東北角鼻頭及龍洞地區正斷層

賴品文¹ 黃文正^{1,2}

節 要

台灣東北角由數條東北-西南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,從壓縮環境轉變為伸張環境,發育一系列的正斷層。位在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,判釋裂隙分佈情形,結合野外地質調查,詳細記錄此區域的構造,分析正斷層可能的成因。

鼻頭南岸出露 14 條北北西向的正斷層,地表破裂跡能追跡約百餘公尺,斷距介於 0.2 公尺至 3 公尺之間。龍洞南區可觀察到 8 條西北西走向的正斷層,斷距可高達 4 公尺以 上,北區能判釋出 3 條西北向的正斷層,此外尚有 5 條近南北向的正斷層零星分佈於整個 龍洞地區。鼻頭南岸正斷層位態與鼻頭向斜軸近乎垂直,推估此區正斷層成因與垂直褶皺 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,推測此組正斷層成因能對應於晚中新世的地殼伸張環境。北區西北向正 斷層與鼻頭地區正斷層同為褶皺形成時期的產物。零星分佈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

^{1.} 國立中央大學應用地質所(Institute of Applied Geology, National Central University)

^{2.} 國立中央大學地球科學系(Department of Earth Sciences, National Central University)

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。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,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;林怡ジ,2021),但對於陸域



圖 1),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於鄰近構造的關聯性。



圖1 龍洞三維模型及立面影像,可見沿岸露頭受數條斷層截切(紅色線段)。

區域地質及構造

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並向海延伸,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), 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)。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。

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。

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),顏滄 波、陳培源(1953)及林啟文等(2022)則認為鼻頭向斜南翼於龍洞灣的北岸出 露岩層屬於南莊層。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(圖3)。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,常見清晰之交錯層理,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。本層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。

2.蚊子坑層(Wt):

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。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。東北角海岸地區出露厚度約 1100 公尺。

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粒至粗粒砂 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。

4.桂竹林層(Kc):

主要分佈於鼻頭向斜兩翼,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。

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),為一東北-西南向的 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,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,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。



圖 2 北臺灣地質圖及剖面。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,內陸斷層(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)

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	
中新世	晩期	桂竹林層大埔段(110m)			
		南莊層(350m)	未發現		
		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)	

表1臺灣東北部各地質區的地層層序及層厚。



圖 3 鼻頭及龍洞區域地質圖及剖面。地質圖改繪自五萬分之一的雙溪地質圖 (黃鑑 水與劉桓吉, 1988)。

建模影像構造判釋

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,藉 由套裝軟體 Pix4Dmapper 進行影像匹配及空中三角測量等作業,建立三維模型、 高精度之正射及立面影像,協助判釋露頭上之構造,以繪製構造地質圖。

斷層常沿既存節理發育,斷層帶附近也常觀察到密集的裂隙分布,裂隙間的 截切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。正攝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 隙進行分組,可初步了解裂隙組間的截切關係,並現地查核影像判釋結果,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。以下將 著重於描述鼻頭及龍洞區域正攝影像上裂隙判釋結果。

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,以利正攝影像判釋平台上裂隙分佈及其走向,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。正攝影像上能明顯看出 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,破裂跡延續良好可追跡約百餘公尺,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 4)。

經濟部中央地質調查彙刊



圖 4 正攝影像判釋之鼻頭裂隙分布情況。主要能判視出四組系統性的裂隙組 (BF1~BF4)。BF1及BF4為主要區域裂隙,略呈正交。BF2及BF3集中分布 於近鼻頭向斜軸部。

龍洞

龍洞岬南北部的裂隙從影像即可判釋出走向上有所差異,因此將本區分為 北區及南區進行討論。根據三維模型及立面影像可見龍洞岬受數條正斷層截切 (參見圖1),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,上有數組具系統性的裂隙,透過正攝影像 能加以分析其方向性。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)。



圖 5 龍洞主要裂隙組分布。白色為正攝影像上出露之露頭,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。

地質調查及分析結果

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 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)描述之走滑斷層及平滑斷層。

鼻頭

- 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(圖6),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。
- 2. 裂隙: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),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,本研究根據影像判釋及野外調查繪製地層柱(圖4),將鼻頭地層區分成12個岩性單元(Unit A-Unit L),分區調查鼻頭裂隙分佈(圖8)。調查結果除了影像判識之四組裂隙(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圓呈現,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 9),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。本區逆斷層僅出現於鼻頭國小下方之海蝕平台,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滑移方向為具右移分量的正斷層。以下將描述幾網斷距較明顯的斷層特徵。



