

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

台灣東北角海岸萊萊地區煌斑岩脈及其圍岩之  
構造演育探討

**Structural evolution study of lamprophyric dikes and  
country rocks in Lailai, northeastern coast of Taiwan**

研究生：尤芊翔

指導教授：黃文正 博士

中華民國 一百零四 年 六 月



## 國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(104年5月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註1說明),在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

(  )同意 (立即開放)

(  )同意 (請於西元 \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日開放)

(  )不同意,原因是: \_\_\_\_\_

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

(  )同意 (立即開放)

(  )同意 (請於西元 \_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日開放)

(  )不同意,原因是: \_\_\_\_\_

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館,基於推動「資源共享、互惠合作」之理念,於回饋社會與學術研究之目的,得不限地域、時間與次數,以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用,並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式,提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 尤芊翔 學號: 102624002

論文名稱: 台灣東北角海岸菜菜地區煌斑岩脈及其圍岩之構造演育探討

指導教授姓名: 黃文正

系所: 應用地質研究所  博士班  碩士班

填單日期: 104/7/28

備註:

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔,紙本論文部分依著作權法第15條第3款之規定,採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽,如您有申請專利或投稿等考量,不同意紙本上架陳列,須另行加填申請書,詳細說明與紙本申請書下載請至本館數位博碩士論文網頁。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後,裝訂於各紙本論文封面後之次頁(全文電子檔內之授權書簽名,可用電腦打字代替)。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文,應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質 學系/研究所 尤芊翔 研究生所提之論文  
台灣東北角海岸萊萊地區煌斑岩脈及其圍岩之構造演育探討

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

104 年 7 月 28 日

國立中央大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

應用地質 學系/研究所 尤芊翔 研究生  
所提之論文

台灣東北角海岸萊萊地區煌斑岩脈及其圍岩之構造  
演育探討 經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人  
委 員

李錫煥

陳子

朱傲祖

羅偉

黃文正

中華民國 一百零四 年 六 月 二十六 日

# 台灣東北角海岸萊萊地區煌斑岩脈及其圍岩之構造演育探討

尤芊翔

## 摘要

台灣東北海岸的萊萊海蝕平台為雪山山脈地質的延伸，煌斑岩脈 (lamprophyric dikes) 以右階雁行排列 (right-stepping en-echelon form) 的形式聳立於其上，伴隨著有不同尺度的斷層、節理及褶皺等構造的出現。煌斑岩脈約形成於九百萬年前，當時的分布形貌，記錄了中新世晚期火山活動的應力環境；岩脈及圍岩中的斷層及破裂等構造，則紀錄上新世以來蓬萊造山運動的應變史，同時反映岩石強度差異所造成的不同變形行為。本研究進行岩脈及地表構造分布及形貌之詳細記錄及精確構造作圖，輔以無人飛行載具 (UAV) 的空照正射影像，以不同比例尺 (最大到 1:20) 的底圖進行野外工作，搭配地電阻測勘剖面確認岩脈在地下的延伸情形，藉以判定各斷層的位態及錯動性質等。煌斑岩脈呈現東西走向，高可達 3 公尺，總長約 190 公尺，由 2 到 30 餘公尺長不等的 19 段岩脈所組成。圍岩岩層為漸新世晚期大桶山層，以硬頁岩為主，大體上呈北北東走向，向西傾約十幾度。研究結果顯示，最晚期的斷層作用為南北向的右移斷層，明顯錯開岩脈，但錯距皆小於 2 米，在還原斷層錯動後，岩脈僅為三道，但仍以右階雁行排列；藉野外構造觀察的推論及地層序列的分析，研判岩漿沿當時既存的垂直裂縫爬升，侵位當時地下 2.6 公里深的”大桶山層”中的雁行排列節理，冷卻後形成至少三道右階雁行排列的垂直岩脈。分析岩脈與圍岩的破裂現象，岩脈上除了一系列低角度西傾的逆斷層外，另有和岩脈走向夾銳角的右移斷層，使得岩脈內出現水平向的類併置構造 (duplex structures)；而圍岩則產生變形。構造演

育形成順序為，晚漸新世在被動的大陸棚環境沉積，經深埋岩化後，產生差排的垂直裂隙，中新世晚期岩漿沿著裂隙侵位，形成右階雁行排列的岩脈列，上新世以來受到蓬萊運動的影響，使得岩脈產生逆斷層及類併置構造，圍岩則產生變形，而後應力場改變產生南北向的右移斷層將岩脈錯開，最後構造抬升及頂蝕作用(unroofing)，形成張裂節理，岩脈則以右階雁行排列出露於現今的海蝕平台。

中文關鍵字:岩脈、雁行排列、構造演育

# **Structural evolution study of lamprophyric dikes and country rocks in Lailai, northeastern coast of Taiwan**

You, Cian-Siang

## **ABSTRACT**

Lai-Lai wave-cut platform is the geological continuation of Hsuehshan mountain range in the northeastern coast of Taiwan. The Lamprophyric dikes stand in right-stepping en-echelon form with faults, joints and folds in different scales on the platform. The dike formed in  $9 \pm 1.1$  Ma ago and the arrangement of the dikes records the stress state during volcanic activity in the late Miocene. Faults and fractures in the dikes and the country rocks show the strain state of Penglai orogeny since Pliocene, and also response the different deformation behavior caused by the difference of rock strength. In this study, I made detailed structural geologic maps in different scales (up to 1:20), and used unmanned aerial vehicle (UAV) to take orthophotography to display the detailed structural distribution. Electrical resistivity imaging (ERI) profile was performed to decipher the arrangement of the dikes underground and the characteristics of the faults. East-west trending dikes can reach 3 meters in maximum height and 190 meters in total length. 19 dike segments are exposed on the platform and range from 2 to 30 meters in length. The strata of country rocks orientated north-south, dipping to west 10~20 degree are Oligocene Tatungshan formation composed mainly of argillite. My field observation reveals that N-S-trending right-lateral strike-slip faults which dislocated dikes less than 2 meters are the latest faulting event. After restoring the results from faulting, dikes remain right-stepping en-echelon arrangement in 3 segments at least. Based on field observation and stratigraphic analysis, I conclude that magma ascended along

en-echelon joints and solidified into three dikes in 'Tatungshan formation' at depth of 2.6 kilometers. There are west dipping reverse faults and vertical right-lateral strike-slip faults in dikes. The strike-slip faults intersect with dikes in an acute angle, which makes the dikes appear as horizontal duplex structures. The structural evolution of dikes in Lailai platform are: 'Tatungshan formation' formed in passive continental shelf and en-echelon joints formed in late Oligocene; magma ascended along en-echelon joints and en-echelon dikes formed in late Miocene. After the Penglai orogeny took place in Pliocene, reverse faults and duplex structures took place in dikes. Then the N-S-trending right-lateral strike-slip faults cut the dikes and displaced them. At last, tectonic uplift and unroofing formed extension joints. Dikes are exposed in right-stepping en-echelon form in the platform now.

Key words: en-echelon dike, structural evolution.

## 誌謝

本篇論文能夠順利完成，首先要感謝我的指導教授黃文正老師在我論文以及構造地質專業上的指導。在論文資料提供，感謝北科大的羅偉老師、楊忠晉學長實地協助 UAV 空拍和提供空照影像，台大土木系的韓仁毓老師、林彥廷學長協助影像正射化的處理，仕弘技術工程有限公司的張漢忠學長協助野外地電阻施測，中央大學的陳建志老師、王子賓學長協助地電阻的資料處理，學弟謝承恩協助提供野外露頭攝影。另外感謝中央大學的李錫堤老師和地調所的朱傲祖先生在口試時給予的肯定與建議。

在中央這段時間，感謝地質力學實驗室的阿根大學長、劭禎學長、18 模擬大將軍、意茹大學姊、詩婷小學姊、徐家祥給我研究及人生上的建議，還有 1D 大大、小波、承恩、耕賢等學弟，以及楚伶小學妹的各種支援。謝謝地物所凱特、家宇、奇祝、Constantine VI 等，以及應地所的同学以及學弟妹們，讓我的生活不會枯燥乏味。最後感謝我家人在精神上的支持，讓我能完成碩士學位。最後，感謝「地科院中東巴基斯坦」以及其成員們，阿宅、默西、狐狸、鳥鳴、王維，我們是最棒的，以後一定都能達到自己的理想的。

最後，感謝自己能堅持走過這兩年，完成這篇論文後，讓我知曉自己能做到的部分，以及更多自己還不足的部分。這一切只是開頭，旅程會不斷持續下去。

# 目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	iii
目錄.....	ii
圖目錄.....	v
表目錄.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
第二章 區域地質概述.....	5
2.1 區域地質敘述.....	5
2.2 構造事件歷史.....	8
第三章 前人文獻回顧.....	12
3.1 岩漿侵入理論.....	12
3.1.1 岩漿的侵入模式與機制.....	13
3.1.2 岩脈形成時的方向性與應力特性.....	15
3.2 岩脈與圍岩的構造現象.....	19
3.2.1 岩脈排列的形貌.....	19
3.2.2 雁行排列岩脈的構造特徵.....	20
3.2.3 圍岩中的節理與斷層.....	21
3.3 萊萊海蝕平台的過去研究.....	34
3.3.1 煌斑岩脈的物性與化性.....	34
3.3.2 應力分析.....	34
3.3.3 構造演化歷史.....	35
第四章 研究方法.....	40

4.1 UAV 空拍和影像正射化.....	40
4.1.1 正射化基本理論.....	41
4.1.2 影像正射化流程.....	44
4.2 野外地表調查.....	46
4.2.1 中視構造地質圖.....	46
4.2.2 野外構造測量與分析.....	47
4.3 地電阻施測與資料處理.....	48
4.3.1 地電阻影像剖面法原理.....	48
4.3.2 施測規劃和資料處理.....	49
第五章 野外調查及地電阻測勘.....	52
5.1 地表構造分布和辨識.....	53
5.1.1 空拍正射影像下的構造判識.....	53
5.1.2 中視尺度的構造描繪.....	53
5.2 構造現象彙整與資料分析.....	61
5.2.1 岩脈野外觀察紀錄.....	61
5.2.2 岩脈中破裂的分析.....	65
5.2.3 圍岩斷層觀察紀錄.....	67
5.2.4 圍岩中裂理與斷層的分析.....	70
5.3 地電阻影像剖面解釋.....	117
第六章 討論.....	122
6.1 岩脈與圍岩之間的構造關聯性.....	122
6.2 雁行排列岩脈形成的原因與機制.....	129
6.3 岩脈構造的演化次序.....	135
第七章 結論.....	139
參考文獻.....	141
附錄一.....	145
附錄二.....	146

附錄三 ..... 147

## 圖目錄

圖 1.1 萊萊海蝕平台全景.....	4
圖 1.2 雁行排列的煌斑岩脈全景.....	4
圖 2.1 萊萊海蝕平台及周遭區域地質圖.....	10
圖 2.2 萊萊海蝕平台附近的地質剖面 AA'、BB'、CC'.....	11
圖 3.1 三種在岩漿侵入末端處，岩漿往前傳遞的模式.....	17
圖 3.2 岩石的應力狀態與破裂產生的應力條件.....	17
圖 3.3 岩漿侵入多裂隙岩體時，岩漿侵入開裂節理與否的判別圖表.....	18
圖 3.4 岩脈侵入末端應力分布的函數圖形.....	18
圖 3.5 三種裂隙尖端位移模式的示意圖.....	25
圖 3.6 三種岩脈在空間中之形貌.....	25
圖 3.7 雁行排列岩脈上常見的構造現象.....	26
圖 3.8 雁行排列岩脈在形貌及分布上的量化.....	26
圖 3.9 雁行排列的岩脈與階梯狀排列的岩脈，在岩漿沿裂隙侵入時的演化過程.....	27
圖 3.10 以方塊圖 (block diagram) 及莫氏圓 (Mohr circle) 表示破裂類型與三軸應力大小之間的關係.....	28
圖 3.11 各類破壞帶在走向滑移斷層中相對的分布位置 (俯視視角).....	29
圖 3.12 斷層尖端 (fault tip) 的破裂模式差異，在走向滑移斷層中不同的位置，其斷層尖端破裂模式會有所不同.....	29

圖 3.13 尖端破壞帶的破裂形貌.....	30
圖 3.14 圍岩破壞帶的破裂形貌.....	30
圖 3.15 連結破壞帶的破裂形貌.....	31
圖 3.16 依據斷盤相對運動方向對斷層分類.....	32
圖 3.17 在一露頭面上，依據斷盤中的標誌層之斷距對斷層分類 .....	33
圖 3.18 萊萊海蝕平台煌斑岩岩脈及斷層構造地質圖.....	37
圖 3.19 煌斑岩脈上斷層的古應力分析成果.....	37
圖 3.20 萊萊海蝕平台上最後一期走向橫移斷層的斷層擦痕分析 .....	38
圖 3.21 萊萊海蝕平台及附近區域的逆斷層擦痕分析.....	39
圖 4.1 相機、相空間、物空間三者之間在空間上的共線條件示意圖 .....	43
圖 4.2 影像正射化流程.....	45
圖 4.3 倒投影法示意圖 .....	45
圖 4.4 地電阻探測常用的四極排列法示意圖.....	50
圖 4.5 Wenner Array 示意圖 .....	50
圖 4.6 地電阻施測情形.....	51
圖 5.1 萊萊附近的海蝕平台上的褶皺與斷層分布.....	56
圖 5.2 萊萊附近海蝕平台上的斷層擦痕統計資料.....	57
圖 5.3 萊萊海蝕平台的 UAV 未正射化空拍影像 .....	58
圖 5.4 正射化後的萊萊海蝕平台 UAV 空拍影像 .....	58
圖 5.5 1:1000 的萊萊海蝕平台構造地質圖.....	59
圖 5.6 1:600 岩脈列及周遭區域的岩性分布及破裂構造底圖 .....	60

圖 5.7 岩脈 A 的構造俯視.....	76
圖 5.8 岩脈 A 的構造.....	76
圖 5.9 岩脈 B 的構造俯視及立面圖.....	77
圖 5.10 岩脈 B 的構造，參自圖 5.9 的.....	78
圖 5.11 岩脈 B 的南北向剖面，參自圖 5.9 的.....	79
圖 5.12 岩脈 C 的構造俯視及立面圖.....	80
圖 5.13 岩脈 C 的構造，參自圖 5.12 的.....	81
圖 5.14 岩脈 C 的南北向剖面，.....	81
圖 5.15 岩脈 D、E、F 的構造俯視及立面圖.....	82
圖 5.16 岩脈 D、E、F 的構造，參自圖 5.15 的.....	83
圖 5.17 岩脈 D、E、F 的南北向剖面.....	84
圖 5.18 岩脈 G 的構造俯視及立面圖.....	85
圖 5.19 岩脈 G 的構造.....	86
圖 5.20 岩脈 G 的南北向剖面.....	87
圖 5.21 岩脈 H 構造俯視圖.....	88
圖 5.22 岩脈 H 的構造.....	88
圖 5.23 岩脈 I 的構造俯視及立面圖.....	89
圖 5.24 岩脈 I 的構造.....	90
圖 5.25 岩脈 I 的南北向剖面.....	91
圖 5.26 岩脈 J 的構造俯視圖。.....	92
圖 5.27 岩脈 J 的構造。.....	92

圖 5.28 岩脈 J 的南北向剖面 .....	92
圖 5.29 岩脈 K 的構造俯視及立面圖 .....	93
圖 5.30 岩脈 K 的構造 .....	94
圖 5.31 岩脈 K 的南北向剖面 .....	95
圖 5.32 岩脈 L 的構造俯視圖 .....	96
圖 5.33 岩脈 L 的構造 .....	96
圖 5.34 岩脈 L 的南北向剖面 .....	97
圖 5.35 岩脈 M~S 的構造俯視圖 .....	98
圖 5.36 岩脈 O、P 的構造 .....	98
圖 5.37 岩脈 R 上的南北向剖面 .....	99
圖 5.38 岩脈 F、G、I、K、L 的斷層擦痕分析 .....	100
圖 5.39 所有岩脈的斷層擦痕分析及應力場推測方向 .....	101
圖 5.40 斷層 (FII, fault II) 截切岩脈 (DA、DB、DC、DD, dike A、dike B、dike C、dike D) 的構造現象 .....	102
圖 5.41 斷層 (FIII) 截切岩脈 (DD、DE) 的構造現象 .....	103
圖 5.42 斷層 (FIV) 截切岩脈 (DE、DF) 的構造現象 .....	104
圖 5.43 斷層 (FV、FVI) 截切岩脈 (DF、DG) 的構造現象 .....	105
圖 5.44 斷層 (FVII、FVIII) 截切岩脈 (DG、DH、DI) 的構造現象 .....	106
圖 5.45 構造地質圖 (FVIII) .....	107
圖 5.46 斷層 (FIX) 截切岩脈 (DI、DJ) 的構造現象 .....	108
圖 5.47 藉由鑽孔來判斷斷層 IX 的位態 .....	109

圖 5.48 斷層 (FX) 截切岩脈 (DK、DL) 的構造現象.....	110
圖 5.49 斷層 (FXI) 截切岩脈 (DL、DM) 的構造現象.....	110
圖 5.50 萊萊海蝕平台西側北傾向斜.....	111
圖 5.51 萊萊海蝕平台東側北傾背斜.....	111
圖 5.52 萊萊海蝕平台地層位態分布及褶皺分析.....	112
圖 5.53 節理圓取樣點分布與平台上圍岩的分區.....	113
圖 5.54 取樣站 1-1、1-2.....	113
圖 5.55 取樣站 2-1、2-2、2-3、2-4.....	114
圖 5.56 取樣站 3-1、3-2、3-3.....	115
圖 5.57 取樣站 5-1、5-2.....	116
圖 5.59 地電阻測線分布.....	119
圖 5.60 L1~L4 測線的地電阻影像剖面.....	120
圖 5.61 斷層 IX 的延伸情形、錯距、錯動方向估計.....	121
圖 6.1 岩脈 G、H、I、K 與斷層 IX 在東西向鉛直面上的投影.....	125
圖 6.2 萊萊海蝕平台全區東西向側面投影.....	125
圖 6.3 萊萊海蝕平台地層及構造立體圖.....	126
圖 6.4 萊萊海蝕平台褶皺與逆斷層的交互關係立體圖.....	126
圖 6.5 在板塊聚合或剛性地塊嵌入的構造環境中可能發生的變形作用 ..	127
圖 6.6 岩脈與周遭圍岩層面的位態投影圓分析.....	128
圖 6.7 斷層作用後的岩脈分布.....	131
圖 6.8 節理頻率調查線分布.....	132

圖 6.9 東西向平行岩脈節理的出現密度統計.....	133
圖 6.10 雁行排列岩脈的形成過程.....	134
圖 6.11 岩脈構造演育過程.....	138

## 表目錄

表 2.1 台灣東北區域的地層層序以及各層層厚.....	9
表 5.1 各岩脈的野外量測資料整理.....	73
表 5.2 各段岩脈中斷層及覆疊構造現象彙整.....	74
表 5.3 各主要斷層的位態、斷層性質、地表錯距彙整.....	75
表 6.1 岩脈與圍岩過去的構造事件及應力演化史.....	137

# 第一章 緒論

## 1.1 前言

台灣東北角萊萊海蝕平台及上面出露的煌斑岩脈 (圖 1.1) ，過去於漸新世沉積形成地層後，於晚中新世岩漿入侵形成岩脈，上新世早期以來受到蓬萊造山運動作用造成擠壓與抬升。本研究區域的煌斑岩脈在形成時間、成份上不同於鄰近的龜山島火山及大屯火山系統，鄰近只在外澳有部分出露，具有特殊性。出露良好的岩脈呈現雁行排列的形式 (圖 1.2) ，其上面的斷層、破裂等構造，記錄了過去的構造作用，因此研究這些構造，除了讓我們知曉岩脈構造的演變及應力變化史，更可以幫助我們了解大尺度下的構造作用如何對一個局部區域的構造產生影響。本研究的研究方法除了傳統的野外觀察及測量，另以較精細的構造底圖去忠實的紀錄構造現象，亦結合了現代科技如 UAV 空拍影像及地電阻測勘。在岩脈構造演化過程的建立上，藉由動力分析的角度，將岩脈各階段的分布樣貌推演出來。

## 1.2 研究動機與目的

台灣關於火山研究已有一定基礎，在北部地區大屯與基隆等火山群，其噴發的形式及巨觀下的噴發機制皆有深厚研究，特別是在火山礦物化學部分。由於台灣島出露的火山群大部分在中新世至上新世之間形成，早於上新世開始的蓬萊造山運動，火成岩上的破裂現象會記錄造山運動的構造作用，研究火成岩上的構造能對台灣新生代的構造演化提供一個新的觀點。前人對於蓬萊已有一定基礎的研究，諸如礦物化學成分判斷、節理統計、應力分析等等，然而對於岩脈構造演化仍未有彙整及更進一步的研究，作者認為針對岩脈及附近圍岩進行中視構造描繪，可以解決前述問題，佐證及延伸前人的研究成果。

位於本研究區域的萊萊海蝕平台，在中視尺度上，萊萊煌斑岩脈的雁行排列以 19 段岩脈組成，呈現東西走向、右階的差排形式，其中各段岩脈的末端有些是岩漿侵入的末端，在外觀上岩脈的厚度會慢慢縮減直至尖滅；有些岩脈末端則是被總計 11 條的南北向右移斷層，以接近正交的角度截切，這些斷層通過岩脈的區域相較圍岩較為脆弱，因而被海水侵蝕為溝，雁行排列形成的原因是作者認為本研究區域最顯而易見且最有趣的問題。岩脈上則有岩脈呈現杏仁狀疊置的現象，並發現一些西傾的低角度小斷層，在圍岩上由於褶皺影響，使得整個海蝕平台上的岩層皆呈現彎曲的排列，存在與岩脈走向平行的節理外，另有許多不同時期產生的裂理相互截切，這些圍岩上的構造在岩脈上並不會發現到，反之亦然，而岩脈與圍岩之間也不容易發現橫跨兩區的裂理，岩脈與圍岩之間構造現象的交互關係，以及本研究區域的局部構造演化與區域應力場變化的關聯性是我們之後感興趣的第二問題。

中視構造描繪在野外調查與構造演化的研究上是相當重要的部分，其中對於裂理的中視紀錄，更是日後從事破裂力學相關理論推演及數值模擬的基礎，除了前述學術上的價值外，更可以延伸至工程領域及地震防災上，

詳細的中視構造調查報告可以提供主事者可靠的現地地質資訊，有助於設計工程解決方案，台灣的工程地質界在這方面仍有很大的進展空間，本研究可提供一個範例去作為野外中視調查的一個參考。

本研究對象主要針對於萊萊海蝕平台上的岩脈及附近的圍岩，研究目的分為三大部分：第一為探討岩脈呈現雁行排列的原因，以及岩脈侵入時的形成環境，第二為統整冷卻後的岩脈與圍岩在裂理上的差異並探討其原因，第三為歸納出岩脈構造演化次序的模型，並和分別和相對同期的區域應力比較。為了達成前面敘述的三項研究目的，除了使用之前描述的中視構造描繪的方式以外，為了提高中視構造紀錄的效率與精度，本研究另外借助 UAV 空照協助判定岩脈、褶皺及主要斷層的形貌與分布，並以此為基礎製作全研究區域的構造底圖，之後借助野外的全站儀定位提高構造底圖的精度，使之與中視構造底圖結合，此外借助地電阻測勘技術，取得岩脈在地下的立體分布，佐證地表觀察現象，幫助後續岩脈構造演化解釋。



圖 1.1 萊萊海蝕平台全景。照片中央為萊萊海蝕平台，而呈現圍牆狀聳立的岩體為煌斑岩脈。



圖 1.2 雁行排列的煌斑岩脈全景。煌斑岩脈突出圍岩呈現右階雁行排列，岩脈厚度約為一公尺。

## 第二章 區域地質概述

台灣東北角位於台灣東北隅，陸域範圍東起太平洋，西至雪山山脈山脊線；海域範圍北起新北市瑞芳區南雅里，南至烏石港。本研究區域位於台灣東北角的三貂角南方，於台二線 109.5K 處的海蝕平台上，東西長約 200 公尺，南北寬約 80 公尺 (圖 2.1)。

### 2.1 區域地質敘述

台灣東北角在地形上屬於雪山山脈的延伸區域，地形主要以丘陵、濱海階地、海蝕平台為主。丘陵海拔介於 200~700 公尺之間，多為陡坡及深谷，嶺線呈東北到東北東走向，與區域內的構造線略呈平行，部分向海延伸形成岬角如鼻頭角及三貂角，河系主要為細流，河道短促，雨季時流量較大乾季則流量少甚至乾涸。海岸區域以岩岸為主，由於風力與海浪等營力使的侵蝕作用發達，多發育海蝕崖 (鼻頭角) 與海蝕平台 (三貂角、和美、鼻頭角)。由於此區海岸大部分屬於沉降海岸，可以見到往陸地退縮的多期階地，部分階地有薄礫石層堆積，形成聚落及農業用地。出露地層為漸新世與中新世形成的地層，岩性以海相至濱海相的砂頁岩等沉積岩為主，另有變質的石英岩和硬頁岩、以及少數更新世的石英安山岩及火山岩屑。地層走向大致以東北向為主，然而由於上新更新世來自菲律賓海板塊的造山運動，岩層受到劇烈擠壓，形成錯綜複雜的褶皺與斷層。

#### 地質分區

在地質分區上，台灣東北角北以龍洞斷層，南以屈尺斷層為界可分為三大地質區 (顏滄波、陳培源, 1931)，龍洞斷層以北屬於西部麓山帶地質區；介於龍洞斷層與屈尺斷層之間區域屬於澳底地塊，為西部麓山帶與雪山山

脈地層之間的過渡區；屈尺斷層以南屬於雪山山脈地質區，本研究所所在的萊萊海蝕平台即位於此區。

西部麓山帶地質區由中新世木山層、大寮層、石底層、南港層、南莊層及桂竹林層組成，為濱海相及大陸棚淺海相沉積環境，部分區域由於第四紀初期石英安山岩體的侵入，形成基隆火山群。澳底地塊由漸新世龍洞砂岩、蚊仔坑層以及其上覆的部分麓山帶地層組成，為麓山帶與雪山山脈帶之間的過渡區域，可做為西部麓山帶地質區與雪山山脈地質區之間地層的對照。雪山山脈地質區由漸新世至中新世傾度變質的大桶山層與中新世澳底層組成，為淺海至半深海相沉積環境，然而自澳底層後的地層並未發現，推測由於地表侵蝕消失，可用西部麓山帶的地層作為對照。除此之外，另有零星的第四紀河階和海階堆積物分布於基隆河、雙溪及部分海岸區域，更新世火成岩體則分布於基隆山和龜山島。

#### 研究區域附近的地層與構造

圖 2.1 為萊萊附近的地質圖，三道 1~1.5 公里長的 AA'、BB'、CC' 地質剖面分別呈現研究區域附近的斷層及地層形貌。從地質圖及地質剖面圖上，萊萊海蝕平台附近地層皆朝北傾，傾角介於 10~20 度之間，有一條東北-西南走向的高角度正斷層切過萊萊西方。以下列出附近地層及構造：

##### (1) 大桶山層

大桶山層由市川雄一 (1930) 命名，標準出露地點位於台北縣烏來鄉大桶山地區，分布於屈尺斷層以南的區域，屬於漸新世晚期外大陸棚或大陸斜坡沉積環境，岩性以硬頁岩為主間夾薄層灰色泥質砂岩，硬頁岩常具劈理和節理，砂岩質地堅硬，常向上向下漸變為硬頁岩，因此缺乏明顯層面。本層在東北角僅僅局部出露因而厚度不詳，出露部分估計有 400 公尺。地層關係上，本層往下整合覆蓋於乾溝層之上，在岩性和時代上可與蚊仔坑層上部對比，但本層變質度較強。

## (2) 澳底層

澳底層由顏滄波、陳培源 (1953) 所命名，標準出露地為貢寮、福隆一帶，分布於屈尺斷層以南的澳底地塊與雪山山脈東北段地區，沉積物為中新世早期的濱海相沉積，本層往下整合覆蓋於大桶山層之上。依據岩性不同本層可以分為媽岡段與枋腳段，媽岡段的標準出露點位於新北市貢寮區馬崗村海岸，枋腳段的標準出露點則位於新北市貢寮區枋腳村。

### 媽岡段

本層岩性以灰白色細粒至中粒砂岩與深灰色頁岩互層為主，砂岩層厚不超過 2 公尺，質地堅硬；頁岩有受到輕微變質作用，沉積年代目前訂為中新世早期，本層為大桶山層與澳底層枋腳段之過渡層，層厚為 370 公尺。

### 枋腳段

本層岩性以灰白色細粒至粗粒砂岩與灰色頁岩互層為主，夾雜砂頁岩薄互層與薄煤層，本層層厚為 300 公尺。本層砂岩有小型至中型交錯層、生物擾動構造，岩性上類似於西部麓山帶地質區內的木山層。

## (3) 鶯仔瀨向斜

本向斜屬於開闊向斜，位於萊萊以北 2 公里處，軸線向東北東通過福隆市區並延伸入海，西南段被枋腳斷層截切。北翼地層較陡，在 15~53 度之間；南翼較緩，在 9~22 度之間，兩翼出現地層為澳底層及大桶山層。

## (4) 萊萊海蝕平台以西約 50 公尺正斷層

本斷層經由黃鑑水、劉桓吉等人在 1984 年的地質調查，發現斷層兩側岩層層位的不一致，認為是一道走向為北 40 度東，向東傾角度接近垂直的斷層，錯距約 100 公尺。

## 2.2 構造事件歷史

現今的萊萊海蝕平台及周遭區域，過去在晚漸新世時期沉積大桶山層，由於台灣北部當時處於南中國海板塊擴張時期，沉積環境屬於淺海至半深海的沉積盆地，此後一直穩定連續沉積整合的地層，現今出露的地層則慢慢地被深埋。在晚中新世時期岩脈侵入 (陳正宏,1989)，此時的海底正在沉積南莊層，地體環境依然屬於張裂的狀態下。直到五百萬年前的上新世早期，蓬萊造山運動使本區域產生東北至東北東方向延伸的長波長褶皺，波長皆達數公里，另有許多波長介於數百公尺的小褶皺分布於其上，以及東北走向的逆斷層和一部分接近南北向的平移斷層，這些斷層的形成順序晚於褶皺的發生。

在岩脈入侵的中新世晚期，現今所看到的萊萊海蝕平台由於地層的連續沉積，掩埋於地下深處，計算晚漸新世到晚中新世之間地層的層厚可以推測出當時的萊萊位於地下的深度。表 2.1 提供東北角各地層的層序以及厚度，萊萊位於雪山山脈地質區內，然而在澳底層以上的地層有所缺失，只能引鄰近的西部麓山帶地層估計，另外東北角區域過去的沉積環境屬於淺海至半深海的沉積盆地，沉積環境變化劇烈使得各處地層組成互異，即使在同一時期的同一地層，由於沉積盆地深度不一使各處岩相迅速變化連帶使層厚產生差異，部分岩層甚至尖滅，導致本區岩層難以追跡 (詹新甫,1981)，在深度估計上僅能提供約略的數據。

依序加總澳底層 (晚漸新世)、大寮層、石底層、南港層、到南莊層 (晚中新世) 的地層總厚度，岩脈入侵時現今的萊萊位於地下 2520~2670 公尺之間。

表 2.1 台灣東北區域的地層層序以及各層層厚。括弧內為地層厚度，用以估計大桶山層堆積（晚漸新世）至煌斑岩脈形成（晚中新世）這段期間，萊萊海蝕平台上覆地層堆積的總層厚。在這段期間一共堆積了 2520~2670 公尺厚的地層，顯示萊萊海蝕平台在晚中新世煌斑岩漿入侵時，位於地表下 2.5 公里左右的深度（詹新甫，1981；何春蓀，1986；黃鑑水，1988）。

地質年代	西部麓山帶地質區 (何春蓀，1986)	澳底地塊(詹 新甫，1981)	雪山山脈地質區 (何春蓀，1986)
晚中新世	南莊層 (350m)	未發現	未發現
	南港層 (700m)		
中中新世	石底層 (300~450m)		
早中新世	大寮層 (500m)	大寮層	澳底層枋腳段 (300m 以上)
	木山層 (450~750m)	木山層	澳底層媽岡段 (370m)
晚漸新世	五指山層	蚊仔坑層	大桶山層 (400m 以上)
			乾溝層
		龍洞砂岩	四稜砂岩

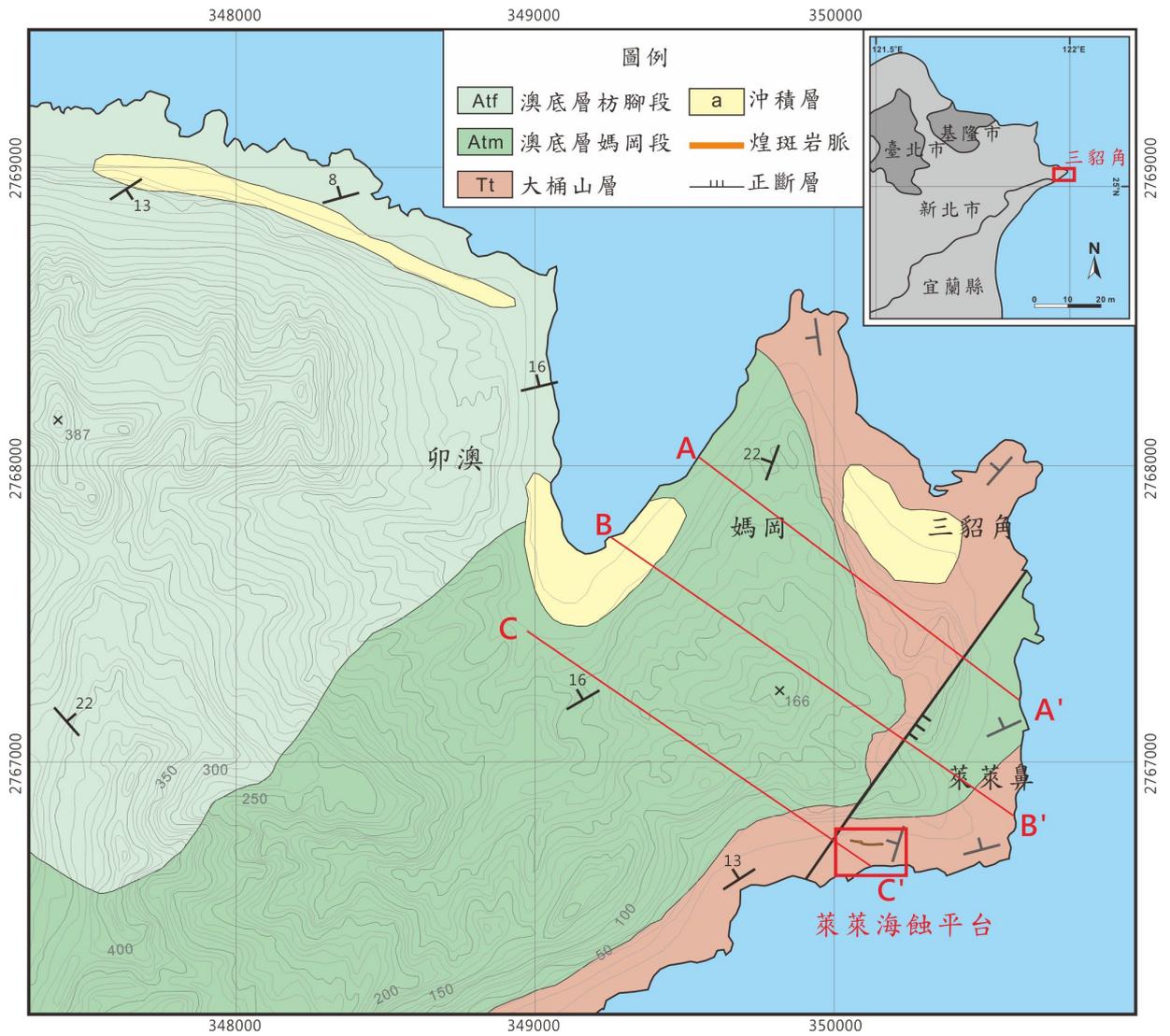
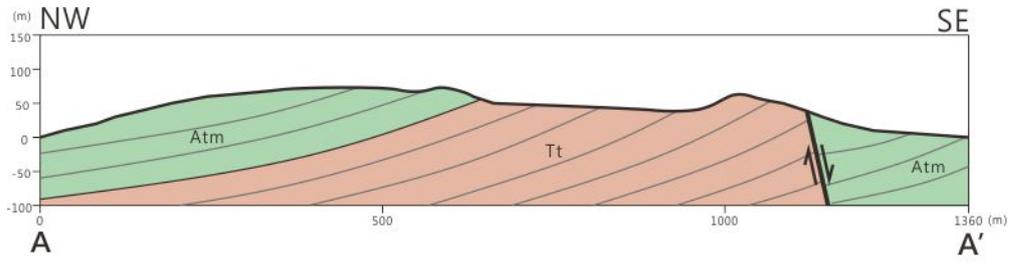
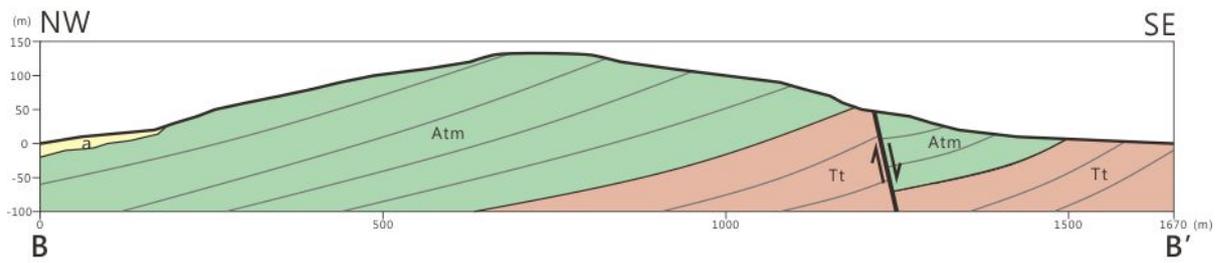


圖 2.1 萊萊海蝕平台及周遭區域地質圖，改繪自中央地質調查所之五萬分之一的雙溪地質圖（黃鑑水，1988），地質剖面 AA'、BB'、CC' 繪於圖 2.2。其中，萊萊海蝕平台以東之大桶山層、澳底層之間的邊界，已根據實際野外調查後並作修改。

(a) 剖面 AA'



(b) 剖面 BB'



(c) 剖面 CC'

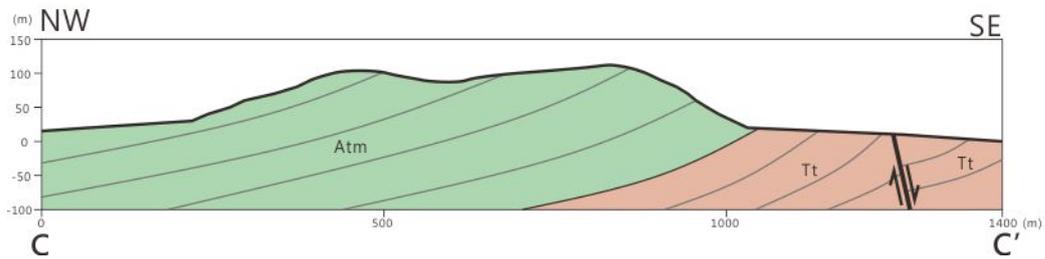


圖 2.2 萊萊海蝕平台附近的地質剖面 AA'、BB'、CC'，剖面線皆為西北-東南走向，位置標於圖 2.1。

## 第三章 前人文獻回顧

### 3.1 岩漿侵入理論

岩漿藉由熱、壓力、浮力產生往上移棲的動力，使應力集中於侵入前端並劈裂圍岩，而後岩漿藉由液壓將裂隙撐大形成通道使岩漿持續進入，最後岩漿固化形成岩脈。然而在不同的溫度、深度、岩石圍壓、應力場特性等條件下，岩脈形成後的走向及形貌皆會有不同的差異。岩脈形成的基本條件必須包含：

- (1) 當岩漿庫的液壓必須大於或等於垂直的上覆岩壓
- (2) 最小主應力軸的方向必須為水平方向，否則會形成傾斜的岩脈或岩床
- (3) 岩漿的密度必須小於圍岩的密度

### 3.1.1 岩漿的侵入模式與機制

在岩脈形成的環境下，岩漿侵入的行為主要分為沿既存裂隙的侵入 (intrusion into pre-existing fissures)、強力入侵 (forceful injection)、以及換質取代作用 (metasomatic replacement)。岩漿沿既存節理侵入的作用，發生於節理存在的上部地殼，藉由岩漿液壓撐開既存節理後侵入，然而岩漿液壓必須大於垂直於節理方向的正向應力。強力入侵作用機制類似於水力破裂 (hydraulic fracturing)，藉由岩漿的熱及壓力破壞侵入通道前的圍岩以產生通道使岩漿進入，因此岩漿液壓除了克服水平向最小主應力外還需克服圍岩的張力強度。換質取代作用，主要藉由岩漿的熱使前方圍岩融化形成通道。

關於岩脈末端的傳導機制，Pollard (1973) 統整前人的研究，將岩脈傳導機制分為 (圖 3.1)：張力破裂作用 (extension fracturing)、脆性斷層作用 (brittle faulting)、塑性斷層作用 (ductile faulting)，這些機制下所產生的裂隙形貌類似於實驗中所觀測到的各種岩石破裂模式 (Griggs and Handin, 1960)，影響這些破裂形貌的因素除了岩性以外，還有環境因素的影響，包括：圍壓、溫度、孔隙壓、以及應變速率。從這些裂隙形貌我們能夠依此判斷岩脈末端周遭的應力場型態，以及在岩脈末端應力集中的狀態。

#### 張力破裂作用

此機制最早由 Anderson (1951) 提出，岩漿經由楔入作用 (wedging action) 導致前方圍岩的應力場發生改變而產生張力破裂，張力破裂遵守 Griffith 破壞準則，這些張力破裂類似於實驗室以低溫、低圍壓、高應變速率條件下所產生的岩石破裂，表示其形成環境位於地殼中較接近地表的區域。Pollard (1973) 解釋張力破裂形成的機制 (圖 3.2)，這些破裂的形成並非由於岩漿直接接觸所造成，隨著岩漿接近，圍岩最小主應力會急遽下降，應力狀態會從初始符合地壓梯度的 point I 移動到 point II，落入破裂可發生的範圍，最小主應力從壓縮的狀態轉為拉張，因而產生張力破裂，而後岩

漿順著破裂的通道進入。張力破裂作用這種機制會使岩脈有較大的長/厚比，其侵入前端與圍岩接觸的輪廓較為尖銳，類似毛筆筆尖狀，在應力分布上，岩脈末端都會有應力集中的現象。

#### 脆性斷層作用

此機制最早由 Griggs and Handin (1960) 提出，其破裂的形式亦符合 Griffith 破壞準則，根據 Pollard (1973) 對其形成機制的解釋 (圖 3.2)，隨著岩漿侵入，其周遭圍岩的最小主應力會急遽下降，應力狀態會由初始的 point III 跳轉到 point IV，達到可以產生破裂的應力狀態，大部分以斷層或剪力破裂出現，相較垂直入侵所需的岩漿液壓，此機制所形成裂隙，其裂面上的正向應力較小，使岩漿液壓容易克服並沿著這些裂面侵入。所形成的岩脈末端形狀大多屬於鈍狀，並和斷層或剪力破裂相接，這些破裂常以和岩脈夾銳角的形式出現，相較於張力破裂機制的形成環境，本機制所形成的岩脈是在中溫中壓的環境下形成，在地殼中較深的位置，一般在地表下 4 到 5 公里以下的深度。

#### 塑性斷層作用

此機制最早由 Griggs and Handin (1960) 提出，和前兩者機制最大不同處在於本機制以塑性變形為主，使得在岩漿侵入前端的邊界容易鈍化並讓圍岩產生變形，應力難以集中在侵入尖端來產生破裂，取而代之的是，隨著應力持續累積，侵入前端產生與傳遞方向夾 45 度且共軛的塑性斷層，使得圍岩產生破裂之後岩漿往前傳遞，然後侵入前端的邊界再次鈍化，如此周而復始。此機制作用於溫壓較高的地殼深處，岩脈末端連結的共軛塑性斷層，使得圍岩也產生明顯的變形，特徵類似於滑移線場理論 (slip-line field theory) 所呈現的變形。

### 3.1.2 岩脈形成時的方向性與應力特性

在中視或巨視的尺度下，岩脈走向的趨勢取決於區域應力場的分配，以及岩漿侵入前既存裂隙的走向趨勢，而在數公尺到公分級的尺度下，岩脈末端的延續方向還另外取決於岩漿侵入時，前端局部應力集中的狀態。

Anderson (1938) 認為區域應力會影響岩脈的走向。在一般岩脈形成的情況，例如強力入侵的方式所形成的岩脈，岩脈的走向會垂直於區域最小主應力的方向。在岩漿侵入有既存節理的圍岩時，只要符合應力場條件，岩漿也會選擇與最小主應力垂直走向的裂隙侵入，Pollard 在 1986 年提出下列公式，作為岩漿能否侵入節理的依據 (圖 3.3)：

$$\frac{(P_m - S_{H_{max}}) + (P_m - S_{H_{min}})}{S_{H_{max}} - S_{H_{min}}} = R > -\cos(2\alpha)$$

$P_m$  代表岩漿液壓， $S_{H_{max}}$  和  $S_{H_{min}}$  分別代表水平方向上最大與最小主應力， $R$  為表示應力狀態的變數， $\alpha$  為既存節理的走向。當區域的水平方向應力過大時，例如板塊擠壓的環境下，岩漿液壓不足以將節理撐開，導致岩脈無法生成；在構造相對不活躍的地方，水平方向應力相當的微小，使得岩漿可以撐開任意走向的節理，岩脈不會有走向上的趨勢。而在特定應力條件下，使得應力狀態  $R$  介於 -1 到 1 之間，岩漿侵入時會選擇撐開特定範圍內走向的節理，岩脈走向的分布因而有趨勢性。

