種奇怪的技能！

我數位相處多年的室友與朋友，晉哲、聖安、順源、柏傑與聖怡，在我需要解悶與談心時給我了非常多的幫助（雖然大部份時候你們充當酒肉朋友的角色），但是這些東西對我而言非常重要，在我選擇逃避時總是把我拉回來，謝謝你們……還有太多太多需要感謝的人了，自己的一點成果其實是受到多少人的照顧與幫忙，想到就覺得自己真的很慚愧，再次謝謝大家。

最後要感謝我的家人，因為有他們全力地支持，這本論文才得以誕生。

## 摘要

本研究以台灣中部國姓地區雙冬斷層上盤出露的河床連續露頭為研究對象，試圖解析逆衝塊體在造山抬升過程中產生的一系列變形構造，包括節理、斷層及褶皺，並探討過程中應力與應變狀態的演變，進而重建雙冬斷層系統的演化過程。本研究透過露頭觀察、地層對比等方式以進行地質構造剖面的建立，並量測節理及斷層等脆性構造，同時利用其與褶皺的關係進行脆性構造演化史的建構。研究地區為雙冬斷層上盤的上衝塊體，主要為中新世岩層。野外調查的結果顯示，上盤地層在近斷層帶時形成 2-3 個覆瓦狀堆疊，並伴隨 3-4 個向北傾沒的短波長連續褶皺。顯示其為一應力集中之區域。

節理與斷層擦痕的初步分析結果得到數個主要構造事件如下：一期同沈積時期的伸張性應力（造成同沉積斷層或節理）與至少三期與雙冬斷層演化相關的東西向擠壓應力。在擠壓斷層滑移事件中，早期的共軛逆斷層系統是在地層還維持在接近水平位態時形成的（造山作用初期，Stage 1），約在地下 4-6 公里深。爾後隨著雙冬斷層上盤上衝塊體持續滑移抬升，使得地層褶皺傾斜與地層堆疊，同時也產生晚期的逆衝斷層及平移斷層系統（Stage 2, 3）。較晚期（Stage 2, 3）的斷層擦痕破裂，似乎是在上衝地塊在淺部（2-4 公里深？）形成連續短波長褶皺的同時期所伴隨的脆性構造，而分析也顯示部分錯動是沿早期形成的既有破裂面滑動。從岩層大致走向和大區域來比較，本區域似乎沒有明顯的水平方向塊體旋轉，所計算之應力場/應變場亦未特別顯示朝順時針或逆時針水平旋轉之特色。

應力與應變分析顯示，三期擠壓性構造事件皆為東西向到西北-東南向的擠壓機制，每一期皆有主要的擠壓方向與若干組次要的擠壓方向，本研究提供另一個可能的解釋：在雙冬斷層系統演化的過程中，常伴隨許多地震滑移事件，地震循環的記錄隨著雙冬斷層演化及上衝地塊抬升，持續了數十萬年，並保存在斷層帶周遭的岩體破裂中，意即這些斷層擦痕不僅記錄了大地震時期或間震期的應力狀態，同時



也記錄了震後時期餘震的應力狀態，而非東西向的最大擠壓應力也許是主震後應力調整期發生的餘震滑移。

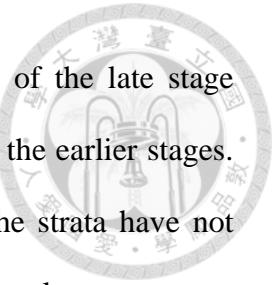
此外，從矩陣張量所計算之軸差比來看，應力軸差比在演化過程中逐漸上升，從 0.13 到 0.35；應變軸差比則穩定保持在 0.5 左右。無論何種計算方法，此結果皆顯示上衝褶皺塊體主要受到東西向強勢的水平擠壓應力及應變，並在爬衝過程中維持著強勢的鉛直方向最小主應力，在演化過程中水平圍壓應力（第二主應力軸）一直維持大於鉛直圍壓應力，暗示台灣中部地區的褶皺逆衝帶在造山作用過程中，水平側向還是有明顯的擠壓應力，這也許與台灣中部仍處於造山帶中段有關。

關鍵字：西部麓山帶，褶皺逆衝帶，雙冬斷層，多期斷層擦痕分析，地殼應力

## Abstract

Based on tectonic analysis on the well-exposed riverbed outcrops in the Guoshing area, central Taiwan, we elucidate and characterize the deformation structures, including joint, fault, and fold, and its evolution during the upward propagation of a thrust sheet in fold-thrust belt. We mainly focused on a section of continuous outcrops about 1 km long in the hanging wall of the Shuangtung Fault, a major thrust fault revealing a duplex structure in the western foothills of the Taiwan mountain belt. By detailed field investigation we established a local geological 3-D architecture of deformed Miocene strata, which is characterized by two to three duplex structures accompanied by multiple folds, which plunge exclusively toward the North, suggesting stress localization near the main Shuangtung fault zone.

We conducted fault slip data and fracture analysis via Faultkin and T-tecto software. By further comparing the brittle fractures with fold structure, our results show that slickenside faulting occurred on multiple phase throughout the propagation of the thrust sheet on the hanging wall of the Shuangtung fault and that the multiple wave folding seemingly developed in the late stage during the exhumation of the thrust sheet. We are finally able to summarize the evolution of the deformation structures in Guoshing area as following: 1 ) one early extensional stress event, which makes syn-sedimentary faulting or joint; 2 ) three phases of compressional thrusting events; one is early conjugate thrust system with E-W compression which may indicate the beginning of thrusting when the strata of this thrust sheet still kept horizontal at depth of about 4-6 km ( Stage 1 ) . Then, the hanging wall strata have been tilted through upward movement of the thrust sheet along the Shuangtung Fault. During this period, a late conjugate thrust system ( with E-W to NE-SW compression ) developed at the shallow depth of 2-4 km ( Stage 2, 3 ) . We found that the late stage of slickenside faulting events is likely syn-folding with the



multiple folds. Our observations and analyses also show that parts of the late stage thrusting slickenside followed the pre-existing fractures developed in the earlier stages. Comparing with regional pattern and strata attitude, it seems that the strata have not experienced block rotation. In addition, for each stages of compressional stress events, we found one mainly compressive direction and several secondary compressive direction, we interpret as following: numerous faulting (slickenside slip) events occurred within the hanging-wall thrust sheet during the evolution of the Shuangtung Fault system, which might represent several seismic cycles. We tend to interpret the variations on the orientation of the maximum principal stress axis to be aftershocks transient stress state under stress perturbation following the major earthquakes.

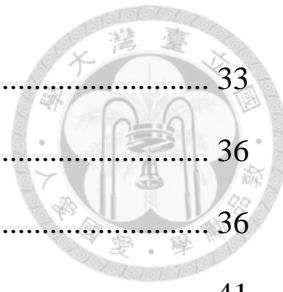
We calculated the stress ratio for each stages of stress event, the stress ratio gradually increasing from Stage 1 to Stage 3, during the Shuangtung Fault evolution, averaging from 0.13 to 0.35. The results show that 1) strong compressive maximum principal stress ( $\sigma_1$ ) in the horizontal direction, 2) minimum principal stress in vertical direction ( $\sigma_3=\sigma_v$ ), and 3) The second principal stress ( $\sigma_2$ ) always larger than the minimum principle stress ( $\sigma_3=\sigma_v$ ). It suggested that there is still have obvious compressive lateral stress during the mountain building process.

**Keyword :** Western Foothills, fold and thrust belt, Shuangtung Fault, multiple phase fault-slip analysis, crustal stress



## 目錄

目錄 .....	1
圖目錄 .....	4
表目錄 .....	8
第一章 緒論 .....	9
1-1 研究動機與目的 .....	9
1-2 研究區域地理位置概況 .....	10
1-3 區域地質前人研究 .....	12
1-4 研究目標 .....	12
第二章 地質背景與文獻回顧 .....	14
2-1 麓山帶區域地質背景概述 .....	15
2-1-1 西部麓山帶地質概述 .....	15
2-1-2 外麓山帶與內麓山帶的差異 .....	17
2-1-3 研究區域地層概述 .....	17
2-1-4 研究區域地質構造 .....	20
2-2 雙冬、龜蒲斷層相關研究討論 .....	21
2-3 褶皺逆衝帶構造演化相關研究 .....	24
2-3-1 斷層帶的擴展模式 .....	24
2-3-2 車籠埔斷層帶的例子 .....	25
2-3-3 九芎坑、觸口斷層帶的例子 .....	28
2-3-4 阿帕拉契山斷層帶的例子 .....	29
第三章 研究方法 .....	31
3-1 野外地質調查 .....	31
3-1-1 野外露頭觀察 .....	31



3-1-2 變形構造 .....	33
3-2 室內資料處理分析 .....	36
3-2-1 斷層擦痕分析 .....	36
3-2-2 軟體介紹 .....	41
第四章 野外露頭地層分層與構造特徵 .....	44
4-1 野外地層對比 .....	44
4-2 構造單元分區 .....	50
4-1-2 構造單元 I .....	50
4-1-3 構造單元 II .....	53
4-1-4 構造單元 III .....	55
4-1-5 構造單元 IV .....	57
4-3 主要斷層帶描述 .....	58
4-3-1 F1 斷層 .....	58
4-3-2 F2 斷層 .....	58
4-3-3 龜蒲斷層帶 .....	59
4-4 構造剖面與特徵 .....	63
4-4-1 龜溝地區構造剖面與特徵 .....	63
4-2-2 雙冬斷層上盤構造剖面 .....	64
4-5 小結 .....	65
第五章 脆韌性構造分析結果：型態、機制與演化 .....	66
5-1 概論 .....	66
5-2 現地節理分析 .....	67
5-3 斷層擦痕構造作用 .....	70
5-4 綜合比對分析 .....	97
5-4-1 Stage 1 (1a, 1b) .....	97



5-4-2 Stage 2 (2a, 2b) .....	98
5-4-3 Stage 3 (3a, 3b) .....	98
5-4-4 Stage 1, 2, 3 與節理綜合討論.....	98
5-4-4 應力軸差比與應變軸差比 .....	106
5-4 小結 .....	109
<b>第六章 討論 .....</b>	<b>110</b>
6-1 地層辨認、指準層、露頭構造剖面重建的相關問題討論 .....	110
6-2 利用軟體進行斷層擦痕分析的問題 .....	111
6-3 斷層擦痕分析結果的地質意義 .....	112
6-4 應力張量與應變張量之異同 .....	114
6-5 雙冬斷層系統構造演化 .....	115
<b>第七章 結論 .....</b>	<b>118</b>
<b>參考文獻 .....</b>	<b>120</b>
<b>附錄 應力原始資料 .....</b>	<b>129</b>

## 圖目錄



圖 1-1	台灣中部地區地質圖與地質剖面。 .....	11
圖 1-2	國姓地區地質圖，藍色方框為研究範圍。 .....	13
圖 2-1	台灣地體架構圖。 .....	14
圖 2-2	西部麓山帶地層對比圖。 .....	16
圖 2-3	1996-2006 台灣中部速度場。 .....	22
圖 2-4	烏溪深部震測剖面。 .....	23
圖 2-5	中興新村至貓羅溪段的集集地震斷層與車籠埔斷層帶 .....	26
圖 2-6	名間地區車籠埔斷層帶及次要斷層型態。 .....	27
圖 2-7	九芎坑斷層帶與其地質剖面。 .....	28
圖 2-8	JF3 斷層露頭。 .....	28
圖 2-9	JF4 斷層下盤（西側）。 .....	29
圖 2-10	JF4 斷層斷層上盤（東側）。 .....	29
圖 2-11	阿帕拉契斷層帶沿線的地質剖面。 .....	30
圖 3-1	野外露頭描繪範例之一。 .....	32
圖 3-2	河道露頭剖面圖描繪範例之二。 .....	32
圖 3-3	斷層面特徵圖與測量要素。 .....	33
圖 3-4	判斷斷層面滑動方向的準則。 .....	34
圖 3-5	非共軛斷層之斷層擦痕作層面修正之操作步驟。 .....	37
圖 3-6	應力轉換圖（I）。 .....	39
圖 3-7	應力轉換圖（II）。 .....	39
圖 3-8	斷層古應力分析方法流程圖。 .....	40
圖 3-9	FaultKin 7.0 軟體操作示意圖。 .....	41
圖 3-10	T-tecto 3.0 軟體操作示意圖（I）。 .....	43
圖 3-11	T-tecto 3.0 軟體操作示意圖（II）。 .....	43



圖 4-1 國姓龜溝地區之地層柱，左半部為野外所建立之地層柱，並與右半部吳樂群所建立之地層柱對比的結果。 .....	46
圖 4-2 龜溝地區 UAV 航照圖與露頭點，編號 1-21 位於龜浦斷層上盤，主要為擦痕測量；編號 22-26 位於龜浦斷層帶，主要為野外露頭。 .....	47
圖 4-3 龜溝地區地質圖（烏溪河床範圍）。 .....	48
圖 4-4 龜溝地區河道兩岸構造剖面。 .....	49
圖 4-5 橋下厚黃砂岩（B 序列）。 .....	50
圖 4-6 Site 9 沉積構造與其素描。 .....	51
圖 4-7 Site 11 露頭素描。 .....	51
圖 4-8 構造單元 I 與次生褶皺，黃線為指示層小黃砂岩（A 層），下方為不同褶皺的史密特下半球投影分析結果。 .....	52
圖 4-9 Site 11 因擠壓而產生的小波長褶皺與層厚改變。 .....	53
圖 4-10 構造單元 I 褶皺示意圖。 .....	53
圖 4-11 構造單元 II 整體樣貌與軸部破裂。 .....	54
圖 4-12 左上：構造單元 II 南岸被風化的砂岩（Site 13），已無層理可供辨認。右上：構造單元 II 北岸的軸部破裂，可見斷層向西逆衝（Site 6）。左下：散布在頁岩中不規則狀的擦痕，其截切關係難以得知（Site 13）。（右下），構造單元 II 褶皺層面投影（ $\pi$ -diagram）結果與示意圖。 .....	54
圖 4-13 構造單元 III 北岸向斜軸（Site 5）。 .....	55
圖 4-14 因斷層拖曳作用而造成的小型拖曳向東伸向褶皺（Site 8）。 .....	56
圖 4-15 厚黃砂岩在北岸的重覆堆疊（Site 4）。 .....	56
圖 4-16 構造單元 III 褶皺層面投影（ $\pi$ -diagram）結果與示意圖。 .....	56
圖 4-17 構造單元 IV 露頭照與素描示意圖。 .....	57
圖 4-18 構造單元 IV 之褶皺層面投影（ $\pi$ -diagram）分析結果與示意圖。 .....	58



圖 4-19 F1 斷層與其交界面。 .....	58
圖 4-20 F2 斷層帶與其交界面。 .....	59
圖 4-21 龜蒲斷層帶與乾溪露頭照，主要岩性為薄砂頁岩互層。 .....	59
圖 4-22 龜蒲斷層帶 UAV 航照圖（上）與路線地質圖（下）。 .....	60
圖 4-23 猴洞坑層中的次生褶皺（Site 22）。 .....	61
圖 4-24 左上：鈣質砂岩與內含生物殘骸，通常為方解石擦痕主要材料來源 (Site 23)。右上：被拉斷成串腸狀的砂岩（Site 25）。左中、左 下：龜蒲斷層帶的左剪特徵與其素描之一（Site 24）。右中、右下： 龜蒲斷層帶的左剪特徵與其素描之二（Site 26）。 .....	62
圖 4-25 龜溝 3D 剖面示意圖。 .....	63
圖 4-26 大橫屏山向斜東翼與指準層 B 層。 .....	64
圖 4-27 雙冬斷層附近上盤之厚層砂岩。 .....	64
圖 4-28 雙冬斷層上盤之構造剖面。 .....	65
圖 5-2 龜溝地區的節理破裂型態。左為 Site 4，右為 Site 9。 .....	67
圖 5-3 國姓龜溝地區節理資料分布圖（原始資料）。 .....	68
圖 5-4 國姓龜溝地區節理資料分布圖（層面修正後資料）。 .....	69
圖 5-5 應力與應變分析結果符號說明，以 Site 2 之 3a 期為例。 .....	70
圖 5-6 Site 1 露頭照片。 .....	71
圖 5-7 Site 1 應力分析結果。 .....	72
圖 5-8 Site 2 在同一組斷層面發現相反滑動方向之擦痕。 .....	74
圖 5-9 Site 2 應力分析結果。 .....	74
圖 5-10 Site 4 斷層截切關係。 .....	76
圖 5-11 Site 4 所觀察到擦痕截切關係。 .....	76
圖 5-12 Site 4 應力分析結果。 .....	76
圖 5-13 Site 6 之共軛斷層，圖為 1a 期。 .....	79

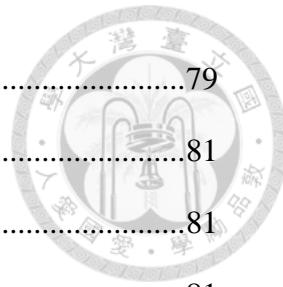


圖 5-14 Site 6 應力分析結果。 .....	79
圖 5-15 Site 9 擦痕覆蓋關係。 .....	81
圖 5-16 Site 9 破裂型態。 .....	81
圖 5-17 Site 9 應力分析結果。 .....	81
圖 5-18 Site 10 應力分析結果。 .....	84
圖 5-19 Site 11 擦痕轉彎的現象。 .....	86
圖 5-20 Site 11 應力分析結果。 .....	87
圖 5-21 Site 12 的斷層截切作用。 .....	88
圖 5-22 Site 12 應力分析結果。 .....	89
圖 5-23 Site 14 應力分析結果。 .....	91
圖 5-24 Site 15 應力分析結果。 .....	93
圖 5-25 Site 17 的擦痕截切。 .....	94
圖 5-26 Site 17 應力分析結果。 .....	94
圖 5-27 Site 18 之節理。 .....	95
圖 5-28 Site 18 應力分析結果。 .....	95
圖 5-29 國姓龜溝地區 1a 期分布圖（原始資料）。 .....	99
圖 5-30 國姓龜溝地區 1a 期分布圖（層面修正資料）。 .....	100
圖 5-31 國姓龜溝地區 1b 期分布圖（原始資料）。 .....	101
圖 5-32 國姓龜溝地區 1b 期分布圖（層面修正資料）。 .....	102
圖 5-33 國姓龜溝地區 2a 和 2b 期分布圖（修正資料）。。 .....	103
圖 5-34 國姓龜溝地區 3a 期分布圖（原始資料）。 .....	104
圖 5-35 國姓龜溝地區 3b 期分布圖（原始資料）。 .....	105
圖 5-36 龜溝地區應力軸差比分布圖，資料來源為表 3。 .....	107
圖 5-37 龜溝地區應變軸差比分布圖，資料來源為表 5。 .....	109
圖 6-1 雙冬斷層系統演化過程示意圖。藍色方框為國姓龜溝地區。 .....	117

## 表目錄

表 1	中部麓山帶岩石地層前人研究 .....	18
表 2	研究範圍各測量點與分期對應表 .....	97
表 3	龜溝地區應力軸差比分期結果分析（一） .....	107
表 4	龜溝地區應力軸差比分期結果分析（二） .....	107
表 5	龜溝地區應變軸差比分期結果分析（一） .....	108
表 6	龜溝地區應變軸差比分期結果分析（二） .....	108
表 7	斷層擦痕的應力型態與應力階段比較 .....	113





# 第一章 緒論

## 1-1 研究動機與目的

在造山作用的變形過程中，脆性變形扮演的角色十分重要，對於一個地區的構造變形歷史，利用脆性構造（如節理、斷層）進行應力分析與運動學研究是常見的重要方法之一。褶皺逆衝斷層帶是臺灣西部地區地形與地質上一個相當獨特的構造，過去因礦產（如煤層）、油氣探勘而有詳細調查，也曾有數次沿著主要斷層發生歷史大地震的記錄，如 1935 新竹—台中地震（獅潭—屯仔腳斷層）、1999 集集地震（車籠埔斷層）。若觀察臺灣地表所呈現的地質特徵，所呈現的是一系列的弧形構造線，以及往西北西方向擴展的背負式盆地（piggy-back basin），這是褶皺逆衝帶因褶皺彎曲、斷裂所形成的典型特色，其引發大地震的主震通常是被深部的斷坡斷坪所影響，而餘震序列則也受更深處仍在活動的主滑脫帶所影響（Suppe and Namson, 1979; Suppe, 1980b; Suppe, 1984; Wang et al., 2000）。過去對於地震所造成的岩層變形研究雖已有相當進展，但多侷限於淺部地表變形（黃文正等人, 2000；李錫堤等人，2000），對於其演化過程、特殊性等則較少著墨。斷層帶和周遭褶皺塊體在逆衝斷層滑移時的形變特徵，及它們反映在時空上的地質環境特性（如溫壓條件、應力等）已成為亟需瞭解的課題之一。

對於淺部地殼大地應力的研究，過去 30 年來的發展中，利用斷層擦痕的分析（Angelier, 1984; Angelier et al., 1986），透過基本的岩石力學原理，結合野外觀察與統計學數值分析求取應力狀態是很常見的方式之一。然而對於更深入且未知的科學問題，例如多期擦痕滑移事件的探討、擦痕與地震滑移的關係（大地震、小地震、同震、餘震、震間期等）等，還有更多的研究與發揮空間。另外，考慮應力狀態在時空間上的演變亦是有趣的科學問題，例如在造山過程中，地體的抬升所對應之擦痕型態、應力的演化、如何估算絕對應力值等，都非常值得進一步來進行分析與探討。



先前的初步勘查顯示，國姓龜溝地區有出露新鮮的地質露頭，顯示本地區之地質特徵為傾斜的褶皺逆衝帶上衝塊體，其構造形貌多變複雜。並且露頭斷層面上常具方解石擦痕，很適合作為瞭解構造演化的過程及應力狀態的研究題材。

本研究擬就國姓地區野外露頭進行調查與構造分析，瞭解整個雙冬斷層系統上衝塊體演化的機制。其中包含地層的變形及建立露頭尺度構造剖面、斷層的型態與斷層帶的特徵、塊體的傾斜、旋轉及滑移事件相關聯之地殼應力的特色等。我們也探討褶皺、節理及斷層等脆性構造在種種地質過程中各自扮演了什麼角色，它們之間又如何互相影響。藉由瞭解這個機制，也進行後續的延伸討論，如上衝塊體隨主斷層滑移時，其應力方向的分布、應力狀態如何變化、並探討之中的地質意義與新的科學啟示。

## 1-2 研究區域地理位置概況

本研究地區位於南投縣國姓地區（圖 1-1），對外交通主要為公路，如台 14 線、台 136 線與國道六號均可到達，向西可外接至草屯鎮及台中市，向東可至埔里鎮，北接東勢可達中橫公路。境內主要水系為烏溪，由上游的北港溪與南港溪匯聚而成，流向由東向西，出南投後接大肚溪，支流則有竹坑溪、乾溪等等。平均海拔 600-700 公尺，境內最高山為大橫屏山，標高 1206 公尺，在地質上為一向斜構造。研究範圍東起柑子林，西至雙冬，主要集中於向斜之西翼，最重要的活動構造是雙冬斷層系統，包括雙冬斷層與龜蒲斷層形成的雙軌系統（thrust duplex），該斷層系統屬於西部麓山帶的褶皺逆衝帶系統，斷層活動性、地形特徵或地下構造在過去一、二十年來已有許多的研究（詳見第二章 2-2 節），於此不再贅述。野外主要的交通工具為汽車與機車，主要在乾峰橋下烏溪河床露頭、乾溪一號橋下進行野外工作，前後野外工作天共 70 餘日。

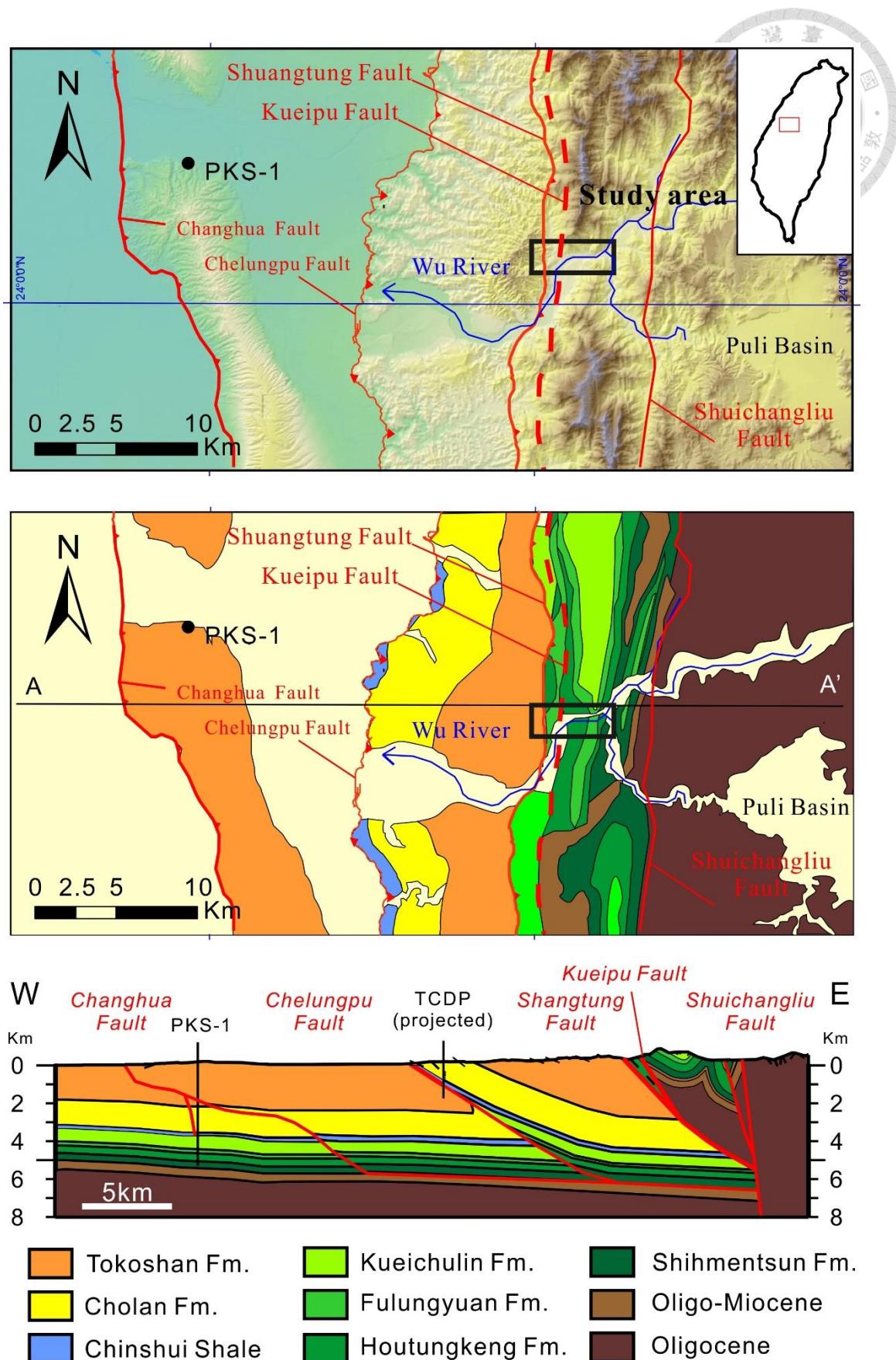


圖 1-1 台灣中部地區地質圖與地質剖面（修改自羅偉等人，1999）。



## 1-3 區域地質前人研究

本章節僅針對本研究區域敘述前人過去的研究，而在斷層構造上的探討，及擦痕應力等之科學議題及疑問，將放在第二章做詳細的闡述。國姓地區的研究，最早有基礎地質與煤田調查（何春蓀及譚立平，1960），以及國姓圖幅（圖 1-2，羅偉等人，1999）；於地層學方面，黃奇瑜（1986）建立本區完整地層學研究，並於烏溪剖面發現晚中新統之平行不整合接觸（相當於南莊層沉積的年代），期間約有 500 萬年之缺失，並推論可能是全球性大海退事件，或同時受到北港高區的影響（羅偉等人，1999）；吳樂群（1986）則解析國姓區域的沉積環境、年代與海平面變化，判斷出漸新世至中新世三次全球海進-海退的地層序列。構造方面，Angelier（Angelier et al., 1986）調查全台灣麓山帶並進行斷層分析，並從古應力反演結果推論台灣中部至少遭受兩期擠壓性應力事件與一期擴張性事件；李錫堤（1986）分析臺灣中北部古應力場，則提出不同看法，他認為台灣北部地區之古應力場主要有二期擠壓作用（第一期與第二期）與一期擴張作用（第三期）。第一期擠壓作用方向為西北—東南，相當於褶皺作用時期或弧陸碰撞時期。第二期擠壓作用轉為南—北方向，可能發生在褶皺作用之後，第三期古應力則以東西方向之擴張作用為主。在地球物理方面，主要有淺部與深部震測剖面（黃金來，1968；Wang et al., 2002；魏碩穎，2003）；而 GPS 與水準資料則顯示此處正在累積應力（莊舒雲等人，2008；Hsu et al., 2003; Ching et al., 2011），詳見第二章 2-2 節。

## 1-4 研究目標

1. 透過露頭觀察、地層對比等方式進行地層柱和地質構造剖面的建立。
2. 從斷層擦痕與古應力的分析，來瞭解本區域的大地應力特徵及隨斷層上衝地塊抬升的應力變化。
3. 進一步利用褶皺、斷層與節理之間交互作用及各自反映大地應力的關係，進行脆性構造演化史的建構。

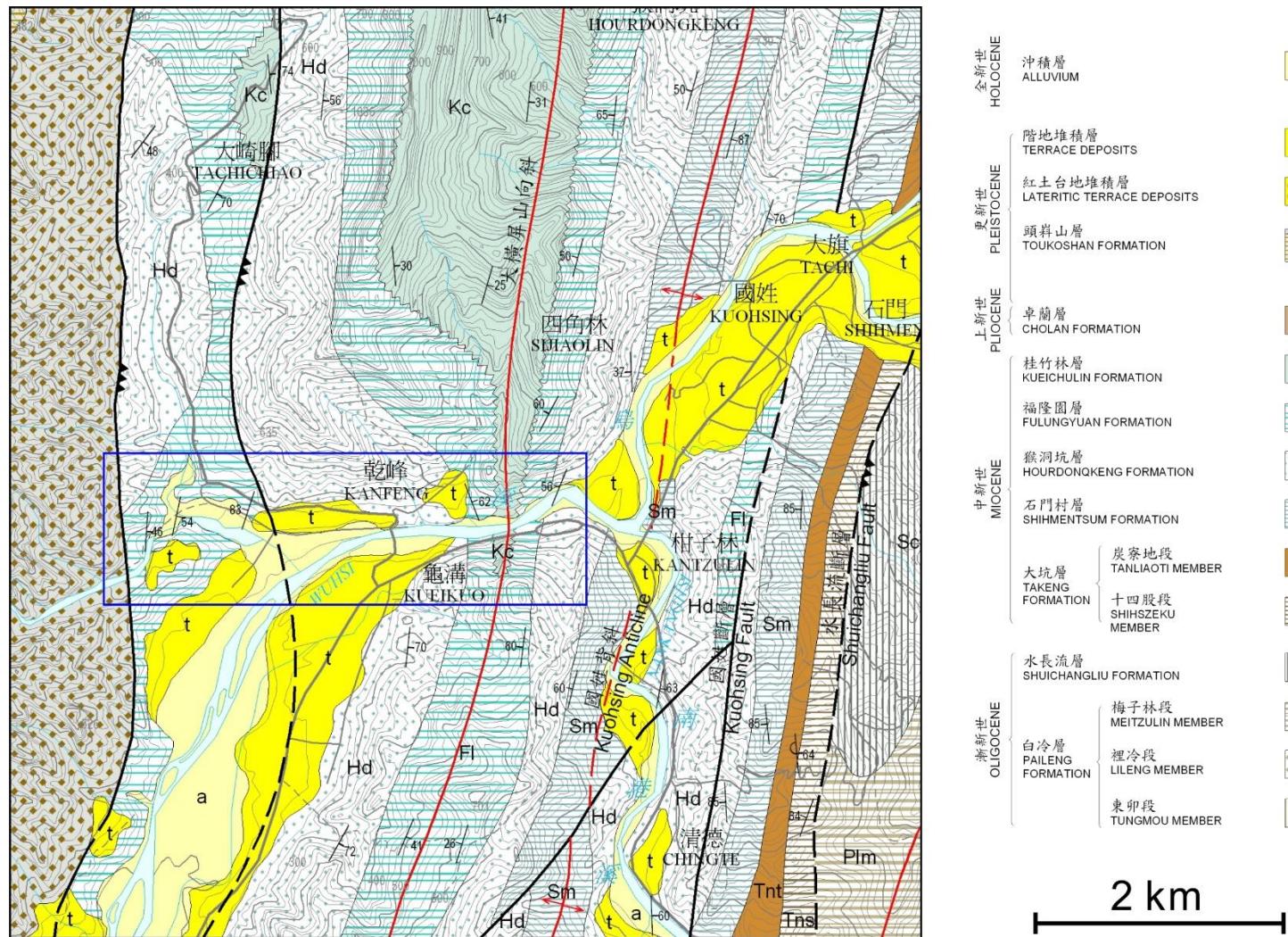


圖 1-2 國姓地區地質圖（引自羅偉等人，1999），藍色方框為研究範圍。



## 第二章 地質背景與文獻回顧

台灣島位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界帶，自中生代以來歷經了多次的地質事件。而現在地形形貌的形成，主要是上新世以來板塊複雜聚合及弧陸碰撞的產物，地處於歐亞板塊、琉球島弧、馬尼拉海溝與呂宋島弧的交界點（圖 2-1）。在本島東南方，菲律賓海板塊約以 70-80 mm/yr 的速率朝西北方推擠（Seno et al., 1977; Yu et al., 1997）；向北，菲律賓海板塊隱沒至歐亞板塊之下，形成琉球島弧並往東北延伸；向西，菲律賓海板塊逆衝至歐亞板塊之上，形成縱谷斷層，稱之為構造上的縫合帶；隱沒作用在台灣西南則形成馬尼拉海溝與呂宋島弧系統，其構造線延伸至台灣西部變形前緣。板塊聚合（擠壓、隱沒等）作用持續的結果造成地震與火成活動發生頻繁，如此活躍的造山作用至今仍持續進行著，台灣學者也將其稱為蓬萊造山運動，用以區分其他在台灣發生的更早期地質事件。

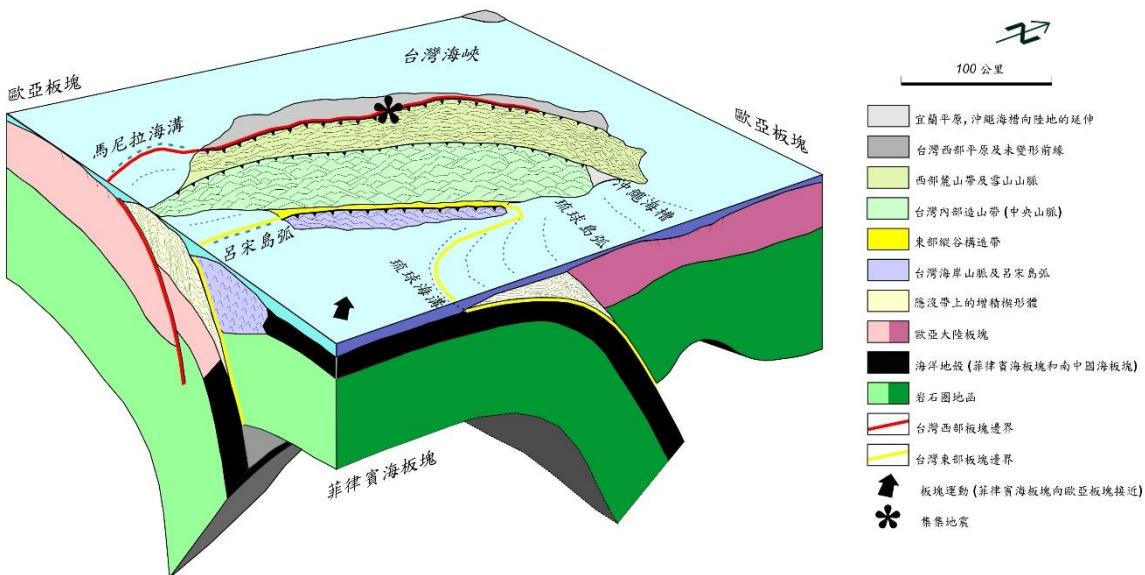


圖 2-1 台灣地體架構圖（引用自 Angelier, 2001）。

整個台灣地體架構分為數個地質分區：西部海岸平原（前陸地區）、西部麓山帶、雪山山脈、脊樑山脈、大南澳片岩區與海岸山脈（何春蓀，2006）。在西部海

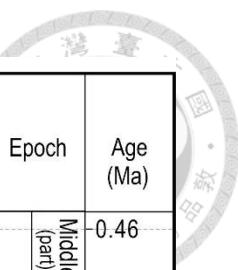
岸平原只有局部輕微或尚未明顯受到造山運動影響，除了些許的前陸褶曲下陷外，並沒有明顯的斷裂或造山抬升現象；往東進入西部麓山帶與雪山山脈，其前身為被動大陸邊緣，於造山運動時岩層受到擠壓與抬升，形成一系列北北東走向的褶皺與斷片；再往東則是脊樑山脈、大南澳片岩帶與呂宋島弧的海岸山脈。

## 2-1 麓山帶區域地質背景概述

### 2-1-1 西部麓山帶地質概述

西部麓山帶地表出露的地層主要為新生代以來未變質的沉積岩，以屈尺-水長流斷層和東側雪山山脈漸新世輕度變質地層做區隔，向西地勢逐漸緩和，進入海岸平原區。本地區因富含煤、石油或天然氣等高經濟礦產，因此具有相當豐富與詳盡的地質調查資料。由於板塊斜向碰撞的緣故，使得地層岩相由北到南的變化快速（何春蓀，1982），這種變化因地區而異，衍生出許多不同的區域地層單位以便野外製圖調查（圖 2-2）。更新世以前地層主要的組成為大陸邊緣海相的砂岩、粉砂岩以及泥岩，如桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層等；在更新世以後，厚層陸相（河相）礫岩及泥砂岩等磨拉斯地層（Molasse）的沉積指示台灣造山運動的發生使得中央山脈大量侵蝕，如頭嵙山層，在許多地區厚達 1-2 公里。

整個西部麓山帶的地質構造為一典型的褶皺-逆衝斷層帶（fold-and-thrust belt），每個逆斷層的斷坡都連接至底下的脫底斷層面（detachment），地層雖未受到變質作用或塑性變形，但已受到脆性的斷層及褶皺作用的變形，整個褶皺-逆衝斷層帶便沿著北北東-南南西走向，使地層呈覆瓦狀排列。世界上其他的山脈前緣也都有類似的地質構造（如逆衝斷層系統的覆瓦狀構造、褶皺逆衝構造以及雙軌構造（duplex）等，例如加拿大洛磯山脈（Jones, 1996）、阿帕拉磯山脈的中部以及南段（Boyer & Elliott, 1982；Mitra, 1988）、喜馬拉雅山（Allegre et al., 1984）、天山（Matte et al., 1996）及阿爾卑斯山（Boyer & Elliott, 1982）等。



時間 (距今 百萬年)	時代		製圖單位 Map unit	西部麓山帶 台中 南投 雲林 Taichung Nantou Yunlin	浮游性 有孔蟲 Planktonic Foraminifer	超微化石 Calcareous Nannofossil	Epoch	Age (Ma)
0.46	第 更 中期 (80万)	中 期		頭崙山層 Toukoshan Formation	頭崙山層 Toukoshan Formation		Middle (part)	0.46
	四 新 世 紀	早 世 期	Q0			N22	Early	
				頭崙山層 Toukoshan Formation	頭崙山層 Toukoshan Formation	c		
						b NN19		
						a		
1.77		晚 上 期	Pc	卓蘭層 Cholan Formation	卓蘭層 Cholan Formation			1.77
				錦水頁岩 Chinshui Shale	錦水頁岩 Chinshui Shale	N21	Late	
3.58	新 世 紀	早 世 期	MP	桂竹林層 Kueichulin Formation	大窩砂岩 Tawo Sandstone	NN18 } NN16	Pliocene	3.58
					十六份頁岩 Shihliufeng Shale	NN15 } NN13		
5.30		晚 期	M3		關刀山砂岩 Kuentaoshan Sandstone	N19	Early	5.30
						N18	NN12	
						N17	NN11	
11.2	中 新 世 紀	中 期	M2	福隆園層 Fulungyuan Formation	南莊層 Nanchuang Formation	N15	Lat	11.2
						N14 } N12/N13	NN7	
						N11 } N10 } N9	NN6	
16.4	第 世 紀	早 期	M1	深坑砂岩 Shenkeng Sandstone		N8	Middle	16.4
				猴洞坑層 Hourdongkeng Formation	樟湖坑頁岩 Changhukeng Shale	N7 } N6	NN5	
						N5	NN4	
				石門村層 Shihmentsun Formation	石門層 Shihmen Formation	N4	NN3	
				炭寮地段 Tanliaoti M.	炭寮地頁岩 Tanliaoti Shale		NN2	
				十四股段 Shihszeku M.	十四股層 Shihszeku Formation		NN1	...
23.8								

圖 2-2 西部麓山帶地層對比圖 (引用自謝凱旋與黃敦友, 2003)。



## 2-1-2 外麓山帶與內麓山帶的差異

西部麓山帶又可分為內麓山帶與外麓山帶，是否有上新世-更新世磨拉斯（molasse）地層的出現，是區分兩者的重要依據（何春蓀，1982）。在台灣中部地區，兩者以雙冬斷層做為主要分界，內麓山帶的地質構造較為複雜，由緊密褶皺與覆瓦狀斷層所組成（何春蓀，1982；Chiu，1975），地層主要為砂岩、粉砂岩與泥岩互層。外麓山帶亦以覆瓦狀斷層為主，但褶皺多半較為開展（何春蓀，1982），在雙冬斷層以西，彰化斷層以東的區域，地層多由老而新，由西向東以單斜方式向東傾斜排列。蘇強亦曾提出兩者構造形式的不同（Suppe, 1980a; 1980b），整體來說，台灣中部麓山帶主要的特色有：

- (1) 疊瓦狀的褶皺及斷層作用，上部地殼的縮短變形主要包含於此兩個作用。
- (2) 斷層間距在內麓山帶較短，同時褶皺較為緊密；在外麓山帶則為間距寬而緩。

## 2-1-3 研究區域地層概述

本研究地區的台灣中部麓山帶地層，前人研究已經相當豐富詳盡（表 1），在地層名稱方面，主要依中央地質調查所國姓圖幅（羅偉等人，1999），中新世地層由老至新包括石門村層、猴洞坑層、福隆園層、桂竹林層，現詳述如後：

中部麓山帶岩石地層前人研究

新竹-台中 台北地質教室 (1936)	國姓油田 大江二郎 (1938)	南投油田 久住久吉 (1939)	東勢-國姓 何春蓀, 譚立平 (1960)	南投地區 邱華燈 (1972, 1975)	中油台探總處 (1982)	國姓地區 黃奇瑜 (1986)	國姓圖幅 (1998)
關刀山層			桂竹林層	桂竹林層	桂竹林層	桂竹林層	桂竹林層
	馬鞍寮層		南莊層	南莊層			
		國姓層	深坑 砂岩段				
國姓層			水里坑層	南港 湊合層	打鹿 貢岩段	打鹿貢岩	打鹿貢岩
	白毛層		樟湖坑 貢岩段	北寮段		北寮層	樟湖坑層
	水長流層		石門段	上部	石底層	石門村層	石門村層

### 石門村層

本層的岩石主要由暗灰色泥岩及灰色至淺灰色厚層砂岩所組成，砂岩中有三層厚約 5 至 25 公尺之細粒至中粒砂岩，質地堅硬分布廣，且經常造成瀑布及急湍，可做為本層野外製圖之指準層。此外，在本層最上部砂岩厚約 25 公尺的頂部，含有一層厚約 60 公分之礫質粉砂岩，粉砂岩內含海綠石及鈣質砂岩的礫石與海相化石之密集帶。石門村層在北港溪附近厚度約為 190 公尺，向北逐漸增厚；至和平一帶推估其厚度約在 350 至 400 公尺之間，上與猴洞坑層呈整合接觸。黃奇瑜(1986)提出「石門村層」此一地層命名，其層位與邱華燈 (Chiu, 1972, 1975) 所提之南港-湊合層北寮段上部相同。與台灣北部地層相對比，石門村層相當於石底層的上部及湊合層的下部。若與苗栗地區的地層相對比，本層應相當於出磺坑層上部及北寮砂岩下部 (紀文榮與黃秀美，1981；Huang & Ting, 1979；Huang & Huang, 1984)。



### 猴洞坑層

主要由灰黑色塊狀泥岩組成，部份泥岩內夾 1 至 3 公分薄層細粒緻密砂岩而成為砂泥岩互層。本層下部及中部的泥岩內常含紅色鐵石質結核，有時排列成層，下部泥岩內夾有數層厚度 1 至 6 公尺的粉砂岩，中部為厚約 25 至 70 公尺之細粒砂岩，由於其側向延伸良好，常造成地形上之突起，故可做為野外追蹤的指準層。猴洞坑層在北港溪附近之厚度約 285 公尺，向北逐漸增厚，出露之岩層厚度推估應不超過 600 公尺，主要出露於烏溪以北至湖桶坑之間。本層與下伏的石門村層與上覆的福隆園層均呈整合接觸。邱華燈 (Chiu, 1972, 1975) 沿用出礦坑剖面的地層名稱，將其稱為南港—湊合層的打鹿頁岩段。黃奇瑜 (1986) 則稱本層下部為樟湖坑層，上部為打鹿頁岩，而羅偉等 (1999) 則因本層岩性與出礦坑標準剖面之岩性不盡相符，故新創猴洞坑層一名以資區別。與台灣北部地層相對比，猴洞坑層相當於湊合層的上部至南港層的中部。若與苗栗地區的地層相對比，本層則相當於北寮層中部至打鹿頁岩 (Huang & Ting, 1979)。

### 福隆園層

本層分成上、下兩部：下部主要由塊狀砂岩與厚層泥岩互層所組成，塊狀砂岩呈青灰色，風化後為淺棕色，細至中粒，淘選不佳，具生痕及貝類化石，岩質堅硬，單層厚可達 10 公尺以上；泥岩呈暗灰色，單層厚度達 10 公尺；分布於大甲溪至烏溪之間。上部主要由砂岩與泥岩薄至中層互層所組合，於近頂部處砂岩比例變大，出露數道厚層砂岩，砂岩與頁岩互層中的砂岩呈淺棕色，細粒，淘選佳；厚層砂岩呈淺黃色，中粒，含帶狀的煤層及雲母，煤層寬一公分，延伸不佳；分布於烏石坑至觀音坑之間。邱華燈 (Chiu, 1972, 1975) 將本層劃為南港湊合層觀音山段下部。中油臺探總處 (1982) 與黃奇瑜 (1986) 均將本層稱為觀音山砂岩。然本層由於泥岩比例較高，與苗栗地區之觀音山砂岩在特徵上不盡相符，故羅偉等人 (1999) 將此新命名為福隆園層。與台灣北部對比，本層相當於南港層上部；與苗栗地區對比，本層相當於觀音山砂岩。