圖 6 鼻頭向斜兩翼層面位態及極點投影圓。紅色方框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°~152°之間,屬於平緩褶皺。



圖 7 鼻頭地區地層柱狀圖。



圖 8 鼻頭裂隙分區調查及結果。Unit A~Unit J 能參照圖 7 所示,為不同岩性單元之 岩層,本區共可調查到五組裂隙 BF1-BF5,其中 BF1 及 BF4 在多數調查區皆 能觀察到,為該區主要區域裂隙。



圖 9 鼻頭南岸構造地質圖。紅色線段為本區正斷層;藍色線段為逆斷層;紫色線段 為逆斷層;虛線為推測斷層。

• BFt13 - BFt 14 斷層組:

BFt13、BFt14兩斷層為北北西走向,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10),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(UnitI)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 - BFt 16 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 11)。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,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12C)。



圖 10 BFt13、BFt14 斷層露頭照片及描繪圖。



圖 11 BFt15、BFt16 斷層帶露頭照片及描繪圖。



圖 12 BFt26 斷層露頭照片及描繪圖。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

- 蚊子坑背斜:野外調查能清楚觀察到龍洞南北部岩層傾向變化,層面資料分 析背斜軸趨向為 S49°W,傾伏角約為7度(圖13),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)。
- 2. 裂隙: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判釋及野外調查的主要斷層位置,將龍洞岬分為七個調查區(I-VII),詳細調查裂隙分佈(圖14)。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。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佈,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;LF4主要出現在調查區II、III;LF5密集發育調查區I,破裂跡可達近百公尺,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 15),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°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具平移分量的正斷層,零星分布於整個龍洞地區,此組近南北向的正斷層,其斷層面及破裂跡規模皆小於前述之西北西及西北向的正斷層,且多受制於此兩組斷層。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具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)零星分布之南北向具平移分量的正斷層。



圖 13 蚊子坑背斜兩翼層面位態及極點投影圓。褶皺兩翼夾角界於 140°~172°之間, 屬於平緩褶皺。



圖 14 龍洞裂隙調查分區及結果。



圖 15 龍洞構造地質圖。紅色線段為正斷層及正斷層;紫色線段為走滑斷層;虛線為 推測斷層。

• LFt2-1、LFt2-2 - LFt 3 斷層組:

龍洞南區可見兩道走向約 N70°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 16A)。 LFt2-1及 LFt2-2為一組傾向相反的高角度斷層(圖 16B),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分別為具右移及 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,偶爾伴隨約 1 公尺寬的 破裂帶(圖 16C),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。

• LFt15 斷層:

LFt15 位於近蚊子坑背斜軸部位置,斷層位態為 N72°W, 82°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 17A)。近斷層處地質破碎(圖 17B),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°W,70°NE,斷距可達4公尺以上。斷層跡朝東南延伸(圖17C),DEM線型顯示此斷層可能已延伸入海(參見圖17A)。



圖 16 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 斷層破碎帶。



圖 17 LFt15 與 LFt19 斷層露頭描繪。A: 1m 數值地形圖(DEM) LFt15 延伸方向 具一明顯線型。B: LFt15 斷層露頭近照。C: LFt19 朝東南延伸。D: LFt19 斷 層面。

討 論

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 2 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:UnitA、UnitF)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18)。

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),岩性邊界的強度、岩層的楊氏模數、 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。

鼻頭及龍洞地區正斷層成因

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 ± 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觀察到擦痕面並帶有石英纖維,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)沉澱的溫度在多數情況下約為 100~250°C (Matsumura et al., 2003; Pollington et al., 2011; Oye et al., 2020),以地溫梯度 30°C/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(~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 19),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。龍洞北區西北向正斷層位態能對應於裂隙組 LF2,兩者可能於相同伸 張環境下形成,同為褶皺形成時側向的伸張作用(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 分佈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 20),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。鼻頭正斷層走向大致垂直 於鼻頭向斜褶皺軸方向,而有可能在形成此向斜同時,於垂直擠壓方向側向的伸 張作用(事件2)產生此區正斷層,且龍洞北區西北向正斷層也近乎垂直於蚊子 坑背斜軸,可能與鼻頭地區正斷層為同時期的產物。

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.能對應於更新 世早期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。