在中視尺度下，岩脈上的局部應力表現會和區域應力場不同，其中在岩漿侵入的前端，其應力分布的狀態會影響往後岩漿向前傳導的方向。

Pollard (1973) 提出下列公式推算岩漿侵入前端應力的分布 (圖 3.4)：

$$(\sigma_{\eta\eta})_{\xi_0} = \frac{(s_1 + s_3 - 2p)2\frac{l}{t} + (s_1 - s_3) \left\{ \left[ \left(\frac{l}{t}\right)^2 + 2\left(\frac{l}{t}\right) + 1 \right] \cos 2(\beta - \eta) - \left[ \left(\frac{l}{t}\right)^2 - 1 \right] \cos 2\beta \right\}}{\left(\frac{l}{t}\right)^2 + 1 - \left[ \left(\frac{l}{t}\right)^2 - 1 \right] \cos 2\eta}$$

$(\sigma_{\eta\eta})_{\xi_0}$  為岩漿垂直作用於岩脈與圍岩接觸面的正向應力， $s_1$ 、 $s_3$  分別是水平方向的最大與最小主應力， $\beta$  為主應力的方向， $\eta$  為沿著岩脈與圍岩接觸面

上的位置， $\frac{l}{t}$ 為岩脈的長厚比， $p$ 為岩漿液壓。岩漿侵入通道為  $x$  軸方向，當最小主應力方向垂直於此通道時，位於 $\eta = 0$ 的岩脈尖端應力會有最大值，岩漿侵入方向依然保持不變；然而當最小主應力方向不垂直於通道，應力最大的區域就不會集中在岩脈尖端，岩漿之後的侵入方向就會偏轉，岩脈的形貌也會有所變化。

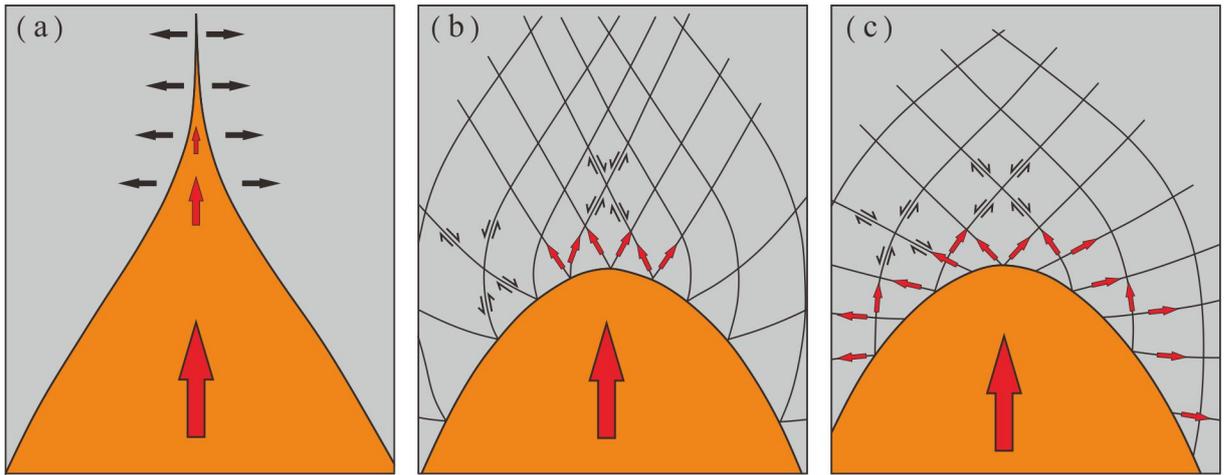


圖 3.1 三種在岩漿侵入末端處，岩漿往前傳遞的模式，紅色箭頭為岩漿傳遞方向，黑色箭頭為圍岩的破裂及錯動方向。(a) 張力破裂作用 (b) 脆性斷層作用 (c) 塑性斷層作用 (Pollard, 1973)。

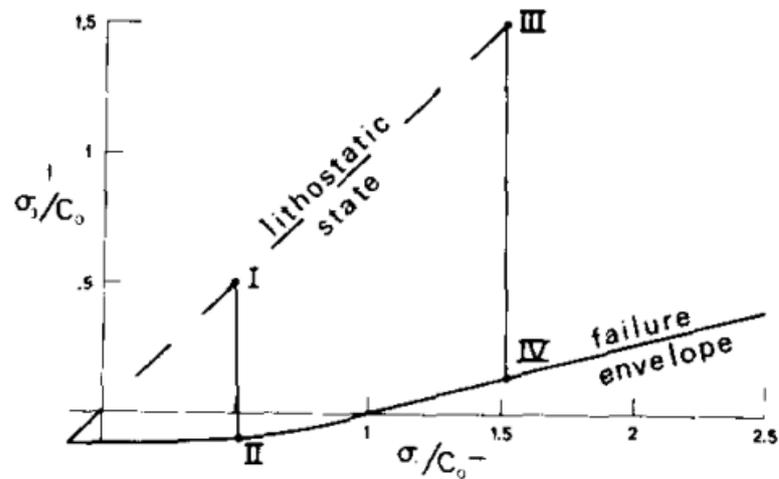


圖 3.2 岩石的應力狀態與破裂產生的應力條件。應力狀態 I、III，岩石並未發生破裂；應力狀態 II、IV，岩石產生破裂 (Pollard, 1973)。

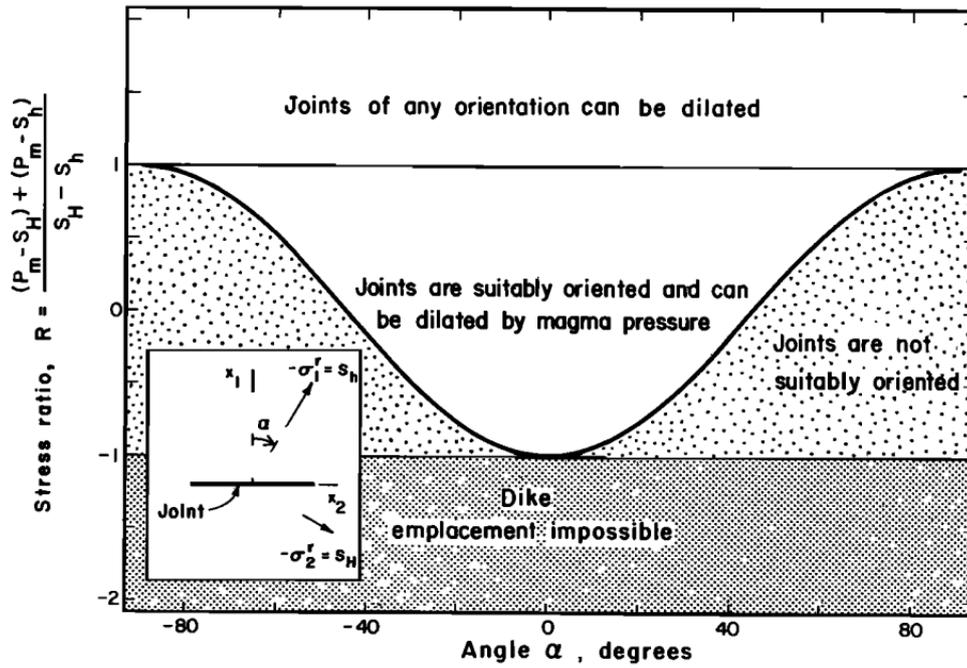


圖 3.3 岩漿侵入多裂隙岩體時，岩漿侵入開裂節理與否的判別圖表 (Pollard, 1986)。當  $R$  小於 1，任意方向的節理皆不會有岩漿入侵；當  $R$  大於 1，所有方向的節理皆會被岩漿入侵； $R$  介於 -1 到 1 之間，特定方向的節理會被岩漿入侵， $R$  越大，岩漿可侵入的節理方向之區間範圍會越大。

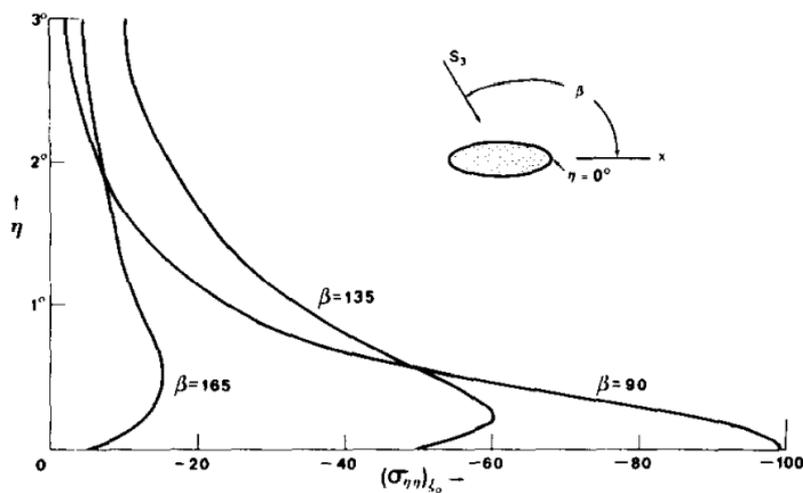


圖 3.4 岩脈侵入末端應力分布的函數圖形 (Pollard, 1986)。當  $\beta = 90$  時 (最小主應力軸與岩脈走向垂直)，侵入末端的尖端會有最大的應力，使得新的裂隙較容易在侵入尖端周遭的圍岩出現。

## 3.2 岩脈與圍岩的構造現象

本章節將介紹岩脈常見的形貌，以及雁行排列岩脈中常見的構造現象。

### 3.2.1 岩脈排列的形貌

根據 crack tip displacement modes 理論，岩脈排列的形貌極大的受到岩漿入侵時應力狀態的影響，在這之前需先介紹裂隙尖端位移模式 (crack tip displacement modes)。

裂隙尖端位移模式由 Atkinson (1987) 和 Engelder (1987) 提出，是針對裂隙發展的機制所提出的理論，藉由集中於裂隙尖端的應力，將前端的材料撕裂使裂隙往前延伸。共有三種形式 (圖 3.5): 張裂 (opening, mode I)、滑動 (sliding, mode II)、剪動 (scissoring, mode III)。mode I 藉由垂直於裂隙面的張力，產生張力裂隙，不包含任何剪力；mode II 藉由作用在裂隙面上的剪力，產生沿著裂隙面並與裂隙尖端邊界 (tip line) 呈垂直的滑動方向；mode III 藉由作用在裂隙面上的剪力，產生沿著裂隙面並與裂隙尖端邊界呈平行的剪動方向。Mode II 和 mode III 所產生的裂隙，皆為剪力所造成，並不包含張力。在野外露頭，裂隙的生成機制常以混合模式 (mixed mode loading) 為主，常以 mode I 結合 mode II 或是 mode I 結合 mode III 的形式出現 (Younes and Engelder, 1999)。

Pollard (1987) 根據 crack tip displacement modes，將岩脈的形貌歸類為三種 (圖 3.6)，平面岩脈 (planar dike)、彎曲末端 (curved tip)、雁行排列 (en-echelon segment)，以下分別敘述：

#### 1. 平面岩脈 (planar dike)

為一般岩脈侵入的形貌，只受到 mode I 機制所影響，在張裂狀態下形成的岩脈。

## 2. 彎曲末端 (curved tip)

在岩漿侵入時，混合 mode I 與 mode II 機制，隨著深度變淺，最小主應力的方向不再保持水平，導致侵入尖端產生彎曲，使得岩脈不垂直於地表，漸漸地朝某一側傾斜。

## 3. 雁行排列 (en-echelon segment)

混合 mode I 與 mode III，隨著深度變淺，最小主應力會產生水平方向的旋轉，岩脈逐漸分裂成數段小岩脈，岩脈走向發生的旋轉，形成雁行排列。除此之外，雁行排列岩脈可能的形成因素不只前述，還包含：

- a. 岩脈形成後的斷層作用：藉由一系列的斷層錯動，將原本的平面岩脈錯斷開來，形成雁行岩脈。
- b. 岩脈形成時受既存雁行節理的影響：在圍岩中先形成一系列的雁形節理，而後岩漿沿著這些裂隙侵入，形成雁行岩脈。

### 3.2.2 雁行排列岩脈的構造特徵

Delaney & Pollard (1981)根據在 Ship rock, New Mexico 的野外調查，歸納出雁行岩脈的構造特徵 (圖 3.7)：

#### 1. 雁行排列岩脈的末端

在 3.1.1 章節已提過，岩漿侵入時的岩脈末端形貌皆為對稱尖狀，然而雁行排列的岩脈段末端並非對稱尖狀。

#### 2. 階梯狀排列的岩脈及接觸邊界

不同於一般岩脈與圍岩之間平面的接觸邊界，此類岩脈的接觸邊界會有急折現象，呈現階梯狀接觸邊界。

為了定義雁行排列岩脈的形貌與形成條件，Nicholson & Pollard (1985) 亦提出以定量方式描述雁行岩脈及形成前雁行裂隙的形貌 (圖 3.8) 參數部分： $2b$ :岩脈段長度， $2s$ :雁行岩脈之間間距， $2o$ :雁行岩脈之間重疊的長度，

2d:岩脈段的厚度，2k:各岩脈段的中心點，在岩脈走向上的間距，2c:各岩脈段的中心點，在整個雁行岩脈帶走向上的間距， $\omega$ :扭轉角。當  $b/k > 0.5$  以及  $s/k < 1.0$  時，岩脈才會被定義為雁行排列，並在幾何形貌與力學上顯現出特徵，在這區間以外岩脈的形貌和機制表現視為單一岩脈。而萊萊岩脈的  $b/k = 1.04$ 、 $s/k = 0.04$ ，符合雁行岩脈的定義。

雁行岩脈的形成過程，大部分為岩漿侵入雁行裂隙的結果 (圖 3.9)，隨著岩漿不斷侵入使雁行裂隙膨脹，雁行岩脈逐漸成形，岩脈的外邊界 (outer part) 由於區域應力下的影響依然會保持直線，而雁行裂隙重疊的圍岩區塊 (bridge)，由於兩側裂隙膨脹所產生的壓力，產生了彎曲作用 (bending) 使得內邊界 (inner part) 產生彎曲，形成不對稱的岩脈尖端 (Farmin, 1941)。而後岩漿持續進入，彎曲應變 (bending strain) 不斷累積使得岩脈之間開始相連，形成梯狀排列的岩脈 (Nicholson & Pollard, 1985; Bussell, 1989)。

這些雁行岩脈之間的侵入末端，其形成時的應力狀態並不符合區域應力場，這是由於在岩漿侵入過程中，鄰近雁行裂隙的區域應力在空間中不均匀分布，並且，隨著岩漿往前傳遞，區域應力狀態也不斷的在變化。

### 3.2.3 圍岩中的節理與斷層

#### 1. 節理的類型與分期

節理 (joint) 又稱為裂理 (fracture)，由於岩體受到的應力狀態超過本身的抗張或抗剪強度而產生破裂，然而破裂的兩側岩石錯動和變形卻不明顯，此特性使得節理的形貌可以用來推測形成當時的應力狀態。Hancock (1985) 藉由方塊圖 (block diagram) 上應力三軸與破裂之間的角度關係，以及莫耳破壞包絡線 (Mohr failure envelope) (圖 3.10)，將節理分為以下三類：

- (1) 伸張節理 (extension joint) : 當節理形成時，尖端破裂機制屬於 mode I，以張力破裂為主，形成時的軸差應力  $\sigma_1 - \sigma_3 < 4\sigma_t$ 。破裂方向與

最大主應力方向平行，破裂面兩面角(dihedral angle,  $2\theta$ )為 0 度，裂面形貌較為粗糙。

- (2) 混合節理 (hybrid joint)：此類節理的尖端破裂機制屬於 mode I + mode II，混合張力與剪力破裂 (extensional shear failure)，形成時的軸差應力  $4\sigma_t < (\sigma_1 - \sigma_3) < 8\sigma_t$ 。破裂面兩面角介於 1~60 度。
- (3) 剪力節理 (shear joint)：當節理形成時，尖端破裂機制屬於 mode II，以剪力破裂 (shear failure) 為主，形成時的軸差應力  $\sigma_1 - \sigma_3 > 8\sigma_t$ 。破裂面兩面角 60 度以上，裂面形貌比起伸張節理較為平直。

在野外露頭調查時，在解釋構造的成因和形成機制之前，需分析裂理的形成次序以推估應力演變次序。判斷裂理形成次序的準則如下 (Price & Cosgrove, 1990)：充填物的存在與否、不同組裂理之間的交互關係 (interaction)、裂理的形態 (morphology)、裂理的外觀比值 (aspect ratio)、裂理間隔及地層厚度。

## 2. 破壞帶的機制與類型

隨著斷層的傳遞、與圍岩的交互作用與錯動，產生了破壞帶 (damage zone)。破壞帶是在斷層面附近的圍岩中所產生的一種變形帶，破壞帶所衍生的各式構造記錄了關於斷層過去的發育與應力狀態等資訊。應用在野外調查中，觀察中視尺度下的破壞帶能幫助解釋裂理形成時的機制與應力狀態。

依照破壞帶的外觀和在走向滑移斷層中的位置，將破壞帶 (damage zone) 區分為 (圖 3.11)：尖端破壞帶 (tip damage zones)、圍岩破壞帶 (wall damage zones)、連結破壞帶 (linking damage zones)。在破裂機制的描述上 (圖 3.12)，尖端破壞帶常以 mode II 或混合 Mode II 和 III 出現，經常出現在走向滑移斷層或剪力節理的末端；圍岩破壞帶常以 mode III 或混合 mode II 和 III 出現，然而 mode III 只會產生圍岩破壞帶，圍岩破壞帶經常出現於整個斷層

或裂理面上；連結破壞帶並沒有明顯的機制，常出現在斷層或裂理之間的區域作為連結的構造出現。各類破壞帶的破裂形貌分別呈現於圖 3.13、圖 3.14、圖 3.15。

### 3. 斷層的分類

楊昭男 (1995) 依據斷盤 (fault blocks) 相對運動方向、斷盤中的標誌層之斷距 (separation) 對斷層進行分類。

在說明斷層分類之前，首先介紹斷層形態的幾何要素，包括斷層面、斷盤 (fault blocks)、滑距 (slip)、斷距 (separation)：

- (1) 斷層面:斷層滑動的介面，斷層面其空間位置由其走向及傾角決定。
- (2) 斷盤:斷層兩側的岩盤，斷層面上方的斷盤稱為上盤 (hanging wall)，下方的斷盤稱為下盤 (foot wall)。
- (3) 滑距:斷盤沿著斷層面實際滑動的距離。
- (4) 斷距:由於斷層的滑距在野外並不易求得，一般判斷準則是依據一標誌層被一裂面錯開的現象，而標誌層在裂面上的相互距離則稱為斷層在這一剖面上的斷距。

依據斷盤相對運動方向，斷層可分為 (圖 3.16)：

- (1) 正滑斷層 (normal-slip fault):一斷層面為傾斜的斷層，上盤相對於下盤向下滑動。
- (2) 逆滑斷層 (thrust-slip fault):一斷層面為傾斜的斷層，上盤相對於下盤向上滑動。
- (3) 平滑斷層 (strike-slip fault):一斷層面為傾斜的斷層，斷盤沿水平方向滑動。又可分為右滑斷層 (right-handed strike-slip fault)，一斷盤對

面的斷盤向右滑動者；與左滑斷層 (left-handed strike-slip fault) ，一斷盤對面的斷盤向左滑動者。

- (4) 斜滑斷層 (oblique-slip fault)：一斷層面為傾斜的斷層，斷盤傾斜滑動者。

在一露頭面上，依據斷盤中的標誌層之斷距，斷層可分為 (圖 3.17)：

- (1) 正移斷層 (normal separation fault):在一非水平的露頭面上，上盤的標誌層與斷層線之交點位於下盤中標誌層與斷層線交點的下方。
- (2) 逆移斷層 (thrust separation fault):在一非水平的露頭面上，上盤的標誌層與斷層線之交點位於下盤中標誌層與斷層線交點的上方。
- (3) 平移斷層 (strike separation fault):在一水平的露頭面上，標誌層與斷層線交點分開者，可分為左移斷層 (left separation fault) 與右移斷層 (right separation fault) 。

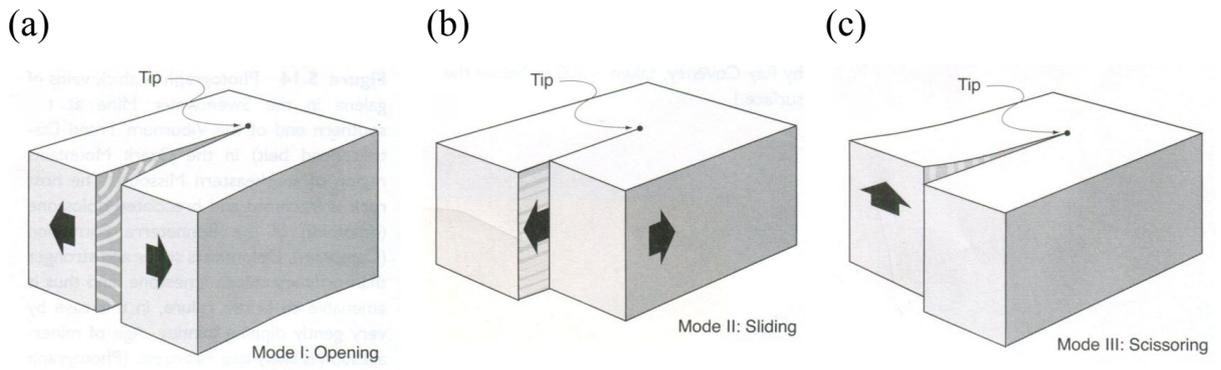


圖 3.5 三種裂隙尖端位移模式的示意圖。(a) 張裂 (mode I) (b) 滑動 (mode II) (c) 剪動 (mode III) (Atkinson, 1987 ; Engelder, 1987)。

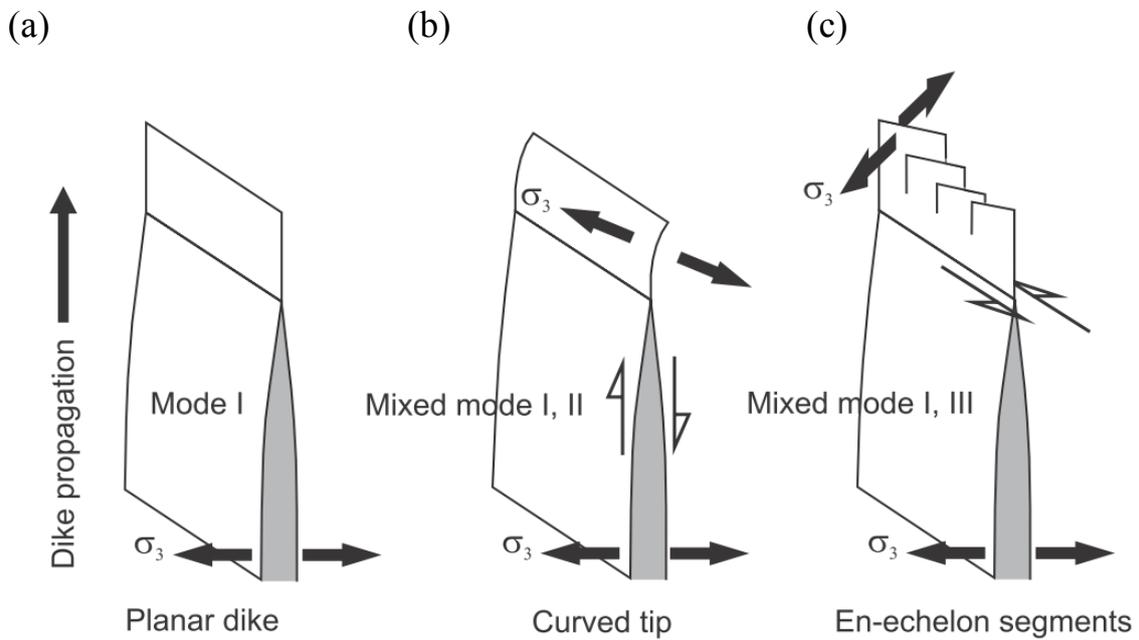


圖 3.6 三種岩脈在空間中之形貌。(a) 平面岩脈 (b) 彎曲末端 (c) 雁行排列。由於最小主應力軸的方向隨著深度的變化產生旋轉，使得岩脈平面亦產生旋轉，因而產生(b)、(c)形貌的岩脈 (Pollard, 1987)。

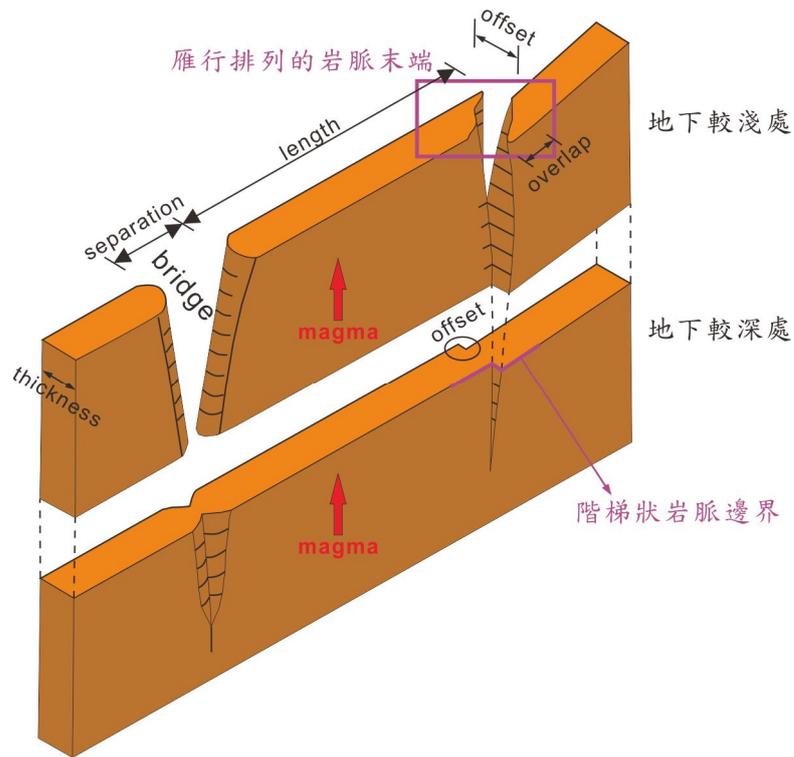


圖 3.7 雁行排列岩脈上常見的構造現象。隨著深度差異，較淺處的雁行排列岩脈及尖錐狀末端，可能是較深處的階梯狀排列岩脈所分裂而成的 (Delaney & Pollard, 1981)。

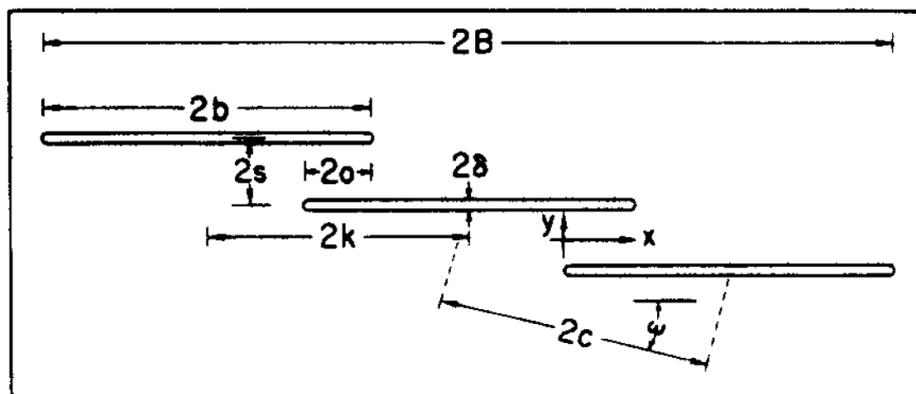


圖 3.8 雁行排列岩脈在形貌及分布上的量化。  $2B$  (岩脈全長)、 $2b$  (岩脈長度)、 $2s$  (岩脈間隔)、 $2o$  (岩脈間的重疊長度)、 $2\delta$  (岩脈厚度)、 $2k$  (各岩脈中心點之間，在岩脈走向方向上的距離)、 $2c$  (各岩脈中心點之間距離) (Nicholson & Pollard, 1985)。

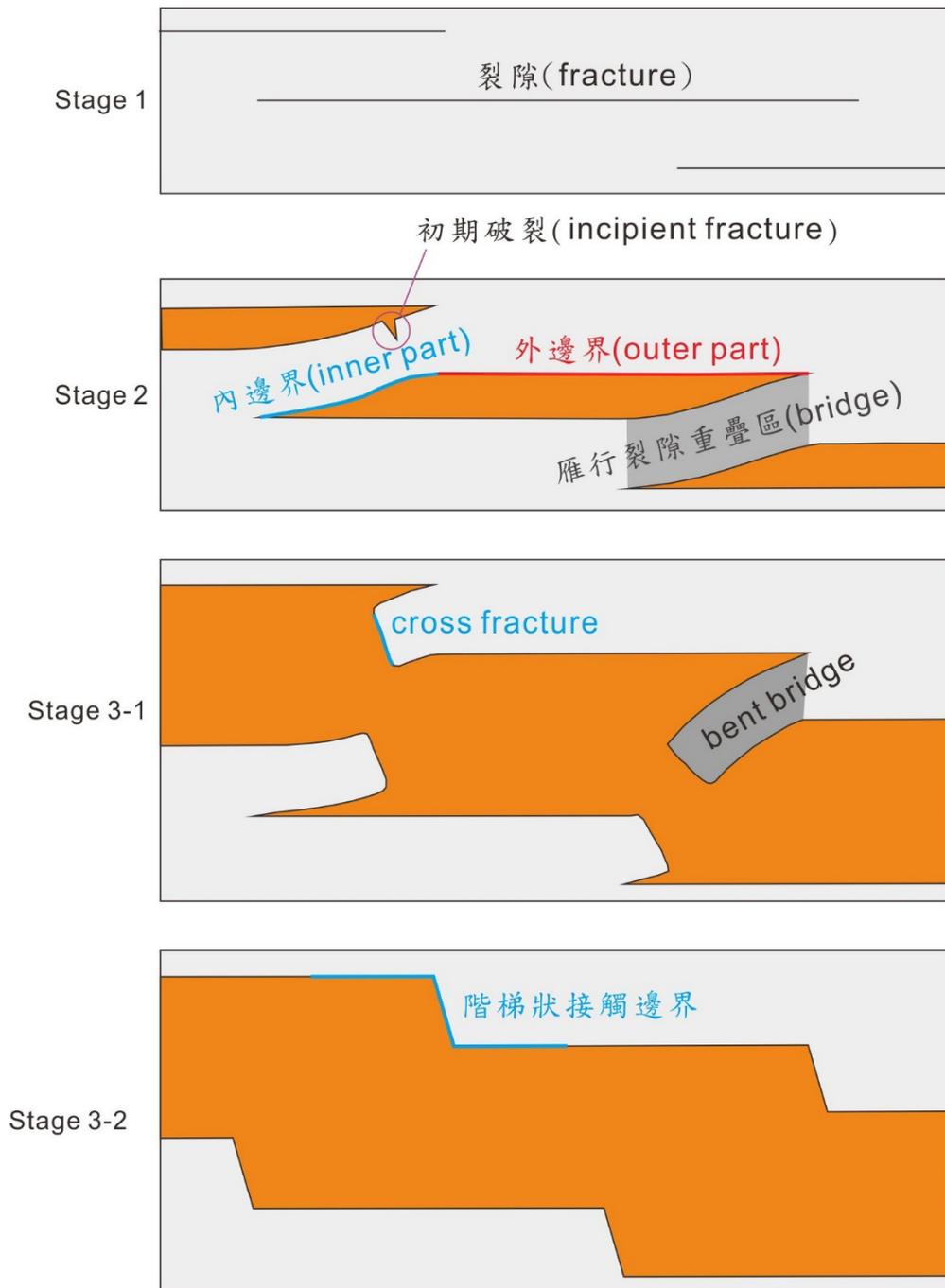


圖 3.9 雁行排列的岩脈與階梯狀排列的岩脈，在岩漿沿裂隙侵入時的演化過程。Stage I:雁行裂隙；Stage 2:岩漿入侵裂隙，形成雁行岩脈，持續發展下去有兩種可能的形貌； Stage 3-1:岩脈連接，岩脈尖端保留 (Nicholson & Pollard, 1985)；Stage 3-2: 岩脈連接後形成階梯狀岩脈邊界 (Bussell, 1989)。

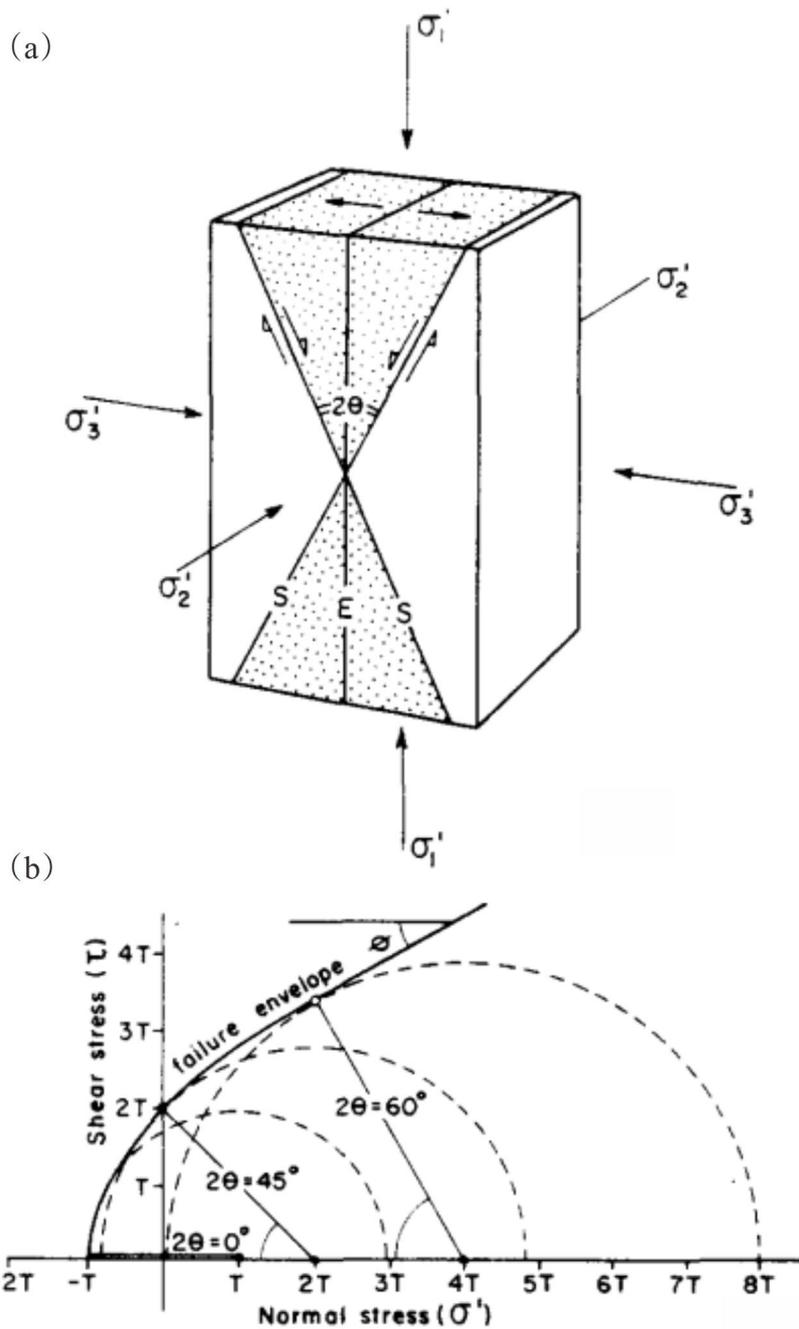


圖 3.10 以方塊圖 (block diagram) 及莫氏圓 (Mohr circle) 表示破裂類型與三軸應力大小之間的關係。(a) 方塊圖及其上的破裂示意圖， $2\theta$  為兩面角 (dihedral angle) (b) 應力狀態和兩面角之間，在莫耳圓中破壞包絡線的關係 (Hancock, 1985)。

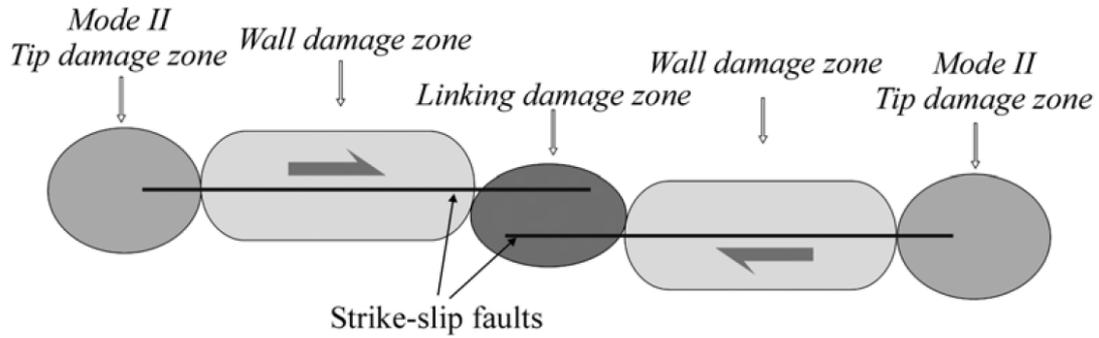


圖 3.11 各類破壞帶在走向滑移斷層中相對的分布位置（俯視視角）。尖端破壞帶 (tip damage zones) 常位於斷層末端，圍岩破壞帶 (wall damage zones) 則位於斷層線上，連結破壞帶 (linking damage zones) 常出現於斷層與斷層之間重疊的區域 (Kim, 2004)。

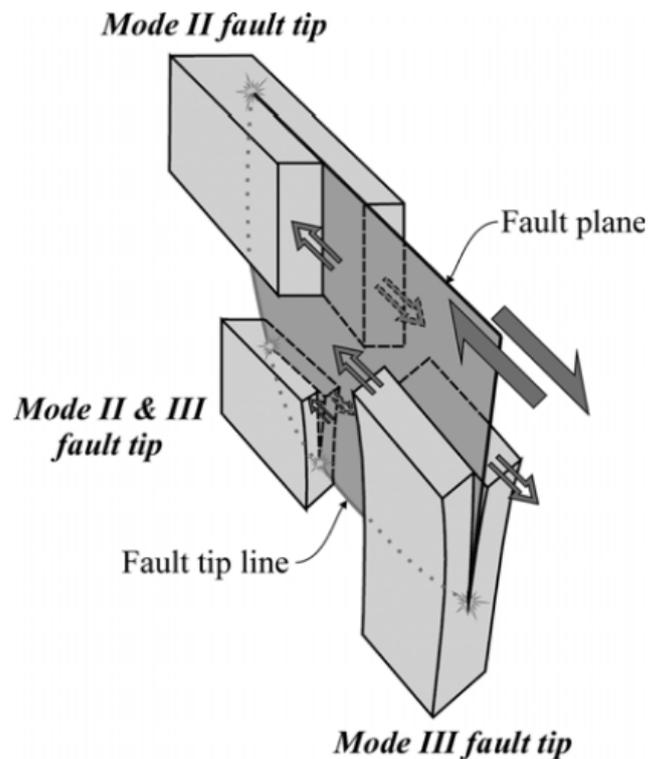


圖 3.12 斷層尖端 (fault tip) 的破裂模式差異，在走向滑移斷層中不同的位置，其斷層尖端破裂模式會有所不同 (Kim, 2004)。

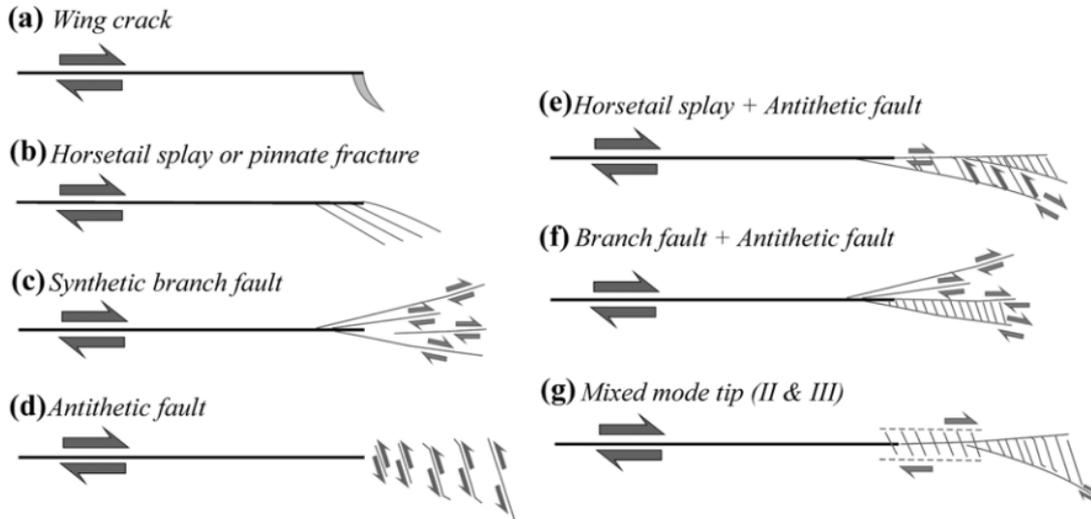


圖 3.13 尖端破壞帶的破裂形貌。(a) 翼狀裂隙(wing crack) (b) 馬尾狀或羽毛狀裂隙(Horsetail fractures or pinnate fractures) (c) 同向分支斷層 (Synthetic branch faults) (d) 反向斷層(Antithetic faults) (e) 馬尾狀裂隙+反向斷層(f) 分支斷層+反向斷層 (g) 混合機制末端(mixed mode tip)。a、b、c、d 屬於 Mode II 破裂機制，e、f、g 屬於 Mode II+ III 破裂機制 (Kim, 2004)。

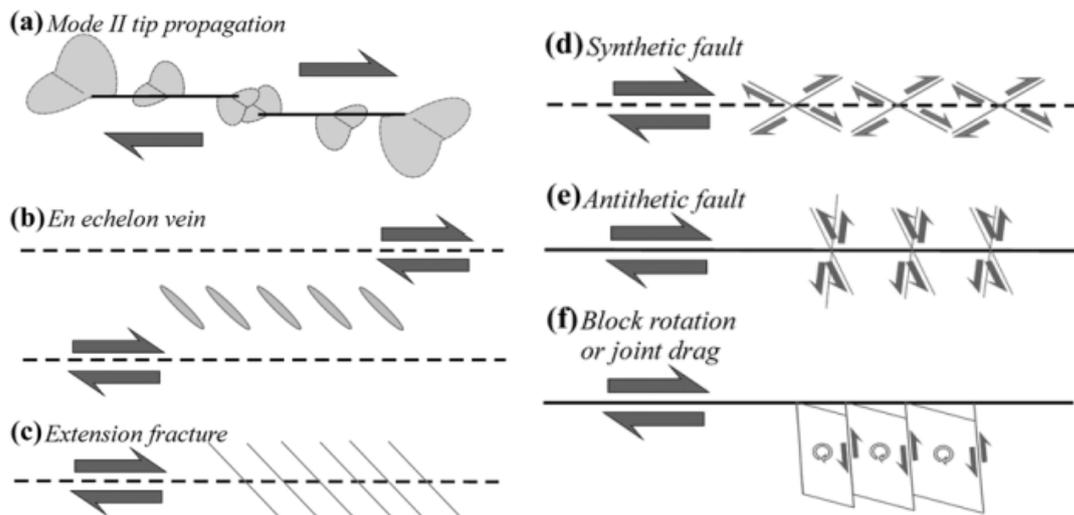


圖 3.14 圍岩破壞帶的破裂形貌。(a) mode II 末端傳遞(mode II tip propagation) (b) 雁行脈(en-echelon vein) (c) 張力破裂(extension fracture) (d) 同向斷層(synthetic fault) (e) 反向斷層(antithetic fault) (f) 塊體旋轉或拖曳節理(block rotation or joint drag) (Kim, 2004)。

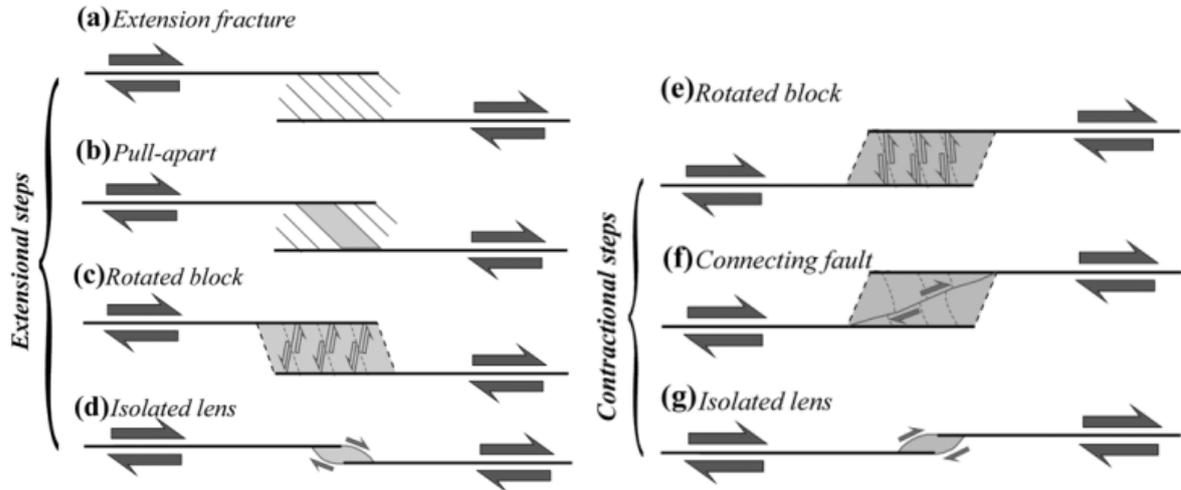


圖 3.15 連結破壞帶的破裂形貌。(a) 拉伸破裂(extension fractures) (b) 拉裂 (Pull-aparts) (c) 塊體旋轉(rotated blocks) (d) 獨立透鏡(isolated lenses) (e) 塊體旋轉(rotated blocks) (f) 斷層連結(connecting faults) (g) 獨立透鏡 (isolated lenses) 。 a、b、c、d 屬於拉伸階狀排列(extensional steps) ， e、f、g 屬於壓縮階狀排列(contractional steps) (Kim, 2004) 。

