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's Thesis

觀音坑地區裂隙特徵分析：構造裂隙之判識及古應力重建

Analysis of Fracture Characteristics in the Kuanyinkeng Area: Identification of Tectonic Fractures and Paleostress Reconstruction

研 究 生：郭 穆
Student: Mu Kuo

指導教授：黃 文 正 博士
Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph.D.

中 華 民 國 一 百 一 十 五 年 十 月
October, 2026

113624002

國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：2026 / 10 / 12　The latest version since Feb. 2026

授權人姓名	郭穆	學 號	113624002
系所名稱	應用地質研究所	學位類別	碩士
論文名稱	觀音坑地區裂隙特徵分析：構造裂隙之判識及古應力重建		

學位論文網路公開授權

同意本人撰寫之學位論文全文電子檔於 立即公開 網路公開。

依著作權法規定，授權國立中央大學、台灣聯合大學系統與國家圖書館，無償、不限期間與次數重製本論文，並得以非營利用途之利用，其包括得將本論文之電子檔收錄於數位資料庫，並透過網際網路於上列日期公開，以供為非營利目的之檢索、閱覽、下載及/或列印。

本授權書所定授權，均為非專屬授權之約定，本人仍得自行或授權任何第三人利用本著作。

存放於本校之學位論文紙本延後公開申請

依學位授予法規定立即公開

※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：郭穆　指導教授簽名：蔡文正

*本授權書請完整填寫並親筆簽名後，裝訂於紙本論文書名頁之次頁並上傳本校博碩士論文系統。

國立中央大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 郭穆 研究生

所提之論文 觀音坑地區裂隙特徵分析：構造裂隙之判識及古應力重建

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

115 年 6 月 23 日

1150622

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 郭穆 研究生

所提之論文 觀音坑地區裂隙特徵分析：構造裂隙之判識及古應力重建

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 林啟文

委　　員 林啟文

楊志成

黃文正

葉恩肇

中　華　民　國　115 年　7 月　3 日

觀音坑地區裂隙特徵分析：

構造裂隙之判識及古應力重建

中文摘要

本研究以北臺灣觀音坑地區為研究對象，整合地表中心安山岩脈調查、KYK-1 至 KYK-3 探勘井之連續岩心紀錄，以及 KYK-1 井 60–300 公尺區段之超音波孔內影像測井（BHTV）資料，探討地下火成岩體與淺部沉積岩層之裂隙分布、局部剪切變形及可能的古應力方向。研究方法包括岩象比較、岩體品質指標（RQD）分析、實體岩心與 BHTV 交叉判釋、裂隙位態統計、定向張量分析，以及基於安德森斷層理論之古應力方向幾何約束。

岩象比較顯示，地表中心岩脈與 KYK-1 井 120 公尺處安山岩心皆具淺灰色細粒至隱晶質基質、斑狀組織，以及粒徑約 0.5–2.0 毫米之長條狀鐵鎂礦物與斜長石斑晶，顯示兩者具有高度相似的岩象特徵，並可能與同一或相近之岩漿活動系統有關；惟其同源性仍需地球化學與定年資料進一步驗證。RQD 分析顯示，220.16 公尺附近為 KYK-1 井岩體品質與裂隙分布型態之主要轉換界線；60–220.16 公尺區段之 RQD 較低且變化較大，而 220.16–300 公尺區段整體較高，反映深部岩體相對完整。

BHTV 與實體岩心之交叉比對顯示，KYK-1 井 132–142 公尺區段之 BHTV 聲學影像未呈現明顯低波幅正弦特徵，但同深度岩心可見黃泥與次生方解石充填之不連續面，說明 BHTV 較易辨識開放或聲學對比明顯之裂隙，而岩心則可保存已充填或癒合之不連續面。淺部未定向岩心之裂隙視傾角統計顯示，KYK-1 井 0–60 公尺與 KYK-2 井 0–75 公尺皆於 40–50° 出現主要峰值。KYK-3 井 24.2 公尺及 67.2 公尺處之剪切面保存擦痕線理，分

別呈右移為主、伴隨正滑分量，以及正滑為主、伴隨右移分量之斜向滑移特徵；惟此判釋僅適用於岩心尺度，不能直接代表區域斷層之絕對運動方向。

KYK-1 井 BHTV 定向裂隙資料顯示，60–220.16 公尺區段之裂隙極點呈近帶狀至局部群集型分布，並具有兩個主要集中區；220.16–300 公尺區段則以單一優勢集中區為主。依據前者之裂隙極點分布、定向張量分析及安德森斷層理論，本研究約束其古最大主應力軸 σ_1 約呈西北西-東南東(N65°W–S65°E)，且近水平。若中心岩脈可近似視為 Mode I 張裂面，則 σ_3 可能近於東北–西南向，而 σ_2 接近垂直，顯示壓縮應力場，容易形成走滑斷層系統。此方向與中心岩脈之西北西–東南東走向相近，並與東北走向的成子寮斷層約呈正交，反映臺灣北部更新世造山運動期的西北西–東南東方向水平擠壓應力場。由於本研究缺乏完整斷層滑移向量、定向擦痕與多點構造資料，上述結果應視為井孔尺度之古應力方向幾何約束，而非完整古應力張量反演。

關鍵詞：安山岩、觀音坑岩脈、裂隙位態、超音波孔內影像測井、古應力幾何約束。

Analysis of Fracture Characteristics in the Kuanyinkeng Area: Identification of Tectonic Fractures and Paleostress Reconstruction

Abstract

This study investigates the Kuanyinkeng area in northern Taiwan by integrating field observations of the central andesite dike, continuous core records from boreholes KYK-1 to KYK-3, and acoustic borehole televiewer (BHTV) data from the 60–300 m interval of KYK-1. The objectives are to characterize fracture distributions and local shear deformation in the subsurface igneous body and shallow sedimentary strata, and to constrain possible paleostress directions. The methods comprise macroscopic petrographic comparison, Rock Quality Designation (RQD) analysis, cross-comparison of physical cores and BHTV images, fracture-orientation statistics, orientation tensor analysis, and geometric paleostress constraints based on Andersonian faulting theory.

Macroscopic petrographic comparison shows that the surface central dike and the andesite core recovered at 120 m in KYK-1 share a light-gray, fine-grained to aphanitic groundmass, porphyritic texture, and elongated mafic minerals and plagioclase phenocrysts approximately 0.5–2.0 mm in size. These similarities suggest that the two may be related to the same or closely associated magmatic system, although geochemical and geochronological data are still required to test their genetic relationship. RQD results indicate that the interval near 220.16 m marks the principal transition in rock-mass quality and fracture-distribution

pattern in KYK-1. RQD values are generally lower and more variable between 60 and 220.16 m, whereas the 220.16–300 m interval is characterized by generally higher values and a relatively more intact rock mass.

Cross-comparison of BHTV images and physical cores shows that the BHTV amplitude image from 132–142 m lacks prominent low-amplitude sinusoidal traces, whereas cores from the same interval contain discontinuities filled with yellow clay and secondary calcite. This contrast indicates that BHTV more readily detects open fractures or discontinuities with strong acoustic contrast, while physical cores can preserve filled or healed features. Apparent-dip statistics from the shallow unoriented cores show major peaks at 40–50° in both the 0–60 m interval of KYK-1 and the 0–75 m interval of KYK-2. Slickenlines on shear surfaces at 24.2 m and 67.2 m in KYK-3 indicate, respectively, dextral-dominant oblique slip with a normal component and normal-dominant oblique slip with a dextral component. Because the KYK-3 core is unoriented, these interpretations are restricted to relative slip at the core scale and do not define the absolute kinematics of a regional fault.

The oriented BHTV fracture data from KYK-1 show that fracture poles in the 60–220.16 m interval form a near-girdle to locally clustered distribution with two principal concentrations, whereas the 220.16–300 m interval is dominated by a single preferred concentration. Based on the pole distribution, orientation tensor analysis, and Andersonian faulting geometry, the maximum principal paleostress axis (σ_1) for the shallower interval is constrained to a WNW–ESE orientation (approximately N65°W–S65°E) and is subhorizontal. If the central dike is approximated as a Mode I opening fracture, σ_3 may have been subhorizontal and

NE–SW, whereas σ_2 may have been near vertical, suggesting a possible strike-slip stress regime under WNW–ESE horizontal compression. The inferred σ_1 is subparallel to the WNW–ESE trend of the central dike and intersects NE–SW regional structures, including the Chengziliao Fault, at a high angle. These relationships may record WNW–ESE horizontal compression during the Pleistocene orogenic stage in northern Taiwan. Because complete fault-slip vectors, oriented slickenlines, and multi-site structural data are unavailable, the result is interpreted as a borehole-scale geometric constraint on paleostress direction rather than a complete paleostress tensor inversion.

Keywords: andesite, Kuanyinkeng dike, fracture orientation, acoustic borehole televiewer, paleostress geometric constraint.

誌謝

論文得以順利完成，首先向我的指導教授黃文正老師致上最誠摯的謝意。在兩年的大學專題跟兩年的研究生涯中，老師跟師母不僅在學術上給予我指導，更在研究遇到瓶頸時引領我思考、釐清邏輯。老師淵博的學識、嚴謹的治學態度以及對研究的熱忱，將是我未來待人處事與職場生涯中不可多得的典範。

此外，由衷感謝口試委員林啟文博士、楊志成博士及葉恩肇老師於百忙之中撥冗審閱本論文。老師們在口試期間提出的精闢見解、建設性建議與修正意見，使本研究的內容更加完善。

在論文寫作與實驗期間，研究室夥伴們給予了我莫大的協助。感謝琮錡、承家、蘭芝、中威、品文、長志、愷風、桃、育熏、譚寧在我剛加入研究室時的帶領與不吝傳承經驗；感謝琬茜、子甄、瑋鈞、納森、安民兩年來的互相扶持、共同討論並分擔野外工作，讓研究生的生活充滿了歡笑；同時也感謝 Vicky 在實驗器材準備與各項行政文書上的協助。因為有你們，地質力學研究室就像一個溫暖的大家庭。

最後，我要將這份喜悅分享給我的家人。感謝父母與弟弟多年來無條件的支持與包容，讓我在求學的道路上能夠無後顧之憂地一路向前。每當我感到疲憊與挫折時，家人的鼓勵總是我最強大的精神後盾。

本研究承蒙經濟部地質調查及礦業管理中心相關計畫〔計畫名稱：新北市觀音山地區地下三維地質模型建置／計畫編號：B114011〕之經費資助與資料提供，使本論文得以順利進行與完成，謹致上誠摯的謝意。

謹以此文，獻給所有關心與支持我的師長、同儕及家人。

目錄

中文摘要 I
Abstract III
誌謝 VI
目錄 VII
圖目錄 X
表目錄 XII
第一章 緒論 1
1-1 前言 1
1-2 研究目的 1
第二章 研究區域概述 6
2-1 地質背景 6
2-2 地形 6
2-3 地層 7
2-4 斷層 8
2-5 構造演化順序 14
第三章 前人文獻回顧 15
3-1 觀音山地區地質演化與火成岩特徵 15
3-2 地下裂隙判識技術：影像測井之應用與限制 15
3-3 裂隙幾何與古應力方向判釋理論 16
第四章 研究方法 19
4-1 樣本採集 19
4-1-1 野外岩脈樣本採集 19
4-1-2 鑽井岩心樣本採集 19

4-2 鑽井岩心紀錄與岩體品質指標(RQD)..... 21
4-3 超音波孔內影像測井(BHTV)之原理與裂隙位態擷取..... 22
4-4 基於定向張量與安德森斷層理論之破裂古應力幾何約束..... 25
第五章 研究結果..... 27
5-1 觀音坑安山岩與鑽井岩心之岩象特徵..... 27
5-1-1 觀音坑中心岩脈(Surface Dike)觀察..... 27
5-1-2 觀音坑一號井(KYK-1)岩心觀察..... 27
5-1-3 觀音坑二號井岩心觀察..... 30
5-1-4 觀音坑三號井岩心觀察..... 32
5-2 岩體品質指標(RQD)深度分佈與岩心分段..... 35
5-3 觀音坑一號井淺部火成岩段與深部火成岩段之裂隙位態分布..... 37
5-4 觀音坑淺部未定向岩心之裂隙與剪切帶觀察..... 39
5-4-1 觀音坑一號井 0 - 60 公尺裂隙視傾角統計..... 39
5-4-2 觀音坑二號井裂隙視傾角統計..... 40
5-4-3 觀音坑三號井剪切面與擦痕線理特徵..... 40
第六章 討論..... 43
6-1 測井影像 (BHTV) 與實體岩心觀測差異之物理與地質意義..... 43
6-2 淺部覆蓋層之破裂特徵與局部剪切變形..... 46
6-2-1 跨井淺部裂隙視傾角分佈之幾何相似性..... 46
6-2-2 局部剪切變形之岩心證據..... 48
6-3 古應力方向與區域構造之幾何關聯..... 50
第七章 結論..... 55
參考文獻..... 57

附錄(一) 觀音坑一號井(KYK-1)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位 61
附錄(二) 觀音坑二號井(KYK-2)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位 65
附錄(三) 觀音坑三號井(KYK-3)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位 66
附錄(四) 口試委員意見修正與回覆說明 67

圖目錄

圖 1.1 規模二以上地震紀錄 4
圖 1.2 GNSS 年平均水平位移場 5
圖 2.1 觀音山地區陰影疊加地形與區域構造跡線分佈圖 9
圖 2.2 研究區域地質圖 10
圖 3.1 脆性破裂模式圖 18
圖 3.2 安德森斷層模型 18
圖 4.1 RQD 計算方式與 KYK-1 井岩體分段示意圖 21
圖 4.2 BHTV 孔壁展開影像中平面狀不連續面呈正弦曲線之示意圖 23
圖 5.1 觀音坑岩脈與 KYK-1 地下 120 公尺岩心岩象對比圖 28
圖 5.2 觀音坑二號井 0～3 公尺岩心 30
圖 5.3 觀音坑二號井 16～20 公尺岩心 30
圖 5.4 觀音坑二號井 42～44 公尺岩心 31
圖 5.5 觀音坑二號井 56～60 公尺岩心 31
圖 5.6 觀音坑二號井 72～75 公尺岩心 31
圖 5.7 觀音坑三號井 0～4 公尺岩心 32
圖 5.8 觀音坑三號井 24～28 公尺岩心 33
圖 5.9 觀音坑三號井 32～35 公尺岩心 33
圖 5.10 觀音坑三號井 54～56 公尺岩心 33
圖 5.11 觀音坑三號井 60～64 公尺岩心 34
圖 5.12 觀音坑三號井 64～68 公尺岩心 34
圖 5.13 KYK-1 井岩石品質指標（RQD） 36
圖 5.14 觀音坑一號井裂隙法向量投影圓(深度 60～220 公尺) 37

圖 5.15 觀音坑一號井裂隙法向量投影圓(深度 220～300 公尺)..... 38
圖 5.16 觀音坑一號井 0~60 公尺裂隙視傾角分佈圖 39
圖 5.17 觀音坑二號井 0～75 公尺裂隙視傾角分佈圖 40
圖 5.18 觀音坑三號井深度 24.2 公尺處的高角度剪切破裂面 41
圖 5.19 觀音坑三號井深度 67.2 公尺處的高角度剪切破裂面 42
圖 6.1 KYK-1 深度 132 - 142 公尺處 BHTV 與實體岩心之對比 45
圖 6.2 觀音坑一號井與二號井淺部裂隙視傾角分佈對比圖 47
圖 6.3 觀音坑二號井深度 45.2 公尺處之高角度不連續面 47
圖 6.4 KYK-3 井泥岩單元中之高角度剪切破裂面與擦痕線理 49
圖 6.5 KYK-1 井 60–220.16 公尺中淺部火成岩段裂隙分布 51
圖 6.6 KYK-1 井下裂隙推估之古應力方向與周遭構造之幾何關係圖 54

表目錄

表 2.1 舊圖幅與現今圖幅分類對照表 12

表 4.1 鑽井位置坐標 20

表 5.1 觀音坑地表岩脈及觀音坑一號井岩心比較 29

第一章 緒論

1-1 前言

臺灣島位處歐亞板塊與菲律賓海板塊之斜向聚合活動邊界，地體構造活動極為劇烈，造就了地表高度複雜且活動頻繁的斷層系統與褶皺構造體系(何春蓀,1986)。在板塊劇烈聚合的背景下,臺灣北部自上新世(Pliocene)至更新世（Pleistocene）早期歷經了強烈的蓬萊造山運動。然而，隨著地體構造轉變，北臺灣自更新世中期起受到琉球隱沒帶向西延伸以及後造山伸張作用（Post-orogenic extension）之影響，大地應力場逐漸由強烈的水平擠壓轉入伸張環境（鄧屬予，1996；鄧屬予等，2011）。

此一應力體系的轉變伴隨了活躍的第四紀熱液與岩漿活動，進而引發了大屯火山群與觀音山群等活躍的火山噴發與侵入事件(莊文星與陳汝勤，1989；鄧屬予等，2011)。觀音山火山體作為北臺灣複式火山之代表，其深部火成岩盤所遺留的裂隙系統、構造不連續面以及岩脈侵入幾何,可能記錄不同階段構造應力與岩漿活動作用之部分地質資訊。

1-2 研究目的

從現今區域動力學的背景來看，依據全球導航衛星系統（GNSS/GPS）之地殼變形觀測與微震震源機制解分析，北臺灣及臺北盆地周緣目前正處於後造山伸張與下陷的構造活動環境中（中央研究院地球科學研究所,2026；如圖 1.2 所示)。然而，現今觀測到的主動形變與地質歷史中造山期的古應力場（Paleostress field）具有不同的構造演化意義。過去控制臺北盆地西緣與林口台地發育的構造,如新莊斷層與成子寮斷層，主要形成於西北西—東南東（WNW–ESE）方向之水平擠壓應力背景下（Angelier et al., 1990；邱維毅，2009)。

為探討觀音坑地下裂隙所保存之古應力方向及其構造意義，需取得可靠的構造位態資料。然而，觀音山地區受地表風化與露頭條件限制，完整之

現地構造資料較為缺乏。相對而言，地下安山岩體與火山碎屑岩可保存岩漿侵入、冷卻收縮及後期構造作用等不同階段形成之脆性破裂（Brittle fractures）。因此，透過深部鑽井取得之連續岩心與孔內影像資料，可補充地表露頭不足，提供地下裂隙幾何與破裂特徵之觀察依據。

由於地下安山岩體在冷卻與後期演化過程中，可能伴隨非構造性冷卻裂隙、熱液充填，以及鑽進與岩心提取過程所產生之人工破裂，因此若直接將所有觀測到的不連續面納入古應力判釋，可能受到非構造裂隙與鑽井誘發破裂之影響。因此，本研究結合實體岩心判識與裂隙位態統計分析：首先，透過岩心觀察破裂面新鮮度、礦物充填、擦痕及其他剪切特徵，以辨識天然不連續面與可能之鑽井誘發裂隙；再針對 BHTV 所取得之定向裂隙資料，利用賓漢分析（Bingham Analysis）與定向張量（Orientation Tensor）描述裂隙極點之優勢方向及空間分布型態，並降低離散資料對幾何判釋之影響。最後，結合裂隙位態、地表中心岩脈與區域構造之相對方向，對觀音坑地區可能之古應力方向進行幾何約束與定性討論。

本研究以 KYK-1 探勘井（深度 300 公尺）為主要研究對象，並輔以周緣 KYK-2 與 KYK-3 井資料。鑽井計畫中，超音波孔內影像測井（BHTV）的有效掃描區間為深度 60–300 公尺。因此，本研究採取分段對比方式：0–60 公尺區段以實體岩心之岩性、裂隙視傾角與破裂面特徵為主；60–300 公尺區段則結合實體岩心紀錄與 BHTV 定向裂隙資料，分析地下火成岩段之裂隙位態與深度分布特徵。主要研究目的包含以下三項：

1. 安山岩體裂隙之幾何統計與分布特徵分析： 以岩石品質指標（RQD）作為深度分段與岩體完整性評估的基礎(Deere, 1964；Deere and Deere, 1988)；針對具備 BHTV 定向資料之 60–300 公尺深部安山岩段，導入賓漢分析（Bingham Analysis）(Bingham, 1974)計算裂隙走向與傾角的定向張量（Orientation tensor）及其特徵向量(Scheidegger, 1965；Woodcock, 1977)，描

述裂隙極點之優勢方向與空間分布型態，並降低離散資料對幾何判釋之影響(Fisher et al., 1987)。

2. 深淺部裂隙幾何特徵之比較： 比較 KYK-1 與 KYK-2 淺部未定向岩心之裂隙視傾角分布，以及 KYK-1 井 60–300 公尺 BHTV 定向裂隙之位態特徵，探討不同深度與岩性區段之破裂幾何差異及其可能之構造意義。

3. 古應力方向與地表岩脈及區域構造之幾何比較： 將 KYK-1 井中淺部火成岩段優勢裂隙所約束之古主應力方向，與地表觀音坑中心安山岩脈之延伸方向及成子寮斷層等區域構造進行比較，探討地下裂隙、岩脈侵入與區域構造應力背景之可能幾何關聯。本研究所得結果屬古應力方向之幾何約束，並非完整古應力張量反演；其所反映之 WNW–ESE 近水平擠壓特徵，可能保存北臺灣更新世造山階段之構造應力紀錄。

