

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Geology

National Central University

Master Thesis

台灣東北部鼻頭及龍洞地區的正斷層

**Normal faults in Bitou and Longdong areas, NE**

**Taiwan**

研究生：賴品文

Student: Pin-Wen Lai

指導教授：黃文正 博士

Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國一百一十二年六月

June, 2023

## 國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：2022 / 08 / 07

2019.9 版

授權人姓名	賴品文	學號	110624009
系所名稱	應用地質研究所	學位類別	<input checked="" type="checkbox"/> 碩士 <input type="checkbox"/> 博士
論文名稱	台灣東北部鼻頭及龍洞地區的正斷層	指導教授	黃文正

### 學位論文網路公開授權

授權本人撰寫之學位論文全文電子檔：

- 在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」

(  ) 同意立即網路公開

(    ) 同意 於西元\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日網路公開

(    ) 不同意網路公開，原因是：\_\_\_\_\_

- 在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

(  ) 同意立即網路公開

(    ) 同意 於西元\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日網路公開

(    ) 不同意網路公開，原因是：\_\_\_\_\_

依著作權法規定，非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統與國家圖書館，不限地域、時間與次數，以文件、錄影帶、錄音帶、光碟、微縮、數位化或其他方式將上列授權標的基於非營利目的進行重製。

### 學位論文紙本延後公開申請 (紙本學位論文立即公開者此欄免填)

本人撰寫之學位論文紙本因以下原因將延後公開

- 延後原因

(    ) 已申請專利並檢附證明，專利申請案號：

(    ) 準備以上列論文投稿期刊

(    ) 涉國家機密

(    ) 依法不得提供，請說明：\_\_\_\_\_

• 公開日期：西元\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日

※繳交教務處註冊組之紙本論文(送繳國家圖書館)若不立即公開，請加填「國家圖書館學位論文延後公開申請書」

研究生簽名： 賴品文

指導教授簽名： 黃文正

\*本授權書請完整填寫並親筆簽名後，裝訂於論文封面之次頁。

國立中央大學博士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 賴品文 研  
究生所提之論文 台灣東北部鼻頭及龍洞地區的正斷  
層 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 蔡文正 (簽章)

112年 6月 19日

112.06.19

國立中央大學碩士班研究生  
論文口試委員審定書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 賴品文 研究生  
所提之論文 台灣東北部鼻頭及龍洞地區的正斷層  
經由委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人  
委 員

林治子  
李元希  
柯明  
黃文正  
鄭偉

中 華 民 國 112年 7月 5日

1120703

# 台灣東北部鼻頭及龍洞地區的正斷層

## 中文摘要

台灣東北部跨雪山山脈與西部麓山帶兩地質區，由數條東北走向的斷層及褶皺縱貫於其中，延伸至外海的區域已進入造山運動後的垮山階段，從擠壓環境轉變為伸張環境，發育一系列的正斷層。位於東北角的鼻頭及龍洞地區，為兩道東北向凸出的岬角，岩層出露狀況良好，能觀察到一系列由正斷層所組成的地塹及地壘。本研究藉由空拍影像建立三維模型，高解析度正射及立面影像，判釋裂隙分布情形，結合野外地質調查，詳細記錄此區域的構造，瞭解鼻頭及龍洞地區裂隙關係及特徵，並分析正斷層可能的成因。鼻頭及龍洞地區分別有五組(BF1-BF5)及六組(LF1-LF6)裂隙，其中 BF1 及 BF2 位態能分別對應於 LF4 及 LF5，此兩對能相互匹配的裂隙組各自形成於相同應力環境。鼻頭南岸出露 14 條北北西向能追跡約百餘公尺的正斷層，斷距介於 0.2 公尺至 3 公尺之間；龍洞南區共可觀察到 8 條西北西向的正斷層，斷距可達 4 公尺以上，北區能判釋 3 條西北向正斷層，此外另有 5 條近南北向的正斷層零星分布於龍洞地區。鼻頭南岸正斷層走向近乎垂直於外海正斷層，且大致平行於近期兩次沖繩海槽開張方向，受沖繩海槽影響較小，斷層位態與鼻頭向斜軸近乎垂直，推估此區斷層與更新世早期垂直褶皺擠壓方向的側向伸張作用有關。龍洞南區西北西向的正斷層走向與萊萊地區的鹼性玄武岩脈長軸方向相似，這些岩脈紀錄了晚中新世地殼的相對伸張方向，此西北西向正斷層可能於此伸張環境下形成，北區西北向正斷層位態大致垂直於蚊子坑背斜軸，推測與鼻頭南岸正斷層為同時期的產物，零星分布之南北向的正斷層多受制於前述兩組斷層，形成於褶皺作用後期。

**關鍵詞：**鼻頭、龍洞、正斷層、裂隙、無人機、沖繩海槽

# **Normal faults in Bitou and Longdong areas, NE Taiwan**

## **Abstract**

Northeastern Taiwan straddles two major geologic provinces, including the the Hsuehshan Range province and the Western Foothills province. Several regional faults and folds trending northeast run through it. The orogenic belt extending to the offshore has been subjected to post-collisional collapse, and a series of normal faults have been developed under such a newly extensional regime. A series of grabens and horsts composed of normal faults can be observed in well-exposed outcrops in Bitou and Longdong areas. In this study, three-dimensional models of rock exposure are established via the PIX4D of a drone mapping & photogrammetry software using the aerial images taken by an unmanned aerial vehicle (UAV), and the distribution of fractures is analyzed by high-resolution orthoimages and facade images. Combining these images with field investigation, the structures in this area are documented in great detail. This study aims to understand the possible cause of normal faults. There are five sets of fractures (BF1-BF5) in Bitou area and six sets of fractures (LF1-LF6) in Longdong area. Among them, the attitude of BF1 and BF2 are comparable to LF4 and LF5, respectively. Each matched fracture sets are likely formed in the same stress state. Fourteen NNW-trending normal faults that can be traced about a hundred meters in the southern shore of Bitou cape, the separation of these faults ranges from 0.2 meters to 3 meters. Eight WNW-trending normal faults can be observed in the southern area of Longdong cape, the separation of the normal faults can exceed 4 meters. In the northern area, three NW-oriented normal faults

can be identified. Additionally, there are five sparsely-distributed N-S trending normal faults in the Longdong area. We conclude that the normal faults in southern shore of Bitou area are not affected by the Okinawa Trough rifting because the strike of the faults is roughly parallel to the two recent rifting events. The normal fault attitudes are almost perpendicular to the fold axis of Bitou Syncline, it is inferred that the faults in this area may be related to the stretching perpendicular to the major compression direction during the formation of the fold. The WNW-trending normal faults in Longdong area is similar to the direction of the alkaline basalt dikes in the Lailai area. The dikes have recorded the relative stretching direction of the Miocene crust. It is possible that the WNW-trending normal fault may be caused by this extensional event. The NW-oriented normal fault attitudes are almost perpendicular to the fold axis of Wenzikeng Anticline, It is speculated that these normal faults and the normal faults in the Bitou area are developed in the same period. The N-S trending normal faults restricted in between the previous two fault sets and formed during the late stage of folding.

**Keywords:** Bitou, Longdong, normal fault, fracture, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Okinawa Trough rifting

## 誌謝

轉眼間兩年的研究所時光已接近尾聲，完成論文的路途艱辛，但也充滿快樂及成就感，想先感謝自己的堅持及努力不懈，心裡雖然總想著按照自己步調慢慢來，看著身旁同學朋友們不眠不休的努力，不知不覺也督促著自己加快腳步完成論文，甚至在口試前投了一篇彙刊，之後回想起來可能也會挺佩服自己的吧哈哈。

首先要感謝指導教授黃文正老師在這兩年給予我研究上的建議及幫助，並提供許多野外調查及實地學習的機會，透過處理研究室事務，精進解決問題的能力及待人處事的方式等，讓我們畢業後能更順利的面對社會上的種種難題。特別感謝研究室好夥伴及戰友中威 AKA 台灣歐巴、石油大亨、研究室樑柱，讓一開始懵懵懂懂的我熟悉研究室的事物，時常協助我解決問題，在各種事情上都很罩。感謝學長承家帶我出野外，提供研究過程上的各種經驗，謝謝學弟家恩、良傑及郭穆陪我出野外收集資料，謝謝 Vicky 協助處理研究室的大小事，也感謝師母 Maryline、長志、桃、曉婷、凱風這兩年中的幫助及陪伴。

另外感謝“好想打球”的各位：佳怡、家寅、佑安、耀文、芷瑜、佶恩、嘉榕、友薇陪我一起打球、吃宵夜、出去玩，創造許多美好的回憶。也謝謝系羽的各位，在我不熟悉這個環境時友善的陪我聊天打球。感謝家人的支持，每次回家都給我滿滿的溫暖，也感謝阿姨、姨丈、逸陞、晨睿，時常邀請我去家裡吃飯，關心我的近況，你們的關心都是我堅持走下去的動力。最後想謝謝陪伴我走過碩士生涯的每個人，祝福大家接下來的人生都能順利圓滿。



# 目錄

中文摘要 .....	I
Abstract .....	II
誌謝 .....	IV
目錄 .....	V
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	IX
第一章 緒論 .....	1
1-1 前言 .....	1
1-2 研究動機及目的 .....	3
第二章 區域地質概述 .....	6
2-1 地形 .....	6
2-2 地質 .....	6
2-2-1 研究區域主要地層 .....	7
2-2-2 研究區域主要構造 .....	8
第三章 文獻回顧 .....	13
3-1 裂隙 .....	13
3-1-1 裂隙破裂機制 .....	13
3-1-2 裂隙定義及分類 .....	14
3-1-3 裂隙與構造的關聯性 .....	15
3-2 正斷層 .....	20
3-2-1 正斷層形成機制與模型 .....	20
3-2-2 正斷層定義與種類 .....	22
3-3 研究區前人相關研究 .....	23
3-3-1 區域構造關聯性 .....	23

3-3-2 區域裂隙調查.....	24
3-3-3 古應力分析.....	25
第四章 研究方法.....	28
4-1 UAV 影像測繪.....	28
4-1-1 攝影測量法.....	29
4-1-2 影像正射化方法.....	31
4-1-3 構造判釋分析.....	32
4-2 現地地質調查.....	33
4-2-1 調查分區規劃與岩性單元.....	34
第五章 研究結果.....	37
5-1 建模影像構造判釋成果.....	37
5-2 地質調查分析結果.....	47
第六章 討論.....	70
6-1 鼻頭及龍洞地區裂隙關聯性.....	70
6-2 正斷層成因.....	74
6-3 構造演化.....	76
第七章 結論.....	81
參考文獻.....	83

## 圖目錄

圖 1.1 台灣東北部外海晚上新世以來大地構造演化.....	2
圖 1.2 台灣東北部外海正斷層分布圖.....	4
圖 1.3 龍洞岬三維影像(上)及立面影像(下)斷層分布判釋.....	5
圖 2.1 北臺灣地質圖.....	10
圖 2.2 鼻頭、龍洞及鄰近區域地質圖.....	11
圖 2.3 研究區地質剖面.....	12
圖 3.1 三種裂隙尖端破裂機制示意圖.....	13
圖 3.2 Hancock 的裂隙分類準則.....	15
圖 3.3 構造影響小的平坦地區預期裂隙分布方式.....	17
圖 3.4 褶皺褶曲可能伴隨形成的各種裂隙.....	18
圖 3.5 褶皺上常見之三種節理種類.....	18
圖 3.6 走滑斷層尖端破壞帶的裂隙形貌.....	19
圖 3.7 安德森斷層理論形成各斷層的應力狀況.....	21
圖 3.8 兩種斷層增長模型概念圖.....	21
圖 3.9 正斷層種類.....	23
圖 3.10 鼻頭地區前人古應力分析比較.....	26
圖 3.11 龍洞地區前人古應力分析比較.....	26
圖 4.1 無人機空拍及影像測繪流程.....	29
圖 4.2 空中三角測量模式共線原理示意圖.....	31
圖 4.3 逆轉換模式示意圖.....	32
圖 4.4 鼻頭地區地層柱及各岩性單元劃分.....	35
圖 4.5 鼻頭南岸地層柱(UnitE~UnitL)測繪位置及空拍影像.....	35
圖 4.6 龍洞分區調查規劃.....	36

圖 5.1 影像判釋鼻頭裂隙分布情況.....	39
圖 5.2 鼻頭南北岸立面影像.....	41
圖 5.3 影像判釋龍洞裂隙分布情況.....	43
圖 5.4 龍洞立面影像.....	45
圖 5.5 鼻頭向斜兩翼層面位態及極點投影圖.....	50
圖 5.6 鼻頭裂隙分布圖.....	51
圖 5.7 鼻頭構造地質圖.....	53
圖 5.8 BFt13 - BFt14 斷層組露頭描繪.....	56
圖 5.9 BFt15 - BFt16 斷層帶露頭描繪.....	57
圖 5.10 BFt26 斷層露頭描繪.....	58
圖 5.11 蚊子坑背斜兩翼層面位態及極點投影圖.....	61
圖 5.12 龍洞裂隙分布圖.....	62
圖 5.13 龍洞主要裂隙組分布.....	63
圖 5.14 龍洞構造地質圖.....	65
圖 5.15 LFt2-1、LFt2-2 - LFt 3 斷層組露頭描繪.....	68
圖 5.16 LFt15 與 LFt19 斷層露頭描繪.....	69
圖 6.1 BF1、LF2 及 LF3 與區域褶皺形成時的相對主應力方向.....	73
圖 6.2 萊萊海蝕平台出露雁形排列近東西向的岩脈.....	77
圖 6.3 東北外海正斷層分布及近期沖繩海槽兩期開張方向.....	77
圖 6.4 鼻頭及龍洞地區構造演化圖.....	79

## 表目錄

表 2.1 臺灣東北部各地質區的地層層序及層厚.....	9
表 5.1 鼻頭構造地質圖各斷層資料.....	55
表 5.2 龍洞構造地質圖各斷層資料.....	67
表 6.1 鼻頭及龍洞地區裂隙對照表.....	72
表 6.3 鼻頭及龍洞地區裂隙可能成因及發育順序.....	78

# 第一章 緒論

## 1-1 前言

台灣東北部自中新世晚期(~5 Ma)以來歷經了造山及之後的垮山等大地構造活動，由於板塊隱沒方向反轉，古造山帶失去板塊擠壓支撐，因重力作用而塌陷伸張(Teng, 1996)。更新世早期(~2 Ma)塌陷的古造山帶逐漸受控於弧後擴張作用，形成現今的沖繩海槽，沖繩海槽南段近期有兩次張裂活動，分別為 2 Ma-0.1 Ma 及 0.1 Ma 至今(Kimura, 1985；Sibuet et al., 1998)，正在逐步地往西南朝東北角宜蘭一帶擴張(圖 1.1)，對於沖繩海槽是否已經影響到台灣東北部，且外海的正斷層與內陸斷層是否有所關聯，已然成為近幾十年地球物理及地質學領域探討的研究課題(黃怡煥，2005；黃雯苓，2007；陳冠宇，2014；康竹君，2016；林怡玟，2021)。

台灣北部至宜蘭地區正處於伸張狀態的大地構造環境，有活躍的地殼陷落作用，例如三腳斷層陷落形成臺北盆地(鄧屬予，2007)、宜蘭平原因沖繩海槽開張而塌陷(Liu, 1995)等等，這些例子都是由於伸張環境下發育的正斷層所導致，因此調查台灣東北部的正斷層是否與近期的構造事件有關，除了能提供此區構造演化的見解，尚能探討海陸斷層的關聯性，進一步在斷層活動性評估、災害防治及工程建設設計上給予良好的地質資訊。

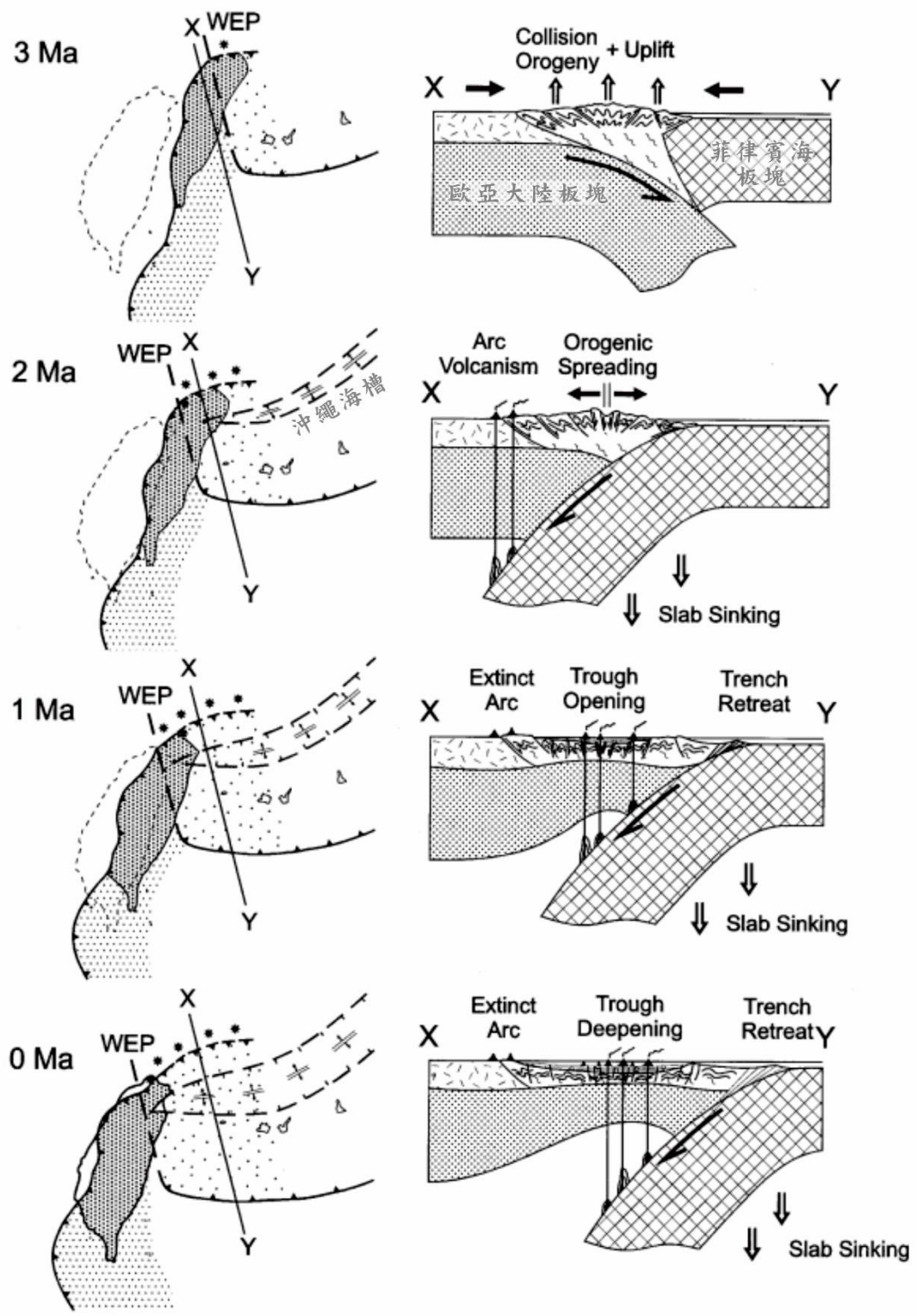


圖 1.1 台灣東北部外海晚上新世以來大地構造演化。更新世早期(~2 Ma)菲律賓海板塊隱沒方向反轉，造成古造山帶垮塌，弧後擴張形成沖繩海槽，逐漸朝台灣東北角及宜蘭一帶擴張。WEP: 菲律賓海板塊向西隱沒邊緣。  
(改繪自 Teng, 1996)

## 1-2 研究動機及目的

根據前人反射震測的研究(Huang et al., 1992 ; Song et al., 2000 ; 蕭力元等, 1998), 現今東北外海發育數條東北-西南向的正斷層(圖 1.2), 且有向內陸延伸的趨勢, 許多研究已提出海陸構造間可能的關聯性(陳冠宇, 2014 ; 林怡廷, 2021), 但對於陸域新期構造的研究相對較少, 尤以伸張環境下容易形成的正斷層, 在該地區鮮少有詳細的研究報導。鼻頭及龍洞地區野外露頭能觀察到數條正斷層(林啟文等, 2022), 兩區之間為龍洞斷層所界分, 出露地層的年代至少有 1 千 5 百萬年以上的差異, 這些正斷層是否為相對近期的構造, 且能否對應外海正斷層值得探討。本研究利用無人機拍攝鼻頭及龍洞地區露頭狀況, 藉由套裝軟體 Pix4Dmapper 建立三維模型、高解析度的正射及立面影像, 協助判釋露頭裂隙及構造分布(圖 1.3), 並進行現地地質調查, 詳細記錄地表地質, 繪製包含斷層延續性及斷距等資料的構造地質圖, 以分析鼻頭及龍洞地區正斷層與鄰近構造的關聯性。



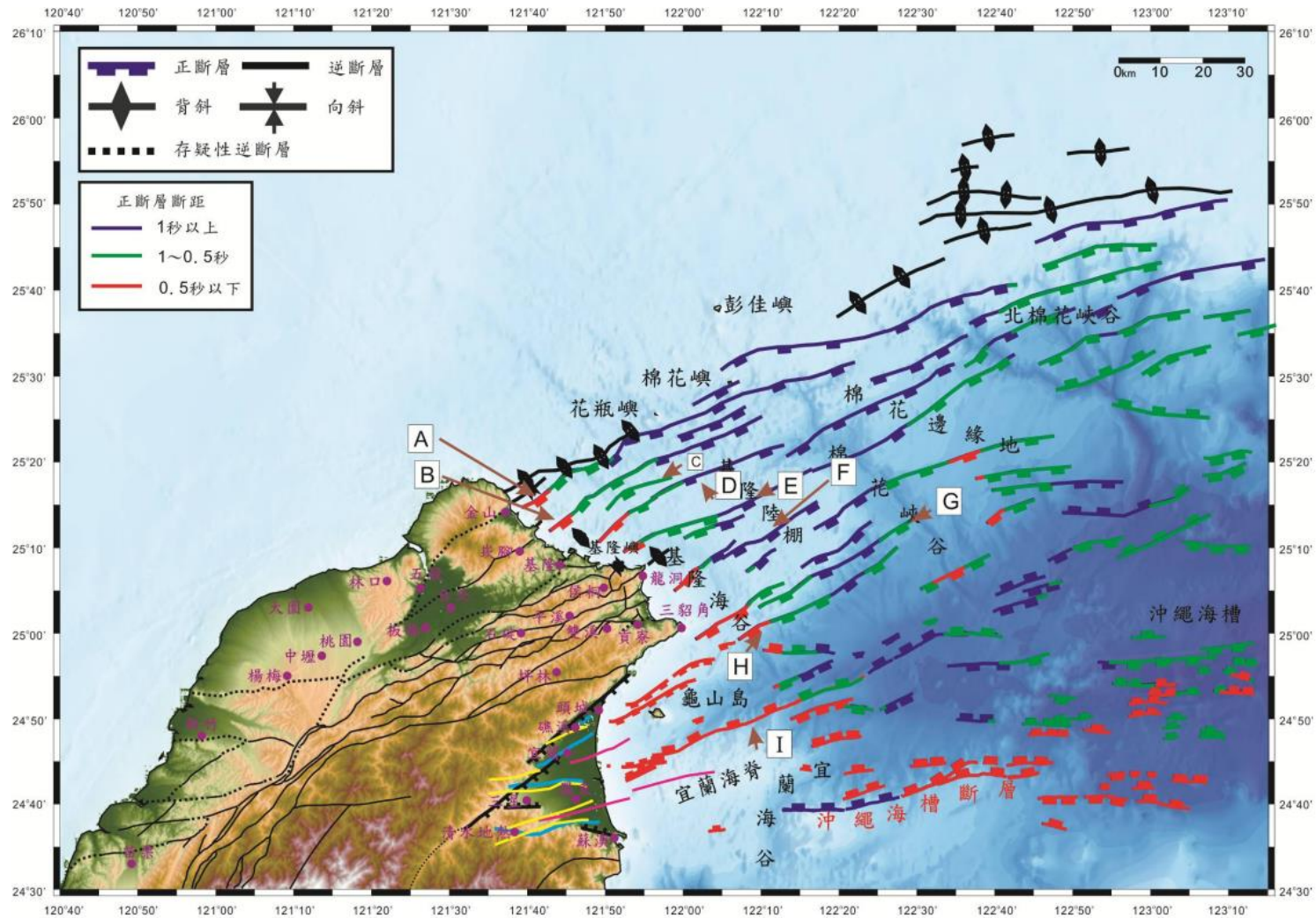


圖 1.2 台灣東北部外海正斷層分布圖。正斷層顏色指示推估斷距大小，由大至小依序為藍色、綠色、紅色。(引自陳冠宇，2014)

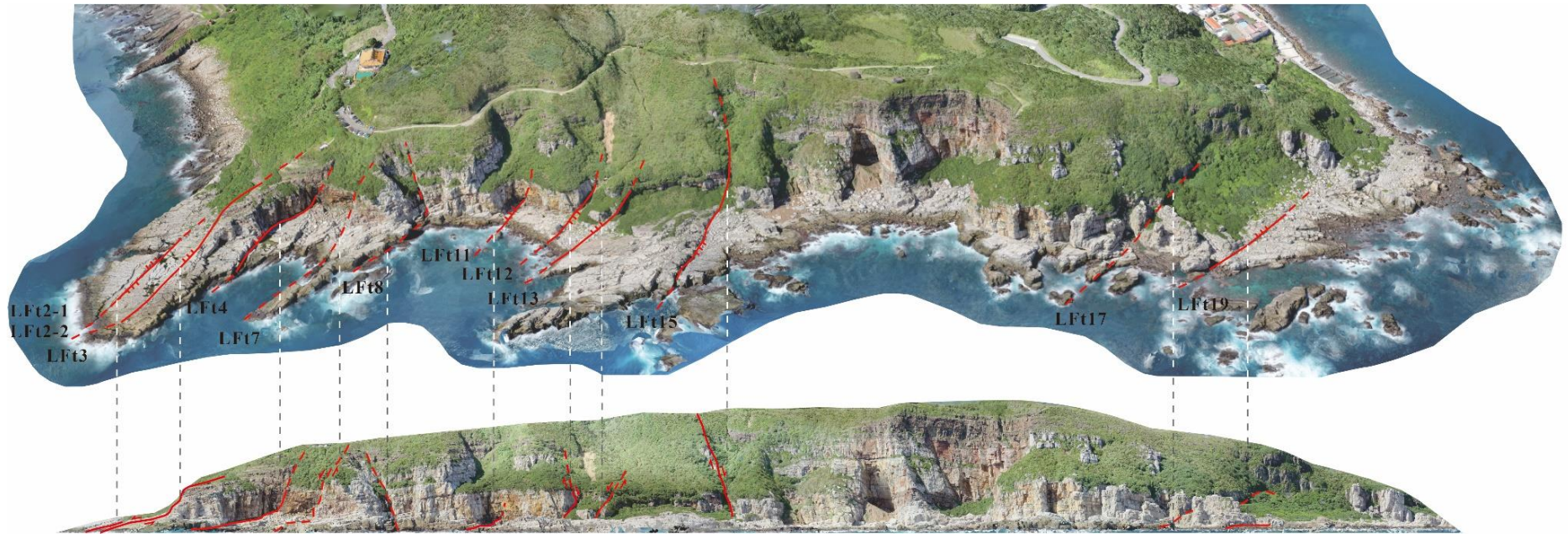


圖 1.3 龍洞岬三維模型(上)及立面影像(下)斷層分布判釋。紅色線段為斷層跡。

## 第二章 區域地質概述

### 2-1 地形

台灣東北角地形以丘陵、濱海階地、海蝕平台為主，受區域地質構造影響，丘陵嶺線多呈東北東走向向海延伸，海岸多為海相至濱海相砂岩及頁岩構成之岩岸。東北海岸幾個主要海灣均為斷層截切塌陷形成(如龍洞灣及澳底灣等)，兩海灣間的岩層則向外凸出形成海岬(如鼻頭角及三貂角等)(圖 2.1)。海岸區域受風力及海浪侵蝕發育許多海蝕地形，如海蝕平台、海蝕崖、海蝕洞等。