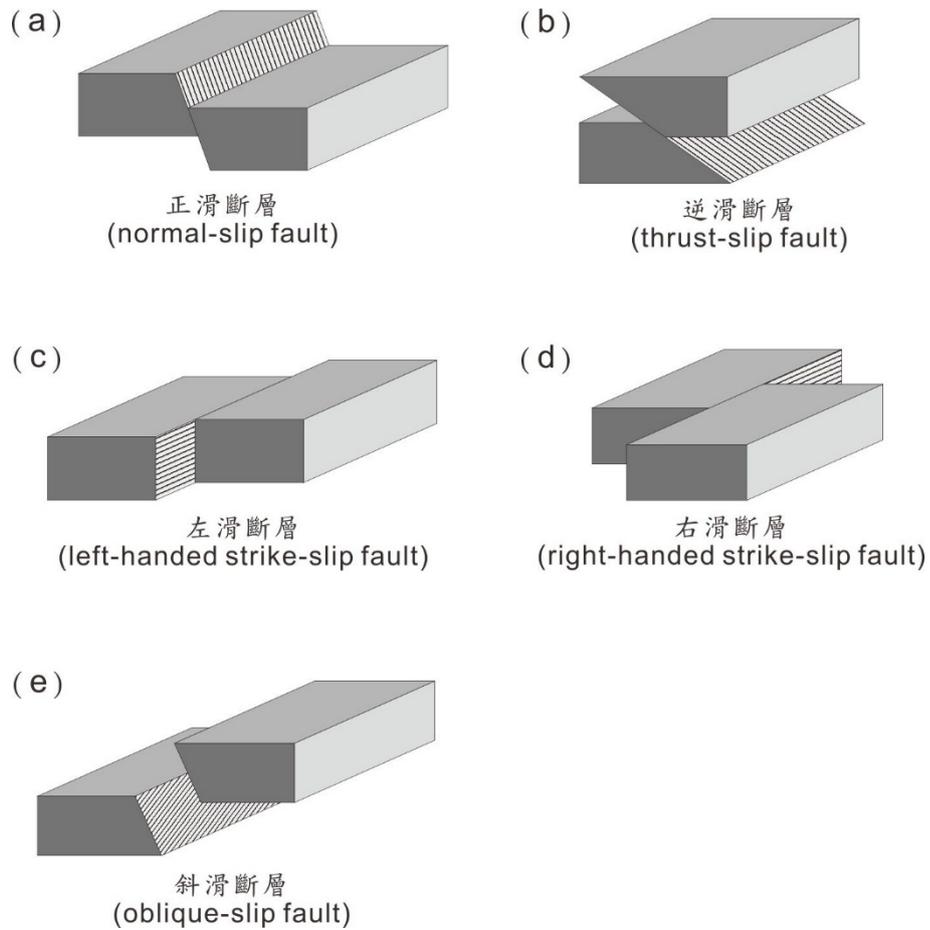


圖 3.16 依據斷盤相對運動方向對斷層分類。(a) 正滑斷層 (normal-slip fault) (b) 逆滑斷層 (thrust-slip fault) (c) 左滑斷層 (left-handed strike-slip fault) (d) 右滑斷層 (right-handed strike-slip fault) (e) 斜滑斷層 (oblique-slip fault) (楊昭男，1995)。

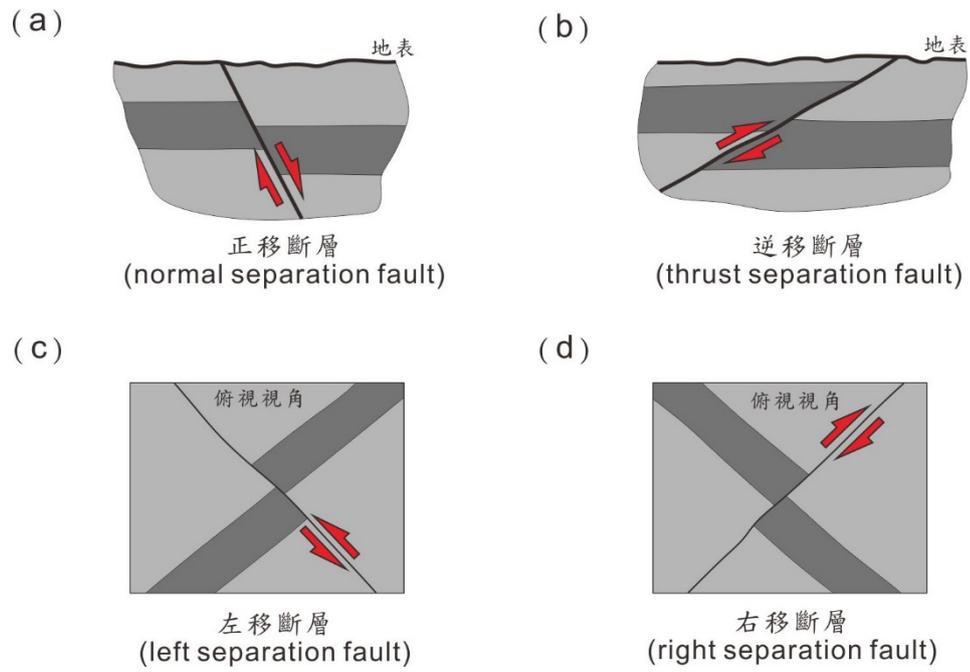


圖 3.17 在一露頭面上，依據斷盤中的標誌層之斷距對斷層分類。(a) 正移斷層 (normal separation fault) (b) 逆移斷層 (thrust separation fault) (c) 左移斷層 (left separation fault) (d) 右移斷層 (right separation fault) (楊昭男，1995)。

### 3.3 萊萊海蝕平台的過去研究

過去研究對於萊萊海蝕平台及煌斑岩脈做過相當研究，包含岩脈物性化性、古應力分析、節理分析、構造演育分期等。

#### 3.3.1 煌斑岩脈的物性與化性

萊萊地區的煌斑岩，最初由顏滄波 (1985) 所命名。出露於海蝕平台的煌斑岩脈呈雁行排列佇立於地表，岩石呈現深灰色，由於受風化作用影響在地表常呈現黃棕色，夾有換質作用所形成的石英脈，岩石中有斑狀的暗色結晶出現，可以用肉眼辨識出來，稱為煌斑結構。岩脈的形成為地表下岩漿急速上升，侵入後快速冷卻所形成，依據陳正宏等人 (1989) Kr-Ar 定年結果，岩脈侵入的時間介於 $9.1 \pm 1.1$ 百萬年前，之後曾受過輕度的區域變質作用而形成變質煌斑岩。岩脈形成後曾受過換質作用，其主要的原生礦物為斜長石、方沸石及鈦鐵礦，並帶有少量的橄欖石、高鋁鈦次透輝石和鈦角閃石，次生礦物包含石英、鈉長石、鉀長石、蛇紋石和黃鐵礦。化學成分上，主要元素的矽含量低，但鈦、磷、鋇、鋳含量較高。岩性歸類上，屬於鹼性玄武岩系列中的方沸石煌綠岩系。

除了萊萊地區，在東北角的外澳也有煌斑岩脈出露。從活動時間和成分上的關聯性來看，萊萊煌斑岩與角板山火山屬於同期的火山活動，角板山火山活動是晚中新世時期在台灣北部相當活躍的火山活動。

#### 3.3.2 應力分析

李錫堤 (1986) 調查煌斑岩脈及海蝕平台上的構造分布後繪製岩脈地質圖 (圖 3.18)，在岩脈上觀察到逆斷層、共軛橫移斷層、正斷層；在海蝕平台上觀測到褶皺、截切岩脈的橫移斷層。

藉由分析岩脈上的裂理和擦痕，李錫堤認為岩脈經歷過三期古應力作用(圖 3.19)：第一期為東西向擠壓，岩脈上產生逆斷層，西傾的逆斷層佔大部分；第二期為東西向的擠壓帶有南北向的擴張，產生小角度的共軛走向橫移斷層，並與岩脈走向夾小角度；第三期為南北向的擴張，產生了東西向的正斷層。在萊萊海蝕平台上，最新一期的構造現象應為南北向的右移斷層，這一組斷層有切過岩脈的現象，且發生的時間較正斷層為晚，然而此組斷層無明顯擦痕可供測量，因而參照在較南邊的石城、大溪村兩地點的資料，顯示為東北-西南向的擠壓作用(圖 3.20)。

在萊萊附近的海蝕平台甚至石城、大溪村，從砂岩層中的逆斷層擦痕，可以區分出一期的東西向擠壓作用(方位角約為 110 度)，與萊萊岩脈中逆斷層的作用相當(圖 3.21)，顯示其普遍性，擦痕指示的滑動趨向不會因地層的彎曲而有所變化，本期應力作用應發生在地層傾斜之後。

綜觀萊萊及附近區域，區大致可以區分為二期的古應力作用。第一期為東西向的擠壓作用，岩脈產生西傾的逆斷層，海蝕平台上的砂岩層亦產生逆斷層作用；第二期為東北-西南向的擠壓作用，產生了南北向截切岩脈的右移斷層，兩期的應力作用皆發生在地層傾斜之後。岩脈上的共軛橫移斷層、逆斷層、和正斷層，可能是褶皺作用最後期與地盤上升時期相繼產生。

### 3.3.3 構造演化歷史

黃蜀圓(2005)綜合萊萊煌斑岩脈與圍岩中的中視構造現象：斷層、節理、剪裂面、褶皺等構造現象，分析這些中視構造之間的相互關係，將岩脈及附近圍岩的構造演化分為七階段：

第一階段：漸新世中晚期，雪山山脈東北部地區屬於大陸棚至大陸坡環境，泥質沉積物堆積形成以頁岩為主的大桶山層。

第二階段：上新世到更新世時期，受到蓬萊造山運動影響，使得水平的大桶

山層傾斜並產生褶皺。

第三階段:岩層持續受到造山運動擠壓，產生一系列的雁行破裂。

第四階段:岩漿沿著已存在的雁行破裂快速侵入並冷卻。

第五階段:受到斷層作用影響，使岩脈本身產生逆斷層、共軛橫移斷層，以及岩脈疊置排列。

第六階段:圍岩受到推擠並發生走向橫移斷裂，並錯開岩脈，使岩脈發生南北向的右移錯動。

第七階段:岩層抬升，在圍岩與岩脈上皆產生區域性的剪切、伸張、解壓節理。

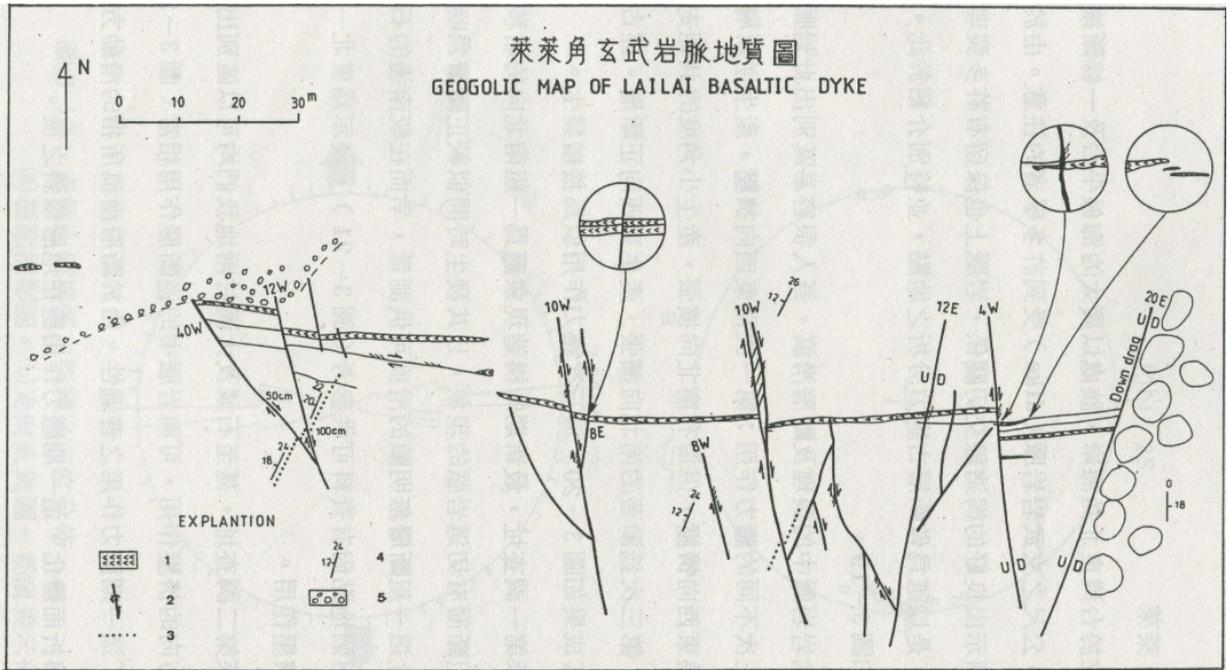


圖 3.18 萊萊海蝕平台煌斑岩岩脈及斷層構造地質圖。編號 1 圖示:玄武岩岩脈；2:斷層，箭頭表示滑動方向，D 表示下降側，細線表示伴隨斷層之裂理；3:層面；4:層面的走向及傾角；5 沖積物及礫石；空白部分表示大桶山層之岩層露頭 (李錫堤，1986)。

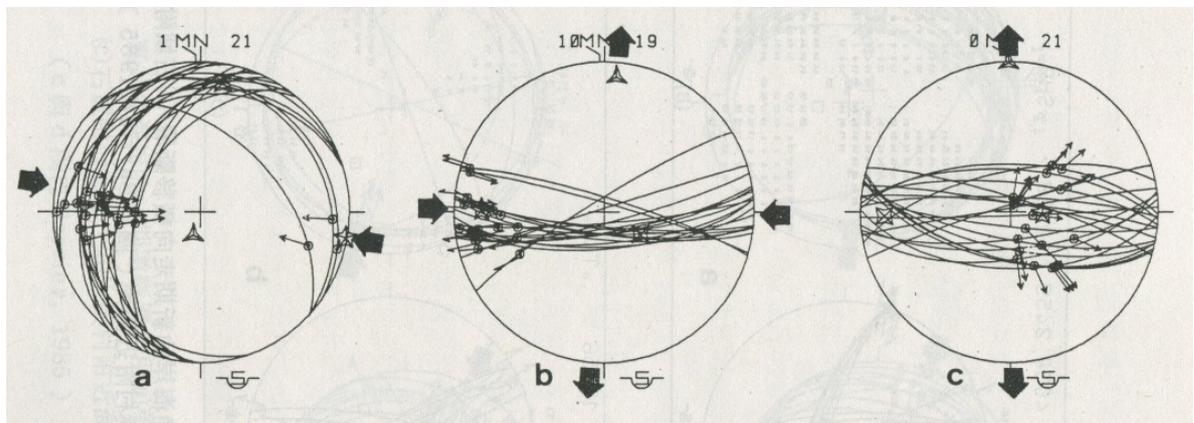
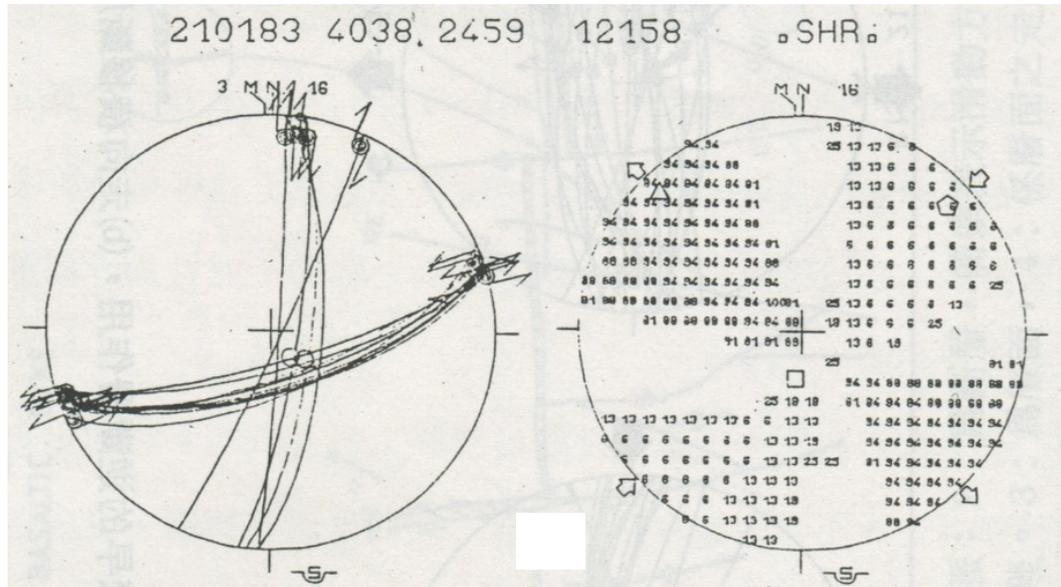


圖 3.19 煌斑岩脈上斷層的古應力分析成果。左圖:第一期斷層作用，逆斷層；中間圖:第二期斷層作用，共軛橫移斷層；右圖:第三期斷層作用，正斷層 (李錫堤，1986)。

(a)



(b)

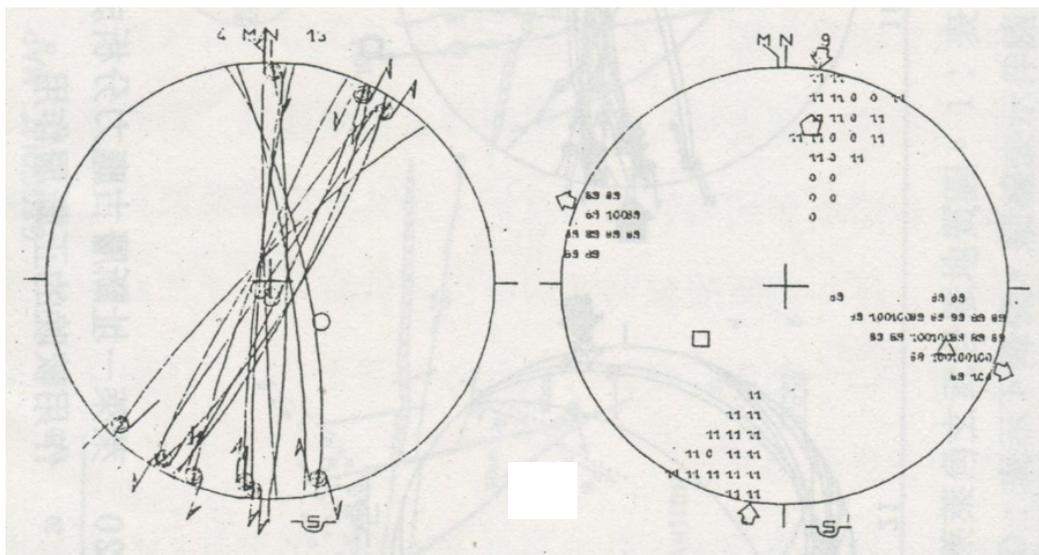


圖 3.20 萊萊海蝕平台上最後一期走向橫移斷層的斷層擦痕分析，由於萊萊海蝕平台無完整擦痕資料，因此以附近海岸的資料佐證：(a) 石城海岸 (b) 大溪村海岸 (李錫堤，1986)。

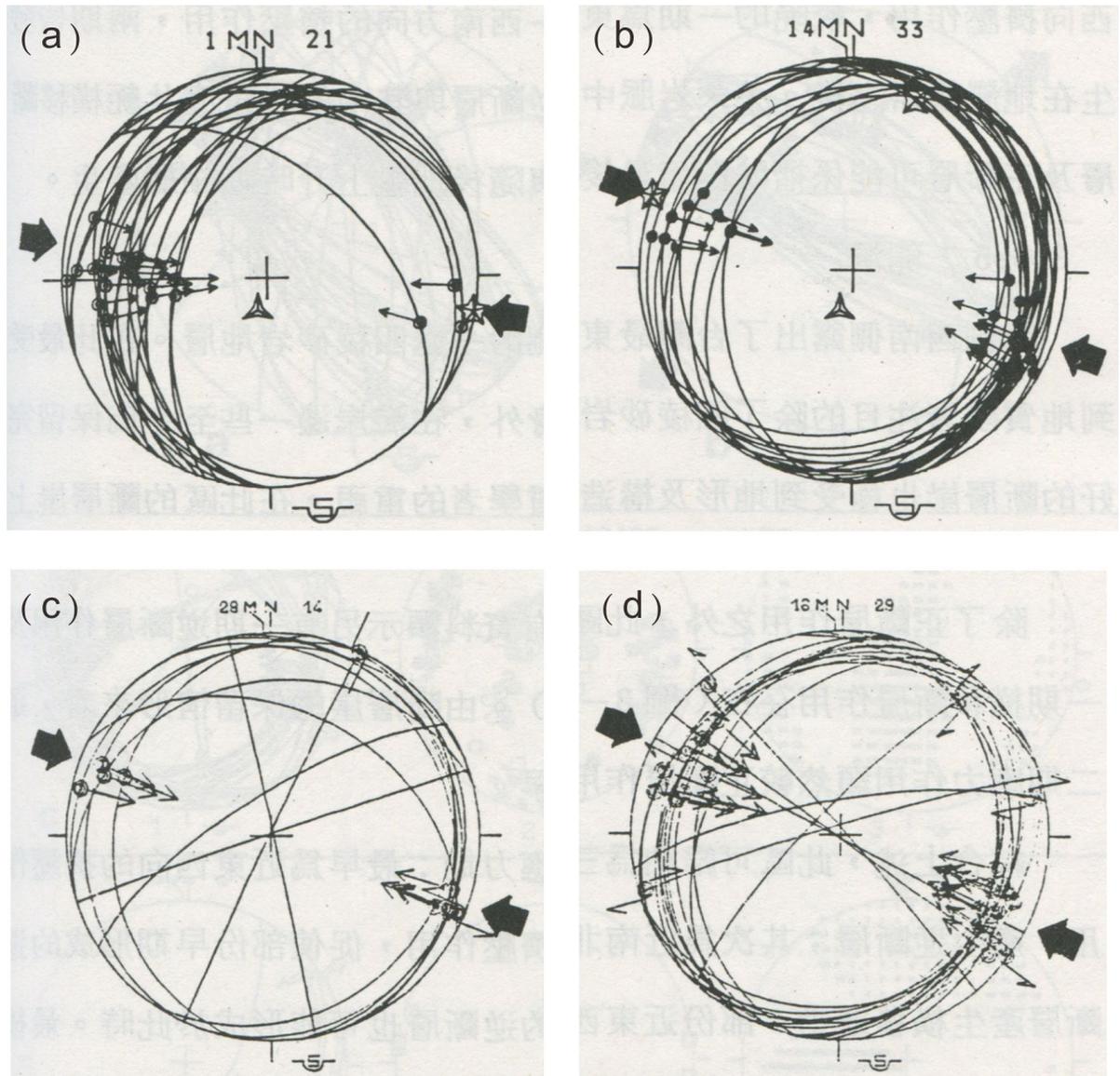


圖 3.21 萊萊海蝕平台及附近區域的逆斷層擦痕分析 (a) 萊萊煌斑岩脈 (b) 鶯歌石海岸 (位於萊萊西方約 200 公尺) (a 與 b 摘自李錫堤, 1986) (c) 石城海岸 (d) 大溪村海岸 (c 與 d 摘自 Barrier, 1985)。

## 第四章 研究方法

### 4.1 UAV 空拍和影像正射化

過去的空拍影像僅限於衛星空拍與高空航照攝影，雖然可以提供區域的地形起伏等地貌訊息，卻無法給予較細節的資訊。近年來由於無人飛行載具 (UAV) 發展迅速，在成本和性能等方面有很大的進步，以及相關的導航與影像傳輸技術的演進，使得 UAV 攝影測量技術 (UAV photogrammetry) 成為可能。UAV 應用於中低空攝影，具有快速、輕便、低成本、不易受天候影響的特性，可作為小範圍區域的應用，以彌補遙測及航空攝影在解析度上的不足，隨著國土測繪資料庫日益齊全，局部測繪是未來的發展趨勢，如何處理及應用 UAV 影像成為一個重要的課題。

### 4.1.1 正射化基本理論

傳統的野外地質底圖繪製由於時間和測量工具的限制，在細節上較難提升，而 UAV 影像可以提供精確的地表構造的分布資訊。然而 UAV 空拍影像由於拍攝角度與地形起伏所造成的空拍影像變形，需要對影像進行正射糾正 (Orthorectification) 才能使影像上的分布與實際一致，以利後續分析。影像正射糾正是針對傾斜像機拍攝及三維空間的起伏，進行二維影像的改正，在符合共線條件 (Line-based collinearity condition) 下，利用共線方程式、地控點、相機內方位參數，重建拍攝時相機、相空間、物空間之間的空間關係。共線條件是基於光線直線前進的原理，地面上任一地形點、相機及相片上之相應像點，此三點應位於同一條直線上之條件 (圖 4.1)。然而影像、相機底片與地面之間有不一樣的坐標系統，依序為相片座標系、像空間坐標系、物空間坐標系，必須定義他們之間的轉換關係：

1. 相片座標系(Photo coordinate system)：位於相機成像的平面上的二維坐標系統，以相片左上角為原點，沿相片邊緣向右為 x 軸正向，向下為 y 軸正向的坐標系統，以像素(pixel)為單位。
2. 像空間坐標系 (Image space coordinate system):
  - a. 影像座標系 (Image coordinate system) :以相機為原點的坐標系統，平行影像右向方向為 x 軸正向，向上為 y 軸正向，像主點與相機方向為 Z 軸正向。
  - b. 內方位參數 (interior orientation parameters, IOP) :與相機相關的參數，包括焦距長(f)、像主點坐標、透鏡畸變差參數。
3. 物空間坐標系 (Object space coordinate system) :地球中心(地心坐標系)、當地的某些點上 (站心坐標系)，x、y、z 三軸互相垂直，並且遵循右手定則之坐標系統。用來表示地控點坐標、相機姿態、DEM。

而外方位參數 (exterior orientation parameters, EOP) 就是用於表示相機

姿態的參數，包涵透鏡中心位置  $(X_L, Y_L, Z_L)$  與相機旋轉角  $(\omega, \phi, \kappa)$ ， $\omega$  為沿 x 軸方向之旋轉角， $\phi$  為沿 y 軸方向之旋轉角， $\kappa$  為沿 z 軸方向之旋轉角。在符合共線條件下，可用共線方程式 (collinear equation) 表示像點與地面的關係，共線方程式如下：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = kM \begin{bmatrix} X_O - X_C \\ Y_O - Y_C \\ Z_O - Z_C \end{bmatrix}$$

$(x_i, y_i)$  為地控像點， $(X_O, Y_O, Z_O)$  為地控物點， $(X_L, Y_L, Z_L, \omega, \phi, \kappa)$  為相機外方位參數， $k$  為比例常數。其中  $M$  為旋轉矩陣由外方位參數的旋轉分量  $\omega, \phi, \kappa$  組成：

$$M = M_\kappa \cdot M_\phi \cdot M_\omega$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix}$$

整個共線方程式可整理為：

$$x - x_i = -f \frac{m_{11}(X_O - X_C) + m_{12}(Y_O - Y_C) + m_{13}(Z_O - Z_C)}{m_{31}(X_O - X_C) + m_{32}(Y_O - Y_C) + m_{33}(Z_O - Z_C)}$$

$$y - y_i = -f \frac{m_{21}(X_O - X_C) + m_{22}(Y_O - Y_C) + m_{23}(Z_O - Z_C)}{m_{31}(X_O - X_C) + m_{32}(Y_O - Y_C) + m_{33}(Z_O - Z_C)}$$

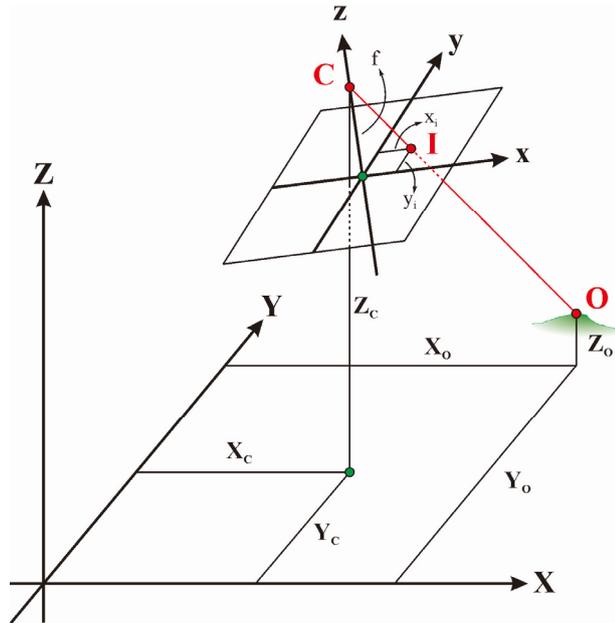


圖 4.1 相機、相空間、物空間三者之間在空間上的共線條件示意圖。C: 相機位置 I: 相空間上的地控像點 O:物空間上的地控物點。成像中心於像平面之垂足稱為像主點 (Principal point, PP)。

#### 4.1.2 影像正射化流程

正射化流程如圖 4.2，依照處理方法的順序，可以分為三大部分：

1. 後方空間交會法 (Space resection) :利用已知的地控像點、地控物點及相機內方位參數，求解相機之外方位參數。須使用共線式

$$x - x_i = -f \frac{m_{11}(X_o - X_C) + m_{12}(Y_o - Y_C) + m_{13}(Z_o - Z_C)}{m_{31}(X_o - X_C) + m_{32}(Y_o - Y_C) + m_{33}(Z_o - Z_C)}$$
$$y - y_i = -f \frac{m_{21}(X_o - X_C) + m_{22}(Y_o - Y_C) + m_{23}(Z_o - Z_C)}{m_{31}(X_o - X_C) + m_{32}(Y_o - Y_C) + m_{33}(Z_o - Z_C)}$$

由於需要求解的外方位參數有 6 個未知數，需要 6 條觀測方程式，因此最少需要 3 個地控點。

2. 使用內插法求解 DEM :藉由外業測量取得地面控制點坐標以內插法的方式產生數值地質模型 (DEM) ，本文使用內插法較為簡單迅速，但可能會忽略地表細節。
3. 倒投影法 (Back projection，圖 4.3) :

又稱作逆轉換模式 (Inverse transformation) 或間接法 (Indirect approach) 。在物空間建立一個空白工作影像，再將物空間坐標以共線式倒投影回像空間中，並擷取像空間中的光譜值，此方法可以消除透視投影的變形量，在運算及影像取樣上較為簡易，所產生的正射影像不會有不連續現象。

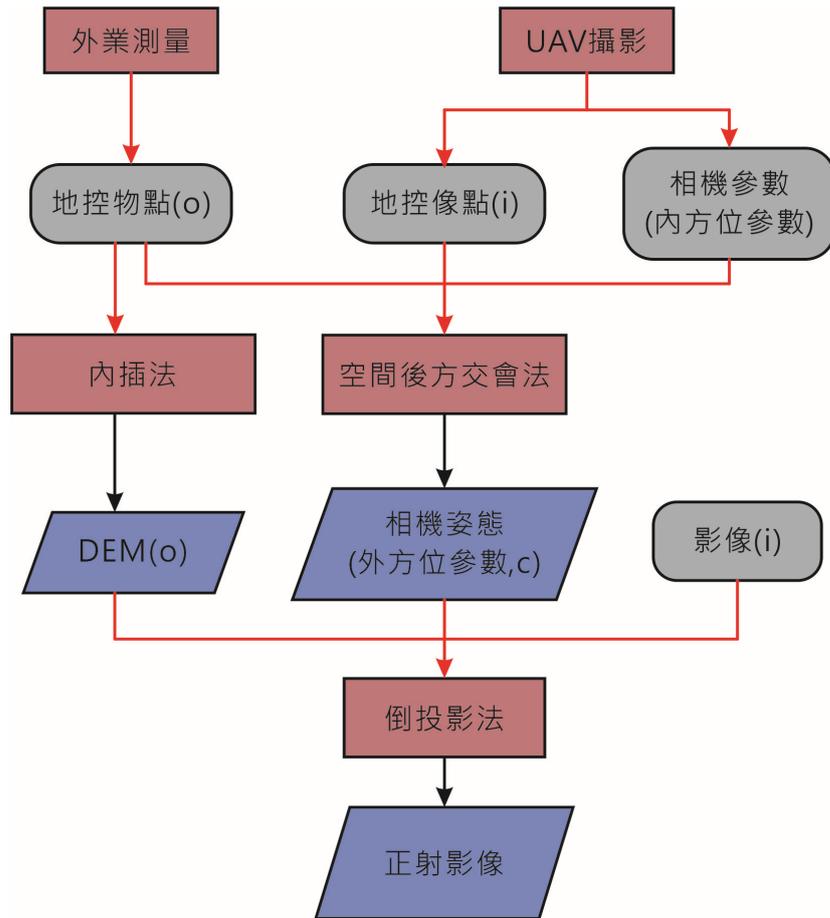


圖 4.2 影像正射化流程。

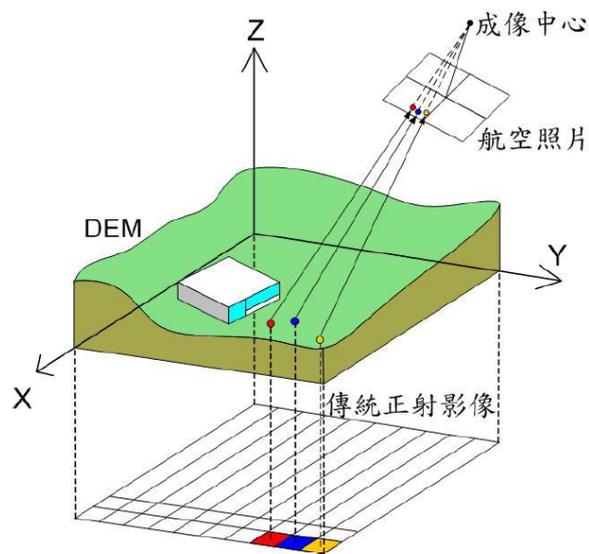


圖 4.3 倒投影法示意圖。

## 4.2 野外地表調查

製作不同尺度的構造底圖，精確地描繪岩脈和斷層的排列和破裂形貌，並釐清構造現象的先後次序；分析斷層、節理、擦痕的位態資料，推測過去應力作用的情況。本研究將不連續接觸的岩脈分為 19 段，由東到西依序為岩脈 A 到 S。斷層方面，將切過岩脈的 11 道南北向斷層，由東到西依序為斷層 I 到 XI。

野外調查方法主要分為兩大項，第一項為不同尺度的野外中視構造底圖，第二項為野外測量資料的蒐集與分析。

### 4.2.1 中視構造地質圖

繪製不同尺度的中視構造地質圖為本研究最主要的研究手段，首先使用衛星影像判識研究區域附近的海岸地質構造，得知大略的褶皺傾向和形貌、主要破裂的錯動性質和趨向，之後藉由全研究區域的空拍圖大略得知岩脈、層面與主要破裂構造的確切分布，為了不同的探討目的，我們使用了以下方法去呈現中視構造紀錄：

1. 岩脈整體的構造地質圖：利用 UAV 取得岩脈周遭的空拍影像，並在現場使用全站儀測量岩脈的實際分布，依此針對研究區域的岩脈整體及周遭 10 公尺內的範圍，製作了 1:600 的構造底圖，記錄岩脈末端與圍岩的接觸關係以及岩脈附近圍岩的破裂狀況。
2. 各段岩脈末端以及岩脈斷層交會處的地表構造描繪：紀錄岩脈末端與圍岩的接觸關係，接觸關係分為兩種：慢慢尖滅，或是被斷層截切。如果岩脈末端被斷層截切，則需要記錄錯動方向和錯動量，比例尺為 1:50。
3. 各段岩脈的立面圖：在中視尺度下，由於岩脈本身是一個類似牆面的構造，以傳統地表平面上的紀錄方式無法精確表現岩脈上破裂的方向和形貌，因此以立面圖的呈現方式，將岩脈上的各個面投影到紙面上形成展開圖，

並在中間切數道與岩脈走向垂直的剖面，而後記錄在各岩脈投影面及剖面下，岩脈的輪廓和破裂的分布情形。每段岩脈的作圖比例尺介於 1:100 到 1:200 之間。

#### 4.2.2 野外構造測量與分析

分為針對岩脈的記錄以及針對圍岩的記錄兩部分，工作項目列於下表，前兩項為針對岩脈的紀錄，後兩項為針對圍岩的紀錄：

1. 記錄各段岩脈的基本訊息：包括岩脈的長、高、厚度、位態、破碎程度、以及其他野外觀察描述等基本訊息。
2. 岩脈上斷層、破裂、及擦痕的記錄：記錄岩脈上斷層和擦痕的位態、錯動性質及錯動量等訊息，並描述破裂和節理的幾何形貌。依照野外觀察描述和位態統計分析判斷構造現象的先後發生次序、應力狀態。
3. 量測海蝕平台上各處的地層層面：取得層面位態資料能計算出褶皺軸方向和判斷褶皺類型。
4. 分區記錄圍岩節理和裂隙特徵：包含圍岩節理組的位態、間距測量。描述破裂的分布特性、形貌。

## 4.3 地電阻施測與資料處理

### 4.3.1 地電阻影像剖面法原理

地電阻影像 (Electrical Resistivity Imaging, ERI) 是一種地下構造研究的地球物理探勘方法，兼具垂直與側向的解析能力。利用直流電通入地表下以量測岩層或岩體的電阻率，依電阻率在空間分布上的差異來判定不同岩性或物質的介面，所測得的剖面影像即為地電阻影像 (Electrical Resistivity Imaging, ERI)。影響地層電阻率大小的因素有礦物成分、顆粒大小、含水量、以及水中所含溶質，岩脈的電阻率約為 $10\sim 1.3 \times 10^7$  Ohm-m，比圍岩中的砂岩 (25 Ohm-m)、頁岩層 ( $10\sim 10^3$  Ohm-m) 還要高，藉由這些不同岩性之間明顯的電阻率對比，我們可以判斷岩脈在地電阻影像剖面中的分布。

由於地電阻影像剖面法屬於二維的構造研究，其探測原理為藉由一四極排列 (圖 4.4)，令直流電經由一對電極 A、B，將電通入地下而產生人為電場。由於地下地層的分布的不均及材料的不同，所產生的導電性差異，可以由另一對電極 M、N 來記錄電場在 M、N 之間造成的電位差，求出地下的視電阻率 (Apparent Resistivity)，然而視電阻率並不代表各岩層的真实電阻率，需要再經由進一步的資料逆推處理，最後得到地下各地層的真实電阻率分布。

地電阻影像剖面法依施測時的排列方式，分為：溫奈排列法 (Wenner Array)、施蘭卜吉排列法 (Schlumberger Array)、雙極排列法 (Pole-Pole Array) 等，以對應不同的地形及施測環境。本研究使用方法為溫奈排列法 (圖 4.5)，是以一對電極 A、B 和另一對電極 M、N 排成一直線，以 O 點為中心點並呈現對稱狀，AB 的距離為 MN 的三倍，且 AM、MN、NB 的長度皆為 a，可探測的最大深度約為 MN 的長度。此方法有受地形限制較大、耗時、深層資料的雜訊較高等缺點，然而本研究區域屬於海蝕平台，地形相當

平緩，因此沒有地形的問題，其優點為施測值較穩定，對垂直變化的解析度高，對於岩脈等垂直地質構造的施測有其優勢。

#### 4.3.2 施測規劃和資料處理

本研究一共規劃 4 道南北向的測線，由東至西依序為 L1~L4，每道測線全長 100 公尺，電極間距為 1 公尺 (圖 4.6)。其中 L1~L3 是要確認岩脈在地下的延伸狀況，是否保持垂直向下的延續，L4 則是要確認岩脈 I、岩脈 K、和斷層 IX 的交互關係。

二維視電阻率的逆推使用 AGI EathImager 2D 軟體進行處理，順推使用有限元素法 (Finite Element Method) 做數值計算，逆推則使用平滑限制最小平分法 (Smoothness-Constrained Least-Squares)。

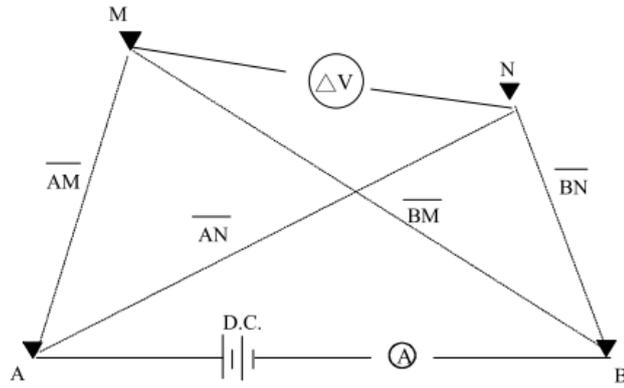


圖 4.4 地電阻探測常用的四極排列法示意圖，A、M、N、B 分別為電極。

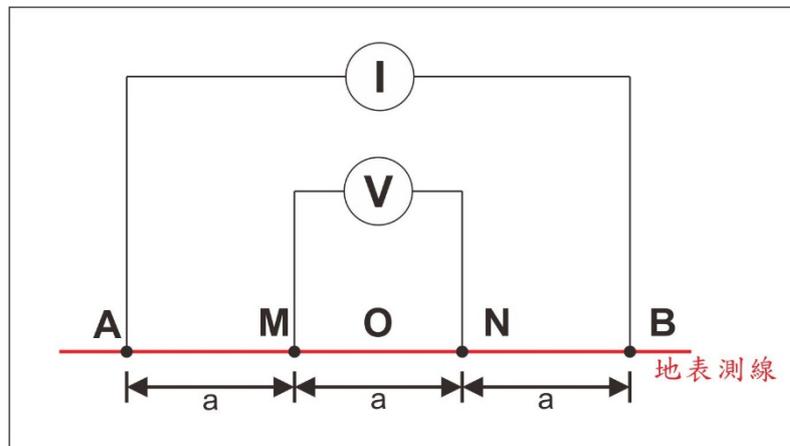


圖 4.5 Wenner Array 示意圖，O 為測線中點，A、M、N、B 分別為電極。



圖 4.6 地電阻施測情形，以 L2 測線的施測情形為例，每根電極的間距為一米。

## 第五章 野外調查及地電阻測勘

本章節藉由 UAV 空拍影像、野外中視構造調查、以及地電阻測勘來呈現研究結果。第一部分，使用衛星影像和正射 UAV 空拍影像，繪製不同尺度的構造底圖，以記錄岩脈及斷層在地表面的精確分布；第二部分，經過野外中視構造調查及測量，取得更精細的岩脈和圍岩的破裂分布描繪，結合擦痕分析、節理調查，判斷構造形成的先後次序、應力狀態。第三部分，藉由地電阻影像剖面，取得岩脈在地下的分布形貌，確認岩脈在地表下是否維持垂直岩脈的形貌，以及判斷斷層在地表下的傾向和傾角。

## 5.1 地表構造分布和辨識

從 1:10000 的萊萊周遭衛星影像，可以看見海蝕平台上連續出露的褶皺，和密集分布的斷層與裂理；從 1:1000 的萊萊全研究區域構造底圖，可以看見東西向排列的岩脈、開口朝北的褶皺、和切過岩脈的一系列南北向主斷層；更進一步的，大比例尺的 1:600 岩脈列及周遭區域的構造底圖，詳細的呈現岩脈內部構造，以及斷層和岩脈的截切形貌。

### 5.1.1 空拍正射影像下的構造辨識

藉由 Google map、野外調查，彙整朱傲祖等人於 1994 年在三貂角沿岸的構造調查底圖 (圖 5.1)，萊萊及周遭海蝕平台位於鶯仔瀨向斜的南翼，以低傾角為主，並出現波長不等的連續褶皺，褶皺軸大致為南北向並朝北傾斜，在萊萊 (台二線 109.5K) 附近的褶皺分布顯得較為密集，波長也較小。斷層以兩組分別為  $N20^{\circ}W$  的左移斷層和  $N60^{\circ}E$  的右移斷層為主 (圖 5.2 c)，然而在萊萊附近 0.5~1 公里的範圍內可以發現與岩脈走向平行的東西向裂理。在台二線 110K 區域則以走向  $N10^{\circ}E\sim N20^{\circ}E$  為主的逆斷層為主 (圖 5.2 a)，壓縮方向為西北西-東南東向。

本研究區域位於台二線 109.5K 上的萊萊海蝕平台，東西長約 200 公尺，南北寬約 80 公尺。

### 5.1.2 中視尺度的構造描繪

#### 1. 萊萊海蝕平台構造底圖 (1:1000)

所使用的 UAV 空拍影像由台北科技大學的羅偉主導，委託成功大學測量所的 UAV 進行拍攝 (圖 5.3)。在岩脈分布的定位和地形資料的取得，使

用全站儀 (total station) 進行現地測量，取得岩脈的精確分布及數值地形模型 (DEM)。UAV 空拍影像的正射化，委託台灣大學土木系韓仁毓進行影像正射處理，取得正射化的空拍影像後 (圖 5.4)，依此繪製 1:1000 的構造底圖 (圖 5.5)。

從萊萊海蝕平台的 UAV 空拍影像，北側為植被分布，南方由於海浪的侵蝕，海岸呈現鋸齒狀的破裂，有凸出的岬角和凹入的海蝕溝，西側和東側區域皆被巨大的礫石所掩埋。海蝕平台岩性為硬頁岩夾薄砂岩層，由於各層岩性不均勻的影響，地表呈現鋸齒狀的起伏，整體地形呈現北高南低的趨勢，南北高差為 2 公尺左右。

岩脈走向為東西向，呈現右階的雁行排列佇立於海蝕平台上，每個岩脈段長度介於 1 到 40 公尺之間，厚度大部分在 1 公尺左右，最厚不超過 2 公尺，共有 19 段岩脈，由東至西依序為岩脈 A 到 S。一系列的南北向右移斷層是整個平台上最為明顯的破裂，皆切過岩脈並產生錯移，切過岩脈的斷層一共有 11 道，由東至西依序為斷層 I 到 XI (除了斷層 IX 是逆斷層以外，其餘皆為右移斷層)。除此之外，平台上另有東西向與岩脈平行的節理。平台上的地層大致呈現低角度往西傾的位態，然而在東西兩側的地層出現褶曲的現象。