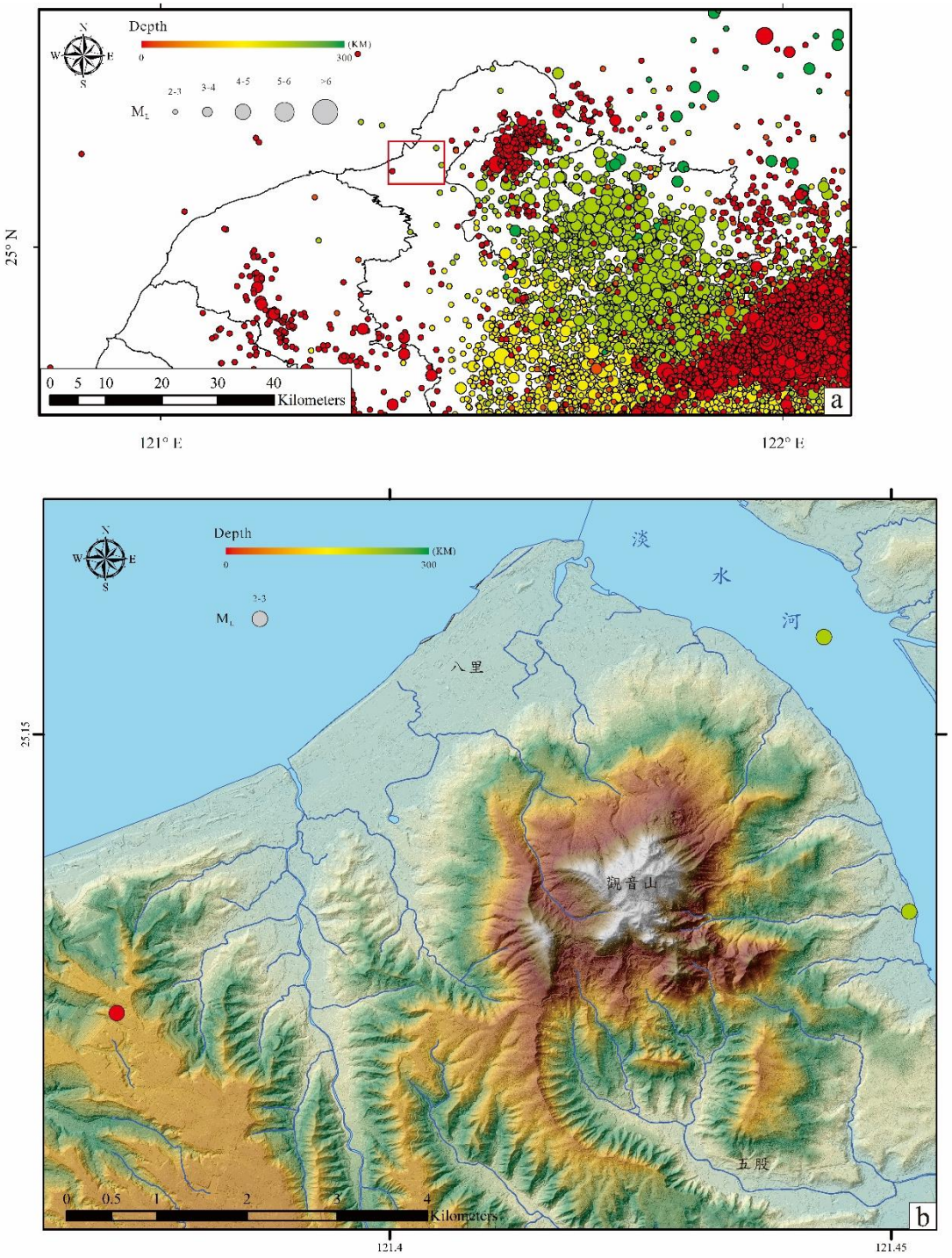


圖 1.1 (a)北台灣規模二以上地震紀錄；(b)研究區域規模二以上地震紀錄 (2011 年 1 月至 2025 年 5 月)

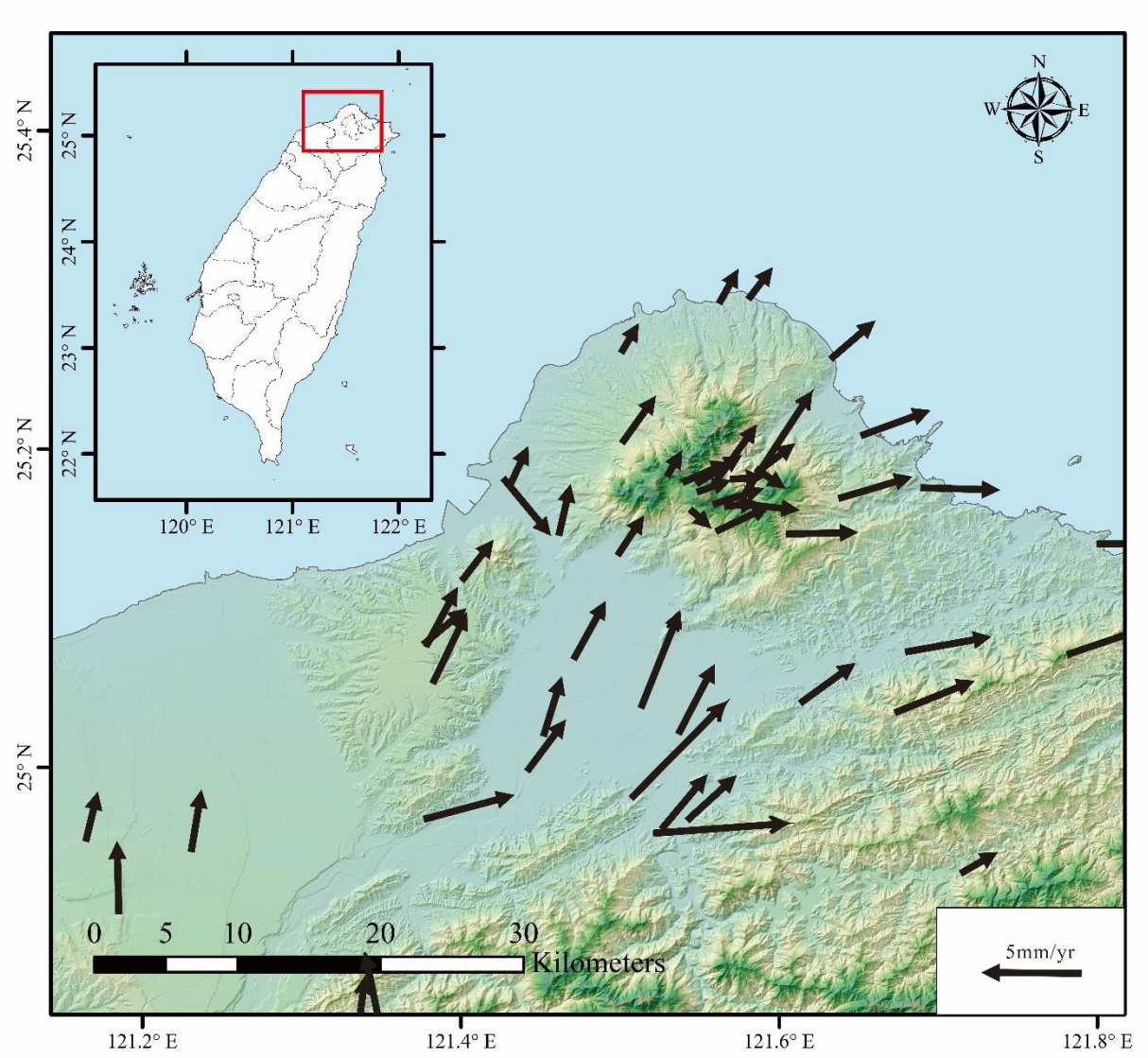


圖 1.2 GNSS 年平均水平位移場(2000 年至今)。箭頭方位代表各觀測站點相對於澎湖基準站（P001）之觀測形變方向，箭頭長度與年平均位移速率成正比。(中央研究院地球科學研究所，《台灣大地測量模型：震間地殼形變》，2026 年 5 月，取自 https://tgm.earth.sinica.edu.tw/interseis)。

第二章 研究區域概述

2-1 地質背景

觀音坑地區位於臺灣西北部，地理位置介於林口台地與觀音火山之間（如圖 2.1 所示）。在區域構造演化上，本區於上新世至更新世早期經歷蓬萊造山運動，在西北西—東南東向的水平擠壓應力環境下，發育包含新莊斷層在內之逆衝斷層與褶皺體系（郭若琳等，2021）。隨後構造運動進入後造山伸張階段（Post-orogenic extension），大地應力場轉為伸張狀態，進而引發包含大屯火山群與觀音火山在內之岩漿活動。

本區火山活動主要發生於更新世，約始於 1 Ma，並於約 0.34 Ma 前後趨於停止。依據前人研究（Huang and Lo, 1986；鄧屬予等，2011）與現行地質圖幅之層位關係，觀音坑安山岩脈與火山岩類應屬後期岩漿活動產物，其形成時間晚於大南灣層。早期岩漿沿觀音坑山一帶通道上湧，侵入既有沉積岩基盤並形成安山岩質岩脈；此侵入作用與後續地表噴發所形成之火山碎屑堆積及熔岩流，在成因與力學意義上應分開討論。其後，火山活動可能伴隨爆發性噴發，於現今觀音坑山周緣堆積火山碎屑物，並進一步噴出安山岩質熔岩流，共同構成觀音山複式火山體（Composite volcano）（如圖 2.2 所示）。火山活動停止後，火山體受到長期侵蝕與河流下切作用改造，原始火山錐形貌已大幅遭受剝蝕，現今主要出露沉積岩基盤、岩漿通道或中心岩脈殘跡，以及分布於周緣之火山角礫岩與安山岩質熔岩流（鄧屬予等，2011）。

2-2 地形

觀音坑在地形上呈現一個近乎圓形、類似劇場式的窪地（或稱環形劇場式陡坡）。此窪地的北、西、南三面被觀音火山的峰巒與熔岩流所環繞，包含占山、內巖山、福隆山、牛港稜以及茫阡坑山等。窪地僅東南側地勢較低且呈現開口，觀音坑溪及其眾多支流在窪地內呈樹枝狀匯集後，向東南流出並注入臺北盆地。

窪地內部地勢相對平緩，中心由觀音坑山突出，周邊主要為標高 200 至 250 公尺之平坦階地，其上緣多覆蓋紅土層。此環形窪地外貌曾被早期研究（牧山鶴彥等，1935；如表 2.1 備註）歸類為地底岩漿房塌陷所形成之破火山口（Caldera）。然而，近代地形與地質綜合研究指出，該地貌為火山錐遭受向源侵蝕與下切作用所形成之侵蝕破火山口（Erosion caldera），非地體構造塌陷產物（鄧屬予等，2011）。

2-3 地層

觀音坑地區地層主要由沉積岩與火山岩層組成（圖 2.2），新舊地層分類之對比關係如表 2.1 所示：

1. 沉積岩層：作為本區基盤，分佈於窪地中心及外圍。本區出露之沉積岩過去統稱為「觀音山層」，現代地層層位大抵可重新劃分為三段：下段以泥岩層為主（相當於錦水頁岩）；中段為砂泥岩互層（可對比大南灣層）；上段則為礫岩層（連接林口層）。上述沉積地層以觀音坑山為中心，呈現同心圓狀分布並向外側傾斜，傾角約 30°至 80°之間，構成穹丘構造（Dome）。此同心圓狀分布與向外傾斜的特徵，顯示沉積岩層已非原始沉積位態，而較可能與後期岩漿侵入或底闢作用(Diapirism)造成之上覆地層頂升與變形有關（鄧屬予等，2011）。

2. 火山岩層：零散分布並覆蓋或穿插於沉積岩層中，依產狀與岩性主要分為三類：

(a) 周緣火山角礫岩：分佈於觀音坑周緣高地，由安山岩碎塊與沉積岩礫交雜組成，局部與沉積岩層或熔岩流呈互層（鄧屬予等，2008；鄧屬予等，2011）。

(b) 中心雜岩：分布於窪地中心的觀音坑山，由交雜的砂岩、泥岩、礫岩，以及含角閃石的安山岩岩牆（Dike）與岩脈組成。該岩牆寬約 15 公尺，呈西北西—東南東走向延伸約 230 公尺。

(c) 熔岩流：主要由塊狀和角礫狀安山岩的熔岩所組成，分佈於本區北緣，形成多處陡峭地形。

2-4 斷層

在區域性斷層構造方面，觀音坑地區主要受周邊兩大斷層系統約束：其東南側邊緣為東北—西南走向之成子寮斷層（低角度逆衝斷層，將中新世地層逆衝於更新世地層之上）；東側臨近臺北盆地邊緣處則有山腳斷層（走向正斷層）通過（如圖 2.1 與圖 2.2 所示）。

在觀音坑窪地內部，沉積岩層雖受岩漿侵入頂升而傾斜，但地層大抵仍保有連續性。儘管周緣地區之地層傾角變化顯著，但現地調查僅觀測到零星分佈之小型正斷層，其錯距較小，未改變穹丘構造之整體幾何形貌。此外，觀音坑周緣並未發現伴隨破火山口發育之環狀正斷層系統（Ring-fault system）。此項構造特徵之缺失，結合內部地層向外傾斜之穹丘現象，進一步指出觀音坑並非由地層塌陷形成之破火山口，而是火山主體遭受侵蝕後之殘跡構造。

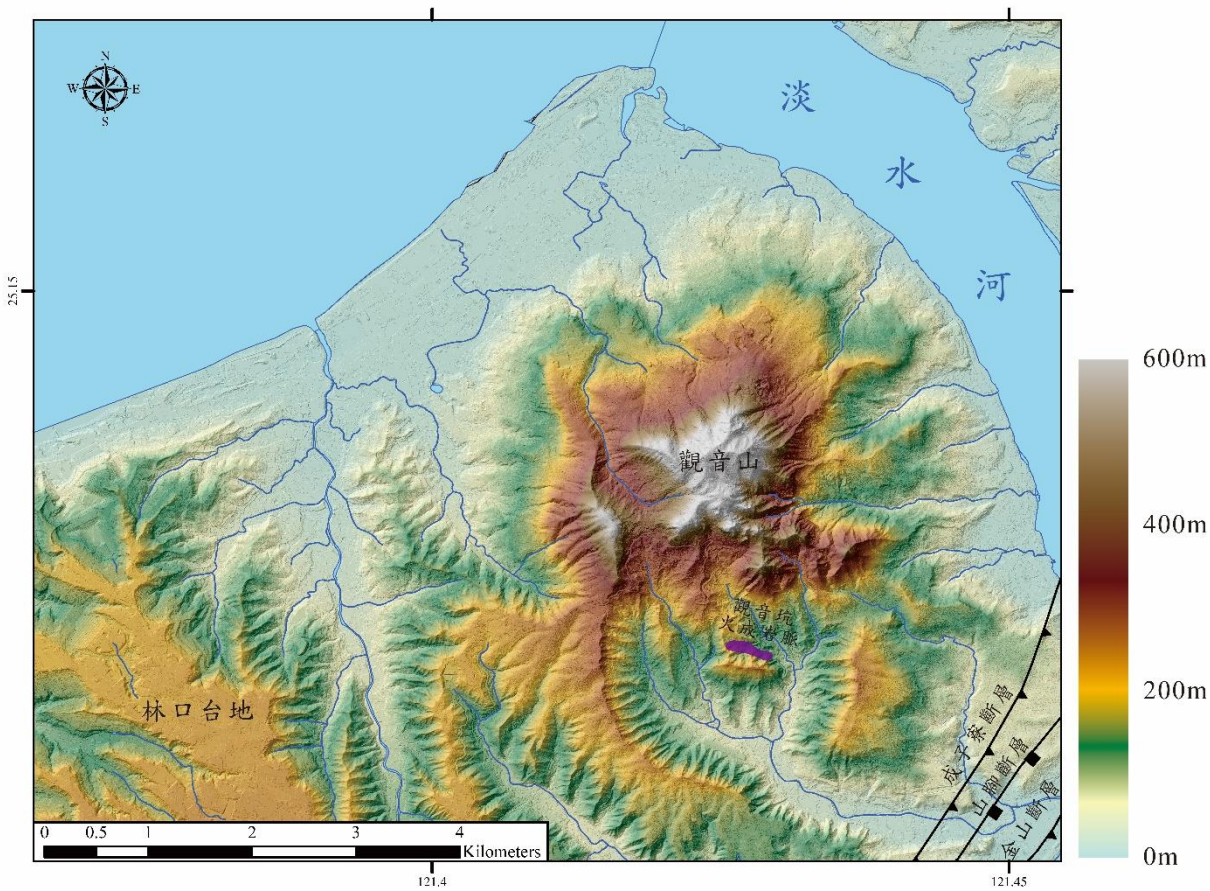


圖 2.1 觀音山地區陰影疊加地形與區域構造跡線分佈圖。本圖主要展示研究區域之數位高程模型（DEM）陰影疊加地形特徵；圖中紫色區域標記為地表出露之觀音坑安山岩脈位置，東南側與東側之黑線及具齒線分別代表成子寮斷層、山腳斷層與金山斷層之構造跡。岩脈與構造線分佈參考並改繪自經濟部地質調查及礦業管理中心五萬分之一地質圖幅《林口圖幅》(2021)。

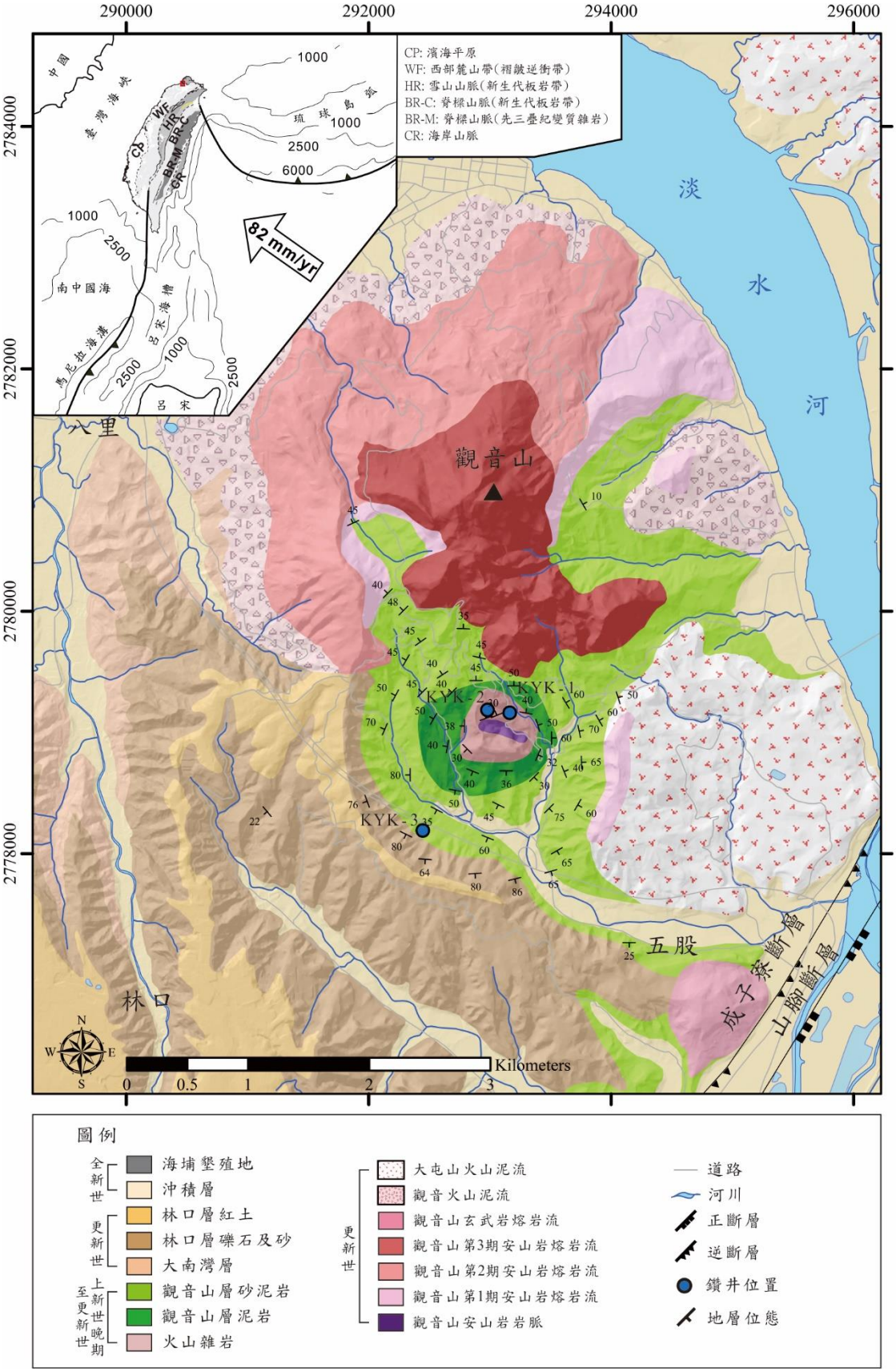


圖 2.2 研究區域地質圖（改繪自鄧屬予等，《觀音坑地質與火山作用》，2011 以及經濟部地質調查及礦業管理中心《林口圖幅》，2021）。圖中藍色圓點標記分別為 KYK-1~3 之平面位置。

表 2.1 觀音山地區早期地層分類（牧山鶴彥等，1935）與現行地質圖幅分類（郭若琳等，2021）之岩石地層單元對照表。本表對比不同地質調查歷史時期之岩石地層單元命名、地質年代歸屬以及沉積基盤與火山岩類之層位對應關係；右側備註欄載明因定年技術與現代地層對比方法更新後之層位修正依據。