本研究區主要位於台二線 83K 至 88K 間鼻頭角及龍洞地區，兩岬角朝東北方向延伸入海，出露延續性良好的海蝕平台及海蝕崖，利於野外調查及無人機測繪作業，平直的地形能大大減少正射及立面影像建模後受地形影響的變形差異。

### 2-2 地質

臺灣東北部出露的地層，主要可以用三大地質區來劃分，龍洞斷層以北屬於西部麓山帶地質區，屈尺斷層以南則屬於雪山山脈地質區(表 2.1)。介於龍洞斷層與屈尺斷層之間區域為西部麓山帶與雪山山脈地層之間的過渡區，因岩性及變質程度不同於此兩大地質區，詹新甫(1981)稱該地塊為澳底地塊，並另建一套岩石地層名稱，包括漸新世龍洞砂岩、蚊仔坑層以及其上覆的部分麓山帶地層。

西部麓山帶地質區為中新世木山層、大寮層、石底層、南港層、南莊層及桂竹林層所組成，屬於濱海相及淺海相交互出現之沉積層，指示中新世曾經歷三次海近海退，部分區域受更新世初期石英安山岩體的侵入，形成基隆

火山群。雪山山脈地質區由漸新世大桶山層與中新世澳底層組成，大桶山層以黑灰色硬頁岩為主，屬於大陸棚或大陸斜坡較深海相的沉積物，澳底層則以淺海至濱海相砂頁岩互層為主。

### 2-2-1 研究區域主要地層

鼻頭岬角出露地層在黃鑑水和劉桓吉(1988)的雙溪五萬分之一地質圖幅中屬於晚中新世至上新世桂竹林層，可分為大埔段及上覆的二鬮段兩段。大埔段主要分布於鼻頭向斜兩翼，二鬮段則分布於鼻頭向斜軸部(詹新甫，1981)。龍洞岬沿岸地區出露龍洞砂岩，於龍洞步道側邊壁面上則能觀察到上覆的蚊仔坑層。以下將簡要描述本研究區及鄰近地層，內容參考自黃鑑水和劉桓吉(1988)：

#### 1. 龍洞砂岩(Lt):

以厚層白色粗粒至極粗粒變質石英砂岩為主，並含有少許卵石狀之沉積岩及火成岩礫石，成條狀帶形成平行於層理之層間礫石，厚度自數公分至數十公分不等。砂岩中常見清晰之交錯層理，具有發育良好的裂隙，破裂面常有石英脈填充。本層推估為濱海相之沉積物，經變質作用產生再結晶現象。下部岩層未完全出露，僅能推估龍洞岬出露岩層厚度約 120 公尺，經化石年代比對屬漸新世地層。

#### 2. 蚊子坑層(Wt):

出露於龍洞至澳底間的海岸地區，岩性以深灰色厚層緻密頁岩為主，偶夾薄層泥質砂岩及粉砂岩，頁岩風化後呈現鉛筆、木片狀破裂。本層上部泥質砂岩較多 厚度最大可達 2 公尺，一般則小於 50 公分。以岩性及沉積構造推測本層可能為大陸棚或大陸斜坡上之堆積物。沿東北角海岸出露厚度約 1100 公尺，化石推論年代為漸新世地層。

#### 3. 南莊層(Nc):

本層主要出露於哩咾及南雅海岸一帶，岩性以白色塊狀或厚層細至粗粒砂岩為主，夾深灰色頁岩及砂頁薄層互層，含有煤層，砂岩以多為石英質，有許多中至大型的交錯層，並夾帶一些淺灰色炭質物，屬於濱海相沉積物。層厚約 350 公尺，年代推估為中晚期中新世。

#### 4. 桂竹林層：

主要分布於鼻頭向斜兩翼，根據岩性可以分成兩段，下段為大埔段(Kct)，以深黃棕色厚層至塊狀砂岩及灰色泥質細砂岩為主，夾有薄至中層的砂頁岩互層。砂岩層能見明顯交錯層理，富含許多貝類及生痕化石，本段頂部有豐富的石英礫石及氧化鐵結核；上段為二鬮段(Kce)，以淡青灰色厚層泥質砂岩及粉砂岩，夾有灰色頁岩及砂頁互層，淘選度差，偶而可見石英礫石夾帶其中。桂竹林層兩段相加厚度約為 400 公尺，化石鑑定屬於晚中新世至早上新世的地層。

### 2-2-2 研究區域主要構造

本研究區陸域構造以東北走向的逆斷層與褶皺為主，鼻頭岬及龍洞岬之間有一高角度向東南傾斜之逆斷層，稱為龍洞斷層(詹新甫，1981)，近斷層上盤及下盤處分別可見一背斜(蚊子坑背斜)及向斜(鼻頭向斜)(圖 2.2、圖 2.3)，陳建輝(1993)認為此區構造形成機制為斷層擴展褶皺作用。以下針對上述地質構造進行描述。

#### 1. 龍洞斷層：

龍洞斷層原稱為草山斷層(顏滄波與陳培源，1953)，走向東北-西南向，為一高角度逆斷層，斷面向東南傾，斷距超過 2,500 公尺；向南延伸至三貂嶺附近斷距逐漸減少，推測除了逆衝作用，該斷層兼具逆時針方向旋轉。根據龍洞斷層下盤岩層高角度倒轉，不符鼻頭向斜南翼海蝕平台上觀察到之緩傾斜岩層，推測龍洞斷層下方有一分支斷層，林啟文等(2022)稱為鼻頭斷

層。

2.鼻頭向斜:

向斜軸為東北走向，近乎水平，向斜兩翼岩層緩傾斜約 5-20 度，褶皺南翼向東南延伸岩層轉為高角度至倒轉，而後被龍洞斷層所截切。

3.蚊子坑背斜:

背斜軸向約與鼻頭向斜軸向平行，朝西南傾沒，於龍洞岬沿岸兩翼岩層緩傾斜約 8-20 度，背斜西北段受龍洞斷層所截切，東南段存在一斷距達數十公尺之正斷層，稱為新路尾斷層。

表 2.1 臺灣東北部各地質區的地層層序及層厚。

地質年代		西部麓山帶地質區 (黃鑑水&劉桓吉，1988)	澳底地塊 (詹新甫，1981)	雪山山脈地質區 (黃鑑水&何信昌，1989)
上新世	早期	桂竹林層二鬮段 (>300m)	未發現	未發現
	中新世	晚期		
南莊層(350m)				
南港層(700m)				
中期	石底層(300~450m)			
早期	大寮層(500m)	大寮層		
	木山層(450~750m)	木山層(750m)	澳底層枋腳段(>320m) 澳底層媽岡段(370m)	
漸新世	晚期	五指山層	蚊仔坑層 (700m)	大桶山層(>735m) 乾溝層(800m)
	早期	未發現	龍洞砂岩 (>100m)	四稜砂岩(>200m)

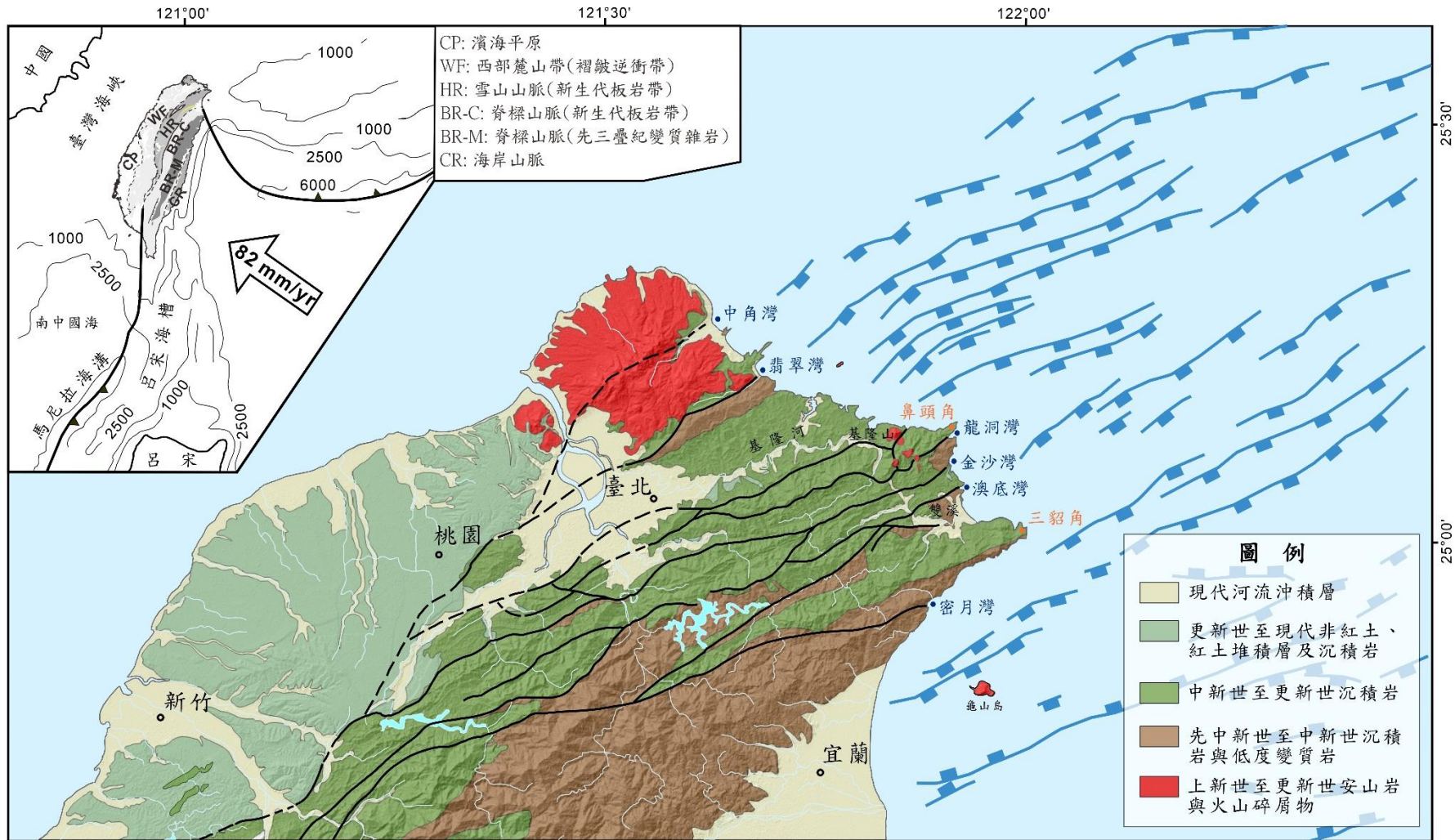


圖 2.1 北臺灣地質圖。地質圖修改自經濟部中央地質調查所民國 89 年五十萬分之一的臺灣地質圖，陸上斷層(黑色線段)外海正斷層(藍色線段)位置修改自陳冠宇(2014)。(改繪自尤芊翔，2016)

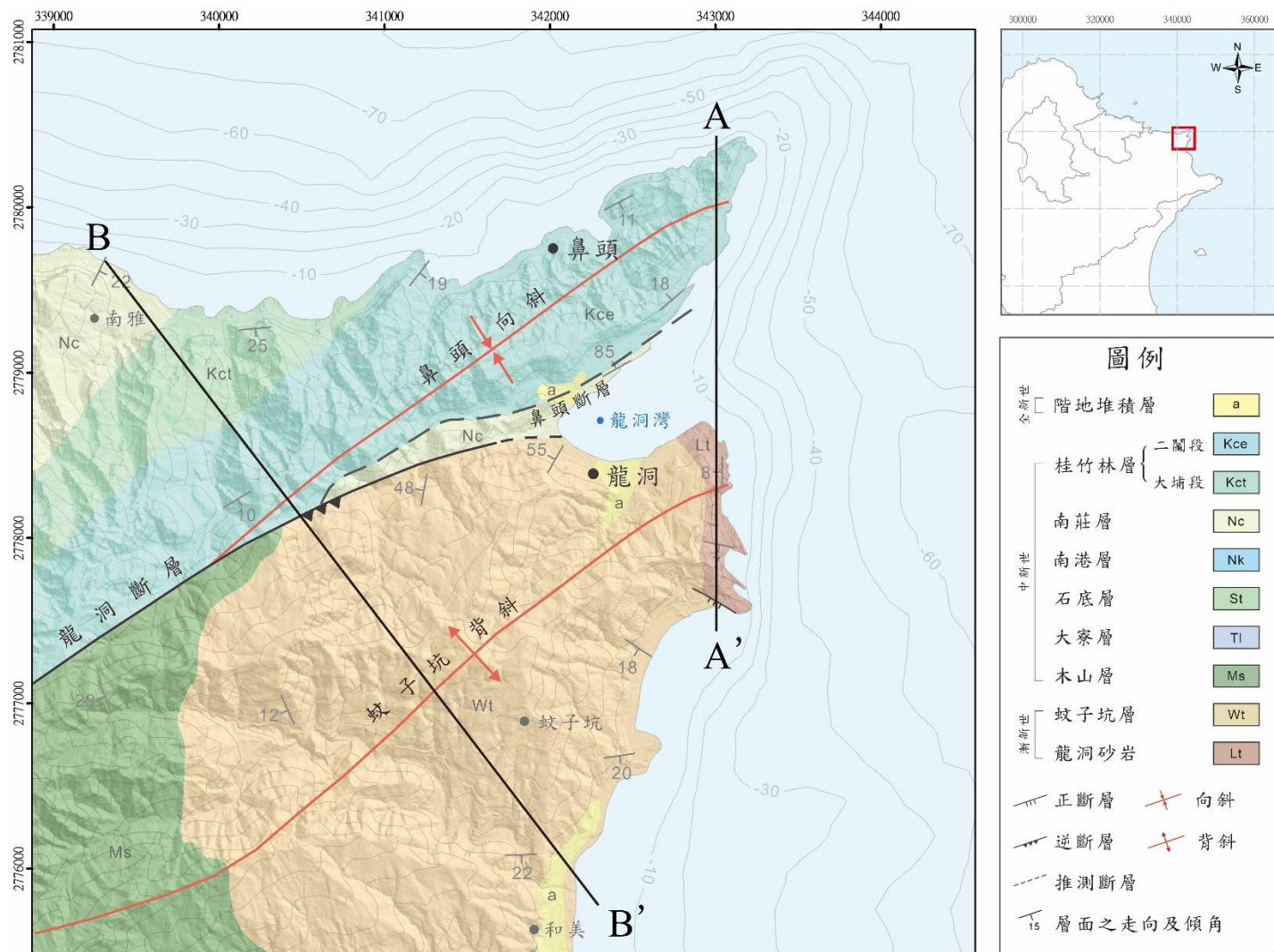


圖 2.2 鼻頭、龍洞及鄰近區域地質圖。(改繪自地調所雙溪地質圖，黃鑑水與劉桓吉，1988)



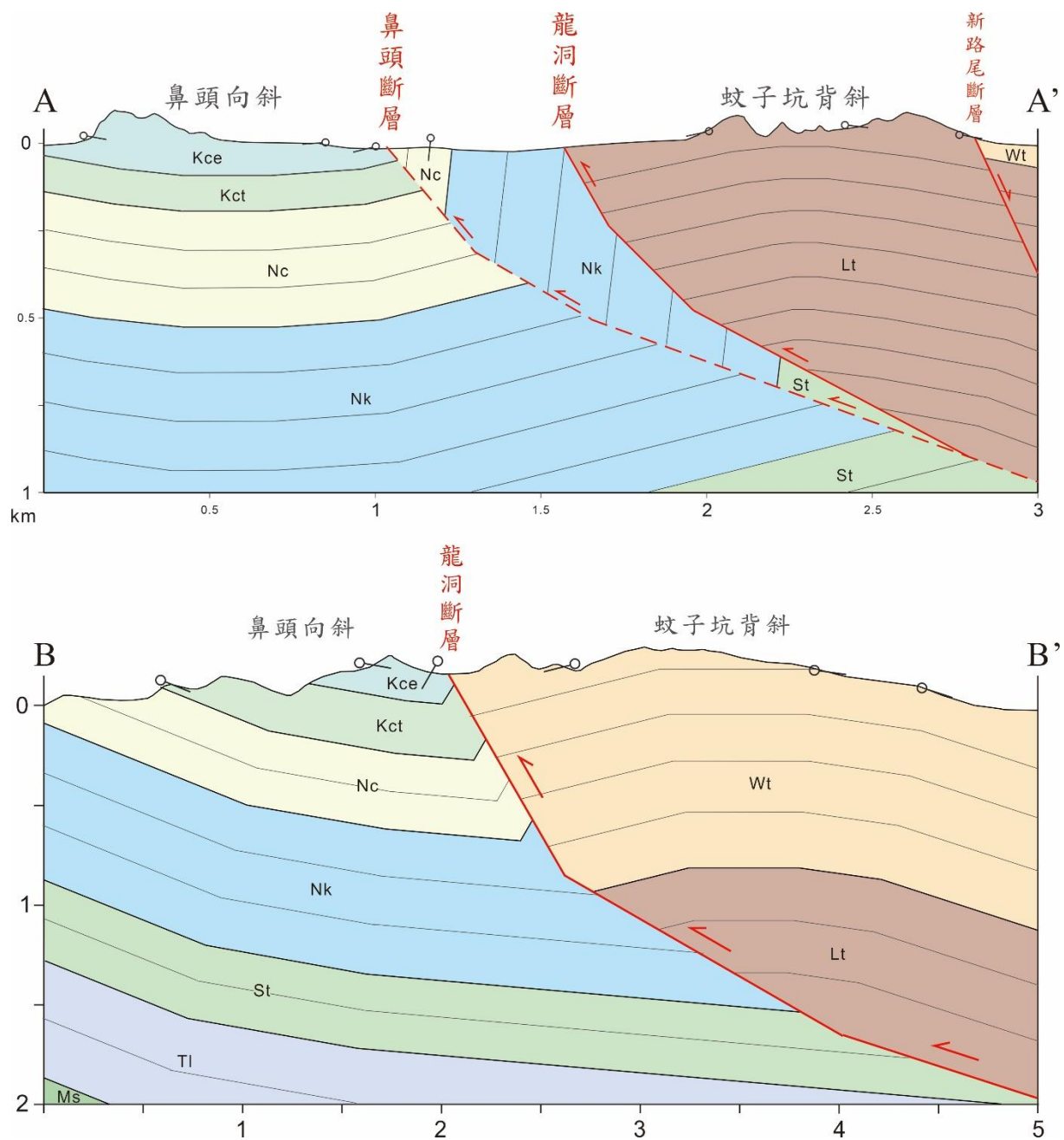


圖 2.3 研究區地質剖面。剖面位置參見圖 2.2。

## 第三章 文獻回顧

### 3-1 裂隙

#### 3-1-1 裂隙破裂機制

根據荷載(loading)與裂隙面及裂面前緣的相對方向，可將裂隙尖端的破裂機制分為三種(Engelder, 1987)(圖 3.1)。

1. 張裂(opening ,mode I)：垂直裂隙面方向的張力破裂，不包含任何剪力作用。
2. 滑動(sliding ,mode II)：平行裂隙面方向存在的剪力，產生沿裂隙面並垂直於裂隙尖端邊界(tip line)的滑動方向。
3. 剪動 (scissoring ,mode III)：平行裂隙面方向存在的剪力，產生沿裂隙面並平行於裂隙尖端邊界的滑動方向。

野外露頭上常能觀察到結合 mode I、mode II 或 mode I、mode III 的破裂特徵，此種裂隙的生成機制可稱為混合模式 (mixed mode loading)。裂隙尖端的破裂路徑通常會趨向垂直最大張應力方向，以最小化剪力於裂隙面上的作用(Younes and Engelder, 1999)。

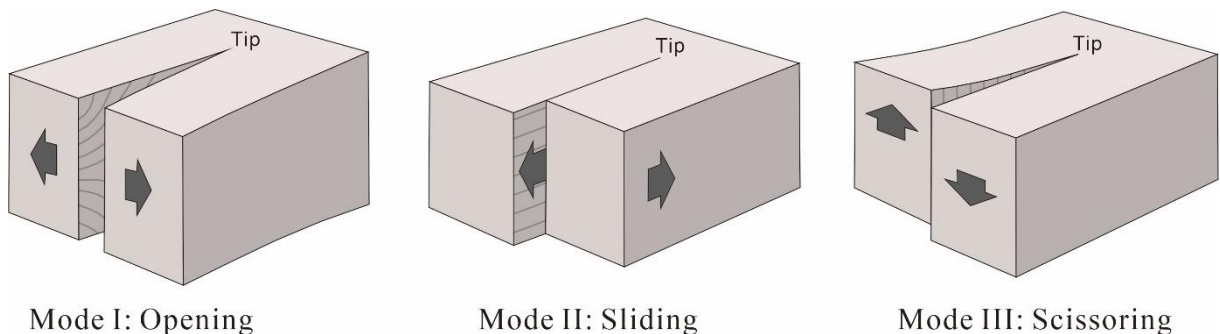


圖 3.1 三種裂隙尖端破裂機制示意圖。Mode I 張裂；Mode II 滑動；Mode III 剪動。(改繪自 Davis et al., 2011)

### 3-1-2 裂隙定義及分類

裂隙(fracture)的定義在不同領域及研究者的解釋上有所不同，在構造地質學上可將裂隙定義為“任何材料中無內聚力的破裂面，在岩石中的裂隙則包括裂縫、節理及斷層”(Neuendorf et al., 2005)。裂縫(crack)通常意指相對小型的裂隙，且其開裂方向有著垂直破裂面的趨勢；節理(joint)多指出現在岩石中的裂隙，且其裂面上無任何剪切位移特徵，較為嚴謹的定義則須為前述 mode I 破裂機制下所形成的裂隙；斷層(fault)則意指岩石中裂隙所分割之兩側岩塊產生滑移，此類的裂隙形成多屬 mode II 或 mode III 的破裂機制。

Hancock (1985)根據前人的三軸試驗(triaxial test)結果以及莫爾破壞包絡線(Mohr failure envelope)，統整在相同內摩擦角( $\phi=30^\circ$ )及相同岩體抗張強度( $T$ )時，軸差應力大小與岩體破裂時破裂面與最大主應力間的兩倍夾角 $2\theta$ (二面角 dihedral angle)的關係(圖 3.2)。軸差應力大小會決定岩體破壞是屬於張力破裂還是剪力破裂，因此依其結果可將裂隙分為以下三類：

- (1) 伸張裂隙(extension fracture)：裂隙形成的尖端破裂機制屬於 mode I，以張力破裂為主，形成時的軸差應力  $(\sigma_1 - \sigma_3) < 4T$ 。破裂方向與最大主應力方向平行， $2\theta$  為 0 度，裂面通常較為粗糙，節理多被歸類為此類裂隙。
- (2) 混合裂隙(hybrid fracture)：此類裂隙的尖端破裂機制屬於 mode I + mode II，混合張力與剪力破裂，形成時的軸差應力  $4T < (\sigma_1 - \sigma_3) < 8T$ ， $2\theta$  介於 1 至 60 度之間，裂面較伸張裂隙平直。
- (3) 剪力裂隙(shear fracture)：裂隙形成的尖端破裂機制屬於 mode II，以剪力破裂為主，形成時的軸差應力  $(\sigma_1 - \sigma_3) > 8T$ ， $2\theta$  在 60 度以上，裂面較前兩類裂隙更為平直。

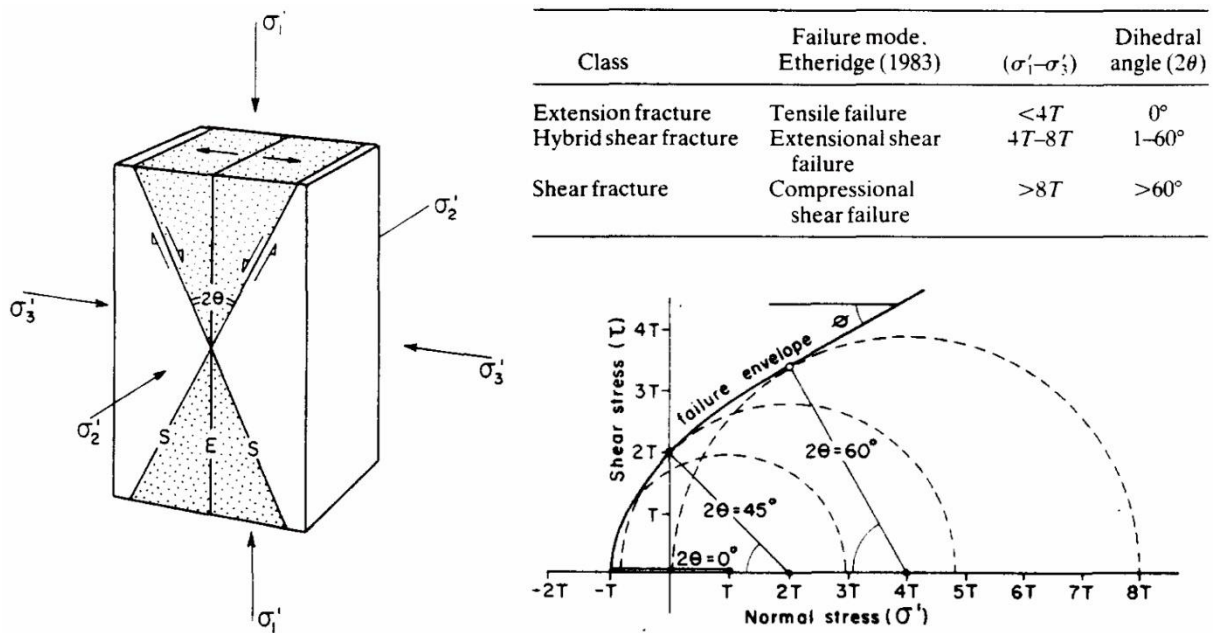


圖 3.2 Hancock 的裂隙分類準則。岩體三軸試驗(左圖)，及對應之莫爾破壞包絡線(右圖)表示破裂面夾角( $2\theta$ )與裂隙形成之應力關係。(圖引自 Hancock, 1985)

### 3-1-3 裂隙與構造的關聯性

本節主要在探討裂隙與鄰近的褶皺及斷層之間的關聯性，在此之前，我們需先了解裂隙於近乎未受構造影響的區域上發育的可能性，褶皺帶通常緊鄰著前陸盆地，該區域多為平坦且幾乎不受褶皺作用的影響(Price & Cosgrove, 1990)，然而，形成伸張裂隙所需的應力條件並不困難( $\sigma_1 - \sigma_3 < 4T$ )，且低應變的區域發育裂隙組的例子也不在少數。Price (1966)根據前人研究及許多實例中，提出一個在這些受構造影響很小的區域中裂隙發育的可能模式，並指出主應力軸在形成裂隙的過程中方向幾乎保持不變，但應力的大小可能發生變化，意指  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  的方向在不同階段可能會互相交替，進而形成不同的裂隙方向及斷層。Price & Cosgrove (1990)將此裂隙發育模式與 Hancock (1969)於野外描繪的實際例子進行比較，兩者並無太大的差異性(圖 3.3)，證實複雜的裂隙組能在此類受構造影響小的區域中形成。

褶皺褶曲過程中常伴隨著裂隙的形成(圖 3.4)，這些裂隙的位態與其發育所在的岩層及鄰近褶皺位態有所關聯(Hancock, 1985; Engelder, 1987)，假設褶皺軸位態與岩層走向相當，我們可以簡單的定義與褶皺相關的裂隙種類，褶皺軸部因局部拉張經常能觀察到垂直於擠壓方向的伸張裂隙，其走向多平行於褶皺軸及岩層走向，因此可稱之為縱節理(longitudinal joint)或走向節理(strike joint)，垂直擠壓的側向伸張作用能形成平行褶皺軸及岩層傾向的橫節理(cross joint)或傾向節理(dip joint)，而其餘與褶皺軸或岩層走向斜交的節理可統稱斜向節理(oblique joint)(圖 3.5)。