## 2. 岩脈列周遭區域構造底圖 (1:600)

為了對岩脈內和附近圍岩裂理有更詳細的描繪，本研究使用 DJI Phantom 2 小型遙控四旋翼直升機，搭載 GoPro hero 3 攝像機，在距地表 20~40 公尺的高度上拍攝地表影像，之後利用全站儀對岩脈分布的精確測量，在室內套疊空拍影像並配合野外調查等確認程序，製作 1:600 的岩脈列構造底圖 (圖 5.6)。

切過岩脈的右移斷層由於風化作用被侵蝕成一道道寬約數公分到數十公分的海蝕溝，岩脈南側區域亦有許多南北向的裂隙延伸，然而並未切過岩

脈。各岩脈並非呈現平直的牆面形狀，幾乎所有岩脈上都會發現走向滑移斷層、逆斷層，在岩脈 G、I、K 可見到岩脈內部出現覆疊構造 (duplex structure)，這些構造僅在岩脈中出現，並未延伸到圍岩也沒被發現。在岩脈的侵入末端，可見到岩脈慢慢尖滅消失的形貌，呈現不對稱的筆尖形貌，岩脈尖滅後取而代之的是持續延伸的裂理。在岩脈周遭的圍岩地層位態一致，位態介於 N10°~20°E，10°W~15°W。圍岩上可見到平行於岩脈走向的裂理，和南北向的剪力節理等構造。

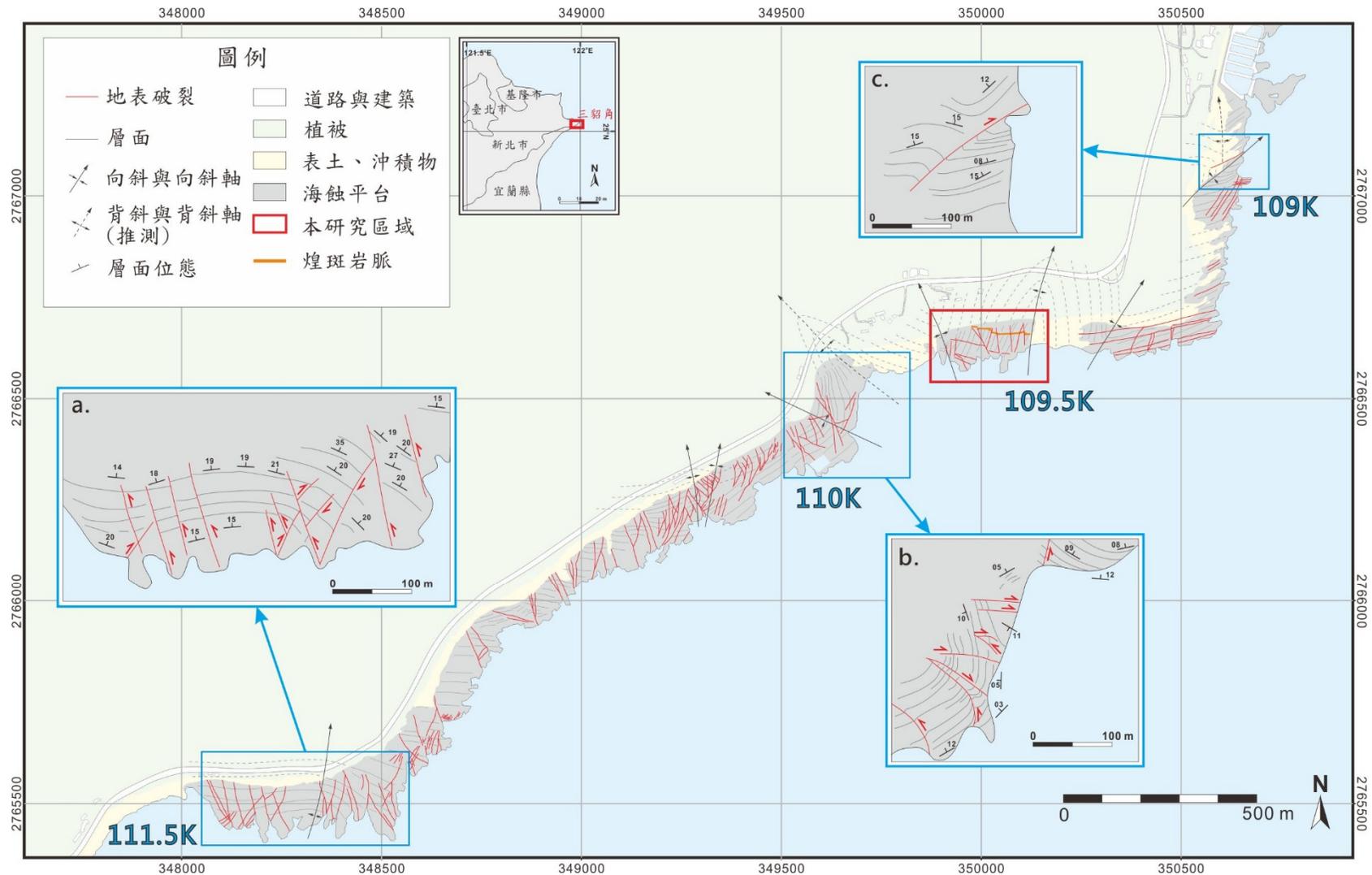


圖 5.1 萊萊附近的海蝕平台上的褶皺與斷層分布，改繪自盧佳遇等人 (1994)。由西至東三個區塊 a, b, c，為較細節的地表構造紀錄，針對這三個區塊的野外量測記錄則呈現於圖 5.2。

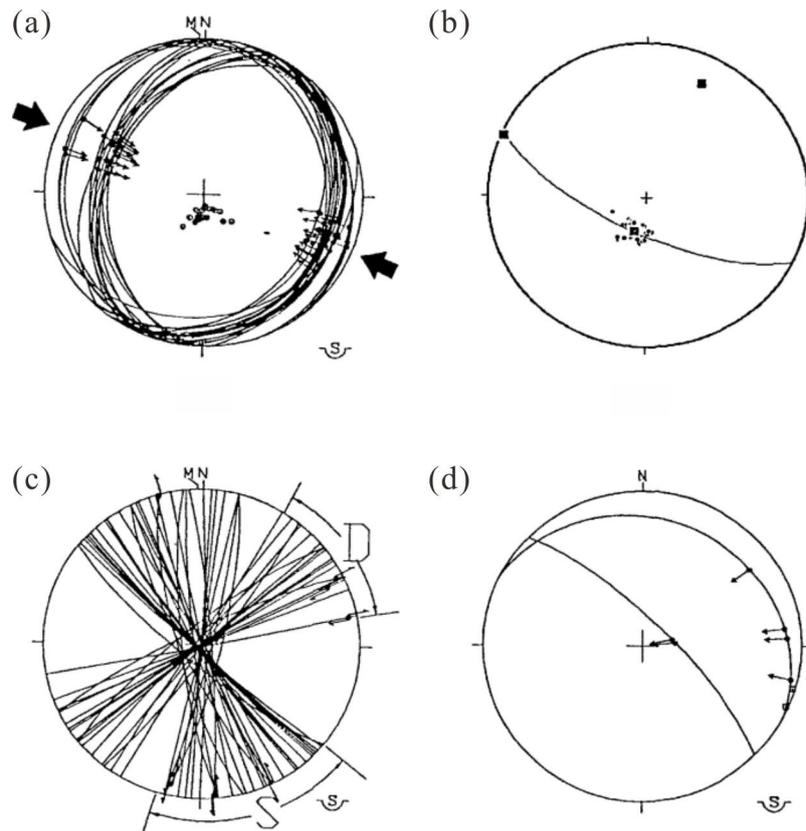
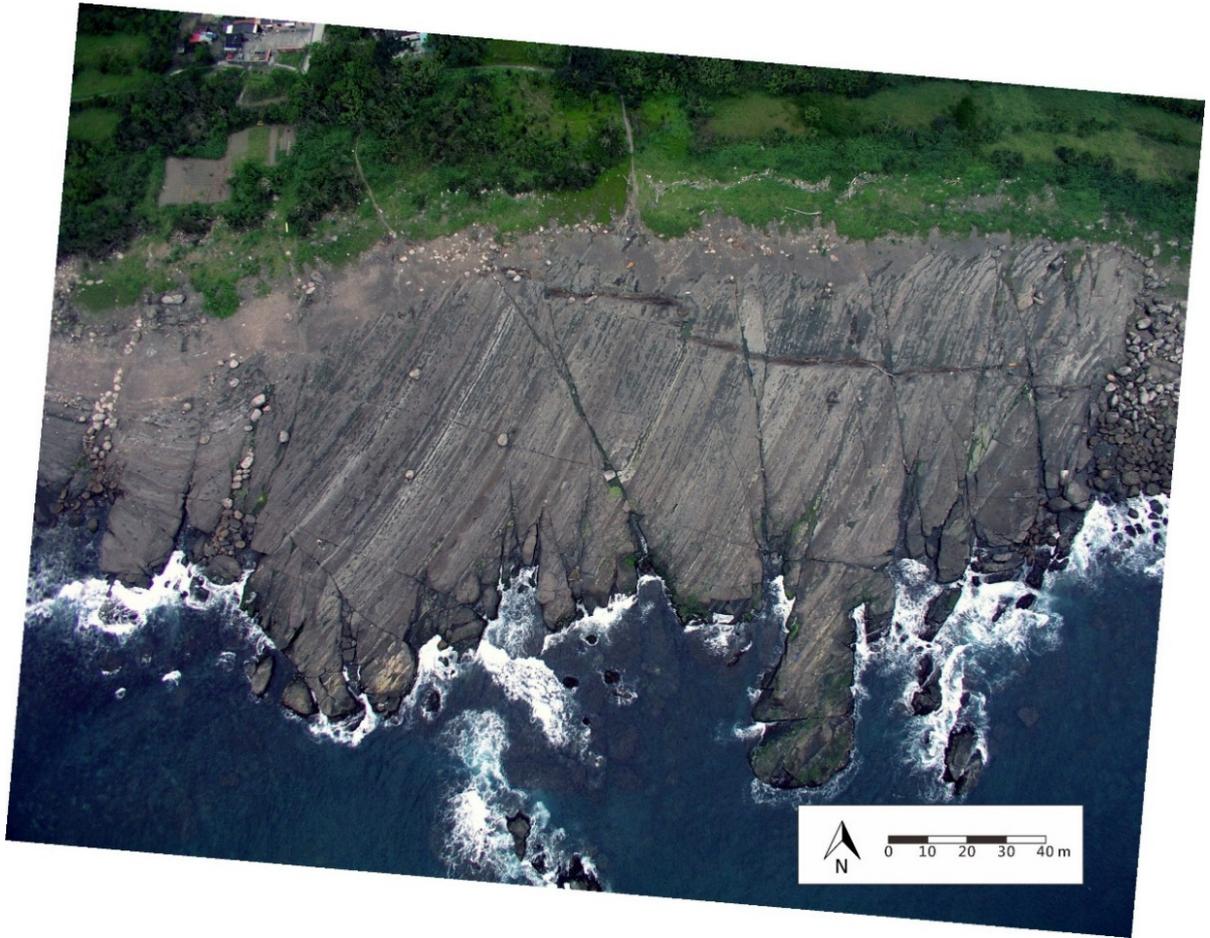
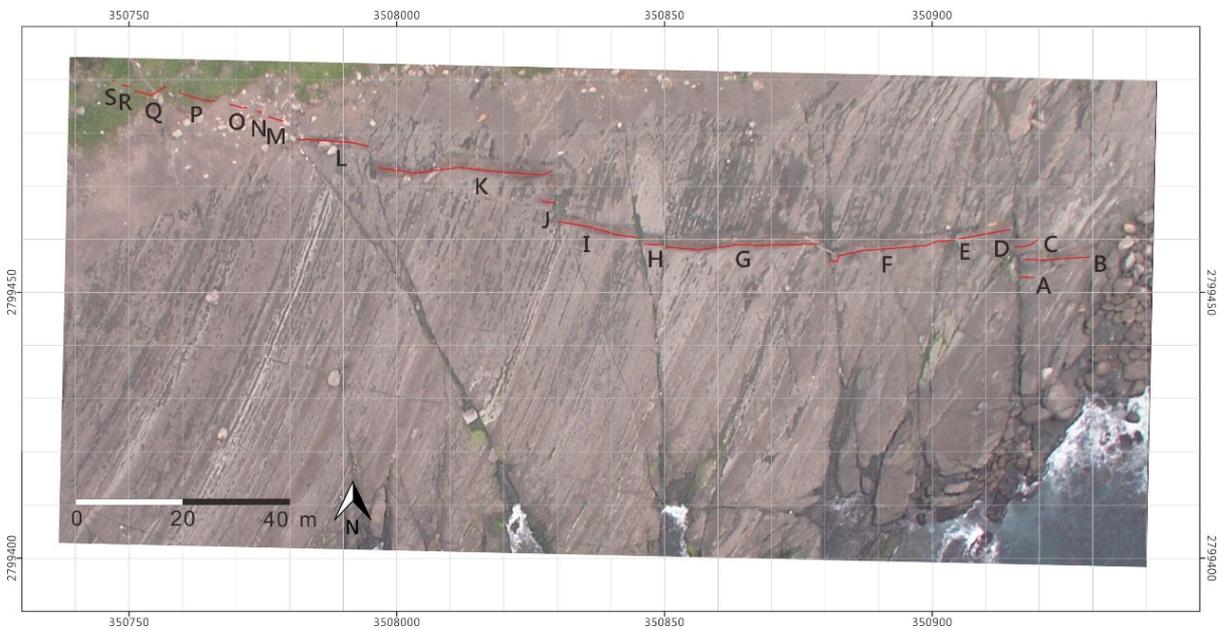


圖 5.2 萊萊附近海蝕平台上的斷層擦痕統計資料。(a) 圖 5.1 b 區 (台二線 110K) 紀錄 51 個逆斷層擦痕資料 (b) 圖 5.1 a 區 (台二線 111.5K) 紀錄 29 個層面極點資料投影之  $\pi$  圖 (c) 萊萊附近海蝕平台 55 個位移大於一公尺的平移斷層位態紀錄，其中 35 個為左移斷層，20 個右移斷層 (d) 顯示在旋轉變形疊加後逆斷層擦痕方向改變的現象 (盧佳遇等人，1994)。



1  
2 圖 5.3 萊萊海蝕平台的 UAV 未正射化空拍影像，由羅偉先生所提供。



3  
4 圖 5.4 正射化後的萊萊海蝕平台 UAV 空拍影像。圖中紅線為藉由全站儀  
5 測量定位之岩脈真實分布，顯示影像正射化後的岩脈分布精度相當良好，  
6 符合野外定位結果。

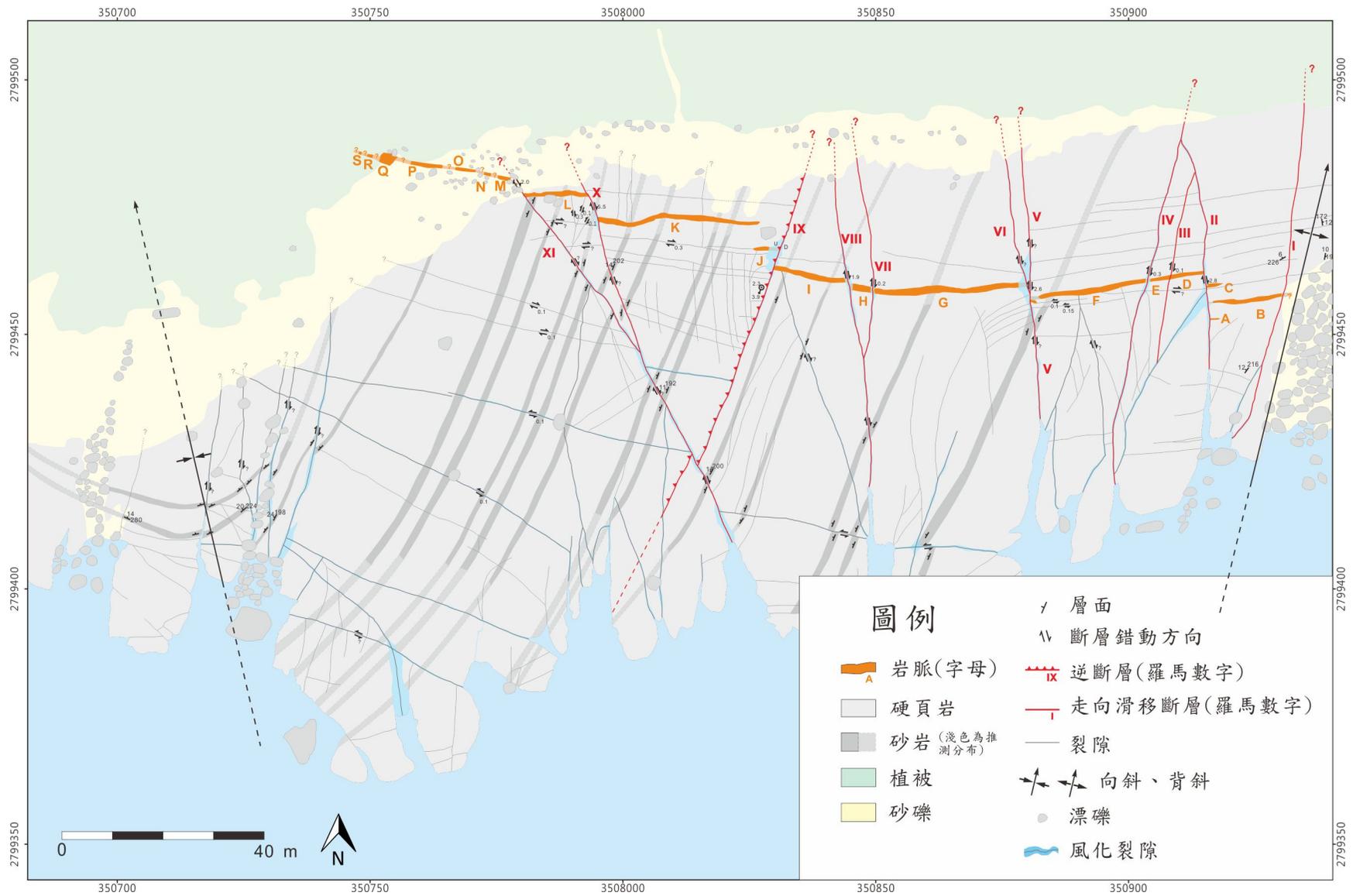


圖 5.5 1:1000 的菜菜海蝕平台構造地質圖。

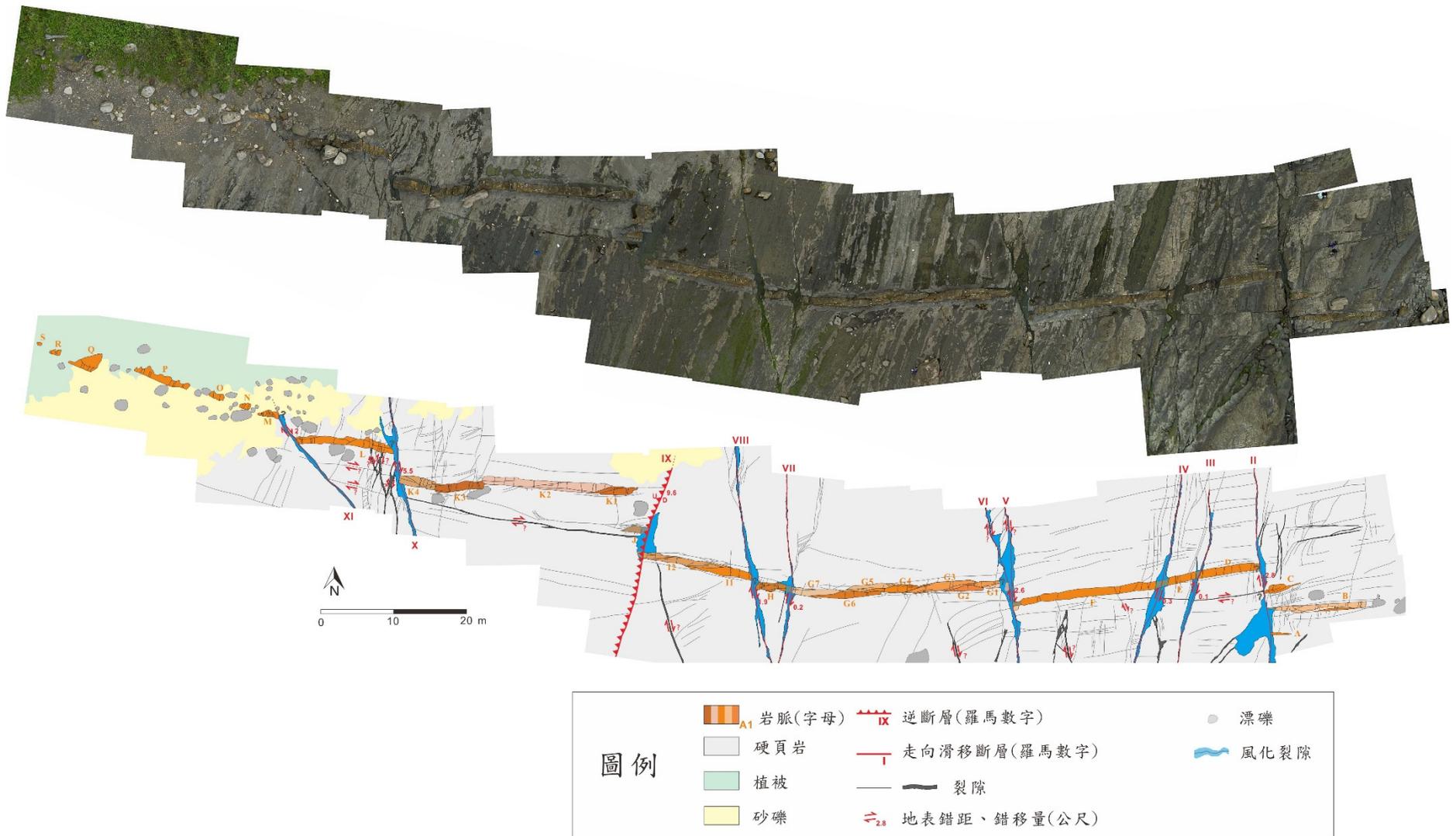


圖 5.6 1:600 岩脈列及周遭區域的岩性分布及破裂構造底圖。

## 5.2 構造現象彙整與資料分析

本節針對各段岩脈、切過岩脈的斷層，針對外觀、破裂的幾何形貌進行構造描繪和紀錄。使用岩脈立面圖 (elevation)、岩脈剖面、擦痕分析來記錄岩脈的形貌和破裂性質；使用節理間距調查、節理圓分析、投影圓分析來描述圍岩的褶皺形貌和裂理性質。之後分析各構造之間的先後次序、應力狀態。

### 5.2.1 岩脈野外觀察紀錄

針對各岩脈繪製岩脈立面圖、剖面，輔以野外照片記錄，紀錄各岩脈的幾何形貌、岩脈內部的斷層及裂理。

岩脈走向落於 $82^{\circ}\sim 105^{\circ}$ 之間，往南傾斜，傾角介於 $72^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之間，厚度介於 0.8~2 公尺，各段岩脈的幾何資訊統整於表 5.1。以下分別對每道岩脈做描述：

#### 1. 岩脈 A (圖 5.7, 圖 5.8)

岩脈 A 的位態為  $N85^{\circ}W, 74^{\circ}S$ ，長度與厚度分別為 2.57、0.39 公尺，岩脈並未凸出地表，東側末端為侵入末端，取而代之成為節理持續延伸；西側被斷層 II 切過，在斷層 II 的另一側並未找到相應的岩脈。再往北半公尺處還可以發現一條小岩脈，寬度不到 1 公尺。本岩脈的顏色相對於其他岩脈偏淡，可能由於侵入末端的關係，使岩脈成分較為不同。在岩脈鄰近的圍岩上，有平行於岩脈走向的節理呈現密集分布，然而僅出現在鄰近岩脈的 30 公分內。

#### 2. 岩脈 B (圖 5.9, 圖 5.10, 圖 5.11)

岩脈 B 的位態為  $N88^{\circ}E, 74^{\circ}S$ ，長度為 12.55 公尺，凸出地表，最大高

度為 0.67 公尺，厚度維持在 0.85 公尺左右，然而在西側有慢慢變細的趨勢，被斷層 II 截切，在斷層 II 的另一側可與岩脈 C' 相對應，東側與斷層 I 接觸，在斷層 I 另一側由於被漂礫覆蓋找不到相對應的岩脈。岩脈 B 內除了有兩道西傾的逆斷層，另被兩道東西向的正斷層切過，皆有充填石英脈，斷層面呈現不規則彎曲，其中一道斷層的兩側有延伸到圍岩達 2 公尺，位態及擦痕為  $N88^{\circ}E, 73^{\circ}S, 70^{\circ}$ 。岩脈西側則出現一組近東西向的共軛走向滑移斷層，切過岩脈內正斷層的石英脈，使得該區段的岩脈增厚並變得較為破碎。在構造形成先後次序上，依序為：東西向正斷層、共軛的走向滑移斷層、逆斷層。

### 3. 岩脈 C (圖 5.12, 圖 5.13, 圖 5.14)

岩脈 C 的位態為  $N84^{\circ}E, 90^{\circ}$ ，凸出地表，最大高度達 0.78 公尺，長度為 4.97 公尺，岩脈東側厚度從 1.5 公尺逐漸變細直至尖滅，尖滅後轉為節理持續往東延伸；岩脈西側被斷層 II 截切，在斷層的另一側可與岩脈 D 的東側相對應。岩脈 C' 雖似與岩脈 C 相連，卻位於斷層 II 的另一端，可能原本與岩脈 B 相連，而岩脈 C' 往西尖滅後，轉為節理持續延伸，最後向北彎曲併入岩脈 F 的南側邊界。在南北向的剖面上 (圖 5.14, 剖面 S1)，岩脈 C 在垂直方向上有差排的現象。

### 4. 岩脈 D、E、F (圖 5.15, 圖 5.16, 圖 5.17)

岩脈 D、E、F 的位態分別為  $N82^{\circ}E, 75^{\circ}S, N82^{\circ}E, 81^{\circ}S, N86^{\circ}E, 81^{\circ}S$ ，長度分別為 12.3、4.29、17.61 公尺，岩脈皆有凸出地表，最高可達 1.96 公尺，厚度變化不大，介於 0.7~0.8 公尺之間，西側末端的岩脈有出現錯位的現象 (圖 5.16, P2; 圖 5.17, S4)。岩脈 F 西側被右移斷層 V、VI 截切，兩斷層合計錯動量有 2.6 公尺，在斷層另一側可與岩脈 G 對應；東側則被斷層 II 截切，在斷層另一側可與岩脈 C 相對應。本段岩脈相對於其他岩脈邊界平直、裂理較少，僅被右移的斷層 III、IV 分割成岩脈 D、E、F，錯移量分別

為 10、30 公分，岩脈內有三道西傾的逆斷層切過岩脈。

#### 5. 岩脈 G (圖 5.18，圖 5.19，圖 5.20)

岩脈 G 的位態為 EW, 80°S，長度為 28.58 公尺，凸出地表，最高可達 1.94 公尺，平均厚度為 0.93 公尺，岩脈西側被右移斷層 VII 截切，錯動量為 20 公分，斷層另一側可與岩脈 H 對應；東側被兩道右移斷層 V、VI 截切，合計錯動量有 2.6 公尺，斷層另一側可與岩脈 F 對應。本岩脈的覆疊構造相當發達，與岩脈走向夾低角度一共 6 道的左移 (5 道) 和右移斷層 (右移占大部分) 將岩脈 G 依序切割成 G1~G7 共 7 段小岩脈，彼此以覆疊的形式交錯排列，這些小岩脈的末端附近常出現剪力破裂等構造。岩脈與圍岩之間邊界並非完全平直，常有急折的階梯狀的接觸邊界 (圖 5.19, P1)，如岩脈 G2 東側、G3 西南側、G5 西北側、G6 西側尖端、G7 西北側，在這些急折處邊界附近常會有走向滑移斷層出現。另外，階梯狀邊界不僅限於水平方向，從剖面上亦可以看到垂直方向的階梯狀邊界 (圖 5.19, P3)。在岩脈內則發現四道西傾的逆斷層貫穿岩脈，亦有東西走向的正斷層，常填充厚達 10 公分的石英脈。依構造截切關係判斷，岩脈 G 的構造形成次序為：

- (1) 岩脈內產生東西向高角度的正斷層，產生開列並填充石英脈。
- (2) 東西向的走向滑移斷層錯動，使得岩脈發生疊置。
- (3) 西傾的逆斷層發生。本期的逆斷層截切了其他所有構造，斷層面和前兩期事件的斷層面相比最為平直。

#### 6. 岩脈 H (圖 5.21，圖 5.22)

岩脈 H 的位態為 N80°W, 76°S，長度為 3.55 公尺，未凸出地表，厚度為 1 公尺，岩脈東西兩側分別被右移斷層 VII、VIII 截切，錯動量分別為 0.2、1.9 公尺，斷層的另一側可分別與岩脈 G7、I1 相對應。岩脈內有一道東西走向的右移斷層，與岩脈 G7 西側的右移斷層同屬於一道。

#### 7. 岩脈 I (圖 5.23, 圖 5.24, 圖 5.25)

岩脈 I 的位態為  $N75^{\circ}W, 79^{\circ}S$ , 長度為 15.3 公尺, 凸出地表, 最高可達 2.15 公尺, 厚度為 0.8 公尺, 其東側被右移斷層 VIII 截切, 錯動量為 1.9 公尺, 斷層另一側有岩脈 H 相對應; 西側被西傾的逆斷層 IX 截切, 錯動量從地表觀測無法判別, 在之後的章節會繼續討論。岩脈 I 上有兩道東西向的右移斷層。西傾的逆斷層共有七道, 傾角介於  $21^{\circ}\sim 37^{\circ}$  度, 斷層擦痕明顯, 本岩脈逆斷層的分布相對地密集許多。在本岩脈的西南側, 有一道走向為  $N17^{\circ}W$  的右剪破壞帶, 並伴隨著同向斷層出現, 破壞帶隨著由南往北延伸, 寬度逐漸減小, 最後終止於岩脈附近, 其破裂的形貌與平台上截切各岩脈的右移斷層類似。

#### 8. 岩脈 J (圖 5.26, 圖 5.27, 圖 5.28)

岩脈 J 的位態為  $EW, 76^{\circ}S$ , 長度為 2.7 公尺, 未凸出地表, 厚度為 0.7 公尺, 其東側被逆斷層 IX 截切; 西側為岩漿侵入末端, 形貌呈現不對稱的尖端, 北邊界彎曲南邊界平直, 其圍岩與岩脈平行的節理亦產生彎曲, 岩脈終止後往西變成節理持續延伸 20 公尺後北轉併入岩脈 K3 的邊界。

#### 9. 岩脈 K (圖 5.29, 圖 5.30, 圖 5.31)

岩脈 K 的位態為  $N89^{\circ}W, 85^{\circ}S$ , 長度為 32.95 公尺, 凸出地表最高可達 2.93 公尺, 厚度為 0.93 公尺, 東側為侵入末端, 其形貌為非對稱尖端, 北邊界平直南邊界彎曲, 岩脈尖滅後轉變為節理持續向東延伸中止於斷層 IX; 岩脈西側被右移斷層 X 截切, 錯動量有 5.5 公尺。本岩脈被數道右移和左移斷層分割成 K1~K4 等四道小岩脈, 然而岩脈 K3 的走向不同於其他小岩脈。岩脈內亦有平行於岩脈走向的正斷層, 可發現高傾伏角的擦痕。共有 13 道逆斷層切過本岩脈, 傾角介於  $14^{\circ}\sim 55^{\circ}$  之間, 大致上可分為高與低傾角共

兩組逆斷層，本岩脈側面的輪廓大部分被這兩種斷層面所決定，本岩脈的逆斷層分布較為密集，錯動也較為劇烈，甚至可以在斷層面上看到被剪碎的岩脈，其高傾角的逆斷層僅在本岩脈上被發現。

#### 10. 岩脈 I (圖 5.32，圖 5.33，圖 5.34)

岩脈 I 的位態為 EW, 78°S，長度為 29.58 公尺，凸出地表，最高可達 1.4 公尺，厚度為 1.1 公尺，東側被右移斷層 X 截切，錯動量為 5.5 公尺；西側被右移斷層 IX 截切，錯動量為 3.6 公尺。岩脈東側相當破碎，被一系列南北向的右移斷層截切並錯動，各斷層的錯距小於 20 公分，皆有延伸到圍岩，並且集中出現在斷層 X 的附近，與斷層 X 有關連性。岩脈西側有一道走向為 N42°E 的左移斷層截切過岩脈。在岩脈內亦可發現與岩脈走向夾低角度的走向滑移斷層，但錯距都不大。

#### 11. 岩脈 M~S (圖 5.35，圖 5.36，圖 5.37)

岩脈 M~S 由於覆蓋大量砂礫和植被，皆未凸出地表，即使凸出也不會高過 0.5 公尺，無法提供較完整的構造訊息，我們藉由清除地表覆土，盡可能的取得構造資訊。從野外調查，可以確認岩脈 M~P 屬於同一道連續岩脈。岩脈 P、Q、R 之間的厚度差異相當的大，無法藉由清除覆土去證明他們之間是相連的，然而附近也沒有找到明顯的斷層，僅能推測在岩脈 P、Q、R 之間岩脈厚度有劇烈的變化。有趣的是，從岩脈 R 的剖面上可以看到厚度劇烈變化以及岩脈錯位的構造現象 (圖 5.37)。

### 5.2.2 岩脈中破裂的分析

在岩脈的幾何特性上，岩脈與圍岩之間常出現階梯狀的接觸邊界，根據 Nicholson & Pollard (1985) 和 Bussell (1989) 對於階梯狀及雁行排列岩脈的研

究，認為這是岩漿侵入一連串差排 (offset) 的裂隙後互相連結的結果。另外，岩脈周遭的圍岩由於岩漿侵入時的高溫，有較高的變質度，相對於平台上其他圍岩較為堅硬並凸出地表，然而分布最多不會超過岩脈附近 50 公分範圍，從各岩脈剖面上圍岩的地表形貌可發現此特性。

岩脈上斷層的特性統整列於表 5.2，岩脈 F、G、I、K、L 的斷層及擦痕投影圖列於圖 5.38，發現在所有岩脈上皆有分布的斷層有：

### 1. 與岩脈走向夾低角度的正斷層

出現頻率不如滑移斷層般頻繁，斷層面走向介於  $N80^{\circ}E \sim N65^{\circ}W$ ，傾角介於  $65^{\circ}S \sim 88^{\circ}S$ ，斷層面上常會填充較厚的石英脈，厚度可達 10 公分，斷層面扭曲而不平直，常會延伸到圍岩。

### 2. 南北向西傾的逆斷層

廣泛分布於所有岩脈，斷層面走向介於  $NS \sim N50^{\circ}E$ ，傾角介於  $14^{\circ}W \sim 53^{\circ}W$ ，絕大部分的逆斷層未延伸到圍岩上，唯一延伸到圍岩的斷層為斷層 IX。在分布的差異性上，在斷層 IX 附近的岩脈 G、I、K 有較多的逆斷層分布，高傾角的逆斷層僅出現在岩脈 K 上，在之後章節提到斷層 IX 時會繼續討論。

### 3. 與岩脈走向夾低角度的走向滑移斷層

廣泛分布於所有岩脈中，斷層面走向介於  $N75^{\circ}E \sim N75^{\circ}W$ ，傾角介於  $70^{\circ}S \sim 88^{\circ}S$ ，斷層在岩脈 G 分布較為發達，絕大多數為右移斷層，使岩脈發生覆疊構造，不延伸到圍岩，斷層錯距不超過 50 公分。統整各岩脈觀察發現，在階梯狀岩脈邊界附近常會出現走向滑移斷層，推測是由於材料強度與分布差異所產生的現象，由於東西向的應力擠壓，較軟的圍岩產生東西向的壓縮應變，使得階梯狀岩脈凸起的部分受到較大的區域應力，使階梯接觸邊界

附近的岩脈產生破裂。

依構造截切的關係來判斷岩脈上斷層的發生次序，依序為東西向正斷層、東西向走向滑移斷層、南北向逆斷層。我們綜合斷層分布較多的岩脈 F、G、I、K、L 來做斷層擦痕分析，分別對各類斷層推估應力狀況 (圖 5.39)，然而由於野外測量得到的擦痕並非共軛，無法精確地計算出應力三軸的方向，僅能推估大致的方向 (Angelier, 1979)，正斷層應力三軸的方向由大至小依序為：垂直地表向、東西向、南北向，走向滑移斷層應力三軸的方向由大至小依序為：東西向、垂直地表方向、南北向，逆斷層應力三軸的方向由大至小依序為：東西向、南北向、垂直地表方向。

### 5.2.3 圍岩斷層觀察紀錄

截切岩脈的主斷層一共有 11 條，由東到西依序為斷層 I 到斷層 XI。下列為各斷層的觀察敘述：

#### 1. 斷層 I

走向為 N14°E，傾角為高角度，截切岩脈 B 的東側，錯距不大，斷層東側被礫石掩埋，傾向不確定，亦不確定斷層錯動方向及斷層類型。

#### 2. 斷層 II (圖 5.40)

右移斷層 (right-lateral fault)，地表錯距為 3.1 公尺，走向為 N6°W，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 A、B、C、D。根據野外測量，岩脈 D、C' 之間的距離和岩脈 B、C 之間的距離大致相等，岩脈 B 和 C' 的厚度變化趨勢一致，確認在錯動前岩脈 C、D 和岩脈 B、C' 原本為同一道的連續岩脈。

### 3. 斷層 III (圖 5.41)

右移斷層 (right-lateral fault) ，地表錯距為 0.1 公尺，走向為  $N10^{\circ}E$ ，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 D、E。在斷層錯動前，岩脈 D、E 為同一道的連續岩脈。

### 4. 斷層 IV (圖 5.42)

右移斷層 (right-lateral fault) ，地表錯距小於 0.1 公尺，走向為  $N6^{\circ}E$ ，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 E、F。在斷層錯動前，岩脈 E、F 為同一道的連續岩脈。

### 5. 斷層 V 和 VI (圖 5.43)

皆為右移斷層 (right-lateral fault) ，地表錯距加總一共 2.56 公尺，走向分為  $N2^{\circ}W$ 、 $N4^{\circ}W$ ，傾角皆為高角度，傾向不確定，野外觀察顯示，斷層 V 和 VI 一起截切過岩脈 F、G，在兩斷層之間可以發現雁行的剪力破裂。在岩脈 F 的西側和岩脈 G 的東側分別發現與岩脈走向平行的石英脈 q1、q2，確認在斷層錯動前，岩脈 F、G 為同一道的連續岩脈。

### 6. 斷層 VII (圖 5.44)

右移斷層 (right-lateral fault) ，地表錯距為 0.2 公尺，走向為  $N9^{\circ}E$ ，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 G、H。在斷層錯動前，岩脈 G、H 為同一道的連續岩脈。

### 7. 斷層 VIII (圖 5.45)

右移斷層 (right-lateral fault) ，地表錯距為 1.87 公尺，走向為  $N5^{\circ}W$ ，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 H、I。在斷層錯動前，岩脈 H、I 為同一道的連續岩脈。

## 8. 斷層 IX (圖 5.46)

右移逆滑斷層 (right-handed reverse-slip fault)，帶有右移分量。走向為 N22°E，傾角經過野外鑽孔測量和計算 (圖 5.47)，為 14°向西傾，斷層位態幾乎和層面相同，在斷層面上也未發現擦痕跡象。斷層截切過岩脈 I 西側、岩脈 J 東側，而斷層兩側岩脈 I、J 的南北側皆可以發現相對應的裂理  $fi1$ 、 $fj1$  和  $fi2$ 、 $fj2$  (圖 5.46)，因此在斷層 IX 錯動之前岩脈 I、J 原本相連。在錯動方向的判斷上，從地表野外調查斷層 IX 似乎是右移斷層，然而根據地電阻影像剖面，發現斷層 IX 實際上是帶有右移分量的逆斷層，細節在 5.3 會繼續討論。

## 9. 斷層 X (圖 5.48)

右移斷層 (right-lateral fault)，地表錯距為 5.5 公尺，走向為 N16°W，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 K、L。在斷層錯動前，岩脈 K、L 為同一道的連續岩脈。

## 10. 斷層 XI (圖 5.49)

右移斷層 (right-lateral fault)，地表錯距為 3.6 公尺，走向為 N30°W，傾角為高角度，傾向不確定，截切過岩脈 K、L。在斷層錯動前，岩脈 K、L 為同一道的連續岩脈。斷層 XI 為斷層 X 的衍生斷層，在斷層 X、XI 之間有許多剪力破裂的出現 (圖 5.6)。

各斷層資訊統整結果於表 5.3，絕大多數的斷層皆屬於右移斷層，只有斷層 IX 是逆斷層，斷層 I 則無法確定。各斷層走向上有三種方向上的趨勢：

1. 斷層 IX 的 N22°E，屬於逆斷層。
2. 斷層 II、V、VI、VII、VIII、X、XI 的 N2°W~N30°W，斷層的地表錯動

量皆超過 1 公尺。

3. 斷層 I、III、IV、VIII 的  $N6^{\circ}E \sim N10^{\circ}E$ ，斷層的地表錯動量不大，最大不超過 0.3 公尺。

#### 5.2.4 圍岩中裂理與斷層的分析

從空拍影像與野外調查，在研究區域西側發現向斜褶皺軸 (圖 5.50)，東側發現背斜褶皺軸 (圖 5.51)，褶皺軸皆北傾，褶皺開口相當寬，翼間角 (interlimb angle) 介於  $150^{\circ} \sim 160^{\circ}$ ，兩翼地層平直。分析層面位態後，西側向斜軸走向為  $336^{\circ}$ ，傾沒角為  $9^{\circ}$  向北；東側背斜軸走向為  $18^{\circ}$  (圖 5.52 a)，傾沒角為  $3^{\circ}$  向北 (圖 5.52 b)。綜合圖 5.1、圖 5.5 在萊萊及周遭區域的褶皺分布，可以發現萊萊海蝕平台上的褶皺屬於非圓柱褶皺，南側的褶皺波長較短，整體而言褶皺有往北擠出的現象。

在圍岩的節理調查，以海蝕平台上錯動較大的斷層 II、V、IX、X 為界，將平台上的圍岩依序由東至西切割成 1~5 區 (圖 5.53)，進行野外觀察及取樣站分析，以下針對各區分別敘述裂理形貌、方向等資訊，取樣站的取樣點調查位置列於圖 5.53。

##### 1 區 (圖 5.54)

砂岩層偏多，層厚介於 4~10 公分，節理延伸性不良，只有平行於岩脈走向的一組破裂較為發達。節理站分析結果顯示，1-1 站  $N84^{\circ}E$  節理早於  $N6^{\circ}W$  節理；1-2 站  $N82^{\circ}E$  節理早於 NS 節理，NS 向節理為右剪節理。

##### 2 區 (圖 5.55)

砂岩層厚度明顯偏厚，厚度介於 10~40 公分，差異侵蝕明顯，因此地形

相當的崎嶇難走，許多南北向右剪的剪力破裂橫貫此區，將地表切割的相當破碎，部分走向的節理僅在砂岩層中出現，並未延伸到泥岩層。本區的分析站在泥岩層及砂岩層皆有取樣，節理站分析結果顯示，2-1 站節理形成次序依序為 N88°E、N66°E、N2°W；2-2 站的節理形成次序依序為 N86°E、N60°E、N8°E；2-3 站節理形成次序依序為 N80°E、N66°E、N4°W，其中 N4°W 走向的節理有右移錯動；2-4 站節理形成次序依序為 N86°E、N18°W，其中 N86°E 走向的節理具有右移錯動。

### 3 區 (圖 5.56)

砂岩層比例較少，層厚不超過 4 公分，因此本區地形是最為平整的，許多南北向的破裂橫貫此區，許多破壞帶有右剪性質，從破裂形貌可以發現一些剪動的次生構造如張力破裂、馬尾狀末端。節理站分析結果顯示 3-1 站節理形成次序依序為 N78°W、N22°E；3-2 站節理形成次序依序為 N86°E、N16°E，其中 N16°E 走向的節理具有右剪的錯動；3-3 站節理形成次序依序為 N32°E、N64°W，其中 N32°E 走向的節理具有右剪的錯動。

### 4 區 (圖 5.57)

類似於 3 區，砂岩層的比例依然較少，地表亦相當平整，除了南北向的破裂較為密集以外東西向的破裂也相當發達。節理站分析結果顯示，4-1 站節理形成次序依序為 N76°W、N30°W、N34°E，N76°W 為右剪節理，N30°W 的節理組為 N76°W 節理剪動時衍生的張力破裂。

### 5 區 (圖 5.58)

此區砂岩層比例偏多，厚度介於 5~20 公分，地形較多起伏，南北向右剪破裂、東西向剪力節理皆相當發達，破裂之間亦發現獨立透鏡構造。節理站分析結果顯示，5-1 站節理形成次序依序為 N74°W、N48°E；5-2 站節理形成次序依序為 N72°W、N36°E。

統整所有節理分析圖，大致上有 3 組節理趨勢：東西向、南北向、N60°E~N66°W 節理組。東西向和南北向的節理組遍及整個海蝕平台，南北向節理為最後一期的節理，大部分具有右剪的性質；東西向節理中，延伸性較佳 (20 公尺以上) 的節理屬於圍岩中最早形成的節理，並和岩脈走向平行，推測與岩脈的形成有關聯性，然而部分延伸性較差的東西向節理甚至會晚於南北向的節理，推測是在接近地表階段時形成的解壓節理。另外，N60°E~N66°W 的節理組分布範圍較局部，多分布在第 2 區的厚砂岩層中，形成順序介於南北向和東西向節理之間。圍岩上節理的形成次序如下：

1. 東西向延伸性較佳的節理屬於最早的構造現象，並和岩脈的形成有關聯性，在之後的章節會持續討論
2. N60°E~N66°W 的節理形成，然而僅在厚砂岩層中發生。
3. 南北向的破裂形成，走向介於 N30°E~N30°W，大部分的破裂未穿過岩脈。較大的破裂則切穿並錯開岩脈，形成南北向右移斷層。

東西及南北向等延伸性較差的節理形成，和第 1、3 階段的破裂同向，破裂線呈現鋸齒狀並不平直，應為近地表階段時的張力破裂。

表 5.1 各岩脈的野外量測資料整理。岩脈走向介於 $82^{\circ}\sim 105^{\circ}$ ，傾角介於 $72^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，長度最長可達 32 公尺，厚度介於 $0.8\sim 2$ 公尺，一般維持在 1 公尺上下，最大高度可達 2.93 公尺。