<table>
<tr><th>地質年代
(Geological Age)</th><th>舊圖幅分類
(牧山鶴彥等，1935)</th><th>現圖幅分類
(郭若琳等，2021)</th><th>備註與對應關係</th></tr>
<tr><td>全新世
(Holocene)</td><td>現世層</td><td>沖積層
(a)</td><td>兩者定義大致相同，指現代沖積物。</td></tr>
<tr><td rowspan="4">更新世
(Pleistocene)</td><td rowspan="2">更新層
(臺地礫層)</td><td>桃園層
(Ty)</td><td rowspan="4">1. 舊圖幅將大南灣層列為第三系，現行歸類為更新世中期。
2. 觀音山火山活動主要發生於更新世（1－0.34 Ma)。</td></tr>
<tr><td>林口層
(Lk)</td></tr>
<tr><td>火山岩類</td><td>火山岩類
(kaf1-3)、(kla)</td></tr>
<tr><td>大南灣層
(歸類於第三系新竹統)</td><td>大南灣層
(Tn)</td></tr>
<tr><td>上新世—更新世早期
(Plio-Pleistocene)</td><td>觀音山層
(歸類於第三系新竹統)</td><td>觀音山層
(Ky)</td><td>舊圖幅認為觀音山層與上部夾炭層層位無顯著差距，現代定年技術已將其釐清為較年輕的層位。</td></tr>
<tr><td>上新世
(Pliocene)</td><td>上部夾炭層
(新竹統)</td><td>桂竹林層
(Kc)</td><td>牧山鶴彥的「上部夾炭層」在現代地層對比中，部分對應於南莊層至桂竹林層的範圍。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">中新世
(Miocene)</td><td rowspan="2"></td><td>南莊層
(Nc)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>南港層
(Nk)</td></tr>
</table>

中新世 (Miocene)	**中部夾炭層** (臺北統)	**石底層** (St)	舊名「中部夾炭層」對應現代的「石底層」。
	大寮層 (臺北統)	**大寮層** (Tl)	
	公館凝灰岩層		
	下部夾炭層 (臺北統)	**木山層** (Ms)	舊名「下部夾炭層」對應現代的「木山層」。
	青潭層		舊名「青潭層」對應現代的「五指山層」或其下部

2-5 構造演化順序

綜合前述地質背景、地層分布與斷層構造特徵，觀音坑地區之構造演化可概略分為數個階段。首先，本區形成以泥岩、砂泥岩互層及礫岩為主之沉積岩基盤。其後，於上新世至更新世早期蓬萊造山運動期間，區域受到西北西—東南東向水平擠壓應力作用，形成褶皺與逆衝斷層等構造。隨後北臺灣進入後造山伸張階段，大地應力場轉為伸張環境，並伴隨山腳斷層活動及大屯—觀音山火山活動。約 1 Ma 起，岩漿沿觀音坑山一帶通道上湧，侵入沉積岩基盤形成安山岩脈，並可能造成上覆沉積岩層頂升，使地層呈現向外傾斜之穹丘構造。其後火山活動轉為火山碎屑堆積與安山岩質熔岩流噴發，逐漸形成觀音山複式火山體。火山活動停止後，火山體受到長期侵蝕與下切作用，形成現今觀音坑之侵蝕破火山口地形。後期則可能伴隨局部小型正斷層、剪切面與裂隙再活動，但其規模較小，未改變觀音坑穹丘構造之整體幾何形貌。

第三章 前人文獻回顧

3-1 觀音山地區地質演化與火成岩特徵

觀音山地區位於林口台地北緣，其地形與地質構造深受第四紀火山活動之影響。根據前人研究，觀音山火山屬於單一中心噴發的複式火山（Composite volcano），岩漿組成主要以安山岩為主。鄧屬予等人（2011）指出，觀音坑地區呈現獨特的雙峰構造（bimodal structure），其周圍被火山碎屑岩及熔岩流包圍，中央坑內則多為沉積岩，推測觀音坑可能為火山噴發中心或岩漿上湧之通道。在岩脈侵入方面，Chen and Lo（1985）針對觀音坑地區出露之安山岩脈（Dike）進行岩石學與地球化學分析，發現該岩脈具有斑狀結構（Porphyritic），含有豐富的同源包裹物（Cognate inclusions），為深部岩漿庫分化與混合作用之產物 。上述前人對觀音坑地表岩脈之岩象與岩石學特徵描述，可作為本研究比對地表岩脈與 KYK-1 井下安山岩心岩象相似性之基礎；本研究主要依據手標本、岩心觀察進行定性比對，尚未進行完整礦物定量計數、全岩地球化學或定年分析，因此不直接判定兩者完全同源。

3-2 地下裂隙判識技術：影像測井之應用與限制

為彌補實體岩心在鑽進與提取過程中常面臨之局部旋轉、非連續性及無法全孔定向之局限，超音波孔內影像測井（Acoustic Borehole Televiewer, BHTV）已被廣泛應用於地下中視尺度不連續面之空間位態擷取。BHTV 的探測機制主要利用孔內儀器之旋轉換能器（Transducer）向孔壁發射高頻超音波脈衝，並接收由孔壁反射之聲波波幅（Amplitude）與行程時間（Travel time）訊號。當圓柱狀井壁之觀測數據經由方位角（以正北為基準）平展開為二維平面影像時，任何交截井孔之平面構造（如裂隙、層面或斷層面等平面狀不連續面），其三維跡線在平面影像上皆呈現特定幾何振幅與波谷方位之正弦曲線（Sine curves）（Milloy et al., 2015）。

然而，BHTV 物理探測機制上存在特定之選擇性與局限性。聲波在孔壁的反射強度主要取決於鑽井流體與孔壁岩石之間的聲學阻抗（Acoustic impedance）對比。當地下安山岩盤中發育現地開放裂隙（Open fractures）時，由於裂隙內部充滿鑽井流體，其聲學阻抗顯著低於周緣完整之安山岩基質，導致超音波能量發生散射與吸收，在平展開影像上呈現低波幅（暗色帶）與長行程時間之正弦軌跡特徵。

相對地，若裂隙已受方解石、石英、黏土質充填物或黃泥物質等次生物質充填，其於 BHTV 影像中的可辨識程度將取決於充填物與圍岩之聲學阻抗差異、裂隙開口程度及影像品質。當充填物與周緣完整安山岩基質之聲學性質差異不明顯時，裂隙可能不呈現清楚之低波幅正弦曲線；但若充填物或蝕變邊界與圍岩具明顯聲學對比，仍可能產生可辨識之振幅異常。因此，BHTV 與實體岩心紀錄之間的差異，反映兩者對裂隙狀態之敏感性不同。本研究透過兩者交叉比對，以提高裂隙判釋之可靠度。

3-3 裂隙幾何與古應力方向判釋理論

根據構造地質學與斷裂力學（Fracture mechanics）之定義（Davis et al., 2012），脆性岩體內部之不連續面（Discontinuities）依據其裂隙尖端（Crack tip）兩側岩體之相對位移向量與破裂面之幾何關係，可劃分為三種基本破裂模式（Modes of fracture）：

1. Mode I 張裂型/純張破裂（Opening Mode / Tensile Fracture）：其相對位移向量垂直於破裂面，平行於面延伸方向無剪切位移。節理（Joints）在力學成因上通常可視為不具明顯剪切位移之 Mode I 張力破裂，但實際岩心或露頭中是否可稱為節理，仍需依其是否成組發育、是否缺乏剪切位移及是否具一致幾何分布加以判斷。其發育可受控於構造大地應力，亦可由非構造因素所引致。Mode I 破裂面或岩脈侵入面之法向量，理論上平行於最小主應力軸（σ_3），即破裂面平行 $\sigma_1\sigma_2$ 平面。

2. Mode II 面內剪切型/滑移型（Sliding Mode / In-plane Shear）：其相對位移方向平行於破裂面，且垂直於裂隙前緣，代表破裂面兩側岩體發生面內剪切位移。在實體岩心或露頭中，若不連續面伴隨擦痕（slickensides）、滑移線理、局部角礫化或錯移現象，則可作為判釋剪切性構造裂隙或剪切面之依據。

3. Mode III 面外剪切型/撕裂型（Tearing Mode / Out-of-plane Shear）：其相對位移方向同樣平行於破裂面，但平行於裂隙前緣，常與撕裂或扭轉式剪切變形有關。在天然岩體中，Mode II 與 Mode III 可能以混合模式出現，因此本研究於岩心尺度上不強行區分兩者，而是將具擦痕、滑移線理或角礫化等剪切指標者，統稱為具剪切性質之構造裂隙。

本研究以定向裂隙資料、立體投影分布與岩心剪切指標，對古應力方向進行幾何約束與定性重建。根據安德森斷層理論（Andersonian faulting theory），在均質且近似各向同性岩體中，一組共軛剪切裂隙面（Conjugate shear pairs）之銳角平分線方向可作為最大構造主應力軸（σ_1）之投影方位之幾何參考，而兩剪切面之幾何交線則平行於中間主應力軸（σ_2）（Anderson, 1942）。然而，深部安山岩體之裂隙可能受到多期構造作用、熱液作用及局部岩體條件影響，使裂隙位態呈現較高離散程度。為求得具備力學相容性（Mechanical compatibility）之優勢幾何邊界，本研究導入賓漢分析（Bingham Analysis）之三維幾何極點統計。透過建構觀測裂隙面法向量之定向張量（Orientation tensor）矩陣進行特徵分解（Eigenvalue decomposition），可計算出三個互相垂直之固有特徵向量（$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$）與其標準化特徵值（$\tau_1, \tau_2, \tau_3$），據以定量判別裂隙集在空間中屬於群集型（Cluster）、帶狀型（Girdle）或隨機型（Random）之織構（Woodcock, 1977）。

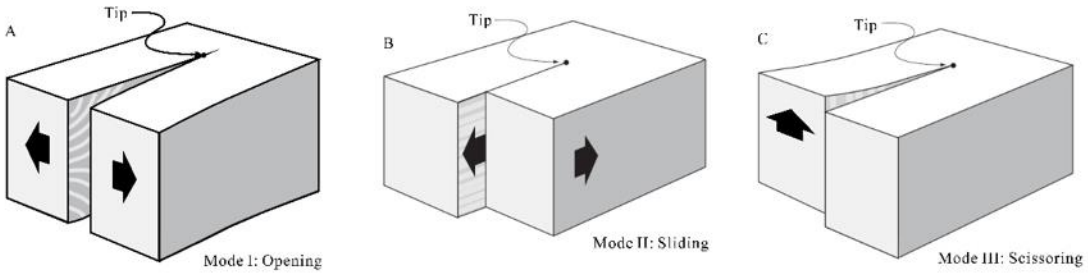


圖 3.1 脆性破裂模式（Mode I、II、III）圖（改繪自 Atkinson, 1987）。

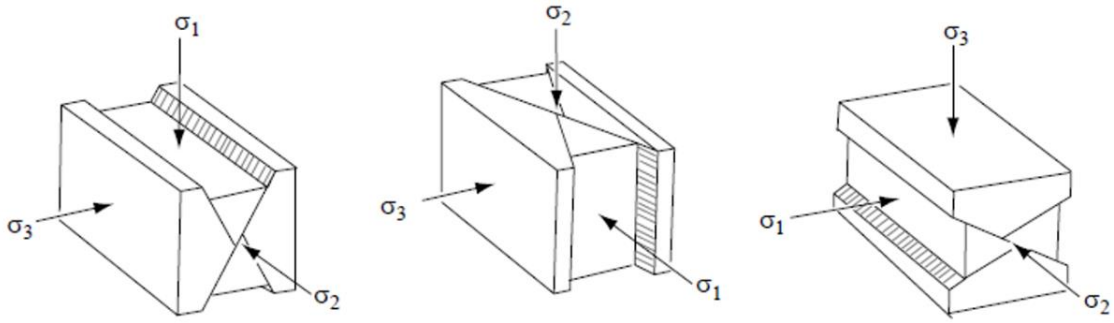


圖 3.2 安德森斷層模型（Andersonian Stress Model）與主應力軸幾何對應關係。在共軛剪切系統中，最大主應力（σ_1）平分兩破裂面之銳角交角。圖左為正斷層，圖中為橫移斷層，圖右為逆斷層。

第四章 研究方法

4-1 樣本採集

4-1-1 野外岩脈樣本採集

野外構造地質調查為建立區域幾何構造架構之客觀依據。本研究實地前往出露於地表之觀音坑安山岩脈進行地質幾何觀測與岩石岩性樣本採集。調查程序主要著重於辨識岩脈本體之產狀與岩象幾何特徵（如礦物斑晶之空間分佈），並利用地質羅盤（Compass）實地量測安山岩脈延伸邊界及其可辨識之裂隙或不連續面之走向（Strike）與傾角（Dip）。此步驟用以確立地表岩脈長軸之幾何延伸走向，作為後續地下岩心不連續面幾何對比之基準數據。

4-1-2 鑽井岩心樣本採集

地下火成岩與沉積基盤單元之資料來源，取自觀音坑一號井至三號井（KYK-1~3）之連續鑽探岩心。本研究岩心自鑽進工具取出後，進行清洗、拼接、排列、拍照與深度標記，並依深度位置建立岩心紀錄。岩心觀察內容包括岩性、顏色、組織、礦物斑晶、破裂面形貌、充填物、擦痕與局部破碎特徵等，並據此劃分沉積岩與安山岩等主要岩性界面。

由於 KYK-1 井 0–60 公尺、KYK-2 與 KYK-3 岩心不具完整定向資訊，因此此類岩心資料主要用於岩性描述、視傾角觀察、破裂面形貌判識與地表岩脈岩象對比。相對地，KYK-1 井 60–300 公尺區段具 BHTV 定向裂隙資料，可進一步用於裂隙位態統計與古應力方向之幾何約束。本研究將岩心觀察與 BHTV 影像判釋結果進行交叉比對，以提高地下裂隙判識之可靠度。本鑽井計畫之各井平面直角坐標與井口高程如表 4.1 所示。

表 4.1 鑽井位置坐標與井口高程統計表，鑽井位置見圖 2.2。

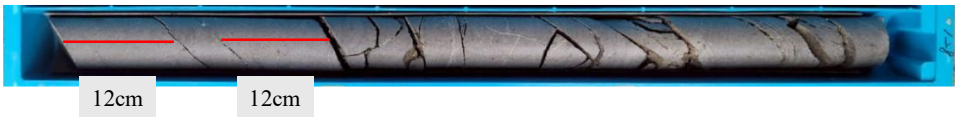
項目	KYK-1	KYK-2	KYK-3
鑽井位置 (TWD 97)	E: 293164.19	E: 292981.06	E: 292447.25
	N: 2779161.98	N: 2779185.26	N: 2778190.42
井口高程	140 m	189 m	99.6 m

4-2 鑽井岩心紀錄與岩體品質指標(RQD)

地下探勘取得之實體岩心，為評估深部岩體幾何特性、不連續面密集度與力學行為之空間事實觀測依據。本研究針對核心 KYK-1 井進行全孔連續之岩體品質指標（Rock Quality Designation, RQD）量測與定量紀錄（Deere and Deere, 1989）。

RQD 為工程地質與岩石力學範疇中，用以定量評估岩體破碎發育程度之標準指標。其計算公式如式（4.1）所示，其量測原理為：在單一鑽探進回次（Core run）中，加總計算長度大於或等於 10 公分之完整實體岩心段長度，並除以該回次之總鑽進長度，以百分比(%)呈現岩體完整度(如圖 4.1)。本研究藉由逐段記錄 RQD 數值，產製 RQD 隨深度的空間變化趨勢圖。當 RQD 出現數值低谷時，通常可指示該深度區段可能具有較高裂隙密度、角礫化破碎帶、岩心流失或取心品質變化等情形，可作為地下岩體品質分段與後續裂隙分析之參考依據。

$$\mathrm{RQD} = \left(\frac{\sum L_{\geq 10\,\mathrm{cm}}}{L_{\mathrm{total}}} \right) \times 100\% \quad \text{--- 式 (4.1)}$$



$$\mathrm{RQD} = \frac{12+12}{100} \times 100\% = 24\%$$



$$\mathrm{RQD} = \frac{100}{100} \times 100\% = 100\%$$

圖 4.1 RQD 計算方式與 KYK-1 井岩體分段示意圖。RQD 係以單一鑽進回次中長度大於或等於 10 公分之完整岩心段總長除以該回次總長計算。本文以 KYK-1 井 RQD 隨深度變化作為岩體品質與裂隙發育程度之分段參考，並搭配岩心觀察與 BHTV 裂隙位態資料進行綜合判釋。

4-3 超音波孔內影像測井(BHTV)之原理與裂隙位態擷取

一般鑽探取得之實體岩心多屬未定向岩心（Unoriented core），且在鑽進與提取至地表的過程中，易受機械剪切力影響而發生局部旋轉、人為破碎或核心碎裂等現象，導致單靠實體岩心難以直接幾何量測地下裂隙之真實空間走向 。為克服未定向岩心之局限，本研究導入高解析度超音波孔壁影像測井（Acoustic Borehole Televiewer, BHTV）技術。

本研究受限於中淺部孔壁工程條件與套管施作之遮蔽，BHTV 的有效觀測掃描區段限制為深度 60 至 300 公尺之裸孔區段。BHTV 之探測原理係利用孔內旋轉換能器（Transducer）在充滿鑽井流體之裸孔內進行 360 度聲學掃描，發射高頻超音波脈衝並記錄孔壁反射之波幅（Amplitude）與行程時間（Travel time）訊號。

當具備面狀幾何特徵之平面狀不連續面，如裂隙、層面或斷層面交截圓柱狀井壁時，在平展開為二維平面（正北至正北，0 至 360 度）之孔壁影像上，該平面的交截跡線會呈現連續之正弦波（Sinusoidal curve）軌跡（如圖 4.2）。其正弦波幾何表達式如式（4.2）所示：

$$y = R \cdot \tan\theta \cdot \sin(x - \phi) + C \quad \text{--- 式 (4.2)}$$

式中，x 為 BHTV 孔壁展開影像之水平座標，代表井壁圓周上相對於正北方向之方位角，範圍為 0°至 360°；y 為展開影像之垂直座標，對應裂隙交截線在井深方向上的位置。 R 為鑽孔半徑， θ 為裂隙面之視傾角，ϕ 為正弦曲線之相位參數，不連續面之視傾向方位則依擬合曲線最低點所對應之方位角判定， C 為正弦曲線之垂直深度中心位置。在影像交互式判釋流程中，透過量測該正弦曲線的幾何振幅與鑽孔半徑及裂隙傾角的正切值有關，可據此求得裂隙傾角，以及波谷所在的相位角度（代表視傾斜方向），即可求得不連續面之視走向與視傾角。

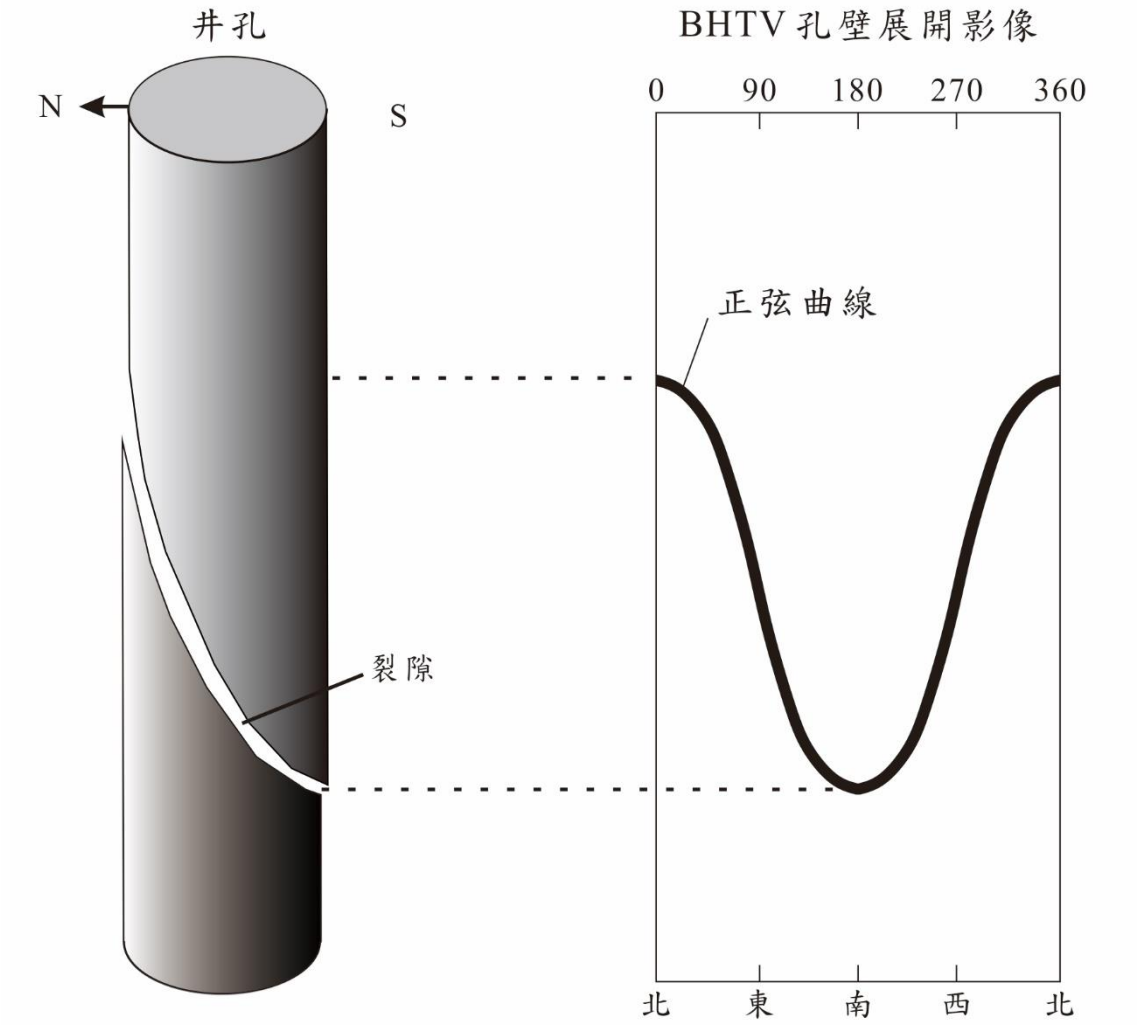


圖 4.2 BHTV 孔壁展開影像中平面狀不連續面呈正弦曲線之示意圖。當裂隙等平面狀不連續面交截圓柱狀井壁時，其交截跡線在 0°至 360°之孔壁展開影像上會呈現正弦曲線。圖中左側為裂隙與井孔之交截關係，右側為其於 BHTV 孔壁展開影像上之正弦曲線形態。修改自 Milloy et al.（2015）。