## 桂竹林層

桂竹林層下部由厚層青灰色砂岩、暗灰色泥岩、粉砂岩及砂泥岩互層所組成，青灰色砂岩厚度一般為 1 至 20 公尺，風化後略呈黃灰色；上部則以厚層砂岩為主，含部份砂泥岩互層，泥質砂岩厚度一般在 2 公尺以上，內含多量雲母及碳質碎片。本層與下伏之福隆園層呈平行不整合接觸，上部在研究地區未出露（被斷層截切），在本研究國姓地區桂竹林層出露厚度僅約 100 到 150 公尺，於大橫屏山出露之最大厚度約 1000 至 1200 公尺。邱華燈（Chiu, 1972, 1975）將其分為觀音砂岩上部、南莊層與桂竹林層，然而紀文榮（Chi, 1979）於福隆園層之上的岩層發現已進入 NN11 化石帶，岩性亦有差異，是以並無南莊層。而本層於國姓地區因岩層出露不佳，無法分成關刀山砂岩、十六份頁岩段及魚藤坪砂岩段，因此並未分段製圖，在岩層對比上可對比至苗栗的桂竹林層。

### 2-1-4 研究區域地質構造

#### 大橫屏山向斜

大橫屏山向斜位於國姓背斜與雙冬斷層之間，最早見於國姓油田地質報告（大江二郎，1938），何春蓀與譚立平（1960）稱之為抽藤坑向斜，本向斜自福隆園及柑林隧道開始，向北延伸 21 公里，至天冷地區為白毛山斷層所截。褶皺軸向呈西北東，南段向北傾沒，北段則反之，為一不對稱之區域性向斜構造，向斜東翼的福隆園層與猴洞坑層向西傾斜 50 度至 60 度，西翼則向東傾斜約 40 度。桂竹林層出露於此向斜的軸部，並與下方的福隆園層成不整合關係，兩者間約有 500 萬年的缺失，此不整合面亦呈褶皺彎曲。



### 雙冬斷層

雙冬斷層最早亦由國姓油田地質報告（大江二郎，1938）所提出。斷層線走向約近南北，南起烏溪南岸之雙冬，北至大甲溪畔之馬鞍寮，並與大茅埔斷層相連，全長超過 30 公里。本研究區域主要為雙冬斷層南段國姓地區，由數位地形圖上來看，其線性特徵並不明顯，但斷層跡兩側的地形形貌則有極大的差異，主要是中新世的桂竹林層逆衝至更新世的頭崙山層之上。詳細的構造敘述及討論，也是本論文的研究重點，將在下一章節闡述。

### 龜蒲斷層

龜蒲斷層最早由國姓圖幅所提出（羅偉等人，1999）為國姓地區最明顯之逆衝斷層，斷層跡在地表附近的地貌，形成酒桶山、暗影山與部份大橫屏山線崖等等，此斷層之上昇斷塊由大橫屏山所組成，斷層線則與大橫屏山向斜軸平行，由龜溝向北延伸，經乾溝、棉仔園、清水林，最後到暗影山接馬鞍寮斷層。詳細的構造敘述及討論，也是本研究的重點，將在下一章節闡述。

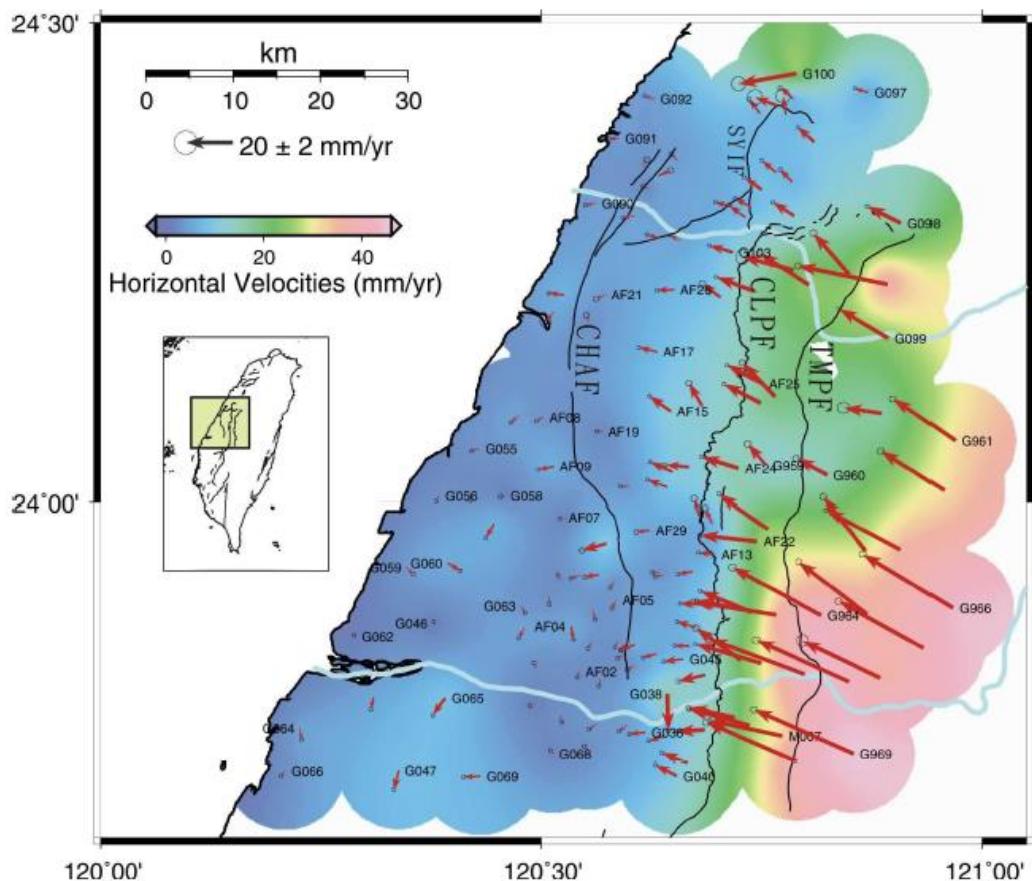
## 2-2 雙冬、龜蒲斷層相關研究討論

在前人研究中有報導過野外雙冬斷層的露頭，如邱華燈（Chiu, 1972）在雙冬東南方兩公里的河床發現本斷層露頭，中新世的南港層向西掩覆於頭崙山層礫岩之上，斷層面走向北 50 度東，向東傾斜 55 度。經濟部地質調查所（1999）的調查結果顯示在南投縣粗坑溪斷層面向東傾斜 40 度，斷層帶寬度超過 20 公尺；雙冬南方的馬鄰坑，斷層面向東傾斜約 40 度，斷層帶寬度約 30 公尺。

在九二一地震地質調查中，經濟部地質調查所報告（1999）亦提及雙冬斷層跡沿線河床多處發現有噴砂或噴泥的現象，地震時斷層上盤也有明顯的抬升（10 到 30 公分），顯示雙冬斷層似乎在集集地震連帶也有一些少許同震的滑移，或者是有被同震觸發的少許震後滑移，地質調查所認為其仍具有活動性，因此由存疑性活動斷層改列為第一類活動斷層。近年來隨著空載遙測技術提升，高精度數位地形圖的



製作及應用也越加廣泛，在斷層沿線調查有很好的發揮，而地殼變形監測結果(GPS 及水準)及斷層錯位數值模擬(圖 2-3)，顯示震間期雙冬斷層正在累積應力而無特別之水平或垂直位移(莊舒雲等人，2008；Hsu et al., 2003; Ching et al. 2011)。震測資料方面，黃金來(1968)所做之深部震測解釋此斷層為一向東傾斜約 50 度的逆衝左移斷層，並顯示在近地表沿著斷層中新世的桂竹林層掩覆在更新世的頭嵙山層之上。王乾盈(Wang et al., 2002)烏溪深部震測剖面，則顯示雙冬斷層為一向東傾斜 40-50 度的逆斷層，且傾角至深部逐漸趨緩(圖 2-4)。



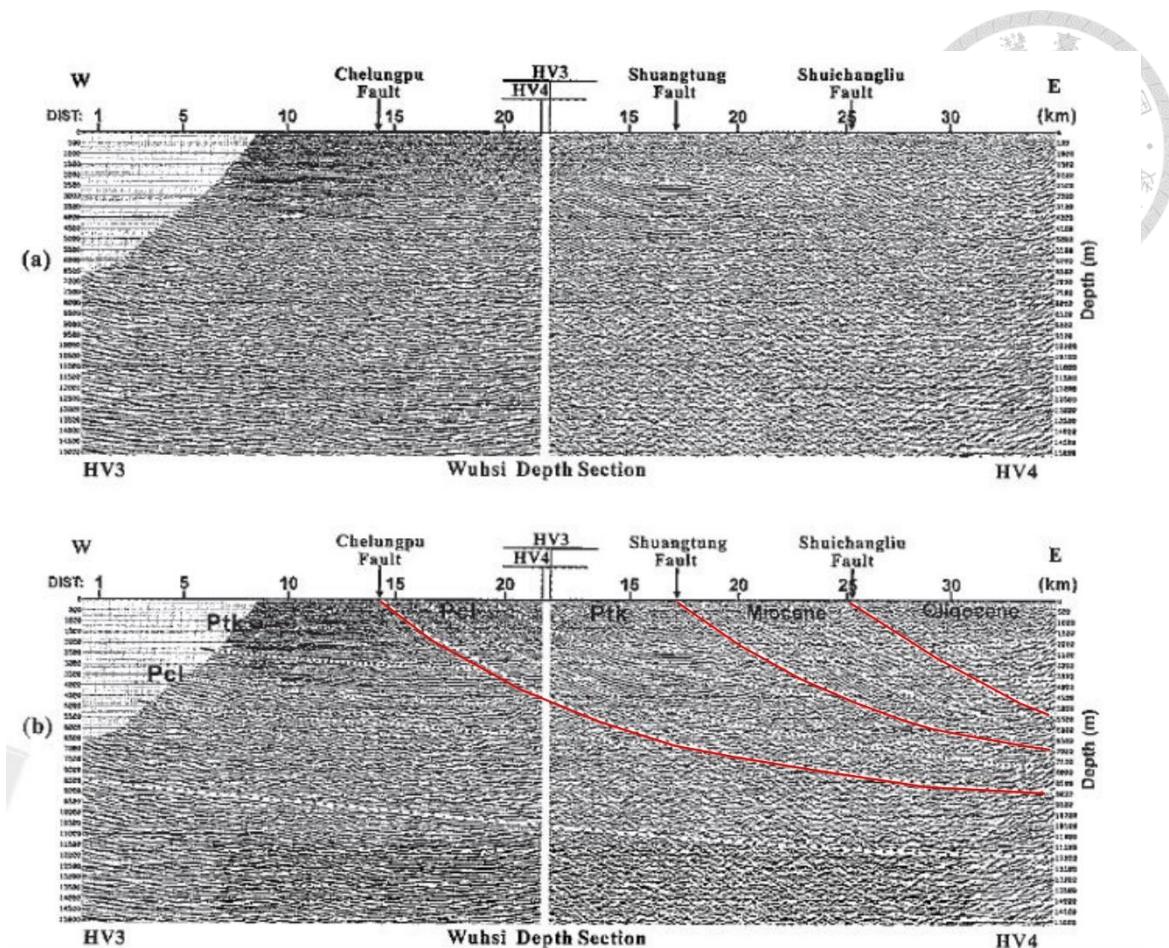


圖 2-4 烏溪深部震測剖面，下方紅線由左至右分別為車籠埔斷層、雙冬斷層與水長流斷層  
(引自 Wang et al., 2002)。

另外，從地質及地形圖觀察，在雙冬斷層東方約一公里即為龜蒲斷層，龜蒲斷層也被視為雙冬斷層系統中的一部分，黃鑑水與陳勉銘（2000）認為龜蒲斷層為東側相對上昇之逆斷層，夾在雙冬與龜蒲之間的斷塊可能受逆斷層強烈擠壓斷裂之影響導致通體破碎。由於本研究範圍橫跨兩斷層，因此釐清兩者構造形式與相關性亦為本研究探討的重點之一。



## 2-3 褶皺逆衝帶構造演化相關研究

以台灣褶皺逆衝帶而言，畢慶昌（1969）在調查台灣北部沿海地區的地質構造時曾提出其看法，認為北部的斷層多半是低角度或沿層面滑動之逆斷層，斷塊可以向西北逆衝好幾公里，形成覆瓦狀斷層體系，當這些逆斷層出露地表時，常呈高角度的彎曲斷面。伴隨斷層之褶皺皆以曲滑褶皺為主。依據地表地質特性、井下地質及震測剖面等資料，顯示台灣西部麓山帶的褶皺逆衝地殼變形，主要發生在新第三紀以上的沈積岩中，似乎並未（至少很少）牽涉到第三紀以下的基盤核心部份；這些覆瓦狀的逆衝斷層延伸至深部且合併到一個共同的滑離面，而這些滑移面通常是岩性較為脆弱的層位，如五指山層底部、桂竹林層、錦水頁岩等。

因此，Suppe & Namson( 1979 )、Namson( 1981, 1983, 1984 )、Suppe & Medwedeff ( 1990 ) 分別提出斷層轉折褶皺 ( fault-bend fold ) 、基底滑脫面褶皺 ( decollement fold ) 及斷層擴展褶皺 ( fault-propagation fold ) 的理論來解釋台灣西部麓山帶的構造。而世界其他的造山帶前緣的褶皺-斷層構造也有許多此種表層擠壓的構造形式 ( Jones, 1982; Vann et al., 1986; Dunne and Ferrill, 1988 )，在這些模式中，被擠壓的岩層具有許多樣貌，如單斜、緊密褶皺、岩層重複堆疊形成的疊瓦 ( Imbrication ) 或雙軌 ( Duplex ) 構造等 ( Suppe, 1980b )。

### 2-3-1 斷層帶的擴展模式

有關斷層帶的發育與擴展模式，從野外觀察及實驗室力學試驗已有很好的例證，可以將斷層帶與圍岩依變形程度分為主要斷層泥帶 ( main gouge zone ) 、破損圍岩 ( damage host rock ) 與未變形圍岩三個單位 ( Chester & Logan, 1986 ; Vermilye & Scholz, 1998 )；其中斷層泥帶為斷層面滑動所在位置，破損帶則包含次要斷層與破碎岩層。研究發現在斷層泥帶滑移的過程中，應力會集中於岩石不均質處或較堅硬的部份，通常位於破損圍岩區，因而造成次要斷層的形成或再活動，這些次要斷層可以是在剪動面成長之前、之中或之後形成 ( Vermilye & Scholz, 1998 )。若次要



斷層是從主斷層分叉而出，則形成分叉斷層（branch fault），整個系統通常發生在近地表處，由於逆衝斷層在該位置上下盤不對稱，所以這些分叉斷層僅局限於上盤，並進而形成覆瓦狀特徵（Scholz, 2002）。

其次討論斷層帶寬度與滑移量的關係，若是斷層帶在持續滑移的過程中逐漸變寬（Wojtal & Mitra, 1988），能累積錯動產生較大滑移量的斷層帶。所以脆性斷層帶的厚度與滑移量呈正比的關係，可能暗示著斷層帶隨著時間產生應變強化與寬度增加的趨勢。斷層內的不同部位在滑移持續時，可以變寬，亦可保持厚度不變，端視應變強化與弱化的比例（Blenkinsop, 1989）。Scholz (2002) 認為若是屬於地震活躍的斷層，則地震活動的傳遞將使斷層帶周圍的作用帶（process zone）持續產生微破裂作用，所以作用帶也會逐漸變寬；若是斷層的發生為雁行排列的破裂方式，滑移量的增加會磨蝕這些阻礙，形成逐漸連續且平滑的斷層。

### 2-3-2 車籠埔斷層帶的例子

林啟文等人(2003)針對 1999 集集地震的斷層兩側各約 2 公里地區進行調查，在草屯、貓羅溪、名間等地區分別發現分叉斷層系統、次要斷層與伴生的褶皺、背衝斷層等等現象（圖 2-5、圖 2-6），推估整個斷層帶的寬度應在 200-400 公尺間，尤以上盤為主要變形區域，顯示在大地震發生時，除了主斷層面滑動之外，上下盤圍岩亦有變形與破壞，因此在探討斷層行為時，不應只考慮斷層泥帶，而是應將斷層泥帶與破損圍岩合併為一個大的系統來進行討論。考慮雙冬斷層的滑移時間，其斷層帶寬度應不小於車籠埔斷層帶，而雙冬斷層帶的特徵與形式亦是一相當值得探討的問題。

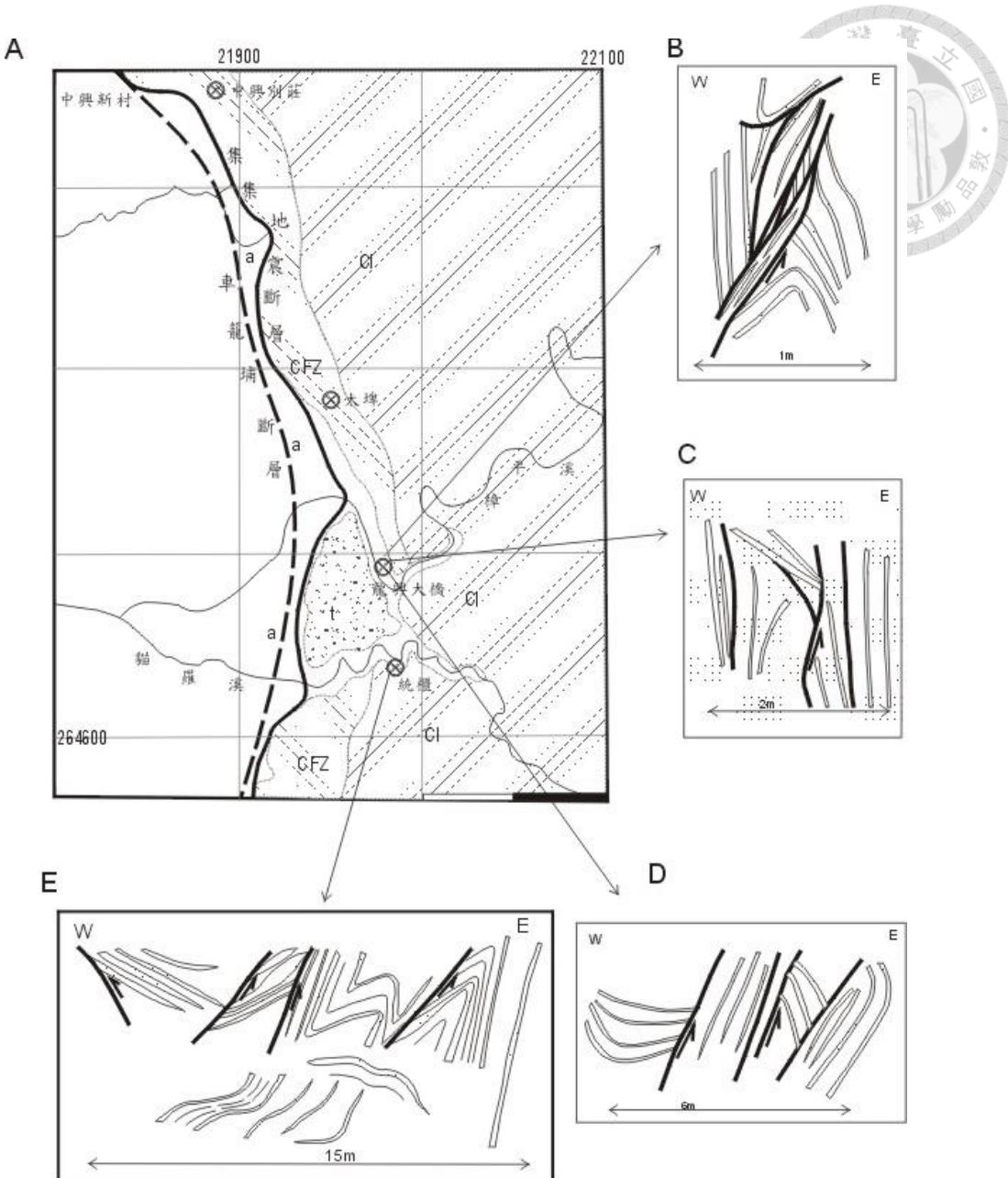
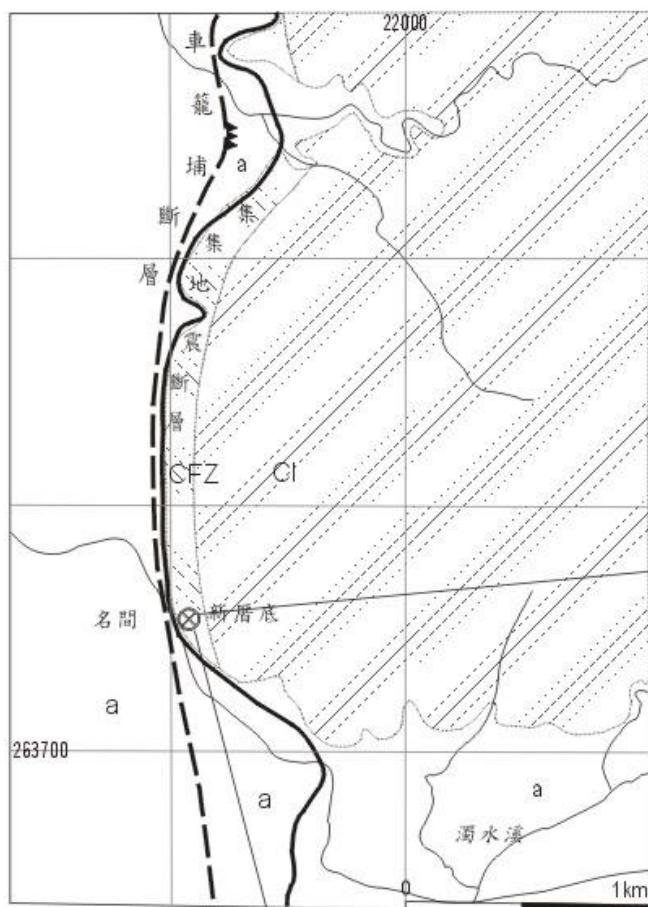
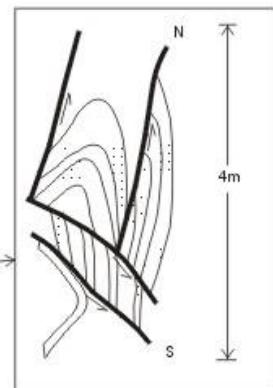


圖 2-5 中興新村至貓羅溪段的集集地震斷層與車籠埔斷層帶 A：斷層帶圖，CFZ 為車籠埔斷層帶，CI 為卓蘭層，a 為沖積層。B：位於新厝底地震斷層崖東方 150 公尺的一露頭剖面，斷層帶內的次要斷層呈覆瓦狀，走向為北北東，向東南呈高角度傾斜，與主崖約 15~20 度夾角。C：B 圖東方約 50 公尺的露頭，次要斷層約呈北北東走向，局部有反向斷層（引自林啟文等人，2003）。

A



C



B

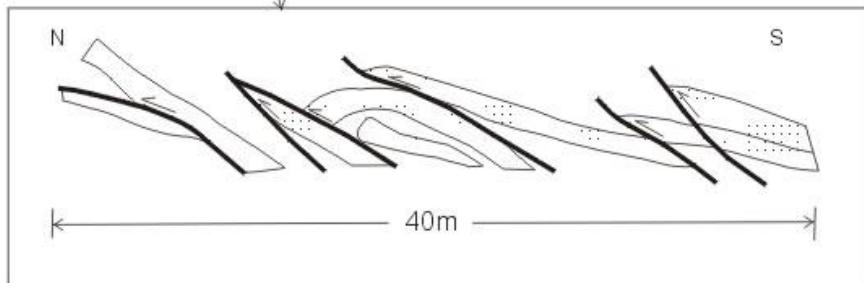


圖 2-6 名間地區車籠埔斷層帶及次要斷層型態。A：斷層帶圖與露頭位置，CFZ 為車籠埔斷層帶，CL 為卓蘭層。B、C 為次要斷層型態（引自林啟文等人，2003）。



### 2-3-3 九芎坑、觸口斷層帶的例子

在震測剖面的解釋上（楊耿明等人，2001），我們可以看到九芎坑斷層及大尖山斷層（觸口斷層）形成一個雙軌（Duplex）的逆斷層系統（圖 2-7）。另外，劉彥求等人（2003）在調查九芎坑斷層時，在石牛溪剖面見到 4 條規模不一、形式略異的逆斷層（JF1 - JF4，圖 2-8、圖 2-9、圖 2-10），構成寬約 850 公尺的九芎坑斷層帶，其變形與破壞在斷層上下盤皆出現，也同樣發現背衝斷層（back thrust）、不對稱褶皺等地質現象。根據其滑動量與剪動程度，推斷這些次生斷層的發育是由主斷面逐漸向上盤方向擴展（JF1 - JF4），同樣指示在探討斷層行為時，不能只考慮斷層泥帶與斷層面性質，而是應將斷層泥帶與破損圍岩合併為一個大的系統來進行討論。

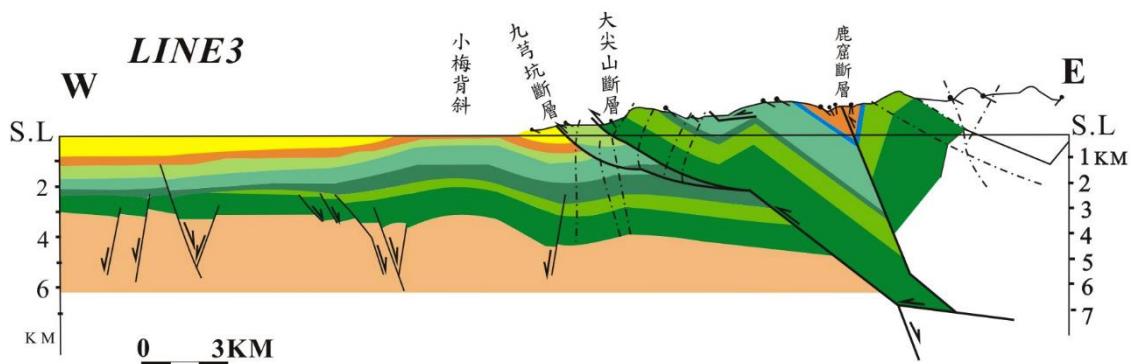


圖 2-7 九芎坑斷層帶與其地質剖面（引自楊耿明等人，2001）。



圖 2-8 JF3 斷層露頭。北岸，斷層前端分叉，上盤拖曳形成一背斜（引自劉彥求等人，2003）。



圖 2-9 JF4 斷層下盤（西側）形成一東翼陡西翼緩的不對稱向斜（引自劉彥求等人，2003）。

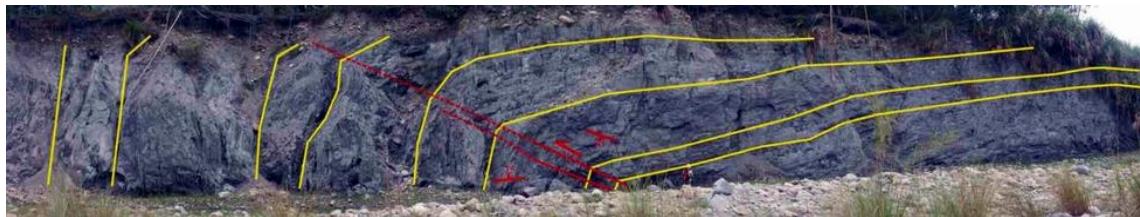
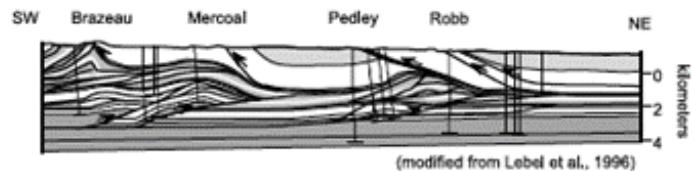


圖 2-10 JF4 斷層斷層上盤（東側）形成一東翼緩西翼陡的不對稱背斜，軸部受逆衝斷層形式的剪動（引自劉彥求等人，2003）。

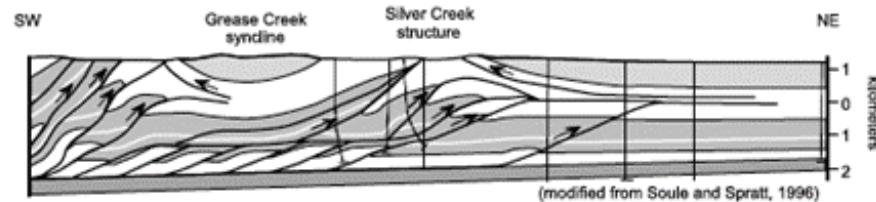
### 2-3-4 阿帕拉契山斷層帶的例子

Couzens-Schultz 等人 (2003) 利用砂箱模型，模擬阿帕拉契山斷層帶在造山過程中，褶皺逆衝斷層帶的演化與形貌特徵。研究結果顯示，規模較大的逆衝斷層發育的順序是呈前展或背負式 (piggy-back sequence)，即由內陸往前陸方向擴展，斷層的活動年代也朝此方向逐漸變得年輕，此種發育順序與台灣的逆衝斷層帶所研究結果是很類似的。同時，Couzens-Schultz 等人彙整前人於阿帕拉契山脈沿線所製作之地質剖面 (圖 2-11)，並與砂箱模擬的結果做一比較。他們認為，控制這個斷層帶形貌的因素非常多，如水平擠壓應力、擠壓速率、岩層厚度、岩層黏滯性、基底滑脫面的強度與基盤地形面等等，以致於無法僅用少數的控制變因來描述整個構造的異同。這些觀察告訴我們，褶皺逆衝斷層帶內部常會伴隨著複雜的變化，如雙軌等構造。

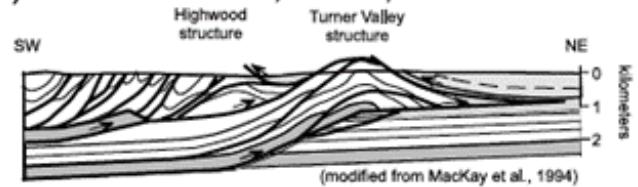
(a) N. Central Foothills, Alberta, Canada



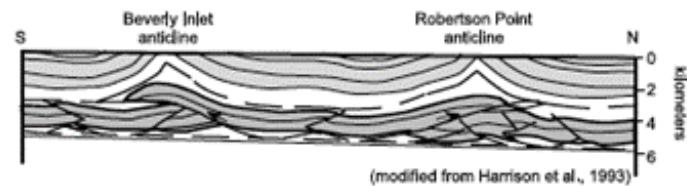
(b) Central Foothills, Alberta, Canada



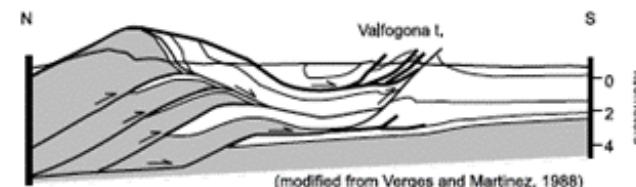
(c) Southern Foothills, Alberta, Canada



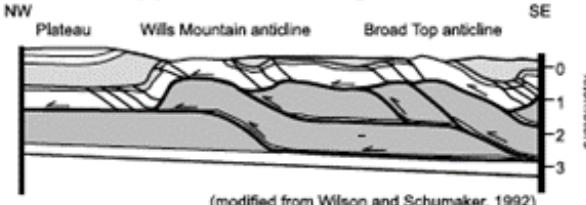
(d) Melville Island fold belt, N.W.T., Canada



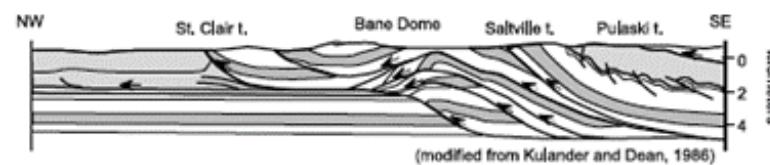
(e) Southern Pyrenees, Spain



(f) Central Appalachians, Virginia, U.S.A.



(g) Southern Appalachians, Virginia, U.S.A.



(h) Brooks Range, Alaska, U.S.A.

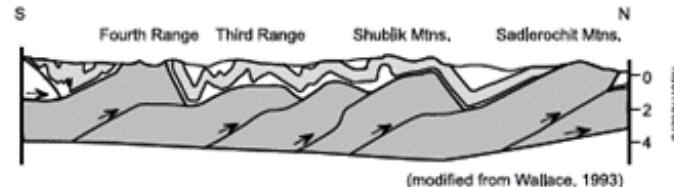


圖 2-11 阿帕拉契斷層帶沿線的地質剖面，可見複雜的雙軌、斷軌、覆瓦狀堆疊等地質構造（引自 Couzens-Schultz et al., 2003）。



## 第三章 研究方法

本章將對本研究之研究方法做一詳盡描述，包含野外部份與室外部份。野外部份將著重在野外工作之內容、流程與原理，例如如何觀察露頭與收集野外資料，並於 3-1 節說明；室內部份則闡述運動學分析的原理與軟體的使用，如斷層擦痕資料之分群和軟體操作步驟等，將於 3-2 節中說明。

### 3-1 野外地質調查

#### 3-1-1 野外露頭觀察

在本研究中，我們主要沿著烏溪及其支流乾溪河床，仔細觀察野外露頭，包括岩層產狀及變形構造，特別是中視尺度構造的觀察與描繪（圖 3-1），記錄的重點有地點、岩性、地層倒轉與否、厚度、顏色、位態、特殊的構造（如沉積構造、次生礦物），同時描繪所發現的小型變形構造。若露頭為破碎帶，則記錄破碎型式、剪切方向、破裂帶寬度等資料。若露頭同時含有多個以上的構造作用，則觀察他們之間交互作用與截切關係，以釐清其先後順序。

根據量到的地層位態資料，在野外即可簡單製作河道沿岸露頭剖面與大比例尺之路線地質圖（圖 3-2），並利用估計地層厚度，得到初步的地層柱。若經過斷層，則要考慮地層錯移與岩層對比的問題，在以上問題排除後，則可完成平面地質圖以瞭解構造在空間上的關係為何。

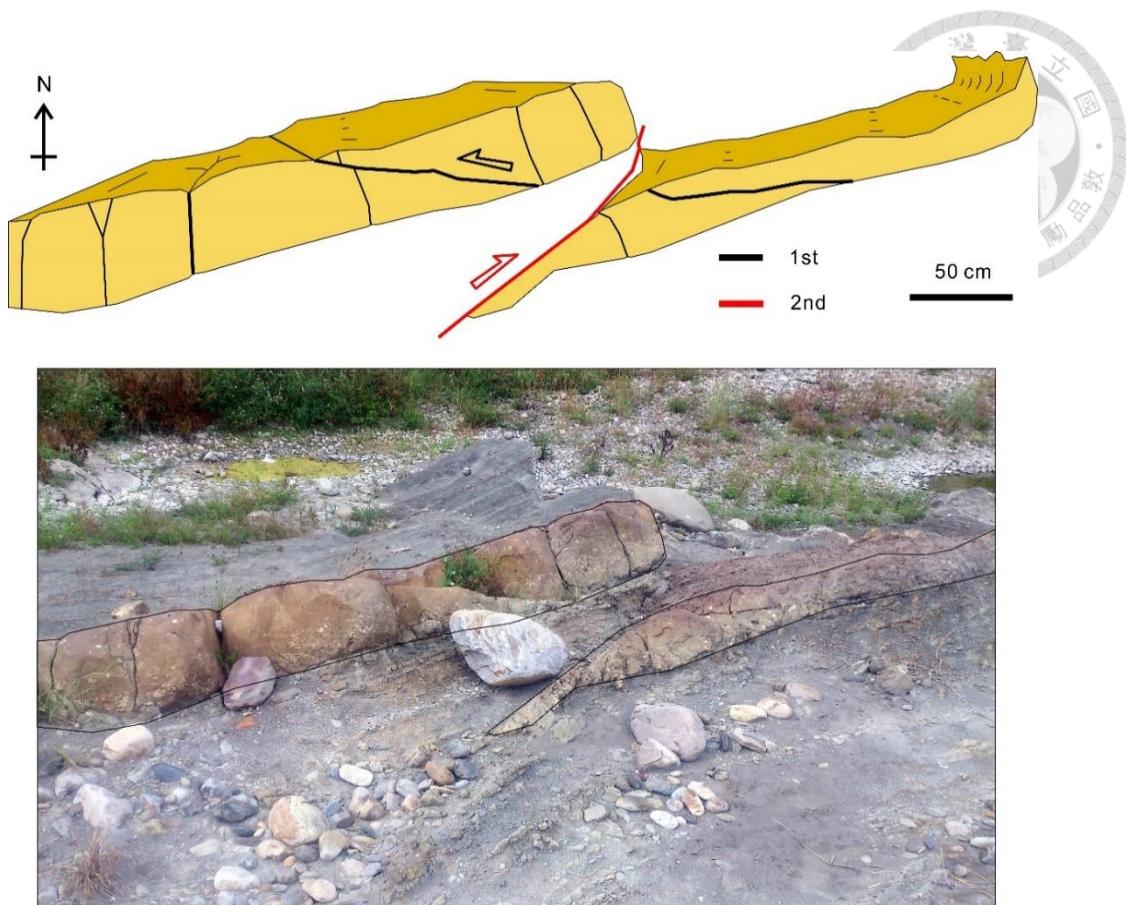


圖 3-1 野外露頭描繪範例之一，圖為 Site 11，描繪過後的露頭可以清楚地揭示其斷層、節理、截切順序與特色。

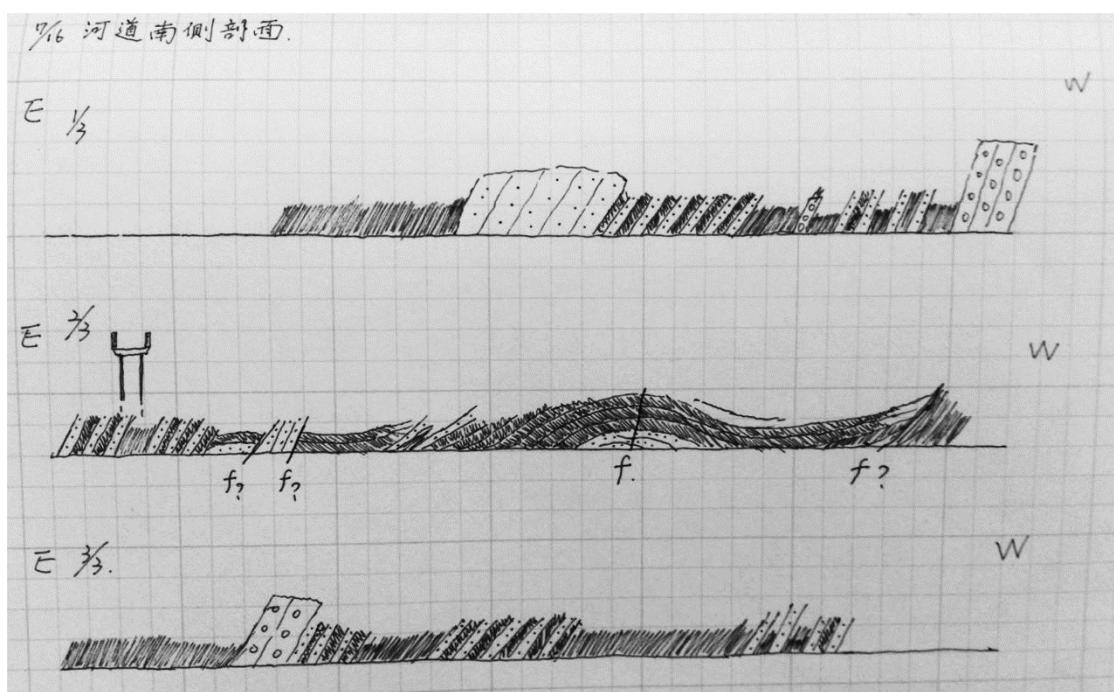


圖 3-2 河道露頭剖面圖描繪範例之二，圖為河道南岸之連續露頭。



### 3-1-2 變形構造

#### 斷層擦痕

擦痕是一種常見之斷層面錯位構造，如圖 3-3 所示，我們直接觀察斷層面上的滑動現象並記錄之，一般而言有以下步驟：

##### 1. 斷層擦痕線性幾何方位及滑動方向判定

一個擦痕資料在空間中以三個元素來表示，包含斷層面之走向 (Strike)、斷層面之傾斜 (Dip) 及斷層面上擦痕之傾伏角 (Pitch)，或是以趨向 (Trend) 與傾沒角 (Plunge) 來表示 (圖 3-3)。在量測過程中，操作並不困難，而儀器誤差及構造上不規則所造成滑動方向之誤差，也可由資料大量的收集而減小；然而最重要的是決定斷層滑動方向，若判定出錯，可能會導致後續分析嚴重錯誤。決定斷層滑動方向為直接觀察斷層面上的特徵 (Petit, 1987)，除了擦痕外，尚有一些滑移伴生構造能藉以研判斷層相對移動方向。常用來判斷之構造有下列幾種 (圖 3-4)：

(1) 再結晶礦物的階狀 (recrystallized minerals steps)：以再結晶之方解石 (石灰岩，鈣質沉積岩) 與石英 (石英砂岩) 為最常見 (Gamond, 1983; Elliot, 1976)。

(2) 張裂隙 (tension cracks)：由於剪裂作用形成的張裂縫隙，與斷層面夾約大於 45 度的角度。

(3) 雷多剪切 (Riedel shear)：由於剪切作用形成的裂隙，與斷層面夾約 15 到 30 度的角度。

(4) 由於斷層面不規則，使得有平滑面與粗糙面之構造。

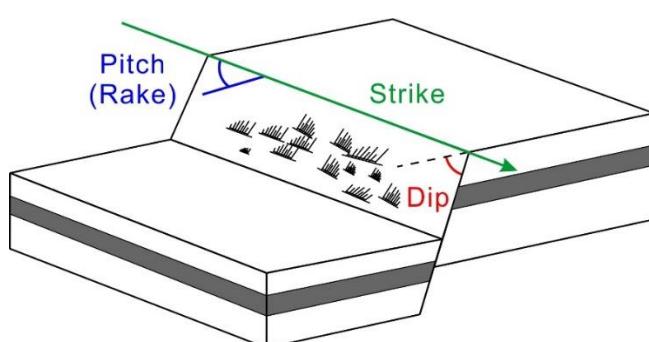


圖 3-3 斷層面特徵圖與測量要素，其中包含斷層走向、斷層面傾角及斷層擦痕之傾伏角。

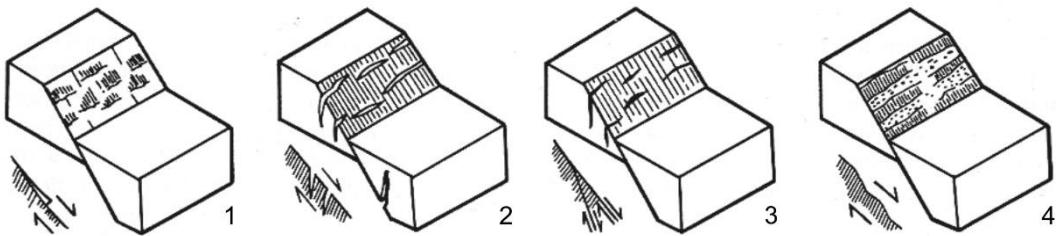


圖 3-4 判斷斷層面滑動方向的準則（引自 Angelier, 1994）。

在斷層運動所造成垂直與水平之位移形式，本研究以正(normal)、逆(reverse)、左移(sinistral)及右移(dextral)等定性名詞，來表示斷層幾何運動量和水平移動直量及水平移動橫量的關係，可是當斷層呈複雜曲面時，則需一些主觀的判斷。此外，對層面、節理與脈狀構造等一併度量，並視它們之間的關係，做變形事件演化及相對應力狀態分析之參考。針對斷層的規模與數量落差所給予的加權計算，本研究沿主要的斷層重覆度量，對於較顯著的露頭，記錄其大量的擦痕，反之小的斷層在露頭上僅提供較少的擦痕測量數據，如此不但能使我們對區域斷層之幾何型態有所瞭解，同時亦在經驗上和最近似之加權提供保證，因此在室內工作處理上，不再對斷層擦痕資料予以加權（Angelier, 1984）。

## 2. 初估應力主軸的方位

進一步的步驟是在野外估計主應力軸的方位，利用史密特下半球投影圖(Schmidt lower-hemisphere projection)，將所量測斷層元素表現在投影圖上。如果資料為共軛斷層(conjugate faults)，則可利用其幾何特性，由投影將應力軸估算出來，其幾何性質歸類如下(Angelier, 1994)：

- (1) 斷層面主要分佈於兩組資料。
- (2) 斷層擦痕約垂直於兩組面的交線。
- (3) 所有的主應力軸包含在此兩組面的交角之銳角的平分線上。



- (4) 此兩組面所夾之銳角角度為岩石力學係數。
- (5) 最大主應力軸的方位 ( $\sigma_1$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾的銳角平分線。
- (6) 次主應力軸的方位 ( $\sigma_2$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾之交線。
- (7) 最小主應力軸的方位 ( $\sigma_3$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾的鈍角平分線。

然而在野外如果沒有清楚的兩組共軛斷層面時，則可以用作圖法虛擬共軛斷層假想面，藉此估計主應力軸的方向；不過所得到的主應力軸方位誤差將較大。

### 3. 多次斷層變形作用定年

所觀察紀錄之斷層常可發現多次滑動現象，其具有不同型態與年代。關於界定斷層作用時間，White 和 Green (1986) 曾利用核飛跡法 (fission track) 來對斷層面礦物結晶定出絕對定年；然而一般情況要對斷層作用定出絕對年代相當不易。對於多次斷層作用或是構造作用，則可以考慮使用相對年代的方法判定其發生先後之順序。例如：疊置定律 (The Law of Superposition)、截切關係原則 (The Principle of Crosscutting Relations) 等。

若斷層發生於較老岩層中，而新的岩層覆蓋其上，此時要界定斷層時間是較容易。有時會伴隨著沉積同時的構造現象，如荷重鑄型 (Loading cast)、同沉積斷層 (Syn-sedimentary fault)，可指示沉積同時的構造活動。然而如果地層缺失嚴重且構造活動長期連續不間斷，將使斷層定年工作不易進行。如果老斷層被新斷層截切，抑或同一斷層面有擦痕疊置現象，則可作為判定斷層發生先後順序之有力指標，不過擦痕的疊置並不足證明有明顯事件或年代之差異。因為同一斷層面上，兩組擦痕也可在同一破裂變形運動過程中產生；也能因新裂隙產生而改變原來滑移方向 (Angelier, 1979)。Price (1966) 也說明，即使區域應力方向不變，這些應力也會促使新的斷層產生。所以，需要加入其他觀察來判斷觀察現象為一明顯地質事件，如同一斷層面上，兩組擦痕的力學來源不同，斷層種類不相同等等，這些變形關係不會很顯著，也不易尋找，特別是在滑動方向分佈很複雜之地區。



因此，要得到多次變形的順序，就得將同一斷層面上，兩組（含以上）的擦痕與僅有一組擦痕的斷層對比，先界定出其中已確定事件順序的擦痕，並且與附近地區的順序做比較，最後得到全部的順序。

根據以上原則，即可在野外獲得初步的古應力分期與古應力軸方位，由於對於地殼變形造山運動的研究，得知最大水平應力大約與板塊運動方向平行 (Anderson, 1951 ; Zoback et al., 1989)，且地表為一自由面，因此若大地應力作用於淺部地殼，其最大主應力軸應平行地表面（壓縮性應力）或垂直地表面（伸張性應力）。若某古應力系統之主應力軸偏離與地表平行與垂直的關係，則可推論此古應力系統遭受較晚期的構造事件（如褶皺作用）而致使地層傾斜，將其地層回復水平時，此系統亦應回復與地面水平或垂直的關係。相反地，若褶皺與斷層系統所求得之古應力方位不一致，而斷層系統結果與現今大地應力吻合時，則可以推估褶皺作用早於斷層作用發生，因此可以建立其交互作用與先後順序之關係 (Angelier, 1994)。