岩脈編號	走向( $^{\circ}$ )	傾角( $^{\circ}$ S)	長度(公尺)	厚度(公尺)	最大高度(公尺)
A	95	74	2.57	0.39	0
B	88	74	12.55	0.85	0.67
C	84	90	4.97	1.5	0.78
D	82	75	12.13	0.76	0.92
E	82	81	4.29	0.8	0.32
F	86	81	17.61	0.77	1.96
G	90	80	28.58	0.93	1.94
H	100	76	3.55	1	0.33
I	105	79	15.03	0.8	2.15
J	90	76	2.7	0.7	0.97
K	91	85	32.95	0.93	2.93
L	90	78	13.3	1.1	1.4
M	100	76	2.53	0.83	0.1
N	104	79	1.95	0.9	0.4
O	108	74	2.15	0.74	0.2
P	102	82	7.3	0.9	0.3
Q	101	81	3.1	2.06	0.5
R	100	84	1.37	0.82	0.8
S	95	81	0.98	0.74	0.6

表 5.2 各段岩脈中斷層及覆疊構造現象彙整。逆斷層集中出現在岩脈 I、K 上，而覆疊構造在岩脈 G 特別發達，正斷層的分布則沒有趨勢出現。

岩脈	逆斷層(組別/數量/傾角)	走向滑移斷層(數量/覆疊構造 d.s.)	岩脈內東西走向正斷層
A	未發現	未發現	未發現
B	A/1/LA,B/1/HA	1/d.s.	出現
C	A/1/LA	未發現	未發現
D	A/1/LA	未發現	未發現
E	未發現	未發現	未發現
F	A/2/LA	2/d.s.	未發現
G	A/4/LA	6/d.s.	出現
H	未發現	1/d.s.	未發現
I	A/6/LA, B/2/HA	2/d.s.	未發現
J	未發現	未發現	未發現
K	A/5/LA, B/8/HA	2/d.s.	出現
L	未發現	2/None	出現
M	未發現	未發現	未發現
N	未發現	未發現	未發現
O	未發現	未發現	未發現
P	未發現	未發現	未發現
Q	未發現	未發現	未發現
R	未發現	未發現	出現
S	未發現	未發現	未發現

註: HA(high angle, 高傾角), LA(low angle, 低傾角)

表 5.3 各主要斷層的位態、斷層性質、地表錯距彙整。除了斷層 IX 是逆移斷層，

斷層	走向	傾角(角度/傾向)	斷層類型	地表錯距(公尺)
I	未確定	未確定	未確定	未確定
II	N6°W	HA/ NS	RSF	3.1
III	N10°E	HA/ NS	RSF	0.1
IV	N6°E	HA/ NS	RSF	0.3
V	N2°W	HA/ NS	RSF	2.56 (斷層 V 及 斷層 VI 加總)
VI	N4°W	HA/ NS	RSF	
VII	N9°E	HA/ NS	RSF	0.2
VIII	N5°W	HA/ NS	RSF	1.87
IX	N22°E	14°/W	TSF	7.1 (估計)
X	N16°W	HA/ NS	RSF	5.5
XI	N30°W	HA/ NS	RSF	3.6

註: NS(not sure, 未確定), HA(high angle, 高傾角), RSF(right separation fault, 右移斷層), TSF(thrust separaton fault, 逆移斷層) (楊昭男, 1995)

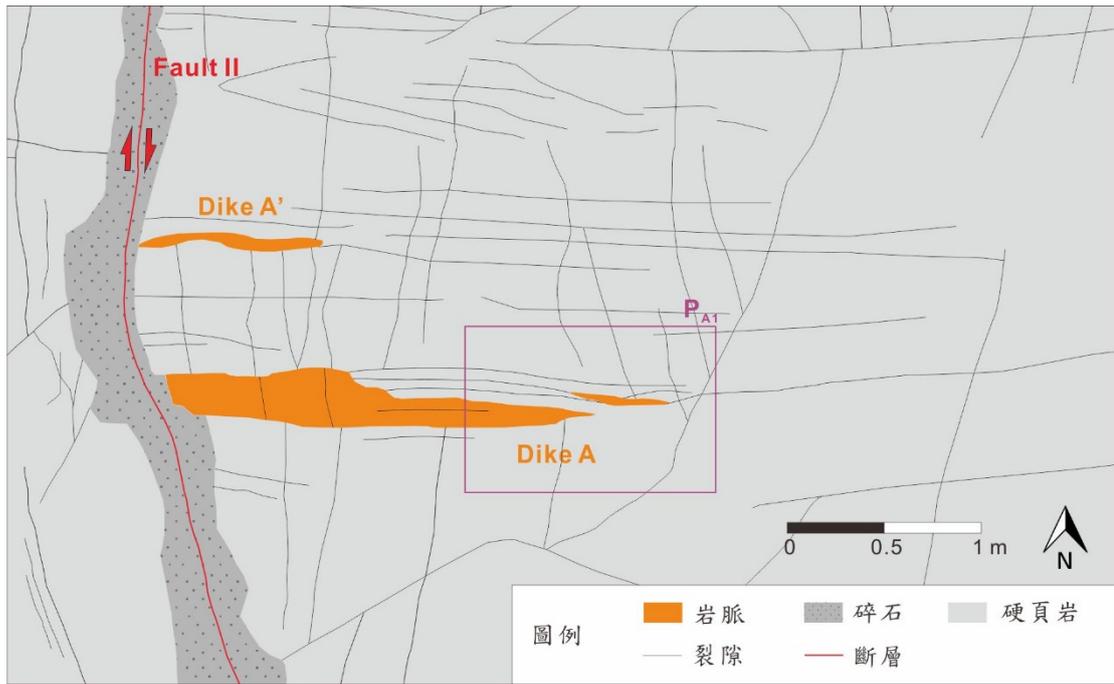


圖 5.7 岩脈 A 的構造俯視。 $P_{A1}$  (photo A1) 為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.8。



圖 5.8 岩脈 A 的構造，參自圖 5.7 的 $P_{A1}$  (photo A1)。岩脈侵入末端的形貌會維持尖錐狀輪廓，岩脈周遭的節理亦隨著岩脈輪廓而彎曲，顯示岩脈附近節理形成早於岩漿入侵。

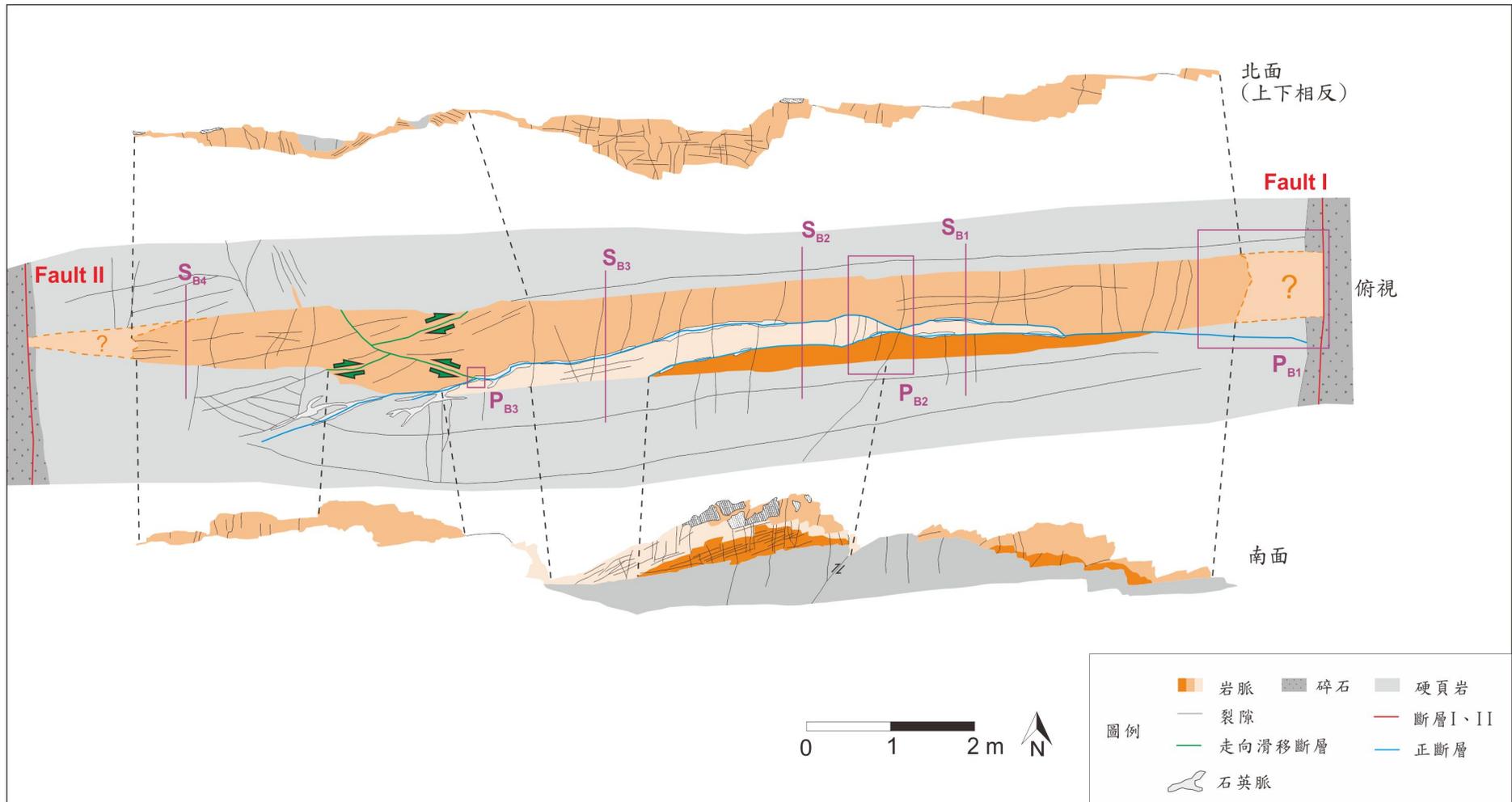


圖 5.9 岩脈 B 的構造俯視及立面圖。 $P_{B1}$ ~ $P_{B3}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.10； $S_{B1}$ ~ $S_{B4}$  (section B1~ section B4) 為剖面線，剖面位於圖 5.11。

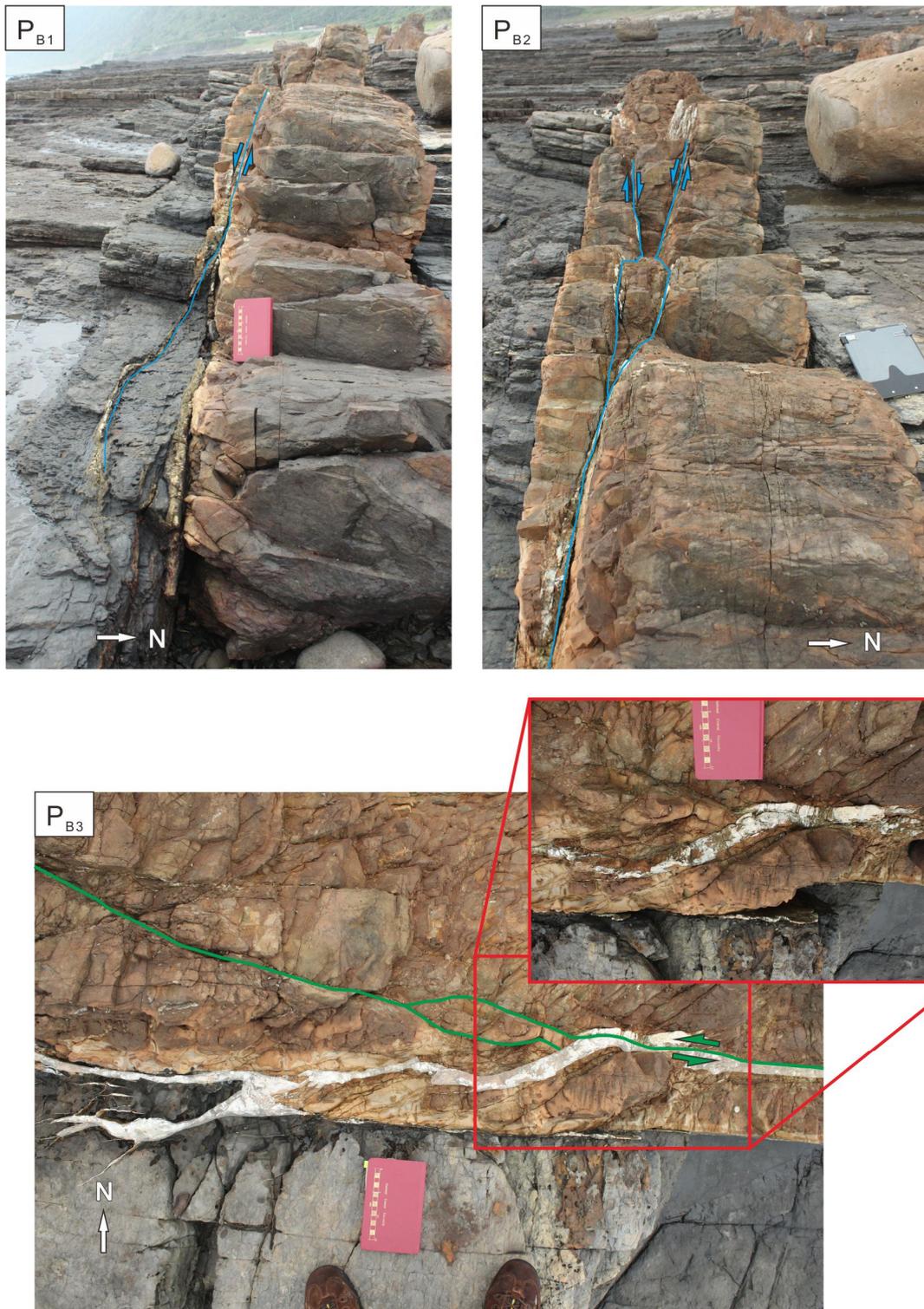


圖 5.10 岩脈 B 的構造，參自圖 5.9 的  $P_{B1} \sim P_{B3}$ 。  $P_{B1}$  顯示岩脈內正斷層有延伸到圍岩，然而僅延伸 2 公尺；  $P_{B2}$  顯示岩脈內發育的共軛正斷層，皆有充填 1~3 公分不等厚度的石英脈；  $P_{B3}$  顯示岩脈內充填石英脈的正斷層與岩脈內走向滑移斷層的截切關係，正斷層早於走向滑移斷層。

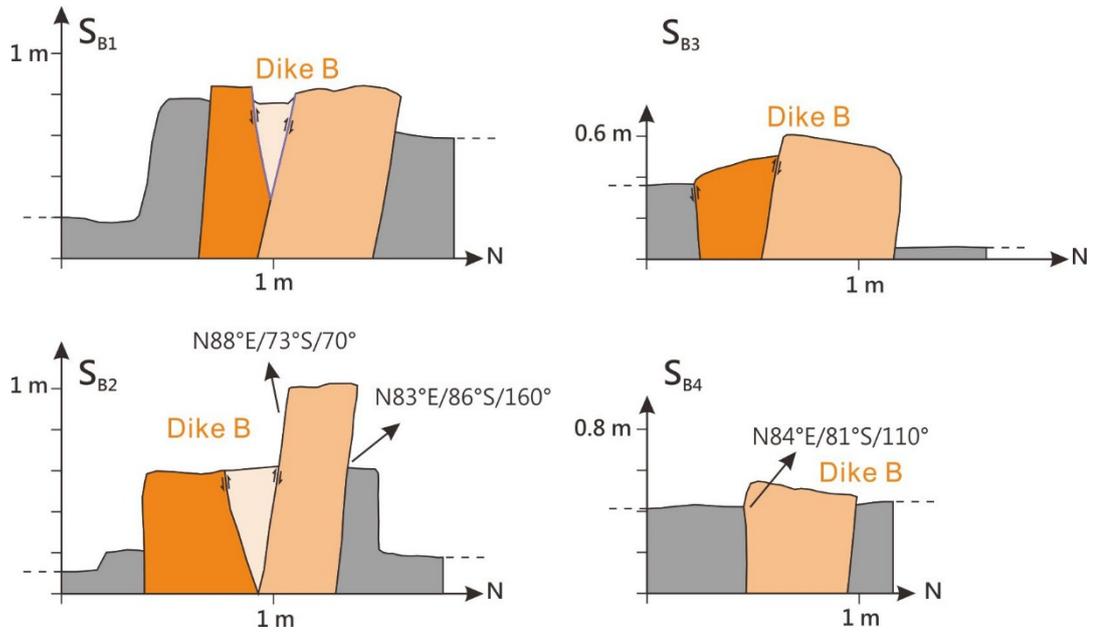


圖 5.11 岩脈 B 的南北向剖面，參自圖 5.9 的  $S_{B1} \sim S_{B4}$  (section B1~ section B4) 剖面線。從剖面  $S_{B1}$ 、 $S_{B2}$  可見共軛正斷層。

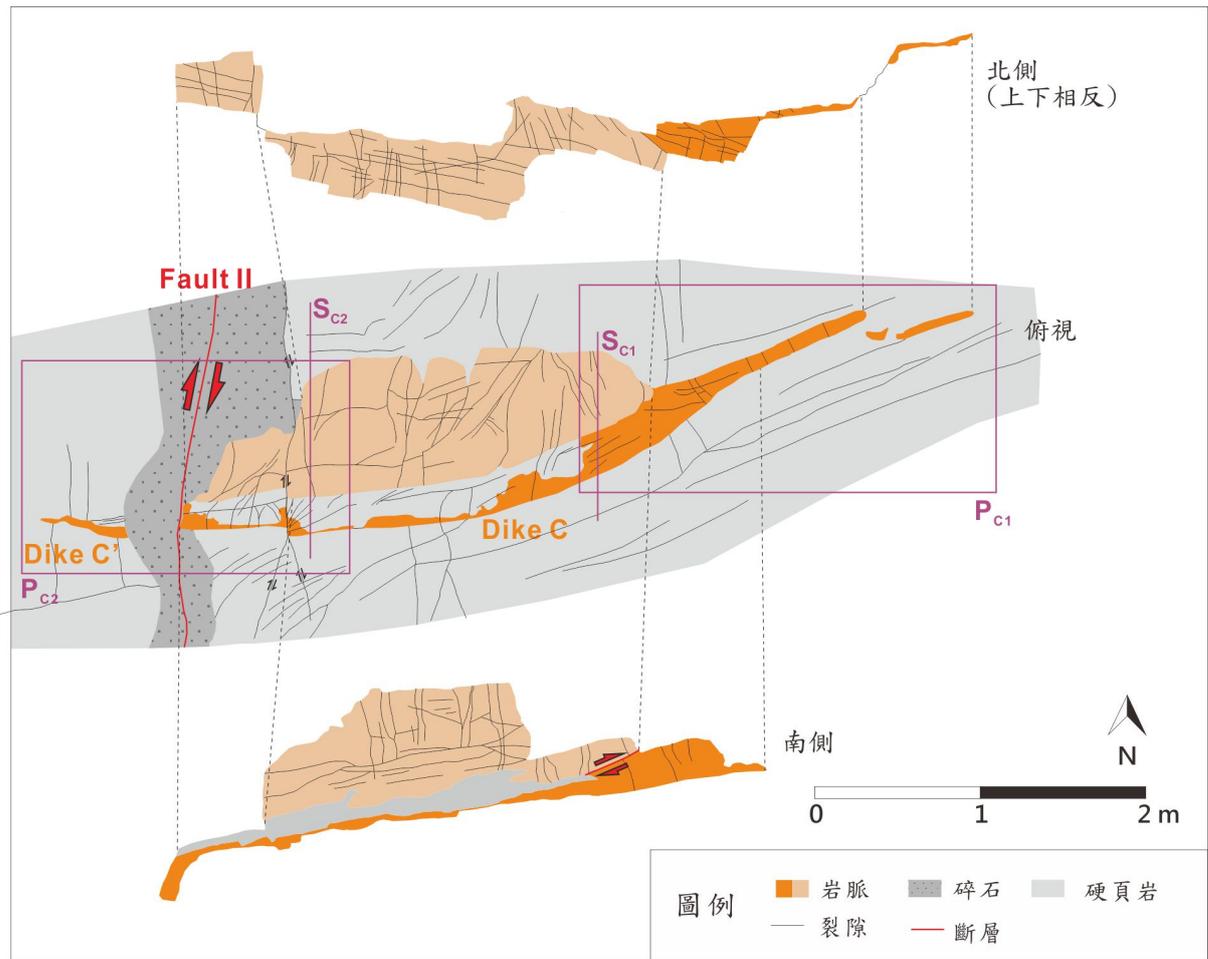


圖 5.12 岩脈 C 的構造俯視及立面圖。 $P_{C1} \sim P_{C2}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.13； $S_{C1} \sim S_{C2}$  為剖面線，剖面位於圖 5.14。岩脈 B 與岩脈 B' 之間隔著斷層 II，兩者不屬於同一道岩脈。

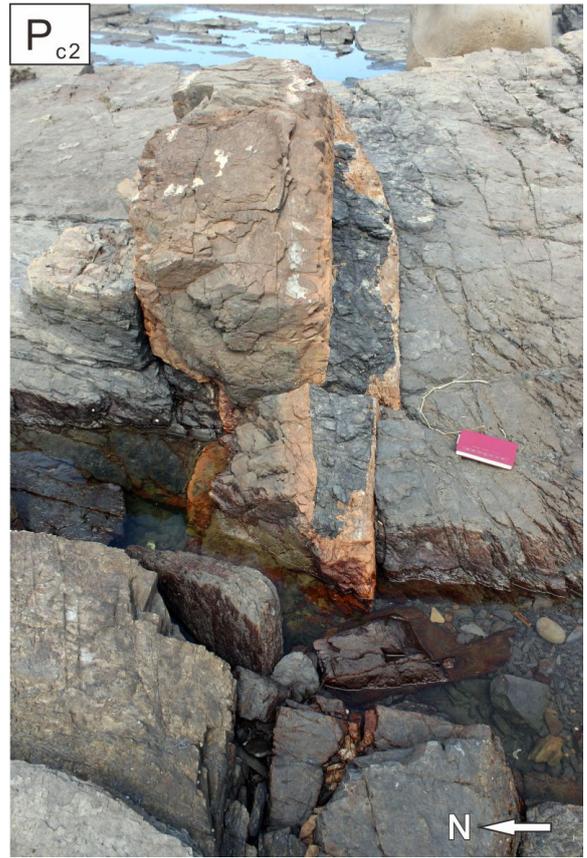


圖 5.13 岩脈 C 的構造，參自圖 5.12 的  $P_{C1} \sim P_{C2}$ 。 $P_{C1}$  顯示岩脈在空間上的錯位，錯位的現象並非由斷層造成。

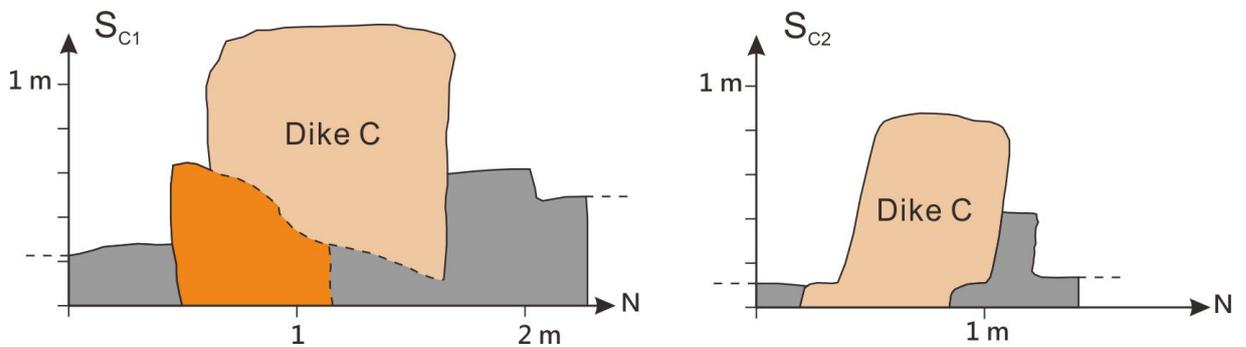


圖 5.14 岩脈 C 的南北向剖面，參自圖 5.12 的  $S_{C1} \sim S_{C2}$  剖面線。從剖面  $S_{C1}$ 、 $S_{C2}$  可見到岩脈在垂直方向上不同的錯位。

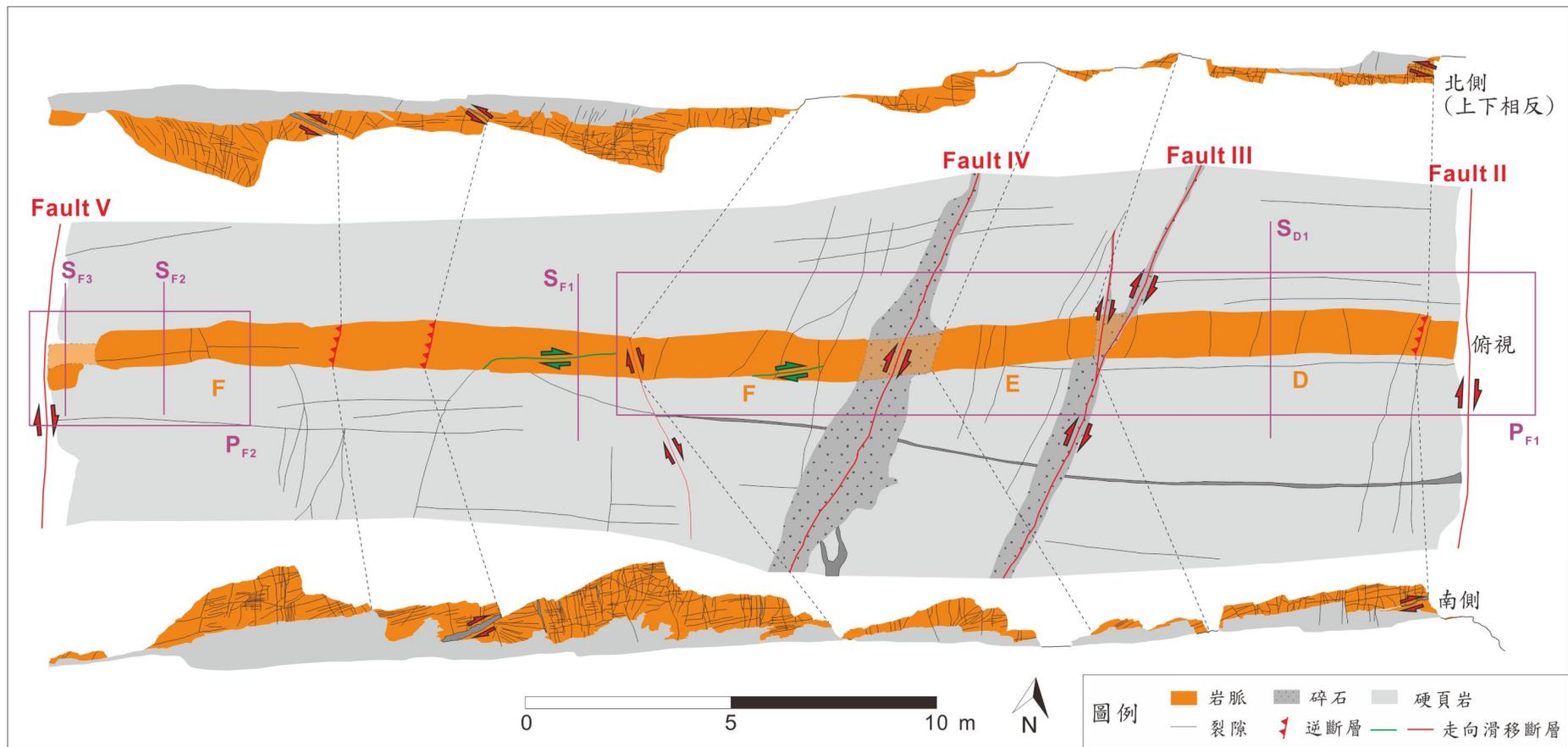


圖 5.15 岩脈 D、E、F 的構造俯視及立面圖。 $P_{F1} \sim P_{F2}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.16； $S_{D1}$ 、 $S_{F1} \sim S_{F3}$  為剖面線，剖面位於圖 5.17。



圖 5.16 岩脈 D、E、F 的構造，參自圖 5.15 的  $P_{F1} \sim P_{F2}$ 。  $P_{F1}$  顯示岩脈 D、E、F 相對於海蝕平台上大部分的岩脈，受構造作用的影響較少。 $P_{F2}$  顯示岩脈 F 在西側厚度突然變厚的現象，此現象亦屬於岩脈錯位。

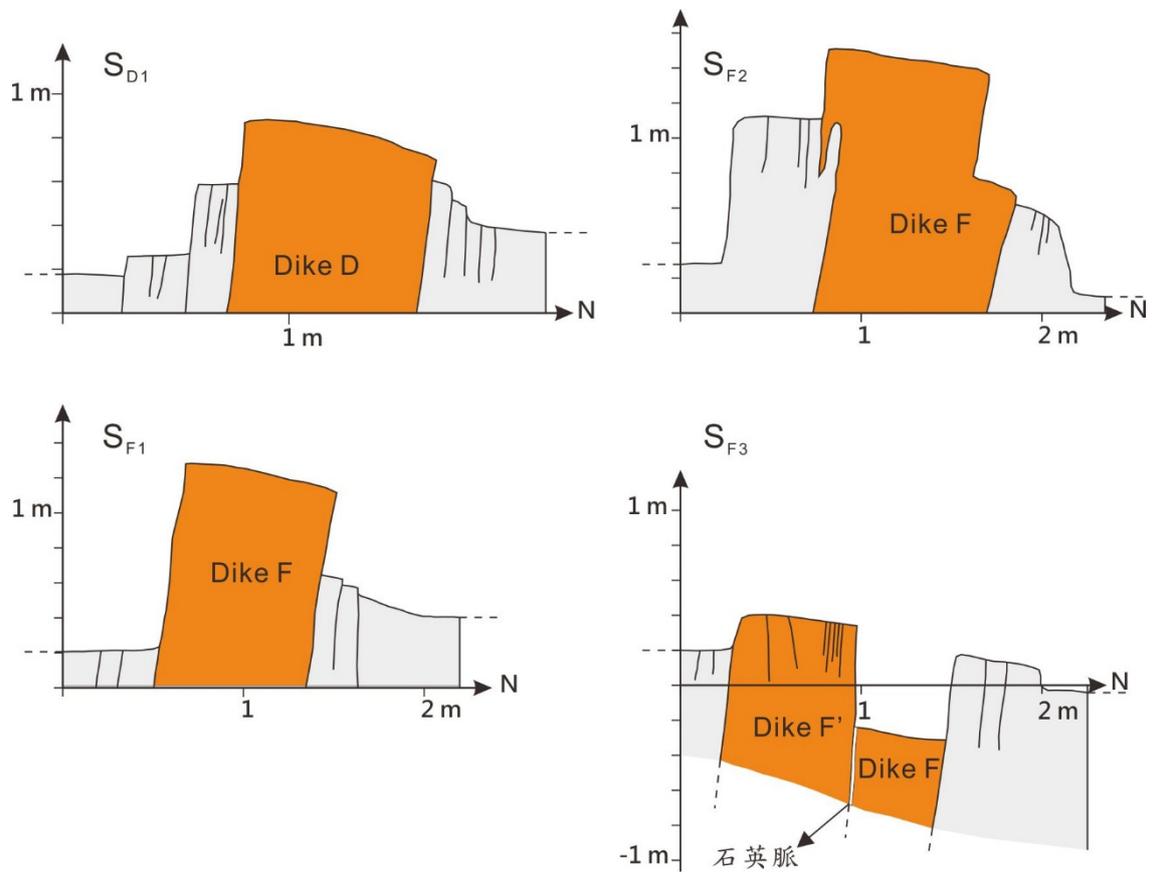


圖 5.17 岩脈 D、E、F 的南北向剖面，參自圖 5.15 的  $S_{D1}$ 、 $S_{F1}$ ~ $S_{F3}$  剖面線。 $S_{F2}$  顯示岩脈在垂直方向上的錯位。

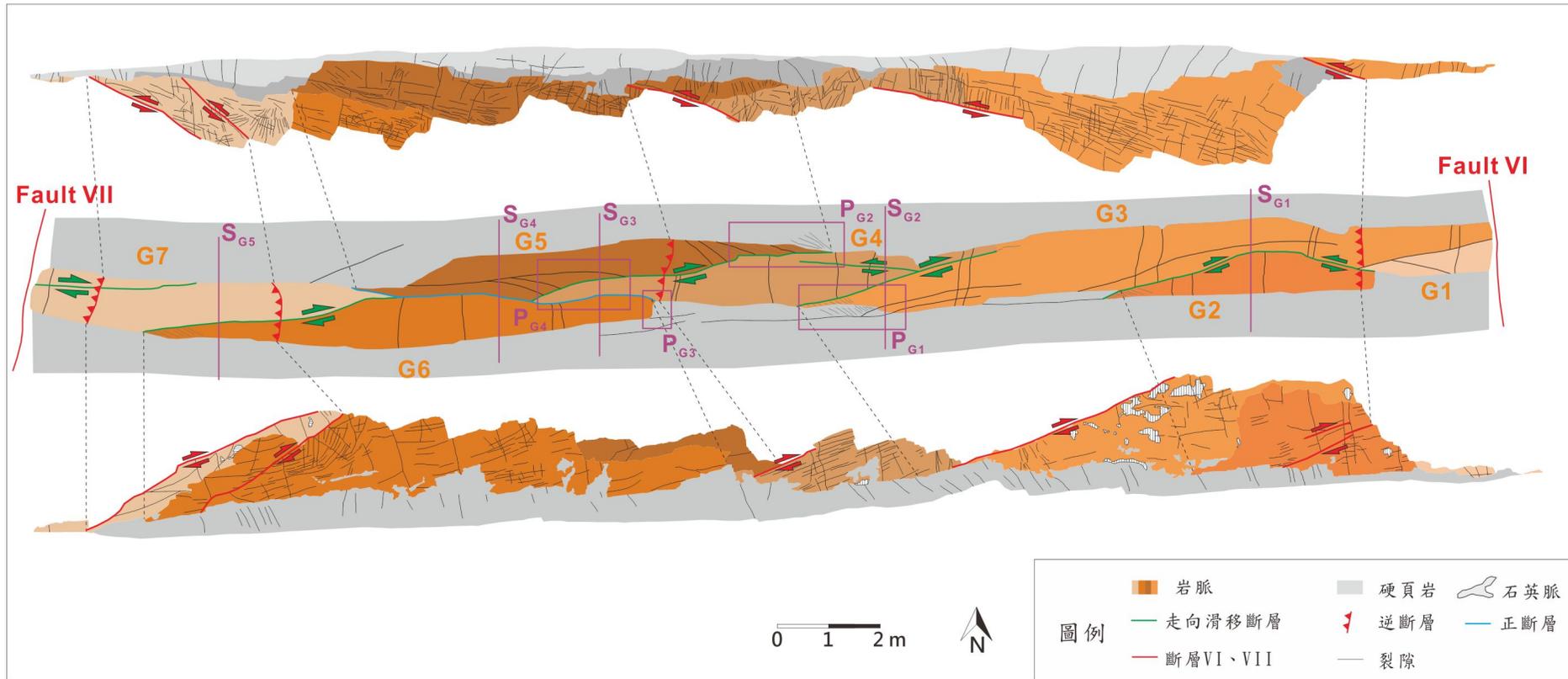


圖 5.18 岩脈 G 的構造俯視及立面圖。 $P_{G1}$ ~ $P_{G4}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.19； $S_{G1}$ ~ $S_{G5}$  為剖面線，剖面位於圖 5.20。



圖 5.19 岩脈 G 的構造，參自圖 5.18 的  $P_{G1} \sim P_{G4}$ 。 $P_{G1}$  顯示階梯狀的岩脈邊界， $P_{G2}$  顯示岩脈內走向滑移斷層， $P_{G3}$  顯示岩脈在垂直方向上的錯位， $P_{G4}$  為岩脈內的覆疊構造。

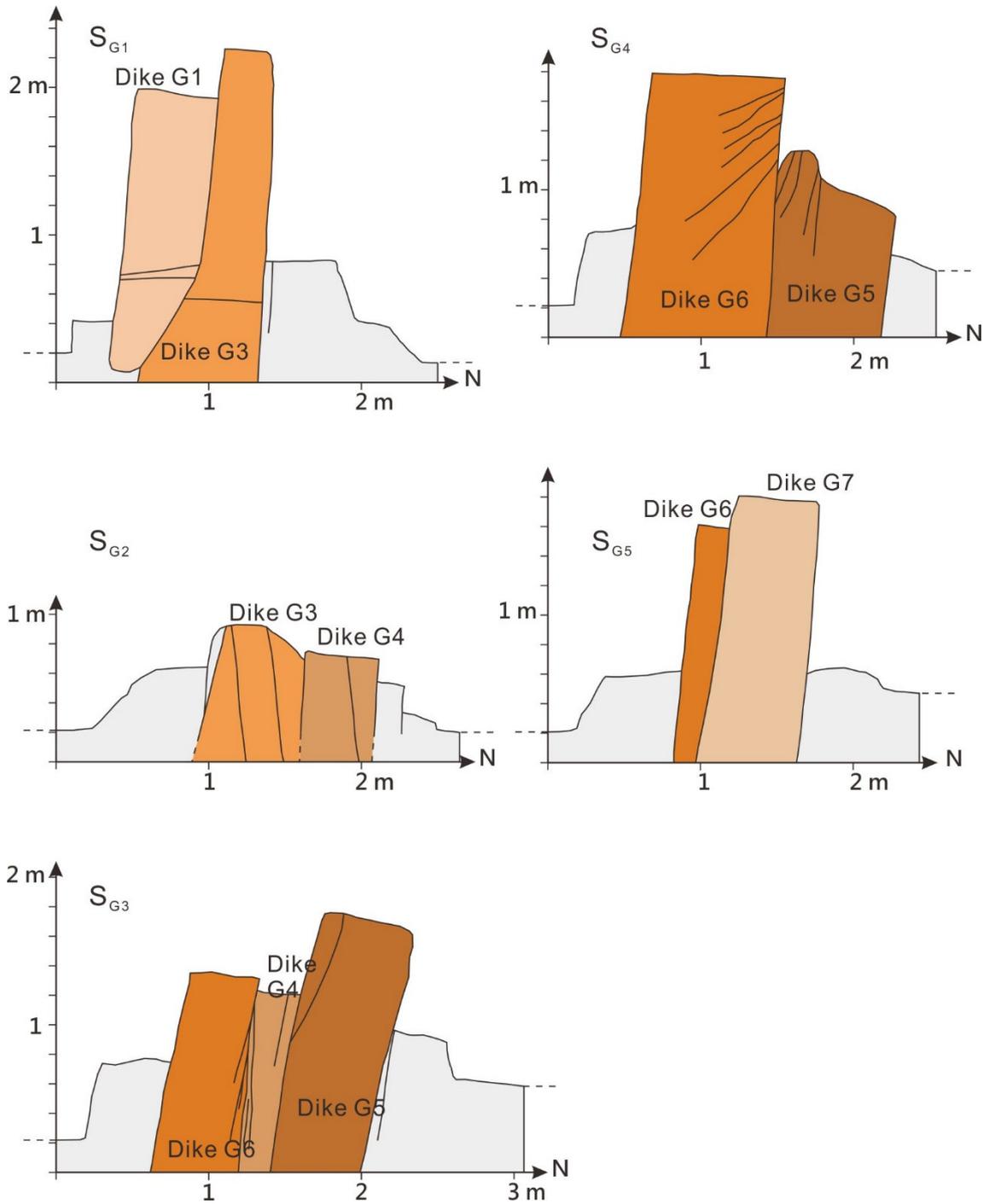


圖 5.20 岩脈 G 的南北向剖面，參自圖 5.18 的  $S_{G1} \sim S_{G5}$  剖面線。剖面  $S_{G1}$ 、 $S_{G2}$ 、 $S_{G5}$  內岩脈之間的接觸面皆為走向滑移斷層接觸面，剖面  $S_{G3}$ 、 $S_{G4}$  岩脈之間的接觸面則為正斷層接觸面。

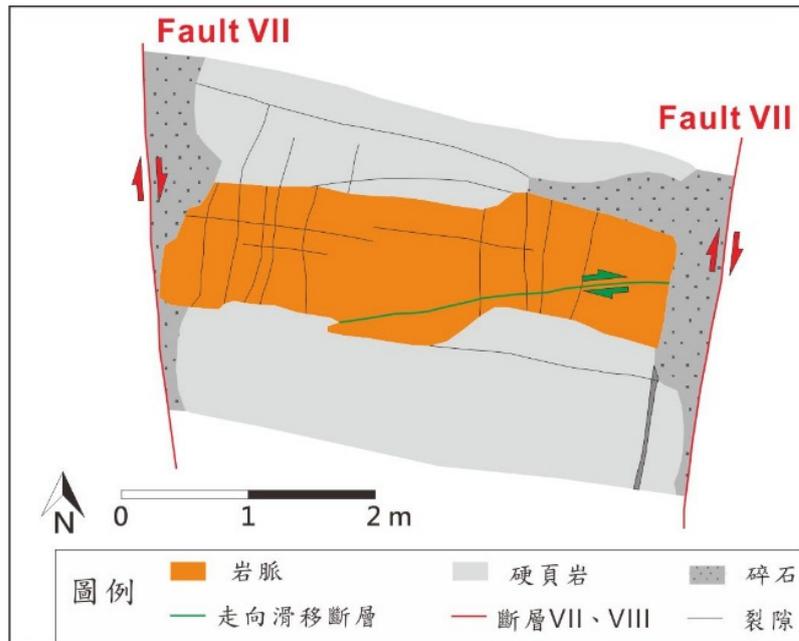


圖 5.21 岩脈 H 構造俯視圖，可見到岩脈 H 在地表面的錯位現象。



圖 5.22 岩脈 H 的構造，岩脈 H 並未凸出地表，東西兩側皆被斷層切過。

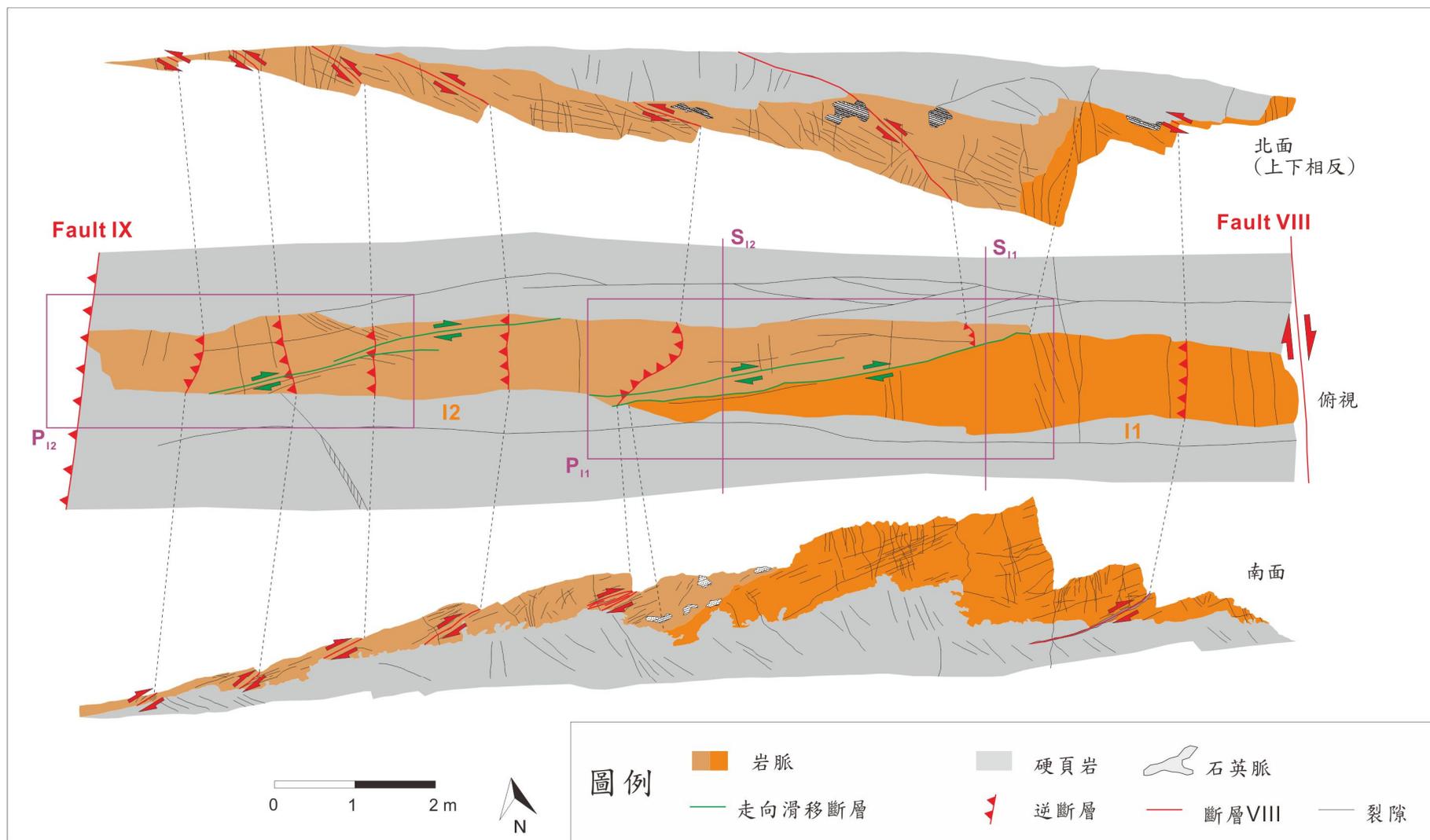


圖 5.23 岩脈 I 的構造俯視及立面圖。 $P_{I1} \sim P_{I2}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.24； $S_{I1} \sim S_{I2}$  為剖面線，剖面則位於圖 5.25。



圖 5.24 岩脈 I 的構造，參自圖 5.23 的  $P_{11} \sim P_{12}$ 。 $P_{11}$  顯示岩脈 I 上的走向滑移斷層，在走向滑移斷層與岩脈邊界的交界處，其岩脈邊界變得較為扭曲； $P_{12}$  顯示岩脈 I 上西傾的逆斷層。