由於鑽進條件、地層性質或孔壁狀態影響而產生井眼偏斜，本研究最終結合三軸加速度計與磁力儀所測得之井偏數據（包含井斜角與井眼方位角），利用空間三維坐標旋轉矩陣如式（4.3）進行校正，以求得校正後之裂隙走向與傾角數據。

$$\mathbf{v}_{\text{true}} = \mathbf{R}_{\text{well}}(\gamma, \alpha) \cdot \mathbf{v}_{\text{apparent}} \quad \text{--- 式 (4.3)}$$

式中，$v_{apparent}$ 為在井孔座標系下判釋所得之裂隙面法向量，v_{true} 為經井孔偏斜校正後轉換至地理座標系之裂隙面法向量。$R_{well}(\gamma, \alpha)$ 為井孔偏斜校正旋轉矩陣，其中 γ 為井斜角，表示井孔軸線相對於垂直方向之偏斜角度；α 為井眼方位角，表示井孔偏斜方向在水平面上相對於正北方向之方位角。

4-4 基於定向張量與安德森斷層理論之破裂古應力幾何約束

為評估 BHTV 測得之定向裂隙資料與古應力方向之幾何關係，本研究以 KYK-1 井裂隙位態資料為基礎，結合裂隙位態統計、定向張量分析與脆性破裂理論之幾何關係，對地下安山岩體之優勢裂隙方向與可能古應力方位進行約束。由於本研究資料主要源自 BHTV 影像判釋所得之裂隙走向與傾角，缺乏完整滑移線理、擦痕方向與剪切位移方向等應力張量反演所需之運動學資料，因此本研究不採用基於滑移偏差最小化之應力張量反演方法，而是透過裂隙面法向量之空間分布特徵、定向張量所反映之幾何對稱軸，以及安德森斷層理論中共軛剪切裂隙與主應力軸之幾何關係，進行古主應力方向之幾何約束與定性討論。

首先，為描述地下安山岩體裂隙位態之空間分布特徵，並降低離散資料對優勢方向判釋之影響，本研究針對 BHTV 有效觀測區段，即 KYK-1 井深度 60–300 公尺之裂隙三維面法向量進行統計。每一筆裂隙面可表示為一單位極點向量 $\vec{n}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$，並據此建構二階對稱之定向張量（Orientation Tensor）矩陣 **T**，其數學矩陣表達式如式（4.4）所示：

$$\mathbf{T} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \vec{n}_i \vec{n}_i^T = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ x_i y_i & y_i^2 & y_i z_i \\ x_i z_i & y_i z_i & z_i^2 \end{bmatrix} \quad \text{--- 式 (4.4)}$$

式中，N 為納入分析之裂隙數；$\mathbf{n}_i = (x_i, y_i, z_i)^{\mathrm{T}}$ 為第 i 個裂隙面之單位法向量，x_i、y_i、z_i 為其於所採座標系各軸方向之方向餘弦。方向餘弦、定向張量 **T** 及標準化特徵值皆為無因次量。透過對定向張量 **T** 進行特徵值分解（Eigenvalue decomposition），可求得三個相互垂直之固有特徵向量（$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$）及對應之標準化特徵值（$\tau_1 \geq \tau_2 \geq \tau_3 \geq 0$，且 $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 1$）。特徵值與特徵向量可用以描述裂隙極點分布之幾何織構，例如群

集型（Cluster）、近帶狀型（Girdle-like）或離散型分布。此分析之目的在於辨識裂隙資料中的優勢方向與空間分布型態，而非直接判定完整古應力張量。

在辨識裂隙極點之優勢群集與分布型態後，本研究進一步引入安德森斷層理論（Andersonian faulting theory）作為古應力方向判釋之幾何參考。根據脆性破裂理論，若岩體中可確認兩組具剪切性質且幾何上成對發育之共軛剪切裂隙，則其銳角平分線方向可作為最大主應力軸 σ_1 方向之幾何參考，而兩剪切面之空間交線則可作為中間主應力軸 σ_2 方向之約束。然而，若裂隙分布僅呈單一優勢群集、近帶狀分布，或缺乏明確剪切位移與滑移方向資料，則不宜直接進行完整應力張量反演（Angelier et al., 1982；Huang and Angelier, 1989）。

因此，本研究將 KYK-1 井 60–300 公尺區段之優勢裂隙組、地表觀音坑中心安山岩脈之延伸方向，以及區域構造線方向進行跨尺度幾何比對。若地表安山岩脈可視為張裂性侵入面，則其岩脈面法向量理論上可作為最小主應力軸 σ_3 方向之參考，而岩脈面本身則大致平行於 $\sigma_1 - \sigma_2$平面。本研究據此綜合討論地下裂隙系統、地表岩脈與區域應力場之可能幾何關聯，並將其作為觀音坑地區構造演化與岩漿侵入作用關係之定性約束。

第五章 研究結果

5-1 觀音坑安山岩與鑽井岩心之岩象特徵

5-1-1 觀音坑中心岩脈(Surface Dike)觀察

觀音坑中心安山岩脈出露於 KYK-1 鑽井位置西南方約 200 公尺處（圖 5.1）。野外露頭觀察顯示，該岩脈受地表風化作用影響，表面多呈土黃色至黃褐色；敲擊後之新鮮破裂面則呈淺灰色。岩石整體為細粒至隱晶質（Aphanitic）基質，並具備斑狀結構（Porphyritic texture）。岩體內分布有長條狀角閃石、黑雲母、輝石與斜長石斑晶，量測結果顯示其斑晶粒徑介於 0.5 至 2.0 毫米之間。此項發現與前人研究（Chen and Lo, 1985；鄧屬予等，2011）所述之觀音坑角閃石安山岩脈特徵大致相符。

根據現地露頭之構造幾何量測結果，該火成岩脈北側主要發育兩組構造面：第一組不連續面為（N 21°W, 66°NE）；第二組不連續面為（N 71°E, 82°NW）。上述地表露頭量測資料主要作為後續與地下 BHTV 定向裂隙資料進行幾何比較之參考，不直接作為完整古應力反演的依據。

5-1-2 觀音坑一號井(KYK-1)岩心觀察

根據 KYK-1 探勘井之連續鑽探柱狀紀錄，該井深度 0 至 56.95 公尺區段主要由沉積岩層（包括凝灰質泥砂岩與細砂岩）組成；自深度 56.95 公尺以下至鑽進總深 300 公尺區段則進入火成岩，岩性主要由安山岩與火山角礫岩交替組成。

本研究選取 KYK-1 井深度 120 公尺處之安山岩心進行岩象特徵觀察。該段岩心呈淺灰色，基質為細粒至隱晶質，並具斑狀結構。岩心中可觀察到黑色長條狀鐵鎂礦物斑晶及白色斜長石斑晶，粒徑約為 0.5–2.0 毫米；岩體整體緻密，未見明顯氣孔構造。與地表觀音坑中心岩脈相比，KYK-1 井 120 公尺處安山岩心在基質顏色、岩石組織、斑晶種類與粒徑範圍上具有相似特徵。此結果顯示兩者在岩象上具有高度相似性，可作為討論地表岩脈與

井下火成岩段關係之基礎；惟本研究目前主要依據手標本與岩心外觀進行定性比對，尚未結合完整薄片礦物點計數、全岩地球化學或定年資料，因此不直接判定兩者完全同源。

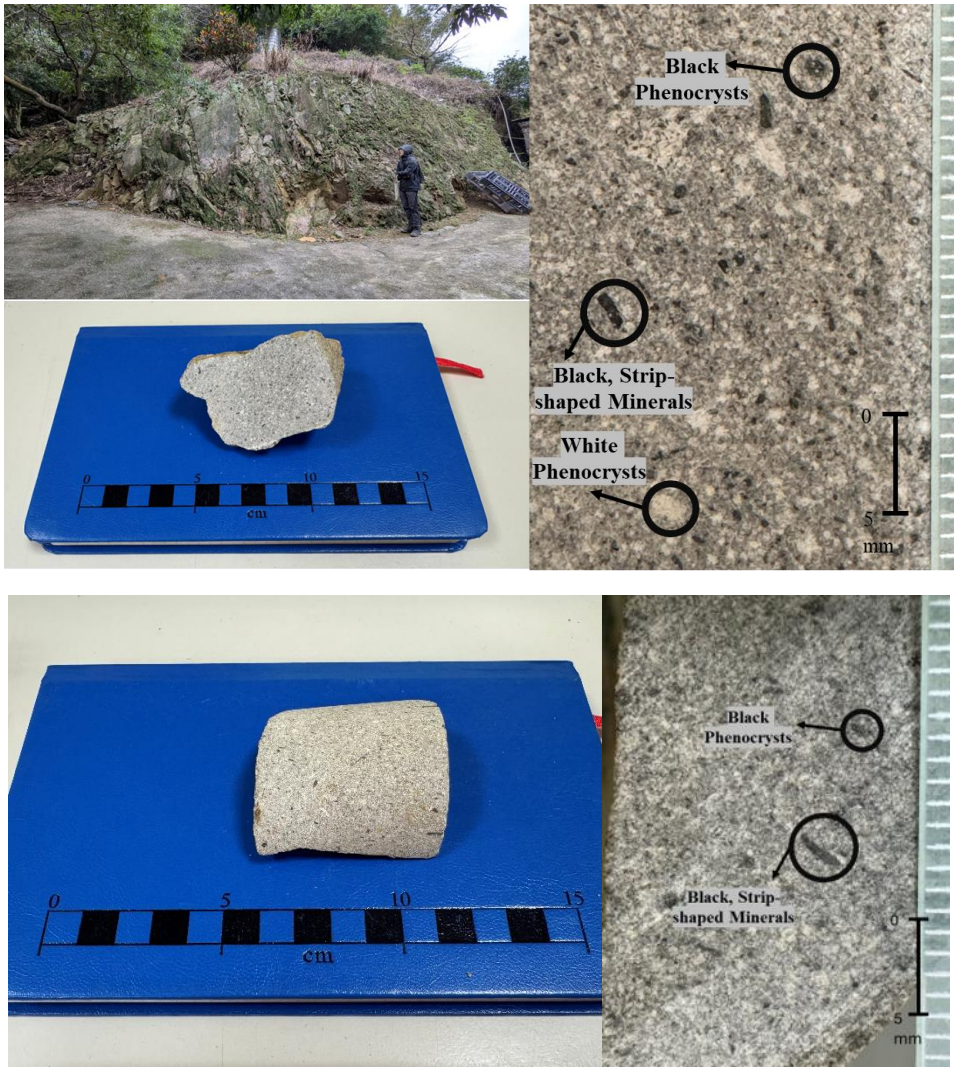


圖 5.1 觀音坑地表安山岩脈露頭與 KYK-1 地下 120 公尺處岩心之岩象對比圖(上：地表出露之角閃石安山岩脈產狀與局部裂隙發育產狀。下：井下 120 公尺處深部安山岩心之淺灰色隱晶質基質與斑狀晶粒。圖中箭頭指示兩樣本中結晶粒徑介於 0.5 至 2 毫米之黑色長條狀鐵鎂礦物與斜長石斑晶。)

表 5.1 觀音坑中心岩脈與 KYK-1 井 120 公尺安山岩心之岩象特徵比較。兩者皆具細粒至隱晶質基質與斑狀組織，且鐵鎂礦物與斜長石斑晶粒徑約為 0.5–2.0 mm，顯示兩者具有高度相似之岩象特徵；惟其同源性仍需地球化學與定年資料進一步驗證。

比較項目	觀音坑中心岩脈 (地表出露)	KYK-1 岩心 (地下 120m)
顏色	表面呈土黃色（風化程度高），新鮮裂面為淺灰色	淺灰色（未受地表風化影響）
整體岩石組織	隱晶質 (Aphanitic)	隱晶質 (Aphanitic)
基質特徵	灰白色細粒至隱晶質基質	灰白色細粒至隱晶質基質
斑晶分佈	呈斑狀組織 (Porphyritic)，含零星斑晶	呈斑狀組織 (Porphyritic)，含零星斑晶
斑晶特徵與形狀	零星白色及黑色礦物、黑色長條狀礦物	零星白色及黑色礦物、黑色長條狀礦物
斑晶粒徑大小	0.5 ~ 2 mm	0.5 ~ 2 mm
氣孔構造	無明顯氣孔（緻密）	無明顯氣孔（緻密）

5-1-3 觀音坑二號井岩心觀察

該井位之地層主要由凝灰岩、泥質砂岩與粉砂岩交替組成，並普遍夾帶再積性（Reworked）火山岩礫石與炭屑，指示該區於淺層地質歷史中，曾處於火山碎屑沉積或近火山區之盆地沉積環境。依據岩石巨觀特徵、膠結程度與局部構造發育狀況，可將二號井劃分為以下四個岩段：

1. 0～2.3 公尺（表土與高度風化帶）： 頂部 1.2 公尺為夾帶角礫之黏土表土層。1.2～2.3 公尺進入黃棕色凝灰岩與砂質泥岩段，內部夾帶少量的再積性火山岩礫石。此區段岩體膠結差、岩質甚弱，並伴隨明顯的銹染現象，岩層層面的視傾角約在 45～55°之間。



圖 5.2 觀音坑二號井 0～3 公尺岩心

2. 2.3～42.5 公尺： 此區段為觀音坑二號井中最厚之單一岩段。由灰色凝灰岩及塊狀砂質泥岩構成，內部散佈角礫至圓礫狀之再積性火山岩碎屑並偶夾炭屑（Carbonaceous debris）。岩體呈基質支持（Matrix-supported），膠結不佳、遇水易軟化，小刀可輕易刮除其表面。

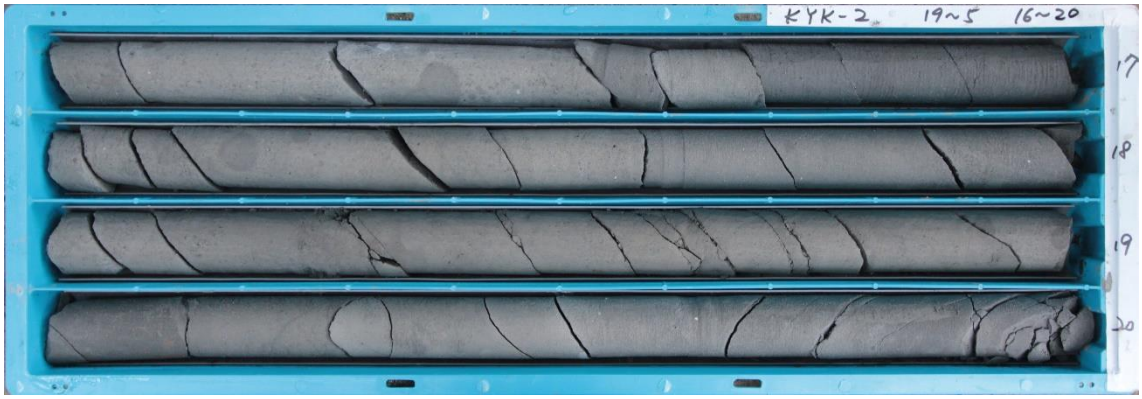


圖 5.3 觀音坑二號井 16～20 公尺岩心

3. 42.5～55.8 公尺（岩性過渡帶）： 該區段岩性變化頻繁，由上部的淡黃色塊狀泥岩與粉砂岩（中度風化，具輕微銹染），向下過渡為深灰色的凝灰角礫岩與泥質砂岩。深度 45.2～45.5 公尺之泥岩段中，可觀察到兩組高角度不連續面，其視傾角分別約為 72°與 65°。由於 KYK-2 岩心不具完整定向資訊，本文僅記錄其視傾角與截切關係，不直接判定為共軛節理。



圖 5.4 觀音坑二號井 42～44 公尺岩心

4. 55.8～75 公尺（粉細砂岩與熱液換質帶）： 55.8 公尺以下過渡為淡黃色至灰白色的塊狀粉砂岩與泥質細至中砂岩，局部夾帶炭屑，層面近乎水平。66.25～75 公尺區間，岩心膠結極差，且普遍伴隨黃色次生礦物，顯示該深度岩盤曾遭受明顯的熱液換質（Hydrothermal alteration）作用。



圖 5.5 觀音坑二號井 56～60 公尺岩心



圖 5.6 觀音坑二號井 72～75 公尺岩心

5-1-4 觀音坑三號井岩心觀察

三號井鑽遇之地層幾乎全數為沉積物（泥岩與細至中砂岩為主），且地層普遍富含炭質物（Carbonaceous materials）。

更重要的是，此井的實體岩心記錄了極度密集的構造擾動與剪切破壞特徵。依據岩性、膠結度與構造發育狀況，可將三號井全孔劃分為以下四個主要區段：

1. 0～8.45 公尺（表土與風化火成岩礫石層）：

淺部由黏土夾帶風化岩塊組成。0.4～8.45 公尺間為黃棕色至紅棕色的礫石層與黏土質砂。礫石主要由風化程度不均的安山岩次圓礫至角礫所組成，偶見粒徑大於 20 公分的巨大礫石，顯示該層為受火山活動或坡積作用影響之淺部堆積。



圖 5.7 觀音坑三號井 0～4 公尺岩心

2. 8.45～34.9 公尺（陡傾泥岩與強烈銹染帶）： 進入 8.45 公尺以下後，岩性轉為灰色至灰黑色的塊狀泥岩與細至中砂岩。此區段層面陡峭，視傾角普遍高達 60～73˚，且呈現頻繁的構造擾動與變形痕跡。在 24.2 公尺處測得 75°剪切面(圖 5.8)；29.65～34.9 公尺之砂岩段，觀察到高度鐵質銹染並形成鐵質結核硬殼(圖 5.9 下半部)，無結核處則膠結極差。

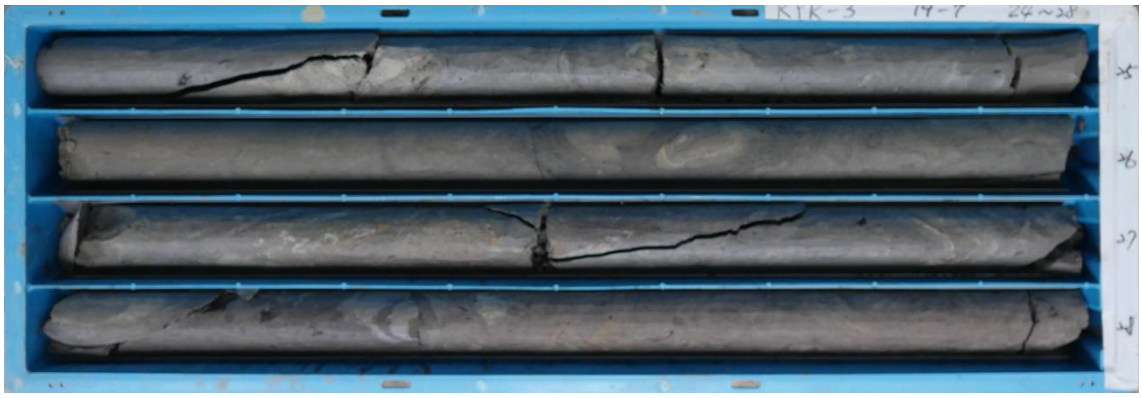


圖 5.8 觀音坑三號井 24～28 公尺岩心



圖 5.9 觀音坑三號井 32～35 公尺岩心

3. 34.9～61.5 公尺（富炭質砂岩與局部斷層帶）：此區段以黃棕色、深褐色至灰黑色的細砂岩為主，岩質相對新鮮但膠結差，且富含炭質物。地層層面在此區段依然維持 60～75˚的視傾角(圖 5.10)。

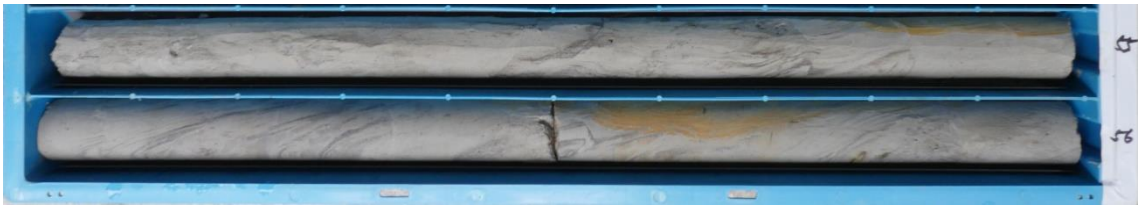


圖 5.10 觀音坑三號井 54～56 公尺岩心

4. 61.5～75 公尺（密集剪切與斷層泥發育帶）： 此井底區段為三號井構造破壞最為劇烈的位置。岩性為灰色泥質細砂岩夾泥岩，岩心呈現密集的構造擾動帶（Tectonic disturbance zone），並發育近乎垂直的剪切面與陡直層面。 最關鍵的構造證據包含：