鼻頭及龍洞地區的構造演化

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 21)。

- 階段一:中新世晚期(9±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3。

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			

表 2 鼻頭及龍洞地區裂隙對照表,*符號指示該區主要裂隙組。



圖 18 根據褶皺形成時最大主應力(σ1)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)區域褶皺於裂隙組 BF1 及 LF2 形成之 σ1 方向大致相同。(c) LF6 可對應蚊子坑背斜軸部局部拉張方向。



圖 19 萊萊海蝕平台出露雁行排列近東西向的岩脈 (改自尤芊翔, 2015)。



圖 20 東北外海正斷層分佈及近期沖繩海槽開張方向。



圖 21 鼻頭及龍洞地區構造演化示意圖。

構造事件	形成之裂隙	形成之正斷層	
晚中新世地殼伸張(9±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國	
蓬萊造山運動活躍期(~3 Ma)	BF1、LF2、LF3	算或用户1212回回正圖 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		龍洞近南北同止斷層	
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	

表3 鼻頭及龍洞地區裂隙可能成因及發育順序。

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°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°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°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°E~N10°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±1.1 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(~5 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

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,共144頁。

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。

林怡ジ(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學系,碩士論文,

共 126 頁。

- 林啓文、周稟珊、范力仁(2022)臺灣東北部海岸鼻頭角至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。
- 陳建煇(1993)從幾何型態探討龍洞地區之地質構造的形成機制。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,共199頁。
- 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第 5 號。經濟部中央地 質調查所,共 51 頁。
- 黃鑑水、何信昌(1989)頭城圖幅與說明書,五萬分之一臺灣地質圖第 10 號。經濟部中央 地質調查所,共 29 頁。
- 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。
- 楊昭男(1995)臺灣的地質構造現象。經濟部中央地質調查所,共150頁。

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第 10 號。臺灣 省地質調查所,共16頁。
- Chen, C.H., Liu, T.K., Lo, H.J. (1989) An alkali basaltic dike in lailai, northeastern coast of Taiwan. Proceedings of the Geological Society of China, 32, 295-316.
- 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, 23, 279-296.
- Gross, M.R. (1993) The origin and spacing of cross joints: examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California. Journal of Structural Geology, 15, 737-751.

- Huang, S.T., Ting, H.H., Chen, R.C., Chi, W.R., Hu, C.C., and Shen, H.C. (1992) Basinal Framework and Tectonic Evolution of Offshore Northern Taiwan. Petroleum geology of Taiwan, 27, 47-72.
- Helgeson, D.E., and Aydin, A. (1991) Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks. Journal of Structural Geology, 13, 897-911.
- Kimura, M. (1985) Back-arc rifting in the Okinawa Trough. Marine and Petroleum Geology, 2, 222-239.
- 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, 31, 1005-1008.
- 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, 115, 104289.
- 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 δ180. Geology, 39, 1119-1122.
- Sibuet, J.C., Deffontaines, B., Hsu, S.K., Thareau, N., Le Formal, J.P., and Liu, C.S., ACT party. (1998) Okinawa trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution. Journal of Geophysics Research, 103, B12, 30245-30267.
- Song, G.S., Ma, C.P., Yu, H.S. (2000) Fault-controlled genesis of the Chilung Sea Valley(northern Taiwan) revealed by topographic lineaments. Marine Geology, 169, 305-325.
- Teng, L.S. (1996) Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. Geology, 24, 949-952.
- 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, 107, 32-40.

NORMAL FAULTS IN BITOU AND LONGDONG AREA, NORTHEASTERN TAIWAN

Pin Wen, Lai¹, Wen-Jeng Huang^{1,2}

ABSTRACT

Northeastern Taiwan straddles two major geologic provinces, including the Hsuehshan Range province and the Western Foothills province. Several regional faults and folds trending northeast-southwest 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.

Fourteen NNW-oriented 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 with a strike-slip component can be observed in the southern area of Longdong cape, their separation 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. The NNW-oriented normal fault attitude in Bitou area is almost perpendicular to the fold axis of Bitou Syncline, it is inferred that the faults 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, it is speculated that the normal faults may be caused by the stretching of the Miocene crust. The NW-oriented normal faults and the NNW-oriented normal faults in the Bitou area are developed in the same period during the formation of the regional fold. The N-S trending

normal faults restricted in between the previous two normal fault sets in Longdong area and formed during the late stage of folding.

Key words: Bitou, Longdong, normal fault, fracture, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Okinawa Trough rifting.

^{1.} Institute of Applied Geology, National Central University

^{2.} Department of Earth Sciences, National Central University