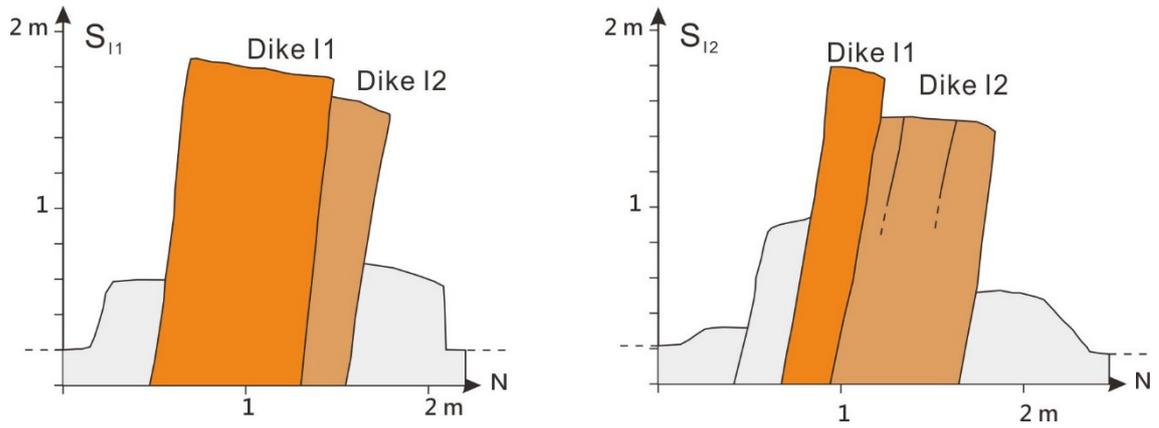


圖 5.25 岩脈 I 的南北向剖面，參自圖 5.23 的  $S_{I1} \sim S_{I2}$  剖面線。剖面上岩脈之間的接觸面為走向滑移斷層接觸。

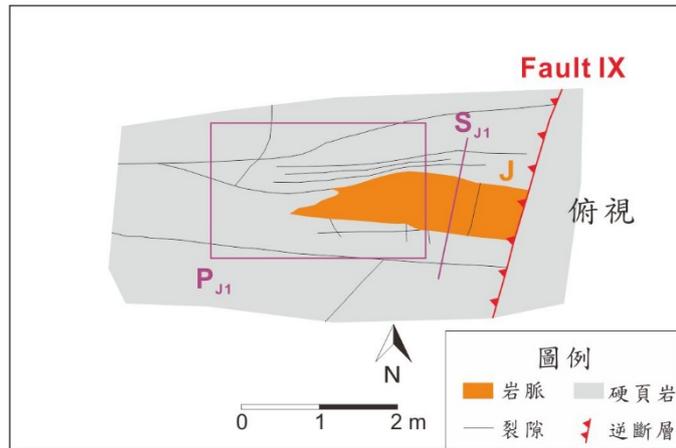


圖 5.26 岩脈 J 的構造俯視圖。 $P_{J1}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.27； $S_{J1}$  為剖面線，剖面位於圖 5.28。



圖 5.27 岩脈 J 的構造。參自圖 5.26 的  $P_{J1}$ 。岩脈的侵入末端與節理相接。

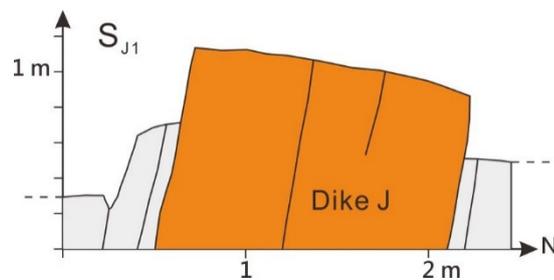


圖 5.28 岩脈 J 的南北向剖面，參自圖 5.26 的  $S_{J1}$  剖面線。

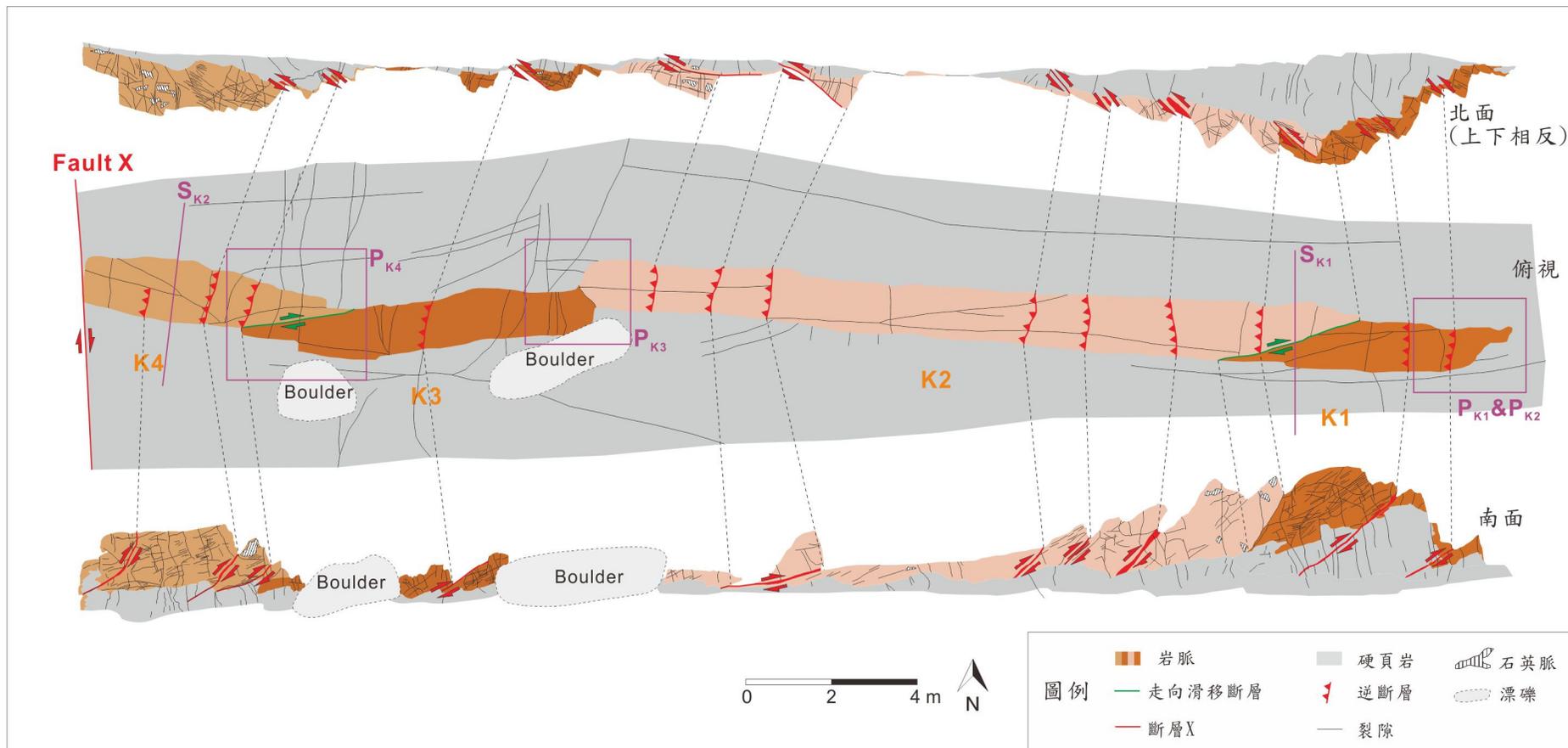


圖 5.29 岩脈 K 的構造俯視及立面圖。 $P_{K1} \sim P_{K4}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.30； $S_{K1} \sim S_{K4}$  為剖面線，剖面位於圖 5.31。



圖 5.30 岩脈 K 的構造，參自圖 5.29 的  $P_{K1} \sim P_{K4}$ 。 $P_{K1}$  顯示岩脈的錯位排列； $P_{K2}$  顯示岩脈的錯位以及分叉出來的小型侵入末端； $P_{K3}$  顯示岩脈東側末端在垂直方向上漸漸尖滅的侵入邊界； $P_{K4}$  顯示岩脈東側末端在水平方向上漸漸尖滅的侵入邊界，侵入末端有出現彎曲的現象。

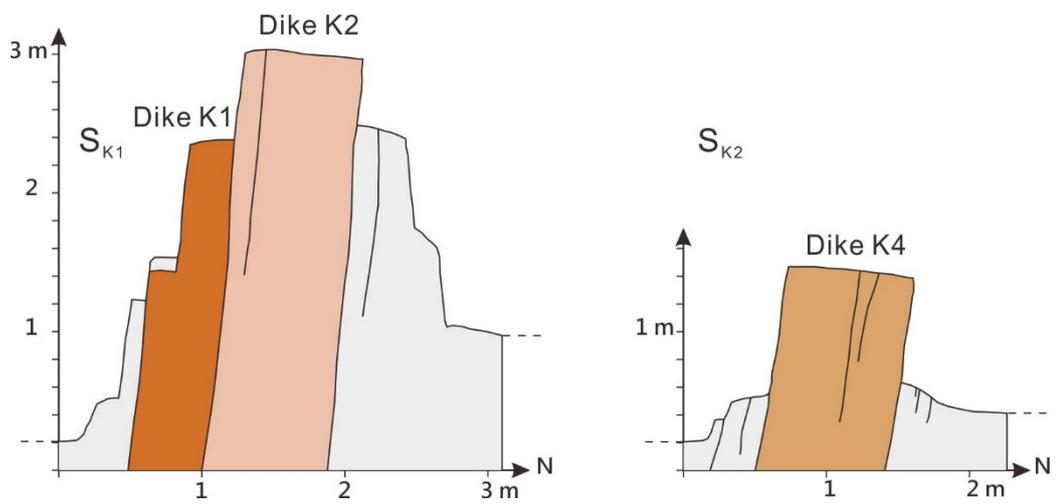


圖 5.31 岩脈 K 的南北向剖面，參自圖 5.29 的  $S_{K1} \sim S_{K4}$  剖面線。

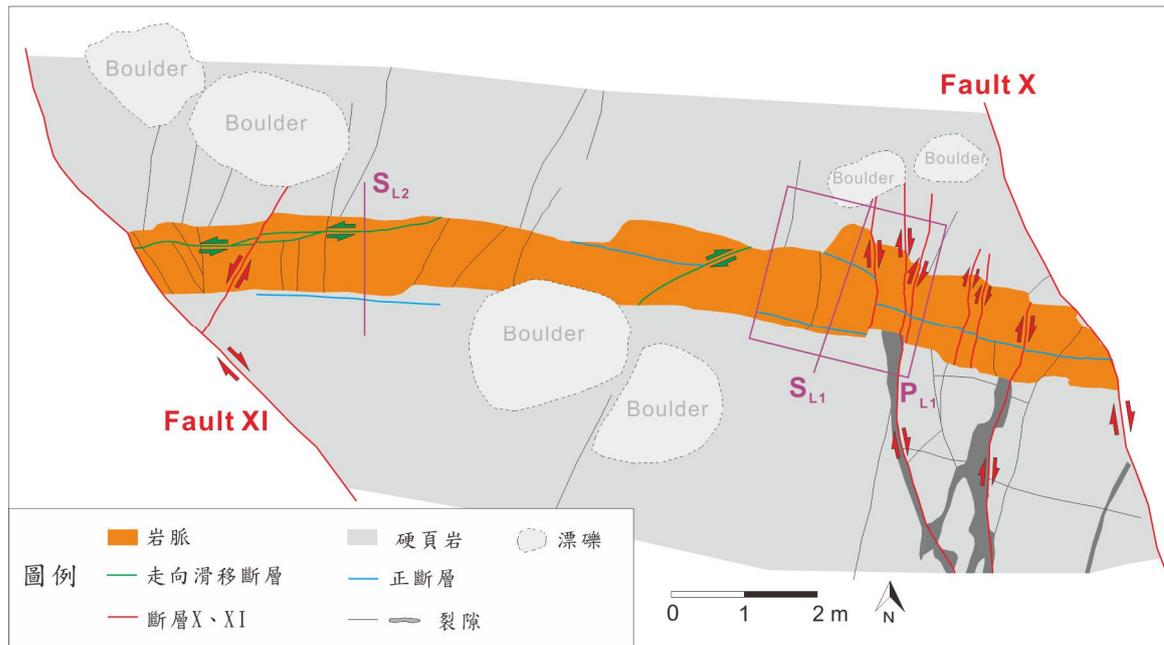


圖 5.32 岩脈 L 的構造俯視圖。 $P_{L1}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.33； $S_{L1} \sim S_{L2}$  為剖面線，剖面位於圖 5.34。岩脈 L 東側被許多南北向的小條右移斷層切過，這些斷層皆為斷層 X 的分支斷層。



圖 5.33 岩脈 L 的構造，參自圖 5.32 的  $P_{L1}$ 。圖中紅圈處顯示岩脈在垂直方向上的階梯狀邊界。

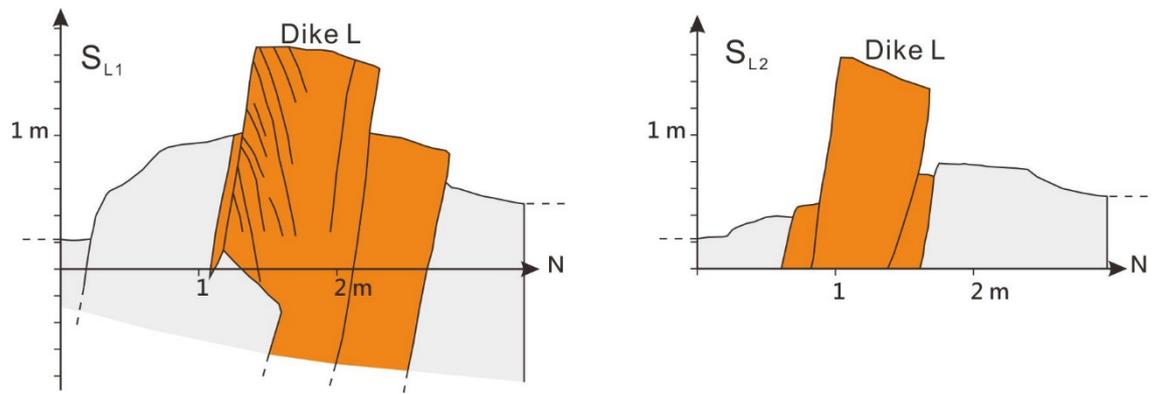


圖 5.34 岩脈 L 的南北向剖面，參自圖 5.32 的  $S_{L1} \sim S_{L2}$  剖面線。其中  $S_{L1}$  可以和圖 5.33 的  $P_{L1}$  做對比

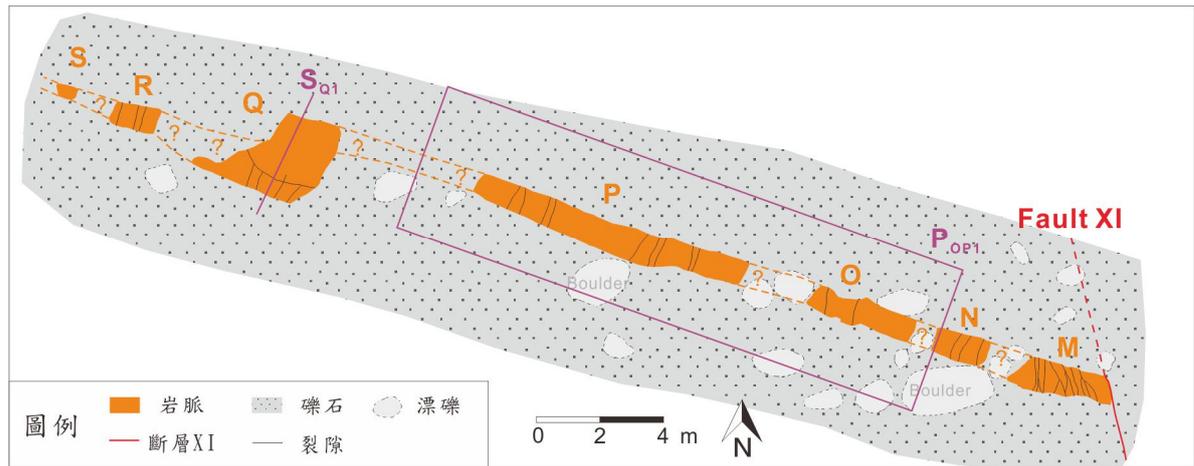


圖 5.35 岩脈 M~S 的構造俯視圖。 $P_{OP1}$  為野外照片拍攝區域，照片位於圖 5.36； $S_{Q1}$  為剖面線，剖面位於圖 5.37。圖中虛線表示岩脈在被地表堆積砂礫掩埋的情況下，所推測的分布狀況，岩脈 M~S 推測是相連的同一段岩脈。



圖 5.36 岩脈 O、P 的構造，參自圖 5.35 的  $P_{OP1}$ 。圖中顯示地表堆積砂礫清除的作業情形，藉此確認各段岩脈 M~S 之間是否相連。

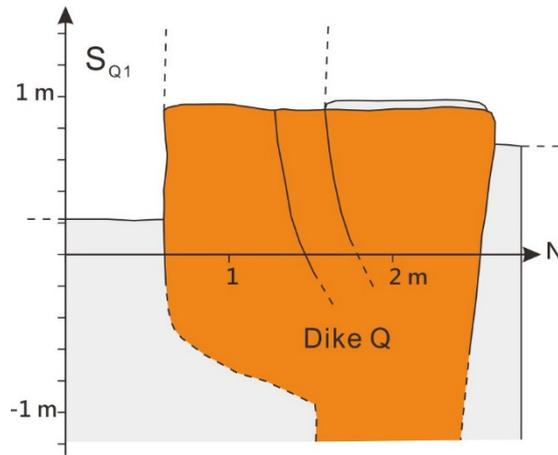


圖 5.37 岩脈 R 上的南北向剖面，參自圖 5.35 的  $S_{Q1}$  剖面線。本剖面由於地表資訊的不足，藉由判定岩脈表面是岩漿接觸邊界或是不連續裂面，推測岩脈在垂直方向上有錯位現象，虛線為推測的岩脈邊界分布。

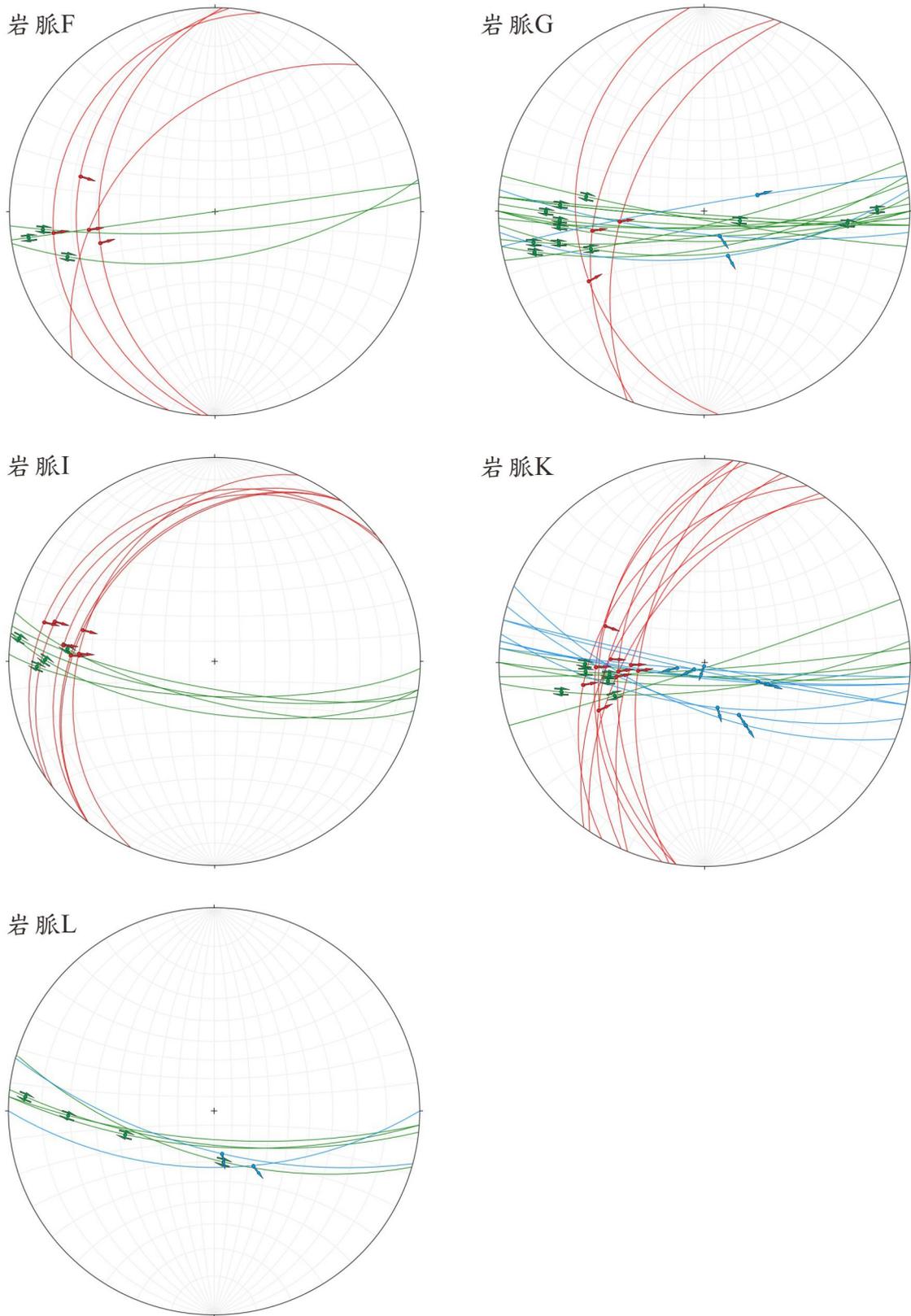
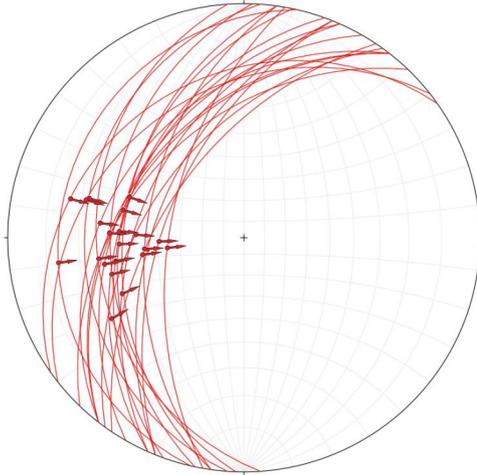
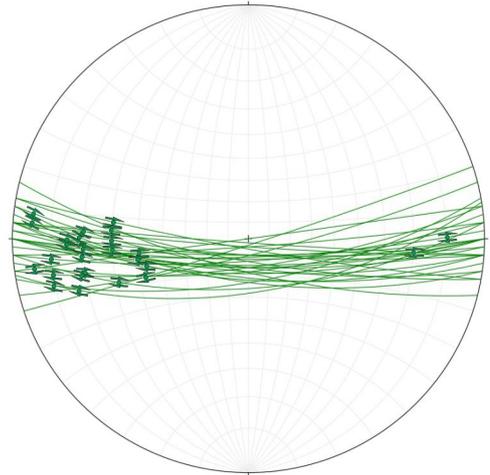


圖 5.38 岩脈 F、G、I、K、L 的斷層擦痕分析。紅線為逆斷層的擦痕分析，綠線為走向滑移的斷層擦痕分析，藍線為正斷層的斷層擦痕分析，黑點為各斷層面的極點。

(a) 逆斷層



(b) 走向滑移斷層



(c) 正斷層

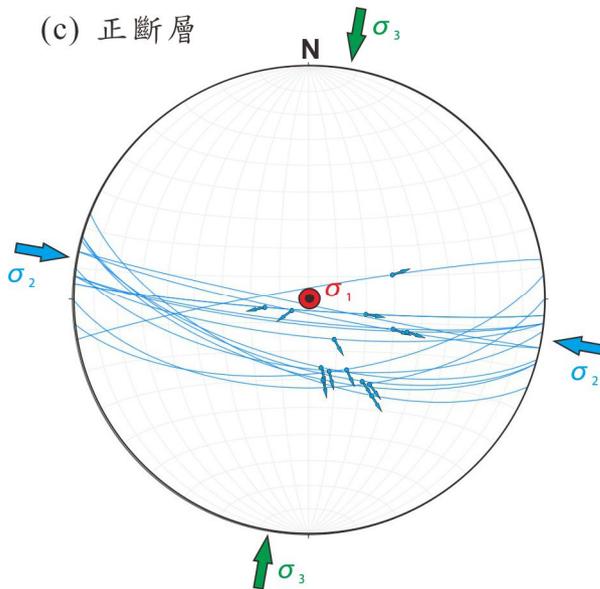


圖 5.39 所有岩脈的斷層擦痕分析及應力場推測方向。(a) 逆斷層擦痕分析 (紅色)，黑色點為各斷層的極點 (pole) (b) 走向滑移斷層擦痕分析 (綠色) (c) 正斷層擦痕分析 (藍色)。

(a)



(b)

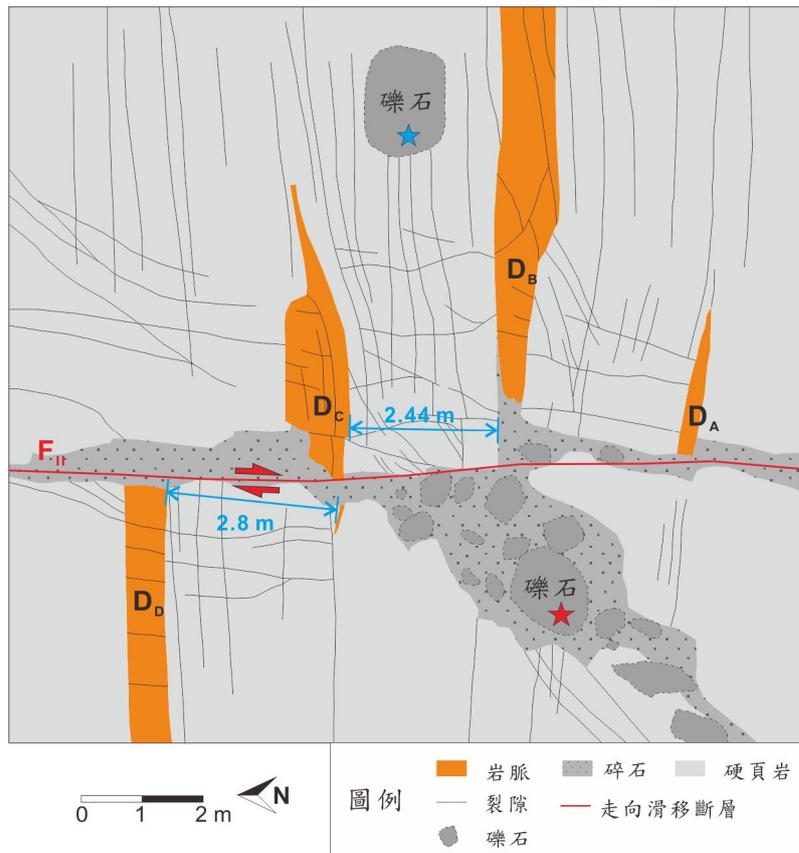


圖 5.40 斷層 (F<sub>II</sub>, fault II) 截切岩脈 (D<sub>A</sub>、D<sub>B</sub>、D<sub>C</sub>、D<sub>D</sub>, dike A、dike B、dike C、dike D) 的構造現象。(a) 野外照片 (b) 構造地質圖。

(a)



(b)

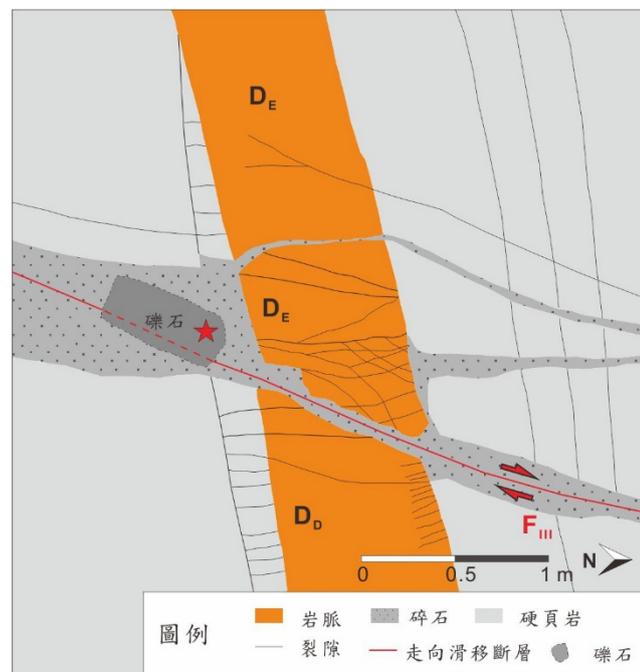


圖 5.41 斷層 ( $F_{III}$ ) 截切岩脈 ( $D_D$ 、 $D_E$ ) 的構造現象。(a) 野外照片 (b) 構造地質圖。

(a)



(b)

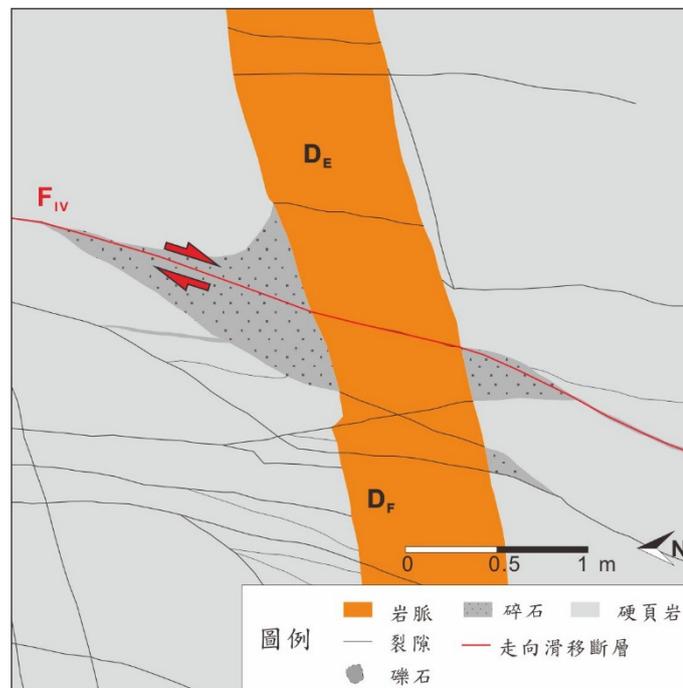


圖 5.42 斷層 (F<sub>IV</sub>) 截切岩脈 (D<sub>E</sub>、D<sub>F</sub>) 的構造現象。(a) 野外照片 (b) 構造地質圖。

(a)



(b)

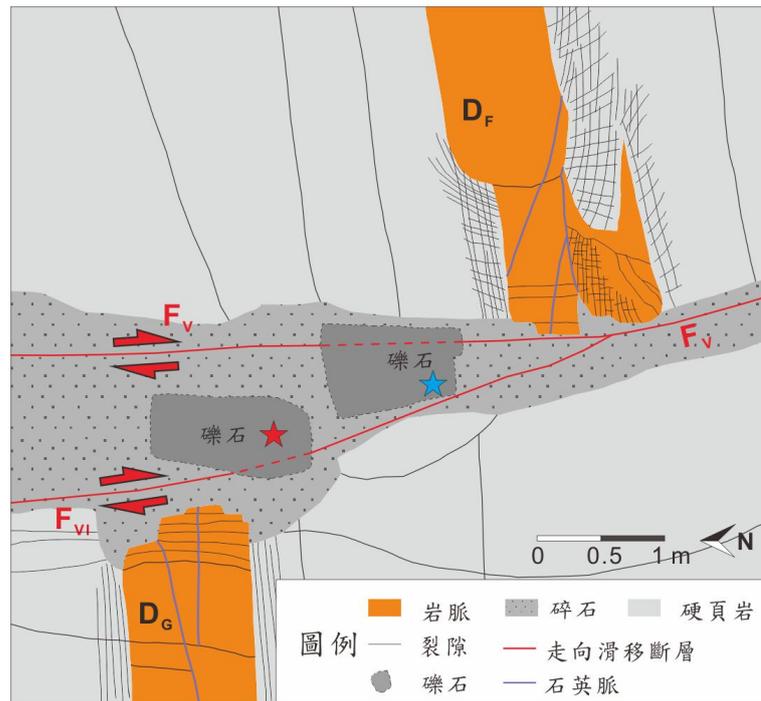
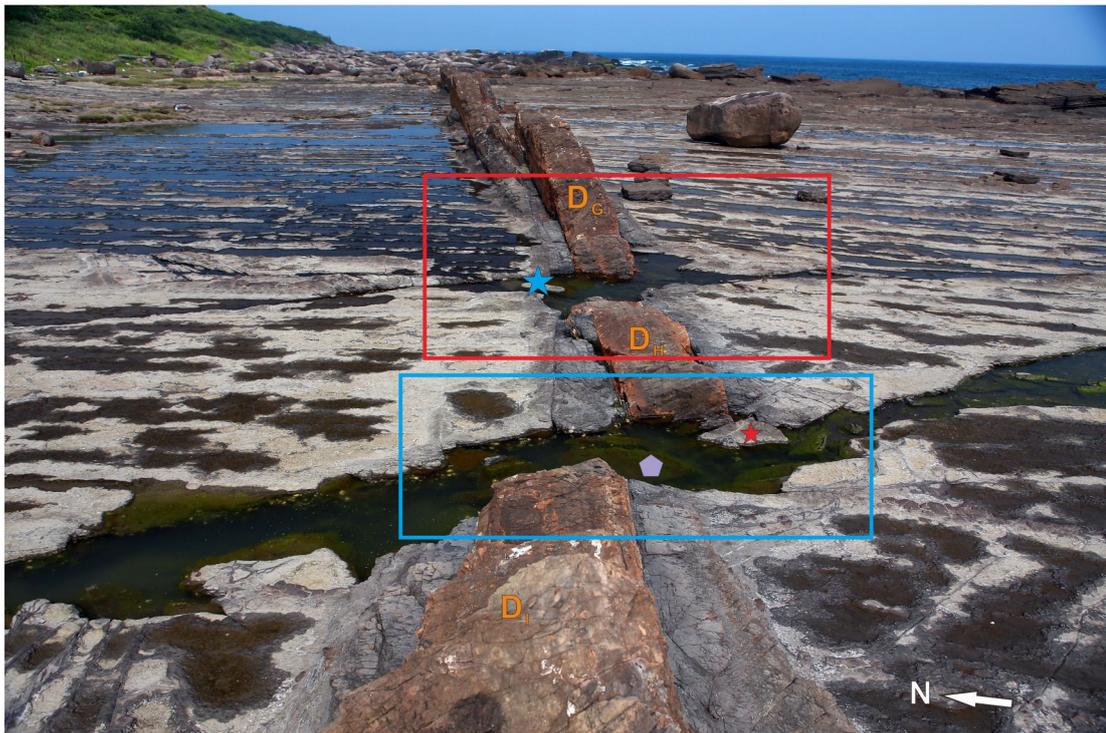


圖 5.43 斷層 ( $F_V$ 、 $F_{VI}$ ) 截切岩脈 ( $D_F$ 、 $D_G$ ) 的構造現象。(a) 野外照片  
(b) 構造地質圖。

(a)



(b)

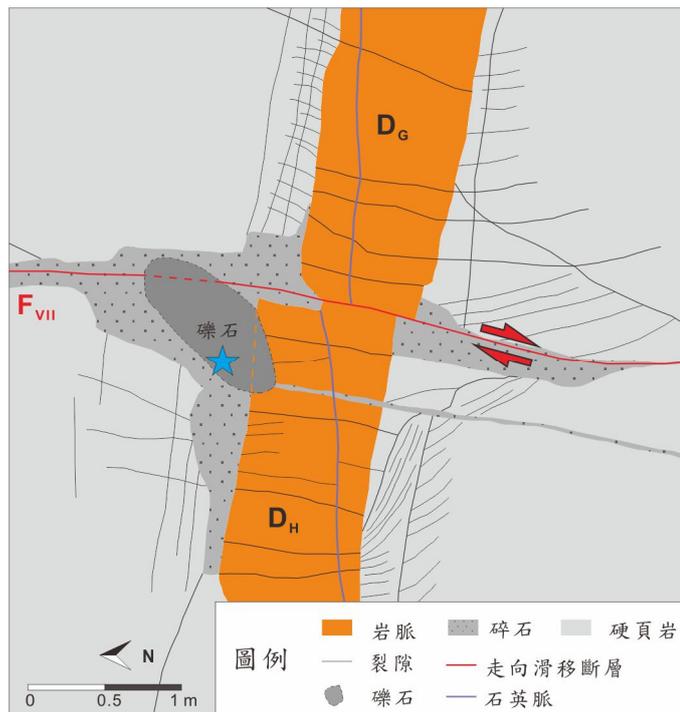


圖 5.44 斷層 (F<sub>VII</sub>、F<sub>VIII</sub>) 截切岩脈 (D<sub>G</sub>、D<sub>H</sub>、D<sub>I</sub>) 的構造現象。(a) 野外照片 (b) 構造地質圖 (F<sub>VII</sub>)，位於圖(a)的紅框處。

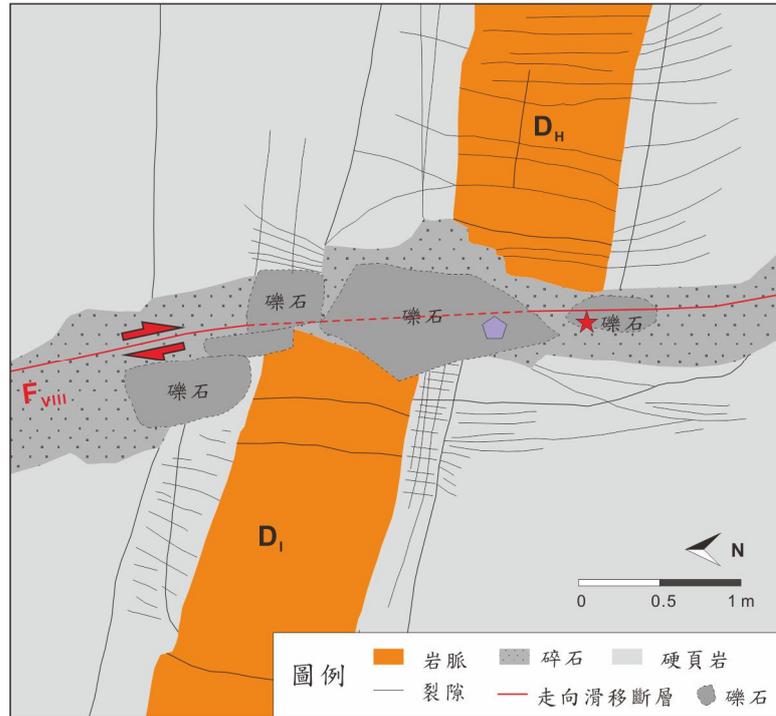
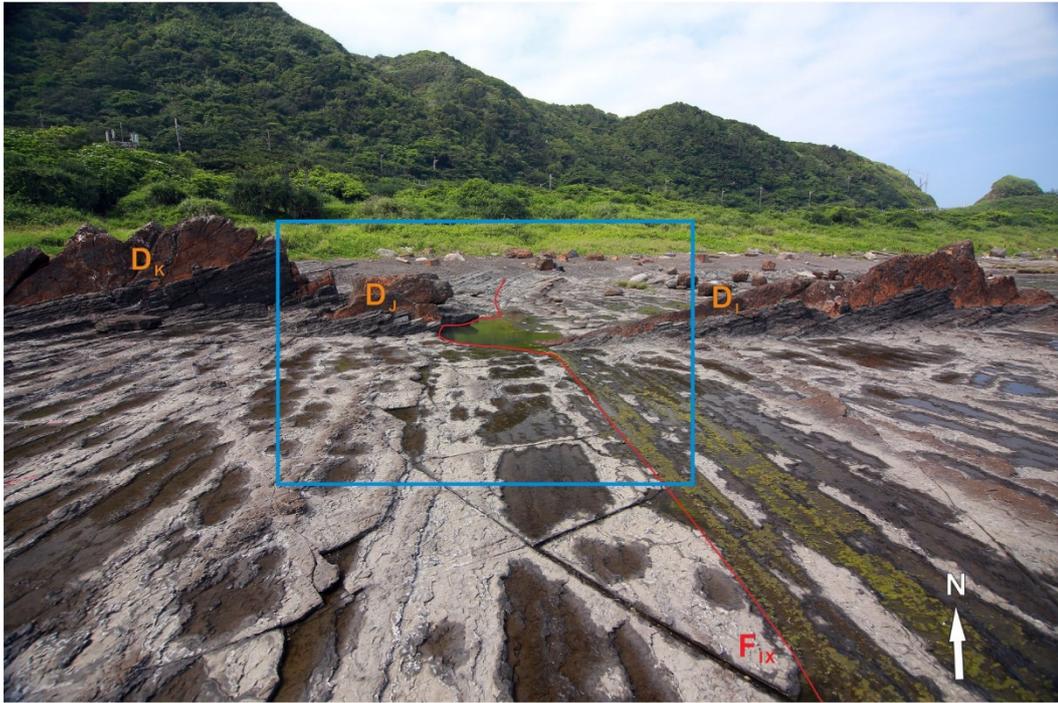


圖 5.45 構造地質圖 (FVIII) ，位於圖 5.44 (a) 的藍框處。

(a)



(b)

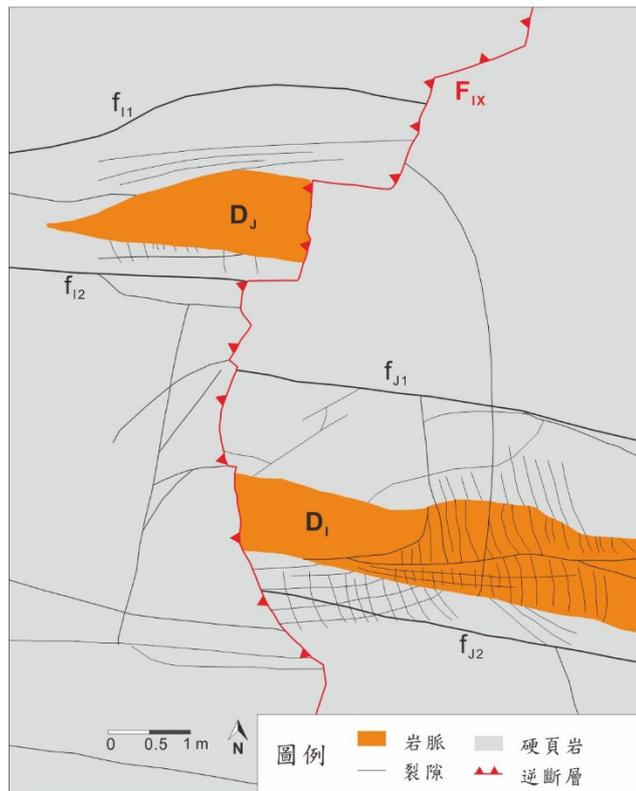
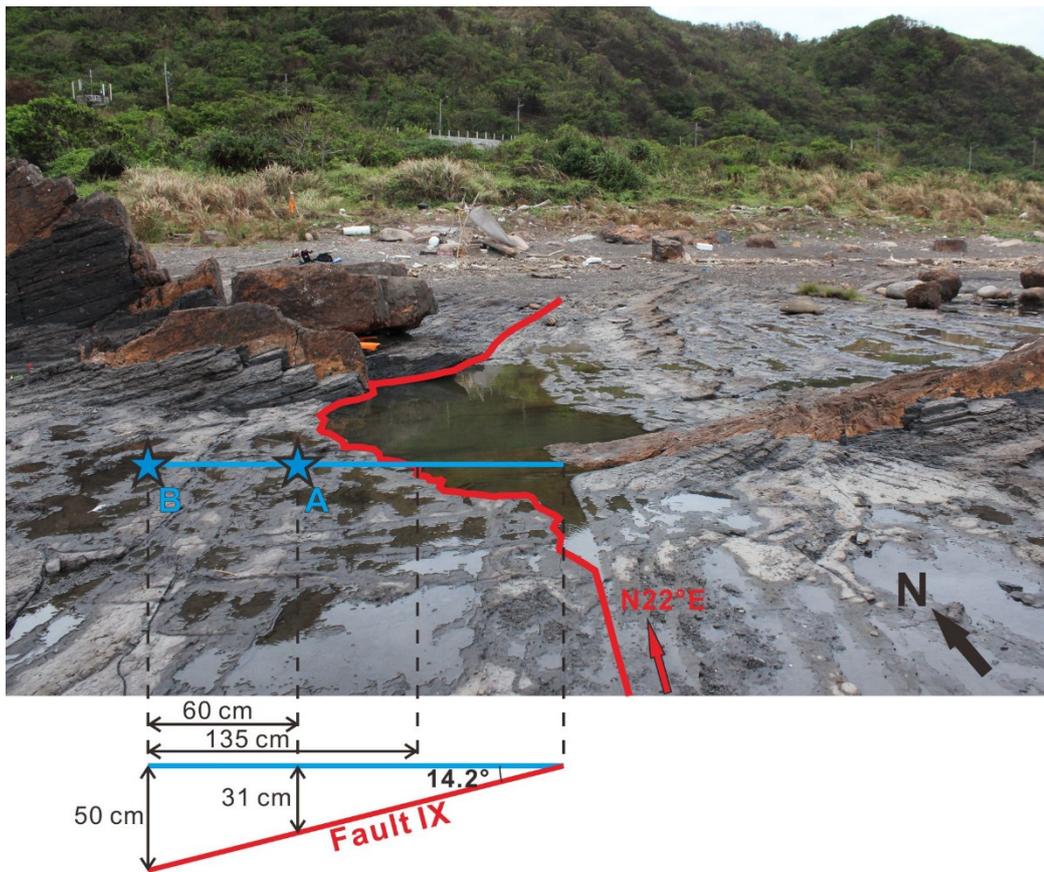