剪切面（Shear planes）： 於 63.8 公尺處測得 45˚剪切面(圖 5.11)；64.3～64.4 公尺區間測得 65˚剪切面(圖 5.12)；67～67.3 公尺區間更發育了 75～80˚的高角度剪切面（國立中央大學碳封存及地熱研究中心，2026）。



圖 5.11 觀音坑三號井 60～64 公尺岩心

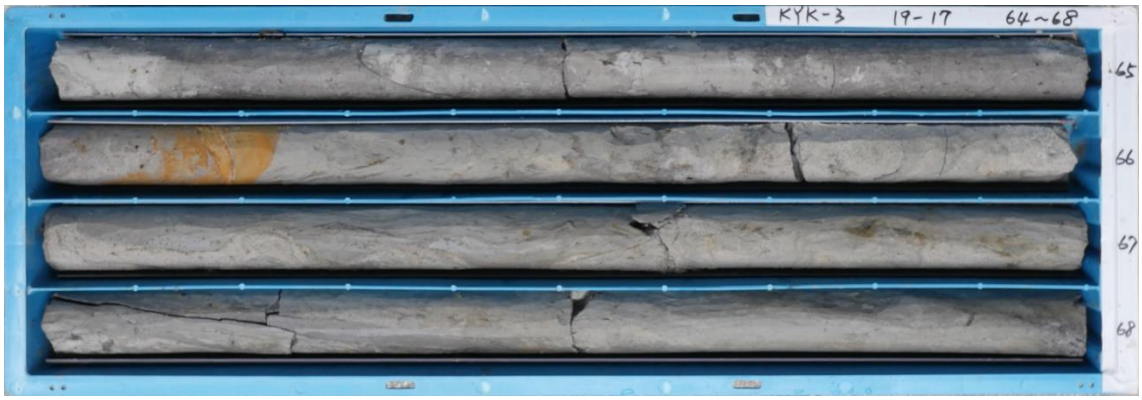


圖 5.12 觀音坑三號井 64～68 公尺岩心

5-2 岩體品質指標(RQD)深度分佈與岩心分段

分析 KYK-1 井全孔岩體品質指標（Rock Quality Designation, RQD）隨深度之變化，可觀察到岩體完整程度具有明顯分段特徵。根據岩心紀錄，KYK-1 井於深度 56.95 公尺以下進入火成岩段，該深度為沉積岩與火成岩之主要岩性界線；而深度 220.16 公尺附近則對應一段明顯破裂帶，並與 RQD 數值變化及裂隙分布型態之轉折相對應。

RQD 統計結果顯示，在 220.16 公尺以上之中淺部火成岩段，RQD 數值相對較低且變化較大，顯示該區段岩體完整度較差，裂隙與破碎現象較為發育。相對地，當深度跨越 220.16 公尺進入深部火成岩段後，RQD 數值整體上升，尤其約 240 公尺以下岩體完整度明顯提高，顯示深部岩段相對較完整且裂隙密度較低。

經對照鑽井岩心紀錄與 BHTV 裂隙位態資料，220.16 公尺附近可辨識一段厚約 2.16 公尺之主要破裂帶。此破裂帶位置與 RQD 數值變化趨勢相符，並可作為 KYK-1 井中淺部與深部火成岩段之岩體品質分段依據。需要注意的是，220.16 公尺並非岩性界線，而是岩體品質與裂隙分布型態之主要轉換界線；因此，本研究後續以此深度作為 BHTV 裂隙資料分段之依據，分別比較 60－220.16 公尺中淺部火成岩段與 220.16－300 公尺深部火成岩段之裂隙位態分布特徵。

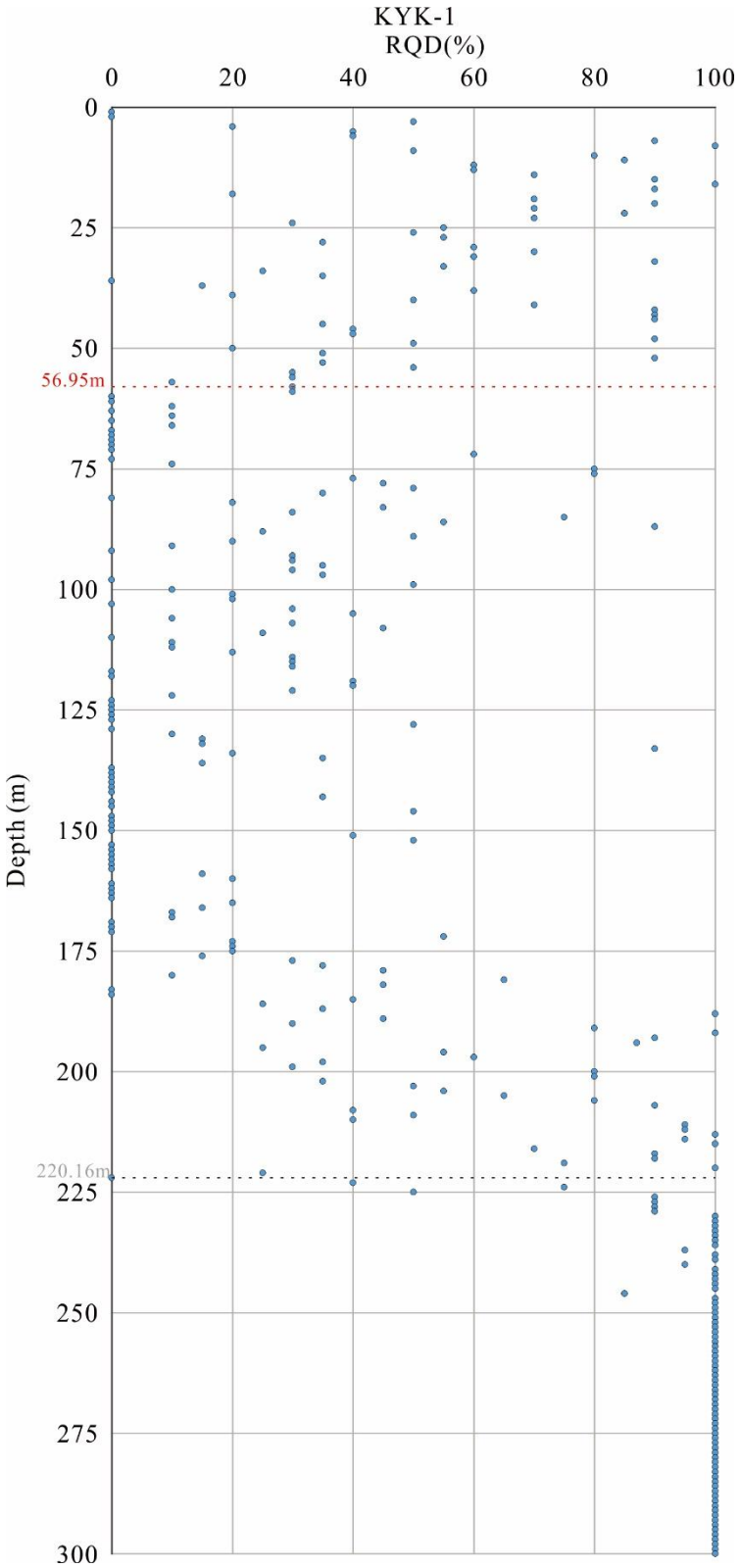


圖 5.13 KYK-1 井岩石品質指標（RQD）隨深度變化及主要岩體分界。每一散點代表對應深度區段之 RQD 值；水平虛線標示 56.95 公尺岩性界線與 220.16 公尺主要破裂帶位置。

5-3 觀音坑一號井淺部火成岩段與深部火成岩段之裂隙位態分布

依據 5-2 節之 RQD 深度分布與岩心破裂帶紀錄，本研究以深度 220.16 公尺附近之主要破裂帶作為 KYK-1 井 BHTV 裂隙資料之分段界線，將 60－220.16 公尺定義為中淺部火成岩段，220.16－300 公尺定義為深部火成岩段。此分段目的在於比較上下兩區段之裂隙位態分布差異，並作為後續古應力方向幾何約束之基礎。需要注意的是，220.16 公尺並非岩性界線，而是岩體品質與裂隙分布型態之主要轉換界線。

本研究將 BHTV 判釋所得之裂隙走向與傾角轉換為裂隙面法向量，並投影至下半球立體投影圖，同時繪製極點密度等值線圖(圖 5.14、圖 5.15)，以檢視裂隙極點之集中區與分布型態。本文於本節主要描述裂隙位態之幾何分布特徵。

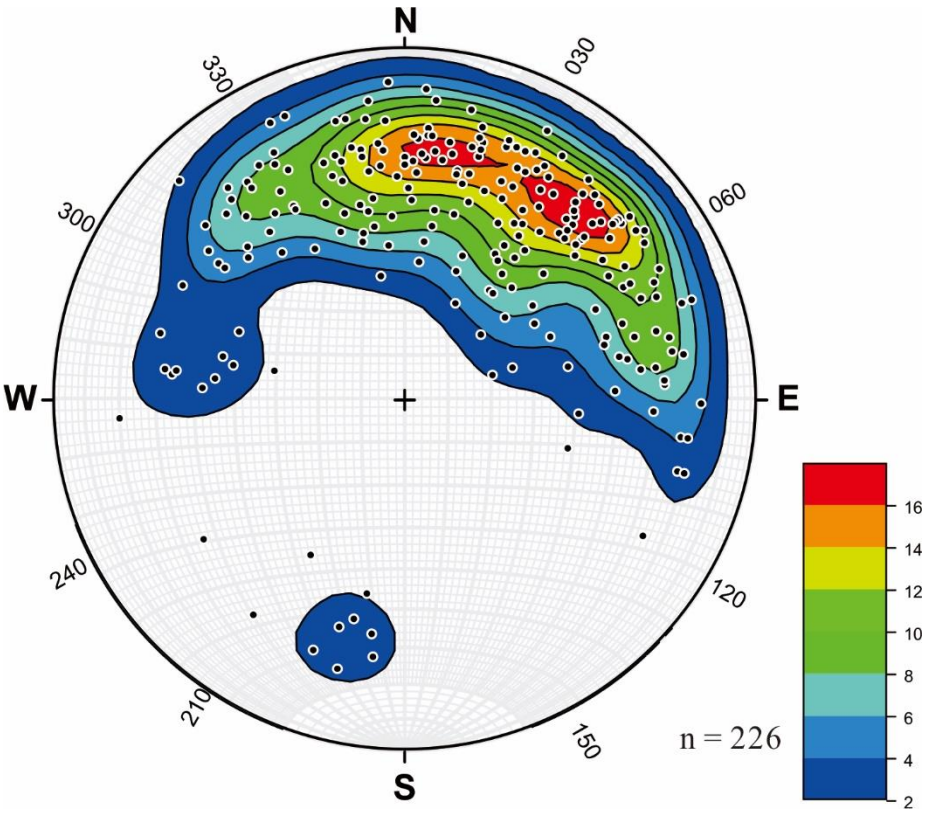


圖 5.14 觀音坑一號井裂隙法向量投影圓(深度 60 ~ 220.16 公尺)。圓點為 BHTV 判釋所得之裂隙面法向量，彩色等值線表示裂隙極點密度分布。此區段裂隙極點主要分布於投影圖北側至東北側一帶，整體呈近帶狀分布，並可辨識出兩個主要極點集中區，顯示中淺部火成岩段之裂隙位態並非完全隨機分散，而具有一定之優勢方位與分布方向。圖中 n＝226。

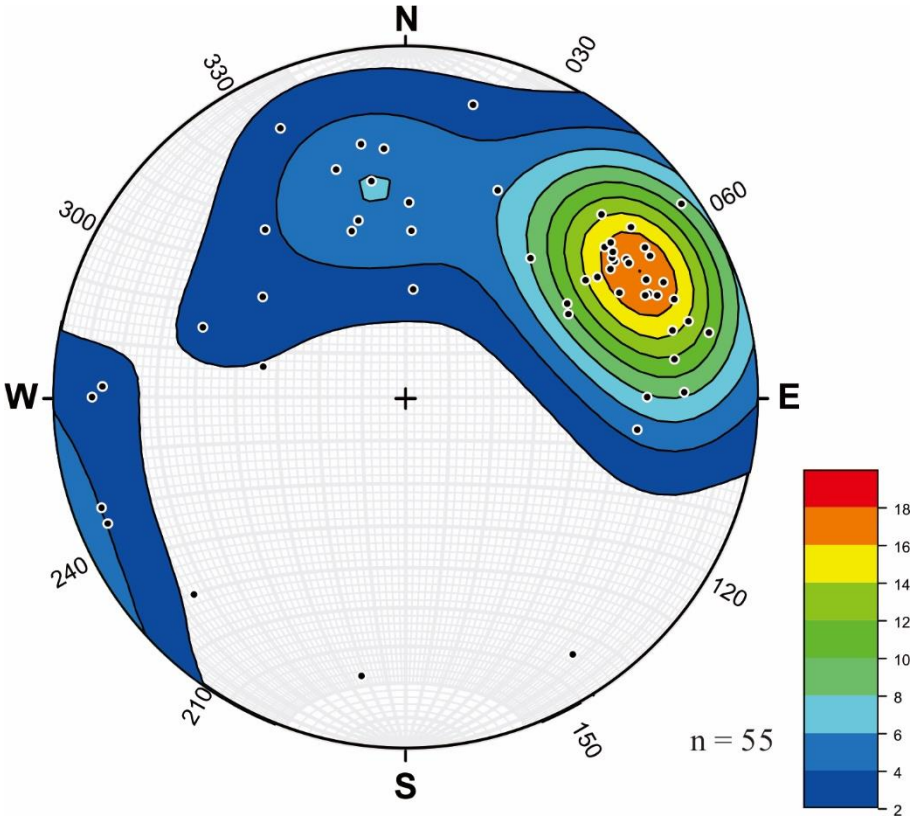


圖 5.15 觀音坑一號井裂隙法向量投影圓(深度 220.16～300 公尺)。相較於 60～220.16 公尺中淺部火成岩段，本區段裂隙極點分布較為集中，主要收斂於投影圖東北至東側之一個優勢區域，顯示深部火成岩段之裂隙位態相對單一。圖中 n = 55。

5-4 觀音坑淺部未定向岩心之裂隙與剪切帶觀察

為釐清觀音坑區域淺部岩層之變形與破裂型態，本節針對 KYK-1 淺部（0-60 公尺）、KYK-2 全孔（0-75 公尺）及 KYK-3 全孔（0-75 公尺）之實體岩心進行觀察。內容涵蓋裂隙視傾角及局部剪切帶特徵之量測。由於上述區段岩心不具完整定向資訊，無法恢復裂隙面、層面或剪切面的真實走向與真實傾角，因此本文所量測之傾角稱為視傾角（Apparent dip）。本文所稱之視傾角，係指在岩心可觀察面上，依據裂隙面、層面或剪切面與岩心軸線之交截關係所量測到的相對傾斜角度。可用於描述未定向岩心中不連續面之角度，但不能直接代表該不連續面之真實位態。

5-4-1 觀音坑一號井 0 - 60 公尺裂隙視傾角統計

該岩段的裂隙發育具有高度集中的幾何特徵，其極座標直方圖之統計峰值最主要落於 40-50°區間(圖 5.16)。

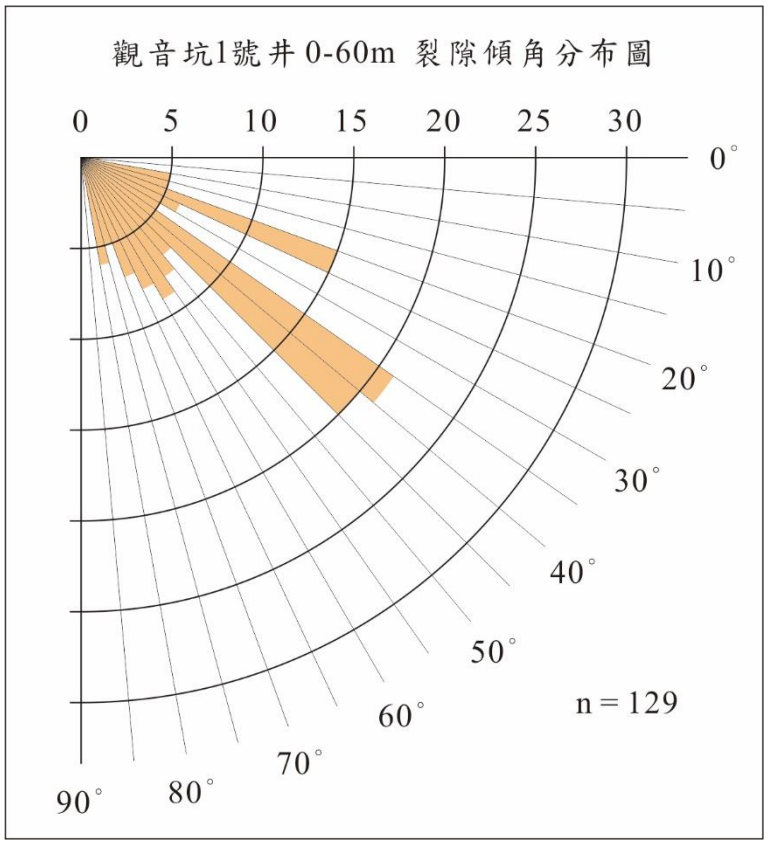


圖 5.16 觀音坑一號井 0~60 公尺裂隙視傾角分佈圖

5-4-2 觀音坑二號井裂隙視傾角統計

二號井整體的裂隙數量中，以 40°～45°區間最為集中，而 25°～30°區間則呈現次高之統計峰值(圖 5.17)。

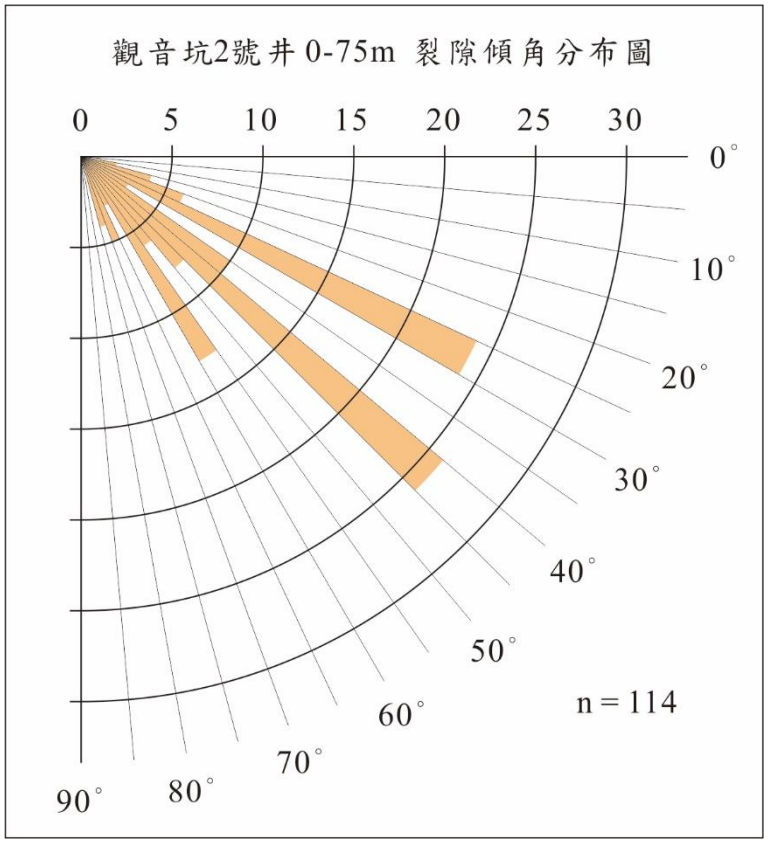


圖 5.17 觀音坑二號井 0～75 公尺裂隙視傾角分佈圖

5-4-3 觀音坑三號井剪切面與擦痕線理特徵

三號井下擾動帶中密集發育多組剪切面。量測結果顯示，63.8 公尺處剪切面視傾角約為 45°，64.3 至 64.4 公尺處發育視傾角約 65°之剪切面，67.0 至 67.3 公尺區間則發育視傾角約 75°至 80°之高角度剪切面。此外，部分破裂面上可觀察到明顯的擦痕線理，顯示該等不連續面曾發生面內相對滑移，具有剪切活動特徵。

深度 24.2 公尺與 67.2 公尺處之高角度破裂面皆顯示明顯擦痕，指示該區段至少經歷過剪切位移作用。此現象反映 KYK-3 井所在位置之淺部沉積岩層曾受構造擾動影響，24.2 公尺處可觀察到具擦痕線理之破裂面

（圖 5.18）。依據擦痕線理之滑移角特徵與剪切感指標，該破裂面可判釋為低滑移角斜向滑移剪切面，其走滑分量相對較明顯，可解釋為右移為主、伴隨正滑分量之斜向滑移剪切面。67.2 公尺處亦可觀察到保存擦痕線理之高角度破裂面（圖 5.19）。相較於 24.2 公尺處，該破裂面之擦痕線理滑移角較高，顯示傾滑分量較明顯。依據其滑移角特徵與剪切感指標，本文將其判釋為正滑為主、伴隨右移分量之斜向滑移剪切面。