### 褶皺與節理測量

針對所觀察到的褶皺，我們主要記錄其波長和褶皺型態，並沿褶皺周遭測量位態的變化，回到室內後進行層面投影 ( $\pi$ -diagram) 分析以求出褶皺軸的方向，通常以趨向與傾沒角來表示；至於節理，則測量走向、與傾角。最後製成施密特下半球投影，並與斷層擦痕資料相互比對。

## 3.2 室內資料處理分析

### 3.2.1 斷層擦痕分析

使用斷層擦痕野外資料來反推滑移變形當時的應力機制，稱作古應力分析 (paleostress analysis)。此分析方法最早於 1970 年代在法國發展 (Carey & Brunier, 1974 ; Angelier, 1975; Armijo & Cisternas, 1978; Etchecopar et al., 1981)，例如應用於愛琴海 (The Aegean Sea) 附近之新大地構造運動 (Angelier & Mechler, 1977; Angelier, 1979)。近三十年來，利用古應力場分析進而建立台灣大地構造模型，也



取得許多不錯的成果 (Barrier & Angelier, 1986; Angelier et al., 1986; Lee & Wang, 1987; Angelier et al., 1990; Chang et al., 1996; Lacombe et al., 2004)。於野外收集資料後，可以回到室內利用電腦程式計算及分析，以下詳述：

### 1. 層面回復

分析所求得之應力場，在地殼變形過程中可能受到之後的構造作用，使地層傾動，不再為原先的水平，無法反映斷層作用當時的應力狀態，此時需將地層恢復到傾動或褶皺前之位態，方能得到斷層作用當時應力之幾何方位，分下列兩種情況討論：

#### (1) 新形成之斷層 (Neo-formed faults)：

有關共軛斷層的地層復原比較容易，基本原理為將應力軸旋轉校正到水平或是垂直方向。另一個比較嚴謹的方法是，先將地層沿著褶皺軸作水平修正，再沿褶皺軸走向將地層作旋轉修正。

#### (2) 沿舊有破裂面再活動的斷層 (faults along pre-existing fracture)：

單就非共軛斷層來推算應力方向是很困難的；較正確的方法是將其與已確定的褶皺軸方位之斷層做比較，如有相關聯則依其地層修正之方式來操作，步驟如圖 3-5 所示。

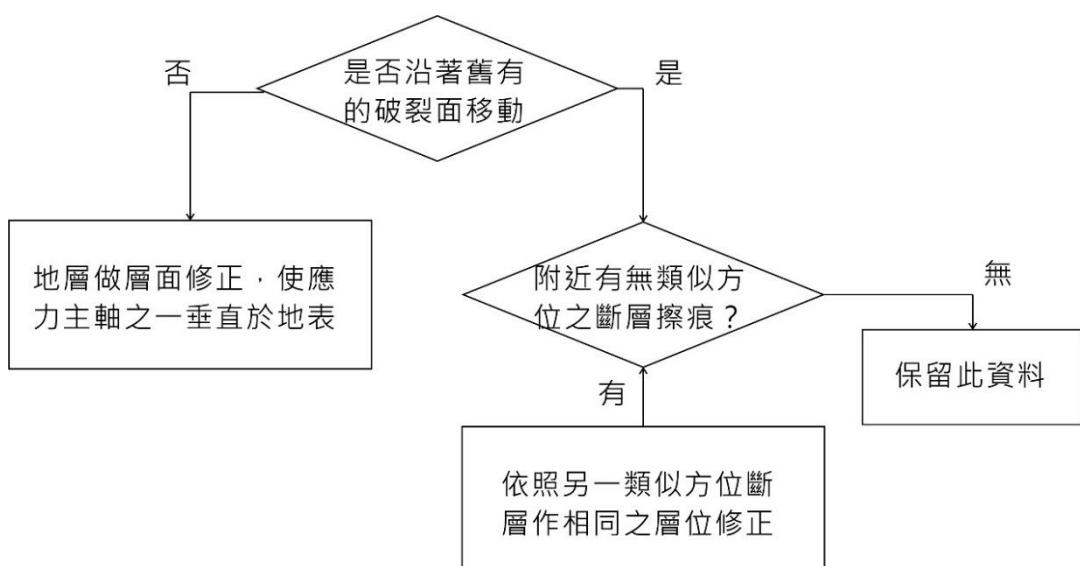


圖 3-5 非共軛斷層之斷層擦痕作層面修正之操作步驟 (引用自 Angelier, 1994)。



## 2. 計算簡化應力張量

本研究之「簡化應力張量」(Reduced Tensor) 是採用由 Angelier (1984) 所提出的應力反演計算方法，包括直接反推法 (Direct Inverse Method) 及反覆搜尋法 (2-D and 4-D Search Method)，多年來已廣泛用於野外斷層擦痕及地震斷層面解的應力反演分析。本研究主要利用 FaultKin 7.0 與 T-tecto 3.0 兩套軟體進行計算，將前述斷層面之元素資料輸入電腦，經計算可得到主應力之最佳方位解及軸差比 (Stress ratio,  $\Phi$ )：

$$\Phi = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

其中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分別為最大、第二與最小主應力軸，而 Angelier (1975) 也提出 R (Ratio of principle stress differences)：

$$R = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2)}.$$

R 值範圍介於 0 到  $\infty$ ，其缺點為不知無限大之範圍究竟是多少？將難以判別所量測的斷層為何種形式。 $\Phi$  的好處是介於 0 到 1 間，利用  $\Phi$  值可簡單且快速知道所量測的斷層應力型態。如  $\Phi$  值趨近於 0.8 ( $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  大小接近)，則有可能為：(1) 正斷層型態帶有橫移分量 (垂直軸與水平軸互換，圖 3-6) 或 (2) 逆斷層有多組斷層面並顯示有多方向的最大水平應力 (水平軸與水平軸互換)； $\Phi$  若趨近於 0.2 ( $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  大小接近)，則有可能為 (1) 逆斷層型態帶有橫移分量 (水平軸與垂直軸互換，圖 3-7) 或 (2) 正斷層有多組斷層面並顯示有多方向的最小水平伸張應力 (水平軸與水平軸互換)。

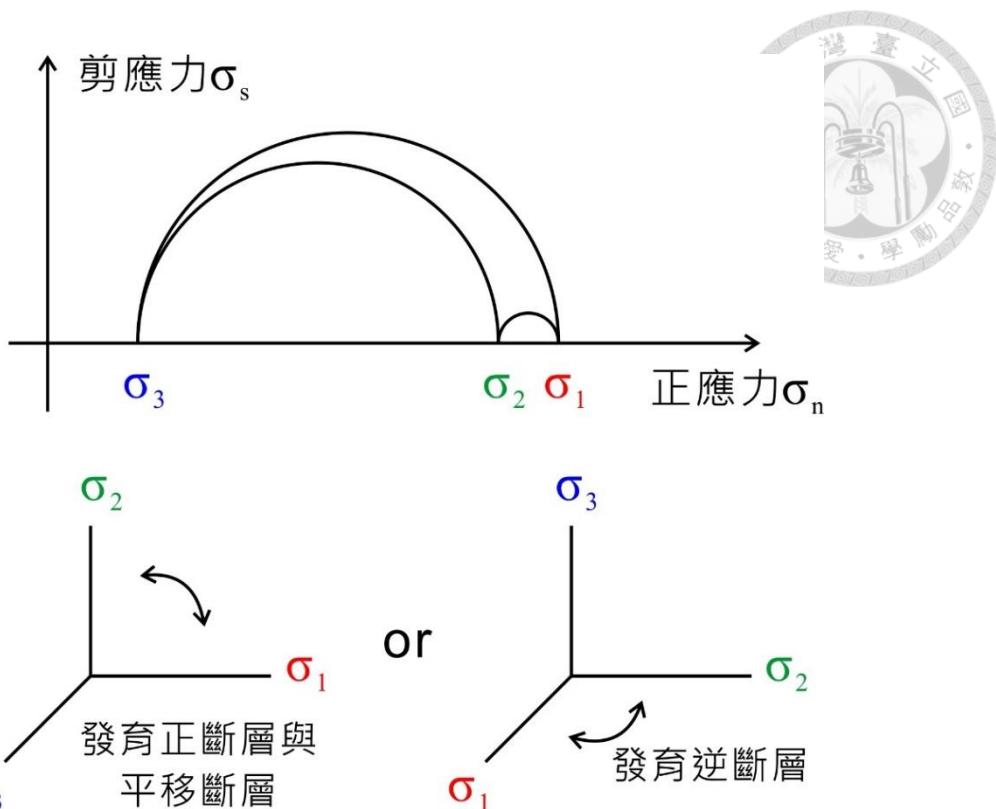


圖 3-6 應力轉換圖 (I)，當  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的大小很接近時， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的位置有可能會互換，此時  $\Phi$  值會接近 1 並有兩種可能。

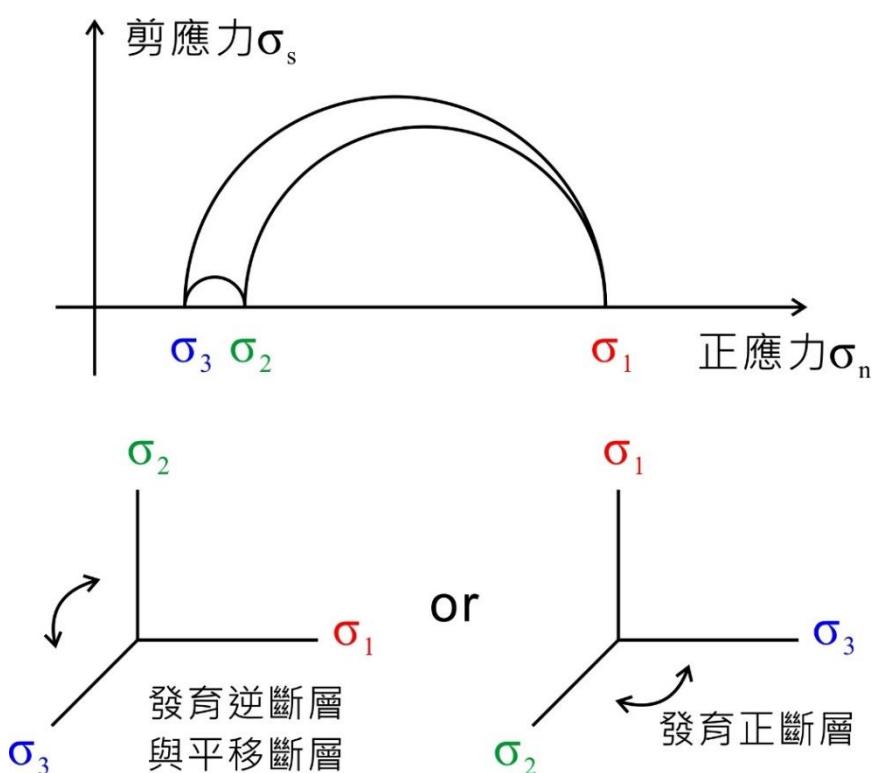


圖 3-7 應力轉換圖 (II)。當  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的大小很接近時， $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的位置有可能會互換，此時  $\Phi$  值會接近 0 並有兩種可能。



### 3. 建立區域性構造運動

藉由露頭觀察及量取斷層擦痕，再由實驗室工作分析出研究區域斷層構造與斷層分期，及不同期斷層作用對應之應力型態，即可進行區域構造特性及演化研究。從幾何運動學或幾何力學角度，每時期的構造活動所造成的斷層破裂及滑移，在地層中皆可能留下記錄。然而區域對比時，不應只觀察焦點放在微構造或是小構造上，而要將研究重點放於大範圍斷層活動上，作區域通盤考慮，可對疊置構造作較正確之評估；反之只專注小構造的資料可能得到不客觀全面的地體構造解釋。另外，進行褶皺構造兩翼之勘查與比較 (Angelier et al., 1986; 1990)，藉由褶皺作用為指標，區分斷層作用在褶皺作用前、後，抑或同時發生。雖然褶皺作用不為一時間面，但在區域構造運動研究中，亦不失為一重要的參考指標，尤其在對受到褶皺作用或多期變形的構造活動特別重要。

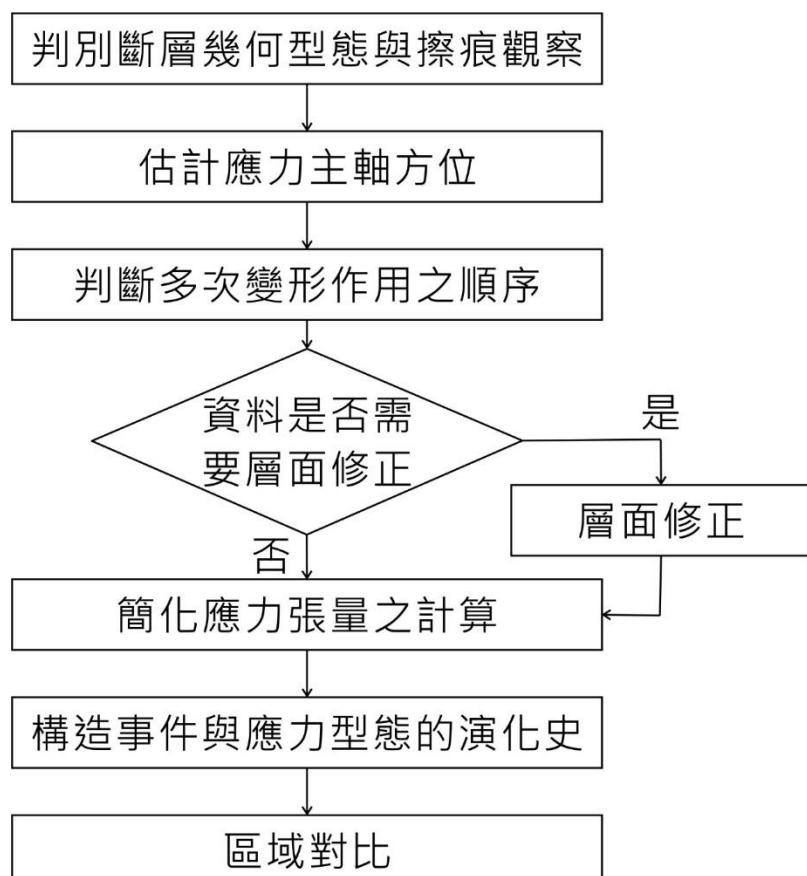


圖 3-8 斷層古應力分析方法流程圖（引用自 Angelier, 1994）。

### 3-2-2 軟體介紹

#### FaultKin 7.0

FaultKin 7.0 是一個用於斷層運動學分析的軟體 (Marrett and Allmendinger, 1990)，將在野外已經確定的分期 (或混合各期) 資料輸入後，便能計算運動學之主應變三軸與簡化應變張量 (圖 3-9)，同時還可做層面修正。由於此程式僅提供計算功能，因此斷層擦痕的分期相當仰賴主觀判斷與野外收集資料的功力，否則便無法得到正確的結果。

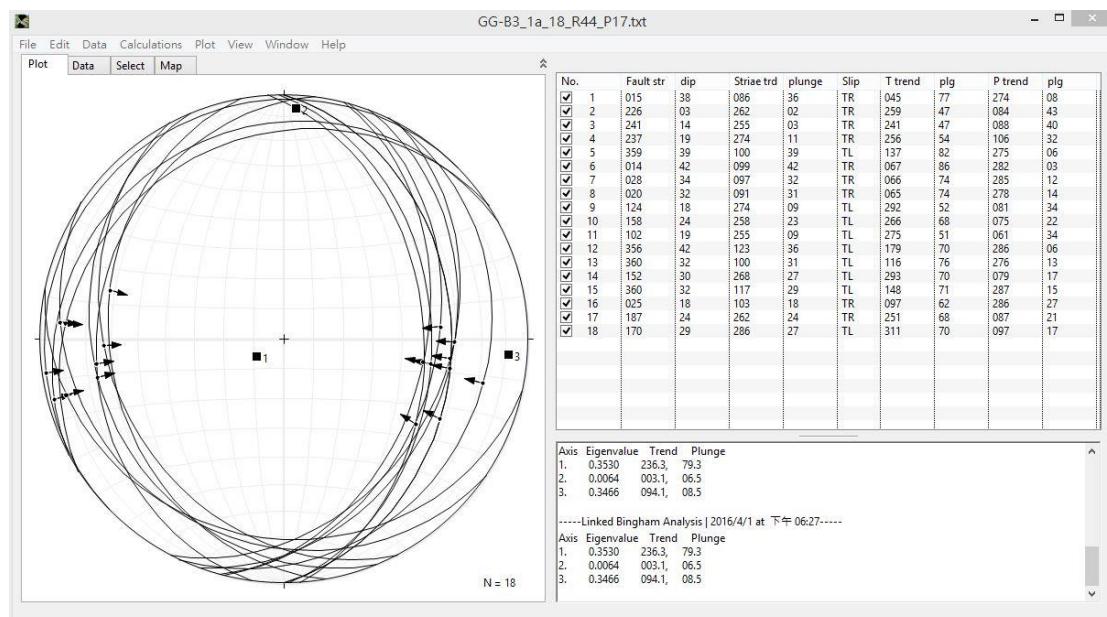
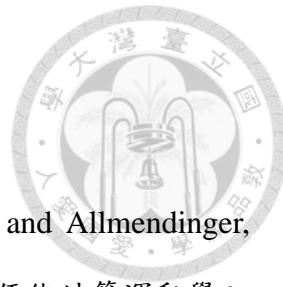


圖 3-9 FaultKin 7.0 軟體操作示意圖，此為 site 17 的計算結果，黑色正方形為主應變軸方位，結果以施密特下半球投影顯示。



### T-tecto 3.0

T-tecto 3.0 是一個多功能的軟體，如應力分析、應變分析（圖 3-10）、震源機制解解算、莫耳圓（Mohr circle）計算（圖 3-11）等等，最主要用於現今地震資料的應力場計算，但亦可輸入斷層擦痕的資料，並藉由層面修正的方式反演古應力場（Žalohar & Vrabec, 2007），我們將收集到的混合斷層擦痕資料，不經分期全數輸入，透過給定的相容角（Misfit angle），程式便會解算應力場空間，求取一最主要應力場 T0，並同時繪出莫耳圓，再將其中數量最多、最主控的擦痕資料挑選出來，並將其視為獨立的一期 T1。而其餘的資料則重覆上述步驟，直到確定不同方向的應力場 T2, T3……Tn 為止，需要注意的是，此分期並不代表事件發生先後，而是取決與主要應力場 T0 的歧異程度，因此對於應力事件的先後順序，必須先在野外先行確定截切關係，並透過 FaultKin 7.0 分期計算；至於野外無法確定是否分期的資料，也可運用 T-tecto 3.0 輔助分期。

因為應力事件順序與斷層擦痕群集已在野外先行確認，因此本研究於解算應力場時，選用之模式為”Classical”，相容角為  $180^\circ$ （即全體資料合併計算，無剔除資料的問題），資料品質為”2”（良好且明顯可辯認），其餘選項無更動。而解算後的資料，再依前述操作流程進行層面回復與應力張量計算，便可得到分析之結果，詳細內容將於第五章詳述。

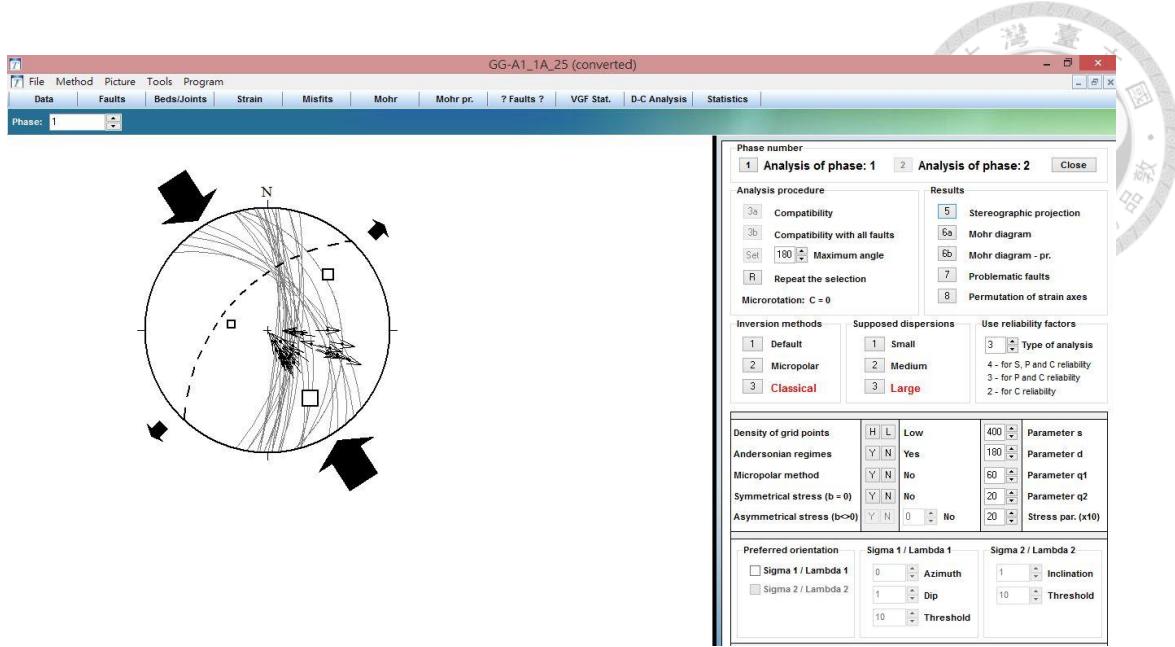


圖 3-10 T-tecto 3.0 軟體操作示意圖 (I)，透過給定的相容角，程式中的”應力分析”功能變成解算最佳之應力與應變場。

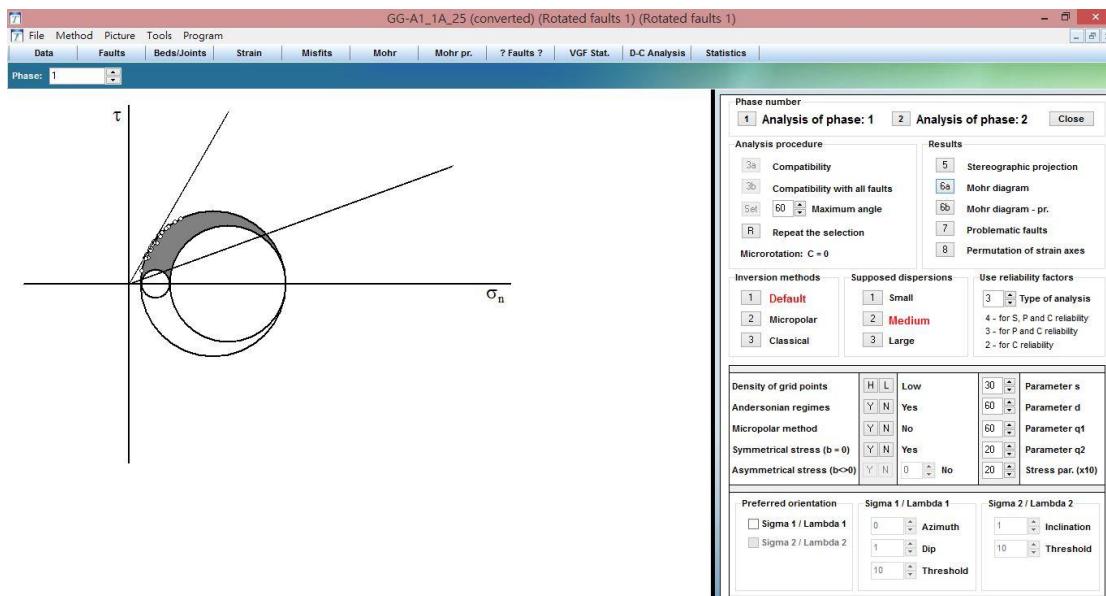


圖 3-11 T-tecto 3.0 軟體操作示意圖 (II)，透過程式中的”應力分析”功能，便能解算最佳之應力場與莫耳圓。



## 第四章 野外露頭地層分層與構造特徵

### 4-1 野外地層對比

進行岩層對比時，首先尋找並確定可進行對比的標準岩層，進一步確認區域內所有岩層之上下年輕方向，最後輔以其他地質證據（例如岩層厚度、地層序列特徵等）進行比對，繪製地層柱（圖 4-1）與區域地質圖（圖 4-3）。基於野外觀察與前人地層研究（吳樂群，1986；黃奇瑜，1986；羅偉等人，1999），研究區域內所見之厚黃砂岩很可能均為同一層（圖 4-2），在此認知下，可由老到新，依序分辨出 A-F 六種不同的指示層或岩層組合序列，分別描述如下：

**A 序列：**一層約 30-50 公分厚之砂岩，新鮮面呈青灰色，風化時為黃棕色，富含生物碎屑，其中多為破碎的貝殼或螺類，顯示此為再積性堆積，利用生物碎屑的層位（較重殘骸在底部）可以確定岩層的年輕方向。

**B 序列：**一層厚黃砂岩：約 8-10 公尺，是本研究地層對比的基準，新鮮面呈青灰色，風化時為黃棕色，於頂部約 60 公分富含生物碎屑與滿月蛤，由於它們的主要成份方解石是斷層擦痕的重要材料，因此露頭上亦有大量的斷層擦痕可供量測。此層於中部具明顯的交錯層，底部則有同沉積變形的構造，加上質地堅硬，在地形上常呈現凸起地貌，因此選擇以此層為對比指準層。

**C 序列：**主要有 2-4 薄層砂岩（粉砂岩），厚度在 20-50 公分不等，顏色為深灰色，具有生痕化石可供判別地層年輕方向。

**D 序列：**主要有三薄層砂岩（粉砂岩），厚度分別為 1 公尺、2.5 公尺、1 公尺，顏色為深灰色，本層沒有特別的沉積構造以供判別岩層年輕方向，底部常有球形結核，在相同層位地區亦有呈現分支管狀分布者，但根據王士偉等人（Wang et al., 2006），此現象應為冷泉碳酸鹽岩，僅指示該沉積環境，無法做為地層對比依據。

**E 序列：**主要為三層薄層砂岩所組合而成，厚度分別為 0.5 公尺、3 公尺、0.5 公尺，顏色為青灰色，有生痕化石可供判別岩層年輕方向。



F序列：約 40-50 公尺砂岩，是地層對比的另一個指準層，此層位於猴洞坑層中部，常造成地形凸起且連續性佳。

透過掌握各單層的特性與其序列，我們得以建立龜溝地區烏溪河床的地層柱（圖 4-1），厚度約 200 公尺，若加上更年輕的福隆園層（約 300 公尺）以及國姓地區出露的桂竹林層（約 150 公尺），國姓區域地層總厚度約在 600 到 700 公尺之間。

將地層分層後並與區域地質圖（羅偉等人，1999）地層相互對比，在龜蒲斷層上盤 1 公里處，亦即本研究路線圖的主要的地層單位，應該歸為石門村層的上部與猴洞坑層。國姓圖幅的資料雖然將本研究區域畫為全新世之河床沖積物（其南北延伸為猴洞坑層），事實上，直到 2008 颱風季後，河床底岩才洗涮出露，也才得以發現此露頭，及許多精彩的變形構造，如斷層、褶皺等，直至西緣的龜蒲斷層帶與雙冬斷層。

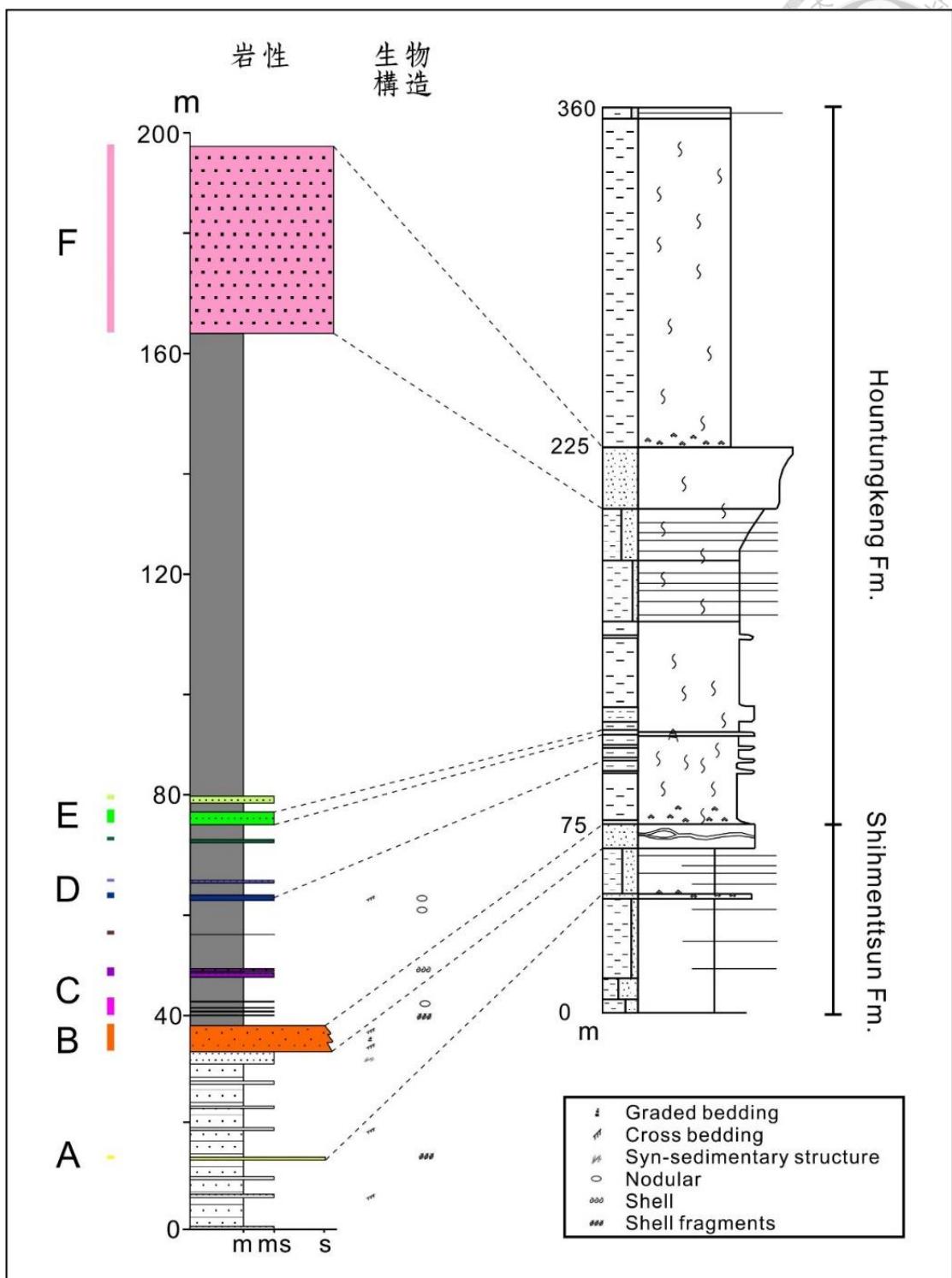


圖 4-1 國姓龜溝地區之地層柱，左半部為野外所建立之地層柱，並與右半部吳樂群所建立之地層柱對比的結果（修改自吳樂群，1986）。

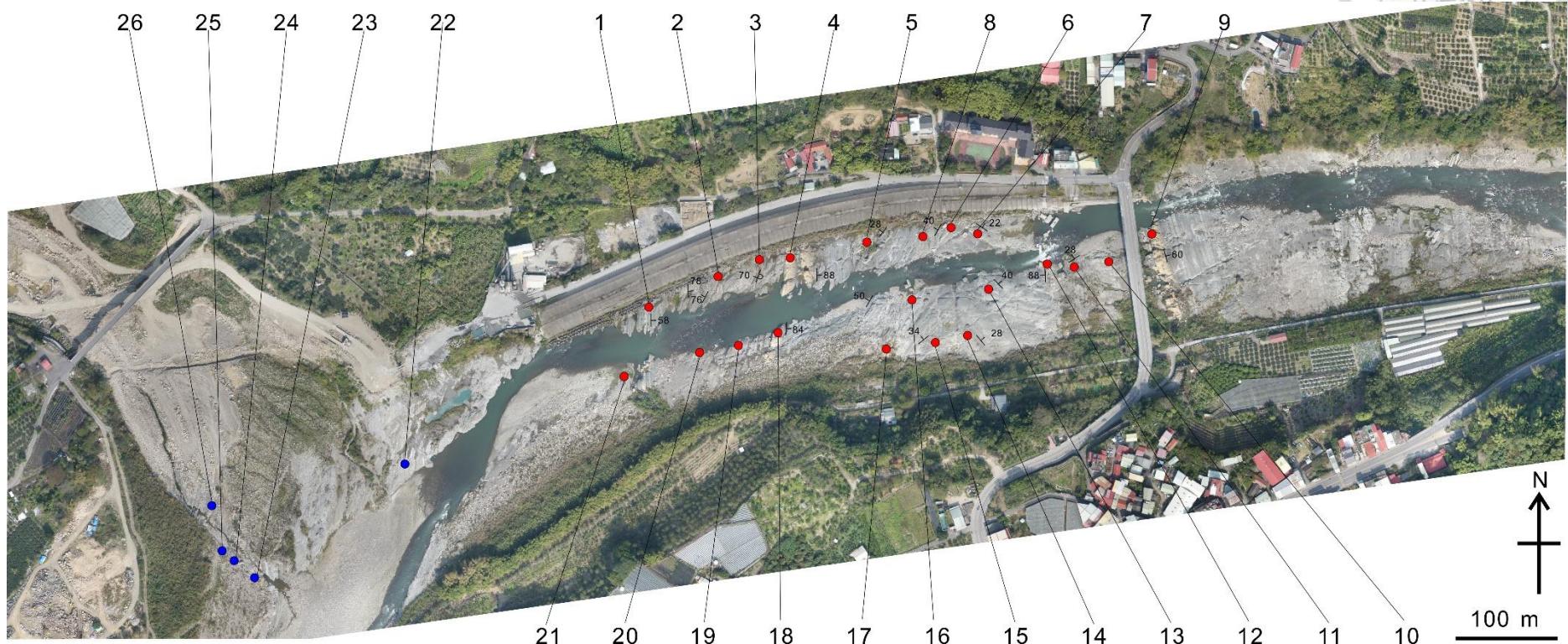


圖 4-2 龜溝地區 UAV 航照圖與露頭點，編號 1-21 位於龜蒲斷層上盤，主要為擦痕測量點；編號 22-26 位於龜蒲斷層帶，主要為野外露頭。

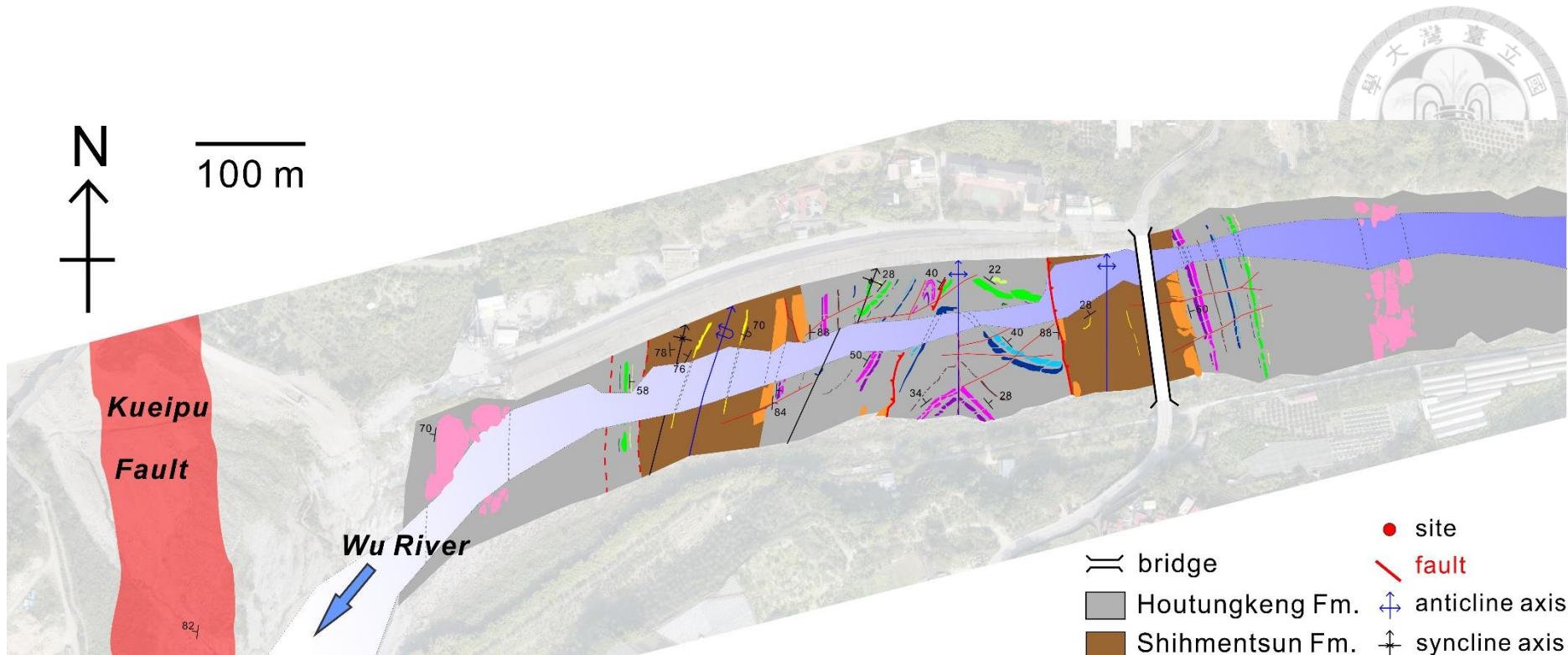


圖 4-3 龜溝地區地質圖（烏溪河床範圍），箭頭為烏溪之流向，單層岩石之分類與顏色參考圖 4-1 之地層柱。

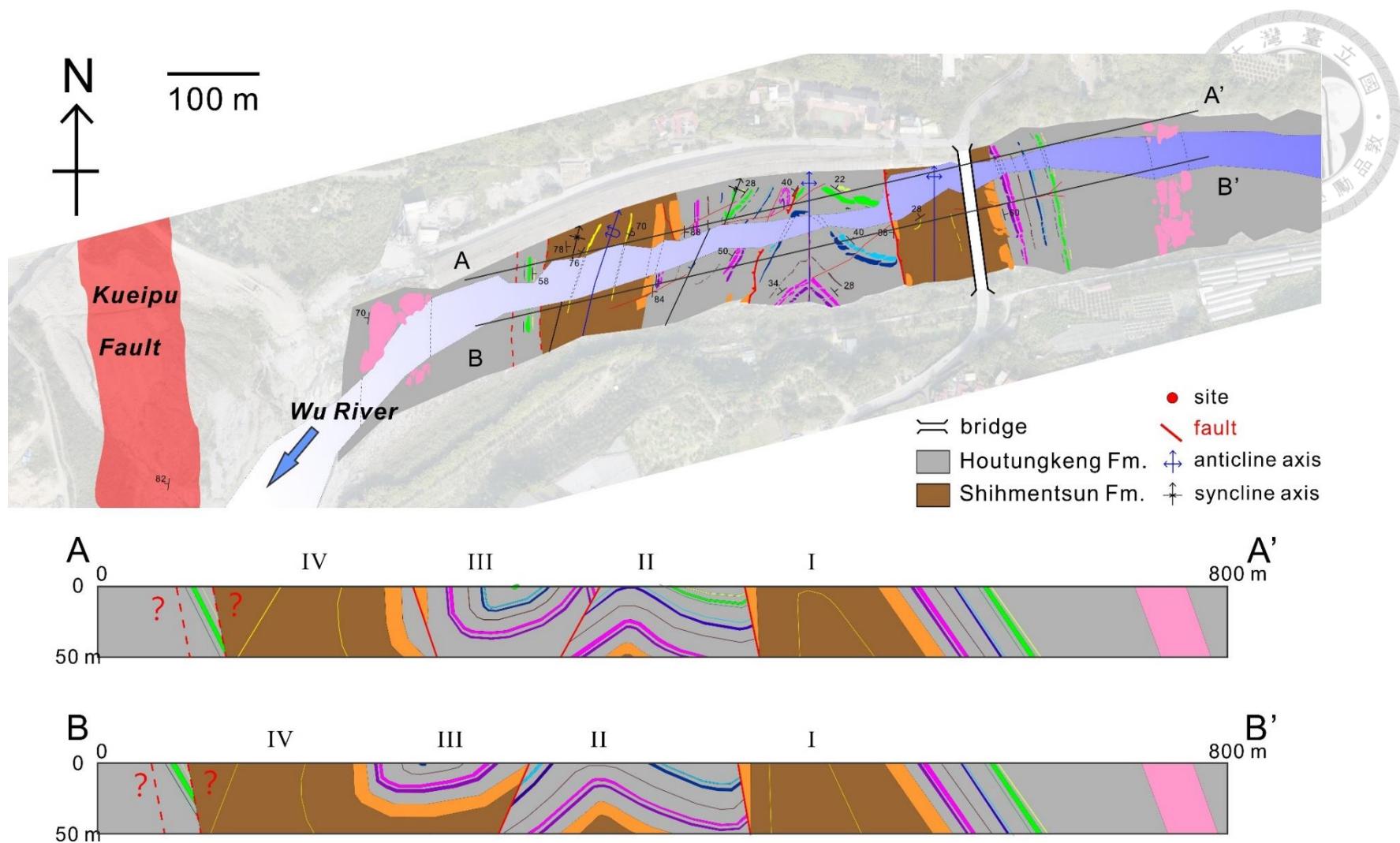


圖 4-4 龜溝地區河道兩岸構造剖面。分別以 A-A' 及 B-B' 表示，構造單元 (I-IV) 如圖所示。



## 4-2 構造單元分區

我們將此長約 1 公里的露頭繪製成地質剖面（圖 4-4），並分成數個構造單元。以下就數條斷層（龜蒲斷層、F1、F2）與褶皺單元分區（I-IV）做詳盡敘述。

### 4-1-2 構造單元 I

構造單元 I 位於乾峰橋下，此區所見最明顯之岩石為 B 序列的厚黃砂（Site 9，圖 4-5），在底部可以觀察到同沉積構造如正斷層錯移、荷重構造等等（圖 4-6），顯示地層在成岩作用之前已有早期地質作用，同時亦可以幫助我們判別岩層年輕方向。另外，Site 11 還能觀察到露頭上有明顯的共軛斷層（圖 4-7）。



圖 4-5 乾峰橋下厚黃砂岩（B 序列），厚約 8-10 公尺；圖右為烏溪下游方向。

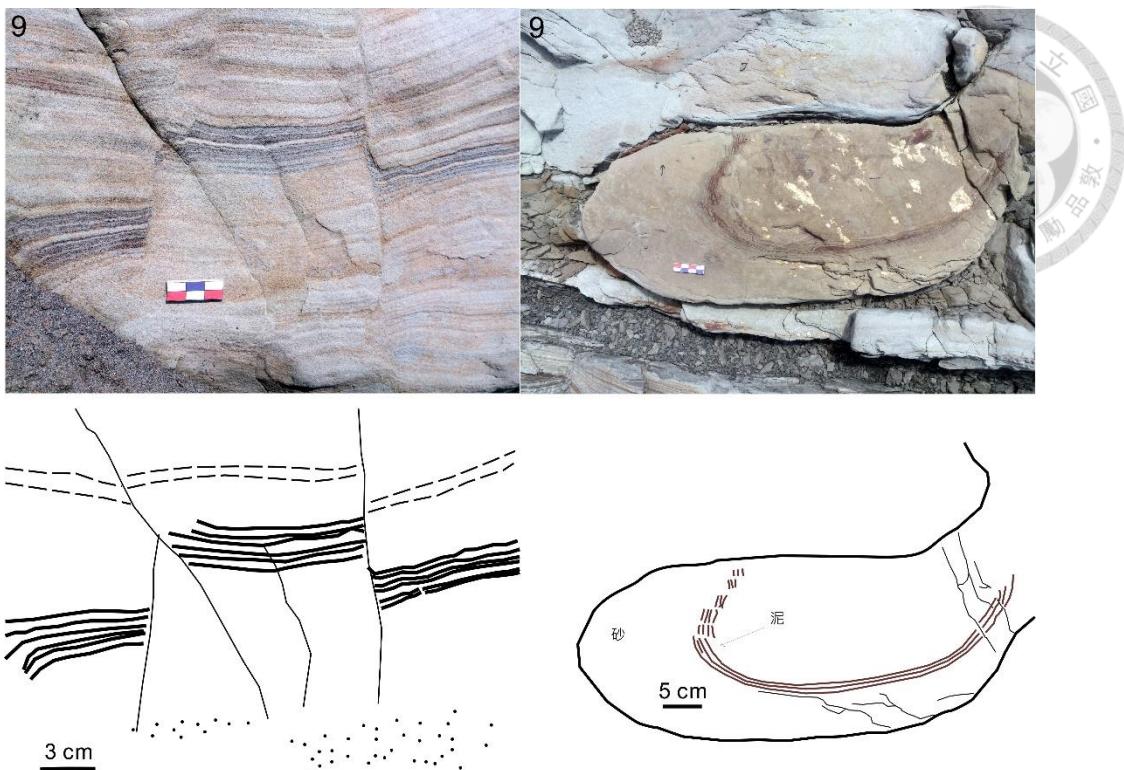


圖 4-6 Site 9 沉積構造與其素描，左：同沉積正斷層，錯移量約 3-5 公分；右：球枕構造，為荷重鑄型的一種。

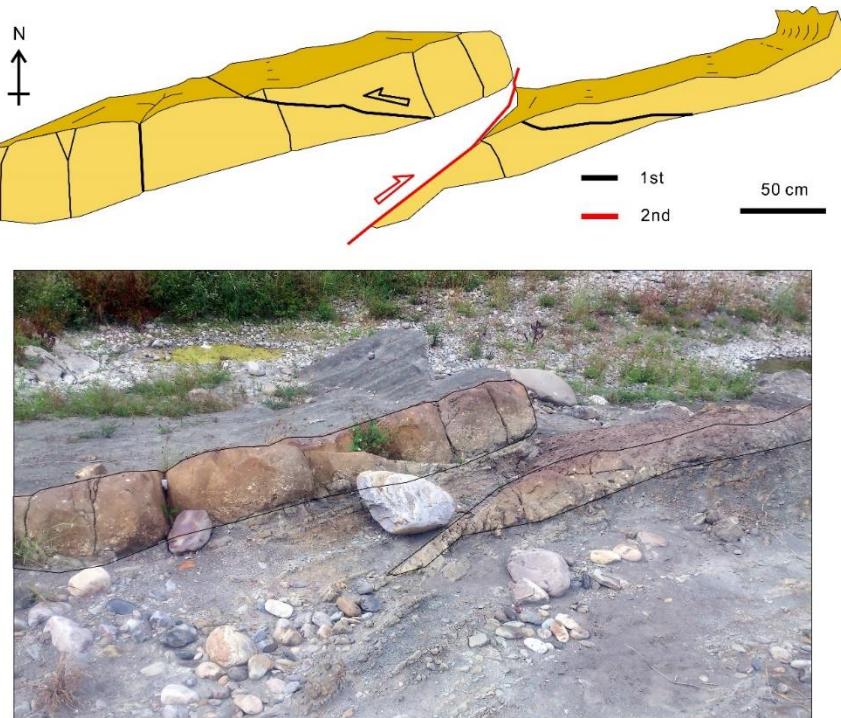


圖 4-7 Site 11 (A 序列) 露頭素描，圖中顯示節理、早期的共軛斷層與其截切關係，向西逆衝斷層先發育，向東逆衝斷層後發育。

在構造單元 I 褶皺的軸部，還有次生構造，包括了兩組背斜與一組向斜（圖 4-8）。這些次要褶皺主要發育在較薄層的砂層中，顯示褶皺的波長與振幅取決於構造擠壓程度、岩性差異與層厚，同時在強烈褶皺作用中，軸部的岩層由於適應空間的改變而產生厚度變化與緊密的次生褶皺（圖 4-9）。本研究針對這些褶皺進行層面位態投影（ $\pi$ -diagram）分析，結果顯示它們都是南北趨向並且向北傾沒，我們以資料最完整的褶皺（圖 4-8，編號 1 和 1''）作為構造單元 I 褶皺的代表（圖 4-10），整體而言，構造單元 I 褶皺為一褶皺軸趨向朝北，向北傾沒的不對稱緊密褶皺。