斷層的形成常沿著既存節理發育，相對地也常伴隨新裂隙產生，Peacock (2001)分別探討早於斷層(pre-fault)、同斷層(syn-fault)及晚於斷層(post-fault)形成的裂隙特徵。早於斷層形成的裂隙多受斷層影響而擴張(dilation)，常有礦脈填充，並控制著後形成的斷層幾何樣貌。Wilkins et al. (2001)另指出沿既存節理發育的斷層，其斷層面上可觀察到羽毛狀構造等 mode I 破裂特徵，且較不易生成斷層角礫岩或斷層泥，此外斷層滑移量通常與破裂長度無關。同斷層形成的裂隙於近斷層的區域密度增加，也常出現在斷層尖端破壞帶(tip damage zone)中(Kim et al., 2004)，如：馬尾狀裂隙(horsetail fracture)、羽狀裂隙(pinnate fracture)等(圖 3.6b)，此類裂隙多與斷層生成時的應力方向有所關聯，可做為古應力分析的良好標記(Petit et al., 2000)。晚於斷層形成的裂隙多受制於斷層，若斷層有礦脈填充，無礦脈填充的裂隙可能指示其形成時間晚於斷層。

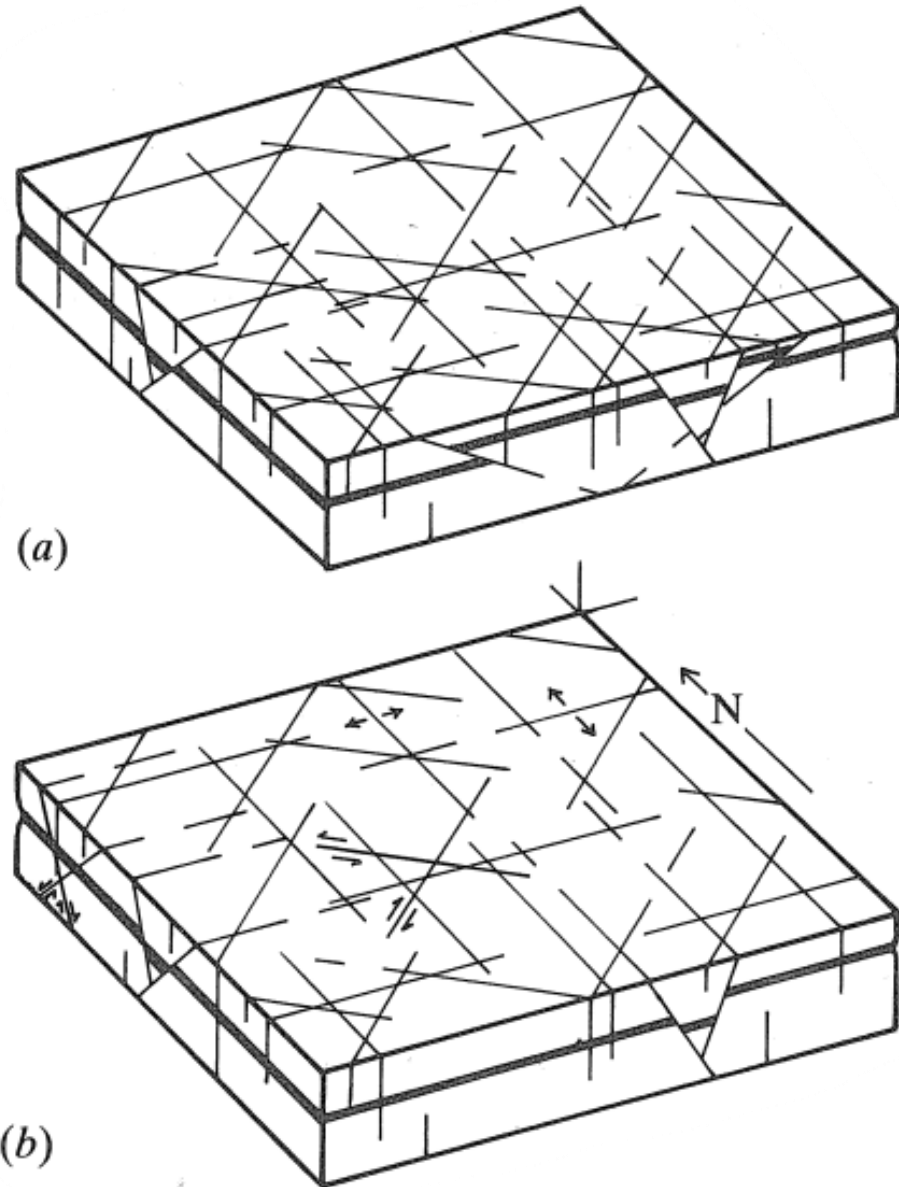


圖 3.3 構造影響小的平坦地區預期裂隙分布方式。(a) Price (1966)裂隙發育模式與(b) Hancock (1969)野外描繪之概念模型，兩者相似度高。(圖引自 Price & Cosgrove, 1990)

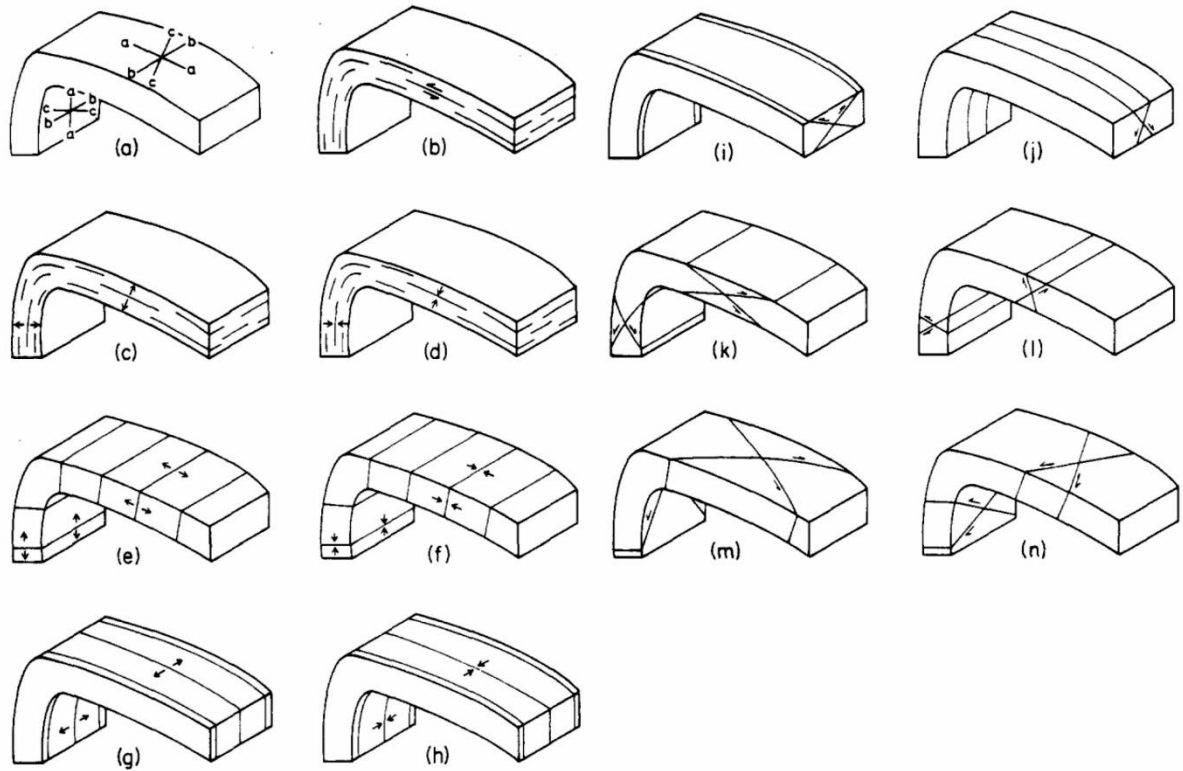


圖 3.4 褶皺褶曲可能伴隨形成的各種裂隙。(圖引自 Hancock, 1985)

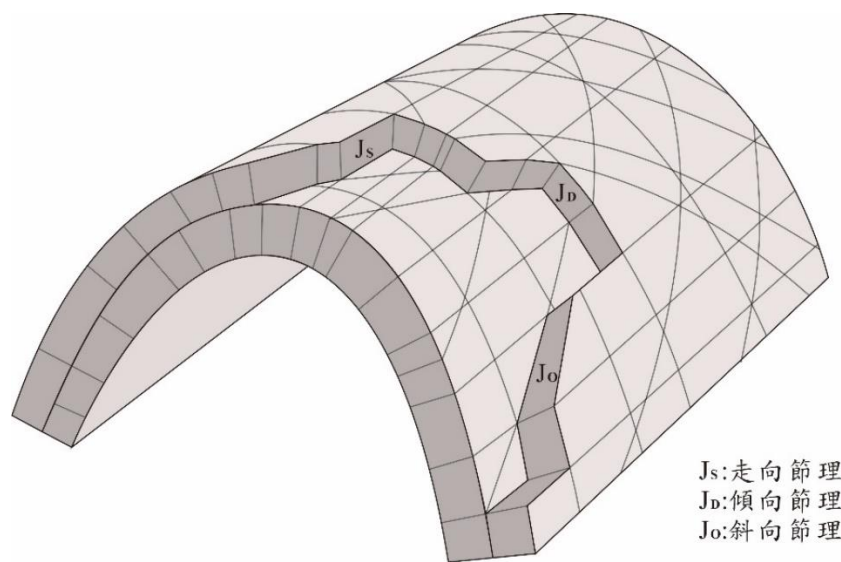


圖 3.5 褶皺上常見之三種節理種類。平行岩層走向的節理為走向節理( $J_s$ )，平行岩層傾向的節理稱為傾向節理( $J_d$ )，與岩層走向斜交的節理可統稱為斜向節理( $J_o$ )。(改繪自 Ramsay et al., 1987)

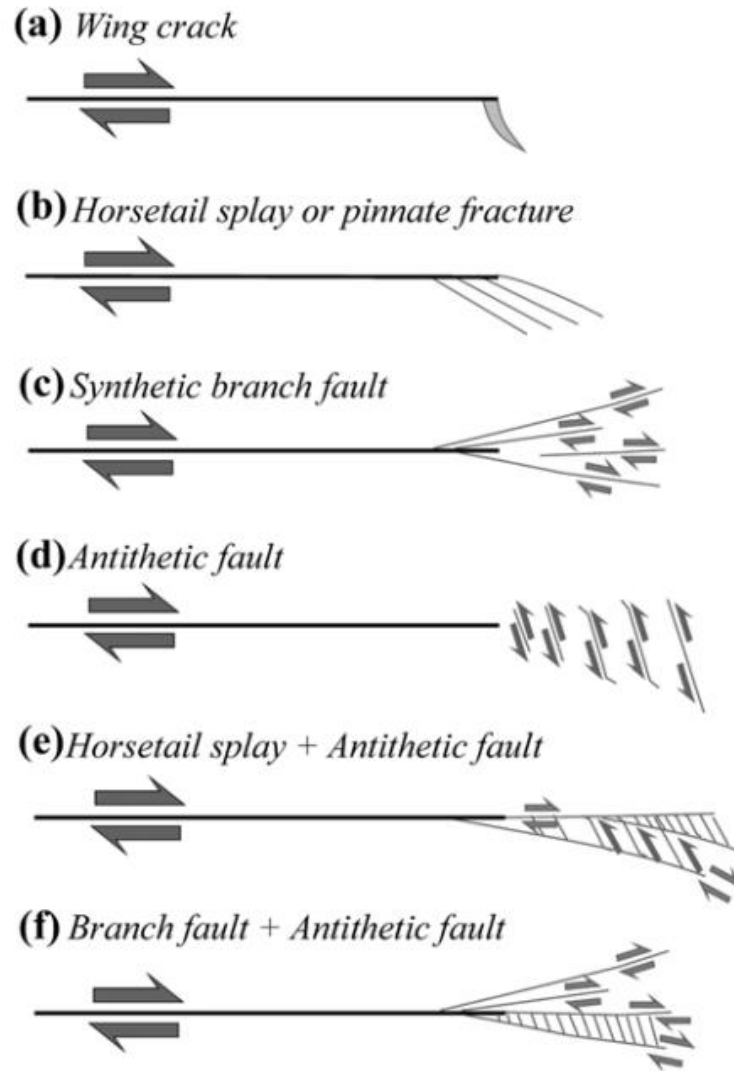


圖 3.6 走滑斷層尖端破壞帶的裂隙形貌。(a)翼狀裂縫 (b)馬尾狀或羽狀裂隙 (c)同向分支斷層 (d)反向斷層 (e)馬尾狀裂隙+反向斷層 (f)分支斷層+反向斷層。(圖引自 Hancock, 1985)



## 3-2 正斷層

### 3-2-1 正斷層形成機制與模型

Anderson (1951)提出所謂的“安德森斷層理論(Anderson's theory of faulting)”假設斷層與主應力軸方向的關係(圖 3.7)。由於大陸地殼表面多可界定為空氣與岩石的界面，理論上表面的剪應力相當小，因此可假設地表為一應力主平面。Anderson 假定在淺層地殼中，一個主應力方向是垂直地表的，另外兩個必須是水平的，而主應力的大小及方向可決定斷層的種類：正斷層( $\sigma_1$  垂直)、走滑斷層( $\sigma_2$  垂直) 和逆衝斷層 ( $\sigma_3$  垂直)，該假設常被使用在後續的許多研究中，例如 Angelier (1989)提出的斷層古應力分析方法即以此假設為背景依據；李建成(1989)以此假設為基礎輔以 Price (1966)的理論，提出在造山運動過程中，大地應力與深度的關係，越接近地表越容易形成正斷層。

Childs (2017)統整前人研究並提出兩個普遍被討論的斷層增長模型(圖 3.8)：一、孤立斷層模型(isolated fault model)，二、等長連貫斷層模型(constant-length coherent fault model)，前者反映了斷層組中的各個斷層一開始彼此在運動學上互不影響，最終由於偶然的相互作用合併成一個大斷層，後者假設斷層組中的各個斷層在三維空間中受控於一個較大的構造，各斷層的發育在運動學上相同，最後連結成一個大斷層，此斷層長度約等於原先存在的斷層長度加總。此兩種斷層增長模式皆曾被用來解釋正斷層的發育機制(Gupta & Scholz, 2000；Walsh et al., 2002)。

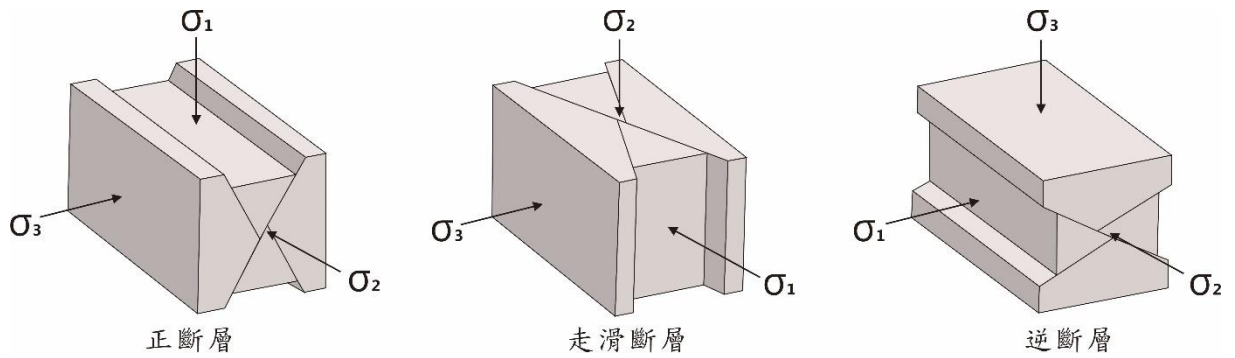


圖 3.7 安德森斷層理論形成各斷層的應力狀況。(改繪自 Rowland et al., 2007)

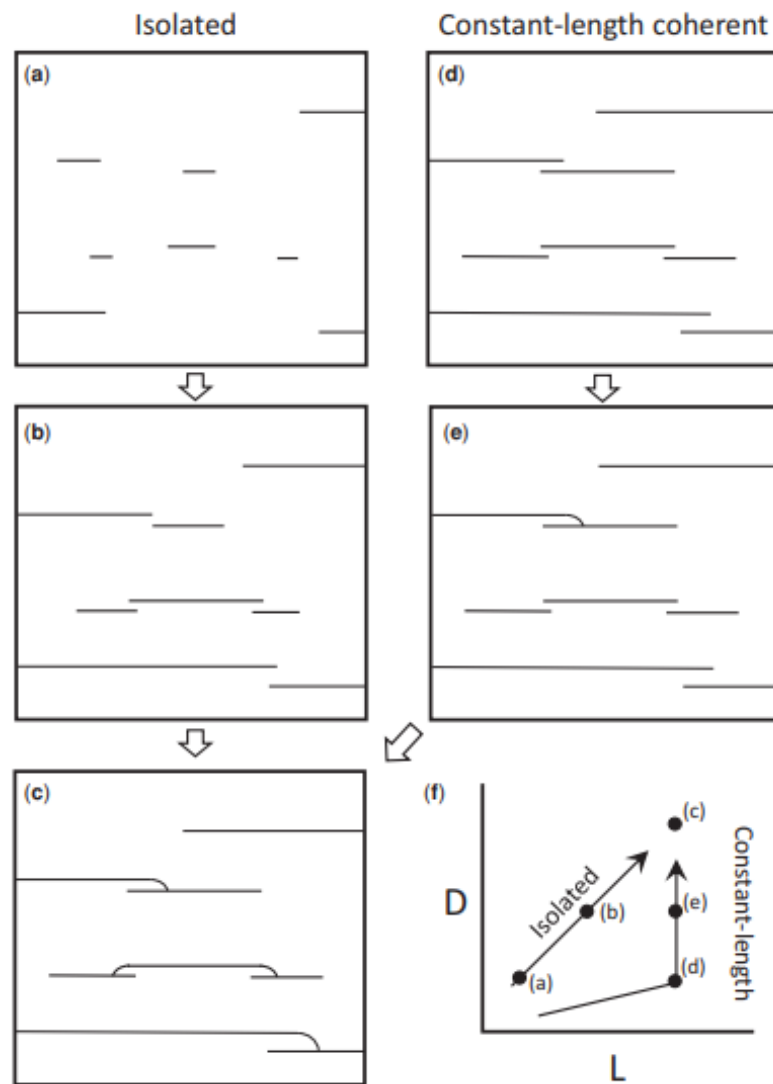


圖 3.8 兩種斷層增長模型概念圖。孤立斷層模型(a,b)各斷層擴展速率不同，等長連貫斷層模型(d,e)各斷層擴展僅限與鄰近斷層相連，最終兩種模型能產生相同的大斷層形貌(c)。圖(f)描述兩種模型於各階段斷層總位移量(D)與總長度(L)間的關係。(圖引自 Childs, 2017)

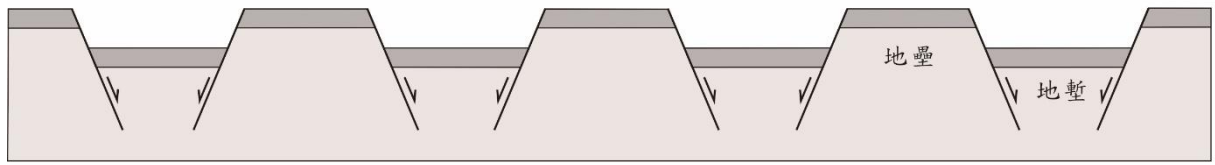
### 3-2-2 正斷層定義與種類

正斷層被指認為在伸張環境下所形成的構造，並定義為上盤相對下盤向下運動的斷層(Neuendorf et al., 2005；Davis et al., 2011)，依莫爾-庫倫破壞準(Mohr-Coulomb's failure criterion)及安德森斷層理論，正斷層形成時最大主應力  $\sigma_1$  垂直於地表，理論上形成之正斷層角度約為 60 度，若角度低於 45 度的正斷層稱為低角度正斷層(low-angle normal fault)。

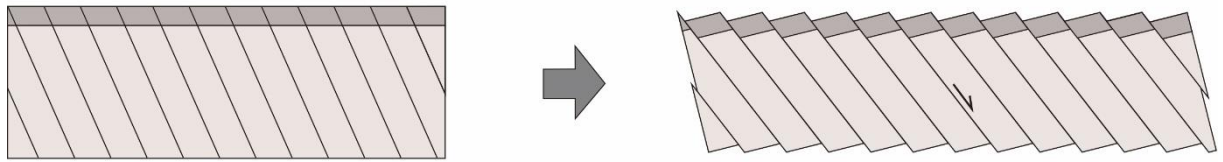
Wernicke & Burchfiel (1982)將正斷層分成非旋轉(non-rotational)及旋轉(rotational)兩種，此分類能廣義的解釋大多數的正斷層型態，主要探討與斷層相關的地質結構(如:岩層)是否旋轉，依斷層幾何可細分為平面斷層(planar fault)及鏟形斷層(listric faults)，非旋轉正斷層僅能以平面斷層的形式呈現(圖 3.9a)，各斷塊滑動方向皆平行斷層面，旋轉斷層則能同時以平面及鏟形斷層的形式出現(圖 3.9b.c.d)，鏟形斷層代表正斷層系統中呈鏟狀(向上凹)的主斷層，在地表露頭上的斷層為高角度，隨深度角度漸緩連接底滑斷層(detachment fault)，假設相鄰斷塊是剛體，則會產生空間上的問題，為了保持幾何相容性，上盤中的岩層必須旋轉並向主斷層傾斜，形成滾動背斜(rollover anticline)。

地塹(graben)及地壘(horst)為傾向相反的正斷層系統中典型的構造型態，在理想的情況下，斷層的增長率是相等的，因此斷塊不會旋轉使得整個地塹-地壘保持對稱，然而斷層通常以不同的速度增長，間夾斷塊旋轉形成相對複雜的地塹-地壘。Lenson (1958)提出在擠壓環境中，假設兩非平行相交的走滑斷層面摩擦力不同，導致兩斷層錯動時斷層之間的空間減少或增加，間夾斷塊為了調適空間變化而抬升或塌陷而形成地塹、地壘，說明此類的伸張構造並非僅出現於正斷層主導的環境下。

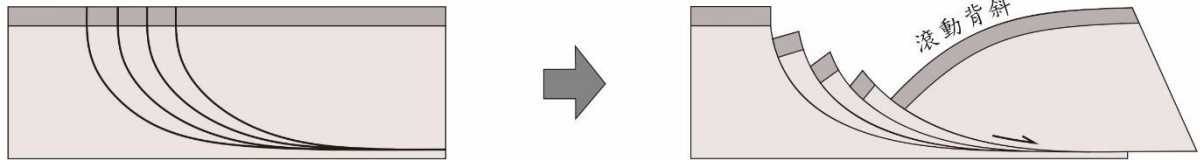
(a) 非旋轉平面斷層



(b) 旋轉平面斷層



(c) 旋轉鏟形斷層



(d) 鏟形主斷層+旋轉平面斷層

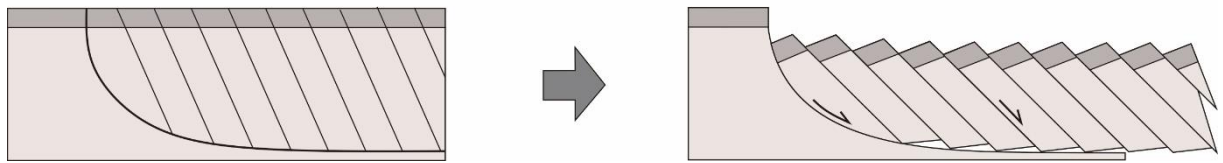


圖 3.9 正斷層種類。(a)非旋轉平面斷層能以理想狀態下的地塹-地壘系統來解釋。(b)旋轉平面斷層，斷層面相互滑動形成骨牌狀(domino)或書架狀(bookshelf)正斷層。(c)旋轉鏟形斷層上盤斷塊沿斷面下滑，因重力彎曲形成滾動背斜。(d)鏟形主斷層與旋轉平面斷層合併的樣貌。(改繪自 Davis et al., 2011)

### 3-3 研究區前人相關研究

鼻頭及龍洞地區橫跨龍洞斷層，兩側出露地層年代及性質截然不同，加上具有良好的海蝕平台，適合地質構造研究，前人已對此區域有一定程度的了解，包括裂隙調查、古應力分析、地質構造剖面建立等等。以下將概述並統整兩區域前人研究：

#### 3-3-1 區域構造關聯性

陳建輝(1993)建立三維地質構造剖面以解釋龍洞區域地質構造的形成機制，利用幾何形態分析法(Wilkerson, et al., 1991)認為龍洞斷層與鼻頭向斜、蚊子坑背斜為斷層擴展褶皺作用的形式。此外，龍洞東北端層位落差可達4000公尺，除了斷層本身的位移量，可能還與斷層兩側地層傾斜方向相反有關。黃榮彬(1994)承襲陳建輝之想法繪製龍洞及鄰近地區的構造平衡剖面，認同此區構造形成機制屬於斷層擴展褶皺作用，斷層與褶皺同時發育。

### 3-3-2 區域裂隙調查

#### (1)鼻頭

游明芳(1998)於鼻頭進行節理與碎形分析相關研究，主要集中在調查南岸海蝕平台及鼻頭漁港旁壁面之露頭，區分成18個調查點分析裂隙分布，並透過裂面特徵、截切關係及礦脈填充有無判斷裂隙形成先後關係。結果得出鼻頭地區共有四組裂隙，位態分別為：第一組  $N10^{\circ}E\sim N23^{\circ}W$ ；第二組  $N57^{\circ}E\sim N79^{\circ}E$ ；第三組  $N37^{\circ}E\sim N44^{\circ}E$ ；第四組  $N35^{\circ}W\sim N43^{\circ}W$ 。四組節理生成的先後順序分別為：第一組、第三組、第二組及第四組。此外，根據此研究提供之擦痕照片及裂隙破壞帶(damage zone)與交跡特徵，指出鼻頭區域第一組裂隙能觀察到右移性質的現象。

林啟文等(2022)於鼻頭岬南岸觀察到一系列具橫移分量的正斷層，形成小型地壘或地塹，斷層走向約為  $N7^{\circ}W\sim N20^{\circ}W$ ，斷距介於數公分至30公分，由於這些正斷層截切鼻頭向斜東翼的岩層，判斷其形成於褶皺之後。

#### (2)龍洞

田蓉禮(1989)詳細調查龍洞地區新路尾斷層周遭之斷層面特徵，描繪20條斷層剖面。此研究以Reches(1983)的三度空間應變模型解釋單一應力如何造成新路尾斷層帶複雜的斷層空間分布，此外，新路尾斷層上下盤皆出露走向約略與新路尾斷層平行之正斷層，此現象能以Kadhi & Hancock(1980)提出的非均勻性小幅度擴張之正斷層構造模式來解釋。

### 3-3-3 古應力分析

李錫堤(1986)於台灣北部進行古應力分析研究，歸納出三期古應力，第一期為西北-東南向之擠壓作用，相當於上新世弧陸碰撞褶皺形成的時期；第二期最大水平應力方向轉變成近南北向，仍以擠壓作用為主，為褶皺作用後正斷層頻繁活動之前，約為更新世早期；第三期則為東北-西南向之擴張作用，約為更新世中期至晚期正斷層開始活動之後。其於鼻頭地區古應力分析結果為第二期南北向擠壓應力為主，帶有次要的東西向伸張作用(圖 3.10a)。於龍洞地區的分析結果，顯示該區經歷三期古應力，第一期為近東西向的擠壓作用，第二期為南北向擠壓作用，最後為東北東-西南西向的伸張作用(圖 3.11a)。

李建成(1989)進一步解釋台灣北部古應力分布狀況，認為自更新世以來，台灣北部受到碰撞及擴張作用雙重影響，擠壓應力主要為西北-東南向，其次亦有約南北向及東西向之應力，多數正斷層指示之伸張方向以南北向為主，少數則為東北-西南向及東西向，這些少數的正斷層可歸類到擠壓應力下，地殼局部產生垂直方向上的運動。主要南北向的伸張則可視為張力型大地構造下的構造活動。根據鼻頭及龍洞地區走滑斷層及正斷層擦痕分析，鼻頭主要以南北向擠壓及近東西向伸張作用為主(圖 3.10b&c)，龍洞則指示西北-東南向的擠壓及東北東-西南西向的伸張作用(圖 3.11b)。