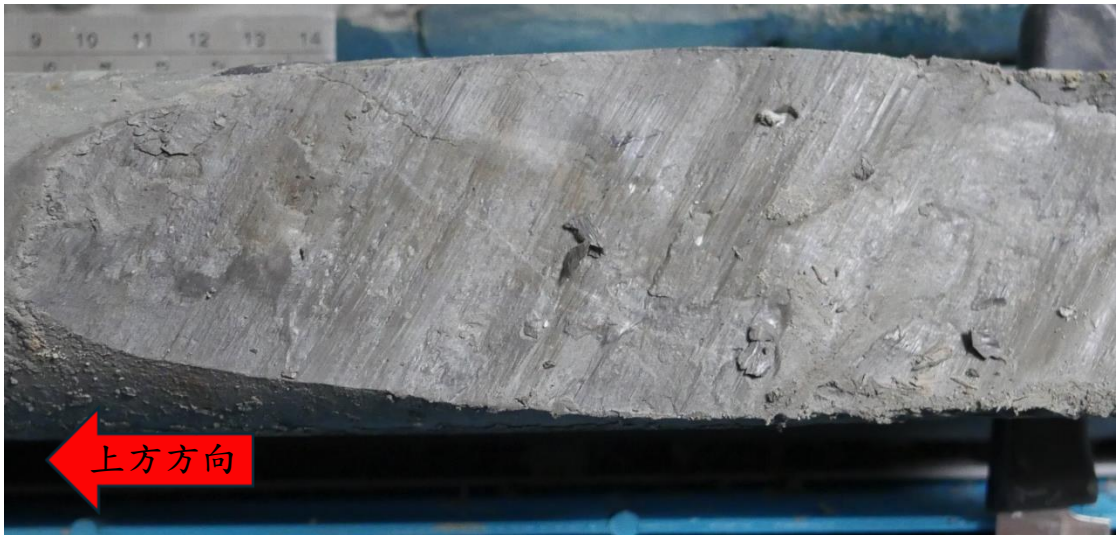


圖 5.18 觀音坑三號井深度 24.2 公尺處的高角度剪切破裂面，破裂面上可觀察到擦痕線理，顯示該不連續面曾發生面內相對滑移。箭頭指向為岩心頂部的方向。

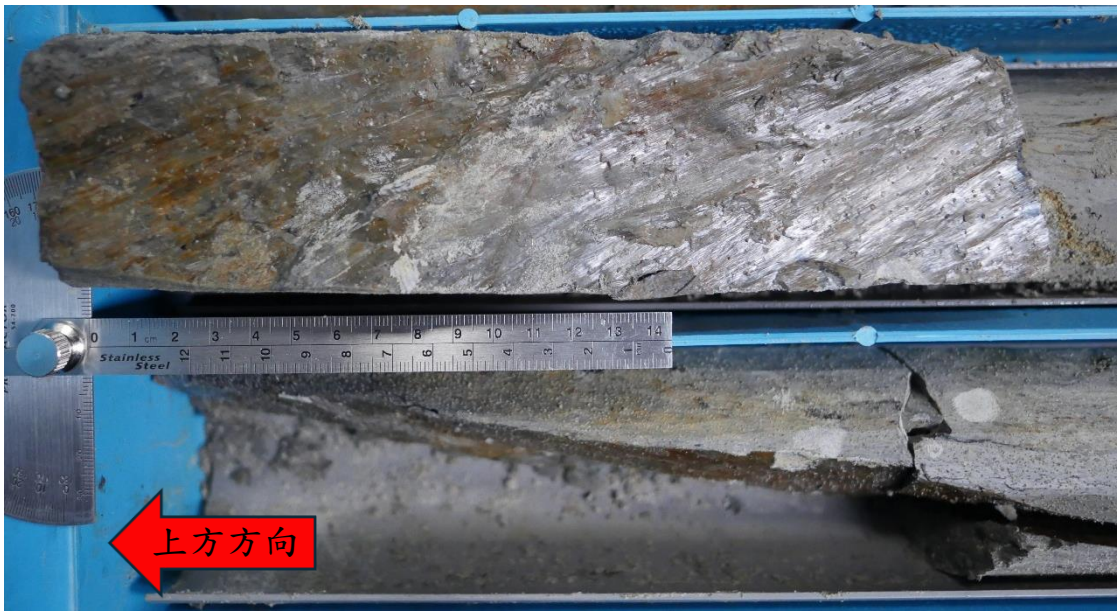


圖 5.19 觀音坑三號井深度 67.2 公尺處的高角度剪切破裂面，破裂面上可觀察到擦痕線理，顯示該不連續面曾發生面內相對滑移。箭頭指向為岩心頂部的方向。

第六章 討論

6-1 測井影像 (BHTV) 與實體岩心觀測差異之物理與地質意義

在地下裂隙判識中，超音波孔內影像測井（BHTV）可提供具方位性之孔壁影像，並可藉由孔壁展開影像上之正弦曲線判釋裂隙、層面或其他不連續面之空間位態。然而，BHTV 對裂隙的辨識能力並非僅受裂隙幾何控制，亦受到裂隙開放程度、充填狀態、孔壁完整性與聲學波幅對比等因素影響。因此，BHTV 影像所呈現的裂隙紀錄，主要代表在孔壁影像上具有足夠聲學反差、且可被影像辨識之不連續面；部分已被次生礦物或黏土物質充填之癒合裂隙，則可能在影像上不易被辨識。

如圖 6.1 所示，KYK-1 井深度 132－142 公尺附近之 BHTV 聲學波幅影像整體相對連續，未顯示明顯代表開放裂隙之低波幅正弦軌跡。然而，同深度之實體岩心中仍可觀察到多條天然不連續面，且裂隙內部已被黃泥物質與次生方解石充填。此一現象顯示，該深度區段之部分裂隙可能並非現今仍維持開放狀態，而是已受到後期礦物或黏土物質充填，形成癒合或半癒合狀態之不連續面。

造成 BHTV 影像與實體岩心觀察差異的原因，可能與裂隙充填後之聲學性質有關。當裂隙為開放狀態，或裂隙內充填物與周圍安山岩母岩之聲學性質差異較大時，BHTV 影像上較容易產生明顯波幅變化，並形成可辨識之正弦曲線。相對地，若裂隙已被方解石、黏土或其他次生物質充填，且其與圍岩之聲學反差較低，則該裂隙在 BHTV 波幅影像上可能不會表現為明顯低波幅正弦特徵。此時，實體岩心反而較能保存並顯示這類早期形成、後期充填之不連續面。

因此，BHTV 與實體岩心之觀測差異並不代表兩者互相矛盾，而是反映兩種資料對裂隙狀態具有不同敏感性。BHTV 較能記錄孔壁上現今仍具開放性、或具有明顯聲學波幅對比之裂隙；實體岩心則可觀察到已被充填、癒

合或聲學對比較弱之不連續面。換言之，BHTV 所代表之「可影像辨識裂隙」與岩心中保存之「充填或癒合裂隙」應視為互補資料，而非完全等價的裂隙紀錄。

此一差異對後續裂隙統計與構造解釋具有重要意義。若僅依據 BHTV 影像進行裂隙判釋，可能低估部分已被充填或癒合之不連續面；若僅依據實體岩心觀察，則可能混合不同時期形成、不同開放狀態或不同充填程度之裂隙。因此，本研究透過 BHTV 與實體岩心之交叉比對，可降低單一資料來源造成之判釋偏差，並有助於區分現今較開放之裂隙與早期已充填之不連續面。此結果也說明，在進行後續裂隙位態統計與古應力方向幾何約束時，應明確區分 BHTV 定向裂隙資料與岩心觀察資料所代表之地質意義。

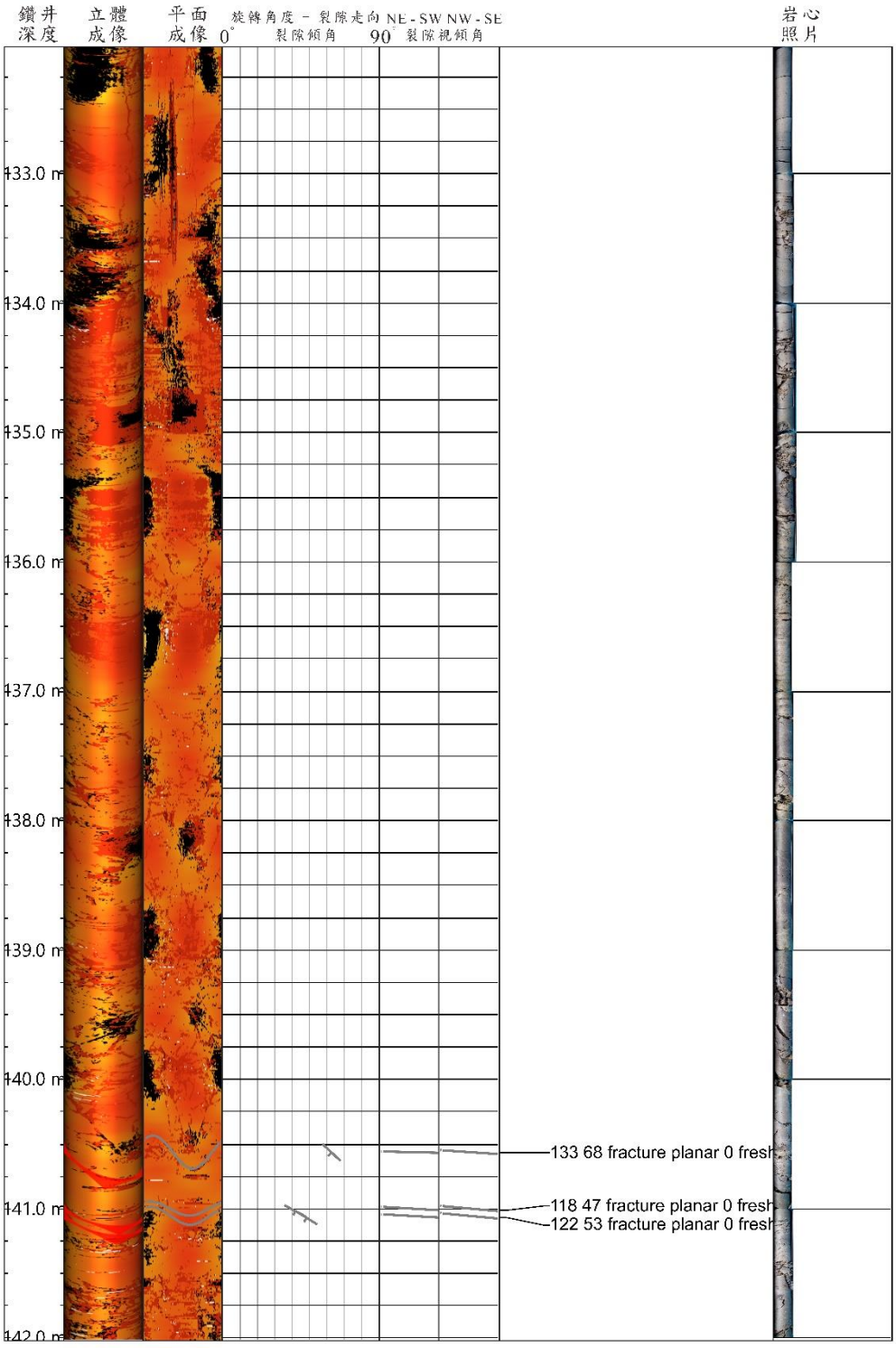


圖 6.1 KYK-1 井深度 132.0 – 142.0 公尺處超音波測井影像與實體岩心特徵之對比。左方為深度 132.0 至 142.0 公尺之 BHTV 聲學波幅展開影像，圖面訊號相對連續，未見明顯代表開放裂隙之低波幅正弦波形；右方為同深度之實體岩心照片。此對比顯示，BHTV 較易辨識現地開放或具明顯聲學對比之裂隙，而實體岩心則可保存已充填或癒合之不連續面。

6-2 淺部覆蓋層之破裂特徵與局部剪切變形

6-2-1 跨井淺部裂隙視傾角分佈之幾何相似性

根據第五章之未定向岩心統計結果，KYK-1 井 0－60 公尺區段與 KYK-2 井 0－75 公尺區段之裂隙視傾角分布具有相似特徵（圖 6.2）。KYK-1 井裂隙視傾角主要集中於 40－50°區間；KYK-2 井則以 40－45°區間最為集中，並於 25－30°區間出現次要峰值。兩井雖位於不同井位，但皆於約 40－50°範圍出現主要集中區，顯示觀音坑淺部岩層中之不連續面在岩心尺度上具有相近的視傾角。

此一跨井相似性顯示，KYK-1 與 KYK-2 淺部岩層可能曾受到相近之脆性破裂作用或構造擾動，使不連續面在岩心尺度上呈現相似的傾斜程度。然而，由於兩井淺部岩心均不具完整方位定向資訊，視傾角僅反映不連續面相對於岩心之幾何關係，無法恢復其在地理座標系中的真實走向、傾向與真實傾角。因此，圖 6.2 所呈現的 40－50°主要峰值不能單獨作為共軛裂隙、特定斷層型態或主應力方向之判據。

若進一步與本研究 KYK-1 井 60－220.16 公尺 BHTV 定向裂隙資料所約束之古應力方向相互比較，則淺部裂隙視傾角之集中現象可能與區域近水平構造應力作用下的淺部脆性變形有關。本研究於第 6-3 節所推估之古最大主應力約為 N65°W－N70°W，且以近水平分量為主；因此，KYK-1 與 KYK-2 淺部岩層所記錄之中角度裂隙，可能反映區域構造應力向淺部傳遞後，受到岩性、層理及局部岩體條件調節所形成之破裂幾何。惟此項解釋屬於與定向 BHTV 資料之幾何相容性討論，並非由未定向岩心之視傾角資料直接求得其受力方向。

除主要視傾角分布外，KYK-2 井深度約 45.2 公尺處之未定向岩心中亦可觀察到兩組交截之高角度不連續面，其視傾角約為 65°與 72°（圖 6.3）。此現象進一步顯示 KYK-2 淺部沉積岩層曾發生局部脆性破裂，但由於缺乏

兩組裂隙之完整三維位態與剪切運動學資料，本文不直接將其判定為共軛節理或共軛剪切裂隙。

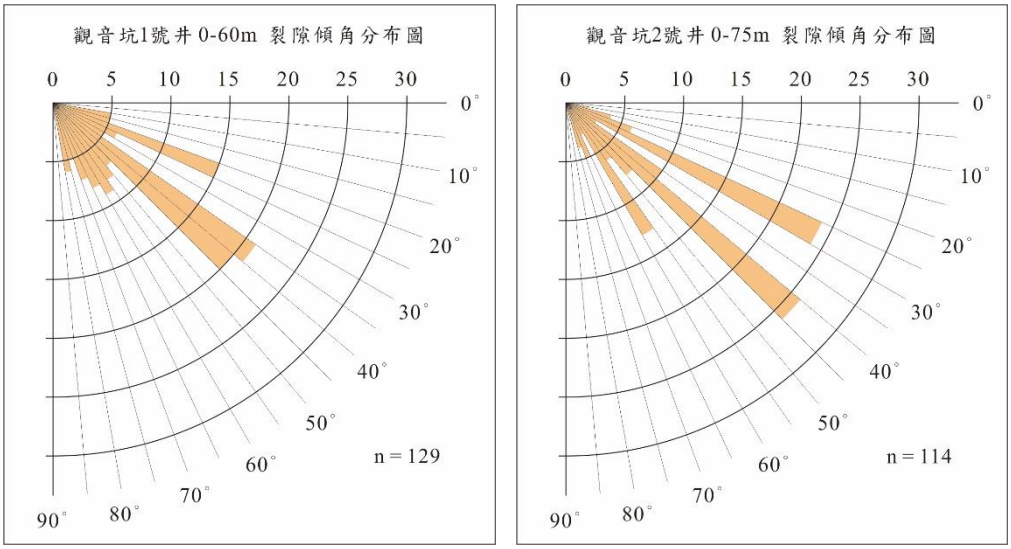


圖 6.2 觀音坑一號井與二號井淺部裂隙視傾角分佈對比圖。左圖為 KYK-1 井 0–60 公尺區段之裂隙視傾角分布（n = 129），右圖為 KYK-2 井 0–75 公尺區段之裂隙視傾角分布（n = 114）。KYK-1 主要集中於 40–50°區間，KYK-2 則主要集中於 40–45°區間，並於 25–30°出現次要峰值。兩井均呈現中角度裂隙視傾角之主要集中現象，顯示不同井位淺部岩層具有相近之破裂幾何特徵；惟因岩心未定向，無法由此直接判定裂隙三維方位或主應力方向。



圖 6.3 觀音坑二號井深度 45.2 公尺處之高角度不連續面。未定向岩心中可觀察到兩組交截之高角度不連續面，其視傾角約為 65°與 72°。此現象顯示淺部岩層曾發生局部脆性破裂。

6-2-2 局部剪切變形之岩心證據

相較於 KYK-1 與 KYK-2，KYK-3 井岩心保存較明顯之局部剪切變形證據。岩心觀察顯示，該井部分區段之層面具有較高視傾角，約介於 60–75°之間，並於深度 61.5 公尺以下出現較密集之破裂、高角度不連續面與局部構造擾動。此結果顯示 KYK-3 淺部沉積岩層除發生脆性破裂外，部分不連續面亦曾經歷後續剪切滑移。

其中，KYK-3 井深度 24.2 公尺與 67.2 公尺處之高角度破裂面皆保存明顯擦痕線理（Slickenlines / Striations）（圖 6.4）。擦痕線理代表破裂面兩側岩體曾沿面發生相對位移，因此相較於僅具有裂隙幾何之 KYK-1 與 KYK-2 淺部岩心，KYK-3 提供了較直接的局部剪切運動學證據。

24.2 公尺處之擦痕線理具有較低滑移角，顯示其走滑分量相對較大。依據擦痕方向及剪切感指標，可將該破裂面判釋為右移分量較明顯、並伴隨正滑分量之斜向滑移剪切面。相較之下，67.2 公尺處之擦痕線理滑移角較高，代表其傾滑分量相對較大，因此可判釋為正滑分量較明顯、並伴隨右移分量之斜向滑移剪切面。

兩處剪切面皆具有正滑與右移分量，顯示 KYK-3 淺部岩層中的局部變形並非單純傾滑或單純走滑，而可能具有斜向滑移（Oblique-slip）特徵。此類局部剪切變形可能反映淺部岩體在構造應力作用下，受到既有不連續面、層理或局部岩體幾何條件影響而產生之應變調節。

然而，KYK-3 岩心同樣未進行完整方位定向，因此雖可依據擦痕線理與剪切感指標判斷破裂面上的相對滑移型態，仍無法將其直接轉換為地理座標系中的絕對滑移方向。故本文將其解釋限制於岩心尺度之局部剪切面，不直接將其外推為正斷層、右移斷層或區域性斜向滑移斷層，也不以此資料單獨進行完整古應力張量反演。

綜合上述結果，KYK-1 與 KYK-2 淺部岩心皆呈現約 40–50°之裂隙視傾角集中現象，而 KYK-3 則進一步保存具擦痕線理之局部剪切面，顯示觀音坑淺部岩層同時記錄脆性破裂與局部剪切滑移特徵。然而，由於上述岩心皆未具完整方位定向資訊，目前尚無法確認不同井位之裂隙與剪切面是否形成於同一構造事件，其與區域古應力場之關係將於下一節結合 KYK-1 BHTV 定向裂隙資料進一步討論。



圖 6.4 KYK-3 井泥岩單元中之高角度剪切破裂面與擦痕線理特徵。左圖為深度 24.2 公尺處之高角度剪切面，其擦痕線理具有較低滑移角，顯示走滑分量相對較大，判釋為右移為主、伴隨正滑分量之斜向滑移；右圖為深度 67.2 公尺處之高角度剪切面，其擦痕線理具有較高滑移角，顯示傾滑分量相對較大，判釋為正滑為主、伴隨右移分量之斜向滑移。由於 KYK-3 岩心未定向，上述判釋僅代表岩心尺度之相對滑移型態，不直接代表區域斷層之絕對運動方向。

6-3 古應力方向與區域構造之幾何關聯

KYK-1 井深度 60–300 公尺區段具有 BHTV 定向裂隙資料，因此可進一步進行裂隙位態統計，並作為古應力方向幾何約束之主要依據。根據第五章之分析，本研究以深度 220.16 公尺附近之主要破裂帶作為分段界線，將 KYK-1 井火成岩段分為 60–220.16 公尺之中淺部火成岩段，以及 220.16–300 公尺之深部火成岩段。60–220.16 公尺區段之裂隙極點主要分布於投影圖北側至東北側，整體呈現近帶狀分布，並可辨識兩個主要極點集中區；相較之下，220.16–300 公尺區段之裂隙極點則主要集中於單一優勢區域。此結果顯示 220.16 公尺上下之火成岩段除岩體品質不同外，其裂隙位態分布型態亦具有差異。由於中淺部火成岩段具有較明顯之優勢裂隙方位與幾何分布特徵，因此本研究以 60–220.16 公尺區段作為後續古應力方向幾何約束之主要資料來源。

本研究利用 KYK-1 井 60–220.16 公尺區段之裂隙極點分布，結合定向張量分析與安德森斷層理論所提供之破裂面與主應力軸幾何關係，推估其古最大主應力方向約為 WNW–ESE（N65°W–S65°E）方向，且以近水平分量為主（圖 6.5）。此方向可視為 KYK-1 井中淺部火成岩段裂隙系統所保存之古水平應力方向紀錄。由於本研究缺乏完整斷層滑移向量與定向擦痕資料，因此上述結果主要代表古應力方向之幾何約束，而非完整古應力張量反演結果。