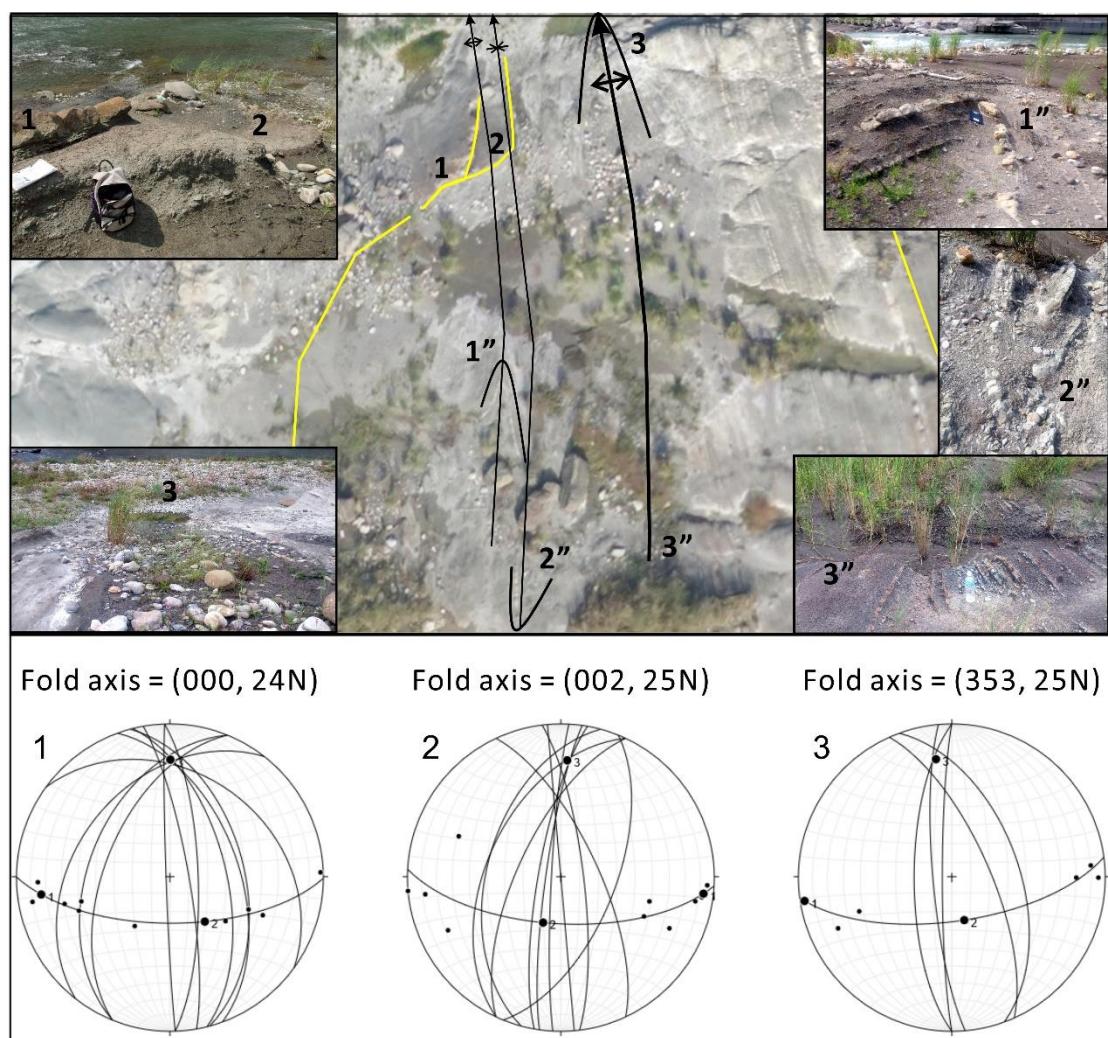


圖 4-8 構造單元 I 與三個小型次生褶皺，以編號 1、2、3 表示，其延伸則以 1''、2''、3''表示。黃線為指示層小黃砂岩（A 序列），下方為不同褶皺的史密特下半球投影分析結果。



圖 4-9 (左) Site 11 (A 序列) 因擠壓而產生的小波長褶皺與層厚改變。

Domain I  
axis = (000, 24N)

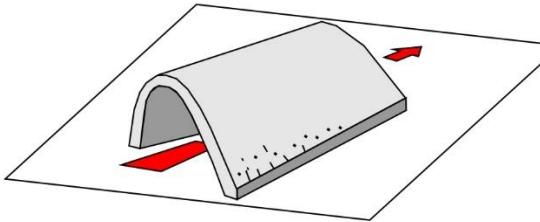


圖 4-10 (右) 構造單元 I 褶皺示意圖。

#### 4-1-3 構造單元 II

構造單元 II 構造型態相對單純，是一個幾近對稱的開闊褶皺。本區最重要的指準層為 D 序列與 E 序列（見圖 4-1 地層柱與圖 4-3 地質圖），其中 D 層分布在南北兩岸，翼部在南岸而軸部在北岸（圖 4-11），主要的岩性為泥岩與砂岩（或粉砂岩），其中泥岩因風化作用，層理已無法辨認（圖 4-12），尋找岩層年輕方向的途徑是利用砂岩中的交錯層。在南岸，褶皺軸部有一明顯的斷裂（圖 4-11），為一左移斷層，滑移量約 3 m；北岸則是疊瓦狀的小型逆斷層堆疊為主要產狀。

與構造單元 I 相比，本區之擦痕相對較少，主要出現在砂岩上，這是因為砂岩受擠壓應力所反映的行為是破裂作用，因此方解石熱液得以充填在破裂面裂隙之中；而泥岩中主要的受力行為是變形作用，顆粒排列緊密，因而不易充填方解石熱液。然而在野外觀察中，泥岩層內偶爾有擦痕以不規則脈狀散布，顯示泥岩層內含有水力破裂之裂縫，此現象暗示本區域在構造演化過程中，液壓對於這些方解石脈的生成扮演重要的角色。此外，有些脈中的擦痕可以發現一期以上的滑痕，但因為風化的緣故，無法辯別其截切關係（圖 4-12），層面投影（ $\pi$ -diagram）分析顯示與構造單元 II 褶皺軸趨向為南北向，向北傾沒 20 度（圖 4-12）。



圖 4-11 構造單元 II 整體樣貌與軸部破裂，其中 D 層翼部在南岸而軸部在北岸。

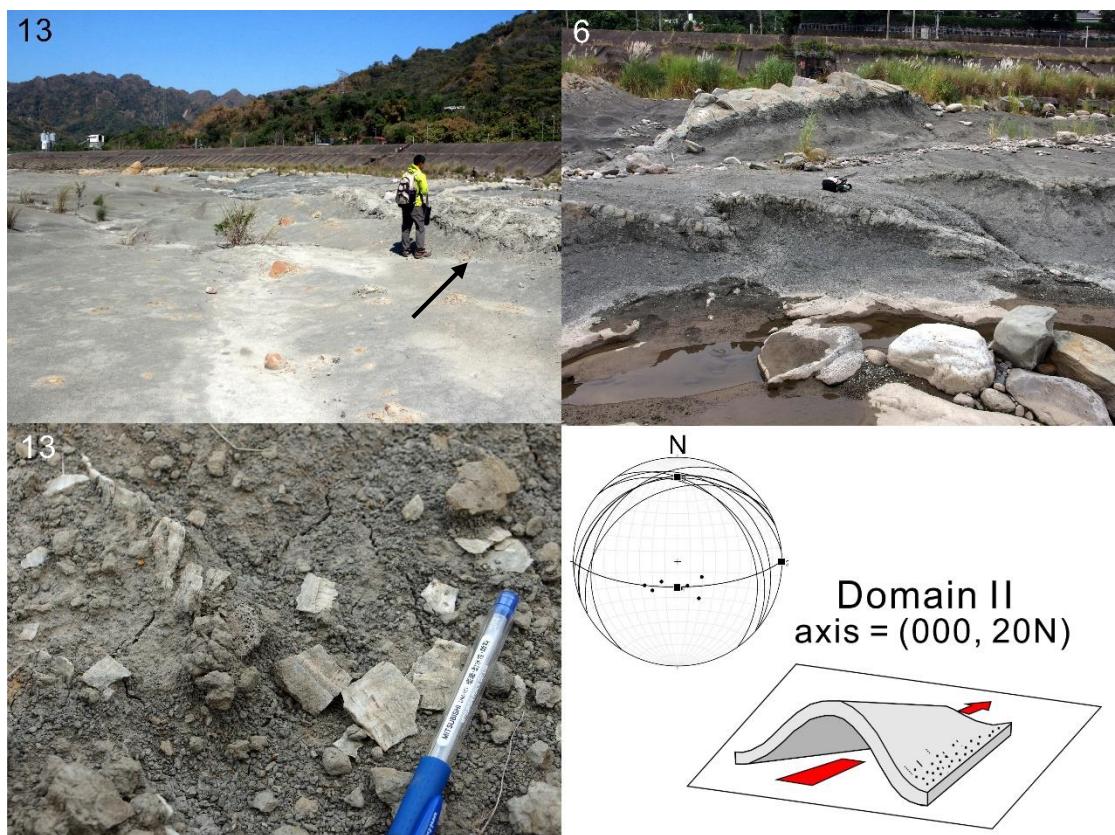


圖 4-12 左上：構造單元 II 南岸被風化的砂岩 (Site 13，箭頭指示)，已無層理可供辨認。右上：構造單元 II 北岸軸部西側之破裂，可見斷層向西逆衝 (Site 6)。左下：散布在泥岩中不規則狀的擦痕，其截切關係難以判斷 (Site 13)。右下：構造單元 II 褶皺層面投影 ( $\pi$ -diagram) 結果示意圖。

#### 4-1-4 構造單元 III

構造單元 III 為一緊密的向斜，最主要可以判別的是 E 序列的厚砂岩（見圖 4-1 地層柱與圖 4-3 地質圖），不論從航照圖或是野外觀察，皆可在北岸發現明顯的地層褶曲（Site 5，圖 4-13），而南岸則較不明顯，主要是透過交錯層指示岩層年輕方向，並搭配明顯的生痕擾動做為輔助依據，以此找出軸部位置。在構造單元 II 與 III 的交界，我們觀察到小型的向東伸向褶皺（圖 4-14），經岩層對比後判斷為 C 序列的薄層砂岩（Site 8），此褶皺可能是因次生斷層發育時拖曳作用所導致，同時亦說明造成褶皺的波長變化主要取決於岩層的厚度。

在構造單元 III 中，北岸的 B 序列厚黃砂具有重覆堆疊的特性（Site 4，圖 4-15），從地層分布而言應為正斷層或右移斷層機制所致，並且在南北兩岸造成數公尺的錯移，因此應有一傾角非常低的斷層通過。層面投影（ $\pi$ -diagram）分析顯示構造單元 III 褶皺軸位態為 017/18N，為一伸向朝東，向北傾沒的向斜（圖 4-16）。



圖 4-13 構造單元 III 北岸向斜軸，可從薄層砂岩看出岩層明顯彎曲（Site 5），下方則有生痕化石可判斷地層年輕方向。



圖 4-14 因斷層拖曳作用而造成的小型拖曳向東伸向褶皺 (Site 8)。



圖 4-15 厚黃砂岩在北岸的重覆堆疊，應為正斷層或右移斷層所致 (Site 4)。

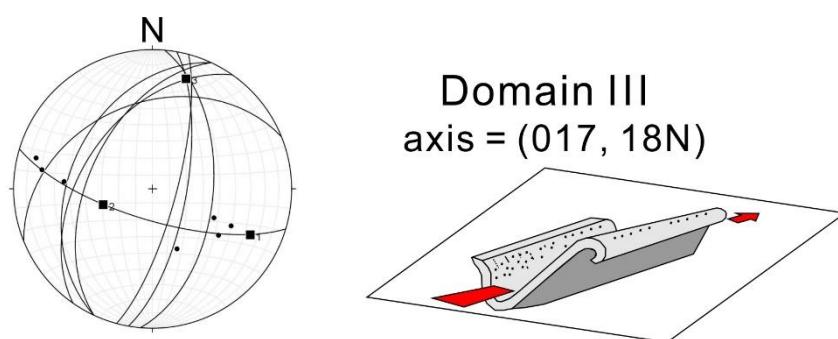


圖 4-16 構造單元 III 褶皺層面投影 ( $\pi$ -diagram) 結果與示意圖。

#### 4-1-5 構造單元 IV

構造單元 IV 的型態與前三個構造單元稍有不同，為一倒轉的偃臥褶皺（圖 4-17），組成為薄層砂泥岩互層，露頭雖經風化，型貌仍可辨認，主要的指準層為 A 序列黃棕色砂岩（Site 2、3、19、20）。其中軸部可以觀察到數條小型斷層切穿與岩層塌陷的現象，由於此處薄層砂泥岩互層常有厚度不一的情形，尚無法排除同沉積變形的可能，同時亦指示龜溝地區在構造演化中可能包含許多不同的地質作用。整體而言，構造單元 IV 倒轉褶皺的波長約為 60 m，層面投影( $\pi$ -diagram)分析結果為一向北傾沒的緊密褶皺（圖 4-18）。

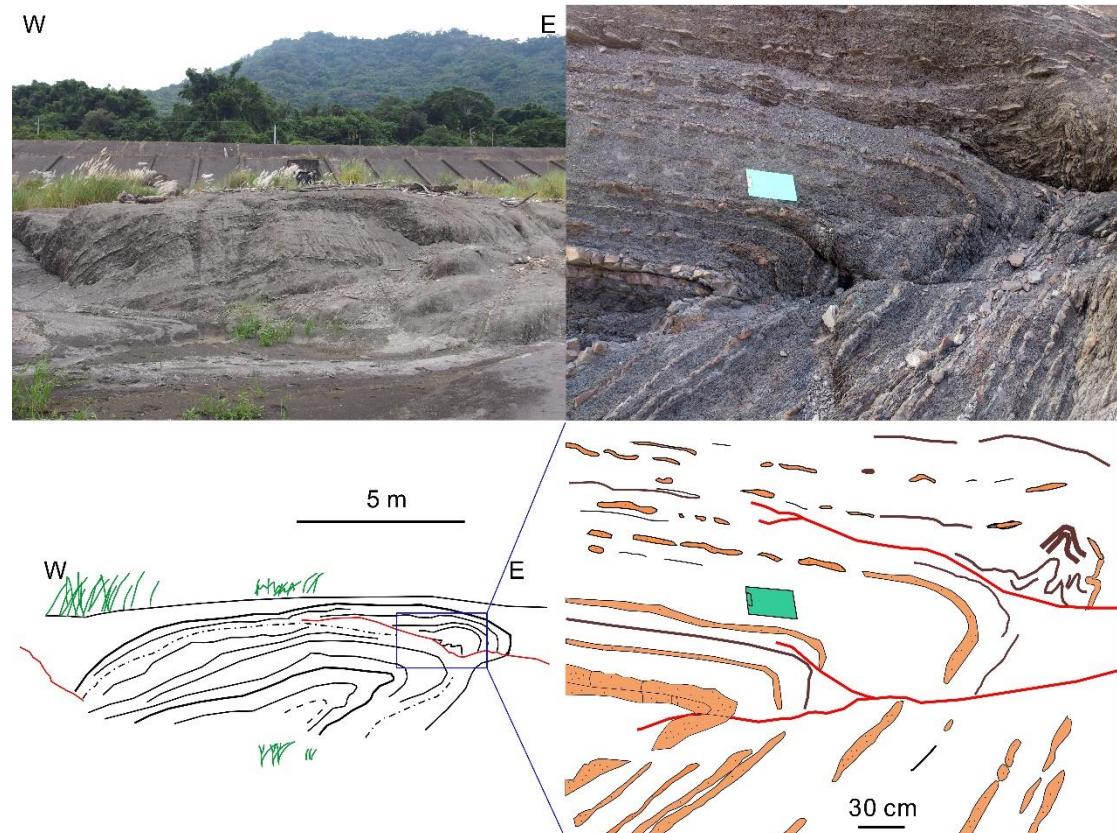


圖 4-17 構造單元 IV 露頭照與素描示意圖。

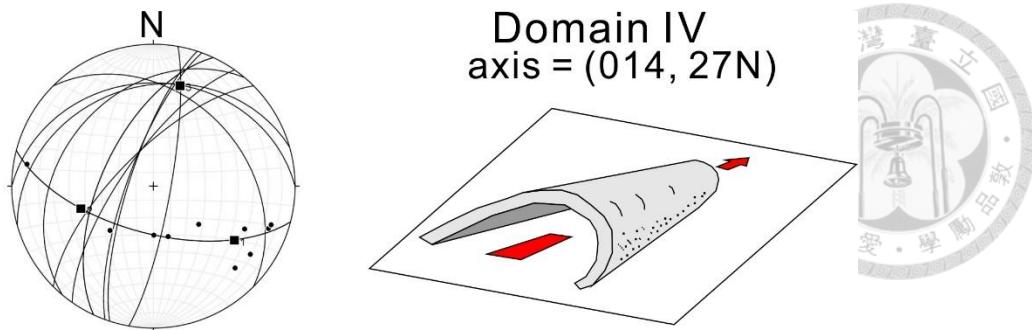


圖 4-18 構造單元 IV 之褶皺層面投影 ( $\pi$ -diagram) 分析結果與示意圖。

### 4-3 主要斷層帶描述

#### 4-3-1 F1 斷層

F1 斷層為分割構造單元 I、II 之間的不連續面，走向為南北向，其中 Site 12 的厚黃砂（B 序列）錯動面已被磨蝕為弧狀（圖 4-19），顯示此斷層經過較長時間的錯移。斷層面上的擦痕多為逆斷層擦痕，以 Site 12 上的斷層擦痕為基準，推測其為一高角度向西逆衝之逆斷層。

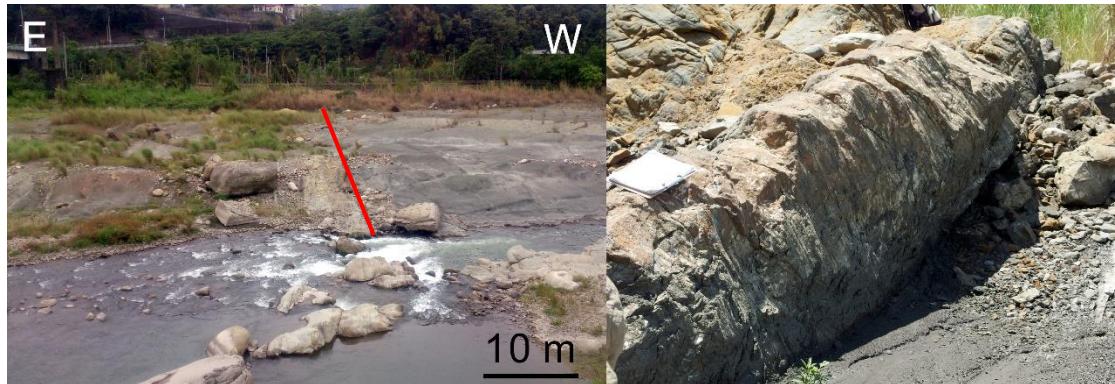


圖 4-19 F1 斷層（紅線）與其交界面，圖為南岸的 Site 12。

#### 4-3-2 F2 斷層

F2 斷層為構造單元 II、III 之間的不連續面，走向為東北-西南向，北岸 Site 6 的露頭顯示被 F2 斷層切穿，整個斷層帶寬度約 8 公尺（圖 4-20），斷層面位態 030/72W，推測其為高角度之逆斷層。



圖 4-20 F2 斷層帶與其交界面，圖為北岸 Site 6。

#### 4-3-3 龜蒲斷層帶

本研究沿龜蒲斷層帶跡線進行調查，大部份地區出露不佳，多為植被所覆蓋，或地形特徵不甚明顯，僅乾溪一號橋橋下河床露頭出露良好（圖 4-21）。在此地，剪切帶明顯出露，走向約為南北向，寬度約 100 公尺，層面位態為 025/82W，岩性主要為砂泥岩互層，偶有厚層鈣質砂岩或生物碎屑石灰岩。此處岩層遭強烈剪切與變形，導致通體破碎且不易找到延續性佳的指準層，沒有明顯的沉積構造指示岩層年輕方向。



圖 4-21 乾溪龜蒲斷層帶，主要岩性組成為薄砂泥岩互層。

本研究依照觀察結果，繪製一簡略路線地質圖（圖 4-22）。岩性上來看，此處應屬猴洞坑層上部至福隆園層（比本章節前述主要連續河岸露頭的地層年輕一些），本研究發現越接近龜蒲斷層帶，地層褶皺變形作用有增強的趨勢，Site 22 露頭位於龜蒲斷層東方約 200 公尺，此處顯示單層薄砂岩因東西向擠壓而產生南北向伸長的次生褶皺（圖 4-23），這種次生褶皺在此區域相當普遍，褶皺振幅甚至可到波長的十倍，顯示強烈的擠壓作用，但沒有特別的斷層剪切特徵，推測近似於純剪（pure shear）形變。

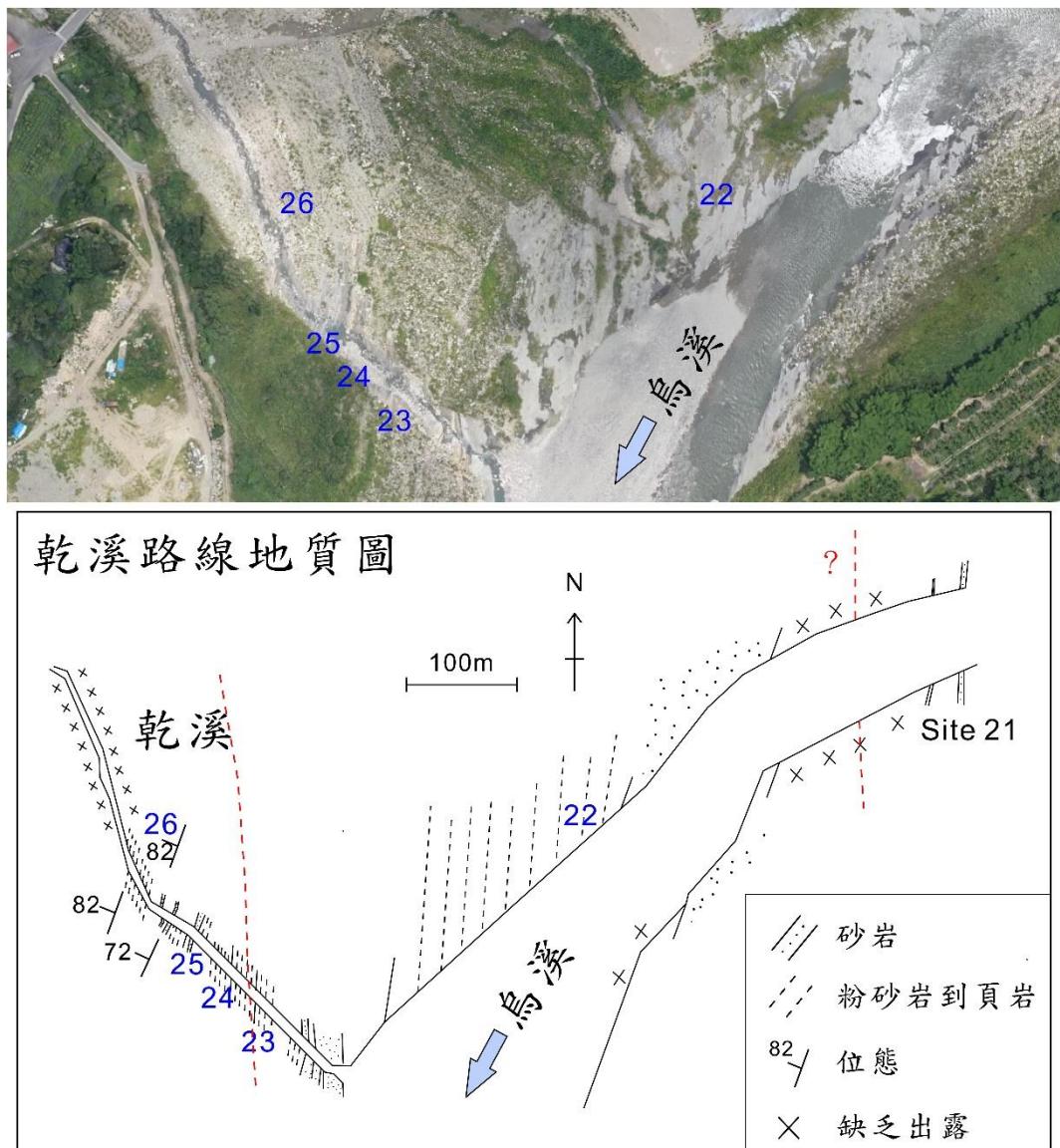


圖 4-22 龜蒲斷層帶 UAV 航照圖（上）與路線地質圖（下）。紅色虛線為斷層，其中左邊的斷層為國姓圖幅所推測龜蒲斷層之位置，數字編號為重點露頭。

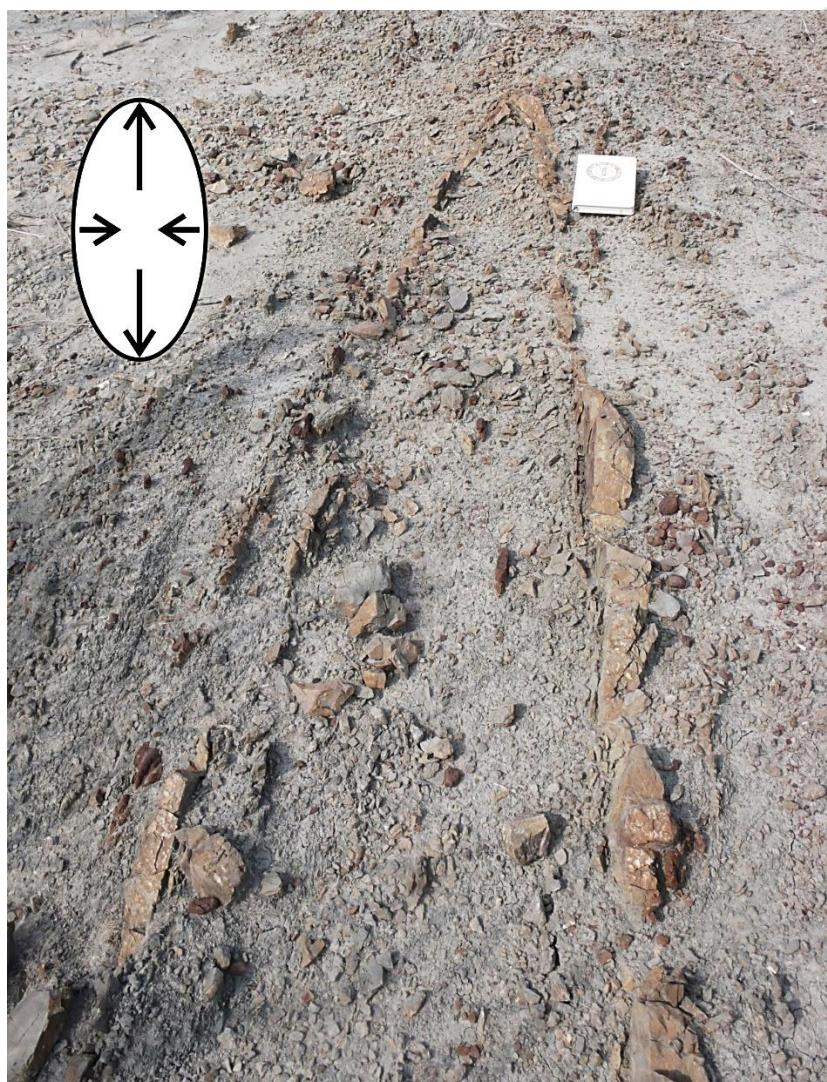


圖 4-23 猴洞坑層中的次生褶皺 (Site 22)，推測為純剪形變。

而露頭編號 23 至 26 皆位於乾溪，此處可以觀察到一些鈣質砂岩（或生物碎屑石灰岩），其生物殘骸與大型有孔蟲依舊清晰可見（圖 4-24），然而不論砂岩或泥岩，皆受到強烈的剪切與擠壓，軟層物質相對不易辨認，硬質的砂岩則被拉斷（剪斷）為一連串不連續且大小不一的串腸構造（圖 4-24），破裂面上的擦痕多帶有逆斷層或左移斷層之滑痕；而這些砂岩的形變亦可指示剪切型式為左剪（圖 4-24），代表龜蒲斷層在滑移過程中，距斷層帶不同距離的岩石受到的破壞與累積的應力並不相等。整體而言，本區為有左移分量的逆斷層剪切帶。

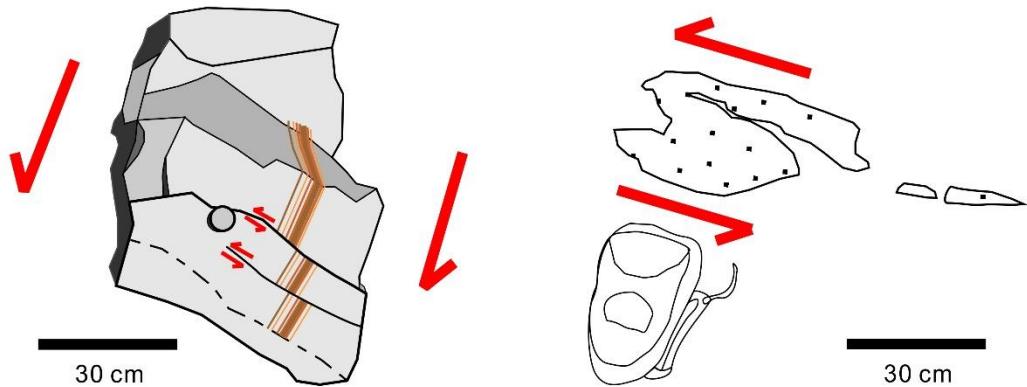


圖 4-24 左上：鈣質砂岩與內含生物殘骸，可能為方解石擦痕主要材料來源 (Site 23)。右上：被拉斷成串腸狀的砂岩 (Site 25)。左中、左下：龜浦斷層帶的左剪特徵與其素描之一 (Site 24)。右中、右下：龜浦斷層帶的左剪特徵與其素描之二 (Site 26)。



## 4-4 構造剖面與特徵

### 4-4-1 龜溝地區構造剖面與特徵

綜合上述露頭與構造分區之研究結果，本研究繪製河道兩側詳細的 2D 地質剖面（圖 4-4）。在距龜蒲斷層帶一公里處，上盤岩體發育出 3-4 個短波長的褶皺，其中有兩條中尺度的斷層（F1、F2）在此截過，可大致依照褶皺分布將本區分為四個子分區，即構造單元 I-IV。另外結合褶皺層面投影（ $\pi$ -diagram）分析之結果，本研究將龜蒲斷層上盤變形以一簡單示意圖表示（圖 4-25）。可以發現這些短波長的褶皺都具有向北傾沒的特性，暗示此處地層除斷層發育、抬升以及褶皺作用之外，還有一向北傾沒的事件，也許是岩體沿主斷層抬升時，在南北兩側的抬升量並不相等所致；從地形上來看，國姓地區的河階多位於河道南側，似乎可與龜溝野外觀察結果相映證，然而兩者事件涉及不同時間尺度，解釋上需特別謹慎。

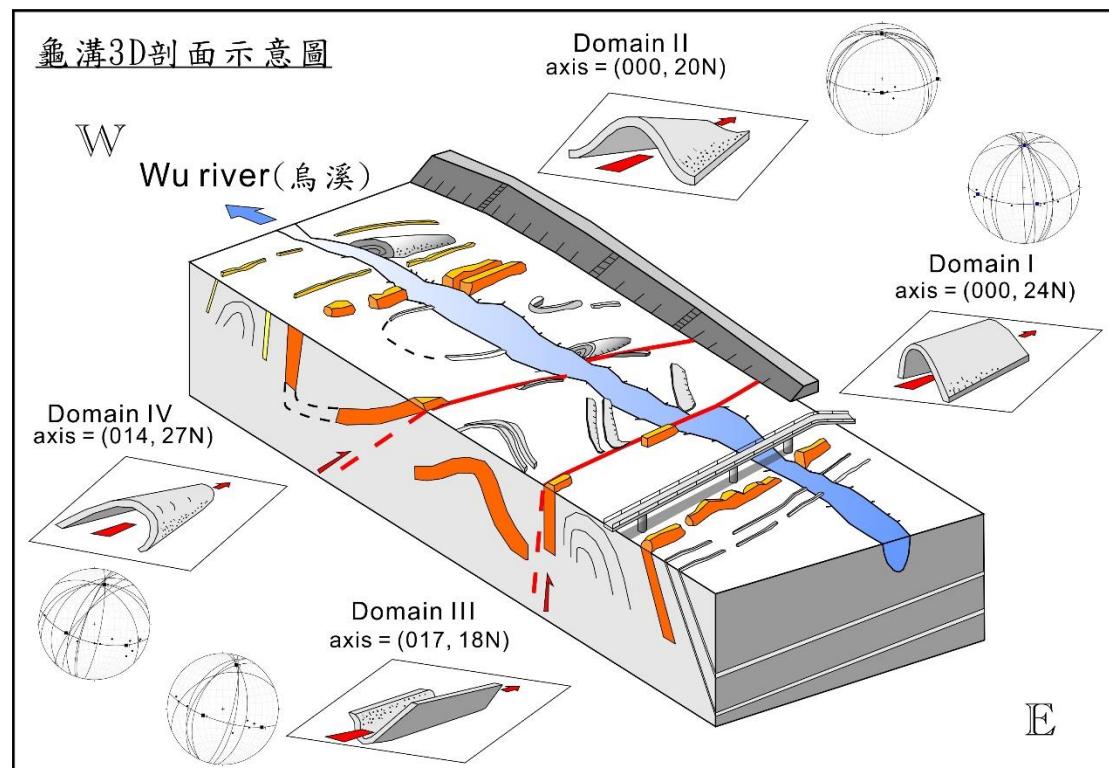


圖 4-25 龜溝 3D 剖面示意圖。

#### 4-2-2 雙冬斷層上盤構造剖面

本研究同時在烏溪河道沿線進行露頭調查，從大橫屏山向斜東翼到雙冬斷層進行位態之測量，其中大橫屏山向斜東翼之構造型態相對龜溝地區單純許多。在柑林地區，同樣可以見到指準層 B 層厚黃砂岩（圖 4-26），但此處序列分明，岩層幾乎沒有破裂現象，也難以觀察到方解石擦痕；同樣地，在接近雙冬斷層處之上盤露頭，亦無強烈的岩層變形作用（圖 4-27），顯示岩層的破壞與應力似乎大多數集中在龜蒲斷層帶與其上盤地區，而雙冬斷層之斷層面在本研究之研究範圍中並無出露，因此無法得知更多資訊。

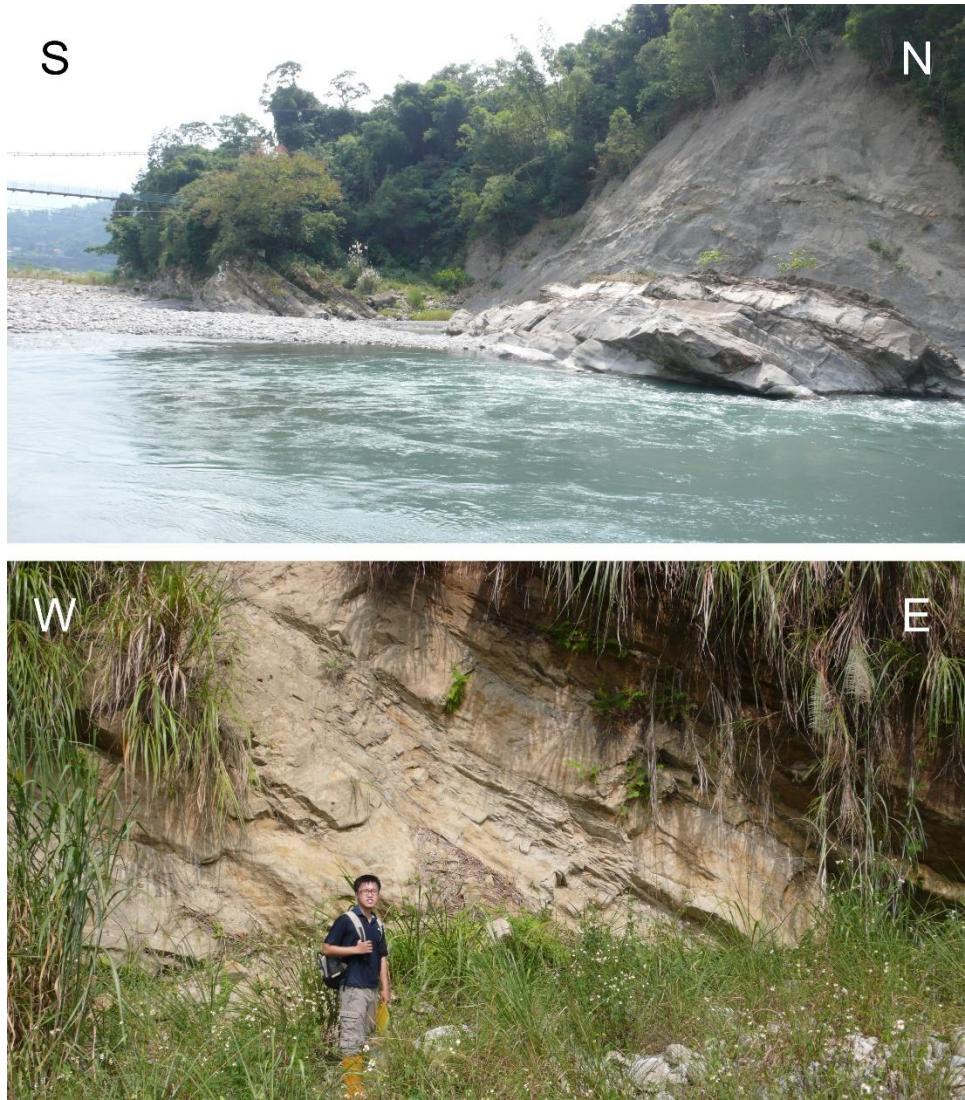


圖 4-26 (上)

大橫屏山向斜東翼與指準層 B 層。

圖 4-27 (下)

雙冬斷層附近上盤之厚層砂岩，可見其未經過變形作用。



## 4-5 小結

總結以上野外觀察，並結合地調所之位態資料、震測結果等，便可繪製雙冬斷層系統上盤之構造剖面（圖 4-28），其中雙冬斷層上盤之中新世斷塊以 45 度的傾角逆衝到更新世的頭嵙山層之上，龜蒲斷層之傾角可能相同或略高，同樣逆衝（兼帶左移分量）至中新世斷塊之上，並在龜溝地區有數條晚期發育的次生斷層。

整體而言，本研究利用岩層風化能力差異，定出 A-F 六組具代表性的砂岩層，在雙冬-龜蒲斷層上盤地區均可發現；龜溝地區地層厚度少於 300m，主要透過數個中尺度的逆斷層切穿，形成二至三次重覆的堆疊地層與數個短波長的次生褶皺，並且褶皺都具有向北傾沒的特性。南北向的地層位態與構造線（褶皺軸）都指示東西向的擠壓方向；同時本研究發現由大橫屏山向斜至龜蒲斷層帶（由遠至近），岩層的破壞與應力集中越發明顯，整個龜蒲斷層帶為一帶有左剪分量的逆斷層，而雙冬斷層與其上盤則沒有發現類似地質現象。

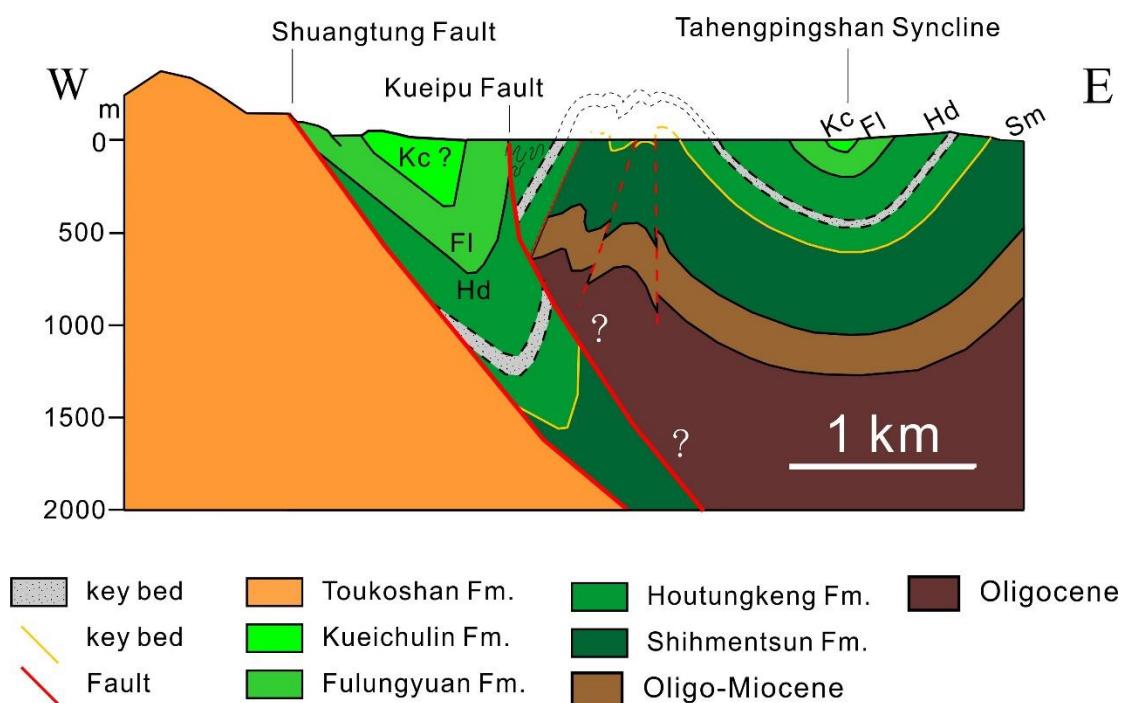


圖 4-28 雙冬斷層上盤之構造剖面。

# 第五章 脆韌性構造分析結果：型態、機制與演化

## 5.1 概論

就地體構造的觀點而言，臺灣中部麓山帶受到之構造作用，主要為菲律賓海板塊與歐亞板塊之斜向碰撞作用，包括淺部地殼所發育之褶皺逆衝斷層帶 (fold and thrust belt)，及區域性地質作用。從今日大地應力狀況來看 (李錫堤, 1986)，台灣中部仍受板塊碰撞作用很大之影響。這種強烈造山作用及擠壓作用所形成之地質構造，在第四章已有詳細描述，至於褶皺逆衝斷層帶之斷塊在這個過程中所扮演的角色以及其機制，本章擬就應力分析與運動學之觀點來加以討論。在擦痕分期上，本研究採取的具體策略有二：截切原則與以褶皺作用為一相對時間面。

其中截切原則又分為斷層截切作用與擦痕截切關係，斷層截切作用較為單純，在露頭上觀察到兩斷層相互截切即可判定先後關係；擦痕截切關係之判定較為不易，須觀察到兩擦痕互相覆蓋且源自不同力學機制來源才可明確分為前後兩期（圖 5-14），若擦痕方位僅有些許之轉折，或是覆蓋關係無法確定時，則需要野外主觀的判定，或是參考那些已有截切關係的測量點來做判斷。

根據此準則，本研究已可分辨出至少兩期的應力事件，一為地層尚處於水平位態時所發育之破裂事件（早期），二為地層隨斷塊滑移時抬升、傾斜或褶皺後所產生的破裂事件（晚期）。然而考慮地層抬升、傾斜時伴隨的褶皺作用，則採用以褶皺作用為一相對時間面，將晚期事件再區分為同褶皺事件 (Syn-folding event, Stage 2) 及褶皺後事件 (Post-folding event, Stage 3)，這兩者區分之依據為反演之主應力軸平行或垂直地層層面與否，而褶皺前事件則對應早期的破裂 (Stage 1)，早期破裂與同褶皺事件皆會進行層面修正。本研究在國姓龜溝地區發現之擦痕截切關係共有 10 組，其中可以明顯區分不同期數的有 3 組（兩組在 Site 9，一組在 Site 4），斷層截切作用在多數測量點都有發現。



## 5-2 現地節理分析

本研究收集 134 筆節理面的資料，製作原始資料與層面修正資料分布圖（圖 5-2、5-3），可以發現這些破裂節理具有以下特色：



- (1) 主要發育 2-3 組不同方位的節理。
- (2) 多數的節理與層面垂直或近乎垂直，少數節理的型態約等於層面（如 Site 4），推論這些垂直層面的節理形成於地層尚處於水平位態之時。
- (3) 垂直於層面的節理會在某個範圍內平均發育（Site 9、Site 12），或是形成明顯的共軛破裂（Site 2、Site 18）。
- (4) 垂直於層面的節理通常會有某一組特別發達（Site 11、Site 12）。
- (5) 在露頭中觀察到許多斷層面與節理面位態相近，顯示多數的節理面會作為既存弱面，在斷層作用中產生再滑動（此時則記錄為斷層擦痕資料，會於 5-3、5-4 節一併討論）。