田蓉禮(1989)根據龍洞地區正斷層面上之擦痕資料分析斷層形成時相對的伸張方向，推估共有兩期，第一期： $N65^{\circ}E$ (圖 3.11c)；第二期： $N50^{\circ}W$ ，其結果與李錫堤(1986)及李建成(1989)於龍洞地區的分析結果一致。

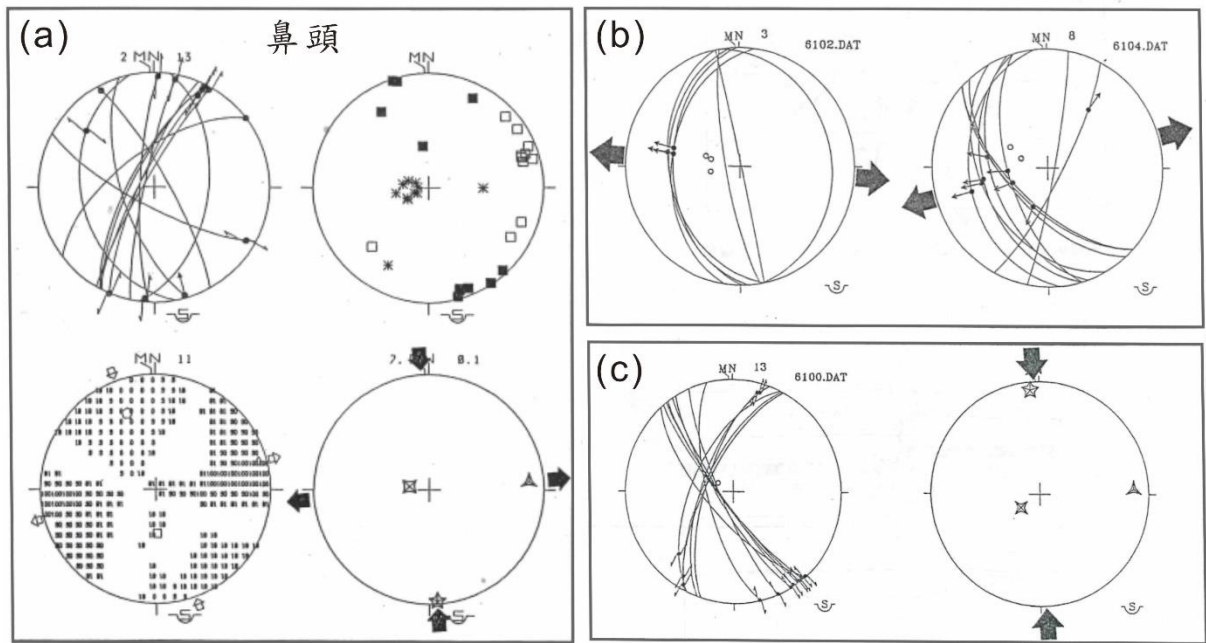


圖 3.10 鼻頭地區前人古應力分析比較。(a)取自李錫堤(1986)。(b、c)取自李建成(1989)。可見兩者分析結果相近，該區主要為南北向擠壓及東西向伸張作用。

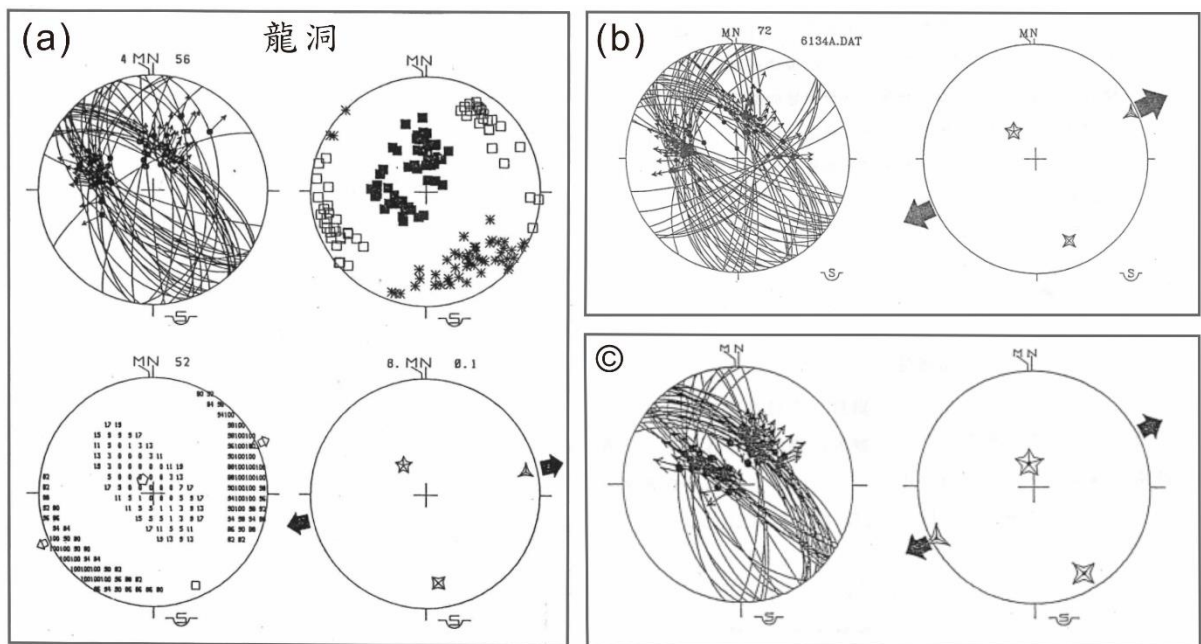


圖 3.11 龍洞地區前人古應力分析比較。(a)取自李錫堤(1986)。(b)取自李建成(1989)。(c)取自田蓉禮(1989)。三者分析結果相近，皆為東北東向伸張作用為主。





## 第四章 研究方法

### 4-1 UAV 影像測繪

早期地質調查前，會透過航照影像或相片基本圖進行地形地貌判釋，評估露頭出露位置並規畫調查路線，然而對於中視尺度的地質調查，前述圖資會因精度不佳或測繪年代久遠，導致呈現之露頭位置於實地調查有異，無法有效協助地質師及學者們進行地質調查前的場址評估。近年無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的發展迅速，除了成本低、機動性高，在性能及掛載之相機鏡頭等級上都有所提升，成為各領域作業應用上的利器。在地質領域的應用上，UAV 能克服傳統影像測繪上精度不足的問題，且能對於無法到達之露頭，進行細節上的拍攝，並可提供三維空間上的構造分布資訊。本研究透過無人機拍攝鼻頭及龍洞地區露頭狀況，並利用衛星定位儀(RTK)取得高精度之地面控制點位(Ground control point)，測量誤差小於 5 公分，最後藉由套裝軟體 Pix4Dmapper 進行影像匹配及空中三角測量等作業(圖 4.1)，建立三維模型及高解析度正射及立面影像協助判釋露頭上之構造。選用之無人機為 DJI Mavic 2 pro，體積小可摺疊收納以利野外調查攜帶，搭載相機鏡頭可達 2000 萬素，飛行抗風性佳，續航時間可達 30 分鐘。

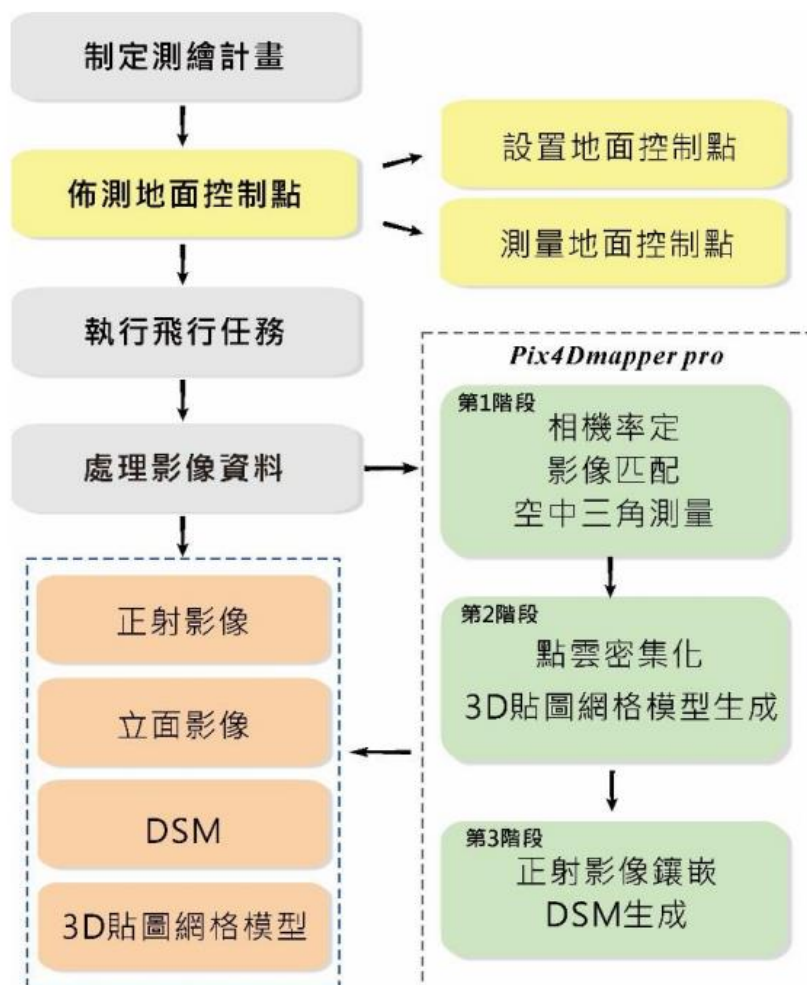


圖 4.1 無人機空拍及影像測繪流程。(圖引自謝承恩等，2016)

#### 4-1-1 攝影測量法

攝影測量法(photogrammetry)是透過攝影影像重建目標物在空間中的相對位置及三維影像的一種技術，以下將概述此方法的基本原理及專有名詞解釋。

1. 地面取樣距離(ground sample distance, GSD)：

地面取樣距離又稱地面解析度，是代表影像解析度重要的指標，其定義為兩連續像素(pixel)中心點在現實空間中的實際距離，單位為 cm/pixel。

2. 地面控制點(ground control points, GCPs):

GCP 是地面上具有已知坐標位置的設置點，用意是作為攝影測量影像能

對應到相對坐標系的參考點，GCP 的布置須考量到航照影像是否能清楚拍到，且盡可能的平均配置在目標區域，在具有明顯海拔高差變化的地區，須確保在海拔高區及低區均有設置 GCP，有效的選擇 GCP 位置能確實制約測繪模型的變形量，以提升模型精度。

3. 檢核點(check point)：

檢核點的測量及設置方式與控制點相同，用來檢核整體測繪模型的精度，通常僅檢核 X 與 Y 分量，高程 Z 分量則不列入考量。

4. 空中三角測量模式(Aerial triangulation):

在航測作業裡，由於相機影像位置(像空間座標)與地面目標位置(物空間座標)有著不同的座標系統，藉由地面控制點(ground control point, GCP)，及假設光線直線前進的原理下，相機投影中心、像點(相片上對應的像素點)、地物點(實際地面上的目標位置)三者應為共線關係(圖 4.2)，透過以下共線方程式能將相片上的像素位置轉換成為地面坐標系統之點位。

$$x = -f \frac{[m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)]}{[m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)]}$$
$$y = -f \frac{[m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)]}{[m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)]}$$

$f$  : 焦距

$x$ 、 $y$  : 地物點 P 的像空間座標

$X$ 、 $Y$ 、 $Z$  : 地物點 P 的物空間坐標；

$X_L$ 、 $Y_L$ 、 $Z_L$  : 相機投影中心 L 的物空間坐標；

$m_{ij}$  : 由相機投影中心分別對物空間坐標系的 X、Y、Z 軸旋轉姿態角

$\omega$ 、 $\varphi$ 、 $\kappa$  所構成旋轉矩陣之組成元素。

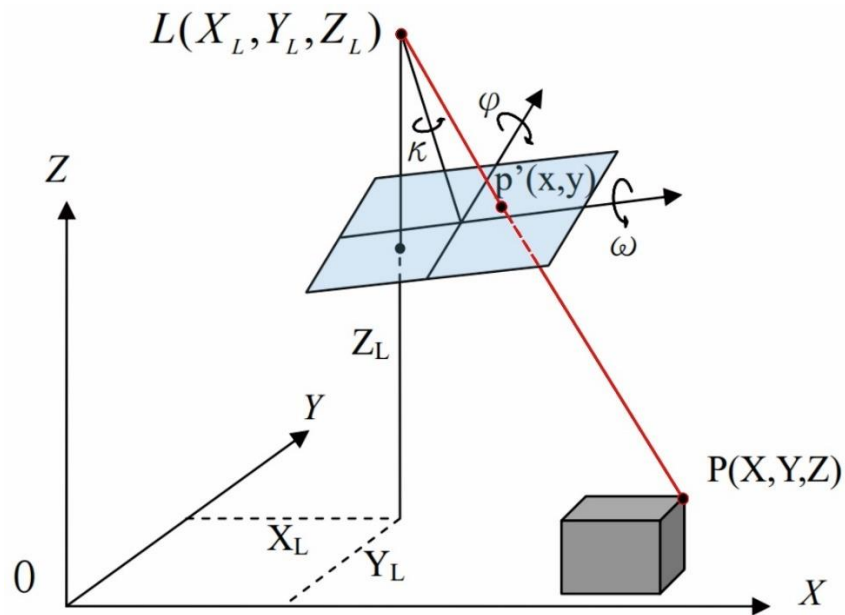


圖 4.2 空中三角測量模式共線原理示意圖。藍色平面為成像平面，相機投影中心(L)、像點(p')、地物點(P)三者為共線關係(紅線)。(改繪自湯美華，2006)

#### 4-1-2 影像正射化方法

以共線方程式建立真實正射影像像點與地物點之轉換關係，進行航照影像之正射糾正而言，逐點糾正法是較嚴密的方式，也就是對每個像點逐一進行糾正，其糾正方式主要可分為兩種，一種為光線追蹤法(ray-tracing)，另一種為逆轉換模式(inverse transformation)。(湯美華，2006)

光線追蹤法是屬於由上而下的影像正射化的方法，從影像之像空間坐標出發，以共線式計算像點對應之地面坐標，相對逆轉換模式存在著影像像點重複或無法匹配的問題，本研究使用之建模軟體 Pix4Dmapper 主要是使用逆轉換模式之計算方法將影像正射化。

逆轉換模式又稱反向投影法(back projection)是由下而上進行影像正射化的方法，以物空間網格化所得之地面網格單元(ground element 簡稱地元)為基礎，透過共線方程式將地物點坐標投影至像空間，以獲取對應的坐標及影像灰階值，當地元對應到非整數像點位置時，其灰階值可依投影之像點位置與其鄰近像點之關係內插計算而得(圖 4.3)。

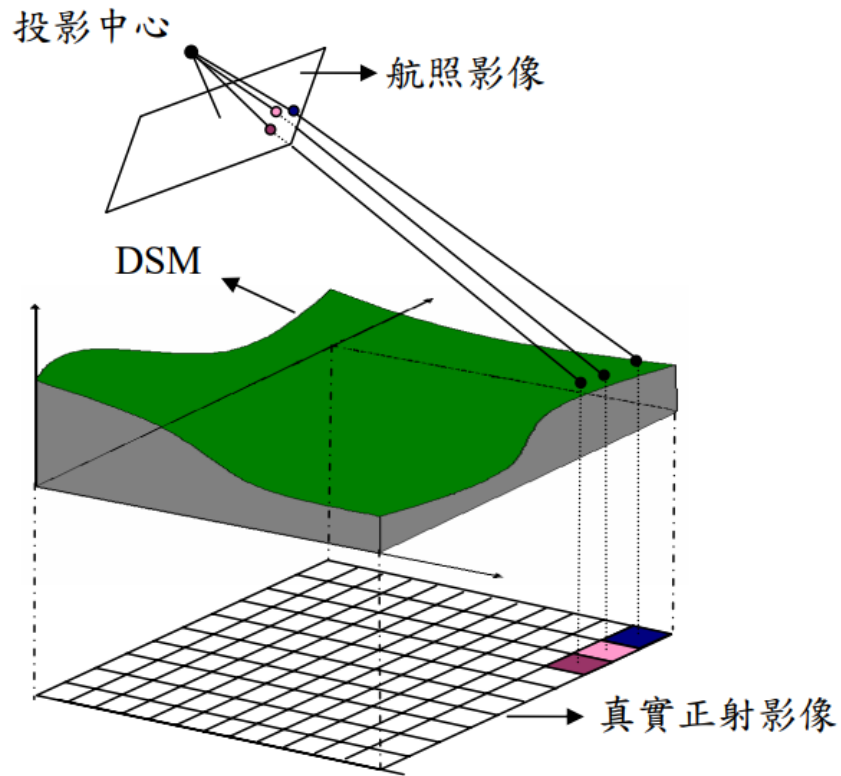


圖 4.3 逆轉換模式示意圖。(圖引自湯美華，2006)

### 4-1-3 構造判釋分析

透過建模生成之影像模型能有效提供我們露頭上構造的初步資訊，根據立面影像能觀察到相對大尺度的岩層傾向變化，提供區域褶皺軸軸部相對位置，且能判釋海蝕崖出露地層是否受斷層截切而錯位，輔以三維模型影像，可大致了解斷層延續性及破裂跡方向。正射影像提供良好海蝕平台露頭，清楚呈現裂隙分布情形，將不同方向裂隙區分出來並分組，可初步了解裂隙組間的截切關係，比較鼻頭及龍洞地區間裂隙的關聯性及其走向是否與區域構造方向有所關聯。

## 4-2 現地地質調查

野外調查前須繪製不同比例尺之地形圖及空拍影像底圖，其目的為：一、調查過程中，能確定調查者於研究區的相對位置，二、了解不同尺度的構造上的相對位置，及分析兩者是否有所關聯，三、方便調查者將目標紀錄於底圖上，並註記相關資訊，可將野外第一手資訊清楚地呈現出來。本研究分別將鼻頭及龍洞岬正射影像製作成 1:1500 及 1:2500 野外底圖，詳細記錄露頭上各種資料，其中包括：

1. 露頭岩性、顏色、產狀及其他特徵。
2. 量測岩層層面位態，根據位態傾向能大致推估區域褶皺軸部位置。
3. 分區調查各組裂隙分布，並記錄位態、裂面特徵及有無礦脈填充等，判斷裂隙組之間的截切關係。
4. 測量斷層位態、斷距(separation)及破裂跡長度等，若斷層面上帶有擦痕，紀錄其側伏角(pitch)並判斷滑移方向。

斷距的定義可為露頭面上斷層的視錯移量(apparent offset)(Davis et al., 2011)，本研究依據斷層兩側相同岩層的視錯移量估計鼻頭正斷層的斷距，龍洞正斷層則假設海蝕平台陷落主要由斷層導致，根據斷層擦痕分布範圍及斷層兩側海蝕平台的陷落量估計最小斷距大小。最後將野外紀錄的各種資料呈現於不同比例尺的構造地質圖上，鼻頭及龍洞地區分別以比例尺 1:2500 及 1:3000 之構造地質圖呈現。

#### 4-2-1 調查分區規劃與岩性單元

正斷層也常由節理及逆斷層的傾向錯移而形成，斷層帶附近也常觀察到密集的裂隙分布，裂隙間的相互關係及特徵能提供斷層調查一些線索，因此裂隙調查為斷層演育研究的必要工作。裂隙發育會受不同岩性岩層影響，岩層邊界常成為裂隙破裂終止的位置(Gross, 1993；Gross et al., 1995)，鼻頭地區出露砂頁岩交替沉積的岩層，岩性差異可能會影響此區裂隙發育，本研究利用無人機側拍鼻頭岬角壁面露頭，根據空拍影像對比岬角南北側岩層，並輔以野外調查繪製地層柱(圖 4.4、圖 4.5)，將鼻頭地層區分成 12 個岩性單元(Unit A ~ Unit L)，Unit A 為薄層(< 0.1m)灰至深灰色細粒砂頁岩互層；Unit F、J 為 1 至 2 公尺厚的灰至深灰色的細粒砂岩及粉砂岩層；Unit B、D、H、K 以灰色細粒砂岩為主，厚度介於 3 至 8 公尺；Unit C、E、G 為黃棕色中粒砂岩，厚度不一致，常見明顯的交錯層理；Unit J、L 為 10 公尺厚的青灰色粗粒砂岩。透過正射影像能判釋各岩性單元上裂隙分布情形，並於現地查核影像結果。龍洞岬受數條斷層截切，斷層可能會影響上下盤裂隙位態，此外，龍洞岬沿岸主要出露質地堅硬的石英砂岩，岩性差異不是影響本區裂隙發育的主控因素，因此本研究根據影像分析及現地調查的主要斷層位置，將龍洞岬分為七個調查區(I-VII)，詳細調查裂隙分布(圖 4.6)。

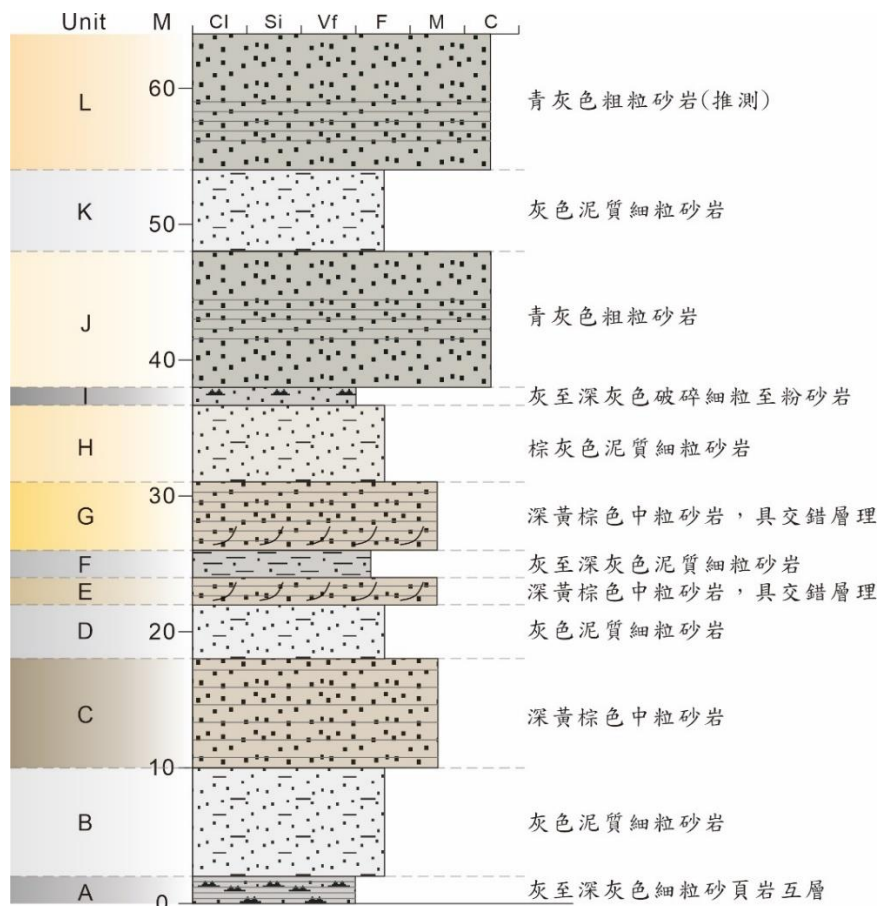


圖 4.4 鼻頭地區地層柱及各岩性單元劃分。Unit A~Unit D 取自鼻頭北岸露頭，Unit E~Unit L 取自鼻頭南岸露頭(參見圖 4.5)，可藉由空拍影像對比兩岸出露岩層層位關係。

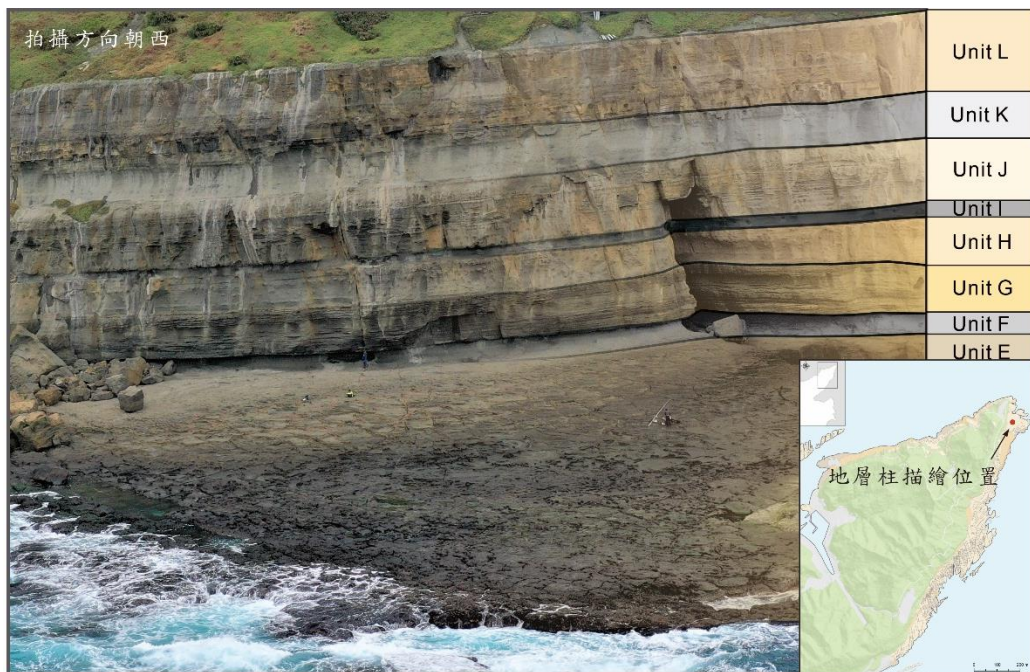


圖 4.5 鼻頭南岸地層柱(UnitE~UnitL)測繪位置及空拍影像。



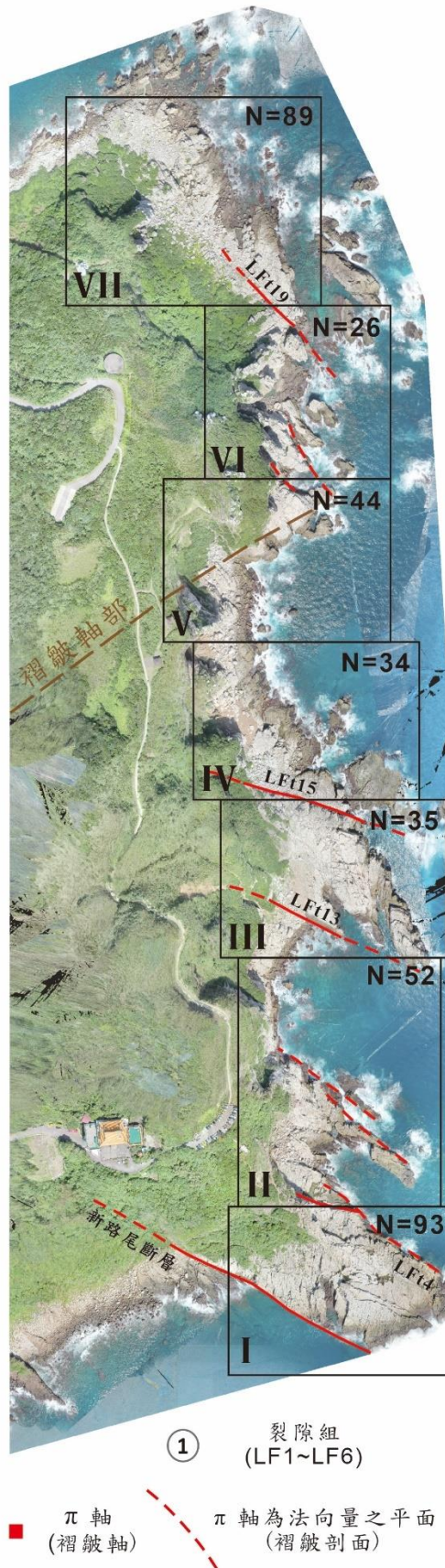


圖 4.6 龍洞分區調查規劃。紅色線段為分界之主要斷層，虛線表示推測。

## 第五章 研究結果

### 5-1 建模影像構造判釋成果

#### 鼻頭

本研究將鼻頭岬分為北岸及南岸兩區，兩岸皆可見延續性良好之海蝕崖，但僅有南岸出露平坦之海蝕平台，以利正射影像判釋平台上裂隙分布及其走向，本節將著重描述南岸露頭影像判釋結果。