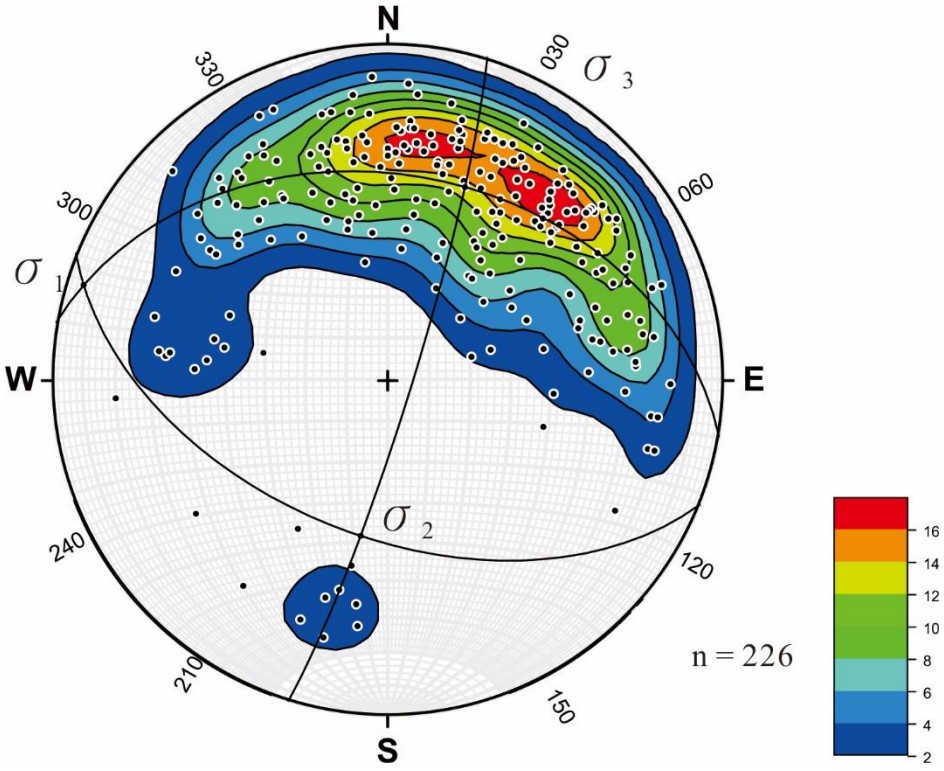


圖 6.5 KYK-1 井 60–220.16 公尺中淺部火成岩段裂隙分布與古主應力方向之幾何關係。白色圓點為 BHTV 判釋所得之裂隙面法向量，彩色等值線表示裂隙極點密度分布，黑色大圓為代表性優勢裂隙面。依裂隙極點分布、定向張量分析及安德森斷層理論之幾何關係，推估最大主應力軸 σ_1 約呈 WNW–ESE（N65°W–S65°E）方向、且近水平；圖中 σ_2 與 σ_3 則作為裂隙幾何與主應力方向關係之參考。上述主應力軸主要用於古應力方向之幾何約束，並非完整斷層滑移應力張量反演結果。圖中 n = 226。

若進一步從破裂模式討論，60 – 220.16 公尺區段之裂隙極點呈近帶狀至局部群集型分布，且具有兩個主要極點集中區，顯示該區段可能保存多組受構造應力控制之優勢裂隙。部分裂隙可能為構造剪切所形成，亦可能為既有不連續面在後續應力作用下重新活化，而非全部由單純張裂作用產生。然而，BHTV 主要提供裂隙面之走向、傾向與傾角，缺乏個別裂隙面上完整之滑移線理與剪切感，因此目前仍無法僅由裂隙位態明確區分其屬於 Mode II、Mode III 或混合型剪切破裂。

若將觀音坑中心安山岩脈視為Mode I張裂面，則在理想的力學條件下，岩脈面法向量應大致趨近於最小主應力方向 σ_3 ，而岩脈面本身則大致位於 $\sigma_1 - \sigma_2$ 平面內。觀音坑中心岩脈約呈 WNW－ESE 向延伸，因此其近水平法向約呈 NE－SW。若中心岩脈確實主要以 Mode I 方式張開，則可推測岩脈形成或張開時之 σ_3 可能近於 NE－SW 水平。配合本研究由井下裂隙所約束之 WNW－ESE 近水平 σ_1 ，若 σ_1 與 σ_3 均以近水平分量為主，則 σ_2 可能接近垂直；依安德森斷層理論之主應力配置，此一古應力狀態可能接近走滑型應力配置（Strike-slip stress regime）。

在上述可能的應力配置下，觀音坑中心岩脈之侵入亦可由構造應力與岩漿壓力共同作用加以解釋。岩脈不一定需要形成全新的張裂面，也可能利用既有裂隙或岩體弱面作為侵入通道。當岩漿或流體壓力升高，使作用於既有不連續面上的有效法向應力降低，並達到使裂隙張開的條件時，原有弱面即可產生張開並被岩漿充填。因此，地表中心岩脈與井下 BHTV 所辨識之裂隙不必代表完全相同的破裂模式：井下裂隙系統可能包含構造剪切形成或後期再活動之不連續面，而中心岩脈則可能代表相同或相近區域應力背景下，局部岩漿壓力促使適當方位之既有弱面產生 Mode I 張裂並侵入的結果。

將 KYK-1 井下裂隙所約束之 N65°W－N70°W 近水平古最大主應力方向，與觀音坑地表中心岩脈之 WNW－ESE 延伸方向進行比較，可見兩者具有相近的走向。然而，岩脈長軸方向本身不一定直接等同於最大主應力方向 σ_1 。較適當的解釋為，井下裂隙所約束之古應力方向與地表中心岩脈之幾何展布具有一定之幾何與力學相容性；亦即，在 WNW－ESE 近水平 σ_1 與可能之 NE－SW 近水平 σ_3 配置下，中心岩脈之走向並未與井下裂隙所反映的古應力狀態產生明顯幾何矛盾。惟目前尚缺乏岩脈內部流動構造、岩脈

侵入時間及井下裂隙形成時間等直接限制，因此尚無法僅依方向相近即判定兩者形成於完全相同的構造事件。

進一步將此 N65°W－N70°W 近水平古最大主應力方向與觀音山周邊區域構造進行比較，可見該方向與成子寮斷層的走向構造線呈高角度交會（圖 6.6）。此一空間關係與北臺灣更新世造山階段所提出之 WNW－ESE 向水平擠壓背景具有幾何相容性。因此，本研究所得之古最大主應力方向可能反映相近之區域構造應力背景，並可能與區域逆衝構造發育時之水平擠壓作用具有關聯。

就可能的應力來源而言，本文較傾向將 KYK-1 井中所記錄之 WNW－ESE 近水平古最大主應力，解釋為北臺灣造山階段區域水平擠壓作用在觀音坑地區留下之構造紀錄。在此區域構造應力背景下，岩性差異、既有裂隙與其他岩體弱面可能控制局部破裂及剪切再活動的位置；另一方面，岩漿壓力升高則可能使適當方位之弱面進一步張開，成為岩漿侵入通道。因此，區域構造應力提供主要受力背景，而既有不連續面與岩漿流體壓力則可能共同控制觀音坑地區裂隙發育與岩脈侵入之局部幾何特徵。

然而，本研究之古應力方向主要依據單一鑽井之 BHTV 裂隙位態、定向張量與幾何關係進行約束，且缺乏完整斷層滑移向量、定向擦痕資料、多點露頭構造量測，以及岩脈侵入與裂隙形成時間之直接限制。因此，本文所提出之 WNW–ESE 近水平最大主應力、可能接近走滑型之應力配置、井下部分裂隙可能具有剪切型破裂性質，以及北臺灣區域水平擠壓可能為其主要構造應力背景，均應視為依據現有資料建立之可能力學模式，而非唯一的古應力演化解釋。整體而言，本研究結果顯示 KYK-1 井下裂隙、地表中心岩脈與周邊區域構造之間具有一定之幾何與力學相容性，支持觀音坑地下火成岩體之裂隙系統可能保存區域構造應力作用之紀錄。

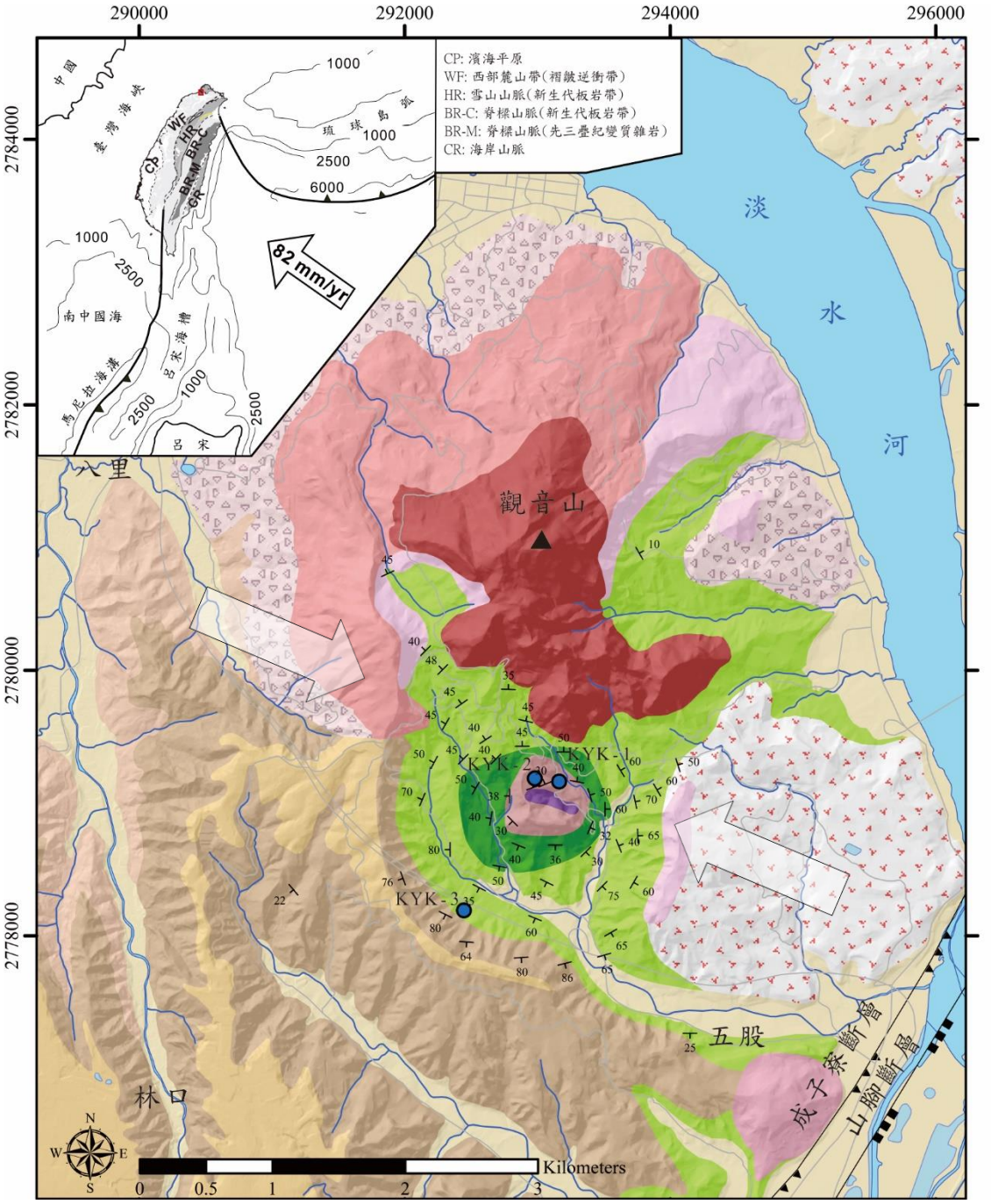


圖 6.6 KYK-1 井下裂隙推估之古應力方向與周遭構造線之幾何關係圖。圖中箭頭表示 KYK-1 井下 60-220.16 公尺區段裂隙群集所推估之古最大主應力方向，約為 WNW–ESE（N65°W–S65°E）。該方向與觀音坑中心岩脈之 WNW–ESE 延伸方向相近，並與成子寮斷層之走向構造線呈現接近正交關係。

第七章 結論

本研究整合觀音坑地表岩脈、KYK-1 至 KYK-3 井岩心及 KYK-1 井 BHTV 定向裂隙資料，分析地下裂隙分布、局部剪切變形及可能的古應力方向。主要結論如下：

1. 觀音坑中心安山岩脈與 1 號井深度 120 公尺處安山岩心，皆具淺灰色細粒至隱晶質基質、斑狀組織，以及粒徑約 0.5–2.0 毫米之鐵鎂礦物與斜長石斑晶，顯示兩者具有高度相似之岩象特徵；惟其同源性仍需地球化學與定年資料進一步驗證。
2. BHTV 與實體岩心對裂隙之記錄具有互補性。BHTV 較易辨識開放或聲學對比明顯之裂隙，岩心則可保存已充填或癒合之不連續面，兩者交叉比對可提高裂隙判釋之可靠度。
3. KYK-1 井深度 220.16 公尺附近為岩體品質與裂隙分布型態之主要轉換界線。60–220.16 公尺區段之裂隙極點呈近帶狀至局部群集型分布；220.16–300 公尺區段則以單一優勢集中區為主，顯示兩區段具有不同之裂隙幾何特徵。
4. KYK-1 與 KYK-2 淺部的未定向岩心之裂隙視傾角皆主要集中於 40–50°，顯示兩井具有相近的破裂幾何。KYK-3 井 24.2 公尺及 67.2 公尺處之剪切面保存擦痕線理，分別呈右移為主、伴隨正滑分量，以及正滑為主、伴隨右移分量之斜向滑移特徵；惟此判釋僅適用於岩心尺度。
5. KYK-1 井 60–220.16 公尺區段之定向裂隙資料顯示，依據裂隙極點分布、定向張量分析及安德森斷層理論，本研究約束其古最大主應力軸（σ_1）約呈 WNW–ESE（N65°W–S65°E）方向，且近水平。若觀音坑中心岩脈可近似視為 Mode I 張裂面，則最小主應力軸（σ_3）可能近於 NE–

SW、且接近水平，而中間主應力軸（σ_2）接近垂直，顯示其古應力狀態可能接近走滑型應力配置，並反映 WNW–ESE 向水平擠壓之構造背景。此方向與中心岩脈之 WNW–ESE 走向相近，並與 NE–SW 向區域構造呈高角度交會，可能保存北臺灣更新世造山階段之構造應力紀錄。

本研究雖整合 KYK-1 井 BHTV 定向裂隙資料、實體岩心與地表岩脈調查，建立觀音坑地下裂隙分布及可能古應力方向之幾何關係，但目前古應力判釋主要依據單一鑽井資料，且缺乏完整斷層滑移向量、定向擦痕與多點露頭構造量測，因此所提出之走滑型應力配置與區域應力來源仍屬可能之力學模式。未來可增加不同井位之孔內影像測井、定向岩心與地表構造調查，並結合斷層滑移資料進行應力張量分析；另可透過薄片礦物定量、全岩地球化學與放射性定年，比較地表中心岩脈與井下安山岩之岩石學及年代特徵，以進一步釐清其岩漿活動關係。

參考文獻

Anderson, E. M., 1942, The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain: Edinburgh, Oliver and Boyd, p. 191.

Angelier, J., Bergerat, F., Chu, H.-T., Juang, W.-S., and Lu, C.-Y., 1990, Paleostress analysis as a key to margin extension: The Penghu Islands, South China Sea: Tectonophysics, v. 183, no. 1–4, p. 161–176.

Angelier, J., Tarantola, A., Valette, B. and Manoussis, S., 1982, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress—I. Single phase fault populations: A new method of computing the stress tensor: Geophysical Journal International, v. 69, no. 3, p. 607–621.

Atkinson, B. K., ed., 1987, Fracture Mechanics of Rock: London, Academic Press.

Bingham, C., 1974, An antipodally symmetric distribution on the sphere: The Annals of Statistics, v. 2, no. 6, p. 1201–1225.

Chen, C.-H. and Lo, H. J., 1985, Petrology of Andesitic dike and its cognate inclusions from Kuanyinkeng, northern Taiwan: Proceedings of the Geological Society of China, no. 28, p. 83–105.

Davis, G. H., Reynolds, S. J., and Kluth, C. F., 2012, Structural Geology of Rocks and Regions: John Wiley and Sons.

Deere, D. U., 1964, Technical description of rock cores for engineering purposes: Rock Mechanics and Engineering Geology, v. 1, no. 1, p. 17–22.

Deere, D. U. and Deere, D. W., 1988, “The Rock Quality Designation (RQD) index in practice.” In Kirkaldie, L. (ed.), Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, p. 91–101.

Deere, D. U. and Deere, D. W., 1989, Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years; U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1; Waterways Experiment Station: Vicksburg, MS, USA.

Fisher, N. I., Lewis, T., and Embleton, B. J. J., 1987, Statistical Analysis of Spherical Data, Cambridge University Press, Cambridge.

Huang, Q., and Angelier, J., 1989, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. II. Using conjugate fault sets within heterogeneous families for computing stress axes: Geophysical Journal International, v. 96, no. 1, p. 139–149.

Huang, W. T. and Lo, H. J., 1986, Volcanological aspects and the petrogenesis of the Kuanyinshan volcanic rocks, northern Taiwan: Acta Geologica Taiwanica, no. 24, p. 123–148.

Milloy, S. F., McLean, K. and McNamara, D. D., 2015, “Comparing borehole televiewer logs with continuous core: An example from New Zealand.” Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.

Scheidegger, A. E., 1965, “On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data.” U.S. Geological Survey Professional Paper 525-C, p. C164–C167.

Woodcock, N. H., 1977, Specification of fabric shapes using an eigenvalue method: Geological Society of America Bulletin, v. 88, no. 9, p. 1231–1236.

中央研究院地球科學研究所，2026，Taiwan Geodetic Model（TGM）：震間地殼形變，線上資料庫，檢索日期：2026/05/25。https://tgm.earth.sinica.edu.tw/interseis。

何春蓀，1986，《臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書》，經濟部中央地質調查所，164 頁。

牧山鶴彥、濱本勝己、淺岡隼太，1935，《觀音山》，臺灣總督府殖產局縮尺五萬分之一地質圖及說明書第 8 號，臺灣總督府殖產局。

邱維毅，2009，臺灣西北部漸新世至更新世盆地演化及層序地層，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。

國立中央大學碳封存及地熱研究中心，2026，《新北市觀音山地區地下三維地質模型建置：精簡版期末報告》，契約編號 B114011，經濟部地質調查及礦業管理中心委託。

莊文星、陳汝勤，1989，〈臺灣北部火山岩之定年與地球化學研究〉，《經濟部中央地質調查所彙刊》，第 5 號，31–66 頁。

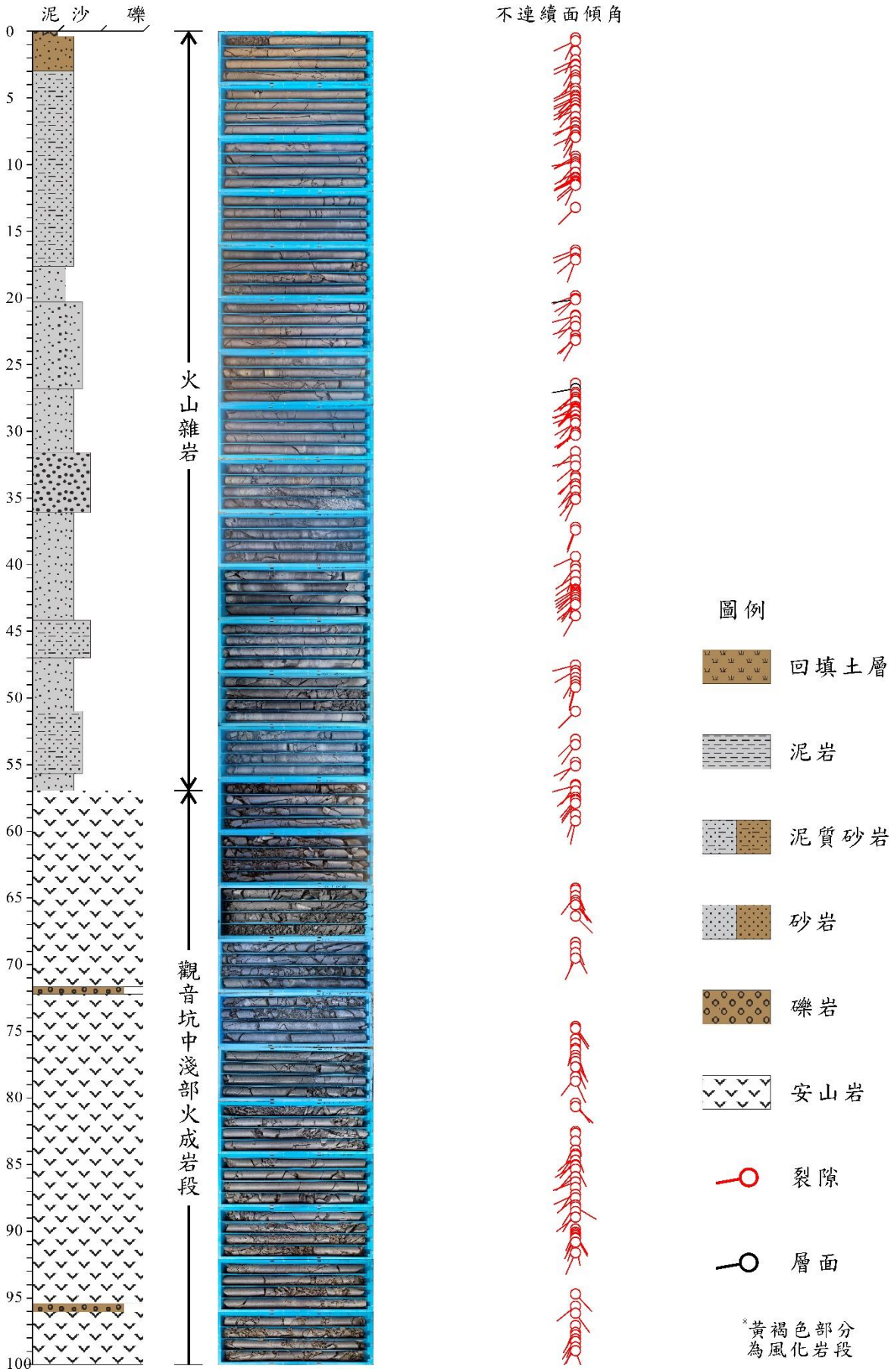
郭若琳、陳棋炫、林朝宗，2021，五萬分之一台灣地質圖說明書-林口圖幅，經濟部中央地質調查所。