圖 5-1 龜溝地區的節理破裂型態。左為 Site 4，右為 Site 9。

圖 5-2 國姓龜溝

地區節理資料分布圖

(原始資料)。紅點

為調查過的露頭點，

節理以施密特下半球

赤平投影呈現，紅色

虛線為層面位態，右

下角數字為各點資料

筆數，共有 134 筆。

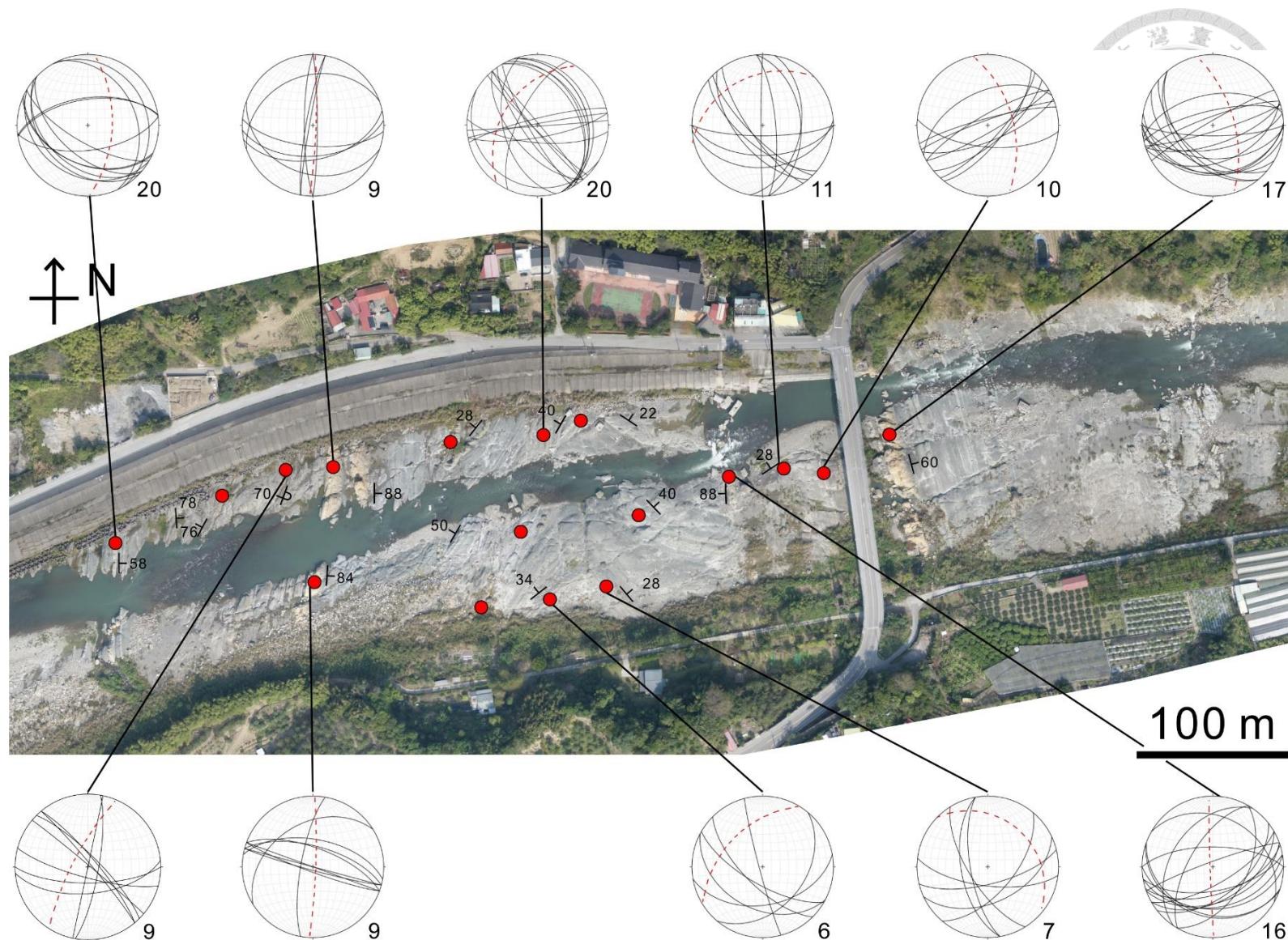
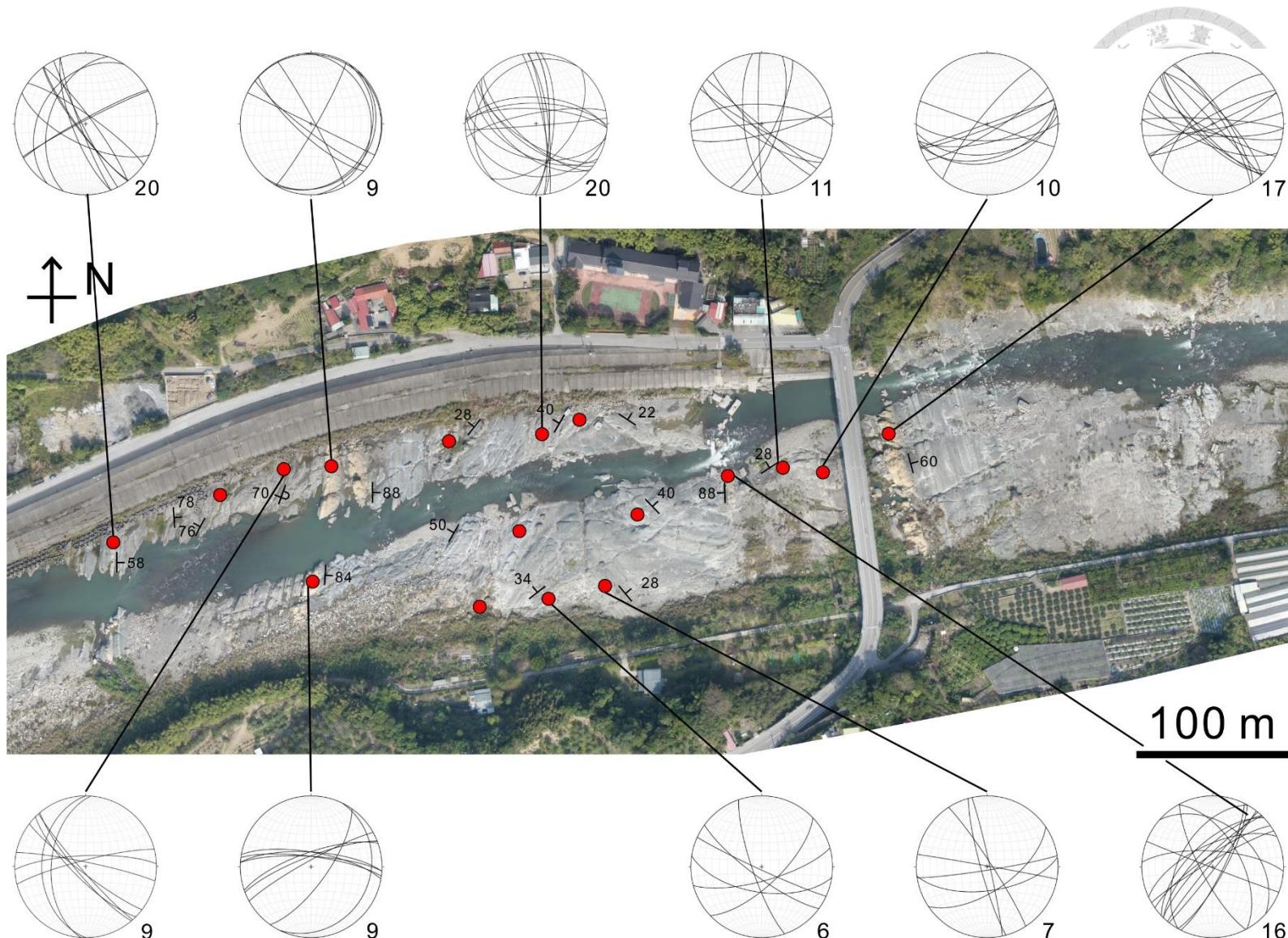


圖 5-3 國姓龜溝

地區節理資料分布圖

(層面修正後資料)。

紅點為調查過的露頭點，節理以施密特下半球赤平投影呈現，右下角數字為各點資料筆數，共有 134 筆。



### 5-3 斷層擦痕構造作用

本研究龜溝地區分析整理了龜溝地區 12 個測量點，共 604 筆擦痕資料，由截切關係比對及與地層褶皺的時間關係區分出三期應力事件（1：褶皺前、2：褶皺中、3：褶皺後），再根據不同斷層類型做分群（如 1a 期為逆斷層、1b 期為平移斷層或正斷層，其中 a、b 事件皆為同期，不分先後），應力分析與動力學分析的內容包含水平最大與最小應力方向、最大與最小應變方向、軸差應力比、軸差應變比和應力莫爾圓等等（圖 5-4），同時將沿既有弱面（節理）再滑動之破裂以藍線表示。本研究以應力分析結果為主，應變分析結果為輔，測量點之分期資料與截切關係則見下方。以下仔細描述各個測量露頭點的分析成果，包括 Site 1, 2, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18 等 12 個測量點。

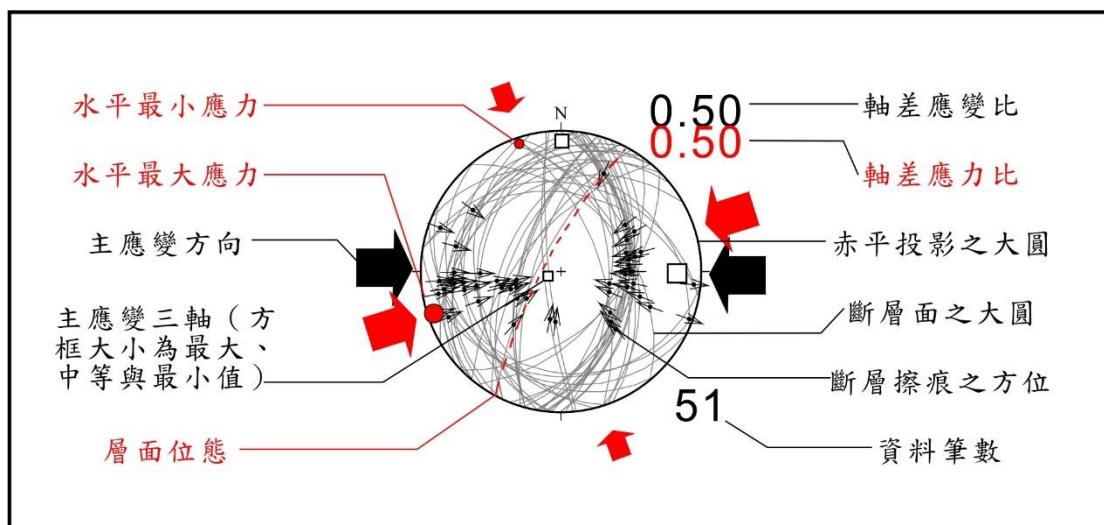


圖 5-4 應力與應變分析結果符號說明，以 Site 2 之 3a 期為例。

**1. Site 1** 此露頭無擦痕截切關係，但不同期之破裂表現的非常清楚（圖 5-5），本區分析結果如下（圖 5-6）：Stage 1 之層面修正位態 000/58E，僅有 1a 與 2a 期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N285E/02W、N015E/12N、N185E/78S，應力軸差比 0；2a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N285E/2E、N195E/02S、N060E/87E，應力軸差比 0.2。

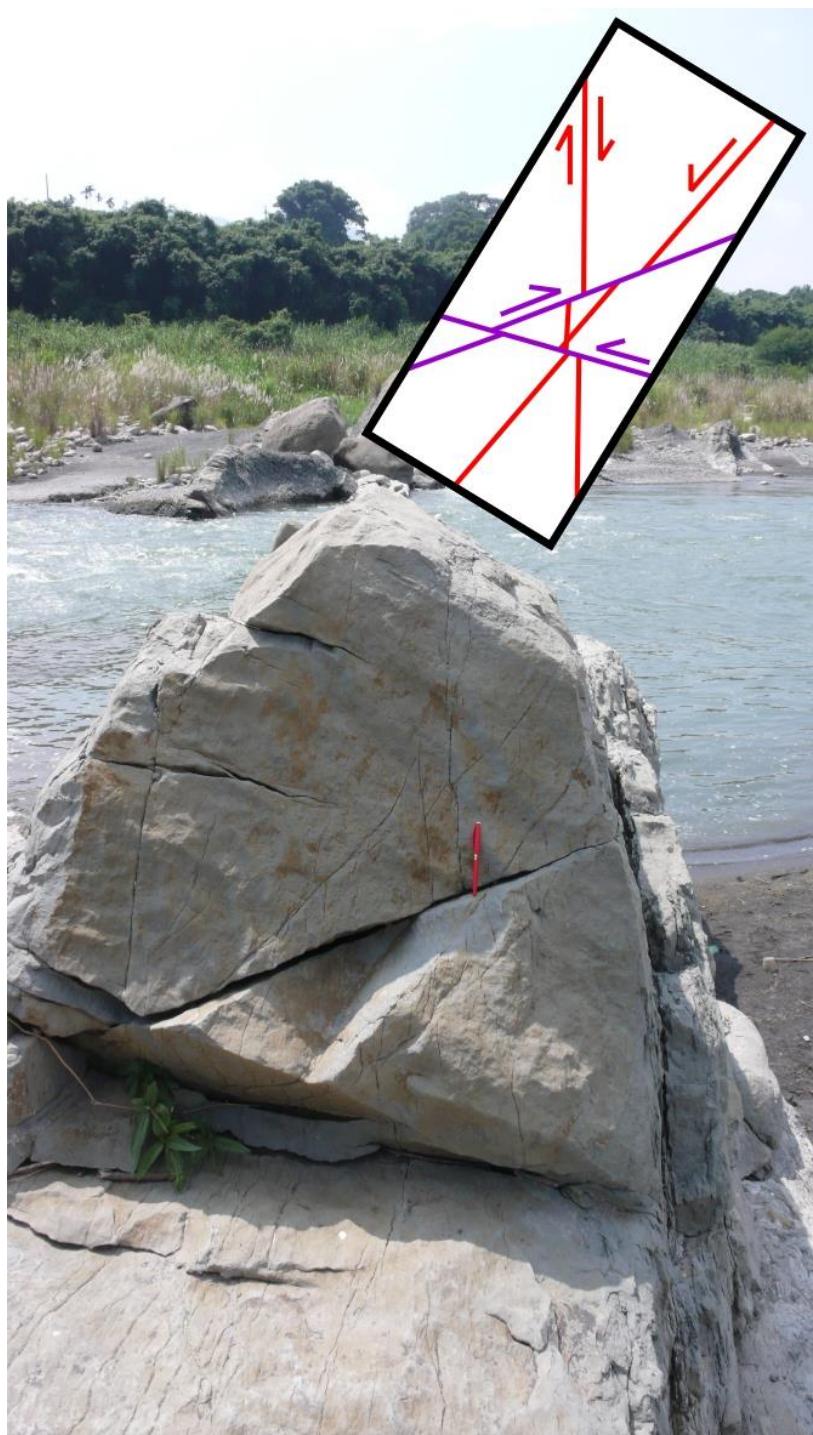
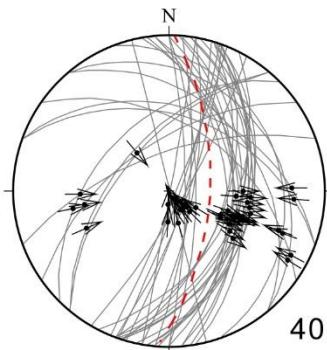


圖 5-5 Site 1 露頭照片。其中 1a 期（老，紅線）與 2a 期（新，紫線）之關係如圖所示，本露頭無擦痕截切之關係以供分期。

## Site 1 分期結果

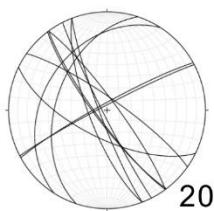
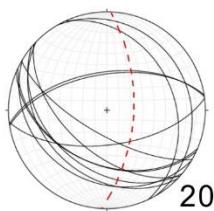


分期 原始資料

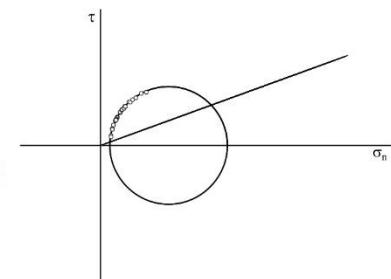
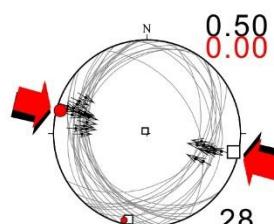
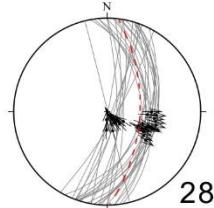
修正後資料

應力莫耳圓

joint



1a



2a

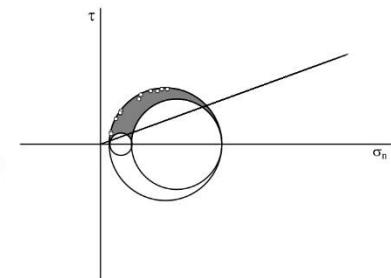
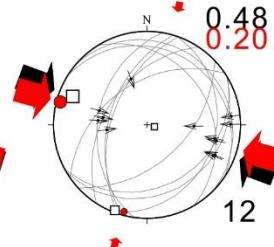
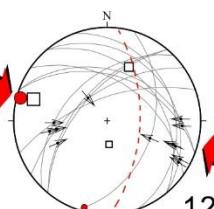


圖 5-6 Site 1 應力分析結果。

**2. Site 2** 本區擦痕（圖 5-7）分析結果如下（圖 5-8）：Stage 1 之層面修正位態 014/63W，主要有 1a、1b、2a、3a 四期，1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N285E/02W、N015E/02N、N150E/87S，應力軸差比 0.30；1b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N101E/02E、N192E/24S、N066E/66E，應力軸差比 0；2a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N100E/13E、N254E/76W、N009E/06N，應力軸差比 0.20；3a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N072E/13E、N163E/02S、N261E/77W。

**3. Site 4** 本區有明顯截切關係（圖 5-9、圖 5-10），分析結果如下（圖 5-11）：Stage 1 之層面修正位態 017/80E，主要有 1a、1b、2b 三期，1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N101E/02E、N011E/02N、N236E/87W，應力軸差比 0.20；1b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N273E/02W、N183E/02S、N060E/87E，應力軸差比 0.30；2b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N099E/23E、N239E/61N、N002E/17E，應力軸差比 0.20。

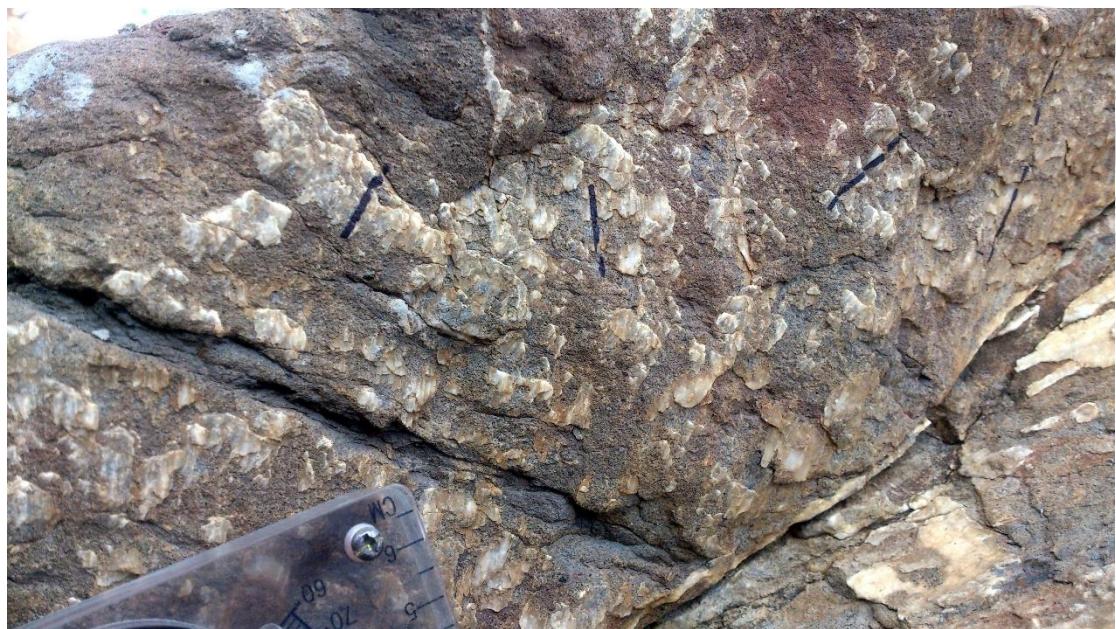


圖 5-7 Site 2 在同一組斷層面發現相反滑動方向之擦痕。其中逆斷層擦痕（黑線左、右）有 15 度左右的變化，正斷層擦痕（黑線中）由於沒有覆蓋關係，無法判定順序先後。

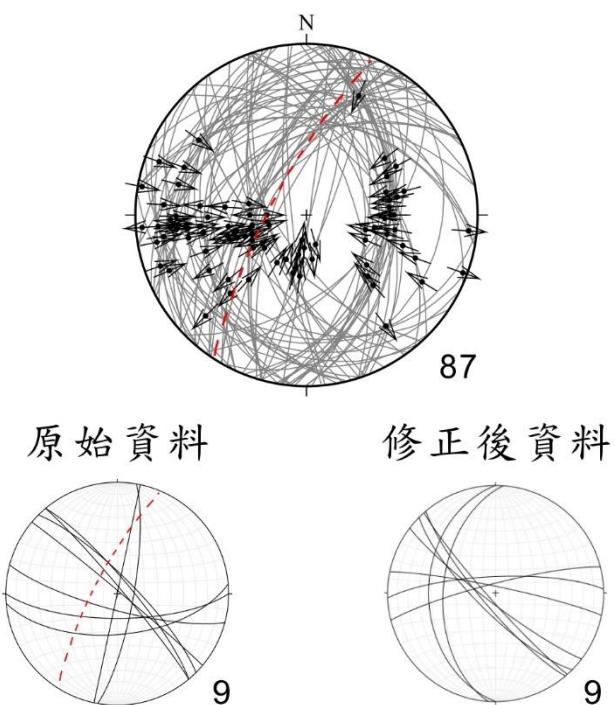


圖 5-8 Site 2 應力分析結果。上方為全部資料，下方為節理。

## Site 2 分期結果

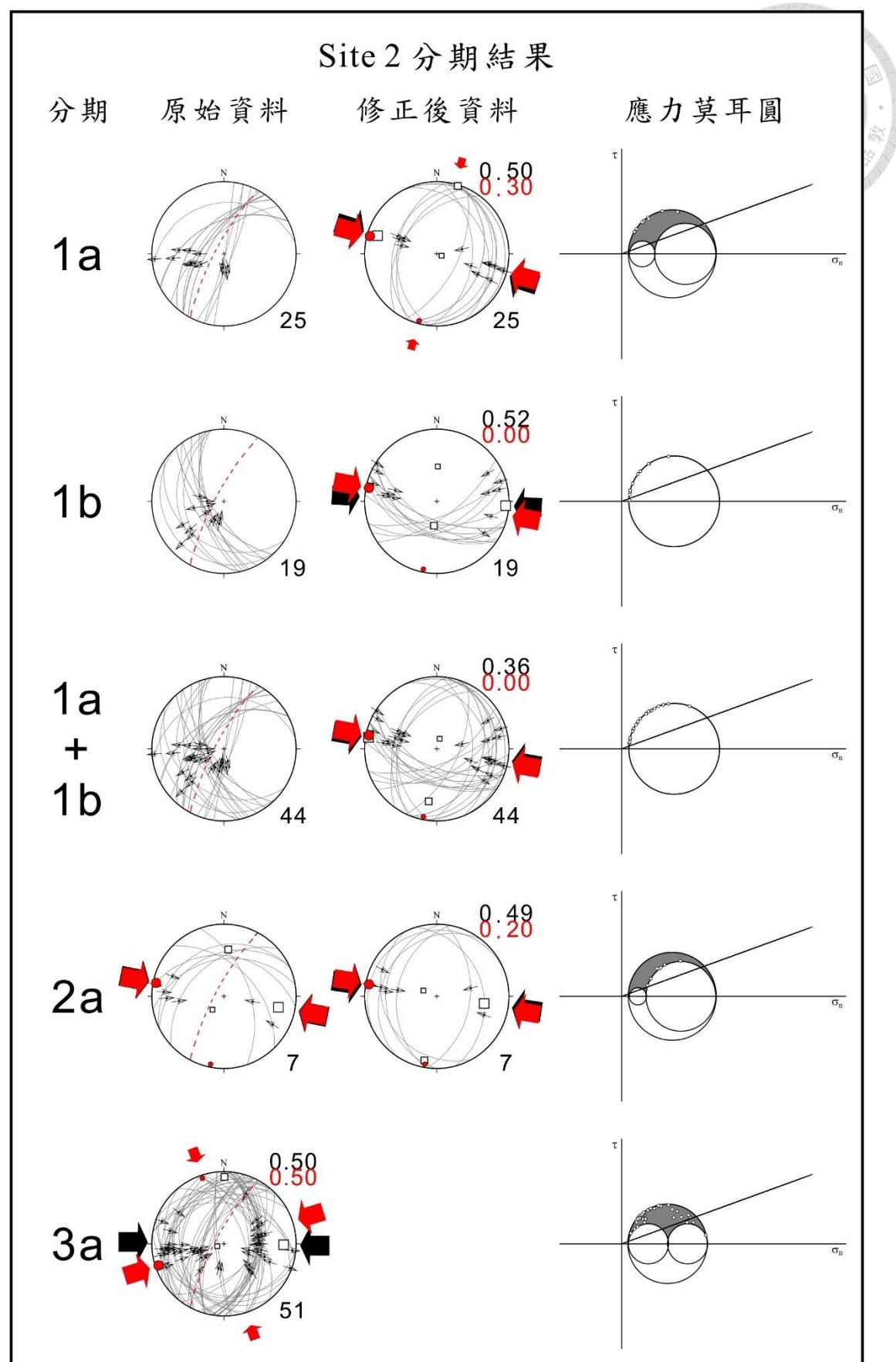


圖 5-8 Site 2 應力分析結果（續）。



圖 5-9 (左) Site 4 斷層截切關係。1a 期斷層面 (老, 黑線) 被 2b 期斷層面 (新, 紅線) 切過，其中 2b 期是沿已存弱面再滑動。

圖 5-10 (右) Site 4 所觀察到擦痕截切關係。1b 期 (老, 黑線) 被 2b 期斷層面 (新, 紅線) 覆蓋。

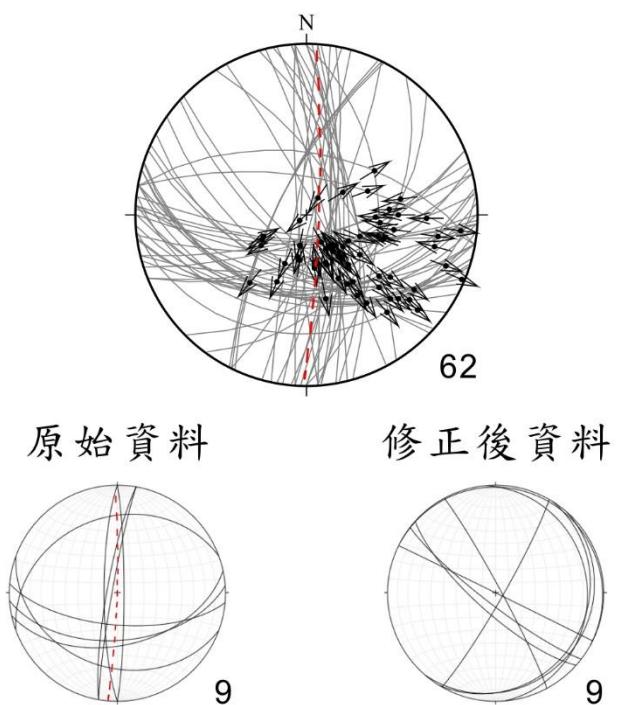


圖 5-11 Site 4 應力分析結果。上方為全部資料，下方為節理。

## Site 4 分期結果

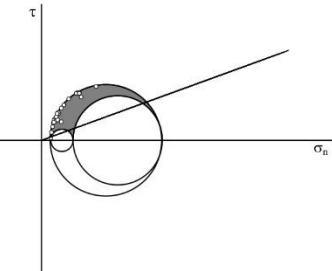
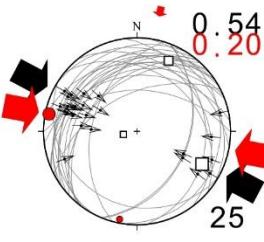
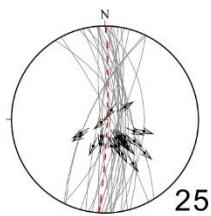
分期

原始資料

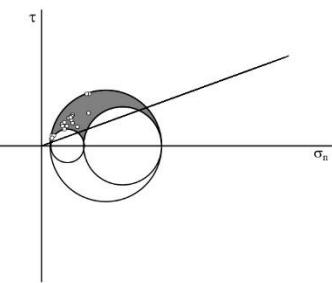
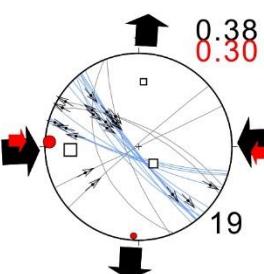
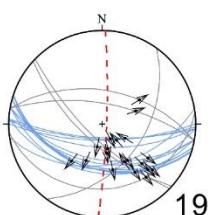
修正後資料

應力莫耳圓

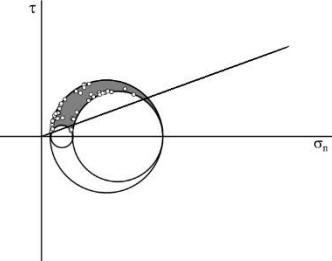
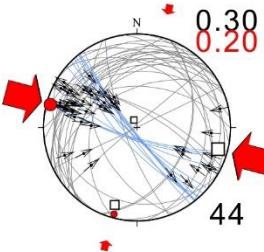
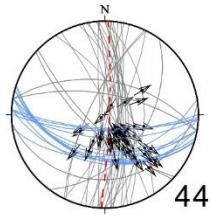
1a



1b



1a  
+  
1b



2b

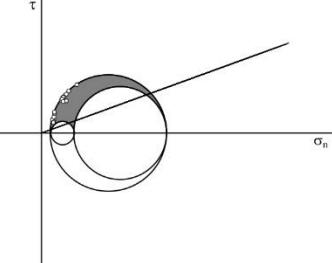
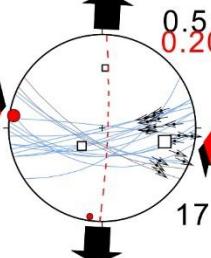


圖 5-11 Site 4 應力分析結果 (續)。

**4. Site 6** 本區僅有少數斷層截切作用與明顯的共軛斷層（圖 5-12），分析結果如下（圖 5-13）：Stage 1 之層面修正位態 000/33W，共有 1a、3a、3b 期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N273E/02W、N003E/02N、N138E/87S，應力軸差比 0.10；3a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N273E/02W、N182E/44S、N007E/66N，應力軸差比 0.30；3b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N292E/02W、N202E/02S、N067E/87E，應力軸差比 0.40；3b 期因資料僅有 5 筆，因此可能會造成計算上較大的不確定性，解釋時須格外謹慎。

**5. Site 9** 本露頭有明顯擦痕覆蓋關係（圖 5-14），同時可觀察早期之破裂（圖 5-15），分析結果如下（圖 5-16）：Stage 1 之層面修正位態 000/57E，主要有 1a、1b、3a、3b 四期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N088E/02E、N178E/02S、N313E/87W，應力軸差比 0.10；1b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N297E/02W、N189E/84S、N027E/06N，應力軸差比 0.10；3a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N273E/02W、N003E/02N、N084E/87E，應力軸差比 0.30；3b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N084E/78E、N309E/02W、N219E/02S（3b 期較特別，為正斷層系統，次要主應力方向為 N309E）。



圖 5-12 Site 6 之共軛斷層，圖為 1a 期，紅箭頭為斷層滑動方向。

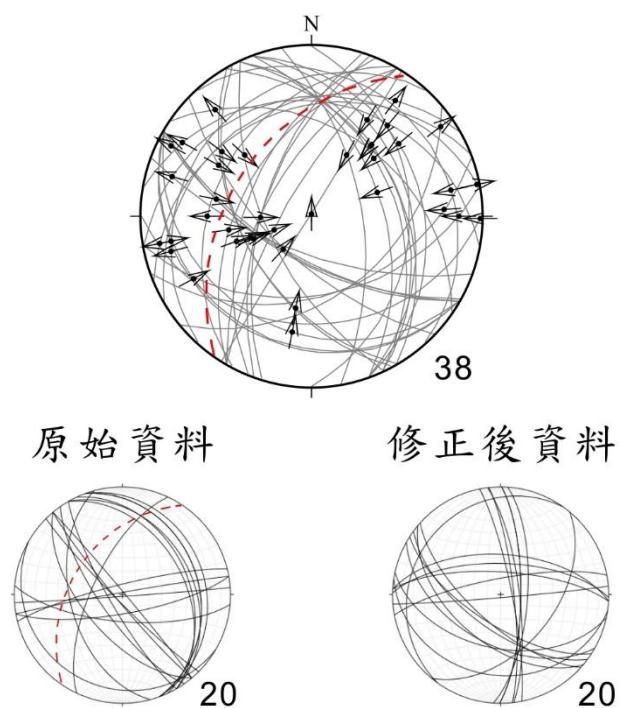


圖 5-13 Site 6 應力分析結果。

## Site 6 分期結果

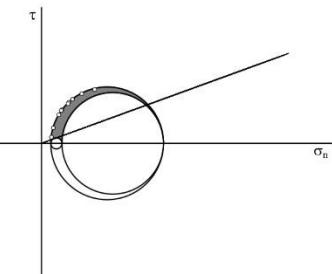
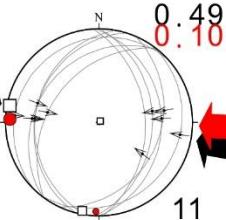
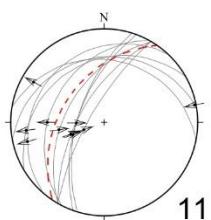
分期

原始資料

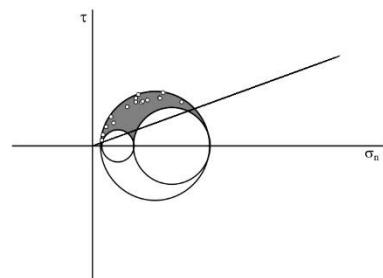
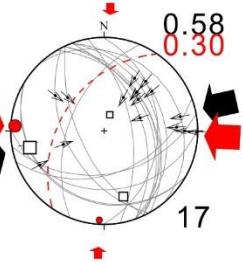
修正後資料

應力莫耳圓

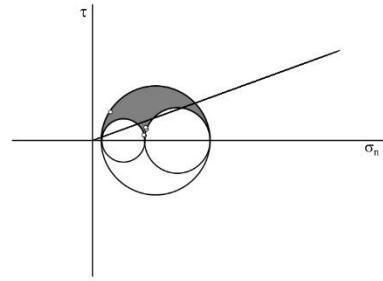
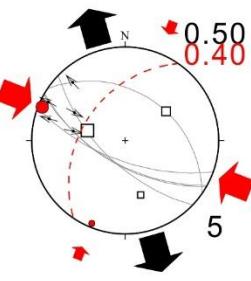
1a



3a



3b?



3a

+  
3b

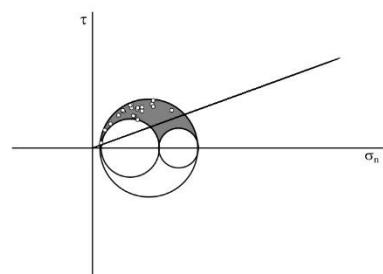
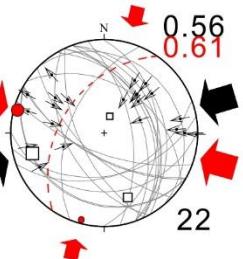


圖 5-13 Site 6 應力分析結果 (續)。



圖 5-14 Site 9 擦痕截切，3a 期逆斷層（新，紅線）蓋在 1a 期正斷層（老，黑線）之上。



圖 5-15 Site 9 破裂型態，似乎為一組近乎垂直的共軛正斷層，可能為早期同沉積事件或是成岩作用後形成。

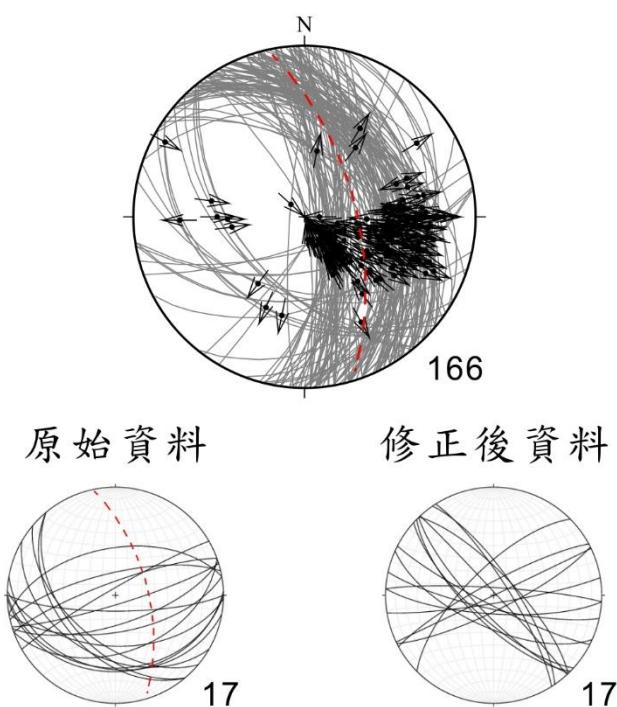


圖 5-16 Site 9 應力分析結果。上方為全部資料，下方為節理。

## Site 9 分期結果

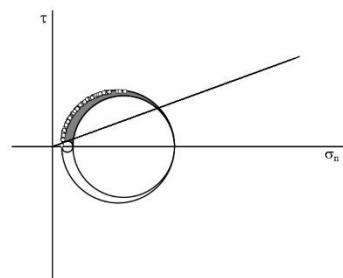
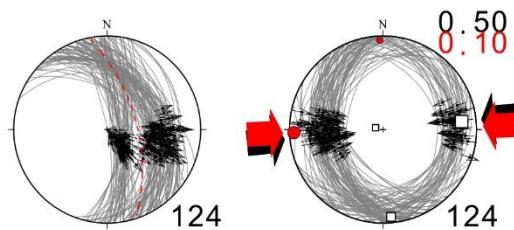
分期

原始資料

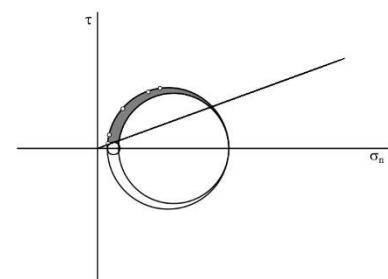
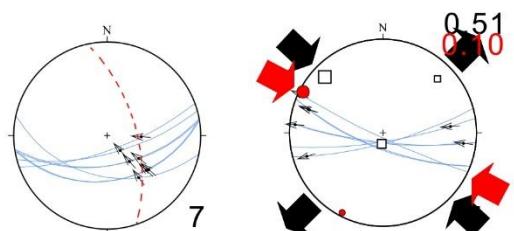
修正後資料

應力莫耳圓

1a



1b



1a  
+  
1b

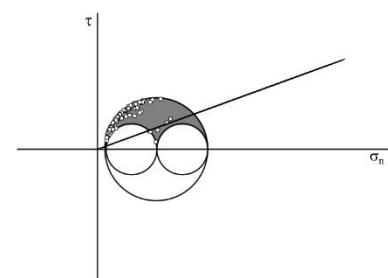
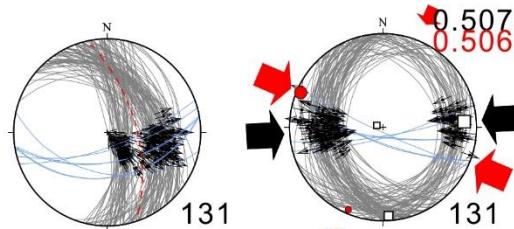


圖 5-16 Site 9 應力分析結果 (續)。

## Site 9 分期結果

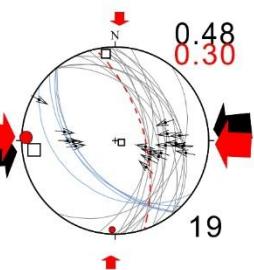
分期

原始資料

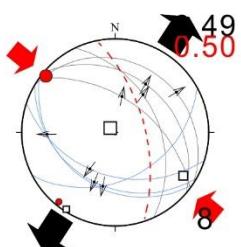
修正後資料

應力莫耳圓

3a



3b



3a  
+  
3b

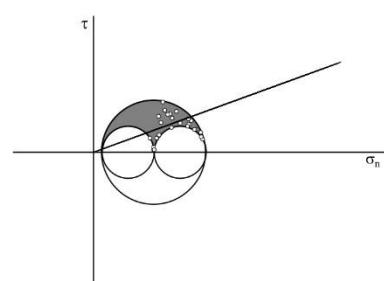
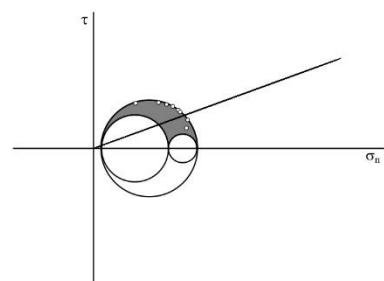
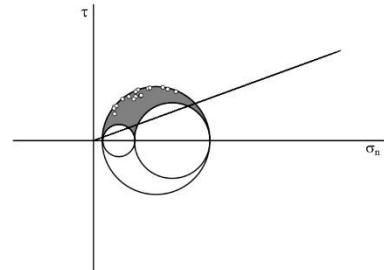
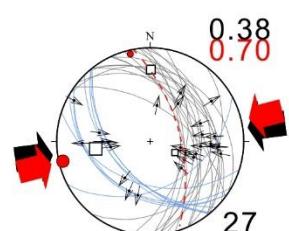


圖 5-16 Site 9 應力分析結果 (續)。

6. Site 10 本區分析結果如下(圖 5-17):Stage 1 之層面修正位態 000/53E, 主要有 1a、1b、2a 三期, 1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N268E/02W、N178E/02S、N313E/87E, 應力軸差比 0.10 ; 1b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N346E/02N、N238E/84S、N76E/06E, 應力軸差比 0.11 ; 2a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N286E/02W、N196E/02S、N061E/87E, 應力軸差比 0.61 。

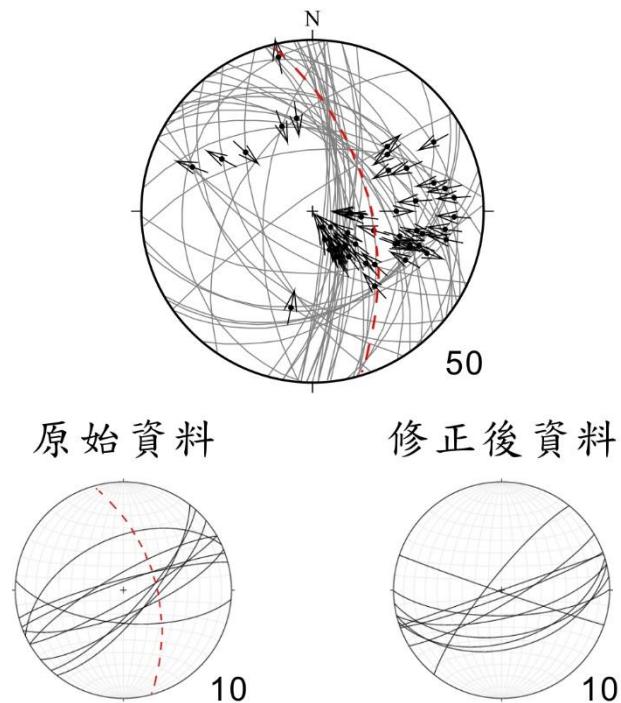


圖 5-17 Site 10 應力分析結果。上方為全部資料，下方為節理。

## Site 10 分期結果

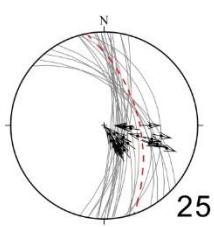
分期

原始資料

修正後資料

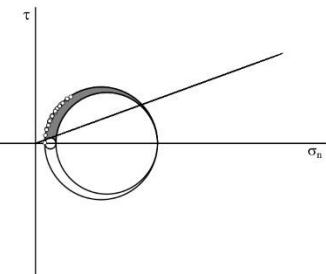
應力莫耳圓

1a

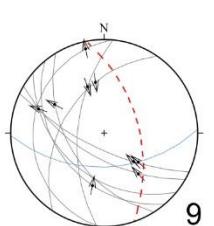


0.50

25

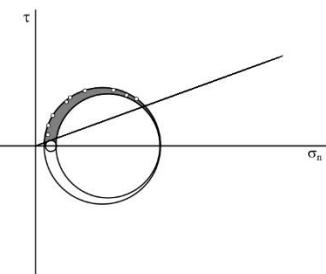


1b

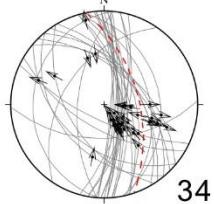


0.46

9

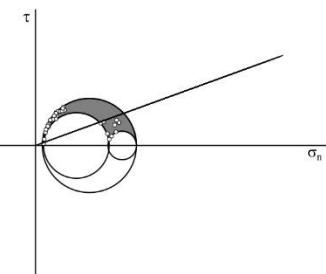


1a  
+  
1b

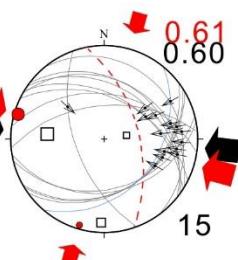


0.51

34



2a



0.61

15

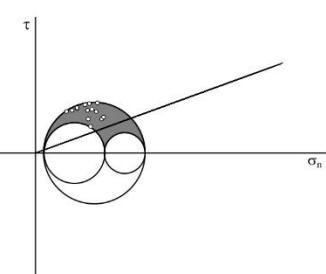


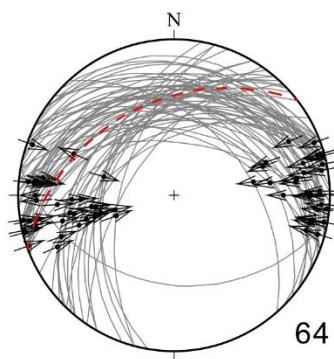
圖 5-17 Site 10 應力分析結果 (續)。

7. Site 11 此露頭的擦痕有轉彎現象(圖 5-18)，但仍解釋為同一期，Stage 1 之層面修正位態 000/22W，僅有 1a 期（共軛逆斷層），1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N260E/02W、N152E/84S、N350E/06N，應力軸差比 0.10 (圖 5- 19) 。



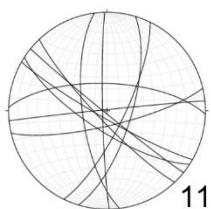
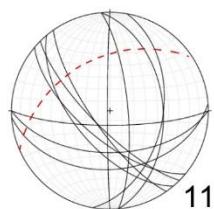
圖 5-18 Site 11 擦痕轉彎的現象，偏折角度約 15 度，無法將其分離成兩期事件。

## Site 11 分期結果



分期    原始資料    修正後資料    應力莫耳圓

joint



1a

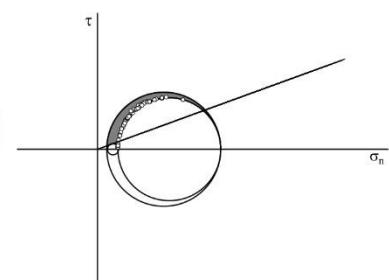
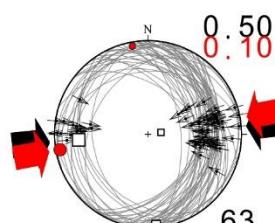
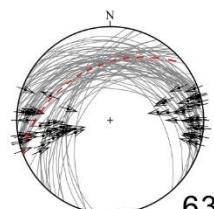