鼻頭南岸為砂頁岩相間的岩層傾角大致向西北傾斜 5 至 20 度，由於差異侵蝕及平緩的岩層海蝕平台多沿較硬的砂岩層發育，從海蝕崖至海岸的出露寬度約為 50~100 公尺，沿岬角延伸方向可延續約 1000 公尺。正射影像上能明顯看出四組具系統性的裂隙 BF1-BF4，其中以 BF1 及 BF4 最為明顯，BF1 位態一致性高，延續良好可達百餘公尺且截穿數層岩層，為該區域之主要裂隙；BF4 破裂跡多終止於其他組裂隙，與 BF1 略呈正交，發育密集，間距大約 2 至 5 公尺。BF2 及 BF3 集中於近鼻頭向斜軸部位置，BF2 破裂跡部分呈現彎曲狀，但可判斷其趨勢方向；BF3 僅出現於褶皺軸部，破裂跡較不明顯(圖 5.1)。鼻頭南岸立面影像可見兩側岩層傾向相反，可推估鼻頭向斜軸部位置，且有兩處岩層出現錯位，判斷可能存在正斷層(圖 5.2)。地形差異可能會導致影像變形，所以影像判釋只能作為野外調查的參考。

## 龍洞

影像判釋龍洞岬南北部裂隙組數及方向有所差異，因此將本區分為北區及南區進行討論。龍洞地區共有六組裂隙 LF1-LF6，包括四組主要裂隙 LF1、LF2、LF3、LF5，及兩組分布較為零散的裂隙 LF4、LF6，將各組主要裂隙分離出來能大致了解其分布狀況，其中 LF1 分布全區，龍洞岬角地形多受此裂隙影響，LF2、LF3 主要分布於龍洞北區，鄰近蚊子坑背斜軸部，LF5 則集中於龍洞南區(圖 5.3)。根據三維影像模型及立面影像，能清楚判釋蚊子坑背斜及其軸部位置(圖 5.4)，此外，影像呈現龍洞岬受數條正斷層截切，形成似地塹及地壘的構造地形，並影響龍洞岬角形貌，由許多小型向外海凸出的海蝕平台組成，方向多與斷層走向相當，出露寬度約為 30~150 公尺，南北向則可延伸約 1200 公尺(參見圖 1.3)。

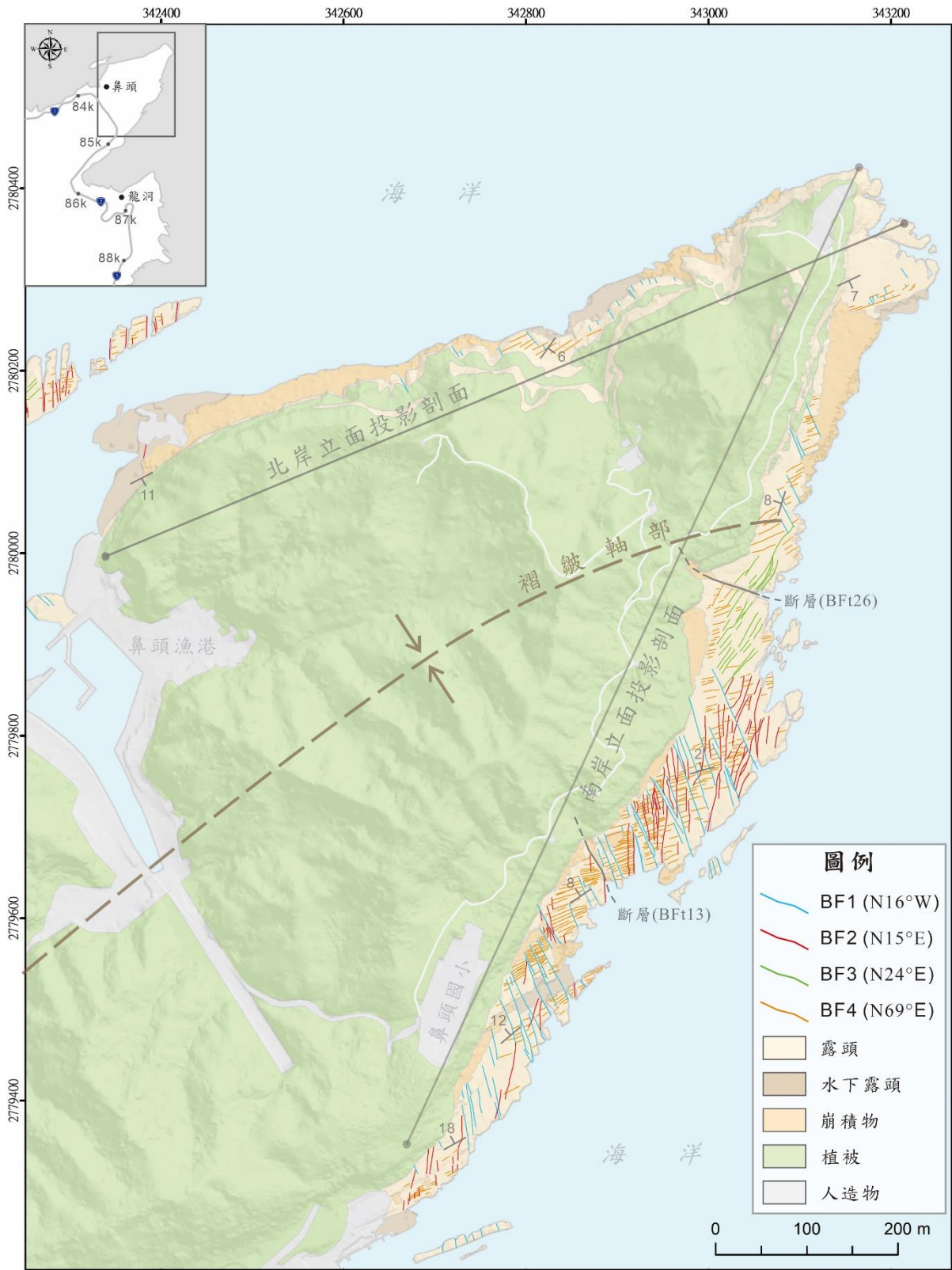


圖 5.1 影像判釋鼻頭裂隙分布情況。主要能判視出四組系統性的裂隙組 (BF1~BF4)。BF1 及 BF4 為區域主要裂隙，略呈正交。BF2 及 BF3 集中分布於近鼻頭向斜軸部。



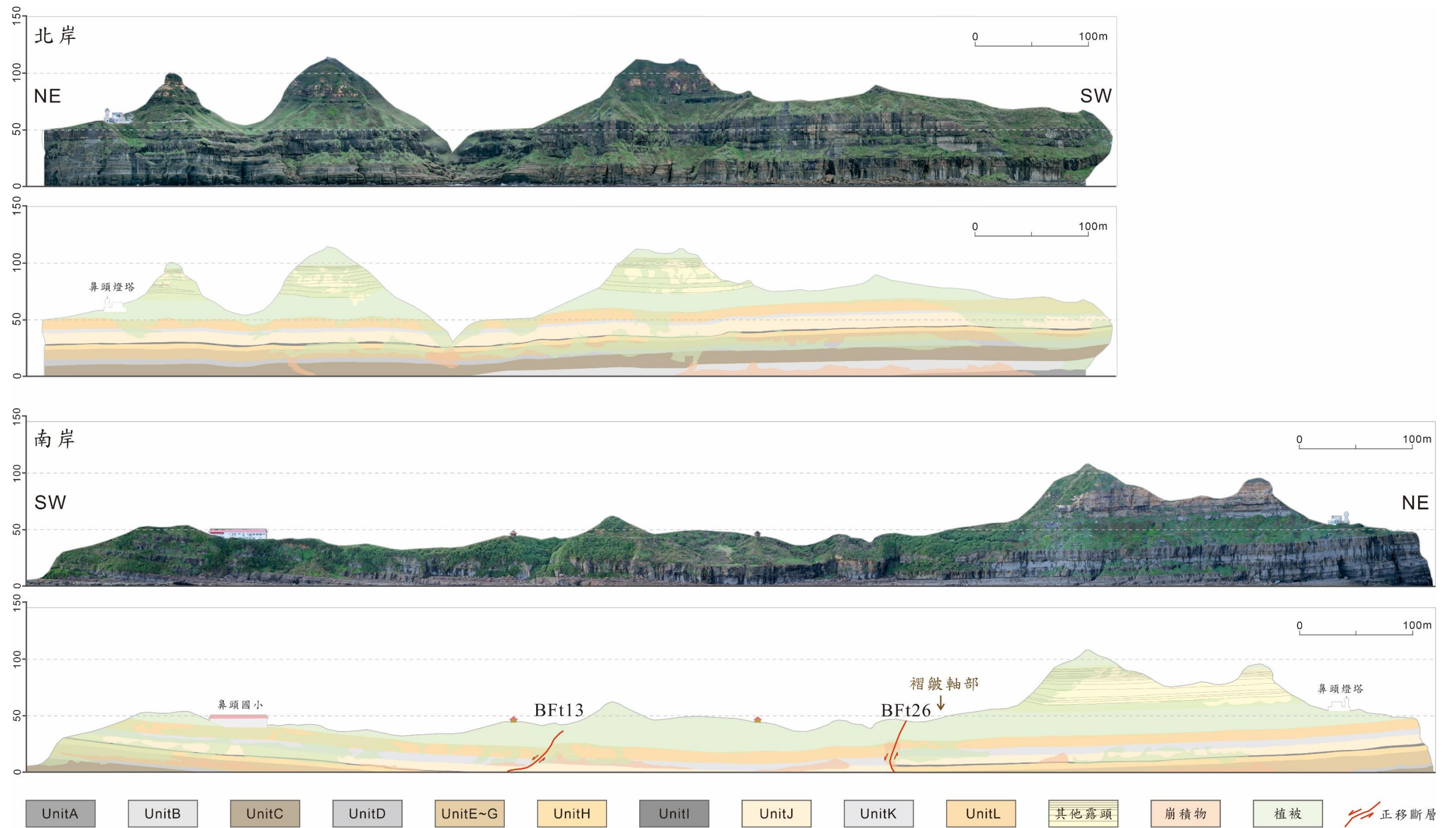


圖 5.2 鼻頭南北岸立面影像。立面影像投影位置能參照圖 5.1，影像上能清楚判釋各岩層延續性及是否錯位，提供主要斷層(BFt13、BFt26)及褶皺軸部大致位置。



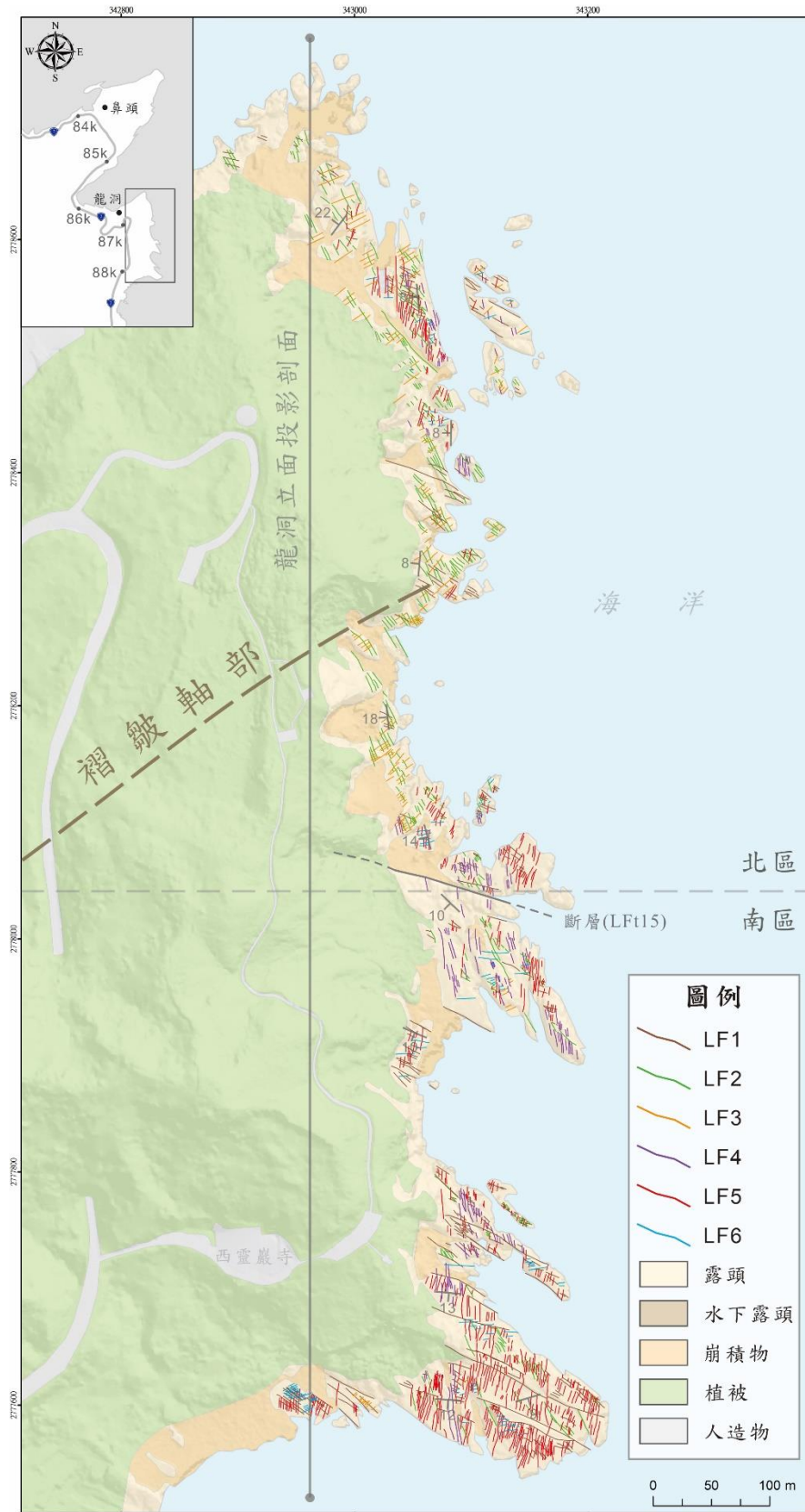


圖 5.3 影像判釋龍洞裂隙分布情況。主要能判視出六組系統性的裂隙組 (LF1~LF6)。LF1 分布全區，LF2、LF3 主要分布於龍洞北區，鄰近蚊子坑背斜軸部，LF5 集中於龍洞南區。





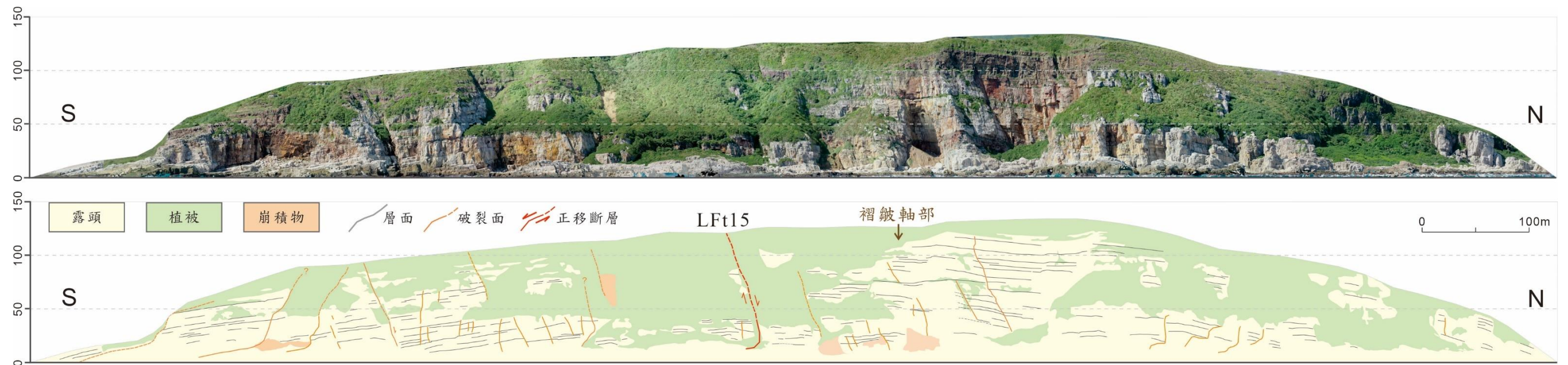


圖 5.4 龍洞立面影像。立面影像投影位置能參照圖 5.3。



## 5-2 地質調查分析結果

本章節將分別描述鼻頭及龍洞沿岸露頭之構造及分析成果，並繪製於構造地質圖上加以討論。褶皺及斷層的種類的描述將參照楊昭男(1995)之分類準則。以下將定義本節會使用的構造名詞：

### 褶皺

平緩褶皺(gentle fold)：褶皺兩翼夾角大於 120 度。

水平褶皺(non-plunging fold)：褶皺軸水平之褶皺。

傾伏褶皺(plunging gentle fold)：褶皺軸非水平之褶皺。

### 斷層

依據上下盤在露頭面上的相對錯動方向(separation direction)可大致將斷層分為三類。

正斷層(normal fault)：非水平斷層露頭面上，斷層上盤相對於斷層下盤向下錯動，包括楊昭男(1995)描述之正移斷層及正滑斷層。

逆斷層(reverse fault)：非水平斷層露頭面上，斷層上盤相對於斷層下盤向上錯動，包括楊昭男(1995)描述之逆移斷層及逆滑斷層。

走滑斷層(strike-slip fault)：近水平斷層露頭面上，斷層兩側岩層沿近乎水平方向錯動者，同楊昭男(1995)描述之平移斷層及平滑斷層。

### 鼻頭

1. **鼻頭向斜**:鼻頭岬角兩岸岩層傾向相反，往岬角東北部延伸傾角趨於水平，南岸岩層往東追跡，於龍洞海洋公園東側出露一組高傾角甚至倒轉的岩層。根據層面資料於投影圓上分析，向斜軸趨向(trend)為 N55°E，傾伏角(plunge)近乎水平，向斜南翼遭龍洞斷層截切，導致岩層倒轉，依兩翼夾角及褶皺軸位態分類，鼻頭向斜為一褶皺軸水平之平緩褶皺(圖 5.5)。
2. **裂隙**:本研究根據前述 12 個岩性單元(Unit A-Unit L)，分區調查鼻頭裂隙分布(圖 5.6)。調查結果除了影像判釋之四組裂隙(BF1-BF4)，另外有一組

局部裂隙(BF5)。BF1 破裂跡平直且延續性良好，能追跡百餘公尺，部分截切海蝕崖壁向內陸延伸，可觀察到方解石礦脈填充；BF2 裂隙可追跡近百公尺，破裂跡常呈彎曲狀導致量測之走向區間廣，整體而言有著南北向發育趨勢，能見方解石礦脈填充；BF3 地表破裂跡能追跡約 40~60 公尺、裂隙內寬(aperture)窄小，無明顯裂面特徵；BF4 位態分布一致，破裂跡較其他組裂隙短，多終止於 BF1 及 BF2，能觀察到肋紋(ribs)於破裂面上，指示該組裂隙可歸類為伸張節理(extension joint)；BF5 僅在局部區域出現，相對前述裂隙組尺度較小，破裂跡短且無明顯破裂面特徵。將各區裂隙資料以投影圖呈現，顯示 BF4 及 BF1 為兩組近正交的區域裂隙；BF2 於南北岸皆可觀察到，密集發育於南岸褶皺軸部鄰近地區；BF3 僅出現於近褶皺軸部位置，緊鄰斷層 BFt26；BF5 主要發育於鼻頭北岸及岬角凸出尖端位置出露較細粒的岩層中(ex: Unit A、Unit F)。根據新裂隙破裂常受制於舊裂隙位置的理論，判斷鼻頭地區裂隙組發育的先後順序，依序為:BF1、BF2、BF3、BF4，而 BF5 無法清楚判斷與其他裂隙組間的截切關係。

3. **斷層:**鼻頭北岸出露高約 60 至 80 公尺的海蝕崖，地勢高聳，難以觀察露頭上之構造，利用無人機調查露頭壁面僅發現一斷距約 1 公尺之正斷層，此外鼻頭北岸岩層並無觀察到明顯錯位的現象及擦痕證據。鼻頭南岸海蝕平台上出露 26 條能追跡約百餘公尺的斷層(圖 5.7)，多數斷層走向約為 N10°W 至 N30°W，與裂隙組 BF1 相當，其中包括：14 條正斷層，斷距介於 0.2 公尺至 3 公尺之間；6 條逆斷層，斷距介於 0.2 公尺至 0.7 公尺之間；1 條走滑斷層；根據地表破裂跡方向、沿續性及長度推測另有 5 條推論斷層，各斷層詳細資訊可見表 5.1。本區逆斷層僅出現於鼻頭國小下方之海蝕平台，斷層皆為高角度且斷距較小，鄰近於鼻頭斷層地表跡位置，可能受該斷層影響。其他區域以正斷層發育為主，由於風化侵蝕嚴重

難以觀察斷層擦痕面，僅能由少數擦痕資訊推估為帶右移分量的正斷層。以下將描述幾組斷距較明顯的斷層特徵。

- **BFt13 - Bft14 斷層組：**

BFt13、BFt14 兩斷層走向為北北西走向，間距約 20 公尺，為一組傾向相反的高傾角正斷層，其間夾斷塊構成一地壘(圖 5.8)，斷層露頭受落石及海洋廢棄物所覆蓋，難以量測斷層傾角。岩性單元 I(Unit I)於斷層兩側明顯錯位，推估斷距約為 2 公尺(BFt13)及 1 公尺(BFt14)。此斷層組切穿崖面，向上追跡能於鼻頭步道西側壁面露頭觀察到一組與此組斷層走向相當的裂隙，由於裂隙兩側岩層並無錯位的現象，此斷層組延伸可能止於步道前。

- **BFt15 - Bft16 斷層帶：**

BFt15 及 Bft16 為此斷層帶中兩條主要的正斷層，各在一側，於兩斷層間的斷塊上能觀察到另外五條小型正斷層，導致此斷層帶以一主要地壘上夾帶數組次要地塹地壘的形式出露(圖 5.9)。此露頭斷層均為北北西走向，兩側主要斷層斷距約為 1 公尺，五條小型斷層斷距則介於 5 至 20 公分，由左往右，第一及第五條小型斷層之斷層面上能觀察到擦痕，指示斷層滑移方式以正滑為主帶有右滑分量。露頭上崖面並無斷層截切跡象，說明此斷層帶可能止鼻頭南岸之海蝕平台。

- **BFt26 斷層：**

鼻頭南岸最顯著的正斷層，位於近鼻頭向斜軸部，立面影像上能明顯看出此斷層兩側岩層錯位(參見圖 5.2)，斷層走向約為 N30°W 向南傾，推估斷距可達 3 公尺，破裂跡向東延伸於鼻頭南岸海蝕平台上轉為近東西向。此斷層明顯截切鼻頭岬角，可能與鼻頭北岸聽濤咖啡廳下方塌陷區域有關，但由於崩積物及植被覆蓋難以向內陸追跡(圖 5.10C)。

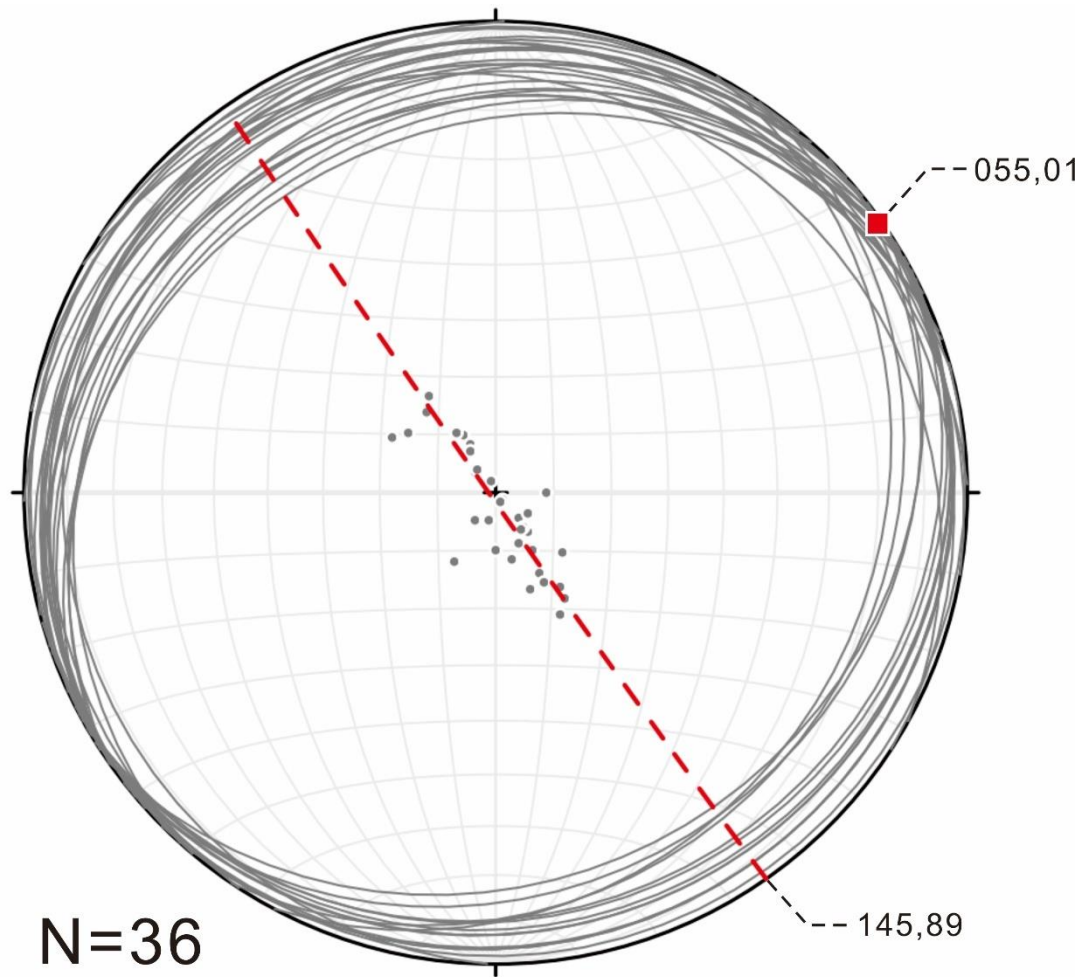


圖 5.5 鼻頭向斜兩翼層面位態及極點投影圓。紅色方形為推算鼻頭向斜軸位態，紅色虛線為以褶皺軸為法向量的褶皺剖面。岩層層面位態估算褶皺兩翼夾角界於  $136^{\circ}\sim 152^{\circ}$  之間，屬於平緩褶皺。