圖 5.46 斷層 ( $F_{IX}$ ) 截切岩脈 ( $D_I$ 、 $D_J$ ) 的構造現象。(a) 野外照片 (b) 構造地質圖， $D_I$  與  $D_J$  的南北側分別有  $f_{J1}$  (節理 1)、 $f_{J2}$  (節理 2) 可以相對照。

(a)



(b)



圖 5.47 藉由鑽孔來判斷斷層 IX 的位態。(a) 斷層 IX 傾角計算作圖，藍色星星分別代表鑽孔 A、鑽孔 B (b) B 點的鑽孔過程。



圖 5.48 斷層 ( $F_x$ ) 截切岩脈 ( $D_K$ 、 $D_L$ ) 的構造現象。



圖 5.49 斷層 ( $F_{xI}$ ) 截切岩脈 ( $D_L$ 、 $D_M$ ) 的構造現象。

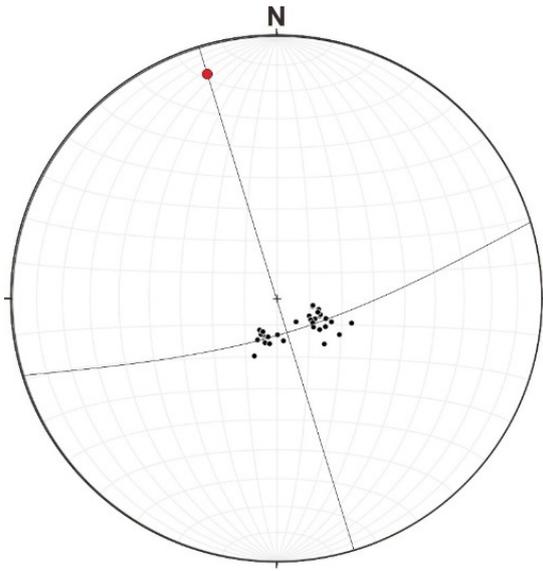


圖 5.50 萊萊海蝕平台西側北傾向斜。



圖 5.51 萊萊海蝕平台東側北傾背斜。

(a)



(b)

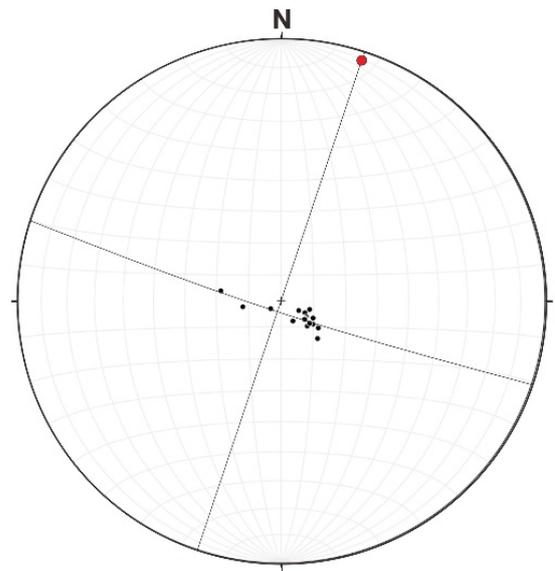


圖 5.52 萊萊海蝕平台地層位態分布及褶皺分析，從地層極點的分布情況來看，褶皺兩翼的地層位態相當一致，顯示兩翼地層相當平直。(a) 萊萊海蝕平台西側層面極點分布 (b) 萊萊海蝕平台東側層面極點分布。

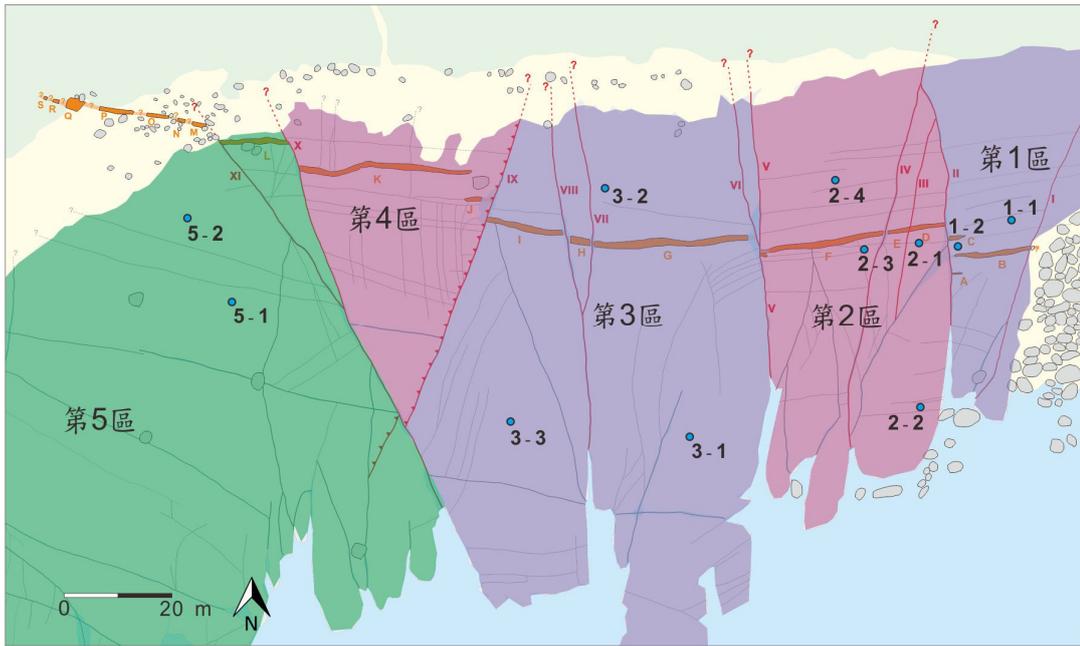


圖 5.53 節理圓取樣點分布與平台上圍岩的分區。藍紫色、紫色、綠色色塊依序由東自西分別為第 1~5 區。

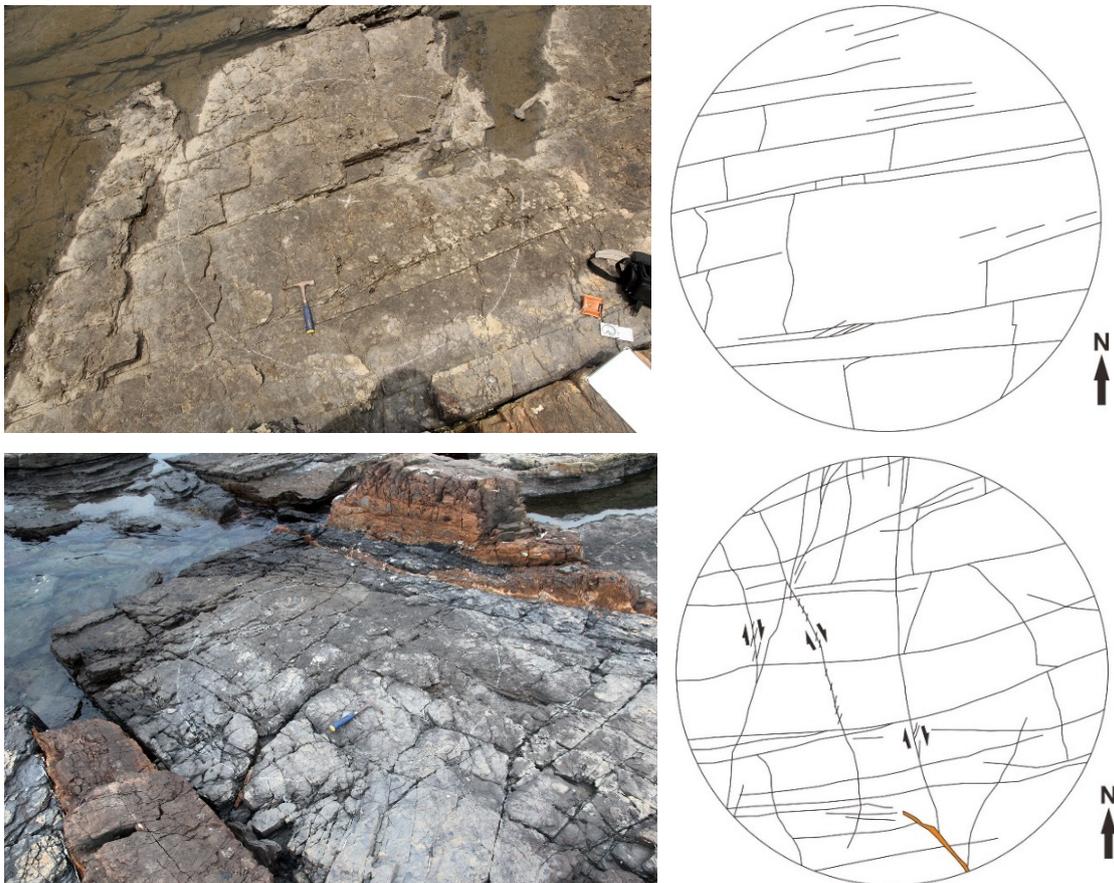


圖 5.54 取樣站 1-1、1-2 (由上至下)。

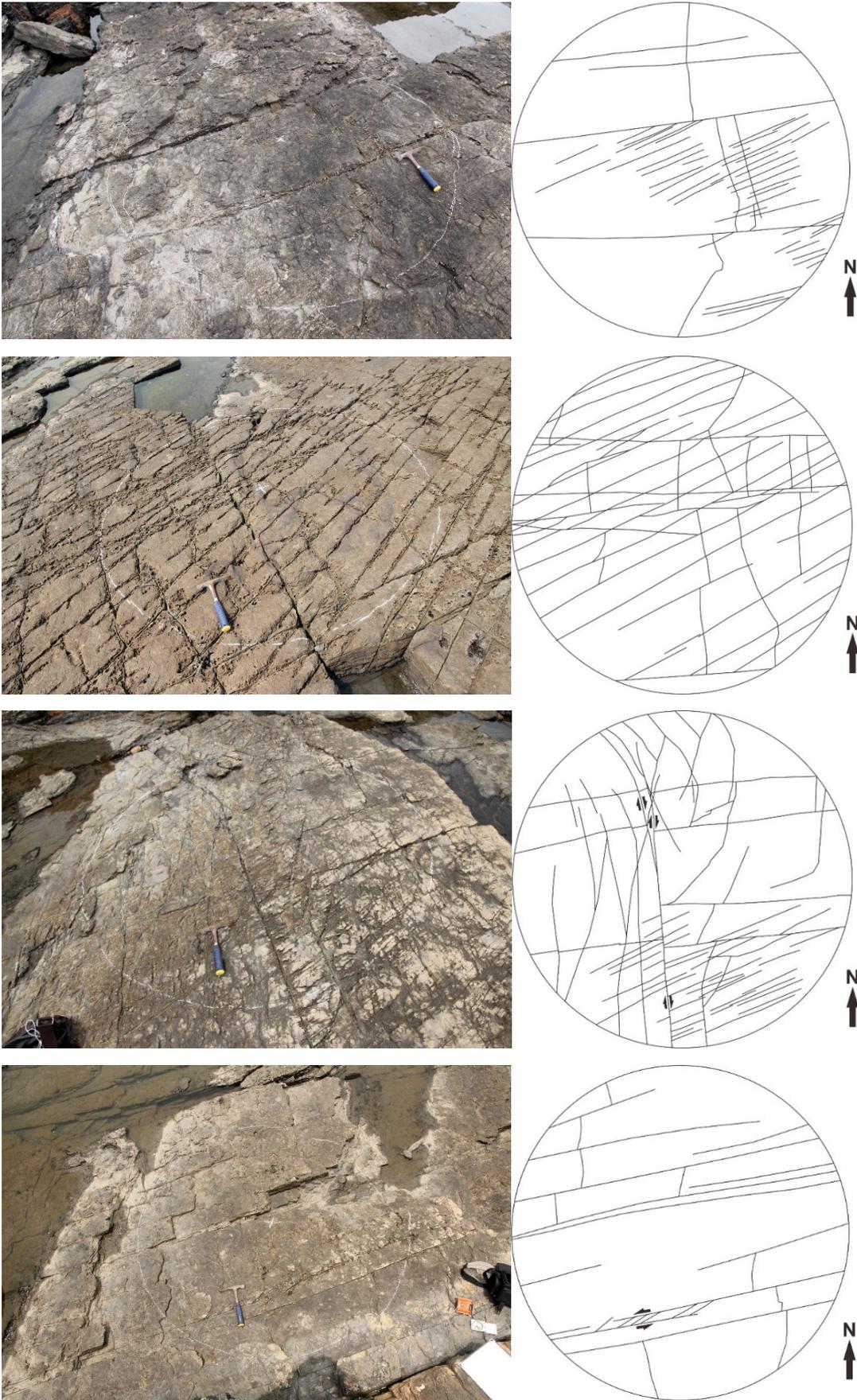


圖 5.55 取樣站 2-1、2-2、2-3、2-4 (由上至下)。

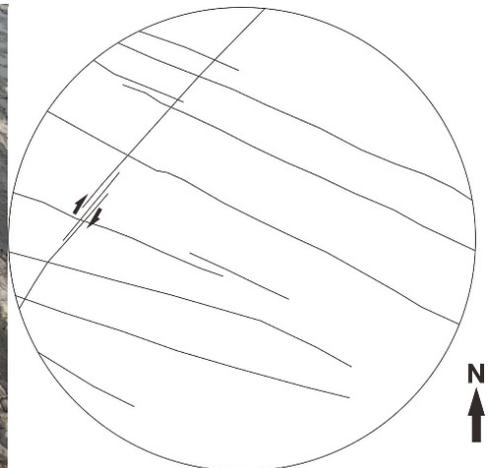
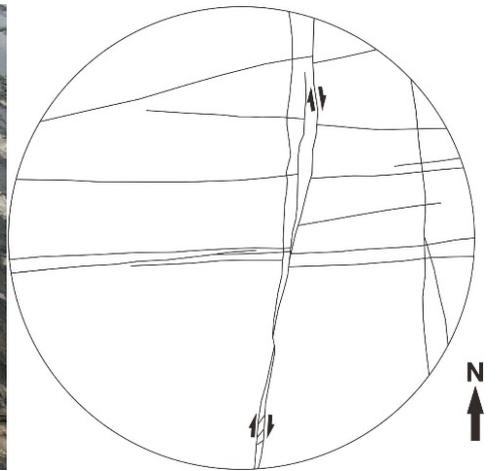
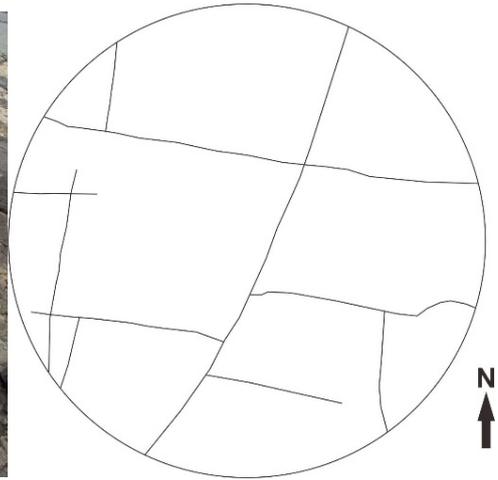


圖 5.56 取樣站 3-1、3-2、3-3 (由上至下)。

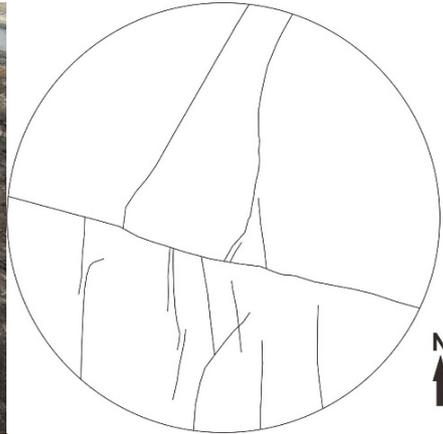


圖 5.57 取樣站 5-1、5-2 (由上至下)。

### 5.3 地電阻影像剖面解釋

由於地表被沉積物覆蓋或岩石受風化作用等因素，有時地表露頭所能提供的構造資訊相當有限；或是在垂直方向上有劇烈變化的構造（如岩脈、岩性變化劇烈的地層），使得地表上所觀察的構造現象和地下有所差異，這些問題可以使用經地電阻測量所得到的地電阻影像剖面，判斷地下的構造分布來解決前述問題。在本研究，藉由地電阻影像剖面能夠確認岩脈在地下是否持續向下延伸，以及斷層 IX 在地下的位態以及延伸情形，更進一步的去計算出斷層面的錯動方向和錯距。

為了確認岩脈在地下的延伸狀況，將三道南北向地電阻測線安排在受斷層作用影響較小的岩脈 H、G 上，測線彼此間距為 11 公尺，由東至西分別為 L1、L2、L3（圖 5.59）。從地電阻影像剖面 L1、L2 可發現（圖 5.60），岩脈 G 往地下延伸至少 15 公尺並維持垂直，證實萊萊煌斑岩在地表上以及地表下皆以岩脈的形式存在。而地電阻影像剖面 L3 並未出現如 L1、L2 岩脈向下延伸的構造，應為 L3 沿線位於斷層 VII、VIII 上，岩脈 H 的岩體因而較為破碎，海水較易沿著裂隙進入，使得高阻的岩脈訊號較不明顯，最後在剖面 L3 無法清楚顯示岩脈 H 的地下訊號。

在前面 5.2.3 章節，已藉由鑽孔的方式估計斷層 IX 位態，本章節則基於地電阻影像剖面中的岩脈分布，來計算斷層 IX 在地下的位態，最後和地表調查得到的位態來做對比。從剖面 L4 可發現岩脈 K 往地下延伸 4.5~5 公尺隨即中止（圖 5.60），顯示斷層 IX 在地下有向西延伸到岩脈 K 的下方並切過岩脈 K，使得岩脈 K 在地下沒有根，依此計算出斷層 IX 傾角為  $14^{\circ}$ （圖 5.61），與用鑽孔測深方式計算得出的傾角相同。

計算斷層 IX 的錯動方向和錯距，藉由野外實際鑽孔確認岩脈 I 在斷層 IX 的下盤中依然持續向西延伸，而從地電阻影像剖面 L4 中，發現岩脈 I 的訊號存在（圖 5.60 中 L4 剖面的紅色方框），因此估計岩脈 I 通過斷層 IX 後

向西延伸至少 16 公尺以上，岩脈 I 末端與岩脈 J 末端屬於同一道岩脈的末端。而後測量岩脈 I 末端和岩脈 J 末端之間的相對位置，我們得到斷層 IX 的上盤錯動方向為  $N86^{\circ}E \sim N90^{\circ}E$  之間，錯距至少 13.9 m 以上，斷層面的 Strike/ dip/ rake 為  $N22^{\circ}E/ 14^{\circ}W/64^{\circ}$ ，顯示斷層 IX 是帶有右移分量的逆斷層。另外，斷層 IX 的 Strike/ dip/ rake 和岩脈中的逆斷層一致 (圖 5.39 a)，顯示岩脈上的逆斷層和斷層 IX 是在同樣的應力狀態下形成。

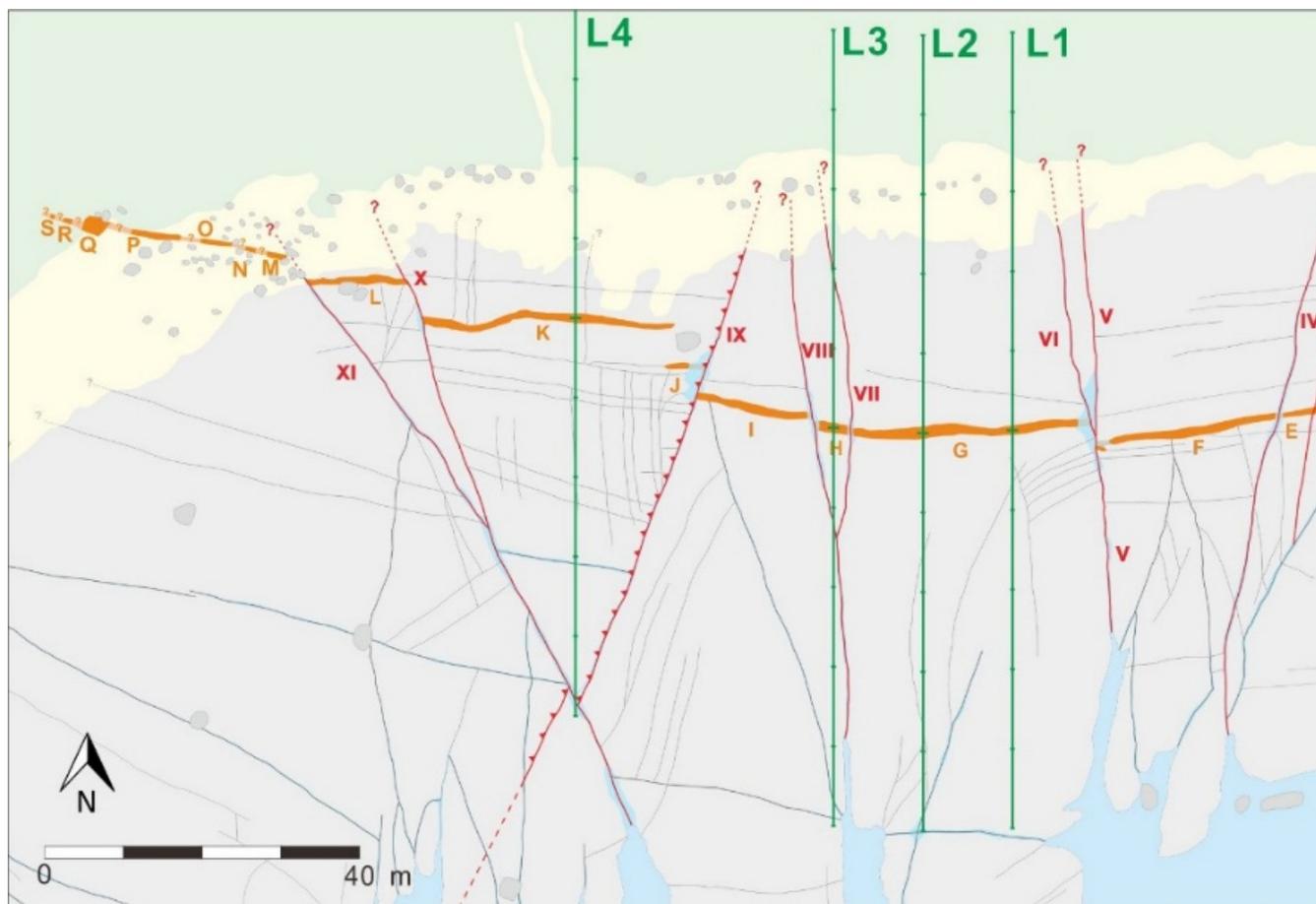


圖 5.59 地電阻測線分布，測線皆為南北向，由東向西依序為測線 L1、L2、L3、L4。每條測線全長皆為 100 公尺，50 公尺處為岩脈位置，在一條測線中，每根電極間距為 1 公尺。

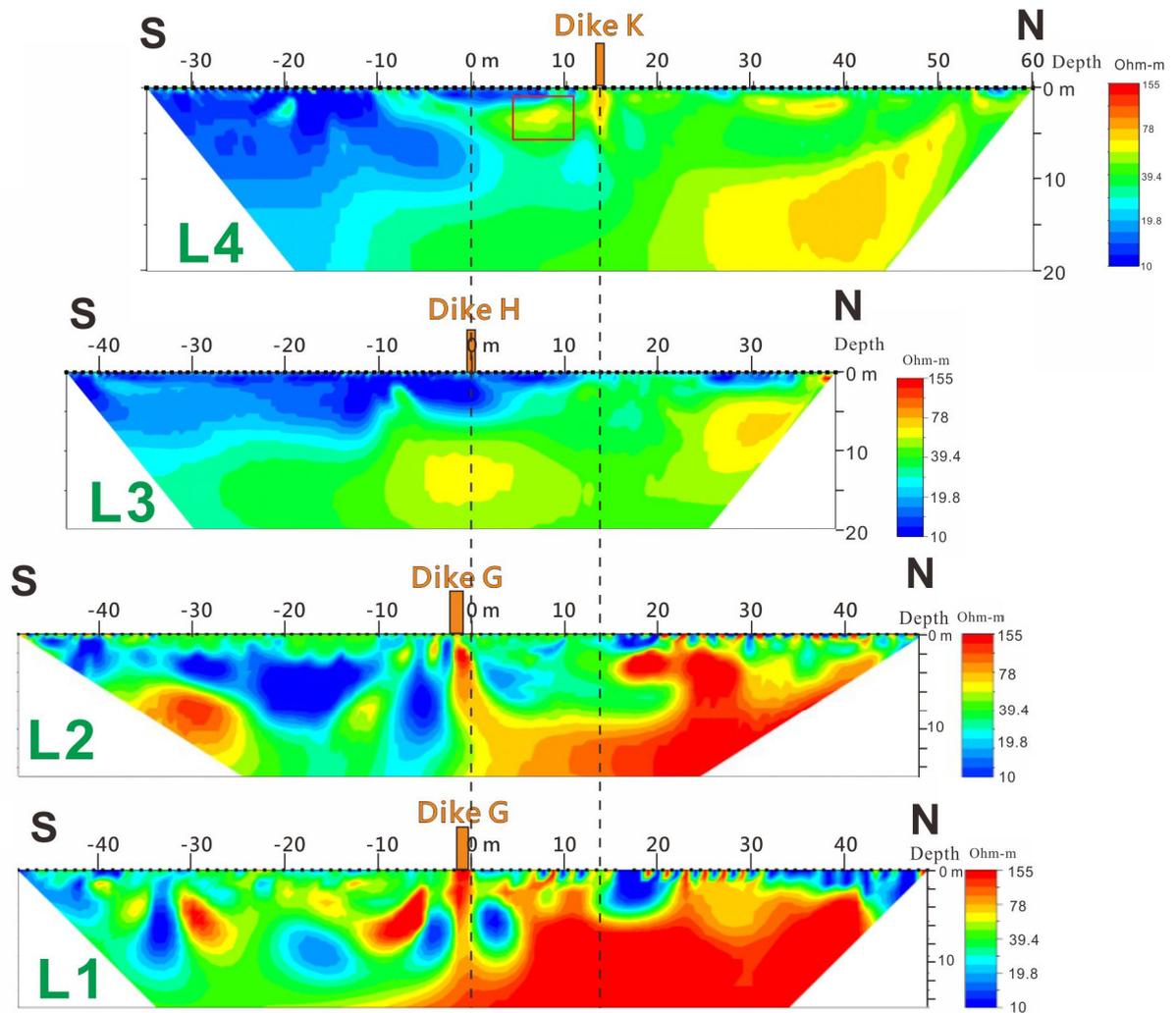


圖 5.60 L1~L4 測線的地電阻影像剖面。從 L1、L2 剖面可發現岩脈皆有往下延伸至少 15 公尺；在 L3 剖面則沒有看到岩脈往下延伸的訊號，可能由於斷層令岩體較為破碎，海水滲入使得岩脈訊號不明顯；L4 剖面中岩脈 K 僅往下延伸 5 公尺即中斷，推論被斷層 IX 所截切，圖中紅框為岩脈 I 的訊號。

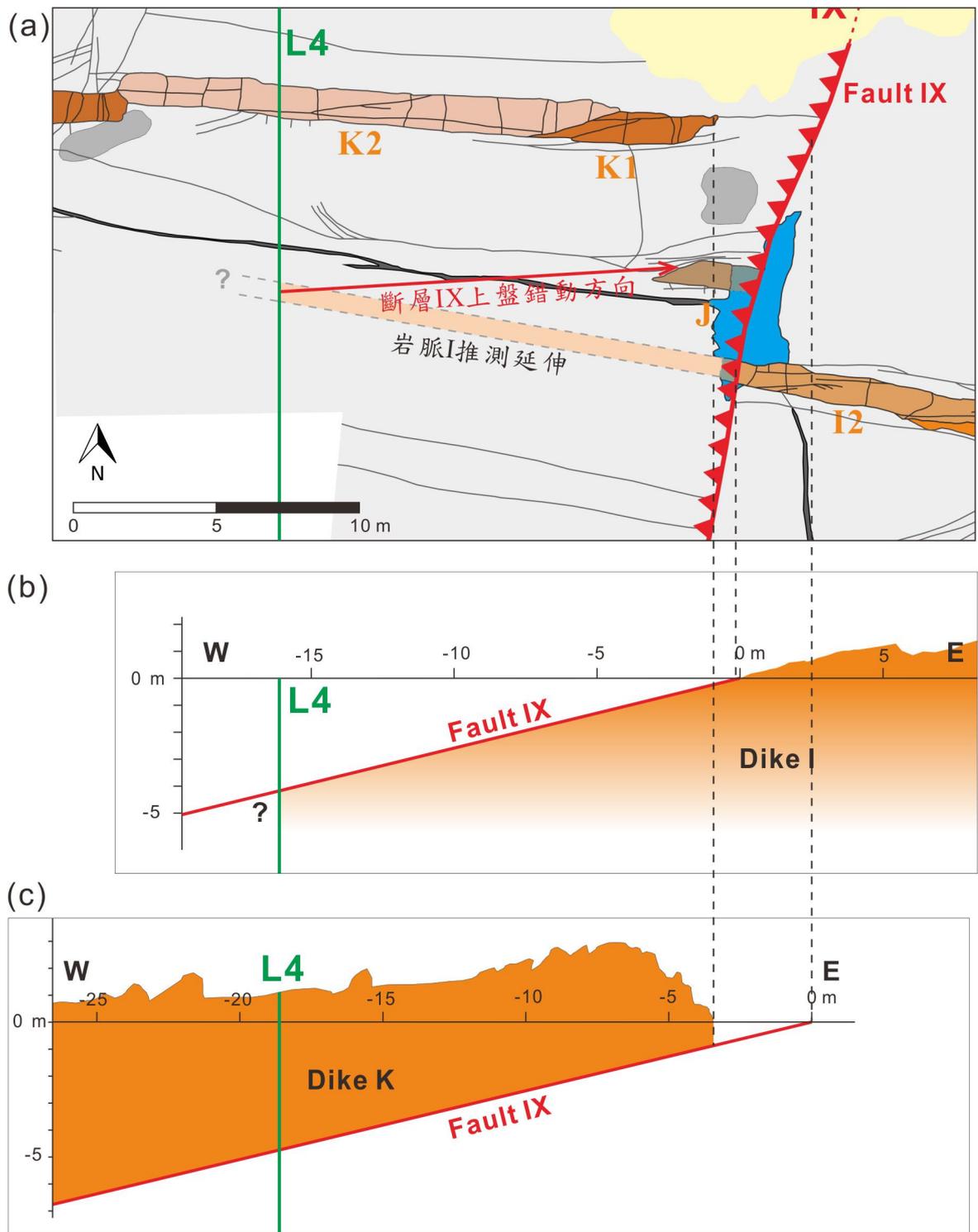


圖 5.61 斷層 IX 的延伸情形、錯距、錯動方向估計。(a) 岩脈 I 往西延伸長度的推估，以及斷層 IX 上盤的錯動方向和錯距推估 (b) 岩脈 I 的東西向投影剖面 (c) 岩脈 K 的東西向投影剖面。

## 第六章 討論

### 6.1 岩脈與圍岩之間的構造關聯性

在 5.2 節已統整研究區域中岩脈及圍岩上的構造現象觀察，岩脈上的構造現象有：南北走向低角度西傾的逆斷層、東西走向與岩脈走向夾低角度的走向滑移斷層、階梯狀的岩脈圍岩接觸邊界、東西走向與岩脈走向近似的正斷層、南北走向垂直的張裂節理。圍岩上的構造現象有：東西走向高傾角的節理、南北走向帶有右剪性質的節理組、南北走向垂直切穿岩脈的右移斷層、北傾的向斜與背斜褶皺。本節將分析哪些構造是在同一個應力狀態或構造階段下形成。

#### 1. 岩脈上的逆斷層、斷層 IX 與褶皺

在 5.2 節對於岩脈上逆斷層的觀察，發現岩脈上的逆斷層在斷層 IX 附近分布較密集，而較高傾角的逆斷層只出現在斷層 IX 上盤的岩脈上，低傾角的逆斷層在所有岩脈上皆有分布（圖 6.1）。在 5.3 節結合地電阻影像剖面，得出斷層 IX 的位態與錯動方向和岩脈上的逆斷層一致，兩者是在同一個時期的應力作用下形成。野外測量發現斷層 IX 與層面有相同的位態，另根據 5.3 節的結果，斷層 IX 是帶有右移分量的逆斷層，其滑動方向大致與褶皺軸走向成正交關係，這些證據顯示斷層 IX 應是褶皺形成後期所產生的層間滑動，並錯開岩脈 I、J，李錫堤 (1986) 認為逆斷層可能是褶皺作用後期產生的，與本研究的推論相符。

根據野外的褶皺位態分析以及構造地質圖（圖 5.1），萊萊海蝕平台地層中的褶皺為南北向，由南往北呈現發散的現象；褶皺軸往北傾沒約 3~9 度，開口越往北越寬，在空間上為由南往北向外散佈的構造（圖 6.3）。斷層 IX

的右移分量為褶皺向北擠出時所產生的層間滑動平衡，符合本區褶皺在運動學上的形貌 (圖 6.4)。

## 2. 圍岩上南北向右移斷層與岩脈塊體旋轉

根據各岩脈的資訊整理 (表 5.1) 以及岩脈中的斷層擦痕分析 (圖 5.38、圖 5.39)，各段被南北向右移斷層切過的岩脈，其走向隨著往西有順時鐘旋轉的趨勢，並在海蝕平台上呈現弧狀的排列，推測一系列被南北向右移斷層分割的地塊在右移斷層錯動的同時產生順時針的塊體旋轉 (Lu et al., 1995；圖 6.5)，使得岩脈一同產生旋轉。而在附近的海蝕平台亦發現由一連串相同走向的右移斷層所造成的塊體旋轉。

## 3. 萊萊煌斑岩脈的北傾與鶯仔瀨向斜的關聯性

萊萊位於鶯仔瀨向斜的南翼，煌斑岩脈呈現高角度南傾為受此褶皺作用所影響。根據投影圓分析 (圖 6.6 a)，萊萊煌斑岩脈與周遭岩層層面夾  $81^\circ$ ，兩者接近垂直接觸關係，依此推估煌斑岩脈在形成時是幾乎垂直於地表的。根據雙溪地質圖，整個萊萊地層往北傾了 13 度左右，我們將鶯仔瀨向斜的褶皺作用還原後發現岩脈傾角接近垂直，平台上的向斜軸亦大致變為水平 (圖 6.6 b)，因此岩脈的傾斜是由於鶯仔瀨向斜的形成所造成，而不是海蝕平台上的區域褶皺。

## 4. 萊萊海蝕平台與區域構造的關聯

Lu et al. (1995) 和 Lu & Malavieille (1994) 認為台灣北部在蓬萊造山運動期間，先經歷過擠縮變形階段，形成逆斷層與褶皺；之後進入橫斷變形階段，產生平移斷層與正斷層並形成逃脫構造；最後進入旋轉變形階段，伴隨著密集的橫移斷層，斷層之間的地塊產生塊體旋轉 (圖 6.5)。台灣東北部一連串東北-西南走向的逆斷層與褶皺，和萊萊海蝕平台上的南北向右移斷

層、走向旋轉的岩脈，皆同屬於板塊聚合時期的構造事件。

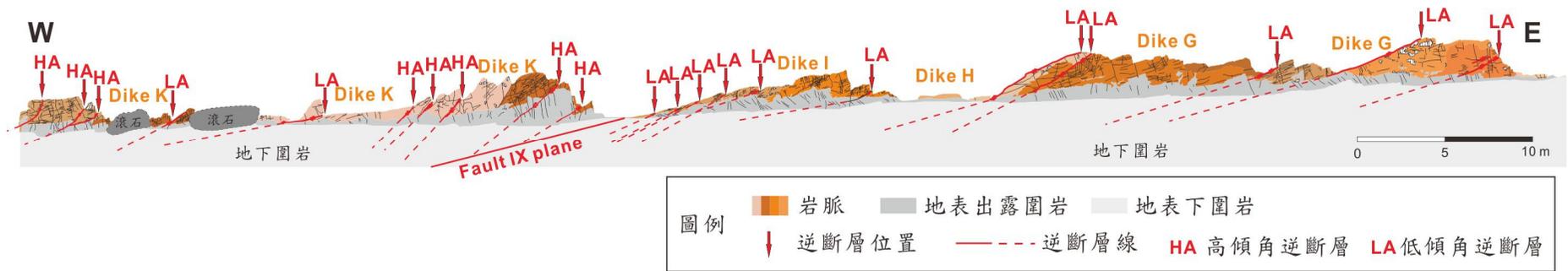


圖 6.1 岩脈 G、H、I、K 與斷層 IX 在東西向鉛直面上的投影。岩脈上的逆斷層在斷層 IX 附近分布的較為密集，其中高傾角的逆斷層僅在斷層 IX 上盤的岩脈上發現，斷層 IX 下盤的岩脈上僅有低傾角的逆斷層。

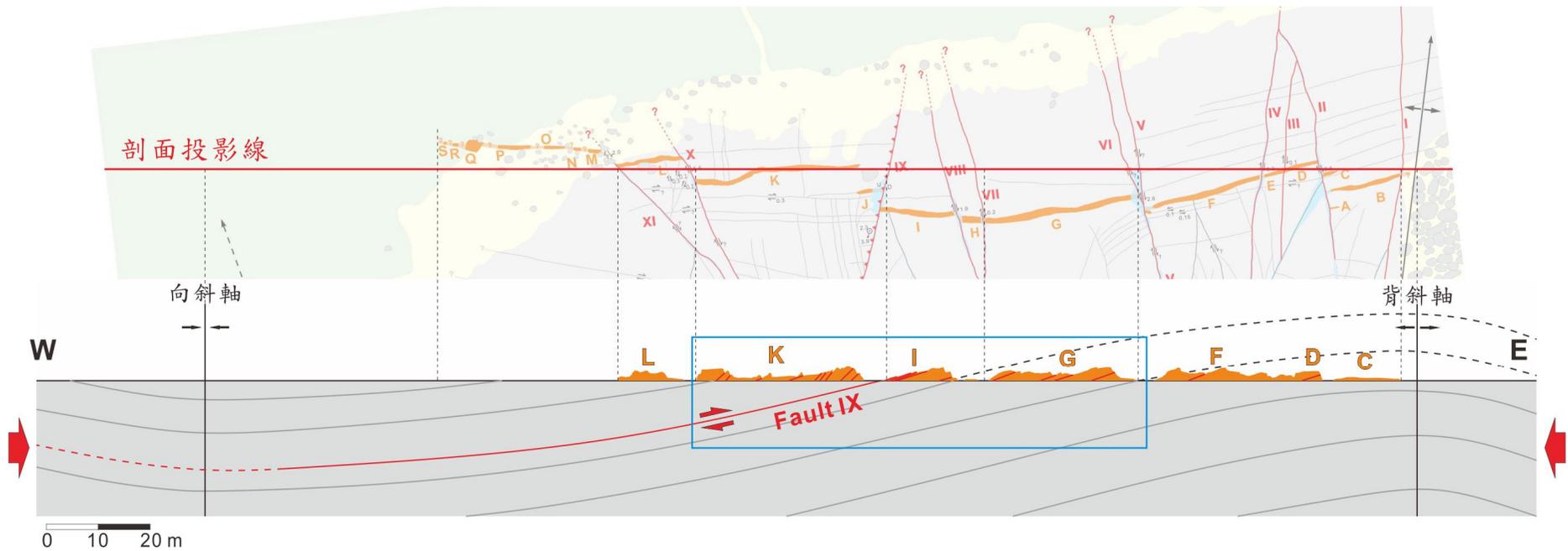


圖 6.2 萊萊海蝕平台全區東西向側面投影。藍色方框為圖 6.1 剖面的範圍，斷層 IX 為褶皺層間滑動的邊界。

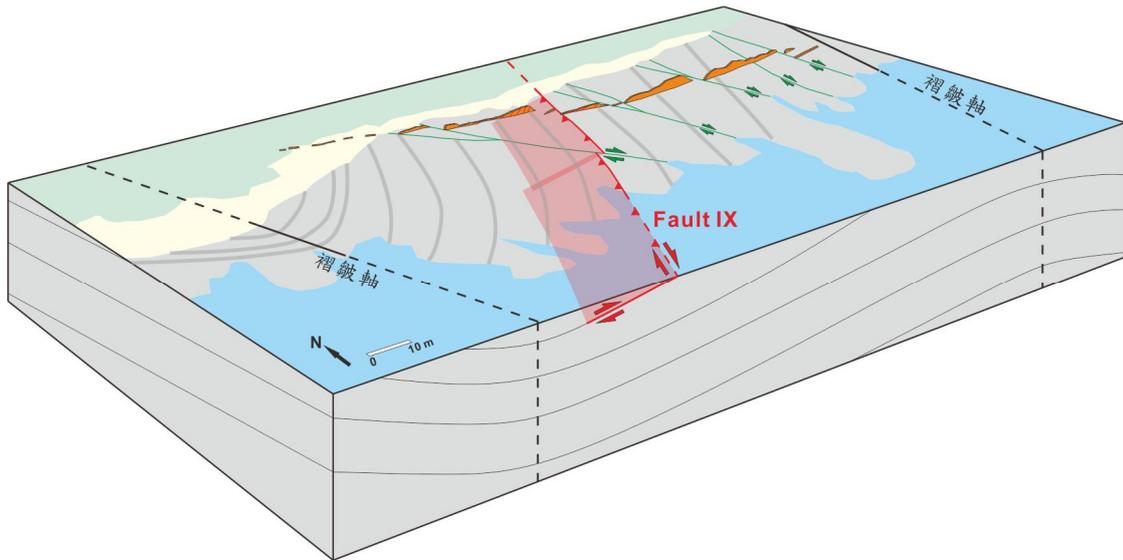


圖 6.3 萊萊海蝕平台地層及構造立體圖，灰色線段為地層邊界，綠色線段為切過岩脈的走向滑移斷層，黑色線段及虛線為褶皺軸，紅色線段及紅色色塊分別為斷層 IX 及斷層面。本立體圖示意了岩脈、褶皺、走向滑移斷層、斷層 IX 彼此在空間上的關係。

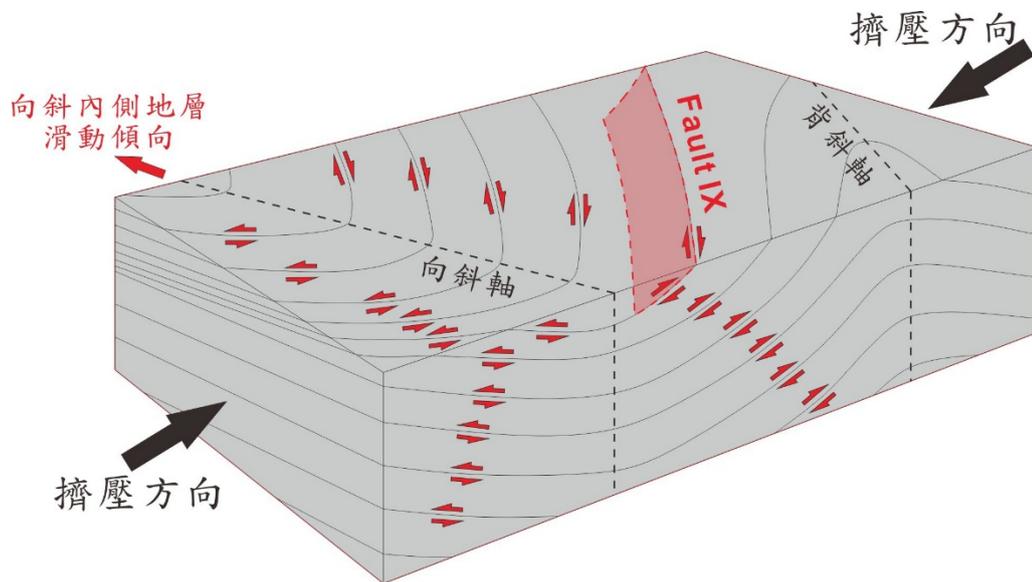


圖 6.4 萊萊海蝕平台褶皺與逆斷層的交互關係立體圖。萊萊的地層過去受應力褶曲時產生向北擠出的褶皺，所產生的層間滑動並不只有逆斷層的錯動，亦帶有右移的錯動分量。

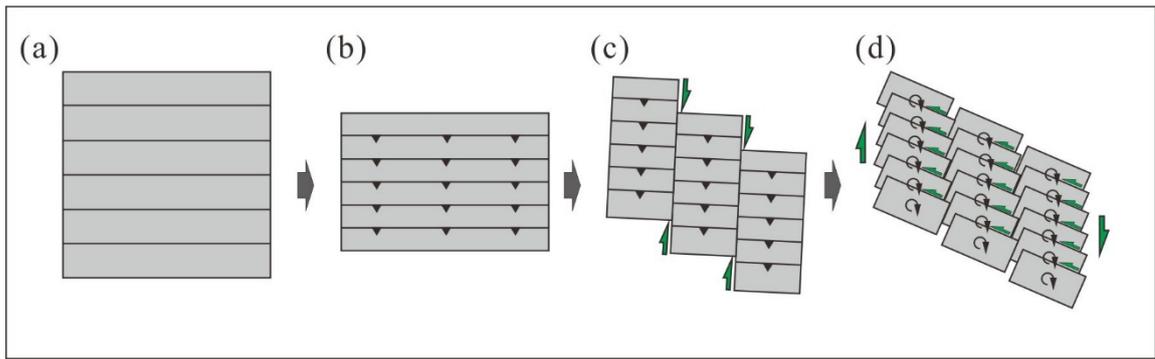


圖 6.5 在板塊聚合或剛性地塊嵌入的構造環境中可能發生的變形作用。

(a) 原始形狀 (b) 擠縮變形 (c) 橫斷變形 (d) 旋轉變形及書疊式平移斷層

(Lu et al., 1994)。

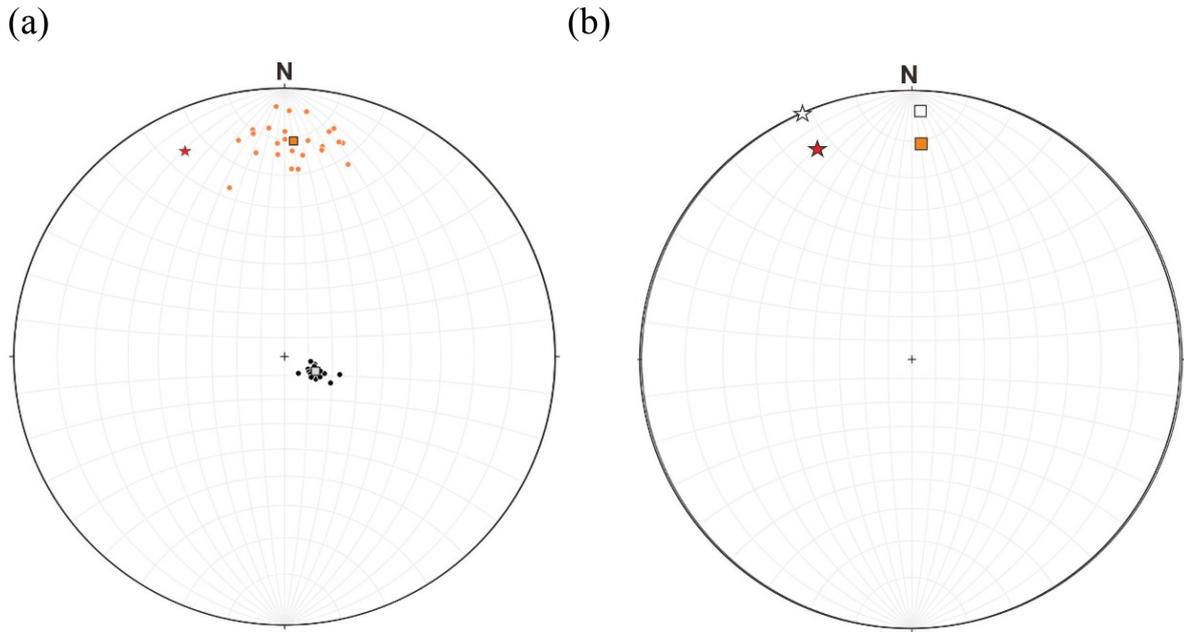


圖 6.6 岩脈與周遭圍岩層面的位態投影圓分析。(a) 橘色圓點為岩脈位態的極點，方形點為平均岩脈位態 (N88°W, 78°S)；黑色點為層面位態的極點，方形點為平均層面位態 (N25°E, 14°W)；紅色星星為向斜褶皺軸的走向與傾角 (336°/9°)。(b) 旋轉投影圓資料使褶皺軸變為水平，白色星星與方框分別是旋轉後的褶皺軸與岩脈位態。