圖 5-19 Site 11 應力分析結果，上方為全部資料。

8. Site 12 本區可以斷層截切作用判定事件先後（圖 5-20），分析結果如下（圖 5-21）：Stage 1 之層面修正位態 000/89W，主要有 1a、2a、3a、3b 期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N260E/02W、N170E/02S、N035E/87N，應力軸差比 0.60；2a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N286E/02W、N196E/02S、N061E/87E，應力軸差比 0.80；3a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N267E/13W、N000E/12N、N132E/73E，應力軸差比 0.30；3b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N244E/02E、N334E/02N、N173E/78S。其中 1a 其只有 4 筆資料，可能造成應力軸差比較大的不確定性。

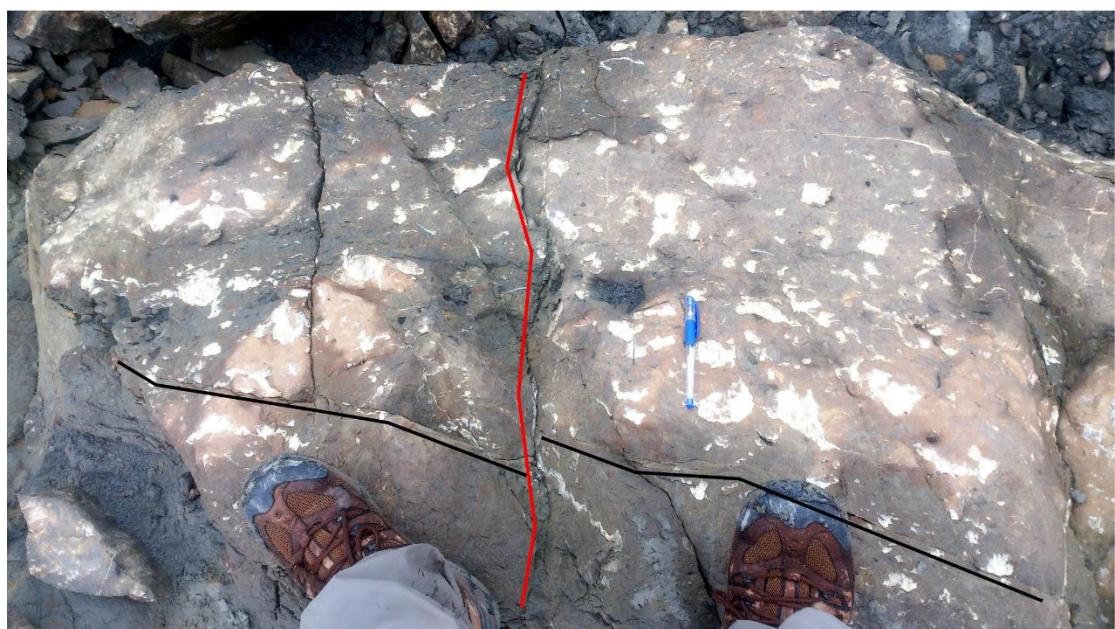
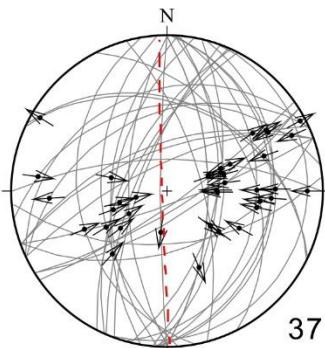


圖 5-20 Site 12 的斷層截切作用，1a 期的斷層（黑線）被 3b 期（紅線）切過，其中 3b 期為沿著既有破裂面再滑動。

## Site 12 分期結果

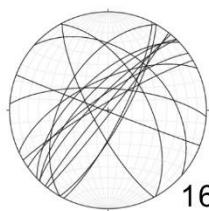
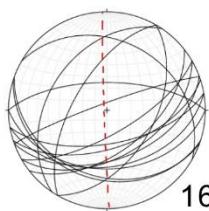


分期 原始資料

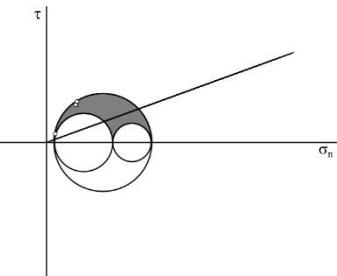
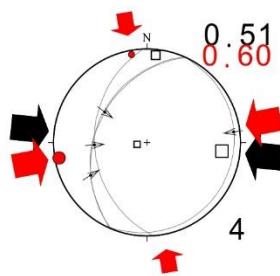
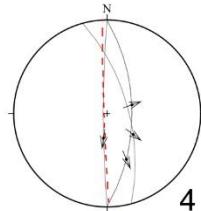
修正後資料

應力莫耳圓

joint



1a



2a

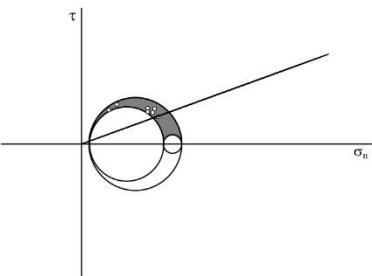
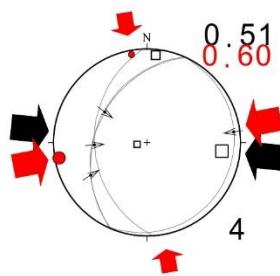
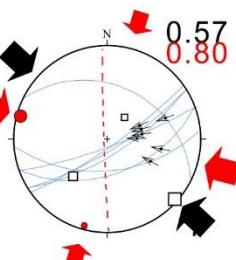


圖 5-21 Site 12 應力分析結果。

## Site 12 分期結果

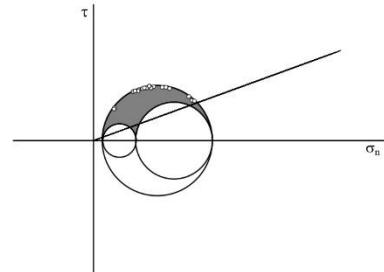
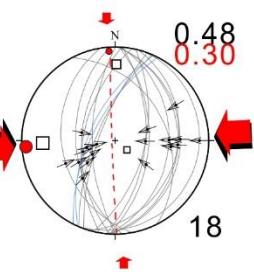
分期

原始資料

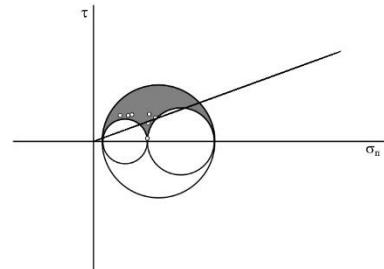
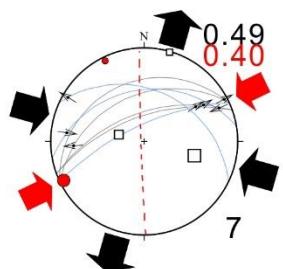
修正後資料

應力莫耳圓

3a



3b



3a  
+  
3b

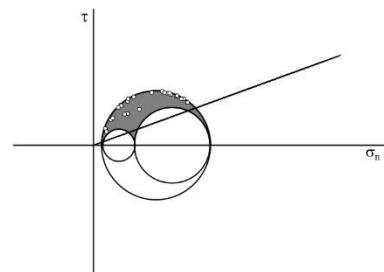
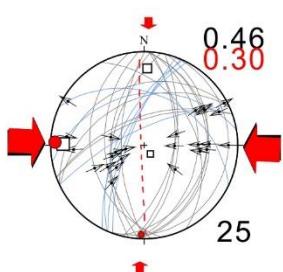


圖 5-21 Site 12 應力分析結果 (續)。

9. Site 14 此露頭分析結果如下（圖 5-22）：Stage 1 之層面修正位態  
 000/15E，僅有 1a 期（共軛逆斷層），2b（或 3b）期因只有 2 筆無法計算，故不予考慮。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N281E/02W、N191E/02S、N056E/87E，應力軸差比 0.21。

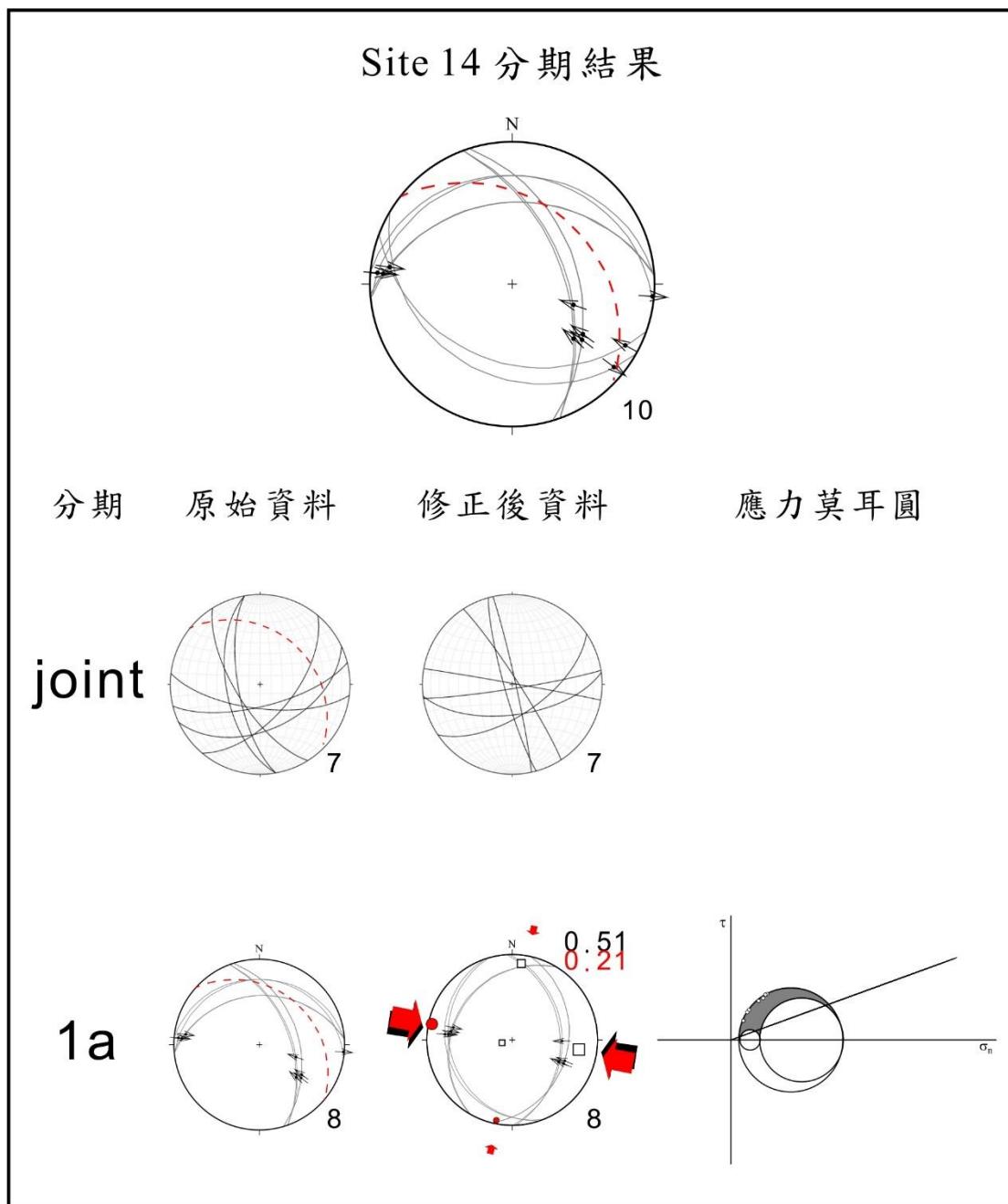


圖 5-22 Site 14 應力分析結果。

**10. Site 15** 此露頭分析結果如下（圖 5-23）：Stage 1 之層面修正位態 000/21W，有 1a、2b 期，其中 2a 期皆沿原有弱面滑動。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N273E/02W、N003E/12N、N173E/78S，應力軸差比 0.10；2a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N128E/12E、N282E/76W、N037E/16N，應力軸差比 0。

**11. Site 17** 本區擦痕覆蓋並不明顯，仍解釋為同一期（圖 5-24），分析結果如下（圖 5-25）：Stage 1 之層面修正位態 017/44W，僅有 1a、3a 期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N088E/02E、N385E/12N、N188E/78S，應力軸差比 0.10；3a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N285E/02W、N016E/24N、N190E/66S，應力軸差比 0.20。但 3a 期僅 3 筆資料，在解釋上要格外謹慎。

**12. Site 18** 本區僅有 2-3 組不同節理與少數擦痕（圖 5-26），分析結果如下（圖 5-27）：Stage 1 之層面修正位態 017/80E，主要有 1a 和 1b 期。1a 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N113E/02E、N022E/18N、N209E/72S，應力軸差比 0.10；1b 期的最大、次大、最小主應力軸的方位分別為 N064E/02E、N238E/72W、N155E/18S，應力軸差比 0.09。

## Site 15 分期結果

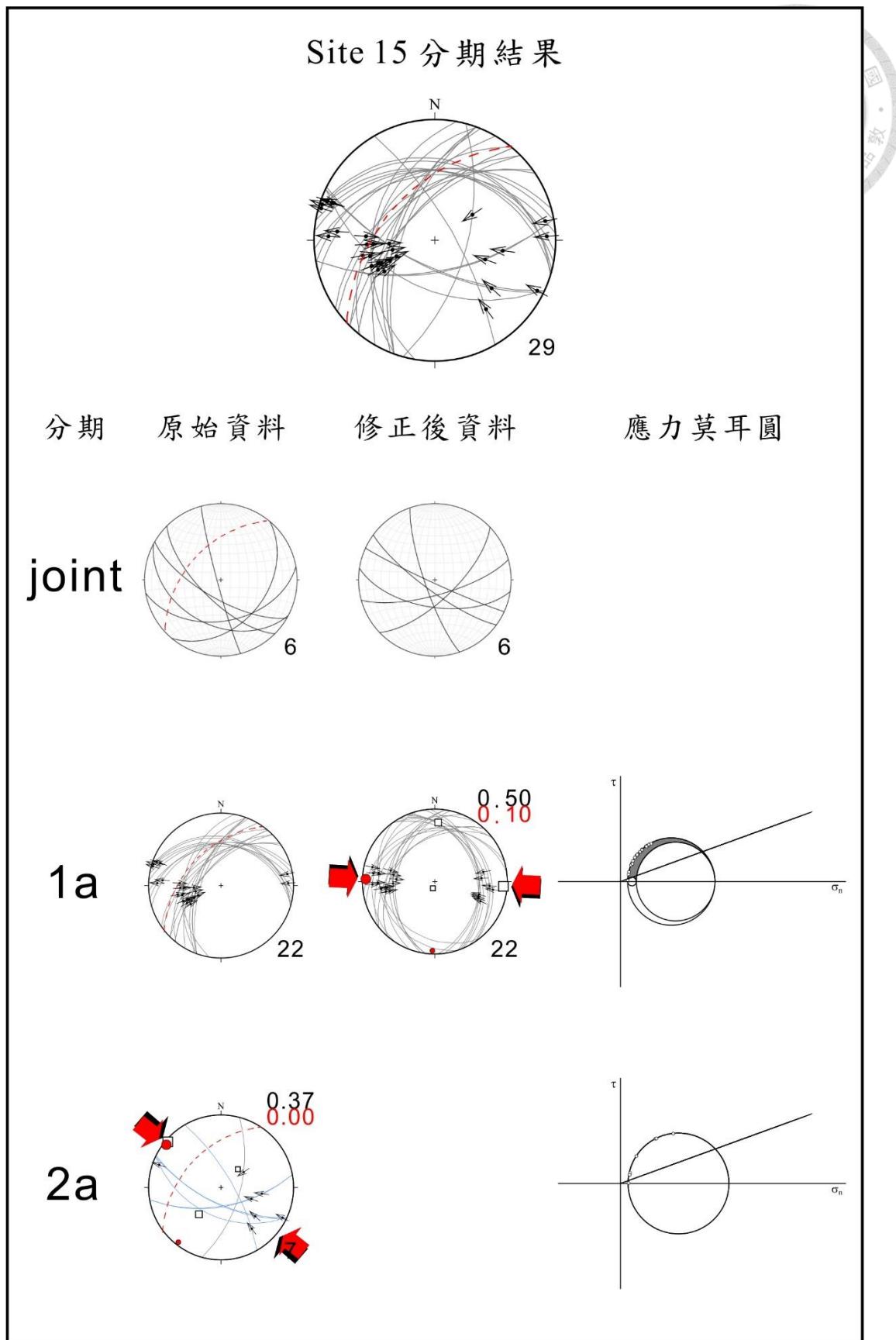


圖 5-23 Site 15 應力分析結果。



圖 5-24 Site 17 的擦痕截切，兩者皆為 1a 期共軛斷層，無法區分為不同期。

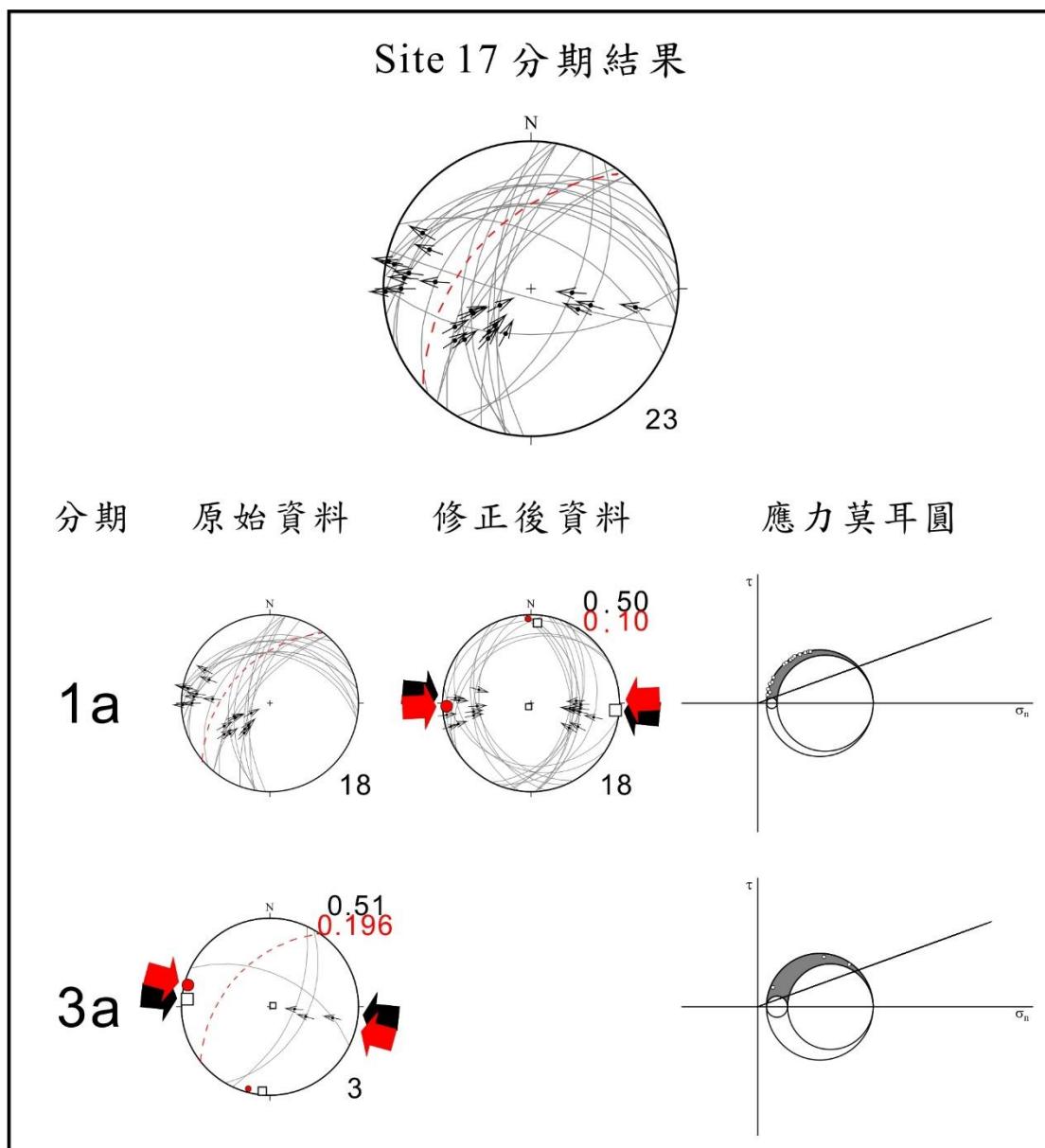


圖 5-25 Site 17 應力分析結果。



圖 5-26 Site 18 之節理，主要可以觀察到兩組不同的節理。

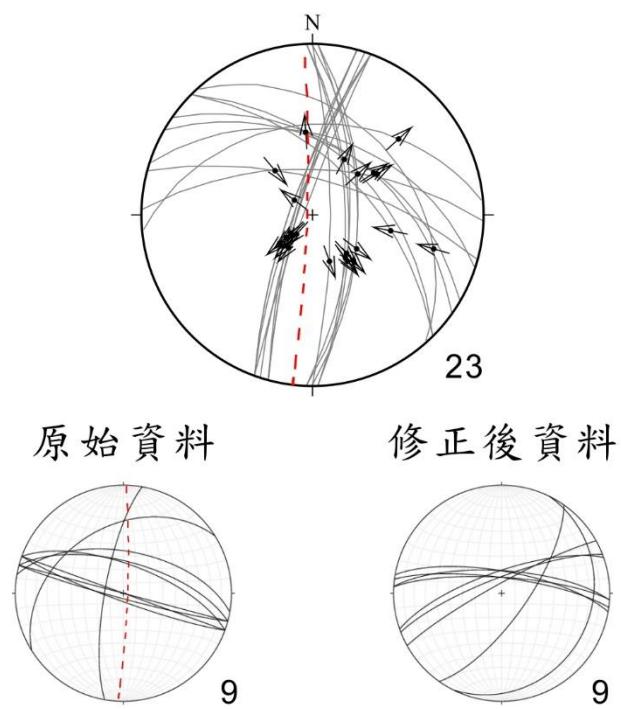


圖 5-27 Site 18 應力分析結果。上方為全部資料，下方為節理。

## Site 18 分期結果

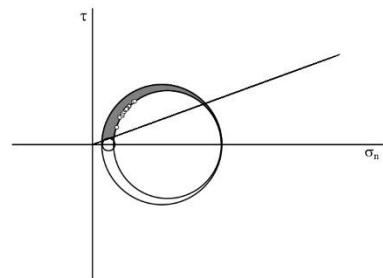
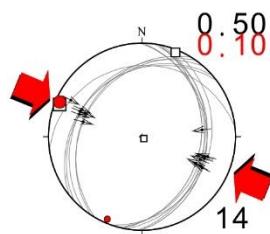
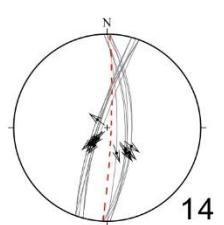
分期

原始資料

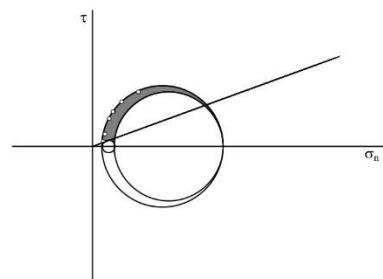
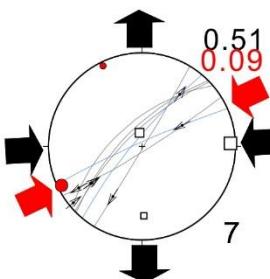
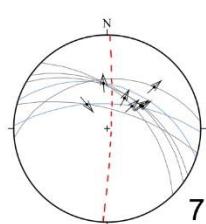
修正後資料

應力莫耳圓

1a



1b



1a  
+  
1b

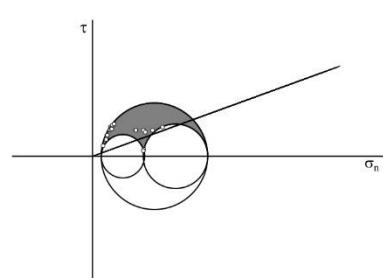
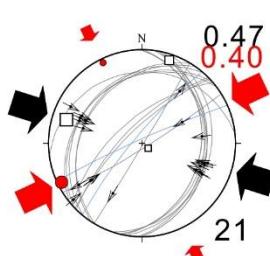
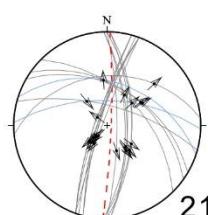


圖 5-27 Site 18 應力分析結果 (續)。

## 5-4 綜合比對分析

各斷層擦痕測量點的分期結果在 5-3 節與下表（表 2）分別呈現，本節將就各分期之特色做一綜合比對分析與討論。



表 2 研究範圍各測量點與分期對應表

編號/分期	構造分區	Joint	1A	1B	2A	3A	3B
Site 1	IV	●	●		●		
Site 2	IV	●	●	●	●	●	
Site 4	IV	●	●	●	●		
Site 6	I	●	●			●	●
Site 9	I	●	●	●		●	●
Site 10	I	●	●	●	●		
Site 11	I	●	●				
Site 12	I	●	●		●	●	●
Site 14	II	●	●				
Site 15	II	●	●		●		
Site 17	III		●			●	
Site 18	III	●	●	●			

### 5-4-1 Stage 1 (1a, 1b)

Stage 1 期擦痕資料的特色為明顯的共軛斷層，在截切關係上總是被覆蓋的一組，因此判定為早期，將層面修正後的資料呈現明顯的共軛逆斷層（1a 期，圖 5-31）或平移斷層（1b 期，圖 5-33）。1a 期的特色是可量得之資料非常多，在每個測量點皆有發現，為本區域最普遍之應力事件，同時共軛逆斷層之交角銳角相對較小，約 40 度，非一般的 60 度或 90 度（Anderson, 1951）。其應力機制呈現強烈地東西向或西北西-東南東方向擠壓，應變機制則為東西向擠壓而南北向伸張，為一橫移壓縮；1b 期資料則較少，應力方向變化也較大，如 Site 10 為接近南北向擠壓，整體來說，仍呈現東西向擠壓，應變機制則為橫移壓縮之型態。



#### 5-4-2 Stage 2 (2a, 2b)

Stage 2 擦痕資料可以在 5 個測量點被記錄到，主要的特徵是許多非共軛的逆斷層或平移斷層（圖 5-34），大多數的 2a 期資料是沿原有的破裂面來滑動，這樣的情況是晚期應應事件的一大特色，由於這些斷層資料所計算之應力軸傾斜於水平面，需經部份修正層面修正才能得到正確的結果（如 Site 1），因此將其從晚期事件獨立分出來命名為 Stage 2。應力分析與應變分析皆顯示西北西-東南東方向到西北-東南向的擠壓機制，部份為橫移壓縮機制（Site 4、Site 12）。

#### 5-4-3 Stage 3 (3a, 3b)

Stage 3 應力事件為本區域最後一期應力事件，應力分析結果也相對一致，主要呈現西北西-東南東方向擠壓機制（圖 5-35、圖 5-36），部份不同的應力分析結果可能與資料筆數過少導致應力張量誤差較大有關（Site 12），本期逆斷層擦痕特色為低角度的共軛斷層，且數量亦較多；平移斷層或正斷層擦痕數量較少，分別在 Site 6、Site 9 及 Site 12 中發現，其中 Site 9 之 3b 期是本區唯一之正斷層系統，將於第六章討論。晚期的斷層擦痕多少會沿舊有的破裂面來滑動（Site 9），且切過早期的擦痕，計算之主應力軸亦垂直於地表，因此和 Stage 2 獨立出來自成一期。

#### 5-4-4 Stage 1, 2, 3 與節理綜合討論

從野外觀察與擦痕分析結果來看，可以推論有一期同沈積時期的伸張性應力（造成同沉積斷層或節理？）與至少兩期的東西向擠壓應力。在擠壓事件中，發現一期的共軛逆斷層系統（Stage 1），是在地層還維持在接近水平位態時形成的（造山作用初期）。爾後隨著雙冬斷層上盤上衝塊體持續滑移抬升，使得地層褶皺傾斜與地層堆疊，同時也產生晚期的逆衝及平移系統。較晚期（Stage 2、Stage 3）的斷層擦痕破裂，似乎是在上衝地塊在淺部形成連續短波長褶皺的同時期所伴隨的脆性構造，而部分錯動是沿早期形成的既有破裂面滑動。

圖 5-28 國姓龜溝

地區 1a 期分布圖 (原始資料)。紅點為調查  
過的露頭點，左上角  
為編號；斷層以施密  
特下半球赤平投影呈  
現，紅色虛線為層面  
位態。

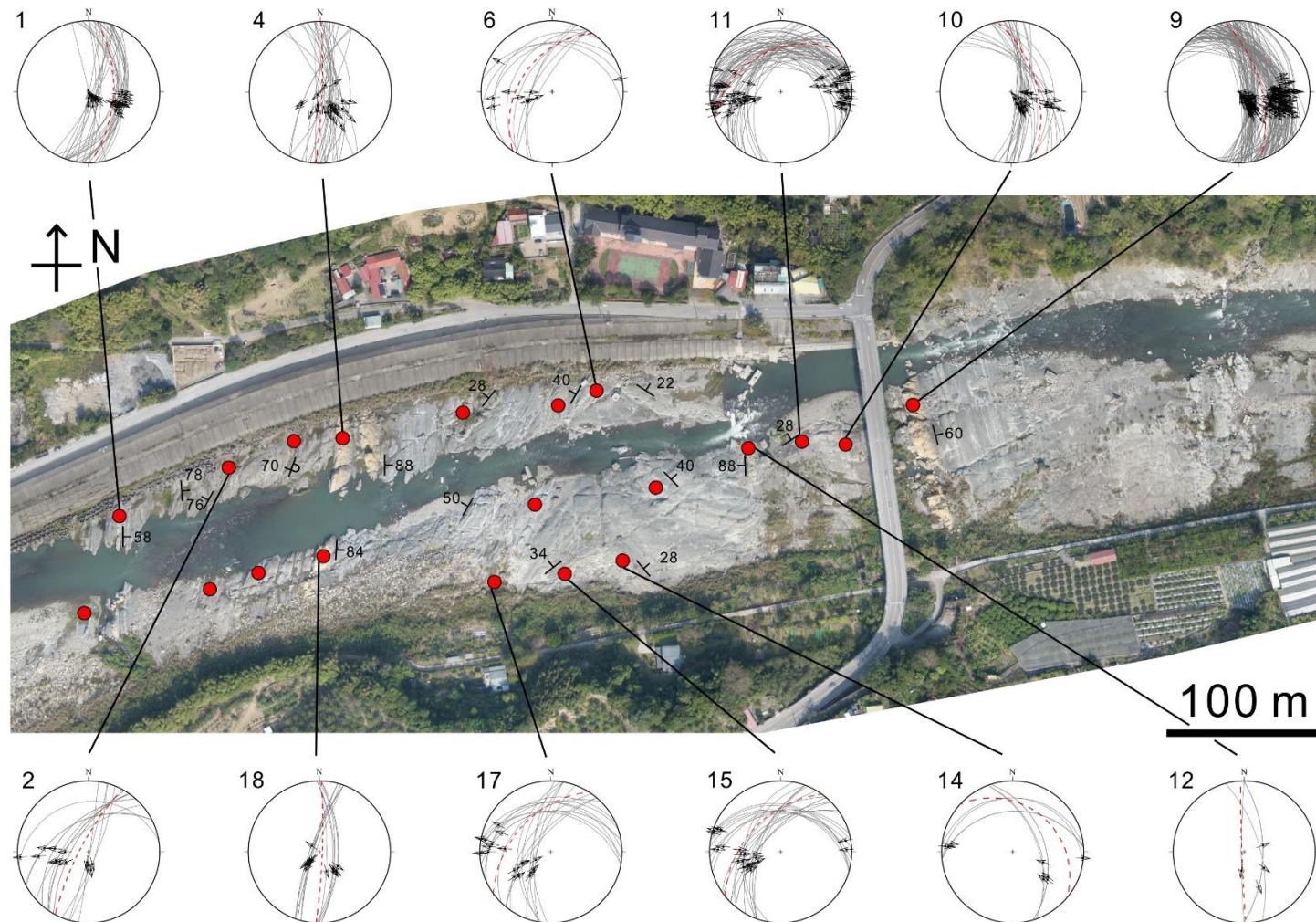


圖 5-29 國姓龜溝  
地區 1a 期分布圖 (層  
面修正資料)。紅點為  
調查過的露頭點，左  
上角為編號；斷層以  
施密特下半球赤平投  
影呈現，紅色虛線為  
層面位態。

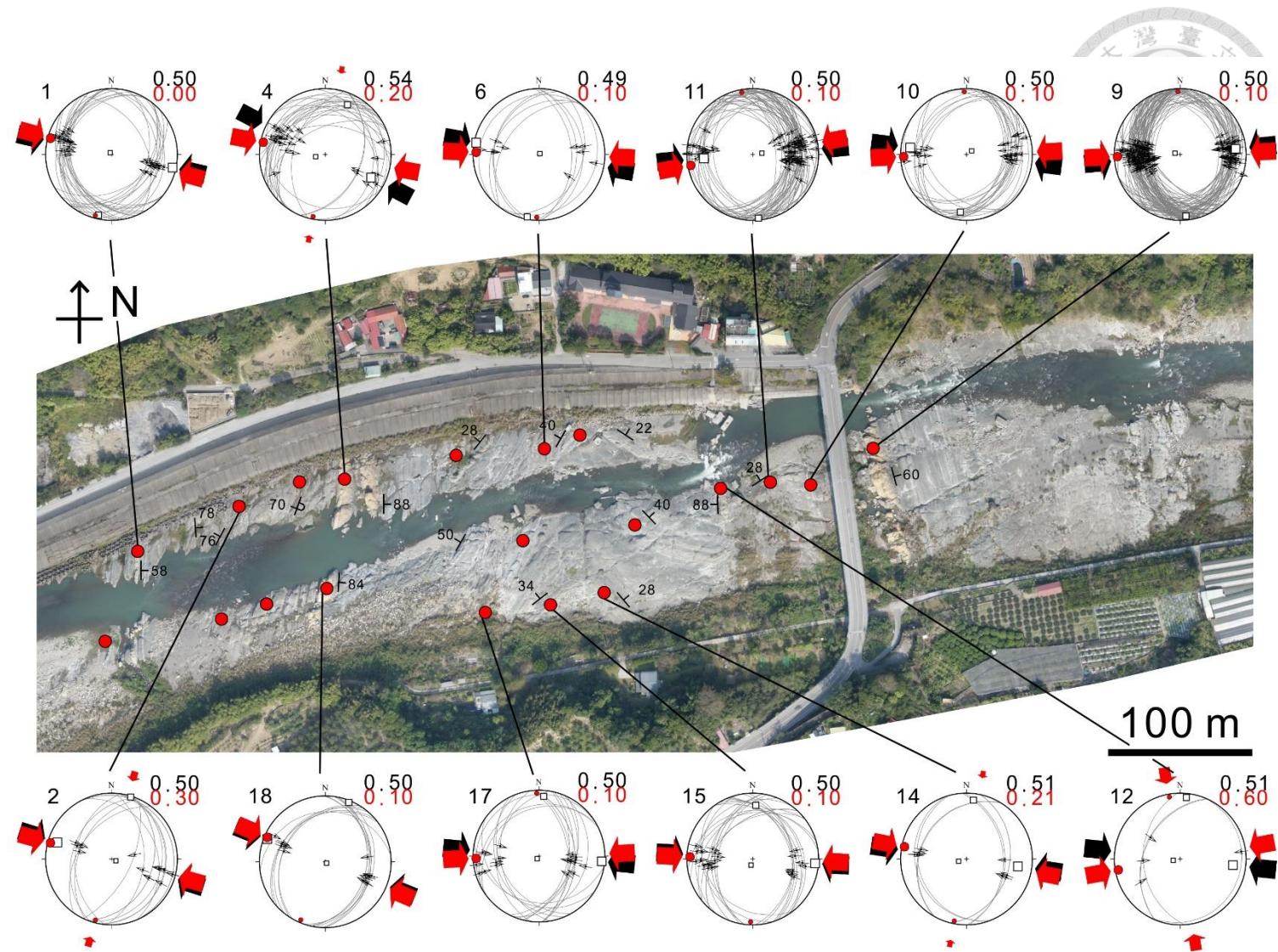


圖 5-30 國姓龜溝

地區 1b 期分布圖 (原始資料)。紅點為調查過的露頭點，左上角為編號；斷層以施密特下半球赤平投影呈現，紅色虛線為層面位態，藍線為沿既有破裂面再滑動之資料。

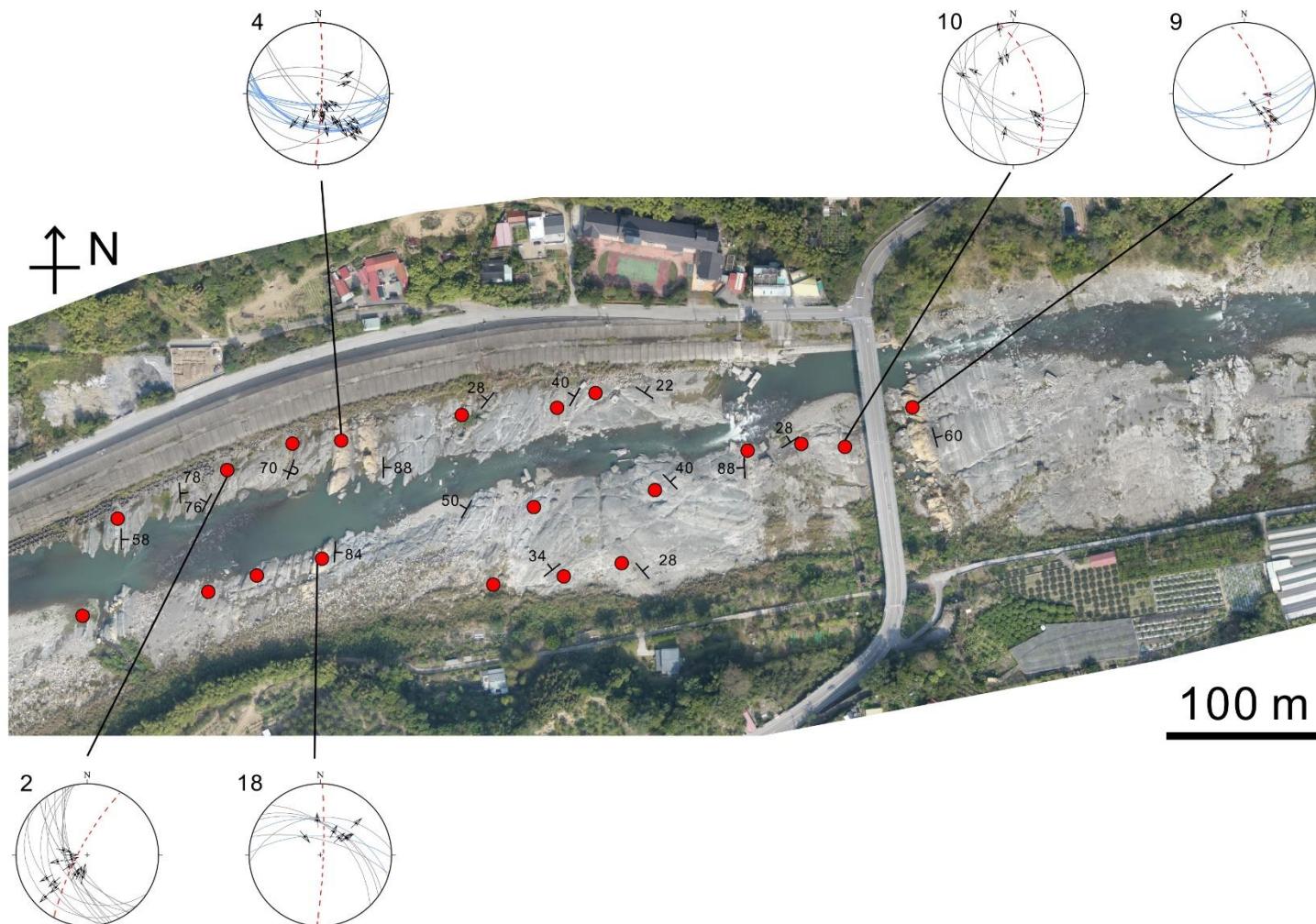


圖 5-31 國姓龜溝

地區 1b 期分布圖 (層面修正資料)。紅點為調查過的露頭點，左上角為編號；斷層以施密特下半球赤平投影呈現，紅色虛線為層面位態，藍線為既有破裂面再滑動之資料。

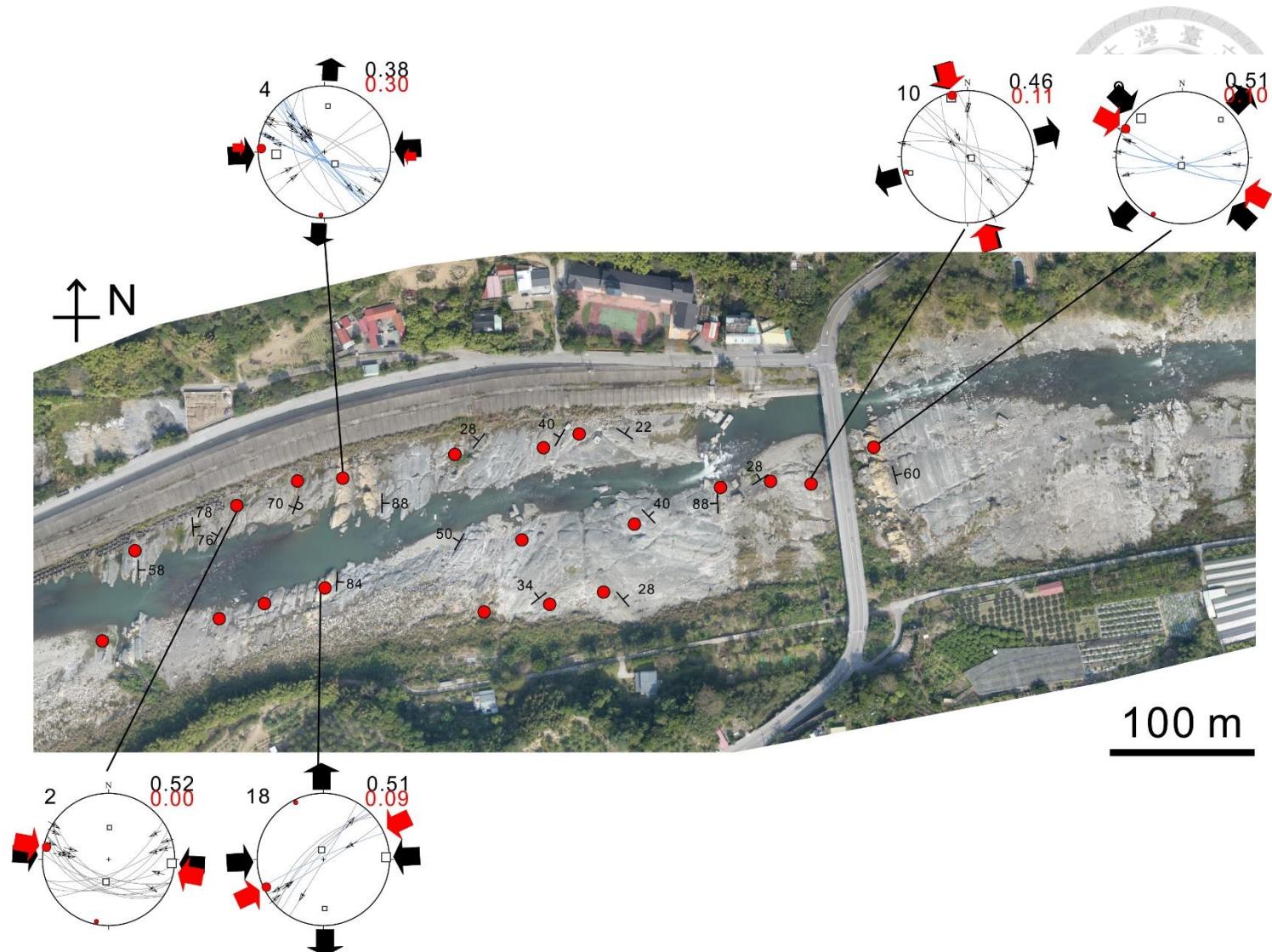


圖 5-32 國姓龜溝

地區 2a 和 2b 期分布

圖(修正資料)。紅點

為調查過的露頭點，

左上角為編號；斷層

以施密特下半球赤平

投影呈現，紅色虛線

為層面位態，藍線為

沿既有破裂面再滑動

之資料。

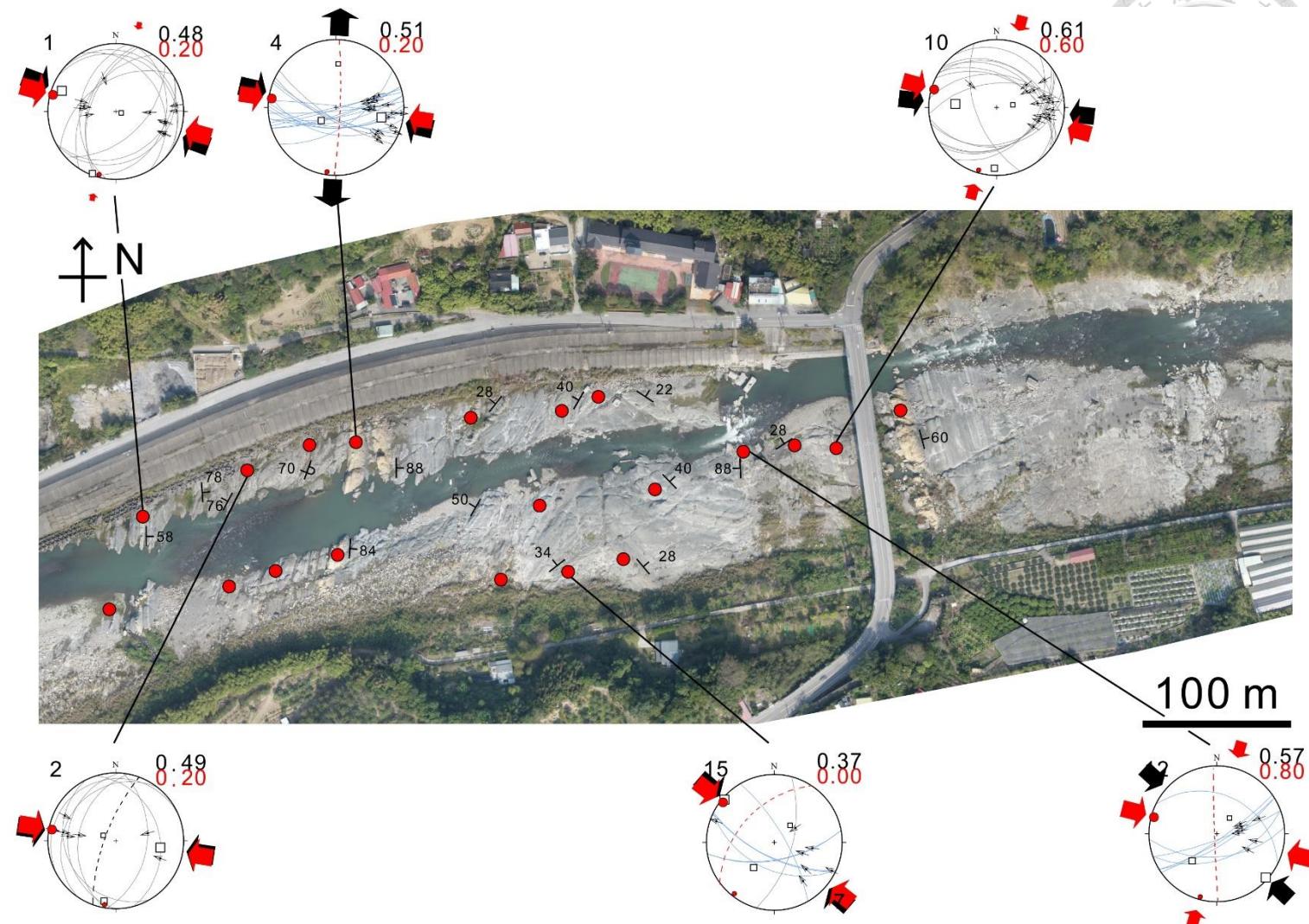


圖 5-33 國姓龜溝  
地區 3a 期分布圖 (原  
始資料)。紅點為調查  
過的露頭點，左上角  
為編號；斷層以施密  
特下半球赤平投影呈  
現，紅色虛線為層面  
位態，藍線為沿既有  
破裂面再滑動之資  
料。