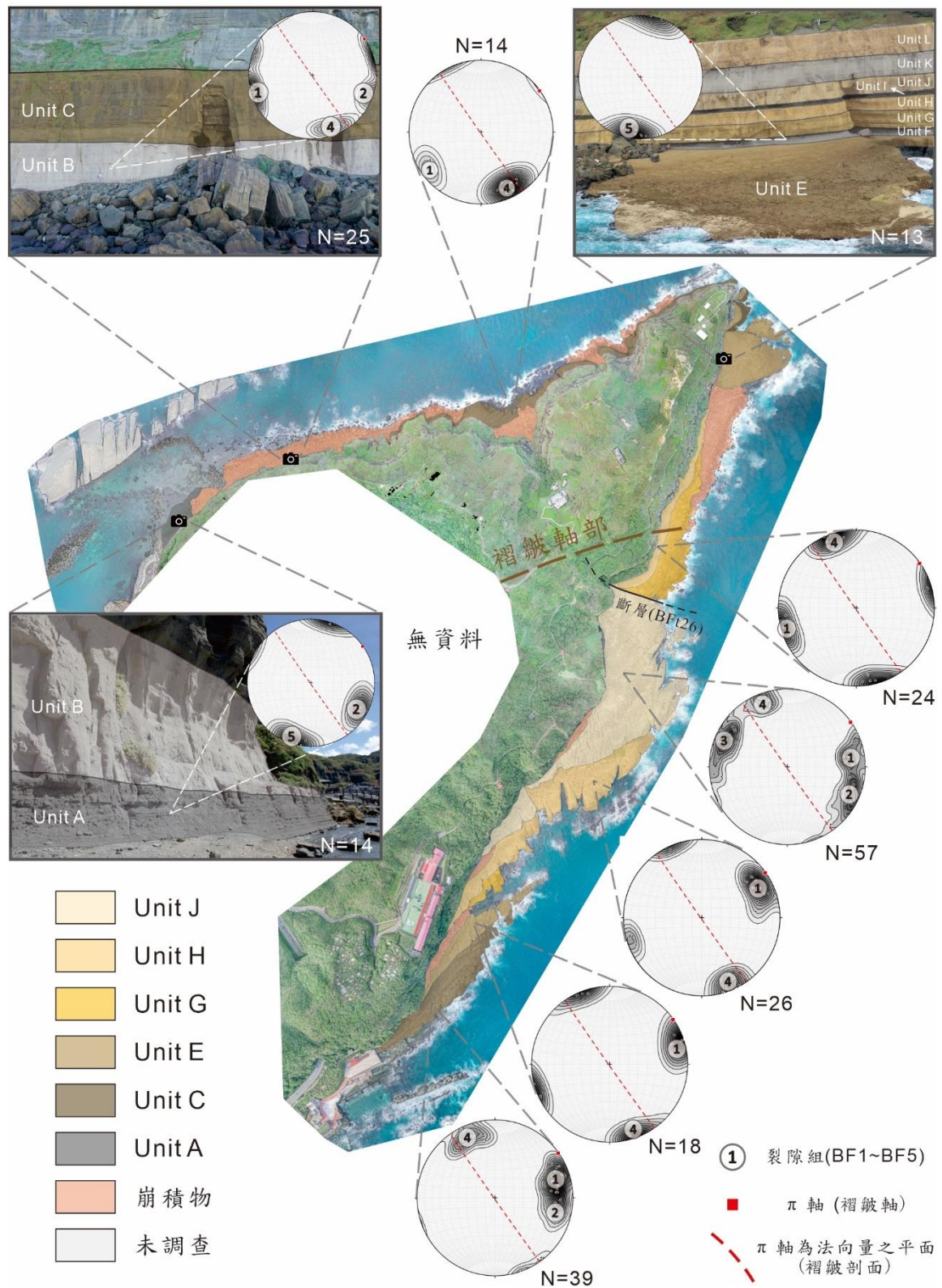


圖 5.6 鼻頭裂隙分布圖。野外調查結果鼻頭共有五組裂隙(BF1~BF5)，以投影圓呈現可見 BF1 與 BF4 為約略正交的區域裂隙，BF1 位態與褶皺剖面相近(紅色虛線)。BF2 及 BF3 密集發育於近斷層 BFt26 及褶皺軸部鄰近地區。BF5 主要發育於較細粒的岩層中(如：Unit A、Unit F)。





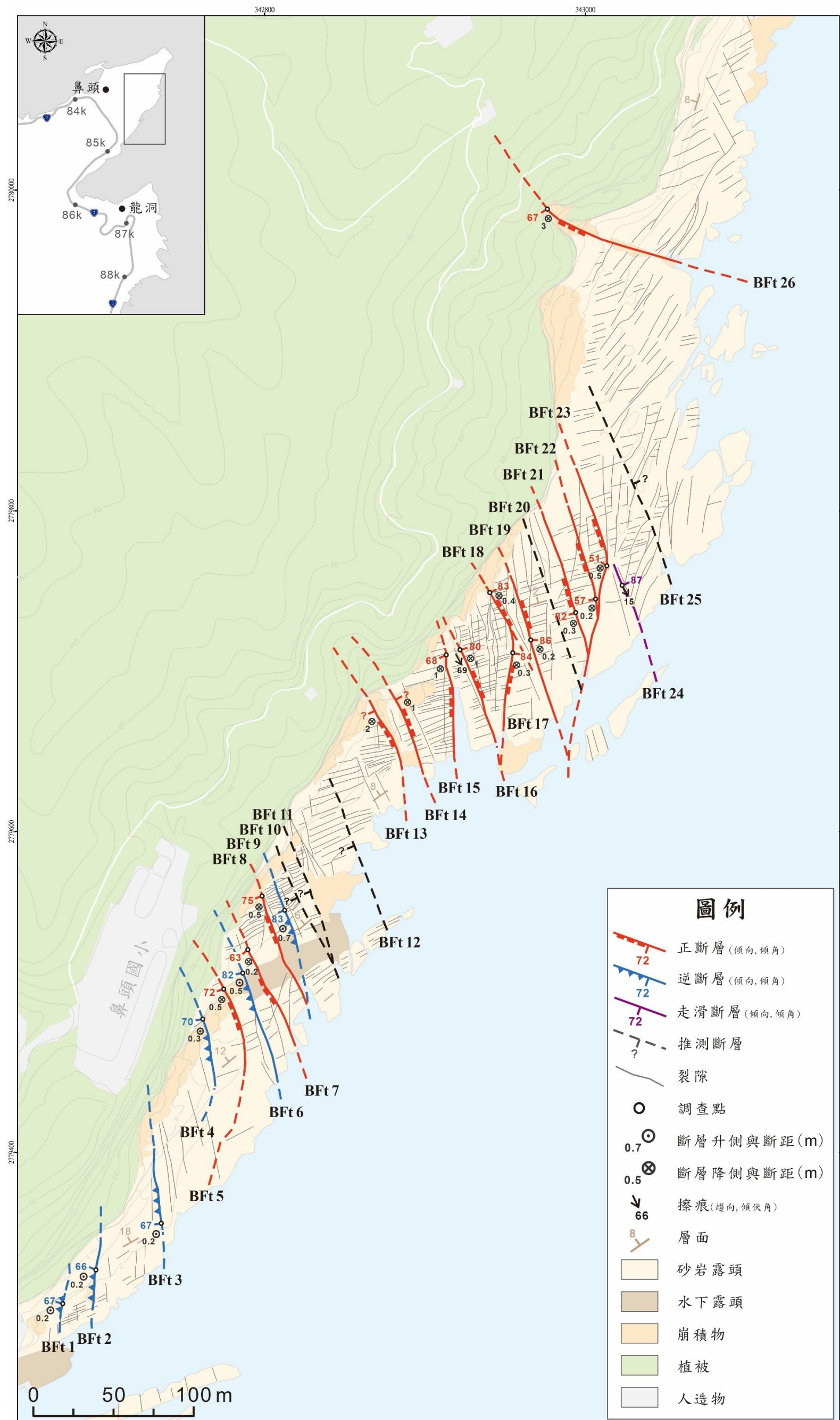


圖 5.7 鼻頭構造地質圖。



表 5.1 鼻頭構造地質圖各斷層資料。

鼻頭斷層資料統整				
斷層名稱	斷層種類	位態	匹配裂隙組	斷距(m)
BFt1	逆斷層	195°, 67°	BF2	0.2
BFt2	逆斷層	200°, 66°	BF2	0.2
BFt3	逆斷層	174°, 67°	BF2	0.2
BFt4	逆斷層	170°, 70°	BF1	0.3
BFt5	正斷層	162°, 72°	BF1	0.5
BFt6	逆斷層	169°, 82°	BF1	0.5
BFt7	正斷層	142°, 63°	BF1	0.2
BFt8	正斷層	160°, 75°	BF1	0.5
BFt9	逆斷層	156°, 83°	BF1	0.7
BFt10	推測斷層	未知	BF1	未知
BFt11	推測斷層	未知	BF1	未知
BFt12	推測斷層	未知	BF1	未知
BFt13	正斷層	未知	BF1	2
BFt14	正斷層	未知	BF1	1
BFt15	正斷層	155°, 68°	BF1	1
BFt16	正斷層	345°, 80°	BF1	1
BFt17	正斷層	009°, 84°	BF2	0.3
BFt18	正斷層	335°, 83°	BF1	0.4
BFt19	正斷層	183°, 86°	BF2	0.2
BFt20	推測斷層	未知	BF1	未知
BFt21	正斷層	164°, 82°	BF1	0.3
BFt22	正斷層	169°, 57°	BF1	0.2
BFt23	正斷層	215°, 51°	BF2	0.5
BFt24	走滑斷層	335°, 87°	BF1	<0.1
BFt25	推測斷層	未知	BF1	未知
BFt26	正斷層	148°, 67°	BF1	3

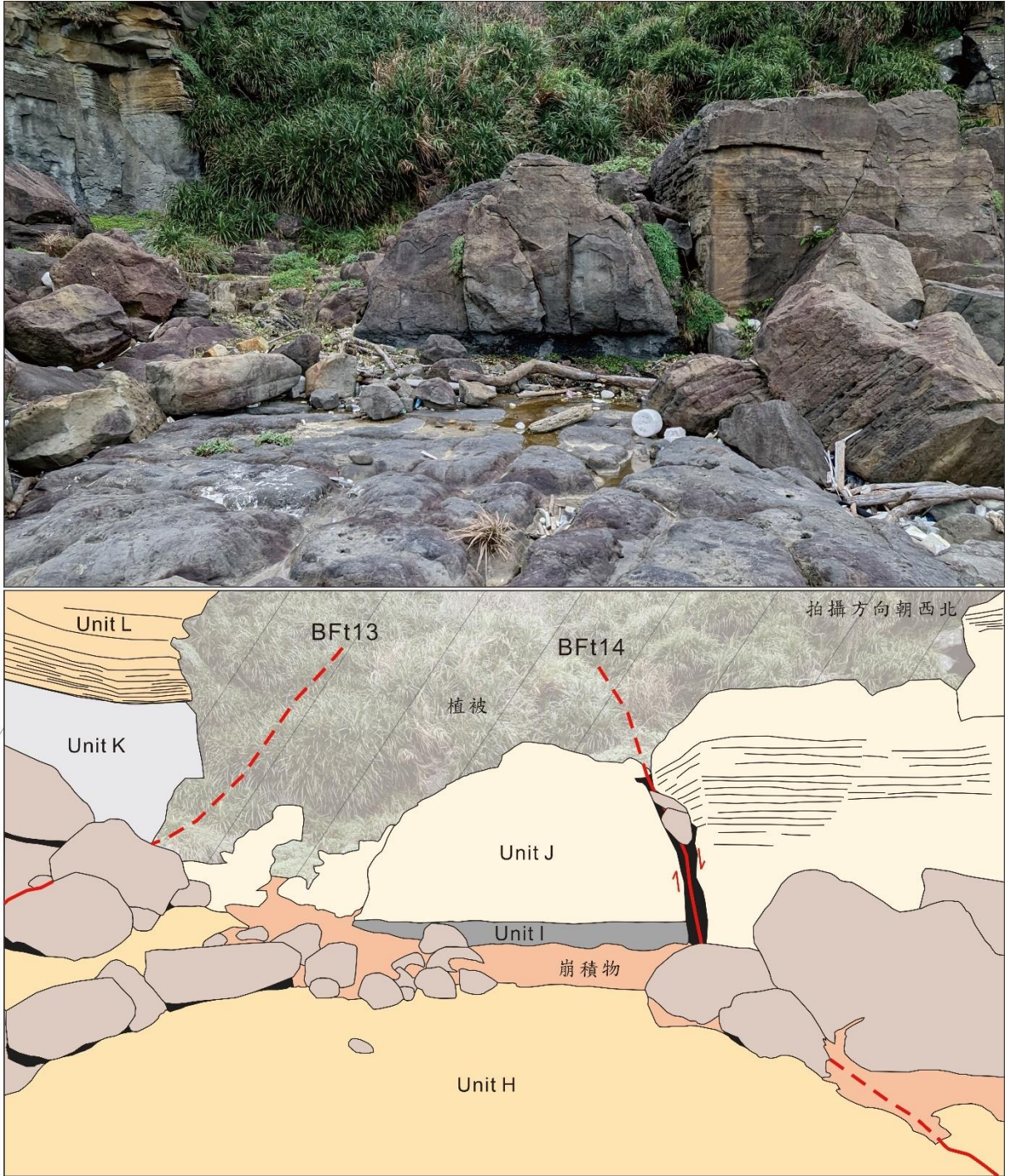


圖 5.8 BFt13 - BFt14 斷層組露頭描繪。斷層露頭受落石及海洋廢棄物所覆蓋，難以量測斷層位態，推估 BFt13 高傾角向西南傾，BFt14 則高傾角向東北傾，兩斷層傾向相反使間夾斷塊形成地壘。

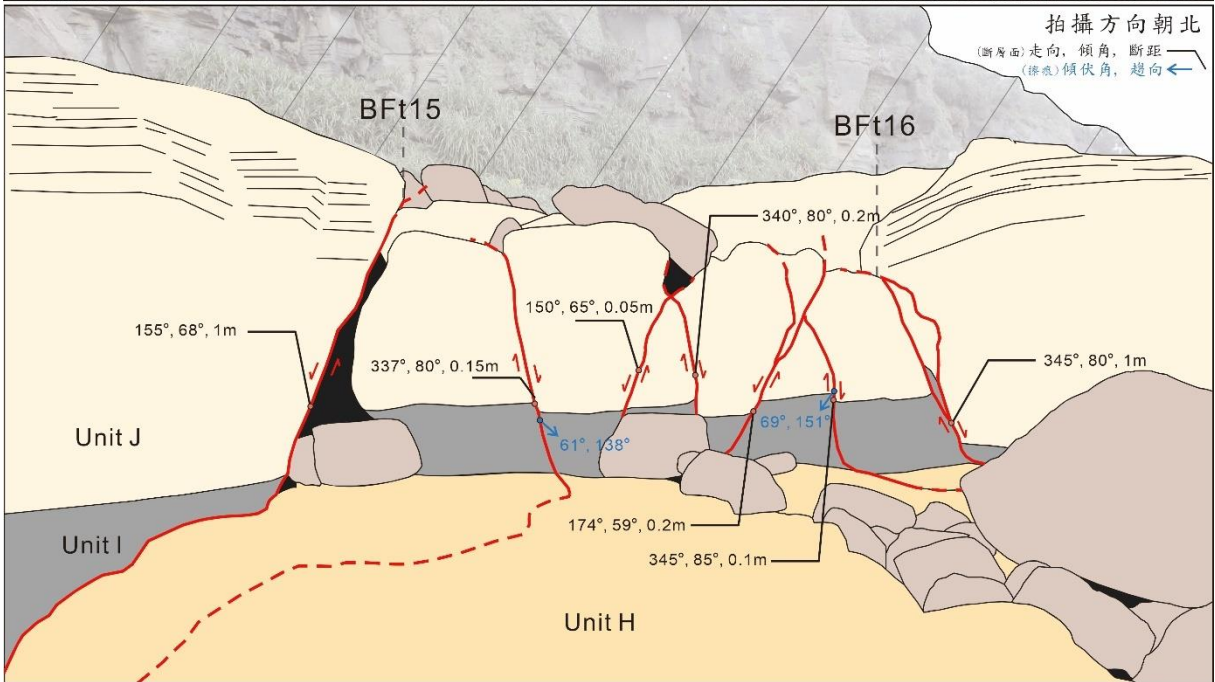


圖 5.9 BFt15 - BFt16 斷層帶露頭描繪。BFt15 及 BFt16 位於斷層帶兩側，兩斷層間夾斷塊上能觀察到另外五條小型正斷層，各斷層走向皆為北北西向，傾向各異，以主要地壘上夾帶數組次要地塹地壘的形式呈現。依擦痕(藍色箭頭)指示斷層滑移方式以正滑為主帶有右滑分量。

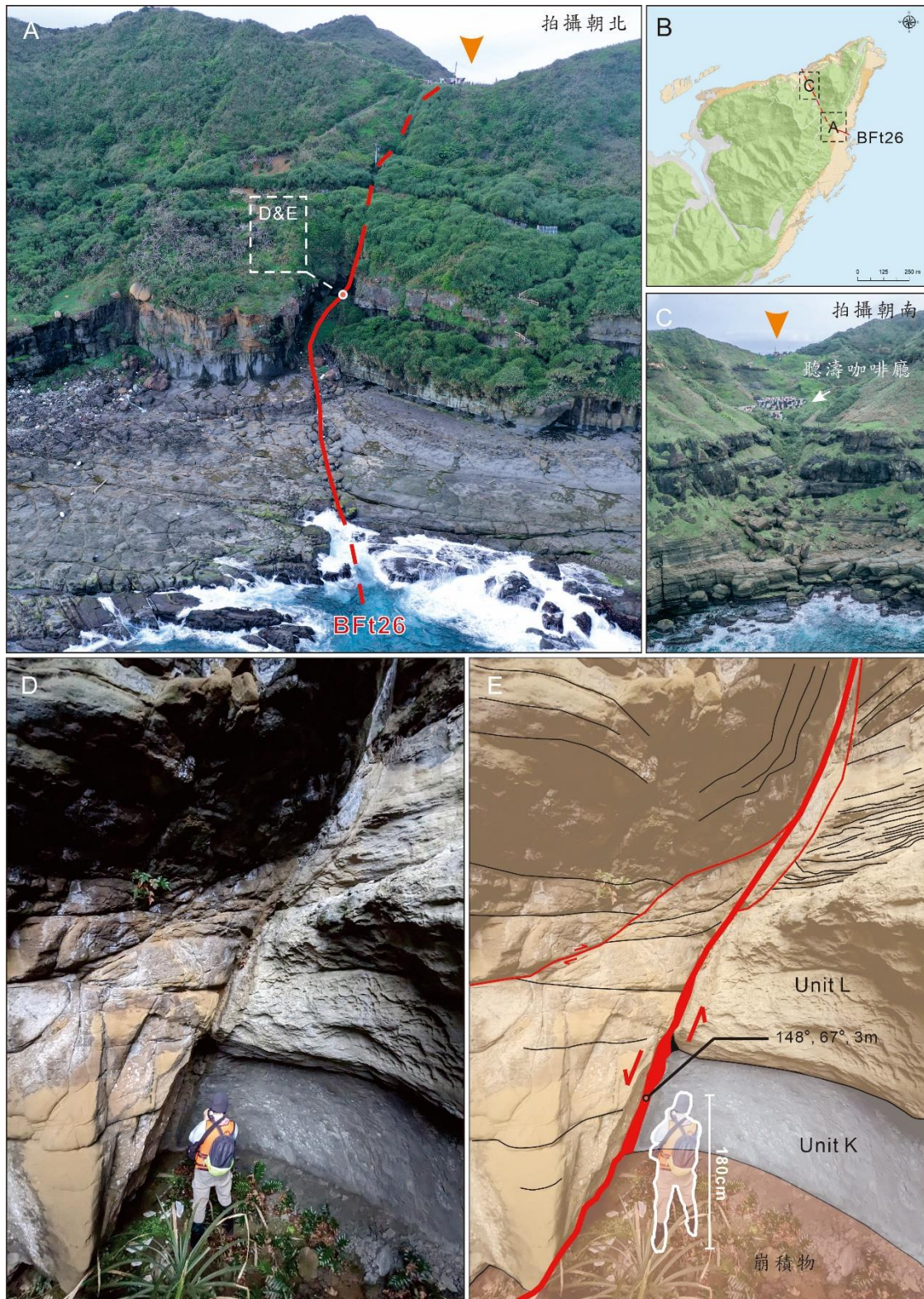


圖 5.10 BFT26 斷層露頭描繪。A: 斷層露頭空拍影像，可見斷層向內陸延伸。B: 圖 A、C 拍攝位置。C: 鼻頭北岸聽濤咖啡廳下方塌陷區域，橘色箭頭指示相同山坳處。D: 斷層露頭近照。E: 斷層露頭描繪。

## 龍洞

1. **蚊子坑背斜:** 立面影像及野外資料皆清楚呈現出龍洞南北部岩層傾向改變，層面資料分析背斜軸趨向為  $S49^{\circ}W$ ，傾伏角約為 7 度，依兩翼夾角及褶皺軸位態分類，蚊子坑背斜為一褶皺軸傾伏之平緩褶皺(plunging gentle fold)(圖 5.11)。
2. **裂隙:** 影像判釋有六組具系統性的裂隙(LF1-LF6)，與現地調查結果相符(圖 5.12)，本區裂隙相互截切，各組裂隙間亦存在許多次要裂隙穿插其中，難以判斷裂隙截切關係，推估原因為該區域裂隙內寬小，且存在許多閉合節理(closed joint)，新裂隙發育時可直接截穿舊的裂隙，對此本小節主要會探討裂隙於各調查區的分布，LF1 廣泛分布於各調查區，能對應龍洞岬許多小型岬角延伸方向，且平行於龍洞南區數條斷層，推估為本區主要之區域裂隙；LF2 及 LF3 呈正交主要分布於調查區 IV-VII，鄰近蚊子坑背斜軸部(圖 5.13)；LF4 主要出現在調查區 II、III；LF5 密集發育調查區 I，延續性可達近百公尺，間距介於數公分至 3 公尺之間；LF6 零星分布，於調查區 I、II 較明顯。
3. **斷層:** 龍洞地區出露 22 條斷層(圖 5.14)，依據擦痕面指示之滑移方式，龍洞南區可觀察到 8 條西北西走向具平移分量的正斷層，及 3 條具相同趨勢的走滑斷層，位態能對應於裂隙組 LF1，斷層破裂跡能追跡約 30 至 150 公尺不等，推估斷距可高達 4 公尺以上。龍洞北區由於崩積物與落石覆蓋難以觀察斷層證據及其延續性，但能見一條走向為  $N35^{\circ}W$  的正斷層(LFt19)，向南追跡推測有兩條與其平行的斷層(LFt16、LFt17)，此外，另有 5 條南北向至北北西走向帶平移分量的正斷層，零星分布於整個龍洞地區，詳細斷層資訊見表 5.2。據此結果，我們能將龍洞地區的斷層概分為三組：(I)龍洞南區西北西走向帶平移分量的正斷層及走滑斷層；(II)龍洞北區西北走向之正斷層；(III)零星分布之南北向帶平移分量的正斷層。



- **LFt2-1、LFt2-2 - LFt3 斷層組：**

龍洞南區可見兩道走向約  $N70^{\circ}W$  的斷層線型，包括一組共軛斷層組(LFt2-1&LFt2-2)及一條向北傾的斷層(LFt3)，兩斷層線型間地形陷落(圖 5.15A)。LFt2-1 及 LFt2-2 為一組傾向相反的高角度斷層(圖 5.15B)，斷層面夾角約為 30 度，根據斷層面上的斷層擦痕判斷 LFt2-1 及 LFt2-2 分別為帶右移及左移分量的正斷層，兩斷層傾向相反且有著不同的剪切方向，因此推論為一共軛斷層組，此斷層組能追跡約 100 公尺，LFt2-1 斷距大於 2 公尺，LFt2-2 斷距則可達 3 公尺以上。LFt3 斷層面較不平整，可向西追跡約 150 公尺，依據斷層擦痕資料判斷為具右移分量的正斷層，斷距大於 2 公尺，偶爾伴隨約 1 公尺寬的壓碎岩(圖 5.15C)，Davis et al. (2004)及 Hobbs (2022)也曾發表壓碎岩出現在正斷層帶中的例子。

- **LFt15 斷層：**

LFt15 位於近蚊子坑背斜軸部位置，斷層位態為  $N72^{\circ}W, 82^{\circ}N$ ，斷距大於 4 公尺，藉由高精度 DEM 可觀察到一線型沿此斷層延伸方向橫跨整個龍洞岬(圖 5.16A)，近斷層處地質破碎(圖 5.16B)，上下盤相對位置顯示此斷層屬於正斷層。

- **LFt19 斷層：**

LFt19 位於龍洞北區，依地形判釋為正斷層，具有明顯斷層面，斷層位態為  $N35^{\circ}W, 70^{\circ}NE$ ，斷距可達 4 公尺以上。斷層跡朝東南延伸(圖 5.16C)，DEM 線型顯示此斷層可能已延伸入海(參見圖 5.16A)。

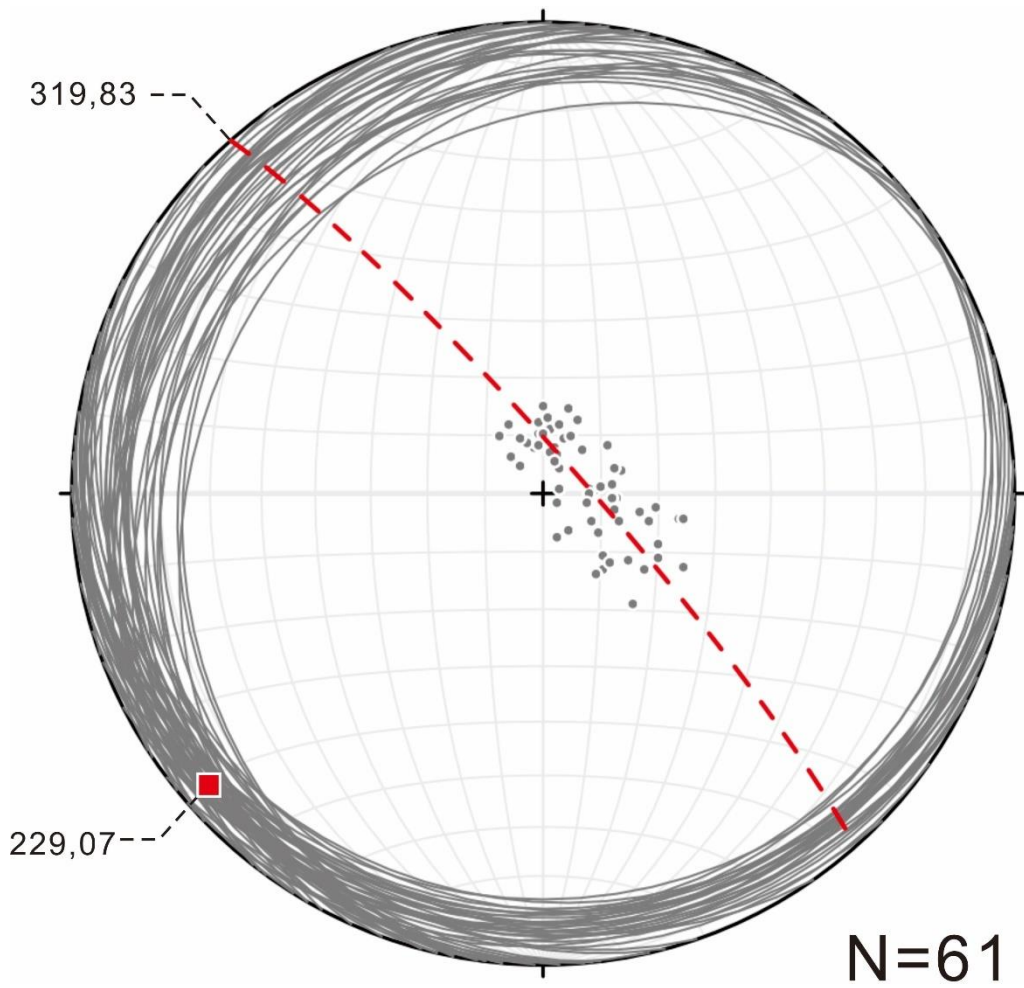


圖 5.11 蚊子坑背斜兩翼層面位態及極點投影圖。紅色方形為推算蚊子坑背斜軸位態，褶皺兩翼夾角界於  $140^{\circ}\sim 172^{\circ}$  之間，屬於平緩褶皺。