## 6.2 雁行排列岩脈形成的原因與機制

要釐清雁行排列岩脈的形成原因與機制，可以由岩脈在野外的形貌、圍岩節理的分布狀況著手，本節證明了岩脈呈現雁行排列是由於岩漿沿著既存的雁行節理侵入而形成。

根據構造截切關係，南北向的右移斷層和逆斷層皆晚於岩脈形成，在還原斷層造成的錯動後（圖 6.7），岩脈呈現三道右階的雁行排列，顯示岩脈形成時就已呈現雁行排列，表示斷層錯動並非造成岩脈雁行排列的唯一原因。

根據 Pollard 等人 (1986) 對於岩脈周遭圍岩節理的野外觀察結論，當局部的岩脈周遭圍岩及廣泛的區域圍岩皆有發現相同走向的節理，表示岩漿過去沿著既存裂隙侵入以形成岩脈。因此我們沿著四道調查線（圖 6.8）Line A、B、C、D 紀錄與岩脈走向相同的節理密度（圖 6.9），篩選長度在 20 公尺以上的節理記錄以避免計入解壓節理。結果顯示岩脈周遭的圍岩和整個海蝕平台的圍岩皆有出現與岩脈走向相同的節理，並有有群集分布的趨勢，而在岩脈周遭出現密度最高，支持岩漿沿著既存裂隙侵入後形成岩脈的論點。

為進一步證明岩漿沿節理侵入的假設，排除岩漿強力入侵機制的可能性，岩脈在野外的特徵如下敘述，這些現象都支持岩漿沿著裂隙侵入的論點：

1. 岩脈與圍岩的接觸邊界維持平直，局部的邊界會有階梯狀的急折。
2. 岩脈 B、C、J、K 的侵入末端呈現不對稱的楔形，沒有出現強力入侵機制特有的水力破裂特徵。
3. 岩脈 B、C、J、K 的侵入末端消失後，與節理相接後持續延伸，強力入侵機制下的岩脈末端不會與裂隙相接。

總結萊萊過去在岩漿侵入時的過程，如圖 6.10：一系列雁行節理形成後，岩漿侵入時由於材料的不足或是岩石圍壓較大的緣故，選擇一部分的雁行

節理，以三道雁行的形式侵入，每道雁行裂隙內也是由許多更小的雁行裂隙組成。在雁行節理重疊的區間，由於岩漿撐開裂隙造成重疊區間的圍岩應力上升，使岩漿無法持續沿著裂隙前進，在侵入末端形成不對稱的尖端 (Nicholson & Pollard, 1985) 。許多間距較小的雁行裂隙之間，隨著岩漿侵入使得局部應力變化，岩脈之間開始相連，形成急折的階梯狀岩脈邊界，使得每段岩脈都出現階梯狀接觸邊界 (Bussell, 1989) 。

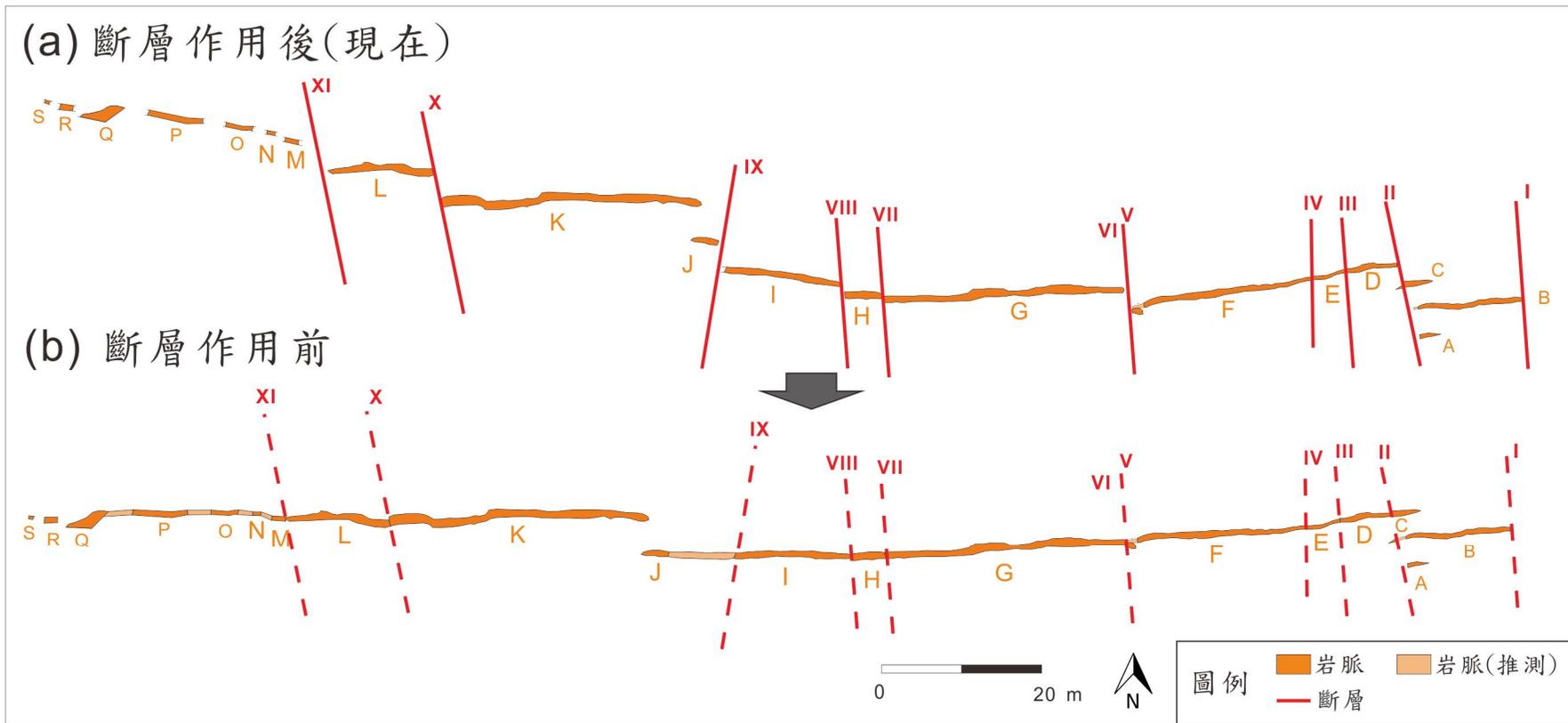


圖 6.7 斷層作用後的岩脈分布。(a) 現在海蝕平台上岩脈的分布狀況 (b) 過去在斷層作用前的岩脈分布狀況。

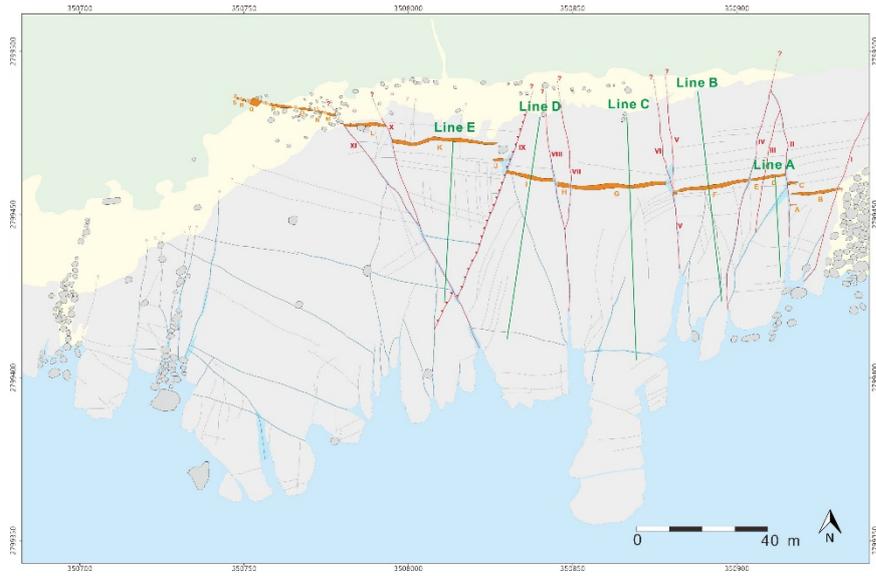
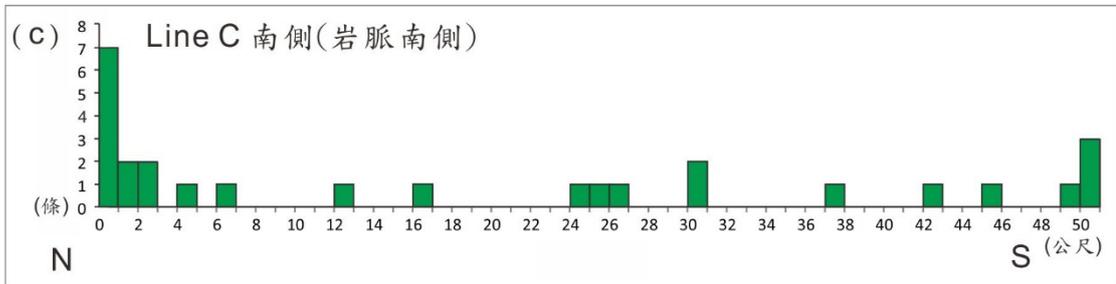
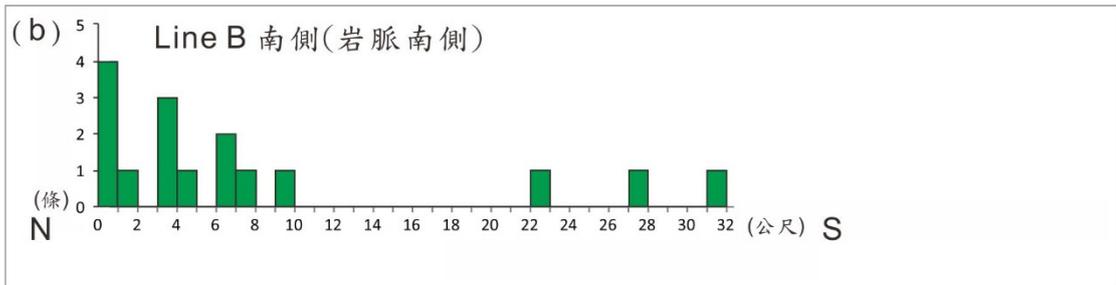
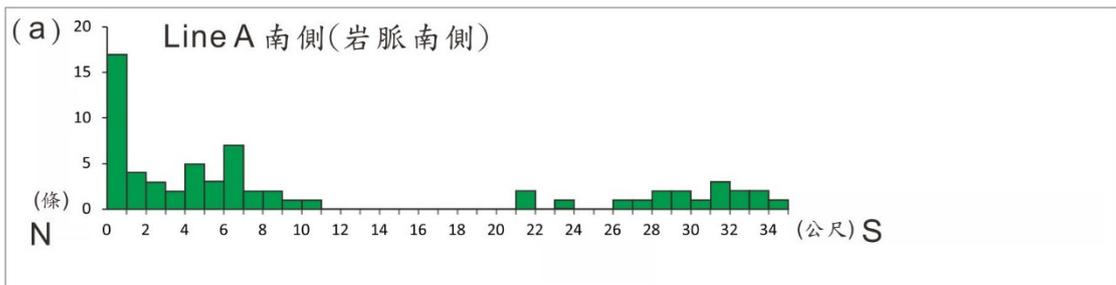


圖 6.8 節理頻率調查線分布。



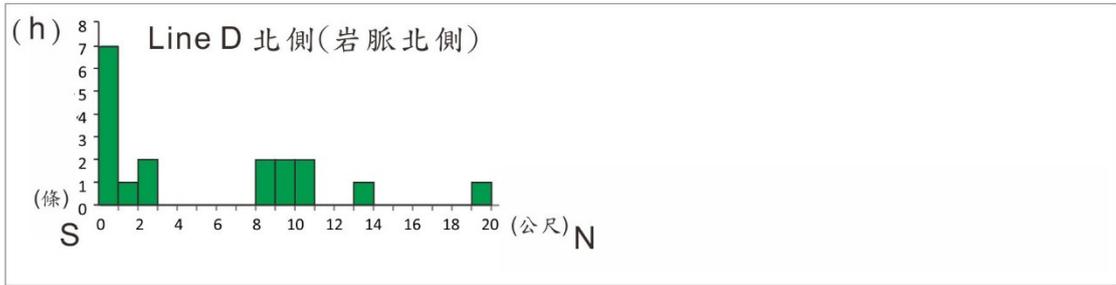
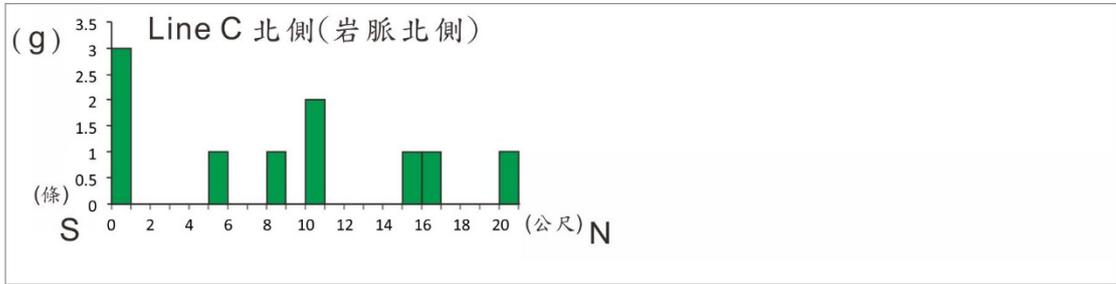
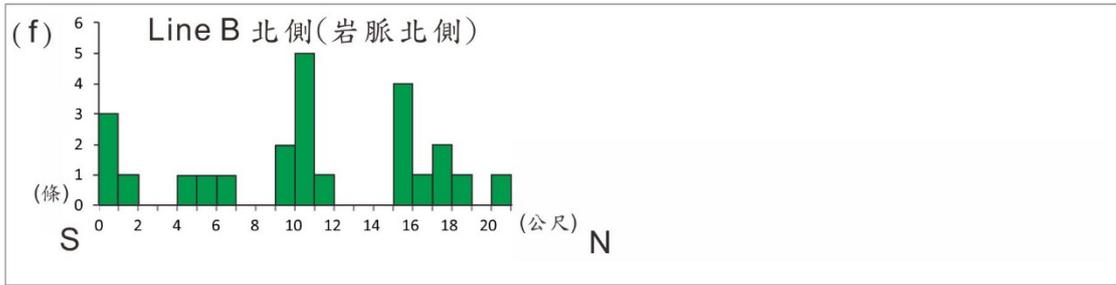
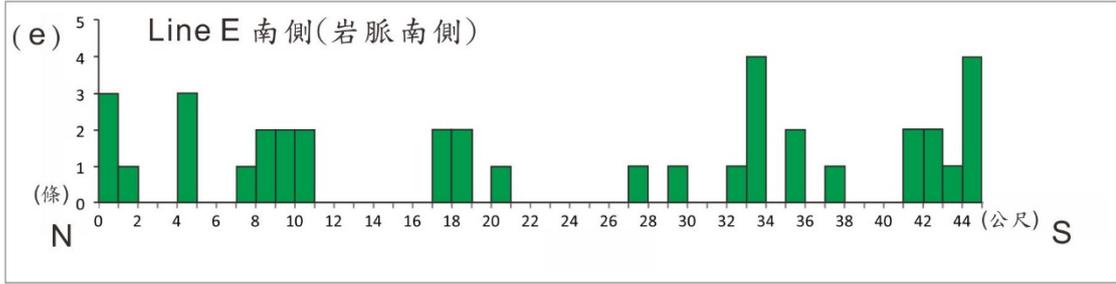
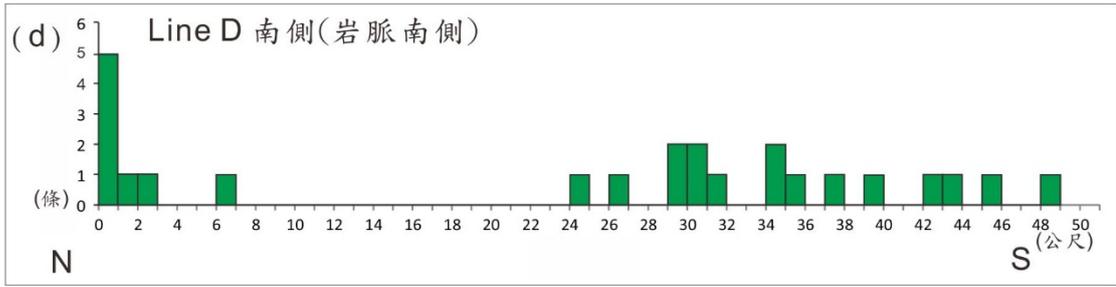


圖 6.9 東西向平行岩脈節理的出現密度統計。

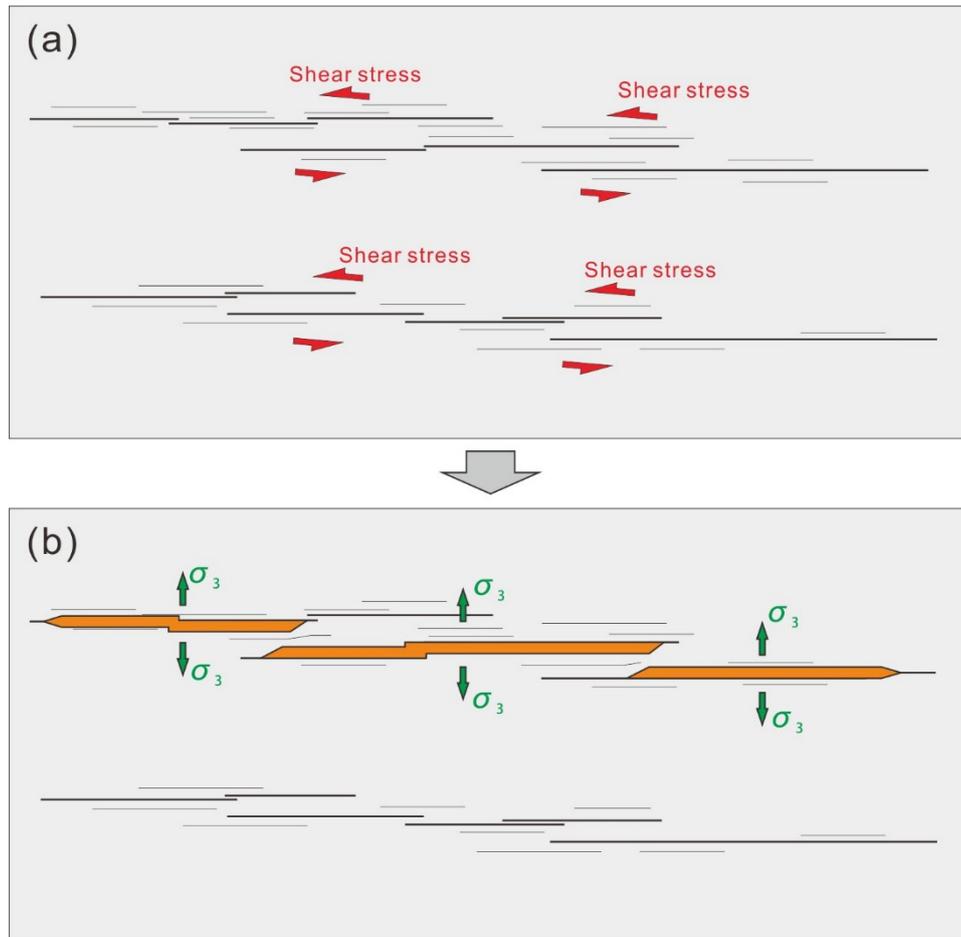


圖 6.10 雁行排列岩脈的形成過程。

### 6.3 岩脈構造的演化次序

根據之前的構造觀察及形成次序判斷，我們結合運動學分析的角度提出萊萊海蝕平台及岩脈過去歷史的演化模型，可分為八期構造事件 (圖 6.10):

事件一:漸新世晚期，在陸棚環境下沉積大桶山層。

事件二:沉積物持續覆蓋在其上，大桶山層經深埋成岩後，岩體產生一系列的雁行節理。

事件三:中新世晚期，岩將沿著部分的雁行節理侵入，周遭的圍岩因熱產生輕度變質，岩漿冷卻固化後形成三道右階雁行排列的岩脈。

事件四:部分岩脈中出現東西向的正斷層，裂隙張開後充填石英脈，此屬於較局部的事件。

事件五:上新世早期，岩脈中出現一連串東西向的走向滑移斷層，使岩脈出現覆疊構造，岩脈全長縮短，圍岩則以塑性變形為主。

事件六:南北向的褶皺產生，逆斷層 IX 作為伴隨褶皺產生的層間滑動，將岩脈 I、J 錯開，岩脈中則出現一連串西傾的逆斷層，岩脈全長縮短。

事件七:上新世早期蓬萊造山運動開始，大尺度下，東北-西南走向的逆斷層與褶皺產生，萊萊北側出現鶯仔瀨向斜，使萊萊連同上面的岩脈往北傾了約 11 度。在萊萊海蝕平台區域，密集的南北向右移斷層除了錯開各段岩脈，亦發生塊體旋轉，各岩脈段產生順時針方向旋轉。

事件八:隨著抬升接近地表，岩脈和圍岩上產生解壓節理或風化節理，經海浪日積月累的波蝕作用，形成我們現在所見到的樣貌。

藉由前面章節斷層擦痕分析，結合動力學來分析主應力軸的方向。我們結合前面的演化模型，來分析應力場的演變史:

張裂環境一期: 主應力軸方向由最大至最小依序為垂直向、東西向、南北向，事件一~四的應力狀態屬於此階段。

壓縮環境一期: 主應力軸方向由最大至最小依序為東西向、垂直向、南北向，

事件五的應力狀態屬於此階段。

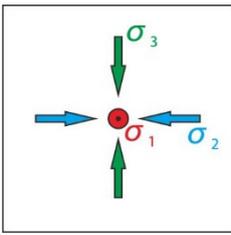
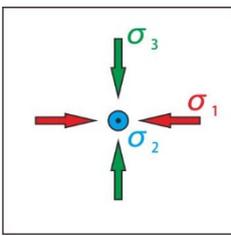
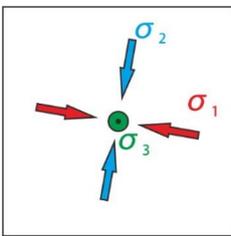
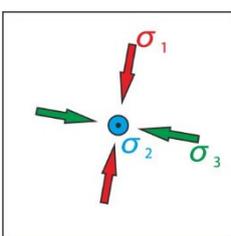
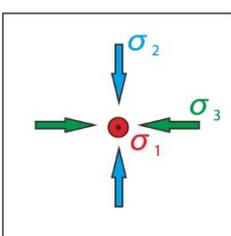
壓縮環境二期: 主應力軸方向由最大至最小依序為西北西-東南東向、北北東-南南西向、垂直向，事件六的應力狀態屬於此階段。

壓縮環境三期: 主應力軸方向由最大至最小依序為北北西-南南東向、垂直向、西南西-東北東向，事件七的應力狀態屬於此階段。

張裂環境二期: 主應力軸方向由最大至最小依序為垂直向、南北向、東西向，事件八的應力狀態屬於此階段。

最後結合本節岩脈和圍岩構造史以及應力演變史，統整後列於表 6.1。

表 6.1 岩脈與圍岩過去的構造事件及應力演化史。最右欄應力三軸方向的參考坐標系，以東西走向的岩脈作為座標的 x 軸。

時間及區域構造事件	岩脈	圍岩	應力三軸方向 (俯視圖)
晚漸新世，南中國海板塊張裂期	尚未形成	大桶山層堆積	
	尚未形成	岩化、雁行排列節理	
晚中新世	岩脈沿節理入侵	在岩脈周圍的圍岩產生變質	
	東西向正斷層	未發現構造作用	
早上新世，蓬萊造山運動發生	東西向走向滑移斷層	塑性變形	
	西傾逆斷層	斷層 IX、南北向褶皺	
	岩脈走向順時針旋轉，被南北向右移斷層錯開	南北向右移斷層	
	近地表張裂節理	近地表張裂節理	

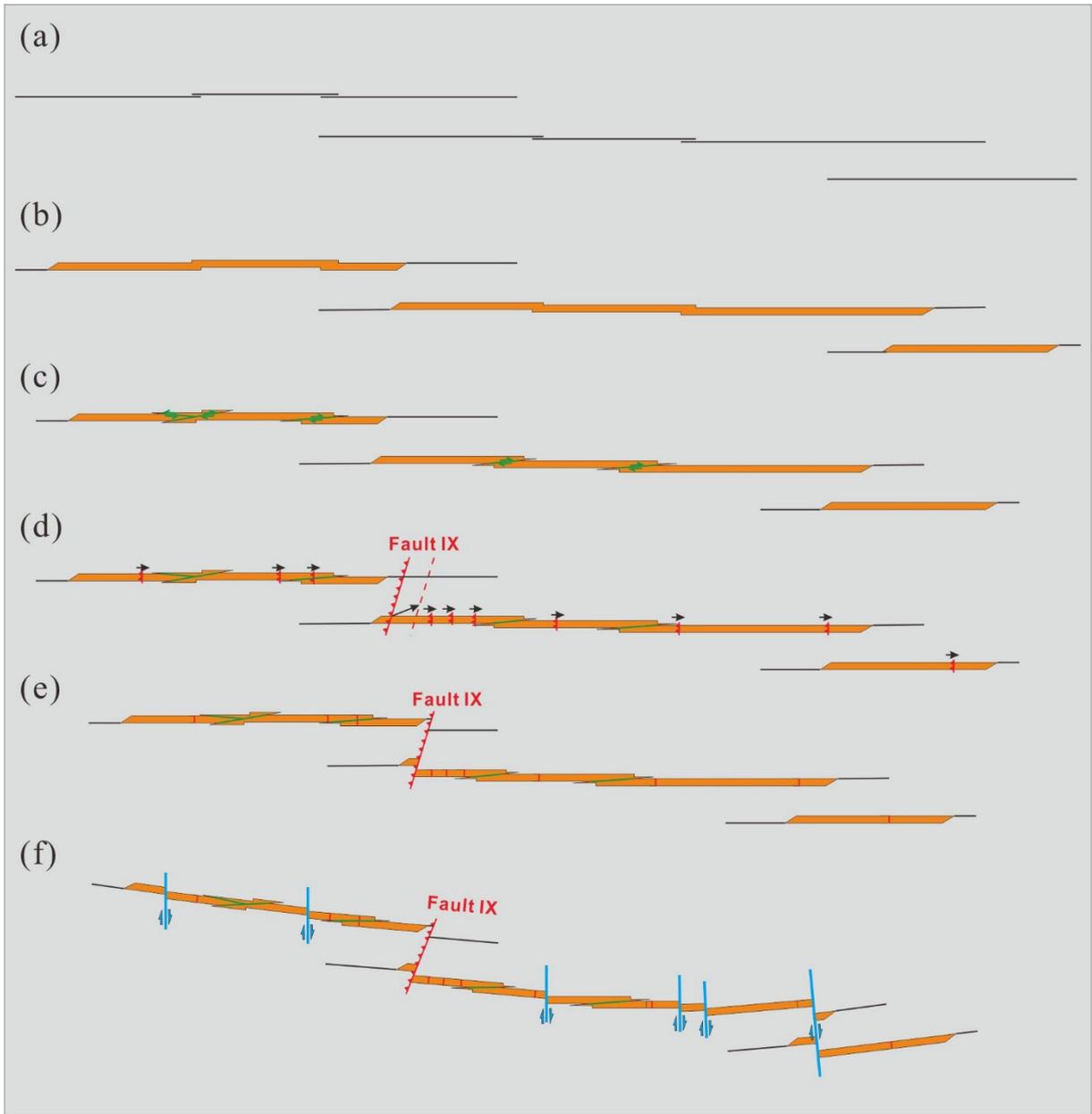


圖 6.11 岩脈構造演育過程。(a) 雁行節理形成 (b) 岩漿侵入，冷卻形成雁行岩脈 (c) 岩脈內右移斷層形成 (d) 岩脈內逆斷層及斷層 IX 形成 (錯動前) (e) 岩脈內逆斷層及斷層 IX 形成 (錯動後) (f) 右移斷層形成。

## 第七章 結論

關於岩脈呈現雁行排列的原因探討，根據野外節理調查、大比例尺構造地質圖、及地電阻影像剖面結果，岩漿在晚中新世侵入既存的右階雁行節理，冷卻後形成雁行排列的岩脈。岩漿侵入時，現在的萊萊位於張裂的陸棚沉積環境，位於地表下 2.5~2.7 公里深處。在上新世早期的蓬萊造山運動開始後，一連串南北向的右移斷層使岩脈進一步的錯斷，形成更多段的雁行岩脈。

對於本研究區域的岩脈在構造事件的先後次序、應力狀態的演變，依序為：漸新世晚期大桶山層沉積後，雁行節理形成；晚中新世岩漿入侵形成東西向雁行排列岩脈，之後局部岩脈上產生正斷層，以上構造事件皆處在張裂的應力環境下。上新世早期蓬萊造山運動開始後，第一階段，東西向的壓縮使岩脈內產生東西向為主的走向滑移斷層，第二階段，最小主應力軸旋轉為垂直方向，岩脈產生一系列的逆斷層，圍岩則產生斷層 IX 及褶皺，第三階段，最大主應力軸偏轉為北北西、南南東向，產生南北向的右移斷層並將岩脈錯開，同時台灣東北部形成一連串段的逆斷層與褶皺，鶯仔瀨向斜形成使整個萊萊向北傾斜。最後隨著抬升到地表，產生解壓節理，形成我們現在所見的構造現象。綜觀台灣東北部自上新世以來的構造作用，其一連串的東北-西南向逆斷層及褶皺，使得萊萊地區整體產生向北傾沒的現象，然而在研究區域中並未發現相同的中視構造，萊萊煌斑岩脈上的構造表現多為局部應力所造成。

本研究藉由詳細的中視構造紀錄對岩脈和周遭圍岩作幾何分析，依此基礎建構出岩脈構造的運動分析，進行動力分析岩脈構造的形成功能、應力狀態演化次序，使我們更加瞭解萊萊煌斑岩過去的構造歷史以及中新世晚期台灣東北區域火山活動的特性。除了各種比例尺的構造地質圖、岩脈三視圖等構造繪製結果能夠作為後續研究的構造調查範例外，亦結合了 UAV 空拍

影像及地球物理探勘等現代科技，展現了現代地質調查方法的多元性及便利性。然而由於經年累月的風化，海蝕平台上的構造資訊逐漸缺乏，造成了部分野外觀察的缺失，並且，本研究區域過去受到複雜的局部應力的影響，導致構造現象相對地複雜許多，使得構造統整和解釋的過程較為困難。該區仍有相當多有趣且特殊的構造現象，卻無法更加充分解釋其形成機制，未來可以進一步地針對岩脈上的構造作動力分析。

## 參考文獻

- Anderson, E. (1938). The dynamics of sheet intrusion. Paper presented at the Proc. R. Soc. Edinburgh.
- Anderson, E. M. (1951). The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain: Hafner Pub. Co.
- Atkinson, B. K. (1987). Introduction to fracture mechanics and its geophysical applications. *Fracture mechanics of rock*, 1-26.
- Baer, G. (1991). Mechanisms of dike propagation in layered rocks and in massive, porous sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 96(B7), 11911-11929.
- Bussell, M. (1989). A simple method for the determination of the dilation direction of intrusive sheets. *Journal of structural geology*, 11(6), 679-687.
- Crowell, J. (1959). Problems of fault nomenclature: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 43.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., & Kluth, C. (1996). *Structural geology of rocks and regions*: Wiley New York.
- Delaney, P. T., & Pollard, D. D. (1981). Deformation of host rocks and flow of magma during growth of minette dikes and breccia-bearing intrusions near Ship Rock, New Mexico: USGPO.
- Delaney, P. T., Pollard, D. D., Ziony, J. I., & McKee, E. H. (1986). Field relations between dikes and joints: emplacement processes and paleostress analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 91(B5), 4920-4938.
- Engelder, T. (1987). Joints and shear fractures in rock. *Fracture mechanics of rock*, 27-69.

- Hancock, P. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of structural geology*, 7(3), 437-457.
- Hill, M. L. (1959). Dual Classification of Faults: GEOLOGICAL NOTES. *AAPG Bulletin*, 43(1), 217-221.
- Kim, Y.-S., Peacock, D. C., & Sanderson, D. J. (2004). Fault damage zones. *Journal of structural geology*, 26(3), 503-517.
- Lee, C., & Wang, Y. (1988). Quaternary stress changes in northern Taiwan and their tectonic significance. Paper presented at the Proc. Geol. Soc. China.
- Lee, T.-Q., Lee, J.-C., Chu, H.-T., Lu, C.-Y., & Hu, J.-C. (1998). Paleomagnetic study in a folded zone of Hsuehshan Range, northeastern coast of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9(4), 643-654.
- Lu, C.-Y., Angelier, J., Chu, H.-T., & Lee, J.-C. (1995). Contractional, transcurrent, rotational and extensional tectonics: examples from Northern Taiwan. *Tectonophysics*, 246(1), 129-146.
- Lu, C.-Y., & Malavieille, J. (1994). Oblique convergence, indentation and rotation tectonics in the Taiwan Mountain Belt: Insights from experimental modelling. *Earth and planetary science letters*, 121(3), 477-494.
- Nicholson, R., & Pollard, D. (1985). Dilation and linkage of echelon cracks. *Journal of structural geology*, 7(5), 583-590.
- Pollard, D. (1987). Elementary fracture mechanics applied to the structural interpretation of dykes Mafic dyke swarms (Vol. 34, pp. 5-24): *Geol. Assoc. Canada*.
- Pollard, D. D. (1973). Derivation and evaluation of a mechanical model for sheet intrusions. *Tectonophysics*, 19(3), 233-269.
- Pollard, D. D., Segall, P., & Delaney, P. T. (1982). Formation and interpretation of dilatant echelon cracks. *Geological Society of America Bulletin*, 93(12),

1291-1303.

Price, N. J., & Cosgrove, J. W. (1990). *Analysis of geological structures*: Cambridge University Press.

Rubin, A. M. (1995). Propagation of magma-filled cracks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23, 287-336.

Teng, L. S. (1990). Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 183(1), 57-76.

Younes, A. I., & Engelder, T. (1999). Fringe cracks: key structures for the interpretation of the progressive Alleghanian deformation of the Appalachian plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 111(2), 219-239.

王子賓, 2005, 結合地電阻影像剖面法及透地雷達法調查 DNAPLs 之案例研究: 中央大學應用地質研究所學位論文.

王證豪, 2013, 臺灣東北角萊萊海岸地區煌斑岩脈及其圍岩之斷層及節理分析: 臺北科技大學資源工程研究所學位論文, p. 1-57.

李建成, 1989, 臺灣北部的新構造運動: 斷層與古應力的分析研究: National Taiwan University Department of Geology.

李錫堤, 1986, 大地應力分析與弧陸碰撞對於台灣北部古應力場變遷之影響: National Taiwan University Graduate Institute of Geology.

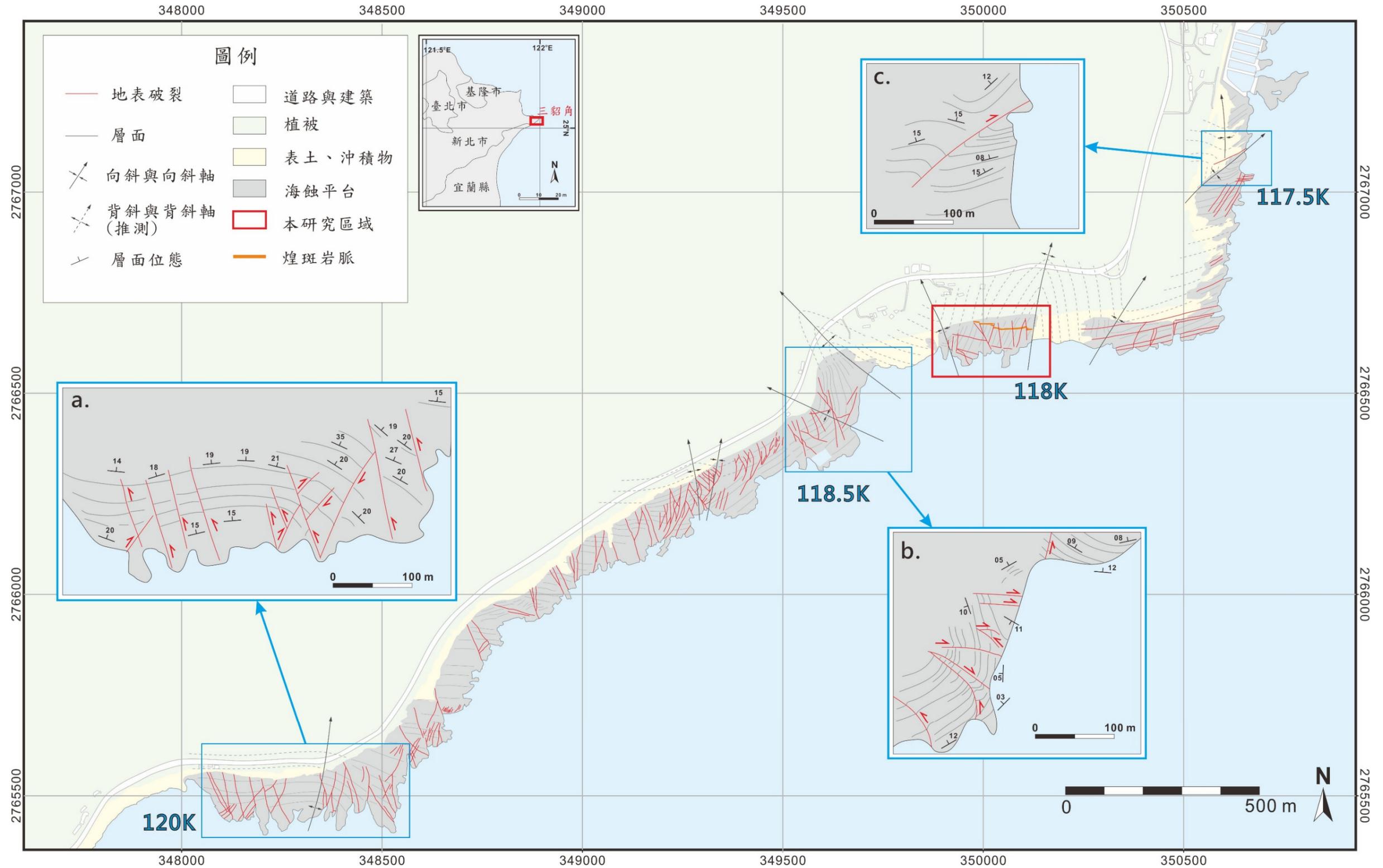
周瑞燉, 1990, 臺灣中央山脈及雪山山脈之古第三紀地層: 經濟部中央地質調查所特刊, v. 4, p. 177-192.

陳文山, 1989, 東北海岸漸新統岩層之再檢討, 地質第九卷.

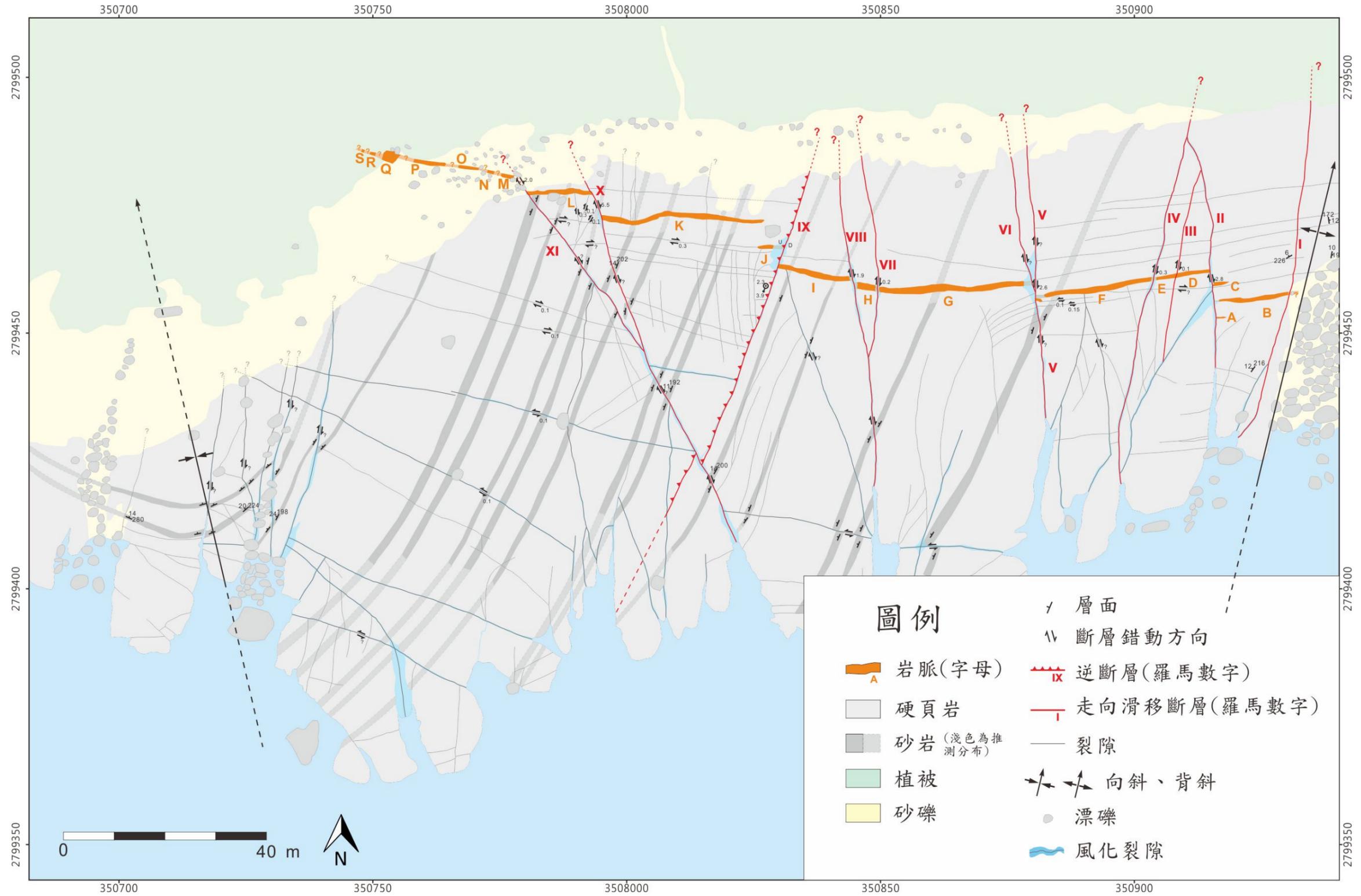
黃蜀圓, 2005, 台灣東北角海岸萊萊地區煌斑岩脈及其圍岩之構造地質研究: 臺北科技大學材料及資源工程系研究所學位論文, p. 1-70.

- 黃鑑水, 1988, 台灣地質圖說明書—雙溪: 經濟部中央地質調查所.
- 楊昭男, 1995, 臺灣的地質構造現象, 經濟部中央地質調查所.
- 楊昭男, 2010, 石英脈形成的先後關係: 臺灣鑛業, v. 62, no. 4, p. 16-26.
- 詹新甫, 1981, 臺灣東北隅鼻頭至福隆間之地層與構造: 經濟部中央地質調查所彙刊, v. 1, p. 49-60.
- 鄧屬予, 2007, 台灣第四紀大地構造: 經濟部中央地質調查所特刊, v. 18, p. 1-24.
- 盧佳遇, 陳培源, and 朱傲祖, 1994, 臺灣東北海岸卯澳至大里間之橫移壓縮構造, 地質.
- 顏滄波, 1979, 澳底地區澳底層之再檢討, Volume 2, 地質, p. 111-114.

萊萊附近海蝕平台上的褶皺構造與斷層



萊萊海蝕平台的構造地質圖



岩脈列及附近圍岩構造底圖