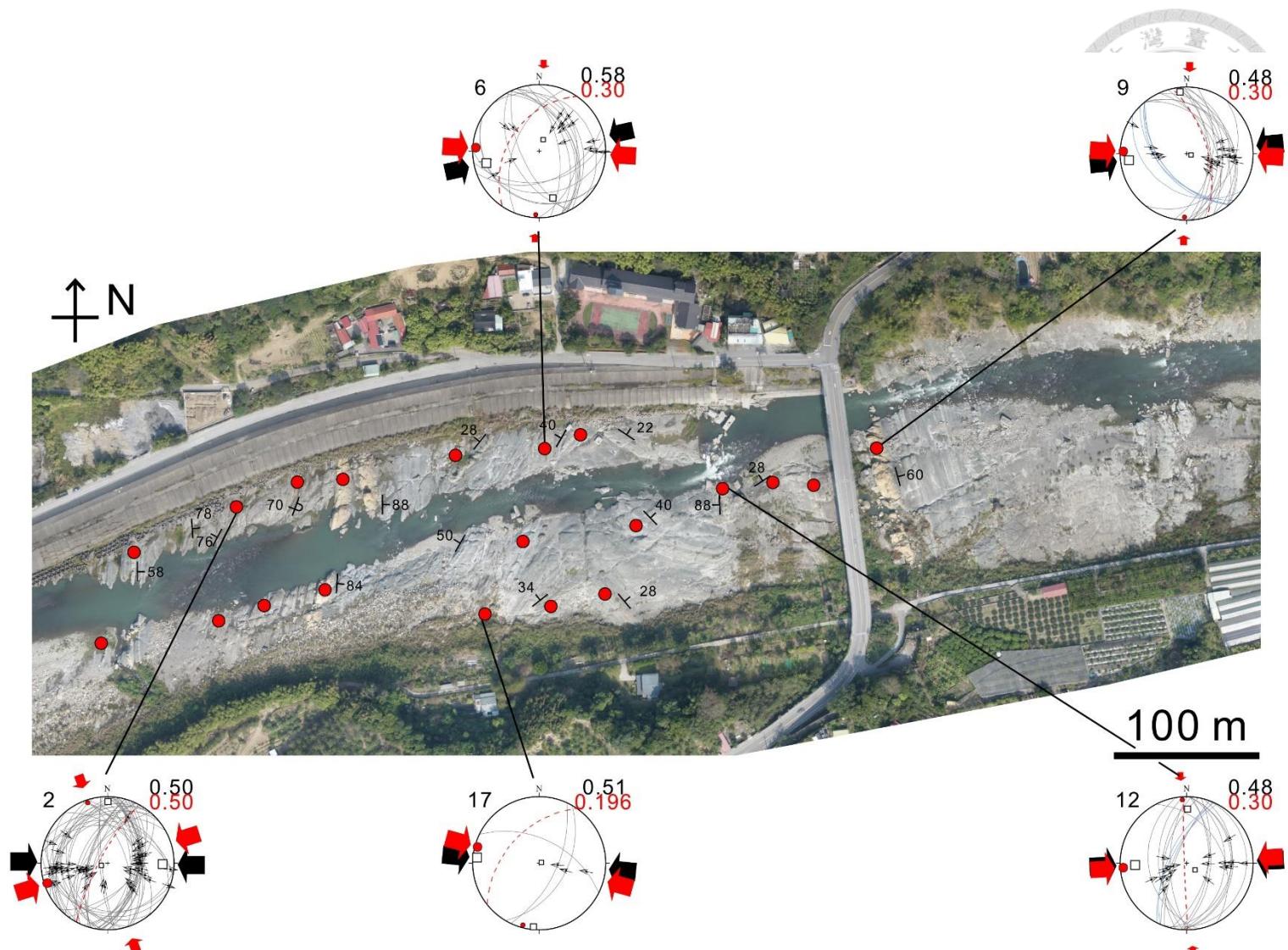


圖 5-34 國姓龜溝

### 地區 3b 期分布圖 (原

始資料)。紅點為調查

過的露頭點，左上角

為編號；斷層以施密

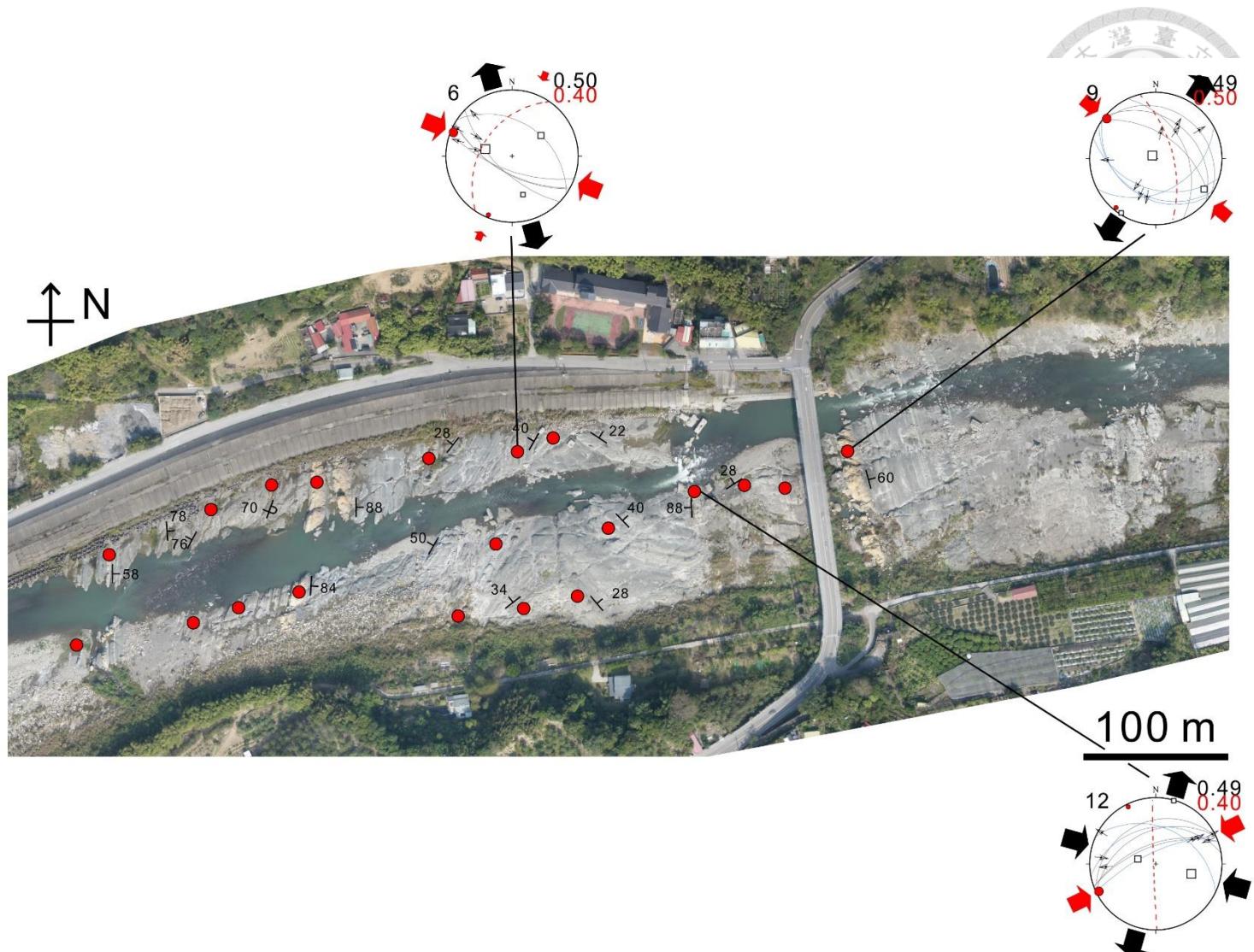
呈平赤赤半球球下半下特

現，紅色虛線為層面

位態，藍線為沿既有

## 破裂面再滑動之資

料。





#### 5-4-4 應力軸差比與應變軸差比

在應力分析與運動學分析中，首先要考慮的是尺度的問題。在微觀的尺度下，岩體的性質、不均質與應力集中現象常成為變形的重要控制因素，然而若考慮中視（或巨視）尺度的分析範圍，上述之因素造成的影響並不大，此時須將多個測量點的測量結果做統計，得到合乎統計學理論的代表值（如平均值），針對整個區域做通盤之考慮而非聚焦在某測量點上。所求得之結果（包含應力張量與應變張量）反映的是一個地區的受力與變形狀況，此時分析結果才有足以代表中視尺度範圍的意義。因此，本節針對龜溝地區各測量點的應力軸差比與應變軸差比，做一綜合性的分析。

##### 應力軸差比

表 3 顯示各分期的應力軸差比，其中早期的事件（1a、1b）的數值非常接近 0，部份異常的數值（如 Site 12）可能是因為資料筆數過少，在計算時會有較大的誤差，我們將這些資料剔除後計算之算術平均為 0.13（剔除特定資料後，列入計算者為粗體，計算之平均會以\*記號表示，若無剔除則正常計算）；相較之下，晚期的事件（2a 或 2b、3a、3b）的數值相對較高，算數平均在 0.17、0.35 與 0.46 之間，分布圖見圖 5-35。

表 4 同樣顯示應力軸差比的分布，但將同一期之資料做合併計算，早期事件平均值 0.24，晚期為 0.34。可以發現某些測量點之數值有明顯的變化，這是因為同一期中不同群的資料所計算的應力張量並不同，因此混合計算時無法得到一致的結果，顯示即使是相同的應力階段，所受到的應力來源仍會有些許的不同，如 Site 10 的 1a 和 1b 期。但不管是哪一種計算方法，分析結果皆顯示，在構造演化過程中，應力軸差比有小幅度上升的趨勢。



表 3 (左) 龜溝地區應力軸差比分期結果分析 (一)

表 4 (右) 龜溝地區應力軸差比分期結果分析 (二)

編號/分期	1A	1B	2A	3A	3B
Site 1	<b>0.00</b>		<b>0.11</b>		
Site 2	<b>0.30</b>	0.00	<b>0.20</b>	<b>0.50</b>	
Site 4	<b>0.20</b>	0.30	<b>0.20</b>		
Site 6	<b>0.10</b>			<b>0.30</b>	0.40
Site 9	<b>0.10</b>	0.10		<b>0.30</b>	0.60
Site 10	<b>0.10</b>	0.11	0.61		
Site 11	<b>0.10</b>				
Site 12	0.70		0.80	<b>0.30</b>	0.40
Site 14	<b>0.21</b>				
Site 15	<b>0.10</b>		0.00		
Site 17	<b>0.10</b>			0.20	
Site 18	<b>0.10</b>	0.09			
平均	0.13*	0.12	0.17*	0.35*	0.46
標準差	0.07*	0.10	0.04*	0.09*	0.10

編號/分期	1A+AB	2A	3A+3B
Site 1	0.00	0.11	
Site 2	0.00	0.20	0.50
Site 4	0.20	0.20	
Site 6	0.10		0.61
Site 9	0.51		0.50
Site 10	0.71	0.61	
Site 11	0.10		
Site 12	0.70	0.80	0.30
Site 14	0.21		
Site 15	0.10	0.00	
Site 17	0.10		0.20
Site 18	0.10		
平均	0.24	0.34	0.34
標準差	0.25	0.31	0.31

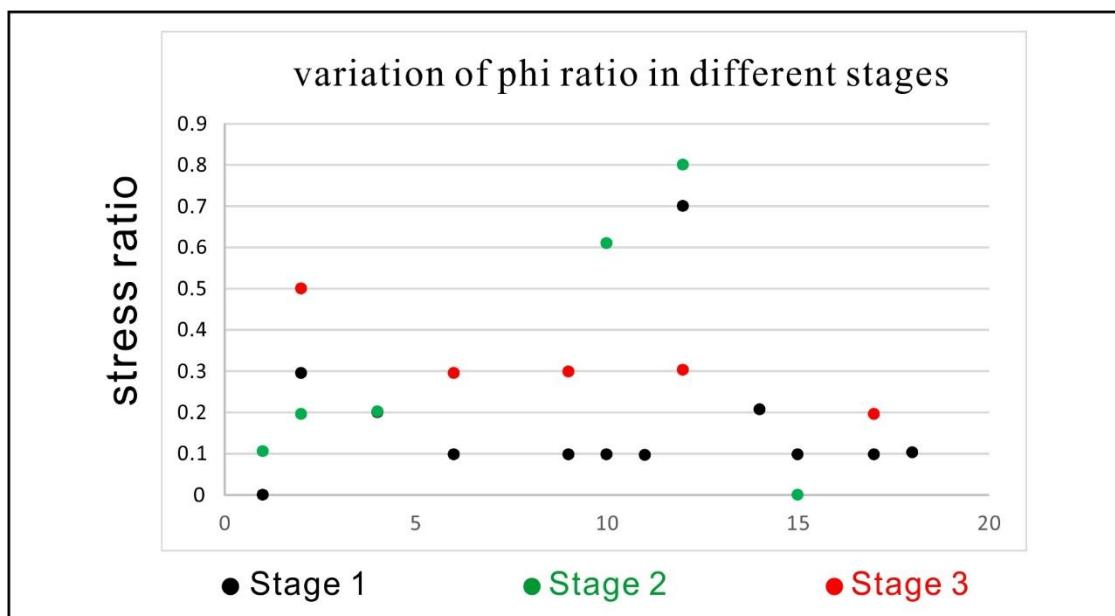


圖 5-35 龜溝應力軸差比分布圖，資料來源為表 3，縱軸為應力軸差比，橫軸為測量點編號。

## 應變軸差比

表 5 與表 6 則同樣考慮分期各別計算與合併計算，不同於應力分析的結果，應變分析的結果相當一致：各別分析中，1a、1b、2a（或 2b）、3a、3b 之值分別為 0.50、0.48、0.49、0.51、0.48（圖 5-36、表 5，剔除特定資料後計算之平均會以\* 記號表示）；合併分析中，Stage 1、Stage 2、Stage 3 之平均值分別為 0.47、0.50、0.48。由於應變張量代表的是變形的狀態，顯示國姓地區（或雙冬斷層系統上盤）在構造演化的過程中，有一個主要的擠壓變形方向（通常為東西向）與一個次要的擠壓變形方向（通常為南北向），且這個變形狀況不因地體抬升、傾斜或是上覆岩體剝蝕而有所改變。

表 5 (左) 龜溝地區應變軸差比分期結果分析 (一)

表 6 (右) 龜溝地區應變軸差比分期結果分析 (二)

編號/分期	1A	1B	2A	3A	3B
Site 1	<b>0.50</b>		<b>0.48</b>		
Site 2	<b>0.50</b>	0.52	<b>0.49</b>	<b>0.50</b>	
Site 4	<b>0.54</b>	0.38	<b>0.51</b>		
Site 6	<b>0.49</b>			<b>0.58</b>	0.50
Site 9	<b>0.50</b>	0.51		<b>0.48</b>	0.49
Site 10	<b>0.50</b>	0.46	0.60		
Site 11	<b>0.50</b>				
Site 12	0.51		0.56	<b>0.48</b>	0.46
Site 14	<b>0.51</b>				
Site 15	<b>0.50</b>		0.37		
Site 17	<b>0.50</b>			0.51	
Site 18	<b>0.50</b>	0.51			
平均	0.50*	0.48	0.49*	0.51*	0.48
標準差	0.01*	0.05	0.01*	0.04*	0.02

編號/分期	1A+AB	2A	3A+3B
Site 1	0.50	0.48	
Site 2	0.36	0.49	0.50
Site 4	0.30	0.51	
Site 6	0.49		0.56
Site 9	0.51		0.38
Site 10	0.51	0.60	
Site 11	0.50		
Site 12	0.51	0.56	0.46
Site 14	0.51		
Site 15	0.50	0.37	
Site 17	0.50		0.51
Site 18	0.47		
平均	0.47	0.50	0.48
標準差	0.07	0.07	0.06

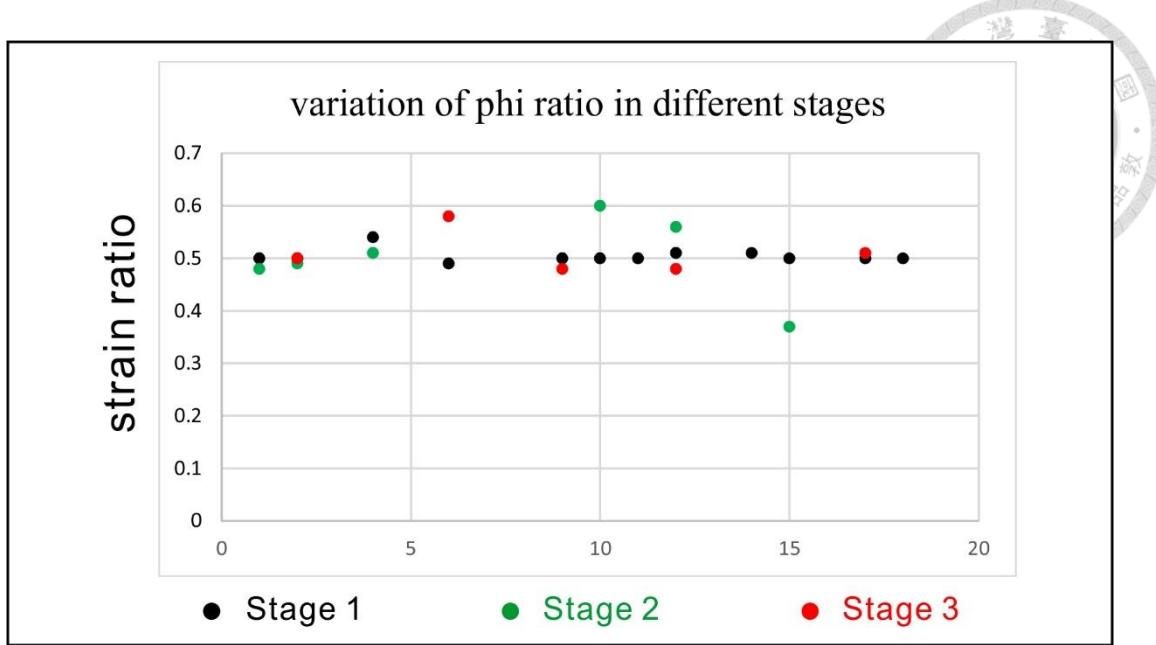


圖 5-36 龜溝應變軸差比分布圖，資料來源為表 5，縱軸為應變軸差比，橫軸為測量點編號。

#### 5-4 小結

本研究從野外觀察與擦痕分析結果來推論雙冬斷層系統上盤之型態、機制與演化，發現一早期的伸張性應力（可能造成同沉積斷層或節理）以及之後至少兩期的擠壓應力。在擠壓事件中，早期的擦痕資料常呈現正斷層或平移斷層型式，然而修正後卻成為明顯共軛逆斷層系統（Stage 1），顯示本期是在地層還維持在接近水平位態時形成的（造山作用初期）。爾後可能因雙冬斷層上盤上衝塊體持續滑移抬升，使得地層褶皺傾斜與地層堆疊，同時也產生晚期的逆衝及平移系統。較晚期（Stage 2、Stage 3）的斷層擦痕破裂，研判是上衝地塊在淺部形成連續短波長褶皺的同時期時所伴隨的脆性構造，且部分錯動是沿早期形成的既有破裂面滑動。

應力分析與應變分析顯示早期事件（Stage 1）與晚期事件（Stage 2、Stage 3）在擠壓方向上是差異不大的，皆呈現東西向到西北西-東南東走向；應力軸差比在構造演化過程中，有小幅度上升的趨勢，約從 0.10 到 0.32。相較之下，應變軸差比分析的結果則相當一致，皆在 0.50 上下，反映在構造演化的過程中，有一個主要的擠壓變形方向與一個次要的擠壓變形方向，且這個變形狀況不因地體抬升、傾斜或是上覆岩體剝蝕而有所改變，至於地質意義將在第六章中詳細討論。



## 第六章 討論

### 6-1 地層辨認、指準層、露頭構造剖面重建的相關問題討論

#### 指準層的選定

地層比對與指準層的選定，是本研究的重要基礎。本研究於第四章以砂泥岩之間差異侵蝕現象，並參酌前人之地層研究（吳樂群，1986；黃奇瑜，1986），研判研究範圍內厚黃砂岩（B 序列）原為同一層，相當於石門村層之頂部岩層，以此建構地質剖面。在附近相當的層位中，其實亦有其他類似的岩層，如石門村層共有三層類似的厚黃砂岩（出露於國姓背斜），或是在福隆園層的底部等。但是這些岩層產狀與研究區內並不符合，（如：該砂岩中部有明顯交錯層，且頂部為約 60 公分之搬運化石與大型有孔蟲），或是使岩層序列對比變得極為複雜，因此在岩層比對上，將厚黃砂岩認定為同一層，可能是較好的選擇。

#### 構造剖面的厚度問題

另一個問題是構造剖面重建過程中，會遵循以下簡化的平衡原則：

1. 岩石體積於變形同時保持不變。
2. 地層厚度不變。
3. 因壓溶作用或是構造作用擠壓而改變的岩體體積會被忽略

透過這三個原則，可以推算地底下未知的地層厚度與所在深度，雖然這種幾何作圖的方法，可能導致估算時的一些誤差。首先，研究範圍內多半為猴洞坑層，岩性以厚層泥岩為主，在這個應力與應變集中的區域，可能會造成泥岩層因擠壓作用而導致體積的變化，使地層總厚度估算不易；再者，考慮製圖範圍與尺度問題，岩層因側向延伸所造成的厚度變化亦容易造成誤差，特別是在尺度較小的範圍。因此，本研究使用上述原則方便製圖，但對於地下構造的解釋仍需搭配其他資料（如淺部震測）來佐證。



## 6-2 利用軟體進行斷層擦痕分析的問題

在討論斷層擦痕的分析方法上，本研究曾於第三章詳述應力分析的過程，在野外進行判定與分期後，再由 T-tecto 3.0 軟體計算應力張量，事實上軟體本身亦有分群能力，但本研究還是以野外觀察的分期為首要考量依據，特別是同一期破裂的共軛斷層擦痕。一般而言，判定共軛斷層時，主要利用的是它內在且固有的幾何特性，此特性與地層是否遭受傾動無關，並以此得出判斷準則 (Anderson, 1951)，如：

- (1) 斷層面主要分佈於兩組資料。
- (2) 斷層擦痕約垂直於兩組斷層面的交線。
- (3) 所有的主應力軸包含在此兩組斷層面的交角之銳角的平分線上。
- (4) 此兩組斷層面所夾之銳角角度為岩石力學係數。
- (5) 最大主應力軸的方位 ( $\sigma_1$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾的銳角平分線。
- (6) 次主應力軸的方位 ( $\sigma_2$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾之交線。
- (7) 最小主應力軸的方位 ( $\sigma_3$ ) 為兩組斷層面擦痕所夾的鈍角平分線。

無數的區域分析已經證明其可靠性與一致性，然而隨著構造地質學的發展，這樣單一模式的侷限性越來越明顯，因為在許多情形下，所觀察到的斷層滑動常發生於既有的弱面上，因此，在考慮多期構造應力的前提下，又進而衍生出更多的假設。即將所有的擦痕數據各別視為獨立的系統，並具有各自的應力張量，Angelier (1994) 在進行數據分離時，便是利用上述斷層力學機制的一致性，將應力張量相似的那些資料自動群集、圈聚起來，最終得到若干組簡化應力張量，這種方法在統計學上稱為「群集分析」，而今日許多應力軟體也多採用此一原理進行分群。

但是在大多數的定量分析中，斷層擦痕分析真正的難點不在於物理或統計上的問題，除了依賴斷層力學機制的一致性，也要考慮地質記錄的訊息來做分期，如此才能將數據分離後計算之應力張量按時間先後順序進行排列。若想要針對各斷層組的活動年代順序進行確定，最重要的可能還是在野外仔細記錄證明其次序之地質現象，如擦痕截切關係等等，Angelier (1994) 亦同樣強調野外證據對於應力

分期的重要性。就本研究範圍而言，由於擦痕分期牽涉到地層之傾斜，在研究過程中，T-tecto 3.0 軟體無法有效區分早期 (Stage 1) 與晚期 (Stage 2, 3) 的滑動資料，因此本研究以野外觀察為準。同時在軟體使用與構造解釋上，也必須更加謹慎與注意。

### 6-3 斷層擦痕分析結果的地質意義

根據應力分期之結果，本區斷層與擦痕破裂事件主要可分為三期（表 7），即褶皺前 (Stage 1，早期)、褶皺中 (Stage 2，晚期 1)、褶皺後 (Stage 3，晚期 2)。早期的擦痕事件經層面修正後基本上皆為一致的共軛逆斷層，並呈現強烈東西向擠壓的應力機制；後兩期的滑移事件略有變化，為東西向到西北西-東南東擠壓機制的逆斷層或平移斷層。

從數量來說，每一期的主控斷層型態皆為逆斷層，或許反映西部麓山帶在造山運動時期的特色，即長度縮短導致地層增厚；從不同分期階段來說，早期擦痕的總數量與完整性都高於晚期總數量，本研究解釋這可能是因為在晚期階段的地層深度較淺（小於 4 公里），以致於溫壓條件不足以使富含碳酸鈣之鈣質砂岩溶化，進而產生方解石熱液，填充於斷層裂隙之間並再結晶，唯有少數幾次的破裂事件（較大地震或是滑移破裂起始位置較深），能在破裂面上產生足夠的摩擦熱，使熱液形成。從擦痕幾何形貌及方位來說，早期的逆斷層方位皆一致且變異小，晚期較不一致（變異大），可能與晚期破裂多沿既有破裂滑動有關。

在每一期的擦痕資料中，皆可發現一組主要的擠壓方向與若干組次要的擠壓方向（表 7），它們的應力特徵是很相似的，即有一組主控的最大應力 ( $\sigma_1$ )，但方向可能不盡相同；至於  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的方位，則會有互換的情形。這個結果說明即使是一個應力事件階段，仍會有主要的應力型態與次要的應力型態，而這種分布是普遍存在的。



表 7 斷層擦痕的應力型態與應力階段比較

應力階段	主要構造與應力型態	次要構造與應力型態	對應之地層位態
Stage 1	逆斷層 	平移斷層 	地層尚處水平時 (pre-folding)
Stage 2	逆斷層 	逆斷層 平移斷層 	地層隨雙冬斷層發育 而產生上盤褶皺 (syn-folding)
Stage 3	逆斷層 	平移斷層 正斷層 	褶皺的最後階段或褶 皺作用後 (post-folding)

擦痕的生成代表過去曾發生過地震事件，可能是大地震或是山崩，在考慮這些少數且次要滑移事件的資料時，可以用岩石的不均質、測量誤差等等來解釋。從另一角度來看，這種在同一應力事件階段出現不同應力機制的現象，也可能是因為應力互換 (stress permutation) 或應力擾動 (stress perturbation)。1906 年規模 7.9 之舊金山地震，Reid (1910) 針對該次地震提出了彈性回跳學說 (Elastic rebound theory)，在地震發生之前，應力持續累積在斷層帶附近，當斷層錯動造成地震發生，累積在斷層上之應力受到釋放。在往後的研究中，這個理論逐漸獲得支持，並進一步發展出「大型地震造成應力釋放進而產生應力轉移」的觀念。有名的例子如美國南加州聖安地列斯斷層 (San Andreas Fault)，或是土耳其的北安那托利亞斷層 (North Anatolian Fault)，皆有過大地震發生後應力轉移，並誘發鄰近地區地震的歷史記錄 (Stein, 1999; 2003)。Wang and Chen (2001) 以及 Wang et al. (2001) 利用 GPS 以及強地動資料 (strong ground motion record) 逆推而得到三維集集地震破裂模型，並計算集集地震震後應力之轉移與震源機制之分佈情形。研究結果指出集集地震前後在震央附近地區之震源機制分佈明顯不同，與逆斷層震源機制相比，平移斷層的數目相對上升，且有明顯的應力降。對照於存在岩體中的地質記錄，本研究認為，或許可以用另一種觀點去看待這些「異常」的擦痕資料。在雙冬

斷層系統演化的過程中，常伴隨許多地震滑移事件，地震循環的記錄在數十萬年裡被保存在斷層帶周遭的岩體破裂中，意即這些斷層擦痕不僅記錄了大地震時期或間震期的應力狀態，同時也記錄了震後時期餘震的應力狀態。



#### 6-4 應力張量與應變張量之異同

從第五章的分析結果來看，可以發現應力分析與應變分析之結果顯示，應力軸與應變軸的方位並不完全一致。首先，在主要擠壓方向（最大應力軸、最大應變軸）上略有不同，但基本上維持東西向到西北-東南向的變化，在地質意義上，應力場反映的是「最大擠壓方向」，反之，應變場代表的是「最大變形方向」，在構造歷史中若經歷塊體旋轉或是非共軸應變，就有可能造成兩者的差異。

此外，從矩陣張量所計算之軸差比來看，扣除次要應力狀態與誤差較大之資料後的結果，應力軸差比於三期平均分別約為 0.12、0.17、0.35（圖 6-1），應變軸差比則分別約為 0.50、0.49 及 0.51。這顯然是因為兩者所用之演算法不同所導致。無論何種計算方法，皆顯示上衝褶皺塊體受到的地殼應力及變形的特色為：（1）有強勢的水平擠壓應力及應變（主要東西向），（2）爬衝過程中維持著強勢的垂直方向最小主應力，（3）岩石的水平圍壓應力（第二主應力軸），明顯大於垂直重力壓應力，暗示台灣中部地區的褶皺逆衝帶在造山作用過程中，水平側向還是有明顯的擠壓應力。一般而言，褶皺塊體在上升過程中，最小主應力（垂直方向）的大小會隨深度逐漸減緩而下降，而水平圍壓應力（第二主應力軸）可能亦隨之下降。然而應力/應變張量的結果顯示，在演化過程中水平圍壓應力一直是維持大於垂直圍壓應力的，這也許是因為台灣中部處於造山帶的中段，因此側向應力作用明顯。例如在台灣西南部造山帶的南端，褶皺逆衝帶中便常見到普遍的平移斷層擦痕發育，顯示水平圍岩的應力相對減弱。另外在野外僅觀察到 2 至 3 條中尺度的平移斷層，數量遠少於逆斷層，其運動學機制尚不十分明瞭，但也許和區域應力調整有



關。從岩層大致走向和大區域來比較，本區域似乎沒有明顯的水平方向塊體旋轉，所計算之應力場/應變場亦未特別顯示朝順時針或逆時針水平旋轉之特色。

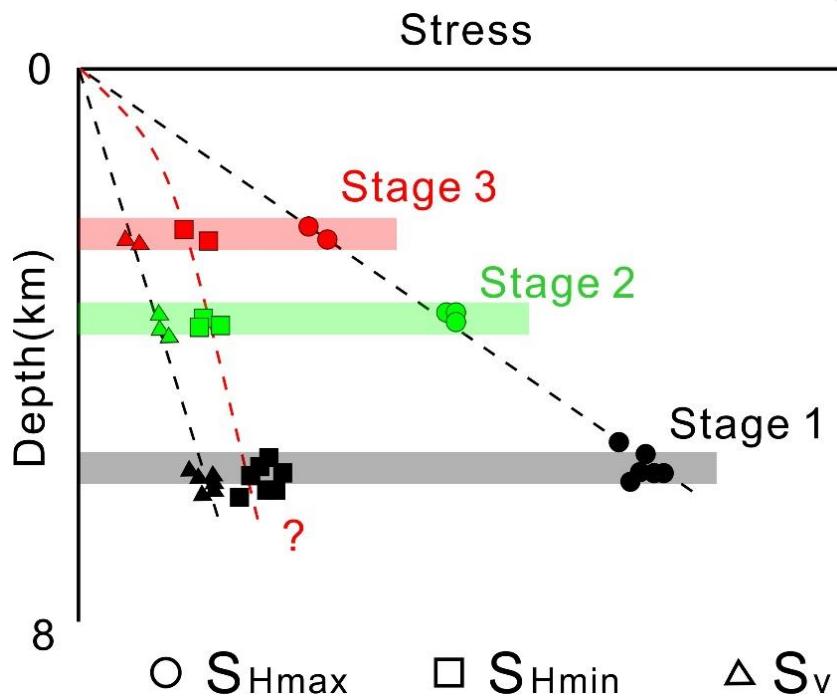


圖 6-1 應力軸差比隨深度變化示意圖

## 6-5 雙冬斷層系統構造演化

如第四、五兩章所述，整個上衝塊體的破裂與變形也反映在雙冬斷層系統的發育與演化上，並且將應力狀態的演變記錄在斷層擦痕中。從國姓龜溝的觀察分析，本研究試圖推及雙冬斷層系統的演化過程，如下（圖 6-2）：

在中新世時期，來自東北方的大陸邊緣沉積物緩慢沉積在基盤岩層上，這些基盤岩層在先前因張裂作用形成一系列的正斷層與沉積盆地；沉積物經逐漸深埋及成岩作用後形成沉積岩層，此時地層尚處於水平，並發育早期的同沉積斷層及節理，其型態垂直（或近乎垂直）於地層層面；到了上新世晚期，造山運動開始，兩大板塊相互擠壓，於西部麓山帶發育一系列之褶皺逆衝斷層，其發育順序為由東至西。此時中新世的沉積岩層約在深度 4-6 公里處（圖 6-2），隨著雙冬斷層開始發育產生



一系列滑移（地震），在斷層帶附近的中新世地層因擠壓而出現早期的共軛逆斷層破裂，呈現明顯的東西向擠壓應力（Stage 1），並將富含生物碎屑的鈣質砂岩材料溶為方解石熱液，充填進共軛破裂中重新再結晶，形成方解石擦痕。

爾後，雙冬主斷層系統沿摩擦力較低之弱面滑移，並往上切穿岩層逐漸往地表發育，斷層上盤的岩層也隨之抬升、傾斜、擠壓形成褶皺，使早期逆斷層傾斜成正斷層擦痕的樣貌，同時在此動態的過程中留下破裂記錄（Stage 2）。在主斷層系統發育時，不只有雙冬斷層，同時還包含了其分支斷層，即龜蒲斷層的滑移，並形成雙軌（Duplex）構造；在斷層上盤塊體褶皺抬升至接近地表約 2-4 公里深時，因持續擠壓的緣故，而在應力集中處（近龜蒲斷層）產生若干短波長的次生褶皺與次生斷層，推測對應於發育最後期的破裂滑移事件（Stage 3），由於塊體抬升之緣故，其溫壓環境已不易使碳酸鈣材料溶化，僅剩破裂當下斷層面上產生的摩擦熱可使之溶化再結晶，因此斷層擦痕數量減少許多，整個晚期的破裂事件（Stage 2、Stage 3）呈現東西向到西北-東南向的擠壓應力機制，其中某些破裂會沿著原先既有之弱面滑動，如節理、早期破裂滑移面等等。在這個過程中，亦伴隨著區域塊體向北傾沒，至於岩體向北傾沒和地層傾斜是否為同時發生，還需要進一步的研究。

最後地表不斷在抬升及侵蝕風化的交互作用下，包含烏溪河川下切，最終使岩層出露在地表，並揭露其所記錄之地質歷史。整個地質過程記錄了多個應力（地震）事件，包含一個擠壓造山作用中，斷層發育、塊體抬升、傾斜、褶皺與水平旋轉的不同階段。

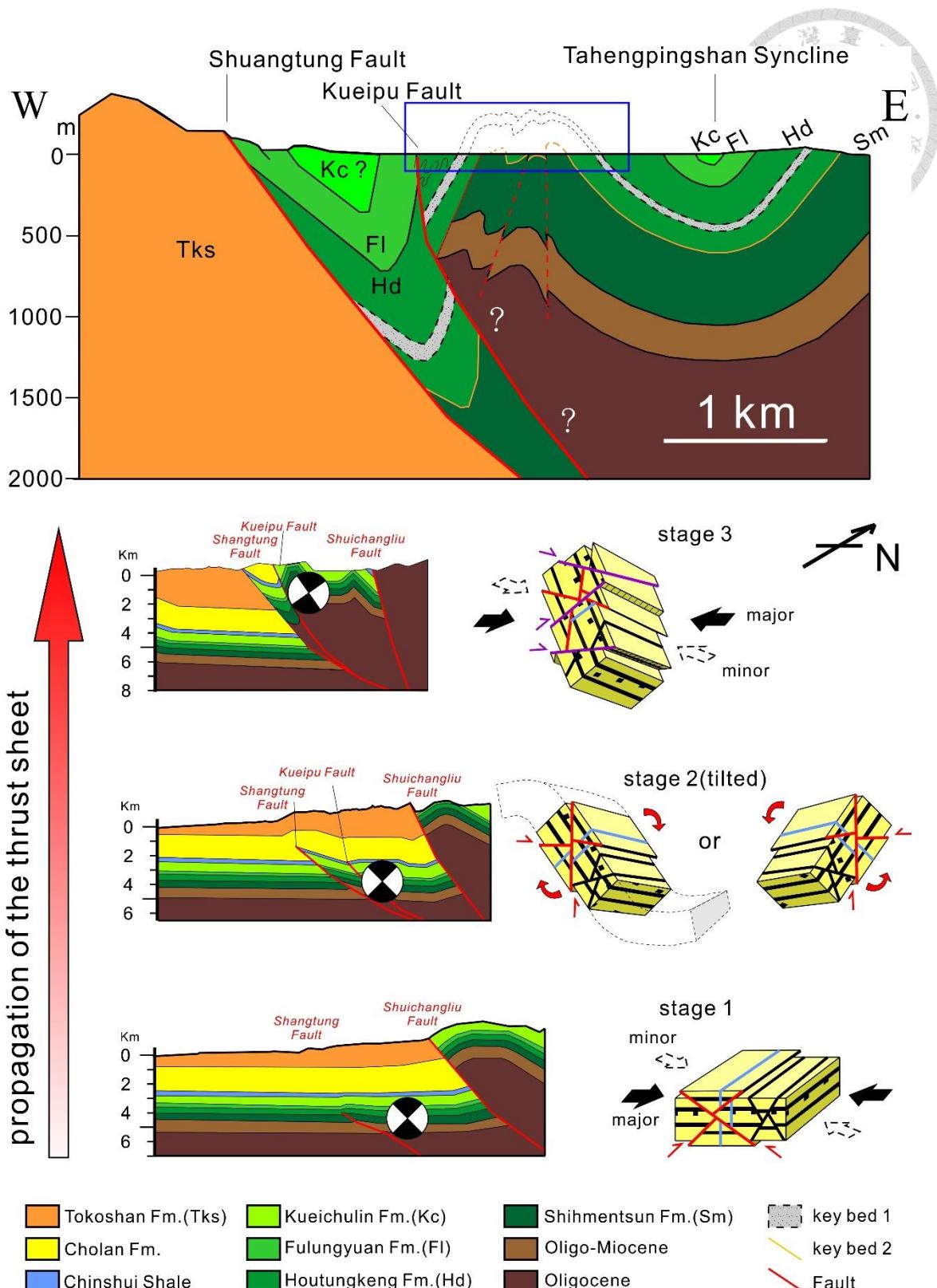


圖 6-2 雙冬斷層系統演化過程示意圖。藍色方框為國姓龜溝地區，指準層 1 為岩層序列 F，指準層 2 為岩層序列 B，震源機制解為破裂滑移事件發生的深度示意圖。



## 第七章 結論

1. 本研究透過野外調查，得到國姓龜溝地區的變形特徵與地層分布。利用幾個指準厚砂岩層，界定出 A-F 共 6 個岩層序列，主要形成 2-3 個覆瓦狀堆疊，並伴隨 3-4 個向北傾沒的短波長連續褶皺，本研究將其分成構造分區 I-IV，同時區域塊體具有向北傾沒的特性。另外野外觀察也發現，越接近斷層帶，地層變形會越加劇烈，本區域總體來說雙冬斷層雙軌 (duplex) 構造的上衝地塊是一個應力集中之地區。
2. 利用斷層擦痕互相截切的關係，本研究將擦痕分離出三期應力事件，三期的應力機制都接近東西向或西北西-東南東擠壓，與現今大地構造應力吻合。而對於每一期的擦痕，皆有部份的資料呈現不同的擠壓方向，顯示即使是一個應力事件階段，仍會有主要的應力型態與次要的應力型態。在雙冬斷層系統演化的過程中，常伴隨許多地震滑移事件，地震循環的記錄在數十萬年裡被保存在雙冬斷層帶周遭的上衝塊體中。本研究認為這些斷層擦痕不僅記錄了大地震時期或間震期的應力狀態，同時也記錄了震後時期餘震的應力狀態，因此，主要與次要的擦痕滑移事件也許分別可對應於地質事件中，同震（或間震）滑移事件與震後滑移事件。
3. 根據分期的結果，則可以建構雙冬斷層上盤岩層的構造演化，主要有一期伸張性事件（造成早期的同沉積斷層及節理）與三期的擠壓性事件（Stage1, 2, 3），早期的共軛逆斷層系統是在地層還維持在接近水平位態時形成的（造山作用初期，Stage 1），約在地下 4-6 公里深。爾後隨著雙冬斷層上盤上衝塊體持續滑移抬升，使得地層褶皺傾斜與地層堆疊，同時也產生晚期的逆衝斷層及平移斷層系統。較晚期 (Stage 2, 3) 的斷層擦痕破裂，似乎是在上衝地塊在淺部 (2-4 公里深) 形成連續短波長褶皺的同時期所伴隨的脆性構造，而分析也顯示部分錯動是沿早期形成的既有破裂面滑動。整個地質過程記錄了多個應力（地震）

事件，包含一個擠壓造山作用中，斷層發育、塊體抬升、傾斜、褶皺與水平旋轉的不同階段以及彼此間的交互作用。



4. 斷層擦痕分析的結果顯示應力軸差比在擠壓過程中逐漸上升，從 0.13 到 0.35，此結果皆顯示上衝褶皺塊體主要受到東西向強勢的水平擠壓應力 ( $\sigma_1$ )，並在爬衝過程中維持著垂直方向最小主應力 ( $\sigma_3=\sigma_v$ )，在演化過程中水平圍壓應力 (第二主應力軸,  $\sigma_2$ ) 一直維持大於垂直圍壓應力 ( $\sigma_v$ )，暗示台灣中部地區的褶皺逆衝帶在造山作用過程中，水平側向還是有明顯的擠壓應力，這也許與台灣中部仍處於造山帶中段有關。

## 參考文獻

### 中文部份

- 久住久吉（1939）。台中州南投油田調查報告（64 頁）：台灣總督府殖產局。
- 大江二郎（1938）。台中州國姓油田調查報告（25 頁）：台灣總督府殖產局。
- 中國石油公司臺灣油礦探勘總處（1982）。台中圖幅(1:100,000)：中國石油股份有限公司台灣油礦探勘總處。
- 台北帝大理學院地質教室（1936）。昭和十年台灣地震災害地區地質調查報告（79 頁）。
- 何春蓀（1982）。臺灣地體構造的演變：臺灣地體構造圖說明書。臺北縣：經濟部中央地質調查所。
- 何春蓀（2006）。臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書（第二版）。臺北縣：經濟部中央地質調查所。
- 何春蓀、譚立平（1960）。臺灣臺中東勢至南投國姓間煤田地質。臺灣省地質調查所彙刊，第 12 期，頁 19-62。
- 吳樂群（1986）。臺灣中部國姓地區漸新統及中新統之古沉積環境分析。國立臺灣大學地質科學研究所。
- 李錫堤（1986）。大地應力分析與弧陸碰撞對於臺灣北部古應力場變遷影響。國立臺灣大學地質學研究所，臺北市。
- 李錫堤、康耿豪、鄭錦桐、廖啟雯（2000）。921 集集大地震之地表破裂及地盤變形現象。地工技術，第 81 期，頁 5-16。
- 林啟文、石同生、石瑞銓（2003）。臺灣中部南投地區的車籠埔斷層帶特性研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 16 期，頁 53-72。
- 紀文榮、黃秀美（1981）。苗栗地區晚新第三紀地層之超微體化石生物地層、古沉積環境及其在構造上之意義。臺灣石油地質，第 18 期，頁 111-129。
- 畢慶昌（1969）。俯衝運動在台灣地體構成中的作用。臺灣省地質調查所彙刊，第二





- 十號，頁 1-39。
- 莊舒雲、陳鶴欽、景國恩、饒瑞鈞、侯進雄 (2008)。由 1996-2006 年之 GPS 觀測資料看台灣中部地區集集地震前後之地殼變形。經濟部中央地質調查所特刊，第二十期，頁 63-80。
- 黃文正、陳致言、劉思妤、林燕慧、林啟文、張徽正 (2000)。臺灣中部大甲溪至頭汴坑溪九二一集集地震地表變形模式。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，頁 63-87。
- 黃奇瑜 (1986)。臺灣中部國姓地區地層學研究 (281-318 頁)。臺北市：國立台灣大學理學院地質系。
- 黃金來 (1968)。臺中車籠埔區震測解釋報告。中國石油公司。
- 黃鑑水、陳勉銘 (2000)。臺灣中部地區之雙冬斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第十二期，頁 171-182。
- 楊耿明、黃旭燦、吳榮章、李民、丁信修、梅文威 (2001)。大尖山—觸口逆衝斷層系統的地下構造及演化特性。「中國地質學會 90 年年會」發表之論文。
- 經濟部中央地質調查所 (1999)。九二一地震地質調查報告 (315 頁)。臺北縣：經濟部中央地質調查所。
- 劉彥求、林燕慧、李明書、林啟文 (2003)。臺灣西南部石牛溪地區九芎坑斷層的構造特性。經濟部中央地質調查所特刊，第十四期，頁 101-112。
- 謝凱旋、黃敦友 (2003)。臺灣第三系的地層層序。臺灣礦業，第 55 期 (4)，頁 17-27。
- 魏碩穎 (2003)。車籠埔斷層烏溪至濁水溪段之地下構造。國立中央大學地球物理研究所，桃園縣。
- 羅偉、吳樂群、陳華玟 (1999)。五萬分之一臺灣地質圖幅說明書-國姓地質圖幅。臺北縣：經濟部中央地質調查所。

## 英文部份

- Allegre, C. J., Courtillot, V., Tappognier, P., Hirn, A., Mattauer, M., Coulon, C., Marcoux, J. (1984). Structure and evolution of the Himalaya–Tibet orogenic belt. *Nature*, 307, 17–22.
- Anderson, E. M. (1951). *The Dynamics of Faulting, Etc.(Revised.)*. Edinburgh, London.
- Angelier, J. (1975). Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites faillés: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques. *CR Acad. Sci*, 281, 1805–1808.
- Angelier, J. (1979). Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56(3), T17–T26.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835–5848.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction. *Continental deformation*, 4, 101-120.
- Angelier, J., Barrier, E., & Hao Tsu, C. (1986). Plate collision and paleostress trajectories in a fold-thrust belt: The foothills of Taiwan. *Tectonophysics*, 125(1-3), 161–178.  
[http://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90012-0](http://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90012-0)
- Angelier, J., Bergerat, F., Hao Tsu, C., Wen Shing, J., & Chia Yu, L. (1990). Paleostress analysis as a key to margin extension: The Penghu Islands, South China Sea. *Tectonophysics*, 183(1-4), 161–176. [http://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90414-4](http://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90414-4)
- Angelier, J., & Mechler, P. (1977). Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales également utilisables en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. *Bulletin de La Société Géologique de France*, (6), 1309–1318.
- Armijo, R., & Cisternas, A. (1978). Un problème inverse en microtectonique cassante.