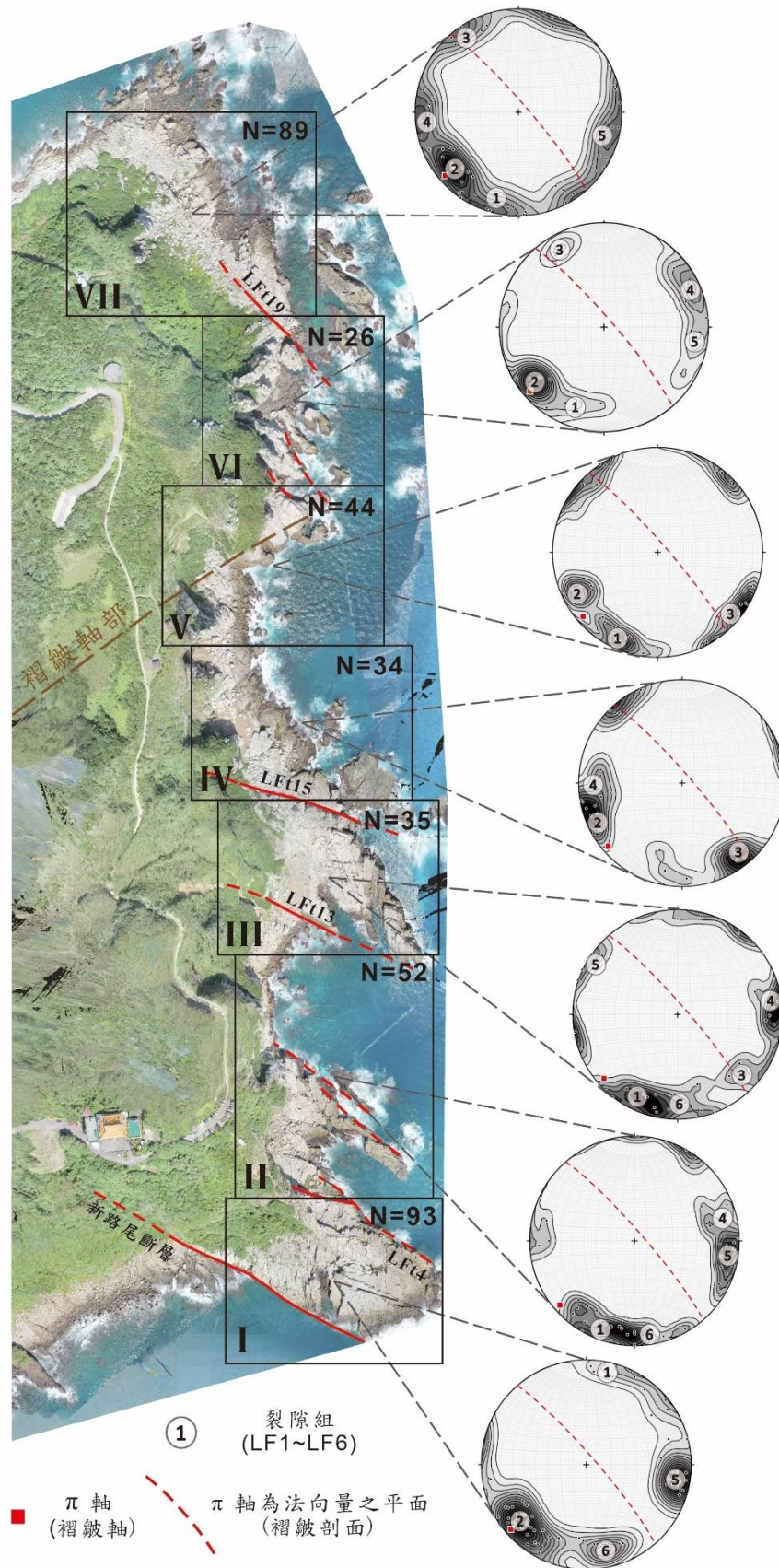


圖 5.12 龍洞裂隙分布圖。野外調查結果龍洞共有六組裂隙(LF5~LF3)，其中 LF1 廣泛分布於各調查區，LF2、LF3 極點近乎平行及垂直褶皱軸。

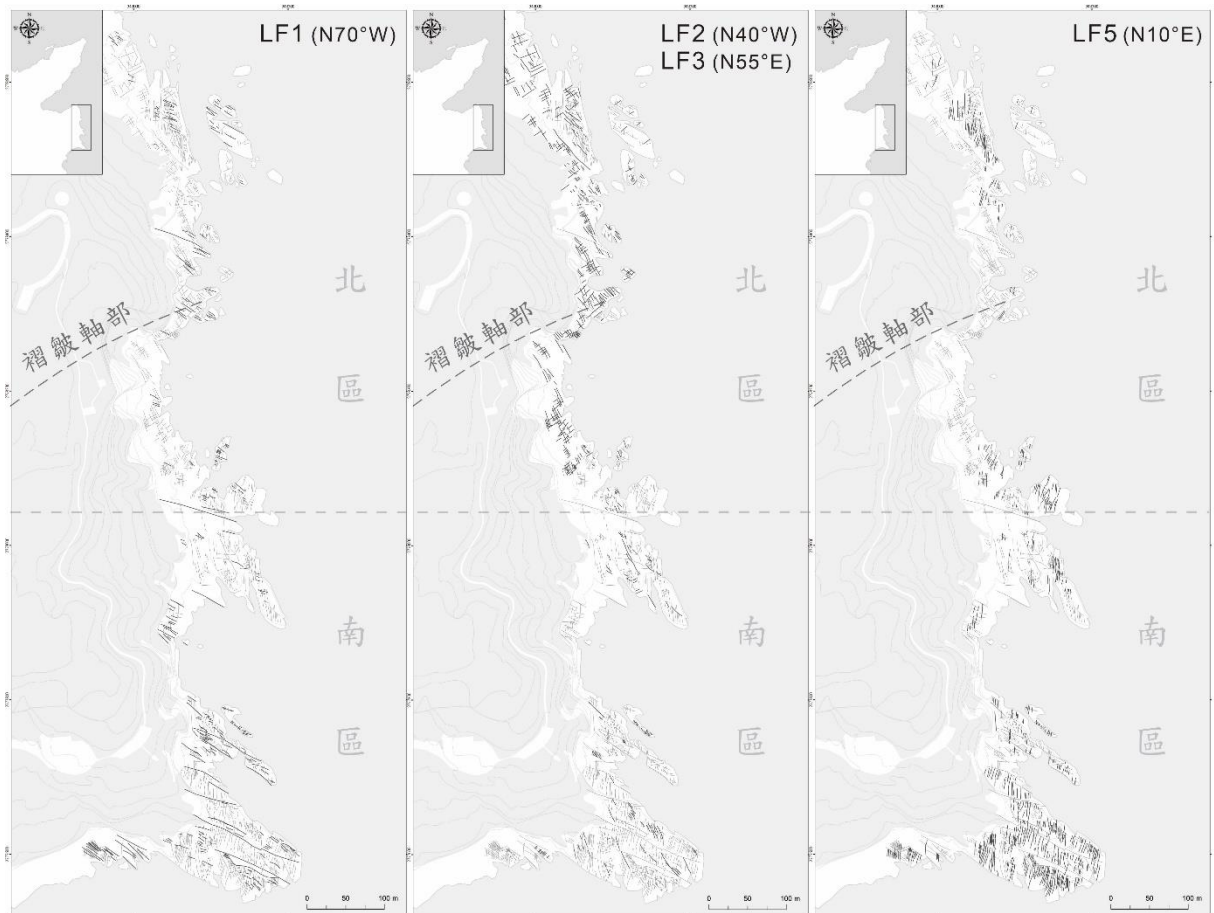


圖 5.13 龍洞主要裂隙組分布。白色為正射影像上出露之露頭，深黑色線條為所標示的裂隙組，LF1 分布全區，LF2 及 LF3 密集分布於龍洞北區，鄰近蚊子坑背斜軸部區域，LF5 主要分布於龍洞南區。



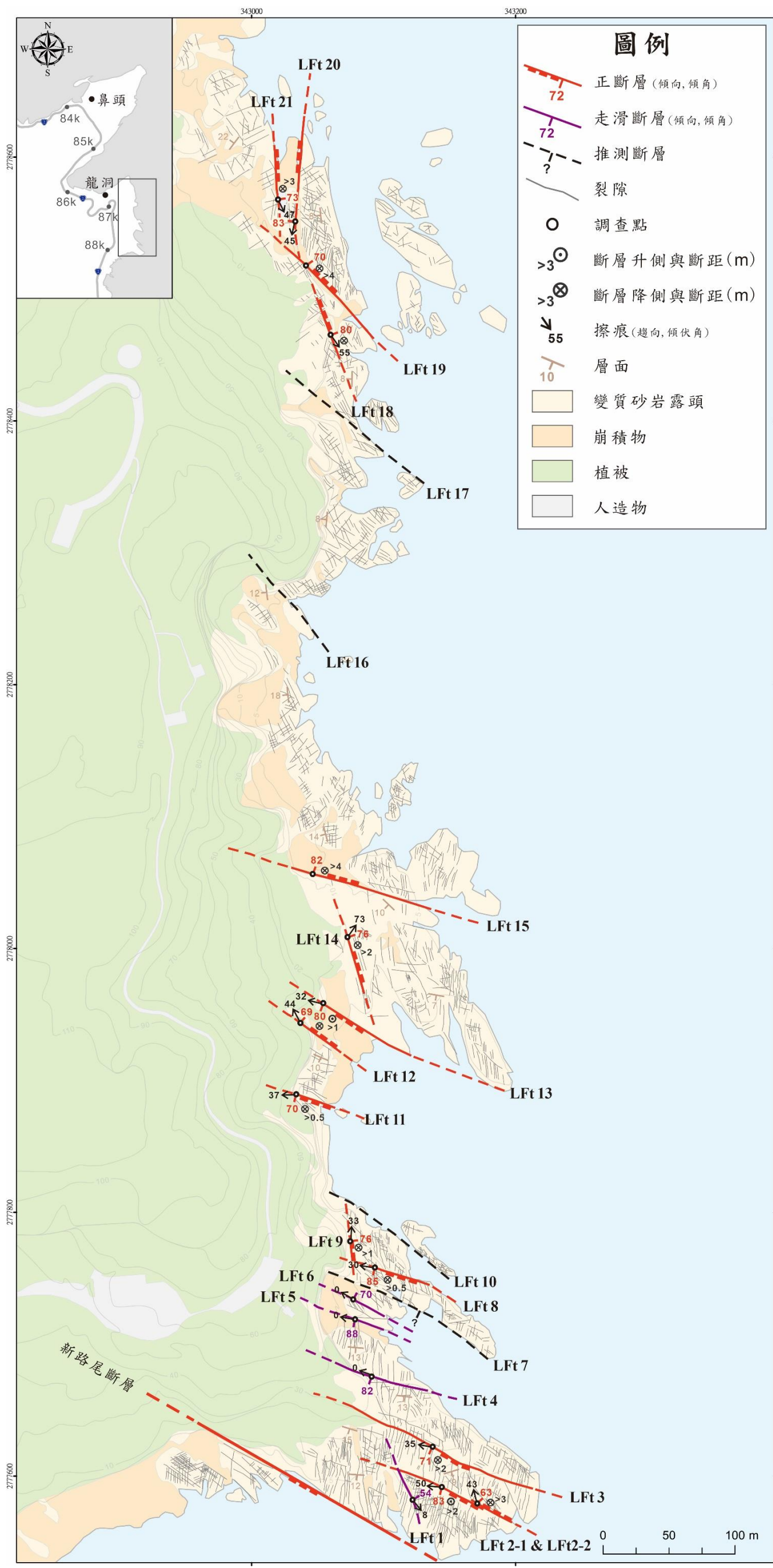


圖 5.14 龍洞構造地質圖。



表 5.2 龍洞構造地質圖各斷層資料。LFt2-1、LFt2-2 表示兩傾向相反的斷層面(參見圖 5.15B)。

龍洞斷層資料統整				
斷層名稱	斷層種類	位態	匹配裂隙組	斷距(m)
LFt1	走滑斷層	328°, 54°	LF2	未知
LFt2-1	正斷層	103°, 83°	LF1	>2
LFt2-2	正斷層	318°, 63°	LF1	>3
LFt3	正斷層	114°, 71°	LF1	>2
LFt4	走滑斷層	110°, 82°	LF1	未知
LFt5	走滑斷層	100°, 88°	LF1	未知
LFt6	走滑斷層	300°, 70°	LF1	未知
LFt7	推測斷層	未知	LF1	未知
LFt8	正斷層	102°, 85°	LF1	>0.5
LFt9	正斷層	353°, 76°	LF4	>1
LFt10	推測斷層	未知	LF1	未知
LFt11	正斷層	105°, 70°	LF1	>0.5
LFt12	正斷層	310°, 69°	LF1	>1
LFt13	正斷層	110°, 80°	LF1	>1
LFt14	正斷層	341°, 76°	LF4	>2
LFt15	正斷層	288°, 82°	LF1	>4
LFt16	推測斷層	未知	LF2	未知
LFt17	推測斷層	未知	LF2	未知
LFt18	正斷層	339°, 80°	LF4	未知
LFt19	正斷層	325°, 70°	LF2	>4
LFt20	正斷層	185°, 83°	LF5	>3
LFt21	正斷層	353°, 73°	LF4	>3





圖 5.15 LFt2-1、LFt2-2 - LFt3 斷層組露頭描繪。A：兩斷層線型形成似地塹的地形，At：斷層位態；Sl：擦痕於斷層面上之側伏角(pitch)；Sep：斷距。B：LFt2-1 及 LFt2-2 兩斷層面傾向相反。C：LFt3 斷層帶中的壓碎岩。

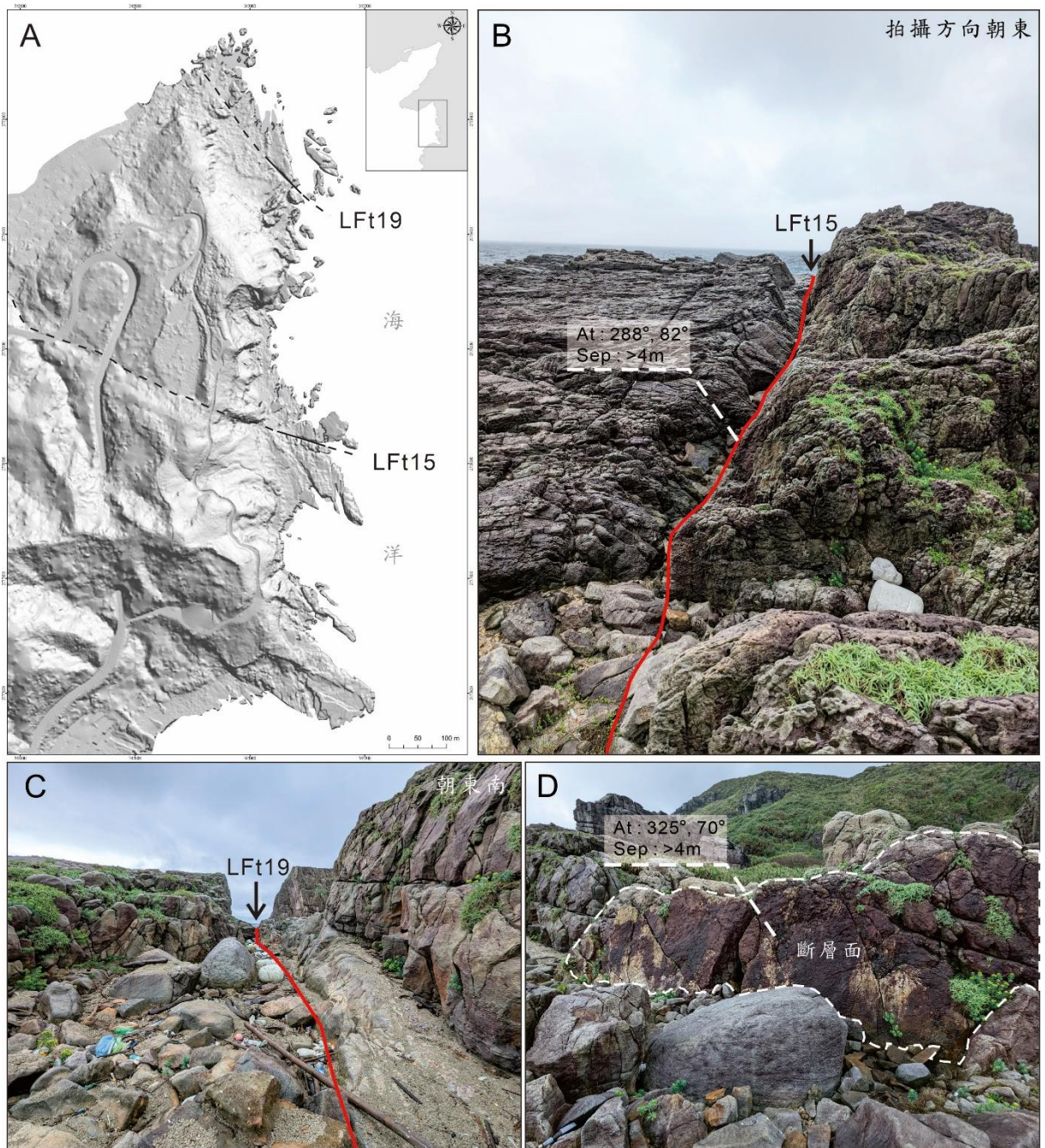


圖 5.16 Lf15 與 Lf19 斷層露頭描繪。A：1m 數值地形圖(DEM) Lf15 延伸方向具一明顯線型。B：Lf15 斷層露頭近照。C：Lf19 朝東南延伸。D：Lf19 斷層面。

## 第六章 討論

### 6-1 鼻頭及龍洞地區裂隙關聯性

鼻頭及龍洞地區的正斷層多能與其各自地區的區域裂隙組匹配，透過比較兩區裂隙組之間的關係，能提供兩區正斷層形成原因及先後順序上的解釋。根據表 6.1 比較兩區域中裂隙組的平均位態，顯示半數無法相互匹配(BF3、BF4、LF2、LF3、LF6)，以下有三個可能原因：一、龍洞無法匹配的裂隙發育在鼻頭出露地層沉積之前，新沉積的岩層未受到該組裂隙影響；二、龍洞斷層上下盤相對的逆時針旋轉分量改變兩區裂隙位態；三、裂隙單純由兩區局部事件造成。而能匹配的裂隙包括：(1) BF1 對應 LF4；(2) BF2 對應 LF5；(3) BF5 對應 LF1，前兩對裂隙組於各自地區之調查區多數皆可觀察到，可能形成於相同應力環境下。BF5 屬於僅出露於鼻頭地區較細粒的岩層中(ex：Unit A、Unit F)的局部裂隙，且無顯著之破裂跡，LF1 為龍洞地區主要的裂隙，破裂跡長度能達數十公尺，沿此裂隙走向發育數條正斷層，比對兩組裂隙特徵相差甚遠，因此推論最後一對裂隙組之間並無關聯。根據裂隙組 LF1 於鼻頭地區無相對應的裂隙組，加上正斷層擦痕面上的石英纖維形成的溫度及壓力條件須要一定埋藏深度，推論此組裂隙形成於鼻頭出露地層沉積之前。

褶皺褶曲常伴隨裂隙的形成，比較鼻頭及龍洞地區裂隙位態及區域的褶皺軸位態，BF1 大致垂直鼻頭向斜軸，LF2、LF3 分別垂直與平行蚊子坑背斜軸，此三組裂隙可能伴隨各自對應的褶皺形成，垂直及平行褶皺軸的裂隙組可分別歸因於垂直擠壓方向的伸張作用及軸部拉張，區域褶皺與裂隙組形成的相對應力方向能相互比較(圖 6.1)。

鼻頭向斜軸部密集發育裂隙組 BF2 及 BF3，裂隙特徵差異大且可能受鄰近的正斷層 BFt26 影響，無法得知其與褶皺作用的關聯性，但根據截切關係可知兩者發育時間皆晚於 BF1，推論為褶皺後期的產物。此外，鼻頭裂隙組 BF4 形成晚於 BF1、BF2、BF3，走向與鼻頭岬沿岸約略平行，加上破裂面能觀察到肋紋(ribs)，可能為後期沿岸解壓作用導致之伸張裂隙。BF5 可解釋為岩性差異影響局部裂隙位態變化，此現象在岩性變化大的沉積岩序列中並不少見(Helgeson & Aydin, 1991；Eyal et al., 2001；Zeng et al., 2019)，不同岩性岩層邊界的強度、岩層材料的楊氏模數、既存裂隙多寡、層厚及應力狀態均會影響裂隙發育(Helgeson & Aydin, 1991)。

龍洞地區較難判斷裂隙間相互截切關係，但若與鼻頭裂隙進行比較，能分析出裂隙組發育的先後順序：LF1 與鼻頭地區無相對應的區域裂隙，推測存在於鼻頭出露地層沉積之前，而後 LF2、LF3 伴隨蚊子坑背斜出現。依據 BF1 及 BF2 發育順序，能推論各自相對應的裂隙 LF5 形成晚於 LF4，LF6 分布零星且破裂跡短小，破裂多終止於其他裂隙組，推測為相對新期的構造。

表 6.1 鼻頭及龍洞地區裂隙對照表。\*符號指示該區主要裂隙組。

鼻頭			
裂隙組	平均位態	主要分布位置	匹配之區域正斷層
*BF1	N16°W, 74°SW	全區	主要北北西向正斷層
BF2	N15°E, 78°W	鼻頭向斜軸部	少數近南北向正斷層
BF3	N24°E, 75°SE	鼻頭向斜軸部	無發現
*BF4	N69°E, 85°NW	全區	無發現
BF5	N72°W, 82°N	細粒岩層	無發現
龍洞			
裂隙組	平均位態	主要分布位置	匹配之區域正斷層
*LF1	N70°W, 85°N	全區	南區西北西向正斷層
*LF2	N40°W, 74°NE	龍洞北區(軸部)	北區西北向正斷層
*LF3	N55°E, 84°NW	龍洞北區(軸部)	無發現
LF4	N10°W, 83°W	零散分布	多數近南北向正斷層
*LF5	N10°E, 78°W	龍洞南區	少數近南北向正斷層
LF6	N90°E, 80°N	龍洞南區	無發現

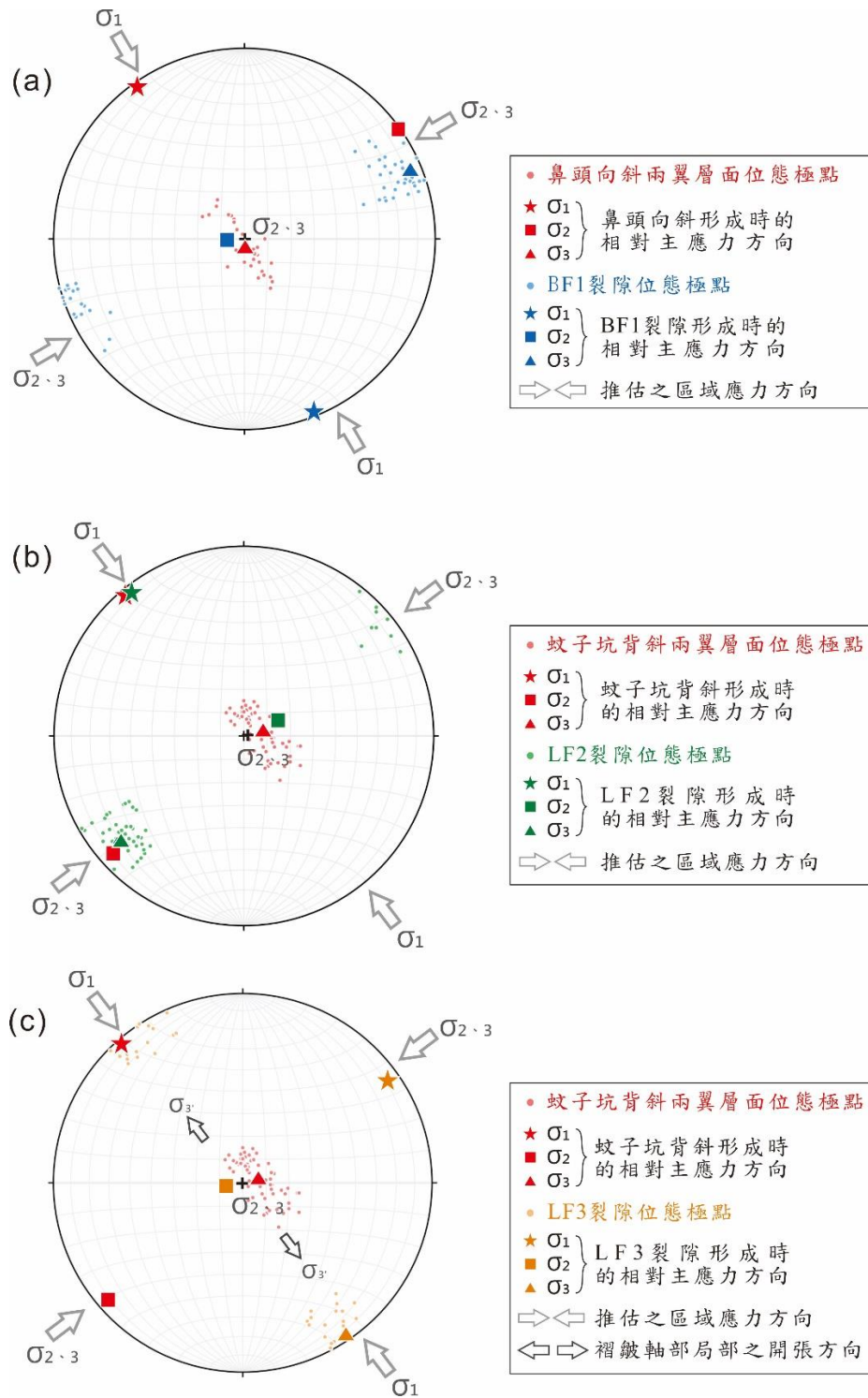


圖 6.1 BF1、LF2、LF3 與區域褶皺形成時的相對主應力方向。根據褶皺形成時最大主應力( $\sigma_1$ )垂直樞紐面(axial surface)，伸張裂隙形成時最大主應力垂直裂面，比較區域褶皺與裂隙組形成時的相對應力方向。(a、b) 區域褶皺與裂隙組 BF1 及 LF2 形成之  $\sigma_1$  方向大致相同。(c) LF6 可對應蚊子坑背斜軸部局部拉張方向。

## 6-2 正斷層成因

龍洞及鼻頭出露地層年代橫跨了漸新世(龍洞砂岩)至上新世(桂竹林層二鬮段)，截切兩區域地層的正斷層形成時間可能也有相當的差異性，若假設鼻頭向斜、蚊子坑背斜及龍洞斷層均為蓬萊造山時期(5 Ma~)形成，我們能以年代區分以下事件，以下列出 6 期可能造成此區正斷層的構造事件：

- (1)  $9 \pm 1.1$  Ma 晚中新世地殼伸張 (Chen et al., 1989)
- (2) 5 Ma~ 蓬萊造山運動垂直擠壓方向的側向伸張作用 (鄧屬予, 2007)
- (3) 5 Ma~ 褶皺軸部拉張 (鄧屬予, 2007)
- (4) 2 Ma~ 第一期沖繩海槽開張 (Sibuet et al., 1998)
- (5) 0.8 Ma~ 後造山作用之垮山階段 (鄧屬予, 2007)
- (6) 0.1 Ma~ 第二期沖繩海槽開張 (Sibuet et al., 1998)

龍洞南區西北西走向之正斷層上常出現帶有擦痕的石英纖維，石英生成須具備一定的溫度、壓力條件和相對應的埋藏深度。石英顆粒於裂隙中膠結(cement)沉澱的溫度需約高於  $80^{\circ}\text{C}$  (Bjørlykke et al., 1989; Walderhaug, 1994)，且多數情況下介於  $100\sim 250^{\circ}\text{C}$  左右(Matsumura et al., 2003; Pollington et al., 2011; Oye et al., 2020)，以地溫梯度  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  推算埋藏深度至少超過 3.5 公里，由此推論此斷層組形成於一定深度以上，且鼻頭地區並無發現對應方向的區域裂隙及斷層。本研究認為此組正斷層形成應早於鼻頭出露地層的沉積年代( $\sim 5$  Ma)，排除前述(2)~(6)的構造事件。鄰近本研究區之萊萊海蝕平台上出露數條雁行排列近東向的岩脈(圖 6.2)，約略與本區正斷層走向平行，這些岩脈於晚中新世侵入，指示當時地殼相對伸張方向，龍洞岬出露漸新世龍洞砂岩，勢必會受到此伸張環境影響，因此推估晚中新世伸張事件可能為此組斷層成因。龍洞與萊萊兩地跨越了澳底斷層及屈尺斷層等東北部主要斷層，兩區的構造位態上是否能相互比較須