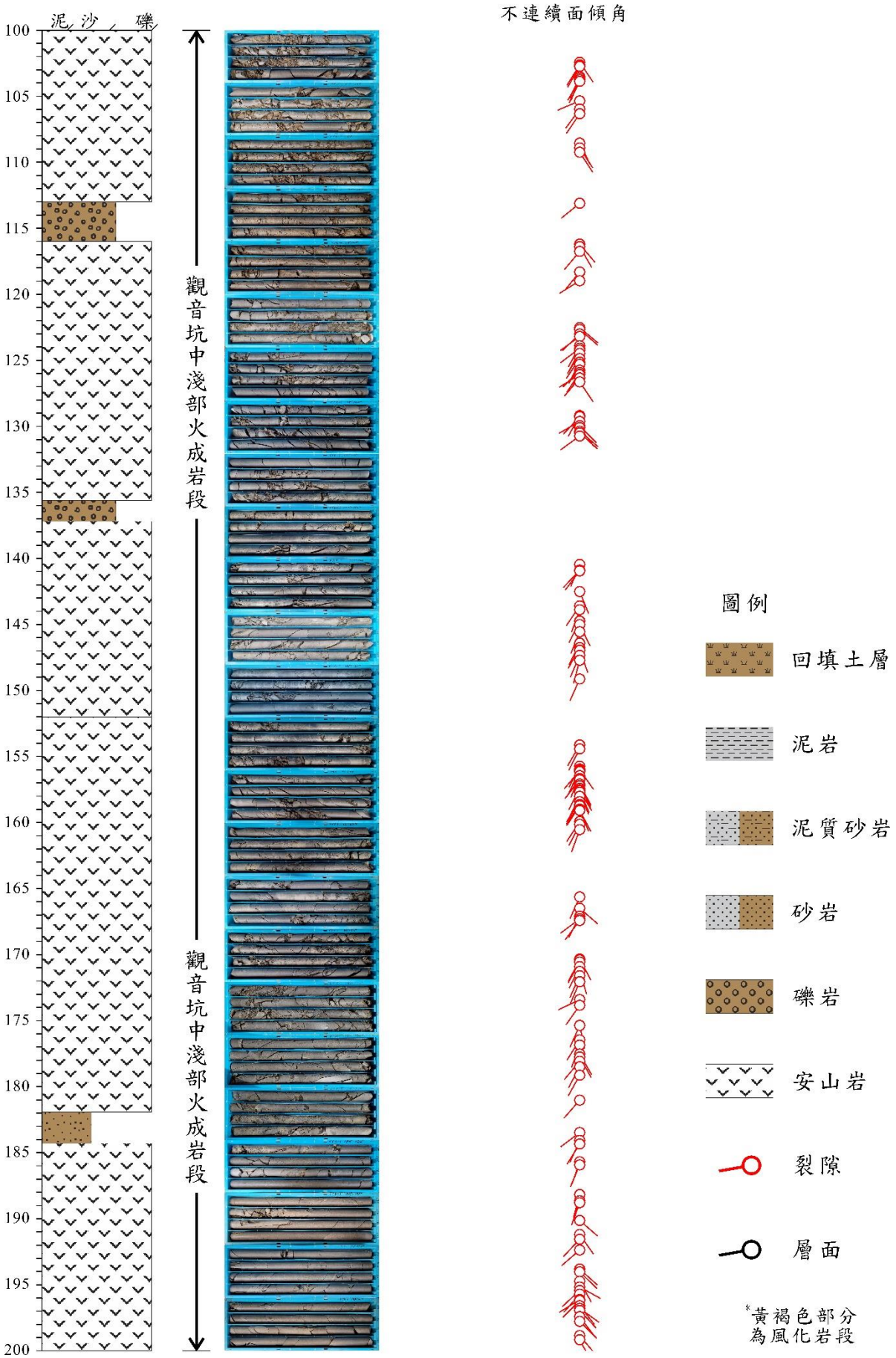
鄧屬予，1996，〈臺北盆地的成因與構造演化〉，《臺灣之第四紀第六次研討會暨臺北盆地地下地質與工程環境綜合調查研究成果發表會論文集》，86–89 頁。

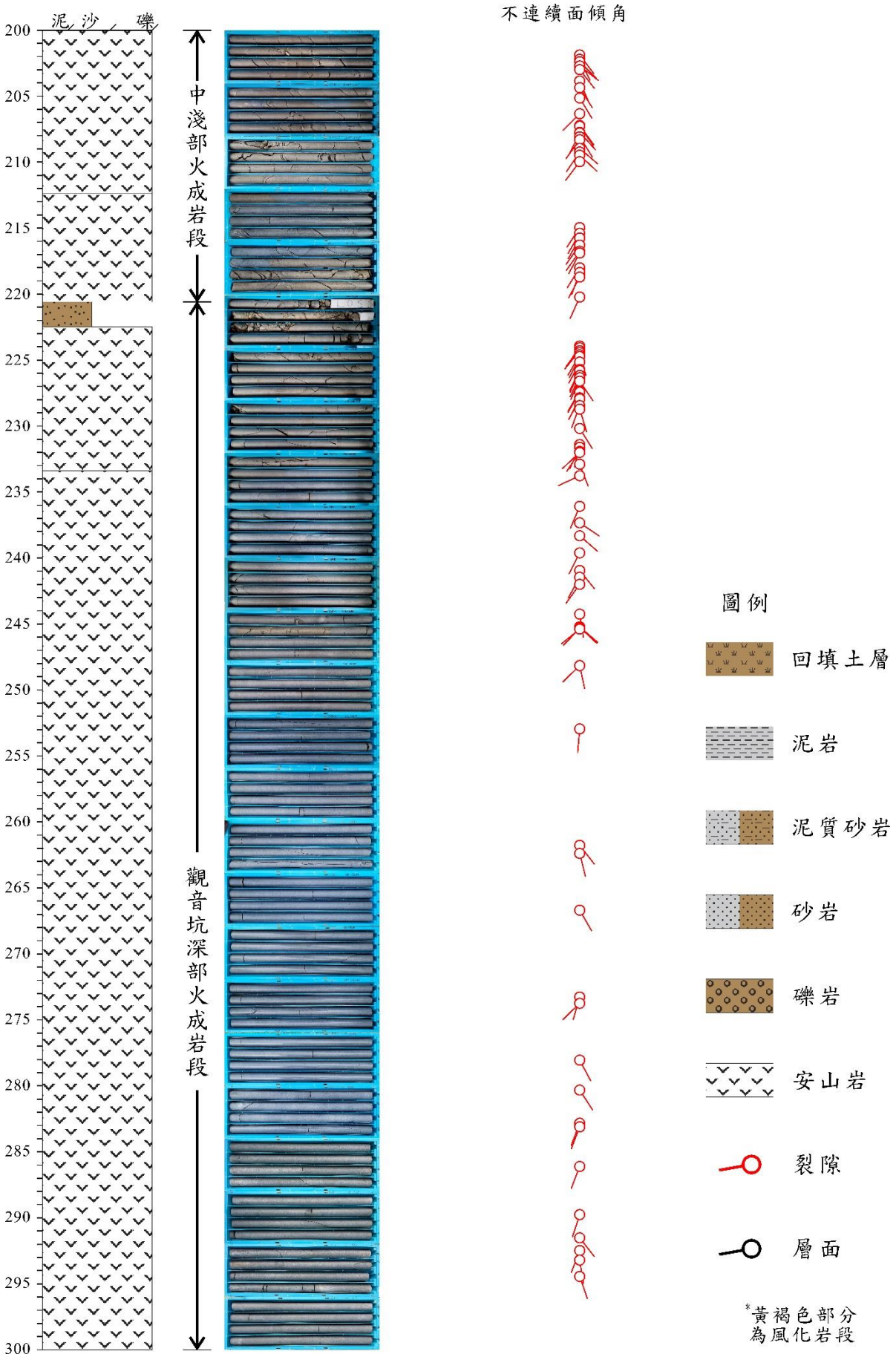
鄧屬予、宋聖榮、劉志學、蕭丁槐、李錫堤、莊釗鳴，2008，林口台地北緣的火山碎屑岩層，西太平洋地質科學，第 8 卷，43-76 頁。

鄧屬予、劉志學、陳文福、游鎮源、蔡宜伶，2011，觀音坑地質與火山作用，經濟部中央地質調查所彙刊，第 24 號，123–153 頁。

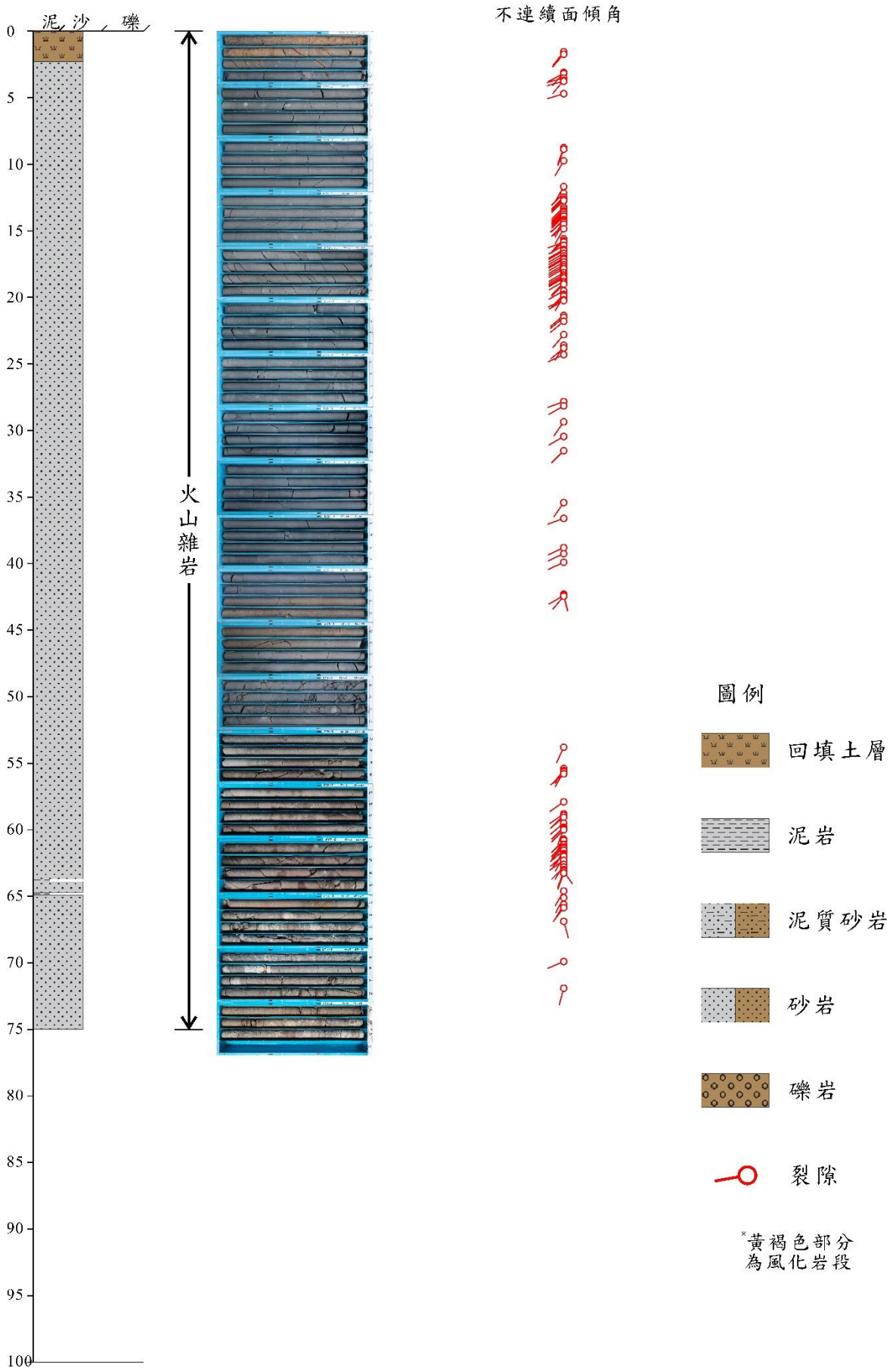
附錄(一) 觀音坑一號井(KYK-1)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位


泥 沙 礫
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80
85
90
95
100
火山雜岩
觀音坑中淺部火成岩段
不連續面傾角
圖例
回填土層
泥岩
泥質砂岩
砂岩
礫岩
安山岩
裂隙
層面
※黃褐色部分
為風化岩段

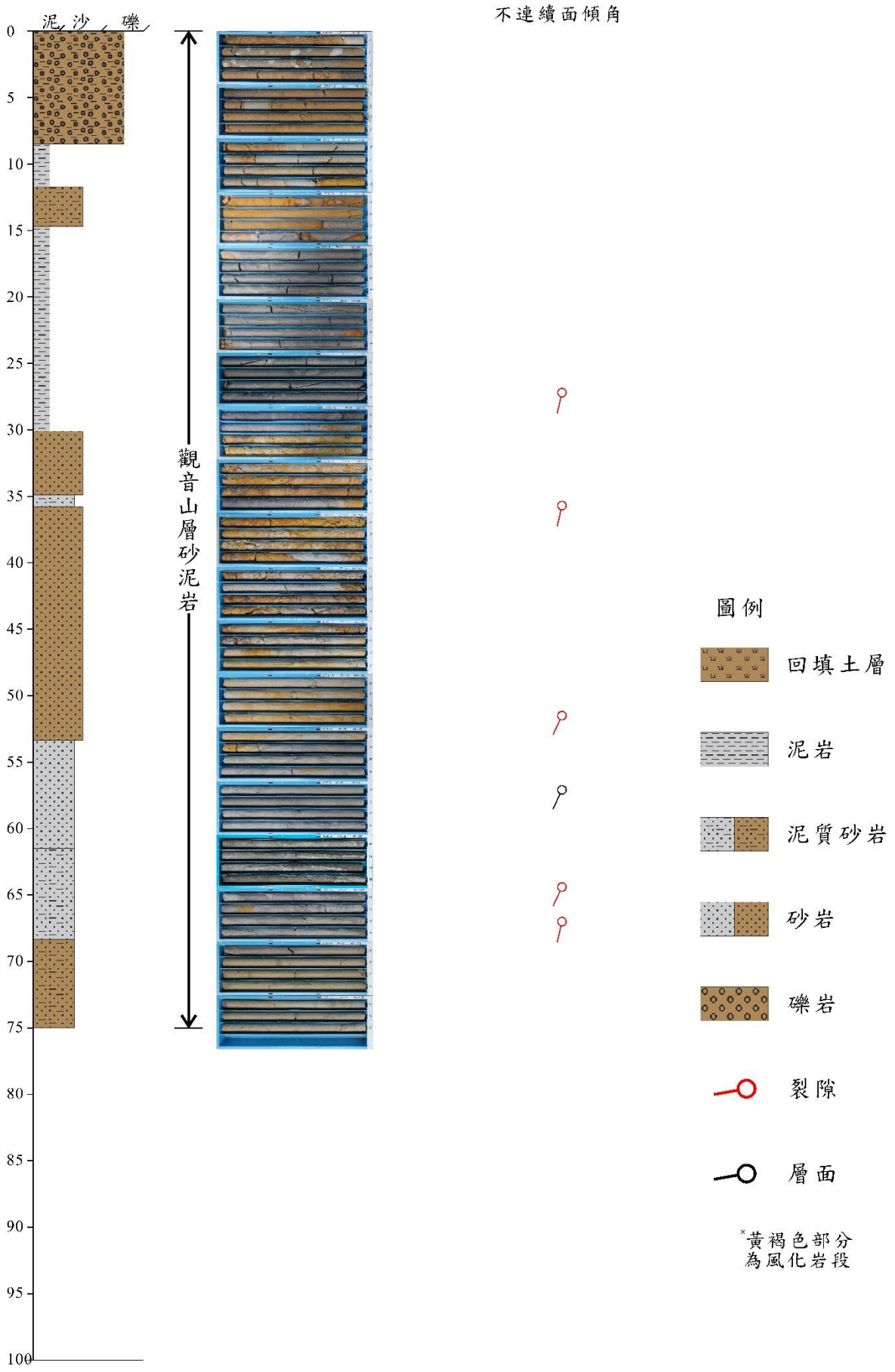

泥
沙
礫
100
105
110
115
120
125
130
135
140
145
150
155
160
165
170
175
180
185
190
195
200
觀音坑中淺部火成岩段
觀音坑中淺部火成岩段
不連續面傾角
圖例
回填土層
泥岩
泥質砂岩
砂岩
礫岩
安山岩
裂隙
層面
*黃褐色部分
為風化岩段


泥
沙
礫
200
205
210
215
220
225
230
235
240
245
250
255
260
265
270
275
280
285
290
295
300
中淺部火成岩段
觀音坑深部火成岩段
不連續面傾角
圖例
回填土層
泥岩
泥質砂岩
砂岩
礫岩
安山岩
裂隙
層面
*黃褐色部分
為風化岩段

附錄(二) 觀音坑二號井(KYK-2)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位



附錄(三) 觀音坑三號井(KYK-3)之井下岩心柱狀圖、岩心照片及岩石地層各分層單位



附錄(四) 口試委員意見修正與回覆說明

修正位置	口試委員意見	修正內容與回覆說明
論文題目；第 3-3 節	應清楚定義「裂隙」與「節理」，避免將所有破裂面皆稱為節理。	本文以「裂隙」為通稱，僅將無明顯剪切位移且成組發育者稱為節理，並補充 Mode I–III 破裂模式。
第 3-1、5-1 節；表 5.1	地表岩脈與井下安山岩岩心是否確實同源？應補充岩性／岩象比較依據。	補充兩者岩象比較，僅指出巨觀特徵高度相似，不直接判定同源，並保留地球化學與定年驗證之需求。
第 3-2、4-3 節；圖 4.2	應更清楚說明 BHTV 可量測哪些裂隙資訊，以及如何由正弦曲線取得裂隙位態。	補充 BHTV 原理、正弦曲線判釋方式及井偏校正流程。
第 1-2、4-1、6-1 節	應區分天然裂隙與鑽井、取心過程造成之人工破裂。	加入破裂面新鮮度、充填物、擦痕等判識依據，並以岩心與 BHTV 交叉比對。
第 4-2～4-4 節	公式中各參數之物理意義與單位應說明清楚。	補充 RQD、BHTV、井偏校正及定向張量公式中各參數之定義與單位。
第 3-3、4-4、6-3 節	僅依一組裂隙或裂隙集中區不足以直接判定完整主應力方向；共軛裂隙之判釋應更審慎。	將「應力反演」修正為「古應力方向幾何約束」，並說明資料不足時不進行完整應力張量反演。
第 5-1-3、6-2-1 節	KYK-2 岩心中兩組高角度裂隙是否可直接稱為「共軛節理」？應量測或說明夾角。	無法直接判定為共軛節理，僅能描述兩組高角度不連續面之視傾角與交截關係。
第 4-1-2、5-4、6-2 節	淺部岩心的傾角代表什麼？未定向岩心是否可用來推論區域應力？	統一改稱「視傾角」，僅用於描述不連續面之相對傾斜程度，不代表真實位態。
第 5-4-3、6-2-2 節	若岩心中可見擦痕，應進一步討論其剪切或滑移型態。	依擦痕與剪切感判釋 KYK-3 兩處剪切面之斜向滑移型態。
第 5-2、5-3 節	投影圓之樣本數與分段依據應標示清楚，並說明 220.16 公尺的地質意義。	將深度 220.16 m 定義為岩體品質與裂隙分布的轉換界線，並於投影圖上標示 n = 226 與 n = 55。

第 3-3、4-4、6-3 節	岩脈走向不可直接等同於最大主應力方向；應釐清 Mode I 岩脈與主應力軸之關係。	若岩脈近似 Mode I 張裂面，其法向量較接近 σ_3，不再直接將岩脈長軸視為 σ_1。
第 6-1 節	BHTV 與實體岩心對裂隙的判釋結果不同，應說明其原因。	新增討論，指出 BHTV 較易辨識開放裂隙，岩心則可保存已充填或癒合之不連續面。
第 6-3 節；第 7 章	古應力方向若只報數值，而未說明可能的受力型態與區域來源，討論較可惜。	補充可能之走滑型應力配置，並與北臺灣更新世 WNW–ESE 水平擠壓背景比較。
第 6-3 節；第 7 章	應說明地表岩脈與地下裂隙是否一定形成於同一事件。	本研究目前缺乏岩脈侵入時間、裂隙形成時間及完整地球化學／定年資料，因此無法直接判定兩者形成於同一構造事件。岩脈亦可能利用既有弱面，在岩漿壓力升高後張開並侵入。