*CR Acad. Sci. Paris*, 287(D), 595–598.

Barrier, E., & Angelier, J. (1986). Active Collision in Eastern Taiwan: The Coastal Range.

*Tectonophysics*, 125(1-3), 34. [http://doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90006-5](http://doi.org/10.1016/0040-1951(86)90006-5)

Blenkinsop, T. G. (1989). Thickness-displacement relationships for deformation zones:

Discussion. *Journal of Structural Geology*, 11(8), 1051–1053.

[http://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90056-4](http://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90056-4)

Boyer, S. E., & Elliott, D. (1982). Thrust systems. *AAPG Bulletin*, 66(9), 1196–1230.

Carey, E., & Brunier, B. (1974). Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliquée à l'étude d'une population de failles. *CR Acad. Sci. Paris*, 279(D), 891–894.

Chang, Y. L., Lee, C. I., Lin, C. W., Hsu, C. H., & Mao, E. W. (1996). Inversion Tectonics In The Fold-Thrust Belt Of The Foothills Of The Chiayi-Tainan Area, Southwestern Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 30, 163–176.

Chester, F. M., & Logan, J. M. (1986). Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pure and Applied Geophysics*, 124(1-2), 79–106.

Chi, W. R. (1979). Calcareous nannoplankton biostratigraphy of the Nantou area, central Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 16, 131–165.

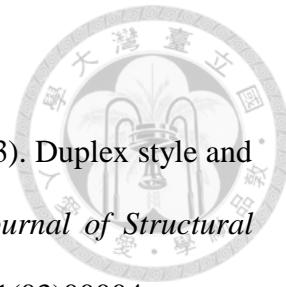
Ching, K., Hsieh, M., Johnson, K. M., Chen, K., Rau, R., & Yang, M. (2011). Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B8).

Chiu, H. T. (1972). Miocene stratigraphy of the Nantou area, central Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 10, 159–177.

Chiu, H. T. (1975). Miocene Stratigraphy And Its Relation To The Palaeogene Rocks In



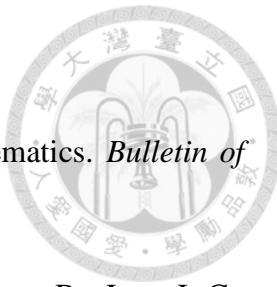
West-Central Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 12, 51–80.



- Couzens Schultz, B. A., Vendeville, B. C., & Wiltschko, D. V. (2003). Duplex style and triangle zone formation: insights from physical modeling. *Journal of Structural Geology*, 25(10), 1623–1644. [http://doi.org/10.1016/s0191-8141\(03\)00004-x](http://doi.org/10.1016/s0191-8141(03)00004-x)
- Dunne, W. M., & Ferrill, D. A. (1988). Blind thrust systems. *Geology*, 16(1), 33–36. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0033:bts>2.3.co;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0033:bts>2.3.co;2)
- Elliott, D. (1976). The motion of thrust sheets. *Journal of Geophysical Research*, 81(5), 949–963. <http://doi.org/10.1029/JB081i005p00949>
- Etchecopar, A., Vasseur, G., & Daignieres, M. (1981). An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3(1), 51–65. [http://doi.org/10.1016/0191-8141\(81\)90056-0](http://doi.org/10.1016/0191-8141(81)90056-0)
- Gamond, J. F. (1983). Displacement features associated with fault zones: a comparison between observed examples and experimental models. *Journal of Structural Geology*, 5(1), 33–45.
- Hsu, Y.-J., Simons, M., Yu, S.-B., Kuo, L.-C., & Chen, H.-Y. (2003). A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3), 287–294.
- Huang, T. C., & Ting, J. S. (1979). Calcareous nannofossil succession from the Oligo-Miocene Peikangchi section and revised stratigraphic correlation between northern and central Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, 22, 105–120.
- Huang, T., & Huang, T. C. (1984). Neogene biostratigraphy of Taiwan. *Pacific Neogene Datum Planes*, Univ. Tokyo Press, Tokyo, 209–216.
- Jones, P. B. (1982). Oil and gas beneath east-dipping underthrust faults in the Alberta foothills. *Geologic Studies of the Cordilleran Thrust Belt: Rocky Mountain*

Association of Geologists, 1, 61–74.

- Jones, P. B. (1996). Triangle zone geometry, terminology and kinematics. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 44(2), 139–152.
- Lacombe, O., Angelier, J., Moutherneau, F., Chu, H.-T., Deffontaines, B., Lee, J.-C., Siame, L. (2004). The Liuchiu Hsu island offshore SW Taiwan: tectonic versus diapiric anticline development and comparisons with onshore structures. *Comptes Rendus Geoscience*, 336(9), 815–825. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2004.02.007>
- Lee, C. T., & Wang, Y. (1987). Paleostress change due to the Pliocene-Quaternary arc-continent collision in Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 9, 63–86.
- Marrett, R., & Allmendinger, R. W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12(8), 973–986. [http://doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-e](http://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-e)
- Matte, P., Tapponnier, P., Arnaud, N., Bourjot, L., Avouac, J. P., Vidal, P., ... Yi, W. (1996). Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3), 311–330.
- Mitra, S. (1988). Three-dimensional geometry and kinematic evolution of the Pine Mountain thrust system, southern Appalachians. *Geological Society of America Bulletin*, 100(1), 72–95.
- Namson, J. (1981). Structure of the Western foothills Belt Miaoli-Hsinchu Area, Taiwan: (I) Southern Part. *Petrol. Geol. Taiwan*, 18, 31–61.
- 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.
- Petit, J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks.



*Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 597–608. [http://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90145-3](http://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90145-3)

Price, N. J. (1966). *Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock*. Pergamon Press.

Reid, H. (1910). The mechanics of the earthquake: The California earthquake of April 18, 1906, report, vol. 2, 192 pp. *State Earthquake Invest. Comm., Carnegie Inst. of Wash., Washington, DC*.

Scholz, C. H. (2002). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (2nd ed.). U.K.: Cambridge University Press.

Seno, T. (1977). The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate. *Tectonophysics*, 42(2-4), 209–226.

Stein, R. S. (1999). The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402(6762), 605–609.

Stein, R. S. (2003). Earthquake conversations. *Scientific American*, 288(1), 72–79.

Suppe, J. (1980a). A retrodeformable cross section of northern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, (23), 46–55.

Suppe, J. (1980b). Imbricated structure of western foothills belt, southcentral Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 17, 1–16.

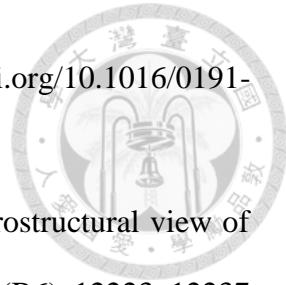
Suppe, J. (1984). Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 6, 21–33.

Suppe, J., & Medwedeff, D. A. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83(3), 409–454.

Suppe, J., & Namson, J. (1979). Fault-Bend Origin of Frontal Folds of the Western Taiwan Fold-and-Thrust Belt. *Petrol. Geol. Taiwan*, 16, 1–16.

Vann, I. R., Graham, R. H., & Hayward, A. B. (1986). The structure of mountain fronts.

*Journal of Structural Geology*, 8(3-4), 215–227. [http://doi.org/10.1016/0191-8141\(86\)90044-1](http://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90044-1)



Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1998). The process zone: A microstructural view of fault growth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B6), 12223–12237. <http://doi.org/10.1029/98jb00957>

Wang, C.-Y., Chang, C.-H., & Yen, H.-Y. (2000). An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11(3), 609–630.

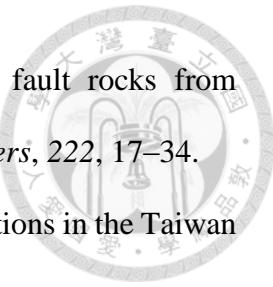
Wang, C.-Y., Li, C.-L., Su, F.-C., Leu, M.-T., Wu, M.-S., Lai, S.-H., & Chern, C.-C. (2002). Structural Mapping of the 1999 Chi-Chi Earthquake Fault, Taiwan by Seismic Reflection Methods. *TAO*, 13(3), 16.

Wang, S., Gong, S., Mii, H., & Dai, C. (2006). Cold-seep carbonate hardgrounds as the initial substrata of coral reef development in a siliciclastic paleoenvironment of southwestern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(2), 405–427.

Wang, W.-H., Chang, S.-H., & Chen, C.-H. (2001). Fault slip inverted from surface displacements during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1167–1181.

Wang, W.-H., & Chen, C.-H. (2001). Static stress transferred by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: Effects on the stability of the surrounding fault systems and aftershock triggering with a 3D fault-slip model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(5), 1041–1052.

White, S. H., & Green, P. F. (1986). Tectonic development of the Alpine fault zone, New Zealand: A fission-track study. *Geology*, 14(2), 124–127.



- Wojtal, S., & Mitra, G. (1988). Nature of deformation in some fault rocks from Appalachian thrusts. *Geological Society of America Special Papers*, 222, 17–34.
- Yu, S. B., Chen, H. Y., & Kuo, L. C. (1997). Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274(1), 41–59.
- Žalohar, J., & Vrabec, M. (2007). Paleostress analysis of heterogeneous fault-slip data: The Gauss method. *Journal of Structural Geology*, 29(11), 1798–1810.  
<http://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.06.009>
- Zoback, M. D., Moos, D., & Stephenson, D. E. (1989). State of stress and the relation to tectonics in the Central Savannah River area of south Carolina. In *The 30th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.



## 附錄 應力原始資料

### 1. 斷述縮寫：

C：確定 P：可能 S：疑似。

N：正斷層 I：逆斷層 D：左移斷層 S：右移斷層。

(如”SN”表示”疑似正斷層”)

### 2. 層述縮寫：

BN：正常地層 BI：反轉地層。

Ji：節理 Jx：節理（有脈填充）

範例：

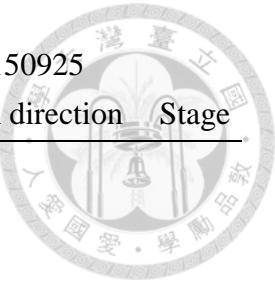
C I 346 53 E 70 S 1a :

確定的逆斷層，位態 346/53E，傾斜角為 70S，1a 為本研究之分期。

C N 325 50 E 110 P 1a

確定的正斷層，位態 325/50E，擦痕方位角為 110 度，1a 為本研究之分期。

Site 1 構造分區 IV Date : 20150820 、 20150925



No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	5	60	E			
2	B	N	10	63	E			
3	B	N	2	58	E			
4	C	I	10	89	E	80	S	1a
5	C	I	0	78	E	80	S	1a
6	C	I	0	70	E	78	S	1a
7	C	I	5	75	E	80	S	1a
8	C	I	10	72	E	78	S	1a
9	C	N	5	40	E	65	S	1a
10	C	N	0	45	E	65	S	1a
11	C	N	350	40	E	65	S	1a
12	C	N	355	42	E	70	S	1a
13	C	N	4	45	E	72	S	1a
14	C	I	320	30	E	110	P	2a
15	C	I	290	38	N	20	E	2a
16	C	I	305	44	N	10	E	2a
17	C	I	290	33	N	25	E	2a
18	C	I	340	18	E	110	P	2a
19	C	I	320	19	E	120	P	2a
20	C	I	45	40	W	42	W	2a
21	C	I	55	55	W	40	W	2a
22	C	I	70	62	N	35	W	2a
23	C	I	40	55	W	120	P	2a
24	C	I	40	52	W	38	S	2a
25	C	N	17	37	E	110	P	1a
26	C	I	17	37	E	112	P	2a
27	C	N	8	36	E	98	P	1a
28	C	N	18	40	E	90	P	1a
29	C	N	19	35	E	94	P	1a
30	C	N	8	34	E	102	P	1a
31	C	N	20	49	E	118	P	1a
32	C	N	20	41	E	111	P	1a
33	C	N	17	50	E	114	P	1a
34	C	N	27	45	E	116	P	1a
35	C	I	16	78	E	79	S	1a
36	C	I	30	79	E	70	S	1a

37	C	I	19	82	E	84	S	1a
38	C	I	20	76	E	81	S	1a
39	C	I	22	85	E	86	S	1a
40	C	N	12	33	E	105	P	1a
41	C	N	172	44	E	95	P	1a
42	C	N	175	49	E	108	P	1a
43	C	I	166	89	E	66	S	1a
44	J	x	130	40	S			
45	J	x	132	55	S			
46	J	x	120	70	S			
47	J	x	330	17	E			
48	J	i	335	32	E			
49	J	i	115	44	S			
50	J	i	113	44	S			
51	J	i	134	34	S			
52	J	i	262	58	N			
53	J	i	261	60	N			
54	J	i	121	28	S			
55	J	i	83	61	S			



Site 2			構造分區 IV		Date : 20140731、20150414、20150925				
No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage	
1	B	N	28	76	W				
2	B	N	30	56	W				
3	C	I	162	65	W	82	N	1b	
4	C	I	165	57	W	80	S	1b	
5	C	I	160	64	W	88	N	1b	
6	C	N	144	46	W	258	P	1b	
7	C	N	167	24	W	241	P	1b	
8	C	I	168	54	W	76	N	1b	
9	C	N	135	10	W	45	P	1b	
10	C	N	170	32	W	230	P	1b	
11	C	N	124	25	S	224	P	1b	
12	C	D	98	31	N	280	P	2a	
13	C	D	80	35	N	274	P	2a	
14	C	S	135	44	E	120	P	2a	
15	C	S	161	50	E	100	P	2a	
16	C	I	26	16	W	266	P	3a	
17	C	I	60	26	W	251	P	3a	
18	C	I	167	27	W	260	P	3a	
19	C	I	158	39	E	84	P	3a	
20	C	I	160	43	E	104	P	3a	
21	C	D	100	31	N	96	P	3a	
22	C	D	113	19	N	110	P	3a	
23	C	I	0	35	E	100	P	3a	
24	C	I	0	34	E	24	P	3a	
25	C	I	45	23	W	264	P	3a	
26	C	I	6	28	W	250	P	3a	
27	C	I	174	80	W	51	S	3a	
28	C	I	175	76	W	54	S	3a	
29	C	I	17	68	W	62	S	3a	
30	C	I	28	72	W	38	S	3a	
31	C	I	140	39	E	111	P	3a	
32	C	I	162	34	E	108	P	3a	
33	C	N	15	78	E	63	S	1a	
34	C	N	30	65	W	59	S	1a	
35	C	N	41	44	W	276	P	1a	

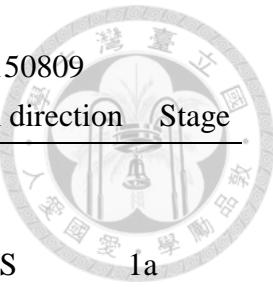
36	P	N	28	14	E	64	S	?
37	C	N	22	77	E	74	S	1a
38	C	N	35	53	W	52	S	1a
39	C	N	48	60	W	46	S	1a
40	C	N	30	65	W	59	S	1a
41	C	N	41	44	W	276	P	1a
42	C	I	162	20	W	264	P	3a
43	C	I	109	19	S	261	P	3a
44	C	I	97	16	S	248	P	3a
45	P	I	10	38	E	90	P	3a
46	C	I	9	40	E	64	P	3a
47	C	I	10	35	E	78	P	3a
48	C	I	48	39	W	264	P	2a
49	C	I	66	20	W	291	P	2a
50	C	I	45	45	E	90	P	3a
51	C	I	21	34	E	76	P	3a
52	C	I	36	46	E	92	P	3a
53	C	N	80	19	N	266	P	1a
54	C	I	64	29	N	268	P	2a
55	C	I	118	14	S	266	P	3a
56	C	I	4	44	E	58	S	3a
57	C	I	195	60	W	62	S	3a
58	C	I	195	58	W	70	S	3a
59	C	I	195	57	W	75	S	3a
60	C	I	6	38	E	56	S	3a
61	C	I	342	58	E	50	S	3a
62	C	N	215	58	W	55	S	1a
63	C	N	214	58	W	70	S	1a
64	C	N	8	88	E	68	S	1a
65	C	N	16	88	E	73	S	1a
66	C	I	138	60	W	78	S	1b
67	C	I	153	58	W	72	S	1b
68	C	I	145	70	W	72	S	1b
69	C	I	138	60	W	70	S	1b
70	C	I	5	38	E	56	N	3a
71	C	I	220	10	W	260	P	3a
72	C	I	220	15	W	85	S	3a
73	C	I	18	38	E	50	N	3a



74	C	I	190	30	W	80	S	3a
75	C	I	5	40	E	74	N	3a
76	C	I	185	20	W	75	S	3a
77	C	I	15	40	E	70	N	3a
78	C	I	210	60	W	60	S	3a
79	C	I	220	58	W	55	S	3a
80	C	I	205	45	W	65	S	3a
81	C	I	205	50	W	62	S	3a
82	C	I	230	18	W	284	P	3a
83	C	I	214	18	W	270	P	3a
84	C	I	358	52	E	80	S	3a
85	C	I	8	50	E	80	S	3a
86	C	N	242	42	N	30	W	1a
87	C	N	243	42	N	40	W	1a
88	C	I	280	25	N	11	W	3a
89	C	I	140	15	S	265	P	3a
90	J	i	320	80	E			
91	J	i	310	88	N			
92	J	i	12	90	E			
93	J	i	85	60	S			
94	J	i	90	72	S			
95	J	i	105	78	S			
96	J	x	10	78	E			
97	J	i	315	78	N			
98	J	i	320	86	E			



## Site 4 構造分區 III Date : 20140803、20150809



No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	2	84	E			
2	B	N	6	85	E			
3	C	N	2	74	E	58	S	1a
4	C	N	4	74	E	60	S	1a
5	C	N	355	68	E	60	S	1a
6	C	N	355	74	E	68	S	1a
7	C	N	5	70	E	68	S	1a
8	C	N	10	73	E	70	S	1a
9	C	N	0	44	E	78	S	1a
10	C	N	0	65	E	70	S	1a
11	C	N	134	72	S	65	E	1b
12	C	N	132	66	S	64	E	1b
13	C	N	26	74	S	66	E	1a
14	C	I	8	84	E	78	N	1a
15	C	N	176	84	W	70	S	1a
16	C	N	184	86	W	86	S	1a
17	C	I	76	75	S	48	E	3a
18	C	I	68	63	S	50	E	3a
19	C	I	86	40	S	23	E	3a
20	C	N	108	38	S	30	E	1b
21	C	N	107	38	S	34	E	1b
22	C	I	76	58	S	48	E	3a
23	C	I	207	70	W	65	S	?
24	C	S	206	70	W	63	S	1a
25	C	S	205	70	W	60	S	1a
26	C	N	350	73	E	60	S	1a
27	C	N	100	48	S	37	E	1b
28	C	N	0	70	E	70	S	1a
29	C	I	72	73	S	40	E	3a
30	C	I	83	68	S	38	E	3a
31	C	N	280	50	N	55	E	1b
32	C	N	280	65	N	55	E	1b
33	C	N	81	42	S	70	E	1b
34	C	I	36	42	E	72	S	1b
35	C	N	100	34	S	51	E	1b
36	C	N	84	20	S	58	E	1b

37	C	N	93	38	S	49	E	1b
38	C	I	74	50	S	26	E	3a
39	C	I	68	60	S	39	E	3a
40	C	I	45	46	S	46	E	3a
41	C	N	328	64	E	36	S	1a
42	C	N	332	83	E	32	S	1a
43	C	I	356	84	E	58	S	1a
44	C	I	15	86	E	60	S	1a
45	C	N	192	82	W	56	S	1a
46	C	N	346	78	E	46	S	1a
47	C	N	118	50	S	18	E	3a
48	C	N	114	55	S	18	E	3a
49	C	N	125	56	S	10	E	3a
50	C	S	112	53	S	1	E	3a
51	C	I	93	73	S	62	E	1b
52	C	I	96	76	S	41	E	3a
53	C	I	90	70	S	73	E	1b
54	C	S	82	40	S	22	E	3a
55	C	S	90	42	S	8	E	3a
56	C	S	96	29	S	16	E	3a
57	C	N	105	40	S	68	E	1b
58	C	N	93	62	S	86	W	1b
59	C	N	105	38	S	70	W	1b
60	C	N	92	72	S	80	E	1b
61	C	N	100	44	S	80	W	1b
62	C	N	356	62	E	57	S	1a
63	C	N	349	58	E	60	S	1a
64	C	N	344	59	E	68	S	1a
65	J	i	190	82	W			
66	J	i	180	80	W			
67	J	i	190	86	W			
68	J	i	0	85	E			
69	J	i	250	30	N			
70	J	x	95	66	S			
71	J	i	110	32	S			
72	J	x	86	54	S			
73	J	x	78	50	S			

## Site 6 構造分區 II Date : 20150729、20150805

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	200	50	W			
2	B	N	214	40	W			
3	B	N	38	42	W			
4	C	S	335	60	W	40	N	3a
5	C	I	30	72	W	70	S	1a
6	C	I	17	58	W	80	S	1a
7	C	I	30	60	W	60	S	1a
8	C	I	20	58	W	65	S	1a
9	C	S	80	20	N	80	P	1a
10	C	N	60	23	N	264	P	1a
11	C	N	42	16	N	256	P	1a
12	C	N	100	22	N	300	P	1a
13	C	N	28	30	W	270	P	1a
14	C	I	340	30	E	30	P	3a
15	C	I	330	35	E	40	P	3a
16	C	I	335	38	E	48	P	3a
17	C	I	340	24	E	50	P	3a
18	C	I	300	15	S	260	P	3a
19	C	D	110	65	S	10	W	3b
20	C	S	134	62	S	30	W	3b
21	C	I	120	62	S	85	W	?
22	C	D	119	61	S	5	W	3b
23	C	N	124	35	N	318	P	3b
24	C	D	70	40	S	22	E	3a
25	C	I	138	12	N	80	P	3a
26	C	D	80	40	S	90	P	3a
27	C	I	332	45	W	306	P	3a
28	C	I	90	25	S	90	P	3a
29	C	I	335	35	N	40	P	3a
30	C	I	22	48	W	60	S	3a
31	C	S	68	25	N	260	P	1a
32	C	I	330	45	W	50	S	?
33	C	I	0	30	E	40	P	3a
34	C	I	300	60	S	36	W	3b
35	C	I	300	22	S	190	P	?



36	C	S	50	40	S	45	P	?
37	C	I	350	57	E	30	P	3a
38	C	I	340	45	E	70	P	3a
39	C	I	300	16	S	242	P	3a
40	C	N	32	89	W	85	P	?
41	C	I	30	45	W	60	S	1a
42	J	i	140	60	W			
43	J	i	165	50	W			
44	J	i	205	67	W			
45	J	i	340	30	E			
46	J	i	135	85	S			
47	J	i	330	42	E			
48	J	x	95	70	S			
49	J	x	80	76	S			
50	J	x	260	88	N			
51	J	x	256	82	N			
52	J	x	86	89	S			
53	J	i	320	88	E			
54	J	i	140	85	W			
55	J	x	150	80	W			
56	J	x	145	73	W			
57	J	i	340	30	E			
58	J	i	330	35	E			
59	J	i	335	38	E			
60	J	i	340	24	E			
61	J	i	120	15	S			

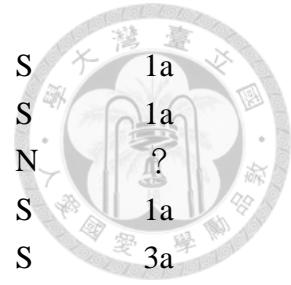
## Site 9 構造分區 I Date : 20140623、20140727

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	346	60	E			
2	B	N	346	45	E			
3	C	I	102	42	S	50	E	1b
4	C	I	358	82	E	80	S	1a
5	C	I	358	78	E	80	S	1a
6	C	N	340	44	E	54	S	1a
7	C	N	335	40	E	67	N	3b
8	C	N	322	33	E	52	S	1a
9	C	I	358	66	E	68	S	1a
10	C	N	334	32	E	56	S	1a
11	C	N	332	39	E	58	S	1a
12	C	I	344	52	E	68	S	3a
13	C	I	358	67	E	80	S	1a
14	C	I	356	60	E	60	S	1a
15	C	I	356	64	E	73	S	1a
16	C	I	352	76	E	72	S	1a
17	C	I	355	72	E	52	S	1a
18	C	I	355	82	E	82	S	1a
19	C	I	0	75	E	78	S	1a
20	C	N	344	40	E	72	S	1a
21	C	I	36	78	E	80	S	?
22	C	N	344	30	E	81	S	1a
23	C	N	344	88	E	70	S	?
24	C	N	328	52	E	55	S	1a
25	C	I	38	20	E	58	N	3a
26	C	N	314	27	E	67	E	1a
27	C	I	350	34	E	77	S	3a
28	C	I	350	74	E	60	S	1a
29	C	N	328	38	E	50	S	1a
30	C	I	357	24	E	85	S	3a
31	C	N	348	29	E	65	S	1a
32	C	I	326	58	E	60	S	?
33	C	I	324	64	E	67	S	?
34	C	N	330	30	E	54	S	1a
35	C	N	316	28	E	50	S	1a
36	C	N	334	33	E	63	S	1a

37	C	N	327	44	E	60	S	1a
38	C	I	322	35	E	64	S	3a
39	C	N	347	29	E	70	S	1a
40	C	N	335	35	E	55	S	1a
41	C	I	352	83	E	74	S	1a
42	C	I	358	86	E	73	S	1a
43	C	I	355	67	E	66	S	1a
44	C	I	350	83	E	72	S	1a
45	C	N	344	40	E	80	S	1a
46	C	N	350	40	E	86	S	1a
47	C	N	340	22	E	81	S	1a
48	C	N	0	26	E	64	S	1a
49	C	N	328	24	E	45	S	1a
50	C	I	358	54	E	82	S	3a
51	C	N	340	20	E	62	S	1a
52	C	I	0	32	E	73	N	3a
53	C	N	342	48	E	70	S	1a
54	C	N	334	42	E	66	S	1a
55	C	N	332	39	E	69	S	1a
56	C	N	320	30	E	28	S	1a
57	C	N	306	50	E	73	W	3b
58	C	N	14	41	E	89	S	1a
59	C	N	356	38	E	78	S	1a
60	C	I	336	43	E	59	S	3a
61	C	N	20	20	E	90	S	1a
62	C	N	14	14	E	84	S	1a
63	C	I	326	85	E	78	S	?
64	C	N	12	15	E	78	N	1a
65	C	N	345	52	E	58	S	1a
66	C	N	340	48	E	60	S	1a
67	C	N	356	47	E	65	S	1a
68	C	N	340	40	E	79	S	1a
69	C	N	335	45	E	63	S	1a
70	C	N	332	39	E	65	S	1a
71	C	N	344	42	E	58	S	1a
72	C	N	335	30	E	77	S	1a
73	C	I	8	62	E	67	S	1a
74	C	N	325	33	E	60	S	1a



75	C	I	358	69	E	80	S	1a
76	C	N	0	44	E	60	S	1a
77	P	I	4	80	W	82	N	?
78	C	N	8	46	E	58	S	1a
79	C	I	10	47	E	68	S	3a
80	C	N	326	29	E	59	S	1a
81	C	N	304	48	E	45	E	1a
82	C	I	30	80	E	78	S	?
83	C	I	346	75	E	70	S	1a
84	C	I	350	57	E	72	S	?
85	C	N	340	48	E	58	S	1a
86	C	N	5	23	E	74	S	1a
87	C	N	310	44	S	29	E	1a
88	C	I	358	65	E	70	S	1a
89	C	I	5	71	E	65	S	1a
90	C	N	322	33	E	40	S	1a
91	C	N	330	42	E	65	S	1a
92	C	N	320	50	E	50	S	1a
93	C	N	350	32	E	60	S	1a
94	C	N	340	34	E	50	S	1a
95	C	N	320	41	E	62	S	1a
96	C	N	310	50	E	28	S	1a
97	C	N	120	30	S	84	S	3b
98	C	N	125	28	S	40	W	3b
99	P	S	125	30	S	8	N	3a
100	C	N	320	56	E	35	S	1a
101	C	D	325	58	E	50	S	1a
102	C	N	302	15	E	66	E	3b
103	C	S	340	75	E	55	S	1a
104	C	N	300	28	E	44	E	1a
105	C	N	312	31	E	22	S	1a
106	C	N	310	30	E	60	S	1a
107	C	N	316	25	E	51	S	1a
108	C	N	108	40	W	77	W	3b
109	C	N	345	42	E	71	S	1a
110	C	I	140	44	W	50	N	3a
111	C	I	135	45	W	55	N	3a
112	C	I	140	48	W	62	N	3a



113	C	I	141	48	W	68	N	3a
114	C	N	0	44	E	84	S	1a
115	C	N	340	40	E	68	S	1a
116	C	N	350	36	E	85	S	1a
117	C	I	350	75	E	55	S	1a
118	C	N	330	32	E	60	S	1a
119	C	N	330	40	E	46	S	1a
120	C	I	1	80	E	90	S	1a
121	C	I	3	65	E	56	S	1a
122	C	I	350	68	E	56	S	1a
123	C	I	345	70	E	80	S	1a
124	C	I	355	72	E	52	S	1a
125	C	I	350	75	E	70	S	1a
126	C	N	320	38	E	40	S	1a
127	C	N	320	34	E	34	S	1a
128	C	N	310	27	E	83	W	3b
129	C	I	8	72	E	66	S	1a
130	C	N	62	36	E	55	S	3b
131	C	I	10	70	E	78	S	1a
132	C	I	15	62	E	64	S	1a
133	C	I	13	65	E	66	S	1a
134	C	I	10	68	E	66	S	1a
135	C	I	355	64	E	80	S	1a
136	C	N	330	32	E	60	S	1a
137	C	N	340	46	E	58	S	1a
138	C	N	340	40	E	56	S	1a
139	C	N	318	33	E	44	S	1a
140	C	N	320	32	E	42	S	1a
141	C	N	335	42	E	40	S	1a
142	C	I	4	60	E	66	S	1a
143	C	I	2	66	E	65	S	1a
144	C	N	310	20	E	42	E	1a
145	C	N	316	26	E	44	S	1a
146	C	N	330	64	E	50	S	1a
147	C	N	290	30	N	23	E	1a
148	C	N	335	44	E	44	S	1a
149	C	N	320	30	E	54	S	1a
150	C	N	345	38	E	66	S	1a

151	C	I	356	75	E	64	S	1a
152	C	I	350	76	E	68	S	1a
153	C	I	350	75	E	72	S	1a
154	C	I	352	73	E	73	S	1a
155	C	I	340	80	E	71	S	1a
156	C	N	315	30	E	48	S	1a
157	C	I	335	20	E	62	S	3a
158	C	I	322	24	E	59	S	3a
159	C	I	320	22	E	42	S	3a
160	C	I	345	89	E	72	S	1a
161	C	I	354	50	E	66	S	3a
162	C	I	80	54	S	60	E	1b
163	C	I	81	54	S	70	E	1b
164	C	I	80	38	S	58	E	1b
165	C	I	81	38	S	55	E	1b
166	C	I	75	68	S	80	E	1b
167	C	I	70	72	S	53	E	1b
168	C	I	355	40	E	70	S	3a
169	J	I	90	33	S			
170	J	I	257	73	N			
171	J	I	72	68	S			
172	J	I	250	80	N			
173	J	I	92	51	S			
174	J	I	240	85	N			
175	J	I	88	30	S			
176	J	I	73	83	S			
177	J	I	130	54	S			
178	J	I	140	45	W			
179	J	I	70	46	S			
180	J	I	140	50	W			
181	J	I	120	42	S			
182	J	I	90	78	S			
183	J	I	260	54	N			
184	J	I	80	62	S			
185	J	I	100	32	S			



## Site 10

## 構造分區 I

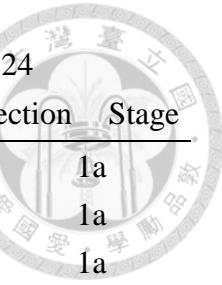
Date : 20140728、20150723

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	340	72	E			
2	B	N	350	58	E			
3	B	N	346	55	E			
4	C	N	148	47	W	38	N	1b?
5	C	N	130	40	W	25	W	1b?
6	C	I	76	33	S	19	E	3a
7	C	I	80	30	S	25	E	3a
8	C	I	265	50	W	44	N	3a
9	C	I	160	55	W	44	N	3a
10	C	I	344	66	E	82	S	1a
11	C	I	355	62	E	67	S	1a
12	C	I	4	82	E	80	S	1a
13	C	I	358	78	E	79	S	1a
14	C	I	346	53	E	70	S	1a
15	C	I	344	60	E	78	S	1a
16	C	I	140	36	S	58	E	1b?
17	C	I	296	42	N	62	E	3a
18	C	I	305	31	N	63	E	3a
19	C	I	300	25	N	46	E	3a
20	C	N	184	15	W	17	N	1b
21	C	I	302	40	E	45	E	3a
22	C	I	278	38	N	22	E	3a
23	C	I	88	50	S	55	E	1b
24	C	I	115	70	S	46	E	1b
25	C	I	120	60	S	36	E	1b
26	C	S	214	42	N	52	N	1b
27	C	S	185	58	W	41	N	1b
28	C	I	58	30	S	63	E	3a
29	C	I	54	30	S	52	E	3a
30	C	I	60	30	S	52	E	3a
31	C	I	15	67	E	70	S	1a
32	C	I	355	70	E	65	S	1a
33	C	I	10	60	E	66	S	1a
34	C	N	330	48	E	50	S	1a
35	C	N	315	50	E	37	S	1a
36	C	I	358	74	E	60	S	1a

37	C	I	0	73	E	66	S	1a
38	C	I	2	68	E	58	S	1a
39	C	I	5	76	E	66	S	1a
40	C	I	4	80	E	72	S	1a
41	C	N	345	38	E	65	S	1a
42	C	N	348	28	E	70	S	1a
43	C	I	2	65	E	90	S	1a
44	C	I	10	64	E	72	S	1a
45	C	I	354	68	E	74	S	1a
46	C	I	358	72	E	60	S	1a
47	C	I	308	26	E	33	E	3a
48	C	I	322	12	E	58	S	3a
49	C	I	40	30	S	60	P	3a
50	C	N	320	45	E	90	P	1a
51	C	N	325	50	E	110	P	1a
52	C	N	55	80	N	30	E	?
53	C	N	310	45	E	110	P	1a
54	J	i	60	82	S			
55	J	i	68	72	S			
56	J	i	255	82	N			
57	J	i	250	84	N			
58	J	i	38	70	E			
59	J	i	42	75	E			
60	J	i	95	65	S			
61	J	i	240	78	N			
62	J	i	245	50	N			
63	J	i	50	70	S			



## Site 11 構造分區 I Date : 20140728、20150724



No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	C	I	266	20	N	6	E	1a
2	C	I	260	28	N	17	E	1a
3	C	I	250	15	N	27	E	1a
4	C	I	248	18	N	31	E	1a
5	C	I	268	24	N	8	E	1a
6	C	I	283	14	N	7	E	1a
7	C	I	285	10	N	5	E	1a
8	C	I	314	12	N	33	E	1a
9	C	I	300	7	N	32	E	1a
10	C	I	298	10	N	13	E	1a
11	C	I	305	40	N	86	S	1a
12	C	I	306	20	N	43	E	1a
13	C	I	260	18	N	45	E	1a
14	C	I	276	20	N	16	E	1a
15	C	S	276	24	N	1	E	1a
16	C	S	280	52	N	26	E	1a
17	C	I	297	44	N	6	E	1a
18	C	I	318	38	N	33	E	1a
19	C	I	210	40	N	64	S	1a
20	C	I	220	40	N	40	S	1a
21	C	I	200	44	N	54	N	1a
22	C	I	210	30	N	52	S	1a
23	C	I	290	40	N	63	N	1a
24	C	I	195	40	N	59	N	1a
25	C	I	292	22	N	21	E	1a
26	C	I	228	42	N	68	N	1a
27	C	I	256	18	N	23	E	1a
28	C	I	256	36	N	38	E	1a
29	C	I	260	26	N	1	E	1a
30	C	I	255	40	N	5	E	1a
31	C	I	272	22	N	6	E	1a
32	C	I	256	25	N	1	E	1a
33	C	I	260	29	N	18	E	1a
34	C	I	256	20	N	1	E	1a
35	C	I	252	33	N	2	E	1a
36	C	I	257	22	N	2	E	1a

37	C	I	224	38	W	3	E	1a
38	C	I	297	32	N	22	E	1a
39	C	I	216	50	N	50	S	1a
40	C	I	290	30	N	14	E	1a
41	C	I	250	42	N	47	N	1a
42	C	I	310	29	N	11	E	1a
43	C	I	240	46	N	22	S	1a
44	C	I	290	32	N	62	E	1a
45	C	I	272	52	N	30	S	1a
46	C	I	278	47	N	37	E	1a
47	C	I	260	20	N	11	E	1a
48	C	S	225	28	N	11	E	1a
49	C	S	250	38	N	15	E	1a
50	C	S	232	30	N	5	E	1a
51	C	S	226	33	N	12	E	1a
52	C	I	248	30	N	36	E	1a
53	C	I	290	34	N	12	E	1a
54	C	I	195	40	N	23	E	1a
55	C	I	100	30	S	23	E	2a?
56	C	I	250	28	N	11	E	1a
57	C	I	222	37	N	46	E	1a
58	C	I	214	52	N	67	N	1a
59	C	D	260	55	N	20	W	1a
60	C	I	260	27	N	1	E	1a
61	C	I	42	37	N	52	W	1a
62	C	I	34	58	N	60	W	1a
63	C	I	80	38	N	1	E	1a
64	C	I	80	39	N	19	E	1a



**Site 12**

## 構造分區 I

Date : 20140729、20150411、20150724

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	65	31	N			
2	B	N	60	45	N			
3	B	N	60	40	N			
4	B	N	74	40	N			
5	C	I	266	20	N	6	E	1a
6	C	I	260	28	N	17	E	1a
7	C	I	250	15	N	27	E	1a
8	C	I	248	18	N	31	E	1a
9	C	I	268	24	N	8	E	1a
10	C	I	283	14	N	7	E	1a
11	C	I	285	10	N	5	E	1a
12	C	I	314	12	N	33	E	1a
13	C	I	300	7	N	32	E	1a
14	C	I	298	10	N	13	E	1a
15	C	I	305	40	N	86	S	1a
16	C	I	306	20	N	43	E	1a
17	C	I	260	18	N	45	E	1a
18	C	I	276	20	N	16	E	1a
19	C	S	276	24	N	1	E	1a
20	C	S	280	52	N	26	E	1a
21	C	I	297	44	N	6	E	1a
22	C	I	318	38	N	33	E	1a
23	C	I	210	40	N	64	S	1a
24	C	I	220	40	N	40	S	1a
25	C	I	200	44	N	54	N	1a
26	C	I	210	30	N	52	S	1a
27	C	I	290	40	N	63	N	1a
28	C	I	195	40	N	59	N	1a
29	C	I	292	22	N	21	E	1a
30	C	I	228	42	N	68	N	1a
31	C	I	256	18	N	23	E	1a
32	C	I	256	36	N	38	E	1a
33	C	I	260	26	N	1	E	1a
34	C	I	255	40	N	5	E	1a
35	C	I	272	22	N	6	E	1a
36	C	I	256	25	N	1	E	1a

37	C	I	260	29	N	18	E	1a
38	C	I	256	20	N	1	E	1a
39	C	I	252	33	N	2	E	1a
40	C	I	257	22	N	2	E	1a
41	C	I	224	38	W	3	E	1a
42	C	I	297	32	N	22	E	1a
43	C	I	216	50	N	50	S	1a
44	C	I	290	30	N	14	E	1a
45	C	I	250	42	N	47	N	1a
46	C	I	310	29	N	11	E	1a
47	C	I	240	46	N	22	S	1a
48	C	I	290	32	N	62	E	1a
49	C	I	272	52	N	30	S	1a
50	C	I	278	47	N	37	E	1a
51	C	I	260	20	N	11	E	1a
52	C	S	225	28	N	11	E	1a
53	C	S	250	38	N	15	E	1a
54	C	S	232	30	N	5	E	1a
55	C	S	226	33	N	12	E	1a
56	C	I	248	30	N	36	E	1a
57	C	I	290	34	N	12	E	1a
58	C	I	195	40	N	23	E	1a
59	C	I	100	30	S	23	E	2a?
60	C	I	250	28	N	11	E	1a
61	C	I	222	37	N	46	E	1a
62	C	I	214	52	N	67	N	1a
63	C	D	260	55	N	20	W	1a
64	C	I	260	27	N	1	E	1a
65	C	I	42	37	N	52	W	1a
66	C	I	34	58	N	60	W	1a
67	C	I	80	38	N	1	E	1a
68	C	I	80	39	N	19	E	1a
69	J	i	10	45	E			
70	J	i	355	45	E			
71	J	x	135	75	S			
72	J	x	90	55	S			
73	J	x	86	40	S			
74	J	i	140	60	W			



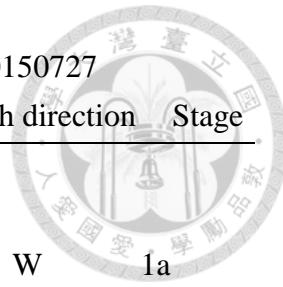
75	J	i	180	88	W
76	J	i	355	75	E
77	J	i	130	66	S
78	J	i	145	75	W
79	J	i	90	78	S



**Site 14****構造分區 II**

Date : 20140730、20150727

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	130	23	E			
2	B	N	134	28	E			
3	C	D	85	15	N	10	W	1a
4	C	D	85	30	N	15	W	1a
5	C	I	163	40	N	42	S	1a
6	C	D	86	30	N	10	W	1a
7	C	I	160	50	E	40	S	1a
8	C	I	163	40	E	45	S	1a
9	C	I	160	48	E	62	S	1a
10	C	D	96	15	N	0	E	1a
11	C	D	110	32	S	10	E	3b
12	C	S	120	24	S	10	E	3b
13	J	i	97	68	S			
14	J	i	148	68	W			
15	J	i	170	59	W			
16	J	i	170	70	W			
17	J	i	65	48	S			
18	J	x	40	60	E			
19	J	i	76	70	S			



## Site 15

## 構造分區 II

Date : 20140730、20150727

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	60	30	N			
2	B	N	70	25	N			
3	B	N	46	31	N			
4	C	I	45	50	W	43	S	1a
5	C	I	20	60	W	65	S	1a
6	C	I	45	60	W	60	S	1a
7	C	I	86	33	N	80	P	1a
8	C	S	95	30	N	88	P	1a
9	C	S	80	29	N	272	P	1a
10	C	I	54	48	N	44	S	1a
11	C	I	56	44	N	274	P	1a
12	C	I	20	55	W	60	S	1a
13	C	I	150	72	E	20	S	2a?
14	C	I	40	60	W	40	S	1a
15	C	S	104	24	N	286	P	1a
16	C	I	30	50	W	50	S	1a
17	C	S	106	22	N	288	P	1a
18	C	I	80	60	S	50	E	2a?
19	C	S	100	30	N	290	P	1a
20	C	I	80	61	S	35	E	2a?
21	C	I	20	38	N	266	P	1a
22	C	I	40	60	W	45	S	1a
23	C	I	39	39	N	258	P	1a
24	C	I	10	35	W	248	P	1a
25	C	D	15	60	E	60	N	2a?
26	C	D	115	46	S	290	P	2a?
27	C	D	115	65	S	3	E	2a?
28	C	S	254	30	N	275	P	1a
29	C	D	116	64	S	130	P	2a?
30	C	I	20	55	N	70	S	1a
31	C	I	22	52	W	50	S	1a
32	C	I	105	30	N	290	P	1a
33	J	x	118	40	S			
34	J	x	40	40	E			
35	J	i	165	86	W			
36	J	i	120	70	S			

37	J	x	135	68	S
38	J	i	80	45	S

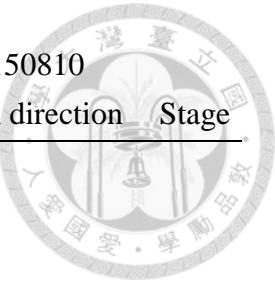


## Site 17

構造分區 III

Date : 20140731 、 20150810

No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	20	50	W			
2	B	N	43	50	W			
3	B	N	50	44	N			
4	C	I	25	60	E	80	N	3a
5	C	I	30	45	E	80	N	3a
6	C	I	90	55	S	72	W	?
7	C	D	105	83	S	52	E	?
8	C	S	268	20	N	1	W	1a
9	C	I	215	50	W	40	S	1a
10	C	I	220	60	W	30	S	1a
11	C	I	220	65	W	50	S	1a
12	C	S	275	30	N	6	W	1a
13	C	S	296	50	N	24	E	3a
14	C	N	280	20	N	1	W	1a
15	C	N	245	16	N	31	W	1a
16	C	N	250	20	N	21	W	1a
17	C	I	190	47	W	68	S	1a
18	C	I	190	60	W	50	S	1a
19	C	I	188	40	W	52	S	1a
20	C	S	280	32	N	20	W	1a
21	C	S	260	30	N	20	W	1a
22	C	I	183	62	W	62	S	1a
23	C	S	260	30	N	35	W	1a
24	C	N	225	30	N	53	W	1a
25	C	I	200	68	N	50	S	1a
26	C	I	190	68	W	74	S	1a



Site 18		構造分區 III		Date : 20140731、20150414、20150810				
No	Reliability	Sense	Strike	Dip	Dipping	Pitch	Pitch direction	Stage
1	B	N	3	84	E			
2	B	N	3	88	E			
3	C	N	195	80	W	65	S	1a
4	C	N	200	84	W	74	S	1a
5	C	N	195	80	W	73	S	1a
6	C	N	198	80	W	74	S	1a
7	C	N	200	75	W	85	N	1a
8	C	N	195	78	W	66	S	1a
9	C	N	200	78	W	70	S	1a
10	C	N	200	75	W	65	S	1a
11	C	N	288	40	N	72	N	1b
12	C	N	315	50	E	80	N	1b
13	C	N	265	34	N	42	N	1b
14	C	N	305	45	N	75	E	1b
15	C	N	272	60	N	63	E	1b
16	C	N	300	45	N	70	E	1b
17	C	N	0	78	E	60	S	1a
18	C	N	358	66	E	60	S	1a
19	C	N	2	65	E	66	S	1a
20	C	N	2	60	E	63	S	1a
21	C	N	358	68	E	62	S	1a
22	C	N	0	60	E	69	S	1a
23	C	I	315	56	E	50	S	?
24	C	I	318	30	N	36	S	?
25	C	I	285	66	N	60	W	1b
26	J	x	110	90	S			
27	J	x	110	84	S			
28	J	x	105	90	S			
29	J	x	105	86	S			
30	J	x	290	68	N			
31	J	x	285	66	N			
32	J	i	190	76	W			
33	J	i	280	58	N			
34	J	i	238	38	N			