考量受這些斷層影響的可能性，根據地質圖幅及前人研究所量測之岩層位態資料，兩區之間沿岸出露的岩層位態多小於 30 度，顯示斷層對岩層位態影響不大，此外，龍洞正斷層及萊萊岩脈走向近乎平行兩個主要斷層且皆為高傾角之構造，位態不易受斷層旋轉影響，因此認為能比較兩者位態上的差異。龍洞北區西北向正斷層位態能對應於裂隙組 LF2，兩者可能同於褶皺形成時期側向的伸張環境下所形成（事件 2），而零星分布之南北向具平移分量的正斷層位態能對應 LF4 及 LF5，此組斷層發育多受制於前述兩組斷層，推論其形成年代較晚。

鼻頭正斷層截切上新世桂竹林層二鬮段的岩層，由此得知其形成晚於中新世，不會受到前述中新世地殼伸張的影響（事件 1）。此區斷層位態垂直褶皺軸，且分布並非集中於褶皺軸部，難以將此區正斷層對應於褶皺軸部拉張作用（事件 3），再者根據斷層走向大致平行於近期兩次沖繩海槽開張方向，且近乎垂直於外海正斷層（圖 6.3），本研究認為鼻頭地區正斷層受沖繩海槽開張（事件 4）、（事件 6）影響較小。東北部山脈跨塌多沿既存的東北走向逆斷層（如山腳斷層），不符合本區正斷層方向，排除垮山作用（事件 5）之可能性。鼻頭地區正斷層、逆斷層及裂隙組 BF1 三者位態相當，正斷層可能沿既存之逆斷層及節理發育，其走向大致垂直於鼻頭向斜軸方向，可能在形成此向斜同時，受垂直擠壓方向側向的伸張作用（事件 2）所導致。

分析結果龍洞西北西走向之正斷層為較早期的構造，與晚中新世地殼伸張作用可能有所關聯；鼻頭北北西走向及龍洞北區西北走向的正斷層能對應於形成區域褶皺及斷層的應力環境，由於斷層走向近乎平行沖繩海槽開張方向，認為兩者無直接關聯；龍洞近南北向斷層於褶皺後期形成。



## 6-3 構造演化

統整前述裂隙及正斷層形成次序及成因，將各裂隙組及正斷層歸類為伸張環境下的伸張構造，並根據運動學的角度分析，將本研究區構造演化分為五個階段(圖 6.4)。

階段一：中新世晚期( $9 \pm 1.1$  Ma)南莊層沉積時期，台灣北部仍屬於被動大陸邊緣的伸張環境，伴隨萊萊地區岩脈入侵，同時形成裂隙組 LF1 及龍洞南區西北西向的正斷層。

階段二：中新世晚期至上新世早期(~5 Ma)，桂竹林層沉積，台灣北部逐漸進入蓬萊造山作用環境，龍洞斷層開始擴展伴隨鼻頭向斜及蚊子坑背斜形成，隨著區域擠壓方向開始形成裂隙組 BF1。

階段三：上新世晚期(~3 Ma)，台灣北部造山運動活躍，龍洞斷層上盤發育蚊子坑背斜，垂直擠壓方向的側向伸張作用形成裂隙組 LF2 及相對應的龍洞北區西北向正斷層，同時背斜軸部的局部拉張則形成裂隙組 LF3。龍洞斷層下盤發育鼻頭向斜，垂直擠壓方向的側向伸張作用形成裂隙組 BF1 及對應之鼻頭南岸北北西向的正斷層。

階段四：更新世早期(~2 Ma)，龍洞斷層作用及伴隨之褶皺作用趨緩，鼻頭及龍洞地區受到相同之北北西-南南東的擠壓方向，分別於鼻頭及龍洞地區發育裂隙組 BF1、LF4 及相對應的正斷層。

階段五：更新世早中期(~1.5 Ma)，擠壓方向轉為近南北向，形成裂隙組 BF2、LF5 及鼻頭及龍洞地區部分近南北向的正斷層。

本研究統整各階段的構造事件所對應形成的正斷層與裂隙組列於表 6.2。

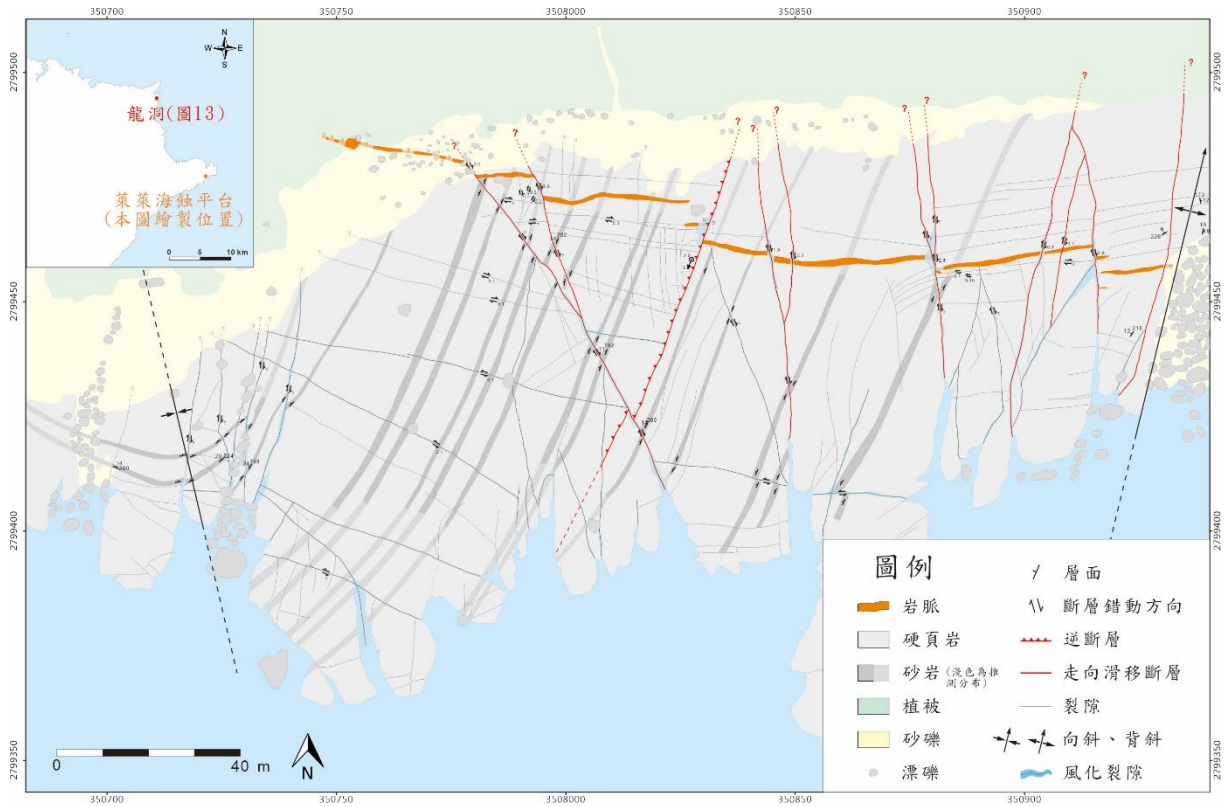


圖 6.2 萊萊海蝕平台出露雁行排列近東西向的岩脈。(改繪自尤芊翔，2015)

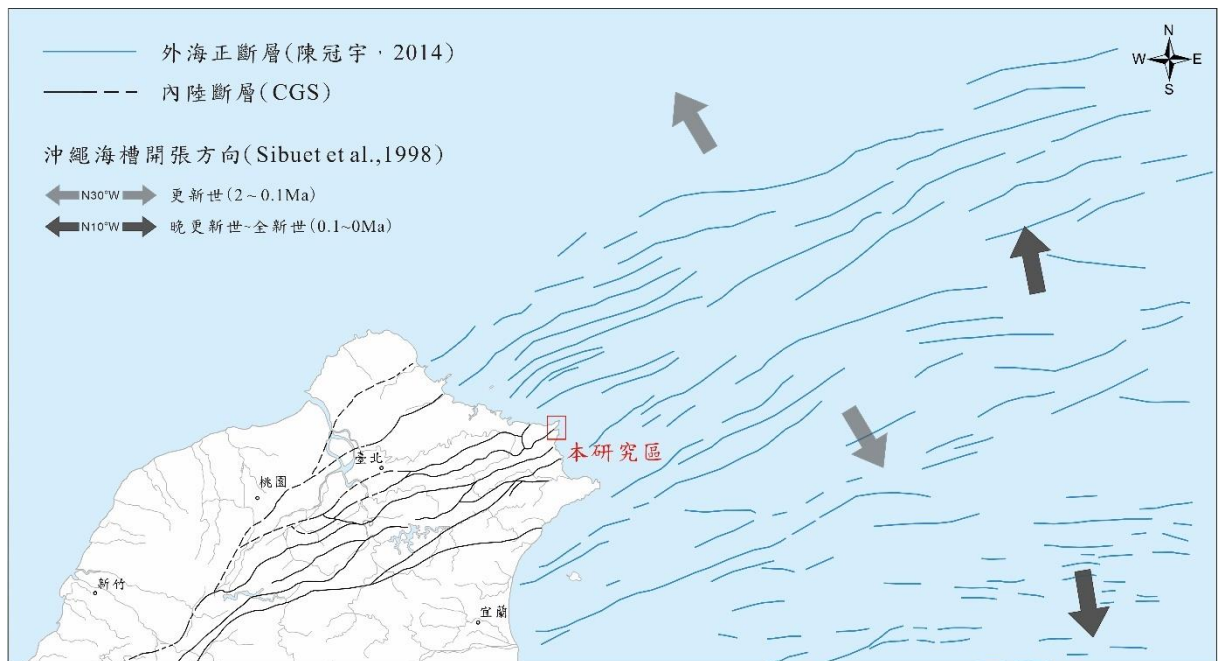


圖 6.3 東北外海正斷層分布及近期沖繩海槽兩期開張方向。

表 6.2 鼻頭及龍洞地區裂隙可能成因及發育順序。

構造事件	形成之裂隙	形成之正斷層
晚中新世地殼伸張 ( $9 \pm 1.1$ Ma)	LF1	龍洞南區西北西向正斷層
蓬萊造山運動初期 (~5 Ma)	BF1	鼻頭南岸北北西向正斷層
蓬萊造山運動活躍期 (~3 Ma)	BF1、LF2、LF3	龍洞北區西北向正斷層
斷層及褶皺作用趨緩 (~2 Ma)	BF1、LF4	龍洞近南北向正斷層
蓬萊造山運動後期 (~1.5 Ma)	BF2、LF5	少數鼻頭及龍洞地區近南北向正斷層

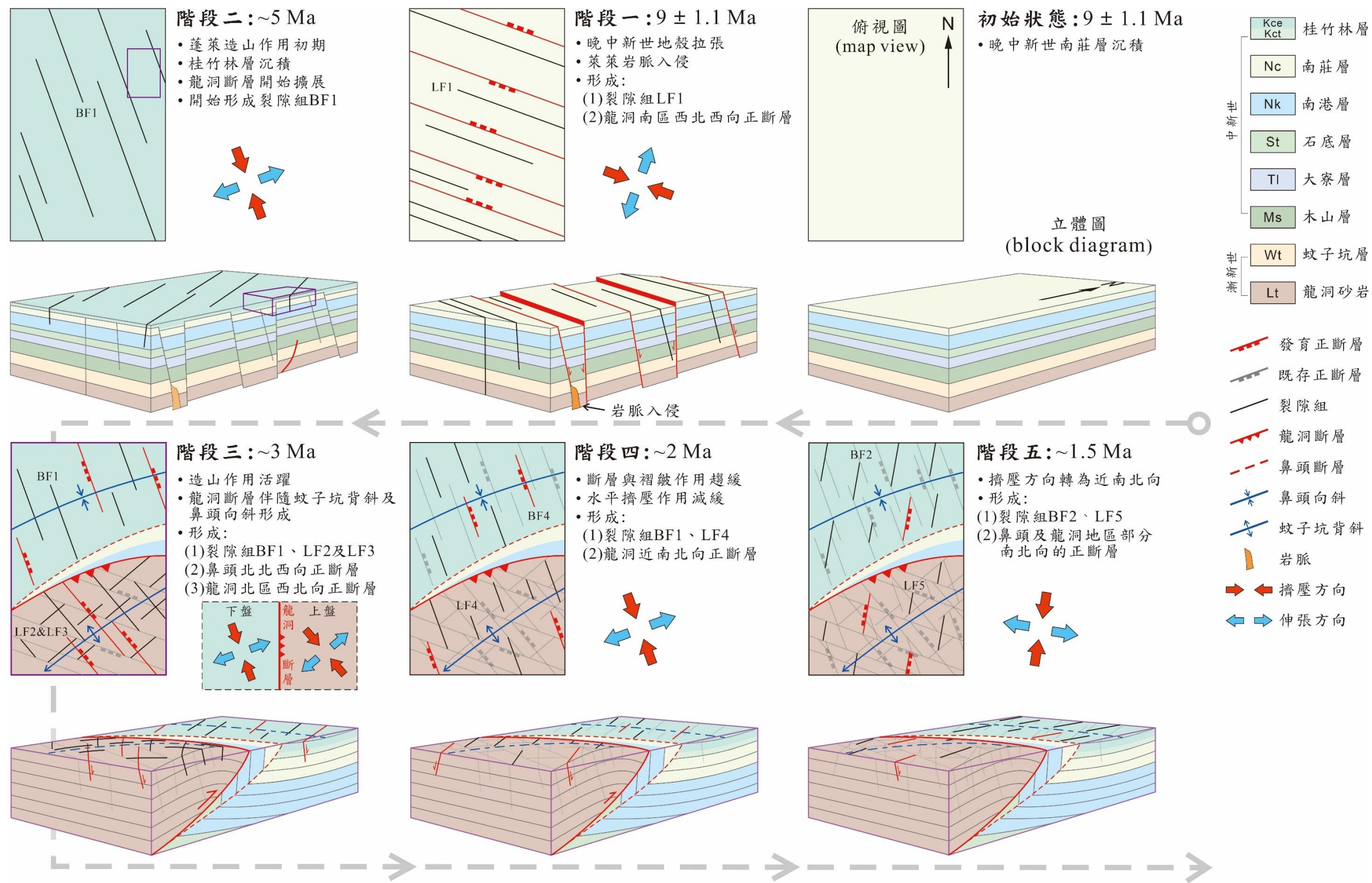


圖 6.4 鼻頭及龍洞地區構造演化圖。本研究構造演化圖以俯視圖及立體圖呈現，說明各組裂隙及正斷層形成順序及時間，共可分為五期構造事件(階段一至階段五)。階段二所示紫色區域指示階段三的俯視及立體圖位置。



## 第七章 結論

本研究結合空拍影像模型和現地地質調查，詳細記錄鼻頭及龍洞地區構造分布及特徵，將結果呈現於構造地質圖上，經討論分析後分別對兩區裂隙關聯性與正斷層可能成因提出以下四點結論：

- 一、鼻頭及龍洞地區能分別判釋出五組(BF1~BF5)及六組裂隙(LF1~LF6)，其中 BF1 及 BF2 位態能分別對應於 LF4 及 LF5，此兩對能相互匹配的裂隙組形成於相同應力環境。裂隙組 LF1 發育在鼻頭地層沉積之前，剩餘無法匹配的裂隙多為兩區局部構造事件所形成。
- 二、鼻頭南岸有 14 條能追跡約百餘公尺的正斷層，位態與裂隙組 BF1 相當 ( $N16^{\circ}W$ )，斷距介於 0.2 公尺至 3 公尺之間，依據擦痕資料推論為具右移分量的正斷層，斷層面約垂直於鼻頭向斜褶皺軸，推估垂直褶皺擠壓方向的側向伸張作用為此區正斷層成因。
- 三、龍洞南區出露 8 條具平移分量的正斷層，能追跡約 30 至 150 公尺，斷層位態可對應於裂隙組 LF1 ( $N70^{\circ}W$ )，斷距可達於 4 公尺以上，斷層走向與鄰近本研究區之萊萊地區出露岩脈長軸方向相似，正斷層成因可能與形成岩脈之晚中新世地殼伸張作用有關。龍洞北區能判釋 3 條西北向正斷層，位態對應裂隙組 LF2 ( $N40^{\circ}W$ )，近乎垂直於蚊子坑背斜軸，與鼻頭地區正斷層同為褶皺形成時期的產物。5 條零星分布之南北向具平移分量的正斷層位態能對應 LF4 及 LF5 ( $N10^{\circ}E\sim N10^{\circ}W$ )，此組斷層發育多受制於前述兩組斷層，形成於褶皺作用後期。
- 四、本研究區構造演化過程依序為：中新世晚期 ( $9 \pm 1.1\text{ Ma}$ ) 南莊層沉積，台灣北部仍屬於被動大陸邊緣的伸張環境，伴隨萊萊地區岩脈入侵及龍洞南區裂隙組 LF1 及對應的西北西向正斷層形成。而後於中新世晚期至上新世早期 ( $\sim 5\text{ Ma}$ )，台灣北部逐漸進入蓬萊造山作用環境，受

北北西-南南東的擠壓方向，形成裂隙組 BF1。上新世晚期 (~3 Ma)，台灣北部造山運動活躍，龍洞斷層上盤形成蚊子坑背斜，垂直褶皺擠壓方向的側向伸張作用形成裂隙組 LF2 及龍洞北區西北向的正斷層，同時背斜軸部拉張則形成裂隙組 LF3。龍洞斷層下盤持續受造山擠壓方向發育鼻頭向斜及裂隙組 BF1，而側向伸張作用使得鼻頭南岸北北西向的正斷層得以形成。更新世早期 (~2 Ma)，龍洞斷層及伴隨之褶皺作用趨緩，鼻頭及龍洞地區受到相同之北北西-南南東的擠壓方向，分別於鼻頭及龍洞地區發育裂隙組 BF1 與 LF4 及其對應的正斷層。更新世早中期後 (~1.5 Ma)，擠壓方向轉為近南北向，形成裂隙組 BF2、LF5 及鼻頭及龍洞地區部分近南北向的正斷層。

## 參考文獻

- Al Kadhi, A., & Hancock, P.L. 1980. Structure of the Durma-Nisah segment of the central Arabian graben system: Saudi Arabian Directorate General of Mineral Resources, Bulletin, no. 16, p. 1-40.
- Anderson, E. M., 1951, The dynamics of faulting: Transactions of the Edinburgh Geological Society, v. 8, p. 387 - 402.
- Angelier, J., 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data: Journal of Structural Geology, v. 11, no. 1, p. 37-50.
- Bjørlykke, K., Ramm, M., and Saigal, G. C., 1989, Sandstone diagenesis and porosity modification during basin evolution: Geologische Rundschau, v. 78, no. 1, p. 243-268.
- Childs, C., Holdsworth, R., Jackson, C., Manzocchi, T., Walsh, J. J., and Yielding, G., 2017, Introduction to the geometry and growth of normal faults: Geological Society, London, Special Publications, v. 439, p. SP439.423.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., and Kluth, C. F., 2011, Structural Geology of Rocks and Regions, Wiley.
- Davis, G. H., Constenius, K. N., Dickinson, W. R., Rodríguez, E. P., and Cox, L. J., 2004, Fault and fault-rock characteristics associated with Cenozoic extension and core-complex evolution in the Catalina-Rincon region, southeastern Arizona: Geological Society of America Bulletin, v. 116, no. 1, p. 128.
- Engelder, T., 1987, Joints and shear fractures in rock: Fracture mechanics of rock, v. 2, p. 27-69.
- Eyal, Y., Gross, M. R., Engelder, T., and Becker, A., 2001, Joint development



- during fluctuation of the regional stress field in southern Israel: *Journal of Structural Geology*, v. 23, no. 2, p. 279-296.
- Gross, M., Fischer, M., Engelder, T., and Greenfield, R., 1995, Factors controlling joint spacing in interbedded sedimentary rocks: Integrating numerical models with field observations from the Monterey Formation, USA: Geological Society, London, Special Publications, v. 92, p. 215-233.
- Gross, M. R., 1993, The origin and spacing of cross joints: examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California: *Journal of Structural Geology*, v. 15, no. 6, p. 737-751.
- Gupta, A., and Scholz, C. H., 2000, A model of normal fault interaction based on observations and theory: *Journal of Structural Geology*, v. 22, no. 7, p. 865-879.
- Hancock, P. L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice: *Journal of Structural Geology*, v. 7, no. 3, p. 437-457.
- Helgeson, D. E., and Aydin, A., 1991, Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks: *Journal of Structural Geology*, v. 13, no. 8, p. 897-911.
- Hobbs, K. M., 2022, Cataclasites in a fault zone exposed in a bedrock quarry near San Marcial, New Mexico, suggest multiple modes of deformation in interlayered sedimentary and volcanic rocks: *New Mexico Geological Society 72nd Annual Fall Field Conference Guidebook*, p. 321-328.
- Kimura, M., 1985, Back-arc rifting in the Okinawa Trough: *Marine and Petroleum Geology*, v. 2, p. 222-239.
- Kim, Y.-S., Peacock, D. C. P., and Sanderson, D. J., 2004, Fault damage zones: *Journal of Structural Geology*, v. 26, no. 3, p. 503-517.
- Lensen, G. J., 1958, A Method of Graben and Horst Formation: *The Journal of*

- Geology, v. 66, no. 5, p. 579-587.
- Liu, C.C., 1995, The Ilan plain and the southwestward extending Okinawa Trough: Journal of the Geological Society of China., v. 38, no. 3, p. 229-242.
- Matsumura, M., Hashimoto, Y., Kimura, G., Ohmori-Ikehara, K., Enjohji, M., and Ikesawa, E., 2003, Depth of oceanic-crust underplating in a subduction zone: Inferences from fluid-inclusion analyses of crack-seal veins: Geology, v. 31, no. 11, p. 1005-1008.
- Neuendorf, K. K. E., Mehl, J. P. J., and Jackson, J. A., 2011, Glossary of Geology, Springer Berlin Heidelberg.
- Oye, O. J., Aplin, A. C., Jones, S. J., Gluyas, J. G., Bowen, L., Harwood, J., Orland, I. J., and Valley, J. W., 2020, Vertical effective stress and temperature as controls of quartz cementation in sandstones: Evidence from North Sea Fulmar and Gulf of Mexico Wilcox sandstones: Marine and Petroleum Geology, v. 115, p. 104289.
- Peacock, D. C. P., 2001, The temporal relationship between joints and faults: Journal of Structural Geology, v. 23, no. 2, p. 329-341.
- Petit, J.-P., Auzias, V., Rawnsley, K., and Rives, T., 2000, Development of joint sets in the vicinity of faults, in Lehner, F. K., and Urai, J. L., eds., Aspects of Tectonic Faulting: In Honour of Georg Mandl: Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, p. 167-183.
- Pollington, A. D., Kozdon, R., and Valley, J. W., 2011, Evolution of quartz cementation during burial of the Cambrian Mount Simon Sandstone, Illinois Basin: In situ microanalysis of  $\delta^{18}\text{O}$ : Geology, v. 39, no. 12, p. 1119-1122.
- Price, N. J., and Cosgrove, J. W., 1990, Analysis of Geological Structures, Cambridge University Press.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., and Lisle, R. J., 1987, The Techniques of Modern

Structural Geology: Folds and Fractures, Elsevier Science.

- Reches, Z. e., 1983, Faulting of rocks in three-dimensional strain fields II. Theoretical analysis: *Tectonophysics*, v. 95, no. 1, p. 133-156.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., and Schiefelbein, I. M., 2007, *Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology*, Wiley.
- Scott Wilkerson, M., Medwedeff, D. A., and Marshak, S., 1991, Geometrical modeling of fault-related folds: a pseudo-three-dimensional approach: *Journal of Structural Geology*, v. 13, p. 801-812.
- Sibuet, J.-C., Deffontaines, B., Hsu, S.-K., Thareau, N., Le Formal, J.-P., and Liu, C.-S., 1998, Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 103, no. B12, p. 30245-30267.
- Teng, L. S., 1996, Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt: *Geology*, v. 24, no. 10, p. 949-952.
- Walderhaug, O., 1994, Precipitation rates for quartz cement in sandstones determined by fluid-inclusion microthermometry and temperature-history modeling: *Journal of Sedimentary Research*, v. 64, no. 2a, p. 324-333.
- Walsh, J. J., Nicol, A., and Childs, C., 2002, An alternative model for the growth of faults: *Journal of Structural Geology*, v. 24, no. 11, p. 1669-1675.
- Wernicke, B., and Burchfiel, B. C., 1982, Modes of extensional tectonics: *Journal of Structural Geology*, v. 4, no. 2, p. 105-115.
- Wilkins, S. J., Gross, M. R., Wacker, M., Eyal, Y., and Engelder, T., 2001, Faulted joints: kinematics, displacement-length scaling relations and criteria for their identification: *Journal of Structural Geology*, v. 23, no. 2, p. 315-327.
- Younes, A. I., and Engelder, T., 1999, Fringe cracks: Key structures for the interpretation of the progressive Alleghanian deformation of the Appalachian

plateau: Geological Society of America Bulletin, v. 111, p. 219-239.

Zeng, L., Lyu, W., Li, J., Guo, Y., Yang, Y., Dong, S., Liu, X., and Zu, K., 2019, Variation in the orientation of the maximum horizontal stress in thick channel-fill sandstones with low-permeability: A case of the Bonan Oilfield in the Bohai Bay Basin, eastern China: Marine and Petroleum Geology, v. 107, p. 32-40.

- 尤芊翔，2015，臺灣東北角海岸萊萊地區鹼性玄武岩脈及其圍岩之構造演育探討，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 尤芊翔、黃文正、羅偉、王子賓、陳建志，2016，結合空拍及電探調查探討臺灣東北角萊萊鹼性玄武岩脈及圍岩之構造演育，經濟部中央地質調查所彙刊，第 29 號，第 99-126 頁。
- 田蓉禮，1989，台灣東北角龍洞地區新期構造運動之研究，國立海洋大學海洋研究所碩士論文。
- 李建成，1989，臺灣北部的構造運動：斷層與古應力的分析研究，國立臺灣大學地質研究所碩士論文。
- 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之影響，國立臺灣大學地質研究所博士論文。
- 林怡玢，2021，台灣北部貢寮外海之地質構造研究，國立中央大學地球科學系碩士論文。
- 林啓文、周稟珊、范力仁，2022，臺灣東北部海岸鼻頭角—外澳地區之地質構造研究，經濟部中央地質調查所彙刊，第 35 號，第 23-52 頁。
- 康竹君，2016，臺灣東北部蘭陽平原之現今地表變形及其構造意義，國立中央大學地球科學系博士論文。
- 陳建輝，1993，從幾何型態探討龍洞地區之地質構造的形成功機，臺灣大學地質研究所碩士論文。
- 陳冠宇，2014，臺灣北部由造山帶至弧後張裂之陸域及海域構造研究，國立中央大學地球科學系博士論文。
- 游明芳，1998，台灣東北部鼻頭角地區節理系的研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 黃怡煥，2005，沖繩海槽最南段與台灣北部斷層系統的分析，國立臺灣海洋大學應用地球科學研究所碩士論文。

- 黃雯苓，2007，臺灣東北部海域斷層系統之研究，國立臺灣海洋大學應用地球科學研究所碩士論文。
- 黃榮彬，1994，臺灣東北部鼻頭至福隆地區之構造及節理分析，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 黃鑑水、劉桓吉，1988，雙溪圖幅與說明書，五萬分之一臺灣地質圖，經濟部中央地質調查所，第 5 號。
- 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，第 1 號，第 49-60 頁。
- 湯美華，2006，空載光達點雲及地形圖輔助生產真實正射影像之研究，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。
- 楊昭男，1995，臺灣的地質構造現象，經濟部中央地質調查所。
- 楊懿丞，2017，臺灣北方海域新近紀的盆地演化，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。
- 鄧屬予，2007，臺灣第四紀大地構造，經濟部中央地質調查所特刊，第 18 號，第 1-24 頁。
- 蕭力元、黃旭燦、鄧屬予、林國安，1998，臺灣新畿褶皺帶南段的構造特徵，台灣石油地質，第 32 號，第 133-153 頁，。
- 顏滄波、陳培源，1953，瑞芳圖幅與說明書，五萬分之一臺灣地質圖說明書，臺灣省地質調查所，第 10 號，共 16 頁。